

Introducing the SMAP L4 Products and Investigating the Spatio-Temporal Variability of Soil Moisture in Iran

Asadi Oskouei, E.¹  | Goodarzi, L.²  | Helali, J.³ 

1. **Corresponding Author**, Assistant Professor, Atmospheric Science and Meteorological Research Center. E-mail: E.asadi.o@gmail.com
2. PhD Graduated in Water Resource Engineering. E-mail: goodarzi.1988@gmail.com
3. Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: jalilhelali@gmail.com

(Received: 20 Nov 2021, Revised: 19 Apr 2022, Accepted: 24 May 2022, Published online: 24 May 2022)

Abstract

Although estimation of soil surface moisture plays an important role in soil and water resources management, unfortunately, there is currently no national soil moisture monitoring network in Iran and the distribution of in situ measurement stations is irregular and some provinces do not have any measuring station. Hence, in recent years, numerous satellite-based methods have been developed for estimating and modeling the surface soil moisture. Active and passive microwave remote sensing provides a unique capability to obtain observations of soil moisture at global and regional scales. Therefore, aimed to quantitative estimation of soil moisture using L-band microwave radiometer, the main objective of the present study is to providing spatio-temporal maps of soil moisture using SMAP products and to interpreting the spatial and temporal variation of soil moisture throughout the country during the period 2015 to 2021. Present study is conducted throughout the country during the period 2015 to 2021 and spatial and temporal soil moisture maps are prepared. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission is quantitative estimation of soil moisture using L-band microwave radiometer at the global scale. It should be noted that SMAP Level-4 soil moisture data were used with a temporal resolution of 3 hour and a spatial resolution of 9 km which are available as the result of spatial and temporal interpolation of large-scale data (40 km). Based on the findings of this study, 6 -year average of surface soil moisture (depth < 5 cm) indicates that surface soil moisture in the country ranged from 0.005 to 0.538 m³m⁻³ and the average surface moisture of the country was 0.137 m³m⁻³ during the mentioned period. Assessment of monthly average maps showed that the highest maximum monthly value (0.192 m³m⁻³) was occurred in February and the lowest monthly average of soil moisture (0.079 m³m⁻³) was occurred in August. Spatial assessment of the surface soil moisture suggests that the average annual soil moisture has been more in the northern and western regions of the country compared to other regions of the country, especially in comparison with the central and southeastern regions of the country. The evaluation of the results shows that Gilan province had the highest annual average soil moisture (0.294 m³m⁻³) during the mentioned period and after that, Mazandaran (0.243 m³m⁻³), Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad (0.216 m³m⁻³) and Alborz (0.209 m³m⁻³) provinces have the highest annual average soil moisture, respectively. Also, Sistan and Baluchestan (0.076 m³m⁻³), South Khorasan (0.091 m³m⁻³) and Yazd (0.096 m³m⁻³) provinces have the lowest annual average soil moisture. Knowledge of the amount of soil moisture is important in hydrological modeling studies, improving numerical weather prediction (NWP) models, intelligent irrigation in agriculture and climate change. Therefore, the results of this study can be applicable in soil and water resources management by knowing the amount of soil moisture in different time and region.

Keywords: L-band radiometry, Remote Sensing, Soil Moisture Active Passive (SMAP), Soil moisture.

Cite this article: Asadi Oskouei, E., Goodarzi, L., & Helali, J. (2022). Introducing the SMAP L4 Products and Investigating the Spatio-Temporal Variability of Soil Moisture in Iran. *Journal of the Nivar*, 46(116-117), 14-27. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2022.315991.1206>



بررسی تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک سطحی در ایران با استفاده از محصول SMAP L4

ابراهیم اسعدی اسکویی^۱ | لیلا گودرزی^۲ | جلیل هلالی^۳

۱. نویسنده مسئول، عضو هیات علمی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم شناسی و تغییر اقلیم، تهران، ایران. رایانامه:

E.asadi.o@gmail.com

۲. دانش آموخته دکتری رشته مهندسی منابع آب. رایانامه: goodarzi.1988@gmail.com

۳. دانش آموخته دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

jalilhelali@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۹، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳، انتشار آنلاین: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳)

چکیده

علی‌رغم نقش مهم رطوبت سطح خاک در مدیریت منابع آب و خاک متاسفانه در ایران شبکه سراسری پایش رطوبت خاک وجود نداشته و از سوی دیگر، توزیع مکانی ایستگاه‌های اندازه‌گیری نیز محدود است. بنابراین، در پژوهش حاضر تلاش شد نقشه‌های توزیع مکانی و زمانی رطوبت خاک از محصولات SMAP در طی بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ در گستره ایران استخراج و تحلیل گردد. نتایج نشان داد که مقادیر ماهانه درصد حجمی رطوبت خاک عمق ۵ سانتیمتری در دوره ۷ ساله در ایران بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۵۳۸ مترمکعب بر مترمکعب متغیر بوده و میانگین زمانی-مکانی درصد حجمی رطوبت خاک کشور ۰/۱۳۷ مترمکعب بر مترمکعب می‌باشد. تحلیل نقشه‌های میانگین ماهانه درصد حجمی رطوبت خاک توسط محصولات SMAP نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار میانگین ۷ ساله در ماه‌های فوریه و اوت به ترتیب ۰/۱۹۲ و ۰/۰۷۹ مترمکعب بر مترمکعب است. از نظر پراکنش مکانی نیز بیشترین مقادیر میانگین سالانه رطوبت خاک در مناطق شمالی و غربی و کمترین مقدار در مناطق مرکزی و جنوب شرقی متمرکز است. تحلیل مکانی رطوبت خاک بر اساس مقیاس استانی نیز نشان می‌دهد بالاترین میانگین سالانه درصد حجمی رطوبت خاک در استان‌های گیلان، مازندران، کهگیلویه و بویراحمد، و البرز به ترتیب ۰/۲۹۴، ۰/۲۴۳، ۰/۲۱۶ و ۰/۲۰۹ مترمکعب بر مترمکعب می‌باشد در حالی که کمترین مقادیر آن را می‌توان در استان‌های سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی و یزد به ترتیب ۰/۰۷۶، ۰/۰۹۱، و ۰/۰۹۶ مترمکعب بر مترمکعب مشاهده نمود. بر اساس نتایج به دست آمده در این مطالعه که در مقیاس کلان کشور انجام شده است، می‌توان از آن به عنوان ابزار سودمندی در مدیریت جامع منابع آب و خاک استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: ایران، رطوبت خاک، سنجش از دور، SMAP

۱. مقدمه

اقلیمی ایران، از نظر زمانی نیز در طی ماه‌ها و فصل‌های مختلف میزان رطوبت سطحی خاک بسیار متغیر خواهد بود. بنابراین اندازه‌گیری میدانی و مستقیم این پارامتر در مقیاس گسترده کاری بسیار دشوار، پرهزینه و وقت‌گیر بوده و کاربرد آن برای دوره‌های طولانی‌مدت را تا حدودی غیرعملی می‌سازد (اسعدی اسکویی و جامعی، ۱۴۰۰). در پهنه جغرافیایی ایران شبکه سراسری پایش رطوبت خاک وجود نداشته و اندازه‌گیری‌ها محدود به مراکز تحقیقات

تخمین رطوبت سطحی خاک نقش مهمی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، برنامه‌ریزی بهینه و صحیح آبیاری و مدیریت منابع آب و خاک دارد. رطوبت خاک از نظر زمانی و مکانی بسیار تغییرپذیر است، به طوری که توزیع مکانی آن تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله الگوهای بارش و تبخیر، بافت خاک، پوشش گیاهی، شیب و توپوگرافی منطقه می‌باشد. با توجه به تنوع جغرافیایی و

استناد: اسعدی اسکویی، ابراهیم؛ گودرزی، لیلا و هلالی، 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. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2022.315991.1206>



۲۰۱۵ با راکت دلتا ۲ از پایگاه هوایی وندنبرگ کالیفرنیا به فضا پرتاب شد و در ارتفاع ۶۷۰ کیلومتری از سطح زمین به صورت خورشید آهنگ با پهنای نوارهای ۱۰۰۰ کیلومتر در حال داده برداری است. هدف اصلی ماهواره SMAP پایش و نقشه برداری جهانی رطوبت خاک در مقیاس کوچک با درجه وضوح بالا، دقت و حساسیت در برداشت و اندازه گیری و پوشش کره زمین در دوره های زمانی کوتاه است. از دیگر ماموریت های ماهواره SMAP اندازه گیری رطوبت خاک سطح زمین و ذوب یخ های کل کره زمین با دوره بازگشت تقریباً ۲ تا ۳ روز است. از دیگر کاربردهای این ماهواره اندازه گیری رطوبت سطحی خاک بر اساس مدل های هیدرولوژیکی که قادر به برآورد رطوبت خاک در منطقه توسعه ریشه گیاه هستند، می باشد (حاجی ملکی و همکاران، ۱۳۹۹). تاکنون تحقیقات متعددی در خصوص اعتبارسنجی محصولات رطوبت خاک SMAP جهت بررسی دقت و کیفیت داده ها و همچنین بررسی وجود خطاهای احتمالی در آنها در مناطق مختلف دنیا صورت گرفته است. از جمله این تحقیقات می توان به مطالعه ولپوری و همکاران (۲۰۱۶) در ایالات متحده آمریکا، ملدنووا و همکاران (۲۰۲۰) در سه منطقه کشاورزی ایالات متحده آمریکا، آفریقای جنوبی و استرالیا، ال حاج و همکاران (۲۰۱۸) در فرانسه، لی و همکاران (۲۰۱۸) در فلات تبت و صبوری نوقابی و همکاران (۱۴۰۰) در ایران اشاره کرد. یافته های این پژوهش ها نشان می دهد داده های رطوبت خاک SMAP می تواند ابزار مناسبی برای تهیه نقشه های رطوبت خاک در مناطق مختلف جهان با تنوع جغرافیایی و اقلیمی باشد. باید توجه داشت که تفکیک مکانی این محصولات متناسب با نیاز و هدف تحقیق، باید افزایش یابد. برای مثال تحقیقی که در کشور چین توسط رائو و همکاران (۲۰۲۱) انجام شده از داده های با تفکیک مکانی یک کیلومتری استفاده شده است. همچنین از دیگر کاربری های محصولات رطوبت خاک SMAP می توان به مطالعات انجام شده در ارزیابی وضعیت خشکسالی (ملدنووا

هواشناسی کشاورزی (ایستگاه های هواشناسی کشاورزی) سازمان هواشناسی کشور است. سازمان هواشناسی کشور در مجموع دارای ۴۵ ایستگاه هواشناسی کشاورزی در سراسر کشور است که در بیشتر آنها داده های رطوبت خاک برای دوره های طولانی مدت و به صورت کامل وجود ندارد. همچنین پراکنش جغرافیایی و اقلیمی این ایستگاه ها در کشور نامنظم بوده و حتی بعضی از استان ها فاقد ایستگاه اندازه گیری می باشند (اسعدی اسکویی و جامعی، ۱۴۰۰). بنابراین امکان بررسی توزیع زمانی و مکانی داده های رطوبت خاک با هدف مدیریت منابع آب و خاک و بر اساس داده های اندازه گیری شده به روش میدانی وجود ندارد. این موضوع همواره باعث ایجاد مشکل برای محققان می شود به طوری که همواره مشکل عدم دسترسی به نقشه های رطوبت خاک و عدم آگاهی از تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک منطقه ای وجود خواهد داشت. از این رو، در سال های اخیر روش های مبتنی بر داده های ماهواره ای و سنجش از دور برای برآورد و مدل سازی رطوبت خاک توسعه داده شده است.

با توسعه فناوری سنجش از دور، نقشه های رطوبت خاک تهیه شده از تصاویر ماهواره ها می تواند به عنوان یک منبع داده با ارزش زیاد مورد استفاده قرار گیرد. امروزه محصولات رطوبت خاک حاصل از روش های سنجش از دور ریزموج، اطلاعات گسترده ای در مورد رطوبت خاک در مقیاس های مختلف ارائه داده است. امواج ریزموج به دلیل قابلیت نفوذ به داخل خاک و اثرپذیری مستقیم از رطوبت خاک و همچنین به دلیل داشتن قابلیت داده برداری در روزهای ابری به دلیل امکان نفوذ این امواج از توده های ابر، نسبت به روش های نوری صحت و کارایی بالاتری در اندازه گیری رطوبت خاک نشان داده اند (هاین و همکاران، ۲۰۱۱).

ماهواره رطوبت خاک فعال و غیرفعال SMAP (Soil Moisture Active Passive)، ماهواره تحقیقات زیست محیطی ایالت متحده آمریکا است. این ماهواره در ۳۱ ژانویه

ماهوره‌های نوری/گرمایی پرداختند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که روش‌های به کار گرفته شده، دقت و کیفیت داده‌های خروجی را نسبت به داده‌های بزرگ مقیاس اولیه بهبود می‌بخشد. صبوری نوقابی و همکاران (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای اعتبارسنجی و ریزمقیاس‌سازی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP به روش SMBDA با استفاده از محصولات رادار Sentinel 1 و داده‌های زمینی در منطقه صالح آباد ایلام انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد ریشه مربعات خطا بین مقادیر درصد حجمی رطوبت خاک ریزمقیاس شده با مشاهدات زمینی به مقدار ۰/۰۸۵ مترمکعب بر مترمکعب بوده است که در مقایسه با تحقیقات مشابه از صحت بالایی برخوردار بوده است. این مطالعه نشان داد تطویل زمانی-مکانی اندازه‌گیری‌های میدانی به دلیل تنوع و پراکنش بیشتر مقادیر اندازه‌گیری شده و پیاده‌سازی الگوریتم با محاسبات نرم موجب بهبود نتایج ریزمقیاس‌سازی گردید. در مطالعات پیشین در خصوص ارزیابی مکانی و زمانی رطوبت عمدتاً متمرکز بر روی کشورهای دیگر بوده و مطالعات کمتری در این زمینه در ایران انجام شده است. تحقیقات انجام شده در ایران عمدتاً به صورت موردی بوده (صبوری نوقابی و همکاران، ۱۴۰۰) و تاکنون پژوهشی در راستای استفاده از داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP و تحلیل توزیع مکانی-زمانی رطوبت خاک در کل کشور انجام نشده است. بنابراین هدف تحقیق حاضر، تولید نقشه‌های توزیع مکانی-زمانی رطوبت خاک حاصل از محصولات رطوبت خاک SMAP برای کل کشور است. نتایج این تحقیق می‌تواند کمک شایانی در مدیریت جامع منابع آب و خاک کشور به خصوص در حیطه کاربردهای کشاورزی، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، پایش وقایع فرین مانند سیلاب، خشکسالی، جنگل‌سوزی‌ها با شاخص‌هایی همچون KBDI (Keetch Byram Drought Index) (کیچ و بایرام، ۱۹۶۸) و مطالعات تغییر اقلیم نماید.

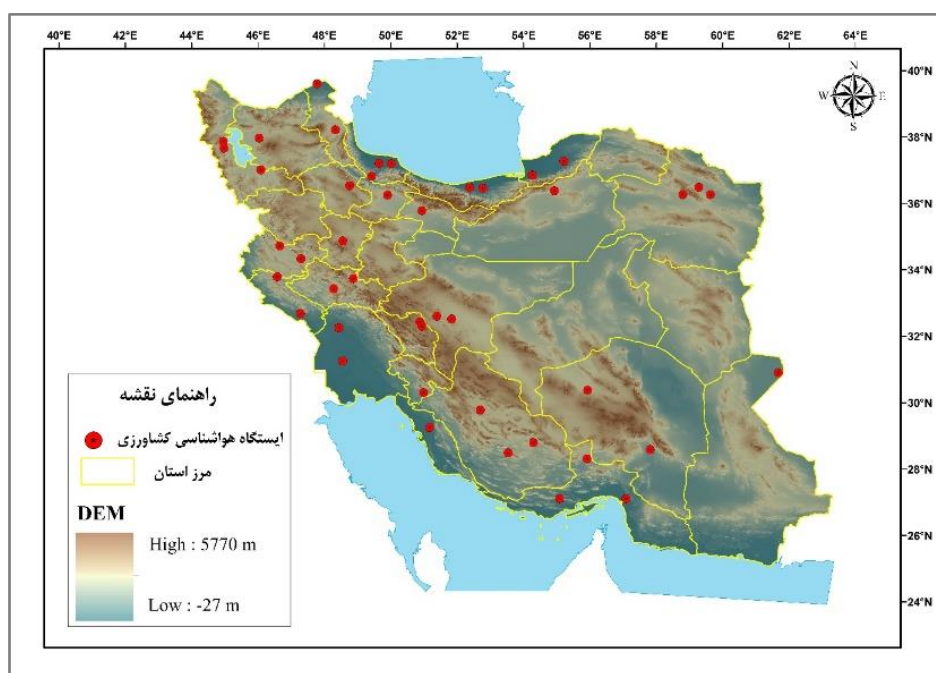
و همکاران، ۲۰۲۰؛ سوزا و همکاران، ۲۰۱۸)، برآورد میزان رواناب (اکبری و همکاران، ۲۰۱۹؛ کروو و همکاران، ۲۰۱۹)، شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی (ژیونگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ کاستر و همکاران، ۲۰۱۸)، محاسبه شاخص خطر آتش‌سوزی (توماس و همکاران، ۲۰۲۰؛ شارما و همکاران، ۲۰۲۱)، و برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری (هائو و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژوو و همکاران، ۲۰۲۱) اشاره نمود. در ایران نیز تحقیقاتی در راستای ارزیابی داده‌های رطوبت خاک SMAP مطالعاتی توسط حاجی ملکی و همکاران (۱۳۹۹)، تقی‌زاده و گیوی (۱۳۹۷) و کرمی و همکاران (۱۳۹۹) انجام شده است. حاجی ملکی و همکاران (۱۳۹۹) به اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP با کاربری‌های مختلف در حوضه سیمینه-زرنه رود پرداخته و نشان دادند که با توجه به عملکرد مناسب داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP، این داده‌ها می‌تواند در مطالعات هیدرولوژی و پیش‌بینی رواناب در اراضی مختلف مورد استفاده قرار گیرد. تقی‌زاده و گیوی (۱۳۹۷) به ارزیابی محصولات بارش GPM و تصویربرداری رطوبت خاک SMAP در شمال غرب ایران در طی دوره آوریل ۲۰۱۶ تا فوریه ۲۰۱۷ پرداخته و نشان دادند که استفاده ترکیبی از داده‌های GPM و SMAP می‌تواند به عنوان ابزاری کلیدی در زمینه‌های کاربردی و مدیریت بحران جهت ارزیابی گستره و پتانسیل تأثیر رویدادهای سیل در میان دیگر پدیده‌های آب و هواشناسی استفاده شود. همچنین تحقیقاتی در راستای بهبود کیفیت داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP نیز در ایران انجام شده است (کرمی و همکاران، ۱۳۹۹؛ غفاری و همکاران، ۱۳۹۹). کرمی و همکاران (۱۳۹۹) به منظور بهبود تفکیک مکانی داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای SMAP از روش تلفیق رادار-تابش‌سنج در حوضه آبریز فیروزآباد استان اردبیل استفاده کردند. غفاری و همکاران (۱۳۹۹) نیز به توسعه الگوریتم‌های بهبود یافته برای ریزمقیاس‌سازی رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP با استفاده از داده

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه پژوهش حاضر، کشور ایران با مساحت بالغ بر ۱,۶۴۸,۱۹۵ کیلومتر مربع است. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد متأسفانه در ایران به دلیل عدم وجود شبکه داده‌های رطوبت خاک برای دوره‌های طولانی‌مدت، امکان بررسی توزیع زمانی و مکانی داده‌های رطوبت خاک اندازه‌گیری شده به روش میدانی وجود ندارد. در شکل ۱،

پراکندگی شبکه پایش رطوبت خاک در کشور ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، در برخی از استان‌ها ایستگاه پایش وجود نداشته و در عین حال میزان رطوبت خاک در ایستگاه‌های موجود نیز به صورت پیوسته اندازه‌گیری نمی‌شود. در این راستا داده‌ها و نقشه‌های رطوبت خاک محصولات SMAP می‌توانند به منظور برآورد و مدل‌سازی رطوبت خاک مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و پراکندگی شبکه پایش رطوبت خاک در کشور

۲-۲- محصولات رطوبت خاک SMAP

مأموریت اختصاصی SMAP بر اساس رادیومترهای ریزموج باند-L بر روی سکوی ماهواره‌ای با هدف برآورد کمی رطوبت خاک در مقیاس جهانی طراحی شده و هم‌اکنون در حال بهره‌برداری می‌باشد که داده‌های رطوبت خاک آن از ۳۱ مارس ۲۰۱۵ با تفکیک حدود ۴۰ کیلومتر در دسترس است (انتخابی و همکاران، ۲۰۱۰). لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از داده‌های سطح چهار رطوبت خاک (SMAP L4_SM) استفاده شده است که هر سه ساعت یکبار و با تفکیک مکانی ۹ کیلومتر در نتیجه

ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بزرگ مقیاس ۴۰ کیلومتری در دسترس می‌باشند (ریچل و همکاران، ۲۰۱۷). این تحقیق در سراسر کشور ایران و در طی یک دوره زمانی ۷ ساله از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ انجام و نقشه‌های رطوبت خاک به صورت مکانی و زمانی تهیه و در بخش‌های بعد ارائه شده است. ویژگی‌های محصول رطوبت خاک ماهواره‌ی SMAP در جدول ۱ ارائه شده است. مطالعه صبوری نوقابی و همکاران (۱۴۰۰) نشان داده است ریشه مربعات خطا بین مقادیر درصد حجمی رطوبت خاک ریزمقیاس شده با مشاهدات زمینی حدود ۰/۰۸۵ مترمکعب بر مترمکعب است

که کارایی بالای این ماهواره را در سنجش داده‌های

رطوبت خاک نشان می‌دهد.

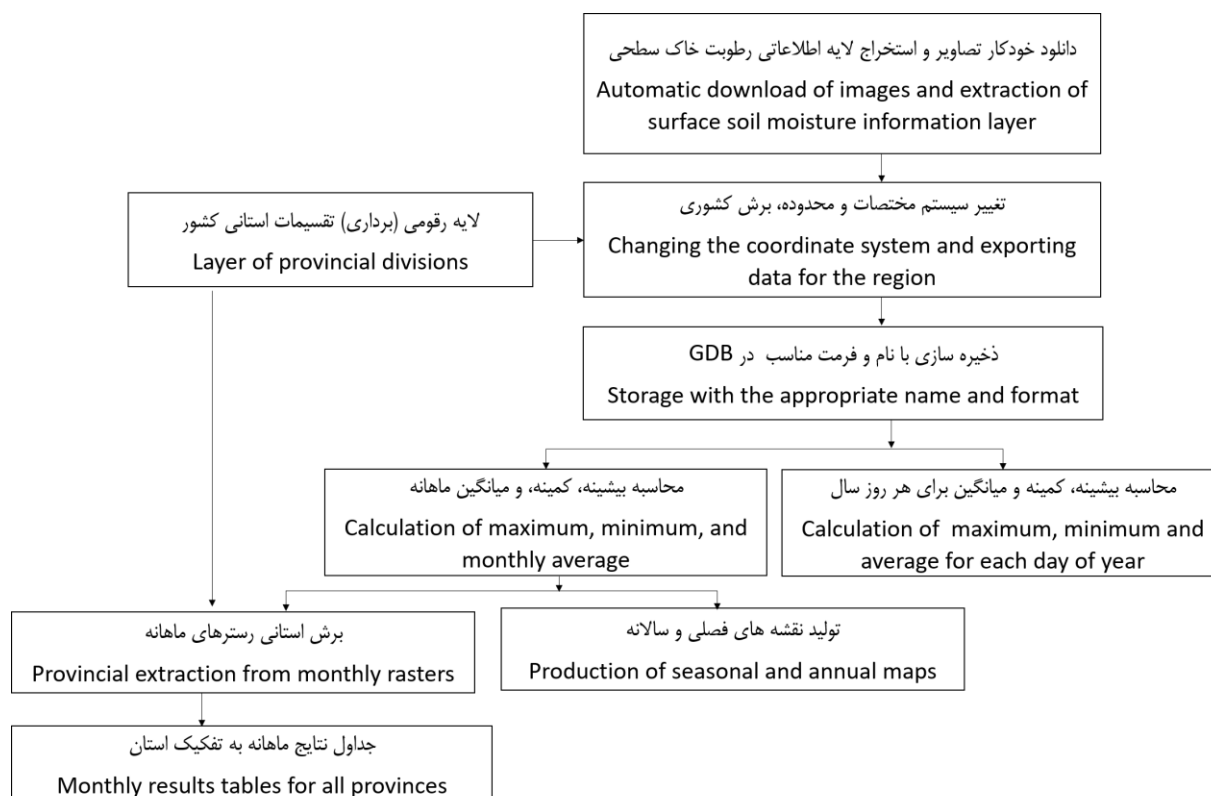
جدول ۱. ویژگی محصولات خاک SMAP مورد استفاده در مطالعه حاضر

داده	تفکیک مکانی (کیلومتر)	دوره آماری	محصول استفاده شده	تعداد تصاویر
رطوبت خاک	۹	۲۰۱۵-۲۰۲۱	SMAP L4 SM	۲۱۹۲

۲-۳- الگوریتم تولید نقشه‌های رطوبت خاک از محصولات SMAP

در این پژوهش تمامی فرایندهای بارگیری تصاویر، تبدیل سیستم مختصات، تغییر محدوده جغرافیایی و برش زدن داده‌ها در محدوده کشور ایران و همچنین پردازش‌های بعدی داده‌ها از جمله محاسبه لایه و نمودارهای کمینه، بیشینه و میانگین روزانه ژولیوسی، ماهانه، سالانه و برش‌های استانی و در نهایت استخراج اطلاعات مورد نیاز در محیط برنامه‌نویسی R انجام شده است (شکل ۲). بر این اساس، برای یک دوره ۷ ساله (از ۲۰۱۵/۰۴/۰۱ تا ۲۰۲۱/۰۳/۳۱) تعداد ۲۱۹۲ تصویر رستری از داده‌های روزانه رطوبت خاک با تفکیک ۹ کیلومتری دانلود شدند. اگرچه این دوره آماری برای مطالعات اقلیمی کوتاه است اما وجود سال‌های حدی بارشی (ترسالی شدید سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۹ و خشکسالی شدید ۲۰۲۰-۲۰۲۱) باعث می‌شود که حدود آستانه‌های کم و زیاد مورد انتظار در دوره‌های آماری

طولانی‌تر تا حد قابل اطمینانی در نتایج این تحلیل آشکار شوند. هر داده دانلود شده دارای لایه‌های مختلف اطلاعاتی است که پس از استخراج لایه مورد نظر (رطوبت خاک ۵ سانتی‌متری) پس از تغییر مختصات، تغییر محدوده جغرافیایی و برش خوردن در محدوده مرز کشور با فرمت مناسب ذخیره شده و سپس از این سری داده برای محاسبه سه سری داده رستری ۳۶۶ روزه (ژولیوسی) شامل میانگین، کمینه و بیشینه روزانه ژولیوسی مورد استفاده قرار گرفت. سپس مقادیر میانگین، کمینه کل و بیشینه کل برای هر کدام از روزها استخراج و نمودار تغییرات این سه مولفه با استفاده از کتابخانه مناسب ترسیم و ذخیره شد. همچنین لایه‌های میانگین، کمینه، بیشینه در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و در نهایت میانگین کل دوره آماری نیز با استفاده از ۲۱۹۲ تصویر اولیه پردازش و در نهایت تبدیل به نقشه‌های خروجی شدند.



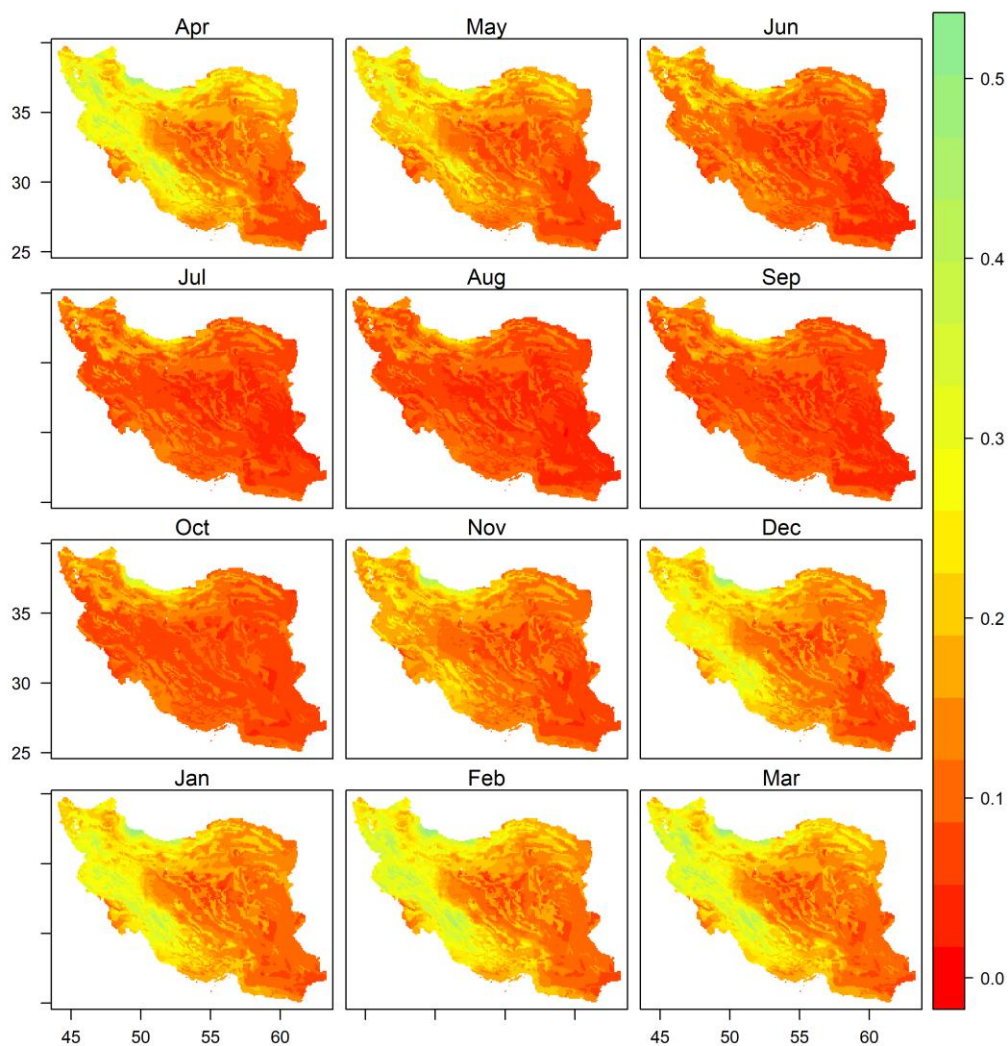
شکل ۲. الگوریتم تولید نقشه های رطوبت خاک از محصولات SMAP در مطالعه حاضر

عوامل موثر بر میزان رطوبت سطحی خاک است. در جدول ۲ مقادیر کمینه، بیشینه و میانگین رطوبت خاک برای هر یک از ماه های سال ارائه شده است. بررسی مقادیر میانگین ماهانه درصد حجمی رطوبت خاک SMAP نشان می دهد که میانگین ماهانه درصد حجمی رطوبت سطحی خاک در کشور در دوره ۷ ساله از سردترین تا گرم ترین ماه ها، بین ۰/۰۷۹ تا ۰/۱۹۲ مترمکعب بر مترمکعب متغیر است (بیشترین و کمترین مقادیر رطوبت خاک به ترتیب در ماه های فوریه و اوت).

۳. نتایج و بحث

۳-۱- میانگین ماهانه رطوبت خاک

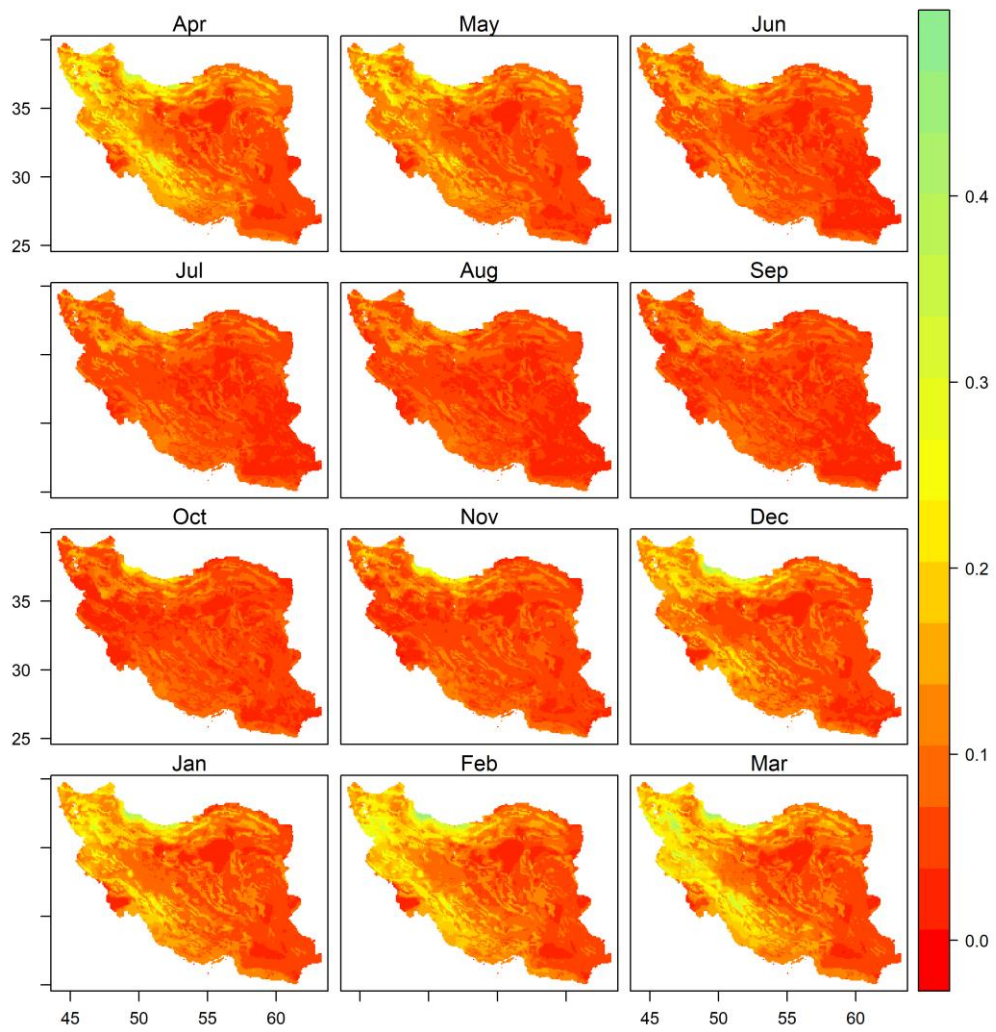
نقشه های پراکنش و توزیع مکانی-زمانی میانگین ماهانه رطوبت خاک تولید شده از محصولات ماهواره SMAP در طی دوره آماری ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ در شکل ۳ نشان شده است. بررسی نتایج حاصل از شکل ۳ نشان می دهد که کمترین میزان رطوبت خاک در طی ماه های جولای تا اکتبر اتفاق می افتد، به طوریکه در این ماه ها تقریباً کلیه نواحی ایران به رنگ قرمز دیده می شود که دلیل آن پایین بودن میزان بارش در طی این ماه ها به عنوان یکی از مهمترین



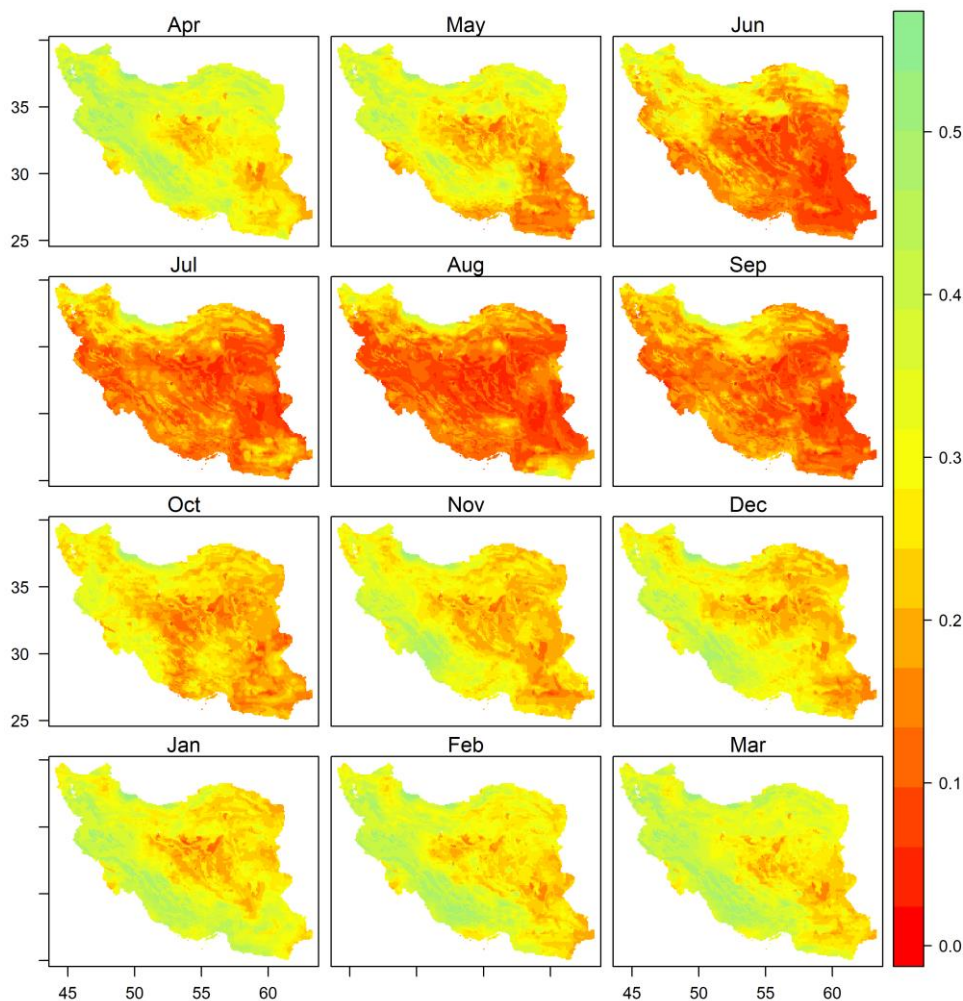
شکل ۳. نقشه‌های توزیع و پراکنش زمانی-مکانی میانگین ماهانه درصد حجمی رطوبت خاک (مترمکعب بر مترمکعب) تولید شده از محصولات ماهواره SMAP در دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۲۱

جدول ۲. درصد حجمی رطوبت خاک ماهانه (مترمکعب بر مترمکعب) تولیدشده از محصولات ماهواره SMAP دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۲۱

ماه	کمینه	میانگین	بیشینه
آوریل	۰/۰۰۶۰۸۸	۰/۱۸۳۱۶۶	۰/۵۳۴۰۸۷
می	۰/۰۰۶۱۶	۰/۱۴۷۳۰۷	۰/۵۱۴۶۶۲
ژوئن	۰/۰۰۶۱۲۷	۰/۱۰۲۹۰۱	۰/۴۶۰۴۵۱
ژوئیه	۰/۰۱۰۷۲۸	۰/۰۸۷۰۱۹	۰/۴۷۴۶۴
اوت	۰/۰۱۱۹۵۵	۰/۰۷۸۹۳	۰/۴۳۵۲۱۴
سپتامبر	۰/۰۱۲۴۷۹	۰/۰۸۲۲۷۸	۰/۴۴۶۳۵۲
اکتبر	۰/۰۰۷۰۲۲	۰/۰۹۷۲۹۳	۰/۵۲۳۸۵۱
نوامبر	۰/۰۰۵۱۶۷	۰/۱۳۴۴۷	۰/۵۲۵۱۹۷
دسامبر	۰/۰۰۶۴۰۴	۰/۱۶۳۳۱۲	۰/۵۲۸۷۴
ژانویه	۰/۰۰۵۷۵۲	۰/۱۷۹۳۸۱	۰/۵۲۸۲۴۶
فوریه	۰/۰۰۶۰۴۳	۰/۱۹۲۱۵۳	۰/۵۳۷۸۹۹
مارس	۰/۰۰۵۵۷۴	۰/۱۹۲۰۳۹	۰/۵۲۸۸۵



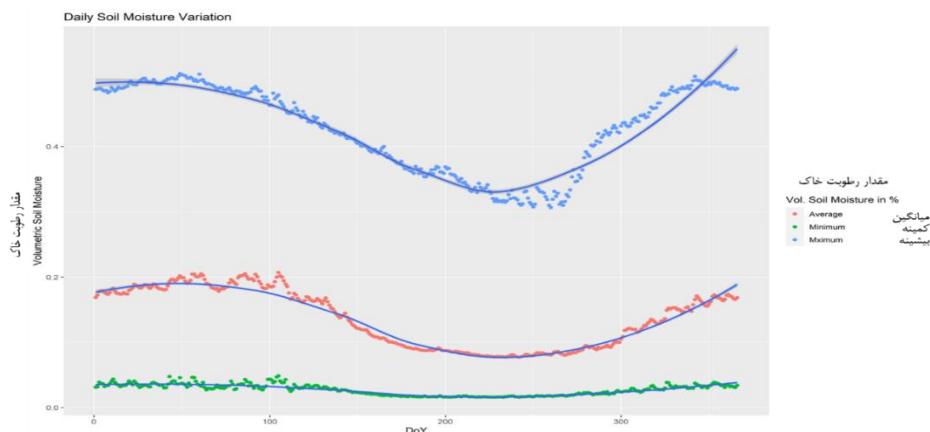
شکل ۴. نقشه‌های توزیع و پراکنش زمانی-مکانی کمینه ماهانه درصد حجمی رطوبت خاک تولید شده از محصولات ماهواره SMAP در دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۲۱



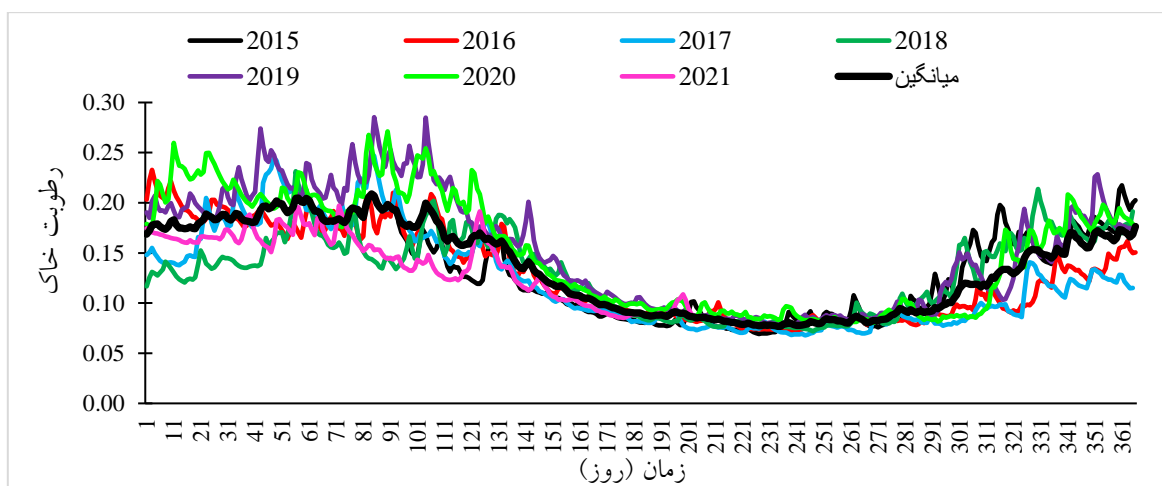
شکل ۵. نقشه‌های توزیع و پراکنش زمانی-مکانی بیشینه ماهانه درصد حجمی رطوبت خاک تولید شده از محصولات ماهواره SMAP در دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۲۱

بررسی اسکویی و جامعی (۱۴۰۰) با استفاده از محصولات رطوبت SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) نیز نشان می‌دهد که بیشینه و کمینه میانگین ماهانه در ماه‌های فوریه (اوایل بهمن تا اواسط اسفند) و اوت (نیمه امرداد تا نیمه شهریور) به ترتیب به مقدار ۰/۰۸۷ و ۰/۰۳۴ مترمکعب بر مترمکعب خواهد بود. اختلاف در مقادیر رطوبت خاک حاصل از دو تحقیق، به دلیل استفاده از طول دوره آماری متفاوت است. نقشه‌های توزیع زمانی-مکانی کمینه و بیشینه مقدار رطوبت ماهانه خاک به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه شده است. بر اساس این شکل‌ها، کمینه و بیشینه درصد

حجمی رطوبت ماهانه خاک در طی دوره ۷ ساله در ماه‌های نوامبر و فوریه به ترتیب ۰/۰۰۵ و ۰/۵۳۸ مترمکعب بر مترمکعب بوده است. در شکل ۶، نمودار سری زمانی روزانه رطوبت خاک در کل کشور به صورت کمینه، بیشینه و میانگین دوره ۷ ساله نشان داده شده است. در این نمودار، محور زمان از روزهای ابتدایی ماه آوریل شروع و در روزهای پایانی ماه مارس پایان می‌یابد. بر اساس نتایج ارائه شده در این شکل، میانگین رطوبت خاک از ماه آوریل تا اوایل پاییز کاهشی بوده و پس از آن با شروع فصل بارش، افزایش یافته و در اواخر ماه مارس به حداکثر می‌رسد.



شکل ۶. تغییرات سری زمانی کمینه، بیشینه و میانگین روزانه درصد حجمی رطوبت خاک بر اساس داده‌های رطوبت خاک SMAP در دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۲۱



شکل ۷. تغییرات میانگین روزانه رطوبت خاک در کشور بر اساس داده‌های رطوبت خاک SMAP به تفکیک سال

بیشترین مقادیر رطوبت خاک متعلق به سال ۲۰۱۹ و کمترین آن متعلق به سال ۲۰۱۸ است. در میانه دوره تغییرات محسوسی نسبت به میانگین ۷ ساله دیده نمی‌شود در حالی که در انتهای سری زمانی بیشترین مقدار رطوبت خاک متعلق به سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ و کمترین مقدار نیز متعلق به سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۱۷ می‌باشد.

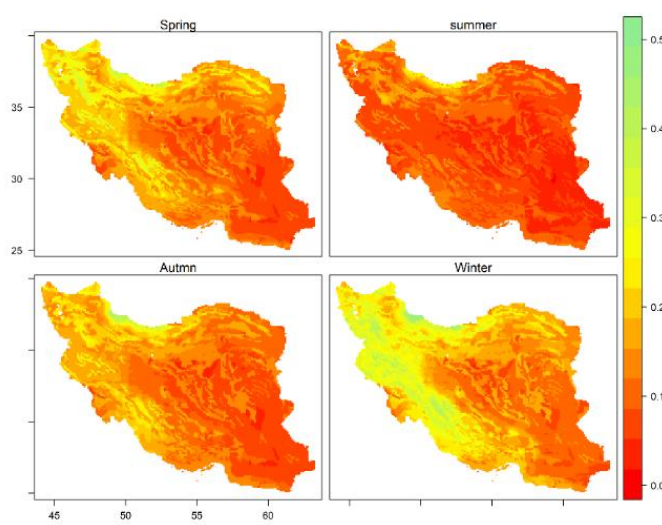
۳-۲- میانگین فصلی و سالانه رطوبت خاک

نقشه‌های توزیع زمانی-مکانی میانگین فصلی و سالانه رطوبت خاک تولید شده از محصولات ماهواره SMAP در طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ به ترتیب در شکل‌های ۸ و ۹

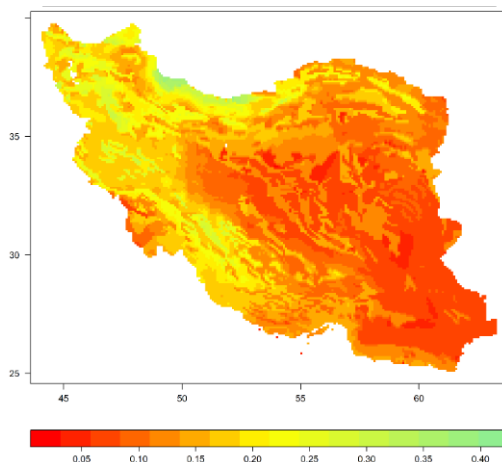
نمودار بیشینه مقدار روزانه نیز که با رنگ قرمز نشان داده شده است از روند تقریباً مشابهی برخوردار است اما نمودار کمینه مقدار روزانه رطوبت خاک نوسانات و تغییرپذیری کمتری نسبت به دو نمودار دیگر دارد، اگرچه در این نمودار نیز کمینه میزان رطوبت در طی روزهای فصل بهار و زمستان بیش از دو فصل دیگر سال است. همچنین در شکل ۷، تغییرات متوسط رطوبت خاک روزانه در کشور، به تفکیک سال‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده است الگوی متوسط رطوبت خاک کشور نسبت به میانگین ۷ ساله در طی سری زمانی روزانه نوسان دارد. بر اساس این نتایج در ابتدای سری زمانی

مختلف ایران درصد حجمی رطوبت خاک از نظر مکانی در دوره ۷ ساله بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۵۳۸ مترمکعب بر مترمکعب نوسان داشته است که مقدار متوسط آن برابر با ۰/۱۳۷ مترمکعب بر مترمکعب می باشد (بیشترین مقادیر در مناطق شمالی و غربی و کمترین آن در مناطق مرکزی و جنوب شرقی).

ارائه شده است. بررسی میزان میانگین فصلی درصد حجمی رطوبت خاک نشان می دهد که میانگین درصد حجمی رطوبت خاک در فصل زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۰/۱۸۸، ۰/۱۴۴، ۰/۱۳۲ و ۰/۰۸۲ مترمکعب بر مترمکعب است. بنابراین از نظر فصلی بیشترین و کمترین مقدار رطوبت خاک فصلی به ترتیب متعلق به فصول زمستان و تابستان است. تحلیل سالانه نشان می دهد در بخش های



شکل ۸. نقشه های توزیع و پراکنش زمانی-مکانی میانگین فصلی رطوبت خاک تولید شده از محصولات ماهواره SMAP در دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۲۱



شکل ۹. نقشه توزیع مکانی-زمانی میانگین سالانه رطوبت خاک تولید شده از محصولات ماهواره SMAP در دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۲۱

آبیاری و مطالعات تغییر اقلیم حائز اهمیت است. بنابراین در این بخش مقادیر متوسط، کمینه و بیشینه سالانه رطوبت خاک تولید شده از ماهواره SMAP در طی دوره آماری ۷ ساله به تفکیک استانی در جدول ۳ ارائه شده است. بر مبنای نتایج به دست آمده بالاترین مقادیر سالانه درصد

۳-۳- تغییرات مکانی رطوبت خاک

آگاهی از مقدار میانگین رطوبت خاک در مقیاس های مکانی مختلف از قبیل استان و یا حوضه آبریز در مطالعات منطقه ای مدل های هیدرولوژیکی، بهبود مدل های پیش بینی رقومی وضع هوا، برنامه ریزی و هوشمندسازی سامانه های

کمترین مقدار درصد حجمی رطوبت خاک سالانه را به خود اختصاص داده‌اند که از نظر عددی به ترتیب ۰/۳۹۸ و ۰/۳۱ مترمکعب بر مترمکعب است. نتایج به دست آمده در این مطالعه با یافته اسعدی اسکویی و جامعی (۱۴۰۰) نیز که با استفاده از محصولات ماهواره SMOS انجام شده است تطابق دارد. مطالعه ایشان نشان داده است که بیشترین مقدار رطوبت خاک در کشور مربوط به مناطق شمالی در حاشیه دریای خزر (استان‌های گیلان، مازندران و گلستان) و مناطق جنوب غربی کشور (استان‌های خوزستان و بوشهر) است.

حجمی درصد حجمی رطوبت خاک در استان‌های گیلان، مازندران، کهگیلویه و بویراحمد و البرز به ترتیب به مقادیر ۰/۲۹۴، ۰/۲۴۳، ۰/۲۱۶ و ۰/۲۰۹ مترمکعب بر مترمکعب، و کمترین مقادیر در استان‌های سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی و یزد به مقدار ۰/۰۷۶، ۰/۰۹۱ و ۰/۰۹۶ مترمکعب در مترمکعب بوده است. بنابراین همانطور که پیش‌تر نیز ذکر شد استان‌های شمالی و غربی نسبت به دیگر استان‌های کشور از میزان رطوبت خاک بالاتری برخوردار هستند. بررسی مقادیر کمیته و بیشینه متوسط سالانه رطوبت نشان می‌دهد که استان مازندران و اصفهان به ترتیب بیشترین و

جدول ۳. مقادیر درصد حجمی رطوبت خاک (مترمکعب بر مترمکعب) تولید شده از محصولات ماهواره SMAP در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۱۵ به تفکیک استان

ردیف	استان	کمیته	میانگین	بیشینه
۱	گیلان	۰/۱۸۸۰۲۴	۰/۲۹۳۵۳	۰/۳۹۸۰۳
۲	مازندران	۰/۱۲۱۵۴	۰/۲۴۲۹۲	۰/۳۹۸۱۱
۳	کهگیلویه و بویراحمد	۰/۱۴۲۲۱۱	۰/۲۱۶۲۸	۰/۲۹۵۷۲
۴	البرز	۰/۱۵۰۰۴۵	۰/۲۰۹۳۹	۰/۲۵۳۴۲
۵	آذربایجان غربی	۰/۱۲۹۰۹۷	۰/۲۰۵۸۱	۰/۳۱۵۶۳
۶	کردستان	۰/۱۲۳۸۲۹	۰/۲۰۵	۰/۳۰۱۱۷
۷	آذربایجان شرقی	۰/۱۱۰۸۰۲	۰/۲۰۳۰۹	۰/۳۱۳۴
۸	قزوین	۰/۱۲۸۳۴۵	۰/۱۹۸۷۹	۰/۲۶۱۲
۹	کرمانشاه	۰/۱۳۷۱۷۱	۰/۱۹۷۵۱	۰/۲۹۳۰۶
۱۰	لرستان	۰/۱۴۸۲۱۱	۰/۱۹۵۲۷	۰/۳۰۰۸۴
۱۱	زنجان	۰/۱۳۱۵۸۹	۰/۱۹۳۳۱	۰/۲۶۱۷۶
۱۲	اردبیل	۰/۱۱۶۹۳۱	۰/۱۸۹۱۵	۰/۲۹۴۴۱
۱۳	همدان	۰/۱۳۱۱۷۴	۰/۱۸۷۹۲	۰/۳۰۰۷۸
۱۴	چهارمحال و بختیاری	۰/۱۱۵۹۶۷	۰/۱۸۴۵۸	۰/۲۹۰۴۶
۱۵	بوشهر	۰/۱۳۵۵۶۸	۰/۱۸۱۷۸	۰/۲۰۶۴۱
۱۶	گلستان	۰/۰۹۲۰۰۶	۰/۱۸۰۹	۰/۳۰۰۰
۱۷	ایلام	۰/۰۷۶۳۷۴	۰/۱۷۸۳	۰/۲۶۳۰۷
۱۸	تهران	۰/۱۶۸۴۷	۰/۲۶۱۰۱	۰/۱۰۵۴۷۳
۱۹	خوزستان	۰/۰۶۸۰۶۶	۰/۱۶۹۸۲	۰/۲۴۷۰۶۴
۲۰	فارس	۰/۰۷۶۳۰۷	۰/۱۵۹۷۱۶	۰/۲۸۱۰۰۳
۲۱	مرکزی	۰/۱۰۴۸۷۴	۰/۱۵۹۰۲۸	۰/۲۵۶۷۵۳
۲۲	خراسان شمالی	۰/۱۰۶۹۴۹	۰/۱۵۱۴۸۸	۰/۲۴۱۳۱۳
۲۳	قم	۰/۰۹۷۲۹۷	۰/۱۴۳۲۶۷	۰/۱۸۶۷۹۶
۲۴	سمنان	۰/۰۴۹۸۰۲	۰/۱۳۸۶۰۶	۰/۳۱۵۸۸۳
۲۵	خراسان رضوی	۰/۰۵۰۲۹۴	۰/۱۲۴۸۸۹	۰/۲۲۱۸۱۱
۲۶	هرمزگان	۰/۰۵۳۸۵۵	۰/۱۲۳۶۱۱	۰/۱۶۳۲۷۹
۲۷	اصفهان	۰/۰۳۰۶۹۳	۰/۱۰۸۸۱۴	۰/۲۸۷۵۹۹
۲۸	کرمان	۰/۰۳۲۷۴۸	۰/۰۹۷۲۳۹	۰/۱۹۵۶۹۸
۲۹	یزد	۰/۰۳۱۸۰۴	۰/۰۹۶۳۶۷	۰/۱۷۶۹۴
۳۰	خراسان جنوبی	۰/۰۳۸۰۷۸	۰/۰۹۰۵۸۴	۰/۱۶۳۸۸۹
۳۱	سیستان و بلوچستان	۰/۰۳۵۷۳۷	۰/۰۷۵۹۳۵	۰/۱۴۴۴۷۳

۴. نتیجه گیری

کمبود و فقدان داده‌های رطوبت خاک در اغلب مناطق کشور همواره از مشکلات مهم در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی، پیش‌بینی‌های هواشناسی و مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب بوده است. با توجه به محدودیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک از یک سوی، پراکنش نامناسب و خلاء آماری این داده‌ها از سوی دیگر، استفاده از فناوری‌های دیگر از جمله فناوری‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای برای رفع این مشکلات بوده و از طرف دیگر ابزار مناسبی برای تهیه نقشه‌های رطوبت خاک و ارزیابی تغییرات زمانی- مکانی رطوبت خاک باشد. پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات زمانی- مکانی مقادیر رطوبت خاک سطحی در سراسر کشور ایران با استفاده از محصولات رطوبت خاک ماهواره SMAP در مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه در دوره ۷ ساله از ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ انجام شد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، متوسط ماهانه درصد حجمی رطوبت خاک در دوره ۷ ساله بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۵۳۸ مترمکعب بر مترمکعب متغیر بوده و مقدار متوسط آن در کل کشور برابر با ۰/۱۳۷ مترمکعب بر مترمکعب است.

بررسی نقشه‌های میانگین فصلی رطوبت خاک نشان می‌دهد که میانگین فصلی درصد حجمی رطوبت خاک از مقدار ۰/۱۸۸ متر مکعب بر مترمکعب در فصل زمستان تا ۰/۰۸۲ مترمکعب بر مترمکعب در تابستان متغیر بوده است. در مقیاس ماهانه نیز بیشترین و کمترین میزان میانگین رطوبت خاک در دوره ۷ ساله به ترتیب در ماه‌های فوریه و اوت دیده می‌شود. از سوی دیگر، کمینه و بیشینه درصدحجمی رطوبت ماهانه خاک در دوره ۷ ساله فوق به ترتیب در نوامبر و فوریه به مقادیر ۰/۰۰۵ و ۰/۵۳۸ مترمکعب بر مترمکعب است. این مطالعه نشان داد که می‌توان تغییرات بلندمدت رطوبت خاک را با این ماهواره پایش نمود که تأکیدی بر مطالعه انجام شده صبوری نوقابی و همکاران (۱۴۰۰) است. تحلیل مکانی میزان رطوبت خاک سطحی بیانگر آن است که در مناطق شمالی و غربی کشور (استان-

های گیلان، مازندران، کهگیلویه و بویراحمد و البرز) میانگین سالانه رطوبت خاک نسبت به سایر مناطق کشور بیشتر بوده و مناطق مرکزی و جنوب شرقی کشور (استان- های سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی و یزد) کمترین میزان رطوبت خاک سطحی را دارند. از آنجایی که آگاهی از میزان رطوبت سطحی خاک می‌تواند کمک شایانی به مدیریت آبیاری، کنترل گردوغبار، پایش پتانسیل آتش‌سوزی جنگل نماید، بنابراین پیشنهاد می‌گردد که در مطالعات آتی نقشه‌های پهنه‌بندی میزان رطوبت خاک در شرایط مختلف رطوبتی و با اهداف مختلف تهیه گردد. همچنین به منظور بهبود کیفیت و دقت داده‌های ماهواره‌ای و کاربرد آنها در جهت مدیریت آب و خاک، پیشنهاد می‌شود عملیات ریزمقیاس‌نمایی بر روی داده‌های ماهواره‌ای انجام شود.

۵. منابع

۱. اسعدی اسکویی، ا. و جامعی، م.، ۱۴۰۰، تولید نقشه‌های رطوبت خاک ایران از محصولات BEC Global Level 3 ماهواره اسموس، پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز، (پذیرش شده)
۲. تقی‌زاده، ا. و احمدی گیوی، ف.، ۱۳۹۷، ارزیابی محصولات بارش GPM و تصویربرداری رطوبت خاک با استفاده از داده‌های SMAP در شمال غرب ایران، ۱۲ (۳): ۷۰-۸۶
۳. حاجی ملکی، خ.، واعظی، ع.، سرمیدان، ف.، کراو، و. و بروکا، ل.، ۱۳۹۹، اعتبارسنجی داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP در کاربری‌های مختلف در حوضه سیمینه-زرنه (بوکان)، تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱ (۵): ۱۳۲۹-۱۳۱۷
۴. صبوری نوقابی، م.، رجبی، م.م. و اسعدی اسکویی، ا.، ۱۴۰۰، اعتبارسنجی و ریزمقیاس‌سازی داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP به روش SMBDA با استفاده از محصولات رادار Sentinel 1 و داده‌های زمینی منطقه صالح‌آباد ایلام، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۷ (۴): ۱۶۰-۱۴۴

- evaluation of SMAP enhanced soil moisture products using high-resolution model simulations and in-situ observations on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*. 10:4:535.
14. Mladenova, I. E., Bolten, J. D., Crow, W., Sazib, N. and Reynolds, C. 2020. Agricultural drought monitoring via the assimilation of SMAP soil moisture retrievals into a global soil water balance model. *Frontiers in big Data*. 3:10.
 15. Rao, P., Wang, Y., Wang, F., Liu, Y., Wang, X. and Wang, Z., 2021. Daily soil moisture mapping at 1 km resolution based on SMAP data for areas affected by desertification in Northern China. *Earth System Science Data Discussions*, 1-28.
 16. Reichle, R. H., De Lannoy, G. J., Liu, Q., Ardizzone, J. V., Colliander, A., Conaty, A. and 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.
 17. Sharma, S. and Dhakal, K., 2021. Boots on the Ground and Eyes in the Sky: A Perspective on Estimating Fire Danger from Soil Moisture Content. *Fire*, 4(3), 45.
 18. Souza, A. G., Neto, A. R., Rossato, L., Alvalá, R. and Souza, L. L., 2018. Use of SMOS L3 soil moisture data: Validation and drought assessment for Pernambuco State, Northeast Brazil. *Remote Sensing*, 10:8. 1314.
 19. Thomas Ambadan, J., Oja, M., Gedalof, Z. E. and Berg, A. A., 2020. Satellite-Observed Soil Moisture as an Indicator of Wildfire Risk. *Remote Sensing*. 12:10. 1543.
 20. Velpuri, N. M., Senay, G. B. and Morisette, J. T., 2016. Evaluating new SMAP soil moisture for drought monitoring in the rangelands of the US high plains. *Rangelands*, 38:4:183-190.
 21. Xiong, L., and Zeng, L., 2019. Impacts of introducing remote sensing soil moisture in calibrating a distributed hydrological model for streamflow simulation. *Water*, 11:4. 666.
 22. Zhu, L., and Zhu, A., 2021. Extraction of Irrigation Signals by Using SMAP Soil Moisture Data. *Remote Sensing*. 13:11. 2142.
 5. Akbar, R., Short Gianotti, D. J., Salvucci, G. D. and Entekhabi, D. 2019. Mapped hydroclimatology of evapotranspiration and drainage runoff using SMAP brightness temperature observations and precipitation information. *Water Resources Research*. 55:4. 3391-3413.
 6. Crow, W. T., Chen, F., Reichle, R. H. and Xia, Y. 2019. Diagnosing bias in modeled soil moisture/runoff coefficient correlation using the SMAP level 4 soil moisture product. *Water Resources Research*. 55:8. 7010-7026.
 7. El Hajj, M., Baghdadi, N., Zribi, M., Rodríguez-Fernández, N., Wigneron, J. P., Al-Yaari, A. and Calvet, J. C. 2018. Evaluation of SMOS, SMAP, ASCAT and Sentinel-1 soil moisture products at sites in Southwestern France. *Remote Sensing*. 10:4: 569.
 8. Entekhabi, D., G. Njoku, E., E. O'Neill, P., Kellogg, K.H., Crow, W., Edelstein, W.N., Entin, J., D. Goodman, S., J. Jackson, T., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J., D. Koster, R., Martin, N., McDonald, K., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J. and van Zyl, J. 2010. The Soil Moisture Active and Passive (SMAP) mission.
 9. Hain, C.R., Crow, W.T., Mecikalski, J.R., Anderson, M.C. and Holmes, T. 2011. An intercomparison of available soil moisture estimates from thermal infrared and passive microwave remote sensing and land surface modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 116.
 10. Hao, Z., Zhao, H., Zhang, C., Wang, H. and Jiang, Y., 2019. Detecting winter wheat irrigation signals using SMAP gridded soil moisture data. *Remote Sensing*, 11(20), 2390.
 11. Keetch, J.J. and Byram, G.A., 1968. Drought index for forest fire control, USDA Research Paper SE-38. Southeastern Forest Experiment Station.
 12. Koster, R. D., Liu, Q., Mahanama, S. P. and Reichle, R. H., 2018. Improved hydrological simulation using SMAP data: Relative impacts of model calibration and data assimilation. *Journal of hydrometeorology*. 19:4. 727-741.
 13. Li, C., Lu, H., Yang, K., Han, M., Wright, J. S., Chen, Y. and Gong, W., 2018. The