



<https://gep.ui.ac.ir/?lang=en>
Geography and Environmental Planning
E-ISSN: 2252- 0910
Document Type: Research Paper
Vol. 35, Issue 3, No.95, Autumn 2024, pp. 35- 64
Received: 24/01/2024 Accepted: 01/05/2024

Examining Temporal and Spatial Variations of Soil Moisture in Iraq

Majid Montazeri ¹ *, Mohammad Sadegh Keikhosravikiany ², Habeeb Alwanees ³

1- Associate professor in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran
m.montazeri@geo.ui.ac.ir

2- Assistant professor in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran
ms.keikhosravikiany@geo.ui.ac.ir

3- MSc. in Climatology, Department of Education of Dhi Qar, Iraq
hbybsbkhghmjsjbr@gmail.com

Abstract

This study aimed to evaluate the temporal and spatial variations in surface soil moisture in Iraq, taking into account the influence of both natural fluctuations and human activities on environmental changes. Volumetric soil moisture data with a resolution of 0.25 degrees and daily intervals covering a thirty-year period (1991-2020) were obtained from the Copernicus climate database. Trend analysis was conducted to examine temporal and spatial trends in soil moisture levels. The results indicated a decrease in volumetric soil moisture during warm months and an increase during cold months, with the latter period exhibiting soil moisture values more than twice as high as the former. Furthermore, a declining trend in volumetric soil moisture during the cold months in Iraq was observed based on the evaluation of monthly time series. The average annual volumetric soil moisture in the country was estimated to be $0.164 \text{ m}^3/\text{m}^3$. The lowest soil moisture value was found in southern Iraq near the border with Kuwait ($0.093 \text{ m}^3/\text{m}^3$), while the highest value was recorded in the northeastern mountainous region of Iraq ($0.240 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Notably, there was a gradual decrease in soil moisture from north to south in Iraq. The analysis of maps revealed that the most substantial decreasing trends occurred in January, February, and March, progressively diminishing as the warm season approached.

*Corresponding Author

Montazeri, M., Keikhosravikiany, M. S., & Alwanees, H. (2024). Examining temporal and spatial variations of soil moisture in Iraq. *Geography and Environmental Planning*, 35 (3), 35 - 64.

2252-0910 © University of Isfahan

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>).



10.22108/GEP.2024.140528.1629

These decreasing trends were predominantly observed along the rivers of Tigris and Euphrates, as well as around the Razazah Lake and the Tharthar Lake extending from northwest to southeast. The provinces of Diyala, Maysan, and Wasit, particularly Wasit, consistently exhibited decreasing trends in soil moisture in most months, indicating their vulnerability to soil moisture reduction.

Keywords: Volumetric Soil Moisture, Trend Tests, Copernicus Climate Database, Iraq

Introduction:

Soil surface moisture is a crucial variable in hydrological processes that influence water and energy exchanges at the Earth's surface and in the atmosphere. Accurate estimation of temporal and spatial variations in soil moisture is vital for various environmental studies. In recent years, remote sensing techniques combined with satellite observations have enabled the measurement of soil surface moisture, providing valuable global-scale information for monitoring and drought prediction (Wang & Qu, 2009). Despite its relatively small quantity, soil moisture plays a significant role in the global water cycle (McColl et al., 2017). The land of Iraq with its ancient civilization owes its existence to the life-giving rivers of Tigris and Euphrates. Despite being located in an arid belt, these rivers have mitigated the adverse effects of the high-pressure desert climate, transforming the otherwise dry and arid land into a lush and vibrant region. However, human interventions in the environment, such as dam construction on the tributaries of the rivers, as well as the impacts of global warming leading to increased temperature and irregular rainfall patterns, have resulted in changes in soil moisture in Iraq. Consequently, extensive areas of the country, particularly along the rivers of Tigris and Euphrates, have experienced a significant decrease in soil moisture.

Materials & Methods:

In this study, soil moisture data obtained from the Copernicus database were utilized. The dataset covered the period from 1991 to 2020 and provided daily temporal resolution and a spatial resolution of 0.25×0.25 degrees of latitude and longitude. The soil moisture data used in this research represented the volumetric soil moisture content measured in cubic meters of water per cubic meter of soil (m^3/m^3). To analyze the trend in the time series of soil moisture data, the Kendall test, a non-parametric method, was employed. The Mann-Kendall method initially introduced by Mann (1945) and further developed by Kendall (1970) was used as well. The null hypothesis of the Mann-Kendall test assumes randomness and the absence of a trend in the data series, while the alternative hypothesis (rejecting the null hypothesis) indicates the presence of a trend. A positive Z statistic indicates an upward trend in the data series, while a negative value indicates a downward trend. One notable advantage of this test is that it does not require the data to follow a normal distribution, making it robust in analyzing non-normal data.

Research Findings:

The average annual volumetric soil moisture in Iraq was $0.164 \text{ m}^3/\text{m}^3$ with significant spatial variation ranging from 0.068 to $0.286 \text{ m}^3/\text{m}^3$, indicating an uneven distribution across the country. The spatial variability coefficient was relatively high at approximately 23.6%. The southern regions of Iraq bordering Kuwait exhibited the lowest levels of volumetric soil moisture, while the highest levels were observed in Baghdad Province, gradually decreasing towards the surrounding areas. Overall, there was a northeast-southwest trend in volumetric soil moisture in Iraq with values decreasing from the northeast to the southwest. This pattern was influenced by the topography and geographical location of the rivers of Tigris and Euphrates. In the northeastern mountainous region of Iraq, the

volumetric soil moisture was approximately $0.18 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Conversely, in the foothill region encompassing Sulaymaniyah, Kirkuk, Erbil, Dohuk, and the northern half of Nineveh Province, the moisture content exceeded $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ and occasionally reached beyond $0.26 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Analyzing the monthly variations in soil moisture revealed distinct patterns. For example, in January, about 54% of Iraq experienced a decreasing trend in soil moisture. This trend extended in a northwest-southeast direction along the rivers of Tigris and Euphrates, covering provinces, such as Diyala, Wasit, Maysan, Qadsiyeh, Babol, Dhi Qar, Basra, and Mushani. In February, a decreasing trend was observed in approximately 42% of the area of Iraq. The February trend map showed similarities to the pattern observed in January, albeit with lower intensity. The spatial extent of decreasing trends widened in a northwest-southeast direction along the rivers of Tigris and Euphrates. In March, declining trends covered around 24% of the area of Iraq, particularly along the northwest-southeast direction along the Tigris River in the provinces of Diyala, Wasit, and Misan, exhibiting increased density and intensity. In April, around 12% of the area of Iraq experienced a decreasing trend. These declining trends followed a specific geographic pattern, mostly occurring along the Tigris River and including provinces, such as Diyala, Wasit, Misan, and parts of Basra. In May, a similar geographic pattern was observed, with approximately 12% of the area of Iraq exhibiting declining trends. These trends were primarily noticed along the Tigris River in Wasit, Maysan, Dhi Qar, and parts of Basra, as well as around the Al-Razzah Lake and the Al-Tharsar Lake, along with a portion of Kirkuk Province. The extent of decreasing trends decreased in June, while the extent of increasing trends expanded. In July, the extent of increasing trends surpassed that of decreasing trends. Decreasing trends covered 7.4% of the area of Iraq primarily observed around the Al-Razzah Lake and the Al-Tharsar Lake, as well as in parts of the provinces of Wasit, Maysan, and Babol. In August, decreasing trends encompassed 6% of the area of Iraq mainly witnessed around the Al-Tharsar Lake, the Al-Razzah Lake, southern Dhi Qar Province, and northern Mothni Province. The trend pattern in September mirrored that of August with declining trends covering 8% of the area of Iraq predominantly observed around the Al-Razzah Lake and the Al-Tharsar Lake and along the Euphrates River in Qadsiyeh Province, north of Mothni Province, and the center of Dhi-Qar. In October, decreasing trends affected 12% of the area of Iraq primarily noticed around the Al-Razzah Lake and the Al-Tharsar Lake, as well as along the Tigris River in the provinces of Diyala and Wasit and parts of the provinces of Qadisiyah and Dhi Qar. The trend map for November highlighted the smallest range of decreasing and increasing trends compared to other months. In this month, 97% of the area of Iraq exhibited no discernible trend. In December, a trend pattern resembling that of April was observed with 11.5% of the area of Iraq experiencing a decrease. This decrease was mainly noticed along the rivers of Tigris and Euphrates, surrounding Al-Razzazeh Lake, below Al-Hadithah Lake, and in the provinces of Diyala, Wasit, and Misan.

Discussion of Results & Conclusion:

For this research, we utilized soil moisture data from the Copernicus Climate Base. The data had a spatial resolution of 0.25 degrees and covered the period from 1991 to 2020 collected on a daily basis. Within the geographical extent of Iraq, we identified a total of 688 cells for analysis. To assess temporal and spatial trends, we employed linear regression trend tests and Mann-Kendall tests. In the temporal analysis, we initially explored the annual changes in soil moisture. Our findings revealed that the average volumetric soil moisture in Iraq from 1991 to 2020 was $0.1646 \text{ m}^3/\text{m}^3$. The highest recorded soil moisture during this period was 0.1782 in 1993, while the lowest was 0.1514 in 2017. Examining the annual time series of soil moisture indicated an overall decline. Furthermore, our monthly analyses highlighted significant decreasing trends in January, February, and March with a subsequent reduction in the extent of areas exhibiting declining trends as the warmer months

approached. Conversely, the increasing trends in soil moisture were more modest during the colder months but exceeded 20% during the warmer months of the year. Geographically, the decreasing trends extended from the northwest to the southeast, primarily along the rivers of Tigris and Euphrates. It is worth noting that the decrease in river flow attributed to the construction of dams in Turkey, particularly Ilisu Dam at the source of the Tigris River, might have contributed to this phenomenon. In conclusion, our research indicated an overall decline in soil moisture in Iraq over the studied period. The decreasing trends were most pronounced during the colder months, while increasing trends were more prominent in the warmer months. The geographical distribution of these trends suggested a strong influence from the rivers of Tigris and Euphrates potentially impacted by upstream dam construction. These findings provide valuable insights into the patterns of soil moisture in Iraq and can contribute to better understanding and managing water resources in the region.

ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی رطوبت خاک در عراق

مجید منتظری* ، دانشیار آب‌وهواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

m.montazeri@geo.ui.ac.ir

محمدصادق کیخسروی کیانی، استادیار آب‌وهواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

ms.keikhosravikiany@geo.ui.ac.ir

حبیب الونیس، کارشناسی ارشد آب‌وهواشناسی، آموزش و پرورش شهر ذی قار عراق

hbybsbkhghmysjbr@gmail.com

چکیده

تغییرات محیطی ناشی از تغییرات طبیعی و فعالیت‌های انسانی می‌تواند در میزان رطوبت خاک تأثیر بگذارد و زمینه کاهش آب خاک را فراهم آورد؛ از این رو در پژوهش حاضر برای ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی رطوبت سطحی (۲ تا ۵ سانتی‌متری) خاک در عراق داده‌های رطوبت حجمی خاک با تفکیک ۰/۲۵ درجه‌ای و بازه زمانی روزانه در یک دوره سی‌ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) از پایگاه داده‌های اقلیمی کوپرنیکوس برداشت شد. در این مطالعه برای ارزیابی روندهای زمانی و مکانی از آزمون‌های روند رگرسیون خطی و مان-کندال استفاده شد. بررسی‌ها نشان داد که رطوبت حجمی خاک در ماه‌های گرم کاهش و در ماه‌های سرد افزایش یافته است؛ به‌طوری که مقدارهای رطوبت خاک در ماه‌های سرد بیش از دو برابر ماه‌های گرم است. ارزیابی روند سری زمانی ماهانه رطوبت حجمی خاک در عراق نشان داد که ماه‌های دوره سرد روند کاهشی داشته است. میانگین مکانی سالانه رطوبت حجمی خاک در عراق $0.164 m^3/m^3$ برآورد شد. کمترین مقدار رطوبت حجمی خاک در جنوب عراق در مرز کویت ($0.093 m^3/m^3$) و بیشترین رطوبت حجمی خاک در منطقه پایکوهی شمال شرق عراق ($0.24 m^3/m^3$) است. مقدار رطوبت خاک در عراق از شمال به جنوب کاسته می‌شود. بررسی نقشه‌های روند نشان داد که بیشترین روندهای کاهشی به ترتیب در ماه‌های دی، بهمن و اسفند بوده است که در ماه‌های دوره گرم سال از وسعت پهنه‌های با روند کاهشی کاسته می‌شود. گستره جغرافیایی روندهای کاهشی روند شمال غرب-جنوب شرق داشته است و بیشتر در امتداد رودهای دجله و فرات و در اطراف دریاچه الرزازه و الثرثار مشاهده می‌شود. استان دیالی، میسان و به‌ویژه استان واسط در بیشتر ماه‌ها در معرض روندهای کاهشی رطوبت خاک قرار داشتند که این حکایت از در معرض خطر قرار داشتن این مناطق دارد. مناطقی که در معرض کاهش رطوبت خاک قرار داشته‌اند، بیشتر در معرض خطر تبدیل شدن به کانون‌های تولید گرد و غبار هستند. در پایان پژوهش به پژوهشگران پیشنهاد می‌شود که اقدام‌های حفاظتی مانند کاشت درختان خشکی‌پسند (نیاز آبی اندکی دارند) انجام شود تا از کاهش بیشتر رطوبت خاک جلوگیری شود.

واژه‌های کلیدی: رطوبت حجمی خاک، تحلیل روند، پایگاه داده کوپرنیکوس.

*نویسنده مسئول

منتظری، مجید، کیخسروی کیانی، محمدصادق، الونیس، حبیب. (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات زمانی مکانی رطوبت خاک در عراق. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*.

۳۵ (۳)، ۶۴-۳۵.



مقدمه

رطوبت سطحی خاک یکی از متغیرهای کلیدی در فرآیندهای آب‌شناختی است که تبدلات آب و انرژی را در سطح زمین و هواسپهر متأثر می‌کند. برآورد دقیق وردش‌های زمانی و مکانی رطوبت خاک برای مطالعات مختلف محیطی لازم و ضروری بوده و پیشرفت‌های اخیر در تکنیک‌های دورسنجی به کمک مشاهده‌های ماهواره‌ای نشان داده است که می‌توان به کمک روش‌های دورکاوی رطوبت سطحی خاک را اندازه‌گیری کرد (Wang & Qu, 2009; P. 237). رطوبت خاک در عمق ۱ تا ۲ متری زمین به‌عنوان یک متغیر کلیدی در بسیاری از مطالعات زیست‌محیطی، هواشناسی، آب‌شناختی، کشاورزی و پژوهش‌های مرتبط با تغییر اقلیم شناخته شده است (Topp et al., 1999; al., 1980; Jakson et al., 1987; Fast & McCorcle, 1991; Engman, 1992; Entekhabi et al., 2023; Betts et al., 1994; Saha, 1995; Su et al., 1995; Walker & Houser, 2004). پایش دقیق و برآورد زمانی و مکانی رطوبت خاک مسئله بسیار مهمی است؛ زیرا رطوبت خاک باوجود مقدار اندک آن در واحد حجمی خاک یک متغیر کلیدی آب‌شناختی است که به‌طور چشمگیری چرخه آب را در مقیاس جهانی تحت‌تأثیر خود قرار داده (McColl et al., 2017) و برآورد دقیق رطوبت خاک در مطالعاتی همچون پایش خشکسالی‌های کشاورزی (Narasimhan & Dobriyal et al., 2005)، رشد پوشش‌های گیاهی (D'Odorico et al., 2007) و مدیریت منابع آب (2012) کاملاً ضروری و لازم است. روند ادامه‌دار تغییر اقلیم سبب بروز رویدادهای حدی (فرین) آب‌وهوایی شده (Huang et al., 2016; Samaniego et al., 2018; Schlaepfer et al., 2017) و خطر سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها را در بخش کشاورزی افزایش داده است (Su et al., 1995). بنابراین پایش دقیق محتوای رطوبتی خاک به منظور برآورد تنش خشکسالی محصول، برآورد میزان آب مورد نیاز گیاه و هشدار به‌موقع به کشاورزان جهت پیشگیری از کاهش تولید محصولات کشاورزی، ضروری است. اگرچه داده‌های زمینی رطوبت خاک را در ژرفاهای مختلف سطح زمین اندازه‌گیری می‌کنند، محدود به نقاط خاصی هستند و برای مطالعات آن در سطح مقیاس وسیع مناسب نیستند؛ بنابراین بیشتر از داده‌های ایستگاهی برای راستی‌آزمایی برآوردهای ماهواره‌ای بهره گرفته می‌شود. از همین روی داده‌های دورکاوی رطوبت خاک برای هر نقطه‌ای در دسترس بوده و برای کاربری‌های آب و اقلیم مناسب است (Dong et al., 2019; Abbaszadeh et al., 2019). داده‌های ماهواره‌ای اطلاعات ارزشمندی را از رطوبت سطح خاک در مقیاس جهانی فراهم می‌کنند که به‌دنبال آن امکان انجام دادن مطالعات گسترده‌ای همچون پایش و پیش‌بینی خشکسالی نیز فراهم می‌شود (Xu et al., 2020). مطالعات مختلفی در جای‌جای جهان به کمک داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک برای هدف‌های مختلفی انجام گرفته است؛ برای نمونه در پژوهشی چنگ و همکاران داده‌های رطوبت خاک پایگاه (ERA5) را برای بازه زمانی 1979 تا 2018 به‌منظور بررسی روند تغییرات رطوبت خاک در فلات تبت به کار گرفتند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که به‌جزء بخش‌های شرقی و مناطق شمال غربی که روند کاهشی رطوبت خاک دارند در سایر بخش‌های مطالعه‌شده روند افزایشی رطوبت خاک قابل مشاهده است. همچنین، برای بررسی دقیق‌تر داده‌های روند تغییرات بارش، تبخیر و تعرق نیز به کار گرفته شد که بررسی‌ها نشان می‌دهد به‌طور کلی روند افزایش رطوبت خاک در منطقه با افزایش بارش و کاهش تبخیر و تعرق هماهنگی دارد (Cheng et al., 2019, P. 11). در مطالعه‌ای دیگر دنگ و همکاران روند تغییرات رطوبت خاک را در مقیاس سیاره‌ای به کمک داده‌های دورکاوی برای

دوره زمانی ۱۹۷۹-۲۰۱۷ ارزیابی کردند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که میانگین رطوبت خاک در جهان روندی کاهشی دارد که این میزان کاهشی در دوره زمانی ۲۰۱۷-۲۰۰۱ روندی شتابان به خود گرفته است. همچنین، محاسبات نشان می‌دهد مناطقی که در حال فقیر شدن از نظر محتوای رطوبت خاک هستند با میزان ۱ درصد در سال در دوره زمانی بررسی شده در حال گسترش هستند که پیامد این مسئله می‌تواند کاهش منابع آبی، تخریب زمین، افزایش امواج گرمایی و دیگر مشکلات زیست‌محیطی باشد. همچنین، محاسبات آنها نشان می‌دهد دلیل اصلی مناطقی که روند کاهشی محتوای رطوبت خاک دارند، افزایش دماست و دلیل عمده افزایش محتوای رطوبت خاک در مناطقی که روند دارند، ترکیب عوامل بارش، دما و پوشش گیاهی است (Deng et al., 2020).

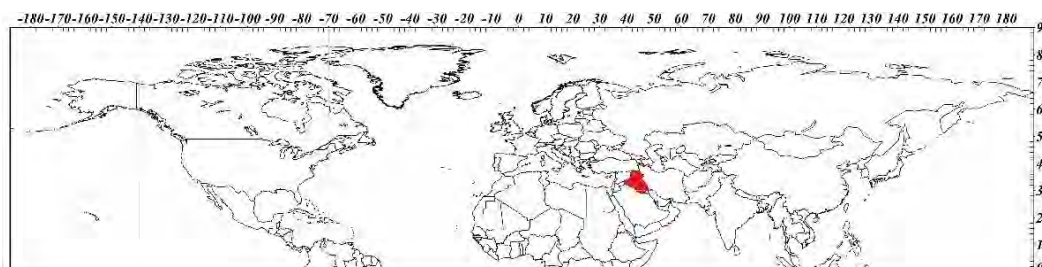
کشاورز و همکاران (۱۳۹۰) در ارزیابی روند رطوبت خاک در استان اصفهان نشان دادند که روندیابی رطوبت خاک نشان‌دهنده نبود روند در حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد مناطق مطالعه شده به خصوص نواحی کم‌ارتفاع شرقی است. در بیشتر مناطق با روند، روندهای منفی حاکم بوده و رطوبت خاک روبه کاهش است. در مناطق مرتفع غربی در هر دو دوره تر و خشک و در مناطق مرکزی و جنوبی در دوره تر شاهد غلبه روندهای منفی هستیم که این امر می‌تواند نشان‌دهنده یک حرکت طولانی مدت به سمت خشکی باشد.

سرزمین عراق و تمدن چند هزار ساله آن مدیون حیات رودخانه‌های دجله و فرات است. این سرزمین برخلاف قرارگرفتن در کمربند خشک عرض میانه به مدد وجود این دو رودخانه توانسته است اثرهای سوء استقرار پرفشار جنب حاره‌ای را خنثی کند و سرزمین کم‌بارش و خشک عراق را در مجاورت این دو رودخانه به پهنه‌ای سرسبز و سر زنده تبدیل کند. دستکاری‌های بشر در محیط زیست منطقه از جمله سدسازی‌ها بر روی سرشاخه‌های این رودخانه‌ها و افزایش شدید دما و بی‌نظمی‌های بارندگی ناشی از پدیده گرمایش جهانی باعث شده است که رطوبت خاک در عراق دستخوش تغییر شود؛ به‌طوری که این دستکاری‌ها در گستره‌های وسیعی از عراق به‌ویژه در امتداد رودخانه‌های دجله و فرات منجر به کاهش رطوبت خاک شده و بسیاری از تالاب‌ها خشک یا محدود شده است. همچنین، از وسعت زمین‌های کشاورزی در اثر کم‌آبی کاسته شده است. ریزدانه‌بودن خاک‌های آبرفتی موجب شده است هنگامی که تالاب‌ها خشک می‌شود یا از وسعت آنها کاسته می‌شود، خاک رطوبت خود را که عامل چسبندگی خاکدانه‌هاست، از دست دهد و ناپایدار شود؛ از این رو وزش باد بر پهنه صاف و هموار جلگه بین‌النهرین ذرات ریزدانه و ناپایدار خاک را جذب و جریان هوا ذرات ریزدانه را به سمت شرق هدایت می‌کند. این موضوع زمینه بروز طوفان‌های ریزگرد را فراهم می‌آورد. این بحران طبیعی علاوه بر سرزمین عراق گریبان‌گیر شهرها و مراکز سکونتگاهی ایران به‌ویژه استان‌های غربی و جنوبی ایران از کرمانشاه تا ایلام و خوزستان می‌شود؛ از این رو شناسایی تغییرات زمانی و آشکارسازی پهنه‌های مکانی در معرض خطر کاهش رطوبت خاک در عراق از مهم‌ترین هدف‌های این پژوهش است.

روش‌شناسی پژوهش

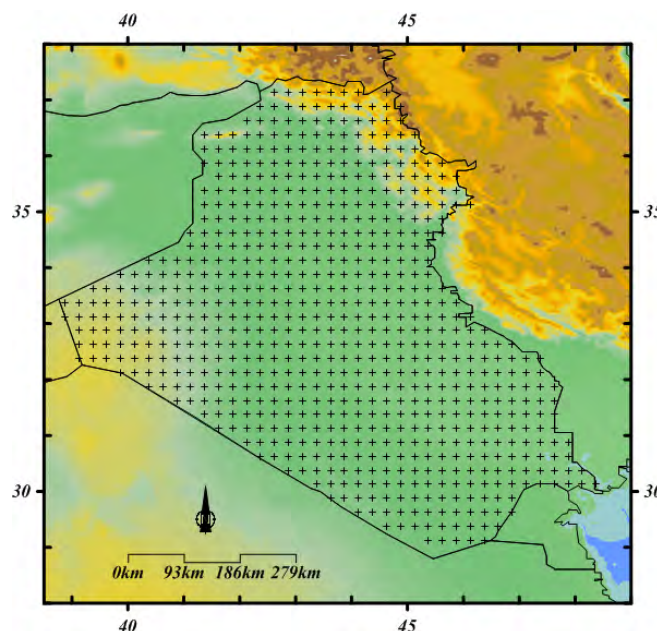
داده‌های رطوبت حجمی خاک از طرف سرویس تغییرات اقلیمی کوپرنیکس (Copernicus Climate Change Service) تولید شده است. این داده‌ها برآوردی از رطوبت خاک در سراسر جهان را از مجموعه بزرگی از ماهواره‌ها و حسگرهای ماهواره‌ای ارائه می‌دهد. داده‌های رطوبت خاک شامل فرآورده‌های سنجنش از دور فعال،

غیرفعال و ترکیبی است. در این پژوهش از داده‌های ترکیبی رطوبت حجمی خاک استفاده شد. رطوبت حجمی خاک، محتوای آب مایع در لایه سطحی خاک به عمق ۲ تا ۵ سانتی‌متر است که به صورت متر مکعب آب در متر مکعب خاک (m^3/m^3) بیان می‌شود. این داده‌ها به صورت شبکه‌ای است و پوششی سیاره‌ای را به دست می‌دهد (شکل ۱ و ۲). ساختار این داده‌ها به صورت قالب معمول داده‌های شبکه‌ای (NetCDF) است که از نسخه ۲۰۲۰۱۲ برداشت شده است. تفکیک مکانی این داده‌ها $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ درجه (حدود 25×25 کیلومتر) و تفکیک زمانی آن به صورت روزانه، ده روزه و ماهانه است که پوشش زمانی از سال ۱۹۷۹ تاکنون را دارد. در این پژوهش داده‌های روزانه برای یک دوره ۳۰ ساله از ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ و از تارنمای کوپرنیکس^۱ برداشت شد. مقدارهای داده‌های رطوبت حجمی بین صفر تا ۱ متغیر است و مقدارهای بدون داده (NaN) با مقدار عددی -0.9999 مشخص شده است. دقت این فرآورده بسته به نوع پوشش و بافت خاک بین 0.04 تا 0.1 متر مکعب بر متر مکعب است.



شکل ۱: موقعیت عراق در شبکه داده‌های 0.25° در نیمکره شمالی (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Figure 1: The position of Iraq in the grid data of 0.25° in the Northern Hemisphere



شکل ۲: موقعیت ۶۸۸ پیکسل مکانی 0.25° در کشور عراق (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Figure 2: Location of 688 pixels 0.25° in Iraq

¹ <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-soil-moisture>

در این پژوهش در راستای دستیابی به هدف‌های پژوهش از آزمون‌های روند رگرسیون خطی و مان-کندال برای پردازش داده‌ها متناسب با ماهیت داده‌ها به لحاظ بُعد زمانی و تفکیک مکانی استفاده شد. در این روش‌ها بیشتر رفتار زمانی داده‌های رطوبت حجمی خاک در عراق ارزیابی و علاوه بر آن امکان تحلیل‌های مکانی نیز فراهم می‌شود.

آزمون روند (Trend test)

یکی از روش‌های ارزیابی تغییرات متغیرهای آب‌وهوایی در بستر زمان استفاده از آزمون‌های روند است. در بیشتر پژوهش‌های آب‌وهوایی که بر روی رطوبت خاک صورت گرفته است، تغییرات آن در بستر زمان با استفاده از آزمون‌های روند بررسی شده است. آزمون‌های روند به دو دسته آزمون‌های پارامتری و ناپارامتری دسته‌بندی می‌شود. مرسوم‌ترین آزمون پارامتری آزمون رگرسیون خطی موسوم به آزمون بتاست. از آنجا که برای انجام دادن آزمون‌های پارامتری پیش‌شرط‌هایی مانند نرمال بودن توزیع داده‌ها، استقلال داده‌ها و تصادفی بودن داده‌ها مطرح است، در بسیاری از موارد به دلیل محقق نشدن شرط‌های مذکور محقق مجاز به استفاده از آزمون‌های روند پارامتری نیست. در اینگونه موارد از آزمون‌های ناپارامتری استفاده می‌شود. آزمون‌های ناپارامتری را آزمون‌های توزیع آزاد نیز می‌نامند؛ زیرا برای انجام دادن آنها هیچ پیش شرطی لازم نیست. این آزمون با خود داده‌ها سرو کار ندارد، بلکه رتبه‌های داده‌ها را بررسی می‌کند. یکی از آزمون‌های ناپارامتری پرکاربرد در آب‌وهواشناسی آزمون مان-کندال (Maan-Kendal test) است (منتظری، ۱۳۹۳، ص. ۲۱۴).

آزمون رگرسیون خطی

آزمون روند بتا بر مبنای شیب خط روند عمل می‌کند. در این روش حد بالا و حد پایین شیب خط محاسبه می‌شود (معادله ۱). مقدار عددی بتا یکبار از شیب خط کسر و یکبار با شیب خط جمع بسته می‌شود. در صورتی که دو عدد حاصل مثبت باشد، روند افزایشی (مثبت) و در صورتی که هر دو عدد منفی به دست آید، روند کاهشی (منفی) و اگر یکی مثبت و دیگری منفی شود، نبود روند نتیجه‌گیری می‌شود.

$$\hat{\beta} \pm t_{0.025} \frac{s}{\sqrt{SSx}} \quad (1)$$

آزمون مان-کندال

Maan (1945) آزمون مان-کندال را ارائه و سپس Kendall (1970) آن را بسط و توسعه داد. فرض صفر آزمون مان-کندال بر تصادفی بودن و نبود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌هاست. در این روش ابتدا اختلاف بین هریک از مشاهده‌ها با تمام مشاهده‌ها محاسبه می‌شود و سپس پارامتر S مطابق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (2)$$

در این رابطه n تعداد مشاهده‌های سری و x_j و x_k به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری است. تابع علامت sgn نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} \operatorname{sgn}(x_j - x_k) &= +1 & \text{for } (x_j - x_k) > 0 \\ \operatorname{sgn}(x_j - x_k) &= 0 & \text{for } (x_j - x_k) = 0 \\ \operatorname{sgn}(x_j - x_k) &= -1 & \text{for } (x_j - x_k) < 0 \end{aligned} \quad (۳)$$

در مرحله بعد محاسبه واریانس S با یکی از روابط زیر محاسبه شد.

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t(t-1)(2t+5)}{18} \quad \text{for } n > 10 \quad (۴)$$

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad \text{for } n < 10 \quad (۵)$$

در این رابطه n و m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آنها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله (تعداد گره‌ها) است. در نهایت، آماره Z به کمک یکی از روابط زیر استخراج می‌شود:

$$\begin{aligned} z &= \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{for } S > 0 \\ z &= 0 & \text{for } S = 0 \\ z &= \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & \text{for } S < 0 \end{aligned} \quad (۶)$$

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر برقرار باشد:

$$|Z| < Z_{\alpha/2} \quad (۷)$$

در این رابطه α سطح معناداری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معناداری α است که با توجه به دو دامنه بودن آزمون از آلفا دوم ($\alpha/2$) استفاده شده است. در بررسی حاضر این آزمون برای سطح اعتماد ۹۵٪ و ۹۹٪ به کار گرفته شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش تحلیل‌های روند با استفاده از روش آزمون بتا و آزمون مان-کندال در سطح احتمال ۹۹ درصد در محیط نرم افزار متلب انجام شد. بررسی‌ها نشان داد که اختلاف معناداری بین خروجی دو روش مشاهده نمی‌شود؛ از این رو نتایج خروجی این پژوهش بر مبنای روش مان-کندال است.

یافته‌های پژوهش و تجزیه و تحلیل

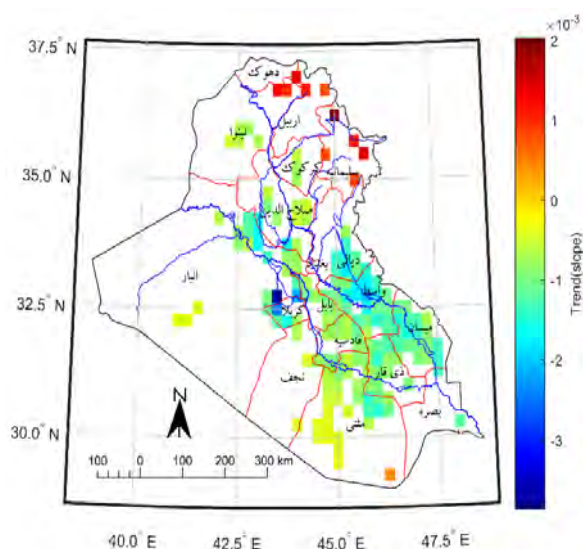
تغییرات مکانی رطوبت حجمی خاک در عراق

به کارگیری داده‌های شبکه‌ای این امکان را به پژوهشگران آب‌وهواشناسی داده است که به کمک رایانه و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی بتوانند تحلیل‌های مکانی واقع‌گرایانه‌ای ارائه دهند و با مقایسه تغییرات عناصر آب‌وهوایی بر روی مکان‌های مختلف جغرافیایی سازوکار این تغییرات را بهتر درک و دلایل رخداد آن را با دید موشکافانه‌تری تفسیر و توجیه کنند.

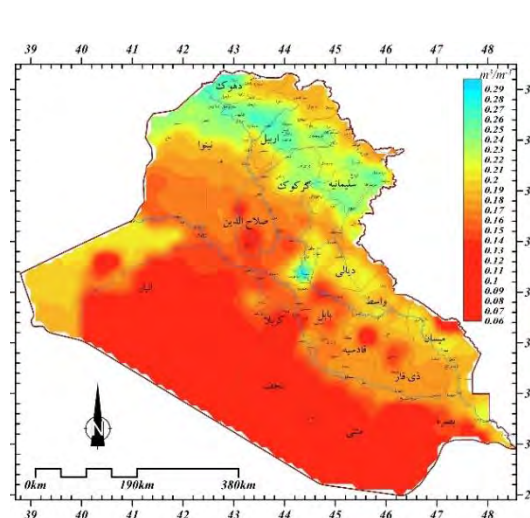
تغییرات مکانی رطوبت حجمی خاک سالانه

نقشه‌های سالانه نمای کلی از وضعیت متغیر اقلیمی در مکان را به دست می‌دهد. میانگین مکانی رطوبت حجمی خاک سالانه در عراق m^3/m^3 ۰/۱۶۴ است که بین ۰/۰۶۸ تا m^3/m^3 ۰/۲۸۶ متغیر است و نشان می‌دهد که توزیع جغرافیایی یکنواختی ندارد؛ از این رو ضریب تغییرپذیری مکانی آن تا حدودی بالا بوده و به حدود ۲۳/۶ درصد می‌رسد. کمترین مقدار رطوبت حجمی خاک در جنوب عراق در مرز با کویت مشاهده می‌شود؛ درحالی که بیشترین رطوبت حجمی خاک در استان بغداد است که به صورت کانونی بوده و به سمت اطراف کاهش پیدا کرده است (شکل ۳). می‌توان گفت رطوبت حجمی خاک در عراق تا حدودی روند شمال شرق-جنوب غرب داشته و از سمت شمال شرق به جنوب غرب از مقدار آن کاسته شده است. این وضعیت تا حدودی تحت تأثیر پیکربندی ناهمواری‌ها و موقعیت جغرافیایی رودخانه‌های دجله و فرات بوده است. مقدار رطوبت حجمی خاک در منطقه کوهستانی واقع در شمال شرق عراق حدود m^3/m^3 ۰/۱۸ است؛ درحالی که در منطقه پایکوهی در محدوده استان‌های سلیمانیه، کرکوک، اربیل، دهوک و نیمه شمالی استان نینوا میزان رطوبت خاک به بالای m^3/m^3 ۰/۲ می‌رسد و در بخش‌هایی از m^3/m^3 ۰/۲۶ نیز فراتر می‌رود. شاید دلیل آن را اینگونه بتوان توجیه کرد که در محدوده کوهستانی حد فاصل مرز ایران و ترکیه به دلیل ارتفاع زیاد و برف‌گیر بودن، میزان رطوبت خاک کمی کمتر از مناطق پایکوهی است؛ درحالی که آب‌های ناشی از ذوب برف در ارتفاعات با شبکه آب‌های جاری به مناطق پایکوهی هدایت شده و موجب افزایش میزان رطوبت حجمی خاک شده است؛ در نتیجه منطقه رطوبت خاک بالاتری را به صورت پهنه‌ای با روند شمال غرب-جنوب شرق به وجود آورده است. نکته مهم دیگر، موقعیت رودخانه فرات است که محدوده با رطوبت خاک بالاتر مرکزی را از محدوده با رطوبت کم‌تر جنوبی جدا کرده است. در محدوده جنوبی رطوبت خاک به ۰/۱۲ تا m^3/m^3 ۰/۱۳ می‌رسد؛ درحالی که در محدوده مرکزی حد فاصل رود فرات تا مرز ایران بین m^3/m^3 ۰/۱۸ تا بیش از m^3/m^3 ۰/۲ در تغییر است.

یکی از هدف‌های مطالعات اقلیمی ارزیابی تغییرات متغیر اقلیمی در بستر زمان است. برای ارزیابی تغییرات سالانه رطوبت حجمی خاک آزمون رگرسیون خطی بر روی سری زمانی سی ساله ۶۸۸ پیکسل مکانی عراق اعمال شد. نتایج نشان داد که روندهای افزایشی بسیار محدود و به صورت پیکسل‌های پراکنده در منطقه کوهستانی شمال شرق عراق در استان‌های سلیمانیه و اربیل مشاهده می‌شود؛ اما روندهای کاهشی گستره بیشتری را شامل می‌شود و بیشتر در محدوده دو رودخانه دجله و فرات در امتداد مرز ایران در استان‌های دیالی، واسط، میسان، بابل، کربلا، قادسیه، ذی قار و مثنی گسترش یافته است. بیشترین شدت روند در مرکز استان واسط و در استان کربلا در محدوده دریاچه الرزازه مشاهده می‌شود (شکل ۴). این وضعیت علاوه بر عراق برای ایران نیز بسیار نگران‌کننده است؛ زیرا ریزدانه بودن خاک در این ناحیه که ناشی از شیب بسیار ملایم توپوگرافی منطقه است، موجب شده است رودخانه‌های دجله و فرات بار رسوبی خود را در طی سال‌های متمادی در بستر متغیر خود بر جای بگذارند و اکنون که این تالاب‌ها روبه خشک شدن هستند، وزش بادهای غربی و شمال غربی (باد شمال) ذرات ریز خاک را با خود به سمت مناطق شرقی هدایت می‌کنند. به عبارت دیگر، کاهش رطوبت خاک در این ناحیه که همراه با خشک شدن تالاب‌ها در این محدوده است، چشمه‌های تولید گرد و غبار را فعال و زیست‌بوم منطقه را با خطر جدی مواجه کرده است.



شکل ۴: شیب روند رطوبت حجمی سالانه (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)



شکل ۳: پراکندگی مکانی رطوبت حجمی سالانه (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Figure 3: Spatial distribution of annual volumetric humidity
Figure 4: Trend Slope of annual volumetric humidity

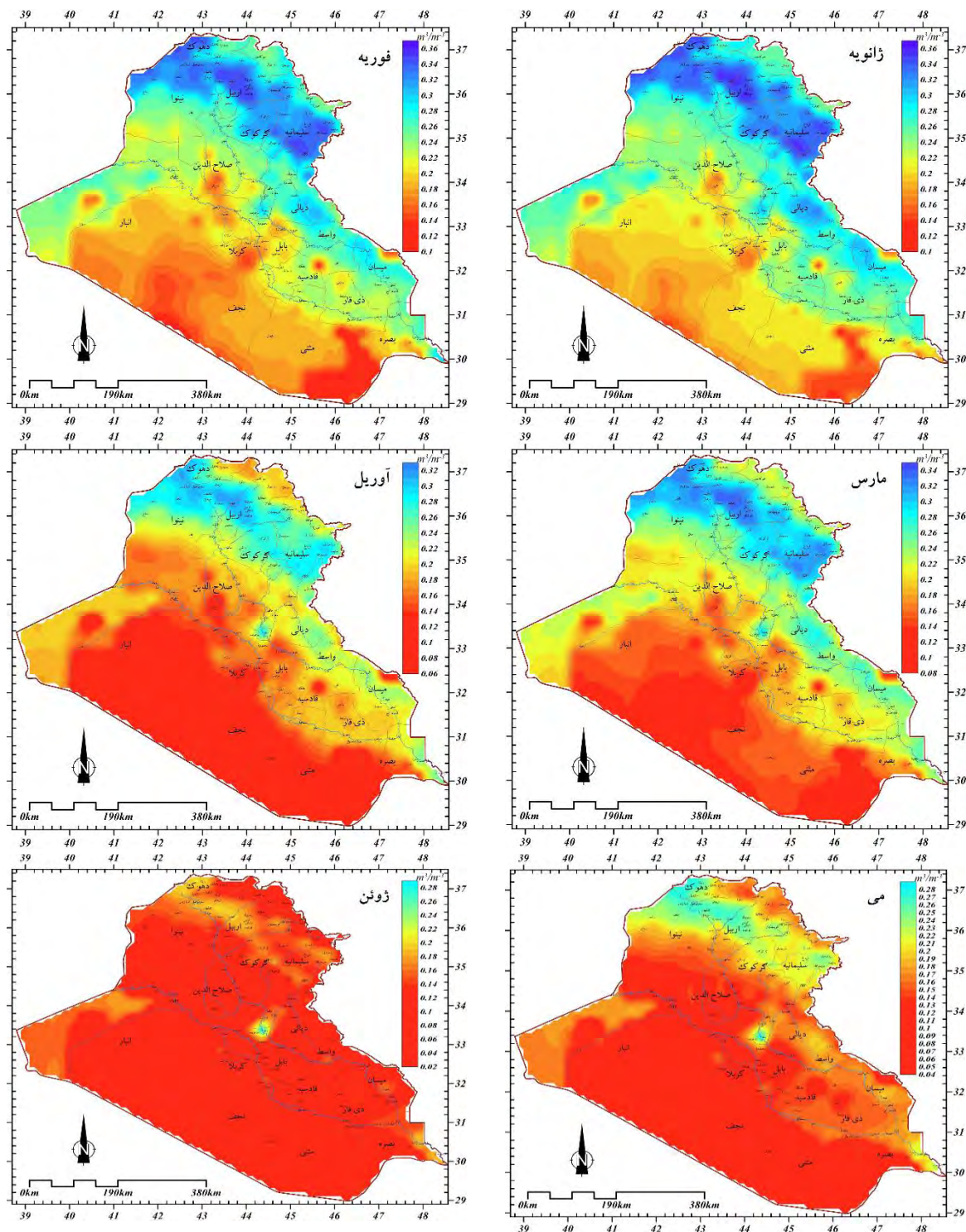
تغییرات مکانی رطوبت حجمی خاک ماهانه

همان‌طور که پیشتر بیان شد رژیم تغییرات ماهانه رطوبت حجمی خاک در عراق از الگوی رژیم بارندگی ماهانه تبعیت می‌کند؛ به‌طوری که در دوره سرد سال افزایش می‌یابد و در ماه‌های گرم سال به کمترین مقدار می‌رسد. میانگین بلندمدت مکانی رطوبت حجمی خاک در ماه ژانویه $0.237 \text{ m}^3/\text{m}^3$ برآورد شد. کمینه رطوبت خاک در این ماه در جنوب عراق در مرز کویت حدود $0.133 \text{ m}^3/\text{m}^3$ و بیشینه آن در محدوده خبات کلک در امتداد رود زاب بزرگ در مرز بین استان اربیل و نینوا ($0.345 \text{ m}^3/\text{m}^3$) مشاهده می‌شود. الگوی مکانی پراکندگی رطوبت خاک در این ماه به الگوی سالانه شبیه است (شکل ۵، ماه ژانویه).

الگوی مکانی نقشه رطوبت حجمی خاک در ماه فوریه به الگوی ماه ژانویه شبیه است. میانگین رطوبت حجمی خاک در این ماه $0.224 \text{ m}^3/\text{m}^3$ است که نسبت به ماه ژانویه کاهش یافته است. کمینه رطوبت خاک در جنوب عراق در مرز استان بصره و مثنی مشاهده می‌شود و حدود $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^3$ است که نسبت به ماه ژانویه کمتر شده است و بیشینه رطوبت خاک حدود $0.35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ است که در منطقه پایکوهی شمال شرق عراق در محدوده استان‌های سلیمانیه، کرکوک، اربیل، دهوک و شمال نینوا مشاهده می‌شود. بیشینه نسبت به ماه ژانویه تغییری نداشته است؛ درحالی که ضریب تغییرپذیری مکانی نسبت به ماه ژانویه اندکی افزایش یافته است (شکل ۵، ماه فوریه).

در ماه مارس رطوبت خاک نسبت به ماه ژانویه و فوریه کمتر شده و این موضوع در نقشه الگوی پراکندگی مکانی رطوبت خاک جلوه کرده است. متوسط رطوبت خاک در این ماه به $0.198 \text{ m}^3/\text{m}^3$ می‌رسد. کمینه رطوبت خاک در جنوب عراق $0.083 \text{ m}^3/\text{m}^3$ و بیشینه در اطراف منطقه خبات کلک در امتداد رود زاب بزرگ در مرز استان‌های اربیل و نینوا به

۳۳۸ m^3/m^3 می‌رسد. ضریب تغییرپذیری مکانی نسبت به دو ماه قبل بیشتر شده است. به عبارت دیگر، تفاوت‌های مکانی رطوبت خاک در ماه مارس نسبت به ماه‌های ژانویه و فوریه افزایش یافته است (شکل ۵، ماه مارس).



شکل ۵: نقشه میانگین بلندمدت پراکندگی مکانی مقدارهای رطوبت حجمی خاک شش ماه اول (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Figure 5: Long-term average of the spatial distribution of volumetric soil moisture values in the first six months

متوسط رطوبت خاک در ماه آوریل به $m^3/m^3 \cdot 0.176$ می‌رسد که نسبت به ماه‌های قبل کمتر شده است. مطابق ماه‌های قبل کمینه رطوبت خاک $m^3/m^3 \cdot 0.064$ و در جنوب عراق در مرز استان‌های بصره، مثنی و مرز کویت مشاهده می‌شود. بیشینه رطوبت خاک $m^3/m^3 \cdot 0.316$ در منطقه پایکوهی شمال شرق عراق حد فاصل رود زاب کوچک تا رود دجله مشاهده می‌شود. ضریب تغییرپذیری مکانی $31/4$ درصد است که در مقایسه با ماه‌های قبل بیشتر شده و حاکی از افزایش تفاوت‌های مکانی رطوبت خاک در این ماه است. این موضوع در افزایش ضریب چولگی نسبت به ماه‌های قبل نمود یافته است (شکل ۵، ماه آوریل).

با نگاهی به نقشه ماه می مشاهده می‌شود که رطوبت خاک در این ماه به شدت روبه کاهش و در بخش اعظمی از عراق رطوبت خاک کمتر از $m^3/m^3 \cdot 0.15$ است. کمینه رطوبت $m^3/m^3 \cdot 0.045$ و همانند ماه‌های قبل در جنوب عراق مشاهده می‌شود؛ اما بیشینه رطوبت خاک علاوه بر منطقه پایکوهی شمال غرب حد فاصل رود زاب بزرگ تا رود فرات به صورت کانونی در بغداد نیز مشاهده می‌شود و برابر $m^3/m^3 \cdot 0.287$ است. میزان تغییرپذیری $31/8$ درصد و ضریب چولگی به بیشترین مقدار 0.656 رسیده است (شکل ۵، ماه می).

نقشه ماه ژوئن نشان می‌دهد که از میزان رطوبت خاک به شدت کاسته شده است؛ به طوری که متوسط رطوبت خاک در این ماه به $m^3/m^3 \cdot 0.114$ می‌رسد. مطابق ماه‌های پیشین کمینه رطوبت خاک $m^3/m^3 \cdot 0.028$ در جنوب عراق مشاهده می‌شود. بیشینه رطوبت خاک برخلاف ماه‌های قبل در منطقه پایکوهی شمال غرب مشاهده نمی‌شود. رطوبت خاک در ماه ژوئن در این منطقه به $m^3/m^3 \cdot 0.19$ رسیده است؛ در حالی که بیشینه رطوبت خاک در بغداد $m^3/m^3 \cdot 0.274$ مشاهده می‌شود که به نظر می‌رسد ناشی از فعالیت‌های انسانی است. در ماه ژوئن در بسیاری از گستره عراق رطوبت خاک به کمتر از $m^3/m^3 \cdot 0.12$ رسیده است. ضریب تغییرپذیری مکانی این ماه $26/3$ درصد و ضریب چولگی به 0.558 رسیده است که نسبت به دو ماه قبل کمتر شده است (شکل ۵، ماه ژوئن).

متوسط رطوبت خاک در ماه ژوئیه به $m^3/m^3 \cdot 0.111$ می‌رسد که باز هم نسبت به ماه‌های قبل کاهش یافته است. کمینه رطوبت خاک $m^3/m^3 \cdot 0.023$ است که مطابق روال ماه‌های پیشین در جنوب عراق مشاهده می‌شود. بیشینه رطوبت خاک هم مطابق ماه قبل $m^3/m^3 \cdot 0.274$ است که در بغداد دیده می‌شود. ضریب تغییرپذیری $24/2$ درصد و ضریب چولگی 0.646 است. رطوبت خاک در منطقه پایکوهی شمال شرق حداکثر به $m^3/m^3 \cdot 0.17$ می‌رسد. در بخش بزرگی از عراق رطوبت خاک کمتر از $m^3/m^3 \cdot 0.11$ است. در منطقه القائم در شمال غرب استان الانبار در جنوب محلی که رود فرات از سوریه وارد عراق می‌شود، رطوبت خاک بیشتر از $m^3/m^3 \cdot 0.18$ است. بررسی‌ها نشان داد که بالابودن رطوبت در این منطقه ناشی از آبیاری چرخشی (عقربه‌ای) در مزارع است. این موضوع از روی تصاویر گوگل ارث نیز قابل رؤیت است (شکل ۶، ماه ژوئیه).

می‌توان گفت ماه آگوست خشک‌ترین ماه به لحاظ رطوبت خاک در عراق است. متوسط رطوبت خاک در این ماه به $m^3/m^3 \cdot 0.11$ می‌رسد. کمینه رطوبت خاک $m^3/m^3 \cdot 0.022$ است که در جنوب عراق مشاهده می‌شود و بیشینه رطوبت خاک $m^3/m^3 \cdot 0.274$ است که مطابق ماه‌های ژوئن و ژوئیه در بغداد دیده می‌شود. تغییرپذیری مکانی در این ماه به $24/2$ درصد می‌رسد و ضریب چولگی مثبت نیز معادل 0.737 است که بیشترین مقدار در بین سایر ماه‌هاست.

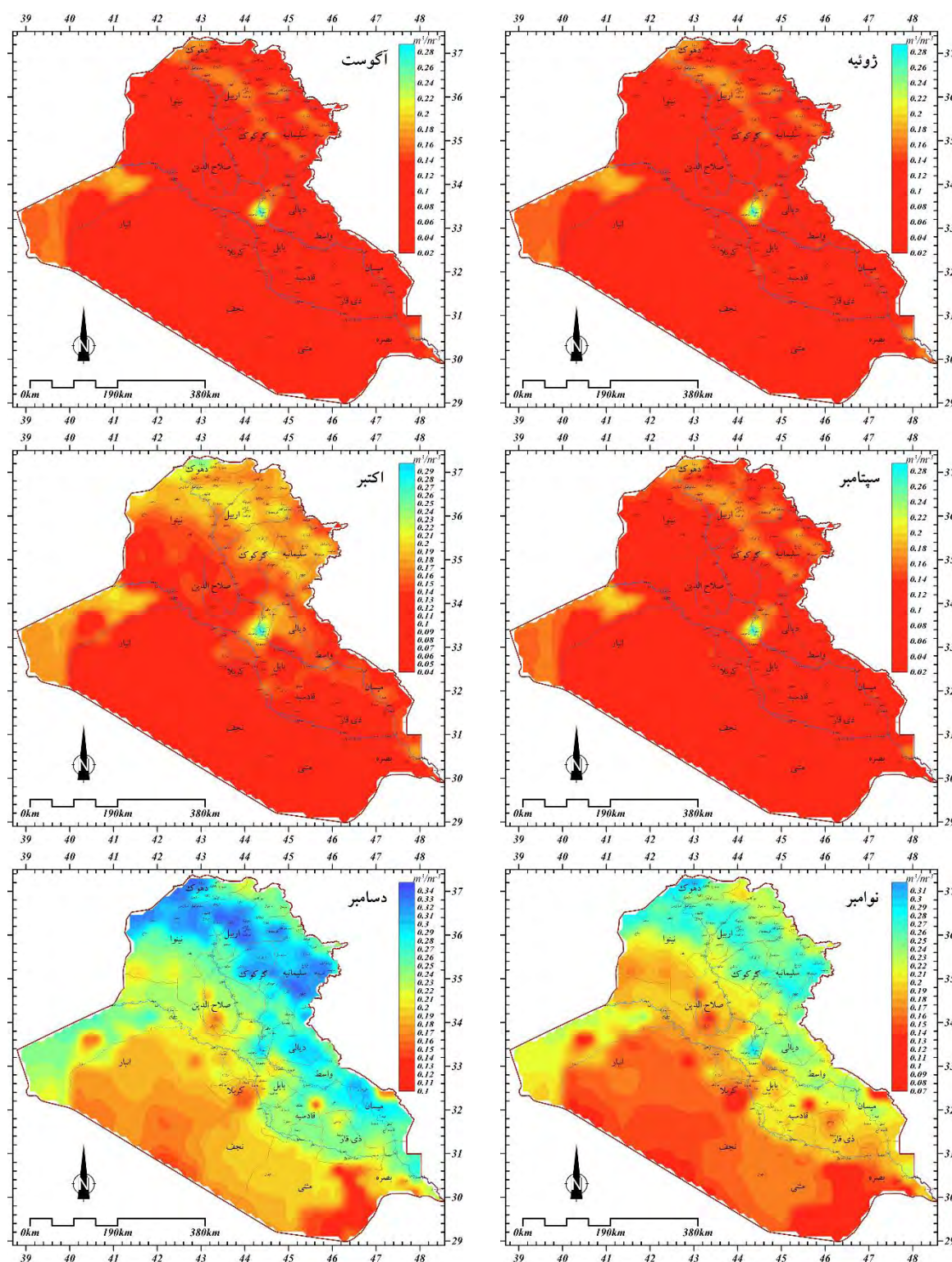
در منطقه پایکوهی شمال شرق رطوبت خاک به کمتر از $m^3/m^3 \cdot 0.16$ رسیده است؛ اما در منطقه القائم در شمال غرب الانبار رطوبت خاک به $m^3/m^3 \cdot 0.19$ نیز می‌رسد (شکل ۶، ماه آگوست).

میانگین رطوبت خاک در ماه سپتامبر اندکی افزایش یافته است و به $m^3/m^3 \cdot 0.114$ می‌رسد. کمینه رطوبت خاک در این ماه $m^3/m^3 \cdot 0.024$ است که در جنوب عراق مشاهده و بیشینه آن $m^3/m^3 \cdot 0.277$ است که در بغداد دیده می‌شود. رطوبت خاک در منطقه پایکوهی شمال شرق به $m^3/m^3 \cdot 0.17$ و در منطقه القائم در شمال غرب استان الانبار به $m^3/m^3 \cdot 0.19$ می‌رسد. در بیشتر بخش‌های عراق رطوبت خاک کمتر از $m^3/m^3 \cdot 0.11$ است (شکل ۶، ماه سپتامبر).

با فرارسیدن ماه اکتبر و شروع بارش‌ها مقدار رطوبت خاک نیز روبه افزایش می‌گذارد؛ به‌طوری که میانگین رطوبت خاک در این ماه به $m^3/m^3 \cdot 0.138$ می‌رسد. کمینه رطوبت خاک نیز $m^3/m^3 \cdot 0.044$ است که در جنوب عراق حادث شده است. بیشینه رطوبت خاک نیز به $m^3/m^3 \cdot 0.283$ می‌رسد که در بغداد مشاهده می‌شود. نکته مهم این است که ضریب چولگی نسبت به ماه‌های قبل بسیار کاهش یافته و به 0.273 رسیده است. رطوبت خاک در منطقه پایکوهی شمال شرق به بالای $m^3/m^3 \cdot 0.2$ می‌رسد و در منطقه القائم در شمال غرب استان الانبار نیز به بالای $m^3/m^3 \cdot 0.2$ رسیده است. در این ماه در بخش‌های وسیعی از عراق رطوبت خاک کمتر از $m^3/m^3 \cdot 0.13$ است (شکل ۶، ماه اکتبر).

در ماه نوامبر میزان رطوبت خاک به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد و الگوی دوره سرد به خود می‌گیرد. میانگین رطوبت خاک در این ماه به $m^3/m^3 \cdot 0.19$ می‌رسد. کمینه رطوبت خاک $m^3/m^3 \cdot 0.075$ است که در جنوب عراق مشاهده و بیشینه به $m^3/m^3 \cdot 0.307$ می‌رسد که در منطقه بایفه در شمال استان دهوک در مرز با ترکیه دیده می‌شود. در منطقه پایکوهی شمال شرق رطوبت به $m^3/m^3 \cdot 0.28$ می‌رسد که نسبت به ماه‌های گرم گستره بیشتری را فراگرفته است. در بغداد نیز که در ماه‌های قبل بیشینه رطوبت خاک را داشت، میزان رطوبت خاک به $m^3/m^3 \cdot 0.29$ رسیده است. در منطقه القائم نیز رطوبت خاک به $m^3/m^3 \cdot 0.22$ رسیده که نسبت به ماه قبل تغییر چشمگیری نکرده است. ضریب چولگی در این ماه به 0.2 رسیده است که کمترین مقدار در بین سایر ماه‌هاست (شکل ۶، ماه نوامبر).

الگوی پراکندگی مکانی رطوبت خاک در ماه دسامبر شبیه ماه‌های ژانویه و فوریه است. میانگین رطوبت خاک در این ماه به $m^3/m^3 \cdot 0.227$ می‌رسد که پس از ژانویه در رتبه دوم است. کمینه رطوبت خاک $m^3/m^3 \cdot 0.118$ است که از میانگین ماه‌های ژوئن تا سپتامبر بیشتر است و مطابق ماه‌های قبل در جنوب عراق مشاهده می‌شود. بیشینه رطوبت خاک $m^3/m^3 \cdot 0.336$ است که در منطقه پایکوهی شمال شرق عراق در منطقه خبات کلک در امتداد رود زاب بزرگ و در بخش‌هایی در استان‌های سلیمانیه، کرکوک، اربیل، شمال نینوا و دهوک مشاهده می‌شود. در منطقه القائم رطوبت خاک به $m^3/m^3 \cdot 0.26$ می‌رسد. در جنوب رود فرات رطوبت خاک به $m^3/m^3 \cdot 0.19$ می‌رسد و در منطقه بین فرات تا مرز ایران رطوبت خاک در بخش‌هایی به $m^3/m^3 \cdot 0.29$ می‌رسد (شکل ۶، ماه دسامبر).



شکل ۶: نقشه میانگین بلندمدت پراکندگی مکانی مقدارهای رطوبت حجمی خاک شش ماه دوم (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Figure 6: Long-term average of the spatial distribution of volumetric soil moisture values in the second six months

تغییرات مکانی روند رطوبت حجمی خاک ماهانه

در ارزیابی روند علاوه بر جهت روند و معناداری آن شدت روند نیز بسیار مهم است. در نقشه‌های ماهانه روند رطوبت خاک و مقدار شیب پیکسل‌هایی که روند معنادار داشته، آورده شده است؛ از این رو جهت روند و شدت روند را آشکار می‌کند. شدت روند از این نظر اهمیت دارد که پیکسل‌هایی که شیب روند در آنها بیشتر باشد، به معنای این است که در معرض تغییرات بیشتری قرار داشته است و توجه به آنها اهمیت بیشتری دارد. توجه به گستره‌های جغرافیایی تحت روندهای معنادار کاهش یا افزایشی امکان ارزیابی دقیق تر و تحلیل و تفسیر واقع‌بینانه تغییرات را امکان‌پذیر می‌کند.

در ماه ژانویه حدود ۵۴ درصد عراق در معرض روندهای کاهش رطوبت خاک قرار داشته است. روندهای کاهش با جهتی شمال غرب-جنوب شرق و در امتداد رودخانه‌های دجله و فرات گسترده شده و استان‌های دیالی، واسط، میسان، قادسیه، بابل، ذی‌قار، بصره و مثنی را دربر گرفته است. شدیدترین روند کاهش در اطراف دریاچه الرزازه و دریاچه الثرثار مشاهده می‌شود. روندهای افزایشی بسیار ناچیز بوده و کمتر از ۱ درصد از وسعت عراق را شامل می‌شود و بیشتر در منطقه کوهستانی شمال غرب عراق پراکنده است. در مجموع، حدود ۴۵ درصد عراق بدون روند بود و بخش‌های شمالی و شمال شرقی به ویژه استان‌های سلیمانیه، اربیل و دهوک و بخش‌های غربی عراق را شامل می‌شود (شکل ۷، ماه ژانویه).

روندها در ماه فوریه حدود ۴۲ درصد روند کاهش داشته است. الگوی نقشه روند ماه فوریه شبیه الگوی روند ماه ژانویه است. با این تفاوت که شدت روند در این ماه کمتر است. گستره جغرافیایی روندهای کاهش با روند شمال غرب-جنوب شرق و در امتداد رودخانه‌های دجله و فرات گسترده شده است. روندهای کاهش در امتداد رود دجله بیشتر جلوه می‌کند و استان‌های مرکزی و شرقی عراق به ویژه استان‌های دیالی، واسط، میسان، بابل، قادسیه، ذی‌قار و مثنی را دربر می‌گیرد. در این ماه نیز بیشترین شدت روند کاهش در اطراف دریاچه الرزازه مشاهده می‌شود. روندهای افزایشی بسیار ناچیز بوده و حدود ۰/۷ درصد است که در شرق استان سلیمانیه مشاهده می‌شود. حدود ۵۸ درصد از مساحت عراق بدون روند است و بیشتر استان‌های سلیمانیه، اربیل، دهوک و الانبار را دربر می‌گیرد (شکل ۷، ماه فوریه).

در ماه مارس حدود ۲۴ درصد عراق در معرض روندهای کاهش بوده است. گستره جغرافیایی روندهای کاهش روند شمال غرب-جنوب شرق داشته است. این گستره جغرافیایی به ویژه در امتداد رود دجله در استان‌های دیالی، واسط و میسان تراکم و شدت بیشتری دارد. این موضوع می‌تواند ناشی از کاهش دبی رودخانه در اثر سدسازی‌های ترکیه (سد ایلسو) بر روی سرشاخه‌های این رودخانه باشد. با ساخت سد ایلسو ۵۶ درصد میزان آب ورودی دجله سهم حوضچه پشت سد و از آن ترکیه می‌شود. در این ماه نیز بیشترین شدت روند کاهش در اطراف دریاچه الرزازه است که می‌تواند نشان‌دهنده خشک شدن بخش‌هایی از آن باشد. روندهای افزایشی هرچند ناچیز است، نسبت به دو ماه قبل افزایش یافته است. روندهای افزایشی در منطقه کوهستانی شمال شرق عراق دیده و ۲/۶ درصد از وسعت عراق را شامل می‌شود (شکل ۷، ماه مارس).

در ماه آوریل حدود ۱۲ درصد از مساحت عراق روند کاهشی داشته است. روندهای کاهشی الگوی جغرافیایی خاصی داشته و بیشتر در امتداد رودخانه دجله گسترده شده است و استان‌های دیالی، واسط، میسان و بخش‌هایی از بصره را شامل می‌شود. روندهای کاهشی در اطراف دریاچه الرزازه و دریاچه الثرثار مشاهده می‌شود. روندهای افزایشی حدود ۱/۳ درصد از وسعت عراق را شامل و در شمال استان سلیمانیه، دهوک مشاهده می‌شود. در این ماه حدود ۸۷ درصد از وسعت عراق بدون روند بوده است که بیشتر شامل استان‌های مثنی، قادسیه، نجف، بابل، بغداد، الانبار، نینوا، اربیل و کرکوک است (شکل ۷، ماه آوریل).

در ماه می نیز حدود ۱۲ درصد از مساحت عراق روندهای کاهشی داشته است. روندهای کاهشی همانند ماه قبل از الگوی جغرافیایی خاصی پیروی می‌کند و بیشتر در امتداد رودخانه دجله در استان‌های واسط، میسان، ذی‌قار، بخش‌هایی از بصره و همینطور در اطراف دریاچه الرزازه و دریاچه الثرثار و قسمت‌هایی از استان کرکوک مشاهده می‌شود. الگوی روندهای افزایشی در این ماه تغییر یافته و در جنوب عراق در نزدیکی مرز کویت پراکنده است و ۲/۳ درصد از وسعت عراق را شامل می‌شود. در ماه می حدود ۸۶ درصد از مساحت عراق بدون روند است (جدول ۱) که استان‌های مثنی، نجف، قادسیه، بابل، بغداد، دیالی، الانبار، نینوا، اربیل و سلیمانیه را شامل می‌شود (شکل ۷، ماه می).

در ماه ژوئن از گستره روندهای کاهشی کاسته شده و بر گستره روندهای افزایشی افزوده شده است. در این ماه روندهای کاهشی ۱۰/۶ درصد از وسعت عراق را دربرگرفته و الگوی پراکندگی جغرافیایی آن همانند ماه‌های قبل است. در اطراف رودخانه دجله به ویژه در استان واسط، میسان، دیالی، ذی‌قار و در استان کربلا در اطراف دریاچه الرزازه و همینطور در اطراف دریاچه الثرثار، روندهای کاهشی مشاهده می‌شود؛ اما روندهای افزایشی حدود ۱۳/۲ درصد وسعت عراق را شامل می‌شود. پراکندگی جغرافیایی بیشتر در جنوب عراق در استان‌های بصره، مثنی، بخشی از نجف و بخش‌های پراکنده‌ای در استان الانبار به‌ویژه در منطقه کشاورزی القائم مشاهده می‌شود (شکل ۷، ماه ژوئن). در این ماه حدود ۷۶ درصد عراق بدون روند است.

در ماه ژوئیه گستره روندهای افزایشی بیشتر از روندهای کاهشی است. روندهای کاهشی ۷/۴ درصد از وسعت عراق را می‌پوشاند و بیشتر در اطراف دریاچه الرزازه و دریاچه الثرثار و بخش‌هایی از استان واسط، میسان و بابل مشاهده می‌شود. روندهای افزایشی حدود ۱۵/۷ درصد از وسعت عراق را شامل و در سه پهنه جغرافیایی عراق مشاهده می‌شود. بخش‌های جنوبی عراق به‌صورت نواری در امتداد مرز کویت در استان‌های بصره و مثنی، در منطقه کشاورزی القائم در غرب استان الانبار و به‌صورت پراکنده در شمال شرق عراق در استان‌های سلیمانیه، کرکوک و اربیل مشاهده می‌شود. در ماه ژوئیه حدود ۷۷ درصد از وسعت عراق بدون روند است (شکل ۸، ماه ژوئیه و جدول ۱).

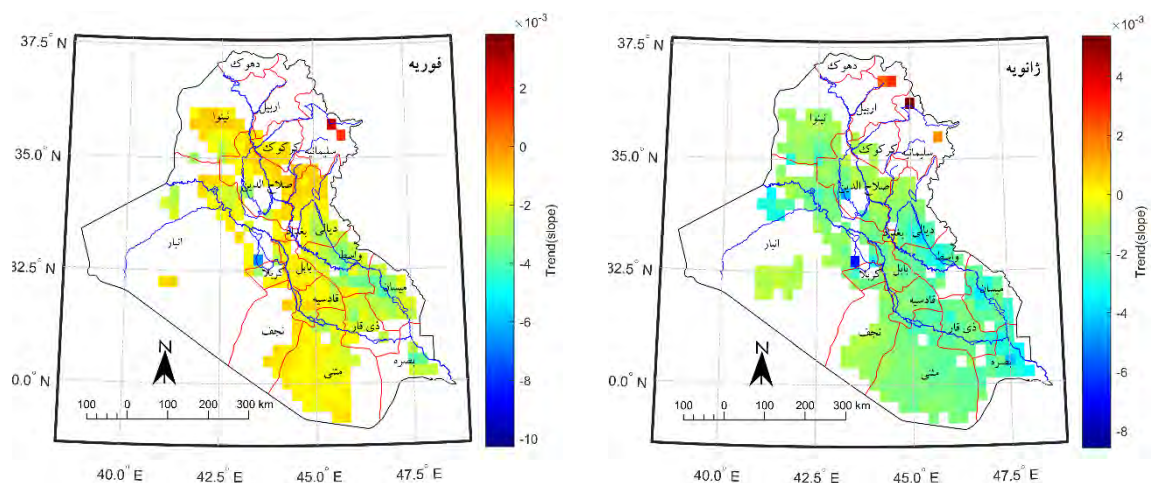
در ماه آگوست روندهای کاهشی ۶ درصد عراق را پوشش می‌دهد و بیشتر در اطراف دریاچه الثرثار، دریاچه الرزازه و جنوب استان ذی‌قار و شمال استان مثنی مشاهده می‌شود. روندهای افزایشی ۲۰/۳ درصد عراق را دربرمی‌گیرد و به‌صورت پراکنده در جنوب عراق در استان بصره و بخش‌های کوچکی از جنوب استان مثنی، منطقه القائم در غرب استان الانبار، شمال استان دیالی، بخش‌هایی از استان‌های سلیمانیه و کرکوک، شمال شرق استان صلاح‌الدین و اربیل مشاهده می‌شود (شکل ۸، ماه آگوست). در این ماه حدود ۷۴ درصد از وسعت عراق بدون روند است (جدول ۱).

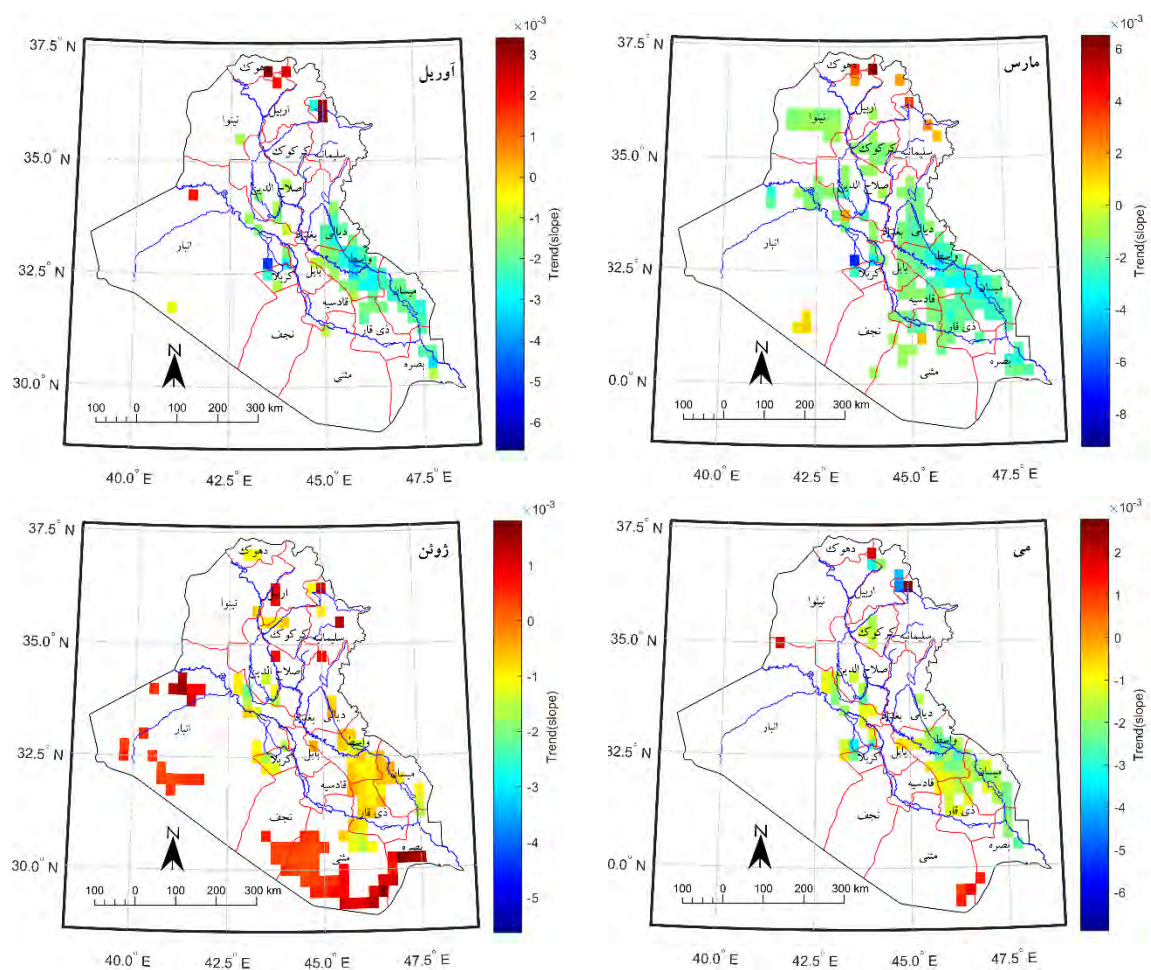
الگوی پراکندگی روند ماه سپتامبر به الگوی روند ماه آگوست شبیه است. در این ماه روندهای کاهشی ۸ درصد از وسعت عراق را پوشش می دهد و بیشتر در اطراف دریاچه الرزازه، دریاچه الثرثار و در امتداد رود فرات در استان قادسیه، شمال استان مثنی و مرکز ذی قار مشاهده می شود. روندهای افزایشی ۱۹/۳ درصد از وسعت عراق را شامل و در جنوب عراق در استان بصره، جنوب استان مثنی، در منطقه القائم در غرب الانبار و شمال دیالی و بخش هایی از استان های سلیمانیه، کرکوک و اربیل مشاهده می شود (شکل ۸، ماه سپتامبر). در ماه سپتامبر حدود ۷۳ درصد از وسعت عراق بدون روند است.

در ماه اکتبر روندهای کاهشی ۱۲ درصد از وسعت عراق را شامل می شود که بیشتر در اطراف دریاچه الرزازه، دریاچه الثرثار و در امتداد رود دجله در استان دیالی و واسط، بخش هایی از استان قادسیه و ذی قار مشاهده می شود. روندهای افزایشی ۵/۴ درصد از وسعت عراق را شامل می شود که بیشتر در اطراف بصره، در منطقه القائم، در سلیمانیه و بخش هایی از اربیل مشاهده می شود. در مجموع، حدود ۸۳ درصد از مساحت عراق بدون روند است (شکل ۸، ماه اکتبر، جدول ۱).

نقشه روند ماه نوامبر کمترین گستره روندهای کاهشی و افزایشی را در بین سایر ماه ها نشان می دهد. در این ماه ۹۷ درصد گستره عراق بدون روند بوده است. روندهای کاهشی ۱/۵ درصد از وسعت عراق را در برمی گیرد که بیشتر در اطراف دریاچه الرزازه و در امتداد رود فرات حد فاصل سد حدیثه تا دریاچه حبانیه و در مرکز استان واسط مشاهده می شود. روندهای افزایشی نیز ۱/۵ درصد وسعت عراق را شامل و بیشتر در اطراف بصره، شمال اربیل و جنوب دهوک مشاهده می شود (شکل ۸، ماه نوامبر).

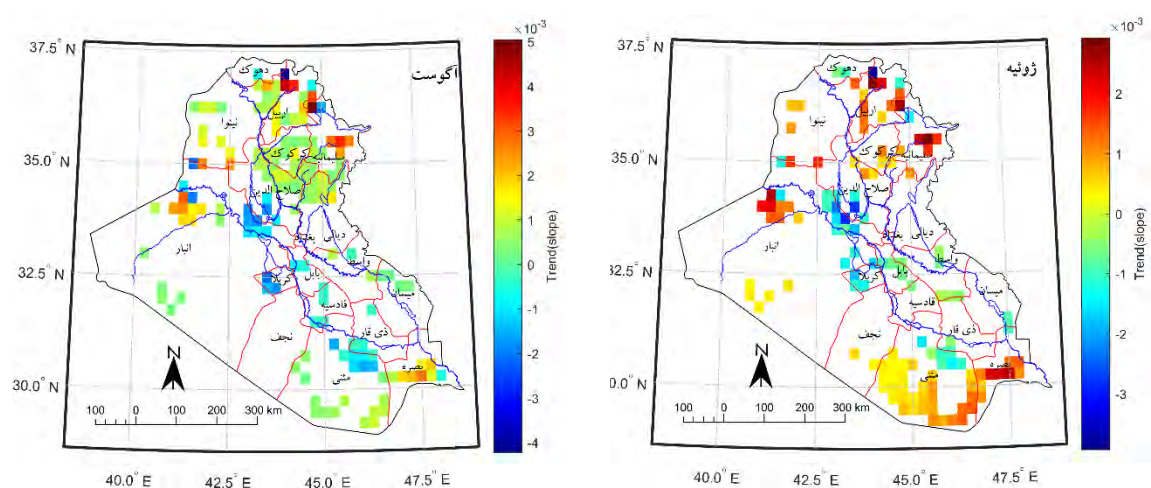
الگوی نقشه روند ماه دسامبر به الگوی نقشه روند ماه آوریل شبیه است. در این ماه ۱۱/۵ درصد از وسعت عراق روند کاهشی داشته است که بیشتر در امتداد رودهای دجله و فرات در اطراف دریاچه الرزازه، زیر دست دریاچه الحدیثه و در استان دیالی، واسط و میسان مشاهده می شود. روندهای افزایشی ۱/۶ درصد از وسعت عراق را شامل که در شمال عراق در استان دهوک دیده می شود. در این ماه ۸۷ درصد از عراق بدون روند بوده است (شکل ۸، ماه دسامبر).

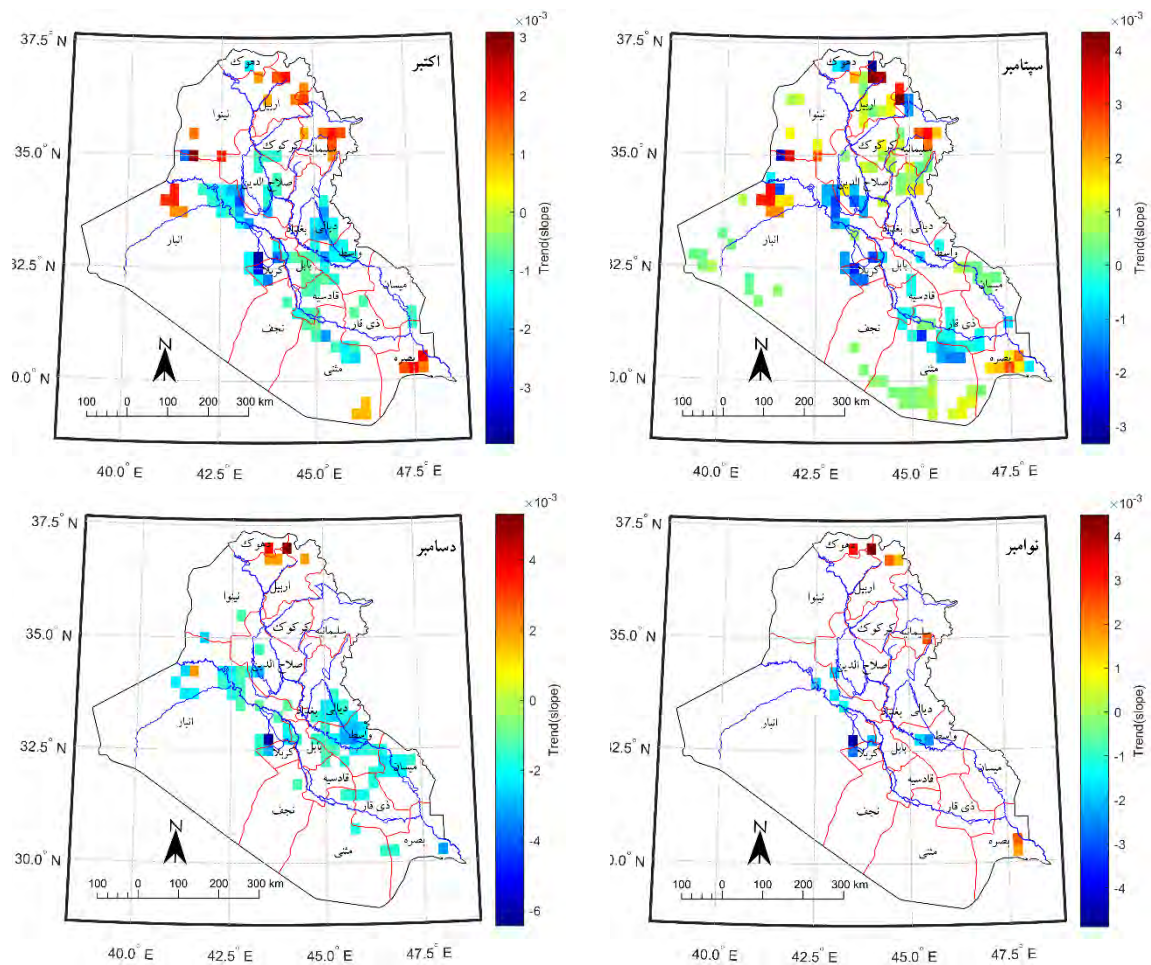




شکل ۷: نقشه شیب روند رطوبت حجمی خاک در شش ماهه اول (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Figure 7: Slope map of volumetric soil moisture trend in the first six months





شکل ۸: نقشه شیب روند رطوبت حجمی خاک در شش ماهه دوم (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Figure 8: Slope of volumetric soil moisture trend in the second six months

شکل ۹ براساس اطلاعات جدول ۱ تهیه و ترسیم شده است. این شکل نشان می‌دهد که بیشترین روندهای کاهشی به ترتیب در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس بوده است و با حرکت به سمت ماه‌های دوره گرم سال از وسعت پهنه‌های با روندکاهشی کاسته می‌شود. در عوض، روندهای افزایشی رطوبت خاک در ماه‌های دوره سرد سال گستره اندکی را دربرمی‌گیرد و در ماه‌های دوره گرم سال تا بیش از ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.

جدول ۱: مؤلفه‌های روند مکانی ماهانه و سالانه رطوبت حجمی خاک در عراق

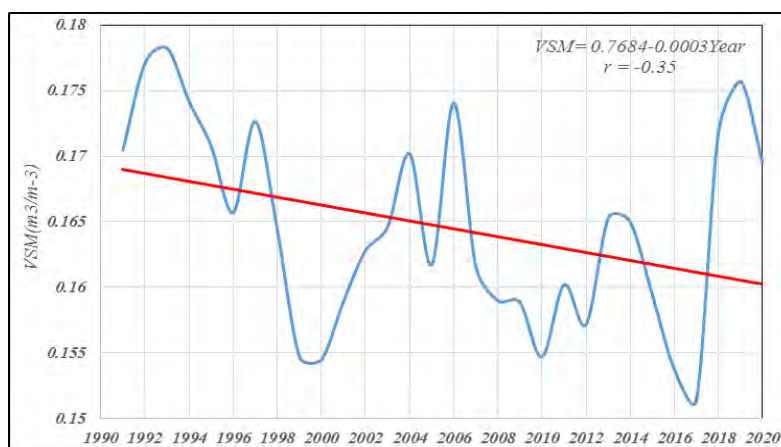
Table 1: Components of monthly and annual spatial trend of volumetric soil moisture in Iraq

ماه	روند افزایشی	تعداد پیکسل	درصد مساحت	روند کاهشی	تعداد پیکسل	درصد مساحت	بدون روند
ژانویه	۶	۰/۹	۳۷۰	۵۳/۸	۳۱۲	۴۵/۳	بدون روند
فوریه	۵	۰/۷	۲۸۶	۴۱/۶	۳۹۷	۵۷/۷	بدون روند
مارس	۱۸	۲/۶	۱۶۴	۲۳/۸	۵۰۶	۷۳/۵	بدون روند
آوریل	۹	۱/۳	۸۱	۱۱/۸	۵۹۸	۸۶/۹	بدون روند
می	۱۶	۲/۳	۸۱	۱۱/۸	۵۹۱	۸۵/۹	بدون روند
ژوئن	۹۱	۱۳/۲	۷۳	۱۰/۶	۵۲۴	۷۶/۲	بدون روند
ژوئیه	۱۰۸	۱۵/۷	۵۱	۷/۴	۵۲۹	۷۶/۹	بدون روند
آگوست	۱۴۰	۲۰/۳	۴۱	۶	۵۰۷	۷۳/۷	بدون روند
سپتامبر	۱۳۳	۱۹/۳	۵۵	۸	۵۰۰	۷۲/۷	بدون روند
اکتبر	۳۷	۵/۴	۸۲	۱۱/۹	۵۶۹	۸۲/۷	بدون روند
نوامبر	۱۰	۱/۵	۱۰	۱/۵	۶۶۸	۹۷/۱	بدون روند
دسامبر	۱۱	۱/۶	۷۹	۱۱/۵	۵۹۸	۸۶/۹	بدون روند
سالانه	۲۳	۳/۳	۱۷۱	۲۴/۹	۴۹۴	۷۱/۸	بدون روند

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲

تحلیل زمانی

برآوردها نشان داد که میانگین رطوبت حجمی خاک در عراق طی دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ معادل ۰/۱۶۴۶ متر مکعب بر متر مکعب بوده است. طی این دوره بیشینه رطوبت خاک در سال ۱۹۹۳ معادل ۰/۱۷۸۲ و کمینه آن در سال ۲۰۱۷ برابر با ۰/۱۵۱۴ مترمکعب بر متر مکعب بوده است. در ادامه، نمودارهای ماهانه رطوبت حجمی خاک در عراق بررسی می‌شود (شکل ۹).



شکل ۹: سری زمانی سالانه تغییرات رطوبت حجمی خاک در عراق (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Figure 9: Annual time series of volume soil moisture changes in Iraq

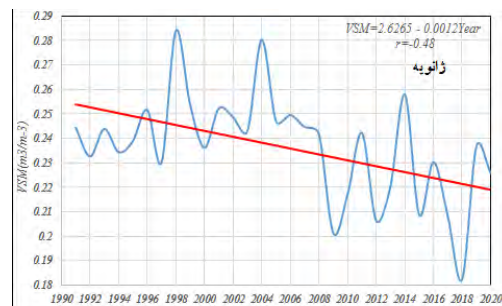
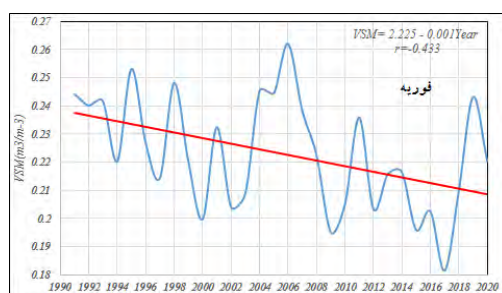
از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۸ رطوبت حجمی خاک ماه ژانویه در دامنه بین ۰/۲۴ تا ۰/۲۵ مترمکعب بر متر مکعب در نوسان بوده است؛ در حالی که پس از سال ۲۰۰۸ با کاهش چشمگیری مواجه شده و بین ۰/۲۱ تا ۰/۲۳ در نوسان بوده است. در این دوره دامنه نوسان کلی نیز افزایش یافته و بین ۰/۱۸ تا ۰/۲۶ بوده است. ضریب همبستگی ماه ۰/۴۸- است که در سطح ۹۹ درصد معنادار است. به عبارت دیگر، در مجموع ماه ژانویه با روند کاهشی معنادار همراه بوده است (شکل ۱۰، ماه ژانویه).

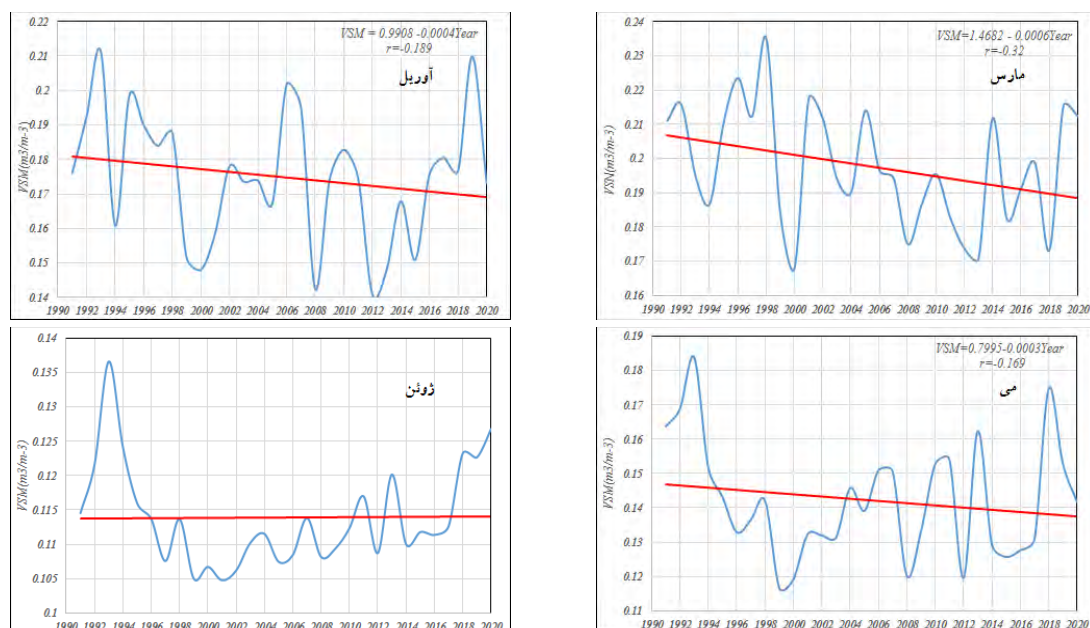
در ماه فوریه از ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۳ روند کاهشی و سپس طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۶ روند افزایشی و مجدد از سال ۲۰۰۷ به بعد روندهای کاهشی تکرار شده است. حد نوسان در ابتدای دوره بین ۰/۲۳ تا ۰/۲۴ بوده که در انتهای دوره به حدود ۰/۲ تا ۰/۲۱ رسیده است. در مجموع، رطوبت حجمی خاک در ماه فوریه روند کاهشی داشته که باتوجه به ضریب همبستگی ۰/۴۳۳- در سطح ۹۵ درصد معنادار است (شکل ۱۰، ماه فوریه).

نمودار ماه مارس نشان می‌دهد که طی دوره مطالعه شده بیشترین مقدار رطوبت حجمی خاک در سال ۱۹۹۸ و کمترین مقدار آن در سال ۲۰۰۰ رخ داده است. این ماه نیز همانند ماه‌های ژانویه و فوریه روند کاهشی را نشان می‌دهد. هرچند که روندهای کاهشی در سطح ۹۵ درصد معنادار نیست. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۴ رطوبت خاک در سطح ۰/۲ تا ۰/۲۱ در نوسان بوده است؛ اما از سال ۲۰۰۵ به بعد در سطحی پایین‌تر در دامنه ۰/۱۸ تا ۰/۱۹ در نوسان بوده است (شکل ۱۰، ماه مارس).

ماه آوریل نیز همانند ماه‌های قبلی روند کاهشی رطوبت خاک را داشته است؛ اما با شدت بسیار کمتر قابل مشاهده است. در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲ کمترین مقدارها و سال‌های ۱۹۹۳، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۹ بیشترین مقدارهای رطوبت حجمی خاک ثبت شده است. از سال ۲۰۰۶ به بعد نوسان رطوبت خاک بیشتر شده و در سطح پایین‌تری در دامنه ۰/۱۵ تا ۰/۱۷ در نوسان بوده است (شکل ۱۰، ماه آوریل).

در ماه می روند کاهشی ضعیفی مشاهده می‌شود. پس از افزایش قابل توجه در سال ۱۹۹۳ مقدار رطوبت خاک روبه کاهش گذاشته و به کمترین مقدار خود در سال ۱۹۹۱ رسیده است. پس از آن با افزایش اندک در سطح ۰/۱۴ تا ۰/۱۵ در نوسان بوده است؛ اما دامنه نوسان چشمگیرتر از قبل بوده است؛ به طوری که بین ۰/۱۲ تا ۰/۱۷ تغییر کرده است (شکل ۱۰، ماه می).





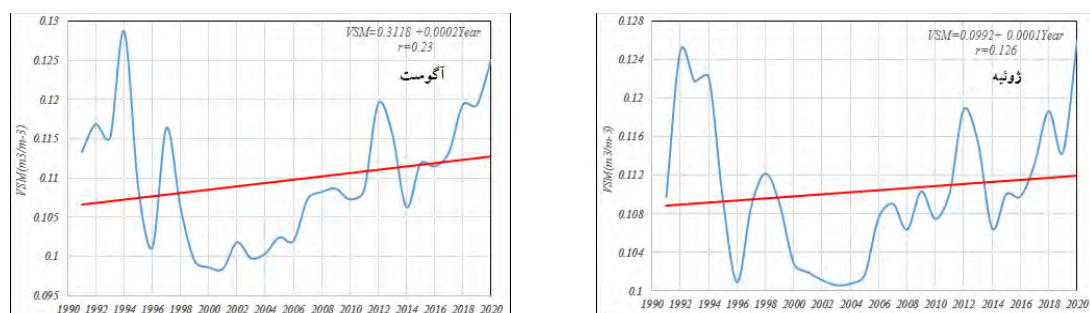
شکل ۱۰: سری زمانی تغییرات رطوبت حجمی خاک در شش ماهه اول (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

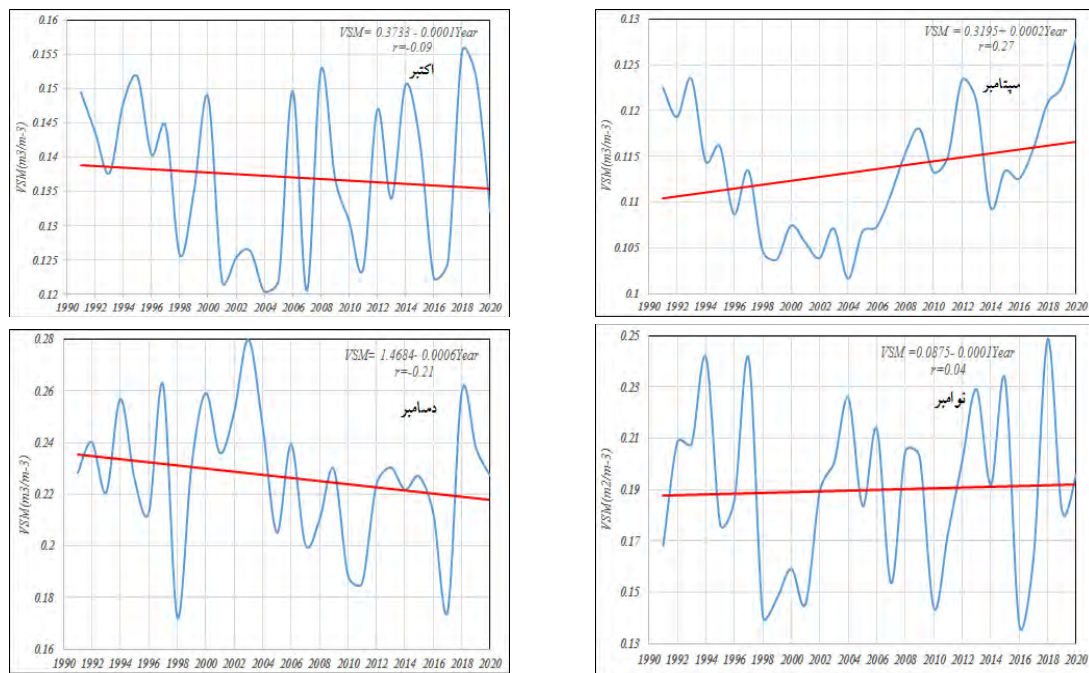
Figure 10: Time series of volume soil moisture changes in the first six months

ماه ژوئن که درواقع، آغاز دوره گرم سال در عراق است، هیچ‌گونه روندی در سری زمانی مشاهده نشد. درواقع، پس از یک افزایش چشمگیر در سال ۱۹۹۳ رطوبت خاک کاهش یافته و از آن پس در سطح ۰/۱۱ در نوسان بوده است (شکل ۱۰، ماه ژوئن).

به نظر می‌رسد که رفتار سری زمانی رطوبت خاک در دوره سرد و گرم به‌طور کامل متفاوت است. در دوره سرد شاهد روندهای کاهشی بودیم که به‌تدریج به سمت ماه‌های گرم از شدت روند کاهشی کاسته شده است؛ به‌طوری که رطوبت حجمی خاک در ماه ژوئن به حالت بدون روند رسید (شکل ۱۰، ماه ژوئن). اما از ماه ژوئیه رفتار سری زمانی رطوبت خاک معکوس شد؛ به‌طوری که شاهد روند افزایشی خفیفی در سری زمانی این ماه هستیم (شکل ۱۱، ماه ژوئیه).

درواقع، رفتار سری زمانی ماه ژوئیه را می‌توان به دو دوره کاهشی و افزایشی تفکیک کرد. از سال ۱۹۹۴ تا سال ۲۰۰۵ شاهد رفتار کاهشی هستیم که کمینه آن سال ۲۰۰۳ است و در آن مقدار رطوبت خاک به ۰/۱ می‌رسد. از سال ۲۰۰۶ به بعد روند افزایشی در سری زمانی قابل رؤیت است (شکل ۱۱، ماه ژوئیه).





شکل ۱۱: سری زمانی تغییرات رطوبت حجمی خاک در شش ماهه دوم (منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲)

Figure 11: Time series of volume soil moisture changes in the second six months

الگوی رفتاری سری زمانی رطوبت خاک ماه آگوست شبیه ماه ژوئیه است؛ یعنی پس از اینکه شاهد یک دوره کاهشی از سال ۱۹۹۴ تا سال ۲۰۰۶ بودیم از سال ۲۰۰۷ به بعد مقدار رطوبت خاک روبه افزایش گذاشته و از حدود کمتر از ۰/۱ به مقدار بیش از ۰/۱۲۵ رسیده است. گفتنی است که شدت روند افزایشی ماه آگوست ($r=0/23$) نسبت به ماه ژوئیه ($r=0/126$) بیشتر شده است (شکل ۱۱، ماه ژوئیه و آگوست).

الگوی رفتار سری زمانی ماه سپتامبر نیز شبیه ماه‌های ژوئیه و آگوست است؛ یعنی ابتدا یک دوره کاهشی از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۵ سپس یک دوره افزایشی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۲ سپس در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ دوره کاهشی و مجدد دوره افزایشی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ ادامه یافته است (شکل ۱۱، ماه سپتامبر). گفتنی است شدت روند در ماه سپتامبر نسبت به دو ماه ژوئیه و آگوست بیشتر شده است.

الگوی رفتاری سری زمانی ماه اکتبر به هیچ‌کدام از ماه‌های قبل شباهت ندارد. در این ماه همانند ماه ژوئن روندی مشاهده نمی‌شود؛ اما نکته مهم این است که دامنه تغییرات رطوبت خاک در این ماه بسیار زیاد است و از ۰/۱۲ تا ۰/۱۵۵ در نوسان بوده است. نکته مهم دیگر این است که پس از یکسال افزایشی یک سال کاهشی مشاهده می‌شود و این وضعیت به‌طور تقریبی، در طول دوره تکرار شده است (شکل ۱۱، ماه اکتبر).

الگوی رفتاری سری زمانی ماه نوامبر بسیار به الگوی ماه اکتبر شبیه است. در این ماه نیز همانند ماه اکتبر روندی مشاهده نمی‌شود و دامنه تغییرات رطوبت خاک زیاد است. در این ماه نیز پس از یکسال افزایشی یک سال کاهشی مشاهده می‌شود (شکل ۱۱، ماه نوامبر).

الگوی رفتاری سری زمانی ماه دسامبر شبیه ماه فوریه است در این ماه نیز روند کاهشی مشاهده می‌شود؛ اما برخلاف ماه فوریه معنادار نیست. دوره کاهشی بین سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۷ چشمگیرتر است. هرچند در سال ۱۹۹۸ نیز کاهش چشمگیری مشاهده می‌شود، تداوم نداشته است (شکل ۱۱، ماه دسامبر). برای ارزیابی وضعیت روند سری زمانی ماهانه رطوبت حجمی خاک در عراق سری زمانی هر ماه به‌طور جداگانه مورد ارزیابی روند رگرسیون خطی قرار گرفت و نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است. این جدول نشان می‌دهد که ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می و دسامبر روند منفی و ماه‌های ژوئن، ژوئیه، آگوست، سپتامبر و نوامبر روند مثبت داشته است؛ اما تنها روند کاهشی دو ماه ژانویه و فوریه در سطح ۹۵ درصد معنادار است و روندهای سایر ماه‌ها به‌لحاظ آماری معنادار نیست. در مجموع، می‌توان گفت که ماه‌های دوره سرد روند کاهشی داشته که در دوره گرم معکوس شده و با روند افزایشی ضعیفی همراه شده است (جدول ۲).

جدول ۲: مؤلفه‌های روند سری زمانی ماهانه و سالانه رطوبت حجمی خاک در عراق

Table 2: Components of monthly and annual time series trend of volumetric soil moisture in Iraq

ماه	شیب خط	حد بالا	حد پایین	روند
ژانویه	-۰/۰۰۱۱۹	-۰/۰۰۰۳۶	-۰/۰۰۲۰۳	-۱
فوریه	-۰/۰۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۱۹	-۰/۰۰۱۷۹	-۱
مارس	-۰/۰۰۰۶۳	۰/۰۰۰۰۹	-۰/۰۰۱۳۶	۰
آوریل	-۰/۰۰۰۴۱	۰/۰۰۰۴۱	-۰/۰۰۱۲۳	۰
می	-۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۰۰۴۱	-۰/۰۰۱۰۷	۰
ژوئن	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳۳	-۰/۰۰۰۳۲	۰
ژوئیه	۰/۰۰۰۱۰	۰/۰۰۰۴۲	-۰/۰۰۰۲۱	۰
آگوست	۰/۰۰۰۲۱	۰/۰۰۰۵۶	-۰/۰۰۰۱۴	۰
سپتامبر	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۵۱	-۰/۰۰۰۰۸	۰
اکتبر	-۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۴۰	-۰/۰۰۰۶۳	۰
نوامبر	۰/۰۰۰۱۴	۰/۰۰۱۵۶	-۰/۰۰۱۲۸	۰
دسامبر	-۰/۰۰۰۶۲	۰/۰۰۰۵۰	-۰/۰۰۱۷۳	۰
سالانه	-۰/۰۰۰۳۰	۰/۰۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۶۲	۰

منبع: نویسندگان، ۱۴۰۲

نتیجه‌گیری

محققان در پژوهش حاضر رطوبت حجمی خاک را در دو بخش واکاوی زمانی و مکانی در عراق ارزیابی کردند. بررسی سری زمانی سالانه رطوبت خاک نشان داد که رطوبت خاک در مجموع روند کاهشی داشته است. تغییرات سالانه رطوبت خاک با تغییرات سالانه دما و بارش مرتبط است. می‌توان گفت تغییرات رطوبت حجمی خاک تحت تأثیر تغییرات بارش سالانه قرار دارد. این موضوع با نتایج کار کشاورز و همکاران (۱۳۹۰) همسوست. بررسی‌ها نشان داد که دمای بیشینه رابطه قوی‌تری را با رطوبت حجمی خاک نشان می‌دهد. این بدان معناست دمای بیشینه که

در بعد از ظهر حادث می شود با میزان تبخیر از سطح خاک ارتباط بهتر و مستحکم تری دارد؛ از این رو می توان نتیجه گرفت که با افزایش دمای بیشینه در روز تحت تأثیر گرمایش جهانی رطوبت بیشتری از خاک سطحی ابتدا تبخیر می شود و سپس از دست خواهد رفت. بررسی سری زمانی ماهانه نشان داد که رطوبت حجمی خاک در ماه های گرم کاهش و در ماه های سرد افزایش یافته است؛ به طوری که مقدارهای رطوبت خاک در ماه های سرد بیش از دو برابر ماه های گرم است.

ارزیابی روند سری زمانی ماهانه رطوبت حجمی خاک در عراق نشان داد که ماه های ژانویه، فوریه، مارس، آوریل، می و دسامبر روند منفی و ماه های ژوئن، ژوئیه، آگوست، سپتامبر و نوامبر روند مثبت داشته است؛ اما تنها روند کاهشی دو ماه ژانویه و فوریه در سطح ۹۵ درصد معنادار است و روندهای سایر ماه ها به لحاظ آماری معنادار نیست. در مجموع، می توان گفت که ماه های دوره سرد روند کاهشی داشته که در دوره گرم معکوس شده و با روند افزایشی ضعیفی همراه شده است. میانگین مکانی سالانه رطوبت حجمی خاک در عراق m^3/m^3 ۰/۱۶۴ است که بین ۰/۰۶۸ تا m^3/m^3 ۰/۲۸۶ متغیر است. کمترین مقدار رطوبت حجمی خاک در جنوب عراق در مرز با کویت و بیشترین رطوبت حجمی خاک در استان بغداد است که به صورت کانونی بوده و به سمت اطراف کاهش یافته است. در منطقه پایکوهی در محدوده استان های سلیمانیه، کرکوک، اربیل، دهوک و نیمه شمالی استان نینوا میزان رطوبت خاک به بالای m^3/m^3 ۰/۲ می رسد و در بخش هایی از m^3/m^3 ۰/۲۶ نیز فراتر می رود. در مجموع، می توان گفت رطوبت حجمی خاک در عراق تا حدودی روند شمال شرق-جنوب غرب داشته و از سمت شمال شرق به جنوب غرب از مقدار آن کاسته شده است. این وضعیت تا حدودی تحت تأثیر پیکربندی ناهمواری ها و موقعیت جغرافیایی رودخانه های دجله و فرات است. رژیم تغییرات ماهانه رطوبت حجمی خاک در عراق از الگوی رژیم بارندگی ماهانه تبعیت می کند؛ به طوری که در دوره سرد سال افزایش می یابد و در ماه های گرم سال به کمترین مقدار می رسد. الگوی پراکندگی مکانی رطوبت خاک در ماه های ژانویه، فوریه و دسامبر شبیه یکدیگر است. در ماه های آوریل تا می از گستره رطوبت خاک به سمت مناطق شمال شرق کاسته می شود؛ به طوری که در ماه های ژوئن تا سپتامبر رطوبت خاک به حداقل می رسد و تنها در محدوده استان بغداد به طور کانونی رطوبت خاک بالاست. در مجموع، می توان گفت الگوی پراکندگی رطوبت خاک در ماه های گرم سال شبیه یکدیگر است. با فرا رسیدن ماه اکتبر بر میزان رطوبت خاک از سمت شمال شرق افزوده می شود و آرام آرام با روندی از سمت شمال شرق به سمت جنوب غرب بر میزان رطوبت خاک افزوده می شود. در نقشه های ماهانه روند رطوبت خاک و مقدار شیب پیکسل هایی که روند معنادار داشته است، آورده شد. بررسی ها نشان می دهد که بیشترین روندهای کاهشی به ترتیب در ماه های ژانویه، فوریه و مارس بوده و به سمت ماه های دوره گرم سال از وسعت پهنه های با روند کاهشی کاسته شده است. در عوض، روندهای افزایشی رطوبت خاک در ماه های دوره سرد سال اندک بوده و در ماه های دوره گرم سال تا بیش از ۲۰ درصد افزایش یافته است. الگوی پراکندگی روندهای کاهشی الگوی جغرافیایی داشته که با روند شمال غرب-جنوب شرق در امتداد رودخانه های دجله و فرات گسترده شده است. از میزان شدت و گستره پهنه های تحت روندهای کاهشی طی ماه های ژانویه تا می کاسته شده است. از ماه ژوئن الگوی پراکندگی پهنه های تحت روند تغییر یافته است؛ به طوری که پهنه های با روند کاهشی

محدودتر شده است و تنها در اطراف دریاچه‌های الرزازه و ال‌ثرثار مشاهده می‌شود. برعکس در همین دوره بر گستره پهنه‌های تحت روند افزایشی، افزوده شده است. این روندها در سه پهنه جغرافیایی عراق شامل بخش‌های جنوبی عراق به صورت نواری در امتداد مرز کویت در استان‌های بصره و مثنی، در منطقه کشاورزی القائم در غرب استان الانبار و به صورت پراکنده در شمال شرق عراق در استان‌های سلیمانیه، کرکوک و اربیل مشاهده می‌شود. گستره جغرافیایی روندهای کاهشی روند شمال غرب-جنوب شرق داشته است که در امتداد رودهای دجله و فرات به‌ویژه در امتداد رود دجله می‌تواند ناشی از کاهش دبی رودخانه در اثر سدسازی‌های ترکیه به‌ویژه سد ایل‌سو بر روی سرشاخه‌های این رودخانه باشد. همچنین، روندهای کاهشی در اطراف دریاچه الرزازه، ال‌ثرثار و زیر دست دریاچه الحدیثه مشاهده می‌شود. استان دیالی، میسان و به‌ویژه استان واسط در بیشتر ماه‌ها در معرض روندهای کاهشی رطوبت خاک قرار داشتند که حکایت از در معرض خطر قرار داشتن این مناطق دارد. لازم است اشاره شود که نتایج پژوهش حاضر با نتایج پژوهش [Chang et al., 2019](#)، [Deng et al., 2020](#) و کشاورز و همکاران (۱۳۹۰) انطباق دارد.

منابع

- کشاورز، محمدرضا، وظیفه دوست، مجید، علیزاده، امین، و اسدی، علی (۱۳۹۰). استخراج و روندیابی رطوبت خاک به کمک داده‌های ماهواره‌های سنجنده مودیس (مطالعه موردی: استان اصفهان). نشریه زهکشی و آبیاری ایران، ۲(۵)، ۲۰۹-۲۱۹. <https://sid.ir/paper/131427/fa>
- منتظری، مجید (۱۳۹۳). واکاوی زمانی-مکانی دماهای سالانه ایران طی دوره ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۸. جغرافیا و توسعه، ۱۲(۳۶)، ۲۰۹-۲۲۸. [10.22111/GDIJ.2014.1719](https://doi.org/10.22111/GDIJ.2014.1719)

References

- 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. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2018WR023354>
- Betts, A. K., Ball, J. H., Beljaars, A., Miller, M., & Viterbo, P. (1994). *Coupling between land-surface boundary-layer parameterizations and rainfall on local and regional scales: Lessons from the wet summer of 1993*. Paper presented at the Fifth Symp. on Global Change Studies. <https://alanbetts.com/workspace/uploads/betts-5-symp-global-change-stu-5acd4ed9291a3.pdf>
- Cheng, M., Zhong, L., Ma, Y., Zou, M., Ge, N., Wang, X., & Hu, Y. (2019). A study on the assessment of multi-source satellite soil moisture products and reanalysis data for the tibetan plateau. *Remote Sensing*, 11(10), 1196. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/10/1196>
- D'Odorico, P., Caylor, K., Okin, G. S., & Scanlon, T. M. (2007). On soil moisture-vegetation feedbacks and their possible effects on the dynamics of dryland ecosystems. *Journal Of Geophysical Research: Biogeosciences*, 112(G4). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006JG000379>
- Deng, Y., Wang, S., Bai, X., Luo, G., Wu, L., Cao, Y., Hu, Z. (2020). Variation trend of global soil moisture and its cause analysis. *Ecological Indicators*, 110, 105939. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105939>
- Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., & Hussain, S. A. (2012). A review of the methods available for

- estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal Of Hydrology*, 458, 110-117. [10.1016/j.jhydrol.2012.06.021](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.021)
- Dong, J., Crow, W., Reichle, R., Liu, Q., Lei, F., & Cosh, M. H. (2019). A global assessment of added value in the SMAP Level 4 soil moisture product relative to its baseline land surface model. *Geophysical Research Letters*, 46(12), 6604-6613. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019GL083398>
- Engman, E. T. (1992). Soil moisture needs in earth sciences. *Paper Presented At The In: IGARSS'92; Proceedings Of The 12th Annual International Geoscience And Remote Sensing Symposium, Houston*, 1(A93-47551 20-43). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930063678>
- Entekhabi, D., Nakamura, H., & Njoku, E. G. (2023). Retrieval of soil moisture profile by combined remote sensing and modeling. In *Passive Microwave Remote Sensing of Land--Atmosphere Interactions*, CRC Press. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=112fd0e9b45cedfa53aab7cae8ad336c56dfe52>
- Fast, J. D., & McCorcle, M. D. (1991). The effect of heterogeneous soil moisture on a summer baroclinic circulation in the central United States. *Monthly Weather Review*, 119(9), 2140-2167. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<2140:TEOHSM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<2140:TEOHSM>2.0.CO;2)
- Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., & Guo, R. (2016). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 6(2), 166-171. <https://www.nature.com/articles/nclimate2837>
- Jackson, T., Hawley, M., & O'Neill, P. (1987). Preplanting soil moisture using passive microwave sensors 1. *JAWRA Journal Of The American Water Resources Association*, 23(1), 11-19. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1987.tb00779.x>
- Keshavarz, M. R., Vazifiedoust, M., Alizadeh, A., & Asadi A. (2011). Soil moisture routing using moderate spatial resolution of MODIS satellite data a case study: Esfahan province. *Iranian Journal Of Lrrigation And Drainage*, 2(5), 209-219. <https://sid.ir/paper/131427/fa> [In Persian].
- McColl, K. A., Alemohammad, S. H., Akbar, R., Konings, A. G., Yueh, S., & Entekhabi, D. (2017). The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geoscience*, 10(2), 100. <https://www.nature.com/articles/ngeo2868>
- Montazeri, M. (2014). Temporal-spatial analysis of Iran's annual temperatures during the period from 1961 to 2008. *Geography And Development*, 12(36), 209-228. [10.22111/GDIJ.2014.1719](https://doi.org/10.22111/GDIJ.2014.1719) [In Persian].
- Narasimhan, B., & Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agricultural And Forest Meteorology*, 133(1-4), 69-88. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168192305001565?via%3Dihub>
- Saha, S. (1995). Assessment of regional soil moisture conditions by coupling satellite sensor data with a soil-plant system heat and moisture balance model. *Remote Sensing*, 16(5), 973-980. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169508954456>
- Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R., Wanders, N., Rakovec, O., Pan, M., & Marx, A. (2018). Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*, 8(5), 421-426. <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0138-5>
- Schlaepfer, D. R., Bradford, J. B., Lauenroth, W. K., Munson, S. M., Tietjen, B., Hall, S. A., & Pyke, D. A. (2017). Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils. *Nature Communications*, 8(1), 14196. <https://www.nature.com/articles/ncomms14196>
- Su, Z., Troch, P., De Troch, F., Nochtergale, L., & Cosyn, B. (1995). *Preliminary results of soil moisture retrieval from ESAR (EMAC 94) and ERS-1/SAR, Part II: Soil moisture retrieval*. Paper presented at the Proceedings of the second workshop on hydrological and microwave scattering modelling for spatial and temporal soil moisture mapping from ERS-1 and JERS-1 Surface Heating

- During a Prescribed Burn, Symposium on Fire and Forest Meteorology. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11707-009-0023-7>
- Topp, G. C., Davis, J., & Annan, A. P. (1980). Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574-582. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR016i003p00574>
- Walker, J. P. (1999). *Estimating soil moisture profile dynamics from near-surface soil moisture measurements and standard meteorological data*. University of Newcastle. https://users.monash.edu.au/~jpwalker/thesis_pdf/preface.pdf
- Walker, J.P., & Houser, P.R. (2004). Requirements of a global near-surface soil moisture satellite mission: Accuracy repeat time and spatial resolution. *Advances In Water Resources*, 27, 785-801. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0309170804000843?via%3Dihub>
- Wang, L., & Qu, J. J. (2009). Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Frontiers Of Earth Science In China*, 3, 237-247. <https://doi.org/10.1007/s11707-009-0023-7>
- Xu, L., Abbaszadeh, P., Moradkhani, H., Chen, N., & Zhang, X. (2020). Continental drought monitoring using satellite soil moisture, data assimilation and an integrated drought index. *Remote Sensing Of Environment*, 250, 112028. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425720303989?via%3Dihub>