

Estimation of surface net water flux and its relationship with hydrological and ecological parameters in the Urmia Lake basin

Mohammad Sadegh Tahmouresi¹, Mohammad Hossein Niksokan^{2*}, Amir Houshang Ehsani³

¹ M.Sc., Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

² Professor, Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Environmental Design, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

Extended Abstract

Introduction

Hydrological fluxes are crucial for maintaining healthy ecosystems, serving as pathways for water, energy, and essential nutrients. Surface net water flux (NWF), determined by the balance between infiltration and evapotranspiration, plays a pivotal role in replenishing groundwater reserves. Understanding NWF is essential for managing water resources effectively, particularly in regions facing increasing urbanization, agricultural intensification, and climate change. The Urmia Lake Basin, in northwest Iran, exemplifies the challenges of water management in a changing environment. This study investigates the mechanisms of NWF and its impact on ecological and hydrological parameters within this basin, aiming to provide insights into sustainable water resource management.

Materials and Methods

The Urmia Lake Basin, located in northwest Iran, encompasses approximately 51,801 square kilometers. It is bordered by the Zagros Mountains to the north, the slopes of Mount Sabalan to the south, and the flanks of Mount Sahand to the north, west, and south. The basin features Lake Urmia, a significant water body situated 1276 meters above sea level and covering approximately 5750 square kilometers. Surrounding the lake are 16 wetlands, highlighting the region's ecological sensitivity. This study investigates soil moisture dynamics using Level 4 data from the SMAP satellite. SMAP data provides valuable insights into hydrological and climatic processes, including runoff, flood modeling, and drought monitoring. Additional data sources include the CHIRPS dataset for precipitation, MODIS products for evapotranspiration and vegetation indices, the GLDAS 2.2 product for groundwater volume, and local databases for Lake Urmia water levels. An analytical model, developed by a previous research team, was used to estimate surface net water flux (NWF). This model relies on direct soil moisture data and applies Warrick's solution to Richards' equation, a well-established model for describing soil moisture dynamics. The model's advantage is its ability to accurately predict NWF without requiring calibration, making it computationally efficient and suitable for environmental studies and water resource management.

Results and Discussion

Analysis of surface net water flux (NWF) in the Urmia Lake Basin from 2015 to early 2021 revealed significant fluctuations, indicating a strong seasonal pattern driven by hydrological conditions. Periods of increased NWF coincided with rainy seasons, as increased precipitation led to higher surface and subsurface water flows toward Lake Urmia. Conversely, NWF decreased during dry seasons due to heightened evaporation and transpiration, reducing water inputs to the basin. The overall trend in NWF did not exhibit a consistent long-term increase or decrease but was primarily influenced by annual and seasonal variations. Annual box plots showed stable medians, but data variability across different years was notable, with 2018 and 2020 exhibiting particularly significant fluctuations. These variations likely reflect climatic conditions or land-use changes, highlighting the sensitivity of NWF to both environmental and anthropogenic factors. Further analysis using a correlation heatmap demonstrated strong relationships between key environmental variables, including soil moisture, vegetation indices, and Lake Urmia water levels. This underscores the interconnectedness of the ecosystem's water dynamics. These findings are crucial for strategic water resource management, emphasizing the need for comprehensive data and the consideration of water use policies to guide informed decision-making. This study demonstrates how integrated data-driven approaches can enhance our understanding and management of water resources in ecologically sensitive regions.

Conclusion

This study estimated NWF in the Urmia Lake Basin from 2015 to 2020, using soil moisture data from the SMAP satellite and an analytical model. The results show that NWF, which represents the balance between infiltration and evapotranspiration, is a critical factor in maintaining the water balance and influencing Lake Urmia's water levels. Seasonal and annual variations in NWF significantly impact soil moisture, precipitation, evaporation, and groundwater storage. Furthermore, strong correlations exist between NWF and key environmental parameters like soil moisture, the normalized difference vegetation index (NDVI), and land surface temperature (LST). Effective water resource management in the Urmia Lake Basin necessitates a deep understanding of the complex interactions between hydrological and ecological parameters. Such knowledge enables the development of more effective management strategies to conserve water resources and protect associated ecosystems. This study underscores the critical importance of utilizing satellite data and advanced modelling techniques to analyse and manage water resources in a sustainable manner. Given the growing challenges posed by climate change and human activities, developing methods for sustainable water resource management is essential for maintaining ecosystem balance and meeting human water needs.

Keywords: Surface net water flux, soil moisture, SMAP, Lake Urmia.

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mohammad Sadegh Tahmouresi: Conceptualization, Methodology, Software, Writing; **Mohammad Hossein Niksokhan:** Supervision, Resources, Analysis Results, Manuscript Editing; **Amir Houshang Ehsani:** Conceptualization, Advising, Editing and Review

*Corresponding Author, E-mail: niksokhan@ut.ac.ir

Citation: Tahmouresi, M.S., Niksokhan, M.H., & Ehsani, A.H. (2025). Estimation of surface net water flux and its relationship with hydrological and ecological parameters in the Urmia Lake basin. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(2), 16-33.

doi: 10.22098/mmws.2024.14929.1450

Received: 20 April 2024, received in revised form: 03 June 2024, accepted: 03 June 2024, Published online: 22 June 2025
Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 2, pp. 16-33.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





برآورد شار آب خالص سطحی و ارتباط آن با پارامترهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در حوضه دریاچه ارومیه

محمدصادق طهمورسی^۱، محمدحسین نیک‌سخن^{۲*}، امیرهوشنگ احسانی^۳

^۱ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی طراحی محیط، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

شار آب خالص (NWF) به عنوان یک عامل مهم در حفظ تعادل هیدرولوژیکی در اکوسیستم‌های خشکی و تعیین نرخ تجدید مخازن آب زیرزمینی نقش دارد. در این تحقیق، از مدل تحلیلی و داده‌های رطوبت خاک سطحی ماهواره SMAP در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ برای تخمین NWF در حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده شده است. مدل تحلیلی مورد استفاده براساس رابطه خطی شده ریچاردز تنظیم شده که دینامیک رطوبت خاک را تحت تأثیر جریان‌های آب نفوذی و گرانشی توضیح می‌دهد. این مدل امکان محاسبه شار آب خالص سطحی را از داده‌های رطوبت خاک فراهم می‌کند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که میانه NWF در حدود ۰/۵ سانتی‌متر در روز است و دامنه بین چارکی (IQR) معمولاً بین ۰/۵ تا ۱/۵ سانتی‌متر در روز قرار دارد. تحلیل همبستگی رابطه قابل توجهی بین NWF و متغیرهای محیطی مانند رطوبت خاک (همبستگی ۰/۵۷)، شاخص پوشش گیاهی (NDVI) (همبستگی -۰/۳۳) و دمای سطح زمین (LST) (همبستگی -۰/۵۷) را نشان می‌دهد. این تحقیق بر اهمیت مدیریت دقیق منابع آب در حوضه دریاچه ارومیه و استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و ابزارهای مدل‌سازی برای تحلیل و مدیریت منابع آب تأکید دارد. این مطالعه نشان می‌دهد که درک دقیق از تعاملات بین پارامترهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی مؤثر برای حفاظت از منابع آب و اکوسیستم‌های مرتبط کمک کند.

واژه‌های کلیدی: شار آب خالص سطحی، رطوبت خاک، SMAP، دریاچه ارومیه

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: niksokhan@ut.ac.ir

استناد: طهمورسی، محمد صادق، نیک‌سخن، محمدحسین، و احسانی، امیرهوشنگ (۱۴۰۴). برآورد شار آب خالص سطحی و ارتباط آن با پارامترهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در حوضه دریاچه ارومیه. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۵(۲)، ۱۶-۳۳.

doi: 10.22098/mmws.2024.14929.1450

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۴، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۱۶ تا ۳۳.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

شارهای هیدرولوژیکی نقش حیاتی در پیوند دادن چرخه آب، انرژی و بیوژئوشیمیایی دارند و به تعادل بین این عناصر در محیط زیست کمک می کنند. وقتی عوامل انسانی مانند توسعه شهری، کشاورزی و تغییرات اقلیمی در این چرخه ها دخالت پیدا می کنند، شارهای هیدرولوژیکی تحت تأثیر قرار می گیرند و می توانند به شکل قابل توجهی تغییر کنند. این دخالت ها اغلب منجر به تغییراتی در دینامیک و الگوهای این شارها می شوند که تشخیص و درک آن ها در مناطق وسیع و گسترده می تواند به یک چالش اساسی تبدیل شود (Sadeghi et al., 2019). شار آب خالص سطحی^۱ که از تفاوت بین نفوذ و تبخیر-تعرق حاصل می شود، به عنوان یک عامل کلیدی در تعیین نرخ بازیابی آب زیرزمینی شناخته شده است. این شار برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی بسیار حیاتی است؛ زیرا آب زیرزمینی نقش مهمی در تأمین آب شرب و آبیاری کشاورزی برای بیش از دو میلیارد نفر در سراسر جهان ایفا می کند (Gurdak, 2017). با افزایش جمعیت و افزایش تقاضا برای آب، بسیاری از منابع آب زیرزمینی در سراسر جهان با نرخ های غیر پایدار برداشت می شوند که این مسأله می تواند به کاهش تراز آب و تغییر در کیفیت آن منجر شود (Moore and Fisher, 2012; Richey et al., 2015). مطابق با گزارش شورای ملی تحقیقات^۲، مشاهدات میدانی، سنجش از دور و مدل سازی نقش کلیدی در فهم بهتر این ضعف ها و چالش ها دارند. درک دقیق این تغییرات و توانایی پیش بینی تأثیرات آن ها بر محیط زیست، برای توسعه سیاست های مؤثر مدیریت آب ضروری است. نفوذ (I) و تبخیر-تعرق (ET)، به عنوان دو جزء مهم و حساس در شارهای هیدرولوژیکی سطح زمین، ترکیب می شوند و شار آب خالص سطحی را تولید می کنند که بر تعادل آب زمینی اثر می گذارد و این تعادل برای حفظ سلامت اکوسیستم های طبیعی و توسعه پایدار حیاتی است.

روش های رایجی که در شبکه های جهانی مانند FLUXNET به کار گرفته می شوند، بر ابزارهای بسیار دقیق و گران قیمت متکی هستند و عموماً نیازمند تعدیل ها و اصلاحاتی هستند که غالباً بر پایه تجربیات ناقص و اغلب تعریف نشده استوار هستند (Baldocchi et al., 2001; Allen et al., 2011). این فن ها هر دو جزء نفوذ (I) و تبخیر-تعرق (ET) را در بررسی های خود شامل می شوند. در مقابل، روش هایی که بر ترازمندی انرژی متمرکز هستند تنها به برآوردهای تبخیر-تعرق می پردازند؛ اما در میان انواع روش های تعادل آب، لایسیمی به عنوان دقیق ترین روش برای اندازه گیری مستقیم تغییرات در

میزان آب شناخته می شود. با این حال، ساخت و نگهداری این لایسیمترهای وزنی هزینه بر است و تنها برای تحقیقات در مقیاس های مکانی کوچک مناسب است (Sadeghi et al., 2019). با پیشرفت های فناوری در سنجش رطوبت خاک، این فناوری ها به جایگزین های قابل توجهی برای روش های سنتی در تعادل آب تبدیل شده اند. در سال های اخیر، شبکه های پایش متعددی در مقیاس های ملی و بین المللی راه اندازی شده اند که فرصت های جدیدی را برای تخمین دقیق تر شار آب خالص با استفاده از روش های تعادل آب فراهم می آورند (Dorigo et al., 2015; Brocca et al., 2014; Awe et al., 2011).

استفاده از داده های رطوبت خاک در عمق های مختلف (۰ تا ۵ سانتی متر) مزایای بسیاری دارد. این داده ها نه تنها از طریق اندازه گیری مستقیم در محل قابل دسترسی هستند، بلکه از طریق مشاهدات سنجش از دور مانند تصاویر هوایی و ماهواره ای نیز در مقیاس های جهانی و حوضه ای قابل به دست آوردن هستند (Dorigo et al., 2011; Brocca et al., 2013). امروزه، رطوبت خاک به عنوان یک عنصر کلیدی در چرخه های هیدرولوژیکی شناخته شده و نقش بسیار مهمی در تأثیرگذاری بر فرآیندهای مختلف نظیر فرسایش خاک، سیلاب، تبخیر-تعرق و رانش زمین ایفا می کند. این داده ها برای مقاصد مختلفی مانند برنامه ریزی آبیاری، مدیریت منابع آب، پیش بینی های هواشناسی و پهنه بندی خشک سالی ضروری هستند و در مدل سازی های مرتبط با بیان انرژی، نظیر پیش بینی های عددی هواشناسی، پیش بینی های اقلیمی و خشک سالی، مدل سازی انتقال تابش و سایر فرآیندهای مرتبط با زمین، از اهمیت بالایی برخوردار هستند (Trenberth et al., 2009; Rodell et al., 2015; Lawston et al., 2017; Brocca et al., 2018; Trambalay et al., 2019; Jalilvand et al., 2019; Zaussinger et al., 2010). این داده ها به خصوص در فرآیندهای تصمیم گیری برای مدیریت منابع آب و خاک نقش مهمی ایفا می کنند و به طور فزاینده ای به عنوان حلقه واسطه بین زمین و اتمسفر، در توزیع باران بین رواناب سطحی و نفوذ که بخشی از فرآیندهای پس از فرآیندهای هیدرولوژیک و ژئومورفولوژیک است، دیده می شوند (Hughes, 2010; Seneviratne et al., 2009).

تحقیقات متعددی به بررسی روش های برآورد شار آب خالص سطحی و عناصر تشکیل دهنده آن پرداخته اند. در مطالعه اخیر (Sadeghi et al., 2019)، یک مدل تحلیلی جدید برای پیش بینی شار آب خالص سطحی بر اساس داده های رطوبت خاک سطحی ارائه شده است. این گروه تحقیقاتی، با استفاده مستقیم از داده های رطوبت خاک، یک مدل فیزیکی را توسعه داده و عملکرد آن را با استفاده از داده های مرجع از چهار سایت

¹ Net Water Flux

² National Research Council

تبخیر-تعرق، دمای سطح زمین، میزان ذخیره آب زیرزمینی و سطح آب دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است.

۲ - مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه که در شمال غربی ایران واقع شده، با وسعتی حدود ۵۱۸۰۱ کیلومترمربع بین مختصات ۴۴/۰۷ تا ۴۷/۵۳ درجه طول شرقی و ۳۵/۴۰ تا ۳۸/۳۰ درجه عرض شمالی قرار گرفته است. این منطقه توسط کوه‌های شمالی زاگرس، جنوب کوه سیلان و دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی کوه سهند احاطه شده است. شکل ۱، تصویر ماهواره‌ای سنتینل ۲، حوضه دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. دریاچه ارومیه که نقطه تجمع جریان‌های سطحی مازاد بر مصرف رودخانه‌های حوضه‌ای بسته است، تقریباً ۵۷۵۰ کیلومترمربع وسعت دارد و در ارتفاع ۱۲۷۶ متری از سطح دریا قرار گرفته است. در اطراف دریاچه ارومیه ۱۶ تالاب با وسعت‌های متغیر از ۵ تا ۱۲۰۰ هکتار وجود دارد که برخی از آن‌ها خشک شده‌اند و از ارزش اکوسیستمی بالایی برخوردارند.

تقریباً ۳۵۱۵۰ کیلومترمربع از سطح حوضه آبریز را مناطق کوهستانی و ۹۰۰۰ کیلومترمربع آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها و ۷۳۱۰ کیلومترمربع آن را دریاچه و مناطق باتلاقی اطراف آن تشکیل می‌دهند. زیرحوضه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه شامل نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای، باراندوزچای و زولاچای در غرب، دریان‌چای و تسوج‌چای در شمال شرقی، آجی‌چای، آذرشهرچای و صوفی‌چای در شرق، دریاچه ارومیه در مرکز، زرینه‌رود، لیلان‌چای، مردوق‌چای و سیمینه‌رود در جنوب و مهابادچای و گذارچای در جنوب غربی هستند. حوضه آبریز دریاچه ارومیه به ۲۵ واحد یا محدوده مطالعاتی تقسیم شده که هرکدام معمولاً یک یا چند پهنه آبرفتی را شامل می‌شوند و منابع آب زیرزمینی آن‌ها مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. مهم‌ترین مخازن آب زیرزمینی در پهنه‌های حاشیه دریاچه ارومیه واقع شده‌اند و محدوده‌های مطالعاتی تبریز، سلماس، ارومیه، میاندوآب و نقده بزرگ‌ترین آبخوان‌های حوضه را در خود جای داده‌اند.

برج شار در ایالات متحده آمریکا ارزیابی کرده‌اند. این مدل با استفاده از روش وارونگی تحلیلی واریک (Warrick, 1975) برای حل رابطه خطی ریچاردز (Richards, 1931) توسعه یافته است. نتایج نشان داده‌اند که این مدل تحلیلی، علی‌رغم دقت نسبتاً پایین‌تر در شرایط خاک‌های خیلی خشک یا مرطوب، برای طیف وسیعی از انواع خاک و شرایط آب و هوایی کاربردی است. همچنین، با وجود سادگی نسبی در مقایسه با مدل‌های عددی پیچیده‌تر، توانایی بالایی در محاسبه شار آب خالص سطحی نشان داده است. در تحقیق دیگری، Sadeghi et al. (2022) یک رابطه تحلیلی جدید بین رطوبت خاک و شار آب خاک در یک عمق مشخص از خاک معرفی کرده‌اند. این رابطه بر اساس حل تحلیلی تقریبی رابطه ریچاردز با توابع هیدرولیکی دلخواه خاک به‌دست آمده و توانایی بالایی در مدل‌سازی تغذیه آب زیرزمینی نشان داده است. در مطالعه دیگری توسط Liu et al. (2024)، روشی جدید برای برآورد تبخیر-تعرق در یک مزرعه ذرت با استفاده از مدل تحلیلی شار آب ارائه شده است. این روش که نیاز به اندازه‌گیری‌های پارامترهای هواشناسی، گیاهی و خاک دارد، دقت بالایی در برآورد تبخیر-تعرق روزانه نشان داده و نتایج حاصل از آن با اندازه‌گیری‌های مستقل مقایسه شده است. در تحقیق دیگری (Sadeghi et al. (2020)، مدلی تحلیلی برای برآورد رطوبت سطحی خاک با استفاده از داده‌های ماهواره GRACE معرفی شده است. این مدل با دقت بالایی توانسته است تغییرات رطوبت سطحی خاک را در مقیاس جهانی برآورد کند و اطلاعات مفیدی برای بهبود برآوردهای ماهواره‌ای ارائه دهد.

در این تحقیق، با استفاده از مدل پیشنهادی توسط Sadeghi et al. (2019)، شار آب خالص سطحی برای دوره زمانی از سال ۲۰۱۵ تا پایان سال ۲۰۲۰ میلادی برآورد شده است. این برآورد با بهره‌گیری از داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP با دقت مکانی ۹ کیلومتر که به‌عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده، انجام شده است. از آنجایی که این پارامتر در تحقیقات پیشین به‌طور کافی مورد توجه قرار نگرفته است، این مطالعه تلاش دارد تا با محاسبه این پارامتر، تغییرات آن را در دوره زمانی مورد بررسی قرار دهد. علاوه بر این، رفتار شار آب خالص طی این بازه زمانی و ارتباط آن با پارامترهایی نظیر بارش، رطوبت خاک،

مدل تحلیلی تهیه شد و عملکرد آن با داده‌های مرجع از چهار سایت برج شار در ایالات متحده ارزیابی شد. مزیت این مدل این است که کاملاً کارآمد و محاسباتی است. رابطه معروف ریچاردز دینامیک‌های مربوط به رطوبت خاک را بر اساس واکنش آن به جریان‌های آب نفوذی و گرانشی در خاک‌های با اشباع متغیر، توضیح می‌دهد. این معادله که به‌طور گسترده‌ای در مدل‌های سطحی زمین به‌کاررفته است، توسط Decker and Zeng (2009) بررسی شده است. فرمول‌بندی خطی شده این معادله به شرح زیر است:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial \theta}{\partial z} - K \right) \quad (1)$$

که در آن، θ رطوبت خاک حجمی، D ضریب پخشیدگی، K هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک، t زمان و z عمق خاک است.

Warrick (1975) با استفاده از اصل ترکیب، رابطه (۱) را برای ارتباط دادن به هر دنباله‌ای از ضربه‌های جریان آب سطحی به‌صورت ریاضی حل کرده است. این راه حل برای یک نیمرخ خاک همگن نیمه‌بینهایت با شرایط اولیه یکسان رطوبت خاک و جریان آب خالص متغیر در سطح و رطوبت ثابت در مرز پایینی صادق است، به شکل زیر در دو حالت بیان شده است: در حالت $N=1$ ، تأثیر جریان آب خالص اولیه در لحظه شروع بر رطوبت خاک در عمق Z و زمان T را نشان می‌دهد.

$$\theta_N(Z) = e^{-0.5Z+0.25T} F_1 U(Z, T)$$

$$= e^{-0.5Z+0.25T} \left\{ F_1 U(Z, T) + \sum_{i=2}^N (F_i - F_{i-1}) U(Z, [N-i+1] \Delta T) \right\}$$

خالصی است که بر رطوبت خاک اثر می‌گذارد. رابطه پارامترهای نرمال شده به‌صورت زیر است که در رابطه نهایی مورد استفاده قرار می‌گیرند:

$$Z = \frac{kz}{D} \quad T = \frac{k^2 t}{D}$$

$$\theta = \left(\frac{\theta - \theta_{\infty}}{\theta_{\infty}} \right) e^{-0.5Z+0.25T}$$

تبخیر-تعرق (ET) که با چرخه‌های آب، کربن و انرژی سطحی مرتبط است، بر سیستم زمین تأثیر می‌گذارد و انرژی نهان و جرم بخار آب را بین جو و زمین منتقل می‌کند و به ارتباط سامانه‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و اکولوژیکی کمک می‌کند (Baethgen and Goddard, 2013). در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، آن‌ها رطوبت خاک را کنترل می‌کنند که بر فرآیندهای حوضه آبریز و جریان تأثیر دارد (Fisher et al., 2017). شاخص گیاهی NDVI، به‌عنوان معروف‌ترین و پرکاربردترین شاخص پوشش گیاهی، از این داده‌ها برای تحلیل‌های محیطی استفاده می‌شود. سنجنده MODIS روی ماهواره‌های AQUA و TERRA نصب‌شده، یکی از پیشرفته‌ترین و کامل‌ترین سنجنده‌های موجود برای پایش محیط‌زیست و منابع طبیعی است و داده‌های تبخیر-تعرق، NDVI و دمای سطح خشکی (LST) از آن استخراج‌شده‌اند.

۲-۲-۴- حجم آب زیرزمینی و تراز آب دریاچه ارومیه

برای حجم آب زیرزمینی در سطح حوزه آبریز دریاچه ارومیه با توجه به محدود بودن داده‌های میدانی از محصول GLDAS-2.2 و برای تراز دریاچه ارومیه داده‌ها از پایگاه اطلاعات دریاچه ارومیه استفاده شد.

۲-۳- مدل تحلیلی شار آب خالص سطحی

در تحقیق (Sadeghi et al. 2019)، برای برآورد شار آب خالص سطحی به‌طور مستقیم از داده‌های رطوبت خاک، یک

$$N = 1$$

(۲)

$$[N > 1, = N \Delta T]$$

در حالت $N > 1$ ، اثرات تراکمی شار آب خالص از گام زمانی دوم به بعد در نظر گرفته می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات رطوبت خاک تحت تأثیر این جریان‌ها در طول زمان است. در این روابط، T و Z نمایانگر متغیرهای نرمال شده زمان و عمق بر اساس پارامترهای فیزیکی خاک هستند و F شار آب

(۳)

$$F = \frac{f - k\theta_{\infty}}{k\theta_{\infty}}$$

در رابطه (۳)، D پخشیدگی آب خاک، k شیب تابع هدایت هیدرولیکی خاک $k(\theta)$ ، θ رطوبت خاک در مرز پایینی، و U به صورت زیر تعریف می شود:

$$U(Z, T) = -0.5e^Z(Z + T + 1) \operatorname{erfc} \left[0.5 \left(\frac{Z}{\sqrt{T}} + \sqrt{T} \right) \right] + 0.5 \operatorname{erfc} \left[0.5 \left(\frac{Z}{\sqrt{T}} - \sqrt{T} \right) \right] \quad (4)$$

رابطه (۴) راه حل واریک را نشان می دهد که در آن با داشتن شار آب خالص سطحی رطوبت خاک را در هر عمق و زمانی می توان محاسبه کرد. Sadeghi et al. (2019) با معکوس کردن رابطه واریک نشان دادند که با داشتن رطوبت خاک در هر زمانی می توان شار آب خالص سطحی را محاسبه کرد.

$$F_N = \frac{\theta_N(Z)e^{0.5Z-0.25T}}{U(Z, \Delta T)} \quad [N = 1, T = \Delta T]$$

$$= F_1 + \frac{\theta_N(Z)e^{0.5Z-0.25T} - F_1 U(Z, T)}{U(Z, \Delta T)} \quad [N = 2, T = 2\Delta T] \quad (5)$$

$$= F_{N-1} + \frac{1}{U(Z, \Delta T)} \left\{ \theta_N(Z)e^{0.5Z-0.25T} - F_1 U(Z, T) - \sum_{i=3}^N (F_{i-1} - F_{i-2}) U(Z, [N - i + 2]\Delta T) \right\} \quad [N > 2, T = N\Delta T]$$

Sadeghi et al. (2019) برای برآورد D در یک مکان رابطه (۶) را پیشنهاد دادند:

$$D = D' \left(\frac{f_{\max}^2}{f_{\max}'} \right) \quad (6)$$

در این معادله D' یک حدس اولیه برای انتشار هست (به عنوان مثال مقدار دلخواه $\frac{cm^2}{d} = 100$) که همراه با k دلخواه (به عنوان مثال $k = 0.01 \frac{cm}{d}$) در رابطه (۶) اعمال می شود. که یک حدس اولیه برای حداکثر شار آب ($f_{\max}'$) به دست می دهد. رابطه (۴) تخمین میزان پراکندگی D ، مربوط به حداکثر شار واقعی آب ($f_{\max}$) اندازه گیری شده در طول دوره مورد نظر، از حدس های اولیه D' و $f_{\max}'$ را امکان پذیر می کند. بنابراین $f_{\max}'$ تنها اطلاعات مربوط به سایت مورد نیاز برای این روش پارامتر سازی بدون اعتبارسنجی است. نمونه کد متلب این مدل تحلیلی در تحقیق Sadeghi et al. (2019) در دسترس است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز شار آب خالص سطحی

نمودار شکل ۲-الف نشان دهنده تغییرات شار آب خالص در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا اوایل ۲۰۲۱ در سطح حوضه دریاچه ارومیه است. این نوسانات می توانند نشان دهنده تغییرات فصلی در شرایط هیدرولوژیکی حوضه باشند. در ادامه، به تحلیل عمیق تر این نمودار می پردازیم:

دوره های افزایش در شار آب خالص معمولاً با فصول بارانی مطابقت دارند، جایی که بارش ها افزایش می یابند و در نتیجه، جریان های سطحی و زیرزمینی آب بیش تری را به سمت دریاچه ارومیه هدایت می کنند.

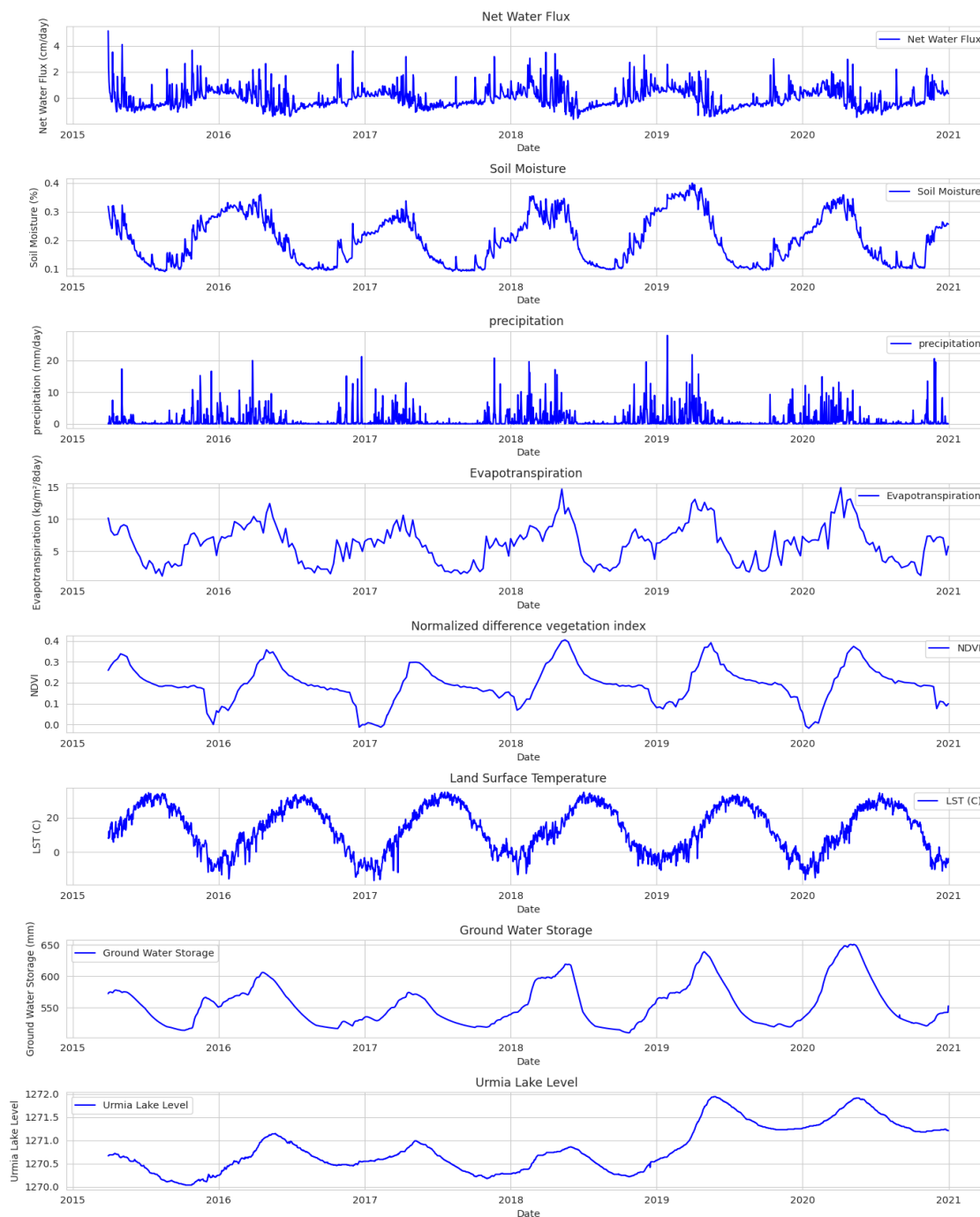
دوره های کاهش ممکن است ناشی از فصول خشک باشند که در آن ها تبخیر-تعرق بالا می رود و ورودی آب به حوضه کاهش می یابد. روند کلی نمودار دارای یک الگوی متناوب است که ممکن است با الگوهای بارشی و تغییرات فصلی در مصرف آب

هستند. نقاط خارج از محدوده احتمالاً رویدادهای آب و هوایی غیرمعمول مانند باران‌های شدید یا خشک‌سالی‌ها را مشخص می‌کنند که اهمیت در نظر گرفتن شرایط خاص آب و هوایی و مدیریت منابع آبی را ضروری می‌سازد.

شکل ۴-الف نشان‌دهنده نمودار مقادیر کلی شار آب خالص برآورد شده در طول زمان است. می‌توان مشاهده کرد که شار آب دارای نوسانات ماهانه است که تحت تأثیر فاکتورهای متعددی مانند بارش، تبخیر و فعالیت‌های انسانی قرار دارد. شکل ۴-ب روند که با خط نارنجی نشان داده شده، یک کاهش تدریجی در شار آب خالص را نشان می‌دهد که این ممکن است به دلیل تغییرات طولانی‌مدت در عواملی مانند الگوهای بارش یا تغییرات اقلیمی باشد. نمودار سبز رنگ در شکل ۴-ج فصلی نوسانات فصلی منظمی را در طول سال نشان می‌دهد که نمایانگر تأثیرات فصلی مانند بارش‌های فصلی و تغییرات دمای فصلی است. در ادامه در این شکل، نمودار قرمز ۴-د رنگ باقی‌مانده تفاوت‌هایی را که توسط سه جزء دیگر توضیح داده نمی‌شوند، نشان می‌دهد. این مقادیر می‌توانند نشان‌دهنده خطاهای مدل، رویدادهای غیرمنتظره یا دیگر عوامل تصادفی باشند.

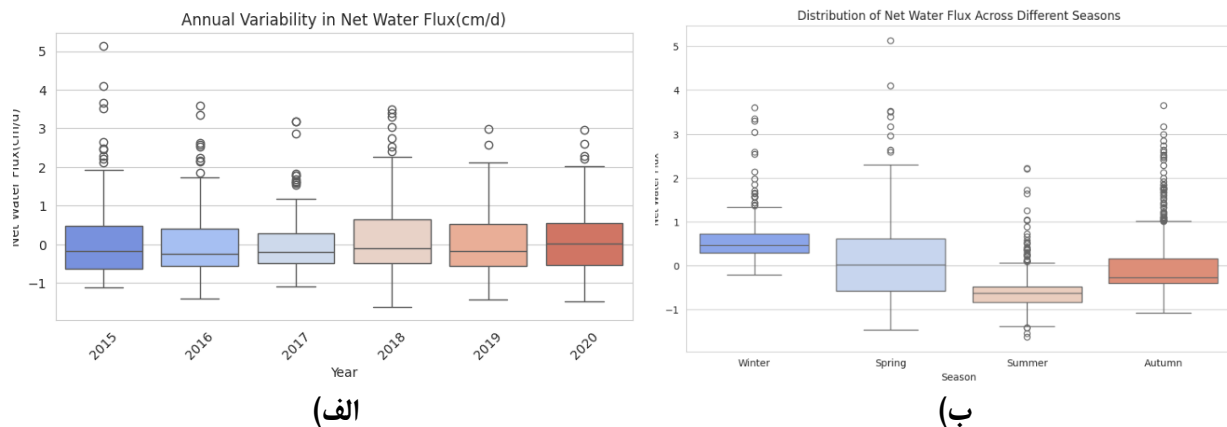
در کل، این تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که شار آب خالص تحت تأثیر ترکیبی از عوامل فصلی و روندهای طولانی‌مدت است و همچنین تحت تأثیر رویدادهای غیرمنتظره یا نوسانات تصادفی قرار دارد.

مرتبط باشد. به نظر می‌رسد که در طول چند سال موردنظر، روند کلی افزایش یا کاهش طولانی‌مدتی را نشان نمی‌دهد، بلکه بیش‌تر تحت تأثیر فاکتورهای فصلی و سالانه است. شکل ۳-الف، نمودار جعبه‌ای سالانه، نوسانات شار آب خالص را در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ نمایش می‌دهد. این نمودار پایداری نسبی میانه‌ها را در کنار دامنه‌های گسترده‌تری از داده‌ها در سال‌های مختلف نشان می‌دهد. سال ۲۰۱۸ به‌عنوان سالی با بیش‌ترین تغییرپذیری برجسته است که احتمالاً ناشی از تغییرات در شرایط آب و هوایی یا کاربری زمین است. سال ۲۰۲۰ شاهد افزایش فراوان در نوسانات و داده‌های خارج از محدوده است که می‌تواند به دلیل رویدادهای هیدرولوژیکی شدید مانند سیل یا خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت باشد. این الگوهای نموداری نشان می‌دهند که چگونه شار آب خالص می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعدد محیطی و انسان‌ساخت تغییر کند. شکل ۳-ب، نمودار جعبه‌ای فصلی، توزیع شار آب خالص را در طی فصول مختلف نشان می‌دهد که در آن بهار با بالاترین مقادیر میانه برجسته می‌شود، احتمالاً به دلیل تأثیر ذوب برف‌ها و افزایش بارندگی که این فصل را به دوره‌ای با بیش‌ترین شار آب تبدیل می‌کند. در مقابل، زمستان دارای کم‌ترین میزان شار است که ممکن است به علت کاهش بارش‌ها و تأخیر در جریان‌ات آب ناشی از یخبندان باشد. تابستان و پاییز با میانه‌های کم‌تر و تغییرات داده‌های بیش‌تر، نشان‌دهنده تبخیر-تعرق افزایش‌یافته در این فصول



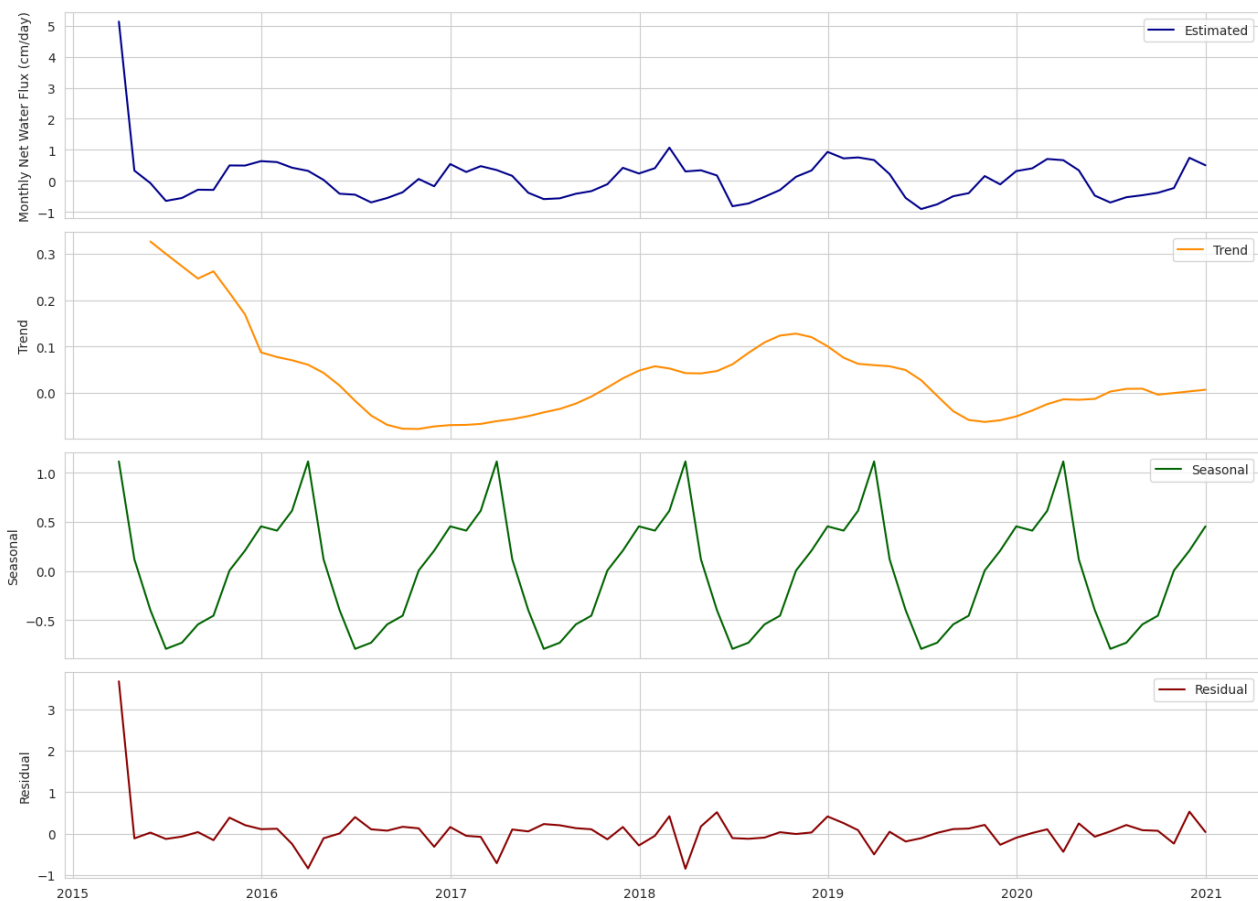
شکل ۲- نمودار سری زمانی پارامترهای شار آب خالص سطحی، رطوبت خاک، بارش، ET، NDVI، LST، ذخیره آب زیرزمینی و تراز سطح دریاچه ارومیه

Figure 2 - Time series chart of surface net water flux parameters, soil moisture, precipitation, ET, NDVI, LST, underground water storage, and the water level of Lake Urmia.



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای سالانه (الف) و فصلی (ب) شار آب خالص سطحی

Figure 3 - Annual (a) and seasonal (b) box plot of surface net water flux



شکل ۴- تجزیه و تحلیل چندبعدی شار آب خالص: روندهای طولانی‌مدت، الگوهای فصلی و نوسانات تصادفی

Figure 4- Multidimensional analysis of net water flux: Long-term trends, seasonal patterns, and random fluctuations

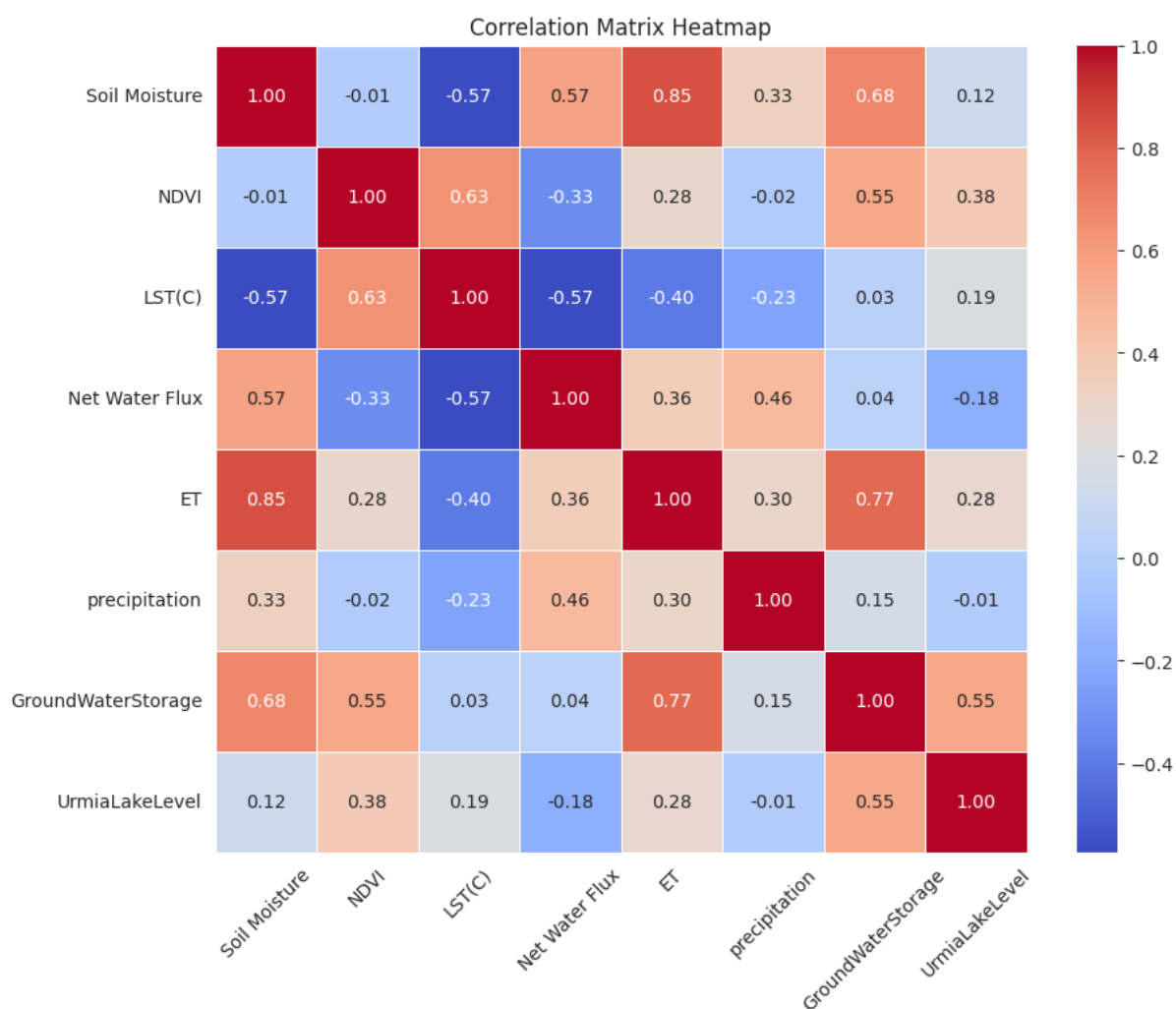
تبخیر-تعرق (ET)، بارش، ذخیره آب زیرزمینی و سطح دریاچه ارومیه را نمایش می‌دهد، وابستگی‌های پیچیده و مهمی را در اکوسیستم آشکار می‌سازد. به‌طور خاص، همبستگی‌های قوی مثبت بین رطوبت خاک و ET (۰/۸۵) و بین رطوبت خاک و ذخیره آب زیرزمینی (۰/۶۸)، به همراه همبستگی منفی بین LST

۳-۲- بررسی رابطه شار آب خالص سطحی با سایر پارامترها

شکل ۵ نمایانگر نمودار حرارتی ماتریس همبستگی که ارتباطات بین متغیرهای کلیدی محیطی مانند رطوبت خاک، شاخص سبزی (NDVI)، دمای سطح زمین (LST)، شار آب خالص،

زیرزمینی (۰/۴۶) دارد و نشان می دهد که چگونه الگوهای بارشی می توانند بر دینامیک های آب زیرزمینی تأثیر بگذارند. این بینش ها برای فهم بهتر مکانیسم های اکوسیستم و توسعه استراتژی های مدیریت آبی که می توانند پیامدهای آب و هوایی و انسانی را به حساب آورند، حیاتی هستند

و شار آب خالص (۰/۵۷-)، اهمیت تعاملات بین این عوامل را در تعیین منابع آبی نشان می دهد. همچنین، NDVI دارای همبستگی منفی با رطوبت خاک (۰/۵۷-) و همبستگی مثبت با LST (۰/۶۳) است که این ممکن است نشان دهنده تأثیر دما بر رشد گیاهی باشد. بارش نیز همبستگی مثبتی با ذخیره آب



شکل ۵- تحلیل همبستگی میان متغیرهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در حوضه دریاچه ارومیه
Figure 5 - Correlation analysis between hydrological and ecological variables of the Urmia Lake basin

بر شار آب خالص تأثیرگذار هستند. شاخص NDVI که وضعیت پوشش گیاهی را نمایان می کند، در فصول رشد افزایش و در فصول غیررشد کاهش می یابد که این ممکن است با تغییرات دمایی و رطوبت خاک ارتباط داشته باشد. دمای سطح زمین نیز نوسانات فصلی مشخصی دارد که می تواند بر تبخیر-تعرق و رشد گیاهی تأثیر بگذارد. ذخیره آب زیرزمینی تحت تأثیر عواملی مانند بارش و برداشت آب است و نوسانات فصلی و سالانه را نشان می دهد. درنهایت، سطح دریاچه ارومیه نشان دهنده کاهش در سال های اخیر است که می تواند نشان دهنده تغییرات در بارش،

همان طور که در شکل ۲ نشان داده شد، نمودارهای سری زمانی مربوط به حوضه دریاچه ارومیه از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ تغییرات مهمی در پارامترهای مختلف اکولوژیک و هیدرولوژیک را نشان می دهند. رطوبت خاک به طور مستمر با فصول بارانی افزایش و در دوره های خشک کاهش می یابد، نشان دهنده تأثیر مستقیم بارش ها و تبخیر-تعرق است. بارش ها دارای پیک های فصلی هستند که بیانگر تغییرات محیطی و الگوهای بارشی فصلی می باشند. فرآیند تبخیر-تعرق نیز با افزایش دما در فصول گرم به اوج خود می رسد و در فصول سردتر کاهش می یابد که این موارد

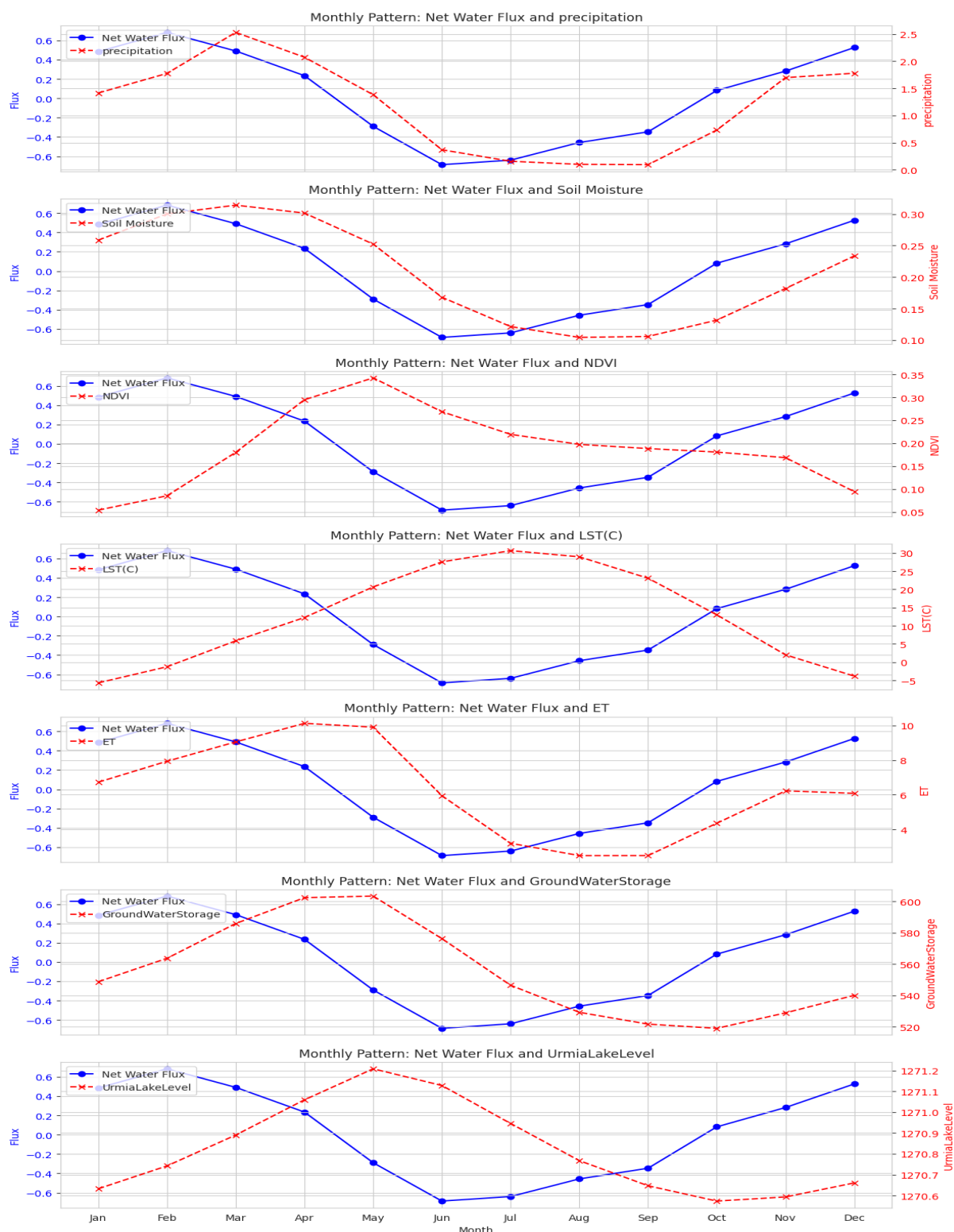
معکوسی رفتار می‌کند، در زمستان بالاست و در تابستان به پایین‌ترین سطح خود می‌رسد که این نیز تأثیر مستقیمی بر تولید محصولات کشاورزی دارد.

همچنین، NDVI که نشان‌دهنده سلامت و فعالیت پوشش گیاهی است، در بهار و تابستان با توجه به شرایط مساعد آب و هوایی و دسترسی به منابع آب افزایش می‌یابد. این افزایش در NDVI که با افزایش ET و دمای سطح زمین در تابستان همراه است، ممکن است به تأمین آب مورد نیاز برای پوشش گیاهی کمک کند، اما درعین‌حال نیاز به مدیریت دقیق‌تر منابع آب را نیز نشان می‌دهد.

سطح آب دریاچه ارومیه که یکی از شاخص‌های حیاتی برای ارزیابی وضعیت اکوسیستم منطقه است، نوسانات فصلی را نشان می‌دهد که با شار آب خالص سطحی همبستگی دارد. افزایش سطح آب دریاچه در ماه‌های زمستانی و بهاری و کاهش آن در تابستان و پاییز، نشان‌دهنده تأثیرات ترکیبی بارش، تبخیر-تعرق و ذخیره آب زیرزمینی بر حوضه آبریز است.

مدیریت منابع آب و فعالیت‌های انسانی باشد. این تحلیل‌ها برای مدیریت دقیق منابع آب و برنامه‌ریزی استراتژیک ضروری هستند و باید با داده‌های زمینی و در نظر گرفتن سیاست‌ها و الگوهای مصرف آب تکمیل شوند.

تحلیل الگوهای ماهانه شار نشان داده‌شده در شکل ۶ شار آب خالص سطحی و متغیرهای مرتبط در حوضه دریاچه ارومیه امکان می‌دهد تا درک عمیق‌تری از دینامیک‌های هیدرولوژیکی منطقه و تأثیرات فصلی و آب و هوایی بر منابع آب کسب شود. شار آب خالص که در زمستان با بارندگی‌ها و ذوب برف افزایش می‌یابد، نشانگر تجمع آب در این فصل است، درحالی‌که کاهش چشم‌گیر آن در تابستان ممکن است به دلیل تبخیر بیش‌تر در دماهای گرم‌تر باشد. به‌طور خاص، در ماه‌های زمستانی، شار آب خالص و ذخیره آب زیرزمینی به نقطه اوج خود می‌رسند که این موضوع تأمین آب را در طول فصل‌های خشک تر تضمین می‌کند. با این حال، با ورود به ماه‌های گرم‌تر، شار آب خالص کاهش یافته و به منفی می‌رسد که این امر نشان‌دهنده کاهش بارندگی و افزایش تبخیر-تعرق است. رطوبت خاک نیز با الگوی



شکل ۶- تحلیل مقایسه‌ای الگوهای ماهانه شار آب خالص با متغیرهای محیطی مختلف در حوضه دریاچه ارومیه
Figure 6 - Comparative analysis of monthly patterns of pure water flow with various environmental variables of the Urmia Lake basin

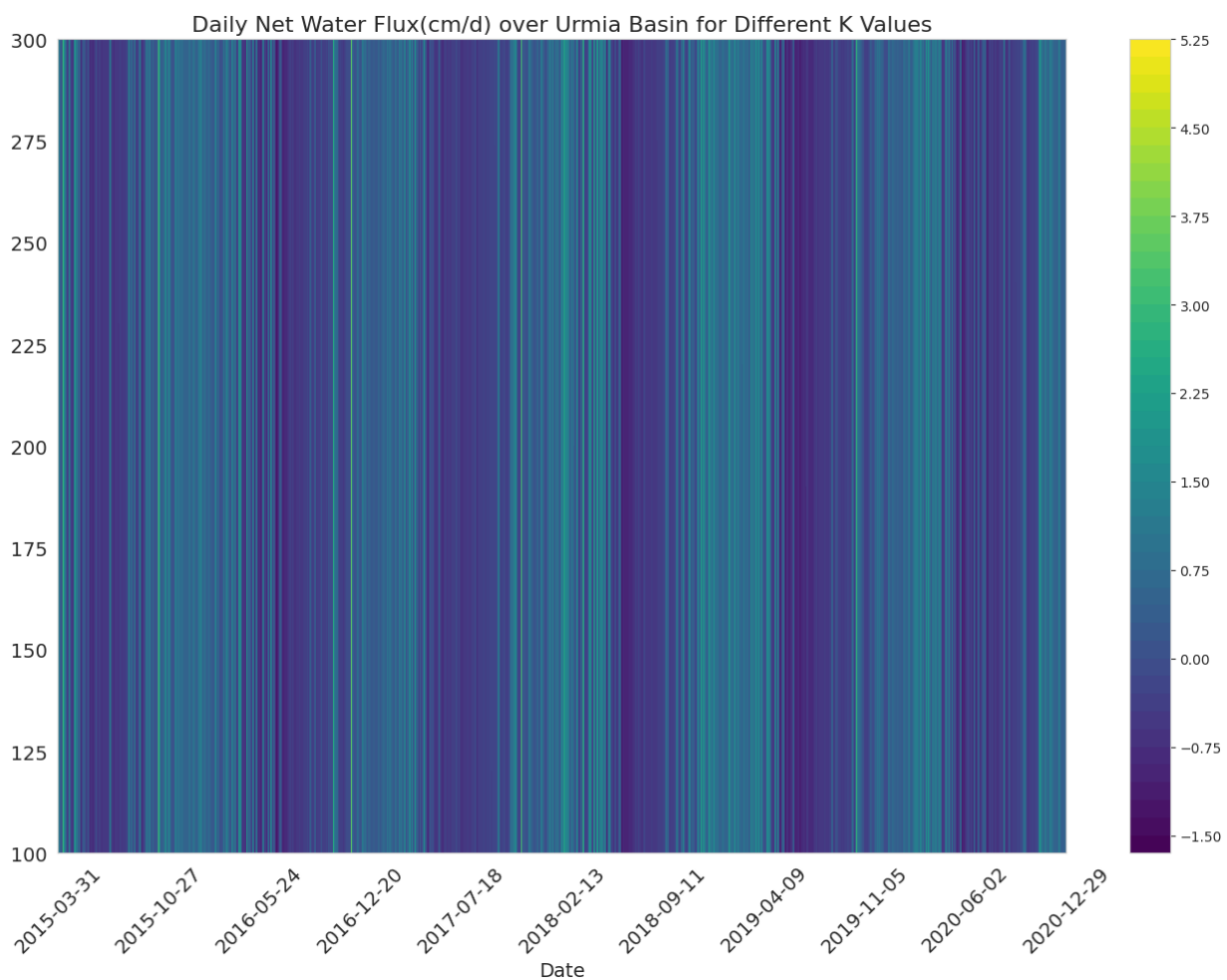
مدل تحلیلی شار آب خالص سطحی که توسط Sadeghi et al. (2019) معرفی شده است، با استفاده از نمودارهای کانتور و سه‌بعدی به‌دقت بررسی شده و برای ۲۱ مقدار مختلف پارامتر

۳-۴- تحلیل حساسیت مدل تحلیلی شار آب خالص سطحی

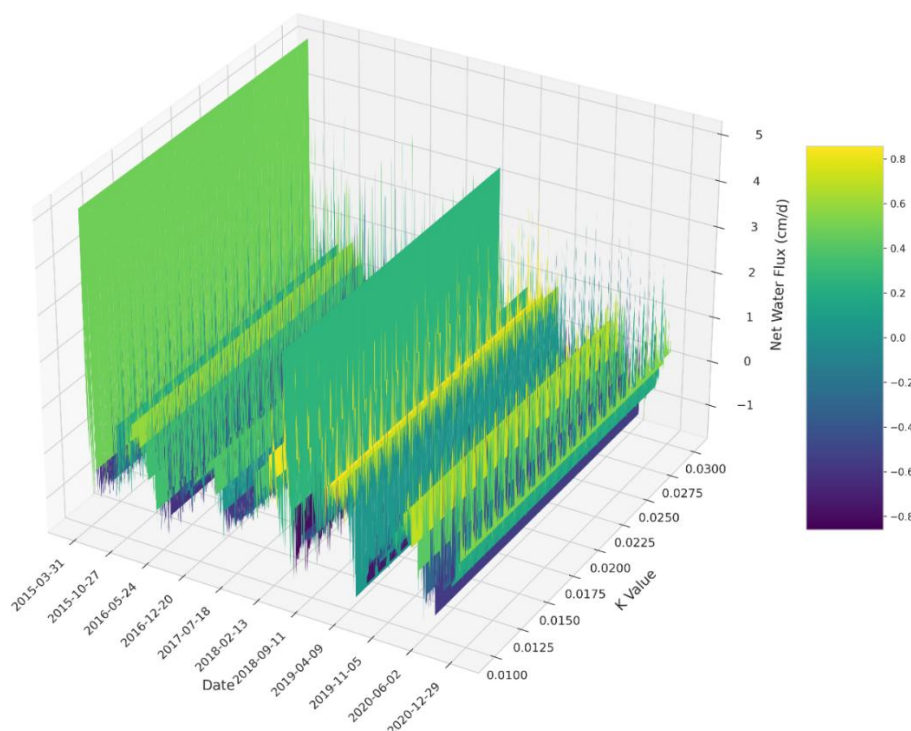
مدل از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج حاصل از این تحلیل حساسیت، فرصت‌های جدیدی را برای ارزیابی و بهبود سایر جنبه‌های مدل فراهم می‌آورند، از جمله بررسی تأثیر دیگر پارامترهای مدل بر دقت و قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌ها. درنهایت، این تحلیل حساسیت اطمینان از قابلیت اعتماد مدل را در شبیه‌سازی جریان آب خالص در حوضه ارائه می‌دهد و پتانسیل کاربرد گسترده‌تر مدل را در مطالعات محیطی و مدیریت منابع آب نشان می‌دهد. این یافته‌ها باید در تدوین سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب در نظر گرفته شوند تا اطمینان حاصل شود که تصمیمات مبتنی بر داده‌های دقیق و قابل اعتماد استوار هستند.

'K' اجرا شد. نتایج نشان می‌دهند که جریان آب خالص به تغییرات 'K' واکنش ناچیزی نشان می‌دهد، این موضوع توسط توزیع یکنواخت شدت رنگ‌ها در نمودار کانتور مشخص شده و توسط نمودار سه‌بعدی تأکید بیشتری می‌یابد. این یکنواختی نشان دهنده پایداری مدل در برابر تغییرات این پارامتر خاص است.

این یافته‌ها تأیید می‌کنند که مدل می‌تواند بدون نیاز به تنظیم دقیق 'K'، جریان آب در حوضه دریاچه ارومیه را با دقت بالا شبیه‌سازی کند. استقلال مدل از تنظیمات دقیق 'K' امکان اعمال آن را در شرایط مختلف و با داده‌های ورودی متنوع تسهیل می‌بخشد که برای تحقیقات آتی و کاربردهای عملی



Daily Net Water Flux(cm/d) over Urmia Basin for Different K Values



شکل ۷- آنالیز تحلیل حساسیت مدل برای پارامتر K
Figure 7 - Model sensitivity analysis for parameter K

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، پس از برآورد شار آب خالص سطحی در حوضه دریاچه ارومیه، بررسی چگونگی تأثیر این شاخص بر پارامترهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در حوضه دریاچه ارومیه مورد توجه قرار گرفت. با استفاده از داده‌های رطوبت خاک ماهواره SMAP با دقت مکانی ۹ کیلومتر که به‌عنوان ورودی مدل Sadeghi et al. (2019) در نظر گرفته شد، شار آب خالص سطحی برای بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰ میلادی برآورد شد. نتایج نشان داد که شار آب خالص سطحی که از تفاوت بین نفوذ و تبخیر-تعرق ناشی می‌شود، نقش کلیدی در تعادل آب زمینی و به تبع آن در سطح آب دریاچه ارومیه دارد. مطالعه حاضر نشان داد که تغییرات فصلی و سالانه در شار آب خالص سطحی تأثیرات قابل توجهی بر میزان رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و ذخیره آب زیرزمینی دارند. بارش به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی مستقیماً بر شار آب خالص سطحی تأثیر می‌گذارد. هر زمان که بارش افزایش می‌یابد، شار آب خالص سطحی نیز به سرعت افزایش پیدا می‌کند. این همبستگی نشان می‌دهد که بارش عامل اصلی در تغییرات شار آب خالص سطحی است و تأثیرات آن به‌صورت آنی و مستقیم قابل مشاهده است. همچنین، تحلیل‌های همبستگی نشان داد که بین شار آب خالص سطحی و پارامترهای محیطی مانند

رطوبت خاک، شاخص سبزیگی (NDVI) و دمای سطح زمین (LST) ارتباطات معناداری وجود دارد. تحلیل‌های انجام‌شده بر روی داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های هیدرولوژیکی نشان می‌دهند که مدیریت منابع آب در حوضه دریاچه ارومیه نیازمند درک دقیقی از تعاملات بین پارامترهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی است. این درک می‌تواند به اتخاذ تصمیمات مدیریتی مؤثرتری در راستای حفاظت از منابع آبی و اکوسیستم‌های مرتبط منجر شود. درنهایت، این مطالعه بر اهمیت استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های پیشرفته در تحلیل و مدیریت منابع آبی تأکید دارد. با توجه به چالش‌های فزاینده ناشی از تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی، توسعه روش‌های مطالعه و مدیریت پایدار منابع آب، برای حفظ تعادل اکوسیستم‌ها و تأمین نیازهای آبی جوامع انسانی حائز اهمیت است.

سپاسگزاری

در این بخش از همکاری و مساعدت دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران قدردانی می‌شود.

مشارکت نویسندگان

محمدصادق طهمورسی: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماری، نگارش نسخه اولیه مقاله
محمدحسین نیک‌سخن: راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج
امیرهوشنگ احسانی: مفهوم‌سازی، مشاوره، بازبینی متن مقاله، تحلیل‌های آماری.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A., & Jensen, M.E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899–920. doi:10.1016/j.agwat.2010.12.015
- Awe, G.O., Reichert, J.M., Timm, L.C., & Wendroth, O.O. (2015). Temporal processes of soil water status in a sugarcane field under residue management. *Plant and Soil*, 387(1-2), 395–411. doi:10.1007/s11104-014-2304-5
- Baethgen, W.E., & Goddard, L. (2013). Latin American Perspectives on Adaptation of Agricultural Systems to Climate Variability and Change. *ICP Series on Climate Change Impacts, Adaptation, and Mitigation*, 57–72. doi:10.1142/9781848169845_0004
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, C., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., & U, K. T. P. (2001). Fluxnet: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11), 2415–2434. doi:10.1175/1520-0477(2001)082%3C2415:FANTTS%3E2.3.CO; 2
- Brocca, L., Camici, S., Melone, F., Moramarco, T., Martínez-Fernández, J., Didon-Lescot, J.F., & Morbidelli, R. (2013). Improving the representation of soil moisture by using a semi-analytical infiltration model. *Hydrological Processes*, 28(4), 2103–2115. doi:10.1002/hyp.9766
- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., & Tarpanelli, A. (2017). Soil Moisture for Hydrological Applications: Open Questions and New Opportunities. *Water*, 9(2), 140. doi:10.3390/w9020140
- Brocca, L., Tarpanelli, A., Filippucci, P., Dorigo, W., Zaussinger, F., Gruber, A., & Fernández-Prieto, D. (2018). How much water is used for irrigation? A new approach exploiting coarse resolution satellite soil moisture products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 752–766. doi:10.1016/j.jag.2018.08.023
- Chen, F., Crow, W.T., Starks, P.J., & Moriasi, D.N. (2011). Improving hydrologic predictions of a catchment model via assimilation of surface soil moisture. *Advances in Water Resources*, 34(4), 526–536. doi:10.1016/j.advwatres.2011.01.011
- Decker, M., & Zeng, X. (2009). Impact of modified Richards equation on global soil moisture simulation in the Community Land Model (CLM3. 5). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 1(3). doi: 10.3894/JAMES.2009.1.5
- Dorigo, W.A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., Gruber, A., Drusch, M., Mecklenburg, S., van Oevelen, P., Robock, A., & Jackson, T. (2011). The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1675–1698. doi:10.5194/hess-15-1675-2011
- Fisher, J.B., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M.F., Hook, S., Baldocchi, D., Townsend, P.A., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D.D., Perret, J., Lagouarde, J.-P., Waliser, D., Purdy, A.J., French, A., Schimel, D., & Famiglietti, J.S. (2017). The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resources Research*, 53(4), 2618–2626. doi:10.1002/2016wr020175
- Gurdak, J.J. (2017). Climate-induced pumping. *Nature Geoscience*, 10(2), 71–71. doi:10.1038/ngeo2885
- Hong, Y., Adler, R.F., Negri, A., & Huffman, G.J. (2007). Flood and landslide applications of near real-time satellite rainfall products. *Natural Hazards*, 43(2), 285–294. doi:10.1007/s11069-006-9106-x
- Hughes, D.A. (2009). Modelling semi-arid and arid hydrology and water resources: The southern Africa experience. *Cambridge University Press EBooks*, 29–40. doi:10.1017/cbo9780511535734.004
- Jalilvand, E., Tajrishy, M., Ghazi Zadeh Hashemi,

- S. A., & Brocca, L. (2019). Quantification of irrigation water using remote sensing of soil moisture in a semi-arid region. *Remote Sensing of Environment*, 231, 111226. doi:10.1016/j.rse.2019.111226
- Kogan, F.N. (1998). Global drought and flood-watch from NOAA polar-orbiting satellites. *Advances in Space Research*, 21(3), 477–480. doi:10.1016/s0273-1177(97)00883-1
- Lawston, P.M., Santanello, J.A., & Kumar, S.V. (2017). Irrigation Signals Detected From SMAP Soil Moisture Retrievals. *Geophysical Research Letters*, 44(23), 11, 860–811, 867. doi:10.1002/2017gl075733
- Liu, Y., Lu, Y., Sadeghi, M., Horton, R., & Ren, T. (2024). Measurement and estimation of evapotranspiration in a maize field: A new method based on an analytical water flux model. *Agricultural Water Management*, 295, 108764–108764. doi:10.1016/j.agwat.2024.108764
- Moore, S., & Fisher, J.B. (2012). Challenges and Opportunities in GRACE-Based Groundwater Storage Assessment and Management: An Example from Yemen. *Water Resources Management*, 26(6), 1425–1453. doi:10.1007/s11269-011-9966-z
- Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318–333. doi: 10.1063/1.1745010
- Richey, A.S., Thomas, B.F., Lo, M.H., Reager, J.T., Famiglietti, J.S., Voss, K., Swenson, S., & Rodell, M. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research*, 51(7), 5217–5238. doi:10.1002/2015wr017349
- Rodell, M., Beaudoing, H.K., L'Ecuyer, T.S., Olson, W.S., Famiglietti, J.S., Houser, P.R., Adler, R., Bosilovich, M.G., Clayson, C.A., Chambers, D., Clark, E., Fetzer, E.J., Gao, X., Gu, G., Hilburn, K., Huffman, G.J., Lettenmaier, D.P., Liu, W.T., Robertson, F.R., & Schlosser, C.A. (2015). The Observed State of the Water Cycle in the Early Twenty-First Century. *Journal of Climate*, 28(21), 8289–8318. doi:10.1175/jcli-d-14-00555.1
- Sadeghi, M., Gao, L., Ebtehaj, A., Wigneron, J.P., Crow, W.T., Reager, J.T., & Warrick, A.W. (2020). Retrieving global surface soil moisture from GRACE satellite gravity data. *Journal of Hydrology*, 584, 124717. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.124717
- Sadeghi, M., Hatch, T., Huang, G., Bandara, U., Ghorbani, A., & Dogrul, E. C. (2022). Estimating soil water flux from single-depth soil moisture data. *Journal of Hydrology*, 610, 127999. doi:10.1016/j.jhydrol.2022.127999
- Sadeghi, M., Tuller, M., Warrick, A.W., Babaeian, E., Parajuli, K., Gohardoust, M.R., & Jones, S.B. (2019). An analytical model for estimation of land surface net water flux from near-surface soil moisture observations. *Journal of Hydrology*, 570, 26–37. doi:10.1016/j.jhydrol.2018.12.038
- Seneviratne, S.I., Corti, T., Davin, E.L., Hirschi, M., Jaeger, E.B., Lehner, I., Orlowsky, B., & Teuling, A.J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4), 125–161. doi:10.1016/j.earscirev.2010.02.004
- Tramblay, Y., Bouvier, C., Martin, C., Didon-Lescot, J.F., Todorovik, D., & Domergue, J.M. (2010). Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 387(3–4), 176–187. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.04.006
- Trenberth, K.E., Fasullo, J.T., & Kiehl, J. (2009). Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(3), 311–324. doi:10.1175/2008bams2634.1
- Wanders, N., Karssenberg, D., Ad de Roo, S.M. de Jong, & Marc. (2014). The suitability of remotely sensed soil moisture for improving operational flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(6), 2343–2357. doi:10.5194/hess-18-2343-2014
- Warrick, A.W. (1975). Analytical solutions to the one-dimensional linearized moisture flow equation for arbitrary input. *Soil Science*, 120(2), 79–84. doi:10.1097/00010694-197508000-00001
- Xie, P., & Arkin, P. A. (1997). Global Precipitation: A 17-Year Monthly Analysis Based on Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Outputs. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(11), 2539–2558. doi:10.1175/1520-0477(1997)078%3C2539:gpayma%3E2.0.co;2
- Zaussinger, F., Dorigo, W., Gruber, A., Tarpanelli, A., Filippucci, P., & Brocca, L. (2019). Estimating irrigation water use over the contiguous United States by combining satellite and reanalysis soil moisture data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(2), 897–923. doi:10.5194/hess-23-897-2019
- Zhang, F., Pu, Z., & Wang, C. (2019). Impacts of Soil Moisture on the Numerical Simulation of a Post-Landfall Storm. *Journal of Meteorological Research*, 33(2), 206–218. doi:10.1007/s13351-019-8002-8.