



Application of the Combination of Remote Sensing and Machine Learning Approaches in Predicting Hydrological Parameters: A Bibliometric Analysis

Moein Tosan¹|Raziye Shamshirgaran²|Mehdi Dastourani¹

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail:

moein.tosan@birjand.ac.ir

2. Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail:

r.shamshirgaran@birjand.ac.ir

1. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran. E-mail: mdastourani@birjand.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Review Article	The integration of remote sensing data with machine learning (ML) techniques has emerged as a robust and effective paradigm for predicting key hydrological parameters, including evapotranspiration, soil moisture content, and land surface temperature. This study presents a comprehensive scientometric analysis of research trends and international collaborative networks within this rapidly evolving field. Data pertinent to this investigation were retrieved from the Web of Science Core Collection database and subsequently analyzed using the Bibliometrix R package and VOSviewer software. These analyses facilitated the identification and visualization of complex interrelationships among scholarly publications, contributing authors, topical keywords, and affiliated countries/institutions. The findings reveal a prominent trend toward the application of advanced ML algorithms, such as Artificial Neural Networks (ANNs) and Random Forest (RF), in conjunction with remotely sensed data acquired from platforms like MODIS, Sentinel, and SMAP, particularly in regions characterized by limited in situ observational data. Furthermore, the utilization of multi-source data fusion and sophisticated ML algorithms for enhanced simulation accuracy of hydrological processes and improved predictive capabilities for climate change impacts and drought events has been identified as a key emerging research direction. Notably, the increasing reliance on satellite-derived datasets, including MODIS, SMAP, and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), for hydrological parameter estimation in data-scarce environments constitutes another significant observation. Beyond identifying prevailing research trends, this study critically examines existing challenges, knowledge gaps, and potential avenues for future research endeavors in this domain.
Article history:	
Received: Dec. 12, 2024	
Revised: Jan. 2, 2024	
Accepted: Jan. 13, 2024	
Published online: May. 2025	
Keywords: Data Integration, Scientometric Analysis, Multi-Source Data, Research Trends, Hydrology.	
Cite this article: Tosan, M., Shamshirgaran, R., & Dastourani, M. (2025). Application of the Combination of Remote Sensing and Machine Learning Approaches in Predicting Hydrological Parameters: A Bibliometric Analysis, <i>Iranian Journal of Soil and Water Research</i> , 56 (3), 825-850. https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.386927.669850	
© The Author(s). Publisher: The University of Tehran Press.	
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.386927.669850	



EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

Hydrology, as a critical discipline in environmental sciences, faces significant challenges in monitoring and forecasting water resources under complex and changing climatic conditions. Traditional hydrological methods, which rely primarily on ground-based data and physical models, are often limited in terms of spatial coverage, temporal resolution, and computational efficiency. In recent years, Remote Sensing (RS) and Machine Learning (ML) have emerged as transformative tools to address these limitations. Remote sensing provides extensive, global coverage data, enabling the monitoring of hydrological variables across diverse landscapes and climates. However, the processing, interpretation, and integration of these vast datasets require advanced computational techniques. Machine learning plays a crucial role in efficiently processing these data, identifying patterns, making predictions, and optimizing hydrological models. The integration of RS and ML offers substantial potential for hydrology, particularly in flood forecasting, drought monitoring, watershed management, and groundwater resource assessment. These technologies can help overcome major challenges faced by hydrologists, such as data gaps, high computational costs, and the complexity of hydrological systems. This study aims to explore the integration of these technologies, identify key research trends, and propose future directions to enhance the joint application of RS and ML in hydrology.

Method:

The methodology adopted for this study involves a bibliometric analysis to assess the application of remote sensing and machine learning in hydrology. Bibliometric analysis examines various scholarly outputs, researchers, and institutions in a specific scientific domain to identify research trends, collaboration networks, and knowledge structures. The analysis was performed in five key stages. Initially, precise research questions were defined to guide the study, followed by the selection of relevant research articles from the Web of Science database. The research used Boolean search strings to extract articles based on keywords related to remote sensing, machine learning, and various hydrological sciences. Data collection involved gathering bibliographic information such as article titles, authors, citations, keywords, and abstracts. This study used the Bibliometrix R package for the analysis, which is equipped with statistical algorithms, numerical methods, and visualization capabilities. Network analysis and keyword clustering were conducted using tools like Bibliophagy within the Bibliometrix package, facilitating the identification of prominent research trends, influential authors, and emerging topics in the field.

Results:

The bibliometric analysis revealed key trends and gaps in the integration of remote sensing and machine learning in hydrological research. A significant portion of the literature focuses on the application of RS data, such as satellite imagery and airborne observations, in hydrological modeling, particularly in flood prediction, river discharge, and precipitation estimation. Machine learning techniques such as Artificial Neural Networks (ANNs), Support Vector Machines (SVMs), and Decision Trees have been employed to improve prediction accuracy in these areas. More recent studies have shifted toward deep learning techniques like Convolutional Neural Networks (CNNs) and Recurrent Neural Networks (RNNs), demonstrating superior performance in handling complex hydrological processes. However, challenges remain, particularly in integrating the temporal and spatial dimensions of RS data into ML models. Additionally, data scarcity, especially in developing countries, limits the training of robust ML models. The analysis also highlighted a lack of comprehensive interdisciplinary frameworks that integrate various aspects of hydrological systems, suggesting the need for more holistic approaches in future research.

Conclusions:

The integration of remote sensing and machine learning holds significant promise for advancing hydrological modeling and improving water resource management. This study underscores the need for continued innovation in techniques to address existing challenges, particularly the effective integration of temporal and spatial RS data into ML models. Future research should focus on developing interdisciplinary frameworks that account for the complexity of hydrological systems and address data gaps, especially in regions with limited access to high-quality datasets. The study also emphasizes the importance of collaboration among researchers, institutions, and governments to foster knowledge exchange and promote the development of scalable, efficient, and accurate models for hydrological predictions. By advancing these methodologies, hydrologists can better tackle the global challenges posed by climate change and environmental uncertainty, ensuring more reliable water resource management for the future.

Author Contributions:

For the article titled Integration of Remote Sensing Data and Advanced Machine Learning Techniques for Hydrological Prediction and Analysis: Emerging Approaches and Challenges, the contributions of the authors are as follows:

Conceptualization: Moein Tosan, Raziye Shamsirgaran, Abolfazl Akbarpour; Methodology: Moein Tosan; Software: Raziye Shamsirgaran; Validation: Moein Tosan, Raziye Shamsirgaran, Abolfazl Akbarpour; Formal Analysis: Moein Tosan; Investigation: Moein Tosan; Resources: Raziye Shamsirgaran; Data Curation: Raziye Shamsirgaran; Writing—Original Draft Preparation: Moein Tosan; Writing—Review and Editing: Moein Tosan, Raziye Shamsirgaran, Abolfazl Akbarpour; Visualization: Raziye Shamsirgaran; Supervision: Abolfazl Akbarpour; Project Administration: Abolfazl Akbarpour; Funding Acquisition: Abolfazl Akbarpour; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement:

Data available on request from the authors.

Ethical considerations:

This study did not require approval from an ethics committee. The authors declare that no data fabrication, falsification, plagiarism, or any form of misconduct was involved in the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

استفاده از ترکیب رویکردهای سنجش از دور و یادگیری ماشین در پیش‌بینی پارامترهای هیدرولوژیکی: یک مطالعه علم‌سنجی

معین توسن^۱ | راضیه شمشیرگران^۲ | مهدی دستورانی^۳

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: moein.tosan@birjand.ac.ir

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: r.shamshirgaran@birjand.ac.ir

۳. نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. رایانامه: mdastourani@birjand.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله مروری	ادغام داده‌های سنجش از دور با تکنیک‌های یادگیری ماشین، رویکردی نوین و مؤثر در پیش‌بینی پارامترهای هیدرولوژیکی از جمله تبخیر-تعرق، رطوبت خاک و دما محسوب می‌شود. این پژوهش با هدف تحلیل علم‌سنجی روندهای تحقیقاتی و همکاری‌های بین‌المللی در این حوزه انجام شده است. بدین منظور، داده‌های مرتبط از پایگاه اطلاعاتی Web of Science استخراج و با استفاده از نرم‌افزارهای Bibliometrix و VOSviewer تحلیل شدند. این تحلیل‌ها روابط بین مقالات، نویسندگان، کلمات کلیدی و کشورها را آشکار ساختند. نتایج نشان دادند که مدل‌های یادگیری ماشین پیشرفته نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و جنگل تصادفی (RF) در ترکیب با داده‌های سنجش از دور منابعی مانند MODIS، Sentinel و SMAP، به‌ویژه در مناطق با محدودیت داده‌های زمینی، کاربرد گسترده‌ای دارند. همچنین، استفاده از داده‌های چندمنبعی و الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین در راستای شبیه‌سازی دقیق‌تر پارامترهای هیدرولوژیکی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌ها به عنوان روندهای نوظهور شناسایی شدند. علاوه بر این، افزایش استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مانند MODIS، SMAP و شاخص NDVI در تحلیل پارامترهای هیدرولوژیکی در مناطق با کمبود داده‌های زمینی از دیگر یافته‌های مهم این پژوهش است. این مطالعه ضمن شناسایی روندهای کلیدی، به بررسی چالش‌ها، شکاف‌های تحقیقاتی و ارائه پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آتی در این حوزه می‌پردازد.
واژه‌های کلیدی: ادغام داده‌ها، تحلیل علم‌سنجی، داده‌های چندمنبعی، روندهای پژوهشی، هیدرولوژی.	

استناد: توسن، معین؛ شمشیرگران، راضیه؛ و دستورانی، مهدی (۱۴۰۴). استفاده از ترکیب رویکردهای سنجش از دور و یادگیری ماشین در پیش‌بینی پارامترهای هیدرولوژیکی: یک مطالعه علم‌سنجی، مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۲)، ۸۵۰-۸۲۵.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.386927.669850>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.386927.669850>

مقدمه

هیدرولوژی، به عنوان یک رشته حیاتی در علوم محیط زیست، با چالش های قابل توجهی در نظارت و پیش بینی منابع آبی در شرایط اقلیمی پیچیده و پویا مواجه است (Maier et al., 2024; Tosan et al., 2024). روش های سنتی هیدرولوژیکی که عمدتاً به داده های زمینی و مدل های فیزیکی وابسته اند، معمولاً با محدودیت هایی در پوشش فضایی، وضوح زمانی و کارایی محاسباتی روبه رو می باشند (Shu-feng et al., 2024; Xia et al., 2023). در سال های اخیر، سنجش از دور (RS) و یادگیری ماشین (ML) به عنوان ابزارهای تحول آفرین برای حل این محدودیت ها مطرح شده اند (Saha & Pal, 2024). سنجش از دور داده های وسیعی با پوشش جهانی فراهم می آورد که امکان نظارت بر متغیرهای هیدرولوژیکی در اقلیم ها و مناظر مختلف را فراهم می سازد (Abegeja, 2024). با این حال، پردازش، تفسیر و یکپارچه سازی این داده های حجیم نیازمند تکنیک های محاسباتی پیشرفته است (Mekonnen et al., 2024). در این راستا، یادگیری ماشین به عنوان یک ابزار ضروری وارد عمل می شود و روش های قدرتمندی برای شناسایی الگوها، پیش بینی ها و بهینه سازی مدل های هیدرولوژیکی ارائه می دهد (Kim et al., 2024).

ترکیب سنجش از دور و یادگیری ماشین پتانسیل فراوانی برای هیدرولوژی، به ویژه در زمینه هایی مانند پیش بینی سیلاب (Amiri et al., 2024; Tosan et al., 2025)، نظارت بر خشکسالی (Talebi & Samadianfard, 2024)، مدیریت حوضه های آبریز (Liu et al., 2024) و ارزیابی منابع آب زیرزمینی (Akbarpour et al., 2024) دارد. این فناوری ها می توانند به غلبه بر چالش های مهمی که هیدرولوژیست ها با آن ها مواجه اند، مانند شکاف های داده ای، هزینه های محاسباتی بالا و پیچیدگی سیستم های هیدرولوژیکی کمک کنند (Abbes et al., 2024). به عنوان مثال، داده های سنجش از دور، از جمله تصاویری ماهواره ای و مشاهدات هوایی، می توانند اطلاعات آنی در مورد وضعیت آب سطحی، تغییرات کاربری اراضی (Zafar et al., 2024)، بارش و پوشش گیاهی (Matyukira & Mhangara, 2024) ارائه دهند، در حالی که الگوریتم های یادگیری ماشین می توانند این داده ها را به طور مؤثر پردازش کرده و مدل سازی کنند تا پیش بینی ها و تصمیم گیری ها را بهبود بخشند.

روش های مبتنی بر سنجش از دور و یادگیری ماشین، امکان پایش دقیق تر و کارآمدتر متغیرهای هیدرولوژیکی مختلف از جمله تبخیر-تعرق، رطوبت خاک، سطح آب های سطحی و زیرزمینی و کیفیت آب را فراهم می کنند. تبخیر-تعرق (ET) به عنوان یکی از اجزای حیاتی چرخه آب، نقش مهمی در توازن آبی و انرژی زمین ایفا می کند و در مدیریت منابع آبی، کشاورزی و پیش بینی اقلیمی از اهمیت ویژه ای برخوردار است (Xiong et al., 2023). سنجش از دور با ارائه داده های گسترده و آنی از شاخص هایی مانند دمای سطح زمین، شاخص پوشش گیاهی و تابش خورشیدی، امکان برآورد مکانی و زمانی دقیق تر ET را فراهم می آورد (Amani et al., 2023). در این راستا، تکنیک های یادگیری ماشین به طور فزاینده ای برای تجزیه و تحلیل این داده ها به کار گرفته شده اند و ابزارهایی قدرتمند برای تخمین غیرخطی و چندمتغیره ET ارائه می دهند (Bai et al., 2021). به عنوان مثال، الگوریتم هایی مانند شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) و جنگل تصادفی (RF) با ترکیب داده های سنجش از دور و زمینی، توانسته اند دقت برآوردهای ET را بهبود بخشند و نتایجی کارآمدتر و مقیاس پذیرتر در مناطق مختلف ارائه دهند (Hadadi et al., 2022; Liu et al., 2024). این پیشرفت ها، به ویژه در شرایط کمبود داده های زمینی و تنوع اقلیمی، نقشی اساسی در مدیریت پایدار منابع آبی و کشاورزی ایفا می کنند.

پایش دقیق رطوبت خاک، به عنوان متغیری کلیدی در تبادلات آب و انرژی (Boutin et al., 2023) و تأثیرگذار مستقیم بر کشاورزی، رشد گیاه و مدیریت آبیاری (Bogena et al., 2022)، نقشی حیاتی در هیدرولوژی و پیش بینی خشکسالی ایفا می کند. داده های سنجش از دور، به ویژه از ماهواره هایی مانند MODIS، Sentinel و SMAP، با ارائه اطلاعات فضایی-زمانی پیوسته و با استفاده از روش های مختلف سنجش امکان پایش وسیع رطوبت خاک را فراهم می نمایند (Rostami et al., 2023; Van Hateren et al., 2023; Boutin et al., 2023). با این حال، استخراج دقیق رطوبت خاک نیازمند پردازش های پیچیده است. از این رو، ترکیب این داده ها با الگوریتم های یادگیری ماشین، از جمله SVM، ANN، RF (Duan et al., 2024; Liu et al., 2023) و به ویژه الگوریتم های یادگیری عمیق مانند RNN و CNN (Kim et al., 2021) با توانایی یادگیری الگوهای پیچیده و استخراج ویژگی های فضایی-زمانی، دقت تخمین و مدل سازی تغییرات رطوبت خاک را بهبود بخشیده و در نتیجه به پایش دقیق تر، پیش بینی خشکسالی و مدیریت بهینه منابع آب کمک شایانی می نماید (Deogkoula et al., 2023)، امری که مستقیماً با اهداف این پژوهش در زمینه بهبود پیش بینی های هیدرولوژیکی همسو است.

ترکیب سنجش از دور و یادگیری ماشین، امکان پایش دقیق تر و کارآمدتر کیفیت آب و شناسایی آلاینده ها در منابع آب سطحی را فراهم می سازد. در حالی که روش های سنتی نمونه برداری و آزمایشگاهی محدود به نقاط مکانی خاص و زمان های گسسته می باشند

(Krishnaraj et al., 2022). داده‌های سنجش از دور، به‌ویژه تصاویر چند طیفی و ابرطیفی ماهواره‌ها مانند (Landsat-Sentinel-2) 8/9 و (Hyperspectral)، امکان پایش پیوسته و گسترده‌ی شاخص‌های کیفیت آب از جمله کدورت (Yang et al., 23)، کلروفیل-a (Xiao et al., 2023)، مواد معلق (Hafeez et al., 2022)، دمای سطح آب و شاخص‌های آلودگی‌های خاص مانند آلاینده‌های نفتی و فلزات سنگین را فراهم می‌آورند (Tysiac et al., 2022; Felegari et al., 2023). الگوریتم‌های یادگیری ماشین، از جمله شبکه‌های عصبی عمیق (DNN)، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) و جنگل‌های تصادفی (RF)، قادر به مدل‌سازی روابط پیچیده غیرخطی بین طیف‌های بازتابی و غلظت آلاینده‌ها هستند و می‌توانند نقشه‌های دقیق و با وضوح بالا از توزیع مکانی آلاینده‌ها در منابع آب سطحی تهیه کنند (Do et al., 2023). این امر به شناسایی منابع آلودگی نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و اتخاذ تصمیمات مدیریتی مؤثرتر در مقیاس‌های مختلف کمک می‌کند (Zhang et al., 2024).

در زمینه مدیریت منابع آب سطحی، ترکیب سنجش از دور و یادگیری ماشین ابزارهای قدرتمندی برای ارزیابی وضعیت منابع آب، پیش‌بینی تغییرات و بهینه‌سازی تخصیص منابع ارائه می‌دهد. داده‌های سنجش از دور، اطلاعات ارزشمندی در مورد وسعت و تغییرات سطح آب دریاچه‌ها، تالاب‌ها و رودخانه‌ها، میزان تبخیر-تعرق، رطوبت خاک و پوشش گیاهی ارائه می‌دهند (Zhang et al., 2024). با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه مدل‌های سری زمانی و مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) و شبکه‌های حافظه بلندمدت (LSTM)، می‌توان این داده‌ها را با سایر داده‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی ترکیب کرده و مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تری از جریان آب، سطح آب، میزان تبخیر-تعرق و سایر متغیرهای مرتبط ایجاد کرد (Zhao et al., 2024). این مدل‌ها می‌توانند در مدیریت بهره‌برداری از سدها، برنامه‌ریزی آبیاری، مدیریت بحران‌های آبی مانند خشکسالی و سیلاب، و تخصیص بهینه منابع آب در مقیاس‌های مختلف حوضه آبریز مورد استفاده قرار گیرند (Raman et al., 2024; Shah et al., 2024).

علاوه بر کاربردهای پیش‌تر ذکر شده، تلفیق سنجش از دور و یادگیری ماشین نقش بسزایی در شناسایی مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی، پایش سطح آب زیرزمینی و مدیریت بهینه این منابع ایفا می‌کند. روش‌های سنتی اکتشاف آب‌های زیرزمینی، مانند حفاری‌های اکتشافی و آزمون‌های پمپاژ، پرهزینه و زمان‌بر بوده و اطلاعات محدودی در مورد توزیع فضایی آبخوان‌ها ارائه می‌دهند. در مقابل، داده‌های سنجش از دور، از جمله تصاویر ماهواره‌ای Landsat، Sentinel و SRTM و داده‌های ژئوفیزیکی هواپرد، اطلاعات ارزشمندی در مورد پارامترهای مؤثر در وجود و حرکت آب زیرزمینی، از جمله زمین‌شناسی، ساختار زمین، پوشش گیاهی، رطوبت خاک، و توپوگرافی ارائه می‌دهند (Atilla et al., 2024; Adams et al., 2022). با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، می‌توان روابط پیچیده بین این پارامترها و پتانسیل آب زیرزمینی را مدل‌سازی کرده و نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی با دقت بالا تهیه نمود (Roy et al., 2024). همچنین، تکنیک‌های تداخل سنجی راداری (InSAR) و داده‌های ارتفاعی ماهواره‌ای امکان پایش تغییرات سطح آب زیرزمینی را با دقت و پوشش فضایی بالا فراهم می‌آورند (Tang et al., 2024). این اطلاعات، در ترکیب با مدل‌های هیدرولوژیکی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، می‌توانند در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، از جمله تعیین میزان برداشت مجاز، مکان‌یابی بهینه چاه‌ها و ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی، مورد استفاده قرار گیرند.

با وجود پتانسیل‌های فراوان، یکپارچه‌سازی سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی با چالش‌های متعددی روبه‌رو است. تنوع داده‌های سنجش از دور، پیچیدگی فرآیندهای هیدرولوژیکی و نیاز به داده‌های آموزشی با کیفیت از جمله موانع اصلی است که محققان باید بر آن‌ها فائق آیند (Wang et al., 2024). علاوه بر این، عدم قطعیت‌های موجود در هر دو داده‌های سنجش از دور (به‌دلیل عواملی همچون تداخل جو و وضوح فضایی) و مدل‌های یادگیری ماشین (به‌دلیل مشکلاتی نظیر بیش‌برازش، کم‌برازش یا سوگیری مدل) به پیچیدگی‌های کاربرد این فناوری‌ها در هیدرولوژی افزوده است (Han et al., 2024). مطالعات اولیه عمدتاً بر استفاده از داده‌های سنجش از دور در مدل‌سازی هیدرولوژیکی، مانند پیش‌بینی بارش-رواناب، متمرکز بودند که در آن‌ها از تکنیک‌های مختلف یادگیری ماشین برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها استفاده شده است (Zhu et al., 2023). به‌عنوان مثال، روش‌هایی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) و درخت‌های تصمیم برای پیش‌بینی جریان رودخانه، رویدادهای سیلابی و توزیع بارش مبتنی بر داده‌های سنجش از دور به کار رفته‌اند و در بسیاری از موارد نتایج امیدوارکننده‌ای به دست آمده است (Pangali Sharma et al., 2020; Sahoo et al., 2019).

پیشرفت‌های اخیر بیشتر به تکنیک‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) و شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN) متمرکز شده‌اند که انعطاف‌پذیری و دقت بالاتری در پردازش فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی ارائه می‌دهند (Tosan et al., 2024).

2024). این تکنیک‌ها در مطالعاتی برای پیش‌بینی سیلاب (Xu et al., 2021)، نقشه‌برداری منابع آب زیرزمینی (Kim et al., 2022) و برآورد تبخیر-تعرق (Li et al., 2022) به کار گرفته شده‌اند و پتانسیل آن‌ها برای مدل‌سازی و پیش‌بینی با عملکرد بالا را نشان داده‌اند. علاوه بر این، داده‌های مبتنی بر سنجش از دور، از جمله داده‌های ماهواره‌های MODIS، Landsat و Sentinel، همراه با الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای نظارت بر کیفیت آب (Arias-Rodriguez et al., 2023)، دینامیک آب سطحی (Shi et al., 2024) و تغییرات کاربری اراضی (Mahmoud et al., 2023) تأثیرگذار بر سیستم‌های هیدرولوژیکی استفاده شده‌اند. با این حال، همچنان چالش‌هایی در زمینه یکپارچه‌سازی مؤثر سنجش از دور و یادگیری ماشین در کاربردهای هیدرولوژیکی وجود دارد. به عنوان مثال، یکپارچه‌سازی ابعاد زمانی و مکانی داده‌های سنجش از دور در مدل‌های یادگیری ماشین همچنان چالش‌برانگیز است (Li et al., 2023). همچنین، بسیاری از مطالعات به جنبه‌های خاصی از سیستم‌های هیدرولوژیکی پرداخته‌اند، در حالی که چارچوب‌های چندرشته‌ای جامع که جنبه‌های مختلف سیستم‌های هیدرولوژیکی را یکپارچه کنند، هنوز به طور کامل توسعه نیافته‌اند. همچنین، در دسترس بودن مجموعه‌های داده با کیفیت بالا که برای آموزش مدل‌های یادگیری ماشین ضروری است، در بسیاری از مناطق، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، همچنان یک محدودیت بزرگ است.

هدف اصلی این مطالعه، بررسی وضعیت تحقیقات در زمینه ترکیب سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی، شناسایی روندهای کلیدی و پیشنهاد جهت‌گیری‌های آینده برای کاربرد مشترک این دو فناوری است. این مطالعه با انجام یک مرور جامع و بیبلمتری از ادبیات، به تحلیل قوت‌ها و ضعف‌های روش‌های موجود، ارزیابی شکاف‌های موجود در دانش کنونی و پیشنهاد مسیرهای جدید برای تحقیق می‌پردازد. از طریق تحلیل جامع مطالعات موردی و کاربردها، این پژوهش به دنبال شناسایی استراتژی‌های مؤثر برای ترکیب داده‌های سنجش از دور با تکنیک‌های یادگیری ماشین، به ویژه در زمینه مدیریت منابع آب، پیش‌بینی سیلاب و نظارت بر منابع آب زیرزمینی است. یافته‌های این تحقیق نه تنها بینش‌هایی در مورد وضعیت کنونی این حوزه ارائه خواهد داد، بلکه روش‌شناسی‌های نوآورانه و موضوعات پژوهشی که می‌توانند پیشرفت‌های آینده را به دنبال داشته باشند، پیشنهاد خواهد کرد. در نهایت، هدف این است که به توسعه مدل‌های دقیق‌تر، کارآمدتر و مقیاس‌پذیر برای پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی کمک کرده و توانایی هیدرولوژیست‌ها را در مواجهه با چالش‌های جهانی منابع آب در دوران تغییرات اقلیمی و عدم قطعیت‌های محیط‌زیستی افزایش دهد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تحلیل علم‌سنجی برای بررسی کاربرد سنجش از دور و روش‌های یادگیری ماشین در هیدرولوژی انجام شد. روش علم‌سنجی (Wallin, 2005) به تحلیل داده‌های متنوع مرتبط با انتشارات، پژوهشگران و مؤسسات در یک حوزه علمی خاص می‌پردازد تا روندهای پژوهشی، شبکه‌های همکاری، و ساختارهای دانشی را شناسایی کند (de Oliveira et al., 2019). این روش با بررسی روابط استنادی بین مقالات، شبکه‌های هم‌نویسندگی و کلمات کلیدی پژوهشی، به ایجاد تصویری از توسعه فکری و جریان دانش در آن حوزه می‌پردازد (Tosan, Dastourani, et al., 2024). از طریق این تحلیل، موضوعات کلیدی پژوهشی و الگوهای همکاری میان پژوهشگران شناسایی می‌شود و تکامل و روندهای حوزه مورد بررسی مورد مطالعه قرار می‌گیرد (Donthu et al., 2021). در مرحله طراحی پژوهش، تعریف دقیق محورهای پژوهشی که قرار است به آن‌ها پاسخ داده شود، از اهمیت بالایی برخوردار است (Tosan et al., 2024). در این پژوهش، تحلیل استنادی برای بررسی روندهای پژوهشی در زمینه کاربرد سنجش از دور و روش‌های یادگیری ماشین در هیدرولوژی و شناسایی مقالات، مجلات، نویسندگان، مؤسسات و کشورهای تأثیرگذار انتخاب شد. همچنین، در بخش تحلیل شبکه، سه‌میدانه (مجلات، کلمات کلیدی و کشورها) استخراج شد. افزون بر این، برای خوشه‌بندی کلمات کلیدی مرتبط با کاربرد سنجش از دور و روش‌های یادگیری ماشین در هیدرولوژی از جفت شدن بیبلیوگرافی استفاده شد.

در مرحله جمع‌آوری داده‌ها، مقالات پژوهشی مرتبط با توجه به سؤالات پژوهشی تعریف‌شده استخراج شدند. داده‌ها از پایگاه‌های Web of Science جمع‌آوری شدند. پژوهشگران با استفاده از اصطلاحات جستجو، کلمات کلیدی، نام مجلات و سایر معیارها، مقالات موردنظر را فیلتر و انتخاب کردند. اطلاعات علم‌سنجی شامل عنوان مقاله، نویسنده، تعداد استنادها، فهرست مراجع، نام مجله، کلمات کلیدی و چکیده به همراه داده‌های استنادی برای تحلیل‌های جفت شدن بیبلیوگرافی یا هم‌استنادی جمع‌آوری شد. در این پژوهش، داده‌های علم‌سنجی در سپتامبر ۲۰۲۴ از پایگاه Web of Science جمع‌آوری شدند و برای ایجاد رشته‌های جستجو از نحو بولی استفاده شد (مطابق جدول ۱). رشته جستجوی نهایی شامل کلمات کلیدی مرتبط با سنجش از دور (شامل: "remote sensing" or "Satellite" or "Radar")

: analys* OR manage* OR assess* (مانند "Sentinel" or "Landsat" or "MODIS" or "LiDAR" OR method* OR probab* "Machine learning" or "Deep Learning" or "Artificial Intelligence" or "Neural Network" or "Support Vector Machines" or "Decision Trees" or "Ensemble Learning" or "boosting" or "stacking" or "bagging" شامل) و علوم مختلف هیدرولوژی (شامل "Flood Prediction" or "Precipitation" or "Evapotranspiration" or "Vegetation" or "Soil moisture" or "Surface temperature" or "Water storage" or "Surface water level" or "Streamflow Discharge" or "Groundwater") استفاده شد. بر این اساس، ۴۲۸ مقاله استخراج شد که اغلب آن‌ها (۴۲۷ مورد) انگلیسی بودند. این مقالات شامل ۳۸۱ مقاله علمی، ۴۱ مقاله کنفرانسی، ۵ مقاله مروری، ۶ مورد از سایر اسناد علمی بود.

در این مرحله، داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از تکنیک‌های مختلف علم‌سنجی برای شناسایی روابط میان داده‌ها تحلیل شدند. برای این پژوهش از بسته Bibliometrix در نرم‌افزار R استفاده شد (Aria & Cuccurullo, 2017). این بسته که در زبان متن‌باز R توسعه یافته، به دلیل الگوریتم‌های آماری، روش‌های عددی، و قابلیت‌های تصویری مورد استفاده قرار گرفت. همچنین از نسخه ۴٫۱ اپلیکیشن Biblioshiny که در این بسته موجود است، برای انجام تحلیل علم‌سنجی استفاده شد (Ghorbani, 2024). با استفاده از این اپلیکیشن، تحلیل شبکه همکاری نویسندگان، یک نمودار سه‌میدانی، و خوشه‌بندی کلمات کلیدی انجام گرفت. در مرحله مصورسازی، نقشه علمی بر اساس داده‌های تحلیل شده تولید شد. این نقشه، مقالات، نویسندگان و کلمات کلیدی را به صورت شبکه‌ای به تصویر می‌کشد و دیدگاهی جامع از ساختار و روندهای کلیدی در حوزه پژوهشی ارائه می‌دهد. این مصورسازی به شناسایی خوشه‌های اصلی، پژوهشگران کلیدی، و روابط میان بخش‌های مختلف حوزه پژوهش کمک می‌کند. در این پژوهش از نسخه ۱٫۶٫۲۰ نرم‌افزار VOSviewer برای مصورسازی شبکه‌های مجلات، مقالات، وابستگی‌ها، کشورها و کلمات کلیدی استفاده شد (Arruda et al., 2022). در این نقشه‌ها، نمادها با رنگ‌هایی که نشان‌دهنده سال انتشار است، مشخص شدند که این امکان را فراهم کرد تا تأثیر و دوره‌های فعالیت پژوهشی شناسایی شود. در مرحله پایانی، نقشه‌های علمی مصور و نتایج تحلیل برای تفسیر روندها و موضوعات اصلی در حوزه پژوهش مورد استفاده قرار گرفتند. این مرحله به شناسایی افراد کلیدی، مقالات تأثیرگذار، و ارتباطات بین موضوعات پژوهشی کمک می‌کند و همچنین شکاف‌ها یا حوزه‌های نوظهور را مشخص می‌سازد. بر اساس این تفاسیر، جهت‌گیری‌های آینده پژوهش پیشنهاد شده و توصیه‌های عملی برای پژوهشگران ارائه می‌شود (Zupic & Čater, 2015).

برای بررسی روندهای موضوعی و شناسایی مفاهیم کلیدی مورد استفاده در پژوهش‌های مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین در هیدرولوژی، تحلیل محتوای کلمات کلیدی مقالات مورد بررسی انجام شد. این تحلیل با استفاده از نرم‌افزار Biblioshiny انجام گرفت و فراوانی ۵۰ کلمه کلیدی اصلی نویسندگان استخراج و در قالب نمودار درختی (شکل ۱۳) نمایش داده شد. این نمودار به ما کمک کرد تا دسته‌های اصلی موضوعی و میزان تمرکز پژوهش‌ها بر هر دسته را شناسایی کنیم. دسته‌بندی کلمات کلیدی بر اساس مفاهیم مرتبط به شرح زیر انجام شد:

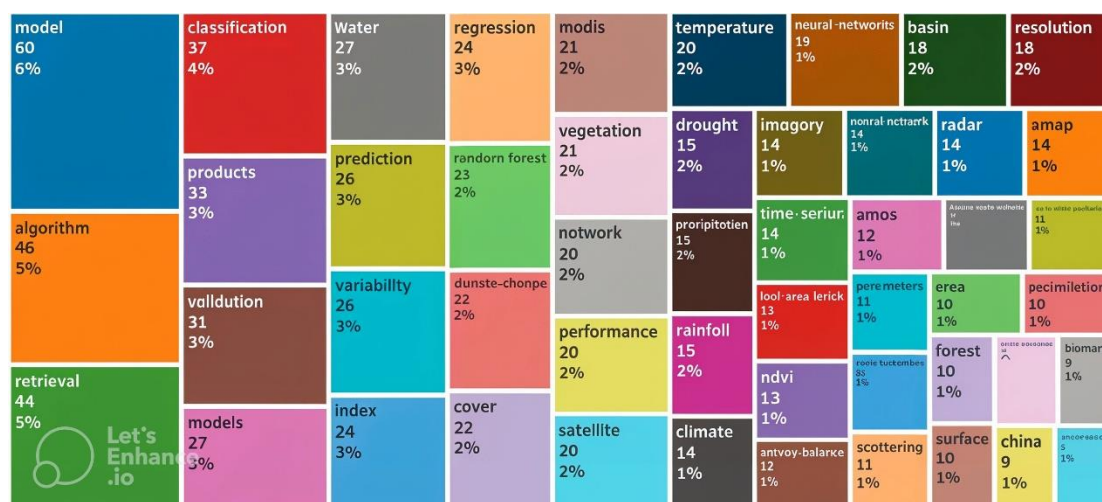
مدل‌ها و الگوریتم‌ها: برای بررسی میزان تمرکز پژوهش‌ها بر روش‌های مدل‌سازی، فراوانی کلمات کلیدی مرتبط با مدل‌ها و الگوریتم‌ها بررسی شد. کلمات کلیدی مانند "model"، "algorithm"، "models" و "random forest" به وفور در مقالات مورد بررسی مشاهده شدند که نشان‌دهنده اهمیت این موضوع در ادبیات پژوهشی است. این تحلیل به ما کمک کرد تا مشخص کنیم که چه نوع مدل‌ها و الگوریتم‌هایی بیشتر در این حوزه مورد استفاده قرار می‌گیرند. تمرکز بر الگوریتم‌های پیشرفته مانند جنگل تصادفی (Random Forest) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (Neural Networks) نیز مورد بررسی قرار گرفت.

داده‌های ماهواره‌ای و سنجش از دور: به منظور بررسی میزان استفاده از داده‌های سنجش از دور، فراوانی کلمات کلیدی مرتبط با این حوزه بررسی شد. کلمات کلیدی مانند "MODIS"، "satellite"، "radar"، "SMAP"، "NDVI" و "leaf area index" در این دسته‌بندی قرار گرفتند. این تحلیل به ما نشان داد که چه نوع داده‌های سنجش از دوری بیشتر در پژوهش‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

تأثیرات تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی: برای بررسی تمرکز پژوهش‌ها بر تأثیرات تغییرات اقلیمی، فراوانی کلمات کلیدی مرتبط با این موضوع بررسی شد. کلمات کلیدی مانند "climate change"، "temperature"، "precipitation"، "drought" و "rainfall" در این دسته‌بندی قرار گرفتند. این تحلیل به ما کمک کرد تا میزان توجه به این موضوع مهم در پژوهش‌های این حوزه را ارزیابی کنیم.

اعتبارسنجی و عملکرد مدل‌ها: برای بررسی اهمیت اعتبارسنجی مدل‌ها در پژوهش‌های مورد بررسی، فراوانی کلمات کلیدی مرتبط با این موضوع بررسی شد. کلمات "validation" و "performance" در این دسته‌بندی قرار گرفتند.

داده‌های زمانی و سری‌های زمانی: برای بررسی استفاده از داده‌های سری زمانی، فراوانی کلمات کلیدی مرتبط با این موضوع بررسی شد. کلمات "time-series" و "assimilation" در این دسته‌بندی قرار گرفتند.



شکل ۱۳. نمودار درختی مربوط به ۵۰ کلمه کلیدی اصلی در اسناد مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی

نتایج و بحث

روند تکاملی و افزایش تولید علمی در زمینه ادغام سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی

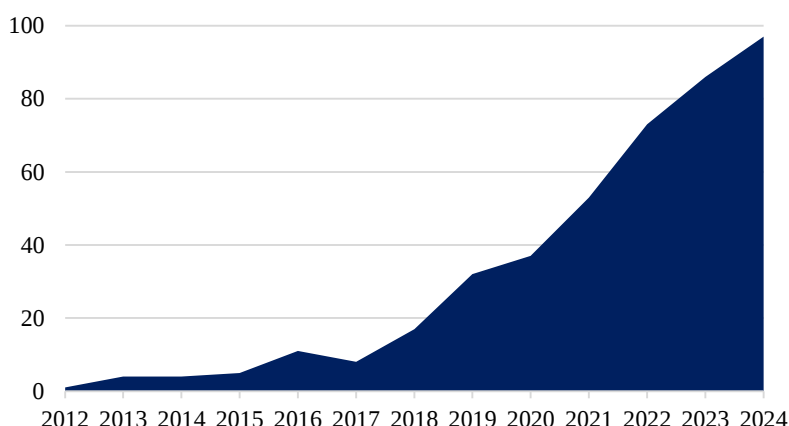
تحلیل روند تعداد مقالات منتشر شده در زمینه کاربرد سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی، نشان‌دهنده تحولی شگرف در این حوزه در دهه گذشته است. در سال‌های ابتدایی، تعداد مقالات نسبتاً کم بود، به طوری که در سال ۲۰۱۲ تنها یک مقاله منتشر شد. اما از سال ۲۰۱۶ به بعد، این تعداد به طور مداوم افزایش یافت و در سال ۲۰۲۳ به ۸۶ مقاله رسید. این روند نشان می‌دهد که از سال ۲۰۱۶، محققان و دانشمندان به تدریج بیشتر به پتانسیل‌های یادگیری ماشین و سنجش از دور در حوزه هیدرولوژی پی برده‌اند. این فناوری‌ها برای تحلیل داده‌های پیچیده، پیش‌بینی مدل‌های هیدرولوژیکی، و ارائه راهکارهای مدیریت منابع آب در مواجهه با تغییرات اقلیمی و بحران‌های زیست‌محیطی، به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند.

از سال ۲۰۱۹ به بعد، میزان انتشار مقالات به طرز چشمگیری افزایش یافته است. در سال ۲۰۱۹ تعداد مقالات به ۳۲ و در سال ۲۰۲۰ به ۳۷ مقاله رسید. این افزایش به وضوح نشان‌دهنده توجه بیشتر به کاربرد همزمان سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی است، به ویژه در دوران پاندمی که محققان در پی راهکارهای جدید برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی و بحران‌های آبی بودند. سال ۲۰۲۱ با ۵۳ مقاله، یک نقطه عطف دیگر در این روند است و در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ به ترتیب با ۷۳ و ۸۶ مقاله، شاهد بالاترین میزان تولید علمی در این حوزه هستیم. سال ۲۰۲۴، که هنوز در جریان است، نشان‌دهنده اوج تحولات علمی در این حوزه است. پیش‌بینی می‌شود که با رسیدن تعداد مقالات به ۹۷ مقاله تا پایان سال، همچنان رشد قابل توجهی در این زمینه وجود خواهد داشت. این روند نشان‌دهنده بلوغ این حوزه و نهادینه شدن کاربرد همزمان سنجش از دور و یادگیری ماشین در تحلیل‌های هیدرولوژیکی و پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی است.

تحلیل نقش مجلات کلیدی در پیشبرد پژوهش‌های بین‌رشته‌ای در هیدرولوژی و سنجش از دور

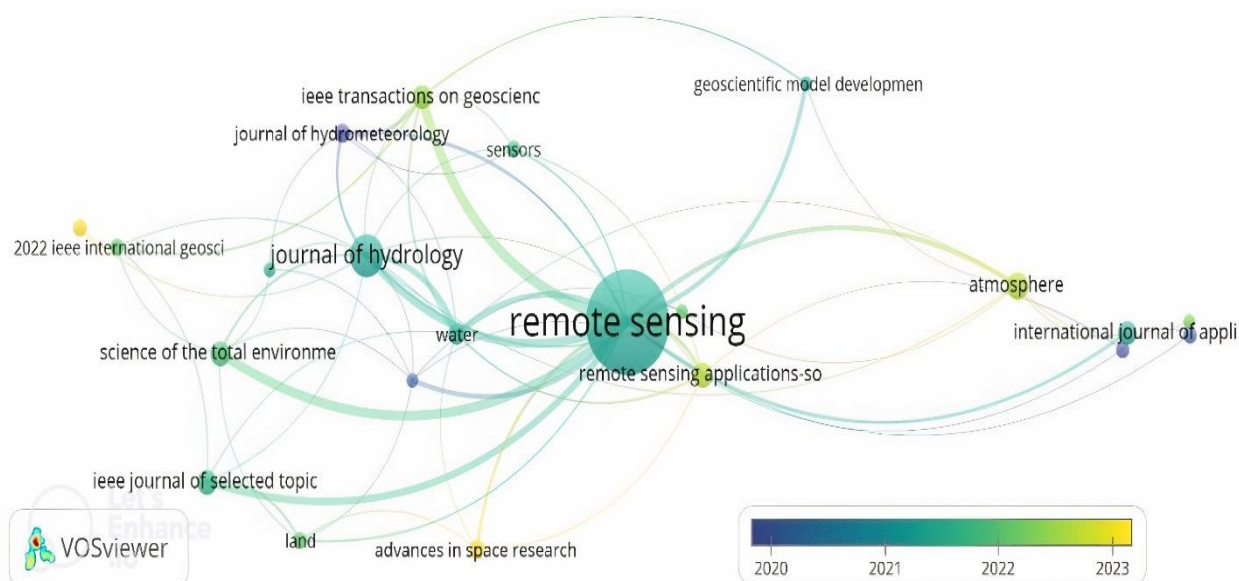
در حوزه پژوهش‌های مرتبط با سنجش از دور و روش‌های یادگیری ماشین در هیدرولوژی، چندین مجله به عنوان منابع اصلی در این زمینه شناخته شده‌اند. شکل ۲، تصویری شبکه‌ای از مرتبط‌ترین مجلات را با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer نشان می‌دهد. اندازه هر نماد متناسب با تعداد مقالات منتشر شده و رنگ آن نشان‌دهنده میانگین سال انتشار مقالات مربوطه است که روند توسعه پژوهش را نمایش

می‌دهد. ارتباط متقابل میان اکثر منابع نشان می‌دهد که مقالات پژوهشی در زمینه سنجش از دور و روشهای یادگیری ماشین در هیدرولوژی به طور گسترده مورد ارجاع و ارتباط قرار گرفته‌اند و بازتاب‌دهنده ویژگی همکاری در این حوزه است.

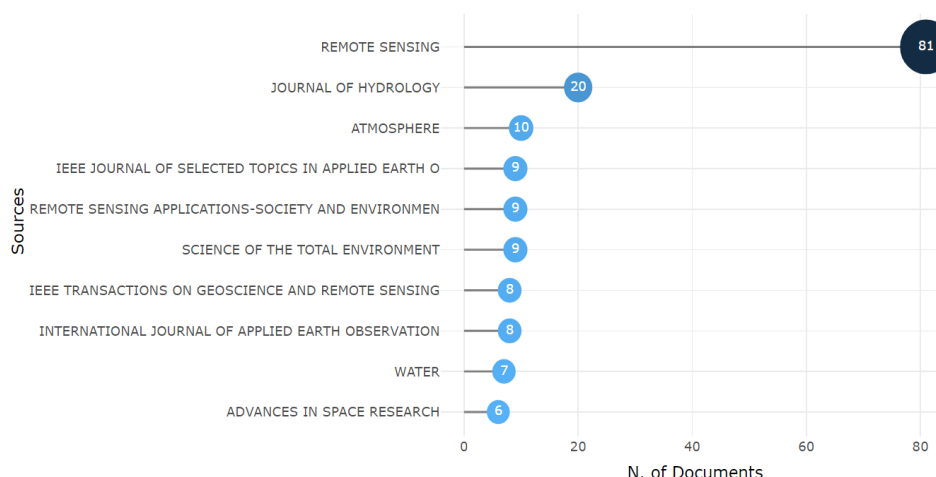


شکل ۱. شبکه هم‌استنادی مجلات مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی

تحلیل‌ها نشان می‌دهد که مجله Remote Sensing بالاترین تمرکز مقالات مرتبط را دارد. شکل ۳ نشان می‌دهد که این مجله با انتشار ۸۱ مقاله پیشروترین منبع در این حوزه بوده و حدود ۱۹ درصد از مقالات در زمینه کاربرد سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی، در این نشریه منتشر شده‌اند. نشریه Remote Sensing یک مجله بین‌المللی معتبر است که به‌صورت دوماهنامه توسط انتشارات MDPI در کشور سوئیس منتشر می‌شود. این مجله فعالیت خود را از سال ۲۰۰۹ آغاز کرده و از همان ابتدا به‌طور ویژه بر علوم و کاربردهای فناوری‌های سنجش از دور تمرکز داشته است. Remote Sensing با ارائه دسترسی آزاد (Open Access) و انتشار مقالات در زمینه‌هایی مانند هیدرولوژی، کشاورزی، تغییرات اقلیمی، و پایش منابع طبیعی، توانسته است جایگاه برجسته‌ای در میان پژوهشگران این حوزه پیدا کند. انتشار این مجله در یک کشور پیشرو در زمینه انتشارات علمی و فناوری‌های نوین، همراه با نمایه‌شدن در پایگاه‌های معتبری مانند Scopus، Web of Science، و PubAg، به جذابیت آن برای پژوهشگران افزوده است. این نشریه به‌دلیل تمرکز بر موضوعات بین‌رشته‌ای و پذیرش سریع مقالات، به یکی از منابع پیشرو برای تحقیقات مرتبط با سنجش از دور و کاربردهای آن، به‌ویژه در تلفیق با یادگیری ماشین، تبدیل شده است.

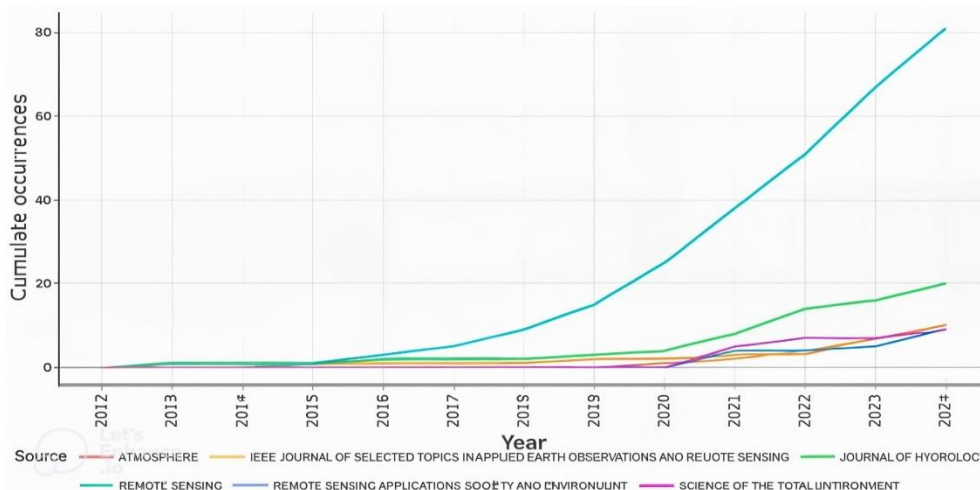


شکل ۲. شبکه هم‌استنادی مجلات مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی



شکل ۳. تعداد مقالات منتشر شده بر اساس نشریات مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی

پس از آن، مجلات Journal of Hydrology با ۲۰ مقاله و Atmosphere با ۱۰ مقاله در رتبه‌های بعدی قرار دارند که نشان‌دهنده مشارکت قابل توجه آن‌ها در پژوهش‌های مرتبط با کاربرد سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی است. نشریه Journal of Hydrology به‌عنوان یکی از معتبرترین منابع علمی در حوزه هیدرولوژی، جایگاه ویژه‌ای در میان پژوهشگران دارد. تمرکز بر تحقیقات بنیادی و کاربردی در تمامی جنبه‌های علوم هیدرولوژی، از جمله مدل‌سازی هیدرولوژیکی، پایش منابع آبی، و مدیریت حوضه‌های آبخیز، این مجله را به یک منبع مرجع برای پژوهش‌های پیشرفته در این حوزه تبدیل کرده است. توجه این نشریه به موضوعات بین‌رشته‌ای، از جمله ترکیب فناوری‌های سنجش از دور و یادگیری ماشین، اگرچه به دلیل گستردگی موضوعات تحت پوشش کمتر از Remote Sensing بوده، اما انتشار ۲۰ مقاله مرتبط (معادل ۵ درصد از کل مقالات بررسی‌شده) بیانگر اهمیت آن در این حوزه است. با در نظر گرفتن استانداردهای بالای داوری علمی و ارتباط گسترده با نهادهای پژوهشی بین‌المللی، این نشریه همچنان به‌عنوان یکی از پیشروترین منابع در علوم هیدرولوژی شناخته می‌شود و تأثیر قابل توجهی در جهت‌دهی به تحقیقات آبی در این حوزه دارد. نشریه به‌طور تخصصی در زمینه علوم جوی و محیط زیست فعالیت دارد و موضوعاتی مانند تغییرات اقلیمی، کیفیت هوا، و فرایندهای اتمسفری را پوشش می‌دهد. انتشار ۱۰ مقاله مرتبط (۲٪ از کل مقالات) نشان‌دهنده آن است که این نشریه نیز در حوزه سنجش از دور و یادگیری ماشین، به‌ویژه در ارتباط با تأثیرات جوی بر هیدرولوژی، سهمی داشته است. با این حال، تمرکز موضوعی این مجله بر علوم جوی، سهم آن را در مقایسه با نشریات تخصصی‌تر کاهش داده است. رنگ نمادهای شکل ۲ نشان می‌دهد که این منابع مقالات نسبتاً جدیدی منتشر کرده‌اند و این روند با شکل ۴ مطابقت دارد. جالب توجه است که پژوهش‌های مرتبط با کاربرد سنجش از دور و یادگیری ماشین در اغلب نشریات نشریات، تنها در ۱۰ سال اخیر با افزایش همراه بوده است (شکل ۴).



شکل ۴. روند نشر مقالات مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی در نشریات برتر

نوآوری‌های کلیدی و روندهای جدید در ترکیب یادگیری ماشین و سنجش از دور

یکی از معیارهای مهم برای شناسایی پژوهش‌های تاثیرگذار، تعداد استنادات است. از میان نمونه مقالات، جدول ۲، ده مقاله برتر را بر اساس تعداد استناد رتبه‌بندی کرده است. مقاله (Ali et al., 2015) با مجموع ۳۰۶ استناد، بیشترین تاثیر را از نظر تعداد استناد داشته و همچنین بالاترین نرخ استناد سالانه را نشان می‌دهد که بیانگر تاثیرگذاری و ارتباط مداوم آن در این حوزه است.

جدول ۲. رتبه‌بندی مقالات بر اساس تعداد استنادات

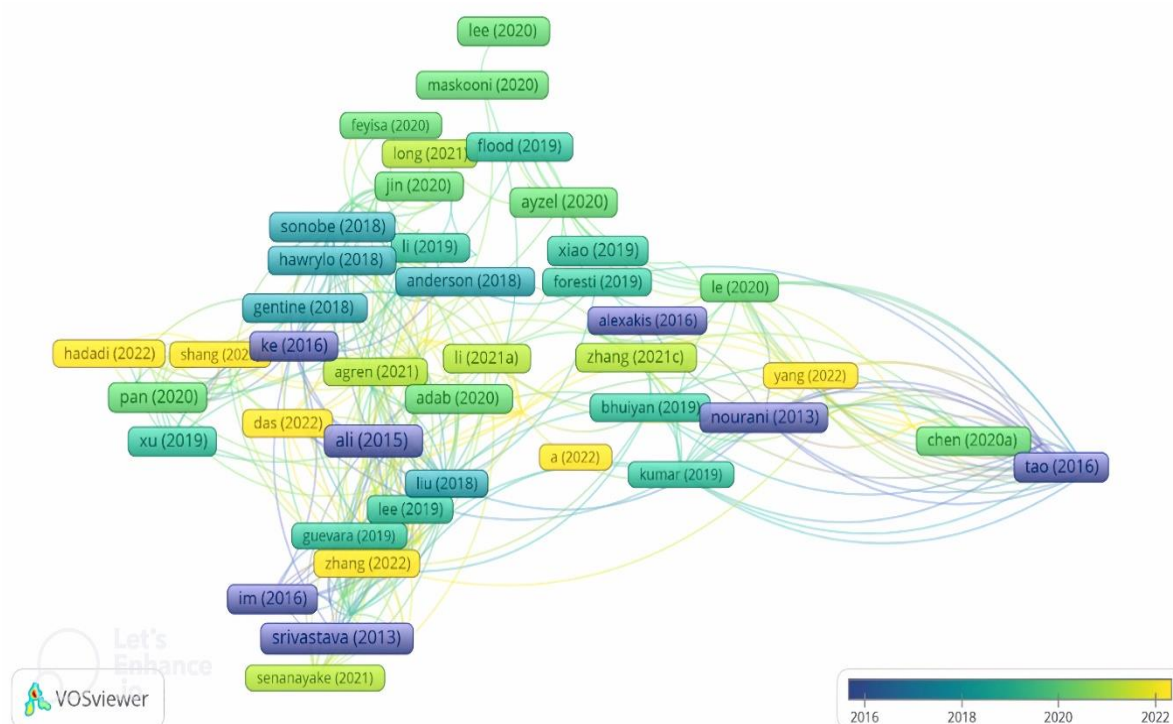
مقاله	DOI	مجموع استنادات	استنادات در هر سال	مجموع استنادات نرمال شده
(Ali et al., 2015)	10.3390/rs71215841	۳۰۶	۳۰/۶۰	۳/۹۵
(Srivastava et al., 2013)	10.1007/s11269-013-0337-9	۲۱۳	۱۷/۷۵	۲/۱۲
(Pan et al., 2020)	10.5194/hess-24-1485-2020	۱۶۱	۳۲/۲۰	۳/۷۵
(Ayzel et al., 2020)	10.5194/gmd-13-2631-2020	۱۵۲	۳۰/۴۰	۳/۵۴
(Xiao et al., 2019)	10.1016/j.envsoft.2019.104502	۱۵۱	۲۵/۱۷	۴/۱۰
(Nourani et al., 2013)	10.1016/j.jhydrol.2012.10.054	۱۴۰	۱۱/۶۷	۱/۴۰
(Im et al., 2016)	10.1007/s12665-016-5917-6	۱۳۶	۱۵/۱۱	۲/۴۴
(Ke et al., 2016)	10.3390/rs8030215	۱۲۴	۱۳/۷۸	۲/۲۳
(Xu et al., 2019)	10.1016/j.jhydrol.2019.124105	۱۱۰	۱۸/۳۳	۲/۹۹
(Tao et al., 2016)	10.1175/JHM-D-15-0075.1	۱۱۰	۱۲/۲۲	۱/۹۷

علاوه بر تعداد استنادات، شبکه مقالات به دست آمده از طریق VOSviewer نیز مورد بررسی قرار گرفت که در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل، مقالات با حداقل ۱۵ استناد مشترک نمایش داده شده‌اند. اندازه هر نماد متناسب با تعداد استنادات و رنگ‌بندی آن نشان‌دهنده تاریخ انتشار مقالات است؛ به طوری که رنگ بنفش مربوط به پژوهش‌های قدیمی‌تر و رنگ‌های سبز و زرد نمایانگر جدیدترین پژوهش‌ها می‌باشد. بررسی توزیع شبکه نشان می‌دهد که مقالات (Ali et al., 2015) و (Srivastava et al., 2013) با موضوعات کلیدی و بنیادی در زمینه کاربرد یادگیری ماشین و سنجش از دور در هیدرولوژی و مدیریت منابع آب، پس از ۱۰ سال همچنان مرجعیت خود را در پژوهش‌های این حوزه حفظ کرده‌اند. این مقالات به دلیل جامعیت در ارائه روش‌ها، تحلیل چالش‌ها و پیشنهاد راهکارهای عملی، نقش محوری در توسعه تحقیقات مرتبط داشته‌اند. علاوه بر این، مقاله (Pan et al., 2020) با موضوع ارزیابی و مقایسه روش‌های پیشرفته تخمین تبخیر-تعرق جهانی که از نظر تعداد استناد در رتبه سوم قرار دارد، در زمانی کوتاه توانسته بزرگ‌ترین خوشه را تشکیل دهد. این مقاله با ارائه تحلیل دقیق از مزایا و محدودیت‌های مدل‌های مختلف و معرفی چارچوبی برای ترکیب داده‌ها و روش‌ها، تأثیرگذاری بالایی در مطالعات مرتبط داشته است. در ادامه، ۱۰ مقاله پراستناد در زمینه کاربرد ترکیبی یادگیری ماشین و سنجش از دور در مطالعات هیدرولوژیکی و زیست‌محیطی به تفصیل تشریح شده است.

پراستنادترین مقاله در حوزه کاربرد سنجش از دور و یادگیری ماشین در مدل‌سازی هیدرولوژیکی (Ali et al., 2015) است. این مقاله با ارائه تحلیلی جامع از تکنیک‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) و مدل‌های هیبریدی، به مقایسه مزایا و محدودیت‌های روش‌های کلاسیک و مدرن پرداخته است. همچنین این مقاله به طور ویژه بر استفاده از ترکیب داده‌های اپتیک و راداری، هم‌جوشی داده‌های میدانی با تصاویر ماهواره‌ای و کاهش مشکلات تفکیک‌پذیری مکانی و زمانی متمرکز شده است. این پژوهش چالش‌های مهمی نظیر عدم قطعیت در داده‌های سنجش از دور، تأثیر نویز، و محدودیت داده‌های آموزشی را بررسی کرده و راه‌حلی هم‌چون یادگیری تطبیقی و استفاده از داده‌های چندمنبعی را پیشنهاد می‌دهد. ارائه روش‌های نوآورانه مانند مدل‌سازی هیبریدی شبکه‌های عصبی و روش‌های ییزی برای پیش‌بینی رطوبت خاک، باعث شده است این مقاله الهام‌بخش مطالعات آتی و منبعی کلیدی در مدل‌سازی هیدرولوژیکی مبتنی بر یادگیری ماشین و سنجش از دور باشد.

پژوهش (Srivastava et al., 2013) رویکردی مؤثر برای بهبود تفکیک‌پذیری مکانی رطوبت خاک ماهواره‌ای SMOS (با وضوح ۴۰ کیلومتر) به مقیاس محلی/منطقه‌ای را با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین شامل شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، ماشین بردار ارتباطی (RVM) و مدل‌های خطی تعمیم‌یافته (GLM) و ترکیب داده‌های رطوبت خاک SMOS با دمای سطح زمین (LST) از سنجنده MODIS ارائه می‌دهد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ANN با $R^2=0.751$ و $RMSE=0.011$ در بهبود وضوح مکانی داده‌ها، بهترین عملکرد را داشته‌است. همچنین تحلیل آماری دقیق عملکرد الگوریتم‌ها و پیشنهاد

استفاده از رویکردهای مبتنی بر فصل (با دقت بالاتر نسبت به داده‌های سری زمانی پیوسته) از دیگر دستاوردهای آن است. این مطالعه بر بهینه‌سازی هایپرپارامترها، از جمله تعداد لایه‌های پنهان شبکه عصبی و تابع کاهش وزن، نیز تأکید دارد و اهمیت آن در ارائه رویکردی جامع و کاربردی برای حل چالش‌های کلیدی هیدرولوژی، مانند پایش خشکسالی و مدیریت آبیاری، از طریق ترکیب نوآورانه تکنیک‌های یادگیری ماشین و داده‌های ماهواره‌ای و تبیین نحوه هیبرید کردن داده‌های ماهواره‌ای و یادگیری ماشین با تمرکز بر کاهش مشکلات تفکیک‌پذیری مکانی و زمانی، ترکیب داده‌های میدانی با ماهواره‌ای و ارائه مدل‌های هیبریدی برای پیش‌بینی دقیق‌تر رطوبت خاک و در نتیجه کاربرد گسترده آن در مطالعات هیدرولوژیکی نهفته است.



شکل ۵. شبکه همکاری مقالات مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی.

مقاله (Pan et al., 2020) از معدود مطالعات جامع منتشرشده‌ای است که با بررسی جامع روش‌های تخمین تبخیر-تعرق جهانی (ET)، شامل مدل‌های فیزیکی سنجش از دور، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌های سطح زمین (LSMs) و با تأکید ویژه بر نقش رویکردهای هیبریدی و ترکیب مدل‌ها و تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین در این زمینه، به بررسی تفاوت‌های فضایی و زمانی در مقادیر ET پرداخته است. با استفاده از ۴ مدل فیزیکی سنجش از دور، ۲ الگوریتم یادگیری ماشین و ۱۴ مدل LSM، این تحقیق روند کلی افزایش ET از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۱ را تأیید کرده و در عین حال، تفاوت‌های قابل توجهی در دقت و تغییرات مکانی آن‌ها نشان داده است. از نکات برجسته این تحقیق، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و سنجش از دور برای بهبود مدل‌ها و کاهش نواقص مدل‌های فیزیکی و LSMs و در نتیجه افزایش دقت تخمین‌ها است. این پژوهش که با ارجاعات گسترده به‌طور مؤثر چالش‌های موجود در تخمین ET جهانی را بررسی و راهکارهایی برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها ارائه می‌دهد. با توجه به نقش حیاتی تبخیر-تعرق در چرخه‌های آب، کربن و انرژی زمین، این تحقیق به‌ویژه برای مطالعات اقلیمی و منابع آب با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اهمیت دارد. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای تحلیل پیچیدگی‌های غیرخطی در داده‌ها و بهبود دقت مدل‌ها، در کنار ترکیب داده‌های سنجش از دور، این مقاله را به منبعی مهم در این حوزه تبدیل کرده است. تکنیک‌های هیبریدی که در مقاله به آن‌ها اشاره شده، به‌ویژه در ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های یادگیری ماشین برای تخمین دقیق‌تر پارامترهای هیدرولوژیکی مانند ET اهمیت دارند و با ترکیب مدل‌های فیزیکی مبتنی بر سنجش از دور و الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین، عدم قطعیت‌ها را کاهش و دقت تخمین‌ها را افزایش می‌دهند و به‌ویژه در مناطقی با عدم قطعیت زیاد مانند جنگل‌های آمازون و مناطق خشک و نیمه‌خشک، نتایج قابل اعتمادتری ارائه می‌دهند.

یکی از پیشگامان در استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق برای پیش‌بینی بارش‌های کوتاه‌مدت مبتنی بر داده‌های راداری، پژوهش

(Ayzel et al., 2020) محسوب می‌شود. این مطالعه با به کارگیری معماری شبکه عصبی عمیق کانولوشنی (CNN) الهام گرفته از U-Net و SegNet، رویکردی نوین در پیش‌بینی کوتاه‌مدت بارش‌های راداری ارائه می‌دهد. این مدل با استفاده از داده‌های راداری با وضوح زمانی ۵ دقیقه و فضایی ۱ کیلومتر، در مقایسه با مدل‌های مرسوم مانند Rainy motion و Persistence، بهبود چشمگیری در معیارهای عملکردی نظیر خطای میانگین مطلق (MAE) و شاخص موفقیت بحرانی (CSI) نشان داده، هرچند محدودیت‌هایی در پیش‌بینی بارش‌های شدید به دلیل هموارسازی فضایی وجود دارد. همچنین به کارگیری موفقیت‌آمیز تکنیک‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه CNN‌ها، در ترکیب با داده‌های سنجش از دور (تصاویر راداری) برای تحلیل و پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی، به‌ویژه در پیش‌بینی بارش، از موارد مود توجه این پژوهش است. در این مدل، تصاویر راداری به عنوان ورودی به شبکه داده شده و از لایه‌های کانولوشنی برای استخراج ویژگی‌ها و از لایه‌های skip connection و upsampling برای افزایش دقت در پیش‌بینی‌های فضایی با وضوح بالاتر استفاده شده است. پیشنهاداتی نیز برای بهبود پیش‌بینی بارش‌های شدید از طریق تنظیمات مختلف در فرآیند یادگیری مدل، از جمله تغییر توابع از دست دادن و انتخاب ویژگی‌های ورودی مناسب، ارائه شده است. این نوآوری در به کارگیری شبکه‌های عصبی عمیق و تحلیل داده‌های پیچیده راداری در پیش‌بینی بارش، این مقاله را به منبعی پر استناد در این حوزه تبدیل کرده است.

مطالعه (Xiao et al., 2019) به بررسی پیش‌بینی دمای سطح دریا (SST) با استفاده از مدل یادگیری عمیق فضایی-زمانی مبتنی بر ساختار ConvLSTM می‌پردازد که قادر به مدل‌سازی همزمان همبستگی‌های زمانی و مکانی موجود در داده‌های SST است. مدل پیشنهادی، شامل دو لایه ConvLSTM و یک لایه کاملاً متصل، با استفاده از داده‌های ۳۶ ساله SST از مجموعه داده OISST در منطقه‌ای از دریای چین شرقی آزمایش شده و در مقایسه با روش‌های متداول مانند SVR و LSTM‌های سنتی، عملکرد بهتری در معیارهای RMSE، MAPE و ضریب همبستگی پیرسون (r) نشان داده و قادر به پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات شدید دمایی در مناطق خاص بوده است. از آنجا که SST به شدت تحت تأثیر پدیده‌های اقلیمی و فرآیندهای اقیانوسی قرار دارد، پیش‌بینی دقیق آن نقش کلیدی در پژوهش‌های اقلیمی ایفا می‌کند و مدل پیشنهادی نه تنها امکان پیش‌بینی کوتاه‌مدت (۱ تا ۱۰ روز) را فراهم می‌آورد، بلکه با کاهش خطا در مناطق بحرانی، ابزاری مؤثر برای تحلیل و مدیریت داده‌های پیچیده هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد. این مقاله به دلیل نوآوری در استفاده از ConvLSTM برای پیش‌بینی SST با داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌سازی دقیق همبستگی‌های فضایی و زمانی، استفاده از مجموعه داده معتبر OISST و تحلیل‌های جامع و کاربردی بالا در زمینه‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی، مدیریت آب و پیش‌بینی بلایای طبیعی مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، تکنیک ConvLSTM با بهره‌گیری از عملیات کانولوشن به جای ضرب ماتریسی در شبکه‌های LSTM سنتی، همبستگی‌های مکانی بین پیکسل‌های تصویر را حفظ کرده و از ویژگی‌های زمانی سری‌های زمانی بهره می‌برد و ترکیب آن با داده‌های ماهواره‌ای OISST، امکان تحلیل دقیق تغییرات دمایی سطح دریا را فراهم کرده و با کاهش خطا در پیش‌بینی و ارائه نتایج با دقت بالا، به یکی از روش‌های پیشرو در تحلیل متغیرهای هیدرولوژیکی تبدیل شده است.

نویسندگان ایرانی (Nourani et al., 2013) رویکرد نوآورانه‌ای را برای پیش‌بینی بارش-رواناب معرفی می‌کند که از ترکیب تکنیک‌های پیش‌پردازش فضایی و زمانی با استفاده از نقشه‌های خودسازمان‌ده (SOM) و تبدیل موجک (WT) بهره می‌برد. در سطح فضایی، SOM با خوشه‌بندی داده‌های بارش ماهواره‌ای مانند TRMM یا GPM (با رزولوشن مکانی X کیلومتر و بازه زمانی Y ساعت)، مناطق همگن با الگوهای بارش مشابه را شناسایی و متغیرهای کلیدی را برای ورودی به شبکه عصبی پیش‌خور (FFNN) انتخاب می‌کند. این امر ضمن کاهش ابعاد داده‌ها و ساده‌سازی مدل، از بیش‌برازش نیز جلوگیری کرده و عملکرد پیش‌بینی را بهبود می‌بخشد. در سطح زمانی WT با تجزیه سری‌های زمانی رواناب به زیرسیگنال‌های چندمقیاسی، الگوهای دینامیک و نویز را جداسازی و دقت پیش‌بینی، به‌ویژه در پیش‌بینی قله‌های رواناب (مانند پیش‌بینی دقیق‌تر زمان اوج سیلاب با جداسازی نوسانات کوتاه‌مدت و بلندمدت دی)، را افزایش می‌دهد. مقایسه مدل SOM-FFNN با مدل ترکیبی SOM-WT-FFNN، برتری مدل دوم را با ضریب تعیین ۰٫۹۳، در مقابل ۰٫۸۰ برای پیش‌بینی تک‌مرحله‌ای و چندمرحله‌ای رواناب نمایش می‌دهد. این نتایج، کارایی این مدل‌ها را در پیش‌بینی دقیق‌تر مدیریت رواناب تأیید می‌کند. نوآوری در ترکیب تکنیک‌های فضایی (SOM) و زمانی (WT) با داده‌های ماهواره‌ای و کاربرد موفق آن در حل مسئله پیچیده (پیش‌بینی بارش-رواناب)، به‌ویژه در مناطق با کمبود داده زمینی، این پژوهش را به مرجعی ارزشمند برای پژوهشگران هیدرولوژی و مدیریت منابع آب تبدیل کرده است.

مقاله با عنوان (Im et al., 2016) رویکردی نوین در استفاده از یادگیری ماشین برای کاهش مقیاس رطوبت خاک از محصولات ماهواره‌ای AMSR-E با بهره‌گیری از داده‌های MODIS ارائه می‌دهد. با استفاده از سه الگوریتم یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی،

درختان رگرسیون تقویت شده و Cubist، رطوبت خاک از رزولوشن ۲۵ کیلومتر AMSR-E به ۱ کیلومتر کاهش مقیاس یافته و نتایج نشان داد که الگوریتم جنگل تصادفی با بالاترین همبستگی ($r = 0.84/0.71$) برای کره جنوبی/استرالیا و کمترین خطا ($RMSE = 0.057/0.049$) نسبت به دو مدل دیگر، بهترین عملکرد را داشته است. این مدل‌ها همچنین نشان دادند که پارامترهای تبخیر-تعرق (ET) و دمای سطح زمین (LST) بیشترین تأثیر را در برآورد رطوبت خاک دارند که بیانگر ارتباط قوی بین رطوبت خاک و جریان انرژی سطحی است. این مطالعه بر اهمیت ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با رزولوشن بالا مانند محصولات MODIS شامل NDVI، EVI، LAI، LST و ET برای بهبود دقت مکانی داده‌های رطوبت خاک تأکید دارد، که نه تنها مشکلات رزولوشن پایین سنجنده‌های میکروویو غیرفعال مانند AMSR-E را کاهش می‌دهد، بلکه محدودیت‌های مربوط به تأثیر پوشش گیاهی را نیز تعدیل می‌کند. این پژوهش به دلیل ارائه یک چارچوب جامع و عملی جهت ادغام تکنیک‌های یادگیری ماشین و داده‌های چندمنبعی سنجش از دور، به‌ویژه ترکیب نوآورانه داده‌های MODIS و AMSR-E و ارائه روشی کارآمد برای کاهش مقیاس داده‌های رطوبت خاک، به منبعی مرجع در این حوزه تبدیل شده و نیازهای کلیدی تحقیقات هیدرولوژی در مدیریت منابع آب و کشاورزی را پاسخ داده است. تکنیک هیبریدی مورد استفاده با به‌کارگیری الگوریتم‌هایی مانند جنگل تصادفی و شناسایی تأثیر پارامترهایی چون ET، LST و شاخص‌های پوشش گیاهی بر رطوبت خاک، ارتباط قوی بین این متغیرها ایجاد کرده و با استفاده از داده‌های MODIS، دقت مکانی را بهبود بخشیده و نقاط ضعف داده‌های AMSR-E در مناطق جنگلی و دارای تنوع بالا را برطرف کرده است.

یکی از مهم‌ترین پژوهش‌ها در زمینه ترکیب یادگیری ماشین و سنجش از دور در مطالعات هیدرولوژی، پژوهش (Ke et al., 2016) است. این مطالعه با ارائه روشی پیشرفته مبتنی بر یادگیری ماشین، به ریزمقیاس‌سازی تبخیر-تعرق (ET) از داده‌های ۸ روزه MODIS با وضوح ۱ کیلومتر به داده‌های Landsat-8 با وضوح ۳۰ متر می‌پردازد. با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی (RF)، کوبیست (Cubist) و رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)، نشان داده می‌شود که شاخص‌های گیاهی مانند NDVI، EVI، SAVI و رطوبت خاک (مانند NDWI، NDIb7) ارتباط دقیق‌تری با ET دارند و RF با خطای نسبی کمتر از ۲۰٪، عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها ارائه می‌دهد. تحلیل اهمیت متغیرها در مدل RF نشان می‌دهد که شاخص‌های مرتبط با سرسبزی و رطوبت خاک نقش اصلی را ایفا می‌کنند، در حالی که LST و شاخص‌های وابسته به آن اهمیت کمتری دارند. ارزیابی تطابق زمانی و مکانی ET ریزمقیاس‌شده با داده‌های MODIS و مشاهدات میدانی، جزئیات فضایی بیشتری را به ویژه در مناطق کشاورزی نشان می‌دهد. این مقاله به دلیل نوآوری در ترکیب روش‌های یادگیری ماشین برای بهبود تفکیک مکانی ET، پاسخ به چالش‌های رایج در داده‌های هیدرولوژی مانند کمبود تفکیک زمانی و مکانی، ارائه چارچوبی عملی برای کاربردهای مختلف هیدرولوژی، مدیریت منابع آب و کشاورزی، تعمیم‌پذیری نتایج به شرایط اقلیمی مختلف با استفاده از داده‌های چهار منطقه در آمریکا و کره جنوبی و پیشگامی در ترکیب مزایای داده‌های با تفکیک زمانی بالای MODIS و داده‌های با تفکیک مکانی بالای Landsat، مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، ابتدا ۱۱ شاخص اصلی مرتبط با سرسبزی، دما و رطوبت سطح زمین با استفاده از داده‌های Landsat-8 محاسبه و به وضوح مکانی ۱ کیلومتر داده‌های MODIS همگام‌سازی می‌شوند و سپس به عنوان ورودی مدل استفاده شده و داده‌های ET به تفکیک ۳۰ متر پایین‌مقیاس‌سازی می‌شوند و RF به دلیل دقت بالاتر و خطای کمتر به عنوان بهترین مدل شناسایی می‌شود.

مطالعه (Xu et al., 2019) یکی از مقالات برجسته در کاربرد هم‌زمان سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی است که به تحلیل جامع عملکرد مدل‌های مختلف در تخمین تبخیر-تعرق (ET) پرداخته است. این مقاله به بررسی و ارزیابی دوازده محصول تبخیر-تعرق (ET) حاصل از مدل‌های یادگیری ماشین، سنجش از دور و مدل‌های سطح زمین در ایالات متحده، با تمرکز بر عملکرد آنها در مقیاس‌های منطقه‌ای و تطابق با مشاهدات ایستگاه‌های آمري فلوکس می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد تمامی مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی دقیق تغییرات فصلی ET بوده و محصولات NLDAS-3 کمترین عدم قطعیت را در مقایسه با سایر محصولات، از جمله ET MODIS، نشان می‌دهند. اهمیت این مقاله در ارائه معیاری برای انتخاب داده‌های مناسب ET در تحلیل‌های هیدرولوژیکی در سطح ایالات متحده و ارائه رویکردهای نوین در ارزیابی عدم قطعیت این داده‌ها نهفته است. استناد بالای این پژوهش در زمینه مطالعات هیدرولوژی با استفاده از سنجش از دور و یادگیری ماشین، به دلیل ارائه مبنای دقیق و قابل اعتماد برای تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی از طریق ترکیب مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین و داده‌های سنجش از دور، به ویژه برای تخمین دقیق ET در مقیاس‌های وسیع، است. کاهش عدم قطعیت‌ها و افزایش دقت تخمین‌ها از طریق تکنیک‌های پیشرفته، به ویژه در شرایط مختلف اقلیمی، تأثیر بسزایی بر پژوهش‌های آبی در زمینه مدل‌سازی منابع آب و تحلیل‌های هیدرولوژیکی داشته است. در زمینه کاربرد یادگیری ماشین در تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و متغیرهای

هیدرولوژیکی، این مقاله به طور خاص به استفاده از رویکرد یادگیری ماشین در ترکیب با داده‌های سنجش از دور اشاره دارد؛ به عنوان مثال، استفاده از مدل‌های درخت‌گان در ترکیب با مشاهدات FLUXNET برای تولید محصول GFET، دقت مدل‌ها را در پیش‌بینی و ارزیابی متغیرهای هیدرولوژیکی مانند تبخیر-تعرق بهبود بخشیده و دامنه کاربرد آنها را در پروژه‌های هیدرولوژی مدرن گسترش داده است. پژوهش انجام شده توسط (Tao et al., 2016) به معرفی یک چارچوب شبکه عصبی عمیق (DNN) با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته شبکه‌های عصبی عمیق مانند Stacked Denoising Autoencoder (SDAE) برای بهبود دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای و کاهش خطاها و هشدارهای اشتباه می‌پردازد. این چارچوب با استخراج اطلاعات ساختاری پیچیده از تصاویر ماهواره‌ای مادون قرمز (IR) در ابعاد ۱۵×۱۵ پیکسل و بهره‌گیری از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و پیش‌آموزش برای کاهش اثر بهینه‌های محلی، تصحیح بایاس در محصولات بارش ماهواره‌ای را ارائه می‌دهد. مطالعات موردی در ایالات متحده مرکزی نشان می‌دهد که این چارچوب توانسته نرخ هشدارهای اشتباه را در تابستان و زمستان به ترتیب تا ۳۳٪ و ۴۳٪ کاهش دهد و اصلاحات بزرگی (۹۸٪ در تابستان و ۷۸٪ در زمستان) در بایاس میزان بارش انجام دهد که نشان‌دهنده قابلیت شبکه‌های عصبی عمیق برای یادگیری خودکار اطلاعات مفید و پردازش داده‌های پیچیده است. این مقاله به دلیل ارائه رویکردی نوآورانه برای کاهش خطاهای تخمین بارش، دقت بالای مدل، آزمایش‌های گسترده، ارائه روشی قابل تعمیم برای مناطق مختلف، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین مانند SDAE و ارزیابی دقیق عملکرد، مورد توجه محققین قرار گرفته و به منبعی معتبر برای تحقیقات آتی تبدیل شده است. در این روش، تکنیک‌های یادگیری عمیق برای تصحیح بایاس داده‌های بارش ماهواره‌ای از طریق استخراج اطلاعات پیچیده ساختاری از تصاویر IR به کار رفته و با بهره‌گیری از پیش‌آموزش لایه‌به‌لایه و تنظیم مجدد وزن‌ها، قابلیت یادگیری روابط پیچیده بین داده‌های خام و تفاوت‌های مشاهده‌شده در میزان بارش افزایش یافته و امکان استفاده در مقیاس جهانی فراهم شده است.

وابستگی‌های نهادی و تحلیل نقشه‌های همکاری تحقیقاتی

این مطالعه با تحلیل نویسندگان برتر که بیشترین تعداد مقالات مرتبط را منتشر کرده‌اند، فعال‌ترین پژوهشگران این حوزه را شناسایی کرده است. لیستی از ده نویسنده برتر بر اساس تعداد مقالات (NP)، تعداد کل استنادات (TC) و سال انتشار اولین مقاله (PY start) در جدول ۳ گردآوری شده است. برای ارزیابی بیشتر تاثیر علمی این نویسندگان، شاخص‌های h-index، g-index و m-index مقایسه شدند که نشان‌دهنده تعداد استنادها، مشارکت و تاثیرگذاری مداوم است.

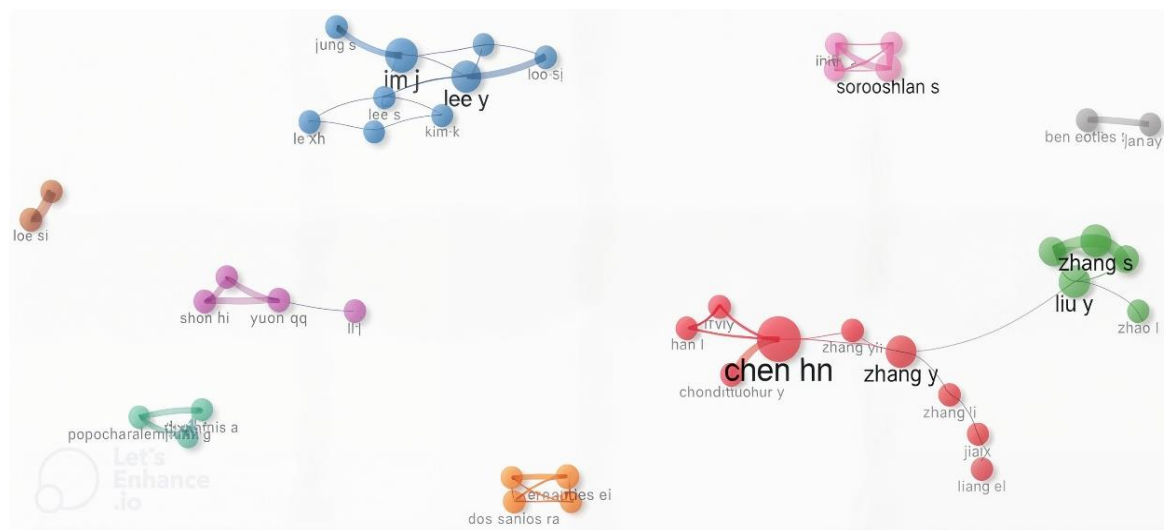
جدول ۳. رده‌بندی نویسندگان بر اساس تعداد انتشارات.

نویسنده	h_index	g_index	m_index	TC	NP	PY_start
IM J	۶	۸	۰/۶۶۷	۳۲۷	۸	۲۰۱۶
ZHANG Y	۶	۸	۰/۸۵۷	۷۵	۱۰	۲۰۱۸
LEE S	۵	۵	۱	۲۴۱	۵	۲۰۲۰
LIU Y	۵	۶	۰/۷۱۴	۱۰۴	۶	۲۰۱۸
CHEN HN	۴	۱۰	۰/۵۷۱	۱۴۱	۱۰	۲۰۱۸
JING WL	۴	۴	۰/۵	۱۱۲	۴	۲۰۱۷
LI J	۴	۵	۰/۸	۱۰۴	۵	۲۰۲۰
SOROOSHIAN S	۴	۴	۰/۳۳۳	۲۵۴	۴	۲۰۱۳
ZHANG LL	۴	۴	۰/۵۷۱	۱۴۱	۴	۲۰۱۸
CHEN NC	۳	۳	۰/۳۷۵	۲۰۸	۳	۲۰۱۷

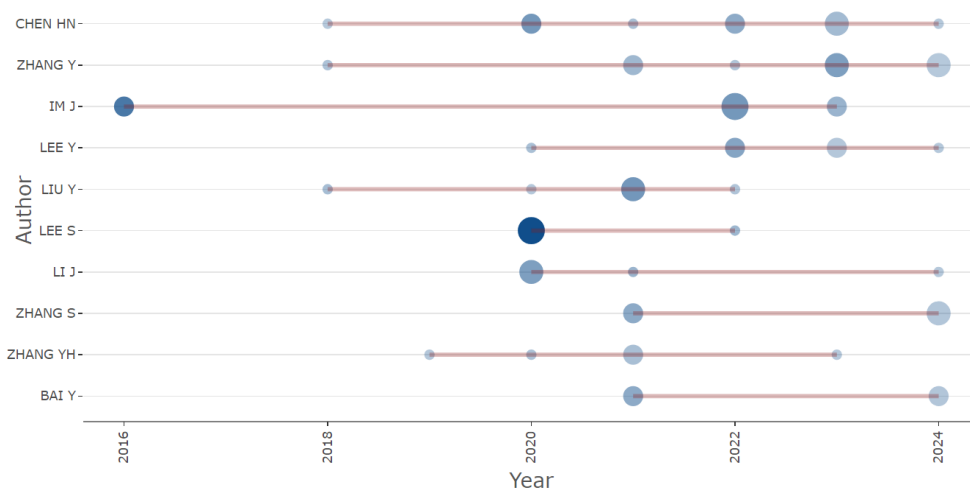
شاخص‌های h-index، g-index و m-index برای ارزیابی کمیت و کیفیت پژوهش یک محقق به کار می‌روند. h-index نشان‌دهنده تعداد مقالاتی است که هر کدام حداقل به همان تعداد بار ارجاع شده‌اند، در حالی که g-index به مقالات پراستناد وزن بیشتری می‌دهد. m-index نیز میانگین تعداد ارجاعات به مقالات یک محقق را نشان می‌دهد. علاوه بر این، شاخص‌های TC (تعداد کل مقالات)، NP (تعداد مقالات با نویسنده اول) و PY_start (سال شروع فعالیت پژوهشی) نیز برای ارائه یک تصویر کامل‌تر از فعالیت پژوهشی یک نویسنده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای بررسی روابط میان نویسندگان، علاوه بر نتایج کمی، تحلیل شبکه‌ای نویسندگان با استفاده از Biblioshiny انجام شد که در شکل ۶ نشان داده شده است. این تحلیل از طریق ویژگی شبکه همکاری در Biblioshiny و با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی walktrap

انجام شد. ZHANG Y با ۱۰ مقاله، بیشترین سند علمی را در این زمینه منتشر کرده است، اما IM J با ۸ مقاله بیشترین تعداد استنادات (۳۲۷) را به خود اختصاص داده است که به دلیل تفاوت عمیق در شبکه‌های علمی دو نویسنده می‌باشد (شکل ۶). با این حال، با در نظر گرفتن شاخص am-index به دلیل انتشار اولین مقاله در سال ۲۰۱۲، به نظر می‌رسد که فعالیت پژوهشی در این حوزه در سال‌های اخیر پایدار نبوده است. بررسی سال‌های شروع انتشار مقالات نویسندگان برتر نشان می‌دهد که گروه‌های پژوهشی به دو دسته تقسیم می‌شوند: کسانی که کار خود را از اوایل سال ۲۰۱۶ آغاز کرده‌اند و کسانی که اخیراً وارد این حوزه شده‌اند (شکل ۷)



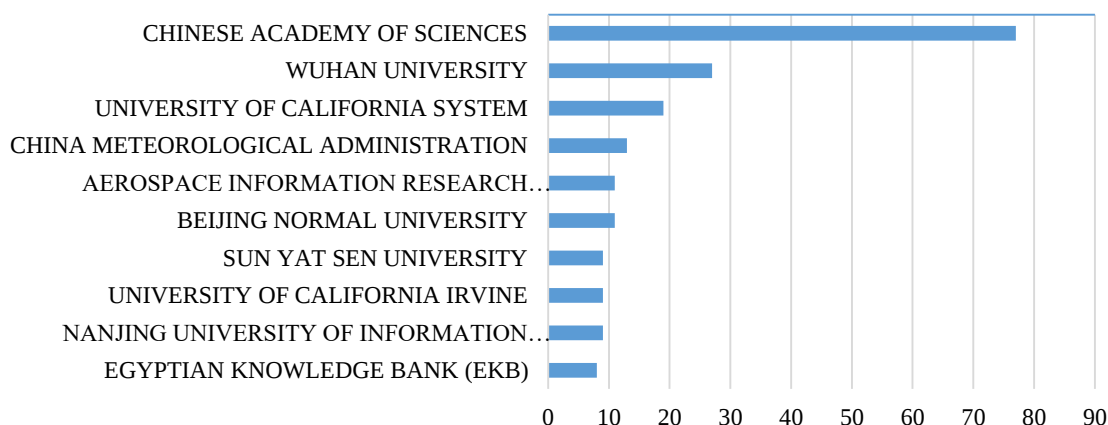
شکل ۶. شبکه همکاری نویسندگان مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی.



شکل ۷. روند نشر اسناد مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی توسط نویسندگان برتر

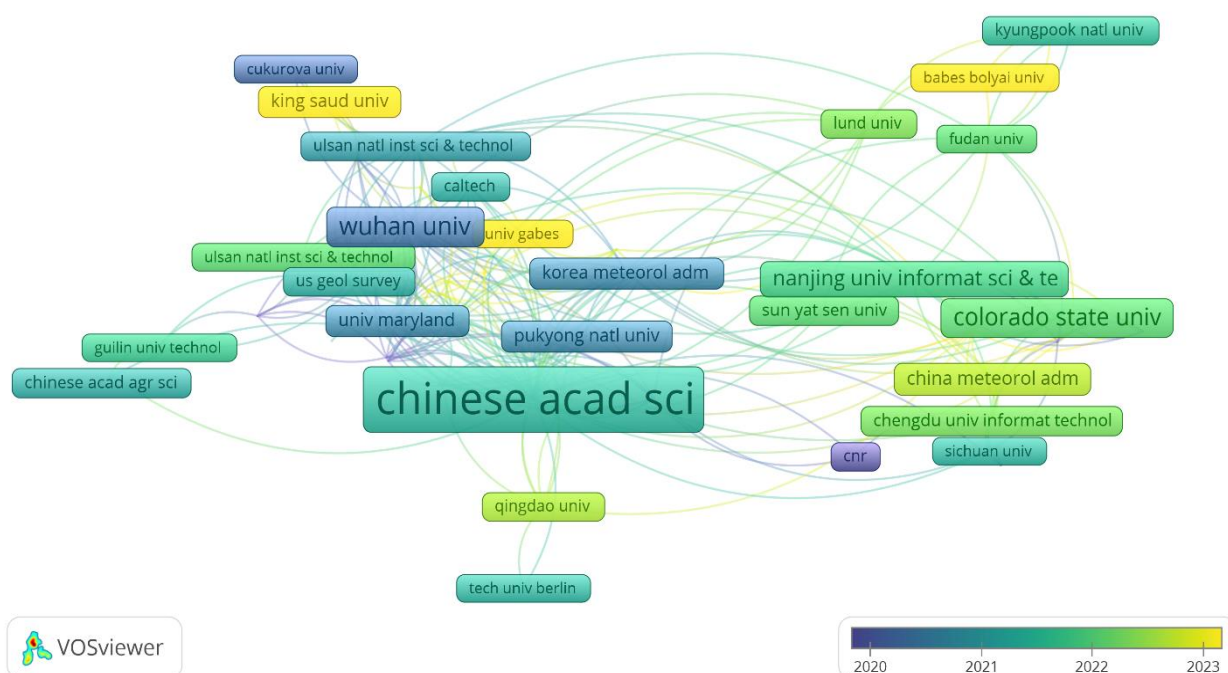
وابستگی‌هایی که بیشترین تعداد انتشارات را دارند در شکل ۸ ارائه شده‌اند. دانشگاه آکادمی علوم چین با ۴۷ مقاله بیشترین تعداد انتشارات را دارد، پس از آن نیز دانشگاه ووهان چین با ۲۷ و دانشگاه کالیفرنیا در ایالات متحده آمریکا با ۱۹ مقاله قرار دارند. آکادمی علوم چین به عنوان یکی از مؤسسات علمی پیشرو در جهان، به واسطه تولید دانش پیشرفته در زمینه مدل‌سازی هیدرولوژیکی و کاربردهای هوش مصنوعی در تحلیل سیستم‌های هیدرولوژیکی، نقشی کلیدی در شکل‌دهی به تحولات این حوزه ایفا می‌کند. این مؤسسه با دسترسی به منابع گسترده داده و زیرساخت‌های تحقیقاتی پیشرفته، زمینه را برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر و کاربردهای نوین در حوضه‌های مختلف هیدرولوژی فراهم ساخته است. دانشگاه ووهان، به عنوان قطب برجسته در تحقیقات سنجش از دور و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقش محوری در یکپارچه‌سازی فناوری‌های داده‌محور با تحلیل‌های هیدرولوژیکی دارد. تمرکز این دانشگاه بر توسعه روش‌های نوآورانه برای استخراج اطلاعات از داده‌های ماهواره‌ای و ترکیب آن‌ها با مدل‌های یادگیری ماشین، مسیر جدیدی را برای

پیش‌بینی و مدیریت منابع آب ایجاد کرده است. دانشگاه کالیفرنیا نیز با مشارکت فعال در این حوزه، نشان‌دهنده رویکرد کشورهای غربی به کاربردهای عملی یادگیری ماشین در مدیریت پایدار منابع آب است. این دانشگاه بر استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته برای حل چالش‌های پیچیده در مدیریت بحران‌های آبی، پیش‌بینی سیلاب و بهینه‌سازی منابع آب متمرکز است و از همکاری‌های بین‌المللی برای افزایش تأثیرگذاری تحقیقات بهره می‌گیرد.



شکل ۸. تعداد مقالات بر اساس وابستگی سازمانی نویسندگان

همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، روابط بین مؤسسات تحقیقاتی با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer تجسم‌سازی شده است. نمودار شبکه نقش غالب مؤسساتی نظیر NTNU را در پیشبرد تحقیقات ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی نشان می‌دهد. این مؤسسات در مرکز تلاش‌های مشترک بین کشورها و رشته‌ها قرار دارند. اکثر مؤسسات به طور ارگانیک به هم متصل بوده و حضور مؤسسات کلیدی که قبلاً به عنوان دارندگان تعداد بالای انتشارات شناخته شده‌اند، به طور چشمگیری دیده می‌شود.



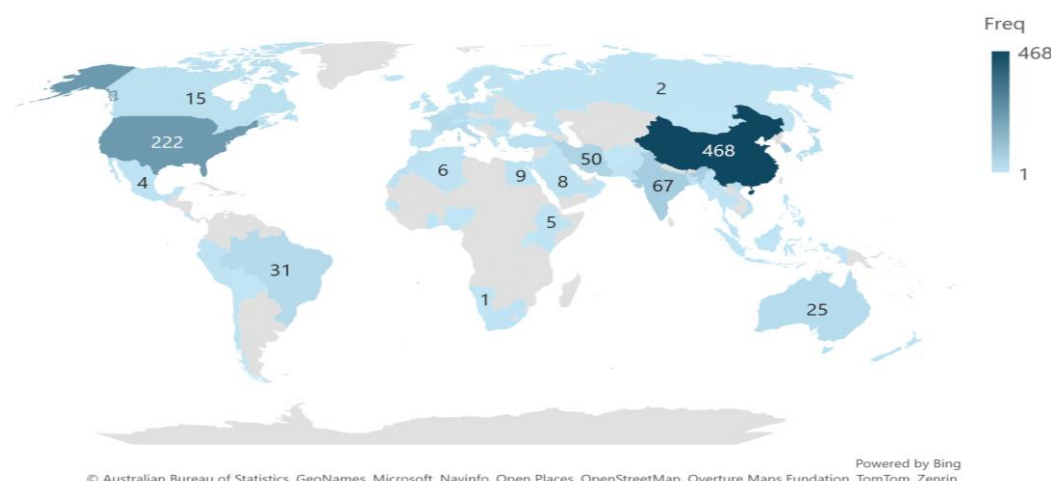
شکل ۹. شبکه همکاری و وابستگی‌ها مرتبط ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی توسط نویسندگان برتر

از طریق نمادهای استفاده شده در شبکه مشاهده می‌شود که از سال ۲۰۱۹ دانشگاه آکادمی علوم چین به طرز قابل توجهی مقالات خود را در این زمینه افزایش داده است، به‌طوری که در سال ۲۰۲۴ بیش از ۲ برابر بیشتر از دومین و سومین موسسه (دانشگاه ووهان چین و کالیفرنیا آمریکا) بوده است با این حال، با توجه به اینکه خط زمانی در راهنما از سال ۲۰۲۰ تنظیم شده است، می‌توان نتیجه گرفت که همه این مؤسسات همچنان به طور فعال در تحقیقات مشارکت دارند.

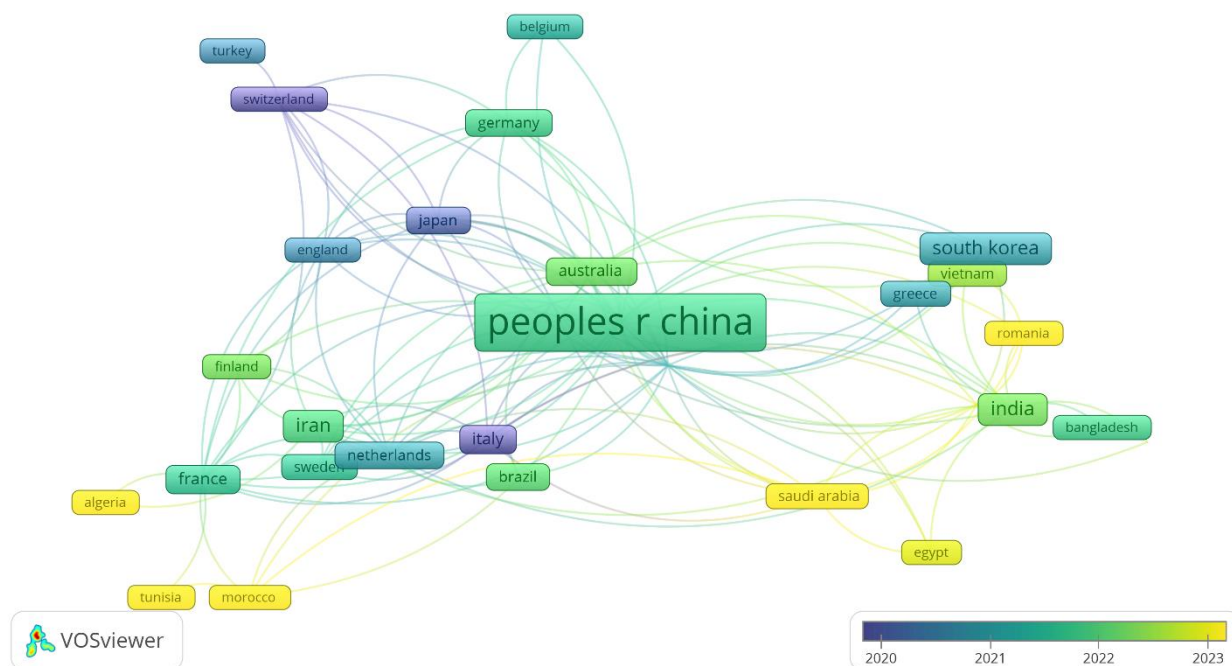
تحلیل توزیع جهانی مقالات در یکپارچه‌سازی داده‌های سنجش از دور و یادگیری ماشین برای هیدرولوژی

توزیع جهانی تحقیقات در شکل ۱۰ نشان داده شده است، که کشورها را بر اساس تعداد مقالات منتشر شده رتبه‌بندی می‌کند. چین با ۴۶۸ مقاله بیشترین تعداد مقالات را داراست، پس از آن و با اختلاف زیاد نسبت به چین، ایالات متحده آمریکا با ۲۲۲ مقاله، کره جنوبی با ۷۰ مقاله، هند با ۶۷ مقاله و ایران با ۵۰ مقاله قرار دارند. چین با انتشار ۴۶۸ مقاله، جایگاه نخست تحقیقات جهانی را به خود اختصاص داده است. این برتری ناشی از سرمایه‌گذاری عظیم در علوم داده و هوش مصنوعی، پروژه‌های ملی مانند برنامه‌های ماهواره‌ای Gaofen و سیاست‌های حمایتی دولت برای توسعه فناوری‌های پیشرفته مدیریت منابع آب است. این کشور با دسترسی به داده‌های گسترده و استفاده از روش‌های یادگیری ماشین، توانسته جایگاه پیشرو خود را در تحقیقات علمی مرتبط با سنجش از دور و هیدرولوژی تثبیت کند. ایالات متحده آمریکا با ۲۲۲ مقاله در جایگاه دوم قرار دارد، اما ویژگی اصلی تحقیقات این کشور تأکید بر کیفیت و تأثیرگذاری مقالات است. بسیاری از مقالات منتشر شده در نشریات برجسته‌ای مانند Journal of Hydrology و Water Resources Research قرار دارند. همچنین، همکاری‌های گسترده بین‌المللی دانشگاه‌های این کشور با سایر کشورها به افزایش تأثیرگذاری علمی ایالات متحده در مدیریت منابع آب و توسعه فناوری‌های پیش‌بینی هیدرولوژیکی کمک کرده است.

کشورهای آسیایی مانند کره جنوبی و هند نیز در حال افزایش سهم خود در این زمینه می‌باشند. کره جنوبی با ۷۰ مقاله بر سیستم‌های هشدار سیلاب و پایش تغییرات آب‌وهوایی از طریق داده‌های سنجش از دور تمرکز کرده است. هند با ۶۷ مقاله، عمدتاً بر مدیریت منابع آب کشاورزی و مقابله با بحران‌های آبی متمرکز شده است. استفاده از راه‌حل‌های اقتصادی‌تر برای تحلیل داده‌های بزرگ در این کشور قابل توجه است. ایران نیز با ۵۰ مقاله در جایگاه پنجم قرار دارد و به‌رغم چالش‌های بین‌المللی، توانسته در حوزه مطالعات منطقه‌ای پیشرفت کند. تمرکز ایران بیشتر بر مدیریت بحران خشکسالی و تحلیل جریان رودخانه‌ها است. این کشور با بهره‌گیری از مدل‌های یادگیری ماشین، نقش مؤثری در تحقیقات مرتبط با آبخوان‌های زیرزمینی و پیش‌بینی جریان آب ایفا کرده است. در میان سایر کشورها، کشورهای اروپایی مانند آلمان و هلند با تعداد کمتری مقاله، بر انتشار مقالات در نشریات با کیفیت بالا تمرکز دارند. موضوعات اصلی تحقیقات این کشورها شامل مدیریت سیلاب و پایش آب‌های سطحی است. استرالیا نیز با وجود تعداد محدود مقالات، پیشرو در مدیریت منابع آب در مناطق خشک و ارائه راه‌حل‌های علمی برای مناطق کم‌آب است. یکی از ویژگی‌های قابل توجه در این تحقیقات، افزایش همکاری‌های بین‌المللی است. بسیاری از کشورهای پیشرو مانند چین و ایالات متحده، از پروژه‌های چندملیتی برای تبادل داده‌ها و توسعه فناوری‌های پیشرفته استفاده می‌کنند. این همکاری‌ها نقش مهمی در گسترش تحقیقات هیدرولوژی مبتنی بر یادگیری ماشین در سطح جهانی دارد (شکل ۱۱)



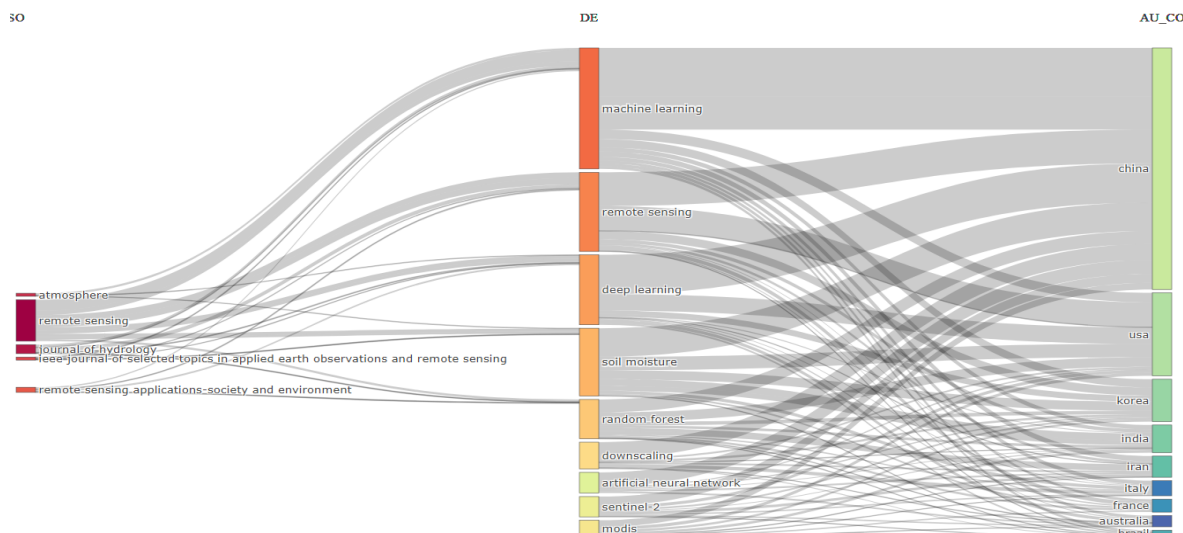
شکل ۱۰. تعداد اسناد بر اساس کشور.



شکل ۱۱. شبکه همکاری کشورهای مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی.

روندهای نوین در یکپارچه‌سازی داده‌های سنجش از دور و یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی

نمودار سه‌میدانه‌ای با استفاده از Biblioshiny تولید شد تا رابطه میان منابع، کلمات کلیدی و کشورها را به تصویر بکشد. این نمودار سه عنصر اصلی تحقیق را به صورت بصری متصل می‌کند و امکان درک روابط بین آن‌ها را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، فراوانی ارتباطات میان این عناصر به صورت پیوندهای وزن‌دار نشان داده شده که ضخامت خطوط آن را مشخص می‌کند. همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده، این نمودار ارتباط میان ژورنال‌های کلیدی، کلمات کلیدی پرتکرار و کشورهایی که بیشترین مشارکت را در تحقیقات سنجش از دور و روشهای یادگیری ماشین در هیدرولوژی داشته‌اند، برجسته می‌کند. مشاهده می‌شود که بسیاری از ارتباطات ژورنال‌های اصلی شناسایی شده را به مجموعه متنوعی از کلمات کلیدی پیوند می‌دهد. به طور خاص، نشریه remote sensing به اکثر کلمات کلیدی مرتبط با یادگیری ماشین و هیدرولوژی که در این مطالعه ارائه شده‌اند، متصل است. به طور قابل توجهی، نشریات Atmosphere و Journal of Hydrology به کلمات "یادگیری عمیق" و "رطوبت خاک" مرتبط می‌باشند که نشان می‌دهد بسیاری از مطالعات منتشر شده در این منابع بر روش‌های نوین یادگیری عمیق و برآورد رطوبت خاک توسط ادغام روش‌های سنجش از دور با یادگیری ماشین متمرکز بوده‌اند.

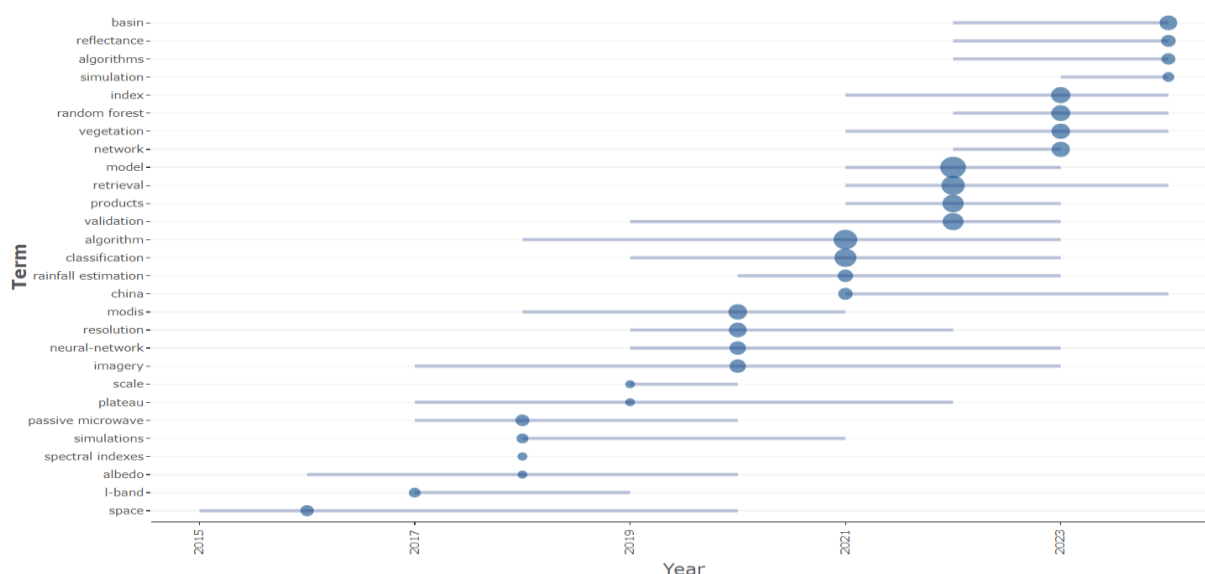


شکل ۱۲. نمودار سه‌میدانی ارتباط بین نشریات، کلمات کلیدی و کشورهای مختلف.

چشم‌انداز تحقیقات آینده در کاربرد سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی

شکل ۱۴ شبکه‌های هم‌رخدادی کلمات کلیدی را ارائه می‌دهد که روند تحولات موضوعی را در سه بازه زمانی (ابتدایی، میانی و پایانی) نشان می‌دهند. این روند منعکس‌کننده پیشرفت‌های فناوری، تغییر تمرکز تحقیقاتی، و پیش‌بینی مسیرهای تحقیقاتی آینده است. تحلیل روند موضوعی کلمات کلیدی در زمینه کاربرد همزمان روش‌های سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی نشان می‌دهد که تحقیقات این حوزه در سال‌های اخیر دچار تحول و تکامل قابل‌توجهی شده است. در دوره ابتدایی (پیش از سال ۲۰۱۸)، تحقیقات عمدتاً بر فناوری‌های پایه‌ای مانند شاخص‌های طیفی، داده‌های میکروویو غیرفعال، و تحلیل تغییرات فضایی متمرکز بود. هدف اصلی این مطالعات، توسعه ابزارها و مدل‌های اولیه برای شبیه‌سازی جریان آب و تخمین بارش بود که استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مانند MODIS برای تحلیل پوشش گیاهی و تبخیر-تعرق نقش کلیدی داشت.

در دوره میانی (۲۰۱۸-۲۰۲۱)، استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین پیشرفته‌تر مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های طبقه‌بندی و رگرسیون افزایش یافت. این دوره با تمرکز بر ترکیب داده‌های سنجش از دور و روش‌های داده‌محور مشخص می‌شود. موضوعاتی مانند تخمین بارش و تحلیل مقیاس‌های مکانی و زمانی وارد تحقیقات شدند و الگوریتم‌های طبقه‌بندی برای تحلیل داده‌های هیدرولوژیکی به کار گرفته شدند. در این بازه زمانی، تلاش‌ها به سمت تحلیل‌های کاربردی‌تر و دقیق‌تر پیش رفتند.



شکل ۱۴. روند انتشار کلمات کلیدی در اسناد مرتبط با ادغام داده‌های سنجش از دور و تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و تحلیل هیدرولوژیکی

تحقیقات اخیر (۲۰۲۱-۲۰۲۴) نشان‌دهنده تمرکز بیشتر بر موضوعاتی نظیر اعتبارسنجی مدل‌ها، بازیابی داده‌ها، و تحلیل داده‌های بزرگ است. استفاده از الگوریتم‌های قوی‌تر مانند جنگل تصادفی و توجه به تحلیل حوضه‌های آبریز به‌ویژه در کشورهای پیشرو مانند چین برجسته شده است. همچنین، کاربرد داده‌های زیست‌محیطی و تحلیل اثرات تغییرات اقلیمی با استفاده از داده‌های سنجش از دور رشد قابل‌توجهی داشته است. این دوره نشان‌دهنده گسترش مقیاس مطالعات از تحلیل‌های محلی به تحلیل‌های جهانی است. پیش‌بینی می‌شود که تحقیقات آینده در این حوزه به سمت توسعه مدل‌های ترکیبی هوشمند حرکت کنند. استفاده از روش‌های ترکیبی مانند مدل‌های Stacking و ترکیب داده‌های چندمنبعی از ماهواره‌ها و مشاهدات زمینی مورد توجه قرار خواهد گرفت. همچنین، مدیریت منابع آب در حوضه‌های آبریز خاص و تحلیل اثرات تغییرات اقلیمی از مهم‌ترین جهت‌گیری‌های آتی محسوب می‌شوند. از سوی دیگر، توسعه مدل‌های قابل‌اعتبارسنجی که قابلیت اجرا در مقیاس‌های محلی و جهانی را داشته باشند، از دیگر اولویت‌های پژوهشی در این زمینه است.

نتیجه‌گیری

تحلیل جامع ارائه‌شده در این مطالعه پیرامون روند تکامل استفاده از یادگیری ماشین و داده‌های سنجش از دور در حوزه هیدرولوژی طی دهه گذشته، نشان می‌دهد که این دو فناوری در تعامل با یکدیگر، نقش قابل‌توجهی در پیشرفت روش‌های پیش‌بینی و مدل‌سازی

هیدرولوژیکی ایفا کرده‌اند. یافته‌ها حاکی از رشد چشمگیر مطالعات مرتبط، به‌ویژه در حوزه پیش‌بینی بارش، رواناب، و تبخیر-تعرق، می‌باشند. ترکیب الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی عمیق، جنگل‌های تصادفی، و ماشین‌های بردار پشتیبان با داده‌های سنجش از دور با وضوح بالا، موجب بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و کاهش خطاهای ناشی از پیچیدگی‌های سیستم‌های طبیعی شده است. همچنین، استفاده از تکنیک‌های هیبریدی مانند ترکیب شبکه‌های عصبی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، گام مهمی در افزایش قابلیت تعمیم مدل‌ها در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی بوده است. روند رشد شتابان مقالات در زمینه کاربردهای سنجش از دور و یادگیری ماشین در هیدرولوژی در دهه گذشته، تحول چشمگیری در این حوزه ایجاد کرده است. این تحول که از تحلیل‌های ابتدایی به مدل‌های پیچیده‌تر و تخصصی‌تر در حال گذار است، نشان‌دهنده افزایش علاقه و توجه فزاینده جامعه علمی به این زمینه است. به‌ویژه از سال ۲۰۱۶ و به‌خصوص از ۲۰۱۹، با افزایش قابل توجه مقالات علمی، شاهد تغییرات اساسی در زمینه پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی شامل پارامترهای کلیدی مانند بارش، تبخیر، دما و جریان آب هستیم. این پیشرفت‌ها نشانه‌ای از تحول علمی و فنی در این عرصه است که به مرور زمان در حال پیچیده‌تر شدن و ارتقاء است. یکی از مسیرهای کلیدی آتی، ادغام فناوری‌های نوین است که در این راستا، ترکیب داده‌های سنجش از دور با تکنیک‌های پیشرفته یادگیری ماشین، به‌ویژه شبکه‌های عصبی عمیق (DNNs) و الگوریتم‌های هیبریدی پیچیده، می‌تواند به‌طور چشمگیری دقت پیش‌بینی‌ها را ارتقا داده و مدل‌های شبیه‌سازی دقیقی در شرایط مختلف اقلیمی و هیدرولوژیکی ارائه دهد. به‌ویژه داده‌های چندمنبعی (optic, radar, thermal) و چندزمانی (long-term and high-frequency) در این زمینه نقشی حیاتی خواهند داشت. این داده‌ها برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌ها، سیلاب‌ها و همچنین بهبود مدیریت منابع آب و ارزیابی اثرات بحران‌های آبی بسیار حیاتی خواهند بود. علاوه بر این، یکی از چالش‌های عمده در کاربرد یادگیری ماشین در هیدرولوژی، تفسیر مدل‌ها و تحلیل نتایج است. در آینده، با توجه به نیاز روزافزون برای شفافیت و تفسیرپذیری مدل‌ها، تمرکز بیشتری بر توسعه مدل‌های قابل تفسیر و شفاف خواهد بود. این پیشرفت‌ها می‌توانند اعتماد به مدل‌ها را در فرآیندهای تصمیم‌گیری مدیریتی و سیاست‌گذاری منابع آبی تقویت کنند. به‌ویژه، ترکیب مدل‌های فیزیکی با یادگیری ماشین، به‌ویژه در زمینه تخمین تبخیر-تعرق و پیش‌بینی منابع آبی، احتمالاً در سال‌های آتی اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد. این روند به بهبود درک ما از فرآیندهای پیچیده هیدرولوژیکی کمک خواهد کرد و به بهینه‌سازی سیاست‌های منابع آبی و کشاورزی منجر خواهد شد. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌های کلیدی همچنان پابرجاست. از جمله این چالش‌ها می‌توان به تفسیرپذیری مدل‌های پیچیده، نیاز به داده‌های باکیفیت و فراگیر، و مشکلات مرتبط با مقیاس‌پذیری مدل‌ها در مناطق مختلف جغرافیایی اشاره کرد. در این مطالعه، نقش تکنیک‌های داده‌افزایی، مانند استفاده از داده‌های مصنوعی و ریزمقیاس‌سازی، در بهبود عملکرد مدل‌ها به طور ویژه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، تأثیر پیشرفت‌های اخیر در روش‌های ارزیابی مدل‌ها، مانند معیارهای جدیدی از قبیل کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) و آمارهای آستانه‌ای (TS)، بر افزایش اعتمادپذیری و قابلیت تکرار مدل‌ها بررسی شده است. در نهایت، با توجه به چالش‌های پیش‌رو در زمینه تغییرات اقلیمی و بحران‌های هیدرولوژیکی مانند سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها، انتظار می‌رود که مدل‌های پیشرفته‌تری برای پیش‌بینی اثرات این تغییرات بر محیط‌زیست و منابع آبی، به‌ویژه با بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور و یادگیری ماشین در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی، توسعه یابند. این پیشرفت‌ها می‌توانند نقش اساسی در کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی و بحران‌های آبی ایفا کنند و به مدیریت هوشمندتر و پایدار منابع آبی کمک شایانی نمایند. این پژوهش، با تأکید بر آینده‌نگری و شناسایی نیازهای تحقیقاتی، گامی اساسی در توسعه کاربردهای یادگیری ماشین و سنجش از دور در هیدرولوژی برداشته است.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- Abbes, A. B., Jarray, N., & Farah, I. R. (2024). Advances in remote sensing based soil moisture retrieval: applications, techniques, scales and challenges for combining machine learning and physical models. *Artificial Intelligence Review*, 57(9), 224 .
- Abegeja, D. (2024). The application of satellite sensors, current state of utilization, and sources of remote sensing dataset in hydrology for water resource management. *Journal of Water and Health*, 22(7), 1162-1179 .
- Adams, K. H., Reager, J. T., Rosen, P., Wiese, D. N., Farr, T. G., Rao, S., ... & Rodell, M. (2022). Remote sensing of groundwater: current capabilities and future directions. *Water Resources Research*, 58(10),

e2022WR032219.

- Akbarpour, A., Dastourani, M., Tosan, M., & Gharib, M. (2024). Performance analysis of finite element method in groundwater studies based on Web of Science using R Biblioshiny. *Journal of Auifer and Qanat*, 4(2), 131-148 .
- Ali, I., Greifeneder, F., Stamenkovic, J., Neumann, M., & Notarnicola, C. (2015). Review of machine learning approaches for biomass and soil moisture retrievals from remote sensing data. *Remote Sensing*, 7(12), 16398-16421 .
- Amani, S., & Shafizadeh-Moghadam, H. (2023). A review of machine learning models and influential factors for estimating evapotranspiration using remote sensing and ground-based data. *Agricultural Water Management*, 284, 108324.
- Amiri, A., Soltani, K., Ebtehaj, I., & Bonakdari, H. (2024). A novel machine learning tool for current and future flood susceptibility mapping by integrating remote sensing and geographic information systems. *Journal of Hydrology*, 632, 130936 .
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of informetrics*, 11(4), 959-975 .
- Arias-Rodriguez, L. F., Tüzün, U. F., Duan, Z., Huang, J., Tuo, Y., & Disse, M. (2023). Global water quality of inland waters with harmonized landsat-8 and sentinel-2 using cloud-computed machine learning. *Remote Sensing*, 15(5), 1390 .
- Arruda, H., Silva, E. R., Lessa, M., Proença Jr, D., & Bartholo, R. (2022). VOSviewer and bibliometrix. *Journal of the Medical Library Association: JMLA*, 110(3), 392 .
- Atalla, M. A., Shebl, A., Durin, B., Kranjčić, N., & AlMetwaly, W. M. (2024). Assessment of groundwater potential zones in Kuwait's semi-arid region: a hybrid approach of multi-criteria decision making, Google earth engine, and geospatial techniques. *Scientific reports*, 14(1), 1-23.
- Ayzel, G., Scheffer, T., & Heistermann, M. (2020). RainNet v1. 0: a convolutional neural network for radar-based precipitation nowcasting. *Geoscientific Model Development*, 13(6), 2631-2644 .
- Bai, Y., Zhang, S., Bhattarai, N., Mallick, K., Liu, Q., Tang, L., ... & Zhang, J. (2021). On the use of machine learning based ensemble approaches to improve evapotranspiration estimates from croplands across a wide environmental gradient. *Agricultural and Forest Meteorology*, 298, 108308.
- Bogena, H. R., Weuthen, A., & Huisman, J. A. (2022). Recent developments in wireless soil moisture sensing to support scientific research and agricultural management. *Sensors*, 22(24), 9792
- Boutin, J., Yueh, S., Bindlish, R., Chan, S., Entekhabi, D., Kerr, Y., ... & Zribi, M. (2023). Soil moisture and sea surface salinity derived from satellite-borne sensors. *Surveys in Geophysics*, 44(5), 1449-1487.
- De Oliveira, O. J., da Silva, F. F., Juliani, F., Barbosa, L. C. F. M., & Nunes, T. V. (2019). Bibliometric method for mapping the state-of-the-art and identifying research gaps and trends in literature: An essential instrument to support the development of scientific projects. In *Scientometrics recent advances*. IntechOpen .
- Do, T. N., Nguyen, D. M. T., Ghimire, J., Vu, K. C., Do Dang, L. P., Pham, S. L., & Pham, V. M. (2023). Assessing surface water pollution in Hanoi, Vietnam, using remote sensing and machine learning algorithms. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(34), 82230-82247.
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of business research*, 133, 285-296 .
- Drogkoula, M., Kokkinos, K., & Samaras, N. (2023). A comprehensive survey of machine learning methodologies with emphasis in water resources (management. *Applied Sciences*, 13(22), 12147.
- Duan, X., Maqsoom, A., Khalil, U., Aslam, B., Amjad, T., Tufail, R. F., ... & Tariq, A. (2024). Enhancing soil moisture retrieval in semi-arid regions using machine learning algorithms and remote sensing data. *Applied Soil Ecology*, 204, 105687.
- Felegari, S., Sharifi, A., Khosravi, M., Sabanov, S., Tariq, A., & Karuppanan, S. (2023). Using Sentinel-2 data to estimate the concentration of heavy metals caused by industrial activities in Ust-Kamenogorsk, Northeastern Kazakhstan. *Heliyon*, 9(11).
- Ghorbani, B. D. (2024). Bibliometrix: Science Mapping Analysis with R Biblioshiny Based on Web of Science in Applied Linguistics. In *A Scientometrics Research Perspective in Applied Linguistics* (pp. 197-234). Springer .
- Hadadi, F., Moazenzadeh, R., & Mohammadi, B. (2022). Estimation of actual evapotranspiration: A novel hybrid method based on remote sensing and artificial intelligence. *Journal of Hydrology*, 609, 127774.
- Hafeez, S., Wong, M. S., Abbas, S., & Asim, M. (2022). Evaluating landsat-8 and sentinel-2 data consistency

- for high spatiotemporal inland and coastal water quality monitoring. *Remote Sensing*, 14(13), 3155.
- Han, H., Liu, Z., Li, J., & Zeng, Z. (2024). Challenges in remote sensing based climate and crop monitoring: navigating the complexities using AI. *Journal of cloud computing*, 13(1), 34 .
- Im, J., Park, S., Rhee, J., Baik, J., & Choi, M. (2016). Downscaling of AMSR-E soil moisture with MODIS products using machine learning approaches. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-19 .
- Ke, Y., Im, J., Park, S & ,Gong, H. (2016). Downscaling of MODIS one kilometer evapotranspiration using Landsat-8 data and machine learning approaches. *Remote Sensing*, 8(3), 215 .
- Kim, J., Lee, M., Han, H., Kim, D., Bae, Y., & Kim, H. S. (2022). Case study: Development of the CNN model considering teleconnection for spatial downscaling of precipitation in a climate change scenario. *Sustainability*, 14(8), 4719 .
- Kim, J., & Parolin, B. (2021). Deep learning-based soil moisture retrieval from remotely sensed data: A review. *Remote Sensing*, 13(19), 398
- Kim, Y. I., Park, W. H., Shin, Y., Park, J.-W., Engel, B., Yun, Y. J., & Jang, W. S. (2024). Applications of Machine Learning and Remote Sensing in Soil and Water Conservation .
- Krishnaraj, A., & Honnasiddaiah, R. (2022). Remote sensing and machine learning based framework for the assessment of spatio-temporal water quality in the Middle Ganga Basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(43), 64939-64958.
- Li, F., Yigitcanlar, T., Nepal, M., Nguyen, K., & Dur, F. (2023). Machine learning and remote sensing integration for leveraging urban sustainability: A review and framework. *Sustainable Cities and Society*, 96, 104653 .
- Li, Y., Wang, W., Wang, G., & Tan, Q. (2022). Actual evapotranspiration estimation over the Tuojiang River Basin based on a hybrid CNN-RF model. *Journal of Hydrology*, 610, 127788 .
- Liu, Q., Wu, Z., Cui, N., Jin, X., Zhu, S., Jiang, S., ... & Gong, D. (2023). Estimation of soil moisture using multi-source remote sensing and machine learning algorithms in farming land of Northern China. *Remote Sensing*, 15(17), 4214.
- Liu, D., Wang, Z., Wang, L., Chen, J., Li, C., & Shi, Y. (2024). Improved remote sensing reference evapotranspiration estimation using simple satellite data and machine learning. *Science of The Total Environment*, 947, 174480.
- Liu, G., Chen, L., Wang, W., Wang, S .,Zhu, K., & Shen, Z. (2024). New paradigm for watershed model development by coupling machine learning algorithm and mechanistic model. *Journal of Hydrology*, 636, 131264 .
- Mahmoud, R., Hassanin, M., Al Feel, H., & Badry, R. M. (2023). Machine learning-based land use and land cover mapping using multi-spectral satellite imagery: A case study in Egypt. *Sustainability*, 15(12), 9467 .
- Maier, H. R., Taghikhah, F. R., Nabavi, E., Razavi, S., Gupta, H., Wu, W., Radford, D. A., & Huang, J. (2024). How much X is in XAI: Responsible use of “Explainable” artificial intelligence in hydrology and water resources. *Journal of Hydrology X*, 100185 .
- Matyukira, C., & Mhangara, P. (2024). Advances in vegetation mapping through remote sensing and machine learning techniques: a scientometric review. *European Journal of Remote Sensing*, 2422330 .
- Mekonnen, Y. G., Alamirew, T., Chukalla, A. D., Malede, D. A., Yalew, S. G., & Mengistu, A. F. (2024). Remote sensing in hydrology: A systematic review of its applications in the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *HydroResearch* .
- Nourani, V., Baghanam, A. H., Adamowski, J., & Gebremichael, M. (2013). Using self-organizing maps and wavelet transforms for space–time pre-processing of satellite precipitation and runoff data in neural network based rainfall–runoff modeling. *Journal of Hydrology*, 476, 228-243 .
- Pan, S., Pan, N., Tian, H., Friedlingstein, P., Sitch, S., Shi, H., Arora, V. K., Haverd, V., Jain, A. K., & Kato, E. (2020). Evaluation of global terrestrial evapotranspiration using state-of-the-art approaches in remote sensing, machine learning and land surface modeling. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1485-1509 .
- Pangali Sharma, T. P., Zhang, J., Khanal, N. R., Prodhan, F. A., Paudel, B., Shi, L., & Nepal ,N. (2020). Assimilation of snowmelt runoff model (SRM) using satellite remote sensing data in Budhi Gandaki River Basin, Nepal. *Remote Sensing*, 12(12), 1951 .
- Raman, R., & Rathi, T. (2024, March). Efficient Dam Water Level Management Using Cloud-Based Data Analytics and LSTM Networks. In 2024 11th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO) (pp. 1-6). IEEE.

- Rostami, A., Raeini-Sarjaz, M., Chabokpour, J., & Chadee, A. A. (2023). Soil moisture monitoring by downscaling of remote sensing products using LST/VI space derived from MODIS products. *Water Supply*, 23(2), 688-705.
- Roy, S. K., Hasan, M. M., Mondal, I., Akhter, J., Roy, S. K., Talukder, S., ... & Karuppannan, S. (2024). Empowered machine learning algorithm to identify sustainable groundwater potential zone map in Jashore District, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 25, 101168.
- Saha, A., & Pal, S. C. (2024). Application of machine learning and emerging remote sensing techniques in hydrology: A state-of-the-art review and current research trends. *Journal of Hydrology*, 130907.
- Sahoo, B. B., Jha, R., Singh, A., & Kumar, D. (2019). Application of support vector regression for modeling low flow time series. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23, 923-934.
- Shah, W., Chen, J., Ullah, I., & Shah, M. H. (2024). Application of RNN-LSTM in Predicting Drought Patterns in Pakistan: A Pathway to Sustainable Water Resource Management. *Water*, 16(11), 1492.
- Shi, K., Han, J.-C., & Wang, P. (2024). Near real-time retrieval of lake surface water temperature using Himawari-8 satellite imagery and machine learning techniques: a case study in the Yangtze River Basin. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1335725.
- Shu-feng, L., Zhi-hua, W., Shuai, G., & Yan-hu, H. (2024). An improved hydraulic method for calculating ecological flow considering the changes of rainfall and temperature within a year. *Ecological Indicators*, 167, 112677.
- Srivastava, P. K., Han, D., Ramirez, M. R., & Islam, T. (2013). Machine learning techniques for downscaling SMOS satellite soil moisture using MODIS land surface temperature for hydrological application. *Water resources management*, 27, 3127-3. ۱۴۴
- Talebi, H., & Samadianfard, S. (2024). Integration of machine learning and remote sensing for drought index prediction: A framework for water resource crisis management. *Earth Science Informatics*, 17(5), 4949-4968.
- Tang, W., Zhao, X., Wang, J., Motagh, M., Xu, H., Ru, Z., & Wang, Y. (2024). Land surface response to groundwater drawdown and recovery in Taiyuan city, Northern China, analyzed with a long-term elevation change measurements from leveling and multi-sensor InSAR. *Journal of Hydrology*, 641, 131781.
- Tao, Y., Gao, X., Hsu, K., Sorooshian, S., & Ihler, A. (2016). A deep neural network modeling framework to reduce bias in satellite precipitation products. *Journal of Hydrometeorology*, 17(3), 931-945.
- Tosan, M., Gharib, M. R., Attar, N. F., & Maroosi, A. (2025). Enhancing Evapotranspiration Estimation: A Bibliometric and Systematic Review of Hybrid Neural Networks in Water Resource Management. *Computer Modeling in Engineering & Sciences (CMES)*, 142(2).
- Tosan, M., Dastourani, M., Akbarpour, A., & Gharib, M. R. (2024). Global trend analysis of numerical simulation application in groundwater based on WoS database using VOSviewer and Biblioshiny between 1997 and 2023. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 12(2), 0-0.
- Tosan, M., Khashei-Siuki, A., Maroosi, A., & Gharib, M. R. (2024). A Review of Smart Water Management for Sustainable Agriculture Based on the Internet of Things. *Water Management in Agriculture*, 11(1), 145-166.
- Tosan, M., Khashei Siuki, A., Sangari, M., & Rezvani Moghaddam, P. (2024). Analysis of the global research trend of saffron (*Crocus sativus* L.) between 2000-2023. *Saffron Agronomy and Technology*, 12(2), 115-138.
- Tosan, M., & Maroosi, A. Khozaymehnezhad, H. (2024). Investigating the performance of artificial rabbit optimization hybrid algorithm (ANN-ARO) in forecasting reference evapotranspiration with limited climatic parameters. *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems*, 12(1), 47-66.
- Tysi c, P., Strelets, T., & Tuszy nska, W. (2022). The application of satellite image analysis in oil spill detection. *Applied Sciences*, 12(8), 4016.
- Van Hateren, T. C., Chini, M., Matgen, P., Pulvirenti, L., Pierdicca, N., & Teuling, A. J. (2023). On the potential of Sentinel-1 for sub-field scale soil moisture monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 120, 103342.
- Wallin, J. A. (2005). Bibliometric methods: pitfalls and possibilities. *Basic & clinical pharmacology & toxicology*, 97(5), 261-275.
- Wang, L., Zhang, M., Gao, X., & Shi, W. (2024). Advances and challenges in deep learning-based change detection for remote sensing images: A review through various learning paradigms. *Remote Sensing*, 16(5), 804.

- Xia, R., Sun, H., Chen, Y., Wang, Q., Chen, X., Hu, Q., & Wang, J. (2023). Ecological flow response analysis to a typical strong hydrological alteration river in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2609 .
- Xiong, J., Abhishek, Xu, L., Chandanpurkar, H. A., Famiglietti, J. S., Zhang, C., ... & Vishwakarma, B. D. (2023). ET-WB: water-balance-based estimations of terrestrial evaporation over global land and major global basins. *Earth System Science Data*, 15(10), 4571-4597.
- Xiao, C., Chen, N., Hu, C., Wang, K., Xu, Z., Cai, Y., Xu, L., Chen, Z., & Gong, J. (2019). A spatiotemporal deep learning model for sea surface temperature field prediction using time-series satellite data. *Environmental Modelling & Software*, 120, 104502 .
- Xiao, Y., Chen, J., Xu, Y., Guo, S., Nie, X., Guo, Y., ... & Fu, Y. H. (2023). Monitoring of chlorophyll-a and suspended sediment concentrations in optically complex inland rivers using multisource remote sensing measurements. *Ecological Indicators*, 155, 111041.
- Xu, T., Guo, Z., Xia, Y., Ferreira, V. G., Liu, S., Wang, K., Yao, Y., Zhang, X., & Zhao, C. (2019). Evaluation of twelve evapotranspiration products from machine learning, remote sensing and land surface models over conterminous United States. *Journal of Hydrology*, 578, 124105 .
- Xu, Y., Hu, C., Wu, Q., Li, Z., Jian, S., & Chen, Y. (2021). Application of temporal convolutional network for flood forecasting. *Hydrology Research*, 52(6), 1455-1468 .
- Yang, Z., Gong, C., Lu, Z., Wu, E., Huai, H., Hu, Y., ... & Dong, L. (2023). Combined Retrievals of Turbidity from Sentinel-2A/B and Landsat-8/9 in the Taihu Lake through Machine Learning. *Remote Sensing*, 15(17), 4333.
- Zafar, Z., Zubair, M., Zha, Y., Fahd, S., & Nadeem, A. A. (2024). Performance assessment of machine learning algorithms for mapping of land use/land cover using remote sensing data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 27(2), 216-226 .
- Zhang, D., Hu, B., Chen, L., Qi, P., Wu, Y., Liu, X., ... & Zhang, W. (2024). Spatiotemporal variation of water level in wetlands based on multi-source remote sensing data and responses to changing environments. *Science of The Total Environment*, 955, 177060.
- Zhang, S., Zhang, L., Meng, Q., Wang, C., Ma, J., Li, H., & Ma, K. (2024). Evaluating agricultural non-point source pollution with high-resolution remote sensing technology and SWAT model: A case study in Ningxia Yellow River Irrigation District, China. *Ecological Indicators*, 166, 112578.
- Zhao, X., Wang, H., Bai, M., Xu, Y., Dong, S., Rao, H., & Ming, W. (2024). A Comprehensive Review of Methods for Hydrological Forecasting Based on Deep Learning. *Water*, 16(10), 1407.
- Zhu, S., Wei, J., Zhang, H., Xu, Y., & Qin, H. (2023). Spatiotemporal deep learning rainfall-runoff forecasting combined with remote sensing precipitation products in large scale basins. *Journal of Hydrology*, 616, 128727.
- Zupic, I., & Čater, T. (2015). Bibliometric methods in management and organization. *Organizational research methods*, 18(3), 429-472.