



Review Paper

Emerging Trends in the Integrating Remote Sensing and Machine Learning for Groundwater Resources Management: A Bibliometric Study

A. Akbarpour^{1*}, M. Tosan², and R. Shamshirgaran³

Abstract

Sustainable management of groundwater resources, as a multifaceted challenge in water sciences, necessitates the adoption of novel computational approaches for monitoring, modeling, and predicting dynamics. This research investigates the status of advanced remote sensing applications for groundwater management from 2000 to 2024 and outlines the future research directions. Data extracted from the database at the Web of Science Core Collection (n=2356) was analyzed using the Bibliometrix package in the R environment. The results revealed a significant growth in the research field, with GRACE satellite data recognized as a key indicator in assessing groundwater storage changes. Furthermore, the emergence of "land-surface model" and "risk assessment" concepts reflect a trend toward integrated modeling and comprehensive risk evaluation. The integration of multi-source remote sensing data (including data from new-generation satellites and aerial platforms) with advanced artificial intelligence algorithms (such as deep neural networks, physics-informed models, and reinforcement learning methods) are expected to become a central focus for leading researchers in hydrology, water resources, and machine learning engineering. This convergence will pave the way for developing more reliable prediction models, accurate uncertainty analysis, and the provision of optimal groundwater resources management solutions under various climatic and land-use scenarios. By systematically reviewing the research published in reputable scientific databases, this bibliometric analysis provides an overview of the status, emerging trends, and future priorities in this vital field for the scientific community.

Keywords: Remote Sensing, Groundwater Resources, InSAR Radar Techniques, Hydrological Modeling.

Received: March 16, 2025

Accepted: May 19, 2025

مقاله مروری

روندهای نوظهور در ادغام سنجش از دور و یادگیری ماشینی در مدیریت منابع آب زیرزمینی: یک مطالعه علم‌سنجی

ابوالفضل اکبرپور^{۱*}، معین توسن^۲ و راضیه شمشیرگران^۳

چکیده

مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی، به عنوان یک چالش چندوجهی در علوم آب مستلزم به کارگیری رویکردهای محاسباتی نوین جهت پیش، مدل‌سازی و پیش‌بینی دینامیک است. در این پژوهش، به بررسی وضعیت کنونی و ترسیم مسیرهای آتی تحقیقات در کاربردهای پیشرفته سنجش از دور در مدیریت آب‌های زیرزمینی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ پرداخته شده است. داده‌های استخراج‌شده از پایگاه Web of Science Core Collection (n=2356) با استفاده از بسته Bibliometrix در محیط R مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که حوزه پژوهشی با رشد قابل توجهی مواجه بوده و داده‌های ماهواره‌ای GRACE به عنوان یک شاخص کلیدی در ارزیابی تغییرات ذخایر آب زیرزمینی شناخته شده‌اند. از طرفی ظهور مفاهیم "land-surface model" و "risk assessment" گرایش پژوهش‌ها را به سمت مدل‌سازی‌های یکپارچه و ارزیابی جامع مخاطرات را منعکس می‌کند. انتظار می‌رود تلفیق داده‌های چندمنبعی سنجش از دور (شامل داده‌های نسل جدید ماهواره‌ها و پلتفرم‌های هوایی) با الگوریتم‌های نوین هوش مصنوعی (از جمله شبکه‌های عصبی عمیق، مدل‌های فیزیک-آگاهانه و روش‌های یادگیری تقویتی) به کانون توجه پژوهشگران برجسته در حوزه‌های هیدرولوژی، منابع آب و مهندسی یادگیری ماشینی بدل شود. این همگرایی زمینه توسعه مدل‌های پیش‌بینی با قابلیت اطمینان بالاتر، تحلیل دقیق عدم قطعیت و ارائه راهکارهای بهینه مدیریت منابع آب زیرزمینی در سناریوهای مختلف اقلیمی و کاربری اراضی را فراهم می‌آورد. این تحلیل علم‌سنجی، با بررسی ساختار یافته پژوهش‌های منتشر شده در پایگاه‌های علمی معتبر، یک دیدگاه از وضعیت کنونی، مسیرهای نوظهور و اولویت‌های آتی در این حوزه حیاتی را برای جامعه علمی ترسیم می‌کند.

کلمات کلیدی: سنجش از دور، منابع آب زیرزمینی، تکنیک‌های راداری InSAR، مدل‌سازی هیدرولوژیکی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۲/۲۹

1- Professor, Department of Civil Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran. E-Mail: Akbarpour@Birjand.ac.ir

2- Ph.D. Candidate in Water Resources, University of Birjand, Birjand, Iran. E-Mail: Moain.Tosan@Birjand.ac.ir

3- Ph.D. Candidate in Water Resources Engineering and Management, University of Birjand, Birjand, Iran. E-Mail: R.Shamshirgaran@Birjand.ac.ir

* - Corresponding Author

Doi: [10.22034/iwrr.2025.512699.2842](https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.512699.2842)

۱- استاد گروه مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۲- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

۳- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

* - نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان تابستان ۱۴۰۴ امکان‌پذیر است.

دسترسی به برخی مناطق برای نصب تجهیزات و انجام اندازه‌گیری‌ها محدود باشد. همچنین، در بسیاری از موارد، داده‌های زمینی تنها در سطح آب زیرزمینی قابل دسترس هستند و اطلاعات کافی در مورد تغییرات در اعماق مختلف آبخوان ارائه نمی‌دهند (Mardani et al., 2025). از سوی دیگر، تکنیک‌های سنجش از دور همچون استفاده از داده‌های GRACE یا رادارهای مصنوعی (SAR^3) به‌ویژه در مناطق خشک و کم‌آب، به دلیل محدودیت‌های وضوح فضایی و زمانی، ممکن است نتوانند اطلاعات دقیقی از لایه‌های عمیق‌تر آب‌های زیرزمینی ارائه دهند (Sahour et al., 2022). علاوه بر این، در مناطق با تغییرات غیرخطی و پیچیده در رفتار هیدرومکانیکی لایه‌ها، هماهنگی داده‌های ماهواره‌ای با مدل‌های هیدروژئولوژیکی همچنان نیاز به پژوهش و بهبود دارد (Adams et al., 2022). این محدودیت‌ها، در کنار مزایای آشکار سنجش از دور در ارائه داده‌های یکپارچه و با پوشش وسیع، اهمیت تلفیق این دو نوع داده را در جهت مدیریت بهینه منابع آب زیرزمینی دوچندان می‌سازد.

با وجود پتانسیل‌های قابل توجه سنجش از دور در مدیریت منابع آب زیرزمینی، محدودیت‌هایی نیز در حال حاضر وجود دارد (Shamshirgaran et al., 2025). یکی از مهم‌ترین این محدودیت‌ها، چالش‌های موجود در ریزمقیاس‌سازی داده‌های ماهواره‌ای برای ارائه اطلاعات با وضوح مکانی کافی در سطح محلی است (Fakourian et al., 2025). همچنین، برآورد دقیق تراز سطح آب زیرزمینی در آبخوان‌های عمیق و ارزیابی کیفیت آب، به‌ویژه در آبخوان‌هایی که با آلودگی‌های مختلف مواجه هستند یا در عمق زیاد قرار دارند، هنوز با محدودیت‌هایی در کارایی سنجنده‌ها روبرو است (Wang et al., 2025). با این حال، با توجه به روند رو به رشد فناوری‌های سنجش از دور، انتظار می‌رود که در دهه‌های آتی شاهد پیشرفت‌های چشمگیری در رفع این محدودیت‌ها باشیم. همان‌طور که در بخش‌های بعدی مقاله نیز به آن اشاره شده است، نتایج حاصل از سنجش از دور همواره باید با داده‌های میدانی مورد راستی‌آزمایی قرار گیرند تا از دقت و قابلیت اطمینان آن‌ها اطمینان حاصل شود. از طرفی سنجش از دور در حال حاضر با محدودیت‌های جدی در ارائه داده‌های هیدرودینامیکی اساسی آبخوان‌ها مانند ضریب هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره و آبدهی ویژه روبرو است (Noory et al., 2025). این پارامترها برای درک دقیق رفتار جریان آب زیرزمینی و انجام مدل‌سازی‌های کمی ضروری هستند و اندازه‌گیری آن‌ها حتی در مطالعات میدانی نیز چالش‌برانگیز است. همچنین، تعیین پارامترهای کیفی آب زیرزمینی، به‌ویژه در سفره‌های تحت فشار و آزاد و در شرایط وجود آلودگی‌های متنوع، با استفاده از روش‌های سنجش از دور فعلی امکان‌پذیر نیست. در نهایت، بحث همگنی و ناهمگنی ساختار زمین در مناطق غیراشباع و اشباع آبخوان‌ها نیز از جمله عواملی است که

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع حیاتی برای تأمین نیازهای انسانی، کشاورزی و صنعتی در بسیاری از مناطق دنیا، نقشی حیاتی در حفظ پایداری جوامع ایفا می‌کنند (Foster, 2022). تغییر در الگوهای بارش، افزایش تبخیر، کاهش تغذیه طبیعی و برداشت‌های بی‌رویه از این منابع، موجب افت شدید سطح آب زیرزمینی در بسیاری از نقاط جهان شده است (Shamshirgaran et al., 2022). این وضعیت چالش‌های جدی در زمینه مدیریت پایدار منابع آب، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، ایجاد کرده است (Tosan & Beyranvand, 2023); از اینرو دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای به‌ویژه از طریق فناوری‌های نوین سنجش از دور، یک ابزار قدرتمند برای نظارت و مدیریت منابع آب زیرزمینی به‌شمار می‌آید (Tosan, Khashei-Siuki, et al., 2024). ماهواره‌ها قادر به ارائه داده‌هایی با پوشش گسترده و قابلیت اندازه‌گیری تغییرات زمانی و مکانی هستند که در زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی کاربردهای فراوانی دارند (Akter et al., 2021). ماهواره‌های مختلفی در زمینه سنجش از دور به پژوهشگران کمک می‌کنند تا رفتار و تغییرات آب‌های زیرزمینی را با دقت بیشتری بررسی کنند. به عنوان مثال، ماهواره‌های $GRACE^1$ و $GRACE-FO^2$ با اندازه‌گیری تغییرات میدان گرانشی زمین، اطلاعات ارزشمندی درباره کاهش حجم آب‌های زیرزمینی در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی ارائه می‌دهند (Satizábal-Alarcón et al., 2024). همچنین، ماهواره‌های Landsat و Sentinel-2، با تصاویر چندطیفی خود، امکان پایش تغییرات پوشش گیاهی و شناسایی غیرمستقیم مناطق دچار افت سطح آب زیرزمینی را فراهم می‌کنند (Shahsavari et al., 2024). ماهواره‌های RADARSAT و Terra SAR-X، با استفاده از تکنیک‌های تداخل‌سنجی راداری، فرونشست زمین ناشی از بهره‌برداری بیش از حد از آب‌های زیرزمینی را اندازه‌گیری می‌نمایند (Castellazzi et al., 2021). این داده‌ها ابزاری کلیدی برای پیش‌بینی بحران‌های آبی و مدیریت پایدار منابع آب محسوب می‌شوند. با این حال، سنجش از دور به‌ویژه در زمینه نظارت بر منابع آب زیرزمینی، با چالش‌هایی مواجه است (Tosan et al., 2025).

یکی از مشکلات عمده در داده‌های زمینی، دقت پایین یا عدم دسترسی به اطلاعات در مقیاس زمانی یا مکانی مناسب است (Shamshirgaran et al., 2024). ایستگاه‌های زمینی معمولاً فقط در مقیاس‌های محدود و در دسترس جغرافیایی خاص داده‌های دقیقی ارائه می‌دهند و ممکن است نتوانند تغییرات گسترده و بلندمدت منابع آب زیرزمینی را پوشش دهند (Chiloane et al., 2022). علاوه بر این موارد، جمع‌آوری داده‌های زمینی اغلب نیازمند صرف زمان و هزینه قابل توجهی است و ممکن است به دلیل موانع لجستیکی یا سیاسی،

دقت و قابلیت اطمینان داده‌های سنجش از دور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. متخصصین حوزه آب‌های زیرزمینی امیدوارند که با پیشرفت‌های آتی در فناوری سنجش از دور، دسترسی آسان و دقیق به این نوع داده‌ها فراهم شده و امکان مدیریت منابع آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات جامع‌تر و صحیح‌تر فراهم شود.

پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های ماهواره‌ای مانند GRACE (پروژه بازیابی و اندازه‌گیری گرانش زمین) و سنجش از دور با استفاده از رادار آرایه مصنوعی (SAR) به ارائه داده‌های دقیق‌تر و مقیاس‌پذیرتر در زمینه ذخیره‌سازی آب زیرزمینی و تأثیرات برداشت آب پرداخته‌اند (An et al., 2024). چندین مطالعه از داده‌های سنجش از دور برای تخمین نرخ‌های کاهش و تغذیه آب زیرزمینی در مناطق مختلف استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، مطالعه‌ای توسط Pranjali et al. (2021) از داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای کمی‌سازی کاهش آب زیرزمینی در مناطق وسیعی از هند استفاده کرده و تفاوت‌های منطقه‌ای قابل توجهی را نشان داده و پتانسیل فرورفتگی زمین ناشی از برداشت آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار داده‌اند. در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳، از داده‌های ذخیره‌سازی آب کل (TWS⁴) ماهواره‌های GRACE و GRACE-FO و مدل GLDAS برای تحلیل تغییرات ذخیره‌سازی آب زیرزمینی (GWS⁵) در حوضه‌های رودخانه چترال (پاکستان) و کابل (افغانستان) از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱ استفاده کرده است. این ماهواره‌ها قادر به اندازه‌گیری تغییرات آب ذخیره‌شده در سطح وسیع و به‌طور غیرمستقیم در نواحی با کمبود چاه‌های مشاهده‌ای هستند، که امکان ارزیابی دقیق‌تر روند کاهش ذخیره‌سازی آب زیرزمینی را فراهم می‌کند. نتایج این مطالعه، کاهش حدود ۳/۶۷ و ۷/۸۳ میلی‌متر در ماه را برای ذخیره‌سازی آب کل و ذخیره‌سازی آب زیرزمینی نشان می‌دهند. این تحقیق به تحلیل روند تغییرات فصلی و روند کلی ذخیره‌سازی آب زیرزمینی پرداخته و تأثیرات آن بر منابع آب و اقتصاد کشاورزی این نواحی را بررسی کرده است (Tariq et al., 2023). در سال ۲۰۲۳، دکالرو و کانانه، ترکیب داده‌های چندمنبعی از ماهواره‌های Landsat-8/9 و Sentinel-1 و Sentinel-2 را برای ردیابی تغییرات کیفیت آب و همچنین شناسایی مناطق بحرانی برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی استفاده کردند. این داده‌ها با تحلیل شاخص‌های آب و استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته سنجش از دور، تغییرات سطح آب و تأثیرات ناشی از مدیریت ناپایدار منابع آبی را شناسایی نمودند. این تکنیک‌ها به ویژه در مناطقی با کمبود داده‌های زمینی مؤثر بوده و امکان تحلیل در مقیاس منطقه‌ای را با دقت بالا فراهم می‌کنند (Declaro & Kanac, 2024).

علاوه بر این، تصاویر ماهواره‌ای مدرن همراه با سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS⁶) امکان نقشه‌برداری دقیق‌تری از آبخوان را فراهم کرده است (Lee et al., 2020) که به بهبود شیوه‌های مدیریت آب،

به ویژه در مناطق با کمبود شدید منابع آب، کمک می‌کند. همچنین، یکپارچه‌سازی سنجش از دور با مدل‌های هیدرولوژیکی به ابزاری قدرتمند در درک رفتار آب‌های زیرزمینی تبدیل شده است (Liu et al., 2023). به عنوان مثال، مدل مطالعاتی MODFLOW⁷ را با داده‌های سنجش از دور ترکیب کرده‌اند تا حرکت آب زیرزمینی، تغذیه و دینامیک ذخیره‌سازی آن را شبیه‌سازی و پیش‌بینی کنند (Akhtar & Rampurwala, 2024; Nawale & Mategaonkar, 2024). این رویکرد به ویژه در ارزیابی پایداری منابع آب زیرزمینی در مناطق با تقاضای بالا مانند ایالات متحده و هند مفید واقع شده است (Majumdar et al., 2024). این پیشرفت‌ها اهمیت روزافزون سنجش از دور در مدیریت منابع آب زیرزمینی را نشان می‌دهند و اطلاعات ارزشمندی را در مورد نوسانات کوتاه‌مدت آب و چالش‌های پایداری بلندمدت ارائه می‌دهند.

مدیریت و ارزیابی دقیق منابع آب زیرزمینی به طور فزاینده‌ای به داده‌های میدانی متکی است (Ibrahim et al., 2024). با این حال، چالش‌های اساسی در دسترسی به داده‌های زمینی با کیفیت بالا، به ویژه در مناطق کم‌داده یا غیرقابل دسترسی، همچنان پابرجاست (Benrabah et al., 2023). علاوه بر این، پراکندگی مکانی و زمانی محدود داده‌های میدانی و هزینه بالای جمع‌آوری و تحلیل آن‌ها، توانایی پژوهشگران و مدیران را در ارائه دیدگاهی جامع برای مدیریت منابع آب زیرزمینی تحت تأثیر قرار می‌دهد (Kautz et al., 2024). این محدودیت‌ها نیاز به استفاده از فناوری‌های سنجش از دور و ادغام آن‌ها با داده‌های زمینی را به‌عنوان ابزاری توانمند برای حل مسائل پیچیده منابع آب زیرزمینی دوچندان کرده است.

در این مطالعه مروری، با استفاده از روش علم‌سنجی به بررسی جامع و سیستماتیک روندهای نوظهور در کاربرد ادغام سنجش از دور و یادگیری ماشین در مدیریت منابع آب زیرزمینی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ پرداخته شده است. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی الگوهای غالب، محققین کلیدی و موضوعات پژوهشی رو به رشد در این حوزه از طریق تحلیل ساختاریافته انتشارات علمی معتبر می‌باشد. نوآوری این مقاله در ارائه یک دیدگاه کلان و مبتنی بر داده‌های انتشاراتی است که به جای تمرکز بر یک جنبه خاص، چشم‌اندازی جامع از تحولات و جهت‌گیری‌های آتی تحقیقات در این زمینه ارائه می‌دهد. یافته‌های این مطالعه می‌تواند به عنوان یک راهنمای ارزشمند برای پژوهشگران، سیاست‌گذاران و متخصصان حوزه منابع آب عمل کرده و اولویت‌های پژوهشی آینده را در جهت توسعه روش‌های دقیق‌تر و کارآمدتر مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی روشن سازد.

۲- مواد و روش‌ها

برای استخراج داده‌های علم‌سنجی در این پژوهش، از پایگاه داده Web of Science Core Collection استفاده شد. در تاریخ ۱ دسامبر ۲۰۲۴، یک جستجوی کامل با هدف شناسایی مقالات مرتبط با کاربردهای نوین سنجش از دور در مدیریت آب‌های زیرزمینی، در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، صورت گرفت. جهت انجام جستجو، از استراتژی شامل عبارات زیر استفاده شد که در نتیجه آن، تعداد ۲۳۵۶ سند علمی شناسایی و استخراج شد. این داده‌ها به‌عنوان پایه‌ای برای تحلیل علم‌سنجی و بررسی روابط بین تغییرات اقلیمی و منابع آب زیرزمینی استفاده می‌شوند.

“Groundwater” AND (“Remote sensing” OR “Satellite” OR “Radar”)

تحلیل کتاب‌سنجی، یک روش کمی است که با بهره‌گیری از تکنیک‌های آماری و اندازه‌گیری، الگوهای توسعه، موضوعات تحقیقاتی کلیدی و روندهای موجود در متون علمی را آشکار می‌سازد (Akbarpour et al., 2024). این روش در حوزه‌های مختلف، از جمله کتابداری و اطلاع‌رسانی، علم‌سنجی و علوم اجتماعی، کاربرد گسترده‌ای دارد (Tosan, Dastourani, et al., 2024).

نرم‌افزارهای کتاب‌سنجی ابزارهایی قدرتمند برای تحلیل بصری داده‌های متنی حجیمی هستند که با ارائه نمایش‌های گرافیکی و شهودی، روابط شبکه‌ای و فرآیندهای تکاملی میان واحدهای دانشی را به تصویر می‌کشند (Passas, 2024; Vargas et al., 2022) و ساختارهای دانشی بالقوه را شناسایی می‌کنند (Donthu et al., 2021). تحلیل‌های کمی حاصل از این روش‌ها، با افزایش عینیت و اعتبار علمی، به تقویت نتایج تحقیقات کمک می‌کنند (Alsharif et al., 2020). Biblioshiny، یک بسته نرم‌افزاری در محیط R، ابزارهای متنوعی را برای تحلیل کتاب‌سنجی، محاسبات استنادی، تحلیل شبکه و نقشه‌برداری دانشی ارائه می‌دهد (Aria & Cuccurullo, 2017; Derviş, 2019). این نرم‌افزار قابلیت واردسازی داده‌ها از پایگاه Web of Science (WoS) را دارد (Tosan, Khashei Siuki, et al., 2024). در این پژوهش، از بسته Bibliometrix برای انجام تحلیل‌های پایه‌ای متون پژوهشی، شناسایی ده مجله برتر بر اساس حجم انتشار سالانه و H-index، و بررسی روندهای کلیدواژه‌های رایج و نوظهور استفاده شده است.

VOS viewer نسخه ۱.۶.۲۰ نیز به‌عنوان یک نرم‌افزار تخصصی برای ساخت و مصورسازی شبکه‌های کتاب‌سنجی به‌کار گرفته شد. این نرم‌افزار با بهره‌گیری از تکنیک‌های مختلف مانند تحلیل هم‌تألیفی، هم‌وقوعی، استنادی، همبستگی کتاب‌شناختی، و هم‌استنادی، نقشه‌های بصری و علمی جامعی از داده‌ها ارائه می‌کند (Arruda et al., 2022; Van Eck & Waltman, 2011). نرم‌افزار

VOS viewer نتایج تحلیل‌های کتاب‌سنجی را از طریق نمودارهای شبکه‌ای به‌صورت بصری نمایش می‌دهد و با تسهیل درک شهودی از قدرت و ماهیت ارتباطات، تحلیل داده‌ها را تسهیل می‌نماید. علاوه بر این، قابلیت مصورسازی پوششی در این نرم‌افزار امکان نمایش اطلاعات تکمیلی، مانند سال‌های انتشار، را فراهم می‌آورد (Van Eck & Waltman, 2010). در این پژوهش، از VOS viewer برای مصورسازی همکاری‌های ملی، بررسی شبکه‌های هم‌تألیفی میان مجلات و نویسندگان، و انجام تحلیل‌های هم‌وقوعی و خوشه‌بندی کلیدواژه‌ها استفاده شده است.

۳- نتایج و بحث

اطلاعات اصلی ۲۳۵۶ مقاله مرتبط با موضوع منابع آب، که از پایگاه داده WoS Core Collection در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۲۴ استخراج شده‌اند، با استفاده از ابزار R-Bibliometrix مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج این تحلیل در جدول ۱ ارائه شده‌اند. این مقالات در مجموع در ۵۲۰ مجله معتبر منتشر شده‌اند. کلیدواژه‌های نویسنده که مفاهیم اصلی مقالات را نمایان می‌کنند، شامل مجموعه‌ای از ۴۷۴۷ کلیدواژه است. Keywords Plus به تعداد کلیدواژه‌های پرتکرار در عناوین مقالات اشاره دارد که مجموعاً ۲۹۳۹ کلیدواژه است. از میان مقالات تحلیل‌شده، ۱۰۰ مقاله توسط یک نویسنده به تنهایی نوشته و منتشر شده‌اند، در حالی که میانگین تعداد نویسندگان در هر مقاله ۴/۵۳ نفر است. شاخص همکاری بین‌المللی در این مقالات، که میزان مشارکت نویسندگان از کشورهای مختلف را نشان می‌دهد، برابر با ۳۳/۵۷ درصد بوده است. این عدد بیانگر آن است که هرچند بخشی از مقالات حاصل همکاری پژوهشگرانی از مناطق گوناگون جهان است، اما بخش عمده‌ای از آن‌ها توسط نویسندگانی از یک کشور یا مؤسسه به‌صورت مشترک نگارش شده‌اند. در طی ۱۵ سال گذشته، تعداد مقالات به‌طور مداوم رشد کرده و نرخ رشد سالانه آن ۱۵/۱۹ درصد گزارش شده است. تعداد مقالات منتشرشده از سال ۲۰۰۰ همواره روند افزایشی داشته و از سال ۲۰۱۹ به بعد، این تعداد به بیش از ۲۰۰ مقاله در سال رسیده است. بالاترین میزان انتشار مقالات در سال‌های ۲۰۲۲، ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ مشاهده شده که در مجموع حدود یک سوم از کل مقالات (۳۴/۵ درصد) را شامل می‌شود. تحلیل برازش چندجمله‌ای نشان‌دهنده همبستگی معنادار بین سال انتشار و تعداد مقالات سالانه است ($R^2=96/55$). بر اساس تحلیل رگرسیون چندجمله‌ای، پیش‌بینی می‌شود که تا انتهای ۲۰۲۴، تعداد مقالات منتشرشده حدود ۳۳۴ مقاله باشد. شکل ۱ توزیع سالانه مقالات را برای مجموعه داده شامل ۴۷۴۸ مقاله نشان می‌دهد، که به

همراه خروجی تجمعی مقالات سالانه و برازش رگرسیون چندجمله‌ای ارائه شده است.

Table 1- Main information of the datasets
جدول ۱- اطلاعات اصلی مجموعه داده مورد استفاده

Description	Results
Timespan	2000:2024
Sources (Journals, Books, etc.)	520
Documents	2356
Annual Growth Rate %	15.19
Average citations per doc	28.29
References	72284
Keywords Plus (ID)	2939
Author's Keywords (DE)	4747
Authors	7548
Single-authored docs	100
Co-Authors per Doc	4.53
International co-authorships %	33.57

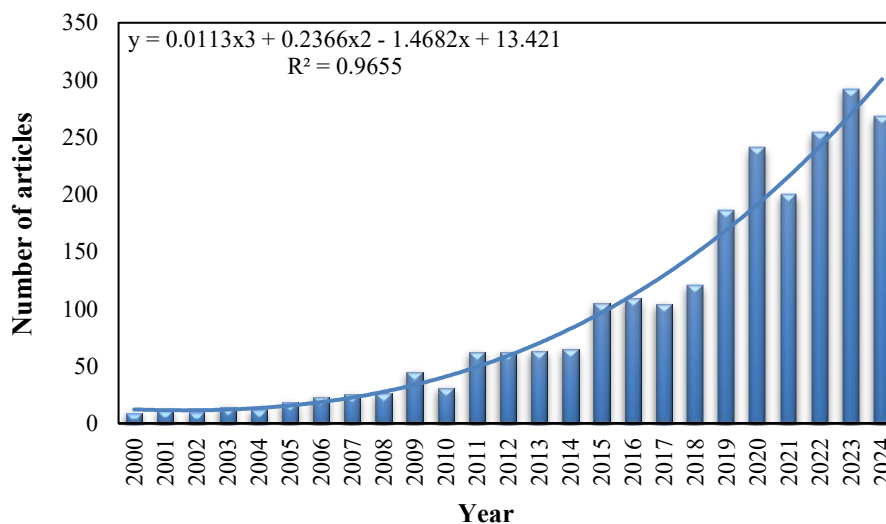


Fig. 1- Trends in annual publications (2000-2024)
شکل ۱- روند انتشار سالانه مقالات (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴)

۱-۳- شناسایی هسته پژوهشی در کاربردهای نوین سنجش از دور

۱-۱-۳- تحلیل منابع علمی برجسته

در این مطالعه، مجموعه‌ای از ۲۳۵۶ مقاله علمی منتشرشده در ۵۲۰ ژورنال تخصصی مورد تحلیل قرار گرفت. بررسی آماری مقالات نشان داد که ۱۰ نشریه برجسته بیش از ۷۱/۹ درصد از کل مقالات این حوزه را پوشش داده‌اند (جدول ۲). این تمرکز قابل توجه نشان‌دهنده شکل‌گیری یک شبکه علمی ساختاریافته در حوزه کاربردهای نوین سنجش از دور در مدیریت منابع آب زیرزمینی است که به‌واسطه مقالات منتشرشده در این ژورنال‌ها هدایت می‌شود. در صدر این نشریات، Journal of Hydrology قرار دارد که با انتشار ۱۱۵ مقاله به‌عنوان مرجع پیشرو در حوزه‌های هیدرولوژی سطحی و زیرزمینی، هیدرومتئورولوژی، هیدروژئولوژی و هیدروژئوگرافی شناخته می‌شود. این نشریه، با انتشار پژوهش‌های اصیل و مطالعات میان‌رشته‌ای جامع، به بررسی جنبه‌های فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی چرخه آب در اکوسیستم‌های طبیعی و انسانی پرداخته و نقشی کلیدی در گسترش دانش هیدرولوژیکی ایفا کرده است.

نشریه Environmental Earth Sciences، منتشرشده توسط انتشارات Springer، با ارائه ۱۰۲ مقاله تخصصی، در رتبه دوم قرار دارد. این ژورنال به‌دلیل تمرکز بر مطالعات میان‌رشته‌ای در علوم زمین و محیط زیست، بستر مهمی برای توسعه تحقیقات نوآورانه در

زمینه‌های مرتبط با مدیریت منابع آب زیرزمینی و سنجش از دور فراهم آورده است. رتبه سوم متعلق به Hydrogeology Journal با ۱۰۱ مقاله منتشرشده است. این ژورنال تخصصی، به‌طور خاص به تحلیل دینامیک آبخوان‌ها، بررسی کیفیت منابع آب زیرزمینی و توسعه ابزارهای نوآورانه برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی پرداخته و مرجع ارزشمندی برای تحقیقات در این حوزه محسوب می‌شود. اگرچه نشریاتی نظیر Water و Remote Sensing از نظر تعداد مقالات منتشرشده در رتبه‌های پایین‌تر قرار دارند (به ترتیب ۹۷ و ۹۰ مقاله)، اما تأثیرگذاری علمی آن‌ها همچنان چشمگیر است. شاخص H-index این دو نشریه به ترتیب برابر با ۲۲ و ۲۶ است که تنها اندکی کمتر از نشریه Hydrogeology Journal با شاخص H-index ۳۲ است. این شاخص‌ها نشان‌دهنده نفوذ علمی گسترده و تأثیرگذاری میان‌رشته‌ای این ژورنال‌ها در جامعه علمی است. شکل ۲ به وضوح شاخص H-index و تأثیرگذاری محلی این نشریات را نمایش می‌دهد. این داده‌ها بر اهمیت استراتژیک نشریات کلیدی در جهت‌دهی به تحقیقات نوین در کاربردهای سنجش از دور در مدیریت منابع آب زیرزمینی تأکید می‌کنند. این تحلیل، الگوی توزیع دانش علمی در این حوزه را نمایان کرده و بینش عمیقی درباره نشریات مرجع، روندهای پژوهشی پیشرو و شکاف‌های موجود در ادبیات علمی ارائه می‌دهد.

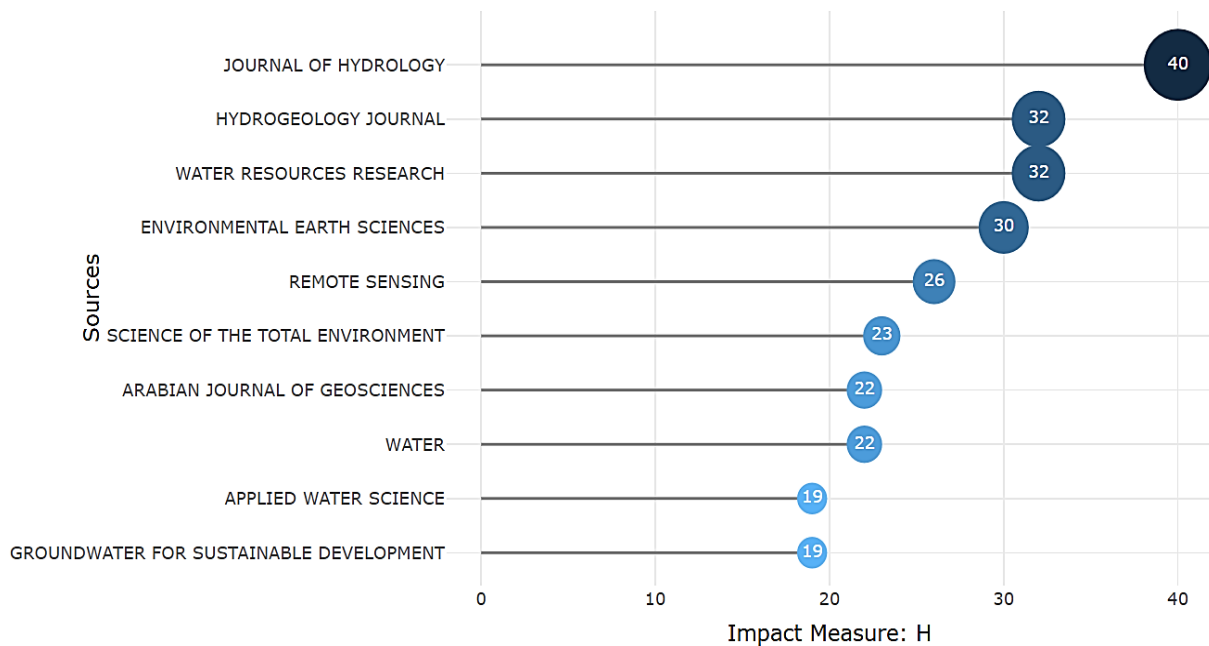


Fig. 2- Sources local impact by H-index
شکل ۲- تأثیر محلی منابع بر اساس شاخص اچ (H-index)

Table 2- Top 10 Journals in Terms of Remote Sensing Applications in Groundwater

جدول ۲- ده نشریه برتر در زمینه کاربرد سنجش از دور در مطالعات آب زیرزمینی

Rank	Element	Number of Publications	Total Citations	Percent (%)	Impact Factor	JCR
1	Journal of Hydrology	115	4832	4.8	6.4	Q1
2	Environmental Earth Sciences	102	2698	4.3	3	Q2
3	Hydrogeology Journal	101	4573	4.3	2.9	Q1
4	Water	97	1498	4.1	3.3	Q3
5	Remote Sensing	90	2315	3.8	8.8	Q1
6	Groundwater for Sustainable Development	84	1418	3.6	4.9	Q1
7	Arabian Journal of Geosciences	56	1944	2.4	1.95	Q2
8	Science of the Total Environment	53	1565	2.2	8.2	Q1
9	Sustainable Water Resources Management	52	603	2.2	2.1	Q2
10	Water Resources Research	49	5077	2.1	4.6	Q1

مهندسی منابع آب، توسط طیف گسترده‌ای از پژوهشگران در رشته‌های مختلف مورد استناد قرار گرفته است.

یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین مطالعات در زمینه تخلیه آب زیرزمینی و پایداری کشاورزی در دو منطقه حیاتی ایالات متحده، یعنی دشت‌های بزرگ و دره مرکزی کالیفرنیا، مقاله (Scanlon et al., 2012) است. این پژوهش با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی پیشرفته و رویکردهای دقیق زمین‌شناسی و هیدروشیمی، نه تنها وضعیت تخلیه آب زیرزمینی را بررسی کرده، بلکه راهکارهایی برای بهبود مدیریت منابع آبی ارائه داده است. این مقاله با تمرکز بر دو منطقه کلیدی کالیفرنیا، که نقشی حیاتی در امنیت غذایی ایالات متحده و جهان دارند و با بهره‌گیری از روش‌های پیشرفته مدل‌سازی هیدرولوژیکی مانند MODFLOW و رویکردهای دقیق زمین‌شیمیایی (مانند موازنه کلراید)، رویکردی بین‌رشته‌ای ارائه داده و ضمن شناسایی ابعاد تخلیه آب زیرزمینی، راهکارهای مدیریتی عملی نظیر تغذیه مصنوعی و کاهش برداشت را پیشنهاد کرده است؛ ویژگی‌هایی که تطبیق‌پذیری جهانی یافته‌های آن و اهمیت بالای مدیریتی‌اش را به اثبات رسانده و موجب استناد گسترده به آن شده است.

مقاله Famiglietti et al. (2011) یکی از پیشگامان در استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای پایش تغییرات ذخایر آب زیرزمینی است. این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌های ۷۸ ماهه ماهواره‌ای GRACE و ترکیب آن با مدل‌های هیدرولوژیکی پیشرفته، نظیر داده‌های PRISM⁸، GLDAS⁹ و اندازه‌گیری‌های جریان آب رودخانه، توانسته است تغییرات منابع آب در حوضه‌های ساکرامنتو و سن‌خوآکین را با دقت بالا تحلیل کند. با جداسازی سهم آب زیرزمینی

۳-۱-۲- رهیافت‌های ماهواره‌ای برای پایش بحران منابع

آب زیرزمینی: تحلیل پراستنادترین مطالعات جهانی

ده مقاله پراستناد (Tomaszewski, 2023) موجود در مجموعه داده تحقیق با استفاده از ابزار R-Bibliometrix تحلیل شده‌اند. جدول ۳ شامل اطلاعاتی درباره ژورنال‌های انتشار، سال چاپ مقالات، تعداد کل استنادها، میانگین استناد سالانه و نرخ استناد آن‌ها است. موضوعات مطرح‌شده در این مقالات گستره‌ای از موضوعات مرتبط با هیدرولوژی، مدیریت منابع آب و سنجش از دور در آب زیرزمینی، را در بر می‌گیرد.

پژوهش (Rodell et al., 2009) با بهره‌گیری از مشاهدات ماهواره‌ای مأموریت GRACE و مدل‌های هیدرولوژیکی پیشرفته، یکی از برجسته‌ترین مطالعات در زمینه کاربردهای سنجش از دور در منابع آب زیرزمینی است. این مقاله به دلیل ارائه روشی سیستماتیک و مقیاس‌پذیر برای ارزیابی تخلیه منابع آب زیرزمینی در شمال غرب هند، که یکی از بحرانی‌ترین مناطق جهان از نظر بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی است، تأثیر عمیقی در این حوزه گذاشته است. این پژوهش، یکی از نخستین مطالعاتی است که کاربرد مستقیم داده‌های ماهواره GRACE را برای پایش آب زیرزمینی در مقیاس منطقه‌ای نشان می‌دهد. این نوآوری، راه را برای استفاده گسترده از این روش در سایر مناطق جهان باز کرده است. از اینرو تمرکز بر منطقه‌ی بحرانی (شمال غرب هند) که یکی از بحرانی‌ترین مناطق جهان از نظر بهره‌برداری بی‌رویه از آب زیرزمینی است، تأثیرگذاری عملی برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع آب و زمینه‌سازی اصلاح سیاست‌های مدیریت منابع آب در مناطق مشابه و بین‌مرزی بودن در علوم زمین، هیدرولوژی و

از سایر اجزای ذخایر آب، مشخص شده که ۲۰/۳ کیلومتر مکعب از منابع آب زیرزمینی در این منطقه، عمدتاً به دلیل برداشت بی‌رویه برای کشاورزی و خشکسالی‌های متوالی، از دست رفته است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که دوسوم کاهش کل ذخایر آبی این حوضه‌ها مربوط به تخلیه آب زیرزمینی بوده که پیامدهای جدی برای امنیت اقتصادی و غذایی ایالات متحده به همراه دارد. این بررسی، به دلیل نوآوری در روش‌شناسی، ترکیب داده‌های چندمنبعی و ارائه رویکردی جامع برای پایش تغییرات آب زیرزمینی، تأثیر چشم‌گیری در حوزه سنجش از دور منابع آبی داشته است. با فراهم کردن یک چارچوب قابل‌اتکا برای تحلیل داده‌های GRACE و پیشنهاد راهکارهایی برای مدیریت پایدار منابع آبی، مقاله به یک مرجع کلیدی در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی تبدیل شده است. هشدارهای مقاله در خصوص ناپایداری تخلیه آب زیرزمینی در دشت مرکزی کالیفرنیا و تأکید آن بر ضرورت تلفیق داده‌های ماهواره‌ای در پایش‌های دوره‌ای، باعث شده این پژوهش بیشترین استاندارد را در زمینه مطالعات آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور کسب کند.

تحلیل (Galloway & Burbey (2011 به بررسی فرآیندهای فرونشست زمین ناشی از برداشت آب‌های زیرزمینی و روش‌های مختلف سنجش و مدل‌سازی آن پرداخته است. این مقاله از دیدگاه‌های مختلف علمی، از جمله رفتار هیدرومکانیکی آکوئیراردها، مدل‌سازی تغییرات سه‌بعدی سیستم‌های آکوئفر و کاربرد روش‌های پیشرفته سنجش از دور مانند InSAR و PSI، به ارزیابی و شبیه‌سازی فرونشست و شکست‌های زمین می‌پردازد. همچنین، به بررسی چالش‌ها و پیشرفت‌های شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی و تغییرات زمین‌ساختی ناشی از استخراج آب پرداخته و بر لزوم توسعه مدل‌ها و تکنیک‌های نوین برای شبیه‌سازی بهتر و دقیق‌تر این فرآیندها تأکید دارد. این پژوهش، به دلیل پوشش گسترده و تحلیلی دقیق از موضوع فرونشست زمین ناشی از برداشت آب زیرزمینی و استفاده از روش‌های پیشرفته سنجش از دور، یکی از مهم‌ترین و پر استنادترین مقالات در زمینه مطالعات آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور است. استفاده از تکنیک‌های مدرن مانند InSAR¹⁰ و PSI¹¹ به تحلیل دقیق‌تر و جامع‌تری از تغییرات سطح زمین در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی منجر شده و نقشی کلیدی در مدیریت منابع آب و کاهش خطرات ناشی از فرونشست دارد.

یکی از مهم‌ترین و معتبرترین مطالعات در زمینه کاهش منابع آب زیرزمینی در شمال هند با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، (Tiwari et al., 2009) است که به روشنی از تحلیل‌های پیشرفته سنجش از دور برای بررسی تغییرات سطحی آب‌های زیرزمینی بهره می‌برد. این تحقیق از داده‌های مأموریت GRACE برای بررسی تغییرات میدان گرانشی زمین استفاده کرده و نشان می‌دهد که منطقه شمال هند، که

یکی از پرآب‌ترین و پرجمعیت‌ترین مناطق کشاورزی جهان است، در حال تجربه یک کاهش چشمگیر در منابع آب زیرزمینی است. طی بازه زمانی بین آوریل ۲۰۰۲ تا ژوئن ۲۰۰۸، میزان افت آب‌های زیرزمینی در این منطقه حدود ۵۴ کیلومتر مکعب در سال برآورد شده که معادل یکی از سریع‌ترین نرخ‌های کاهش آب‌های زیرزمینی در جهان است. این مقاله در زمینه مطالعات آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور یکی از پیشگامان استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای بررسی تغییرات منابع آب زیرزمینی در مقیاس جهانی است.

این پژوهش به دلیل دقت و شفافیت بالا در تحلیل داده‌های گرانشی و استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی برای تفکیک اثرات انسانی و طبیعی، به عنوان یکی از مطالعات کلیدی و جامع در این زمینه شناخته می‌شود. اهمیت آن در این است که نشان می‌دهد چگونه تکنیک‌های پیشرفته سنجش از دور می‌توانند تغییرات آب‌های زیرزمینی را در مقیاس‌های بزرگ و در مناطقی که نظارت سنتی به سختی انجام‌پذیر است، به دقت مورد بررسی قرار دهند. این نوآوری در اندازه‌گیری‌های دقیق، به ویژه در مناطق پرآب و پرجمعیت مانند شمال هند، توجه بسیاری از محققان و سیاست‌گذاران جهانی را جلب کرده است و به همین دلیل، بیشترین میزان استناد در زمینه مطالعات آب زیرزمینی را به خود اختصاص داده است.

مقاله (Richey et al. (2015 با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای ارزیابی استرس منابع آب زیرزمینی و مقایسه آن با روش‌های سنتی مبتنی بر آمار برداشت‌های آبی، رویکرد نوینی را در مدیریت و پایش منابع آب زیرزمینی معرفی می‌کند. مقاله ذیل چهار نوع استرس منابع آب زیرزمینی را شبیه‌سازی کرده و نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های GRACE نسبت به روش‌های سنتی که تغییرات زمان‌مند و تنوع منطقه‌ای را نادیده می‌گیرند، دقت و حساسیت بیشتری دارد. همچنین، تحلیل تأثیرات کاربری اراضی و زیست بوم‌های انسانی بر فشار منابع آب زیرزمینی، این مطالعه را از نظر کاربردهای جهانی و منطقه‌ای ارزشمند می‌سازد. این مقاله به دلیل استفاده از داده‌های عمومی و قابل دسترس GRACE، پوشش جهانی از بزرگ‌ترین سیستم آبی زیرزمینی، و روش‌های نوآورانه‌اش در اندازه‌گیری استرس منابع آب زیرزمینی، توجه گسترده‌ای را در حوزه‌های هیدرولوژی و سنجش از دور جلب کرده است. نتایج این تحقیق به ویژه برای مناطقی که تغییرات طبیعی و انسانی بر ذخایر آب زیرزمینی تأثیرگذار است، کاربردی و عملی است. این ویژگی‌ها باعث شده تا مقاله ذیل در میان مقالات مرتبط با آب زیرزمینی و سنجش از دور به یکی از پر استنادترین منابع تبدیل شود.

پژوهش انجام شده توسط (Voss et al. (2013 نشان‌دهنده روند نگران‌کننده کاهش ذخایر آب در این منطقه، به ویژه در حوضه‌های آبریز دجله و فرات و غرب ایران، از ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۰۹ است.

طبق این مطالعه، میزان کاهش آب معادل ۲۷/۲ میلی‌متر در سال به ارتفاع معادل، که معادل حجم ۱۴۳/۶ کیلومتر مکعب آب در دوره تحقیق است، مشاهده شد. این روند عمدتاً ناشی از کاهش آب‌های زیرزمینی است، که در واقع به‌عنوان منبع اصلی کاهش ذخایر آب در این منطقه شناسایی شد. تحلیل‌های استفاده‌شده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE، مدل‌های سطح زمین و مشاهدات سایر منابع دورسنجی، پایه‌گذار یک چارچوب بهینه در مطالعه تغییرات منابع آبی در مناطقی هستند که دسترسی به داده‌های زمینی به شدت محدود است. اهمیت این تحقیق در ضرورت توافقات بین‌المللی در زمینه حقوق آب‌های مرزی و اهمیت نظارت و پایش منابع آبی در مناطق پیچیده جغرافیایی مانند خاورمیانه، مشخص می‌شود. این پژوهش، به‌طور قابل توجهی بر اهمیت فناوری‌های سنجش از دور در شبیه‌سازی و تحلیل تغییرات ذخیره آبی در مناطق حساس و با داده‌های محدود تأکید دارد. به‌ویژه، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای تعیین تغییرات ذخایر آب‌های زیرزمینی، که تحت تأثیر مصرف بی‌رویه و مدیریت نادرست منابع آبی قرار دارند، گامی مهم در تحلیل منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک به شمار می‌آید. این مطالعه با توجه به حجم بالای استناداتی که به خود اختصاص داده، در واقع نشان‌دهنده قدرت روش‌های نوین سنجش از دور در تعیین دقیق تغییرات ذخایر آبی و به‌ویژه آب‌های زیرزمینی است. این استنادها به دلیل استفاده از رویکرد جامع و داده‌های در دسترس از فناوری‌های نوین، که کمبود داده‌های زمینی در این مناطق را جبران می‌کند، به‌طور قابل توجهی در حوزه مطالعات آب‌های زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور رشد کرده است.

مقاله با عنوان Döll et al. (2014) که به ارزیابی جهانی کاهش آب‌های زیرزمینی و برداشت‌های مربوطه پرداخته و تحلیلی عمیق و علمی از وضعیت منابع آب زیرزمینی در مقیاس جهانی به ویژه در کشاورزی و بوم‌شناسی ارائه می‌دهد. استفاده از مدل هیدرولوژیک جهانی Water GAP¹² و داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای شبیه‌سازی تغییرات حجم ذخایر آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در مناطقی مانند هند، ایالات متحده، ایران، عربستان سعودی و چین که بالاترین نرخ‌های کاهش آب زیرزمینی را داشته‌اند، از نقاط قوت این تحقیق است. همچنین، این مقاله چالش‌ها و روش‌های مختلفی را برای ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای و ترکیب آن‌ها با مدل‌های هیدرولوژیک معرفی می‌کند، که می‌تواند به بهبود نظارت و مدیریت منابع آب زیرزمینی در مقیاس جهانی کمک کند. اصلاحات در فرضیات مدل‌ها، از جمله راندمان آب مصرفی و جریان‌های برگشتی، منجر به بهبود دقت نتایج شبیه‌سازی شده نسبت به برآوردهای مستقل در مناطق مختلف شده است. این پژوهش به دلیل نوآوری در روش‌های مدل‌سازی و استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

GRACE، در ارزیابی وضعیت کاهش منابع آب زیرزمینی در مقیاس جهانی، جایگاه برجسته‌ای در زمینه مطالعات آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور دارد. تطبیق داده‌های GRACE با مدل‌های هیدرولوژیک پیچیده و ارائه روش‌های نوین برای ارزیابی و نظارت دقیق‌تر بر ذخایر آب زیرزمینی، این تحقیق را به یکی از مقالات پر استناد در این حوزه تبدیل کرده است. همچنین، این مقاله به‌طور مؤثر نشان داده که چگونه می‌توان از این داده‌ها برای پیش‌بینی و مدیریت بحران‌های آبی در آینده استفاده کرد، که موجب جلب توجه محققان و نهادهای بین‌المللی در این زمینه شده است.

تحلیل جامع (Alley et al. (2002) به بررسی تعاملات پیچیده بین آب‌های سطحی و زیرزمینی، اثرات تغییرات اقلیمی و روش‌های نوین برای مدیریت منابع آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های سنجش از دور می‌پردازد. یکی از بخش‌های کلیدی این مقاله، تأکید بر استفاده از فناوری‌های پیشرفته سنجش از دور مانند رادار تداخل‌سنجی (InSAR) است که توانسته تغییرات سطح زمین ناشی از برداشت‌های آب زیرزمینی را با دقت بی‌سابقه‌ای اندازه‌گیری کند. این فناوری‌ها قادرند تغییرات جزئی و تدریجی در ارتفاع سطح زمین (میزان تغییرات در حدود ۱۰ میلی‌متر یا کمتر) را به‌طور دقیق شبیه‌سازی کرده و تغییرات زمانی و مکانی در فرایندهای فروکش زمین را اندازه‌گیری کنند. از آنجا که بررسی این تغییرات در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف برای مدیریت پایدار منابع آب ضروری است، استفاده از این روش‌ها به‌شدت در تحقیقات آب زیرزمینی محبوب و ضروری شده است. از این رو این بررسی، بیشترین ارجاعات را در زمینه مطالعات آب زیرزمینی به‌ویژه با استفاده از سنجش از دور به خود اختصاص داده که به‌طور مداوم و دقیق تغییرات زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی را از طریق تکنولوژی‌های نوین اندازه‌گیری کرده است. این مقاله نه تنها به‌خوبی روندهای بلندمدت و کوتاه‌مدت در آب‌های زیرزمینی را تحلیل می‌کند، بلکه نشان می‌دهد که چگونه استفاده از داده‌های راداری می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای فهم دقیق‌تر روابط میان جریان‌های سطحی و زیرزمینی و همچنین تغییرات فیزیکی در منابع آب به‌ویژه در پاسخ به تغییرات اقلیمی فراهم کند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که این مقاله یک منبع مهم برای پژوهشگران و متخصصان در زمینه مدل‌سازی منابع آب و مدیریت آنها باشد.

یکی از پیشگامان استفاده از سنجش از دور برای تخمین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی، (Rodel et al., 2007) است. این تحقیق به‌ویژه از داده‌های ماموریت ماهواره‌ای GRACE برای اندازه‌گیری تغییرات ذخیره آب سطح زمین بهره می‌برد، که شامل آب زیرزمینی، رطوبت خاک و برف می‌شود. این روش توانسته با استفاده از مدل‌های سطح زمین مانند GLDAS و با اعمال تکنیک‌های پیشرفته برای تفکیک آب زیرزمینی از دیگر منابع آبی، نتایج قابل اعتمادی را در مقیاس‌های

داده‌های زمینی در دسترس نیست، ارائه می‌دهد. همچنین، استفاده از داده‌های GRACE در ترکیب با مدل‌های شبیه‌سازی سطح زمین و تحلیل دقیق عدم قطعیت‌ها، موجب افزایش دقت نتایج می‌شود. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند که این تحقیق به عنوان یک مدل استاندارد در ارزیابی منابع آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور شناخته شود و جایگاه بالایی در جامعه علمی و نشریات معتبر پیدا کند.

وسیع (بیش از ۹۰۰,۰۰۰ کیلومتر مربع) به دست آورد. این مقاله به‌طور مشخص توانایی GRACE را برای پیش‌بینی تغییرات آب زیرزمینی در حوضه‌های آبی با مساحت‌های مختلف آزمایش کرده و نتایج آن با مشاهدات میدانی (آب‌سنجی‌ها) تطابق بالایی داشته است. این تحقیق بیشترین ارجاعات را در زمینه مطالعات آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور به خود اختصاص داده؛ چراکه یک روش نوین و معتبر برای تخمین تغییرات ذخیره آب زیرزمینی به‌ویژه در مناطقی که

Table 3- Most Cited Global References

جدول ۳- پراستنادترین منابع جهانی

Rank	Title	Title of the Journal	NTC	TC	TC/Y
1	Rodell et al. (2009)	Nature	20.32	1913	119.56
2	Scanlon et al. (2012)	Pnas	13.43	897	69
3	Famiglietti et al. (2011)	Geophysical Research Letters	12.35	663	47.36
4	Galloway & Burbey (2011)	Hydrogeology Journal	11.19	601	42.93
5	Tiwari et al. (2009)	Geophysical Research Letters	6.37	600	37.5
6	Richey et al. (2015)	Water Resources Research	10.75	530	53
7	Voss et al. (2013)	Water Resources Research	9.14	517	43.08
8	Döll et al. (2014)	Water Resources Research	9.11	510	46.36
9	Alley et al. (2002)	Science' S Compass	5.24	509	22.13
10	Rodell et al. (2007)	Hydrogeology Journal	5.2	468	26

TC: Total Citations / TC/Y: Total Citations per Year /NTC: Normalized Total Citations

همچنین، چین با ۱۰۷۵ مقاله در جایگاه دوم قرار دارد. افزایش فشار بر منابع آبی این کشور، به‌ویژه در مناطق شمالی و خشک‌تر، باعث شده است که این کشور به‌طور گسترده‌ای از فناوری‌های سنجش از دور برای پایش ذخایر آب زیرزمینی و مدیریت بحران‌های آب بهره‌برد. همچنین، همکاری‌های بین‌المللی در پژوهش‌های این کشور نقش قابل توجهی ایفا کرده است.

ایالات متحده با ۹۸۷ مقاله سومین کشور پیشرو در این حوزه است. تمرکز تحقیقات این کشور بیشتر بر مناطق خشک مانند جنوب غربی ایالات متحده و همچنین مدیریت بحران‌های آب زیرزمینی در کالیفرنیا بوده است. پژوهش‌ها در این کشور اغلب با هدف پیش‌بینی تغییرات منابع آبی در آینده و تدوین استراتژی‌های پایدار انجام شده‌اند. ایران با ۲۲۵ مقاله در جایگاه چهارم قرار دارد. شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک و وابستگی شدید به آب زیرزمینی در بخش‌های کشاورزی و شرب، باعث شده است که این کشور از فناوری‌های سنجش از دور برای مدیریت بهینه منابع آبی خود استفاده کند. تحقیقات در ایران عمدتاً بر روی مدل‌سازی ذخایر آب زیرزمینی و شناسایی مناطق مستعد

۲-۳- رویکردهای منطقه‌ای و همکاری‌های جهانی در توسعه سنجش از دور برای مدیریت پایدار آب زیرزمینی

۳-۲-۱- تحلیل ساختار همکاری‌های بین‌المللی در پژوهش‌های سنجش از دور

این تحلیل به بررسی توزیع جهانی خروجی‌های علمی و همکاری‌های بین‌المللی می‌پردازد. برای این منظور، با استفاده از نرم‌افزار VOS viewer، حداقل تعداد اسناد برای هر کشور ۱۰ مورد در نظر گرفته شد (شکل ۳). تحلیل تعداد مقالات منتشر شده در Web of Science نشان‌دهنده توجه قابل توجهی از سوی کشورهای مختلف به موضوع کاربردهای سنجش از دور در مدیریت آب‌های زیرزمینی است.

هند با انتشار ۱۱۸۸ مقاله در صدر کشورهای تولیدکننده علم در این حوزه قرار دارد. این آمار نشان‌دهنده نیاز گسترده این کشور به مدیریت منابع آب زیرزمینی است، به‌ویژه با توجه به جمعیت بالا، کشاورزی وابسته به آب‌های زیرزمینی، و شرایط اقلیمی متنوع. فناوری سنجش از دور در هند عمدتاً برای ارزیابی ذخایر آب زیرزمینی، پایش خشکسالی، و بهینه‌سازی استفاده از منابع آبی به‌کار رفته است.

در مناطق بیابانی و کشاورزی، از فناوری سنجش از دور برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی توسعه پایدار بهره می‌گیرد.

برداشت بیش از حد متمرکز است. کشور مصر نیز با ۲۲۴ مقاله در رتبه بعدی قرار دارد. این کشور به دلیل وابستگی بالا به منابع آب زیرزمینی

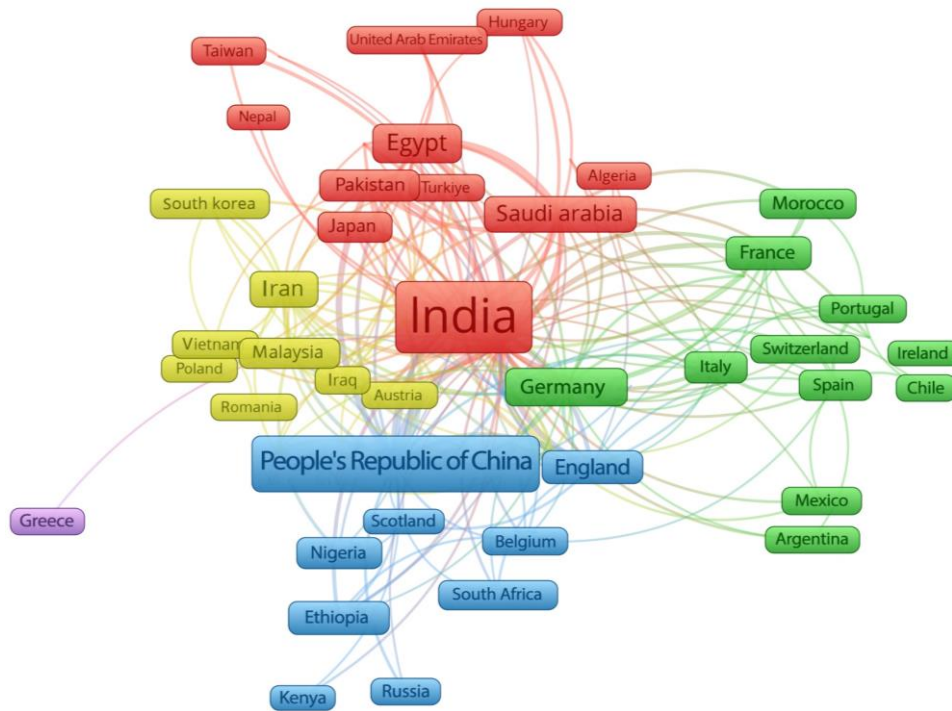


Fig. 3- Map of country collaborations in research on advanced remote sensing applications in groundwater

شکل ۳- نقشه همکاری‌های بین کشورها در پژوهش‌های پیرامون کاربردهای سنجش از دور در مطالعات آب زیرزمینی

متحد با ۴۱ همکاری، بیشترین تعامل علمی را با هند داشته است. این امر می‌تواند به دلیل پیشرو بودن ایالات متحده در توسعه فناوری‌های سنجش از دور و تمایل هند به استفاده از دانش فنی و منابع این کشور در مطالعات هیدروژئولوژیکی باشد. همکاری این کشور با چین (۱۸) و عربستان سعودی (۱۶) نیز نشان‌دهنده تمرکز بر مسائل مرتبط با مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. مشارکت هند با آلمان و بریتانیا منعکس‌کننده اهمیت تحقیقات بین‌رشته‌ای و تکنیک‌های پیشرفته در مدل‌سازی منابع آب زیرزمینی است. این همکاری‌ها به طور کلی نشان‌دهنده افزایش توجه جهانی به مدیریت پایدار منابع آب و نقش برجسته سنجش از دور در دستیابی به این هدف است.

تجزیه و تحلیل کشورها و مناطق مختلف نشان می‌دهد که توسعه فناوری سنجش از دور در مدیریت آب‌های زیرزمینی به شدت با شرایط اقلیمی، نیازهای محلی و سیاست‌های ملی مرتبط است. کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک مانند هند و چین، به دلیل بحران‌های آبی گسترده، سهم بیشتری در تولید مقالات علمی داشته‌اند. از سوی دیگر، در مناطقی با منابع آبی پایدارتر، استفاده از سنجش از دور بیشتر در راستای بهینه‌سازی و برنامه‌ریزی بلندمدت صورت می‌گیرد.

شکل ۴ همچنین نمایانگر شبکه همکاری‌های بین‌المللی در زمینه پژوهش‌های سنجش از دور در آب‌های زیرزمینی است. در این شکل، اندازه و رنگ دایره‌ها نشان‌دهنده حجم تولیدات علمی هر کشور بوده و ضخامت خطوط اتصال، سطح و شدت همکاری‌ها را بین کشورها نشان می‌دهد. تحلیل همکاری هند با سایر کشورها در زمینه کاربردهای سنجش از دور در آب زیرزمینی نشان می‌دهد که ایالات

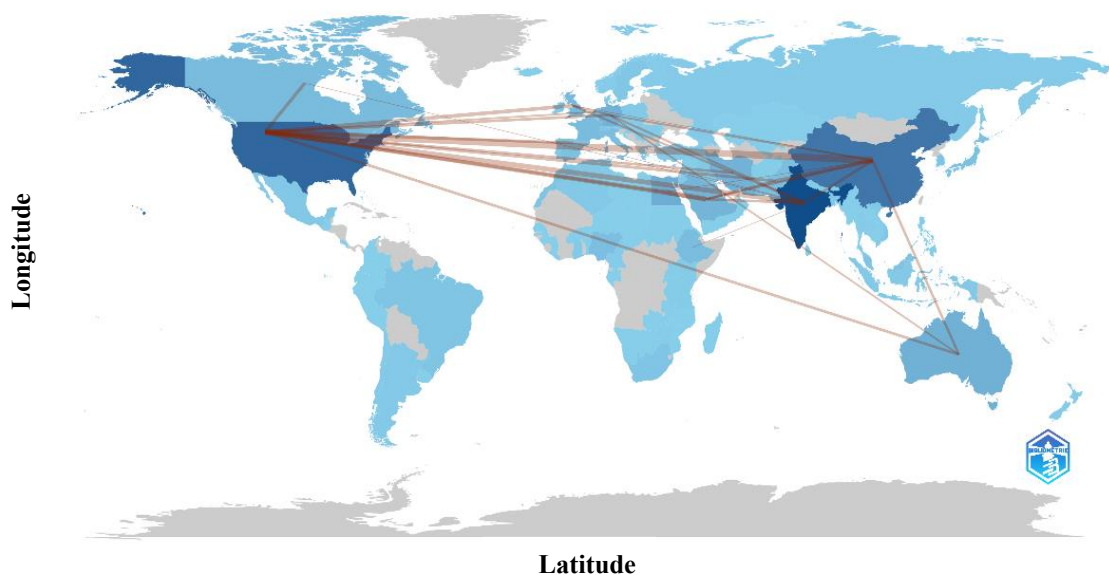


Fig. 4- The number of published articles and collaboration patterns of countries in research on advanced remote sensing applications in groundwater
 شکل ۴- تعداد مقالات منتشرشده و الگوهای همکاری بین کشورها در پژوهش‌های مربوط به کاربردهای سنجش از دور در مطالعات آب زیرزمینی

به سرعت از ایالات متحده پیشی گرفته است. همچنین، درصد ارجاعات مربوط به کشورهای پیشرو محاسبه و یک نمودار دایره‌ای (شکل ۶) ترسیم شد. نتایج نشان می‌دهد که ایالات متحده، هند و چین به ترتیب بیشترین ارجاعات را دریافت کرده‌اند.

شکل ۵ روند انتشار مقالات سالانه برای پنج کشور پیشرو از نظر تعداد مقالات منتشرشده، شامل هند، چین، آمریکا، ایران و مصر را نشان می‌دهد. در میان این کشورها، هند به‌عنوان یک کشور در حال توسعه توجه خاصی را جلب می‌کند. در طول زمان، تعداد مقالات منتشرشده از هر کشور به‌طور مداوم افزایش یافته است، اما از سال ۲۰۲۰، هند

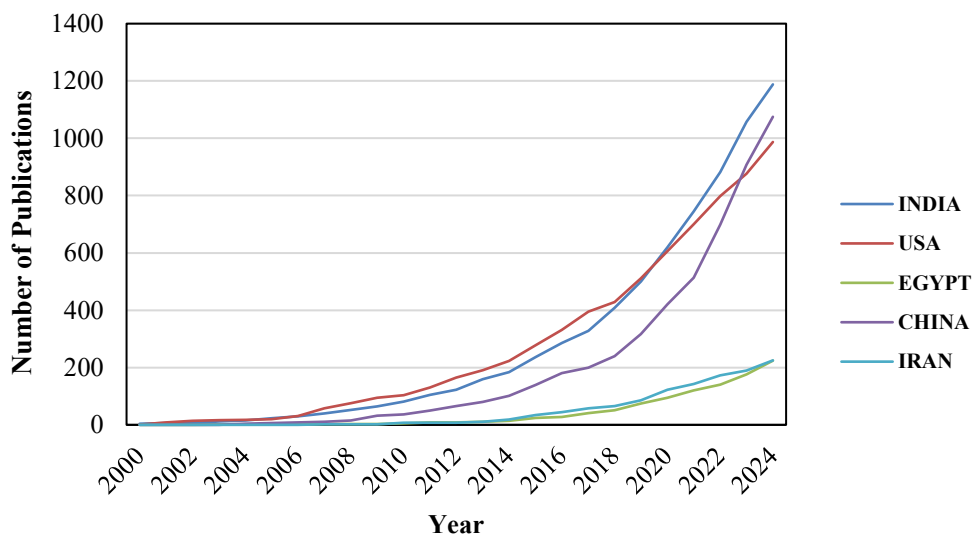


Fig. 5- The annual publication trend for the top five countries in terms of published articles on advanced remote sensing applications in groundwater research
 شکل ۵- روند سالانه انتشار مقالات برای پنج کشور برتر از نظر تعداد مقالات منتشرشده در زمینه کاربردهای سنجش از دور در پژوهش‌های آب زیرزمینی

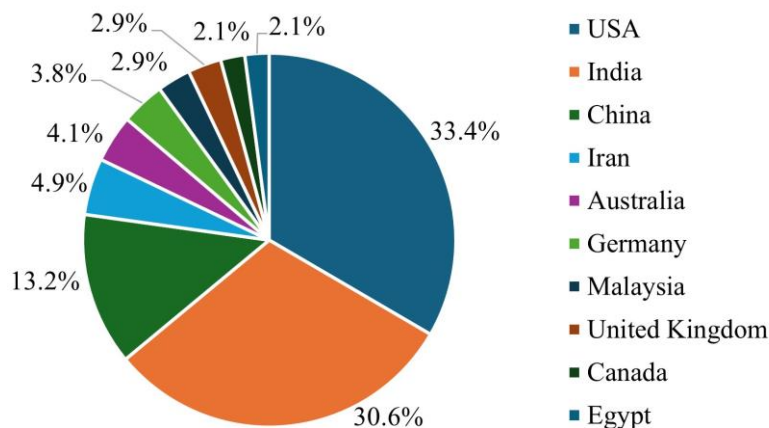


Fig. 6- Percentage of citations from leading countries in advanced remote sensing applications in groundwater research

شکل ۶- درصد استنادات کشورهای پیشرو در زمینه کاربردهای سنجش از دور در پژوهش‌های آب زیرزمینی

مقالات منتشرشده را نشان می‌دهد. آکادمی علوم چین با ۲۱۷ مقاله، بانک دانش مصر با ۲۱۴ مقاله و سیستم موسسات فناوری هند با ۱۷۴ مقاله، به ترتیب در جایگاه‌های اول تا سوم قرار دارند.

۳-۲-۲- نقش مؤسسات علمی در نوآوری‌های سنجش از دور و مدل‌سازی هیدرولوژیک

این بخش به تحلیل حجم مقالات منتشرشده در زمینه سنجش از دور و آب‌های زیرزمینی می‌پردازد. جدول ۴، ده مؤسسه پیشرو از نظر تعداد

Table 4- Top 10 Institutions in Terms of Publication
جدول ۴- ده مؤسسه برتر از نظر تعداد انتشار مقالات

Institutes	Number of Papers
Chinese Academy of Sciences	217
Egyptian Knowledge Bank (EKB)	214
Indian Institute of Technology System (IIT SYSTEM)	174
National Aeronautics and Space Administration (NASA)	71
Indian Space Research Organisation (ISRO)	66
Indian Institute of Technology (IIT)- KHARAGPUR	61
United States Geological Survey	61
Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)	57
University of California	55
United States Department of the Interior	50

وجود تعداد زیاد مؤسسات پژوهشی در مجموعه داده‌ها (۸۱۱۸ مؤسسه)، نمایش تمامی آن‌ها در این شبکه امکان‌پذیر نبود. به همین دلیل، مؤسساتی که بیش از ۱۰ مقاله منتشر کرده‌اند، انتخاب شدند و شبکه‌ای شامل ۷۵ مؤسسه ایجاد شد.

شکل ۷ شبکه همکاری میان مؤسسات فعال در تحقیقات مربوط به کاربرد سنجش از دور بر آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد. همچنین، میانگین زمان انتشار مقالات را با رنگ‌های مختلف نمایش داده به صورتی که رنگ‌های تیره‌تر نشان‌دهنده مقالاتی با زمان انتشار قدیمی‌تر و رنگ‌های روشن‌تر نمایانگر مقالات جدیدتر است. به دلیل

و بین‌المللی، در پیشبرد تحقیقات در این حوزه نقش برجسته‌ای ایفا کرده‌اند. این همکاری‌ها عمدتاً بر پایش تغییرات منابع آب زیرزمینی، شناسایی و مدیریت آبخوان‌ها و ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی متمرکز بوده‌است. دانشگاه ملک سعود (KSU¹⁴) از سال ۲۰۲۲ با گسترش همکاری‌های فراملی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بر مدل‌سازی مکانی منابع آب و استفاده از تکنیک‌های نوآورانه مانند داده‌های GRACE و SAR تأکید کرده که این همکاری‌ها منجر به توسعه الگوریتم‌های پیشرفته و مدل‌های پیش‌بینی هیدرولوژیک، بهبود پایگاه‌های داده مکانی و ارائه راهکارهای مدیریت منابع آب در مناطق بحران‌زده شده‌اند.

در این شبکه، اندازه هر گره بیانگر تعداد مقالات منتشر شده توسط آن مؤسسه است و ضخامت خطوط اتصال نشان‌دهنده میزان همکاری بین مؤسسات مختلف است. شبکه به ۹ خوشه رنگی تقسیم شده و ضخامت بیشتر خطوط درون هر خوشه نشان‌دهنده همکاری نزدیک‌تر میان مؤسسات آن خوشه است، در حالی که خطوط نازک‌تر بین خوشه‌ها سطح همکاری کمتری را نشان می‌دهند. یکی از همکاری‌های برجسته در این شبکه، تعامل میان آکادمی علوم چین و دانشگاه آکادمی علوم چین است.

تحلیل همکاری‌های علمی بین‌المللی در حوزه سنجش از دور و آب زیرزمینی نشان می‌دهد که آکادمی علوم چین (CAS¹³) همراه با دانشگاه‌های مرتبط به ویژه در سال ۲۰۲۰ به واسطه تعاملات داخلی

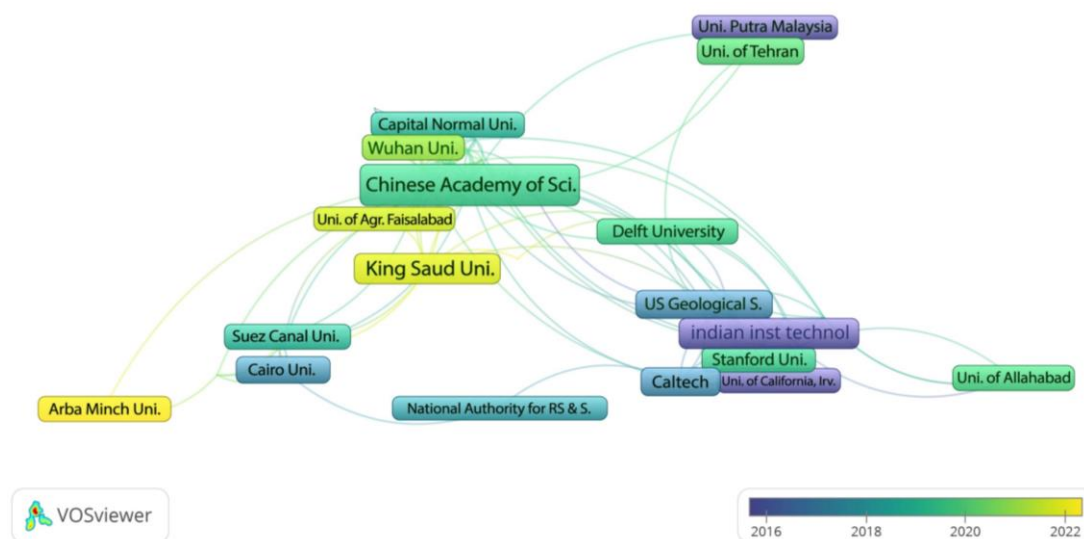


Fig. 7- Institutional cooperation network
شکل ۷- شبکه همکاری بین مؤسسات

نویسندگان، که در شکل ۹ نشان داده شده، استفاده شد. تحلیل شبکه همکاری‌های علمی نشان می‌دهد که در حوزه کاربردهای سنجش از دور در مطالعات آب زیرزمینی، گروه‌هایی از پژوهشگران تعاملات پژوهشی مؤثری داشته‌اند. از جمله، محمد عبدالکریم، چتانیانیا پانده و فهد الشهري در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ بیشترین همکاری‌های پژوهشی را ارائه داده‌اند. همچنین، سودهر کیومر سینگ در سال ۲۰۲۲ با موکش کیومار و چتانیانیا پانده به‌صورت گسترده در این زمینه فعالیت داشته است. پیش از آن، سومرتا موخرجی در سال ۲۰۱۴ با سودهر کیومر سینگ، تعاملات برجسته‌ای در قالب پژوهش‌های مرتبط با موضوع تحقیق حاضر داشته‌اند. این تحلیل، نقش کلیدی این پژوهشگران در هدایت و توسعه تحقیقات در این حوزه را برجسته می‌سازد.

۳-۲-۳- تحلیل دینامیک شبکه‌های علمی نویسندگان
پیشگام در تحقیقات سنجش از دور آب‌های زیرزمینی
تعداد زیادی از پژوهشگران در این حوزه به فعالیت‌های گسترده‌ای پرداخته‌اند. شکل ۸، وضعیت ده نویسنده برتر را ارائه می‌دهد که بر اساس بیشترین تعداد مقالات منتشر شده رتبه‌بندی شده‌اند. Rodell M (۲۳ مقاله) بالاترین انتشار مقالات را در بین نویسندگان این شکل دارد. لذا این نویسنده نقش مهمی در توسعه کاربردهای سنجش از دور در آب زیرزمینی داشته است.
برای بررسی الگوهای همکاری، زیرمجموعه‌ای شامل ۱۱۸ نویسنده انتخاب شد که بیش از پنج مقاله منتشر کرده و حداقل یک همکاری پژوهشی داشته‌اند. این داده‌ها برای رسم نمودار شبکه همکاری

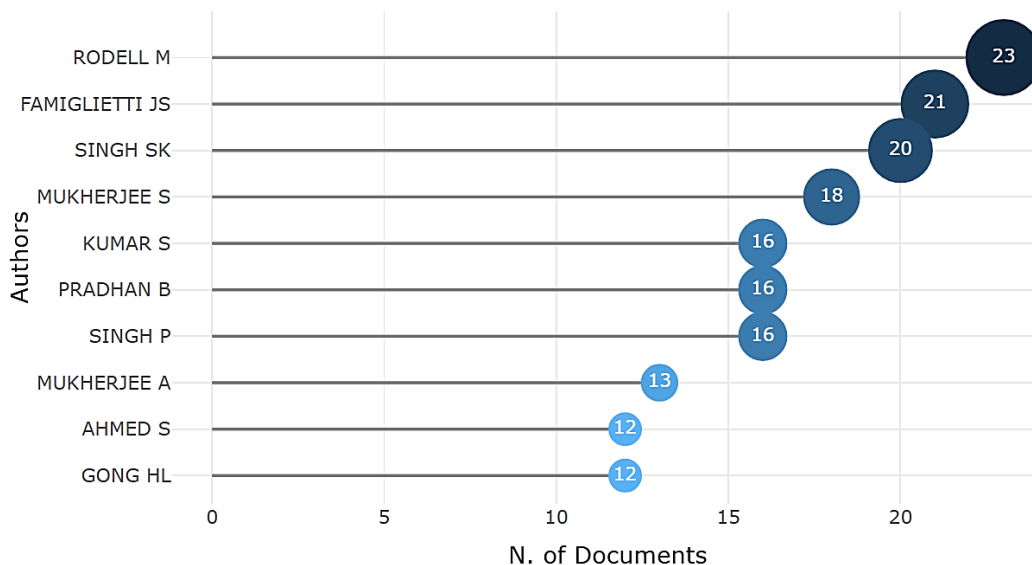


Fig. 8- Top 10 authors in advanced remote sensing applications in groundwater research
 شکل ۸- ده نویسنده برتر در زمینه کاربردهای سنجنش از دور در پژوهش‌های آب زیرزمینی

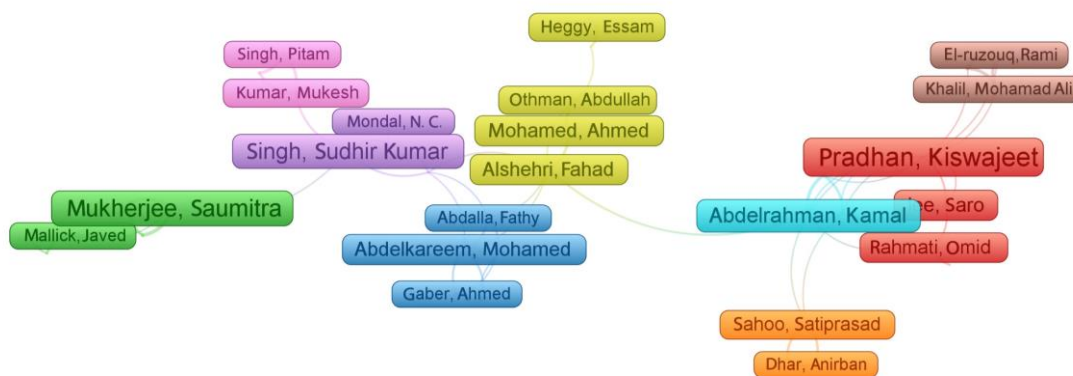


Fig. 9- Author collaboration network in remote sensing applications for groundwater research
 شکل ۹- شبکه همکاری نویسندگان در زمینه کاربردهای سنجنش از دور برای پژوهش‌های آب زیرزمینی

تحلیل کلمات کلیدی از مقالات منتشر شده بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱ در حوزه کاربردهای سنجنش از دور در مطالعات آب زیرزمینی نشان‌دهنده استفاده گسترده از مفاهیمی چون "remote sensing"، "GIS"، "model"، "GRACE"، "aquifer" و "land-subsidence" است. این مفاهیم بازتابی از تمرکز علمی بر بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته برای شناسایی تغییرات منابع آب زیرزمینی، ارزیابی کمی و کیفی این منابع، و مطالعه پدیده‌هایی چون نشست زمین و نوسانات سطح آبخوان‌ها است. به‌ویژه، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE نقشی محوری در پایش تغییرات ذخایر آب زیرزمینی ایفا کرده است و تلفیق آن با سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) موجب ارائه تحلیل‌های مکانی دقیق‌تر شده است.

۳-۳- تحلیل مفاهیم نوین در سنجنش از دور آب‌های زیرزمینی: مدل‌سازی‌های پیشرفته و ارزیابی ریسک
 برای تحلیل کلمات کلیدی مقالات مرتبط با آب‌های زیرزمینی و تغییرات اقلیمی، از ابزار VOS viewer استفاده شد. این ابزار، با تعیین حداقل آستانه تکرار ۱۰ برای کلمات کلیدی، مجموعه‌ای از اصطلاحات را استخراج کرد. سپس، برای افزایش دقت، اصطلاحات مترادف به صورت دستی ترکیب شدند و در نهایت، مجموعه‌ای پالایش شده شامل ۲۸۱ کلمه کلیدی حاصل شد. بر اساس این داده‌ها، نمودار دانش مربوط به پژوهش‌های این حوزه تهیه شد که موضوعات کلیدی و میزان فعالیت پژوهشی مرتبط با آن‌ها را به صورت بصری نمایش می‌دهد (شکل ۱۰).

سوی دیگر، ارزیابی ریسک^{۱۶} به یک مفهوم کلیدی در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی تبدیل شده است. این ارزیابی شامل تحلیل خطرات مرتبط با بهره‌برداری بیش از حد، افت کیفیت منابع آبی، و پیامدهای بلندمدت تغییرات اقلیمی است.

این تغییرات مفهومی نشان می‌دهند که تحقیقات در زمینه سنجش از دور و مدیریت آب زیرزمینی به‌طور فزاینده‌ای به سمت کاربردهای عملی و سیاست‌گذاری پایدار حرکت می‌کنند. در آینده، استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر نظیر مدل‌های پیوندی سطح و زیرسطح، همراه با داده‌های چندمنبعی و تحلیل‌های عدم قطعیت، می‌تواند زمینه‌ساز مدیریت بهتر منابع آبی در مواجهه با بحران‌های جهانی باشد. این روندها بازتابی از نیاز به تلفیق فناوری‌های نوین با دیدگاه‌های مدیریتی برای مقابله با چالش‌های پیش روی منابع آب زیرزمینی در مقیاس جهانی و منطقه‌ای است.

از سال ۲۰۲۲ به بعد، ظهور کلمات کلیدی جدیدی نظیر "land-surface model" و "risk assessment" نشان‌دهنده تحول در رویکردهای پژوهشی به سمت تحلیل‌های جامع‌تر و مدل‌سازی‌های پیشرفته‌تر بوده است. شایان ذکر است که مدل‌های سطح زمین از حدود دو دهه پیش معرفی شده‌اند؛ اما با پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های ماهواره‌ای، به‌ویژه از نظر داده‌ها و پارامترهای سطح زمین و نیز به‌دلیل اهمیت مسائل زیست‌محیطی، کارایی این مدل‌ها در برآورد دقیق‌تر داده‌ها و پایش منابع آب زیرزمینی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. این مفاهیم به‌طور خاص بر تعاملات میان لایه‌های سطحی زمین و سیستم‌های آب زیرزمینی تأکید دارند. به‌عنوان مثال، مدل‌های سطح زمین^{۱۵} امکان شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی و تبادل انرژی بین زمین و اتمسفر را فراهم می‌کنند که این امر برای درک تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب زیرزمینی ضروری است. از

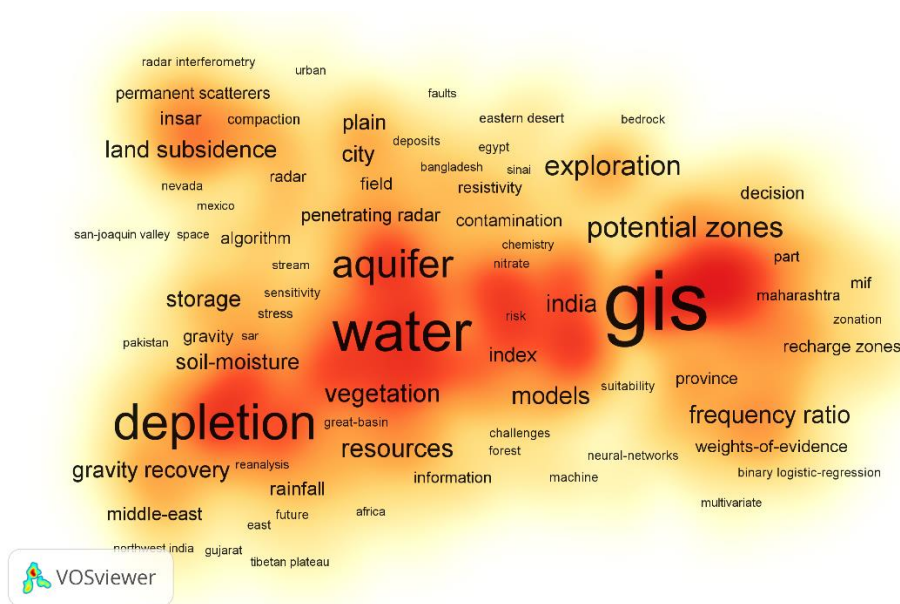


Fig. 10- Keyword co-occurrence analysis

شکل ۱۰- تحلیل هم‌رخداد کلیدواژه‌ها

در دوره ابتدایی، تمرکز تحقیقات بر توسعه روش‌ها و مفاهیم پایه‌ای در زمینه هیدروژئولوژی و سنجش از دور بوده است. استفاده از کلماتی مانند *information-systems*، *parameter-estimation*، و *conductivity* نشان‌دهنده آغاز تلاش‌های پژوهشی برای تحلیل ساختار و ویژگی‌های آبخوان‌ها است. در این دوره، ابزارهایی مانند GIS و مدل‌های مفهومی اولیه نظیر *DRASTIC*¹⁷ model، به‌عنوان ابزارهای اصلی تحلیل داده‌های مکانی و ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی استفاده می‌شدند. تحقیقات در این بازه زمانی بر شناسایی پارامترهای هیدرولوژیکی و تحلیل داده‌های ساده جغرافیایی متمرکز

۴-۳- تحلیل روند تکاملی ابزارها و رویکردهای سنجش

از دور در مدیریت منابع آب زیرزمینی

شکل ۱۱ روندهای تکاملی و تحولات پژوهشی در زمینه سنجش از دور و آب‌های زیرزمینی را بر اساس توزیع زمانی و فرکانس کلمات کلیدی به تصویر می‌کشد. این روندها را می‌توان به سه دوره زمانی اصلی تقسیم کرد: دوره ابتدایی (پیش از ۲۰۱۵)، دوره میانی (۲۰۱۵-۲۰۲۰)، و دوره پایانی (۲۰۲۱ به بعد). در ادامه، تحلیل تخصصی این دوره‌ها و مسیر احتمالی تحقیقات آینده ارائه می‌شود.

analytical hierarchical process و frequency ratio model نشان‌دهنده افزایش استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره^{۱۸} (MCDM) و ابزارهای تحلیل پیشرفته برای مدیریت منابع آب زیرزمینی است. در این دوره، پژوهش‌ها به سمت ارزیابی مناطق تغذیه آب زیرزمینی، تحلیل مجدد^{۱۹} داده‌های تاریخی و بررسی اثرات بلندمدت تغییرات اقلیمی پیش رفته‌اند. علاوه بر این، تمرکز بر مناطق خاصی نظیر Tamil Nadu و Birbhum District بیانگر افزایش علاقه به تحلیل‌های مکان‌محور و منطقه‌ای است که ارتباطات پیچیده میان لایه‌های سطحی زمین و سیستم‌های آب زیرزمینی را مورد مطالعه قرار می‌دهند (Tosan & Shamshirgaran et al., 2025).

این سه دوره نشان‌دهنده تکامل تدریجی پژوهش‌ها در حوزه سنجش از دور و آب‌های زیرزمینی است، به طوری که تحقیقات آینده احتمالاً به سمت استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی، ترکیب داده‌های چندمنبعی و تحلیل جامع خطرات محیطی حرکت خواهند کرد. این رویکردها نه تنها به ارزیابی کمی منابع آب، بلکه به درک بهتر ارتباطات بین سیستم‌های انسانی و طبیعی در مدیریت منابع آبی کمک خواهند کرد.

بود و بیشتر جنبه‌های شناسایی و تحلیل اولیه منابع آبی را در بر می‌گرفت. همچنین، فناوری‌های سنجش از دور به شکل محدود و برای نقشه‌برداری ساده مورد استفاده قرار می‌گرفتند.

دوره میانی با گسترش کاربردهای فناوری و ظهور مدل‌سازی‌های پیشرفته همراه بود. اصطلاحاتی مانند synthetic-aperture radar، penetrating radar و geographic information-systems حاکی از پیشرفت در روش‌های داده‌برداری و تحلیل چندبعدی است. در این دوره، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای GRACE برای پایش دقیق‌تر تغییرات سطح آب زیرزمینی و ترکیب آن با فناوری‌های راداری باعث شد پژوهش‌ها به سمت تحلیل‌های پیچیده‌تر حرکت کنند. علاوه بر این، مفاهیمی مانند artificial recharge و riparian vegetation نشان‌دهنده تمرکز بر تحلیل ارتباط بین منابع آب زیرزمینی و اکوسیستم‌های مجاور بوده و اهمیت مدیریت مصنوعی ذخایر آبی را برجسته می‌کردند. به طور کلی، این دوره را می‌توان نقطه عطفی در حرکت به سمت کاربردهای پیشرفته سنجش از دور در مدیریت شبیه‌سازی منابع آب زیرزمینی دانست.

از سال ۲۰۲۱ به بعد، پژوهش‌ها وارد فاز جدیدی شده‌اند که در آن توجه بیشتری به مدیریت پایدار منابع آبی و ارزیابی جامع خطرات معطوف شده است. ظهور اصطلاحاتی نظیر recharge zones

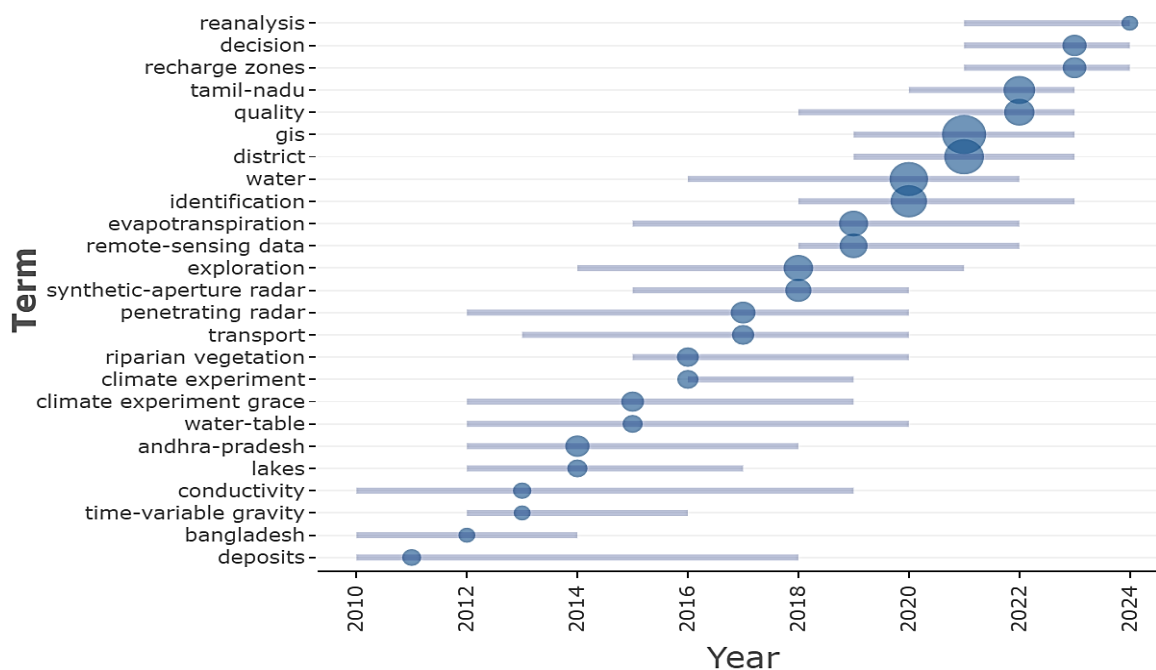


Fig. 11- Term trend analysis
 شکل ۱۱- تحلیل روند موضوعی

۳-۵- چالش‌های کنونی و روندهای آتی در مدیریت منابع

آب زیرزمینی با استفاده از سنجش از دور

با توجه به روندهای اخیر و دستاوردهای پژوهشی در زمینه سنجش از دور و کاربردهای آن در مدیریت منابع آب زیرزمینی، می‌توان مسیر تحقیقات آینده را در چهار محور کلیدی پیش‌بینی کرد:

۱- توسعه مدل‌های یکپارچه زمین-آب^{۱۵}

با توجه به پیچیدگی تعاملات بین سیستم‌های سطحی و زیرسطحی، استفاده از مدل‌های یکپارچه زمین-آب به‌عنوان ابزارهایی پیشرفته در شبیه‌سازی‌های سه‌بعدی برای تحلیل دقیق‌تر این تعاملات مورد توجه قرار خواهد گرفت. این مدل‌ها قادر خواهند بود به‌طور همزمان فرآیندهای هیدرولوژیکی سطح زمین و تغییرات آبخوان‌ها را شبیه‌سازی کنند، که این امر می‌تواند به بهبود پیش‌بینی‌ها و مدیریت منابع آب زیرزمینی کمک کند. پیشرفت‌های اخیر در ترکیب داده‌های سنجش از دور و مدل‌های عددی، استفاده از مدل‌های یکپارچه زمین-آب را به ابزاری حیاتی برای درک بهتر فرآیندهای هیدرولوژیکی و ارزیابی تأثیرات محیطی ناشی از تغییرات اقلیمی تبدیل کرده است.

۲- مدیریت ریسک و پایش تغییرات اقلیمی

یکی از چالش‌های اساسی پیش‌روی مدیریت منابع آب زیرزمینی، تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آبی است. در این راستا، پیش‌بینی اثرات بلندمدت تغییرات اقلیمی بر سطح آب زیرزمینی و کیفیت منابع آبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم و استفاده از داده‌های سنجش از دور به‌ویژه در تحلیل مخاطرات ناشی از کاهش کیفیت آب و نشست زمین می‌تواند ابزاری مؤثر برای ارزیابی این تهدیدات باشد. در آینده، تلفیق داده‌های سنجش از دور با شبیه‌سازی‌های عددی و مدل‌های یادگیری ماشین می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر اثرات تغییرات اقلیمی و کمک به تصمیم‌گیری در مورد مدیریت منابع آب کمک کند.

۳- تلفیق داده‌های چندمنبعی

یکی از روندهای نوظهور در این حوزه، افزایش استفاده از داده‌های چندمنبعی برای تحلیل‌های جامع‌تر و کاهش عدم قطعیت‌ها است. این روند شامل ترکیب داده‌های سنجش از دور (مانند ماهواره GRACE و Sentinel-2) با داده‌های درجا (مانند اندازه‌گیری‌های میدانی و مدل‌های هیدرولوژیکی) و شبیه‌سازی‌های عددی است. این داده‌های ترکیبی می‌توانند به‌طور دقیق‌تری ویژگی‌ها و تغییرات منابع آب زیرزمینی را شبیه‌سازی کنند و از این طریق به مدیریت بهینه و پایدار منابع آب کمک کنند. با استفاده از این رویکرد، می‌توان به تحلیل تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی پرداخت و همچنین از مدل‌های پیشرفته برای پیش‌بینی خطرات و تهدیدات مربوط به منابع آبی استفاده کرد. در راستای افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج

حاصل از سنجش از دور، به‌ویژه در زمینه مدیریت آب‌های زیرزمینی، ضرورت تلفیق این داده‌ها با داده‌های میدانی و انجام راستی‌آزمایی‌های دقیق همچنان از اهمیت بالایی برخوردار است. این امر به ویژه در برآورد دقیق تراز آب در آبخوان‌های عمیق و ارزیابی کیفیت آب که سنجش از دور در حال حاضر با محدودیت‌هایی روبرو است، از اهمیت دوچندان برخوردار است.

۴- کاربرد فناوری‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

پیش‌بینی می‌شود که استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در سال‌های آینده افزایش یابد. این فناوری‌ها به‌ویژه در شناسایی الگوهای پیچیده و پیش‌بینی تغییرات منابع آب زیرزمینی نقش کلیدی خواهند داشت. مدل‌های یادگیری ماشین قادر خواهند بود به تحلیل داده‌های حجیم و پیچیده که از ترکیب داده‌های سنجش از دور، داده‌های میدانی و مدل‌های هیدرولوژیکی به‌دست می‌آیند، پرداخته و الگوهای پنهانی را شبیه‌سازی کنند. به‌ویژه، مدل‌های یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی می‌توانند به‌طور خودکار روابط پیچیده میان داده‌ها را شناسایی کرده و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری برای مدیریت منابع آب زیرزمینی ارائه دهند. با وجود پتانسیل بالای هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در تحلیل داده‌های سنجش از دور، لازم به ذکر است که این فناوری‌ها نیز در حال حاضر قادر به استخراج مستقیم پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان مانند ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره یا پارامترهای کیفی آب زیرزمینی نیستند. پیشرفت در این زمینه مستلزم توسعه روش‌های نوین سنجش از دور و الگوریتم‌های پیشرفته‌تر هوش مصنوعی است که بتوانند به‌طور غیرمستقیم این پارامترهای مهم را با دقت قابل قبولی برآورد نمایند. تحقیقات آینده در حوزه سنجش از دور و مدیریت منابع آب زیرزمینی به‌طور فزاینده‌ای بر تلفیق داده‌های چندمنبعی، استفاده از فناوری‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، و توسعه مدل‌های یکپارچه زمین-آب متمرکز خواهد بود. این روندها نه تنها به پیش‌بینی دقیق‌تر منابع آبی و تغییرات آن‌ها کمک خواهند کرد، بلکه امکان مدیریت بهینه و پایدار منابع آب زیرزمینی را در مواجهه با چالش‌های تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی فراهم می‌آورند. در این راستا، پژوهشگران باید توجه ویژه‌ای به طراحی مدل‌های یکپارچه، استفاده از داده‌های جدید و بهبود روش‌های تحلیل داشته باشند تا به راه‌حل‌های عملی و مؤثری برای چالش‌های کنونی و آتی در مدیریت منابع آب زیرزمینی دست یابند.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی کاربردهای نوین سنجش از دور در مدیریت و ارزیابی منابع آب زیرزمینی، تلاش کرد تا روندهای کلیدی و تحولات اساسی در این زمینه را تحلیل و شناسایی کند. در طول دو دهه گذشته،

زمین بر منابع آب زیرزمینی و مدل‌سازی بلندمدت سناریوهای مدیریتی پرداخته‌اند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، چالش‌های متعددی همچنان وجود دارد. از جمله این چالش‌ها می‌توان به دقت پایین داده‌های سنجش از دور در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پیچیدگی‌های مدل‌سازی رفتار غیرخطی منابع آب زیرزمینی، و محدودیت در یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی اشاره کرد. برای غلبه بر این چالش‌ها، پژوهش‌های آتی باید بر بهبود الگوریتم‌های پردازش داده‌های سنجش از دور، توسعه سیستم‌های پایش هوشمند و طراحی مدل‌های یکپارچه و چندمقیاسی تمرکز کنند. در نهایت، یافته‌های این مطالعه تأکید می‌کند که ترکیب فناوری‌های سنجش از دور، مدل‌های پیشرفته هیدرولوژیکی، و ابزارهای تصمیم‌گیری مبتنی بر داده می‌تواند به عنوان چارچوبی جامع و مؤثر برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. این چارچوب به‌ویژه در مواجهه با چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی، برداشت بی‌رویه از منابع، و نوسانات هیدرولوژیکی اهمیت حیاتی خواهد داشت. پیش‌بینی می‌شود که در آینده، بهره‌گیری از این فناوری‌ها در مناطق بحرانی، نقش اساسی در کاهش اثرات بحران‌های آبی، تدوین سیاست‌های پایدار منابع آب، و بهبود بهره‌وری از این منابع ایفا کند. به این ترتیب، این حوزه تحقیقاتی همچنان یکی از اولویت‌های اصلی در مدیریت منابع آب در مقیاس جهانی باقی خواهد ماند. شایان ذکر است که مباحث مربوط به مدیریت آب‌های زیرزمینی مطرح شده در این مقاله، بیشتر برآمده از پژوهش‌های دانشگاهی و مراکز تحقیقاتی است و برای پیاده‌سازی گسترده در سطح عملیاتی، نیازمند در نظر گرفتن ملاحظات اجرایی و مسئله‌محور بیشتری خواهد بود.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Gravity Recovery and Climate Experiment
- 2- Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-on
- 3- Synthetic Aperture Radar
- 4- Total Water Storage
- 5- Groundwater Storage
- 6- Geographic Information Systems
- 7- Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model
- 8- Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model
- 9- Global Land Data Assimilation System
- 10- Interferometric Synthetic Aperture Radar
- 11- Persistent Scatterer Interferometry
- 12- Water- Global Assessment and Prognosis
- 13- Chinese Academy of Sciences
- 14- King Saud University
- 15- Land Surface Models
- 16- Risk Assessment
- 17- Depth to water, Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of the Vadose Zone, Conductivity
- 18- Multi-Criteria Decision Making
- 19- Reanalysis

فناوری‌های سنجش از دور تحولات چشمگیری را تجربه کرده‌اند و از ابزارهای پایش ساده به راهکارهای پیشرفته و چندمنظوره‌ای تبدیل شده‌اند که می‌توانند نقشی استراتژیک در برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آبی ایفا کنند. داده‌های ماهواره‌ای نظیر Sentinel، GRACE و InSAR امکان دسترسی به اطلاعات دقیق و به‌روز درباره تغییرات حجم ذخایر آب زیرزمینی، تحلیل روندهای بحرانی و ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی را فراهم کرده‌اند. یکی از مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق، استفاده گسترده از فناوری‌هایی مانند GRACE و InSAR و داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-1 و Sentinel-2 بود که امکان نظارت بر تغییرات حجم ذخایر آب زیرزمینی و تحلیل دقیق رفتار آبخوان‌ها را فراهم کرده‌اند. این ابزارها در مناطقی که دارای داده‌های میدانی محدود یا غیرقابل دسترس است، نقشی بی‌بدیل در ارائه اطلاعات به‌روز و قابل اتکا داشته‌اند. افزون بر این، ترکیب داده‌های سنجش از دور با مدل‌های هیدرولوژیکی نظیر MODFLOW و SWAT توانسته است دقت شبیه‌سازی‌ها و تحلیل روندهای هیدرولوژیکی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. در دهه اخیر، پیشرفت‌های حاصل در یادگیری ماشین و هوش مصنوعی به بهبود کارایی فناوری سنجش از دور در مدیریت منابع آب زیرزمینی منجر شده است. الگوریتم‌های نوین یادگیری ماشین، به‌ویژه در تحلیل داده‌های چندمنبعی و پردازش اطلاعات پیچیده، توانسته‌اند رفتارهای غیرخطی و تاثیرات ناشی از تغییرات اقلیمی را با دقت بیشتری مدل‌سازی کنند. همچنین، ابزارهای تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) و مدل‌های تحلیل ریسک، نقش مهمی در پیش‌بینی رفتار آبخوان‌ها و طراحی راهکارهای بهینه برای مدیریت منابع ایفا کرده‌اند. تحلیل منطقه‌ای این مطالعه نشان داد که کشورهای واقع در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک نظیر هند، چین، ایران، مصر و عربستان سعودی بیشترین توجه را به این فناوری‌ها داشته‌اند. بحران‌های گسترده ناشی از کمبود آب در این کشورها، نیاز به پایش دقیق‌تر و مدیریت هوشمندتر منابع آب زیرزمینی را دوچندان کرده است. در مقابل، کشورهای اروپایی و آمریکای شمالی که عمدتاً در اقلیم‌های معتدل و مرطوب قرار دارند، از فناوری سنجش از دور برای بهینه‌سازی منابع و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی بهره می‌گیرند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که توسعه و استفاده از فناوری سنجش از دور به‌شدت وابسته به شرایط اقلیمی، نیازهای محلی و سیاست‌های ملی است. روندهای تحقیقاتی نیز حاکی از تغییرات قابل توجهی در اهداف و رویکردهای پژوهش در این حوزه بوده است. در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۱، تمرکز اصلی پژوهش‌ها بر ابزارهای فناوری مانند مدل‌های عددی و GIS بود؛ اما پس از سال ۲۰۲۲، این روند به سمت تحلیل‌های سیستمی و بین‌رشته‌ای تغییر یافت. پژوهش‌های اخیر بیشتر به اثرات متقابل فرایندهای سطحی و زیرسطحی، تاثیرات تغییرات اقلیمی و کاربری

- Adams K H, Reager J T, Rosen P, Wiese D N, Farr T G, Rao S, Haines B J, Argus D F, Liu Z, and Smith R (2022) Remote sensing of groundwater: Current capabilities and future directions. *Water Resources Research* 58(10):e2022WR03221
- Akbarpour A, Dastourani M, Tosan M, and 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 (In Perisan)
- Akhtar S and Rampurawala A (2024) Integrating remote sensing data and MODFLOW modeling for sustainable groundwater resource management and monitoring in the Guinea Region, West Africa. *Journal of Auifer and Qanat* 28(1):50-64
- Akter F, Bishop T F, and Vervoort R W (2021) Space-time modelling of groundwater level and salinity. *Science of the Total Environment* 776:145865
- Alley W M, Healy R W, LaBaugh J W, and Reilly T E (2002) Flow and storage in groundwater systems. *Science* 296(5575):1985-1990
- Alsharif A H, Salleh N, and Baharun R (2020). Bibliometric analysis. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* 98(15):2948-2962
- An Y, Yang F, Ren C, Xu J, Hu J, and Luo G (2024) Surface deformation analysis and prediction of groundwater changes from joint sar-grace satellite data. *IEEE Access*
- Aria M, and Cuccurullo C (2017) bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics* 11(4):959-975
- Arruda H, Silva E R, Lessa M, Proença Jr D, and Bartholo R (2022) VOSviewer and bibliometrix. *Journal of the Medical Library Association: JMLA* 110(3):392
- Benrabah A, Senent Domínguez S, Carrera-Ramírez F, Álvarez-Alonso D, de Andrés-Herrero M, and Jorda Bordehore L (2023) Structural and geomechanical analysis of natural caves and rock shelters: Comparison between Manual and remote sensing discontinuity data gathering. *Remote Sensing* 16(1):72
- Castellazzi P, Garfias J, and Martel R (2021) Assessing the efficiency of mitigation measures to reduce groundwater depletion and related land subsidence in Querétaro (Central Mexico) from decadal InSAR observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 105:102632
- Chiloane C, Dube T, and Shoko C (2022) Impacts of groundwater and climate variability on terrestrial groundwater dependent ecosystems: A review of geospatial assessment approaches and challenges and possible future research directions. *Geocarto International* 37(23):6755-6779
- Declaro A and Kanae S (2024) Enhancing surface water monitoring through multi-satellite data-fusion of Landsat-8/9, Sentinel-2, and Sentinel-1 SAR. *Remote Sensing* 16(17):3329
- Derviş H (2019) Bibliometric analysis using bibliometrix an R package. *Journal of Scientometric Research* 8(3):156-160
- Döll P, Müller Schmied H, Schuh C, Portmann F T, and Eicker A (2014) Global-scale assessment of groundwater depletion and related groundwater abstractions: Combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resources Research* 50(7):5698-5720
- Donthu N, Kumar S, Mukherjee D, Pandey N, and Lim W M (2021) How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research* 133:285-296
- Fakourian M H, Naderi M, and Joodaki G (2025) Downscaling GRACE-scale groundwater storage variations to aquifer scales: A linear regression approach based on the water balance concept. *Hydrogeology Journal* 33(2):465-492
- Famiglietti J S, Lo M, Ho S L, Bethune J, Anderson K, Syed T H, Swenson S C, de Linage, C R, and Rodell M (2011) Satellites measure recent rates of groundwater depletion in California's Central Valley. *Geophysical Research Letters*:38 (3)
- Foster S (2022) The key role for groundwater in urban water-supply security. *Journal of Water and Climate Change* 13(10):3566-3577
- Galloway D, and Burbey T (2011) Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology* 19:1459-1486
- Ibrahim A, Wayayok A, Shafri H Z M, and Toridi N M (2024) Remote sensing technologies for modelling groundwater storage dynamics: Comprehensive review. *Journal of Hydrology X*, 100175
- Kautz M, Feurer J, and Adler P (2024) Early detection of bark beetle (*Ips typographus*) infestations by remote sensing-A critical review of recent research. *Forest Ecology and Management* 556:121595
- Lee S, Hyun Y, Lee S, and Lee M J (2020) Groundwater potential mapping using remote sensing and GIS-based machine learning techniques. *Remote Sensing* 12(7):1200

- Liu J, Liu K, and Wang M (2023) A residual neural network integrated with a hydrological model for global flood susceptibility mapping based on remote sensing datasets. *Remote Sensing* 15(9):2447
- Majumdar S, Smith R G, Hasan M F, Wilson J L, White V E, Bristow E L, Rigby J R, Kress W H, and Painter J.A (2024) Improving crop-specific groundwater use estimation in the Mississippi Alluvial Plain: Implications for integrated remote sensing and machine learning approaches in data-scarce regions. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 52:101674
- Mardani M, Tosan M, and Falaki M (2025) Participatory groundwater governance (PGM): Charting a course for sustainable innovation in the face of climate change. *Journal of Aquifer and Qanat* 5(2) (In Persian)
- Nawale S and Mategaonkar M (2024) Groundwater flow simulation for artificial recharge: A GIS, remote sensing, and MODFLOW integration. *Water Practice and Technology* 19(5):2136-2157
- Noory H, Khoshsima M, Tsunekawa A, Tsubo M, Haregeweyn N, and Pashapour S (2025) Developing a method for root-zone soil moisture monitoring at the field scale using remote sensing and simulation modeling. *Agricultural Water Management* 308:109263
- Passas I (2024) Bibliometric analysis: The main steps. *Encyclopedia* 4(2)
- Pranjal P, Kadiyan N, Chatterjee R, Kumar D, and Sati M.S (2021) Interpreting land subsidence impacts due to groundwater depletion using remote sensing-based GRACE gravity anomaly and DInSAR technique: A study on north-western parts of India. *Environmental Earth Sciences* 80:1-12
- Richey A S, Thomas B F, Lo M H, Reager J T, Famiglietti J S, Voss K, Swenson S, and Rodell M (2015) Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. *Water Resources Research* 51(7):5217-5238
- Rodell M, Chen J, Kato H, Famiglietti J S, Nigro J, and Wilson C R (2007) Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal* 15:159-166
- Rodell M, Velicogna I, and Famiglietti J S (2009) Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. *Nature* 460(7258):999-1002
- Sahour H, Sultan M, Abdellatif B, Emil M, Abotalib A Z, Abdelmohsen K, Vazifedan M, Mohammad A T, Hassan S M, and Metwalli M R (2022) Identification of shallow groundwater in arid lands using multi-sensor remote sensing data and machine learning algorithms. *Journal of Hydrology* 614:128509
- Satizábal-Alarcón D A, Suhogusoff A, and Ferrari L C (2024) Characterization of groundwater storage changes in the Amazon River Basin based on downscaling of GRACE/GRACE-FO data with machine learning models. *Science of the Total Environment* 912:168958
- Scanlon B R, Faunt C C, Longuevergne L, Reedy R C, Alley W M, McGuire V L, and McMahon P B (2012) Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(24):9320-9325
- Shahsavari H, Arefi H, Farahani M D, alizadeh Pirstabi M, and Shobairi S O R (2024) Mapping groundwater resource using multispectral Sentinel 2 and Fuzzy Logic method, Case Study: Salafchegan, Qom, Iran. *Ecological Questions* 35(2):1
- Shamshirgaran R, Malakooti R, Akbarpour A, and Moghaddam A Z (2022) Fabrication of Polyvinylpyrrolidone-Stabilized Nano Zero-Valent Iron Supported by Hydrophilic Biochar for Efficient Cr (VI) Removal from Groundwater. *ChemistrySelect* 7(43):e202202927
- Shamshirgaran R, Malakooti R, and Akbarpour A (2024) A review of technologies for purification of groundwater including heavy metals based on nanotechnology. *Journal of Auifer and Qanat* 4(2):1-34 (In Perisan)
- Shamshirgaran R, Tosan M, and Nasirian A (2025) Investigating the functional problems of ground water studies in dry areas: a case of Boshruyeh Plain, South Khorasan, Iran. *Journal of Aquifer and Qanat* 5(2) (In Perisan)
- Tariq A, Ali S, Basit I, Jamil A, Farmonov N, Khorrami B, Khan M M, Sadri S, Baloch M Y J, and Islam F (2023) Terrestrial and groundwater storage characteristics and their quantification in the Chitral (Pakistan) and Kabul (Afghanistan) river basins using GRACE/GRACE-FO satellite data. *Groundwater for Sustainable Development* 23:100990
- Tiwari V M, Wahr J, and Swenson S (2009) Dwindling groundwater resources in northern India, from satellite gravity observations. *Geophysical Research Letters* 36(18)
- Tomaszewski R (2023) Visibility, impact, and applications of bibliometric software tools through citation analysis. *Scientometrics* 128(7):4007-4028
- Tosan M and Beyranvand Z (2023) The role of flood analysis in different return periods using empirical relationships for small watersheds in the stability of aquifers. *Journal of Auifer and Qanat* 4(1):169-180

- Tosan M, Dastourani M, Akbarpour A, and 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) (In Perisan)
- Tosan M, Khashei-Siuki A, Maroosi A, and 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 (In Perisan)
- Tosan M, Khashei Siuki A, Sangari M, and 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 (In Perisan)
- Tosan M, Gharib M R, Attar N F, and Maroosi A (2025) Enhancing evapotranspiration estimation: a bibliometric and systematic review of hybrid neural networks in water resource management. *Computer Modeling in Engineering and Sciences (CMES)* 142(2) (In Perisan)
- Tosan M, Shamshirgaran R, and Falaki M (2025) A review of participatory management's role in reducing vulnerability and enhancing resilience to climate change and drought (2006-2024). *Journal of Drought and Climate Change Research* (In Perisan)
- van Eck N and Waltman L (2010) Software survey: VOSviewer, A computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics* 84(2):523-538
- van Eck N J and Waltman, L (2011) VOSviewer manual. Manual for VOSviewer version 1
- Vargas A C, Espinoza-Mina M, Alvarez D L, and Espinosa J N (2022) Bibliometric Software: The most commonly used in research. In *ICAI Workshops* (pp.47-65)
- Voss K A, Famiglietti J S, Lo M, De Linage C, Rodell M, and Swenson S C (2013) Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris-Euphrates-Western Iran region. *Water Resources Research* 49(2):904-914
- Wang F, Han L, Liu L, Wei Y, and Guo X (2025) Prediction of groundwater level based on the integration of electromagnetic induction, satellite data, and artificial intelligent. *Remote Sensing* 17(2):210