Original Article

Journal of Aquifer and Qanat

Autumn And Winter 2024, Vol. 4, No. 2, pp 131-148

10.22077/jaaq.2024.7481.1071

Performance Analysis of Finite Element Method in Groundwater Studies Based on Web of Science Using R Biblioshiny

Abolfazl Akbarpour [1,✉] | Mehdi Dastourani [2] | Moein Tosan [3] | Mohammadreza Gharib [4]

1. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.
2. Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
3. Ph.D. Student of Water Resources, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
4. Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Technical and Engineering Faculty, University of Torbat Heidaryeh, Torbat Heidaryeh, Iran.

✉Corresponding Author: Akbarpour@birjand.ac.ir

Received:
02 April 2024

Accepted:
04 May 2024

Published:
19 March 2024

Keywords:

Bibliometric analysis,
Watershed,
Citation analysis,
Numerical modelling.

Extended abstract

Introduction

Groundwater flow modelling is a widely used technique for the sustainable management of these resources. Many groundwater modelling tools are readily available. Numerical modelling of groundwater flow in confined aquifers is much more than in confined aquifers. The governing equation is fully nonlinear and subject to nonlinear boundary conditions. The nonlinearity in Richard's equation is related to the dependence of the relative permeability and water retention in the unsaturated zone on the pressure head. Furthermore, fully saturated models are usually associated with boundary conditions such as constant head, pumping/injection flow rate, and leakage flux through a semi-confined bed. These are essentially linear and do not pose additional challenges to standard numerical solution techniques. Numerical models for groundwater flow and transport are often developed using the finite element approach (FEM). The behaviour of groundwater flow and transport is described by partial differential equations (PDEs), which are solved numerically using this method. FEM can represent rough geometries and various material properties and is particularly useful for modelling complex geological settings.

Cite this article: Akbarpour, A., Dastourani, M., Tosan, M. & Gharib, M.R. (2024). Performance Analysis of Finite Element Method in Groundwater Studies Based on Web of Science Using R Biblioshiny. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 4 (2), 131-148. DOI: http//doi.org/10.22077/jaaq.2024.7481.1071

Copyright: © 2024 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This open-access article is distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Material and method

In this study, the WoS database has been used for the scientometric analysis of finite element method application in groundwater studies. This choice was made primarily because of superior journal coverage and citation analysis capabilities compared to other widely used publication databases. Considering that, according to the WoS database, research on the application of finite elements in groundwater started in 1971, a database search was performed using the search code TITLE, with the operator "AND" between the years 1971 and 2023. The AND operator was used for two keywords "underground water" and "limiting elements" and finally 1910 scientific documents were extracted. This study used R software to analyze the data through a web interface called Biblioshiny, a bibliometric analysis. The Biblioshiny R approach includes other bibliometric analyses and helps to understand the productivity of research publications. Therefore, using the Biblioshiny approach, 1910 WoS data were analyzed for this paper.

Results and Discussion

The National University of Scientific Research of Quebec and the Indian Institute of Technology are the most active research centres regarding the use of finite elements in groundwater studies, and also the countries of China, America, Canada, Germany, Italy, France, Great Britain, and Iran are leaders in this field in terms of publications. This distribution reflects the global interest and participation in research related to the application of finite elements to groundwater problems. Based on this research, the current popular topics in the field of finite element application in groundwater studies are: "seepage", "deformation" and "stability analysis". The present study not only highlights the relationship between collaborations and scientific advances and trends in scientific collaboration but also serves as a model to display new research directions in the field of finite element applications in groundwater.

The Biblioshiny R approach has clarified the dominant issues in the existing literature and emphasizes the widespread application of finite elements in groundwater research. These programs collectively serve to strengthen the security of water resources. According to Biblioshiny's analysis, the most cited, productive, and influential author is Olaf Colditz, a German and department head of the Helmholtz Center for Environmental Research. His outstanding work is "Flow and Transport of Solutes in Groundwater" which has been published in 2 editions "Examination of Variable Density Flow and Transport Models" and "Three Dimensional Thermohaline and Convection Systems". Previous works in the literature developed using a moving mesh approach using standard finite difference (FDM), finite volume (FVM), and finite element (FEM) methods. This is because, in an FDM framework, the grid must remain orthogonal and fixed, so the groundwater flow equation is rewritten in a rectangular computational domain using a coordinate transformation technique.

This study emphasizes the importance of using finite elements in groundwater studies. It is important to understand that some study axes in this field, which have been discussed more in the past, are used less recently in research, including Richard's equation, spatial variation, and stochastic analysis. Therefore, future research should focus on recently trended axes.

مقاله پژوهشی

مجله
آبخوان و قنات

دوره چهارم، شماره دوم، پاییز و زمستان ۱۴۰۲، صفحات ۱۴۸ - ۱۳۱

10.22077/jaaq.2024.7481.1071

تحلیل کارایی اجزای محدود در مطالعات آب زیرزمینی بر اساس Web of Science با استفاده از R Biblioshiny

ابوالفضل اکبرپور [۱]✉| مهدی دستورانی [۲] | معین توسن [۳]| محمدرضا قریب [۴]

۱. استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۲. دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۳. دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۴. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربت حیدریه، تربت حیدریه، ایران.

✉نویسنده مسئول: Akbarpour@birjand.ac.ir

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹

کلیدواژه‌ها:
تحلیل بیبلیومتریک،
آبخوان،
تحلیل استنادات،
مدل‌سازی عددی.

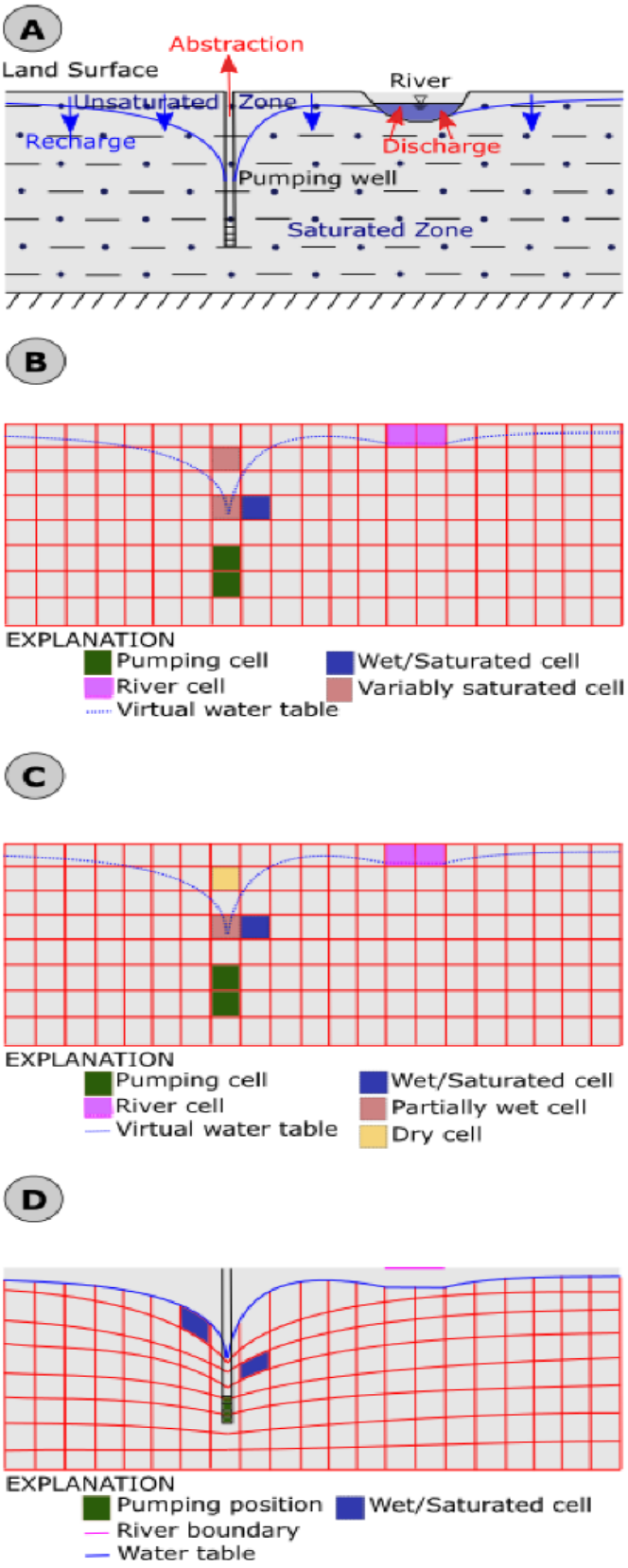
سفره‌های آب زیرزمینی منبع اصلی آب برای میلیاردها نفر از مردم ساکن در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد. تغییرات عمده در بارندگی، پمپاژ و تغذیه آب زیرزمینی و بروز فرسایش شدید خاک، سیل و خشک‌سالی، از محسوس‌ترین پیامدهای تغییرات اقلیمی به‌شمار می‌روند. همه این موارد، چالش حفظ منابع آب زیرزمینی را برای آینده قابل پیش‌بینی پیچیده می‌کند. این سناریوها نیاز به بازنگری در مورد راهبردهای فعلی مطالعات آب زیرزمینی را برجسته می‌کند. این مقاله به کاربرد اجزای محدود در مطالعات آب زیرزمینی می‌پردازد. این مقاله با استفاده از Biblioshiny -یک ابزار تجزیه و تحلیل کتاب‌سنجی قوی مبتنی بر نرم‌افزار R- داده‌های Web of Science را مورد بررسی قرار داد. مطالعه نشان می‌دهد دانشگاه ملی تحقیقات علمی کبک و مؤسسه فناوری هندوستان، فعال‌ترین مراکز تحقیقاتی پیرامون کاربرد اجزای محدود در مطالعات آب زیرزمینی بوده و همچنین چین، آمریکا، کانادا، آلمان، ایتالیا، فرانسه، بریتانیا و ایران از نظر کشورهای فعال در این زمینه پیشتاز می‌باشند. این توزیع نشان‌دهنده علاقه و مشارکت جهانی در تحقیقات مربوط به کاربرد اجزای محدود در مسائل آب زیرزمینی است. بر اساس این پژوهش، موضوعات پرطرفدار حال حاضر در دنیا پیرامون کاربرد روش اجزای محدود در مطالعات آب زیرزمینی عبارت‌اند از: "تراوش (seepage)"، "دگردیسی (deformation)" و "تحلیل پایداری". مطالعه حاضر، نه‌تنها ارتباط بین همکاری‌ها و پیشرفت‌های علمی و روندهای همکاری علمی را برجسته می‌سازد، بلکه به‌عنوان یک الگو برای نمایش جهت‌های تحقیقاتی جدید در زمینه کاربرد اجزای محدود در آب‌های زیرزمینی عمل می‌کند.

مقدمه

آب‌های زیرزمینی برای مناطق روستایی و شهری، به‌ویژه مناطقی که منابع آب سطحی کمیاب یا محدود می‌باشند، اهمیت حیاتی دارد (Tegegne et al., 2023) و به‌عنوان یک منبع مهم برای اهداف مختلف از جمله آب آشامیدنی، آبیاری کشاورزی و کاربردهای صنعتی به‌شمار می‌رود (Tosan & Beyranvand, 2023). به دلیل رشد سریع جمعیت و توسعه اجتماعی و اقتصادی در طول چند دهه گذشته، شدت فشار بر روی مخازن آب زیرزمینی به‌طور پیوسته در حال افزایش بوده است (Guo et al., 2023). ازاین‌رو، بهره‌برداری پایدار از منابع محدود آب زیرزمینی یک نیاز ضروری است (Kumar et al., 2024)؛ موضوعی که رفاه اقتصادی و اجتماعی نسل‌های آینده را تضمین می‌کند (Krishan et al., 2023). نزدیک به نیمی از نیاز به آب در جهان از سفره‌های آب زیرزمینی تأمین می‌شود (Phat & Le Luu, 2023)، به‌طوری‌که در مناطق خشکی مانند ایران، آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب در بخش‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود (Shakour et al., 2023)، که در آن کاهش کیفیت و کمیت آب به یک مانع مهم تبدیل شده است. از این‌رو، ارزیابی و پایش دائم کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی ضروری است (Tosan et al., 2023).

مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی یک تکنیک پرکاربرد برای مدیریت پایدار این منابع است (Hassan & Lubczynski, 2024). درواقع، بسیاری از ابزارهای مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی به‌راحتی در دسترس هستند (Balcha et al., 2024). زیرزمینی محصور، بسیار رایج‌تر از مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در سفره‌های زیرزمینی نامحصور است. این به دلیل آن است که معادله حاکم (یعنی معادله ریچارد) کاملاً غیرخطی است و همچنین تابع شرایط مرزی غیرخطی است. غیرخطی بودن در معادله ریچارد به وابستگی نفوذپذیری نسبی و احتباس آب در ناحیه غیراشباع به هد فشار مربوط می‌شود (Peszynska et al., 2024). علاوه بر این، مدل‌های کاملاً اشباع معمولاً با شرایط مرزی مانند هد ثابت، نرخ جریان پمپاژ / تزریق، و شار نشتی از طریق یک بستر نیمه محدود مرتبط می‌باشند. این مدل‌ها اساساً خطی بوده و چالش‌های اضافی برای تکنیک‌های حل عددی استاندارد ایجاد نمی‌کنند. این مورد برای مدل‌های جریان نامحدود که در آن برخی از شرایط مرزی غیرخطی و در نتیجه ناشناخته می‌باشد، صادق نیست. بنابراین، این مسائل بخشی جدایی‌ناپذیر از حل عددی می‌باشند. جریان طبیعی آب زیرزمینی بیشتر در موارد بسیار ناهمگن و ناهمسان‌گرد رخ می‌دهد، بنابراین غیرخطی بودن سیستم‌های جبری گسسته معادلات را افزایش می‌دهد. از این‌رو در این زمینه روش‌های عددی قوی و پیشرفته موردنیاز است.

شکل ۱ نمایی از رویکردهای مختلف برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی نامحدود در آبخوان‌های زیرسطحی را نشان می‌دهد. برای سفره‌های زیرزمینی محدود، اغلب باید تصمیمی پیرامون انتخاب روش مدل‌سازی آب زیرزمینی گرفته شود. دقیق‌ترین رویکرد، گسسته‌سازی عددی معادله ریچارد را برمی‌گزیند که به صراحت فرآیندهای ناحیه غیراشباع را محاسبه می‌کند (شکل ۱-ب). انتخاب دوم استفاده از رویکردی است که فیزیک زیربنایی را در محیط متخلخل ساده می‌کند. از این‌رو، سطح آب به‌عنوان یک رابط در نظر گرفته می‌شود که موقعیت آن در مکان و زمان جستجو شده و جریان در ناحیه غیراشباع نادیده گرفته می‌شود (شکل ۱-پ). آخرین رویکرد، اگرچه عاری از محدودیت نیست، اما هنگام سر و کار داشتن با مطالعات مدل‌سازی در مقیاس منطقه‌ای، بیشترین کاربرد را دارد (شکل ۱-ت)؛ چراکه رویکردهای دقیق‌تر به داده‌های میدانی بسیار بیشتری نیاز دارد که اغلب در مقیاس بزرگ در دسترس نیستند. از این‌رو، مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی ناحیه غیراشباع اغلب در مقیاس محلی که داده‌های تجربی در دسترس می‌باشد انجام می‌گردد.



شکل ۱. تصویری از رویکردهای مختلف برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی نامحدود در سفره‌های زیرسطحی (Sbai & Larabi, 2023).

Fig 1. Illustration of different approaches for modelling unconfined groundwater flow in aquifers (Sbai & Larabi, 2023).

رویکرد مبتنی بر مش ثابت احتمالاً به دلیل در دسترس بودن بسیاری از پیاده‌سازی‌های رایانه‌ای مانند MODFLOW که توسط USGS توسعه یافته است، گسترده‌ترین رویکرد می‌باشد (Hughes et al., 2024). نسخه‌های قدیمی MODFLOW به دلیل نمایش غیرفیزیکی دینامیک جریان آب زیرزمینی محدود مورد انتقاد قرار گرفتند، که منجر به ناپایداری عددی برای مسائل کاملاً غیرخطی می‌شود (Taylor & Peach, 2024)؛ موضوعی که تا حدی به دلیل نتایجی بود که بر اساس آن تصمیم برای اشباع مجدد سلولی که قبلاً خشک شده بود، اتخاذ شد. دوم، تکرار پیکارد برای برخی از مسائل کاملاً غیرخطی ممکن است با سرعت بسیار آهسته پیش رفته و یا اصلاً همگرا نگردد. با این‌حال، آخرین نسخه‌ها شامل یک فرمول جدید مبتنی بر نیوتن رافسون است که به‌طور قابل ملاحظه‌ای ثبات محاسباتی را بهبود می‌بخشد (Canales et al., 2024). یکی دیگر از مشکلات شناخته‌شده در رویکرد مش ثابت ناشی از روش پنهان کردن مصنوعی الگوهای جریان در سلول‌های خشک است. از آنجا که به‌دلیل ثابت بودن مش، این امکان وجود ندارد، رویکردهای مختلفی برای مقابله با این مشکل ایجاد شده است. Sbai et al. (2021) یک مدل المان محدود دو بعدی ایجاد کرد که تابع نفوذپذیری نسبی را خطی کرده و آن را به‌عنوان تابعی از هد هیدرولیکی دوباره می‌سازد. همین رویکرد توسط اِسبای و همکاران در چارچوب مدل‌های اجزای محدود سه‌بعدی استفاده شد (Sbai & Larabi, 2023). سایر پژوهشگران نیز از نمایش دقیق این تابع استفاده کردند (Robinson, 2023). یعنی رسانایی هیدرولیکی در تمام سلول‌های خشک در یک ضریب باقیمانده کوچک ضرب می‌شود (یعنی حدود ۲-۱۰ تا ۳-۱۰). پیشرفت‌های جدید راه‌حل عددی مسائل تراوش نامحدود سه‌بعدی را با روش المان محدود هموار شده از مکانیک جامدات ارائه کردند (Lei et al., 2024). یک محدودیت رویکرد مش ثابت این است که موقعیت و شکل دقیق سطح ایستابی را تنها می‌توان توسط هد آب‌های زیرزمینی محاسبه‌شده پس از پردازش تعیین کرد. از این‌رو، انتظار می‌رود که یک تکنیک مش متحرک در مقایسه با رویکرد مش ثابت با استفاده از وضوح یکسان، همیشه به موقعیت دقیق‌تر و شکل صاف سطح فریاتیک منجر شود.

پژوهش‌های اخیر، با استفاده از رویکرد مش متحرک با استفاده از روش‌های تفاضل محدود استاندارد (FDM)، حجم محدود (FVM)، و اجزای محدود (FEM) توسعه داده شدند. این به دلیل آن است که در یک چارچوب FDM، شبکه باید متعامد و ثابت بماند، بنابراین معادله جریان آب زیرزمینی در یک حوزه محاسباتی مستطیلی با استفاده از تکنیک تبدیل مختصات بازنویسی می‌شود. یک مثال از این روش به‌اصطلاح مختصات برازش مرزی (BFC) است (Behroozi & Vaghefi, 2022). همین روش همچنین توسط Deng et al. (2024) برای کاربرد در حوضه دلاور در جنوب شرقی نیومکزیکو مورد استفاده قرار گرفت. این رویکرد منجر به یک معادله جریان آب زیرزمینی تغییریافته می‌گردد که از نوع فرا رفت-انتشار است که منجر به ذخیره محاسباتی بیشتر می‌شود زیرا ماتریس سیستم حاصل نامتقارن است. علاوه بر این، حل عددی این نوع معادله نه‌تنها بیشتر از معادله استاندارد جریان آب زیرزمینی دشوار است، بلکه برای بسیاری از پژوهشگران در زمینه مدل‌سازی آب زیرزمینی غیرطبیعی به نظر می‌رسد. نقطه ضعف روش دیگر استفاده از سلول‌های نزدیک به مرز سطح ایستابی است، زیرا امکان گسسته سازی شرایط سینماتیکی دقیقاً در سطح فریاتیک وجود ندارد. با توجه به محدودیت‌های روش FDM، FEM استاندارد جایگزین جذاب‌تری است. یک رویکرد مش متحرک مبتنی بر FEM در سال ۱۹۷۰ برای کاربردهای آب زیرزمینی برای اولین بار معرفی شده است (Zhang et al., 2024). یک مدل مقطع دو بعدی با استفاده از عناصر محدود مثلثی برای سفره‌های آبرفتی ناهمگن توسعه داده شد و برای شبیه‌سازی آبیاری و زهکشی در دره سن خواکین غربی کالیفرنیا (Purkey et al., 2006) اعمال شد. در این مدل، حوزه چینه‌شناسی از بالا در امتداد موقعیت جدید منحنی سطح آب برش داده شد و حوزه محاسباتی به‌روز شده قبل از توزیع یافتن هد آب زیرزمینی دوباره مش‌بندی شد. در مطالعه دیگری، یک الگوریتم کمینه‌سازی برنامه‌ریزی غیرخطی با یک روش المان محدود تطبیقی برای تعیین مکان خط فریتیک در سدهای خاکی همراه

شد (Robinson, 2023). این مدل یک مسئله نشت دو بعدی حالت پایدار را با استفاده از عناصر محدود مثلثی دو خطی حل می‌کند. یک مدل المان محدود مش تطبیقی موازی سه‌بعدی برای یک جریان نامحدود حالت پایدار در سفره‌های زیرسطحی ارائه شد (Carle et al., 2022).

با استفاده از رویکرد اجزای محدود (FEM)، مدل‌های عددی برای جریان و انتقال آب زیرزمینی اغلب ایجاد می‌شوند. رفتار جریان و انتقال آب زیرزمینی توسط معادلات دیفرانسیل جزئی (PDEs) توصیف می‌شود که با استفاده از این روش به‌صورت عددی حل می‌شوند. FEM می‌تواند هندسه‌های ناهموار و ویژگی‌های مواد مختلف را نشان دهد و به‌ویژه برای مدل‌سازی تنظیمات پیچیده زمین‌شناسی مفید است. از طرفی FEFLOW (Berehanu et al., 2017)، FEMWATER (Nourani & Mousavi, 2016) و SUTRA Rezaei et al. (2021) چند راه‌حل نرم‌افزاری برای مدل‌های عددی با استفاده از رویکرد اجزای محدود به‌شمار می‌روند. FEFLOW با توانایی شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی، انتقال املاح و انتقال حرارت در دو بعدی و سه‌بعدی، یک برنامه مدل‌سازی آب زیرزمینی محبوب است. این به دلیل ظرفیت این روش در مدیریت شرایط پیچیده زمین‌شناسی است که یک رابط کاربرپسند ارائه می‌دهد. سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده (USGS)، برنامه FEMWATER را ایجاد کرد، یک برنامه مدل‌سازی آب زیرزمینی که از رویکرد اجزای محدود برای شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی در دو بعدی و سه‌بعدی استفاده می‌کند. USGS همچنین برنامه مدل‌سازی آب‌های زیرزمینی SUTRA (حمل و نقل اشباع-غیراشباع) را معرفی کرد که می‌تواند جریان آب زیرزمینی و انتقال املاح را در مناطق اشباع و غیر اشباع شبیه‌سازی کند. این اغلب در رشته‌های زیست‌محیطی و هیدروژئولوژی استفاده می‌شود و برای حل مسائل چالش‌برانگیز با جریان اشباع متغیر ایجاد می‌شود. رویکرد اجزای محدود، که به تصویر کشیدن هندسه‌های پیچیده و ویژگی‌های مواد متنوع را امکان‌پذیر می‌کند، توسط هر سه برنامه نرم‌افزاری استفاده می‌شود. علاوه بر این، آن‌ها مجموعه‌ای از ابزارها را برای کالیبراسیون مدل، تجسم و تجزیه و تحلیل نتایج ارائه می‌دهند. انتخاب نرم‌افزار بر اساس نیازهای خاص پروژه مدل‌سازی، تخصص و تجربه کاربر با برنامه و همچنین نقاط قوت و معایب هر بسته نرم‌افزاری است (Nhu et al., 2024). بر اساس توضیحات ارائه‌شده و با توجه به نقش غیر قابل انکار روش اجزای محدود در مطالعات پنج دهه اخیر پژوهشگران در مطالعات آب زیرزمینی، در این پژوهش کاربردهای روش اجزای محدود در پژوهش‌های آب زیرزمینی مورد تحلیل قرار گرفته و موضوعاتی که در سال‌های اخیر توسط پژوهشگران دنیا در حال بررسی می‌باشند، معرفی شده است.

مواد و روش‌ها

اهداف این مطالعه از طریق تجزیه و تحلیل کتاب‌سنجی مقالات علمی مربوط به کاربرد روش اجزای محدود در مطالعات آب زیرزمینی انجام شد. تجزیه و تحلیل کتاب‌سنجی به‌عنوان استفاده از مدل‌های ریاضی و آماری برای بررسی کمی نشریات علمی توصیف می‌گردد (Pandin et al., 2024). این تجزیه و تحلیل کمی در پایگاه داده‌های کتاب‌شناختی، از جمله Google Scholar، PubMed، Web of Science و Scopus انجام می‌شود. با این‌حال، پس از ارزیابی دقیق با پیروی از معیارهای مشخص‌شده توسط Farooq(2024)، این مطالعه از پایگاه داده WoS استفاده کرد. این انتخاب در درجه اول به دلیل پوشش مجلات برتر و قابلیت‌های تجزیه و تحلیل استناد در مقایسه با سایر پایگاه‌های اطلاعاتی انتشارات پرکاربرد انجام شده است. با توجه به این‌که بر اساس پایگاه داده WoS، تحقیقات کاربرد اجزای محدود در آب‌های زیرزمینی از سال ۱۹۷۱ آغاز شده است، جست و جویی در پایگاه داده با استفاده از کد جستجو TITLE، با عملگر "AND" بین سال‌های ۱۹۷۱ الی ۲۰۲۳ انجام شد. عملگر AND برای دو کلمه کلیدی «آب زیرزمینی» و «اجزای محدود» استفاده شد که درنهایت تعداد ۱۹۱۰ سند علمی استخراج شد.

این مطالعه از نرم‌افزار R برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از طریق یک رابط وب به نام Biblioshiny، یک تجزیه و تحلیل کتاب‌سنجی استفاده کرد. رویکرد Biblioshiny R شامل سایر تحلیل‌های کتاب‌سنجی است و به درک

بهره‌وری انتشارات تحقیقاتی کمک می‌کند. بنابراین، با استفاده از رویکرد Biblioshiny، ۱۹۱۰ داده WoS بر اساس اهداف این مقاله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل علم‌سنجی

تجزیه و تحلیل علم‌سنجی یک نمای کلی و جامع از انتشارات در پایگاه داده WoS ارائه می‌دهد، که در پنج دهه گذشته، بر اهمیت تاریخی این مطالعه تأکید می‌کند. این تحلیل پیرامون دو جنبه اصلی ساختار یافته است: شناخت روندهای کلیدی و تولید علمی سالانه. جنبه مرکزی قابلیت اطمینان داده‌ها در جدول ۱ ارائه شده است که همسویی با معیارهای ورود و خروج تعیین‌شده توسط دستورالعمل‌های PRISM را نشان می‌دهد و قابل اعتماد بودن مجموعه داده را تقویت می‌کند.

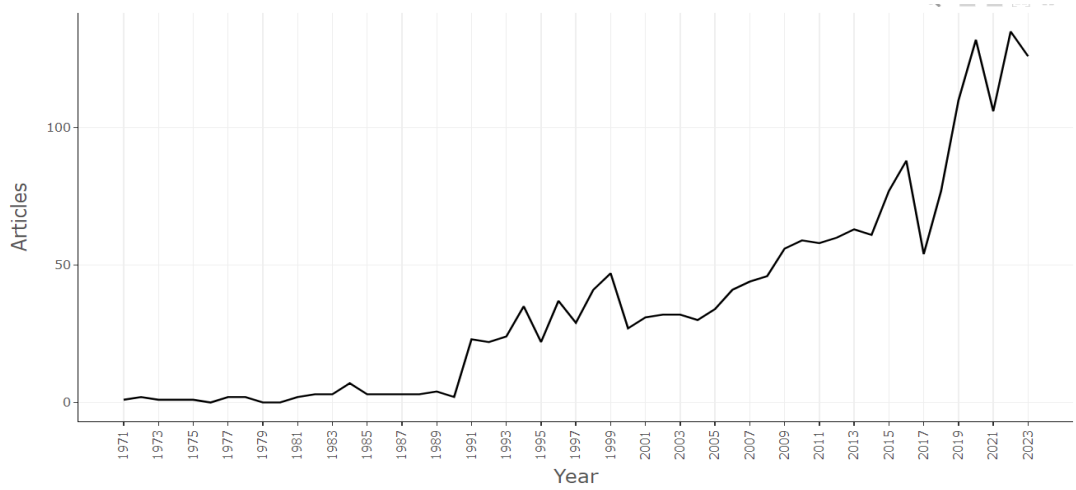
شکل ۲ تصویری آشکار از تولید علمی سالانه از سال ۱۹۷۱ تا ۲۰۲۳ ارائه می‌دهد. در طول دو دهه اولیه، فعالیت انتشار محدودی در رابطه با کاربرد اجزای محدود در آب‌های زیرزمینی وجود داشت. این کمبود تحقیق در این دوره عاملی قابل توجه است که به مشکلات متعدد آب‌های زیرزمینی می‌پردازد. با این‌حال، از سال ۲۰۱۸ شاهد پیشرفت قابل‌توجه انتشارات در این زمینه بوده‌ایم.

جدول ۱. مشخصات Biblioshiny پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Table 1. Biblioshiny information on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

توصیف Description	نتایج Results
مشخصات اصلی داده‌ها Main Information About Data	
دوره زمانی Timespan	1971:2023
منابع (نشریه، کتاب و...) Sources (Journals, Books, etc)	454
اسناد Documents	1902
نرخ رشد سالانه Annual Growth Rate %	9/75
قدمت متوسط مقاله Document Average Age	12/8
میانگین استنادات هر مقاله Average citations per doc	22/6
منابع References	52629
محتوای مقالات Document Contents	
کلمات کلیدی Keywords Plus (ID)	3175
کلمات کلیدی نویسنده Author's Keywords (DE)	4612
نویسندگان Authors	
نویسندگان Authors	4645
نویسندگان مقالات تک استنادی Authors of single-authored docs	121

همکاری نویسندگان Authors Collaboration	
مقالات تک نویسنده Single-authored docs	142
نویسندگان مشترک در هر سند Co-Authors per Doc	3/47
نویسندگان مشترک بین‌المللی International co-authorships %	25/92
نوع سند علمی Document Types	
مقاله article	1799
مقاله؛ داده‌محور article; data paper	1
مقاله؛ دسترسی زودهنگام article; early access	9
مقاله کنفرانسی article; proceedings paper	51
مقالات سلب اعتبار شده article; retracted publication	1
اصلاحی correction	1
مباحثه discussion	2
سرمقاله editorial material	5
خلاصه جلسه meeting abstract	3
یادداشت note	9
مروری review	21

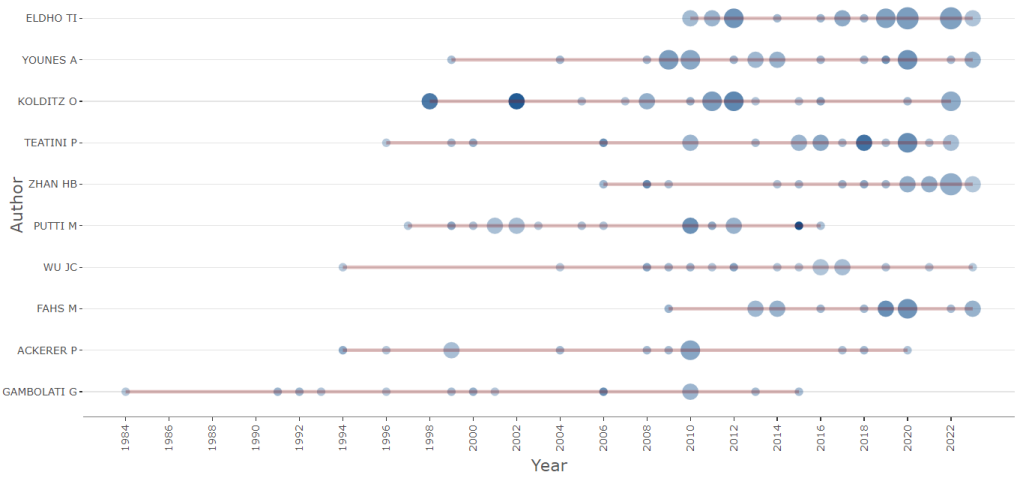


شکل ۲. تولید علمی سالانه پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 2. Annual scientific production on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

تجزیه و تحلیل مولدترین نویسندگان

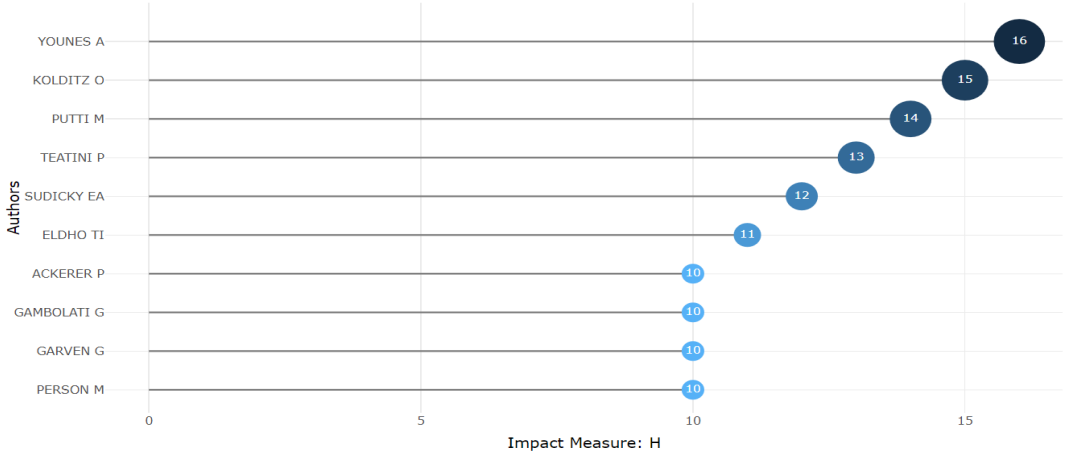
در شکل ۳، مشارکت‌های علمی نویسندگان از طریق نمایش تعداد مقالاتی که آن‌ها تألیف کرده‌اند به تصویر کشیده شده است. این شکل، از حباب‌هایی با اندازه‌ها و شدت رنگ مختلف تشکیل شده است و منعکس‌کننده تاریخ انتشار نویسندگان (که با خطوط نشان داده می‌شود) می‌باشد و از رویکردی که توسط Farooq (2024)، ارائه شده تبعیت کرده است. قابل ذکر است، این تجسم محققانی همچون TEATINI P، WU JC، YOUNES A را به‌عنوان نویسندگان با بیشترین اثر در پژوهش‌های پیرامون کاربرد اجزای محدود در مطالعات آب زیرزمینی برجسته می‌کند. بهره‌وری بی‌نظیر KOLDITZ O توسط مقاله اصلی او تأکید می‌شود: "جریان و انتقال با چگالی متغیر در محیط‌های متخلخل: رویکردها و چالش‌ها".



شکل ۳. نویسندگان سازنده در طول زمان پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 3. Productive authors overtime on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

شکل ۴ به تأثیر موضعی این نویسندگان می‌پردازد، و روشن می‌کند که چگونه کار آن‌ها تأثیر مثبتی بر سایر انتشارات و اسناد تحقیقاتی مربوط به کاربرد اجزای محدود در مطالعات آب زیرزمینی داشته است. در میان سه نویسنده برتر از نظر تأثیر محلی، Younes A، Kolditz O و Putti M به‌عنوان نویسندگان محوری ظاهر می‌شوند و بر مشارکت قابل‌توجه آن‌ها در شکل دادن به گفتمان و چشم‌انداز پژوهشی در این زمینه تأکید می‌کنند.

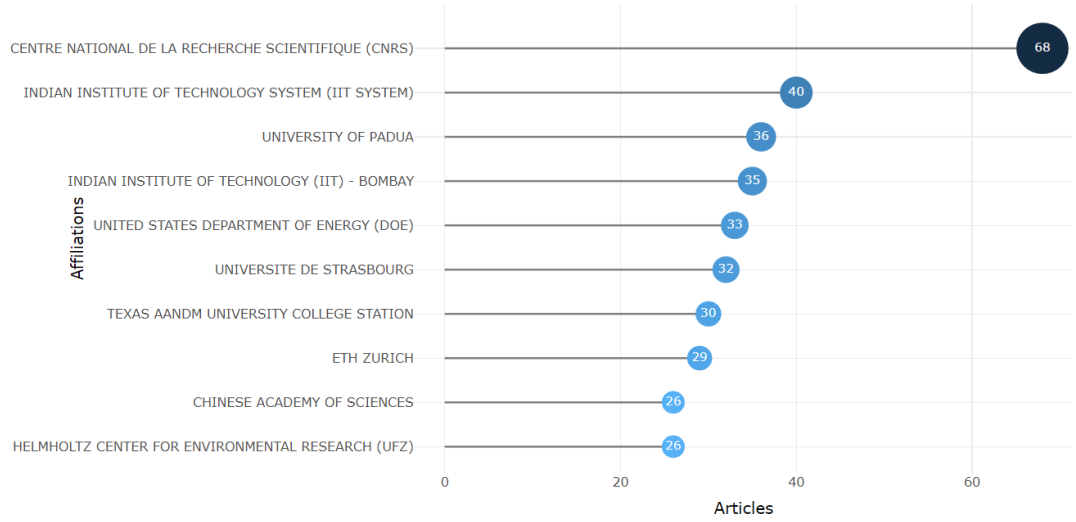


شکل ۴. تأثیر محلی نویسندگان در طول زمان پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 4. Authors' local impact over time on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

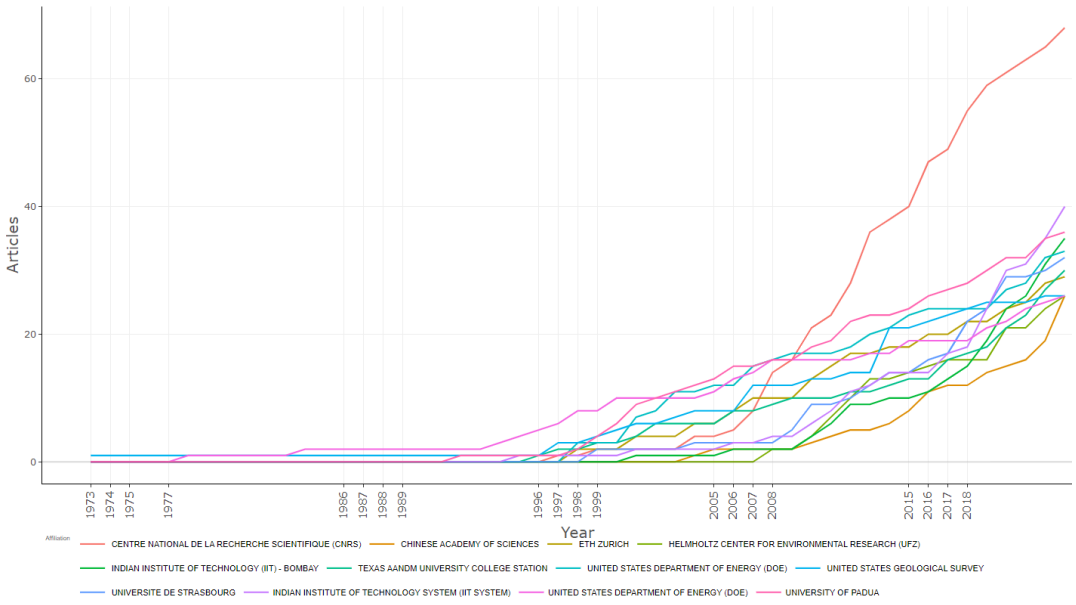
وابستگی‌ها و کشورهای مربوطه

شکل ۵ بینش‌هایی را در مورد مرتبط‌ترین مؤسسه‌های فعال در موضوع مورد مطالعه ارائه می‌دهد. قابل توجه است که دانشگاه ملی تحقیقات علمی کبک و مؤسسه فناوری هندوستان به‌عنوان دو مؤسسه با بیشترین ارتباط با این رشته برجسته هستند. این امر بر مشارکت قابل توجه آن‌ها در پیشبرد کاربرد اجزای محدود در انجام تحقیقات پیرامون آب زیرزمینی تأکید می‌کند. شکل ۶ پرکارترین مؤسسات را نشان می‌دهد که بر این اساس مرکز ملی تحقیقات علمی (CNRS) بزرگ‌ترین سازمان تحقیقاتی دولتی در فرانسه و بزرگ‌ترین آژانس علوم بنیادی در اروپا از سال ۲۰۰۹ تاکنون، بیشترین تعداد مقاله را در دنیا منتشر نموده است. در این میان نقش سازمان زمین‌شناسی ایالات‌متحده آمریکا قابل‌توجه است، این مؤسسه از سال ۱۹۹۶ برای اولین‌بار شروع به انجام تحقیقات درزمینه کاربرد اجزای محدود در حوزه آب‌های زیرزمینی بوده است که تاکنون ادامه داشته و تعهد پایدار خود را به این حوزه مطالعاتی نشان می‌دهد.



شکل ۵. وابستگی‌های مرتبط در طول زمان پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 5. Relevant affiliations overtime on the application of "finite element" in "groundwater" studies.



شکل ۶. مراکز علمی مولد در طول زمان پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

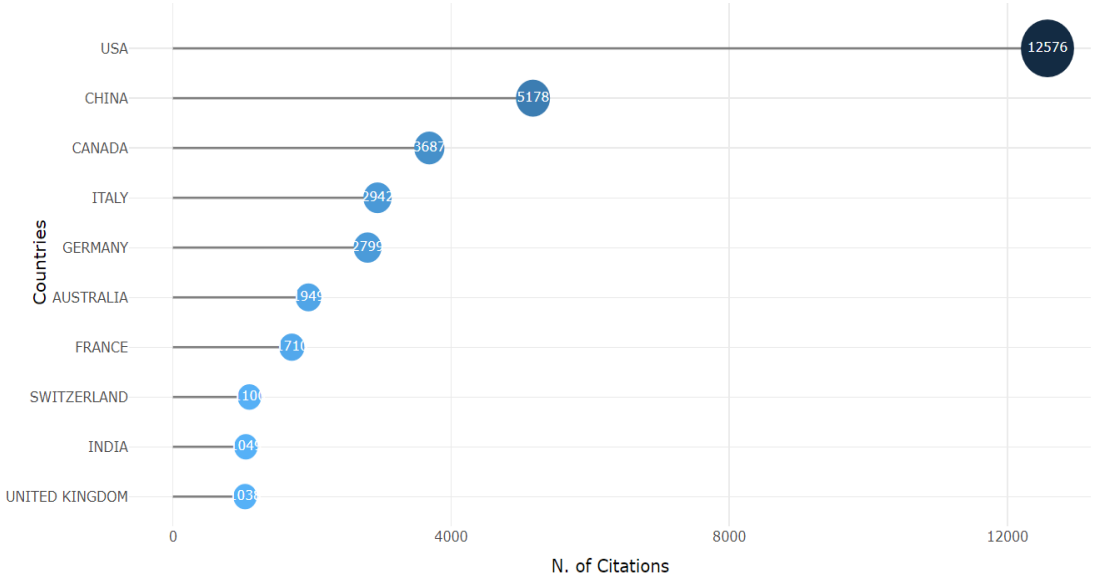
Fig 6. Productive Associations overtime on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

جدول ۶ نمای کلی از بازده علمی کشورهای مختلف را که حداقل ۲۰ سند علمی منتشر کرده‌اند، ارائه می‌دهد. چین از نظر انتشارات در این زمینه پیشتاز است و پس از آن آمریکا، کانادا، آلمان، ایتالیا، فرانسه، بریتانیا و ایران قرار دارند. این توزیع نشان‌دهنده علاقه و مشارکت جهانی در تحقیقات مربوط به کاربرد اجزای محدود در مسائل آب زیرزمینی است. شکل ۷ نشان می‌دهد که آمریکا، چین، کانادا، ایتالیا و آلمان کشورهایی هستند که اغلب درزمینه‌ی اجزای محدود و آب زیرزمینی مورد استناد قرار می‌گیرند. مشارکت آن‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر گفتمان و شناخت علمی در این زمینه داشته است. شکل ۸ بر نقش پیشرو چین و آمریکا در تلاش‌های مشترک، به‌ویژه با کشورهایی مانند استرالیا، کانادا، بریتانیا و ایتالیا تأکید می‌کند. این روحیه مشارکتی در پیشبرد تحقیقات و دانش درزمینه‌ی کاربرد اجزای محدود در مطالعات آب زیرزمینی مؤثر است.

جدول ۶. تولیدات علمی کشورها پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

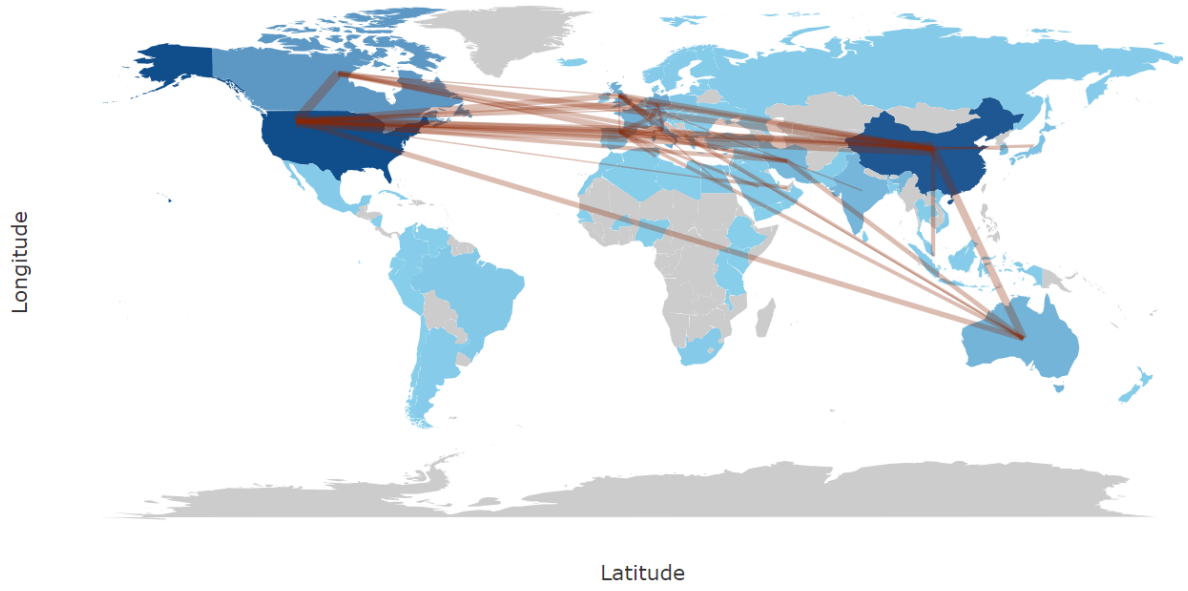
Table 6. Scientific production of countries on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

منطقه region	تعداد Freq
China	909
USA	716
Canada	265
Germany	220
Italy	197
France	182
Uk	140
Iran	132
India	129
Australia	120
Spain	88
South Korea	80
Japan	78
Switzerland	63
Belgium	36
Brazil	36
Turkey	35
Greece	33
Netherlands	32
Egypt	30
Poland	30
Israel	27
Vietnam	27
Hungary	23
Czech Republic	20



شکل ۷. کشورهای دارای بیشترین استناد پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 7. Countries with the most citations on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

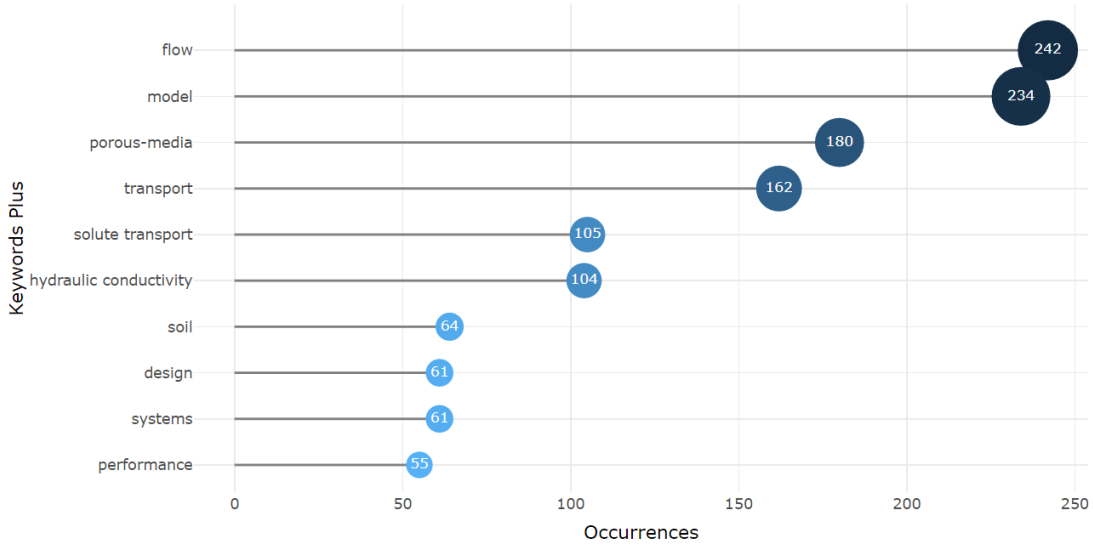


شکل ۸. همکاری بین کشورها پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 8. Collaborations among countries on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

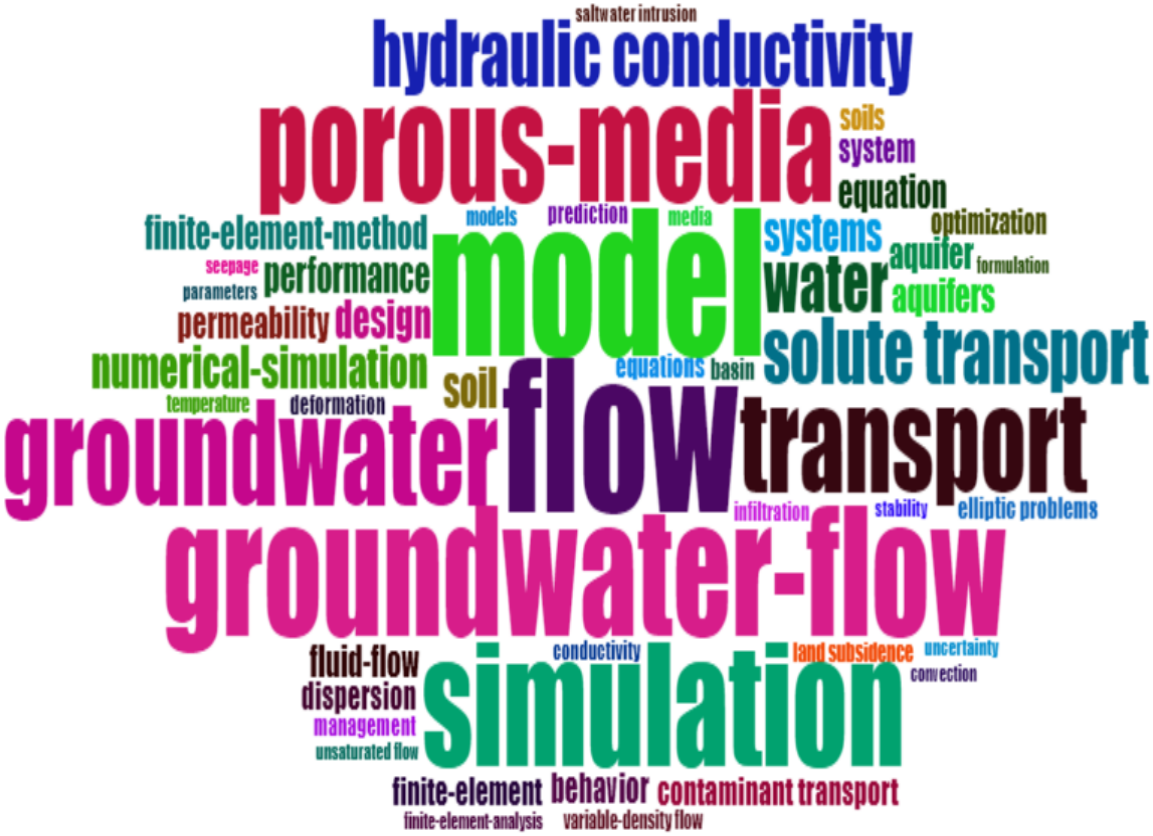
تجزیه و تحلیل کلمات

در میان ۳۱۷۵ کلید واژه شناسایی‌شده، "جریان"، "مدل‌سازی"، "محیط متخلخل" و "انتقال املاح" به‌عنوان چهار کلید واژه پرمصرف، همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است. این برجستگی در شکل ۱۰ توسط ابر کلمه و همچنین در شکل ۱۱، با بررسی کلمات کلیدی استفاده‌شده در طول زمان، به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده می‌کنیم که "انتقال املاح" به‌طور مداوم به‌عنوان یک کلمه کلیدی از سال ۱۹۹۰ در انتشارات پیرامون کاربرد اجزای محدود در آب‌های زیرزمینی استفاده شده است. شکل ۱۲ بینشی در مورد موضوعات پرطرفدار فعلی تا دسامبر سال ۲۰۲۳ ارائه می‌دهد. سه موضوع غالب عبارت‌اند از: "تراوش (seepage) "، "دگردیسی (deformation) " و "تحلیل پایداری". این حوزه‌ها نشان‌دهنده اولویت‌ها و علایق در حال تحول در تحقیقات مربوط به کاربرد اجزای محدود در آب زیرزمینی است.



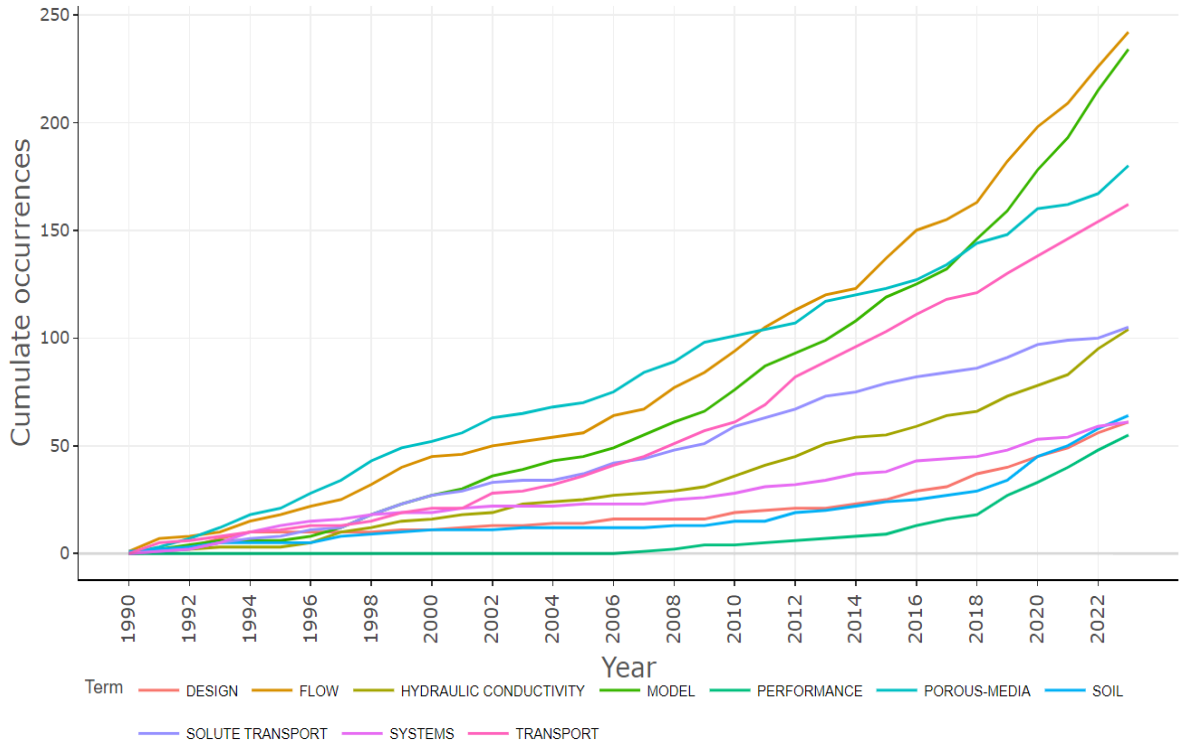
شکل ۹. کلمات کلیدی پرکاربرد پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 9. Relevant keywords on the application of "finite element" in "groundwater" studies.



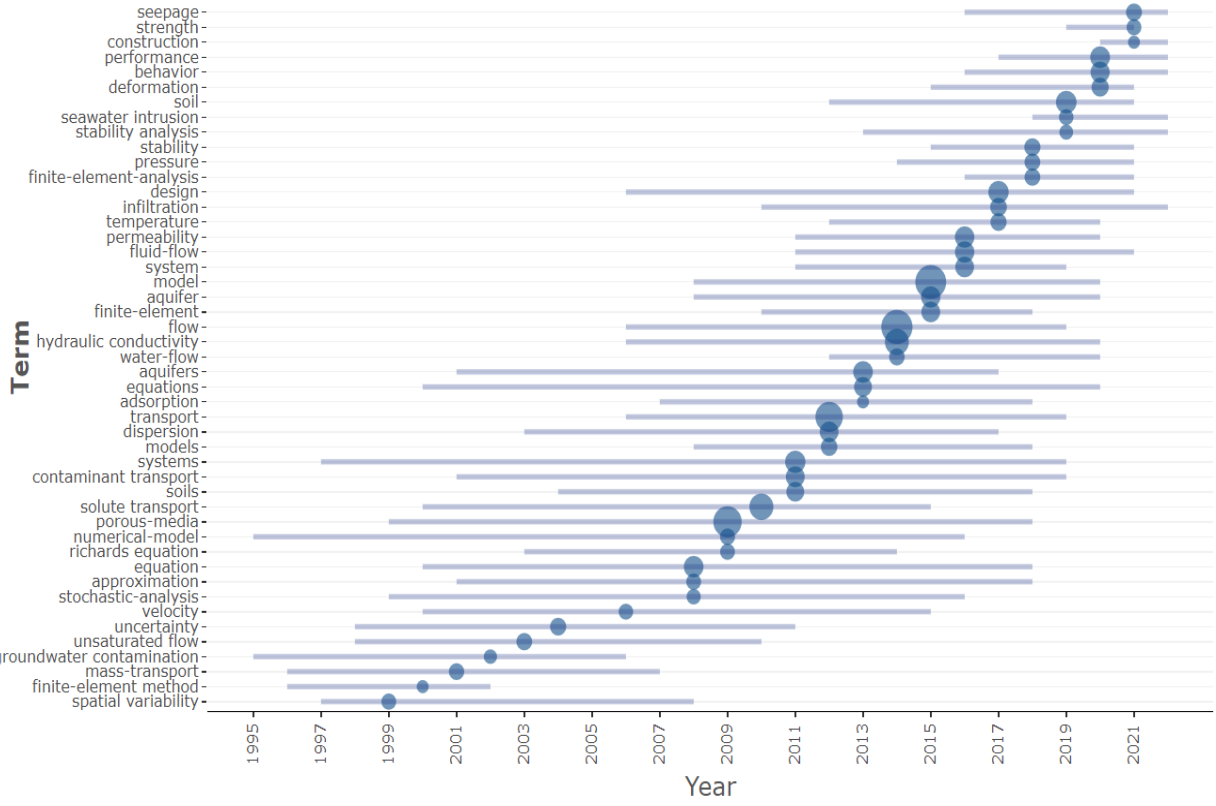
شکل ۱۰. ابر کلمه پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 10. Word cloud on the application of "finite element" in "groundwater" studies.



شکل ۱۱. فراوانی کلمه کلیدی پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی" در طول زمان.

Fig 11. Keyword frequency overtime on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

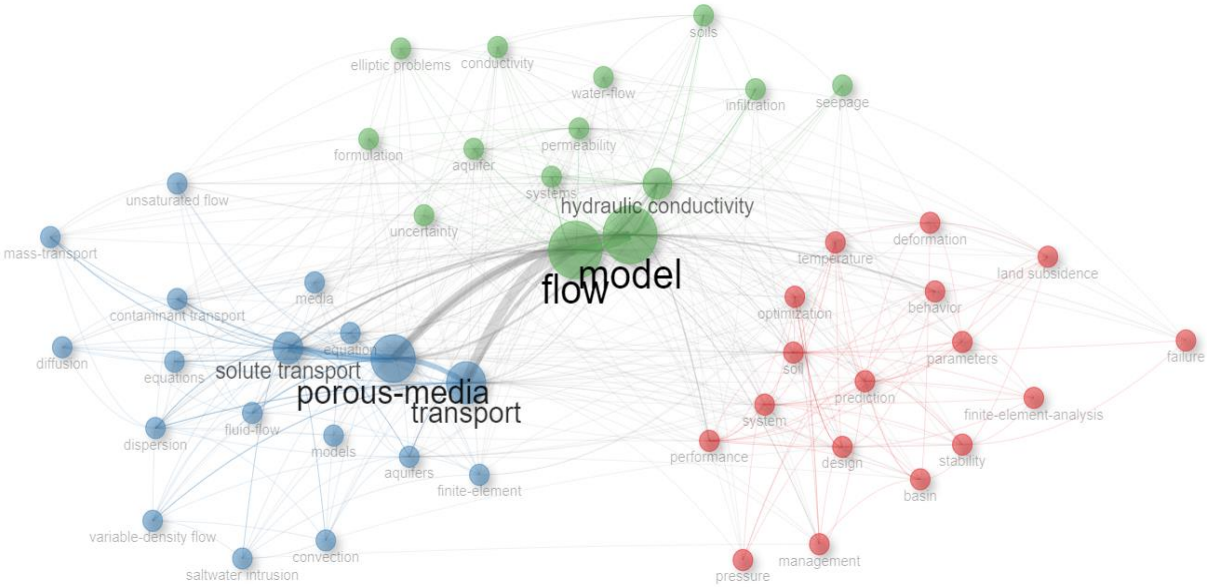


شکل ۱۲. موضوعات پرطرفدار پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 12. Trending topics on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

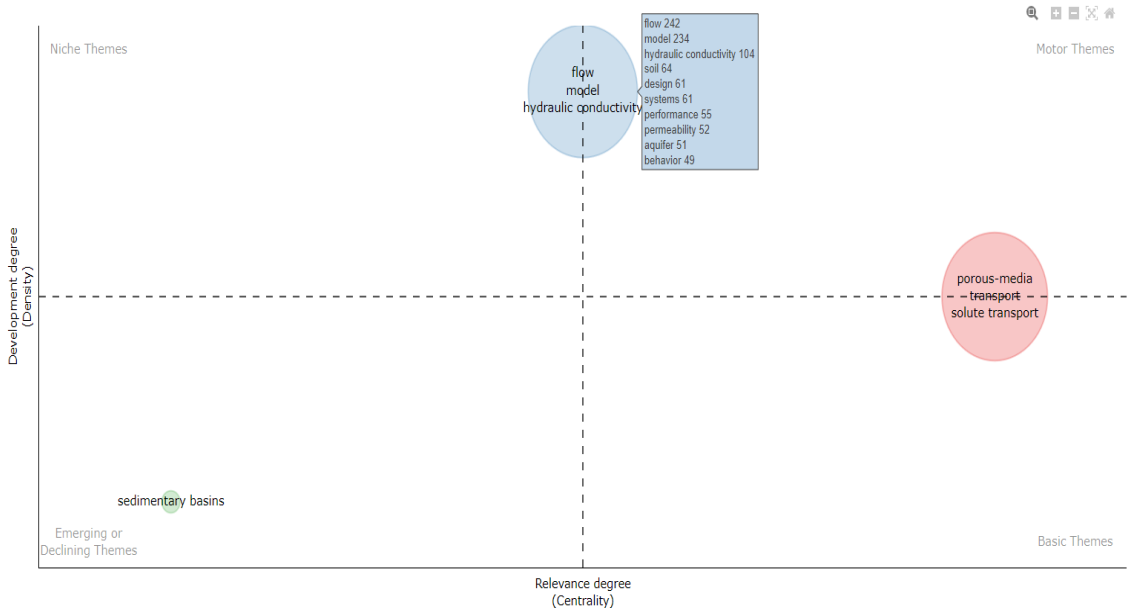
نقشه‌برداری علمی کلمات کلیدی

شبکه‌های همزمان کلمات کلیدی و نقشه موضوعی به‌صورت بصری در شکل ۱۳ و ۱۴ ارائه شده است. این تصاویر نشان می‌دهد که درحالی‌که "مدل‌سازی"، "محیط متخلخل" و "انتقال املاح" کلمات کلیدی مرتبطی می‌باشند؛ نقشه موضوعی، اهمیت محوری کلمات کلیدی مانند "هدایت هیدرولیکی"، "نفوذپذیری"، "آبخوان" و "انتشار" را برجسته می‌کند. این تأکید بر اهمیت استفاده از اجزای محدود در مطالعات مختلف آب زیرزمینی تأکید می‌کند.



شکل ۱۳. هم‌زمانی کلمه کلیدی پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 13. Keyword co-occurrence on the application of "finite element" in "groundwater" studies.



شکل ۱۴. نقشه‌برداری موضوعی پیرامون کاربرد "اجزای محدود" در مطالعات "آب زیرزمینی".

Fig 14. Thematic mapping on the application of "finite element" in "groundwater" studies.

شکل ۱۳ سه خوشه مجزا را نشان می‌دهد. خوشه ۱ که با رنگ سبز نشان داده شده است، شامل کلمات کلیدی مرتبط با «جریان»، «مدل‌سازی»، «هدایت هیدرولیکی»، «عدم قطعیت»، «تراوش»، «نفوذپذیری»، «مسائل بیضوی» و «فرمولاسیون» است. خوشه ۲ که با رنگ آبی نشان داده شده است شامل کلمات کلیدی مانند "انتقال املاح"، "محیط متخلخل"، "آبخوان"، "جریان غیراشباع"، "انتقال انبوه"، "انتشار" و "پراکندگی" است. خوشه سوم با رنگ قرمز شامل کلمات کلیدی مانند «"بهینه‌سازی"، "دما"، "دگردیسی" "پیش‌بینی"، "کارایی"، "طراحی"، "فرونشست زمین" و "مدیریت" است.

بررسی دقیق این دسته‌بندی‌های کلیدی، دسته‌بندی‌های زیر را نشان می‌دهد: خوشه ۱ بر «مدل‌سازی» تمرکز دارد، خوشه ۲ به «آبخوان» مربوط می‌شود و خوشه ۳ با «اقدامات مدیریتی» مرتبط است.

نتیجه‌گیری

رویکرد Biblioshiny R موضوعات غالب در انتشارات موجود را روشن کرده است و بر کاربرد گسترده اجزای محدود در تحقیقات آب زیرزمینی تأکید می‌کند. این برنامه‌ها درمجموع برای تقویت امنیت منابع آب خدمت می‌کنند. بر اساس تجزیه و تحلیل Biblioshiny، نویسنده پر استناد، سازنده و تأثیرگذار اولاف کولدیتز، آلمانی و رئیس بخش مرکز تحقیقات محیطی هلمهولتز است. کار برجسته او، "جریان و انتقال املاح در آب زیرزمینی" می‌باشد که در دو نسخه "بررسی مدل‌های جریان و انتقال چگالی متغیر" و "سیستم‌های ترموهالین و کانوکشن سه‌بعدی"، منتشر شده است. این مطالعه بر اهمیت کاربرد اجزای محدود در مطالعات آب زیرزمینی تأکید می‌کند. درک این نکته مهم است که برخی محورهای مطالعاتی در این حوزه که در گذشته بیشتر مورد بحث بوده‌اند، اخیراً کمتر در پژوهش‌ها به کار می‌روند که از جمله آن می‌توان به معادله ریچارد، تنوع فضایی و آنالیز استوکاستیک اشاره کرد. بنابراین، تحقیقات آینده باید پیرامون محورهایی که اخیراً روند شده‌اند باشد. جهت تحلیل بهینه‌ترین روش‌های شبیه‌سازی عددی برای مطالعه آب زیرزمینی، لازم است کارایی سایر مدل‌ها مانند حجم محدود، تفاضل محدود و همچنین روش‌های جدیدتر مانند شبکه عصبی مصنوعی نیز مورد بررسی قرار گیرد که از محدودیت‌های این پژوهش به‌شمار رفته و می‌تواند در تحقیقات آتی مورد مطالعه قرار گیرد.

منابع

Balcha, S. K., Hulluka, T. A., Awass, A. A., Bantider, A., Ayele, G. T., & Walsh, C. L. (2024). Numerical groundwater flow modelling under future climate change in the Central Rift Valley Lakes Basin; Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101733.

Behroozi, A. M., & Vaghefi, M. (2022). Thin Plates Spline-Based Differential Quadrature for the numerical solution of groundwater flow. *Engineering Computations*, *39*(6), 2194-2208 .

Berehanu, B., Ayenew, T., & Azagegn, T. (2017). Challenges of groundwater flow model calibration using mudflow in Ethiopia: with particular emphasis on the upper awash river basin. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, *5*(3), 50-66 .

Canales, M., Castilla-Rho, J., Rojas, R., Vicuña, S., & Ball, J. (2024). Agent-based models of groundwater systems: A review of an emerging approach to simulate the interactions between groundwater and society. *Environmental Modelling & Software*, 105980 .

Carle, S., Hao, Y., & Tompson, A. (2022). *Verification and Validation of a Modified Numerical Algorithm for Simulation of Transient Unconfined Groundwater Flow* .

Deng, A., Li, X., Qiu, W., Li, L., Tao, N., & Jin, Y. (2024). Geometry optimization of microwavable food to improve heating uniformity. *Journal of Food Engineering*, *369*, 111945 .

Farooq, R. (2024). A review of knowledge management research in the past three decades: a bibliometric analysis. *VINE Journal of Information and Knowledge Management Systems*, *54*(2), 339-378. https://doi.org/10.1108/VJIKMS-08-2021-0169

Guo, W., Li, P., Du, Q., Zhou, Y., Xu, D., & Zhang, Z. (2023). Hydrogeochemical processes regulating the groundwater geochemistry and human health risk of groundwater in the rural areas of the Wei River Basin, China. *Exposure and Health*, 1-16 .

Hassan ,S. T., & Lubczynski, M. W. (2024). Surface-groundwater interactions in hard rock, water-limited environments, simulated at a very fine scale using long time-series observations and hydrotope-modeling concept. *Journal of Hydrology*, *629*, 130505 .

Robinson, N. I. (2023). New analysis and numerical values for the classical dam problem. *Advances in Water Resources*, *175*, 104356.

Sbai, M. A., & Larabi, A. (2023). A Deforming Mixed-Hybrid Finite Element Model for Robust Groundwater Flow Simulation in 3D Unconfined Aquifers with Unstructured Layered Grids. *Water*, *15*(6), 1177 .

Sbai, M. A., Larabi, A., Fahs, M., & Doummar, J. (2021). A New Normalized Groundwater Age-Based Index for Quantitative Evaluation of the Vulnerability to Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Implications for Management and Risk Assessments. *Water*, *13*(18), 2496 .

Shakour, S., Chitsazan, M., & Mirzaee, S. Y. (2023). Zonation of groundwater quality in terms of drinkability, using Fuzzy Logic and Schoeller deterministic method for Northern Dezful-Andimeshk Plain, Iran. *Discover Water*, *3*(1), 22 .

Taylor, A., & Peach, D. (2024). Groundwater modelling of the Silala basin and impacts of channelization. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, *11*(1), e1662 .

Tegegne, A. M., Lohani, T. K., & Eshete, A. A. (2023). Evaluation of groundwater quality for drinking and irrigation purposes using proxy indices in the Gunabay watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Heliyon*, 9(4).

Tosan, M., & 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., Khashei-Siuki, A., Maroosi, A., & Gharib, M. R. (2023). A Review of Smart Water Management for Sustainable Agriculture Based on the Internet of Things. *Water Management in Agriculture* .

Zhang, Y.-P., Jiang, X.-W., Zhang ,X.-L., Zhang, Z.-Y., Wang, X.-S., Cao, G.-L., Wei, W., & Wan, L. (2024). Pumping-induced groundwater ageing and rejuvenation in aquifer-aquitard systems: A perspective from regional groundwater flow. *Journal of Hydrology*, *632*, 130718 .

Hughes ,J. D., Langevin, C. D., Paulinski, S. R., Larsen, J. D., & Brakenhoff, D. (2024). FloPy workflows for creating structured and unstructured MODFLOW models. *Groundwater*, *62*(1), 124-139 .

Krishan, G., Kumar, M., Rao, M. S., Garg, R., Yadav, B. K., Kansal ,M., Singh, S., Bradley, A., Muste, M., & Sharma, L. (2023). Integrated approach for the investigation of groundwater quality through hydrochemistry and water quality index (WQI). *Urban climate*, *47*, 101383 .

Kumar, P., Gupta, D. S., Rao, K., Biswas, A., & Ghosh, P. (2024). Delineation of groundwater potential zones and its extent of contamination from the hard rock aquifers in west Bengal, India. *Environmental Research*, 118332 .

Lei, Y., Dai, Q., Zhang, B., Kong, C., & Yang, J. (2024). A gradient smoothing technique-based S-FEM for simulating the full impacts of anomalies on seepage solutions and its application in multi-parameter seepage inversion. *Water Resources Management*, *38*(2), 753-773 .

Nhu, V.-H., Phan, D. C., Hoa, P. V., Vinh, P. T., & Bui ,D. T. (2024). A new approach based on Deep Neural Networks and multisource geospatial data for spatial prediction of groundwater spring potential. *IEEE Access* .

Nourani, V., & Mousavi, S. (2016). Spatiotemporal groundwater level modelling using the hybrid artificial intelligence-meshless method. *Journal of Hydrology*, *536*, 10-25 .

Pandin, M., Sumaedi, S., Yaman, A., Ayundyahrini, M., Supriatna, N. K., & Hesty, N. W. (2024). ISO 50001 based energy management system: a bibliometric perspective. *International Journal of Energy Sector Management* .

Peszynska, M., Vohra, N., & Bigler, L. (2024). Upscaling an extended heterogeneous stefan problem from the pore scale to the Darcy scale in permafrost. *Multiscale Modeling & Simulation*, *22*(1), 436-475 .

Phat, V. V., & Le Luu, T. (2023). Review on the removal of Arsenic in groundwater using laterite adsorbent. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, *35*, 100496 .

Purkey, D. R., Wallender, W. W., Islam, N., & SivaKumar, B. (2006). Identifying sources of recharge to shallow aquifers using a groundwater model. *Agricultural water management*, *86*(3), 283-287 .

Rezaei, M., Mousavi, S.-F., Moridi, A., Eshaghi Gordji, M., & Karami, H. (2021). A new hybrid framework based on the integration of optimization algorithms and numerical methods for estimating monthly groundwater level. *Arabian Journal of Geosciences*, *14*, 1-15 .