

The Necessity of Pumping Tests and Exploratory Well Drilling in Groundwater Baseline Studies: Challenges and Gaps in Iran

Kamal Ganjalipour^{1✉}, Majid Naeimi², Effat Zamani³

1. Ph.D, Kharazmi University, Tehran, Iran. E-mail: kganjalipour@gmail.com

2. M.Sc, Arak University, Arak, Iran. E-mail: majid.co403@gmail.com

3. Ph.D, Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran. E-mail: Efatzamani@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 19 May 2025
Accepted 31 August 2025

Keywords:
Baseline Groundwater
Studies, Conceptual Model of
the Aquifer, Test Well,
Pumping Test, Water
Resources Governance.

ABSTRACT

Exploratory studies and pumping tests are considered fundamental tools for understanding the hydrogeological behavior of aquifers. They play a critical role in water resources modeling, planning, and governing water resources. This article aims to analyze the role of these studies within the water governance framework in Iran by examining the institutional, technical, and legal challenges in comparison with developed countries. The findings indicate that weak legal requirements, the absence of an integrated data acquisition system, limited equipment, and a shortage of exploratory wells have led to reduced accuracy in baseline studies, weakened numerical models, and unstable decision-making. Additionally, the paper reviews the historical development of exploratory drilling and pumping tests, along with their tools and objectives, emphasizing the role of exploratory wells in developing conceptual models and monitoring aquifer dynamics under declining water table conditions. In conclusion, the article highlights the need to revise policymaking, strengthen institutional structures, and mandate the implementation of precise tests to achieve evidence-based water governance.

Introduction

Exploratory well drilling and aquifer pumping tests are essential components of groundwater baseline studies, serving as the foundation for understanding aquifer geometry, hydrodynamic parameters, water quality, and system behavior. In the context of integrated water resources management and evidence-based governance, such field investigations are critical for producing reliable data, informing modeling efforts, and guiding sustainable policies. This paper aims to highlight the strategic importance of these tools, assess their current status in Iran, and compare national practices with those of developed countries.

Materials and Methods

Subtitle

This study takes a multidisciplinary approach to reviewing the subject, combining historical

analysis, a technical evaluation of field methods, institutional and legal assessments, and a quantitative analysis of the distribution of exploratory wells in Iran. To contextualize Iran's performance, comparative benchmarks are drawn from international experiences (e.g., the United States, Australia, and the Netherlands).

Key Findings

- **Governance and Policy Gaps:** Iran suffers from weak regulatory enforcement and lacks mandatory frameworks for systematic pumping tests in exploratory wells. In contrast, countries with effective groundwater governance require these tests as prerequisites for licensing abstraction and for model calibration.
- **Data Infrastructure Deficiency:** The absence of a national, centralized data

Cite this article: Ganjalipour, K., Naeimi, M., Zamani, E. (2025). The Necessity of Pumping Tests and Exploratory Well Drilling in Groundwater Baseline Studies: Challenges and Gaps in Iran. *Journal of Engineering Geology*, 19 (2), 183-223. <https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1010693>

platform for pumping test results and aquifer parameters has led to fragmented, incomplete datasets, impeding the development of accurate numerical models.

- **Limited Technical Capacity:** Many regional institutions in Iran lack access to modern equipment (e.g., digital pressure transducers, high-precision flow meters) as well as trained personnel. Consequently, most pumping tests are rudimentary and poorly documented.
- **Sparse Exploratory Well Density:** On average, only 0.5 exploratory wells per 100 km² exist in Iranian aquifers far below the density required for regional-scale modeling or sustainable groundwater planning.
- **Conceptual Model Inaccuracy:** Without recent and spatially distributed field data, conceptual models of aquifers remain hypothetical and fail to reflect dynamic changes in aquifer behavior due to overexploitation and climate variability.

Comparative Insights

In developed countries, exploratory wells and pumping tests are part of long-term monitoring strategies integrated into water information systems (e.g., USGS NWIS, Australia's BOM). These countries rely on systematic testing to update groundwater models, manage conjunctive use, and evaluate the impacts of land use and climate change. Iran, by contrast, tends

to use models based on estimated or outdated parameters, leading to unreliable predictions and suboptimal management outcomes.

Recommendations

To align Iran's groundwater studies with international standards and improve the scientific foundation of water governance, the following actions are recommended:

1. Enforce mandatory pumping tests in all exploratory wells, with national technical protocols.
2. Establish a centralized, publicly accessible groundwater data repository.
3. Invest in modern monitoring equipment and capacity building.
4. Incorporate exploratory data directly into conceptual and numerical modeling processes.
5. Shift policy orientation toward recognizing groundwater as a strategic national asset.

Conclusions

Exploratory well drilling and pumping tests are more than technical procedures they are pillars of transparent, evidence-based water governance. In the face of growing groundwater stress, land subsidence, and uncertainty, Iran must elevate the status of these tools within its institutional, technical, and policy frameworks. Doing so will not only enhance the credibility of groundwater studies but also strengthen the country's resilience to future water challenges.



ضرورت انجام آزمایش پمپاژ و حفر چاه‌های اکتشافی در مطالعات پایه منابع آب و خلاءهای موجود در ایران

کمال گنجعلی پور^۱، مجید نعیمی^۲، عفت زمانی^۳

۱. دکتری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: kghanjalipour@gmail.com
۲. کارشناسی ارشد، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: majid.co403@gmail.com
۳. دکتری، شرکت مدیریت منابع ایران، تهران، ایران. رایانامه: Efatzamani@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

مطالعات اکتشافی و انجام آزمون‌های پمپاژ، پایه‌ای‌ترین ابزارهای شناخت رفتار هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها محسوب می‌شوند و نقش کلیدی در مدل‌سازی، برنامه‌ریزی و حکمرانی منابع آب ایفا می‌کنند. این مقاله با هدف تحلیل جایگاه این مطالعات در ساختار حکمرانی آب در ایران، به بررسی چالش‌های نهادی، فنی و قانونی کشور در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته می‌پردازد. یافته‌ها نشان می‌دهد که ضعف در الزامات قانونی، نبود نظام یکپارچه داده‌برداری، محدودیت تجهیزات و کمبود چاه‌های اکتشافی، موجب کاهش دقت مطالعات پایه، تضعیف مدل‌های عددی و تصمیم‌گیری‌های ناپایدار شده است. مقاله همچنین سیر تحول تاریخی حفاری اکتشافی و آزمون‌های پمپاژ، ابزارها و اهداف آن‌ها را مرور کرده و بر نقش چاه‌های اکتشافی در توسعه مدل مفهومی و پایش دینامیک آبخوان‌ها در شرایط افت سطح ایستابی تأکید دارد. در پایان، بر لزوم بازنگری سیاست‌گذاری، تقویت ساختار نهادی، و الزام اجرای آزمون‌های دقیق در راستای تحقق حکمرانی مبتنی بر شواهد تأکید می‌شود.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹

کلیدواژه‌ها:

آزمون پمپاژ، چاه اکتشافی، حکمرانی منابع آب، مدل مفهومی آبخوان، مطالعات پایه آب زیرزمینی.

مقدمه

جایگاه مطالعات اکتشافی در حکمرانی منابع آب

در حکمرانی منابع آب، هدف اصلی ایجاد چارچوبی هماهنگ برای استفاده پایدار، منصفانه و کارآمد از منابع آبی است؛ چارچوبی که در آن بازیگران مختلف از دولت و بخش خصوصی گرفته تا جوامع محلی و نهادهای علمی در تصمیم‌گیری و اجرای سیاست‌ها مشارکت داشته باشند. این نوع حکمرانی فراتر از مدیریت فنی منابع آب است و ابعاد اقتصادی، اجتماعی، حقوقی و محیط‌زیستی را نیز در بر می‌گیرد (OECD, 2015). در این بستر، حکمرانی مبتنی بر شواهد به عنوان یک رویکرد نوین مطرح می‌شود که بر استفاده نظام‌مند از داده‌های معتبر، نتایج مطالعات علمی و

تحلیل‌های تخصصی در فرایند سیاست‌گذاری و اجرا تأکید دارد (Head, 2016). این رویکرد به ویژه در حوزه منابع آب که با پیچیدگی‌های طبیعی، تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی مواجه است اهمیت دوچندان می‌یابد. یکی از ارکان اصلی تحقق حکمرانی مبتنی بر شواهد، مطالعات اکتشافی و پایه‌ای است؛ این مطالعات شامل بررسی‌های هیدروژئولوژیکی، هیدرولوژیکی، کیفیت آب، و شناخت ساختار آبخوان‌ها می‌شوند و نقش کلیدی در کاهش عدم قطعیت، شناسایی چالش‌ها و فرصت‌ها، و طراحی سیاست‌های مؤثر ایفا می‌کنند (Foster and Ait-Kadi, 2012). بدون این داده‌ها و تحلیل‌ها، تصمیم‌گیری در حوزه

استناد: گنجعلی پور، ک.، نعیمی، م.، زمانی، ع. (۱۴۰۴). ضرورت انجام آزمایش پمپاژ و حفر چاه‌های اکتشافی در مطالعات پایه منابع آب و خلاءهای موجود در ایران. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۲)، ۱۸۳-۲۲۳. <https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.2.1010693>



منابع آب ممکن است به سیاست‌های ناکارآمد، پرهزینه یا حتی آسیب‌رسان به منابع بینجامد. از این‌رو، پیوند میان علم، سیاست و مدیریت از طریق تقویت نظام‌های داده محور و بهره‌گیری از مطالعات اکتشافی، قلب تپنده حکمرانی پایدار منابع آب به شمار می‌رود (Pahl-Wostl et al., 2007). در همین راستا، برای درک بهتر مسیرهایی که می‌توانند به پایداری منابع آب منجر شوند یا آن را با بحران مواجه کنند، تمایز میان حکمرانی خوب و حکمرانی بد در این حوزه ضروری است. این تمایز نه تنها به شناخت ویژگی‌های ساختاری و رفتاری نظام‌های حکمرانی کمک می‌کند، بلکه چارچوبی برای ارزیابی عملکرد نهادهای مرتبط با آب در سطوح محلی، ملی و منطقه‌ای فراهم می‌آورد.

حکمرانی خوب منابع آب - مطالعات اکتشافی در چارچوب حکمرانی خوب منابع آب، مطالعات اکتشافی و پایه‌ای جایگاهی محوری دارند، زیرا تصمیم‌گیری کارآمد، پاسخ‌گو و پایدار بدون تکیه بر داده‌های معتبر و شناخت علمی دقیق از وضعیت منابع آب امکان‌پذیر نیست. این مطالعات شامل بررسی‌های هیدروژئولوژیکی، پایش‌های کمی و کیفی، مدل‌سازی دینامیک آبخوان‌ها، و تحلیل روندهای زمانی مبنای تولید شواهدی هستند که در تدوین سیاست‌ها، تخصیص منابع و مدیریت بحران‌ها به کار می‌روند (GWSP, 2012; Gleeson et al., 2013). در حکمرانی خوب، استفاده از چنین شواهدی موجب ارتقای شفافیت، افزایش

اعتماد عمومی، و ایجاد زمینه برای مشارکت ذی‌نفعان در فرآیند تصمیم‌سازی می‌شود (OECD, 2015). افزون بر این، مطالعات پایه‌ای امکان ارزیابی دقیق پیامدهای سیاست‌های آبی را نیز فراهم می‌کنند؛ برای مثال، بررسی‌های مبتنی بر داده می‌توانند اثربخشی طرح‌های احیای آبخوان یا مدیریت بهره‌برداری را پیش از اجرا شبیه‌سازی و ارزیابی کنند (Scanlon et al., 2017). در فقدان این نوع مطالعات، تصمیم‌گیری‌ها عمدتاً بر پایه فرضیات یا فشارهای سیاسی شکل می‌گیرند که ممکن است منجر به بهره‌برداری ناپایدار یا بحران‌های غیرقابل جبران شود؛ بنابراین، ادغام مستمر داده‌های علمی با ساختارهای نهادی و مشارکتی از الزامات کلیدی حکمرانی خوب در حوزه آب به شمار می‌رود. در حکمرانی خوب منابع آب، شاخص‌هایی چون شفافیت، پاسخ‌گویی، مشارکت ذی‌نفعان، قانون‌مندی و پایداری نقش کلیدی دارند. تحقق این شاخص‌ها بدون بهره‌گیری از مطالعات اکتشافی ممکن نیست. این مطالعات، از طریق پایش، مدل‌سازی و تحلیل داده‌های کمی و کیفی منابع آب، اطلاعات معتبری تولید می‌کنند که هم پایه تصمیم‌گیری علمی هستند و هم بستر اعتماد عمومی و مشارکت را فراهم می‌سازند. همچنین، نتایج این مطالعات می‌توانند پایه اصلاح قوانین، ارتقاء پاسخ‌گویی نهادی و برنامه‌ریزی برای آینده پایدار منابع آب باشند (جدول ۱).

جدول ۱. نقش مطالعات اکتشافی در تقویت شاخص‌های کلیدی حکمرانی خوب در مدیریت منابع آب

Table 1. The Role of Exploratory Studies in Strengthening Key Good Governance Indicators in Water Resources Management

منابع	نقش مطالعات اکتشافی در تقویت شاخص	شاخص حکمرانی
UNDP, 1997; OECD, 2015; GWP, 2009; World Bank, 2009	تولید و انتشار داده‌های قابل اعتماد در مورد منابع آب (کمی، کیفی، ژئوفیزیکی، سنجش‌ازدور، مدل‌سازی)، تسهیل درک عمومی، افزایش مشروعیت تصمیمات، کاهش انحصار داده و تقویت اعتماد عمومی	شفافیت

OECD, 2015; Gleeson et al., 2012	فراهم سازی اطلاعات مستند از وضعیت منابع آب برای توجیه علمی تصمیمات (مانند اعمال محدودیت های برداشت)، ارتقای شفافیت نهادی و پاسخ گویی نهادهای در برابر افکار عمومی	پاسخ گویی
Molle and Tilmant, 2007	فراهم سازی پایه علمی برای مشارکت مؤثر، اشتراک داده های مطالعاتی با عموم و جوامع محلی، تسهیل گفت و گو مبتنی بر شواهد بین دولت و ذی نفعان	مشارکت ذی نفعان
Scanlon et al., 2017	استفاده از داده ها و تحلیل های مطالعات اکتشافی برای به روز رسانی قوانین و مقررات، تدوین سیاست های علمی مبنا در مدیریت منابع آب	قانون مندی و تصمیم گیری بر پایه شواهد
UNESCO, 2012	پیش بینی تغییرات منابع آب در اثر اقلیم، آلودگی یا بهره برداری، شبیه سازی سناریوهای آینده برای برنامه ریزی درازمدت، حفاظت از منابع برای نسل های آینده	پایداری

حکمرانی بد منابع آب - مطالعات اکتشافی (بعد تاریک)

حکمرانی بد به وضوح تضعیف می شود و این پدیده را می توان در ابعاد نشان داده شده در جدول ۲ مشاهده کرد. در نظام های دارای حکمرانی ضعیف، مطالعات اکتشافی اغلب فاقد هدف گذاری علمی و پیوند با سیاست گذاری هستند. چنین مطالعاتی ممکن است صرفاً جنبه صوری داشته، ابزار توجیه تصمیمات از پیش تعیین شده شوند یا در انحصار نهادی باقی بمانند. همچنین، نبود ارتباط مؤثر میان علم و سیاست، ضعف ظرفیت انسانی و نهادی، و کم توجهی به تأمین مالی بلندمدت، از جمله عواملی اند که موجب بی اثر شدن این مطالعات در تصمیم سازی و تضعیف زیرساخت دانشی حکمرانی آب می شوند.

در مقابل حکمرانی خوب، حکمرانی بد در منابع آب با ویژگی هایی همچون نبود شفافیت، ضعف پاسخ گویی، تصمیم گیری های سیاسی بدون پشتوانه علمی، و حذف مشارکت واقعی ذی نفعان تعریف می شود. در چنین چارچوبی، نه تنها منابع طبیعی در معرض خطر قرار می گیرند، بلکه ابزارهای علمی مانند مطالعات اکتشافی نیز یا نادیده گرفته می شوند یا در مسیر انحرافی قرار می گیرند (Molle, 2009; Jasanoff, 2004). جایگاه مطالعات اکتشافی به عنوان زیرساخت دانشی سیاست گذاری، در

جدول ۲. چالش ها و نقص های حکمرانی ضعیف در مطالعات اکتشافی منابع آب
Table 2. Challenges and Deficiencies of Poor Governance in Exploratory Studies of Water Resources

منابع	شرح	چالش
Ingram, 2008; UNDP, 2014	مطالعاتی بدون طراحی علمی، فاقد هدف کاربردی، گسسته از سیاست گذاری و منجر به داده های ناقص یا بلااستفاده.	مطالعات صوری و بی هدف
Jasanoff, 2004; Cash et al., 2003	مطالعات برای توجیه تصمیمات از پیش گرفته شده به کار می روند. تصمیمات مبنای استفاده از داده ها قرار می گیرند، نه بالعکس.	سوء استفاده ابزاری از نتایج
Edelenbos et al., 2013	اطلاعات مطالعاتی به صورت انحصاری نگهداری می شود و از انتشار عمومی و مشارکت ذی نفعان جلوگیری می شود.	انحصار اطلاعات و پنهان کاری
Cash et al., 2003	فقدان مکانیسم های مؤثر برای انتقال یافته های علمی به سیاست گذاران، حتی در صورت کیفیت بالای مطالعات.	شکاف بین علم و سیاست
World Bank, 2017; UNDP, 2014	نبود زیرساخت تحلیلی و نیروی متخصص برای بهره گیری از داده های اکتشافی در نهادهای متولی منابع آب.	ضعف در ظرفیت نهادی و انسانی

Shah, 2007; Molle, 2009	عدم اولویت‌بخشی به مطالعات اکتشافی در تخصیص منابع مالی و تمرکز بر پروژه‌های نمایشی کوتاه‌مدت.	بی‌توجهی به مطالعات اکتشافی در تخصیص بودجه
-------------------------	---	--

ابزارها و روش‌های مطالعات اکتشافی

سنجش‌ازدور و GIS برای پایش فضایی و زمانی منابع آب است (Anderson et al., 2015; Kirsch, 2006). در جدول ۳ انواع روش‌ها و ابزارهای مطالعات اکتشافی آورده شده است. همچنین، در رویکردهای نوین، تحلیل‌های اجتماعی - نهادی نیز به عنوان مکمل درک فنی منابع آب وارد مطالعات اکتشافی شده‌اند (Meinzen-Dick and Appasamy, 2002). این مجموعه اقدامات، زیربنای حکمرانی خوب را شکل می‌دهد، چرا که بدون داده‌های دقیق، هیچ سیاست‌گذاری مؤثر، مشارکتی و پاسخ‌گو در حوزه منابع آب امکان‌پذیر نخواهد بود.

مطالعات اکتشافی در منابع آب مجموعه‌ای از روش‌ها و ابزارهای فنی، داده محور و تحلیلی هستند که با هدف شناسایی کمی و کیفی منابع آب، ساختار آبخوان‌ها، دینامیک جریان و تعاملات سطحی و زیرزمینی طراحی می‌شوند. این مطالعات شامل بررسی‌های ژئوفیزیکی (مانند مقاومت ویژه الکتریکی و GPR، تحلیل‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی، آزمایش‌های پمپاژ، پایش سطح ایستابی، نمونه‌برداری‌های کیفی، مدل‌سازی‌های ریاضی MODFLOW، MT3DMS، استفاده از ابزارهای

جدول ۳. روش‌ها و ابزارهای مطالعات اکتشافی

Table 3. Methods and Tools of Exploratory Studies

ردیف	روش / ابزار	هدف اصلی	نوع داده خروجی	منابع علمی منتخب
1	ژئوفیزیک (ERT, EM, GPR, VES)	شناسایی ساختار زیرسطحی، ضخامت آبخوان، محل مناسب چاه	پروفیل‌های عمقی، نقشه لایه‌های آبدار	Kirsch, 2006
2	نقشه‌برداری زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی	شناسایی جنس، گسل، مرز آبخوان، ارزیابی ضریب هدایت	نقشه‌های زمین‌شناسی، ضرایب هیدرولیکی	Domenico and Schwartz, 1998
3	اندازه‌گیری‌های هیدرومتری	پایش سطح ایستابی، دبی چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوت	جداول زمانی سطح آب و دبی	Alley and Leake., 2004
4	آزمایش پمپاژ و بازیابی	تعیین ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان (S, K)	ضرایب انتقال، هدایت، نمودار افت سطح آب	Kruseman and de Ridder, 1994
5	نمونه‌برداری و تحلیل شیمیایی	ارزیابی کیفیت منابع آب، منشأ آلودگی، پایداری بهره‌برداری	جداول آنالیز شیمیایی، نمودارهای کیفی (Piper, Stiff, ...)	Hem, 1985
6	آنالیز ایزوتوپی و ردیاب‌ها	تعیین سن آب، مسیر جریان، نرخ تغذیه	ایزوتوپ‌های پایدار (H-O-18) یا پرتوزا (2)	Clark and Fritz, 1997
7	سنجش‌ازدور و GIS	پایش سطحی منابع، تغییرات پوشش اراضی، انتخاب محل حفاری	نقشه‌های تغییرات، مدل‌های مکانی آبخوان	Lillesand and Kiefer, 2008

8	مدل سازی عددی (MODFLOW, MT3DMS)	پیش بینی رفتار آبخوان، اثر پمپاژ، پخش آلاینده ها	خروجی های شبیه سازی هیدرولیکی و کیفی	Anderson et al., 2015
9	تحلیل نهادهای و اجتماعی	شناخت ساختار بهره برداری، ظرفیت حکمرانی محلی، مشارکت ذی نفعان	گزارش های میدانی، نتایج پرسش نامه و مصاحبه	Meinzen-Dick and Appasamy, 2002

سیر تاریخی حفاری اکتشافی و آزمون پمپاژ در آب زیرزمینی

مطالعات اکتشافی در منابع آب زیرزمینی، به ویژه از طریق حفاری چاه های اکتشافی و آزمون های پمپاژ، یکی از بنیادی ترین ابزارهای شناخت کمی و کیفی آبخوان ها هستند. سیر تحول این مطالعات از رویکردهای سنتی و تجربی به روش های علمی و فناورانه، همگام با رشد علوم زمین، مهندسی و مدل سازی عددی توسعه یافته است (جدول ۴).

در دوران پیشامدرن، چاه ها تنها با هدف دسترسی مستقیم به آب و بدون درک لایه های زیرسطحی یا اصول هیدرولوژیکی حفر می شدند. با ورود به قرن نوزدهم و آغاز مطالعات سیستماتیک زمین شناسی، نیاز به شناخت ساختارهای آبدار و تعیین محل، عمق و پتانسیل آبخوان ها باعث شد تا حفاری ها به رویکردی نیمه علمی گرایش پیدا کنند. اما نقطه عطف اساسی در دهه ۱۹۳۰ با معرفی مدل تئوریک Theis برای تحلیل آزمون پمپاژ و درک رفتار دینامیکی آبخوان ها رقم خورد. این مدل، بنیان مفهومی آزمون های پمپاژ را بر پایه روابط ریاضی قرار داد و امکان برآورد پارامترهای کلیدی مانند ضریب هدایت هیدرولیکی (K) و ضریب ذخیره (S) را فراهم کرد (Ahmadi et al., 2023).

از دهه های ۱۹۶۰ به بعد، با ظهور مدل های تحلیلی متنوع تر (مانند Cooper-Jacob برای آبخوان های تحت فشار) و انتشار دستورالعمل های اجرایی توسط مؤسسات پژوهشی

مانند ILRI، حفاری چاه های اکتشافی و آزمون های پمپاژ به استانداردهای مشخصی رسیدند. در این دوره، توجه به دقت طراحی، شرایط مرزی آبخوان و تحلیل داده ها به شکل جدی تری دنبال شد.

تحول مهم بعدی در دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ با ظهور مدل های عددی نظیر (MODFLOW) رخ داد که توانایی شبیه سازی جریان در محیط های سه بعدی را فراهم کردند. در این مرحله، داده های حاصل از آزمون های پمپاژ نه تنها برای ارزیابی محلی، بلکه برای کالیبراسیون مدل های منطقه ای مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین استفاده از تجهیزات مانند ثبت کننده های فشار دیجیتال (pressure transducer) و نرم افزارهای تحلیل خودکار، کیفیت و کمیت داده ها را به طور چشمگیری بهبود بخشید.

در دهه های اخیر، مطالعات اکتشافی با تلفیق ژئوفیزیک، سنجش از دور، GIS و تحلیل های ایزوتوپی، بُعد میان رشته ای یافته اند. چاه های اکتشافی اکنون نه تنها برای آزمون پمپاژ، بلکه برای نمونه برداری کیفی، ردیابی آلاینده ها، پایش بلندمدت سطح ایستابی و تغذیه مصنوعی مورد استفاده قرار می گیرند. آزمون های پمپاژ نیز به گونه ای طراحی می شوند که رفتار آبخوان در شرایط واقعی بهره برداری، با دقت و حساسیت بالا تحلیل شود.

در مجموع، چاه های اکتشافی و آزمون های پمپاژ، از ابزارهای سنتی تجربی به هسته های علمی تصمیم سازی در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی تبدیل شده اند.

جدول ۴. سیر تاریخی حفاری اکتشافی و آزمون پمپاژ در آب زیرزمینی
Table 4. Historical Evolution of Exploratory Drilling and Pumping Tests in Groundwater

منابع کلیدی	ویژگی‌ها و پیشرفت‌ها	دوره تاریخی
Bouwer, (1978)	حفاری چاه‌های دستی با هدف تأمین آب؛ بدون تحلیل علمی یا شناسایی ساختار آبخوان‌ها.	پیش از قرن ۱۹
Meinzer, 1923	آغاز مطالعات زمین‌شناسی؛ تعیین تجربی لایه‌های آبدار؛ تلفیق حفاری با بررسی‌های توپوگرافی و سنگ‌شناسی.	قرن ۱۹
Theis, 1935; Cooper and Jacob, 1946	توسعه مدل نظری آزمون پمپاژ (Theis)؛ تحلیل کمی آبخوان‌ها؛ شروع رویکرد علمی به آزمون‌ها.	دهه ۱۹۳۰-۱۹۵۰
Kruseman and de Ridder, 1994	تدوین دستورالعمل‌ها؛ معرفی تحلیل گرافیکی؛ تفکیک بین آبخوان‌های تحت‌فشار و آزاد؛ تفسیر داده با ابزار دستی.	دهه ۱۹۶۰-۱۹۸۰
Anderson et al., 2015	ورود مدل‌های عددی (MODFLOW)؛ استفاده از ابزارهای دیجیتال؛ افزایش دقت در تحلیل پارامترهای هیدرولیکی.	دهه ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰
Lillesand and Kiefer, 2008; Clark and Fritz, 1997	ادغام سنجش‌ازدور، GIS، ژئوفیزیک، ایزوتوپ؛ آزمون‌های چندمرحله‌ای؛ تحلیل خودکار و اتصال به پایگاه داده.	دهه ۲۰۰۰ تاکنون

اهداف حفاری چاه اکتشافی

نمود و آزمون‌های پمپاژ را برای تحلیل رفتار دینامیکی آبخوان انجام داد. همچنین این چاه‌ها بستر مناسب برای نمونه‌برداری از آب و تحلیل کیفیت آن فراهم می‌کنند و نقش مهمی در کالیبراسیون مدل‌های عددی و بررسی تأثیر پروژه‌های توسعه‌ای دارند. در نهایت، داده‌های حاصل از این حفاری‌ها نقش حیاتی در برنامه‌ریزی اصولی، تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد، و پیاده‌سازی حکمرانی خوب در مدیریت منابع آب ایفا می‌کنند (جدول ۵).

حفاری چاه‌های اکتشافی یکی از ارکان اصلی مطالعات منابع آب زیرزمینی به شمار می‌رود که اهداف متعددی را دنبال می‌کند. این چاه‌ها ابزار کلیدی برای شناسایی ویژگی‌های زمین‌شناسی زیرسطحی و ارزیابی کمی و کیفی سفره‌های آب هستند. از طریق حفاری اکتشافی، می‌توان لایه‌های آبدار و غیر آبدار را تفکیک کرده، پارامترهای هیدرولیکی مانند ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره را اندازه‌گیری

جدول ۵. اهداف حفاری چاه اکتشافی
Table 5. Objectives of Exploratory Well Drilling

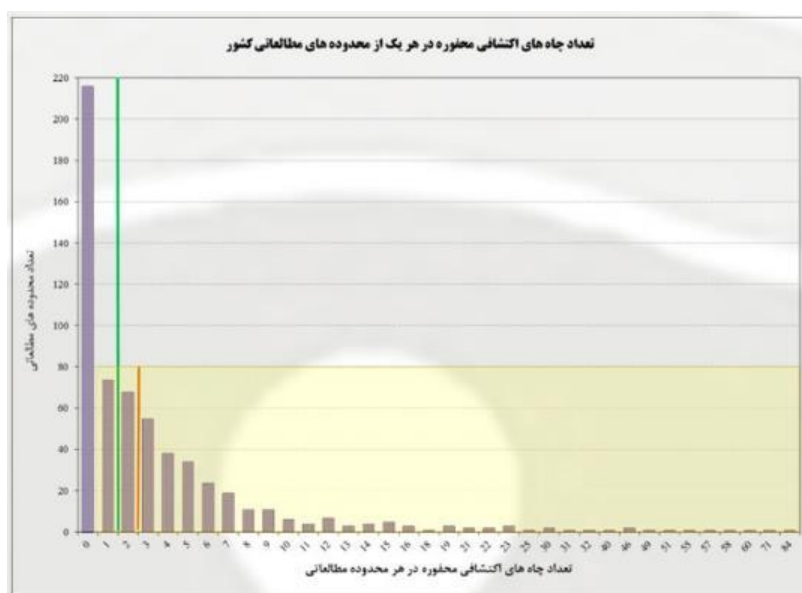
هدف	شرح
شناسایی ساختار زمین‌شناسی زیرسطحی	تعیین لایه‌های زمین‌شناسی، جنس، ضخامت و توالی آن‌ها و موقعیت سفره‌های آبدار
ارزیابی پتانسیل آبدهی آبخوان‌ها	محاسبه پارامترهای هیدرولیکی مانند ضریب هدایت هیدرولیکی و ضریب ذخیره
انجام آزمون‌های پمپاژ و پایش پاسخ آبخوان	تحلیل رفتار دینامیکی آبخوان هنگام برداشت آب و نحوه بازیابی سطح آب
برداشت نمونه آب جهت تحلیل کیفیت	بررسی کیفیت آب با توجه به نیاز شرب، کشاورزی و صنعت

شناسایی مناطق مناسب برای تزریق و تغذیه مصنوعی منابع زیرزمینی	بررسی شرایط مناسب برای تغذیه مصنوعی
فراهم سازی داده های واقعی برای تنظیم مدل های عددی شبیه سازی جریان آب زیرزمینی	کالیبراسیون مدل های عددی آب زیرزمینی
ثبت اطلاعات پایه جهت تحلیل بلندمدت تغییرات سطح ایستابی	پایش سطح ایستابی و نوسانات آن در طول زمان
مطالعه تأثیرات بهره برداری یا پروژه های عمرانی بر منابع آب زیرزمینی	ارزیابی تأثیر گذاری فعالیت های انسانی یا توسعه ای

وضعیت کنونی چاه اکتشافی در کشور

طی سال های ۱۳۴۰ تا ۱۳۹۵، تعداد ۲۵۶۲ حلقه چاه اکتشافی با متوسط عمق ۱۲۲ متر و متراژ کل ۳۱۲ هزار متر حفاری شده است. به عبارتی، سالانه به طور متوسط حدود ۴۷ حلقه چاه با مجموع متراژ ۵۶۷۰ متر حفاری شده است. در همین بازه، به طور میانگین در هر شرکت آب منطقه ای، سالانه ۱/۵ حلقه چاه با مجموع متراژ ۲۰۰ متر حفاری شده است. این در حالی است که سالانه ۱۰۰۰ کیلومتر معادل

۴۰۰۰ حلقه چاه بهره برداری با متوسط عمق ۲۵۰ متر حفر می شود. در حال حاضر ۲۲۰ محدوده مطالعاتی فاقد چاه اکتشافی هستند. سایر محدوده ها بین ۱ تا ۸۴ حلقه چاه دارند. به طور متوسط، در هر محدوده ۱/۵ حلقه چاه اکتشافی وجود دارد. اگر فقط محدوده های فاقد چاه اکتشافی در نظر گرفته شوند، این عدد به ۲/۵ حلقه در هر محدوده افزایش می یابد (شکل ۱).



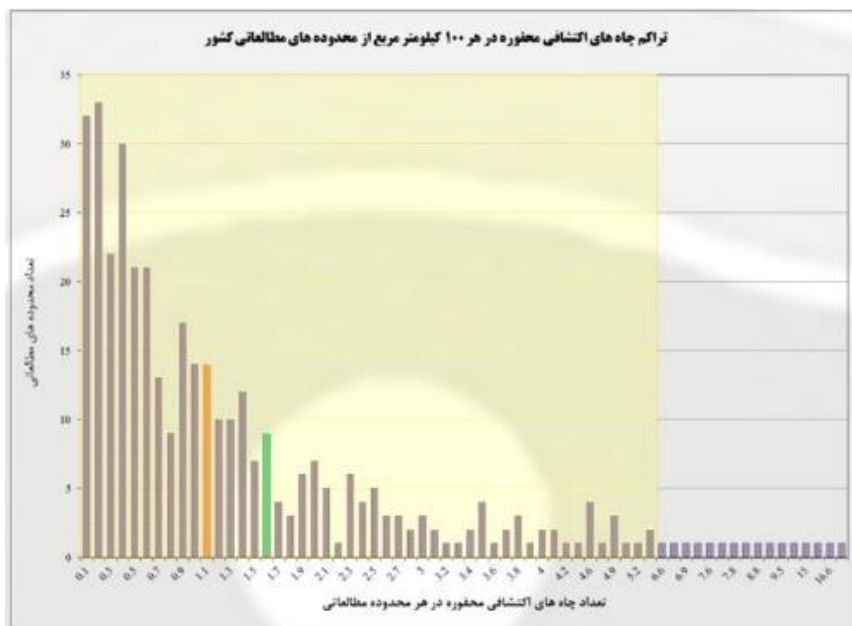
شکل ۱. تعداد چاه های اکتشافی در هر یک از محدوده های مطالعاتی کشور

Fig 1. Number of Exploratory Wells in Each of the Country's Study Areas

مربع (دشت لادیز استان سیستان و بلوچستان) متغیر است. تراکم متوسط در سطح کشور ۰/۵ حلقه در هر ۱۰۰ کیلومتر

تراکم چاه های اکتشافی از ۰/۰۲ حلقه در هر ۱۰۰ کیلومتر مربع (دشت رودبار جیرفت) تا ۳۰ حلقه در هر ۱۰۰ کیلومتر

مربع است. اگر فقط محدوده‌های فاقد چاه را در نظر بگیریم، این مقدار به ۱/۱ حلقه در هر ۱۰۰ کیلومتر مربع افزایش می‌یابد (شکل ۲ و جدول ۶).



شکل ۲. تراکم چاه‌های اکتشافی در هر ۱۰۰ کیلومتر مربع از محدوده‌های مطالعاتی کشور

Fig 2. Density of Exploratory Wells per 100 Square Kilometers in the Country's Study Areas

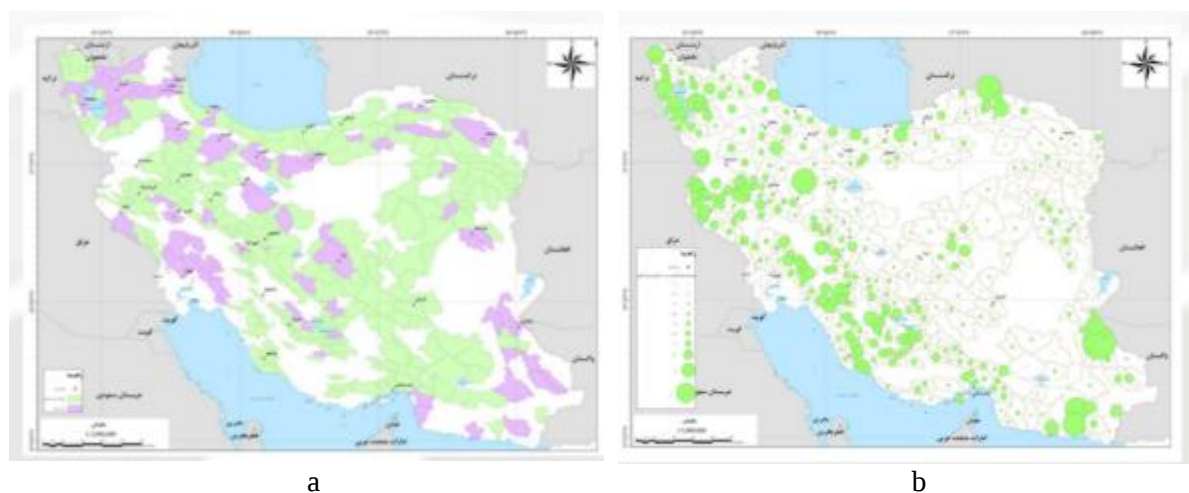
جدول ۶. تعداد، مترآژ و درصد تراکم چاه‌های اکتشافی در هر ۱۰۰ کیلومتر مربع از آبخوان‌های آبرفتی (Ganjaliipour, 2025)
Table 6. Number, Footage, and Density Percentage of Exploratory Wells per 100 Square Kilometers of Alluvial Aquifers (Ganjaliipour, 2025)

تراکم (100)	متوسط عرصه	مترآژ	تعداد	نام استان	تراکم (100)	متوسط عرصه	مترآژ	تعداد	نام استان
(KM ²)	(متر)	(متر)	(عدد)		(KM ²)	(متر)	(متر)	(عدد)	
0.6	58	17899	308	تهران	0.1	159	10982	69	کرمان
0.5	90	4579	51	قزوین	0.1	150	300	2	لرستان
0.3	101	8803	87	بوشهر	0.1	173	7975	46	سیستان و بلوچستان
0.2	106	3599	34	مرکزی	0.2	127	11331	82	همدان
0.2	194	2323	12	کردستان	0.2	169	13874	58	خراسان جنوبی
0.2	114	9250	81	فارس	0.2	147	2061	14	قم
0.6	124	24578	19	هرمزگان	0.2	128	14442	113	خراسان رضوی
0.4	87	1574	18	کهگیلویه و بویراحمد	0.8	84	1937	23	چهارمحال و بختیاری
0.9	137	8647	63	کرمانشاه	0.8	113	5078	45	خراسان شمالی
1.5	99	6816	69	اردبیل	1.1	127	4699	37	ایلام

زنجان	33	3017	91	1.1	آذربایجان غربی	222	17349	79	1.9
گلستان	101	18459	183	1.2	سمنان	48	7222	150	0.2
آذربایجان شرقی	91	10200	110	1.3	اصفهان	96	13910	145	1.4
مازندران	111	13415	121	2.4	البرز	37	3155	85	1.2
گیلان	118	15784	134	2.5	بوشهر	10	1000	100	0.3
یزد	226	43829	197	0.7	کل کشور	2562	312206	122	0.5

است (a). رنگ سبز مناطق دارای مطالعات نیمه تفصیلی و رنگ بنفش مناطقی که فاقد مطالعات کافی هستند یا مطالعات ناقص دارند را نشان می‌دهد. وجود عدم تطابق بین نواحی دارای مدل‌سازی و نواحی دارای داده‌های میدانی (چاه‌های اکتشافی)، می‌تواند موجب کاهش اعتبار و دقت نتایج مدل‌سازی در برخی مناطق شود. این امر اهمیت طراحی شبکه مناسب برداشت داده و تکمیل بانک اطلاعاتی اکتشافی در سراسر کشور را برجسته می‌کند.

مقایسه تراکم چاه‌های اکتشافی با موقعیت نواحی دارای مطالعات نیمه تفصیلی و خصوصاً مدل ریاضی، گویای انجام این مطالعات در برخی نواحی فاقد اطلاعات اکتشافی کافی و به تبع آن دقت اندک ضرایب هیدرودینامیک و مطالعات مذکور می‌باشد. در شکل ۳ تراکم چاه‌های اکتشافی در سمت راست با دایره‌های سبز روی نقشه نشان داده شده است (b). هر چه دایره بزرگ‌تر باشد، تراکم بالاتر است. مطالعات نیمه تفصیلی و مدل ریاضی در نقشه سمت چپ نمایش داده شده



شکل ۳. (a) نقشه تراکم چاه‌های اکتشافی در نواحی مختلف (b) نقشه نواحی دارای مطالعات نیمه تفصیلی
Fig. 3. a) Map of exploratory well density in different areas b) Map of areas with semi-detailed studies

ضریب انتقال (T)، ضریب ذخیره (S)، هدایت هیدرولیکی (K) و ضریب انتشار (D) به شمار می‌روند (Kruseman and de Ridder, 1994). این آزمون‌ها مبنای علمی و داده محور برای درک رفتار آبخوان، طراحی شبکه‌های

مقایسه وضعیت تراکم چاه‌های اکتشافی در ایران و برخی کشورها

آزمون‌های پمپاژ در چاه‌های اکتشافی یکی از اصلی‌ترین ابزارهای تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان‌ها نظیر

بهره‌برداری، و توسعه مدل‌های عددی هستند. با این حال، مقایسه بین دانسیته آزمون‌های هیدرودینامیکی در ایران و کشورهای پیشرو در مدیریت آب زیرزمینی (مانند ایالات متحده، استرالیا و هلند) نشان‌دهنده یک شکاف جدی در تولید داده‌های پایه و مطالعات اکتشافی است (جدول ۷). این شکاف را می‌توان از چند بعد تحلیل کرد:

جدول ۷. مقایسه وضعیت تراکم چاه‌های اکتشافی در ایران و برخی کشورها
Table 7. Comparison of Exploratory Well Density in Iran and Selected Countries

مشخصه کلیدی	نوع چاه	دانسیته آزمون در چاه‌های اکتشافی (تعداد آزمون/1000 کیلومتر مربع)	کشور
ابزار ساده، پوشش محدود	اغلب تک چاهی	2 - 0.5	ایران
دقیق، منظم، تحلیلی	چند چاهی	30 - 10	آمریکا
هدفمند، سری‌های زمانی	چند چاهی	20 - 10	استرالیا
فوق‌العاده دقیق و شبکه‌ای	چند چاهی	+30	هلند

۱. نگاه سیاست‌گذاران به آب زیرزمینی: سطح راهبردی یا منبع جایگزین؟

در کشورهای توسعه‌یافته، آب زیرزمینی نه تنها یک منبع طبیعی مهم، بلکه بخشی جدایی‌ناپذیر از ساختار راهبردی امنیت آبی و اقتصادی کشور به شمار می‌رود. در این کشورها، سیاست‌گذاران با درک عمیق از نقش حیاتی آب زیرزمینی، آن را به عنوان پشتیبان اصلی تاب‌آوری سرزمین در برابر تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های دوره‌ای و افزایش فشارهای جمعیتی در نظر می‌گیرند. به طور خاص، در مناطقی همچون جنوب غربی ایالات متحده یا بخش‌هایی از استرالیا که اقلیم خشک یا نیمه‌خشک دارند، آب زیرزمینی ستون فقرات سیستم تأمین آب در شرایط بحرانی تلقی می‌شود (Shah, 2007). همین نگاه راهبردی موجب شده است که این کشورها سرمایه‌گذاری‌های کلان و مداومی در زمینه پایش، مدل‌سازی و حفاظت از منابع زیرزمینی انجام دهند.

این کشورها دارای برنامه‌های ملی و بین‌دستگاهی برای حفاظت از آب زیرزمینی هستند که از حمایت قانونی، مالی

و فنی برخوردارند. سیاست‌های مرتبط با آب زیرزمینی در آن‌ها اغلب دارای پیوست‌های علمی و ارزیابی‌های اقتصادی - اجتماعی هستند که نقش آب زیرزمینی را در توسعه پایدار و امنیت غذایی و انرژی مشخص می‌سازند. در نتیجه، آزمون‌های پمپاژ و سایر مطالعات اکتشافی به صورت بخش جدایی‌ناپذیر از مدیریت یکپارچه منابع آب تلقی می‌شود. در مقابل، در ایران باوجود آنکه بیش از نیمی از آب مصرفی کشور (در برخی دشت‌ها حتی بیش از ۷۰٪) از منابع زیرزمینی تأمین می‌شود، هنوز نگاه سیاست‌گذاری در سطوح کلان بر آب سطحی متمرکز مانده است. نظام برنامه‌ریزی در ایران از دیرباز بر محور پروژه‌های بزرگ سدسازی و انتقال آب سطحی بنا شده و آب زیرزمینی بیشتر به عنوان یک منبع مکمل، اضطراری یا حتی غیررسمی تلقی شده است (Report on the prohibition of Komijan plain, 2021). این دیدگاه موجب شده تا اهمیت مطالعات اکتشافی دقیق و پایدار کمتر در سیاست‌های ملی برجسته شود و آزمون‌های پمپاژ به صورت پراکنده و محدود باقی بمانند.

و برنامه‌ریزان می‌توانند به این اطلاعات تکیه کنند، بلکه جامعه محلی، ذی‌نفعان و حتی نهادهای بین‌المللی نیز در تصمیم‌سازی مشارکت دارند.

در مقابل، نظام داده‌برداری در ایران عمدتاً تابع طرح‌های پروژه‌ای و مقطعی است. یعنی تا زمانی که یک پروژه عمرانی، اکتشافی یا مطالعاتی در جریان باشد، داده‌برداری نیز ادامه دارد؛ اما با اتمام پروژه، پایش متوقف می‌شود. این وابستگی به بودجه‌های مقطعی و غیر پایدار، موجب گسست در سری‌های زمانی داده و کاهش اعتبار نتایج مطالعات می‌شود (Report on the prohibition of Komijan plain, 2021).

افزون بر این، داده‌های آزمون‌های پمپاژ در بسیاری موارد به صورت فیزیکی یا فایل‌های پراکنده در دفاتر مشاوران یا ادارات محلی نگهداری می‌شوند و دسترسی به آن‌ها بسیار دشوار یا غیرممکن است. در سطح ملی، سامانه متمرکزی برای گردآوری، طبقه‌بندی و انتشار داده‌های مربوط به آزمون‌های هیدرودینامیکی وجود ندارد. همچنین، استانداردهای یکنواخت برای اجرای آزمون، تفسیر نتایج و ذخیره‌سازی داده‌ها اغلب رعایت نمی‌شوند که این موضوع قابلیت مقایسه و استفاده مجدد از داده‌ها را به شدت کاهش می‌دهد.

این تفاوت بنیادین در ساختار داده‌برداری، نه تنها موجب ضعف در پایش تغییرات زمانی و مکانی رفتار آبخوان‌ها می‌شود، بلکه توان کشور برای توسعه مدل‌های عددی، پیش‌بینی‌های علمی، و طراحی نظام بهره‌برداری پایدار را به شدت محدود کرده است؛ بنابراین، فقدان یک نظام داده‌برداری منسجم و ساختاریافته، یکی از دلایل اصلی پایین بودن دانسیته آزمون‌های پمپاژ در ایران نسبت به کشورهای توسعه‌یافته به شمار می‌رود.

از سوی دیگر، در اسناد راهبردی و توسعه‌ای کشور، جایگاه آب زیرزمینی غالباً به صورت کلی و غیردقیق ترسیم شده و ارتباط تنگاتنگ آن با امنیت ملی، امنیت غذایی و تاب‌آوری اقتصادی موردتوجه نظام‌مند قرار نگرفته است. این در حالی است که بحران فرونشست زمین، کاهش کیفیت منابع، و افت شدید سطح ایستابی نشانه‌هایی هشداردهنده از ناکارآمدی این نوع نگاه هستند.

۲. تفاوت در نظام داده‌برداری و پایش

در کشورهای توسعه‌یافته، داده‌برداری از منابع آب زیرزمینی یک فعالیت ساختارمند، منسجم، و بلندمدت محسوب می‌شود که در چارچوب نظام حکمرانی منابع آب قرار دارد. نهادهایی مانند سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS)، سازمان آب‌شناسی استرالیا، و مؤسسات اروپایی مشابه، شبکه‌های دائمی و گسترده‌ای از چاه‌های مشاهده‌ای، اکتشافی و پمپاژی را راه‌اندازی کرده‌اند. این چاه‌ها نه تنها برای پایش پیوسته سطح ایستابی و کیفیت آب زیرزمینی به کار می‌روند، بلکه داده‌های حاصل از آزمون‌های پمپاژ نیز در قالب سامانه‌های ملی اطلاعات آب مانند NWIS (National Water Information System) در آمریکا یا BOM در استرالیا به صورت طبقه‌بندی‌شده، مستند و عمومی منتشر می‌شوند.

در این کشورها، داده‌برداری به عنوان زیرساخت اصلی مدل‌سازی منابع آب، تخصیص بهینه، و سیاست‌گذاری مبتنی بر شواهد شناخته می‌شود. این فرآیند شامل استانداردسازی روش‌ها، استفاده از تجهیزات پیشرفته مانند دیتالاگرهای خودکار، حسگرهای هوشمند، چاه‌های مشاهده‌ای دیجیتال و نیز آموزش مستمر کارشناسان داده‌برداری است. سیستم‌های مدیریت داده نیز به گونه‌ای طراحی شده‌اند که یکپارچگی، کیفیت و دسترسی آزاد به اطلاعات را تضمین می‌کنند. در نتیجه، نه تنها پژوهشگران

۳. ظرفیت فنی و دسترسی به تجهیزات: زیرساخت

توانمند یا محدودیت در عمل

یکی دیگر از عوامل کلیدی در تفاوت دانسیته آزمون‌های پمپاژ بین ایران و کشورهای توسعه‌یافته، تفاوت در ظرفیت فنی نهادهای اجرایی و سطح دسترسی به تجهیزات استاندارد و دقیق است. در کشورهای پیشرو در مدیریت منابع آب، انجام آزمون‌های پمپاژ با استفاده از تجهیزات پیشرفته، دستورالعمل‌های فنی مدون، و تیم‌های تخصصی آموزش‌دیده انجام می‌شود. این کشورها از زیرساخت فنی و آزمایشگاهی بسیار بالایی برای طراحی، اجرای، و تحلیل آزمون‌های هیدرودینامیکی برخوردارند که امکان اجرای آزمون‌های چندمرحله‌ای، بلندمدت، و تکرارشونده را فراهم می‌سازد.

برای مثال، در ایالات متحده یا هلند، پمپ‌های باقابلیت کنترل دقیق دبی، دیتالاگرهای خودکار با وضوح زمانی بالا، حسگرهای دیجیتالی فشار و تجهیزات نمونه‌برداری کیفی آب بخشی از ابزار استاندارد آزمون‌ها هستند. علاوه بر این، در این کشورها دسترسی به سامانه‌های نرم‌افزاری پیشرفته برای تفسیر داده‌ها مانند AQTESOLV یا GMS رایج است و مهندسان با تکیه بر دانش تخصصی روزآمد، نتایج را در چارچوب مدل‌های عددی یا تصمیم‌یار تفسیر می‌کنند.

در ایران، با وجود پیشرفت‌های نسبی در برخی شرکت‌های مشاور و نهادهای دانشگاهی، ظرفیت فنی برای انجام آزمون‌های دقیق و قابل‌اعتماد هنوز به صورت یکپارچه و ملی توسعه‌نیافته است. در بسیاری از مناطق کشور، به ویژه در دشت‌های دور از مرکز، کمبود تجهیزات مانند دبی‌سنج‌های دقیق، حسگرهای فشار و ابزار ثبت داده با دقت بالا، موجب می‌شود تا آزمون‌ها به روش‌های ساده، دستی و بعضاً با دقت پایین اجرا شوند. این محدودیت‌ها نه تنها بر کیفیت داده‌های حاصل از آزمون تأثیر منفی می‌گذارند، بلکه موجب می‌شوند

بسیاری از چاه‌ها یا مورد آزمون قرار نگیرند، یا نتایج به دست آمده برای تحلیل‌های سطح بالا غیر قابل اتکا باشند.

از سوی دیگر، کمبود نیروی انسانی متخصص، به ویژه در مناطق غیر مرکزی، یکی دیگر از موانع جدی است. انجام آزمون‌های پمپاژ دقیق نیازمند تخصص‌هایی چون هیدروژئولوژی کاربردی، تحلیل داده‌های هیدرودینامیکی، و مدل‌سازی آبخوان است که هنوز در بدنه اجرایی بسیاری از نهادهای محلی به صورت مستمر و ساختاریافته وجود ندارد. آموزش‌های دوره‌ای، گواهی‌نامه‌های حرفه‌ای، و نظام ارزیابی کیفیت عملکرد که در کشورهای توسعه‌یافته رایج است، در ایران کمتر نهادینه شده‌اند.

در مجموع، ضعف در زیرساخت فنی و فقدان نظام پشتیبان برای تأمین، نگهداری و ارتقاء تجهیزات، در کنار پراکندگی دانش و مهارت‌های تخصصی، موجب شده‌اند تا آزمون‌های پمپاژ در ایران با چالش‌های متعددی مواجه باشند. این عوامل به طور مستقیم بر کاهش دانسیته، دقت و تداوم آزمون‌ها تأثیر گذاشته‌اند و در کنار عوامل نهادی و سیاستی، تصویر نهایی از تفاوت‌های جدی در تولید داده‌های هیدرودینامیکی بین ایران و کشورهای توسعه‌یافته را تکمیل می‌کنند.

۴. ساختار حقوقی و نهادی: مالکیت منابع و اختیار

مطالعه

ساختار حقوقی و نهادی، به ویژه در زمینه مالکیت منابع آب زیرزمینی و اختیارات نهادهای اجرایی، یکی از دلایل عمده تفاوت‌ها در انجام آزمون‌های پمپاژ و مطالعات هیدرودینامیکی بین ایران و کشورهای توسعه‌یافته است. این ساختار، نه تنها به توزیع قدرت و مسئولیت‌ها میان نهادهای مختلف، بلکه به میزان دسترسی به منابع و داده‌های مرتبط با آبخوان‌ها و نیز نحوه اجرای سیاست‌های مربوط به حفاظت و بهره‌برداری از آب زیرزمینی تأثیرگذار است.

در کشورهای توسعه یافته، معمولاً آب زیرزمینی به عنوان یک منبع عمومی و ملی در نظر گرفته می شود که تحت مدیریت نهادهای دولتی یا نیمه دولتی قرار دارد. به طور معمول، دولت ها مسئول پایش، حفاظت و بهره برداری از منابع آب زیرزمینی بوده و قوانین مربوط به استفاده از این منابع به طور دقیق و شفاف تدوین شده اند. برای مثال، در ایالات متحده، استفاده از منابع آب زیرزمینی تابع قوانین مختلف فدرال و ایالتی است که به طور کلی بر اساس اصل "حق بهره برداری منصفانه" (fair use) تنظیم می شود. در بسیاری از ایالت ها، استفاده از آب های زیرزمینی تحت نظارت مستقیم و مجوزهای ویژه قرار دارد که این امر شرایطی را برای انجام آزمون های پمپاژ به طور منظم و در مقیاس وسیع فراهم می کند.

در مقابل، در ایران، مشکلات مالکیت منابع آب زیرزمینی به ویژه در دشت ها و مناطق کشاورزی به شدت پیچیده است. از آنجا که آب زیرزمینی به طور عمده در اختیار کشاورزان و بهره برداران محلی قرار دارد و استفاده از آن بدون نظارت و کنترل های کافی انجام می شود، نهادهای دولتی با چالش های اساسی در اجرای پایش های دقیق و مطالعه آبخوان ها مواجه هستند. بسیاری از کشاورزان، به ویژه در مناطق فاقد سیستم های نظارتی دقیق، بدون در نظر گرفتن اثرات بلندمدت بهره برداری، به استخراج بیش از حد آب از چاه ها می پردازند. این امر موجب افت کیفیت آبخوان ها، کاهش سطح ایستابی و در نهایت بحران هایی چون فرونشست زمین می شود.

بنابراین، در ایران با وجود این که دولت قوانین مربوط به منابع آب زیرزمینی را وضع کرده است، به دلیل ضعف در اجرای مقررات و نبود نظارت های مؤثر، مطالعات دقیق و پایدار در سطح ملی انجام نمی شود و تنها در مقیاس های محدود و محلی بررسی ها صورت می گیرد.

در کشورهای توسعه یافته، نظارت و مدیریت منابع آب زیرزمینی به صورت متمرکز و هماهنگ توسط نهادهای ملی و محلی انجام می شود. این نهادها نه تنها مسئول اجرای قوانین و مقررات، بلکه همچنین در زمینه پایش، انجام آزمون های پمپاژ، و توسعه مدل های هیدرودینامیکی مشارکت دارند. برای مثال، در ایالات متحده، سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS) و سایر نهادهای دولتی به طور فعال در انجام مطالعات هیدرودینامیکی و آزمون های پمپاژ در سطح ملی و منطقه ای همکاری می کنند. این نهادها برای انجام مطالعات و آزمون ها دسترسی کافی به منابع مالی و تجهیزات دارند و به طور مستقیم در طراحی و اجرای این پروژه ها نقش دارند.

در ایران، ساختار نهادی برای مدیریت منابع آب زیرزمینی به طور عمده شامل وزارت نیرو، شرکت های مدیریت منابع آب ایران و شرکت های آب منطقه ای است. با این حال، این نهادها به دلیل محدودیت های منابع مالی، عدم هماهنگی بین سازمان ها، و ضعف در برنامه ریزی کلان، در اغلب موارد قادر به اجرای برنامه های مطالعاتی به صورت جامع و یکپارچه نیستند. این نهادها معمولاً محدود به اجرای پروژه های مقطعی و یا اقدامات اضطراری در پاسخ به بحران ها هستند که این امر تأثیر مستقیمی بر دانسیته آزمون های پمپاژ و کیفیت داده های حاصل از آن ها دارد.

یکی دیگر از مشکلات ساختار نهادی در ایران، عدم هماهنگی و یکپارچگی در سیاست ها و پروژه های مختلف است. به عنوان مثال، در بسیاری از موارد، وزارت جهاد کشاورزی، وزارت نیرو، و دیگر نهادهای دولتی برای انجام آزمون های پمپاژ به صورت جداگانه اقدام می کنند، بدون آنکه اطلاعات حاصل از این آزمون ها به طور مشترک در یک سیستم متمرکز جمع آوری و تحلیل شود (Ganjali pour et al., 2024). این پراکندگی موجب شده تا داده های مربوط به

آبخوان‌ها از انسجام کافی برخوردار نباشند و نتایج آزمون‌های پمپاژ تنها برای همان پروژه خاص قابل استفاده باشند.

۵. فقدان الزام قانونی برای انجام آزمون‌های دقیق

هیدرودینامیکی

یکی از دلایل اصلی پایین بودن دانسیته و کیفیت آزمون‌های پمپاژ در ایران نسبت به کشورهای توسعه‌یافته، فقدان چارچوب‌های الزام‌آور قانونی و مقررات مشخص برای انجام این نوع مطالعات در مراحل مختلف برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و نظارت بر منابع آب زیرزمینی است. این مسئله موجب شده است که انجام آزمون‌های هیدرودینامیکی که اساس بسیاری از تحلیل‌های کمی و کیفی در آبخوان‌هاست، نه به عنوان یک تعهد قانونی و ضروری، بلکه صرفاً به عنوان یک اقدام اختیاری یا وابسته به صلاحدید کارفرما یا ناظر طرح تلقی شود. در بسیاری از کشورها، از جمله ایالات متحده، استرالیا و اتحادیه اروپا، انجام آزمون‌های دقیق پمپاژ شرط صدور مجوز بهره‌برداری از آب زیرزمینی، یا حتی مجوز حفر چاه‌های جدید است. به عبارت دیگر، متقاضی حفر یا بهره‌برداری از چاه ملزم است قبل از دریافت مجوز نهایی، نتایج آزمون‌هایی مانند *drawdown test*، *step test* و *recovery test* را ارائه کند تا نهاد ناظر بتواند بر اساس داده‌های واقعی، در مورد پتانسیل بهره‌برداری، پایداری برداشت، و تأثیرات احتمالی آن تصمیم‌گیری نماید.

در ایران اما اگرچه در آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌های مربوط به منابع آب، به انجام مطالعات اولیه و اکتشافی اشاره شده، اما الزام صریح و عملیاتی برای انجام آزمون‌های پمپاژ با روش‌های استاندارد وجود ندارد. در بسیاری از موارد، مجوزهای حفر یا بهره‌برداری بر اساس اطلاعات تجربی یا تخمین‌های اولیه صادر می‌شود، بدون آنکه داده‌های دقیق از ضرایب انتقال، ذخیره و افت هد به دست آمده باشد. این موضوع، نه تنها موجب عدم دقت در تخمین ظرفیت آبخوان،

بلکه زمینه‌ساز بهره‌برداری‌های غیر پایدار، افت سطح آب و حتی تعارضات بین کاربران می‌شود.

در پروژه‌های مطالعات منابع آب در ایران (اعم از مطالعات پایه، تفضیلی و یا طرح‌های آمایش سرزمین)، معمولاً انجام آزمون‌های پمپاژ به صورت توصیه‌ای و در حد انتخاب مشاور یا کارفرما مطرح می‌شود. بدین معنا که الزامی برای انجام آن در تمامی چاه‌های اکتشافی یا پایش وجود ندارد و اغلب، به دلیل محدودیت بودجه یا زمان پروژه، از این مرحله صرف‌نظر می‌شود. حتی در پروژه‌هایی که آزمون پمپاژ انجام می‌شود، در بسیاری از موارد از روش‌های ساده، فاقد ابزار دقیق، یا دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت استفاده می‌شود که کیفیت داده‌های خروجی را به شدت کاهش می‌دهد.

این در حالی است که در کشورهای توسعه‌یافته، بخش مهمی از استانداردهای فنی مطالعات آبخوان‌ها، متکی بر نتایج دقیق و مستند آزمون‌های پمپاژ است. این استانداردها نه تنها در مرحله طراحی پروژه، بلکه در فرآیند ارزیابی، تصویب و تحویل پروژه نیز نقش اساسی دارند. وجود این نوع الزامات فنی و قانونی، سبب می‌شود کیفیت داده‌ها و قابلیت اعتماد به نتایج مطالعات در سطح بالایی باقی بماند.

اگرچه برخی آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها مانند آیین‌نامه بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، یا دستورالعمل‌های شرکت مدیریت منابع آب ایران، به موضوع مطالعات اکتشافی اشاره کرده‌اند، اما اغلب این اسناد از صراحت کافی برخوردار نیستند و استانداردهای دقیق و عملیاتی برای آزمون‌های پمپاژ تعیین نکرده‌اند. همچنین، بخش بزرگی از این اسناد به روز نشده‌اند و از نظر فنی با تحولات روش‌های روز دنیا (مانند استفاده از دیتالاگرها، چاه‌های مشاهده‌ای خودکار، تحلیل‌های عددی پیشرفته) همخوانی ندارند.

در غیاب چنین آیین‌نامه‌هایی، مشاوران و مجریان پروژه‌ها عموماً یا بر اساس روش‌های سنتی و غیر مستند عمل می‌کنند، یا اصول آزمون پمپاژ را به شکل حداقلی و بدون

۶. تفاوت در نگاه به مدل سازی

مدل سازی عددی منابع آب زیرزمینی، به ویژه با استفاده از نرم افزارهایی مانند MODFLOW، ابزاری کلیدی برای شبیه سازی رفتار آبخوان، تحلیل سناریوهای مختلف بهره برداری، و تصمیم سازی در حوزه مدیریت منابع آب محسوب می شود (Anderson et al., 2015). اما تفاوت اساسی میان ایران و کشورهای توسعه یافته، در نقش و جایگاه مدل سازی در چرخه سیاست گذاری، طراحی، پایش و اجراست. در طراحی یک مدل عددی قابل اتکا، دو مفهوم بنیادی مطرح است:

- پارامتر برای مدل: در این رویکرد، داده های واقعی میدان (مثل نتایج آزمون پمپاژ، داده های سطح آب، ضرایب هیدرودینامیکی و...) مبنای ساخت و کالیبراسیون مدل قرار می گیرند. هدف، استفاده از پارامترهای حاصل از آزمون های میدانی برای ایجاد مدل هایی واقع گرایانه و شبیه سازی دقیق رفتار آبخوان است.
- مدل برای پارامتر: در این حالت، به دلیل فقدان داده های میدانی، از مدل به عنوان ابزاری برای "تخمین" پارامترها استفاده می شود. در اینجا، مدل نه نتیجه یک پایگاه داده قوی، بلکه ابزاری جایگزین برای پر کردن شکاف داده ای است. این رویکرد به ویژه در شرایط کم داده، به ناچار مورد استفاده قرار می گیرد؛ اما دقت و اطمینان نتایج را کاهش می دهد.

در کشورهای توسعه یافته، رویکرد "پارامتر برای مدل" حاکم است. شبکه های گسترده چاه های مشاهده ای و آزمون های استاندارد پمپاژ، مجموعه ای از داده های دقیق و زمان مند را فراهم می کنند که به صورت مستقیم در مدل های عددی اعمال می شوند. به این ترتیب، مدل ها بازتابی از وضعیت

تحلیل علمی پیاده سازی می کنند. این موضوع باعث شده است که دانش تولید شده در مطالعات آبخوان های ایران، از اعتبار و قابلیت اعتماد در سطح بین المللی برخوردار نباشد و در بسیاری از موارد قابلیت انتشار در مجامع علمی نداشته باشد.

فقدان الزام قانونی برای انجام آزمون های دقیق، آثار منفی متعددی در سطح ملی به همراه دارد:

- کاهش دقت در طراحی شبکه های بهره برداری: نبود داده های دقیق هیدرودینامیکی، منجر به استفاده از ضرایب تجربی یا تخمینی در طراحی چاه ها و شبکه های برداشت می شود که می تواند منجر به افت بهره وری و بروز تعارضات بهره برداری گردد.
- عدم قابلیت کالیبراسیون مدل های عددی: بسیاری از مدل های شبیه سازی جریان آب زیرزمینی به دلیل فقدان داده های آزمون پمپاژ، بر پایه مقادیر فرضی یا داده های ناقص ساخته می شوند و از قابلیت پیش بینی مناسبی برخوردار نیستند.
- ضعف در تصمیم سازی های کلان: برنامه ریزی در سطح ملی برای کنترل برداشت، مقابله با فرونشست یا تخصیص آب زیرزمینی، بدون داده های آزمون پمپاژ، فاقد پشتوانه علمی دقیق است و ممکن است منجر به خطای سیاست گذاری شود.
- هدر رفت منابع مالی: نبود الزام قانونی برای تولید داده های دقیق، موجب اجرای چندباره مطالعات مشابه، اتلاف منابع و کاهش بهره وری پروژه های مطالعاتی می شود.

- محدودیت در کالیبراسیون مدل و تحلیل حساسیت
- کم‌توجهی به آموزش تخصصی در حوزه مدل‌سازی پیشرفته و تحلیل عدم قطعیت

پیماد این تفاوت نگاه به مدل‌سازی در ایران، کاهش دقت و اعتبار مدل‌ها، اتکای بیش از حد به مفروضات تجربی، تعداد مجهولات متعدد و ناتوانی در استفاده مؤثر از مدل به عنوان ابزار تصمیم‌سازی است. در نتیجه، خروجی مدل‌ها اغلب فاقد قابلیت اعتماد در برنامه‌ریزی کلان هستند و به‌روزرسانی و بهره‌برداری مستمر از آن‌ها صورت نمی‌گیرد. این موضوع موجب تکرار مطالعات مشابه و هدر رفت منابع مالی و انسانی می‌شود.

ضرورت حفاری چاه‌های اکتشافی

مدل مفهومی

در مطالعات منابع آب زیرزمینی، توسعه یک مدل مفهومی دقیق و جامع، نخستین گام برای درک رفتار هیدروژئولوژیکی سامانه و پایه‌ای برای طراحی مدل‌های عددی و سیاست‌گذاری‌های آبی است. مدل مفهومی (Conceptual Model) در واقع چارچوبی ذهنی و تحلیلی است که به صورت کیفی و کمی، سیستم آبخوان را در سه بعد کلیدی توصیف می‌کند (Anderson et al., 2015; Fitts, 2012):

- ساختار فیزیکی (Physical Structure)
- ساختار فرایندی (Process Structure)
- ناهمگونی مکانی (Spatial Variability)

در بخش ساختار فیزیکی، هندسه آبخوان، لیتولوژی، لایه‌های آبدار و غیر آبدار، موقعیت گسل‌ها، مرزهای هیدرولیکی و عمق سنگ کف شناسایی می‌شوند. چاه‌های اکتشافی در این بخش، اصلی‌ترین ابزار برای ثبت توالی

واقعی آبخوان هستند، نه بازسازی فرضی آن. در ایران اما به دلیل ضعف زیرساخت‌های داده‌ای و پراکندگی آزمون‌های پمپاژ، غالباً رویکرد "مدل برای پارامتر" به کار گرفته می‌شود؛ یعنی پارامترهای هیدروپنماکی مانند (K, T و S) از طریق کالیبراسیون مدل به دست می‌آیند نه از طریق آزمون‌های میدانی. این موضوع باعث تضعیف قابلیت اعتماد مدل و افزایش خطای پیش‌بینی می‌شود، به ویژه در شرایطی که مدل به عنوان ابزار تصمیم‌سازی مورد استناد قرار می‌گیرد. در کشورهایی مانند آمریکا، استرالیا، هلند و فرانسه، مدل‌سازی آب زیرزمینی نه تنها یک ابزار علمی، بلکه جزء لاینفک فرآیند تصمیم‌گیری است. داده‌های حاصل از آزمون‌های پمپاژ، پایش سطح آب، کیفیت آب، و بارش، به صورت ساختاریافته در سامانه‌هایی مانند NWIS در آمریکا گردآوری و به کار گرفته می‌شوند. این مدل‌ها معمولاً تحت نظارت نهادهای ملی نظیر (USGS) توسعه‌یافته و به طور دوره‌ای به‌روزرسانی و ارزیابی می‌شوند.

خروجی مدل‌ها در طراحی برنامه‌های تعادل بخشی، ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی، تخصیص منابع و تعیین حریم بهره‌برداری کاربرد مستقیم دارد. سیاست‌گذاران به این مدل‌ها اعتماد دارند، زیرا مبتنی بر داده‌های واقعی و قابل ردگیری هستند و فرآیندهای کالیبراسیون و صحت‌سنجی آن‌ها شفاف و مستند است.

در ایران، استفاده از مدل‌های عددی معمولاً به عنوان بخشی از گزارش‌های پروژه‌ای انجام می‌شود و غالباً خروجی آن‌ها به صورت محدود در تصمیم‌سازی‌های کلان وارد می‌شود. از دلایل این وضعیت می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کمبود داده‌های آزمون میدانی دقیق (به ویژه آزمون پمپاژ در چاه‌های اکتشافی)
- نبود شبکه‌های پایش دائمی و جامع

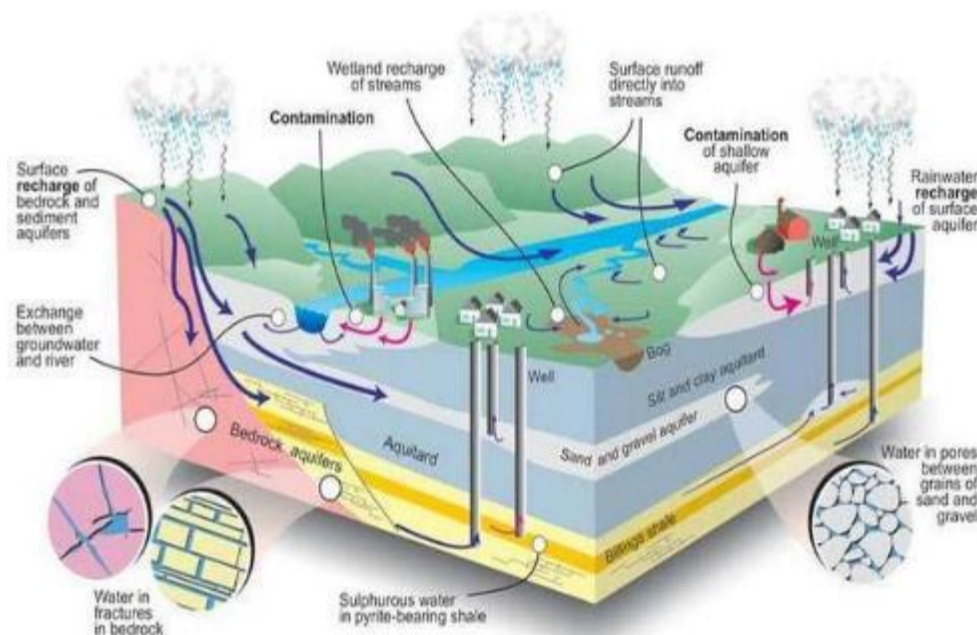
در واقع، پارامترهایی چون هدایت هیدرولیکی، تخلخل، ضریب ذخیره و آبدهی ویژه در نقاط مختلف دشت می‌توانند به شدت متغیر باشند. تنها با حفاری چندین چاه اکتشافی در نقاط مختلف و انجام آزمون‌های پمپاژ و نمونه‌برداری می‌توان این تنوع مکانی را اندازه‌گیری کرد و در مدل لحاظ نمود. این موضوع برای پیش‌بینی رفتار آبخوان در شرایط مختلف بحرانی یا بهره‌برداری حیاتی است (UNESCO, 2012).

در غیاب داده‌های دقیق حاصل از چاه‌های اکتشافی، مدل مفهومی صرفاً بر فرضیات و داده‌های پراکنده استوار خواهد بود و از دقت کافی برای استفاده در تصمیم‌گیری‌های فنی، اقتصادی و مدیریتی برخوردار نخواهد بود. به همین دلیل، حفاری اکتشافی نه تنها ضرورتی فنی، بلکه شرط تحقق حکمرانی مبتنی بر شواهد در مدیریت منابع آب زیرزمینی است. چنین مدلی، زیرساخت دانشی لازم برای طراحی سیستم‌های بهره‌برداری هوشمند، حفاظت کمی و کیفی، و تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی را فراهم می‌سازد (شکل ۴).

زمین‌شناسی، ترسیم مقاطع طولی و عرضی، شناسایی ساختارهای زیرسطحی و تعیین حدود واقعی مرزهای آبخوان هستند. این داده‌ها، پایه شناخت هندسی و توپوگرافی زیرسطحی برای مدل‌سازی سه‌بعدی و تحلیل دینامیک جریان زیرزمینی هستند (Domenico and Schwartz, 1998).

در بعد دوم، یعنی ساختار فرایندی، تأکید بر شناخت ورودی‌ها (مانند تغذیه از بارش، نفوذ از آب سطحی و پساب)، خروجی‌ها (پمپاژ، چشمه‌ها، تبخیر از سطح ایستابی) و تبادلات بین آب‌های سطحی و زیرزمینی است. چاه‌های اکتشافی با فراهم کردن اطلاعات تراز آب، امکان تحلیل جهت و شیب جریان، شناسایی مناطق تغذیه و تخلیه، و بررسی تبخیر از سطح ایستابی را فراهم می‌کنند. آزمون‌های پمپاژ نیز نرخ پاسخ‌دهی آبخوان به برداشت را مشخص می‌کند که برای تحلیل بهره‌برداری پایدار ضروری است (Reilly and Harbaugh, 2004).

سومین بعد، ناهمگونی مکانی پارامترها است. در مدل مفهومی، فرض همگن بودن آبخوان نادرست و نادقیق است.



شکل ۴. مدل مفهومی آب زیرزمینی دره اتاوا، کانادا

Fig. 4. Conceptual Model of Groundwater in the Ottawa Valley, Canada

ماهیت دینامیک آبخوان

درک دقیق ماهیت دینامیک آبخوان‌ها زیربنای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی است. آبخوان‌ها سامانه‌هایی پویا و واکنش‌پذیر به تغییرات اقلیمی، برداشت انسانی و عوامل طبیعی هستند. یکی از چالش‌های اساسی در بسیاری از آبخوان‌های کشور، افت پیوسته و شدید سطح ایستابی است که نه تنها منجر به کاهش دسترسی به منابع آب شیرین می‌شود، بلکه بر پارامترهای کلیدی هیدروژئولوژیکی نیز تأثیر مستقیم و گاه برگشت‌ناپذیر دارد. حفاری چاه‌های اکتشافی و آزمون‌های پمپاژ، ابزارهایی ضروری برای درک این پویایی‌ها و تغییرات هستند (Domenico and Schwartz, 1998; Kruseman and de Ridder, 1994).

در شرایط افت شدید سطح ایستابی، ممکن است لایه‌های بالایی آبدار به طور کامل خشک شوند. این پدیده باعث می‌شود ضریب انتقال ($T = K \times b$) کاهش یابد، چراکه ضخامت اشباع (b) کاهش می‌یابد. مثلاً در یک آبخوان آزاد

با هدایت هیدرولیکی ثابت، اگر سطح ایستابی ۲۰ متر پایین‌تر رود و بخشی از لایه آبدار غیرفعال شود، مقدار b کاهش‌یافته و در نتیجه ضریب انتقال نیز به نسبت مستقیم کاهش خواهد یافت. این کاهش به معنای کاهش ظرفیت انتقال آب در آبخوان و پایین آمدن پتانسیل برداشت ایمن است (Fitts, 2012).

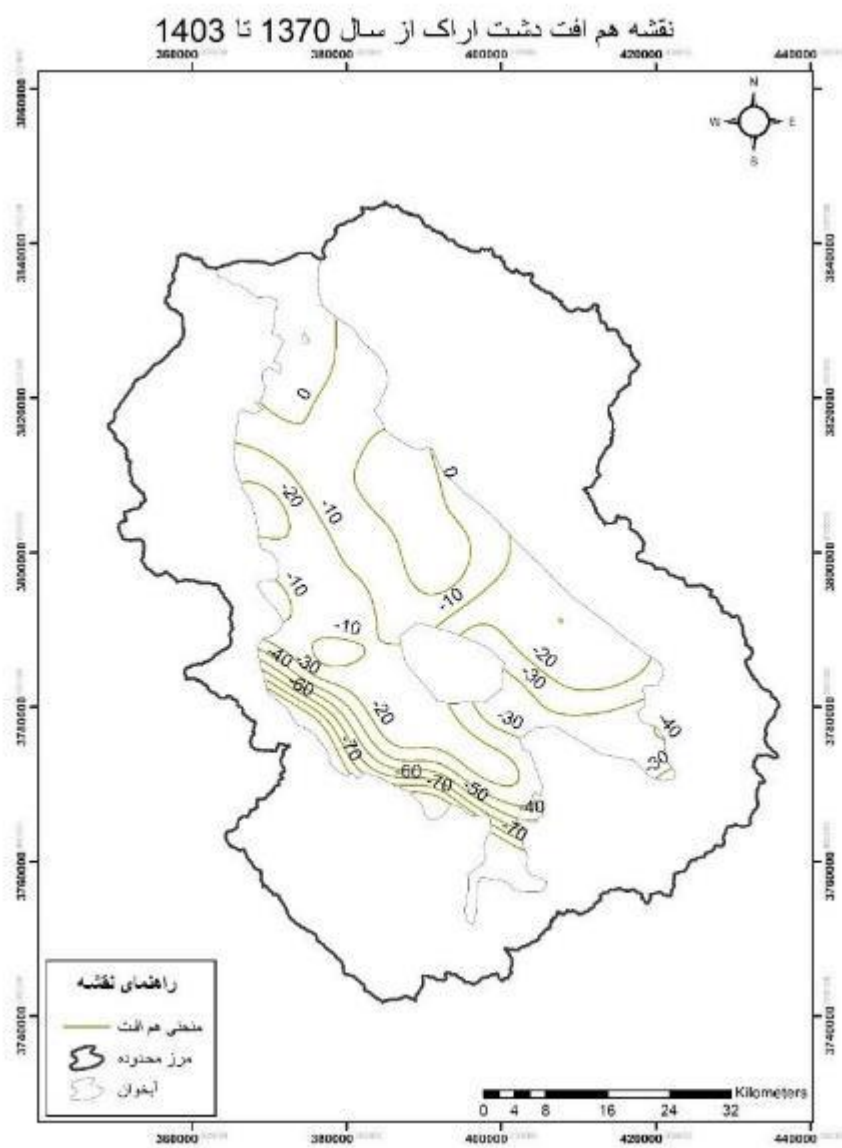
از سوی دیگر، افت سطح ایستابی می‌تواند سبب انتقال بهره‌برداری به نواحی با ویژگی‌های متفاوت از لحاظ تخلخل، نفوذپذیری یا حتی بافت رسوبی شود. در برخی موارد، ورود به نواحی عمیق‌تر که دارای مصالح ریزدانه‌تر یا سیمانی شده هستند، باعث کاهش هدایت هیدرولیکی (K) نیز می‌شود. این تغییرات تنها با پایش مستمر از طریق چاه‌های اکتشافی و تحلیل نتایج آزمون‌های پمپاژ قابل تشخیص و مدل‌سازی است (Anderson et al., 2015).

در عمل، این تغییرات پارامترها باعث می‌شوند مدل‌های مفهومی قبلی دیگر معتبر نباشند و نیاز به بازنگری پیدا کنند. برای مثال، در برخی دشت‌های ایران افت‌های چند ده متری

می‌شوند. مدل مفهومی آبخوان که سه مؤلفه‌ی کلیدی ساختار فیزیکی (Physical Structure) شامل لایه‌ها، گسل‌ها و مرزها؛ ساختار فرآیندی (Process Structure) شامل جریان ورودی و خروجی، تبخیر و تغذیه؛ و تغییرپذیری مکانی (Spatial Variability) شامل توزیع مکانی S ، K و $porosity$ نیازمند داده‌های واقعی و به روز است. در غیر این صورت، سیاست‌گذاری‌ها بر پایه فرضیات نادرست و شرایط گذشته انجام می‌گیرند (Ahmadi et al., 2022).

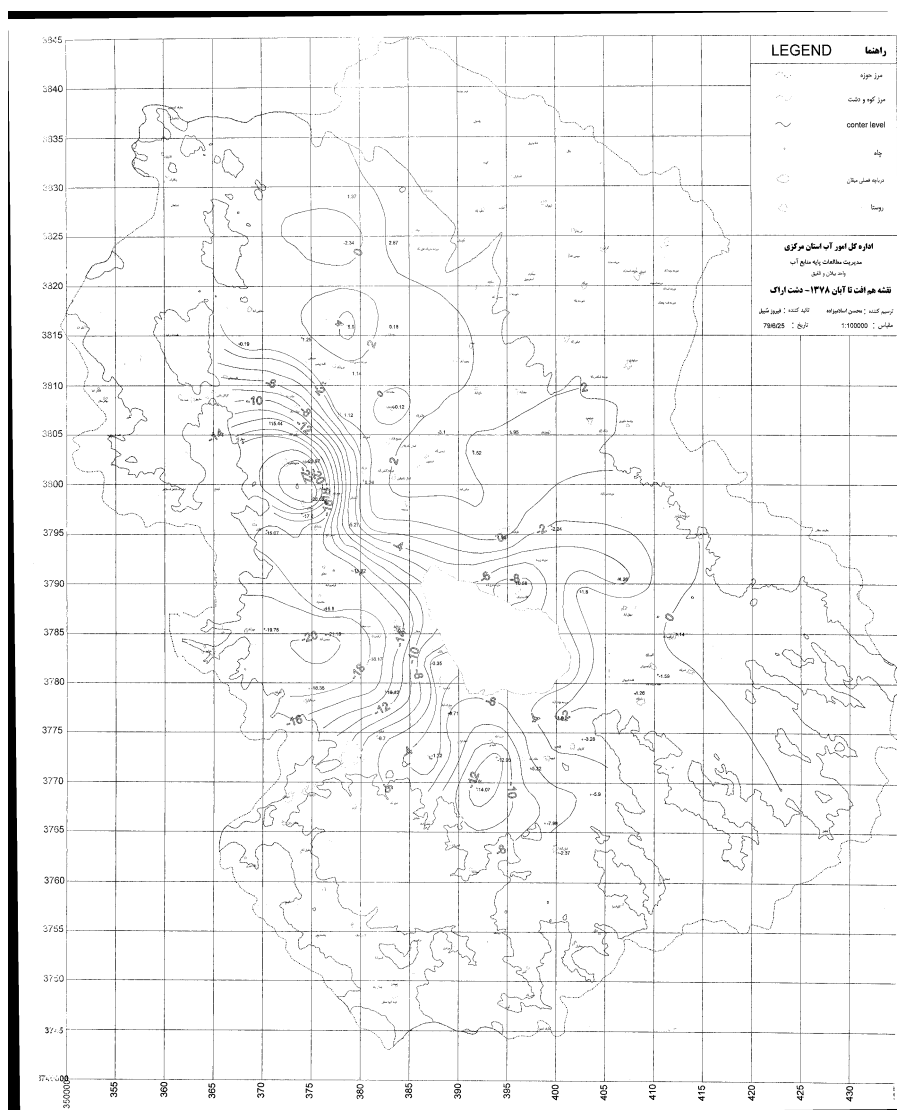
در نهایت، تحلیل تغییرات در ضرایب هیدرودینامیکی تنها از طریق تکرار آزمون‌های پمپاژ در بازه‌های زمانی مشخص و مقایسه با نتایج پیشین امکان‌پذیر است. چنین رویکردی، در قالب حکمرانی مبتنی بر شواهد (Evidence-based Governance)، ضامن سیاست‌گذاری دقیق، پاسخ‌گو و آینده‌نگر خواهد بود (UNESCO-IHP, 2021).

سطح ایستایی باعث خشک شدن کامل بخشی از لایه‌های آبدار و انتقال بهره‌برداری به لایه‌های کم نفوذ و کم تغذیه شده است که عملاً باعث تغییر در ضریب ذخیره (S) از مقدار معمول آبخوان آزاد به مقدار پایین‌تر در شرایط نشتی می‌شود. در شکل ۵ و ۶ نقشه‌های هم‌افت سطح آب زیرزمینی دشت اراک از سال‌های ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۳ و ۱۳۶۴ تا ۱۳۷۸ و همچنین در شکل ۷ همپوشانی دو نقشه ۵ و ۶ آورده شده است. به طور مثال اگر چاه اکتشافی در سال ۱۳۷۰ حفر شده و سپس خشک شده باشد اطلاعات حاصل از آن دیگر برای مدل‌های مفهومی قابل استفاده نیست و باید نقشه‌های جدید با اطلاعات چاه‌های اکتشافی جدید مورد ارزیابی قرار گیرند تا مدل‌های مفهومی قابل اتکا باشند (Report on the prohibition of Arak plain, 2024). از این منظر، چاه‌های اکتشافی نه فقط ابزار اطلاعاتی، بلکه عنصر دینامیک و زنده در به‌روزرسانی مدل مفهومی محسوب



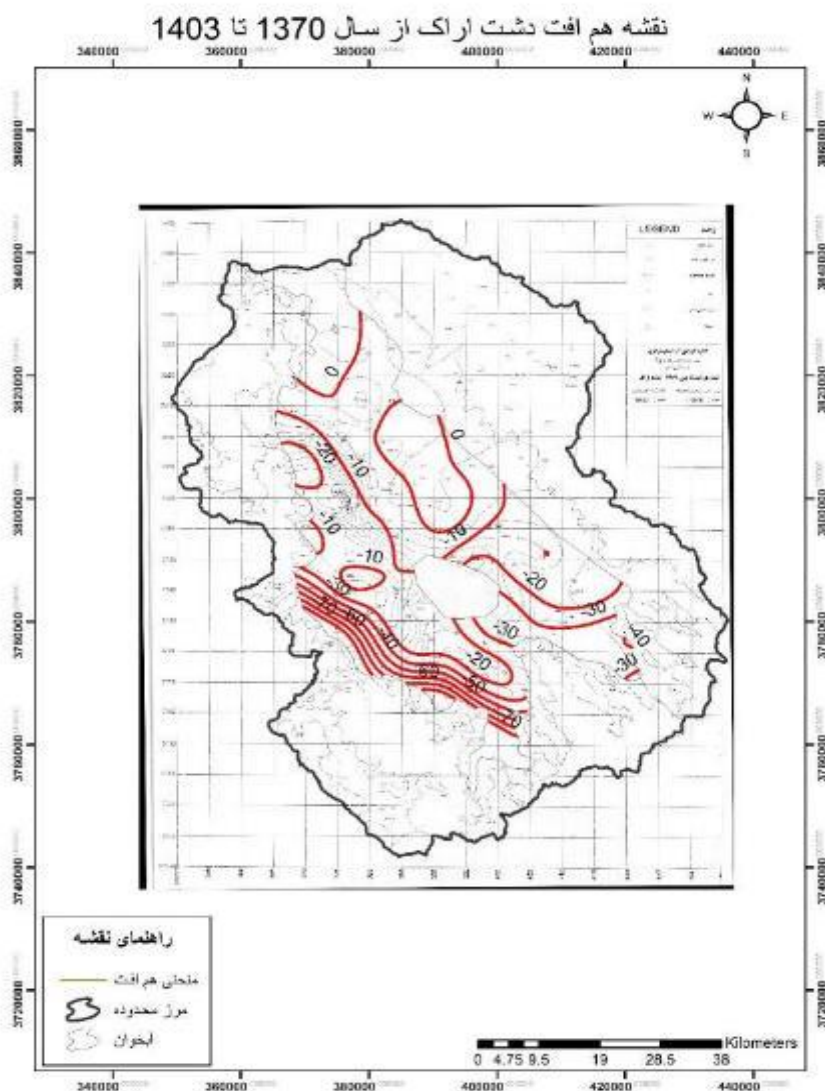
شکل ۵. نقشه هم‌افت دشت اراک از سال ۱۳۷۰ تا ۱۴۰۳

Fig. 5. Land subsidence contour map of Arak Plain from 1991 to 2024



شکل ۶. نقشه هم افت دشت اراک از سال ۱۳۶۴ تا ۱۳۷۸

Fig. 6. Land subsidence contour map of Arak Plain from 1985 to 1999



شکل ۷. همپوشانی دو نقشه هم افت دشت اراک

Fig 7. Overlay of the two land subsidence contour maps of Arak Plain

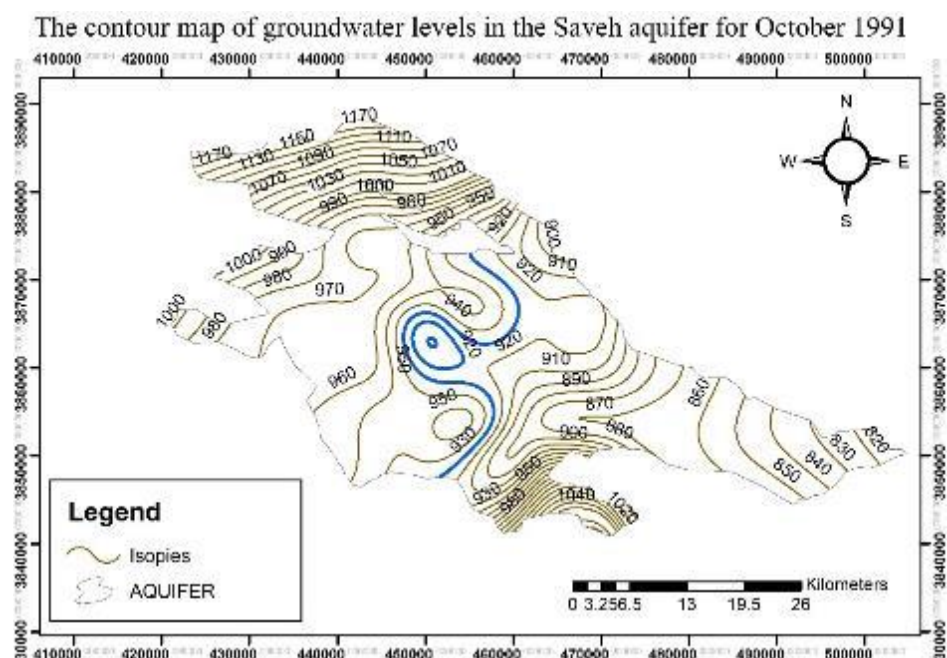
پدیده‌هایی چون تداخل مخروط‌های افت، افت مفرط سطح ایستابی، و کاهش بازدهی چاه‌ها به شکل فزاینده‌ای مشاهده شود (Custodio and Llamas, 1983; Foster and Chilton, 2003) در این شرایط، ضرورت شناخت دقیق ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان، مکان‌یابی بهینه چاه‌های جدید، و تحلیل کمی تأثیر بهره‌برداری چاه‌ها بر یکدیگر، ایجاب می‌کند که حفاری چاه اکتشافی و انجام

تغییر در بهره‌برداری و اثرات متقابل چاه‌ها

در سال‌های اخیر، تغییرات در الگو و شدت بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موجب بروز مسائل پیچیده‌ای در آبخوان‌ها شده است. افزایش تعداد چاه‌ها، برداشت بیش از حد مجاز، تغییر در اهداف بهره‌برداری (مثلاً از کشاورزی به صنعت یا شرب) و کاهش تغذیه طبیعی در اثر خشکسالی‌ها، سبب شده تا

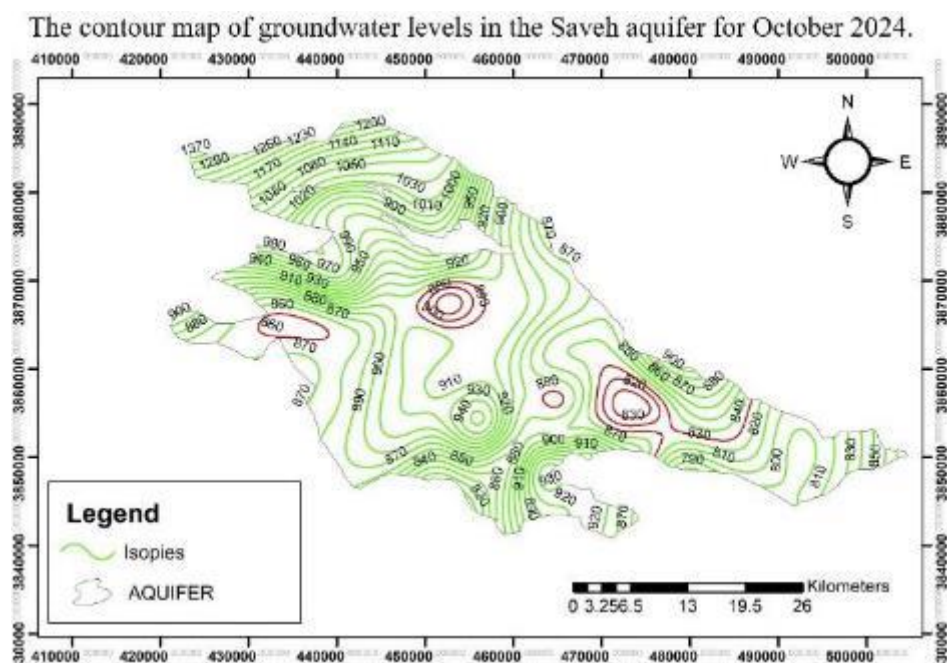
آزمون پمپاژ به عنوان دو ابزار کلیدی مورد توجه قرار گیرند. پاسخ دینامیکی آبخوان به تغییرات بهره‌برداری تغییر در شدت و الگوی بهره‌برداری می‌تواند سبب تغییرات گسترده‌ای در رفتار هیدرودینامیکی آبخوان شود. در بسیاری از موارد، افت ناگهانی یا مداوم سطح ایستابی، کاهش دبی خروجی چاه‌ها، یا حتی خشک شدن کامل برخی از چاه‌های بهره‌بردار، به دلیل شناخت ناکافی از ظرفیت واقعی آبخوان اتفاق می‌افتد. افزایش برداشت از چاه‌ها (چه به صورت افزایش دبی هر چاه، چه به صورت افزایش تعداد چاه‌ها) معمولاً باعث افت سطح ایستابی در مناطق برداشت می‌شود. این افت موضعی، گرادیان هیدرولیکی را افزایش داده و ممکن است جهت جریان را در سطح محلی یا حتی در مقیاس دشت تغییر دهد. به عبارتی، نقاط برداشت شدید به زون‌های تخلیه (sink zones) تبدیل می‌شوند. به طور مثال در شکل ۸ و ۹ نقشه‌های هم تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان ساوه در سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۴۰۳ آورده شده است که ملاحظه می‌شود در سال ۱۴۰۳ تعداد نقاط برداشت شدید (زون‌های تخلیه) از سال ۱۳۷۰ بیشتر است که در نتیجه افزایش برداشت از چاه‌ها و تمرکز چاه‌های بهره‌برداری در یک مکان ایجاد شده است. در طول زمان، با افزایش برداشت، مخروط‌های افت در اطراف چاه‌ها توسعه می‌یابند و با یکدیگر همپوشانی پیدا می‌کنند. این امر می‌تواند باعث بروز شکست در الگوی طبیعی جریان و شکل‌گیری گرادیان‌های مصنوعی شود که منجر به انحراف مسیرهای تغذیه طبیعی، تغییر مسیر مهاجرت آلاینده‌ها، کاهش پتانسیل انتقال آب از نواحی تغذیه به نواحی تخلیه (مثلاً قنوات یا چشمه‌ها) می‌گردد. به طور مثال در شکل ۱۰ و ۱۱ نقشه‌های جهت جریان آبخوان ساوه در سال‌های ۱۳۷۰ و ۱۴۰۳ آورده شده است که ملاحظه می‌شود در نقاط مشخص شده جهت

طبیعی جریان از سال ۱۳۷۰ تا سال ۱۴۰۳ دچار تغییر شده و شکست در الگوی طبیعی جریان در اثر برداشت بی‌رویه و توسعه مخروط‌های افت ایجاد شده است. هر چاه بهره‌برداری یک مرکز افت فشار در آبخوان ایجاد می‌کند. افزایش تعداد این مراکز به معنای تغییر در ساختار خطوط چاه مشاهده‌ای آب زیرزمینی است. در گذر زمان، اگر چاه‌ها بدون ملاحظات فنی و فاصله‌گذاری علمی حفر شوند، ساختار جریان آب می‌تواند کاملاً مختل شود. به طور خاص، در آبخوان‌های با پوشش رسوبی ناهمگن یا شکستگی‌های محلی، افزایش چاه‌ها ممکن است باعث بروز جهت‌گیری غیرمنتظره در جریان آب شود که نه تنها پیش‌بینی را دشوار می‌سازد، بلکه احتمال مهاجرت آلاینده‌ها یا شورشدگی منابع را افزایش می‌دهد (Foster and Chilton, 2003). تغییر در الگوهای جریان لزوماً آبی نیست. بلکه اغلب، آثار آن در طول زمان و به شکل تجمعی (Cumulative) ظاهر می‌شود. به ویژه در آبخوان‌های تحت فشار یا نشتی که واکنش به برداشت‌ها با تأخیر همراه است، ممکن است سال‌ها پس از شروع بهره‌برداری شدید، انحراف جدی در جریان مشاهده شود. این تأخیر در واکنش باعث می‌شود مدیران منابع آب در ابتدا متوجه عمق مشکل نشوند، اما پس از مدتی با کاهش گسترده منابع مواجه شوند (Custodio and Llamas, 1983). در شرایط برداشت بیش از حد، ممکن است جهت جریان به گونه‌ای تغییر کند که برخی نواحی تخلیه طبیعی (مانند قنوات یا چشمه‌ها) به نواحی تغذیه معکوس تبدیل شوند به این پدیده برگشت جریان (flow reversal) گفته می‌شود که نشانه‌ای از فشار هیدرولیکی معکوس است و معمولاً در دشت‌هایی با افت‌های بسیار زیاد رخ می‌دهد (Anderson et al., 2015).



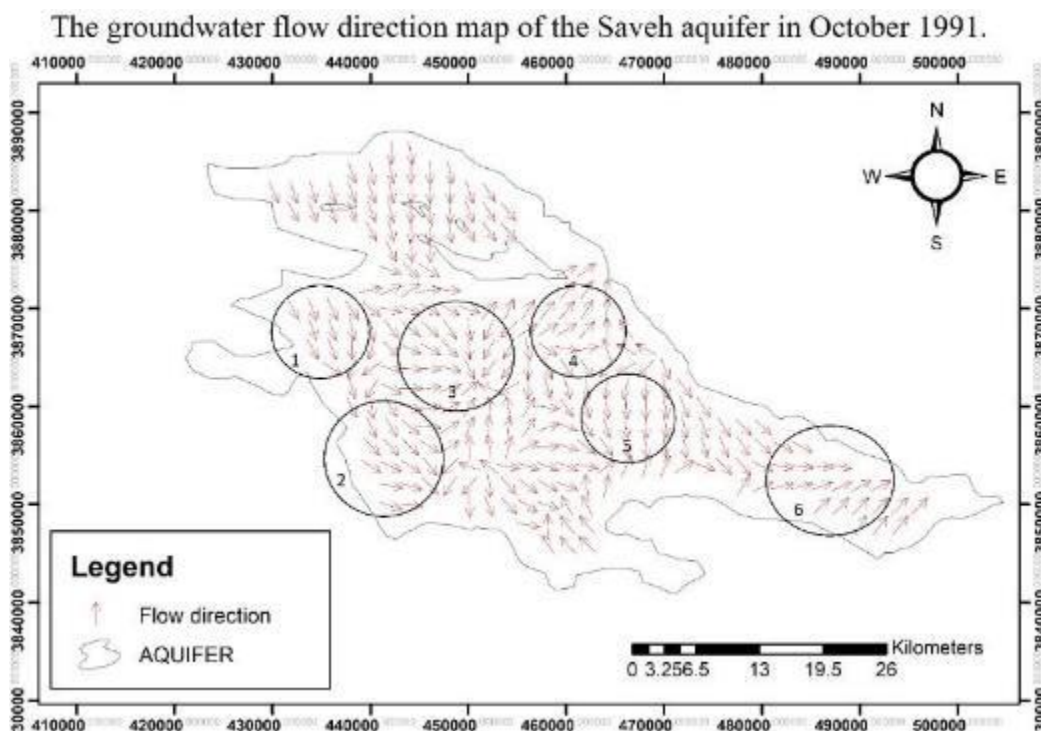
شکل ۸. نقشه هم‌تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان ساوه در سال ۱۳۷۰

Fig. 8. Groundwater table contour maps of saveh aquifer in 1991



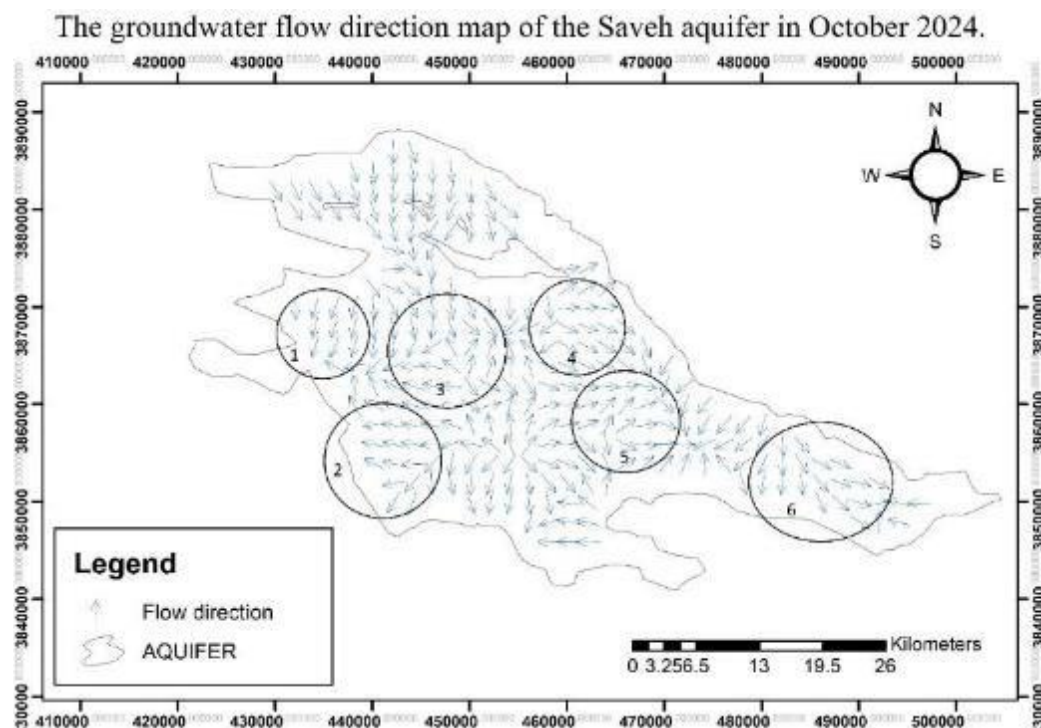
شکل ۹. نقشه هم‌تراز سطح آب زیرزمینی آبخوان ساوه در سال ۱۴۰۳

Fig. 9. Groundwater table contour maps of saveh aquifer in 2024



شکل ۱۰. نقشه جهت جریان آبخوان ساوه در سال ۱۳۷۰

Fig. 10. Groundwater flow direction maps of saveh aquifer in 1991

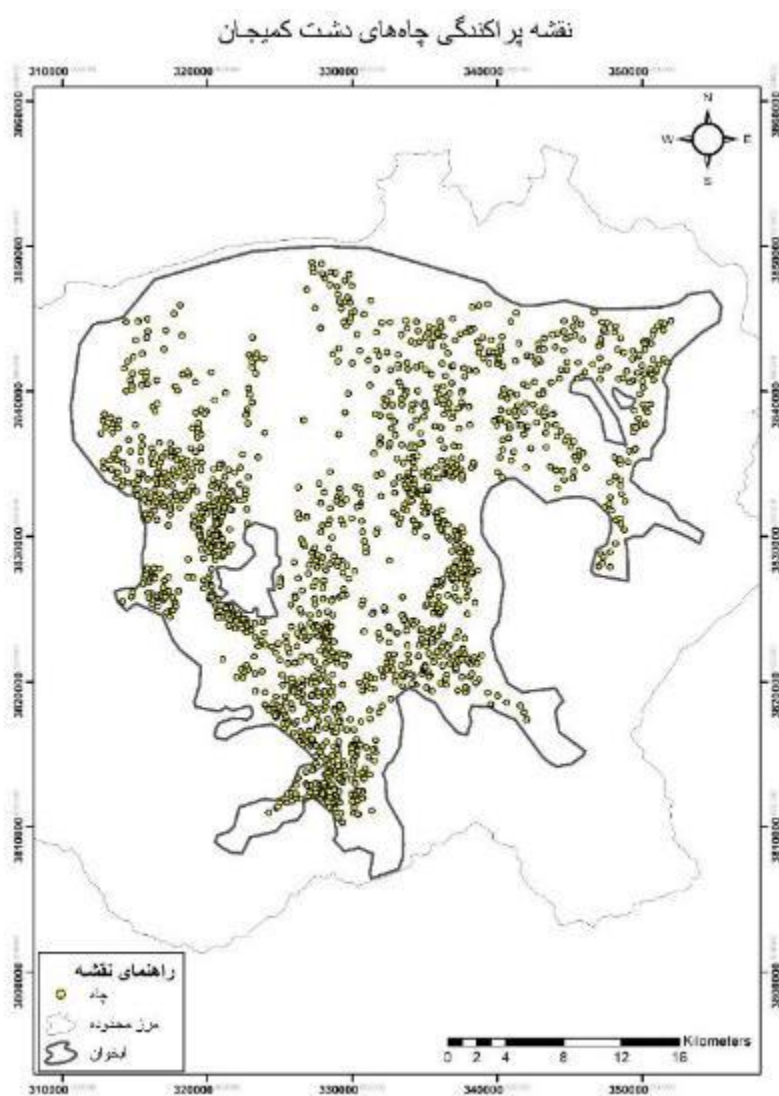


شکل ۱۱. نقشه جهت جریان آبخوان ساوه در سال ۱۴۰۳

Fig. 11. Groundwater flow direction maps of saveh aquifer in 2024

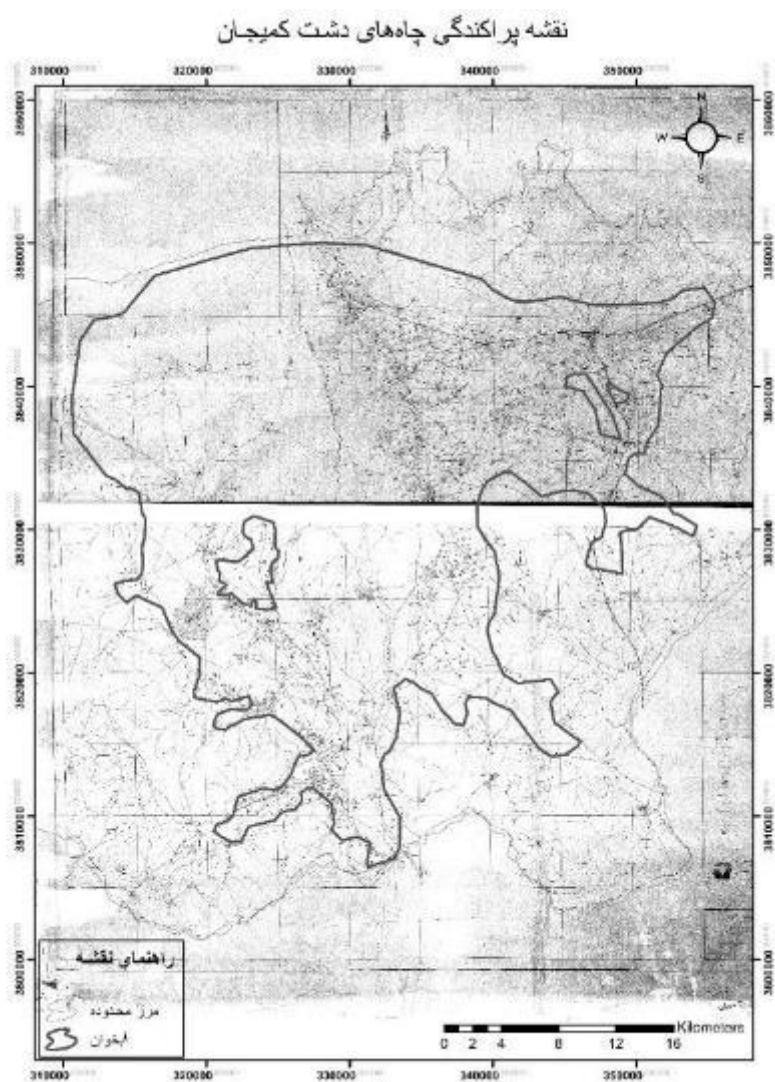
برای پیشگیری از این پیامدها، باید ابتدا پارامترهای کلیدی مانند ضریب هدایت هیدرولیکی (T) و ضریب ذخیره (S) از طریق آزمون‌های میدانی به دست آید (Kruseman and de Ridder, 1994). حفاری چاه اکتشافی با هدف دستیابی به مقاطع زمین‌شناسی دقیق و بررسی کیفیت و کمیت زون‌های آبدار، پیش‌نیاز این آزمون‌هاست. در واقع، بدون چاه اکتشافی و اطلاعات ژئوهیدرولوژیک اولیه، طراحی آزمون پمپاژ علمی و قابل استناد ممکن نخواهد بود (Driscoll, 1986). یکی از پیامدهای مستقیم افزایش چاه‌ها در یک محدوده، تداخل مخروط‌های افت و بروز اثرات متقابل بین چاه‌ها است. این پدیده باعث افت بیشتر سطح ایستابی نسبت به شرایط برداشت مجزا می‌شود و منجر به کاهش بازدهی چاه، افزایش مصرف انرژی و افت پایدار آبخوان می‌گردد (Bear, 1979). برای تحلیل علمی این پدیده، انجام آزمون پمپاژ با ثبت داده در چاه‌های مشاهده‌ای اطراف، ابزاری مؤثر و ضروری است. این روش، امکان ترسیم خطوط هم‌افت و مدل‌سازی دامنه تأثیر هیدرولیکی چاه‌ها را فراهم می‌کند و در نتیجه، تصمیم‌گیری برای فاصله‌گذاری بهینه بین چاه‌ها بر مبنای داده‌های میدانی انجام خواهد شد. تحلیل و پیش‌بینی رفتار بلندمدت آبخوان یکی از مهم‌ترین کاربردهای داده‌های حاصل از چاه‌های اکتشافی و آزمون پمپاژ، استفاده در مدل‌سازی عددی است. مدل‌های عددی نظیر MODFLOW تنها در صورتی می‌توانند رفتار آینده

آبخوان را با دقت شبیه‌سازی کنند که با داده‌های معتبر کالیبره شوند. این مدل‌ها برای پاسخ به پرسش‌هایی مانند "در صورت افزایش ۲۰ درصدی برداشت، سطح ایستابی چه تغییری خواهد کرد؟" یا "در شرایط خشکسالی متوالی، پایداری بهره‌برداری چگونه خواهد بود؟" به کار می‌روند (Anderson et al., 2015). در نتیجه، عدم انجام مطالعات پایه‌ای شامل حفاری چاه اکتشافی و آزمون پمپاژ، باعث ایجاد عدم قطعیت در برنامه‌ریزی منابع آب و تصمیم‌گیری مدیریتی می‌شود مکان‌یابی بهینه چاه‌ها و کاهش تمرکز بهره‌برداری توزیع فضایی چاه‌های بهره‌بردار نقش بسزایی در کاهش تداخل و بهبود بهره‌برداری ایفا می‌کند. اطلاعات به دست آمده از چاه اکتشافی نه تنها در شناسایی زون‌های پرآب مؤثرند، بلکه از تمرکز چاه‌ها در مناطق دارای پتانسیل پایین یا با ضریب هدایت هیدرولیکی ضعیف جلوگیری می‌کنند. این امر منجر به بهره‌برداری متوازن و پایدار از مخزن زیرزمینی می‌شود. در شکل ۱۲ و ۱۳ نقشه‌های پراکندگی چاه‌های دشت کمیجان در سال‌های ۱۴۰۳ و ۱۳۷۱ آورده شده است که نشان‌دهنده تغییرات پراکندگی چاه‌ها و همچنین تمرکز چاه‌ها از سال ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۳ است. همچنین در شکل ۱۴ همپوشانی دو نقشه پراکندگی چاه‌های دشت کمیجان آورده شده است که نشان‌دهنده تغییرات تعداد چاه‌ها در گذر زمان می‌باشد (Report on the prohibition of Komijan plain, 2021).



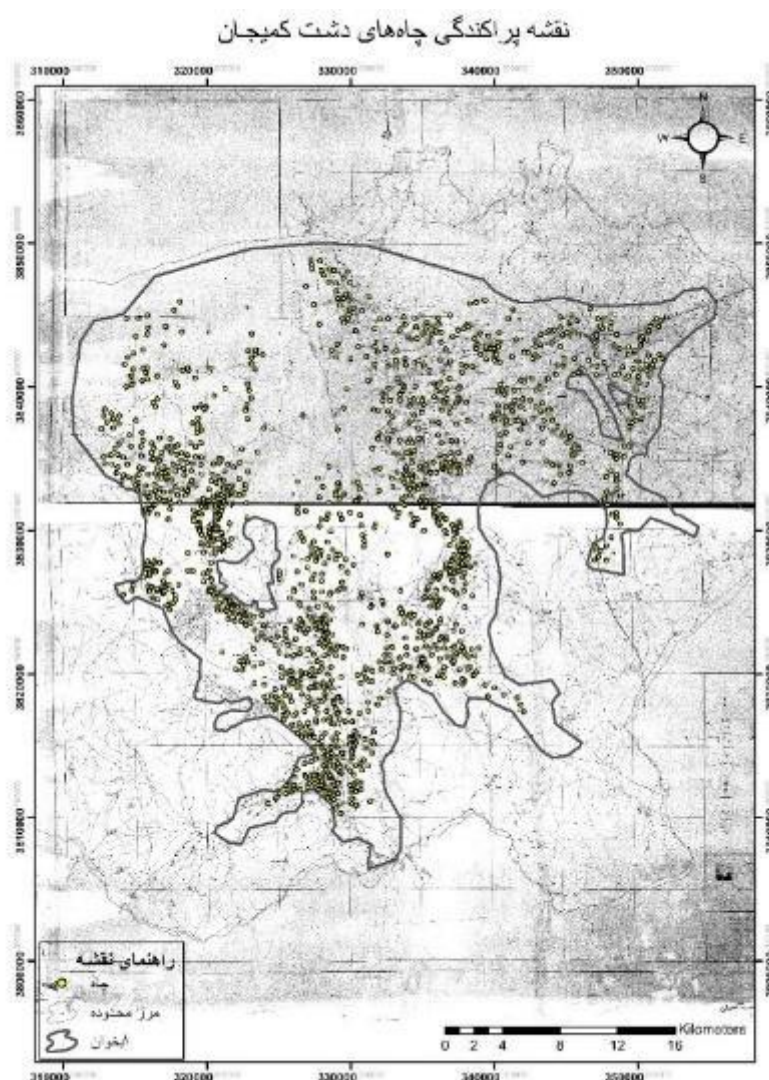
شکل ۱۲. نقشه پراکندگی چاه‌های دشت کمیجان در سال ۱۴۰۳

Fig. 12. Well distribution map of Kamijan Plain in 2024



شکل ۱۳. نقشه پراکندگی چاه‌های دشت کمیجان در سال ۱۳۷۱

Fig. 13. Well distribution map of Kamijan Plain in 1992



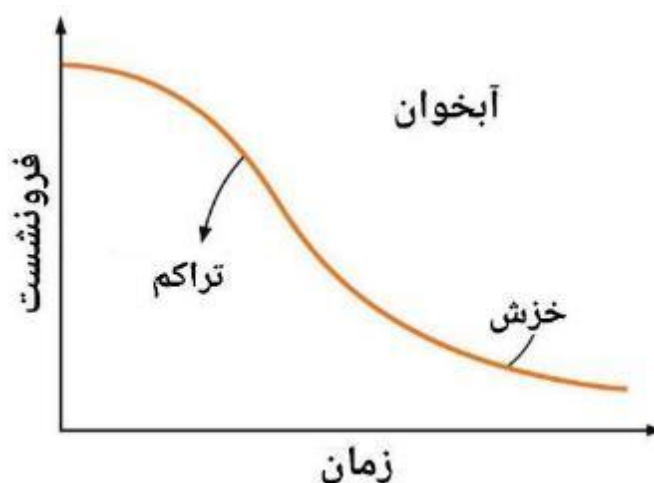
شکل ۱۴. همپوشانی دو نقشه پراکندگی چاه‌های دشت کمیجان

Fig. 14. Overlay of the two well distribution maps of Kamijan Plain

دارد نمودار ذیل اشاره، این رابطه را به صورت زمانی نشان می‌دهد (شکل ۱۵).

فرونشست

فرونشست آبخوان در اثر برداشت آب زیرزمینی، فرایندی تدریجی اما پیچیده است که به دو پدیده کلیدی بستگی



شکل ۱۵. روند فرونشست در یک آبخوان

Fig. 15. Temporal Trend of Land Subsidence in an Aquifer

از بین می‌رود و ذرات در اثر تنش‌های قبلی به موقعیت‌های پایدارتر جابه‌جا می‌شوند.

خزش به ویژه در رس‌های عمیق و آبخوان‌های دارای لایه‌های ریزدانه مهم است، زیرا این فرایند می‌تواند برای دهه‌ها ادامه داشته باشد. حتی اگر سطح آب زیرزمینی تثبیت شود یا اندکی افزایش یابد، خاکی که قبلاً تحت بارگذاری قرار گرفته و ساختار آن ضعیف شده، همچنان به نشست ادامه می‌دهد.

به همین دلیل است که در بسیاری از دشت‌های ایران (مانند ورامین، تهران یا مشهد)، علی‌رغم تلاش برای کنترل برداشت آب، فرونشست زمین هنوز ادامه دارد. این پدیده که ناشی از خزش تحکیمی است، نه تنها مشکلات فنی برای زیرساخت‌ها ایجاد می‌کند، بلکه نشان دهنده تغییرات برگشت‌ناپذیر در ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان نیز هست. در شکل ۱۶ لوله‌زایی ناشی از فرونشست در دشت ساوه که مربوط به چاه مشاهده‌ای سینک است مشاهده می‌شود.

در گام نخست، با شروع برداشت آب، سطح ایستابی کاهش‌یافته و فشار آب منفذی در لایه‌های اشباع خاک (مانند رس یا سیلت) افت می‌کند. این افت فشار باعث می‌شود که وزن مؤثر بیشتری به اسکلت دانه‌ای خاک وارد شود، و در نتیجه، ذرات خاک به یکدیگر نزدیک‌تر شوند و حجم کل لایه کاهش یابد. این فرایند که منجر به نشست نسبتاً سریع زمین می‌شود، تحکیم اولیه نام دارد و معمولاً طی ماه‌ها یا چند سال اول اتفاق می‌افتد. تحکیم اولیه به شدت وابسته به نفوذپذیری خاک، ضخامت لایه، و میزان افت سطح آب است.

اما پس از مدتی که فشار منفذی به حالت تعادل می‌رسد و دیگر آبی از منافذ خارج نمی‌شود، نشست متوقف نمی‌گردد. در واقع، خاک وارد مرحله‌ای می‌شود که در آن بدون تغییر در فشار آب یا تنش‌های خارجی جدید، به آرامی دچار تغییر شکل و کاهش حجم می‌شود. این مرحله به عنوان خزش شناخته می‌شود. در این فاز، ساختار میکروسکوپی خاک به صورت تدریجی بازآرایی می‌شود، پیوندهای ضعیف بین ذرات



شکل ۱۶. فرونشست چاه مشاهده‌ای سینک

Fig. 16. Land Subsidence Observed at the Sink Monitoring Well

نمونه‌برداری از مغزه‌ها، اطلاعات دقیق از جنس، ضخامت و ترتیب لایه‌های خاک به دست آید.

۲. برآورد دقیق پارامترهای هیدرولیکی از طریق آزمون پمپاژ:

فرایندهای تحکیم و خزش به شدت به نفوذپذیری خاک و ضریب ذخیره وابسته‌اند. با انجام آزمون پمپاژ و تحلیل پاسخ تراز آب در چاه مشاهده‌ای، می‌توان پارامترهای ضریب هدایت هیدرولیکی (K)، ضریب انتقال (T)، ضریب ذخیره (S)، نرخ افت سطح آب و نرخ بازیابی آن را تعیین کرد. این اطلاعات برای مدل‌سازی دقیق فشار منفذی و تحلیل نشست زمین ضروری‌اند.

۳. کالیبراسیون مدل‌های عددی و پیش‌بینی خزش بلندمدت:

پیش‌بینی صحیح از ادامه فرونشست با وجود تثبیت سطح آب زیرزمینی نیازمند مدلی است که رفتار مکانیکی و

در نتیجه، مدل‌سازی و مدیریت منابع زیرزمینی باید هر دو مؤلفه تحکیم و خزش را در نظر بگیرند، چرا که حذف هر کدام منجر به برآوردهای نادرست در پیش‌بینی نشست و طراحی ناپایدار سازه‌های سطحی می‌شود.

با توجه به موارد فوق، فرایند تحکیم و خزش در لایه‌های ریزدانه اشباع و اثرات آن، کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی آبخوان را برجسته می‌کند و به دلایل زیر نیاز به حفر چاه اکتشافی و انجام آزمون پمپاژ بسیار ضروری است:

۱. ضرورت شناخت لایه‌بندی زمین و حضور لایه‌های ریزدانه (رس، سیلت):

برای تحلیل دقیق فرونشست و پیش‌بینی رفتار خزشی خاک، ابتدا باید ساختار زمین‌شناسی آبخوان و به ویژه وجود لایه‌های کم نفوذ و ریزدانه را شناسایی کرد. چاه اکتشافی این امکان را فراهم می‌کند که با حفاری کنترل‌شده و

آب که حاصل برداشت از چاه‌های قدیمی یا داده‌های گذشته است، دیگر بیانگر وضعیت فعلی آبخوان نباشد. در چنین شرایطی، برای به‌روزرسانی نقشه‌های کیفی و درک واقعی از پویایی جبهه‌ها، حفر چاه‌های اکتشافی در مناطق مشکوک یا حساس به تغییرات کیفی یک ضرورت محسوب می‌شود.

پایش و تحلیل دقیق پیشروی جبهه‌های شور یا آلوده
در بسیاری از دشت‌ها، پدیده‌هایی نظیر پیشروی آب‌شور از حاشیه دشت یا مناطق تبخیری، برگشت آب‌شور زهکش‌های کشاورزی، یا نفوذ آلودگی از منابع سطحی و زیرسطحی مانند (فاضلاب‌های رهاشده، مخازن سوخت، صنایع، دفن‌گاه‌های زباله) باعث شکل‌گیری و گسترش جبهه‌های آلوده در داخل آبخوان شده‌اند. این جبهه‌ها معمولاً به آرامی در مسیر جریان آب زیرزمینی حرکت می‌کنند و می‌توانند کیفیت منابع را در مساحت‌های وسیع تخریب کنند.

برای بررسی و پایش این فرایند، تنها داده‌های موجود کفایت نمی‌کند. بلکه باید با حفر چاه اکتشافی در جهت‌های محتمل حرکت جبهه‌ها، محل دقیق و مرز جبهه شوری یا آلودگی شناسایی شود. با اجرای آزمون پمپاژ در محدوده موردنظر و ثبت پاسخ چاه‌های مشاهده‌ای، الگوی هیدرودینامیک جریان و سرعت جابه‌جایی جبهه‌های آلودگی تخمین زده شود. در حین آزمون پمپاژ، نمونه‌برداری لحظه‌ای و عمقی از آب انجام گیرد تا تغییرات غلظت و کیفیت در طی زمان پمپاژ (که می‌تواند نشان‌دهنده ورود آب‌شور یا آلوده باشد) بررسی گردد.

تحلیل عمقی کیفیت آب و رفتار لایه‌های مختلف آبخوان

در بسیاری از موارد، تغییرات کیفی نه تنها به صورت افقی، بلکه در جهت عمودی نیز رخ می‌دهند. به ویژه در آبخوان‌های دارای ساختار چندلایه یا پوشیده شده با نهشته‌های ریزدانه، امکان دارد:

هیدرولیکی خاک را در کنار هم شبیه‌سازی کند. داده‌های حاصل از چاه اکتشافی و آزمون پمپاژ، ورودی‌های اساسی برای کالیبراسیون چنین مدل‌هایی هستند (مثلاً مدل‌های خزش مانند NCE-CS یا مدل‌های تحکیم غیرخطی).

۴. بررسی تغییرپذیری مکانی خواص خاک در دشت:

در دشت‌هایی مانند ورامین یا تهران، تغییرات جانبی در عمق و کیفیت لایه‌های ریزدانه وجود دارد؛ بنابراین حفر چند چاه اکتشافی در نقاط مختلف به شناسایی ناحیه‌های با پتانسیل بالای خزش تحکیمی کمک می‌کند و پایه‌ای برای مدیریت منطقه‌بندی شده آبخوان را فراهم می‌سازد.

ضرورت حفر چاه اکتشافی و انجام آزمون پمپاژ با رویکرد تحلیل تغییرات کیفی آب زیرزمینی

با گذر زمان و در اثر فشارهای ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه، تغییر الگوی کاربری اراضی، فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی و همچنین نشت آلاینده‌ها، کیفیت منابع آب زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور دچار دگرگونی شده است. این دگرگونی نه تنها به صورت تدریجی رخ می‌دهد، بلکه در مواردی می‌تواند به صورت جهشی و برگشتناپذیر ساختار کیفی یک آبخوان را متحول کند. در چنین شرایطی، پایش‌های کیفی متکی بر چاه‌های قدیمی یا پراکنده، پاسخگوی نیازهای مدیریت منابع آب نخواهد بود و نیاز به اطلاعات دقیق، به روز و هدفمند اجتناب‌ناپذیر است.

تغییر مرزهای کیفی آبخوان

یکی از پیامدهای اصلی برداشت بی‌رویه و ورود آلاینده‌ها، جابه‌جایی مرزهای کیفی آبخوان است. برای نمونه، مرز میان آب‌شور و شیرین در مناطقی که قبلاً به صورت طبیعی پایدار مانده بود، به دلیل افت سطح آب زیرزمینی و ورود جریان‌های آلوده یا شور، دچار جابه‌جایی می‌شود. این جابه‌جایی منجر به آن می‌شود که اطلاعات موجود از کیفیت

نقشی غیرقابل جایگزین در تنظیم بیلان دارند (Kruseman and de Ridder, 1994).

چاه‌های اکتشافی ابزار اصلی در شناخت لایه‌بندی زمین، گسترش جانبی و عمقی آبخوان، موقعیت مرزها و ضخامت مؤثر لایه‌های آبدار هستند. این اطلاعات ساختاری پایه، برای تخمین درست تغذیه، نشت جانبی و تبادل مرزی آبخوان ضروری‌اند (Domenico and Schwartz, 1998). بی‌توجهی به این اطلاعات می‌تواند منجر به خطاهای ساختاری در تنظیم بیلان شود.

آزمون‌های پمپاژ که شامل برداشت کنترل‌شده آب و ثبت افت تراز ایستابی در زمان هستند، ابزاری کلیدی برای تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی مانند ضریب انتقال (T)، ضریب هدایت هیدرولیکی (K) و ضریب ذخیره (S) محسوب می‌شوند (Kruseman and de Ridder, 1994). این پارامترها پایه محاسبه مقدار مجاز برداشت، تخمین تغذیه واقعی و پیش‌بینی واکنش آبخوان به بهره‌برداری هستند (Fetter, 2001).

در بخش خروجی‌های بیلان، آزمون پمپاژ کمک می‌کند تا رفتار آبخوان نسبت به برداشت‌ها و میزان پایداری سطح ایستابی سنجیده شود. آزمون‌های بلندمدت داده‌هایی درباره وضعیت مرزهای فعال، مناطق تغذیه‌پذیر و بخش‌های دارای افت بحرانی فراهم می‌کنند (Anderson et al., 2015).

در تعیین تغییرات ذخیره، ضریب ذخیره‌ای که از آزمون پمپاژ به دست می‌آید، نشان‌دهنده رابطه بین افت تراز و حجم واقعی آب آزادشده از آبخوان است (Bear, 1979). این موضوع، نقش تعیین‌کننده‌ای در محاسبه دقیق موجودی ذخیره و مدیریت برداشت ایفا می‌کند.

تعیین آب قابل‌برنامه‌ریزی یا برداشت پایدار (sustainable yield) بدون داده‌های حاصل از آزمون‌های میدانی امکان‌پذیر نیست. این داده‌ها اجازه می‌دهند مرز میان بهره‌برداری مجاز و بهره‌برداری مخرب شناسایی شود

• لایه‌های بالایی تحت تأثیر آلودگی قرار گرفته باشند.

• لایه‌های پایینی به تدریج دچار شورشدگی شوند.

• کیفیت آب در اعماق مختلف کاملاً متفاوت باشد.

در چنین شرایطی، نمونه‌برداری عمقی از چاه‌های اکتشافی در حین حفاری می‌تواند تصویر دقیقی از پراکندگی عمودی آلودگی یا شوری ارائه دهد. چاههایی که قبلاً برای بهره‌برداری حفاری شده‌اند، معمولاً فاقد داده‌های عمقی دقیق یا نمونه‌برداری مرحله‌ای هستند.

فراهم‌سازی داده‌های ورودی برای مدل‌سازی کیفی

هرگونه مدل‌سازی انتقال جرم، چه برای شوری و چه برای آلاینده‌های نقطه‌ای یا گسترده، نیازمند پارامترهای دقیق هیدرولیکی و کیفی است. این پارامترها را نمی‌توان صرفاً از منابع ثانویه یا چاه‌های موجود استخراج کرد، بلکه باید از طریق آزمون‌های دقیق پمپاژ و نمونه‌برداری به دست آورد. بدون این داده‌ها، مدل‌های انتقال آلودگی یا شوری با عدم قطعیت بالا مواجه خواهند بود و در عمل، تصمیم‌گیری مدیریتی بر اساس نتایج آن‌ها فاقد اعتبار خواهد بود.

تأثیر نتایج حفر چاه اکتشافی و آزمون پمپاژ بر نتایج بیلان

بیلان آبخوان به عنوان یکی از ابزارهای بنیادین در تحلیل و مدیریت منابع آب زیرزمینی، بر اساس موازنه دقیق بین ورودی‌ها، خروجی‌ها و تغییرات ذخیره تعریف می‌شود. کیفیت و دقت این بیلان، ارتباط مستقیم با شناخت علمی، داده‌های میدانی و برداشت تجربی از رفتار سیستم هیدروژئولوژیکی دارد (Custodio and Llamas, 1983). در این میان، چاه‌های اکتشافی و آزمون‌های پمپاژ دو مؤلفه کلیدی در شناخت ساختاری و عملکردی آبخوان هستند که

۲. رسوب‌گذاری مواد معدنی مانند آهن، منگنز یا سیلیس که موجب کاهش نفوذپذیری در ناحیه مشبک چاه می‌شود.

۳. رشد میکروبیولوژیکی (بیوفیلیم) ناشی از باکتری‌های آهن‌ساز یا گوگردی که عملکرد چاه را مختل می‌کند.

۴. خوردگی تجهیزات چاه و فرسودگی لوله‌ها و مشبک‌ها که به کاهش راندمان و نفوذ آب به داخل چاه منجر می‌شود.

۵. افزایش سن چاه و تغییرات زمانی در رفتار آبخوان که داده‌های آزمون اولیه را غیرقابل اتکا می‌سازد.

۶. کیفیت پایین داده‌های آزمون اولیه به دلایل فنی مانند کالیبراسیون نامناسب ابزار، خطاهای قرائت، یا مدیریت نامطلوب پمپاژ.

۷. ضرورت بازبینی مدل مفهومی آبخوان در پی دریافت اطلاعات جدید یا بروز نشانه‌های ناسازگاری در نتایج قبلی.

۸. تغییرات منطقه‌ای در بهره‌برداری از آبخوان که می‌تواند بر میزان تغذیه، مخروط افت یا مرزهای هیدرولیکی تأثیر بگذارد.

۹. لزوم به‌روزرسانی بیلان آبخوان با داده‌های جدید برای برآورد دقیق تغذیه، برداشت، و تغییرات ذخیره.

۱۰. استفاده از روش‌ها و تجهیزات نوین جهت دستیابی به داده‌های دقیق‌تر و قابل‌اتکاتر.

فرآیند احیای چاه و اهمیت آزمون مجدد پمپاژ

احیای چاه به مجموعه‌ای از عملیات مکانیکی، هیدرولیکی یا شیمیایی اطلاق می‌شود که با هدف بازگرداندن چاه به عملکرد اولیه یا بهینه انجام می‌گیرد. به دلیل عبور زمان،

(Alley and Leake, 2004). همچنین داده‌های ساختاری حاصل از چاه‌های اکتشافی، برای تعیین مناطق دارای محدودیت و ریسک زمین‌شناسی ضروری‌اند.

در مدل‌سازی، استفاده از مدل‌های عددی نظیر MODFLOW نیازمند پارامترهای ورودی دقیق، حاصل از پمپاژ و حفاری است. دقت کالیبراسیون و صحت پیش‌بینی‌های این مدل‌ها مستقیماً به کیفیت داده‌های صحرایی وابسته‌اند (Anderson et al., 2015). در مقابل، مدل‌های پدیده‌شناسی یا آماری که رفتار گذشته آبخوان را تحلیل می‌کنند، برای صحت‌سنجی خود نیازمند داده‌های واقعی هستند و بدون داده‌های اکتشافی قابلیت اعتبار علمی کمتری خواهند داشت (De Marsily, 1986).

در مجموع، چاه‌های اکتشافی و آزمون‌های پمپاژ پایه‌ای‌ترین داده‌های لازم برای تنظیم بیلان قابل‌اتکا، پایدار و مبتنی بر واقعیت‌های هیدروژئولوژیکی هستند. در غیاب آن‌ها، تمامی مدل‌ها و سنجش‌ها با عدم قطعیت بالا همراه بوده و تصمیم‌گیری‌ها با ریسک مدیریتی جدی مواجه می‌شود.

احیای چاه اکتشافی به منظور انجام آزمون پمپاژ مجدد
در بسیاری از موارد، چاه‌های اکتشافی پس از گذشت زمان، به دلایل مختلفی کارایی اولیه خود را از دست می‌دهند و نیازمند احیا هستند تا آزمون‌های پمپاژ مجدد با دقت بالا و قابلیت استناد انجام گیرند. در چنین شرایطی، احیای چاه اکتشافی و اجرای مجدد آزمون پمپاژ به یک ضرورت علمی و فنی تبدیل می‌شود.

دلایل ضرورت احیای چاه اکتشافی و انجام مجدد آزمون پمپاژ:

۱. انسداد فیزیکی چاه به واسطه ورود ذرات ریز، گل حفاری یا ریزدانه‌های آبرفتی که باعث کاهش دبی خروجی می‌شود.

ورود ذرات، رسوب گذاری یا رشد زیستی در ناحیه مشبک، بسیاری از چاه های اکتشافی به مرور دچار کاهش بهره وری می شوند. در چنین شرایطی، انجام آزمون پمپاژ بدون احیا، نه تنها داده های غیرواقعی تولید می کند، بلکه ممکن است منجر به تفسیر نادرست رفتار آبخوان و پارامترهای کلیدی مانند هدایت هیدرولیکی و ضریب انتقال شود ([Kruseman and de Ridder, 1994](#)).

فرایند احیا ابتدا نیازمند بررسی دقیق وضعیت چاه است. این بررسی شامل استفاده از ویدئومتری برای مشاهده وضعیت درونی چاه، تحلیل لاگ های ژئوفیزیکی، آزمون افت پله ای برای بررسی افت ناشی از ساختمان چاه یا برداشت رسوبات ته نشین شده برای شناسایی نوع انسداد است. با اتکا به این اطلاعات، روش مناسب احیا انتخاب می شود که می تواند شامل روش های زیر باشد:

هوادهی (air-lift) برای بیرون کشیدن ذرات و رسوبات معلق.

پمپاژ نوسانی یا جریان معکوس برای تحریک محیط اطراف لوله مشبک.

شستشوی شیمیایی با استفاده از اسیدهای ملایم، کلر یا اکسیدکننده ها جهت حذف رسوبات معدنی یا بیولوژیکی. استفاده از برس یا تجهیزات مکانیکی برای پاک سازی دیواره چاه و افزایش نفوذپذیری ناحیه تماس با آبخوان.

پس از تکمیل عملیات احیا و تثبیت شرایط چاه، آزمون پمپاژ مجدد انجام می شود. آزمون ها ممکن است به صورت پله ای، دبی ثابت یا آزمون برگشت طراحی شوند. در این مرحله، دقت در ثبت تراز سطح آب و دبی استخراجی با تجهیزات کالیبره، اهمیت زیادی دارد. نتایج حاصل از آزمون مجدد، پایه ای برای محاسبه دقیق پارامترهایی چون ضریب هدایت ضریب ذخیره و میزان بهره برداری مجاز از آبخوان فراهم می کند.

علاوه بر آن، داده های جدید می توانند در بازبینی و بهبود مدل مفهومی آبخوان، نقشه های پهنه بندی پتانسیل آبدهی، و نیز تحلیل بیلان آب زیرزمینی مؤثر باشند. به ویژه در شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک ایران که فشار بر منابع آب زیرزمینی رو به افزایش است، به روزرسانی این مدل ها نقش تعیین کننده ای در مدیریت پایدار منابع ایفا می کند. در نهایت، احیای اصولی چاه و انجام آزمون پمپاژ مجدد، صرفاً یک اقدام فنی محدود به حوزه میدانی نیست، بلکه بخشی از چرخه پایش، تحلیل و تصمیم گیری در مدیریت کلان منابع آب زیرزمینی محسوب می شود.

موانع احیای چاه های اکتشافی قدیمی و آزمون مجدد پمپاژ

احیای چاه های اکتشافی قدیمی و انجام آزمون مجدد پمپاژ، هرچند از نظر علمی و فنی ضروری است، اما در عمل با موانع متعددی مواجه می شود. این موانع ممکن است فنی، ساختاری، مدیریتی، یا ناشی از تغییرات طبیعی و انسانی در رفتار آبخوان باشند. شناسایی این چالش ها، شرط لازم برای تصمیم گیری آگاهانه و طراحی مؤثر عملیات احیا و آزمون است. مهم ترین این موانع عبارتند از:

افت شدید سطح ایستابی و خشک شدن چاه: در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک، بهره برداری بی رویه از منابع آب زیرزمینی منجر به افت قابل توجه سطح ایستابی شده است. در این شرایط، عمق آب از کف چاه پایین تر رفته یا به حدی رسیده که امکان پمپاژ از چاه عملاً از بین رفته است. در مواردی نیز سطح آب در زمان حفر چاه قابل قبول بوده، اما در دوره های بعدی با کاهش بارش و تغذیه، چاه به کلی خشک شده و احیا بی معنا شده است ([Foster and Chilton, 2003; Scanlon et al., 2006](#)).

انسداد کامل یا شدید ناحیه مشبک و دیواره چاه: در اثر رسوب گذاری، رشد بیولوژیکی یا ورود ذرات ریز، ناحیه

امکانات در برخی مناطق یا پروژه‌ها، عملیات را دچار تأخیر یا شکست می‌کند. همچنین، پروژه‌هایی با بودجه یا زمان محدود اغلب به احیا و آزمون اصولی توجه کافی نمی‌کنند (Kruseman and de Ridder, 1994).

ضعف در هماهنگی مدیریتی و اولویت‌های سازمانی: در برخی موارد، سازمان‌های اجرایی یا کارفرمایان از نظر دیدگاه فنی، درک درستی از اهمیت آزمون مجدد ندارند یا آن را در اولویت کاری خود قرار نمی‌دهند. این موضوع موجب می‌شود که حتی در صورت نیاز علمی و فنی، عملیات احیا در برنامه قرار نگیرد یا با کیفیت ناکافی اجرا شود (Foster and Chilton, 2003).

وجود این موانع به این معنا نیست که احیای چاه‌های قدیمی غیرممکن است، بلکه ضرورت دارد که پیش از اقدام میدانی، ارزیابی دقیقی از وضعیت چاه، سطح ایستابی، امکانات اجرایی و داده‌های موجود انجام شود. در صورتی که شرایط مساعد باشد، احیای اصولی می‌تواند چاه را به منبع قابل اتکایی برای داده‌های هیدروژئولوژیکی تبدیل کند. همچنین، ثبت و مستندسازی موانع و تجربیات اجرایی می‌تواند راهنمایی برای پروژه‌های آینده باشد.

نتیجه‌گیری

مطالعات اکتشافی، به ویژه حفاری چاه‌های اکتشافی و انجام آزمون‌های پمپاژ، نقش محوری در شناخت دقیق ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان‌ها، طراحی مدل‌های عددی معتبر، و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی دارند. این ابزارها، ستون فقرات مدل مفهومی و پایه بسیاری از تصمیم‌سازی‌های فنی، اقتصادی و مدیریتی در حوزه منابع آب به شمار می‌روند. بالاین‌حال، بررسی وضعیت موجود در ایران نشان می‌دهد که چالش‌های متعددی نظیر فقدان الزامات قانونی برای اجرای آزمون‌های استاندارد، نبود نظام منسجم داده‌برداری، محدودیت در ظرفیت فنی و تجهیزات، و همچنین کم‌توجهی

مشبک در بسیاری از چاه‌های قدیمی دچار گرفتگی کامل شده و جریان آب به داخل چاه به شدت محدود می‌شود. این مسئله به ویژه در چاه‌هایی که سال‌ها بلااستفاده مانده‌اند، بسیار شایع است (Kruseman and de Ridder, 1994).

فرسودگی و خوردگی لوله‌ها: چاه‌های قدیمی معمولاً از لوله‌های فلزی استفاده کرده‌اند که در گذر زمان دچار زنگ‌زدگی، خوردگی، شکستگی یا حتی ریزش دیواره شده‌اند. این وضعیت باعث نایمن شدن چاه و غیرممکن شدن عملیات احیا یا پمپاژ می‌شود (Driscoll, 1986).

ورود ماسه یا ریزدانه‌ها به داخل چاه: در نتیجه تخریب تدریجی لوله‌های مشبک یا ناپایداری لایه‌های اطراف چاه، ورود ماسه و مواد ریزدانه به داخل چاه رخ می‌دهد. این مواد معمولاً در ته چاه انباشته شده، فضای مفید چاه را کاهش داده و عملیات احیا را با دشواری زیاد همراه می‌سازد (Zhou et al., 2010).

عدم وجود مستندات فنی از ساختار چاه: در بسیاری از چاه‌های قدیمی، نقشه حفاری، عمق ناحیه مشبک، نوع سازند، اطلاعات لوله‌گذاری یا مشخصات آزمون قبلی در دسترس نیست. نبود این اطلاعات مانع از طراحی بهینه برای احیا یا آزمون می‌شود و گاه منجر به تصمیم‌گیری اشتباه یا پرهزینه می‌گردد (Gates and Jackson, 1996).

تغییر شرایط سطح زمین و کاربری منطقه: در برخی موارد، ساخت‌وسازهای جدید، احداث معابر، تأسیسات شهری یا حتی ورود آلاینده‌ها به ناحیه اطراف چاه، امکان دسترسی یا بهره‌برداری مجدد از چاه را سلب کرده‌اند. این تغییرات می‌توانند از نظر فنی، زیست‌محیطی یا حقوقی مانع احیا باشند (Allison et al., 2011).

محدودیت در تجهیزات، منابع مالی و زمان: اجرای احیا و آزمون پمپاژ نیازمند تجهیزات تخصصی (مانند پمپ‌های آزمون، ابزار اندازه‌گیری دقیق، سیستم ویدئومتری و سامانه‌های ثبت داده) و نیروهای مجرب است. نبود این

بنابراین، اصلاح رویکردها و سیاست‌ها در سه سطح ضروری به نظر می‌رسد: نخست، تدوین و اجرای الزامات قانونی برای انجام آزمون‌های دقیق در تمامی چاه‌های اکتشافی و مطالعات پایه؛ دوم، توسعه زیرساخت‌های فنی و داده محور شامل شبکه‌های پایش دائم، تجهیزات دقیق و سامانه‌های متمرکز مدیریت داده؛ و سوم، بازتعریف جایگاه آب زیرزمینی در سیاست‌گذاری ملی به عنوان یک منبع راهبردی و نه صرفاً مکمل. تنها در چنین چارچوبی می‌توان به تحقق حکمرانی مبتنی بر شواهد، پایداری بهره‌برداری از آبخوان‌ها، و حفاظت بلندمدت از منابع آب زیرزمینی کشور امید بست.

ساختاری به اهمیت آب زیرزمینی در سیاست‌گذاری‌های کلان، موجب شده است که تراکم و کیفیت این مطالعات در کشور به سطحی نازل برسد.

در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته که در آن‌ها داده‌های حاصل از چاه‌های اکتشافی و آزمون‌های دقیق پمپاژ، به صورت مستند، ساختارمند و عمومی در سامانه‌های ملی گردآوری و تحلیل می‌شوند، وضعیت ایران با پراکندگی داده، ضعف در کالیبراسیون مدل‌ها و کاهش قابلیت اطمینان در نتایج مواجه است. این شکاف، نه تنها در کیفیت تصمیم‌گیری‌های اجرایی و علمی، بلکه در توانایی کشور برای مقابله با بحران‌هایی چون فرونشست، افت سطح ایستابی، و تنش‌های ناشی از بهره‌برداری بیش‌ازحد نیز نمود دارد.

References

- Ahmadi, A., Chitsazan, M., Mirzaee, S. Y., Nadri, A. (2022). The effects of aquifer and well parameters on Capture Zone and Discharge Zone in alluvial unconfined aquifers. *Journal of Engineering Geology*, 16 (2) :1-28.
- Ahmadi, A., Mirzavand, G., & Zebarjad, M. (2023). The drawdown cone of influence zone in water wells in unconfined alluvial aquifers and the influence of physical parameters of the aquifer on it. *Journal of Engineering Geology*, 17(3), 299-320.
- Alley, W. M., & Leake, S. A. (2004). The journey from safe yield to sustainability. *Ground Water*, 42(1), 12-16.
- Allison, G. B., Hughes, M. W., & Sklash, M. G. (2011). The influence of land use on the quality of groundwater in a semi-arid area: A case study from southern Australia. *Journal of Hydrology*, 402(3-4), 211-226.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: Simulation of flow and advective transport* (2nd ed.). Academic Press. 1-630.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill. 1-592.
- Bouwer, H. (1978). *Groundwater hydrology*. McGraw-Hill.
- Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., Jäger, J., & Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8086-8091.
- Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC Press/Lewis Publishers.
- Cooper, H. H., Jr., & Jacob, C. E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *Transactions, American Geophysical Union*, 27(4), 526-534.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Groundwater hydrology* (2nd ed.). Barcelona, Spain: Ediciones Omega. 1-1150.
- De Marsily, G. (1986). *Quantitative hydrogeology: Groundwater hydrology for engineers*. Academic Press. 1-440.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology* (2nd ed.). Wiley. 1-506.
- Driscoll, F. G. (1986). *Groundwater and wells* (2nd ed.). St. Paul, MN: Johnson Screens. 1-1089.
- Edelenbos, J., Bressers, N., & Scholten, P. (2013). *Water governance as connective capacity*. Farnham, UK: Ashgate. 1-374.

- Fetter, C. W. (2001). *Applied hydrogeology* (4th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 1-598.
- Fitts, C. R. (2012). *Groundwater science* (2nd ed.). Academic Press. 1-672.
- Foster, S. S. D., & Chilton, P. J. (2003). Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation. *Global Environmental Change*, 13(4), 308-314.
- Foster, S., & Ait-Kadi, M. (2012). Integrated water resources management (IWRM): How does groundwater fit in? *Hydrogeology Journal*, 20(2), 415-418.
- Ganjalipour, K., Azimi, R., & Moradi, M. (2024). Investigating the method of calculating the allocable underground water in Iran and providing corrections for it. *Journal of Engineering Geology*, 18 (1), 109-122.
- Ganjalipour, K. (2025). Report presented at the consultative meeting of the heads of groundwater studies groups in Iran. Iran Water Resources Management Company, Tehran, Iran.
- Gates, D., & Jackson, C. (1996). Groundwater flow and well performance: Implications for pumping test interpretation. *Water Resources Research*, 32(8), 2451-2460.
- Gleeson, T., Wada, Y., Bierkens, M. F. P., & van Beek, L. P. H. (2012). Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. *Nature*, 488(7410), 197-200.
- Global Water Partnership (GWP). (2009). *A handbook for integrated water resources management in basins*. Stockholm, Sweden: Global Water Partnership. 1-104.
- Global Water System Project (GWSP). (2013). *Water in the Anthropocene: Challenges for science and governance*.
- Head, B. W. (2016). Toward more “evidence-informed” policy making? *Public Administration Review*, 76(3), 472-484.
- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water* (3rd ed.). U.S. Geological Survey Water-Supply. 1-2254.
- Ingram, H. (2008). Beyond universal remedies for good water governance: A political and contextual approach. *Water International*, 33(1), 10-22.
- Jasanoff, S. (Ed.). (2004). *States of knowledge: The co-production of science and social order*. London, UK: Routledge. 1-344.
- Kirsch, R. (2006). *Groundwater geophysics: A tool for hydrogeology*. Berlin, Germany: Springer. 1-493.
- Kruseman, G. P., & de Ridder, N. A. (1994). *Analysis and evaluation of pumping test data* (2nd ed.). Wageningen, The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement. 1-377.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2008). *Remote sensing and image interpretation* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Meinzer, O. E. (1923). *The occurrence of ground water in the United States, with a discussion of principles*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 489. U.S. Government Printing Office.
- Meinzen-Dick, R., & Appasamy, P. (2002). Strengthening water user associations. *International Journal of Water Resources Development*, 18(1), 95-105.
- Molle, F., & Tilmant, A. (2007). Water governance in the Mekong River Basin: A critical review. *Water International*, 32(3), 292-304.
- Molle, F. (2009). Water scarcity, prices and quotas: A review of evidence on irrigation volumetric pricing. *Irrigation and Drainage Systems*, 23(1), 43-58.
- OECD. (2015). *Water governance in OECD countries: A multi-level approach*. Paris, France: OECD Publishing. 1-246.
- Pahl-Wostl, C., Craps, M., Dewulf, A., Mostert, E., Tabara, D., & Taillieu, T. (2007). Managing change toward adaptive water management through social learning. *Ecology and Society*, 12(2), 30.
- Reilly, T. E., & Harbaugh, A. W. (2004). *Guidelines for evaluating ground-water flow models* (Scientific Investigations Report 2004-5038). Reston, VA: U.S. Geological Survey.
- Report on the prohibition of Komijan plain. (2021). Markazi Regional Water Company, Office of Basic Water Studies Management, Groundwater Group, Arak, Iran.
- Report on the prohibition of Arak plain. (2024). Markazi Regional Water Company, Office of Basic Water Studies Management, Groundwater Group, Arak, Iran.
- Scanlon, B. R., Healy, R. W., & Cook, P. G. (2006). *Groundwater recharge in the arid and semi-arid*

- regions of the world. *Hydrological Processes*, 20(15), 3335-3370.
- Scanlon, B. R., Ruddell, B. L., Reed, P. M., Hook, R. I., Zheng, C., Tidwell, V. C., & Siebert, S. (2017). The food-energy-water nexus: Transforming science for society. *Water Resources Research*, 53(5), 3550-3556.
- Shah, T. (2007). Issues in reforming informal water economies of low-income countries. *Water Policy*, 9(Suppl. 2), 33-50.
- Theis, C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Transactions, American Geophysical Union*, 16(2), 519-524.
- United Nations Development Programme (UNDP). (1997). *Governance for sustainable human development*. New York, NY: United Nations Development Programme.
- United Nations Development Programme (UNDP). (2014). *Water Governance Facility: Practitioner's guide*. Stockholm, Sweden: Stockholm International Water Institute.
- UNESCO. (2012). *Managing water under uncertainty and risk (The United Nations World Water Development Report 4)*. Paris, France: UNESCO. 1-888.
- UNESCO-IHP. (2021). *Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change (GRAPHIC)*. Paris, France: UNESCO International Hydrological Programme.
- World Bank. (2009). *Improving transparency, integrity, and accountability in water supply and sanitation*. Washington, DC: World Bank. 1-164.
- World Bank. (2017). *Accountability in public services in South Asia*. Washington, DC: World Bank. 1-180.
- Zhou, Q., Li, L., & Xin, P. (2010). Evaluation of groundwater well performance using pumping test data. *Environmental Earth Sciences*, 60(5), 1103-1111.