



Developing an Effectiveness Based Model to Evaluate Artificial Recharge Implementation on Groundwater Resources

Hamid Kardan Moghaddam¹, | Mahsa Jabbari² | Farzad Hashemzadeh³ | Seyedeh Zeynab Yaghoubi³ | Elham Shirzadi³

1. Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy Water Research Institute, Tehran, Iran.
2. Researcher, Water Research Institute, Tehran, Iran.
3. Technical Expert, Technical Studies and Engineering Assessment Office, Engineering and Development Deputy, National Water and Wastewater Engineering Company (NWWEC), Tehran, Iran
4. PhD in Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
5. Researcher, Water Research Institute, Tehran, Iran.

✉Corresponding Author: h.kardan@wri.ac.ir

Received:
06 July 2025

Revised:
23 July 2026

Accepted:
29 July 2026

Keywords:

Analytic Hierarchy Process, Aquifer improvement index, Artificial recharge, Azghand aquifer, MODFLOW.

Extended abstract

Introduction

Groundwater depletion and the continuous decline of water table levels are major challenges in water management in arid and semi-arid regions. Limited and unevenly distributed rainfall, rising agricultural and domestic water demand, and overextraction beyond the aquifer's renewable capacity have disrupted the natural balance of groundwater resources. This process can lead to reduced aquifer storage, deterioration of groundwater quality, higher pumping costs, drying of wells and qanats, and even land subsidence. Therefore, restoring and strengthening groundwater reserves, especially in plains highly dependent on groundwater, is essential. Artificial recharge is one of the most effective approaches for sustainable aquifer management. It enhances the infiltration of surface water, runoff, or flood flows into aquifers and can help reduce groundwater decline, increase aquifer storage, mitigate flood damage, improve water quality, and strengthen hydrogeological resilience.

Cite this article: Kardan Moghaddam, H., Jabbari, M., Hashemzadeh, F., Yaghoubi, S.Z. & Shirzadi, E. (2026). Developing an effectiveness based model to evaluate Artificial Recharge implementation on groundwater resources. *Journal of Aquifer and Qanat*, 7 (1), 113-138. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2026.11635.1149>.



Copyright: © 2026 by the authors. Licensee: Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

However, its success depends strongly on proper site selection. Poorly selected sites may result in low infiltration efficiency, greater water loss, sediment and pollution transfer, limited impact on groundwater levels, and wasted financial resources. Thus, site selection must consider surface, subsurface, hydrological, hydrogeological, and management criteria. Artificial recharge site selection is often carried out using GIS and multi-criteria decision-making methods. These approaches integrate factors such as slope, geology, land use, hydraulic conductivity, water quality, available water volume, exploitation conditions, and distance from groundwater resources. However, spatial suitability alone does not guarantee maximum aquifer response, which also depends on hydrodynamic properties, boundary conditions, flow regime, pumping patterns, and subsurface structure. Therefore, this study aims to identify, evaluate, and prioritize suitable artificial recharge sites in the Azghand aquifer, Razavi Khorasan Province. Its main innovation is the integration of AHP-GIS-based site selection with MODFLOW groundwater flow modeling and the development of an index to rank the effectiveness of the proposed sites in improving the aquifer's quantitative condition.

Materials and Methods

The research methodology followed a multi-stage framework. In the first stage, the required hydrological, hydrogeological, geological, topographic, land-use, water-quality, exploitation, and observation-well data were collected and processed. A conceptual framework for artificial recharge site selection was then developed, focusing on the use of flood flows for aquifer recharge. Eight main criteria were considered: water quantity, water quality, aquifer hydraulic conductivity, land use, geological formations and erodibility, land slope, exploitation status, and proximity to groundwater resources. Criteria weighting was performed using the Analytic Hierarchy Process (AHP). For each criterion, four suitability classes were defined: highly suitable, suitable, moderately suitable, and unsuitable. Pairwise comparison matrices were constructed for both the internal classes of each criterion and the eight main criteria. The weights were assigned based on previous studies, regional conditions, field observations, and expert judgment. The spatial layers were then prepared, standardized, and integrated in a GIS environment using weighted overlay analysis to produce the artificial recharge potential map. In the second stage, the proposed sites identified by the AHP-GIS analysis were evaluated using numerical groundwater flow modeling with MODFLOW. The model was developed for the Azghand aquifer over a three-year simulation period, with the first two years used for calibration and the final year (2019–2020) for validation. Monthly time steps were applied, and October 2017 was selected as the reference time for the steady-state simulation. Recharge components included infiltration from precipitation, flood and surface flows, return flows, and lateral groundwater inflow, while discharge components comprised pumping, evapotranspiration, and downstream groundwater outflow. Lateral boundaries were represented as general-head boundaries. Model calibration and validation were performed using groundwater-level data from seven observation wells. Sensitivity analysis identified hydraulic conductivity as a key parameter in the steady-state model, while specific yield was particularly important in transient calibration. Finally, the proposed artificial recharge sites were simulated in MODFLOW, and their performance was compared using an aquifer quantitative status improvement index, defined as the ratio of the average annual groundwater level rise under artificial recharge to the average annual groundwater level decline under non-recharge conditions. Higher index values indicate more effective sites for improving the quantitative condition of the aquifer.

Results and Discussion

The results of the weighting and classification of the eight criteria demonstrated that the AHP method provides a structured and interpretable framework for integrating the various factors influencing artificial recharge site selection. The criteria maps revealed that artificial recharge potential in the Azghand aquifer is spatially heterogeneous, with each area exhibiting different suitability levels based on its specific combination of hydrological, geological, topographic, and land-use conditions. Highly suitable areas were characterized by high flood volumes, superior water quality, high hydraulic conductivity, alluvial and Quaternary formations, gentle slopes, and low-conflict land uses. Conversely, areas with low permeability, unfavorable slopes, residential or agricultural land use, or water quality constraints received lower suitability scores.

Following the integration of the weighted layers in GIS, five potential sites for artificial recharge were identified based on the drainage network, land conditions, slope, and flood routing capacity. This stage highlighted that while spatial mapping identifies suitable preliminary options, a quantitative assessment of the aquifer's response is essential for final prioritization. Factors such as a site's position relative to groundwater flow direction, exploitation zones, hydraulic coefficients, and aquifer boundaries significantly influence the actual impact of recharge. Numerical modeling of the Azghand aquifer revealed significant spatial heterogeneity in hydraulic parameters. During the steady-state calibration,

hydraulic conductivity was identified as a highly sensitive parameter, ranging from a maximum of 12 m/day in the northern part of the aquifer to a minimum of 3 m/day in the southwest. This variation indicates that the capacity for water transmission differs across the aquifer, which directly affects the propagation of the recharge effect. Furthermore, the calibrated average specific yield was approximately 6%, reflecting the aquifer's storage capacity and its influence on water table response to recharge. Simulating the proposed sites in MODFLOW demonstrated that not all options contribute equally to improving the aquifer's quantitative status. Based on the Aquifer Quantitative Status Improvement Index, Site 1 was ranked as the top priority with an index value of 2.24, followed by Site 4 (2.03), Site 2 (1.64), Site 3 (1.21), and Site 5 (1.12). The variance in these index values confirms that spatial suitability derived from AHP-GIS is insufficient for final decision-making; the actual hydrodynamic impact must be evaluated through numerical modeling. These findings indicate that Site 1 is not only spatially suitable but also yields the greatest hydrodynamic response in terms of elevating the groundwater table. Its high performance can be attributed to its strategic location relative to the drainage network, favorable hydraulic conditions, effective connectivity to exploited zones, and high capacity for transmitting the recharge impact. In contrast, the lower indices of other sites suggest that even if a location appears suitable based on surface criteria, subsurface conditions or limited flow transmission may hinder its ability to improve groundwater levels. Therefore, integrating AHP-GIS with MODFLOW enhances decision-making accuracy and reduces uncertainty in selecting artificial recharge sites.

Conclusion

This study was conducted to identify and prioritize suitable areas for artificial recharge in the Azghand aquifer and aimed to move the decision-making process from simple spatial zoning toward evaluating the actual effectiveness of recharge on aquifer conditions. The results showed that applying AHP within a GIS environment provides a suitable framework for identifying potential recharge zones based on a range of surface and subsurface criteria. However, the AHP-GIS output mainly reflects spatial suitability and cannot, by itself, determine the actual impact of each option on the quantitative behavior of the aquifer. Therefore, the use of the MODFLOW numerical model in the next stage made it possible to analyze aquifer response to artificial recharge scenarios and compare the performance of the proposed sites. According to the modeling results, hydraulic conductivity in the Azghand aquifer ranges from 3 to 12 m/day, while the average specific yield is about 6%. This hydrogeological heterogeneity indicates that the aquifer does not respond uniformly to artificial recharge across all areas. Among the five proposed sites, Site 1, with an improvement index of 2.24, showed the highest effectiveness and was identified as the top priority for artificial recharge implementation. Sites 4, 2, 3, and 5 ranked next, respectively. Thus, the aquifer quantitative status improvement index provided a quantitative and comparable basis for ranking the alternatives. The main contribution of this study is the development of an integrated approach for moving from potential-based site selection to effectiveness-based prioritization. In this framework, potentially suitable areas are first identified using spatial criteria, and their actual performance is then evaluated through numerical aquifer modeling. This approach can provide a practical tool for water resources managers and decision-makers in selecting the optimal locations for artificial recharge projects. It is also recommended that future studies examine the combined effects of implementing multiple recharge sites, changes in flood input volume, drought and wet-period scenarios, the water quality impacts of recharge, and the long-term consequences of artificial recharge on aquifer balance, in order to support more reliable decision-making for aquifer restoration.



تدوین مدل اثربخشی اجرای تغذیه مصنوعی بر منابع آب زیرزمینی

حمید کاردان مقدم^۱ | مهسا جباری^۲ | فرزاد هاشم‌زاده^۳ | سیده زینب یعقوبی^۴ | الهام شیرزادی^۵

۱. استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.
۲. کارشناس پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.
۳. کارشناس دفتر مطالعات و بررسی‌های فنی، معاونت مهندسی و توسعه، شرکت مهندسی آب و فاضلاب کشور، تهران، ایران.
۴. دانش‌آموخته دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۵. کارشناس پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب، تهران، ایران.

✉ نویسنده مسئول: h.kardan@wri.ac.ir

چکیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۴/۱۵
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۰۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۷

در این پژوهش، مکان‌یابی و اولویت‌بندی عرصه‌های مناسب تغذیه مصنوعی در آبخوان ازغند با استفاده از رویکرد تلفیقی AHP-GIS و مدل عددی انجام شد. هشت معیار مؤثر شامل کمیت آب، کیفیت آب، هدایت هیدرولیکی، کاربری اراضی، سازندهای زمین‌شناسی، شیب، وضعیت بهره‌برداری و نزدیکی به منابع آب زیرزمینی انتخاب و در محیط GIS طبقه‌بندی شد. وزن معیارها و زیرکلاس‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین و نقشه پتانسیل تغذیه مصنوعی تهیه شد. بر اساس نتایج مکان‌یابی، پنج موقعیت پیشنهادی برای اجرای تغذیه مصنوعی انتخاب گردید. در مرحله بعد، مدل عددی جریان آب زیرزمینی آبخوان ازغند با MODFLOW توسعه یافت و پس از واسنجی، برای ارزیابی اثر هر یک از مکان‌های پیشنهادی بر سطح آب زیرزمینی به کار گرفته شد. برای مقایسه عملکرد مکان‌های پیشنهادی، شاخص بهبود وضعیت کمی آبخوان تعریف شد که نسبت متوسط سالانه افزایش تراز آب در حالت اعمال تغذیه مصنوعی به متوسط سالانه افت آب در شرایط بدون تغذیه مصنوعی را نشان می‌دهد. بر اساس این شاخص، مکان شماره ۱ با مقدار ۲/۲۴ به‌عنوان اولویت اول، مکان شماره ۴ با مقدار ۲/۰۳ به‌عنوان اولویت دوم و مکان‌های شماره ۲، ۳ و ۵ به ترتیب با مقادیر ۱/۶۴، ۱/۲۱ و ۱/۱۲ در اولویت‌های بعدی قرار گرفت. نتایج نشان داد تلفیق مکان‌یابی AHP-GIS با مدل‌سازی عددی، امکان عبور از پهنه‌بندی صرفاً پتانسیل‌محور و دستیابی به اولویت‌بندی اثربخشی‌محور را فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها:

آبخوان ازغند، تحلیل سلسله‌مراتبی، تغذیه مصنوعی، شاخص بهبود آبخوان، MODFLOW

مقدمه

منابع آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه خشک، یکی از مهم ترین ذخایر راهبردی برای تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت محسوب می شود (Boo et al., 2024). محدودیت بارش، نوسان شدید زمانی و مکانی بارندگی، افزایش تقاضای آب و توسعه بهره برداری از چاه ها موجب شده است که بسیاری از آبخوان ها با افت مستمر سطح آب زیرزمینی و کاهش ذخیره آبخوان مواجهه باشد (Moghaddam et al., 2025). این مسئله در ایران، به دلیل قرارگیری بخش وسیعی از کشور، در اقلیم خشک و نیمه خشک و وابستگی گسترده به منابع آب زیرزمینی، اهمیت ویژه ای دارد. گزارش های بین المللی نشان می دهد که مصارف آب در بخش کشاورزی سهم غالبی از برداشت آب در ایران را به خود اختصاص می دهد و بهره برداری بیش از ظرفیت از آبخوان ها به ویژه در حوضه های مرکزی کشور، یکی از عوامل اصلی کاهش ذخایر آب زیرزمینی است. مطالعات اخیر نیز نشان داده که افت آب زیرزمینی، کاهش تغذیه طبیعی آبخوان ها و تشدید فرونشست زمین از پیامدهای مهم بهره برداری ناپایدار از منابع آب زیرزمینی در ایران است (Javadi et al., 2021; Noori et al., 2021). در چنین شرایطی، مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی نیازمند رویکردهایی است که علاوه بر کنترل برداشت، امکان احیا و تقویت ذخیره آبخوان ها را ایجاد کند. در این راستا یکی از راهکارهای مؤثر در بحث احیاء و تقویت آبخوان ها، تغذیه مصنوعی یا مدیریت تغذیه آبخوان است. تغذیه مصنوعی به مجموعه اقداماتی اطلاق می شود که طی آن، آب سطحی، رواناب ها، سیلاب ها یا منابع آب مازاد به صورت هدفمند به درون سازندهای نفوذپذیر هدایت شده تا ذخیره آب زیرزمینی بهبود و در زمان مناسب مورد بهره برداری قرار گیرد (Dillon et al., 2020).

این فرایند می تواند از طریق روش هایی مانند حوضچه های نفوذ، پخش سیلاب، بندهای تغذیه ای، کانال ها و

گودال های نفوذ، یا تزریق مستقیم از طریق چاه ها انجام گیرد (Bouwer, 2002). مطالعات مروری نیز نشان داده اند که مدیریت تغذیه آبخوان می تواند در افزایش امنیت آبی، کاهش افت سطح آب زیرزمینی، بهبود کیفیت آب، افزایش تاب آوری در برابر خشکسالی و تقویت مدیریت تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی نقش مؤثری داشته باشد (Eghbali Lord et al., 2025).

با وجود مزایای تغذیه مصنوعی، موفقیت این طرح ها به شدت وابسته به انتخاب صحیح مکان یابی و محل اجرا است. مکان یابی نامناسب می تواند موجب کاهش راندمان نفوذ، افزایش تلفات سطحی، ایجاد ماندابی شدن، انتقال آلاینده ها، عدم تأثیر محسوس بر سطح آب زیرزمینی و اتلاف هزینه های اجرایی شود؛ بنابراین، شناسایی عرصه های مناسب برای تغذیه مصنوعی باید بر اساس مجموعه ای از معیارهای مختلف انجام گیرد. معیارهایی مانند شیب، زمین شناسی، ژئومورفولوژی، نفوذپذیری، بافت خاک، کاربری اراضی، تراکم زهکشی، فاصله از آبراهه ها، بارش، عمق سطح آب زیرزمینی، ضخامت آبرفت و ویژگی های هیدرودینامیکی آبخوان از جمله عوامل مؤثر در تعیین قابلیت اجرای تغذیه مصنوعی هستند (Seif et al., 2024; Song et al., 2025).

در سال های اخیر، استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی^۱، سنجش از دور و روش های تصمیم گیری چندمعیاره^۲، به ویژه تحلیل سلسله مراتبی^۳، به عنوان یکی از رویکردهای رایج در مکان یابی مناطق مستعد تغذیه مصنوعی گسترش یافته است. مرور مطالعات اخیر نشان می دهد که رویکرد غالب در مکان یابی تغذیه مصنوعی، استفاده از GIS، سنجش از دور و روش های تصمیم گیری چندمعیاره مانند

1 Geographic Information System (GIS)

2 Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)

3 Analytical Hierarchy Process (AHP)

۱۴۰۲ به منظور تشخیص محدوده‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی در منطقه‌ی کوهستانی گهر و دشت گربایگان، در استان فارس، از پهنه‌بندی کمی سطح زمین با برازش فرم بنیادی پله‌ای و خطی، به سطح استفاده کرد. برای تشخیص بهترین ساختار بنیادی پله‌ای قابل برازش از ساختارهایی با رده درجه دو برای پنجره سه‌تایی و از داده‌های حاصل از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۱۰ متری استفاده گردیده است. برای تعیین درجه برازش ساختارهای بنیادی از شاخص مجموع اختلاف مربعات اختلافات سطح استفاده شده است (Ebrahimi, 2023). مناسب بودن یک پهنه از نظر معیارهای سطحی، لزوماً به معنی بیشترین اثربخشی هیدرولیکی نبوده و پاسخ آبخوان علاوه بر ویژگی‌های سطحی، به هدایت هیدرولیکی، آبدی و ویژه، ضخامت اشباع، شرایط مرزی، جهت جریان، محل برداشت‌ها و اجزای بیلان وابسته است؛ بنابراین، نقشه تناسب مکانی باید به‌عنوان مرحله غربالگری استفاده شود و انتخاب نهایی با ارزیابی عددی پاسخ آبخوان تکمیل گردد. اگرچه استفاده از AHP، GIS و MODFLOW پیش‌تر در پژوهش‌های مکان‌یابی تغذیه مصنوعی بکار گرفته شده است؛ اما در مطالعه حاضر که مبتنی بر چارچوب دومرحله‌ای است، در مرحله نخست گزینه‌های مستعد با AHP-GIS شناسایی و در مرحله دوم، هر گزینه به‌طور مستقل در MODFLOW شبیه‌سازی و بر اساس پاسخ کمی آبخوان رتبه‌بندی می‌شود. بدین ترتیب، اولویت نهایی صرفاً از امتیاز تناسب مکانی به دست نیامد و اثر هیدرولیکی گزینه نیز در تصمیم‌گیری وارد شد. در این پژوهش تلاش شده است از رویکرد متداول مکان‌یابی پتانسیل محور به رویکرد اولویت‌بندی اثربخشی محور تبدیل شود. در این چارچوب، مکان‌های پیشنهادی تغذیه مصنوعی نه تنها بر اساس قابلیت طبیعی و مکانی، بلکه بر اساس میزان تأثیر آن‌ها بر بهبود سطح آب زیرزمینی،

AHP، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی^۱، و میانگین وزنی مرتب شده^۲ است (Raja Shekar & Mathew, 2023). این مطالعات معمولاً با تلفیق معیارهایی مانند شیب، زمین‌شناسی، بافت خاک، کاربری اراضی، عمق آب زیرزمینی، تراکم زهکشی، هدایت هیدرولیکی، کیفیت آب و دسترسی به منابع آب، نقشه پتانسیل تغذیه مصنوعی را تهیه می‌کنند. با این حال، بخش زیادی از این پژوهش‌ها در مرحله پهنه‌بندی مکانی متوقف می‌شود و پاسخ واقعی آبخوان به اجرای تغذیه مصنوعی را از طریق مدل‌سازی عددی بررسی نمی‌کنند. از این نظر، پژوهش‌هایی مانند جوادی و همکاران (Javadi et al., 2021) و الایماتو همکاران (Alelaimat et al., 2023) که مکان‌یابی را با MODFLOW تلفیق کرده‌اند، به رویکرد ارزیابی و اثربخشی اشاره داشته اما اولویت‌بندی بنا به اثربخشی کمی بر آبخوان مدنظر نبوده است (Alelaimat et al., 2021; Javadi et al., 2023). همچنین، حسن‌پور و خزیمه نژاد نیز طی پژوهشی عرصه‌های مناسب تغذیه مصنوعی برای افزایش آبدی قنوات آبخوان دشت گناباد تعیین کردند. بدین منظور، ابتدا داده‌های شش پارامتر تأثیرگذار شیب حوضه، کیفیت آب، ضخامت آبرفت، کاربری اراضی، سیلخیزی و نفوذپذیری منطقه مورد مطالعه، در محیط GIS آماده‌سازی و تعیین گردید و با استفاده از روش سلسله‌مراتبی و مقایسه زوجی به ترتیب وزن هر معیار و زیرمعیار در نرم‌افزار Expert choice محاسبه شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد مناطق غربی آبخوان، مکان مناسبی برای انجام طرح تغذیه مصنوعی است که حدود نیمی از قنوات موجود در این محدوده قرار می‌گیرد (Hassanpour, 2017). ابراهیمیان و همکاران در سال

1 Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP)

2 Ordered Weighted Average (OWA)

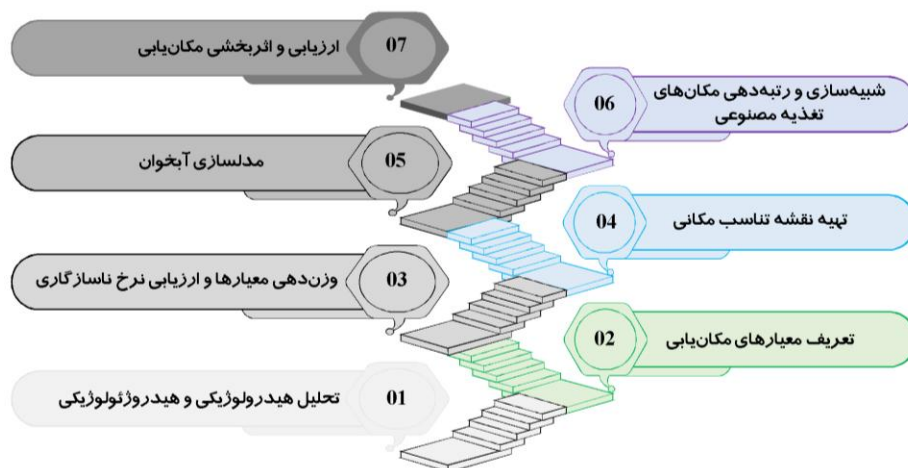
تغییرات تراز هیدرولیکی و شاخص بهبود نسبی آبخوان رتبه‌بندی می‌شوند.

مواد و روش‌ها

روش پژوهش

باتوجه به رویکرد فرایندمحور استفاده از مدل عددی برای تدقیق و اولویت‌بندی عرصه‌های مناسب تغذیه مصنوعی، روش پژوهش در ۷ گام برنامه‌ریزی شد. در گام اول، گردآوری و آماده‌سازی داده‌های هیدروژئولوژیکی، هیدروژئولوژیکی و محیط طبیعی ارزیابی می‌شود. در گام دوم مدل مفهومی مکان‌یابی تغذیه مصنوعی مبتنی بر مطالعات انجام‌گرفته شده طراحی می‌شود. سپس وزن‌دهی

معیارهای مؤثر بر مکان‌یابی تغذیه مصنوعی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) تعیین می‌شود. در گام چهارم مدل تناسب مکانی تهیه و مکان‌یابی مناطق مستعد انجام می‌شود. در گام پنجم مدل‌سازی عددی آبخوان بر پایه کد MODFLOW انجام شده و رفتارسنجی کمی آبخوان انجام می‌شود. در گام ششم شبیه‌سازی و رتبه‌دهی مکان‌های منتخب در مدل اعمال می‌شود و در گام هفتم، اثربخشی مکان‌های مناسب تغذیه مصنوعی تحلیل شده و با استفاده از شاخص بهبود نسبی آبخوان اولویت‌بندی می‌شود.



شکل ۱. روش‌شناسی پژوهش

Fig 1. Research study

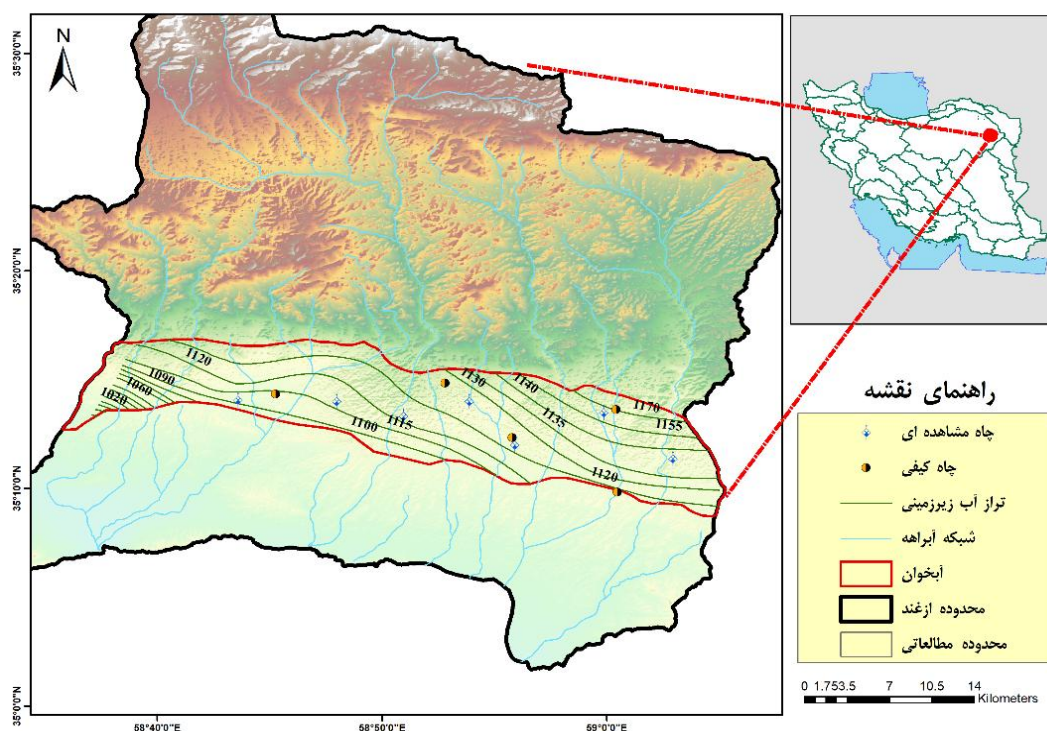
منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی ازغند با وسعت ۱۹۵۳ کیلومترمربع واقع در بخش شرقی حوزه آبریز کویر مرکزی واقع شده است. سطحی بالغ بر ۳۸۴ کیلومترمربع این محدوده نواحی دشتی که ۳۰۶ کیلومترمربع آبخوان آبرفتی را تشکیل داده است. بررسی‌های هیدروژئولوژیکی در این آبخوان بیانگر این موضوع است که حداکثر میزان ضخامت آبرفت در بخش مرکزی و به میزان ۲۵۰ متر است و به سمت شرق و دامنه ارتفاعات جنوبی از ضخامت آن کاسته می‌شود. این رسوبات بر روی سنگ هادی که عمدتاً از

رخساره‌های نفوذن تشکیل‌یافته قرار داشته و آبخوان دشت ازغند را تشکیل می‌دهد. آبرفت تشکیل‌دهنده دشت شامل واریزه‌ها، مخروط‌افکنه‌ها، پادگانه‌های قدیمی، جدید و رسوبات رودخانه‌ای است. بررسی‌ها اکتشافی و متوسط عمق چاه‌های بهره‌برداری و مشاهده‌ای در این آبخوان نشان می‌دهد که متوسط ضخامت لایه اشباع حدود ۳۰ متر است. در این محدوده ۷ حلقه چاه مشاهده‌ای برای اندازه‌گیری ماهانه سطح آب زیرزمینی حفر شده است. بررسی‌های رفتار کمی آبخوان نشان می‌دهد که این آبخوان در وضعیت کسری و افت قرار داشته و متوسط

شده است. دامنه تغییرات اسیدیته (pH) بین ۷/۶ تا ۸/۲ در نوسان است. بیشترین گستره آبخوان تحت تسلط تیپ بی کربناته قرار داشته و در هر دو نوع تیپ سولفات و بی کربناته رخساره از نوع سدیک تحلیل شده است. کیفیت آب در این پژوهش به عنوان یک معیار حفاظتی در مرحله مکان یابی لحاظ شد. استفاده از این معیار به معنی شبیه سازی تغییرات کیفی آبخوان پس از اجرای تغذیه مصنوعی نیست؛ مدل عددی حاضر صرفاً برای ارزیابی جریان و تغییرات کمی تراز آب زیرزمینی توسعه یافت.

سالانه ۰/۵ متر افت ثبت شده است. جهت جریان آب زیرزمینی در این آبخوان به صورت عمومی شمال به طرف جنوب است که از بخش شمالی و ارتفاعات تغذیه و بیشتر حجم آب در مرکز آبخوان مورد بهره برداری قرار می گیرد. در شکل ۲ موقعیت آبخوان و محدوده مطالعاتی ازغند نمایش داده شده است. در این محدوده تعداد ۵ حلقه چاه عمیق به عنوان چاه منتخب کیفی مورد سنجش کیفی قرار گرفته که حداقل میزان هدایت الکتریکی ۶۸۰ میکروموس بر سانتیمتر و حداکثر آن ۱۱۷۳ میکروموس بر سانتیمتر اندازه گیری



شکل ۲. موقعیت محدوده مطالعاتی ازغند

Fig 2. Location of the study area of Azghand

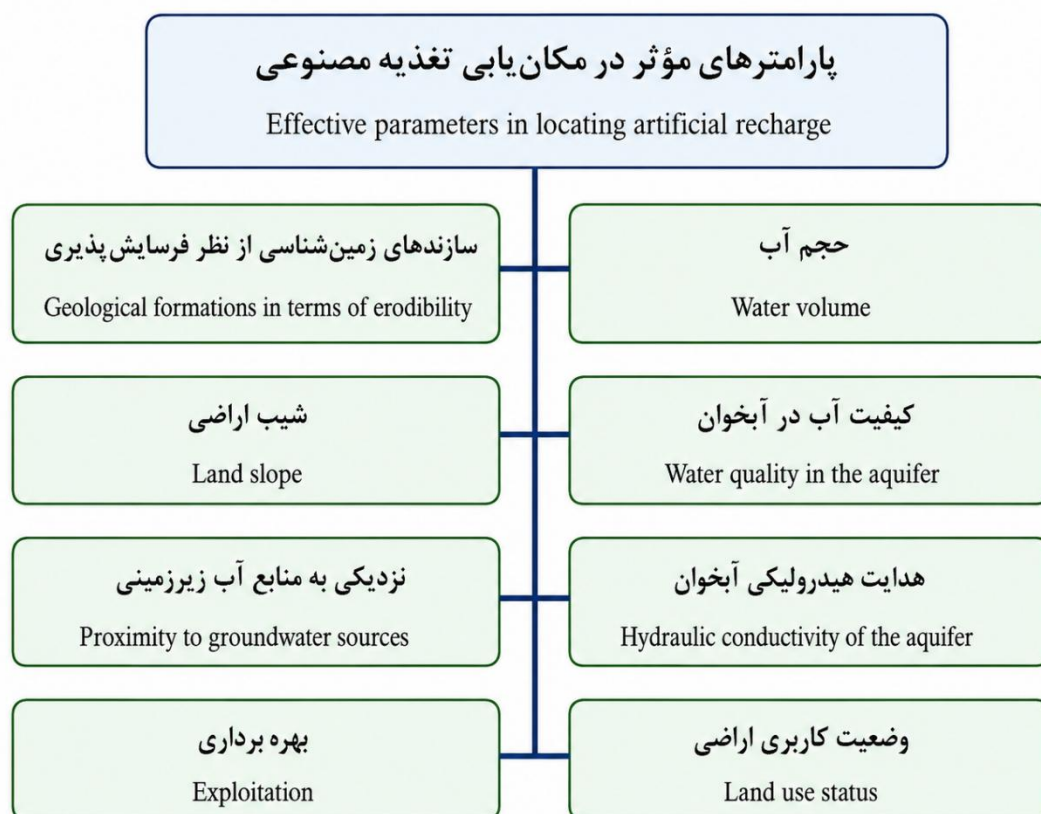
هیدروژئولوژیکی منطقه، بررسی های میدانی و هدف اصلی پژوهش، یعنی استفاده از جریان های سیلابی برای تغذیه آبخوان، انجام گرفت (Kaliraj et al., 2014; Onglassynov et al., 2025). در این پژوهش، مدل مفهومی مکان یابی تغذیه مصنوعی بر مبنای هشت پارامتر اصلی شامل سازندهای زمین شناسی از نظر

مدل مفهومی مکان یابی تغذیه مصنوعی

به منظور شناسایی عرصه های مناسب برای اجرای تغذیه مصنوعی، ابتدا معیارهای مؤثر بر قابلیت اجرای طرح، امکان نفوذ آب، پایداری محیطی و اثربخشی هیدروژئولوژیکی شناسایی شدند. انتخاب این معیارها بر اساس مرور مطالعات پیشین، شرایط طبیعی و

نظر قابلیت نفوذ و هم از نظر اثرگذاری بر آبخوان شرایط مناسبی وجود داشته باشد، معیارهای انتخاب شده سه جنبه اصلی قابلیت فیزیکی و ژئومورفولوژیکی محل برای نفوذ و استقرار سازه تغذیه‌ای (جنبه اول)، توان هیدروژئولوژیکی آبخوان برای پذیرش، انتقال و ذخیره آب تغذیه شده (جنبه دوم) و ملاحظات بهره‌برداری، کیفی و کاربری اراضی (جنبه سوم) اشاره داشت. در شکل ۳ چارچوب پارامترهای مؤثر بر مکان‌یابی تغذیه مصنوعی ارائه شده است.

فرسایش‌پذیری، شیب اراضی، نزدیکی به منابع آب زیرزمینی، وضعیت بهره‌برداری، حجم آب، کیفیت آب در آبخوان، هدایت هیدرولیکی آبخوان و وضعیت کاربری اراضی طراحی شد. هر یک از این پارامترها به صورت یک لایه اطلاعاتی مستقل در محیط GIS تهیه و پس از طبقه‌بندی، استانداردسازی و وزن‌دهی، در فرایند تلفیق مکانی مورد استفاده قرار گرفتند. خروجی این مرحله، نقشه پهنه‌بندی اولیه عرصه‌های مستعد تغذیه مصنوعی بود (Nithya et al., 2019). از آنجا که تغذیه مصنوعی زمانی موفق خواهد بود که هم از نظر تأمین آب، هم از



شکل ۳. پارامترهای منتخب مکان‌یابی تغذیه مصنوعی
Fig 3. Selected parameters for artificial recharge location

اجرای سازه و احتمال گرفتگی سطح نفوذ اثر مستقیم دارد. سازندهای بسیار فرسایش‌پذیر می‌تواند باعث افزایش بار رسوبی جریان‌های سیلابی شده و با انسداد منافذ سطحی، راندمان نفوذ را کاهش دهد. در مقابل، سازندهای

سازندهای زمین‌شناسی از نظر فرسایش‌پذیری یکی از معیارهای مهم در مکان‌یابی تغذیه مصنوعی است (Hussaini et al., 2022). سازندهای زمین‌شناسی از نظر جنس و مقاومت بر میزان تولید رسوب، پایداری محل

با فرسایش پذیری کمتر و پایداری مناسب، شرایط مطلوب تری برای احداث سازه های تغذیه ای فراهم می کند. شیب اراضی از دیگر عوامل تعیین کننده در موفقیت تغذیه مصنوعی است. مناطق با شیب زیاد معمولاً باعث افزایش سرعت رواناب، کاهش زمان ماند آب و کاهش فرصت نفوذ می شود. همچنین در این نواحی احتمال فرسایش و انتقال رسوب بیشتر بوده و در مقابل، اراضی با شیب ملایم شرایط مناسب تری برای پخش سیلاب، افزایش زمان تماس آب با سطح زمین و نفوذ تدریجی به داخل آبخوان دارند. لذا در مدل مفهومی، پهنه های دارای شیب کمتر معمولاً از اولویت بالاتری برای اجرای تغذیه مصنوعی برخوردار است (Rajasekhar et al., 2021).

نزدیکی به منابع آب زیرزمینی در این پژوهش به عنوان معیاری برای بررسی ارتباط مکانی عرصه های پیشنهادی با محدوده های حساس یا مؤثر آبخوان در نظر گرفته می شود (Seif et al., 2024). این معیار صرفاً براساس فاصله مکانی از چاه ها، قنوات، چشمه ها و پهنه های حساس آبخوان تعریف می شود. فاصله اقلیدسی هر سلول در محیط GIS محاسبه و به طبقات تناسب تبدیل می شود. تعداد چاه، تراکم منابع و حجم برداشت در این معیار استفاده نشد و در معیار مستقل وضعیت بهره برداری در نظر گرفته می شود.

فاصله بسیار کم می تواند موجب برداشت سریع آب تغذیه شده و فاصله بسیار زیاد می تواند اثر قابل پایش طرح را کاهش دهد، لذا فاصله میانی و کنترل شده اولویت بیشتری دارد.

حجم آب یکی از معیارهای کلیدی در مکان یابی تغذیه مصنوعی است، زیرا اجرای طرح بدون وجود منبع آب مناسب از نظر کمی و کیفی، کارایی لازم را ندارد (Hussaini et al., 2022). در پژوهش حاضر که هدف استفاده از جریان های سیلابی برای تغذیه مصنوعی است، حجم آب قابل دسترس از رواناب ها و سیلاب ها اهمیت زیادی داشته که براین اساس مناطقی که امکان جمع آوری، هدایت و ذخیره موقت حجم مناسبی از سیلاب را دارد، پتانسیل بالاتری را دارد. این معیار نشان می دهد که آیا منبع آبی کافی برای ایجاد اثر محسوس بر آبخوان وجود دارد یا خیر. کمیت جریان سیلابی با استفاده از دبی اوج زیرحوضه های بالادست آبخوان پس از انتخاب روش تجربی کریگر از بین روشهای تجربی محاسبه گردید. دبی اوج برای دوره های بازگشت های ۲ تا ۱۰۰ ساله محاسبه و حجم سیلاب در دوره بازگشت ۲۵ ساله مبنای حجم تغذیه مصنوعی انتخاب شد. در جدول ۱ برآورد سیلاب با استفاده از روش کریگر ارائه شده است.

جدول ۱. سیلاب در منطقه مورد مطالعه با روش کریگر (مترمکعب بر ثانیه)
Table 1. Flood in the study area using the Krieger method (m^3/s)

دوره بازگشت Return period						زیرحوزه Sub-basin
100	50	25	10	5	2	
460.9	373.3	214.2	126.4	78.4	30.8	S1
1021.4	821.5	674.7	421.5	238.1	112	S2
504.9	399.2	226.3	135.4	80.2	32.5	S3
671.4	482.5	325.7	267.1	184.6	84.3	S4
570.9	446.7	299.0	197.4	132.8	58.6	S5
329.9	286.1	164.2	96.9	60.1	23.6	S6

کیفیت آب در آبخوان از جنبه حفاظتی و مدیریتی اهمیت دارد. تغذیه مصنوعی نباید موجب افت کیفیت آب زیرزمینی یا انتقال آلاینده‌ها به آبخوان شود (Javadi et al., 2021). کیفیت موجود آب زیرزمینی می‌تواند نشان دهد که آبخوان از نظر شوری، سختی، هدایت الکتریکی یا سایر شاخص‌های کیفی در چه وضعیتی قرار دارد و آیا ورود آب سیلابی می‌تواند موجب بهبود، رفیق‌سازی یا در برخی موارد تشدید مشکلات کیفی شود. بنابراین، در مدل مفهومی، کیفیت آب به‌عنوان معیاری برای کاهش ریسک‌های زیست‌محیطی و حفاظت از منابع آب زیرزمینی لحاظ می‌شود. مدل‌سازی قابل‌اعتماد انتقال املاح صرفاً براساس پارامترهای شوری مانند EC و SAR امکان‌پذیر نبوده و به سری زمانی غلظت آب ورودی و آبخوان، تخلخل مؤثر، پخشیدگی طولی و عرضی، انتشار، شرایط اولیه و مرزی انتقال و در صورت لزوم اطلاعات ژئوشیمیایی نیاز دارد که نبود مجموعه کامل این داده‌ها سبب شد مدل کیفی در دامنه پژوهش حاضر قرار نگیرد.

هدایت هیدرولیکی آبخوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای هیدروژئولوژیکی در تغذیه مصنوعی است. این پارامتر نشان‌دهنده توانایی محیط آبخوان برای عبور دادن آب است. هرچه هدایت هیدرولیکی بیشتر باشد، آب تغذیه‌شده با سهولت بیشتری در محیط متخلخل حرکت کرده و امکان گسترش اثر تغذیه در آبخوان افزایش می‌یابد. در مقابل، آبخوان‌هایی با هدایت هیدرولیکی پایین ممکن است ظرفیت پذیرش و انتقال محدودی داشته باشند و اجرای تغذیه مصنوعی در آن‌ها با ماندابی شدن یا کاهش راندمان همراه شود. بنابراین، هدایت هیدرولیکی نقش مستقیمی در تعیین قابلیت پذیرش و توزیع آب تغذیه‌شده در آبخوان دارد (Ebrahim et al., 2024). وضعیت کاربری اراضی نیز در مکان‌یابی تغذیه مصنوعی از نظر اجرایی، محیطی و مدیریتی اهمیت دارد. برخی کاربری‌ها مانند اراضی بایر، مراتع کم‌تراکم یا اراضی

حاشیه آبراهه‌ها معمولاً امکان بیشتری برای اجرای سازه‌های تغذیه‌ای دارد (Nithya et al., 2019). در مقابل، اراضی شهری، صنعتی، باغات متراکم یا اراضی دارای ارزش اقتصادی و مالکیتی بالا ممکن است محدودیت اجرایی ایجاد کنند. همچنین برخی کاربری‌ها می‌توانند ریسک آلودگی را افزایش دهد. بر اساس این ساختار، مدل مفهومی مکان‌یابی تغذیه مصنوعی در این پژوهش به‌گونه‌ای طراحی شد که ابتدا عرصه‌های دارای قابلیت اولیه برای اجرای تغذیه مصنوعی شناسایی شوند. سپس این عرصه‌ها در مرحله بعد با استفاده از مدل عددی MODFLOW از نظر میزان اثرگذاری بر سطح آب زیرزمینی و بهبود وضعیت کمی آبخوان ارزیابی شدند. بنابراین، خروجی مدل مفهومی مکان‌یابی، مبنای اولیه‌ای برای تعریف سناریوهای تغذیه مصنوعی و اولویت‌بندی نهایی مناطق بر اساس شاخص بهبود نسبی آبخوان فراهم می‌کند. در جدول ۱ خلاصه نقش عوامل مؤثر در مدل مفهومی تغذیه مصنوعی تشریح شده است.

مکان‌یابی محل مناسب تغذیه مصنوعی با روش

AHP

در این پژوهش، به‌منظور تعیین عرصه‌های مناسب تغذیه مصنوعی، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شد. ابتدا هشت معیار اصلی شامل حجم آب، کیفیت آب در آبخوان، هدایت هیدرولیکی آبخوان، کاربری اراضی، سازندهای زمین‌شناسی، شیب اراضی، وضعیت بهره‌برداری و نزدیکی به منابع آب زیرزمینی انتخاب گردید. سپس هر معیار بر اساس نقش آن در تغذیه مصنوعی و شرایط منطقه مطالعاتی، در چهار کلاس خیلی مناسب، مناسب، متوسط و نامناسب طبقه‌بندی شد. وزن‌دهی معیارها بر پایه مطالعات کتابخانه‌ای، اطلاعات میدانی و نظر کارشناسی انجام گرفت. برای این منظور، ابتدا کلاس‌های داخلی هر معیار امتیازدهی شد و سپس اهمیت نسبی معیارهای اصلی در قالب ماتریس مقایسات زوجی 8×8 تعیین گردید.

جدول ۲. تحلیل عوامل موثر بر مکان‌یابی تغذیه مصنوعی

Table 2. Analysis of factors affecting the location of artificial recharge

معیار Criteria	نقش در مکان‌یابی تغذیه مصنوعی Role in Artificial Recharge Site Selection	اثر مورد انتظار در انتخاب پهنه مناسب Expected impact on suitable site selection
سازندهای زمین‌شناسی از نظر فرسایش‌پذیری Geological formations in terms of erodibility	بررسی پایداری سازندها، تولید رسوب و احتمال گرفتگی سطح نفوذ Investigating formation stability, sediment production, and the possibility of infiltration surface clogging	سازندهای پایدارتر و کم‌فرسایش مناسب‌ترند More stable and less eroded formations are more suitable.
شیب اراضی Land slope	کنترل سرعت رواناب، زمان ماند آب و فرصت نفوذ Control of runoff velocity, water retention time and infiltration opportunity	شیب ملایم اولویت بیشتری دارد Gentle slope has higher priority.
نزدیکی به منابع آب زیرزمینی Proximity to groundwater sources	بررسی ارتباط مکانی محل تغذیه با چاه‌ها، قنات‌ها یا نواحی حساس آبخوان Investigation of the spatial relationship between recharge sites and wells, qanats, or sensitive aquifer zones	نزدیکی کنترل‌شده می‌تواند اثر تغذیه را قابل پایش‌تر کند Controlled proximity can make the recharge effect more monitorable.
وضعیت بهره‌برداری Exploitation Status	نشان‌دهنده شدت برداشت و نیاز آبخوان به احیا Reflecting exploitation intensity and the urgency of aquifer recovery.	نواحی با افت و برداشت بیشتر می‌توانند اولویت مدیریتی بالاتری داشته باشند Areas with higher depletion and exploitation intensity deserve greater management priority
حجم آب Water volume	بیانگر امکان تأمین آب کافی از جریان‌های سیلابی Indicates the possibility of providing sufficient water from flood flows	حجم بیشتر آب قابل دسترس، مطلوب‌تر است A higher volume of available water is more desirable
کیفیت آب در آبخوان Water quality in the aquifer	کنترل ریسک‌های کیفی و حفاظت از آب زیرزمینی Controlling quality risks and protecting groundwater	مناطق با شرایط کیفی مناسب‌تر یا قابلیت بهبود کیفی اولویت دارند Areas with more favorable water quality conditions or greater potential for quality improvement are prioritized
هدایت هیدرولیکی آبخوان Hydraulic conductivity of the aquifer	نشان‌دهنده توان آبخوان برای پذیرش و انتقال آب تغذیه‌شده Represents the aquifer's ability to receive and transmit the recharged volume	هدایت هیدرولیکی بالاتر، مناسب‌تر است Higher hydraulic conductivity is more suitable
وضعیت کاربری اراضی Land use status	بررسی امکان اجرای طرح و محدودیت‌های محیطی و مالکیتی Assessment of implementation feasibility and environmental and ownership constraints	راضی بایر، مرتعی و کم‌تعارض مناسب‌ترند Barren, pasture-like, and low-conflict lands are more suitable.

مؤثر آبخوان کنترل و پنج گزینه دارای بیشترین امتیاز برای ارزیابی در MODFLOW انتخاب گردید.

مدل سازی آب زیرزمینی

به منظور شبیه سازی اثر بخشی مکان های تغذیه مصنوعی در آبخوان ازغند، مدل سازی مبتنی بر استفاده از کد MODFLOW انجام گرفت. یک دوره یک ساله که شامل ۹ ماه برای واسنجی و ۳ ماه برای صحت سنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. گام زمانی شبیه سازی به صورت ماهانه و مهرماه ۹۶ با توجه به کمترین تغییرات تراز آب، کمترین حساسیت آبخوان به منابع تغذیه و تخلیه و داده های موجود برای شبیه سازی حالت ماندگار مدل انتخاب شد (Rajaei et al., 2019). مدل مفهومی آبخوان بر پایه مرز آبخوان، هندسه لایه، تراز اولیه، پارامترهای هیدرولیکی و مؤلفه های اصلی بیلان تهیه گردید. نفوذ مستقیم بارندگی، نفوذ جریان های سطحی، آب برگشتی کشاورزی و آب برگشتی شرب و صنعت به صورت تغذیه سطحی و با پوشش Areal Recharge به سلول های فعال تخصیص یافت. جریان جانبی زیرزمینی (GHB) به صورت شرایط مرزی هیدرولیکی، چاه های بهره برداری با بسته Well و خروجی های مرزی و تبخیر-تغرق متناسب با مدل مفهومی اعمال شد.

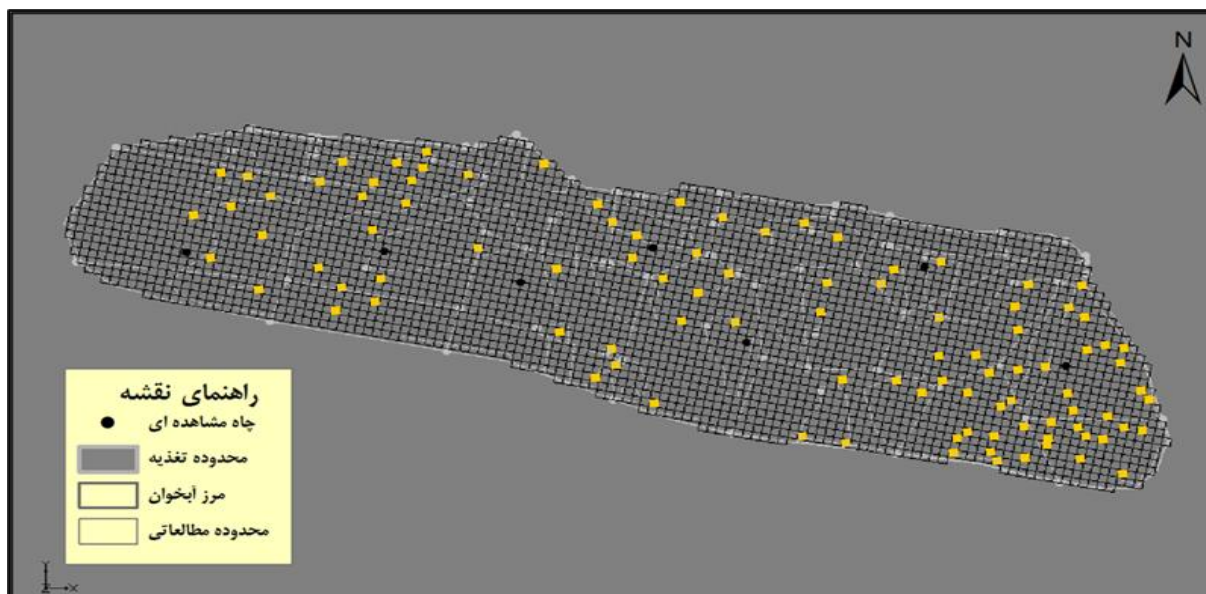
موقعیت ۷ چاه مشاهده ای در جدول ۳ ارائه شده است. به منظور شبیه سازی از ماه مهر سال ۱۳۹۶ به عنوان گام زمانی ابتدایی شبیه سازی استفاده شد. پس از تعیین مرز مدل و ورود داده های پایه، ساختار هندسی آبخوان شامل توپوگرافی سطح زمین، تراز اولیه آب زیرزمینی و سنگ بستر به صورت سه بعدی تعریف شد. این ساختار، چارچوب لازم برای تخصیص پارامترهای هیدرولیکی، شرایط مرزی و اجرای شبیه سازی جریان آب زیرزمینی را فراهم کرد. موقعیت هندسی آبخوان ازغند در شکل ۵ نشان داده شده است.

پس از محاسبه وزن نهایی معیارها و کنترل نرخ ناسازگاری، لایه های مکانی در محیط GIS استاندارد سازی و با استفاده از روش همپوشانی وزن دار تلفیق شدند. در طبقه بندی معیارها، زیرحوضه های دارای حجم سیلاب بیشتر، آب با کیفیت مناسب تر بر اساس دیاگرام ویلکاکس، محدوده های دارای هدایت هیدرولیکی بالاتر، اراضی مرتعی و باير، سازندهای آبرفتی و کوآترنری، و اراضی با شیب ملایم در اولویت بالاتر قرار گرفتند. در مقابل، مناطق دارای سیلاب کم، کیفیت نامطلوب آب، نفوذپذیری پایین، کاربری مسکونی یا کشاورزی، سازندهای کم نفوذ و شیب های بسیار زیاد یا نامناسب، امتیاز کمتری دریافت کردند. همچنین معیارهای وضعیت بهره برداری و نزدیکی به منابع آب زیرزمینی با هدف توجه به نیاز مدیریتی آبخوان و اثرگذاری تغذیه مصنوعی بر منابع پایین دست وارد مدل شدند.

در نهایت، شاخص نهایی تناسب مکانی از طریق رابطه زیر محاسبه شد:

$$S = \sum_{i=1}^n W_i \cdot R_i \quad (1)$$

که در آن، S شاخص تناسب نهایی، W_i وزن معیار، R_i امتیاز کلاس مربوط به هر معیار و n تعداد معیارها است. خروجی این مرحله، نقشه پهنه بندی پتانسیل تغذیه مصنوعی بود که مبنای انتخاب گزینه ها برای ارزیابی اثر بخشی در مدل عددی MODFLOW قرار گرفت. پس از محاسبه شاخص نهایی، نقشه به بازه صفر تا یک نرمال و با روش شکست طبیعی جنکس در چهار طبقه نامناسب، متوسط، مناسب و خیلی مناسب طبقه بندی شد. پهنه خیلی مناسب آستانه اولیه انتخاب است و پهنه های پیوسته شناسایی و از هر پهنه، نقطه دارای بیشترین امتیاز استخراج می شود. سپس محدودیت های کاربری اراضی، امکان دسترسی و انتقال سیلاب و قرارگیری در محدوده



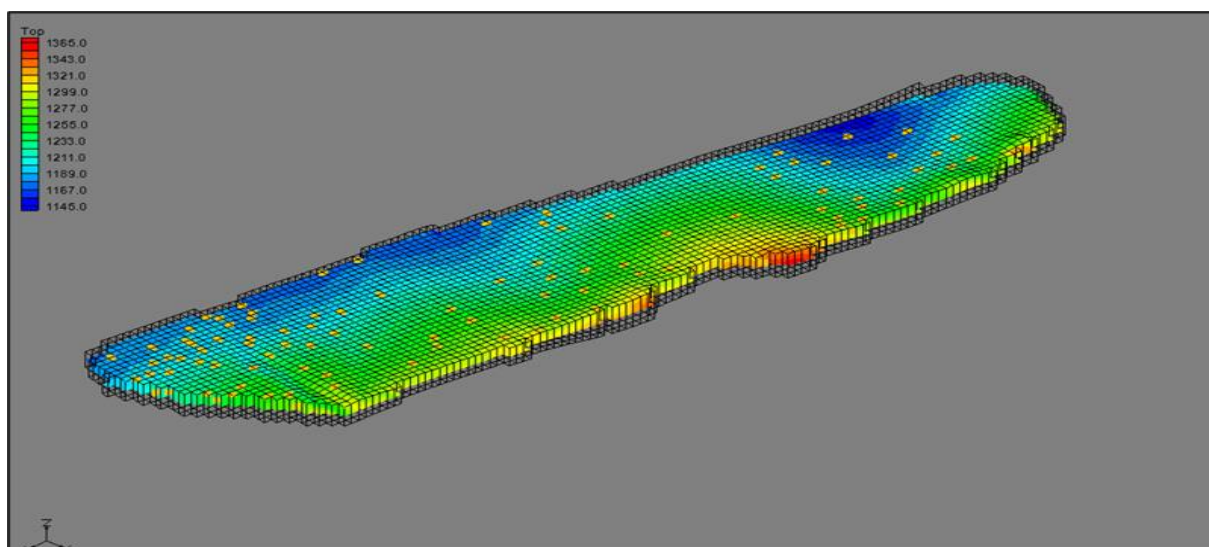
شکل ۴. مدل مفهومی آبخوان ازغند

Fig 4. Conceptual model of the Azghand aquifer

جدول ۳. موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان ازغند

Table 3. Location of observation wells in the Azghand aquifer

UTM Y	UTM X	Observation well	UTM Y	UTM X	Observation well
3899215	668376	سلطان آباد Soltan Abad	3899795	681872	زرمهر Zarmehr
3900364	657202	نای Na'ay	3895965	686602	شادمهر Shadmehr
3900411	663812	گلستان Golestan	3896875	675920	خوش دره Khosh Dareh
			3900541	672796	چنار Chenar



شکل ۵. موقعیت هندسی آبخوان ازغند

Fig 5. Geometric location of the Azghand aquifer

نشان می‌دهند و مبنای تلفیق نهایی لایه‌ها برای تهیه نقشه پتانسیل تغذیه مصنوعی قرار گرفتند. در ادامه، جدول‌های وزن‌دهی و نقشه‌های هشت معیار منتخب ارائه شده است.

بردار وزن معیارهای اصلی از ماتریس 8×8 مطابق جدول ۶ محاسبه شد. نتایج نشان داد که کمیت آب بیشترین وزن و بهره‌برداری کمترین وزن را دارا است. شاخص سازگاری برابر صفر و نرخ ناسازگاری ماتریس اصلی صفر محاسبه شد که بیانگر این موضوع است ماتریس اصلی از نظر سازگاری قابل قبول است.

برای تحلیل و تهیه هشت فاکتور برای مکان‌یابی به روش تحلیل سلسله‌مراتبی، در هر بخش کلاس‌بندی در ۴ بخش بر اساس اهمیت و رتبه‌ها انجام می‌شود (شکل ۶). در بخش کمیت آب، زیرحوضه‌های بالادست منطقه بر اساس حجم سیلاب به ۳ دسته تقسیم می‌شوند. زیرحوضه‌هایی که آورد بالایی دارند در کلاس خیلی مناسب و زیرحوضه‌هایی که آورد کمی دارند در کلاس متوسط تقسیم‌بندی می‌شوند. در بخش کیفیت آب بر اساس تقسیم‌بندی دیاگرام ویلکاکس تقسیم‌بندی و کلاس‌بندی خیلی مناسب تا نامناسب انجام می‌شود. با توجه به برآورد هدایت هیدرولیکی در محدوده آبخوان ازغند کلاس‌بندی از نفوذپذیری بالا (۱۲ متر در روز) تا نفوذپذیری پایین و نامناسب برای تغذیه مصنوعی انجام گرفت. تقسیم‌بندی اراضی منطقه از نظر کاربری به صورتی که مراتع با داشتن پتانسیل خیلی مناسب برای تغذیه مصنوعی و مناطق مسکونی و اراضی کشاورزی مناطق نامناسب تقسیم‌بندی می‌شود. سازندهای زمین‌شناسی منطقه نیز بر اساس ضریب انتقال آب در لایه‌های مختلف تقسیم‌بندی می‌شوند به‌طوری که آبرفت‌ها یا سازندهای کواترنر در گروه خیلی مناسب و مناسب و سازندهای نئوژن و نفوذناپذیر در کلاس نامناسب تقسیم شده‌اند.

مقادیر سالانه ورودی آبخوان شامل جریان جانبی زیرزمینی $12/18$ MCM، نفوذ مستقیم بارندگی $1/85$ MCM، نفوذ جریان‌های سطحی $2/6$ MCM، آب برگشتی ناشی از مصارف کشاورزی $7/9$ و آب برگشتی شرب و صنعت $3/8$ MCM در نظر گرفته شد. این مقادیر پس از تبدیل زمانی و مکانی متناسب با شبکه و گام مدل به MODFLOW وارد شد.

نتایج و بحث

مکان‌یابی محل مناسب تغذیه مصنوعی با روش AHP

در این مرحله، وزن‌دهی معیارها و زیرکلاس‌های مؤثر بر مکان‌یابی تغذیه مصنوعی با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی انجام شد. بدین منظور، برای هر یک از هشت معیار اصلی، شامل حجم آب، کیفیت آب، هدایت هیدرولیکی، کاربری اراضی، سازندهای زمین‌شناسی، شیب اراضی، وضعیت بهره‌برداری و نزدیکی به منابع آب زیرزمینی، کلاس‌های داخلی در قالب چهار سطح تناسب شامل خیلی مناسب، مناسب، متوسط و نامناسب ارزیابی شدند. برای تعیین وزن کلاس‌های هر معیار، ماتریس‌های مقایسات زوجی 4×4 تشکیل شد؛ بنابراین، در مجموع هشت ماتریس مقایسه زوجی برای رتبه‌بندی داخلی معیارها تهیه گردید که نتایج وزن‌دهی آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. سپس به‌منظور تعیین اهمیت نسبی معیارهای اصلی نسبت به یکدیگر، ماتریس مقایسات زوجی 8×8 تشکیل و وزن نهایی هر معیار محاسبه شد. نتایج این مرحله در جدول ۵ نشان داده شده است. مبنای تأیید دو ماتریس با استفاده از روش وزن‌دهی AHP، تعیین نرخ ناسازگاری است که در ماتریس زیرگروه میزان $0/09$ و در ماتریس معیارها مقدار $0/07$ به دست آمد.

پس از محاسبه وزن‌ها، نقشه هر یک از معیارها در محیط GIS تهیه و بر اساس کلاس‌های تعریف‌شده استانداردسازی شد. نقشه‌های حاصل، وضعیت مکانی هر عامل مؤثر بر تغذیه مصنوعی را در محدوده آبخوان ازغند

جدول ۴. ماتریس اهمیت و وزن پارامتر در هر زیرگروه

Table 4. Importance matrix and weight parameter in each subgroup

نامناسب Inappropriate	متوسط Moderate	مناسب Appropriate	خیلی مناسب Very Appropriate	محدوده زیر حوضه‌ها Sub-areas	کمیت آب Water quantity
8	5	2	1	S2-S4	خیلی مناسب Very Appropriate
5	2	1	1.2	S5	مناسب Appropriate
2	1	1.8	1.5	S1-S3-S6	متوسط Moderate
1	1.2	1.5	1.8	---	نامناسب Inappropriate
		متوسط Moderate	مناسب Appropriate	مقدار بر حسب دیاگرام ویلکاکس Value according to Wilcox diagram	کیفیت آب Water Quality
		3	1	$E_c < 750 - SAR < 10$	مناسب Appropriate
		1	1.3	$E_c < 2250 - SAR < 18$	متوسط Moderate
نامناسب Inappropriate	متوسط Moderate	مناسب Appropriate	خیلی مناسب Very Appropriate	میزان نفوذ - متر در روز Infiltration rate- meter/day	نفوذپذیری Infiltration
8	6	4	1	> 10	خیلی مناسب Very Appropriate
6	2	1	1.4	$7 - 10$	مناسب Appropriate
4	1	1.2	1.6	$4 - 7$	متوسط Moderate
1	1.4	1.6	1.8	< 4	نامناسب Inappropriate
	نامناسب Inappropriate	متوسط Moderate	مناسب Appropriate	خیلی مناسب Very Appropriate	فرسایش و سازند زمین‌شناسی Erosion and Geological Formation
	9	5	2	1	خیلی مناسب Very Appropriate

5	2	1	1.2	مناسب
				Appropriate
2	1	1.2	1.5	متوسط
				Moderate
1	1.2	1.5	1.9	نامناسب
				Inappropriate
نامناسب	متوسط	مناسب	خیلی مناسب	کاربری اراضی
Inappropriate	Moderate	Appropriate	Very Appropriate	Land Use
8	6	4	1	وضعیت
				اراضی مرتعی
				متوسط و غنی
				Moderate and rich rangelands
6	4	1	1.4	اراضی دیم و اراضی مرتع فقیر
				Rainy lands and poor rangelands
4	1	1.4	1.6	اراضی کشاورزی
				Agricultural lands
1	1.4	1.6	1.8	سایر اراضی
				Other lands
نامناسب	متوسط	مناسب	خیلی مناسب	درصد شیب
Inappropriate	Moderate	Appropriate	Very Appropriate	%Slope
9	7	3	1	< 5
				خیلی مناسب
				Very Appropriate
7	3	1	1.3	مناسب
				Appropriate
3	1	1.3	1.7	متوسط
				Moderate
1	1.3	1.7	1.9	نامناسب
				Inappropriate
	نامناسب	متوسط	مناسب	تعداد روستا و بهره‌برداری خانوار
	Inappropriate	Moderate	Appropriate	Number of villages and household exploitation
6	3	1		یک شهر - بیش از ۱۰ روستا - بیش از ۱۰۰۰ خانوار
				One city - more than 10 villages - more than 1000 households
3	1	1.3		بیش از ۱۰ روستا و بیش از ۲۵۰ خانوار
				More than 10 villages and more than 250 households
				مناسب
				Appropriate
				متوسط
				Moderate

نامناسب	متوسط	مناسب	خیلی مناسب	بیش از ۱۰ روستا و حدود ۱۰۰ خانوار More than 10 villages and about 100 households تعداد چاه و حجم برداشت سالانه Number of wells and annual extraction volume (MCM)	نامناسب Inappropriate نزدیکی به منابع آب زیرزمینی Proximity to groundwater sources
نامناسب Inappropriate	متوسط Moderate	مناسب Appropriate	خیلی مناسب Very Appropriate		خیلی مناسب Very Appropriate
9	5	3	1	> 25	مناسب Appropriate
5	3	1	1.3	20-25	متوسط Moderate
3	1	1.3	1.5	10-20	نامناسب Inappropriate
1	1.3	1.5	1.9	< 10	

جدول ۵. ماتریس اهمیت نسبی هر معیار در اجرای تغذیه مصنوعی

Table 5. Matrix of relative importance of each criterion in the implementation of artificial nutrition

	بهره‌برداری Exploitation	نزدیکی به منابع آب زیرزمینی Proximity to groundwater sources	شیب Slope	زمین‌شناسی Geology	کاربری اراضی Land Use	نفوذپذیری Penetration	کیفیت آب Water Quality	کمیت آب Water Quantity
دردسترس بودن Availability	1	1.4	1.7	1.6	1.5	1.8	1.3	1.9
نزدیکی به منابع آب زیرزمینی Proximity to groundwater sources	4	1	4.7	4/6	4.5	4.8	4.3	4.9
شیب Slope	7	7.4	1	7.6	7.5	7.8	7.3	7.9
زمین‌شناسی Geology	6	6.4	6.7	1	6.5	6.8	6.3	6.9
کاربری اراضی Land Use	5	5.4	5.7	5.6	1	5.8	5.3	5.9
هدایت هیدرولیکی Hydraulic Conductivity	8	2	8.7	8.6	8.5	1	8.3	8.9

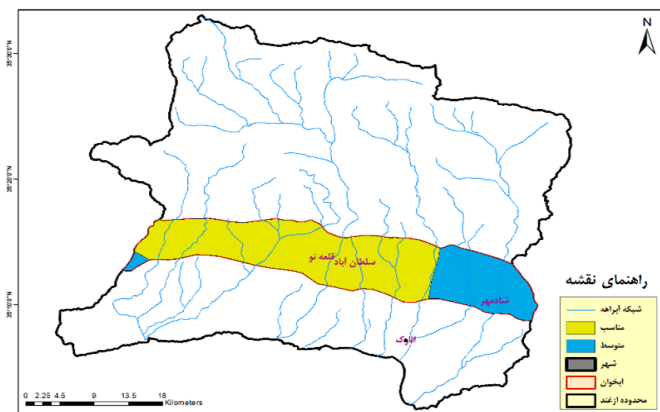
کیفیت آب Water Quality	3	3.4	3.7	3.6	3.5	3.8	1	3.9
کمیت آب Water quantity	9	9.4	9.7	9.6	9.5	9.8	3	1

جدول ۶. وزن نهایی معیارهای اصلی و نرخ ناسازگاری
Table 6. Final weight of main criteria and non-compliance rate

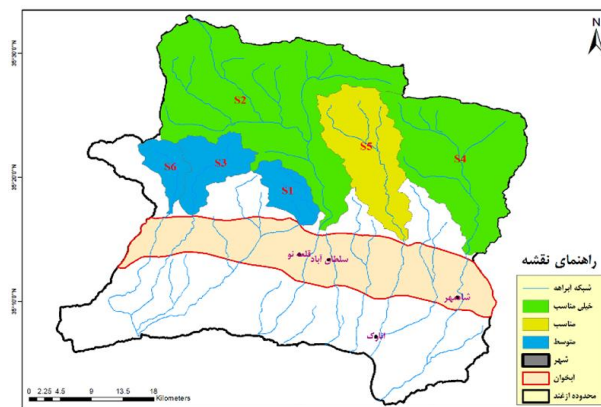
نرخ ناسازگاری Incompatibility rate	وزن معیار Weight criterion	معیار Criteria
0	0.2093	کمیت آب Water quantity
0.005	0.186	هدایت هیدرولیکی Hydraulic Conductivity
0	0.1628	شیب Slope
0.061	0.1395	زمین‌شناسی Geology
0.003	0.1163	کاربری اراضی Land Use
0.078	0.093	نزدیکی به منابع آب زیرزمینی Proximity to groundwater sources
0.037	0.0698	کیفیت آب Water Quality
0.016	0.0233	بهره‌برداری Exploitation

که منطقه به چهار بخش بر اساس آبادی و جمعیت پایین‌دست، منابع آب زیرزمینی در پایین‌دست تقسیم می‌شود. پس از ارزیابی پارامترهای ۸ گانه جهت مکان‌یابی تغذیه مصنوعی، وزن‌های هر شاخص محاسبه و در نهایت با استفاده از ابزارهای GIS مکان‌های پیشنهادی مطابق شکل ۷ به دست می‌آید.

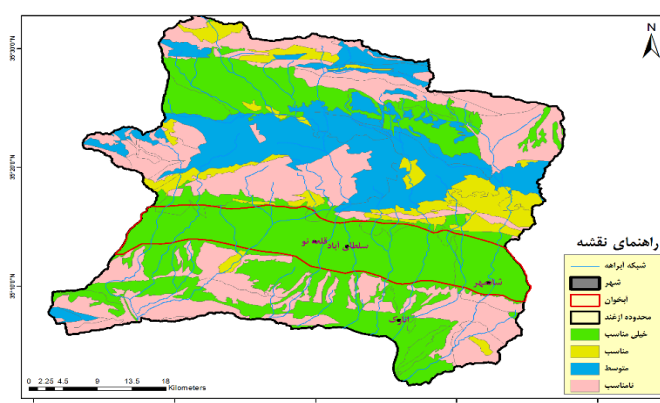
اراضی بر اساس شیب با استفاده از GIS به چهار گروه تقسیم شده و طبقه‌بندی شیب اراضی بر اساس کلاس‌بندی‌های استاندارد انجام و مناطقی که دارای شیب بالا یا فاقد شیب هستند را نامناسب و اراضی با شیب بین ۲ تا ۵ اراضی خیلی مناسب تقسیم می‌شوند. بهره‌برداری و نزدیکی به منابع آب از یک طرح بسیار حائز اهمیت است



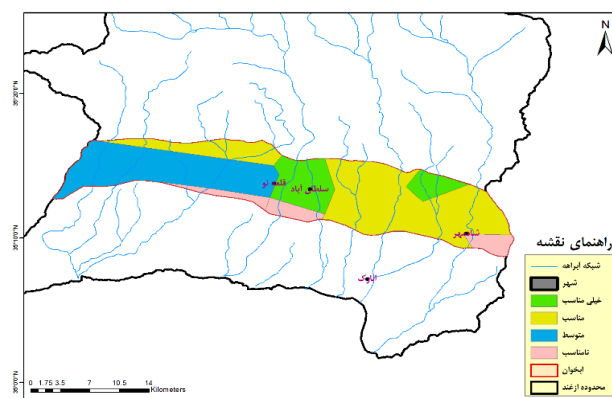
ب) کیفیت آب



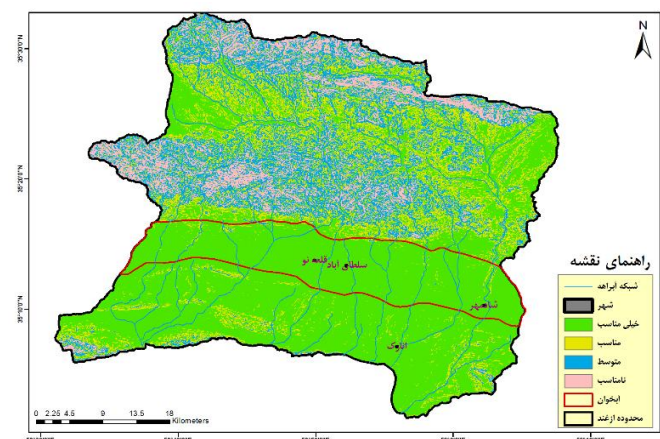
الف) کمیت آب



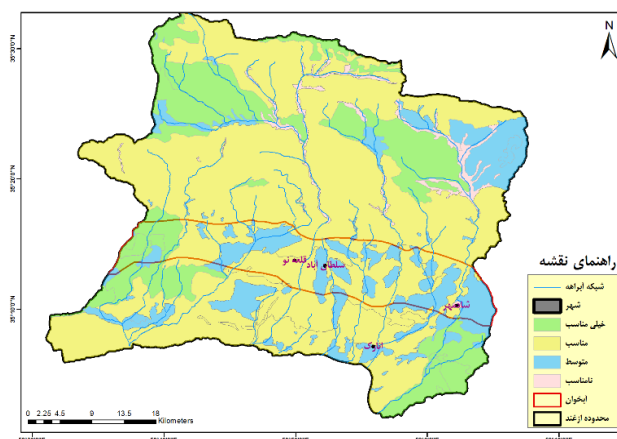
د) فرسایش



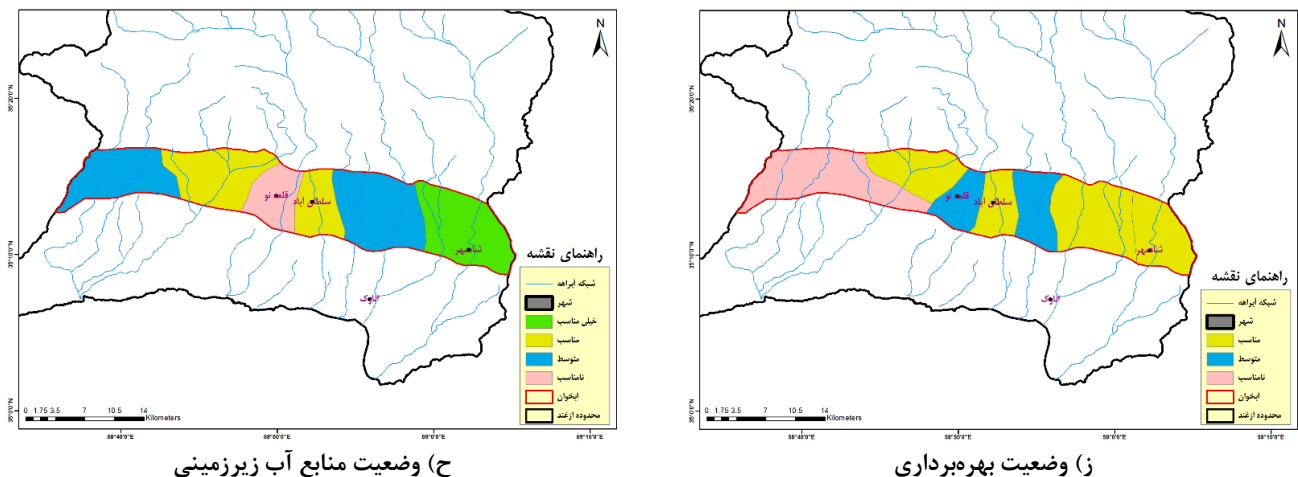
ج) نفوذپذیری



و) شیب

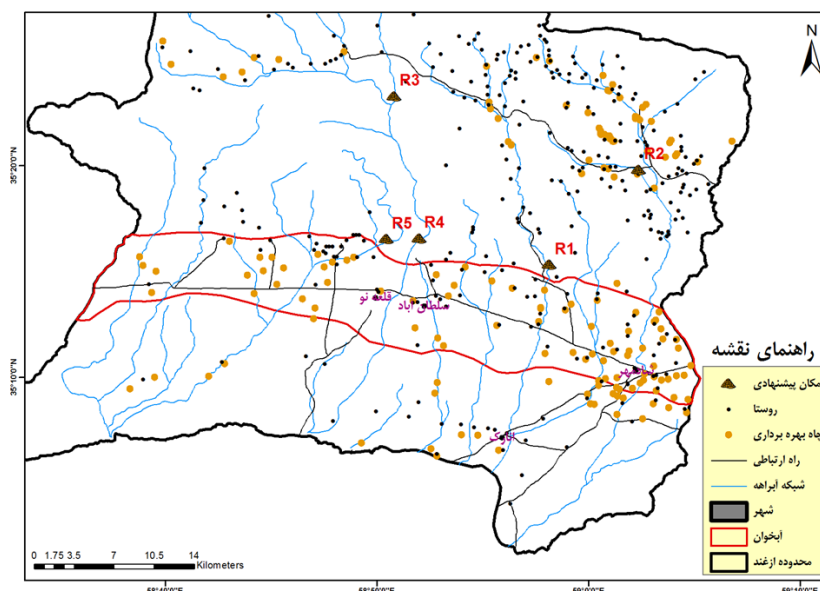


ه) کاربری اراضی



شکل ۶. طبقه‌بندی معیارهای تغذیه مصنوعی در آبخوان ازغند مبتنی بر استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی

Fig 6. Classification of artificial recharge criteria in the Azghand aquifer based on the use of the Analytic Hierarchy Process (AHP) method



شکل ۷. موقعیت مکان‌های پیشنهادی برای تغذیه مصنوعی

Fig 7. Location of proposed sites for Artificial recharge

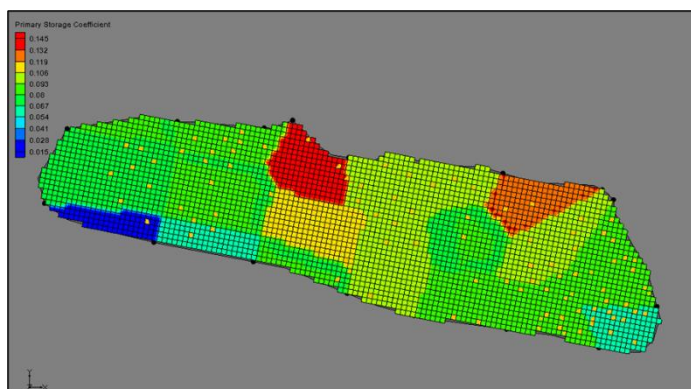
شکل ۸-الف واسنجی نهایی پارامتر هدایت هیدرولیکی را در آبخوان ازغند نشان می‌دهد. بر اساس مطالعات میدانی و آزمایش‌های پمپاژ مشخص می‌گردد که هر چه به پایین‌دست آبخوان در حرکت باشیم میزان هدایت هیدرولیکی کاسته می‌گردد. متناسب با تغییرات هدایت هیدرولیکی آبخوان، واسنجی در حالت غیرماندگار مبتنی بر تغییرات آبدی ویژه انجام گرفت که نتایج پهنه‌بندی آبدی ویژه در شکل ۸-ب نمایش داده شده است.

شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی

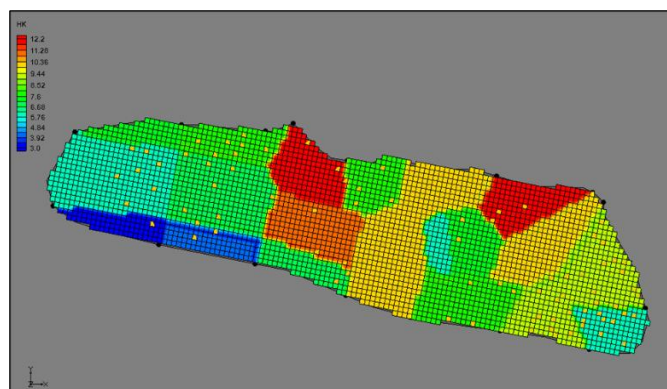
کلیه مراحل جهت انجام مراحل واسنجی چه در حالت ماندگار و چه غیر ماندگار بر اساس به‌دست‌آمدن کمترین میزان خطا در محاسبه سطح آب محاسبه شده نسبت به سطح آب ورودی به هر چاه مشاهده‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. در جدول ۷ تحلیل مؤلفه‌های آماری خطا در مدل‌سازی کمی آبخوان ارائه شده است. در مدل ماندگار با اعمال تحلیل حساسیت، پارامتر هدایت هیدرولیکی در آبخوان به‌عنوان عامل حساس جهت واسنجی مشخص و

جدول ۷. میزان خطای مدل کمی در دو حالت ماندگار و غیرماندگار
Table 7. Error in Quantitative model in steady and Un-steady

مدل غیرماندگار Un-steady model	مدل ماندگار Steady model	پارامتر خطا Error parameter
0.67	0.42	میانگین خطا Mean Error
0.85	0.38	میانگین مطلق خطا Abs Error
0.89	0.44	میانگین مجذور خطا RMSE
0.68	0.76	Kling-Gupta



ب) آبدهی ویژه واسنجی شده در حالت غیرماندگار



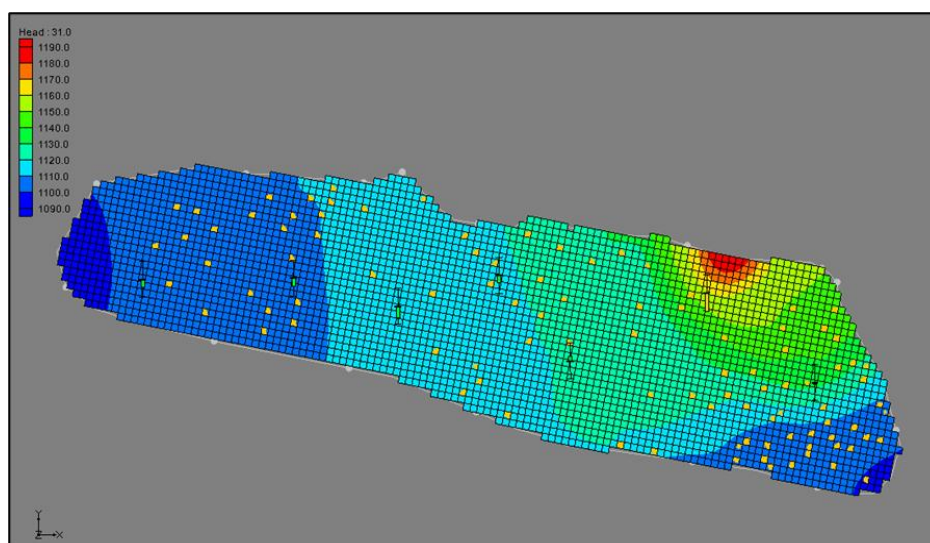
الف) هدایت هیدرولیکی واسنجی شده در حالت ماندگار

شکل ۸. پهنه‌بندی پارامترهای واسنجی شده در مدل جریان آب زیرزمینی آبخوان ازغند

Fig 8. Zoning of calibrated parameters in the groundwater flow model of the Azghand aquifer

متوسط آبدهی ویژه مورد واسنجی نیز در آبخوان ازغند ۶ درصد محاسبه شده است. در نهایت مدل نهایی اجرا شده برای آبخوان ازغند در شکل ۹ نمایش داده شده است.

بیشترین میزان هدایت هیدرولیکی در بخش شمالی و به میزان ۱۲ متر در روز و کمترین مقدار در بخش جنوب غرب آبخوان و به میزان ۳ متر در روز واسنجی شده است.



شکل ۹. مدل نهایی مدل غیرماندگار آبخوان ازغند

Fig 9. Final model of the unsteady Azghand aquifer model

ارزیابی مکان مناسب تغذیه مصنوعی در مدل آب زیرزمینی

به منظور ارزیابی و اولویت‌بندی مکان‌های پیشنهادی جهت تغذیه مصنوعی از رویکرد مدل‌سازی عددی و نقش و تأثیر آنها بر آبخوان از غند استفاده شد. بر این اساس با توجه به برآورد سیلاب در هر زیرحوضه و رخداد یک‌بار در سال، در مدل عددی MODFLOW شبیه‌سازی انجام گرفت. با توجه به ضریب میزان نفوذ که در مطالعات بیلان منطقه واسنجی شده است، میزان تغذیه ناشی از سیلاب در هر زیرحوضه در مدل عددی اعمال گردید. به منظور ارزیابی از شاخص بهبود سطح کمی آبخوان استفاده شد. بر این اساس رابطه ۲ بدین منظور پیشنهاد شد.

$$Eq\ a = \sum_{i=1}^n \frac{\theta_p}{\theta_q} \quad (2)$$

در این رابطه Eq a به عنوان شاخص بهبود وضعیت کمی آبخوان و مقدار آن هرچه بیشتر باشد؛ یعنی عملکرد سیستم تغذیه مصنوعی در آبخوان بهتر بوده است. این شاخص برای چاه‌های مشاهده‌ای در آبخوان که از i تا n باشد محاسبه می‌شود. مقدار θ_p برابر با متوسط سالانه

افزایش تراز آب در دوره شبیه‌سازی یا اعمال تغذیه مصنوعی در مدل و مقدار θ_q برابر با متوسط سالانه افت آب در دوره شبیه‌سازی بدون اعمال تغذیه مصنوعی است. بر این اساس مطابق جدول ۸ پس از شبیه‌سازی هر مکان میزان شاخص برای هر چاه مشاهده‌ای و در مجموع برای آبخوان محاسبه شد و در نهایت مکان شماره یک به عنوان اولویت اول جهت تغذیه مصنوعی در محدوده مطالعاتی از غند انتخاب شد. شایان ذکر است استفاده از رویکرد ترکیبی یعنی دو یا چند مکان با هم در این مطالعه مورد ارزیابی قرار نگرفت.

مکان R1 بیشترین پاسخ تجمیعی را در شبکه چاه‌های مشاهده‌ای ایجاد کرده است. این افزایش پاسخ به مفهوم بهبود وضعیت کمی در شرایط ایجاد تغذیه مصنوعی است. تفسیر هیدروژئولوژیکی این رتبه نیز بر هم‌پوشانی موقعیت گزینه با جهت عمومی جریان، هدایت هیدرولیکی، آبدهی ویژه، ضخامت اشباع، نواحی برداشت و گستره چاه‌های متأثر استوار است؛ بنابراین برتری آن صرفاً به امتیاز GIS نسبت داده نمی‌شود.

جدول ۸. اولویت‌بندی مکان‌های تغذیه مصنوعی در محدوده مطالعاتی از غند
Table 8. Prioritization of artificial recharge sites in the Azghand study area

اولویت Priority	مقدار شاخص Eq a	UTM Y	UTM X	مکان Site	ردیف Row
اول 1	2.24	3903093	679142	1	1
دوم 2	2.03	3905213	669764	4	2
سوم 3	1.64	3911516	685377	2	3
چهارم 4	1.21	3917590	667745	3	4
پنجم 5	1.12	3905096	667437	5	5

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه از نظر اهمیت تلفیق معیارهای سطحی و هیدروژئولوژیکی با مطالعات پیشین در یک راستا بوده است. بر این اساس مطالعات GIS-AHP، نقشه تناسب را برای غربالگری اولیه ایجاد کرده که مطالعات تلفیقی مانند Javadi et al. (2021) و Alelaimat et al. (2023) نیز نشان داده‌اند که پاسخ واقعی آبخوان به موقعیت، ویژگی‌های هیدرولیکی و شرایط برداشت وابسته است. تمایز مطالعه حاضر در شبیه‌سازی مستقل گزینه‌های منتخب و استفاده از پاسخ کمی آبخوان برای رتبه‌بندی نهایی برای مکان مناسب تغذیه مصنوعی است که مبتنی بر شاخص کمی به صورت نسبی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

یکی از محدودیت‌های پژوهش، در نظر گرفتن قطعی وزن‌های AHP و پارامترهای واسنجی‌شده مدل عددی است. نرخ ناسازگاری و واسنجی، انسجام قضاوت‌ها و انطباق مدل با داده‌ها را کنترل می‌کند، اما عدم قطعیت وزن‌ها، ساختار مدل، هدایت هیدرولیکی، آبدی و ویژه و تغذیه را حذف نمی‌کند. این موضوع سبب می‌شود که رتبه‌بندی باید مشروط به وزن‌ها و مجموعه پارامترهای واسنجی‌شده تفسیر شود و تحلیل حساسیت و عدم قطعیت در مطالعات آینده انجام گیرد. از طرفی نیز کیفیت آب به‌عنوان معیار حفاظتی در مکان‌یابی دیده شد، اما مدل حاضر یک مدل جریان کمی بود و انتقال املاح بوده و شبیه‌سازی کیفی به عنوان یک هدف قرار ندارد.

در این پژوهش، مکان‌یابی و اولویت‌بندی عرصه‌های مناسب تغذیه مصنوعی در آبخوان ازغند مبتنی بر انتخاب هشت معیار مؤثر شامل کمیت آب، کیفیت آب، هدایت هیدرولیکی، کاربری اراضی، سازندهای زمین‌شناسی، شیب، وضعیت بهره‌برداری و نزدیکی به منابع آب زیرزمینی شناسایی در محیط GIS با وزن‌دهی با رویکرد AHP انجام گرفت. بر اساس تلفیق لایه‌های وزن‌دار،

پهنه‌های مستعد تغذیه مصنوعی در محدوده مطالعاتی مشخص شد و در نهایت پنج موقعیت پیشنهادی برای ارزیابی دقیق‌تر انتخاب گردید. با توجه به اینکه مناسب بودن یک پهنه از نظر معیارهای مکانی الزاماً به معنی بیشترین اثرگذاری آن بر آبخوان نیست، در مرحله بعد، مکان‌های پیشنهادی با استفاده از مدل عددی MODFLOW مورد ارزیابی قرار گرفتند.

برای مقایسه عملکرد مکان‌های پیشنهادی، شاخص بهبود وضعیت کمی آبخوان تعریف شد. این شاخص بر مبنای نسبت متوسط سالانه افزایش تراز آب زیرزمینی در حالت اعمال تغذیه مصنوعی به متوسط سالانه افت آب در شرایط بدون تغذیه مصنوعی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مکان شماره ۱ با مقدار شاخص ۲/۲۴ بیشترین اثربخشی را در بهبود وضعیت کمی آبخوان دارد و به‌عنوان اولویت اول اجرای تغذیه مصنوعی انتخاب شد. پس از آن، مکان‌های شماره ۴، ۲، ۳ و ۵ به‌ترتیب با مقادیر شاخص ۲/۰۳، ۱/۶۴، ۱/۲۱ و ۱/۱۲ در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، تلفیق مکان‌یابی تغذیه مصنوعی با ارزیابی کمی پاسخ آبخوان است. این رویکرد موجب می‌شود انتخاب مکان تغذیه مصنوعی تنها بر پایه پتانسیل سطحی و معیارهای مکانی انجام نشود، بلکه اثر واقعی هر گزینه بر تراز آب زیرزمینی نیز در تصمیم‌گیری لحاظ گردد؛ بنابراین، روش ارائه‌شده می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی برای کاهش عدم قطعیت در انتخاب محل اجرای تغذیه مصنوعی و افزایش کارایی طرح‌های احیای آبخوان مورد استفاده قرار گیرد.

از نظر کاربردی، نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری مدیران منابع آب در اولویت‌بندی اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی در آبخوان ازغند باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، اثر اجرای هم‌زمان چند مکان تغذیه مصنوعی، سناریوهای مختلف حجم سیلاب،

selection for managed aquifer recharge in the city of Kabul, Afghanistan, using a multi-criteria decision analysis and geographic information system. *Hydrogeology Journal*, 30(1), 59–78. <https://doi.org/10.1007/S10040-021-02408-X/FIGS/12>

Javadi, S., Saatsaz, M., Hashemy Shahdany, S. M., Neshat, A., Ghordoyee Milan, S., & Akbari, S. (2021). A new hybrid framework of site selection for groundwater recharge. *Geoscience Frontiers*, 12(4), 101144.

<https://doi.org/10.1016/J.GSF.2021.101144>
Kaliraj, S., Chandrasekar, N., & Magesh, N. S. (2014). Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(4), 1385–1401. <https://doi.org/10.1007/S12517-013-0849-X/METRICS>

Moghaddam, H. K., Rahimzadeh Kivi, Z., Abtahizadeh, E., & Abolfathi, S. (2025). Sustainable water allocation under climate change: Deep learning approaches to predict drinking water shortages. *Journal of Environmental Management*, 385, 125600.

<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2025.125600>
Nithya, C. N., Srinivas, Y., Magesh, N. S., & Kaliraj, S. (2019). Assessment of groundwater potential zones in Chittar basin, Southern India using GIS-based AHP technique. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 15, 100248.

<https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2019.100248>
Noori, R., Maghrebi, M., Mirchi, A., Tang, Q., Bhattarai, R., Sadegh, M., Noury, M., Haghighi, A. T., Kløve, B., & Madani, K. (2021). Anthropogenic depletion of Iran's aquifers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(25), e2024221118. https://doi.org/10.1073/PNAS.2024221118/SUPPL_FILE/PNAS.2024221118.SAPP.PDF

Onglasyanov, Z., Berndtsson, R., Rakhimova, V., Rakhimov, T., Jabassov, A., Rakhmetov, I., Muratova, M., & Tussupova, K. (2025). GIS-Based Multi-Criteria Assessment of Managed Aquifer Recharge (MAR) Zones Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) Method in Southern Kazakhstan. *Water* 2025, Vol. 17, Page 2774, 17(18), 2774. <https://doi.org/10.3390/W17182774>

Raja Shekar, P., & Mathew, A. (2023). Assessing groundwater potential zones and artificial recharge sites in the monsoon-fed Murredu river basin, India: An integrated approach using GIS, AHP, and Fuzzy-AHP. *Groundwater for Sustainable Development*, 23, 100994. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2023.100994>

Rajae, T., Ebrahimi, H., & Nourani, V. (2019). A review of the artificial intelligence methods in groundwater level modeling. *Journal of Hydrology*,

تغییرات اقلیمی، کیفیت آب ورودی و اثرات بلندمدت تغذیه مصنوعی بر بیلان و کیفیت آب زیرزمینی نیز بررسی شود.

منابع

Alalaimat, A., Yusoff, I., Nizar, M. K., Ng, T. F., & Majali, Y. A. (2023). Groundwater management in the face of climate change: enhancing groundwater storage in the alluvium aquifer of Wadi Araba, Jordan, through GIS-based managed aquifer recharge and groundwater MODFLOW. *Water Supply*, 23(12), 5136–5153.

<https://doi.org/10.2166/ws.2023.316>
Boo, K. B. W., El-Shafie, A., Othman, F., Khan, M. M. H., Birima, A. H., & Ahmed, A. N. (2024). Groundwater level forecasting with machine learning models: A review. *Water Research*, 252, 121249.

<https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2024.121249>
Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 121–142. <https://doi.org/10.1007/S10040-001-0182-4/METRICS>

Dillon, P., Escalante, E. F., Megdal, S. B., & Massmann, G. (2020). Managed Aquifer Recharge for Water Resilience. *Water* 2020, Vol. 12, Page 1846, 12(7), 1846. <https://doi.org/10.3390/W12071846>

Ebrahim, G. Y., Stefan, C., Sallwey, J., & Lautze, J. (2024). Mapping the potential of managed aquifer recharge in Africa: GIS-based multi-criteria decision analysis approach. *Groundwater for Sustainable Development*, 27, 101374. <https://doi.org/10.1016/J.GSD.2024.101374>

Ebrahimian, S., Nohtani, M., & Sadeghi Mazidi, H. (2023). Groundwater recharge using quantitative site selection (A case study of the Gareh Bygan watershed, Fasa). *Aquifer and Qanat*, 4, 69–80. <https://doi.org/https://doi.org/10.22077/jaaq.2023.5537.1047> [In Persian].

Eghbali Lord, Z., Rasoulzadeh, A., Abedi, A., Alikhani, S., & Fernández-Gálvez, J. (2025). Integrating Geographic Information Systems and Multi-Criteria Decision Analysis for Evaluating Artificial Groundwater Recharge. *Water Resources Management*, 39(8), 3817–3836. <https://doi.org/10.1007/S11269-025-04131-8/FIGS/6>

Hassanpour, M., & Khazimeh Nejad, H. (2017). Determining suitable areas for artificial recharge to increase the discharge of qanats in the Gonabad plain aquifer. *Aquifer and Qanat*, 1(1), 13–25. <https://doi.org/10.22077/jaaq.2017.637> [In Persian].

Hussaini, M. S., Farahmand, A., Shrestha, S., Neupane, S., & Abrunhosa, M. (2022). Site

572, 336–351.

<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2018.12.037>

Rajasekhar, M., Ajaykumar, K., Raju G, S., & Bhagat, V. (2021). Identification of artificial groundwater recharge zones in semi-arid region of southern India using geospatial and integrated decision-making approaches. *Environmental Challenges*, 5, 100278.

<https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100278>

Seif, A. K., Masria, A., Ghareeb, M., Saleh, A. A., Soliman, K., & Ammar, A. I. (2024). Identifying managed aquifer recharge and rainwater harvesting

sites and structures for storing non-conventional water using GIS-based multi-criteria decision analysis approach. *Applied Water Science*, 14(8), 181. [https://doi.org/10.1007/S13201-024-02246-](https://doi.org/10.1007/S13201-024-02246-8/FIGS/15)

[8/FIGS/15](https://doi.org/10.1007/S13201-024-02246-8/FIGS/15)

Song, Q., Liu, Y., Wang, Z., & Xu, Z. (2025). Assessing groundwater artificial recharge suitability in the Mi River basin using GIS, RS, and FAHP: a comprehensive analysis with seasonal variations. *Applied Water Science*, 15(2), 39-.

[https://doi.org/10.1007/S13201-025-02362-](https://doi.org/10.1007/S13201-025-02362-Z/FIGS/5)
[Z/FIGS/5](https://doi.org/10.1007/S13201-025-02362-Z/FIGS/5)