Journal of Water and Soil Science
Vol. 30, No. 2, 2026, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. DOI: 10.47176/jwss.30.2.10851

Locating Artificial Groundwater Recharge Basins (Case Study: Yazd-Ardakan Basin)

Reza Peykanpour Fard, Ferial Farasat*, Sohrab Hasheminejad[1] and Sima Fakheran[1]

(Received: July 27-2025; Revised: April 24-2026; Accepted: May 3-2026)

1. Department of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
*Corresponding author: f.farasat@na.iut.ac.ir

Abstract
This study aimed to optimize the site selection of artificial groundwater recharge zones in the Yazd-Ardakan watershed (covering an area of 116,765 hectares) to address challenges such as water scarcity, severe groundwater depletion, and annual rainfall below 100 mm. The research integrated Geographic Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods. Seventeen influential criteria, including elevation, slope, land use, geology, soil type, climate, distance from faults, and isothermal lines were analyzed using ArcGIS 10.5. Criteria weighting was performed using the Best-Worst Method (BWM), and layer integration was achieved through the Weighted Linear Combination (WLC) approach. Results indicated that slope (weight: 0.203), elevation (correlation >0.75), and land use (correlation ≈0.5) had the highest impact on zone suitability, while climate and isothermal lines were less influential. The final suitability map (900×900 m resolution) revealed that central and southern plain areas with slopes <2%, permeable alluvial formations, flat topography, and optimal distance from faults were prioritized for artificial recharge. Sensitivity analysis identified eight key criteria (correlation >0.5), and by eliminating 53% of non-essential parameters, an efficient framework for sustainable water resource management was established. This study not only contributes to raising groundwater levels, improving soil fertility, and preserving local ecosystems but also offers a practical solution for water crisis management in arid regions.

Keywords: Optimization, Water resource management, Weighted Linear Combination (WLC), Artificial recharge basins, Site selection

How to cite this article: Peykanpour Fard, R., Farasat, F., Hasheminejad, S. and Fakheran, S. 2026. Locating Artificial Groundwater Recharge Basins (Case Study: Yazd-Ardakan Basin). *J. Water and Soil Sci.* 30(2): 92-106. DOI: 10.47176/jwss.30.2.10851

Copyright © 2026 Peykanpour Fard et al. Published by Isfahan University of Technology.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

نشریه علوم آب و خاک
سال سی‌ام/ شماره دوم / تابستان ۱۴۰۵/مقاله علمی-پژوهشی: صفحات ۹۲ تا ۱۰۶ 10.47176/jwss.30.2.10851

مکان‌یابی حوضه‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی (مطالعه موردی: حوضه یزد - اردکان)

رضا پیکان‌پور فرد، فریال فراست*، سهراب هاشمی‌نژاد و سیما فاخران[1]

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۵/۵ ؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۲/۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۳)

۱. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: f.farasat@na.iut.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر با هدف مکان‌یابی بهینه حوضه‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در حوضه آبریز یزد - اردکان با مساحت ۱۱۶۷۶۵ هکتار به‌منظور مقابله با چالش‌های کمبود منابع آب، افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و بارندگی کمتر از ۱۰۰mm انجام شد. مطالعه حاضر با تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) انجام گرفت. ۱۷ معیار مؤثر شامل ارتفاع، شیب، کاربری اراضی، زمین‌شناسی، خاکشناسی، اقلیم، فاصله از گسل و خطوط هم‌دما در محیط ArcGIS 10.5 تحلیل شد. وزن‌دهی معیارها با روش بهترین - بدترین (BWM) و تلفیق لایه‌ها با روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC) صورت گرفت. نتایج نشان داد معیارهای شیب (وزن ۰/۲۰۳)، ارتفاع (همبستگی >۰/۷۵) و کاربری اراضی (همبستگی ≈۰/۵) بیشترین تأثیر را در مطلوبیت مناطق دارند؛ درحالی‌که اقلیم و خطوط هم‌دما کم‌اثر بودند. نقشه نهایی مطلوبیت در مقیاس ۹۰۰m×۹۰۰m متر نشان داد مناطق مرکزی و جنوبی دشت، شیب کمتر از ۲٪ و سازندهای آبرفتی نفوذپذیر، به دلیل توپوگرافی مسطح و فاصله مناسب از گسل‌ها، اولویت بالاتری برای تغذیه مصنوعی دارند. تحلیل حساسیت، ۸ معیار کلیدی با ضریب همبستگی >۰/۵ را شناسایی کرد و با حذف ۵۳٪ از معیارهای غیرضروری، چارچوبی کارآمد برای مدیریت پایدار منابع آب ارائه شد. مطالعه حاضر علاوه بر کمک به افزایش سطح آب‌های زیرزمینی، بهبود حاصلخیزی خاک و حفظ اکوسیستم‌های محلی، راهکاری مؤثر برای مدیریت بحران آب در مناطق خشک ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، مدیریت منابع آب، ترکیب خطی وزن‌دار، حوضه‌های تغذیه مصنوعی، مکان‌یابی

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. ۱۴۰۴ ©.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

مقدمه

آب‌های زیرزمینی منبع حیاتی تأمین آب، به‌ویژه در مناطق خشک، هستند. اما افزایش جمعیت و بهره‌برداری بیش از حد، منجر به کاهش سطح این آب‌ها و پدیده فرونشست شده که پیامدهای جدی اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دارد (۳). به دلیل افزایش جمعیت، خشکسالی، سهولت برداشت و نبود برنامه‌ریزی، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی باعث افت شدید سطح آنها و خشک‌شدن منابع آبی در بسیاری از نقاط جهان از جمله ایران شده است (۲). تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی، به ویژه در نواحی کویری با بارش کم، به عنوان راهکاری نوین و مؤثر برای مدیریت پایدار منابع آبی و تأمین آب شرب و کشاورزی اهمیت فزاینده‌ای یافته است (۴).

دشت یزد – اردکان یکی از مهم‌ترین دشت‌های استان یزد محسوب می‌شود که نقش کلیدی در توسعه اقتصادی، اجتماعی و صنعتی این استان ایفا می‌کند. این دشت با این پهنه حدوداً وسعتی برابر با ۱۱۶۷۶۵ هکتار، ۷۵٪ تراکم جمعیتی استان یزد را در خود جای داده است (۱۸) و به عنوان یکی از قطب‌های اصلی سکونتگاهی و فعالیت‌های انسانی در منطقه شناخته می‌شود. علاوه بر این، دشت یزد – اردکان میزبان بیشترین مراکز صنعتی استان است. این صنایع نه‌تنها نقش مهمی در اقتصاد منطقه ایفا می‌کنند، بلکه به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین منابع اشتغال برای ساکنان محلی نیز محسوب می‌شوند (۵).

دشت یزد – اردکان به دلیل برداشت بی‌رویه آب برای مصارف کشاورزی، صنعتی و شهری، خشکسالی‌های متوالی و مدیریت نادرست، با افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی مواجه شده و به همین دلیل توسط وزارت نیرو به عنوان دشت ممنوعه اعلام شده است تا از برداشت بیشتر و تخریب بیشتر آبخوان‌ها جلوگیری شود (۱۷ و ۲۱). وضعیت بحرانی آب در دشت یزد – اردکان که منجر به اعلام آن به عنوان دشت ممنوعه شده، نیازمند اجرای فوری برنامه‌های مدیریت پایدار منابع آب است. در غیر این صورت، پیامدهایی چون فرونشست زمین، شور شدن آب‌های زیرزمینی و تخریب اکوسیستم‌ها رخ خواهد داد. برای جلوگیری از این فجایع و تضمین امنیت آبی آینده، باید با افزایش بهره‌وری آب، استفاده از منابع جایگزین (آب سطحی و پساب) و اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی، وضعیت این دشت را بهبود بخشید. (۱۱ و ۲۰).

در این راستا، شناسایی مناطق سیل‌خیز و پخش سیلاب در اراضی مستعد، علاوه بر کمک به افزایش سطح آب‌های زیرزمینی، می‌تواند به بهبود کیفیت خاک، کاهش فرونشست زمین، حفظ اکوسیستم‌های محلی و تأمین نیازهای آبی جامعه منجر شود (۱۳). این روش با استفاده از تکنیک‌هایی مانند نفوذ آب باران، بازچرخانی آب‌های سطحی و استفاده از آب‌های تصفیه‌شده، می‌تواند به بهبود کیفیت و کمیت منابع آبی در نواحی کویری کمک کند (۱).

برخی از پژوهش‌های انجام‌شده دررابطه‌با چیدمان مکانی تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها به شرح زیر است. در حوضه آبخیز بوشکان به مکان‌یابی در این پژوهش، مکان‌یابی حوضچه‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی با استفاده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (Analytic Hierarchy Process: AHP) و سیستم اطلاعات جغرافیایی (Geographic Information System: GIS) پرداخته شد. پارامترهایی مانند میزان بارش، شیب زمین، نفوذپذیری خاک، هدایت الکتریکی و کاربری زمین به عنوان عوامل مؤثر در این فرایند انتخاب شدند. نتایج نشان داد که ۱۴/۱٪ از منطقه برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی بسیار مناسب، ۳۹/۱۰٪ مناسب، ۱۳/۳۳٪ نسبتاً مناسب و ۱۴/۷۵٪ نامناسب است. از هشت منطقه بسیار مناسب، چهار منطقه آبرفتی به عنوان مناطق کاربردی برای تغذیه مصنوعی انتخاب شدند. همچنین، بر اساس مدل آب‌های زیرزمینی در نرم‌افزار GMS، سه منطقه آبرفتی برای اهداف کوتاه‌مدت و یک منطقه برای اهداف بلندمدت برای تغذیه مصنوعی برگزیده شد (۸).

با توجه به معضلات موجود در ارتباط با کاهش منابع آب زیرزمینی در استان تهران، این پژوهش به شناسایی و پهنه‌بندی مناطق مناسب برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی پرداخته است. برای این کار، از تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

و روش Fuzzy AHP به منظور وزن‌دهی و ترکیب معیارهای مؤثر مانند عمق و تغییرات تراز آب زیرزمینی، بارش، تراکم زهکشی، شیب زمین، فاصله از گسل و رودخانه استفاده شد. پس از مشاوره با کارشناسان و تعیین ارجحیت معیارها، خصوصیات هیدرولوژیک به‌عنوان مؤثرترین معیار شناسایی شدند. نتایج نشان داد که ۶/۲٪ از مساحت منطقه برای تغذیه مصنوعی بسیار مناسب و ۱۵/۷۵٪ مناسب است (۹).

در پژوهشی در حوضه آبریز قروه استان کرمان به مساحت ۱۷/۲۳۲km^2، معیارهای شیب زمین، نوع کاربری اراضی، ضخامت آبرفت غیراشباع، هدایت هیدرولیکی، فاصله از رودخانه و پوشش گیاهی بررسی شدند. روش مورد استفاده در این پژوهش، روش ترکیب وزنی – خطی (Weighted Linear Combination: WLC) است. وزن‌های وارد شده در این روش، توسط فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در نرم‌افزار Super Decisions استخراج شدند. نتایج حاصل از این روش نشان داد که حدود ۴/۲۳٪ از کل مساحت دشت دارای ارزش زیادی است و ۱۹٪ از کل مساحت دشت نامناسب تشخیص داده شده است (۷).

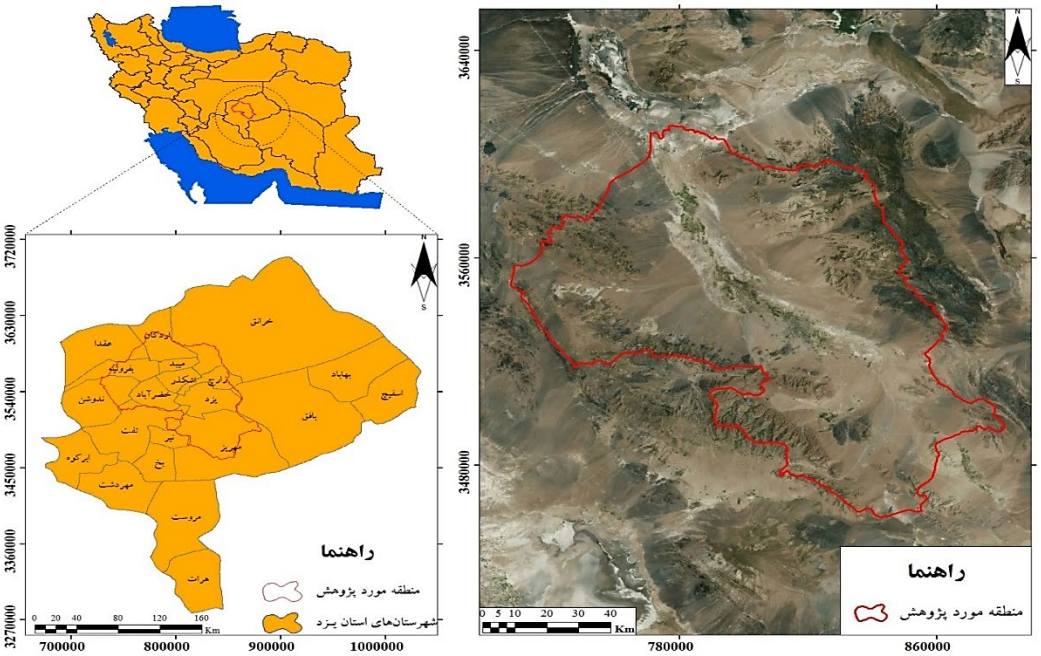
به منظور مدیریت پایدار حوضه آبریز موردو در هند، رویکردی جامع پیشنهاد شده که از ترکیب سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، سنجش از دور و تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده می‌کند. هدف اصلی، شناسایی مناطق بالقوه آب زیرزمینی و مکان‌های مناسب برای تغذیه مصنوعی بود. در این مطالعه از چندین لایه موضوعی شامل شیب زمین، تراکم زهکشی، ژئومورفولوژی، پوشش کاربری اراضی، خاک، بارندگی، فاصله از رودخانه و ارتفاع استفاده شد. برای تعیین وزن‌های این لایه‌ها، از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و تکنیک‌های فازی بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که ۱۴/۹۳٪ از منطقه نامناسب، ۷۳/۷۵٪ مناسب و ۱۱/۵۴٪ بسیار مناسب برای تغذیه مصنوعی است. این مطالعه به تسهیل مدیریت و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب زیرزمینی کمک کرده و به تضمین دسترسی و پایداری منابع آب برای نسل‌های آینده می‌پردازد (۱۴).

هدف از این پژوهش، ارائه یک رویکرد تحلیلی برای شناسایی و مکان‌یابی بهینه حوضه‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در حوضه یزد – اردکان با استفاده از روش ترکیب خطی وزن‌دار (WLC) است. این مطالعه با درنظرگرفتن چالش‌های ناشی از کمبود منابع آب و افت سطح آب‌های زیرزمینی در منطقه، به دنبال تعیین مکان‌های مناسب برای اجرای پروژه‌های تغذیه مصنوعی از طریق ارزیابی معیارهای مؤثر مانند ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژیک و محیط زیستی است. نتایج این پژوهش می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در اختیار برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان قرار گیرد تا با انتخاب مکان‌های بهینه، گامی مؤثر در جهت مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و بهبود کیفیت و کمیت آن در حوضه یزد – اردکان بردارند.

مواد و روش

منطقه مورد بررسی

محدوده حوضه‌ی آبریز دشت یزد – اردکان (بین طول جغرافیایی ۵۴° تا ۵۵° و عرض جغرافیایی ۳۱° تا ۳۳°) به‌عنوان منطقه‌ی مطالعه انتخاب شد. این منطقه با میانگین بارندگی سالانه کمتر از ۱۰۰mm، توپوگرافی عمدتاً مسطح تا نیمه‌کوهستانی و شرایط هیدروژئولوژیک بحرانی (مانند افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی و خشک‌شدن قنات‌ها) شناخته می‌شود (۴). انتخاب این حوضه با توجه به آسیب‌پذیری بوم‌شناختی و تنش‌های اجتماعی – سیاسی ناشی از کم‌آبی در این منطقه توجیه می‌شود (شکل ۱). بر اساس آخرین سرشماری مرکز آمار ایران (۱۴۰۰)، دشت یزد – اردکان دارای جمعیتی معادل ۴۲۱۱۲۶ هزار نفر است (۱۸). این پهنه حدوداً وسعتی برابر با ۱۱۶۷۶۵ha دارد و شامل بخش عمده شهرستان‌های یزد و اشکذر، تقریباً نیمی از میبد و مهریز و بخش کوچکی از اردکان، تفت و بافق را به ترتیب وسعت در برمی‌گیرد (۵).



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه

تعیین معیار و زیرمعیارهای اصلی

در پژوهش حاضر، فرایند مکان‌یابی با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 انجام شد. ابتدا معیارها و زیرمعیارهای مؤثر در مکان‌یابی حوضه آبریز برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی تعیین شد. این معیارها بر اساس مطالعات پیشین و ویژگی‌های آب‌زمین‌ریخت‌شناسی منطقه انتخاب شدند (جدول ۱). سپس لایه‌های اطلاعاتی مربوط به هر معیار تهیه و در محیط GIS استانداردسازی شده‌اند. وزن‌دهی معیارها با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (Multi-Criteria Decision Making: MCDM) انجام شد (۱۲). درنهایت، با تلفیق لایه‌های وزن‌دار، مناطق مستعد برای تغذیه مصنوعی شناسایی و اولویت‌بندی شدند. انتخاب معیارها و زیرمعیارها مبتنی بر تأثیر آنها در پتانسیل تغذیه آب‌های زیرزمینی و ویژگی‌های فیزیکی حوضه بود.

استانداردسازی و وزن‌دهی به زیرمعیارها

برای انتخاب بهترین گزینه از بین گزینه‌های موجود، از روش بهترین – بدترین (Best Worst Method: BWM) استفاده شد. روش BWM به دلیل نیاز به مقایسات زوجی کمتر (در مقایسه با روش‌هایی مانند AHP)، دقت بیشتر در تعیین وزن شاخص‌ها و امکان سنجش عینی سازگاری نتایج از طریق محاسبه نرخ ناسازگاری برای این پژوهش انتخاب شد. این روش به‌ویژه برای مسائل تصمیم‌گیری چندشاخصه با داده‌های محدود مناسب است؛ چرا که با شناسایی بهترین و بدترین شاخص‌ها، مقایسات را هدفمند و کارآمد می‌کند (۱۰ و ۱۵). در مرحله انتخاب بهترین و بدترین معیارها، ابتدا لیستی از تمام معیارهای مرتبط (شامل ۱۷ معیار اولیه) در اختیار متخصصان قرار گرفت و از آنها خواسته شد تا بر اساس دانش و تجربه خود، معیاری را که بیشترین تأثیر مثبت (بهترین) و بیشترین تأثیر منفی (بدترین) را بر مکان‌یابی حوضه‌های تغذیه مصنوعی دارند، مشخص کنند. پس از تعیین این دو معیار کلیدی، مقایسات زوجی بین معیار بهترین و سایر معیارها (به ترتیب اهمیت نزولی) و سپس مقایسات زوجی بین معیار بدترین و سایر معیارها (به ترتیب اهمیت صعودی) صورت پذیرفت. این مقایسات با استفاده از یک مقیاس زبانی استاندارد (جدول ۲) و تبدیل آن به مقادیر

جدول ۱. مولفه‌های مورد نیاز در مکان‌یابی تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی

شماره	شاخص	معیار	زیرمعیار	مرجع داده	سال تهیه داده
۱	فیزیکی (پایدار)	توپوگرافی	ارتفاع	Google Earth Engine	۱۴۰۳
			شیب		
		خصوصیات زمین	خاکشناسی	سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح (ارتش)	۱۳۸۸
			زمین‌شناسی		
			فاصله از گسل		
			فاصله از ریزگسل		
۲	فیزیکی (ناپایدار)	آب‌شناسی	فاصله از آبراهه	سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح (ارتش)	۱۳۸۸
			فاصله از آبخوان		
			فاصله از سیل		
		اقلیم	خرد اقلیم	سازمان هواشناسی	۱۳۸۸
			فاصله از خطوط هم‌دما		
			فاصله از خطوط هم‌بارش		
			فاصله از خطوط هم‌تبخیر		
۳	بوم‌شناختی	منطقه حفاظت‌شده	فاصله از منطقه حفاظت شده	سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح (ارتش)	۱۳۸۸
۴	کالبدی	کاربری اراضی	براساس کلاس‌های مناسب		
		محدودیت	فاصله از جاده‌ها		
			فاصله از معادن		

جدول ۲. شاخص سازگاری روش BWM

a_{Bw}	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
شاخص سازگاری	۰/۰۰	۰/۴۴	۱/۰۰	۱/۶۳	۲/۳۰	۳/۰۰	۳/۷۳	۴/۴۷	۵/۲۳

عددی انجام شد تا امکان فرمول‌بندی در مسئله بهینه‌سازی فراهم شود.

در این روش ابتدا بهترین و بدترین شاخص‌ها توسط تصمیم‌گیرنده مشخص شد. سپس مقایسات زوجی بین این شاخص‌های کلیدی (بهترین و بدترین) و سایر شاخص‌ها انجام شد. در مرحله بعد، یک مسئله بهینه‌سازی حداکثر – حداقل برای تعیین وزن نهایی هر شاخص ایجاد شد؛ همچنین در این روش رابطه‌ای برای محاسبه نرخ ناسازگاری به‌منظور بررسی اعتبار مقایسات در نظر گرفته شد. این نرخ سازگاری در بازه [یک الی صفر] قرار می‌گیرد و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، مقایسات از سازگاری و ثبات بیشتری برخوردارند و هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، مقایسات از سازگاری و ثبات کمتری برخوردارند (۱۷) (جدول ۲). همچنین برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از پرسشنامه‌های تخصصی طراحی‌شده بر اساس معیارهای پژوهش استفاده شد که توسط متخصصان حوزه آب زیرزمینی تکمیل شد. این پرسشنامه‌ها به همراه تحلیل‌های آماری، مبنای تعیین بهترین و بدترین شاخص‌ها و انجام مقایسات زوجی قرار گرفتند.

ایجاد نقشه مطلوبیت

در این مطالعه، از روش فازی برای استانداردسازی زیرمعیارها استفاده شد. ابتدا هر لایه اطلاعاتی بر اساس دانش متخصصان و

مطالعات میدانی، با توابع عضویت فازی (تابع خطی) در بازه [یک الی صفر] با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS 10.5 استانداردسازی شد. سپس وزن‌های زیرمعیارها با روش BWM محاسبه و به هر زیرلایه اختصاص داده شد. در مرحله بعد، ترکیب خطی وزنی (WLC) با استفاده از معادله ۱ انجام گرفت که در آن مقادیر فازی زیرلایه‌ها با وزن‌های مربوطه ضرب و با هم جمع شدند. درنهایت، نقشه نهایی تناسب سرزمین تهیه شد. با توجه به محدودیت‌های مالی و نیاز به زیرساخت‌های گسترده برای اجرای عملی تغذیه مصنوعی، روش بازدیدهای میدانی برای ارزیابی صحت نتایج به کار گرفته شد. بازدیدهای میدانی در ۲۰ نقطه شاخص در کلاس‌های مختلف تناسب صورت گرفت که شامل بررسی ویژگی‌های آب‌زمین‌شناسی مانند نفوذپذیری خاک، عمق آب زیرزمینی و کیفیت سازندهای زمین‌شناسی بود. همچنین مراحل ترکیب خطی وزن‌دار شامل موارد زیر است:

۱) تهیه ماتریس ارزیابی با بررسی پیشینه پژوهش و نظرات و تجربیات کارشناسان و خبرگان.

۲) جمع‌آوری و آماده سازی لایه‌های اطلاعاتی و داده‌های مورد نظر.

۳) استاندارد کردن داده‌ها به معنای همسان‌کردن تغییرات داده‌ها بین صفر و یک.

۴) وزن‌دهی معیارها و زیرمعیارها با استفاده از روش BWM در نرم‌افزار R: این روش به دلیل امکان مقایسه دوبه‌دو معیارها از دقت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است. این روش برای اولین‌بار توسط ال ساعتی در زمینه فرایند تجزیه‌وتحلیل سلسله‌مراتبی ابداع شد که تعداد معیارها در این روش برای جلوگیری از پیچیدگی روابط نباید بیش از ۱۰ عدد باشد. با استفاده از این روش برای هرکدام از متغیرها وزن خاصی تعریف می‌شود که اساس تعیین وزن در این روش را مقایسه دوبه‌دو معیارها تشکیل می‌دهد. مجموع وزن‌های تعیین‌شده که اهمیت نسبی معیارها را نشان می‌دهد، معادل یک است. در این روش اهمیت نسبی عوامل در یک مقیاس پیوسته به ۹ بخش تقسیم می‌شود (جدول ۲).

۵) تلفیق و تحلیل اطلاعات: لایه‌های وزن‌دهی‌شده و استانداردشده تلفیق می‌شوند و سپس طبق مدل مفهومی میزان تناسب محاسبه می‌شود.

یکی از دلایل کاربرد گسترده این مدل سادگی کاربرد و درک آسان آن برای تصمیم‌سازان است. این مدل دو مؤلفه اصلی دارد که شامل وزن فاکتورها و لایه مورد استفاده است. معادله مورد بررسی در این مدل به شرح زیر است (۶):

$$S = \sum_{n}^{i=1} W_i \times X_i \times C_j \qquad (۱)$$

S: تناسب برای هر کاربری، W_i: وزن فاکتور i که با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی تعیین می‌شود، X_i: فاکتور i شامل فاکتورهای مورد بررسی و C_j: لایه‌های محدودیت که شامل نقشه‌های بولین هستند.

ارزیابی صحت و دقت نتایج در کار میدانی

برای اطمینان از صحت و دقت نتایج حاصل از مدل‌سازی، از روش‌های آماری صحت کلی (Overall Accurac: OA) استفاده شد (۱۱). به‌منظور اعتبارسنجی یافته‌ها، کار میدانی گسترده‌ای در سطح حوضه مطالعاتی انجام شد. در این راستا، ۲۰ نقطه به‌صورت تصادفی در مناطق مختلف حوضه انتخاب شدند. در هر یک از این نقاط، نتایج روش WLC که پتانسیل منطقه مورد مطالعه را برای تغذیه مصنوعی پیش‌بینی کرده بود با استفاده از دستگاه GPS (Global Positioning System)، مورد سنجش قرار گرفت. فرمول محاسباتی صحت کلی به شرح زیر است (معادله ۲):

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^{r} x_{ii}}{N} \qquad (۲)$$

- صحت کلی:

در این فرمول، x_ii نشان‌دهنده تعداد نمونه‌هایی است که در کلاس i به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند. r تعداد کل کلاس‌ها است و N نیز نشان‌دهنده تعداد کل نمونه‌ها در مجموعه داده می‌باشد.

عبارت (x_ii) از i = 1 تا r، مجموع تمامی نمونه‌هایی است که در همه کلاس‌ها به‌درستی طبقه‌بندی شده‌اند.

بررسی همبستگی نهایی زیرمعیارها

برای تحلیل وابستگی خطی بین زیرمعیارهای مؤثر و پتانسیل مکانی حوضه‌های تغذیه مصنوعی، از روش‌های آماری چندمتغیره استفاده شد. بر اساس مبانی آماری، همبستگی خطی (Linear Correlation) به عنوان شاخصی کمی برای سنجش درجه و به منظور ارتباط خطی بین متغیرها با محاسبه ضرایبی مانند Pearson's r یا Spearman's rho تعریف می‌شود که دامنه آن بین ۱+ (همبستگی مثبت کامل) تا ۱- (همبستگی منفی کامل) متغیر است (۵، ۹ و ۱۴). در مطالعه حاضر، با اجرای تحلیل حساسیت مبتنی بر همبستگی روی ۱۷ زیرمعیار مکانی (شامل شاخص‌های آب‌زمین‌ریخت‌شناسی، خاک‌شناسی و اقلیمی)، سهم هر پارامتر در تعیین مطلوبیت نهایی حوضه‌های آبریز منطقه یزد – اردکان ارزیابی شد. با وجود ناهمگنی توزیع داده‌ها، از روش‌های ناپارامتریک برای شناسایی زیرمعیارهای کلیدی با سطح معناداری (p-value < ۰/۰۵) استفاده شد. این رویکرد امکان جداسازی متغیرهای پیش‌بینی‌کننده اصلی از پارامترهای کم‌اثر را فراهم کرد که در تدقیق مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره نقش اساسی ایفا کرد.

نتایج

حدود زیر معیارهای مورد پژوهش

برای تحلیل دقیق‌تر تأثیر مؤلفه‌های مورد نیاز در مکان‌یابی تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی از حدود زیرمعیارهای اشاره‌شده در جدول ۳ استفاده شده است.

وزن معیارهای مورد پژوهش با استفاده از روش BWM

در مقایسه زوجی فاکتورهای مؤثر در مکان‌یابی حوضه‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در حوضه یزد – اردکان به فاکتور شیب با ۰/۲۰۳ بیشترین وزن نسبی و به فاکتور اقلیم با ۰/۰۰۸ کمترین وزن تعلق گرفته است. در تمامی این مقایسه‌ها نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۰۵ برآورد شده است (جدول ۴).

نقشه مطلوبیت نهایی

نقشه استانداردشده زیرمعیارها نشان داده شده است (شکل ۲) و نتایج تحلیل نهایی مطلوبیت مکانی برای تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در حوضه یزد–اردکان نیز در قالب نقشه پهنه‌بندی ارائه گردیده است (شکل ۳). در این نقشه، هر پیکسل با ابعاد ۹۰۰m×۹۰۰m بر اساس شاخص مطلوبیت که مقداری پیوسته بین صفر (کمترین مطلوبیت) تا یک (بیشترین مطلوبیت) را اختیار می‌کند، طبقه‌بندی شده است. این مقادیر از تلفیق وزنی لایه‌های زیرمعیارها در محیط ArcGIS 10.5 و با استفاده از روش WLC حاصل شده‌اند (شکل ۴).

نتایج صحت و دقت نقاط مورد بررسی

همان‌طور که بیان شد برای اطمینان از صحت و دقت نتایج حاصل از مدل‌سازی، از روش آماری صحت کلی استفاده شد. به‌منظور اعتبارسنجی یافته‌ها، ۲۰ نقطه به‌صورت تصادفی در مناطق مختلف حوضه مورد بررسی قرار گرفت. در هر یک از این نقاط، نتایج روش WLC که پتانسیل منطقه مورد مطالعه را برای تغذیه مصنوعی پیش‌بینی کرده بود، با استفاده از دستگاه‌های GPS مورد سنجش قرار گرفت. نتایج کار میدانی نشان داد که بین داده‌های مدل و مشاهدات زمینی همخوانی زیادی وجود دارد. به‌طور خاص، در ۱۸ نقطه از ۲۰ نقطه، پیش‌بینی‌های مدل با شرایط واقعی زمین مطابقت داشتند. نتایج صحت کلی با عدد ۰/۹ صحت و دقت این تطابق را تضمین می‌کند.

به منظور اعتبارسنجی و تکمیل یافته‌های حاصل از مدل‌سازی WLC، تعداد ۲۰ نقطه به صورت تصادفی از مناطق با امتیاز مطلوبیت بیش از ۸۵٪ انتخاب شدند. این انتخاب با هدف تأیید انطباق پیش‌بینی‌های مدل با شرایط واقعی میدانی صورت گرفت. بررسی‌های میدانی در این نقاط نشان داد که پارامترهای دیگر مورد تحلیل، از جمله خصوصیات خاک و

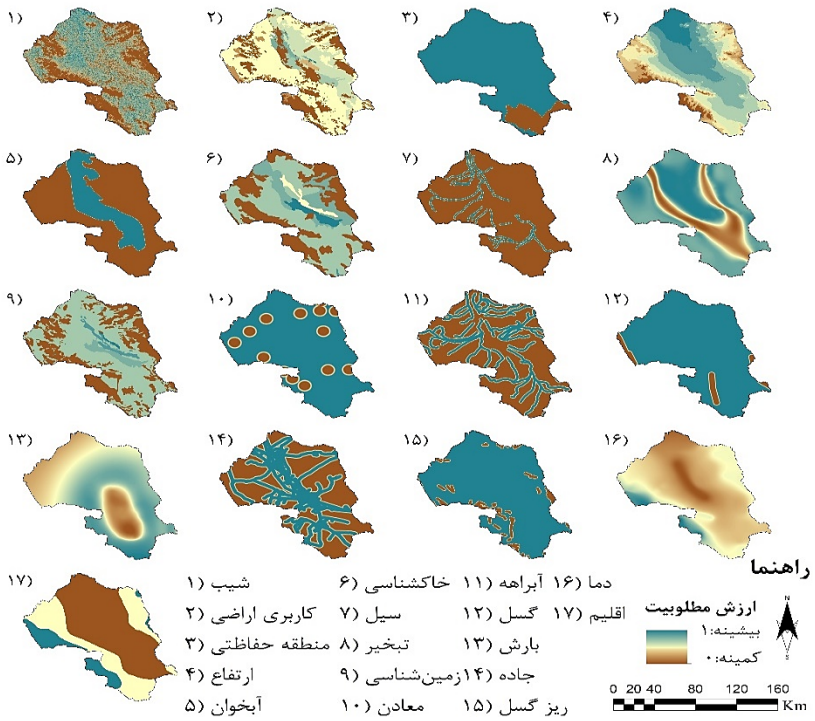
جدول ۳. حدود زیرمعیارهای پژوهش

شماره	زیرمعیار	حدود زیرمعیار
۱	ارتفاع	۱=۱۰۹۹-۹۵۸، ۰/۹=۱۲۴۵-۱۰۹۹، ۰/۸=۱۴۰۴-۱۲۴۵، ۰/۷=۱۵۸۷-۱۴۰۴، ۰/۶=۱۷۸۶-۱۵۸۷، ۰/۵=۱۹۹۶-۱۷۸۶، ۰/۴=۲۲۵-۱۹۹۶، ۰/۳=۲۴۹۴-۲۲۲۵ و ۰=x<۲۴۹۴
۲	شیب (درصد)	۱=۲-۰، ۰/۸=۴-۲، ۰/۳=۸-۴ و ۰=x>۸
۳	خاکشناسی	بدون رس تا رس کم=۱ رس کم تا متوسط=۰/۷ رس متوسط تا زیاد=۰/۵ رس بسیار زیاد=۰/۳ کاملا رسی=۰
۴	زمین‌شناسی	ماسه سنگ ریزدانه و درشت دانه=۱ کنگلومرای پلی متال و ماسه سنگ=۰/۷ کنگلومرای پلی ژنیک، ژیپس، گدازه های داسیتی=۰/۵ دولومیت، شیل توف دار، شیل آهکی و توف=۰/۳ اگلومرای، سنگ آهک رسی=۰
۵	فاصله از گسل فعال	۰ تا ۲=۰ (km)، ۲ تا ۴= ۰<x<۱، ۴<x=۱
۶	فاصله از ریزگسل	۰ تا ۱=۰ (km)، ۱ تا ۲= ۰<x<۱، ۲<x=۱
۷	فاصله از آبراهه	۰ تا ۱=۱ (km)، ۱ تا ۲= ۰<x<۱، ۲<x=۰
۸	فاصله از آبخوان	۰ تا ۰/۵=۱ (km)، ۰/۵ تا ۱= ۰<x<۱، ۱<x=۰
۹	سیل	۰ تا ۰/۵=۱ (km)، ۰/۵ تا ۱= ۰<x<۱، ۱<x=۰
۱۰	خرد اقلیم	فراخشک=۰/۸، خشک=۰/۹ و نیمه خشک=۱
۱۱	فاصله از خطوط هم‌دما (^{o}C)	۰≤x≤۱
۱۲	فاصله از خطوط هم‌بارش	۱≤x≤۰
۱۳	فاصله از خطوط هم‌تبخیر	۰≤x≤۱
۱۴	منطقه حفاظت شده و پارک ملی	۰ تا ۰/۵=۰ (km)، ۰/۵ تا ۱/۵= ۰<x<۱، ۱/۵<x=۱
۱۵	کاربری اراضی	آبخوان و تالاب=۱، زمین بایر=۰/۸، مراتع=۰/۶، درختزار=۰/۴، رخنمون سنگی، نمکزار و مستثنیات اراضی=۰
۱۶	جاده‌های اصلی	۰ تا ۱/۵=۱ (km)، ۱/۵ تا ۳= ۰<x<۱، ۳<x=۰
۱۷	معادن	۰ تا ۵=۰ (km)، ۵ تا ۷/۵= ۰<x<۱، ۷/۵<x=۱

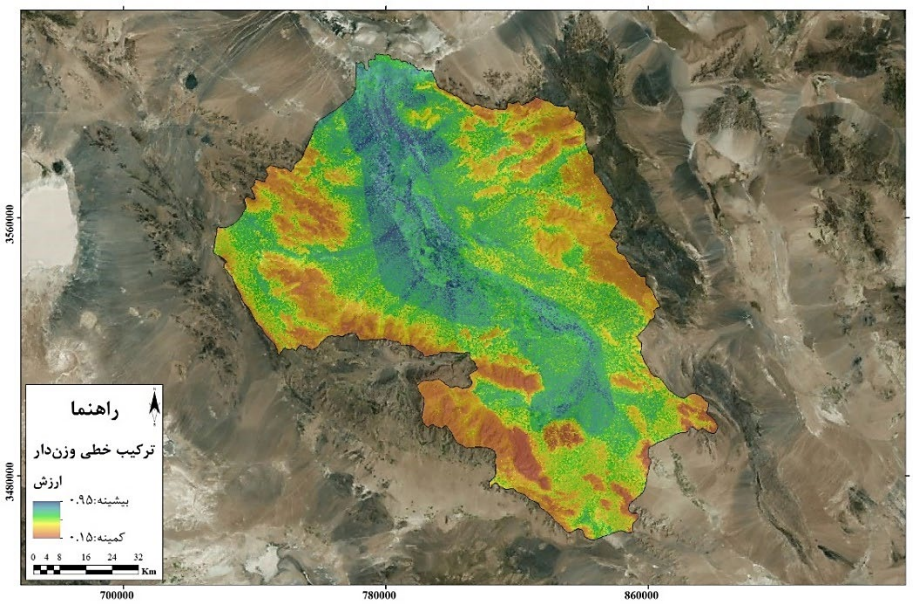
مشخصات زمین‌شناسی، با نقشه‌های اولیه تهیه‌شده تطابق زیادی دارند. برای نمونه، در بیشتر نقاط انتخابی، بافت خاک از نوع لومی رسی تا لومی شنی دیده شد که با لایه‌های خاک‌شناسی منطقه و همچنین معیارهای مطلوبیت نفوذپذیری مطابقت داشت. این هم‌راستایی بین نتایج مدل‌سازی و مشاهدات میدانی، اعتبار یافته‌های پژوهش را در خصوص شناسایی مناطق مستعد تغذیه مصنوعی تقویت می‌کند. این ارزیابی‌ها تأیید کرد که مدل ارائه‌شده از دقت و قابلیت اطمینان زیادی برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

جدول ۴. وزن‌های زیرمعیارهای پژوهش

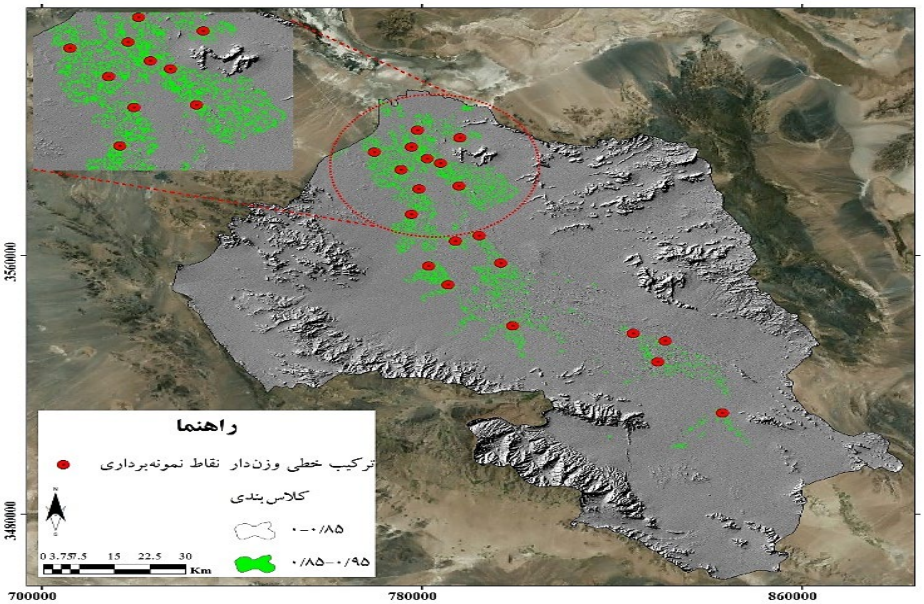
شماره	زیرمعیار	وزن
۱	ارتفاع	۰/۱۰۱
۲	شیب	۰/۲۰۳
۳	خاکشناسی	۰/۰۷
۴	زمین‌شناسی	۰/۰۴
۵	فاصله از گسل	۰/۰۲۵
۶	فاصله از ریزگسل	۰/۰۱۵
۷	فاصله از آبراهه	۰/۰۳
۸	فاصله از آبخوان	۰/۰۹۳
۹	فاصله از سیل	۰/۰۵
۱۰	خرد اقلیم	۰/۰۰۸
۱۱	فاصله از خطوط هم‌دما	۰/۰۱۵
۱۲	فاصله از خطوط هم‌بارش	۰/۰۲۲
۱۳	فاصله از خطوط هم‌تبخیر	۰/۰۵
۱۴	فاصله از منطقه حفاظت‌شده	۰/۱۰۳
۱۵	کاربری اراضی	۰/۱۱۵
۱۶	فاصله از جاده‌ها	۰/۰۲
۱۷	فاصله از معادن	۰/۰۴



شکل ۲. نقشه استانداردشده زیرمعیارها



شکل ۳. نقشه مطلوبیت نهایی حوضه‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در حوضه یزد - اردکان



شکل ۴. نقاط نمونه‌برداری در حوضه‌های در حوضه یزد - اردکان

همبستگی نهایی زیرمعیارهای مورد پژوهش

همبستگی خطی هر ۱۷ زیرمعیار نقشه با مطلوبیت نهایی حوضه‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در حوضه یزد - اردکان مورد آزمون قرار گرفت. صرف نظر از نرمال یا غیرنرمال بودن داده‌های ورودی، فقط به تعیین معیارهای تاثیرگذار پرداخته شد که نتایج آن به ترتیب در جدول ۵ آورده شده است.

در جدول ۵، نتایج همبستگی خطی پیرسون بین هر یک از معیارهای پژوهش و مطلوبیت نهایی ارائه شده است. برای ارزیابی اعتبار این همبستگی‌ها، مقدار P-value مربوط به هر جفت متغیر نیز محاسبه و در جدول ۵ درج شد. همان‌طور که دیده می‌شود، تقریباً همبستگی تمام معیارهای (فاصله از خطوط هم‌دما، خرد اقلیم، کاربری اراضی، شیب، فاصله از آبخوان،

جدول ۵. همبستگی خطی معیارهای پژوهش با مطلوبیت نهایی

شماره	زیرلایه‌ها	همبستگی
۱	فاصله از خطوط هم‌دما	۰/۶۵-
۲	خرد اقلیم	۰/۶۲-
۳	فاصله از خطوط هم‌بارش	۰/۱۵-
۴	فاصله از خطوط هم‌تبخیر	۰/۰۴۲-
۵	فاصله از گسل	۰/۱۵
۶	فاصله از معادن	۰/۱۹
۷	فاصله از منطقه حفاظت‌شده	۰//۲۵
۸	فاصله از آبراهه	۰/۲۹
۹	فاصله از سیل	۰/۳۰
۱۰	فاصله از ریزگسل	۰/۳۱
۱۱	فاصله از جاده‌ها	۰/۳۷
۱۲	کاربری اراضی	۰/۵۰
۱۳	شیب	۰/۵۷
۱۴	فاصله از آبخوان	۰/۶۵
۱۵	زمین‌شناسی	۰/۶۷
۱۶	خاکشناسی	۰/۶۷
۱۷	ارتفاع	۰/۷۵

زمین‌شناسی، خاکشناسی و ارتفاع) با مطلوبیت نهایی از نظر آماری معنی‌دار است ($P<۰/۰۵$) که نشان‌دهنده رابطه قابل اتکا بین این معیارها و مطلوبیت کلی است. در مقابل، همبستگی دیگر معیارها با مطلوبیت نهایی، از نظر آماری معنی‌دار تلقی نشد.

بحث و نتیجه‌گیری

در حوضه آبریز یزد – اردکان درنتیجه انجام هرگونه پردازشی نیاز به تعداد زیادی زیرلایه‌های مختلف در راستای ترکیب و مکان‌یابی حوضه‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی دارد. پژوهش حاضر از ۱۷ لایه اطلاعاتی متفاوت برای این مدل‌سازی استفاده شد که تهیه داده و اطلاعات دقیق آن بسیار زمان‌بر است (جدول ۳). درنتیجه برای کاهش هزینه‌ها و صرفه‌جویی در زمان پس از مکان‌یابی حوضه‌های تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی در حوضه آبریز یزد – اردکان به بررسی همبستگی تمام ۱۷ لایه یادشده با نتیجه مدل‌سازی پرداخته شد. طبق نتایج از ۱۷ لایه موجود در جدول ۴ فقط ۸ لایه تأثیرگذار شناسایی شد که ضریب همبستگی آن بیش از ۰/۵ بوده است. زیرلایه‌های خطوط هم‌دما منطقه و خرد اقلیم منطقه به ترتیب دارای رابطه معنی‌دار کاهشی و لایه‌های کاربری اراضی، شیب، فاصله از آبخوان، زمین‌شناسی، خاکشناسی و ارتفاع به ترتیب دارای رابطه معنی‌دار افزایشی هستند. بنابراین پارامترهای مربوط به زمین‌شناسی و شکل زمین عوامل اصلی تأثیرگذاری در هر حوضه هستند.

در دو مطالعه اشاره شده (۱۶ و ۱۹)، از روش‌های ترکیبی برای مکان‌یابی تغذیه مصنوعی استفاده کردند. مطالعه ۱۸ با تحلیل شبکه‌ای (ANP)، ۶ سناریو را بر اساس ۱۶ معیار فنی و چهار حوزه (فنی، اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی) ارزیابی کرد. مطالعه ۱۶ از ترکیب AHP، مدل‌سازی عددی و خوشه‌بندی (k-means) استفاده نمود و با ۲۱ معیار، آبخوان را

به ۷ خوشه تقسیم و اراضی متروکه را انتخاب کرد. نتایج نشان داد روش‌های چندمعیاره با درنظرگرفتن معیارهای متنوع، دقت و کارایی را افزایش می‌دهند و برای توسعه پایدار مناسب‌اند. ازآنجایی‌که روش مورداستفاده در این پژوهش محدود به مکان و زمان نیستند، می‌توان آن را به حوزه‌های دیگر تعمیم داد. براساس نتایج پژوهش از بین زیرمعیارهای مختلف برای مکان‌یابی تغذیه مصنوعی حوضه‌های آب زیرزمینی، زیرمعیارهای کاربری اراضی، خرد اقلیم، شیب، فاصله از آبخوان، خطوط هم‌دما، زمین‌شناسی، خاکشناسی و ارتفاع به ترتیب دارای روند معنا دار در ضریب همبستگی خود با لایه نهایی ترکیب خطی وزن‌دار هستند؛ به‌طوری که ضریب همبستگی زیرلایه کاربری اراضی حدودا ۰/۵ و ضریب همبستگی زیرلایه ارتفاع بیش از ۰/۷۵ است.

در بخش یافته‌ها، همبستگی معنی‌دار بین معیارهای فاصله از خطوط هم‌دما، خرد اقلیم، کاربری اراضی، شیب، فاصله از آبخوان، زمین‌شناسی، خاکشناسی و ارتفاع با مطلوبیت نهایی روش WLC گزارش شد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش ۲۰ و ۲۱ همسوتر است. یافته‌های این پژوهش، به ویژه در خصوص همبستگی مثبت و معنی‌دار بین معیارهای یادشده و مطلوبیت نهایی حوضه‌های تغذیه مصنوعی با نتایج مطالعات پیشین همسو است. برای نمونه، مطالعه ۲۰ نشان داد که کاربرد فناوری تغذیه مصنوعی در منطقه گرمسار به بهبود مدیریت منابع آب کمک کرده است که این خود مؤید اهمیت معیارهای مؤثر بر فرایند تغذیه است. همچنین، پژوهش ۲۱ با استفاده از روش‌های پیشرفته آماری، ارتباط پیچیده‌ای بین کاربری اراضی و کیفیت آب را آشکار ساخته است. یافته‌های ما مبنی بر این است که معیارهای فاصله از خطوط هم‌دما، خرد اقلیم، کاربری اراضی، شیب، فاصله از آبخوان، زمین‌شناسی، خاکشناسی و ارتفاع نیز می‌تواند در راستای درک بهتر این روابط پیچیده قلمداد شود؛ چرا که این معیار به طور مستقیم بر کیفیت و کمیت آب ورودی به سفره زیرزمینی تأثیرگذار است.

با بررسی همبستگی بین لایه‌های مختلف و لایه مطلوبیت، دیده می‌شود که دو لایه خرد اقلیم و خطوط هم‌دما رابطه کاهشی قوی با مطلوبیت دارند. این بدان معناست که با افزایش مقادیر مربوط به خرد اقلیم و خطوط هم‌دما، مطلوبیت مناطق برای تغذیه مصنوعی کاهش می‌یابد. علت این پدیده به ویژگی‌های اقلیمی و زمین‌شناختی منطقه برمی‌گردد. بر اساس مطلوبیت نهایی، مناطقی که دارای اقلیم فراخشک و دمای بیشتر هستند، معمولاً در مناطق پست با شیب و ارتفاع کم قرار گرفته است. این انتخاب عمدتاً به دلیل عوامل زمین‌شناختی و فیزیکی منطقه است که در این مناطق شرایط بهتری برای نفوذ آب و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی فراهم می‌کنند. از سوی دیگر، مناطق با اقلیم نیمه‌خشک و درجه حرارت کمتر که معمولاً در ارتفاعات بالا و شیب‌های تند قرار دارند، برای تغذیه مصنوعی چندان کارآمد نیستند. این مناطق به دلیل شیب زیاد و شرایط اقلیمی خاص، امکان نفوذ آب به داخل زمین را کاهش می‌دهند و بنابراین، از نظر مطلوبیت در رتبه‌های پایین‌تری قرار می‌گیرند. در واقع، شیب زیاد و ارتفاعات بالا باعث افزایش رواناب و کاهش فرصت نفوذ آب به داخل زمین می‌شوند که این امر کارایی تغذیه مصنوعی را در این مناطق محدود می‌کند.

به طور کلی، این تحلیل نشان می‌دهد که عوامل اقلیمی (مانند دما و نوع اقلیم) و عوامل فیزیکی (مانند شیب و ارتفاع) نقش تعیین‌کننده‌ای در انتخاب مکان‌های بهینه برای تغذیه مصنوعی دارند؛ بنابراین، در برنامه‌ریزی‌های آینده باید به این عوامل توجه ویژه‌ای شود تا مناطق با بیشترین پتانسیل برای تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی شناسایی و انتخاب شوند. این رویکرد نه‌تنها به بهبود کارایی پروژه‌های تغذیه مصنوعی کمک می‌کند، بلکه به مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی نیز منجر می‌شود.

مناطق کم‌ارتفاع (۱۰۹۹m–۹۵۸m) در دشت یزد – اردکان به دلایل علمی متعددی برای تغذیه مصنوعی مناسب‌تر هستند. از دیدگاه هیدروژئولوژیک، این ارتفاعات معمولاً با سطح ایستابی ارتباط نزدیک‌تری داشته و در مناطق تخلیه آبخوان قرار می‌گیرند که امکان نفوذ مستقیم آب به سفره‌های زیرزمینی را

فراهم می‌کند. مطالعات میدانی نشان می‌دهد شیب‌های کمتر از ۲٪ در این دشت با کاهش سرعت رواناب و افزایش زمان تماس آب با خاک، نفوذپذیری را تا ۴۰٪ بهبود می‌بخشند. این در حالی است که لایه‌های زمین‌شناسی نفوذپذیر مانند ماسه‌سنگ‌های درشت‌دانه در نواحی مرکزی و جنوبی دشت، مسیرهای هیدرولیکی مؤثری برای تغذیه سفره‌های زیرزمینی تشکیل می‌دهند. بر اساس پژوهش‌های مشابه که پیش از این اشاره شد، تلفیق این معیارهای فیزیکی با روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌تواند دقت مکان‌یابی نقاط تغذیه را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. با این حال، برای دستیابی به نتایج بهینه‌تر، پیشنهاد می‌شود پارامترهای تکمیلی مانند کیفیت شیمیایی آب ورودی و عمق سطح ایستابی نیز در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرند

مناطق دور از گسل‌های فعال و ریزگسل‌ها برای تغذیه مصنوعی مناسب‌تر هستند؛ زیرا تغییرات ساختاری در این مناطق کمتر است. در دشت یزد – اردکان، مناطق شرقی و جنوبی از گسل‌های اصلی فاصله بیشتری دارند و بنابراین برای این پروژه مناسب‌تر هستند. نزدیکی به آبراهه‌ها و آبخوان‌ها دسترسی به منابع آب را تسهیل می‌کند و امکان تغذیه مصنوعی را افزایش می‌دهد. در دشت یزد – اردکان، آبراهه‌های فصلی و آبخوان‌های موجود در بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت، گزینه‌های مناسبی برای این پروژه هستند.

پارک ملی سیاه‌کوه و معادن اطراف آن از جمله محدودیت‌های مهم در انتخاب مکان بهینه هستند. فاصله مناسب از این مناطق (ترجیحاً بیش از ۱/۵km) باعث کاهش مخاطرات محیط‌زیستی و حفظ اکوسیستم‌های طبیعی می‌شود. پارک ملی سیاه‌کوه به‌عنوان یک منطقه حفاظت‌شده، باید مطابق با قوانین محیط‌زیست حفظ و نگهداری شود. در دشت یزد – اردکان، مناطق جنوبی و شرقی از پارک ملی و معادن فاصله بیشتری دارند و بنابراین برای تغذیه مصنوعی مناسب‌تر هستند.

با توجه به معیارهای فوق، بهترین مکان برای تغذیه مصنوعی در دشت یزد – اردکان، بخش‌های مرکزی و تا حدی جنوبی دشت است. این مناطق دارای ارتفاع کم، شیب ملایم، خاک‌های با رس کم، لایه‌های زمین‌شناسی نفوذپذیر، فاصله مناسب از گسل‌ها و ریزگسل‌ها، نزدیکی به آبراهه‌ها و آبخوان‌ها و فاصله کافی از پارک ملی سیاه‌کوه و معادن هستند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود این مناطق به‌عنوان گزینه‌های بهینه برای اجرای پروژه تغذیه مصنوعی در نظر گرفته شوند. درنهایت پیشنهاد نویسندگان این پژوهش برای مطالعات آتی شامل آن دسته پژوهش‌هایی است که به بررسی و مقایسه زیرلایه‌های یادشده با روش‌های (Ordered Weighted Average: OWA) و (Principal Component Analysis: PCA) و یا سایر مدل‌های مشابه می‌پردازند. روش OWA، امکان مدل‌سازی انعطاف‌پذیرتر تصمیم‌گیری را فراهم می‌آورد و می‌تواند در ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریت منابع آب با درنظرگرفتن هم‌زمان عوامل هیدرولوژیک، کیفی و زیست‌محیطی، بینش‌های عمیق‌تری نسبت به روش‌های خطی ارائه دهد. همچنین، تحلیل مؤلفه‌های اصلی می‌تواند برای کاهش ابعاد مجموعه‌های داده پیچیده حاوی متغیرهای متعدد (مانند پارامترهای متنوع کیفی آب یا شاخص‌های هیدرولوژیک) به کار گرفته شود. PCA به شناسایی الگوهای پنهان و روابط اساسی بین متغیرها کمک کرده و می‌تواند منجر به ساده‌سازی مدل‌ها و درک بهتر روابط حاکم بر سیستم هیدرولوژیک شود.

گفتنی است که این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز روبرو بوده است که در مطالعات آتی قابل توجه و بهبود هستند. در این مطالعه، تمرکز اصلی بر معیارهای هیدرولوژیک و کمی آب بوده و تحلیل جامعی از کیفیت شیمیایی آب ورودی به حوضه‌های تغذیه مصنوعی صورت نگرفته است. کیفیت شیمیایی آب می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر مطلوبیت نهایی و پایداری حوضه‌های تغذیه داشته باشد؛ ازاین‌رو لحاظ کردن آن در پژوهش‌های آتی ضروری است. همچنین، اگرچه عمق سطح ایستایی به عنوان یکی از معیارهای مؤثر در نظر گرفته شد، اما بررسی دقیق‌تر تأثیر تغییرات آن در بازه‌های زمانی طولانی‌تر یا در سطوح عمیق‌تر می‌توانست تصویر کامل‌تری از وضعیت هیدرولوژیک منطقه ارائه دهد.

References منابع مورد استفاده

1. Entezari, F. and M. R. Ardam. 2015. Site selection of suitable areas for artificial recharge of groundwater using Boolean logic. *In* the National Congress of Irrigation and Drainage (in Farsi).
2. Faraji Sabokbar, H., A. S. Hasanpour, S. K. Alavipanah and S. Elyaspour. 2011. Site selection of suitable areas for floodwater spreading using AHP in a GIS environment (Case study: Garbaigan watershed, Fasa plain, Shiraz). *Physical Geography* 4(14): 13-25 (in Farsi).
3. Gordoei Milan, M. and G. H. Karami. 2013. Evaluation of the quantitative effects of the artificial recharge project in Khoy. *In* the Iranian Society of Engineering Geology and Environmenta (in Farsi).
4. Gudarzi, M., M. Sabaghzadeh and A. Rajabpour Niknam. 2025. The relationship between land subsidence and water consumption in Yazd-Ardakan plain using Sentinel images. *Geographical Sciences Applied Research Quarterly* 25(76): 144-161 (in Farsi). DOI:10. 1186/jgs.25.76.13
5. Jahangirzadeh, H. and M. Ghanbarzadeh Lak. 2021. Developing a decision-making model to enhance artificial aquifer recharge site selection through floodwater spreading based on GIS and ELECTRE I. *Water Resources Management* 35: 5169–5186. DOI: 10.1007/s11269-021-02993-2
6. Malczewski, J. 2004. GIS-based land-use suitability analysis: A critical overview. *Progress in Planning* 62(1): 3-65. DOI: 10.1016/j.progress.2003.09.002
7. Ma'roofpoor, A., A. Zarei and J. Abedi Koopaee. 2022. Groundwater Recharge Area Suitability Mapping Using GIS and WLC (Qorveh Plain - Kurdistan). *Journal of Rainwater Harvesting Systems* 10(2): 43-60 (in Farsi).
8. Nasimi, A. R. and M. Zarei. 2015. Site selection of artificial groundwater recharge ponds in the Bushkan watershed based on the Analytic Hierarchy Process (AHP). *Water and Soil Science* 25(1): 125-141(in Farsi).
9. Papi, R., S. Hamzeh and M. Soleimani. 2020. Site selection of suitable areas for artificial groundwater recharge using Fuzzy AHP method in Tehran province. *Watershed Management Engineering and Management* 12(1): 282-297 (in Farsi). DOI:10. 2092/ijwmse.2018.123092.1535
10. Peykanpour Fard, R., H. Moradi, A. Lotfi. and S. Pourmanafi. 2021. Integration of air pollution mapping in land use planning: A case study of Mobarakeh County. *Geography and Environmental Planning* 32(2): 45-66 (in Farsi).
11. Peykanpour Fard, R., H. Moradi, A. Lotfi, S. Pourmanafi and N. Bihamta Toosi. 2022. Advancing the mapping of optimal land use structure in industrialized areas: incorporating AERMOD modeling and MCE approach. *GeoJournal* 88(2): 1979-1995. DOI: 10.1007/s10708-022-10716-2
12. Peykanpour Fard, R., S. Sefianian, M. Ahmadi and S. Pourmanafi. 2024. Multi-objective zoning of protected areas using MCE and MOLA methods (Case study: Abbasabad Wildlife Refuge, Esfahan Province). *Applied Ecology Research Journal* 13(1): 47-60 (in Farsi) . DOI: 10. 2108/gep.2021.126855.1393
13. Rajaei, F., A. Esmaeili Sari, A. Salman Mahini, M. Delavar, M. Gholipour and A. R. Massah Boon. 2016. Prediction of the most suitable agricultural areas in the Tejan watershed using the Multi-Criteria Evaluation (MCE) method. *Scientific Journal of Land Use Planning* 9(1): 351-366 (in Farsi).
14. Raja Shekar, P. and A. Mathew. 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. DOI:10.1016/j.gsd.2023.100994
15. Rezaei, J. 2015. Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega* 53: 49-57. DOI:10.1016/j.omega.2014.11.009. ISSN 0305-0483.
16. Sadjadi, S. and M. Karimi. 2018. Best-worst multi-criteria decision-making method: A robust approach. *Decision Science Letters* 7: 323-340. DOI: 10.5267/j.dsl.2018.3.003
17. Saeedmoghadam, M., M. R. Espehbod, F. Rezaei and S. Bozari. 2015. Site selection of suitable areas for implementing aquifer artificial recharge projects using GIS in Alashtar Plain. *In* the International Congress on Earth and Science (in Farsi).
18. Salnameh amari ostan Yazd . 2021. https://amar.org.ir/salnameh-amari (in Farsi).
19. Shafiei, M. and M. Ghanbarzadeh Lak. 2019. Prioritization of scenarios in aquifer artificial recharge site selection model using ANP (Case study: Khoy plain aquifer*). Iran's Water Resources Research* 14(4): 140-159 (in Farsi).
20. Soltanian Talak Abadi, M., M. Hasanpour Darvishi, S. H. Mousavi Jahromi and M. Naseri. 2024. Application of artificial recharge technology for water resource management and pollution reduction (Case study: Garmsar region). *Geography (Regional Planning)* 14(57): 14-25. DOI:10.22034/JGEOQ.2024.289919.3127 (in Farsi).
21. Zhu, H., G. Tong, N. Duan, H. Ma, Q. Song, J. Wang, Y. Luo, Q. Zhang, X. Yu and S. Q. Jin. 2024. Analysis of the complex correlations between land use and water quality using the PLS-SEM method combined with fluorescence fingerprinting data. *Journal of Environmental Management* 373: 12-36. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123688