



Spatial Analysis of Suitable Managed Aquifer Recharge Areas Using Overlaying of Layers method: Case of Hashtgerd Study Area Aquifer

Seyed Mohammad Mahdi Abbasi¹ | Hamed Ketabchi²

1. Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: abbasi_mahdi@modares.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: h.ketabchi@modares.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Article Article history: Received 20 November 2024 Received in revised form 21 December 2024 Accepted 10 January 2025 Published online 17 May 2025 Keywords: Hashtgerd Aquifer Managed Aquifer Recharge (MAR) Overlaying of Information Layers Suitable Areas	The increasing exploitation of water resources due to population growth along with climate change necessitates a series of appropriate management measures to address water challenges. Managed aquifer recharge (MAR) could serve as a promising solution. The first step of managed aquifer recharge is finding suitable locations for its implementation. In this research by using the overlaying of layers method in Geographic Information System (GIS), flood spreading areas as a managed aquifer recharge method were examined. Hashtgerd study area aquifer was chosen. The selected layers for this study include drainage density, distance from wells, slope, soil texture, land use, lineament density, groundwater depth, geology, geomorphology, runoff height, electrical conductivity, and transmissivity. Sensitivity analysis was conducted to weight these information layers. The weighting method was also compared with the case where all the layers had equal weights. The results indicate that according to the weighting method used 1 and 13 percent of areas were in highly suitable and suitable, 43 percent in moderate, and 41 and 2 percent in unsuitable and highly unsuitable classes. Northern, north-eastern, and a small part of the south-western areas of the aquifer are the most suitable for MAR implementation.

Cite this article: Abbasi, S. M. M., & Ketabchi, H. (2025). Spatial Analysis of Suitable Managed Aquifer Recharge Areas Using Overlaying of Layers method: Case of Hashtgerd Study Area Aquifer. *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (1), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.385701.1190>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.385701.1190>

Publisher: University of Tehran Press.



تحلیل مکانی مناطق مناسب تغذیه مدیریت شده آبخوان با استفاده از روش هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی (مطالعه موردی: آبخوان محدوده مطالعاتی هشتگرد)

سید محمد مهدی عباسی^۱ | حامد کتابچی^۲

۱. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: abbasi_mahdi@modares.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: h.ketabchi@modares.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
با وجود افزایش روزافزون جمعیت و به دنبال آن، افزایش بهره‌برداری از منابع آبی در کنار پدیده‌هایی نظیر تغییر اقلیم، لازم است اقدامات مدیریتی مناسبی برای مواجهه با چالش‌های آبی اتخاذ شود. تغذیه مدیریت شده آبخوان می‌تواند به عنوان یک راه کار برای جبران بخشی از کاهش ذخایر آب زیرزمینی آبخوان به کار گرفته شود. اولین گام در تغذیه مدیریت شده آبخوان، انتخاب مناطق مناسب برای اجرا کردن آن است. در این مطالعه، با استفاده از روش هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS، مناطق پخش سیلاب به عنوان یکی از روش‌های تغذیه مدیریت شده آبخوان در محدوده مطالعاتی هشتگرد به عنوان منطقه مورد مطالعه بررسی شد. لایه‌های اطلاعاتی منتخب، لایه‌های تراکم زهکشی، فاصله از چاه، شیب، بافت خاک، کاربری اراضی، تراکم خطواره، عمق سطح آبخوان، زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، ارتفاع رواناب، هدایت الکتریکی و قابلیت انتقال آبخوان است. برای وزن‌دهی لایه‌های اطلاعاتی، تحلیل حساسیت انجام گرفت. هم‌چنین روش وزن‌دهی مورد استفاده با شرایطی که وزن لایه‌ها برابر باشند مقایسه شد. طبق نتایج به دست آمده در وزن‌دهی با روش مورد استفاده، به ترتیب یک و ۱۳ درصد مناطق در کلاس‌های بسیار مناسب و مناسب، ۴۳ درصد در کلاس متوسط و ۴۱ و ۲ درصد مناطق در کلاس نامناسب و بسیار نامناسب برای تغذیه مدیریت شده آبخوان قرار گرفتند. بخش شمال، شمال شرقی و بخش کوچکی از جنوب غربی آبخوان به عنوان بهترین مناطق جهت پیاده‌سازی طرح تغذیه مدیریت شده آبخوان تعیین شدند.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ کلیدواژه‌ها: آبخوان هشتگرد تغذیه مدیریت شده آبخوان مناطق مناسب هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی

استناد: عباسی، سید محمد مهدی و کتابچی، حامد (۱۴۰۴). تحلیل مکانی مناطق مناسب تغذیه مدیریت شده آبخوان با استفاده از روش هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی (مطالعه موردی: آبخوان محدوده مطالعاتی هشتگرد). نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۱)، ۱۸-۱.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.385701.1190>



۱. مقدمه

نیاز به تأمین آب بخش‌های مختلف از جمله شرب، صنعت و کشاورزی امری اجتناب‌ناپذیر است. در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأمین نیاز آبی به یک چالش جدی تبدیل شده است. آب‌های زیرزمینی به‌واسطه ویژگی‌های خاص خود، در شرایط بحرانی به‌عنوان مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده این نیازها به‌شمار می‌روند (Vaux, 2010). به دلایلی از قبیل افزایش جمعیت، تغییرات کاربری اراضی، تغییر اقلیم (Olivares et al., 2019) و مدیریت نامناسب (Jakemann et al., 2016)، این منابع در شرایط نامناسب قرار گرفتند و دچار کاهش ذخایر شده‌اند. در این شرایط لازم است اقدامات مناسبی برای مدیریت این منابع صورت گیرد. یکی از این اقدامات استفاده از روش تغذیه مدیریت شده آبخوان (MAR)^۱ می‌باشد. تغذیه مدیریت شده آبخوان به مجموعه‌ای از روش‌ها اشاره دارد که برای حفظ و تقویت منابع آب زیرزمینی به‌کار می‌روند (Dillon et al., 2019). در این روش آب برای تغذیه و افزایش کمی یا کیفی به آبخوان وارد می‌شود. تزریق یا نفوذ آب در روش MAR سریع‌تر و بیش‌تر از تغذیه طبیعی اتفاق می‌افتد و همچنین نرخ و حجم تغذیه قابل تغییر و تنظیم می‌باشد (Jakemann et al., 2016). هرکدام از روش‌های MAR، رویکردها، هزینه و درآمد و اقدامات مختلفی را نیاز دارند. این روش‌ها به سه بخش اصلی تقسیم می‌شوند؛ ۱- تغذیه توسط چاه، این روش را به‌سادگی می‌توان تزریق آب توسط چاه تفسیر کرد. مهم‌ترین و پرستفاده‌ترین روش‌های این بخش ASR^۲ و ASTR^۳ می‌باشند، ۲- روش‌های پخش، در این روش‌ها، آب روی سطح زمین پخش می‌شود و به زیر سطح زمین نفوذ پیدا می‌کند. حوضچه‌های نفوذ و پخش سیلاب از مهم‌ترین کارهای انجام‌شده در این روش می‌باشند و ۳- نفوذ از طریق دیواره رودخانه‌ها و دریاچه‌ها که آب در این روش از طریق احداث مثلاً تپه‌های شنی در مسیر رودخانه‌ها به زیر سطح زمین نفوذ می‌یابد (Ringleb et al., 2016). اولین گام در اجرای پروژه‌های MAR، انتخاب بهترین مناطق برپایی آن‌ها می‌باشد. انتخاب این مناطق نیازمند انجام پژوهش‌ها و مطالعات مختلفی است (Kourakos et al., 2023). یکی از روش‌های مرسوم در انتخاب بهترین مناطق ساخت MAR، روش برهم‌نهی لایه‌های اطلاعاتی است. با کمک این روش می‌توان به‌سادگی با توجه به لایه‌های اطلاعاتی منتخب و وزن‌دهی مناسب، بهترین مناطق تغذیه را پیدا کرد (Alkhatib et al., 2021). هنوز هیچ‌گونه دستورالعمل مناسبی برای انتخاب بهترین لایه‌های اطلاعاتی و وزن‌دهی آن‌ها وجود ندارد. به همین دلیل، تنوع زیادی در نوع لایه‌های اطلاعاتی منتخب و اوزان مربوط به آن‌ها وجود دارد (Sallwey et al., 2019).

در مطالعات پیشین، لایه‌ها براساس نوع MAR انتخاب و سپس وزن‌دهی با روش‌های مختلف و اغلب براساس قضاوت کارشناسی انجام شده است. برخی لایه‌ها به‌دلیل اهمیت بالا در تمامی مطالعات مورد استفاده قرار گرفتند. به‌عنوان مثال، لایه شیب، کاربری اراضی و تراکم زهکشی به‌دلیل تأثیر بالایی که بر روش‌های پخش دارند، در بیش‌تر مطالعات مورد استفاده قرار گرفتند. در پژوهش‌های Varouchakis et al. (2023)، Maréchal et al. (2020) و Sadeghi et al. (2022) همه از لایه‌های مزبور استفاده کردند. در روش پخش تنها Valverde et al. (2016) بودند که با وجود استفاده از لایه‌های شیب و تراکم زهکشی، از لایه کاربری اراضی استفاده نکردند. همچنین در بیش‌تر مطالعات حداقل از یک لایه زمین‌شناسی در مطالعات استفاده شد. شایان توجه است که با وجود اهمیت بالای عوامل کیفی و هیدروژئولوژیکی نظیر قابلیت انتقال، به این موارد کم‌تر توجه شده و به‌غیر از Kazakis (2018) و Ahani Amineh et al. (2017)، در باقی مطالعات به آن‌ها توجهی نشده است. جدول (۱) خلاصه‌ای از لایه‌های مورد استفاده قرار گرفته مطالعات پیشین در تعیین مناطق مناسب MAR را نشان می‌دهد. در این جدول، لایه‌های مورد استفاده به چهار بخش اصلی تقسیم شدند؛ عوامل زمین‌شناسی مانند نقشه زمین‌شناسی یا ژئومورفولوژی منطقه؛ عوامل هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی نظیر ارتفاع رواناب، تراکم زهکشی، قابلیت انتقال و عمق آبخوان؛ ویژگی‌های خاک و توپوگرافی مانند بافت خاک، شیب زمین

و توپوگرافی منطقه و عوامل انسانی و زیرساختی که از فعالیت‌های انسان تأثیر گرفتند مانند تراکم خطواره، فاصله از چاه‌های پمپاژ و کاربری اراضی. همچنین در این جدول به‌روش وزن‌دهی نیز اشاره شده است.

Table 1. Summary of Layers and Weighting Methods in Previous MAR Studies

Reference	MAR method	Geology factors	Hydrology and hydrogeology factors	Soil and topography factors	Human and infrastructure factors	Study Area	Weighting method
Valverde <i>et al.</i> (2016)	Spreading method	×	Hydrogeological aptitude Drainage density	Terrain slope Top soil texture	×	Costa Rica	MIF ⁴ and sensitivity analysis
Kazakis (2018)	Not mentioned	Distance from shore	Transmissivity Groundwater quality Vadose zone Piezometric head Depth of groundwater Drainage network	Slope	Distance from main roads Water availability	Anthemountas Basin, Greece	AHP ⁵ and sensitivity analysis
Ahani Amineh <i>et al.</i> (2017)	ASR	Geology Geomorphology	Transmissivity Runoff height Drainage density Groundwater quality Depth to groundwater Groundwater level decline	Soil erosion	Land cover Proximity to existing infrastructure	Hamoon-Jazmoorian plain, Iran	AHP method of SMCDM ⁶
Sadeghi <i>et al.</i> (2022)	Spreading (Flooding)	Geology Geomorphology	Runoff height Drainage density Depth of groundwater	Soil texture Slope	Lineament density Distance from wells Land cover	Sharifabad plain, Iran	Used another article weighting method and correlated final map with EC
Maréchal <i>et al.</i> (2020)	Infiltration basin	Aquifer storage capacity	Water quality and availability	Soil infiltration rate	Distance from river Elevation difference from the closest stream	Vistrenque and Costières plain, France	GIS tool designed by authors for cost evaluation
Varouchakis <i>et al.</i> (2023)	Spreading method	Hydrogeology Distance to source water	Groundwater level	Slope Soil texture	Land use	Geropotamos basin, Greece	MCDA ⁷ AHP pairwise comparison

مطالعات زیادی در رابطه با پیدا کردن مناطق مناسب MAR انجام شده‌اند اما تعداد کمی از آن‌ها به جنبه‌های مختلف مؤثر بر MAR به‌صورت همزمان پرداختند. به‌علاوه بیش‌تر مطالعات وزن‌دهی را از نظر کارشناسی انجام دادند (ستون آخر). اگرچه این روش می‌تواند در وزن‌دهی و اهمیت لایه‌ها نسبت به یکدیگر کمک کند، اما در عین حال می‌تواند نظر فردی را در انتخاب دخیل کند. در این مطالعه، نوع دوم از انواع روش MAR استفاده شد. لایه‌های اطلاعاتی مدنظر، ۱۰ لایه مهم طبیعی و فیزیکی تأثیرگذار بر انتخاب سطوح مناسب تغذیه مصنوعی (Sadeghi *et al.*, 2022) مشتمل بر لایه‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، بافت خاک، شیب، کاربری اراضی، ارتفاع رواناب، تراکم زهکشی، تراکم خطواره، عمق سطح آب زیرزمینی و فاصله از چاه‌های پمپاژ به‌علاوه لایه انتقال آبخوان (Ahani Amineh *et al.*, 2017; Kazakis, 2018) به‌دلیل نقش آن در سرعت و نحوه حرکت آب در آبخوان و هدایت الکتریکی (Ahani Amineh *et al.*, 2017) به‌دلیل اهمیت کیفیت آبخوان در پروژه‌های MAR انتخاب شدند که ۱۲ لایه مورد استفاده را تشکیل می‌دهند. در این مطالعه، از هرکدام از عوامل تأثیرگذار بر MAR بسته به نوع آن، یک یا چند لایه اطلاعاتی انتخاب شده و تأثیر هر عامل در انتخاب مناطق مناسب موردتوجه قرار گرفت. به‌علاوه، در وزن‌دهی از تحلیل حساسیت به جای تأثیر قضاوت

کارشناسی استفاده شده است. همچنین در پایان اهمیت وزن دهی در تعیین مناطق مناسب مورد بحث و مقایسه قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه، آبخوان محدوده مطالعاتی هشتگرد، به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. آبخوان هشتگرد یک آبخوان آبرفتی از نوع آزاد است که در طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۵۱ دقیقه عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۰۷ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱). این محدوده با مساحت ۱۱۷۰/۵ کیلومتر مربع در استان البرز واقع شده است. رودخانه‌های اصلی هشتگرد عبارت است کردان، شور، فشنند، آردهه، ولیان و هیو. میانگین بارندگی سالانه در دوره زمانی ۱۹ ساله (۱۳۷۹-۱۳۹۸) در ارتفاعات این محدوده ۲۳۸ میلی‌متر و در نواحی دشت آن ۱۷۲ میلی‌متر است (RIWEM, 2022). جهت جریان رودخانه‌ها از شمال شرق به جنوب غرب است. در این منطقه ۷۸۵۶ حلقه چاه وجود دارد. براساس گزارش بیلان منطقه هشتگرد که از سال ۱۳۷۹-۸۰ تا ۱۳۹۷-۹۸ انجام شده، در این بازه زمانی سطح آب ۱۸ میلیون مترمکعب افت کرده است که مقدار افت سالانه تراز آبخوان را حدوداً ۹۰ سانتی‌متر می‌کند. همچنین میزان برداشت آب براساس آمار برداری در دوره سوم (۱۳۹۷-۹۸) ۳۳۴ میلیون مترمکعب بوده که ۸۴ درصد یعنی ۲۸۰ میلیون مترمکعب از آن از منابع آب زیرزمینی بوده است (RIWEM, 2022). آبخوان هشتگرد در سال‌های اخیر افت زیادی داشته چرا که میزان برداشت از آبخوان بیش‌تر از تغذیه طبیعی آن بوده است، بنابراین باید اقدامات مناسب برای تغییر این شرایط انجام شود (RIWEM, 2022).

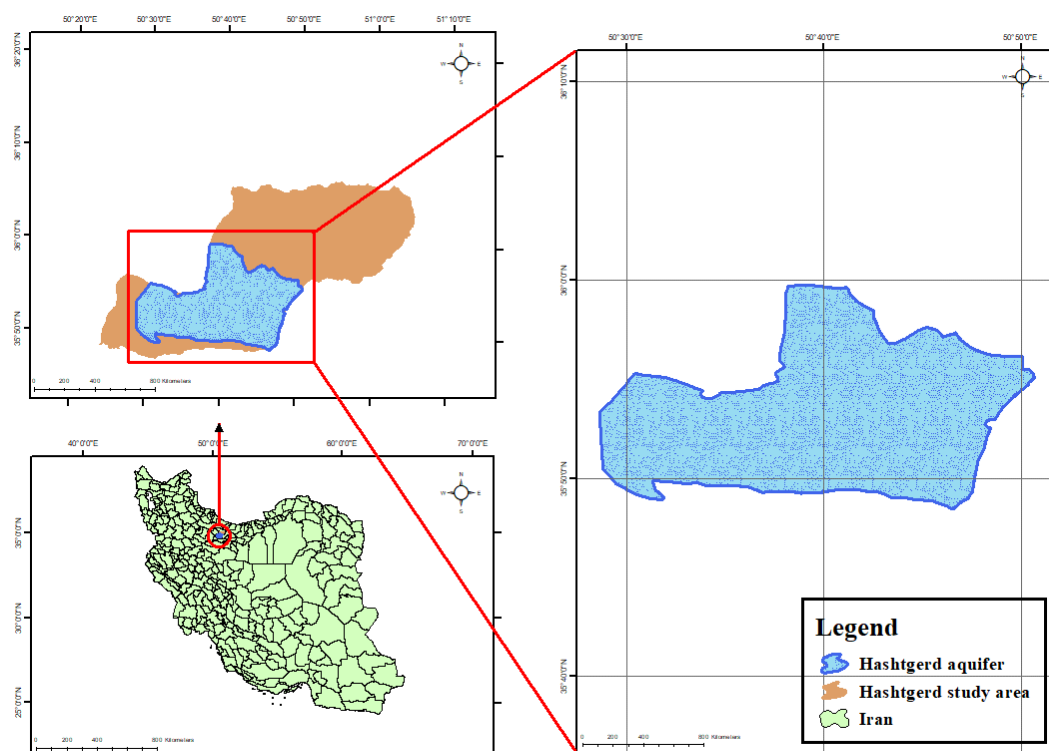


Figure 1. Hashtgerd study area

۲.۲. روش کار

در این پژوهش، ۱۲ لایه اطلاعاتی استفاده شد که برای برخی از لایه‌ها از نتایج مطالعات پیشین استفاده شد. این لایه‌ها عبارتند از لایه‌های کاربری اراضی، قابلیت انتقال، بافت خاک، شیب و عمق سطح آبخوان از RIWEM (2022)، لایه زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی از Khorsandi (2009) و لایه هدایت الکتریکی از ARWA (2018). لایه‌های دیگر مانند ارتفاع رواناب و تراکم خطواره نیز رسم شدند. سپس هر لایه براساس تأثیر بر MAR از یک تا ۱۰ ارزش‌گذاری شدند. در مرحله بعد هر لایه براساس تحلیل حساسیت وزن‌دهی شد. پس از آن لایه‌ها با هم ترکیب شده و مناطق مناسب برای MAR رسم گردید. در نهایت نقشه به‌دست‌آمده به پنج کلاس بسیار مناسب، مناسب، متوسط، نامناسب و بسیار نامناسب تبدیل شد. برای مقایسه و تأکید بر اهمیت وزن‌دهی، یک نقشه هم‌پوشانی‌شده با وزن یکسان نیز رسم شد که با وزن‌دهی با تحلیل حساسیت مقایسه شد. شکل (۲) مراحل انجام کار و منابع مورداستفاده را نشان می‌دهد.

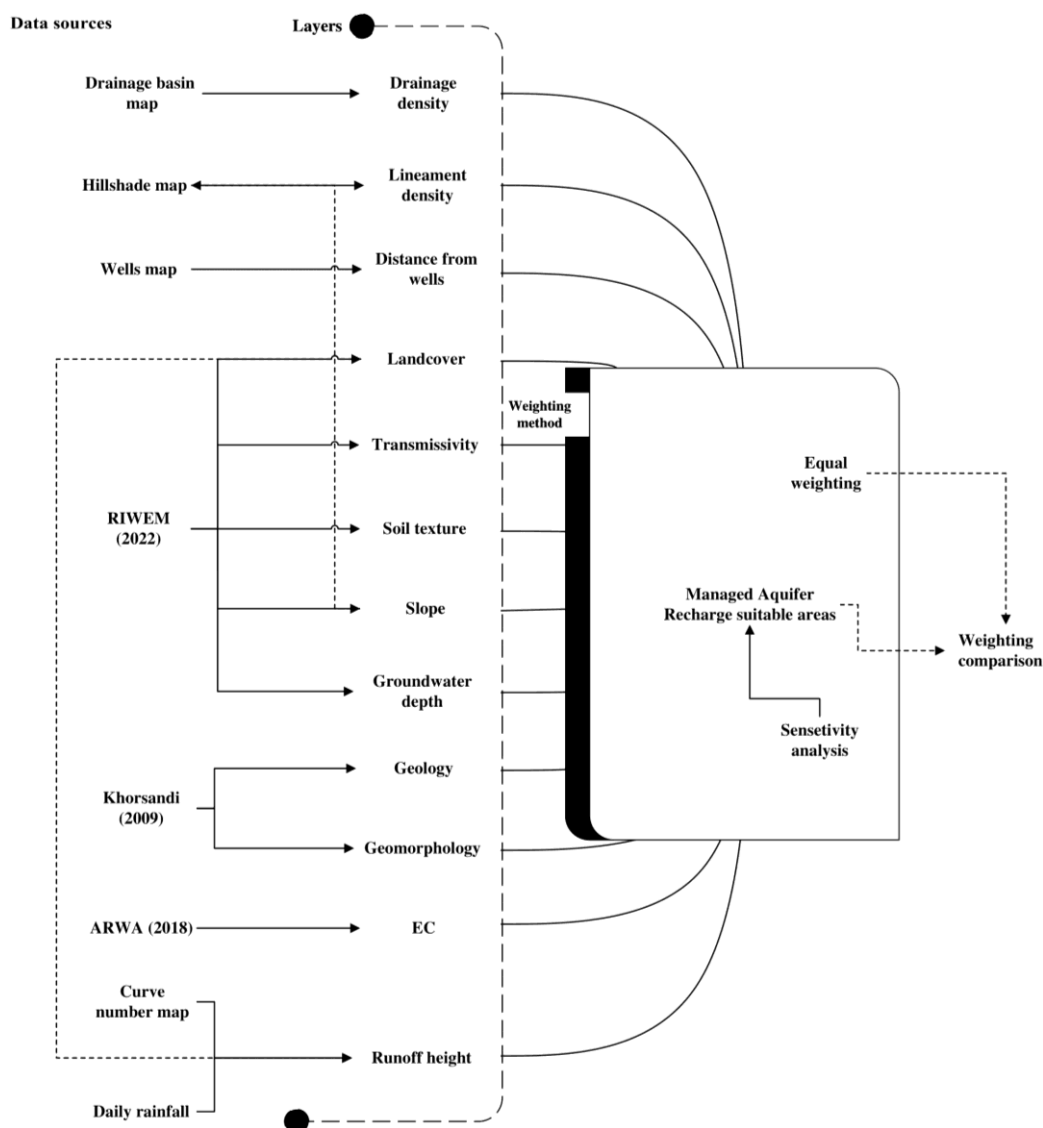


Figure 2. Methodology

۳.۲. لایه‌های اطلاعاتی

۳.۲.۱. تراکم زهکشی

تراکم زهکشی به شناسایی سیستم زهکشی منطقه کمک می‌کند. هم‌چنین به‌عنوان یک شاخص برای نفوذ طبیعی زمین می‌تواند به کار رود. هر چقدر تراکم زهکشی بالاتر باشد، رواناب بیش‌تر است و در نتیجه آن نفوذ کم‌تر و بنابراین نرخ تغذیه پایین‌تر است. تراکم زهکشی از تقسیم طول آبراهه‌های یک حوضه به مساحت کل آن به‌دست می‌آید (Valverde *et al.*, 2021; Sadeghi *et al.*, 2022). برای سیستم رودخانه از ARWA (2018) استفاده شد. در نهایت برای رسم این نقشه از رابطه (۱) استفاده شد.

$$D = \frac{\sum L_i}{A} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، D تراکم زهکشی برحسب کیلومتر بر کیلومتر مربع، L_i طول هر آبراهه برحسب کیلومتر و A مساحت کل حوضه آبریز برحسب کیلومتر مربع می‌باشد.

۳.۲.۲. فاصله از چاه

هر چقدر یک منطقه به حریم چاه نزدیک‌تر باشد، از نظر ارزش MAR پایین‌تر خواهد بود (Sadeghi *et al.*, 2022). اگر منبع آب مورد استفاده از چاه فاصله داشته باشد، فرصت کافی برای پخش روی سطح زمین را دارد که همین باعث تصفیه طبیعی آلاینده‌ها و افزایش کیفیت آب می‌شود. برای تهیه این بخش، از مختصات جغرافیایی چاه‌ها که توسط RIWEM (2022) ارائه شده است، استفاده شد. سپس با بهره‌گیری از ابزار Euclidean Distance در محیط GIS، محدوده تأثیر هر چاه مشخص شده و نقشه فاصله از چاه‌ها تولید شد.

۳.۳.۲. شیب

شیب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های توپوگرافی مؤثر بر تغذیه آب زیرزمینی است. شیب بر سرعت و نفوذ آب در خاک تأثیر مستقیم دارد. هم‌چنین شیب تند باعث فرسایش خاک شده که همین عامل می‌تواند اثرات نامطلوب بر حوضچه نفوذ داشته باشد (Valverde *et al.*, 2021). اطلاعات این بخش از RIWEM (2022) به‌دست آمده است.

۳.۳.۲. بافت خاک

بافت خاک نشان‌دهنده میزان نفوذ آب به خاک است. به همین دلیل، از مهم‌ترین ویژگی‌های خاک به‌شمار می‌رود. خاک هر چه درشت‌دانه‌تر باشد، مقدار آب بیش‌تری از خود عبور می‌دهد و تغذیه آبخوان را سریع‌تر می‌کند (Sandoval & Tiburan, 2019). برای نقشه بافت خاک نیز از اطلاعات RIWEM (2022) استفاده شده است.

۳.۳.۵. کاربری اراضی

یکی از عوامل مهم در شناسایی مناطق مناسب MAR، کاربری اراضی است. کاربری اراضی معمولاً به‌عنوان مجموعه‌ای از طبقات سلسله‌مراتبی توصیف می‌شود که هر کدام مجموعه‌های زیستی و غیرزیستی غالب را نشان می‌دهند (Wulder *et al.*, 2018). این اطلاعات بر نفوذ آب زیرزمینی در منطقه، پتانسیل رواناب، توانایی زمین در نگهداری آب، تبخیر-تعرق و چرخه آب تأثیرگذار است (Sandoval & Tiburan, 2019). این نقشه از میانگین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ کاربری اراضی RIWEM (2022) استخراج شده است.

۲.۳.۶. تراکم خطواره

خطواره مشخص کننده ساختار و ساختمان سنگ زیرین است. رابطه نزدیکی بین تراکم خطواره و جریان آب زیرزمینی وجود دارد. هرچه تراکم خطواره بیش تر باشد، حرکت آب به شکستگی ها و نفوذ به اعماق زمین بیش تر می شود، اما باید توجه داشت که مقادیر بالای تراکم خطواره احتمال حرکت آلودگی به سمت آب های زیرزمینی را افزایش می دهد (Abdullah et al., 2015; Oikonomidis et al., 2015). نقشه سایه روشن^۹ با استفاده از فایل رقوم ارتفاعی در Azimuth و Altitude های متفاوت (۳۱۵-۴۵، ۵۰-۲۰۰، ۶۰-۱۰۰ و ۹۰-۵۰) تهیه شد. سپس برای هر کدام از این موارد در نرم افزار Geomatica خطواره رسم می شود.

۲.۳.۷. عمق سطح آبخوان

عمق سطح آبخوان فاصله سطح زمین تا سطح ایستابی است. عمق سطح آبخوان به عنوان یکی از مهم ترین پارامترها در تعیین مناطق مناسب MAR است. با کاهش عمق سطح آبخوان در یک مکان، مطلوبیت آن جا برای MAR کاهش می یابد (Kazakis, 2018). برای نقشه عمق سطح آبخوان از RIWEM (2022) استفاده شده است.

۲.۳.۸. زمین شناسی

زمین شناسی با تأکید بر جنس سنگ مهم ترین پارامتر در پتانسیل آب زیرزمینی است. هر محیط متخلخل/سنگی نفوذپذیری مشخصی دارد و یک مقدار آب را می تواند از خود عبور دهد، به همین دلیل برای تغذیه اهمیت بالایی دارد. زمین شناسی اطلاعات از گسل ها و شکستگی های زمین را نشان می دهد. همچنین زمین شناسی تأثیر به سزایی در کیفیت و توزیع رسوبات آبرفتی را نشان می دهد (Zende, 2014; Zarate et al., 2021). در پژوهشی که توسط Sallwey et al. (2019) انجام شد، لایه زمین شناسی را یکی از بیش ترین لایه هایی اعلام کردند که در مطالعات انتخاب مناطق مناسب MAR مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از نظر کارشناسان، این لایه بالاترین وزن را به خود اختصاص داده است. برای تهیه نقشه زمین شناسی از Khorsandi (2009) استفاده شد.

۲.۳.۹. ژئومورفولوژی

منظور از ژئومورفولوژی، واحدهایی می باشند که رخنمون های سطحی مانند دشت، تراس، آتشفشان، تپه، دره، کوه و غیره هستند. تفاوت لایه های زمین شناسی و ژئومورفولوژی در این است که انسان در ویژگی های ژئومورفولوژیکی تأثیر بیش تری داشته است (Sandoval & Tiburan, 2019). رابطه مستقیمی میان ویژگی های ژئومورفولوژیکی و تغذیه آبخوان وجود دارد (Letz et al., 2021) در این بخش نیز از نقشه ژئومورفولوژی Khorsandi (2009) استفاده شد.

۲.۳.۱۰. ارتفاع رواناب

ارتفاع رواناب که رابطه معکوس با نفوذپذیری دارد و یکی از پارامترهایی است که می تواند در انتخاب مناطق مناسب کمک کند. در این بخش از روش SCS-CN استفاده می شود. مزیت این روش این است که می توان بدون نیاز به داده های زیاد و پیچیده بتوان به جواب های مناسب رسید (Al-Ghobari et al., 2020). ورودی های اصلی برای رسم نقشه ارتفاع رواناب شامل میزان بارندگی و شماره منحنی رواناب (CN) است. شماره منحنی رواناب از رابطه بین گروه هیدرولوژیکی خاک و الگوی کاربری اراضی در منطقه مورد مطالعه به دست می آید (Sadeghi et al., 2022; Roshun et al., 2022).

با توجه به میزان بارندگی روزانه منطقه مورد مطالعه و همچنین گروه هیدرولوژیکی خاک و لایه کاربری اراضی نقشه ارتفاع رواناب ترسیم گردید. در ابتدا شماره منحنی با توجه به لایه کاربری اراضی به دست آمد (رابطه ۲).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{(رابطه ۲)}$$

رابطه بالا برای محاسبه S استفاده شد. در رابطه (۲)، CN شماره منحنی و S عامل نگهداشت آب در خاک است. برای نقشه بارندگی روزانه آبخوان، دو ایستگاه نجم‌آباد و کریم‌آباد در داخل آبخوان و دو ایستگاه ولیان و ده‌صومعه خارج از آبخوان انتخاب شد. سپس با توجه به مقادیر برای هر روز که در آن بارندگی رخ داده نقشه‌های هم‌باران تهیه شد. در نهایت لایه Q یا ارتفاع رواناب براساس رابطه (۳) حاصل شد.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

در این رابطه، P میانگین روزهای دارای بارندگی در نظر گرفته شد.

۱۱.۳.۲. هدایت الکتریکی

برای در نظر گرفتن تأثیر کیفیت آب به عنوان یک عامل اصلی در موفقیت پروژه‌های MAR از لایه هدایت الکتریکی استفاده شد، چرا که یکی از تفاوت‌های اصلی تغذیه مدیریت شده آبخوان با تغذیه مصنوعی در تأکید به درک اهمیت کیفیت در کنار کمیت آب تزریق شده یا پخش شده است (Dillon et al., 2019). اگر کیفیت آبخوان پایین باشد، باید آبی با کیفیت بهتر به آن اضافه شود و اگر این اتفاق نیفتد، برای بهبود کیفیت آب هزینه بیش‌تری برای انجام پروژه تحمیل می‌شود (Ahani Amineh et al., 2017). به دلیل اهمیت بالا در کیفیت آب، لایه هدایت الکتریکی به عنوان لایه معرف کیفیت آبخوان انتخاب شد (ARWA, 2018).

۱۲.۳.۲. قابلیت انتقال

قابلیت انتقال آبخوان یکی از ویژگی‌های مهم است که توانایی آبخوان را در دریافت تغذیه مشخص می‌کند. براساس رابطه قابلیت انتقال با در نظر گرفتن این پارامتر هم هدایت هیدرولیکی و هم ضخامت آبخوان را می‌توان به صورت هم‌زمان در نظر گرفت. هر چه قابلیت انتقال بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده این است که آبخوان می‌تواند حجم بیش‌تری از آب را از طریق لایه‌های متخلخل و با سرعت بالاتری انتقال دهد که همین امر باعث بهبود وضعیت تغذیه می‌شود (Ahani Amineh et al., 2017). لایه قابلیت انتقال نیز از RIWEM (2022) اضافه شده است.

۴.۲. تحلیل حساسیت

پس از ارزش‌گذاری لایه‌ها، روی لایه‌ها تحلیل حساسیت انجام شد. به این صورت که وزن هر لایه $\pm 50\%$ درصد تغییر کرده و باقی لایه‌ها برای رسیدن به وزن کل قبل تنظیم شدند. همچنین برای مقایسه با نقشه اصلی، نقشه با وزن یکسان رسم شد. برای وزن‌دهی نهایی از رابطه‌های (۴)، (۵) و (۶) استفاده شد. در این رابطه $M(Main)$ میانگین لایه با وزن یکسان، $M(A_Layer_i)$ میانگین در شرایط افزایش وزن لایه i ، $M(B_Layer_i)$ میانگین در شرایط کاهش وزن لایه i ، $AveChange_i$ میانگین تغییرات لایه i نسبت به لایه اصلی، S جمع میانگین تغییرات لایه‌ها و W_i وزن لایه است.

$$AveChange_i = \frac{|M(Main) - M(A_Layer_i)| + |M(Main) - M(B_Layer_i)|}{2} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$S = \sum_{i=1}^{12} AveChange_i \quad \text{(رابطه ۵)}$$

$$W_i = \frac{AveChange_i}{S} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

در نهایت با توجه به رابطه (۷) نقشه هم‌پوشانی شده رسم شد.

$$SM = \sum_{i=1}^{12} w_i \times S_i \quad \text{رابطه (۷)}$$

در این رابطه، w_i وزن لایه i ، S_i ارزش هر لایه از ۱ تا ۱۰ و SM نقشه هم‌پوشانی شده می‌باشد.

۳. نتایج و بحث

شکل (۳) لایه‌های اطلاعاتی ترسیم‌شده را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه (۳-a) تراکم زهکشی در بخش‌های شمال‌شرقی و جنوب‌شرقی به نسبت بیش‌تر از مناطق دیگر است. براساس نقشه (۳-b) در مناطق مرکزی تعداد چاه بیش‌تر است، در نتیجه بیش‌ترین حریم در مرکز آبخوان قرار دارد. شیب منطقه (نقشه ۳-c) به‌طور کلی در بخش شرقی آبخوان بیش‌تر است، اما بسیاری از مناطق در وضعیت با شیب زیادی نیستند. براساس نقشه (۳-d) بخش شمال‌شرقی بافت مناسب و بخش مرکزی و غربی بافت خاک نامناسبی برای MAR دارد. هرچه خاک درشت‌دانه‌تر باشد نفوذ به آن بیش‌تر اتفاق می‌افتد. بنابراین، برای تغذیه به‌ترتیب بافت شن، شن-لوم، لوم، شن-رس، لوم، سیلت-رس-لوم، سیلت-رس و رس مناسب است. طبق نقشه به‌دست‌آمده (۳-e) عمده کاربری اراضی منطقه، اراضی کشاورزی، بایر و دیم است. جاده، چمنزار، باغ و زمین مسکونی از دیگر کاربری‌های اراضی منطقه است. بدیهی است که زمین‌های بایر، جاده و زمین‌های مسکونی نسبت به سایر بخش‌ها، ارزش پایین‌تری برای MAR دارند. با توجه به نقشه (۳-f) می‌توان استنباط کرد که بخش شرقی به‌ویژه شمال‌شرقی دارای تراکم خطواره بیش‌تری نسبت به سایر مناطق است. با حرکت از جنوب و جنوب‌غربی به سمت شمال و شمال‌غربی، عمق سطح آبخوان (نقشه ۳-g) افزایش می‌یابد. زمین‌شناسی منطقه (نقشه ۳-h) به سه بخش تقسیم می‌شود؛ ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای جوان کم ارتفاع (Qft2)، ذخایر تراسی و مخروط‌افکنه‌های کوهپایه‌ای قدیمی بلند (Qft1) و کفه رسی (Qcf). Qft2 به دلیل کم ارتفاع بودن و ویژگی‌های رسوبی جوان، دارای نفوذپذیری بالایی است. پس از آن Qft1 قرار دارد که بلندتر و قدیمی‌تر از Qft2 می‌باشد و به دلیل ارتفاع بالاتر و رسوب‌های قدیمی‌تر نفوذپذیری پایین‌تری نسبت به آن دارد. نامناسب‌ترین بخش، Qcf است که به دلیل وجود رس بالا، نفوذپذیری پایینی دارد و برای تغذیه مناسب نیست. رسوبات منطقه از جمله ماسه، لای و رس نقش تعیین‌کننده‌ای در نرخ تغذیه آبخوان دارند. رسوبات رسی باعث کاهش نفوذپذیری شده و به‌عنوان یک مانع برای تغذیه عمل می‌کنند، درحالی‌که رسوبات شنی و ماسه‌ای به دلیل نفوذپذیری بالا، پتانسیل تغذیه بیش‌تری دارند. براساس نقشه ژئومورفولوژی (۳-i) آبخوان به پنج بخش تقسیم شده است؛ دشت سیلابی (PL)، مخروط‌افکنه (Qf)، سازندهای زمین‌شناسی غیرکارستی (F)، واریزه‌های کوهستان (Qs) و بخش قرمز رنگ موجود در نقشه که شامل سه بخش پلکان‌های آبرفتی و گیسوار و قسمت باریک بالایی با ساختار ژئومورفولوژیکی پیچانرود (T&G-M) می‌باشد. Qf به دلیل نفوذپذیری بالا و دانه‌بندی درشت‌بهترین بخش، پس از آن T&G-M است که نفوذپذیری نسبی و ظرفیت مناسبی برای نگهداری آب و نفوذ به پایین را دارد. PL اگرچه برای پخش آب نسبتاً مناسب است اما به دلیل وجود ذرات ریزدانه نفوذپذیری محدودی دارد. Qs اگرچه نفوذپذیری خوبی دارد اما به دلیل شیب بالا قادر به نگهداری آب نیست. F نفوذپذیری بسیار پایینی دارد و آب به سختی به درون خاک نفوذ می‌کند. طبق نقشه ارتفاع رواناب (۳-j) نیز، بخش مرکز و شرق، بالاترین ارتفاع رواناب و بخش شمال و شمال‌شرقی و همچنین جنوب‌غربی دارای پایین‌ترین مقادیر ارتفاع رواناب می‌باشند. شایان ذکر است که به دلیل استفاده از نقشه کاربری اراضی در تهیه این نقشه، تشابه بسیار زیادی میان نقشه‌های ارتفاع رواناب و کاربری اراضی وجود دارد. طبق نقشه هدایت الکتریکی (۳-k) به جز بخش جنوب‌غربی بقیه آبخوان هدایت الکتریکی به نسبت پایینی دارند و هرچه به مرکز نزدیک‌تر می‌شود، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. با

توجه به نقشه (۳-۱) دامنه قابلیت انتقال از ۱۰۰ تا ۴۲۲۳ مترمربع بر روز می‌باشد. بیش‌ترین مقدار قابلیت انتقال در شمال و شمال شرقی واقع شده است که ارزش بالاتری به‌منظور تغذیه دارند. برای ۱۲ نقشه ارائه‌شده در شکل (۳) بسته به بازه تغییرات آن‌ها، ارزش‌گذاری لایه‌ها از یک تا ۱۰ انجام شد. بدیهی است که مقدار ۱۰ به منزله بیش‌ترین ارزش و مقدار یک کم‌ترین ارزش است.

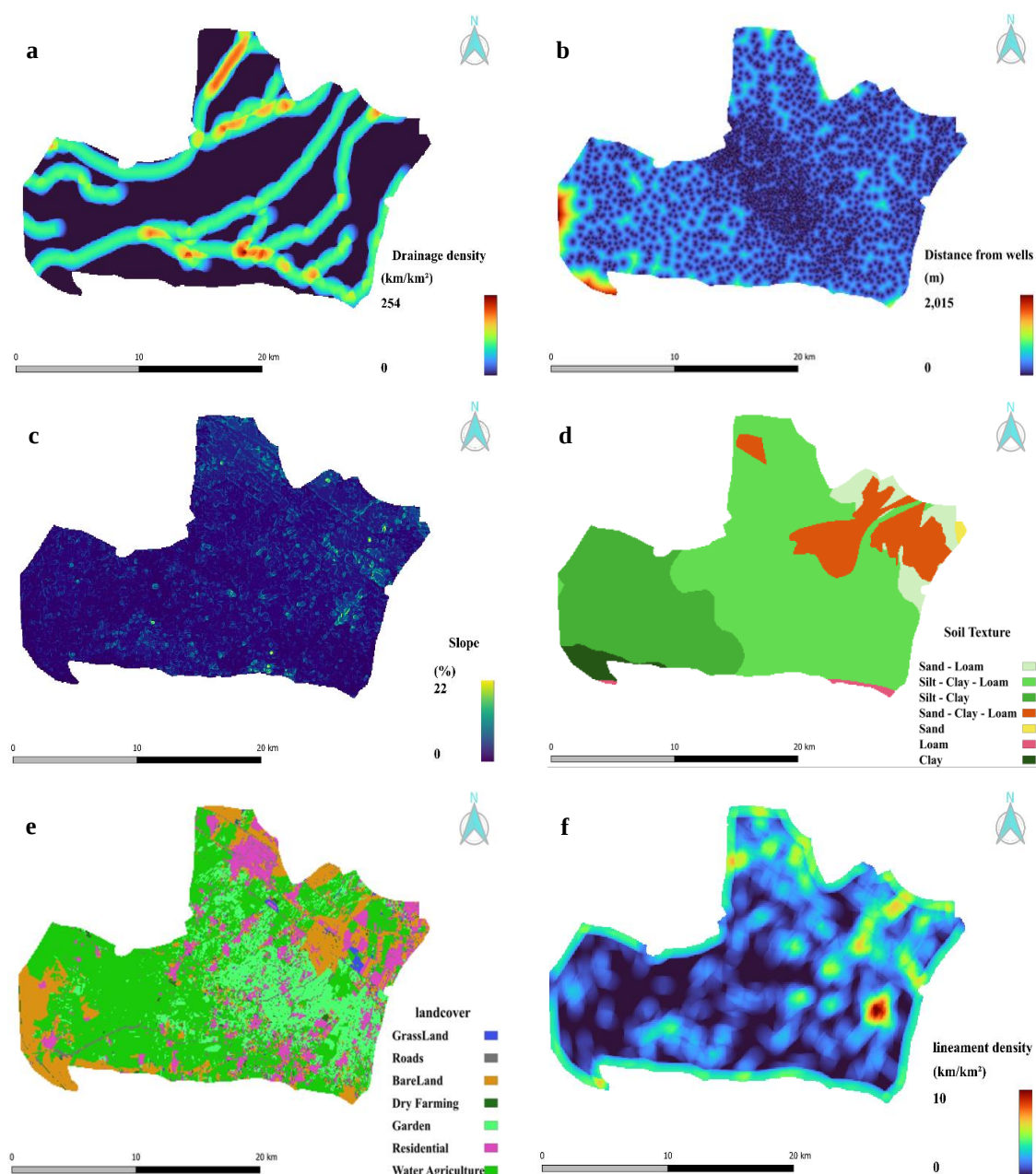
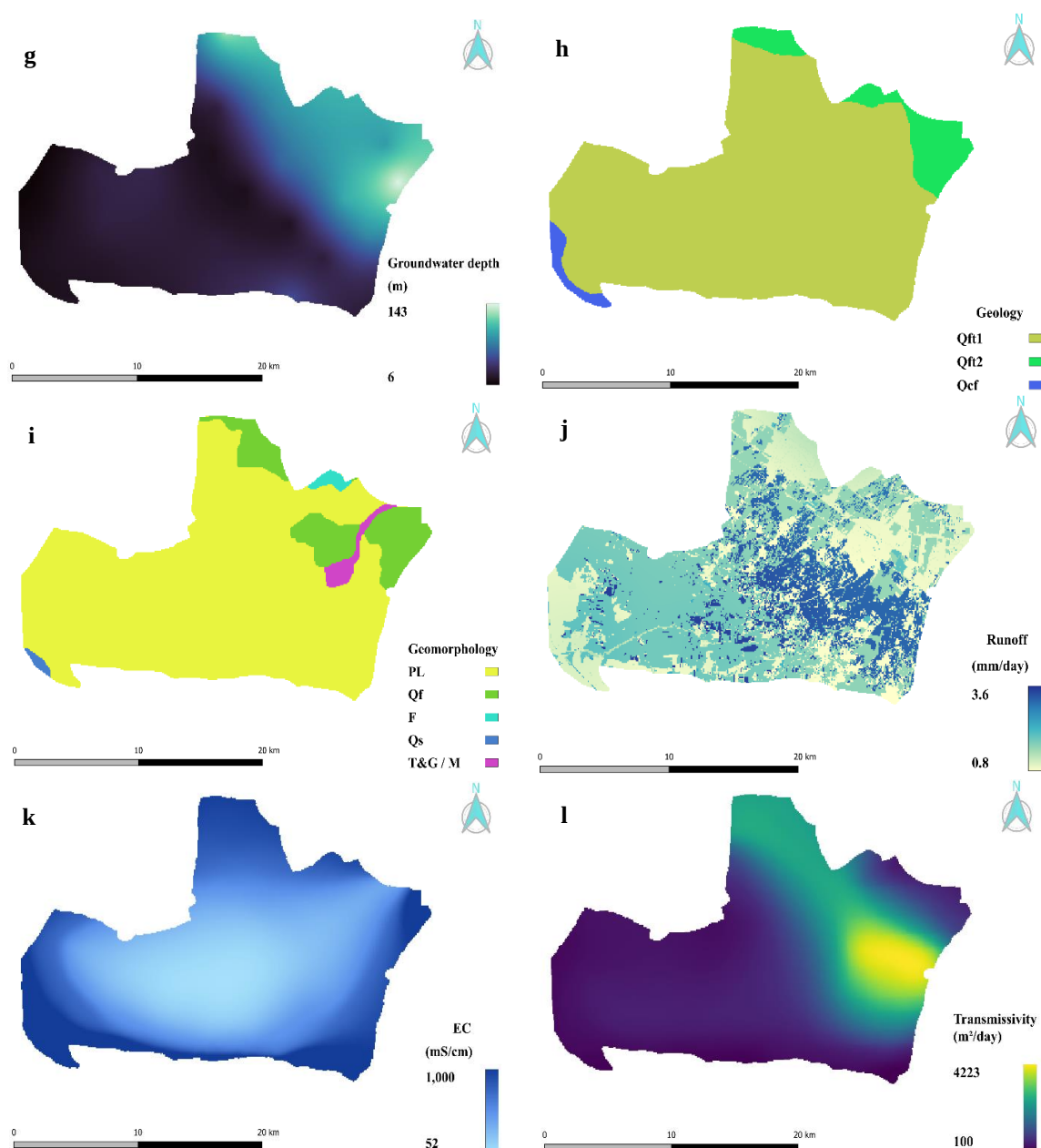


Figure 3. Layers: (a) Drainage density Map (b) Distance from wells map (c) Slope map (d) Soil texture map (e) Land use/Land cover Map (f) Lineament density map (g) Groundwater depth map (h) Geology map (i) Geomorphology map (j) Runoff height map (k) Electrical conductivity map (l) Transmissivity map



Continued figure 3. Layers: (a) Drainage density Map (b) Distance from wells map (c) Slope map (d) Soil texture map (e) Land use/Land cover Map (f) Lineament density map (g) Groundwater depth map (h) Geology map (i) Geomorphology map (j) Runoff height map (k) Electrical conductivity map (l) Transmissivity map

۱.۳. تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت نشان دهنده تأثیر تغییرات وزنی هر لایه اطلاعاتی بر نتایج نهایی نقشه هم‌پوشانی است. با توجه به توضیحات داده شده تأثیر تنظیم هر لایه بر نقشه نهایی بررسی شد. جدول (۲) تحلیل حساسیت و وزن‌دهی لایه‌ها را نشان می‌دهد. در این جدول برای درک بهتر مراحل محاسبه وزن لایه‌ها، حد بالا، پایین و میانگین هر لایه نیز آورده شده است.

Table 2. Sensitivity analysis and layer weighting

Layer	Changes	Minimum value	Maximum value	Average	Weight
Equal weight map		3.7	7.8	5.7	
Drainage density	A*	3.7	7.9	5.8	8.7
	B**	3.5	7.7	5.6	
Distance from wells	A	3.5	7.5	5.5	19.1
	B	3.8	8.1	6	
Slope	A	4	7.9	5.9	17
	B	3.4	7.7	5.6	
Soil texture	A	3.5	7.7	5.6	10
	B	3.7	8	5.8	
Land cover	A	3.6	7.8	5.7	4.2
	B	3.7	7.9	5.8	
Lineament density	A	3.5	7.7	5.6	13.1
	B	3.8	8	5.9	
Groundwater depth	A	3.5	7.9	5.7	3.1
	B	3.8	7.8	5.8	
Geology	A	3.6	7.8	5.7	1.1
	B	3.7	7.8	5.8	
Geomorphology	A	3.8	7.9	5.8	9
	B	3.6	7.7	5.6	
Runoff height	A	3.6	7.9	5.8	5.6
	B	3.6	7.7	5.6	
EC	A	3.7	7.9	5.8	8
	B	3.5	7.8	5.6	
Transmissivity	A	3.5	7.9	5.7	1.1
	B	3.8	7.7	5.8	

* + 50% to the map and adjust the rest of the layers to reach the previous total weight.

** - 50% of the map and adjust the rest of the layers to achieve the previous total weight.

طبق این جدول سه لایه با بیش‌ترین حساسیت نسبت به تغییرات، لایه‌های فاصله از چاه، شیب و تراکم خطواره و سه لایه با کم‌ترین حساسیت، لایه‌های کاربری اراضی، قابلیت انتقال و عمق سطح آبخوان می‌باشند. دلیل حساسیت پایین این لایه‌ها می‌تواند مواردی از قبیل هم‌بستگی با لایه با وزن یکسان یا شامل شدن لایه در یک لایه دیگر (مانند نقشه کاربری اراضی در ارتفاع رواناب) باشد.

با توجه به شکل (۴-ا) می‌توان استنباط کرد که بهترین مکان برای MAR به‌روش پخش سیلاب بخش شمال و شمال‌شرقی است. بخش مرکزی آبخوان به‌دلیل بافت خاک نامناسب برای نفوذ، عمق سطح آبخوان پایین، ارتفاع رواناب بالا (که نشأت‌گرفته از نوع خاک نیز می‌باشد) و هم‌چنین تراکم زهکشی بالا مناطق مناسبی جهت پخش سیلاب به‌حساب نمی‌آیند و امتیاز پایینی گرفتند. بخش کوچکی از جنوب و جنوب‌غربی نیز با وجود وضعیت نامناسب از نظر ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی به‌دلیل بافت خاک نسبتاً مناسب، ارتفاع رواناب پایین و به‌ویژه تراکم زهکشی پایین و فاصله زیاد از چاه در منطقه نسبتاً مناسب قرار گرفتند. هم‌چنین مناطق بسیار مناسب و مناسب واقع در بخش شمالی در محدوده Qft2 واقع شدند که این مناطق به‌دلیل ارتفاع کم و ویژگی‌های رسوبی جوان، بهترین مناطق زمین‌شناسی می‌باشند و نفوذپذیری بالایی دارند. مناطقی که به‌عنوان بهترین نقاط انتخاب شدند، از نظر کاربری اراضی، مناسب نبودند. هم‌چنین از نظر فاصله از چاه و شیب با وجود این‌که نامناسب‌ترین مناطق نبودند اما نقاط بهینه نیز نبودند. اگر چه در لایه‌های مزبور، مناطق شمالی آبخوان نقاط بهینه نبودند ولی با توجه به وضع مناسب در باقی لایه‌ها و اهمیت آن‌ها، این مناطق توانستند بالاترین امتیاز را کسب کنند. شکل (۴-ب) نیز (که نقشه نقاط مناسب در شرایط وزن یکسان را نشان می‌دهد) در مجموع به نقشه به‌دست‌آمده با تحلیل حساسیت شباهت دارد اما تفاوت‌هایی نیز دارد. درباره تفاوت‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد؛ مناطق واقع در کلاس بسیار مناسب در نقشه a (نقشه با وزن به‌دست‌آمده با تحلیل حساسیت) نسبت به b (نقشه با وزن یکسان) کم‌تر است. بخش جنوب و جنوب‌غربی آبخوان در نقشه b در کلاس

نامناسب و یا متوسط واقع شده اما در نقشه a در کلاس مناسب واقع شده است. دلیل این امر می‌تواند وزن بالای لایه‌های فاصله از چاه، شیب و تراکم زهکشی باشد. در نقشه a مناطق واقع در کلاس نامناسب کم‌تر و کلاس متوسط بیش‌تر از نقشه b است. کلاس بسیار نامناسب در هر دو نقشه بسیار شبیه به یک دیگر می‌باشند.

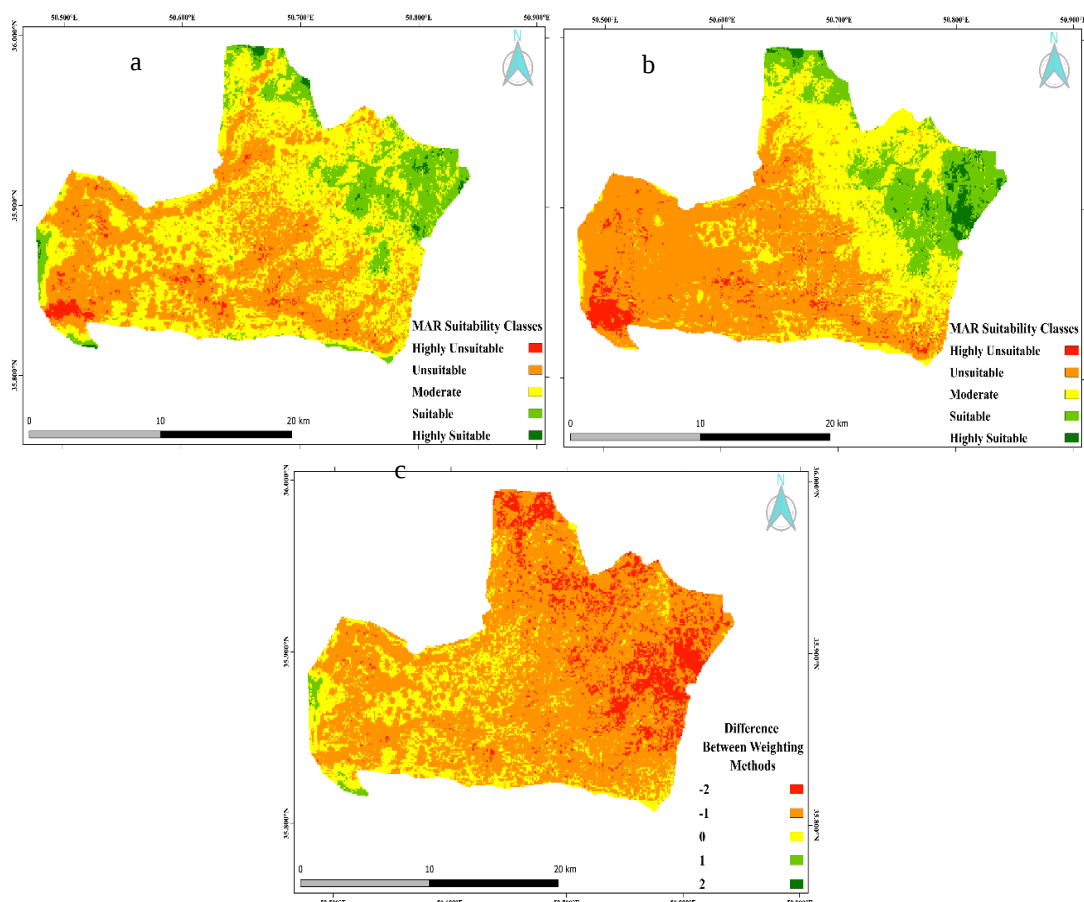


Figure 4. Managed Aquifer Recharge suitable areas (a) Sensitivity analysis weighting method (b) Equal weighting method (c) Difference between two weighting methods

شکل (۴-۳) نیز نشان‌دهنده تفاوت میان نقشه a و b است. در این نقشه مقدار صفر به معنای شباهت دو نقشه است. به این معنا که هر دو روش در این مناطق شبیه به یک‌دیگر عمل کردند. اعداد مثبت نشان‌دهنده مکان‌هایی است که در آن نقشه a مقادیر بیش‌تری نسبت به b داشته، درحالی‌که اعداد منفی مشخص‌کننده مناطقی است که مقادیر b از a بیش‌تر است. به‌عنوان مثال بخش قرمز و نارنجی مناطقی را نشان می‌دهند که آبخوان با وزن‌دهی یکسان (b) مقدار بیش‌تری نسبت به وزن‌دهی با تحلیل حساسیت (a) گرفته، بنابراین اختلاف آن منفی شده است. همچنین بخشی از جنوب‌غربی آبخوان در وزن‌دهی با تحلیل حساسیت در کلاس مناسب واقع شده، درحالی‌که در شرایط وزن‌دهی یکسان در کلاس متوسط و نامناسب واقع شده است. به همین دلیل تفاوت این مناطق به رنگ سبز درآمده و مقادیر آن‌ها مثبت می‌باشند. برای بررسی بیش‌تر تفاوت این دو روش، شکل (۵) ارائه می‌شود. این شکل درصد هرکدام از دسته‌ها را برای دو وزن‌دهی نشان می‌دهد و فراوانی هر کلاس در دو نقشه را با یک‌دیگر مقایسه می‌کند.

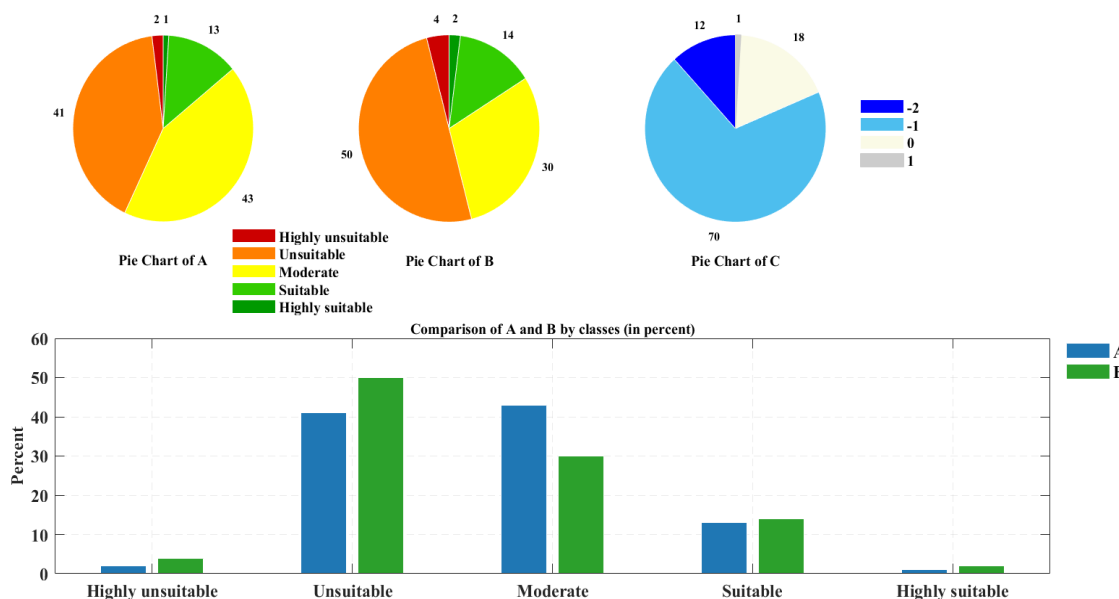


Figure 5. Weighting methods' and their difference pie charts and comparison of weighting method frequencies

با توجه به شکل (۵) می‌توان استنباط کرد که به جز در دسته نامناسب، در باقی دسته‌ها فراوانی b از a بیش‌تر است. با توجه به نمودار دایره‌ای c دسته ۲+ وجود ندارد و بیش‌ترین تفاوت در دسته ۱- است که در آن b بیش‌تر از a می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در وزن‌دهی با روش مورد استفاده، به‌ترتیب یک و ۱۳ درصد مناطق در کلاس‌های بسیار مناسب و مناسب شامل بخش شمال، شمال شرقی و بخشی از جنوب غربی، ۴۳ درصد در کلاس متوسط به‌طور عمده در بخش مرکزی و ۴۱ و ۲ درصد مناطق در کلاس نامناسب و بسیار نامناسب شامل بخش جنوبی و قسمتی از مرکز برای تغذیه مدیریت شده آبخوان قرار گرفتند.

۴. نتیجه‌گیری

روش تغذیه مدیریت شده آبخوان (MAR) می‌تواند به‌عنوان روشی مناسب جهت کمک به بهبود وضعیت آبخوان استفاده شود. MAR مجموعه روش‌هایی هستند که سعی دارند وضعیت آبخوان را از لحاظ کمی و کیفی بهبود ببخشند. ذکر این نکته مهم است که MAR با وجود موفق بودن در بسیاری از پروژه‌ها در کشورهای مختلف، نمی‌تواند به‌تنهایی تمامی مشکلات کاهش سطح آب زیرزمینی را رفع کند و تنها زمانی موفقیت‌آمیز خواهد بود که به‌همراه راه‌کارهای مدیریتی دیگر نظیر سازگاری با کم‌آبی، کاهش برداشت از چاه‌ها و راه‌کارهای مدیریتی موفقیت‌آمیز دیگر همراه شود. هم‌چنین در زمان برداشت آب لازم است دقت زیادی در مورد اثرات برداشت از منبع مورد انجام داد و تعادل مناسبی میان حقابه زیست‌محیطی و تغذیه وجود داشته باشد. اگر این مناطق به‌درستی انتخاب نشوند، می‌تواند لطمه جدی به منابع آبی منطقه وارد کند و وضعیت آبخوان را حتی از قبل هم بدتر کند. در مرحله امکان‌سنجی در وهله اول باید مناطق مناسب MAR بررسی و انتخاب شوند. روش مورد استفاده یعنی هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی، می‌تواند با در نظر گرفتن بسیاری از موارد مهم، مکان مناسب تغذیه را بدون نیاز به محاسبات پیچیده نشان دهد. هنوز روش واحدی برای انتخاب لایه‌ها و وزن‌دهی آن‌ها وجود ندارد؛ بنابراین مطالعات مختلف بسته به روش و هدف مورد استفاده لایه‌ها و اوزان مختلفی انتخاب کردند. در این مطالعه سعی شد تا از تحلیل حساسیت و ترکیبی از لایه‌های متشکل از عوامل زمین‌شناسی، عوامل

هیدرولوژیکی و هیدروژئولوژیکی، ویژگی‌های خاک و توپوگرافی، عوامل انسانی و زیرساختی و وضعیت آبخوان استفاده شود. همچنین با مقایسه روش وزن‌دهی تحلیل حساسیت با وزن یکسان و همچنین اوزان متفاوت لایه‌ها، اهمیت وزن‌دهی و تفاوت هر روش در انتخاب مناطق مشخص و بررسی شد. به‌طور کلی، دسته‌بندی‌های کلاس‌های بسیار مناسب، مناسب و نامناسب، در نقشه وزن‌دهی یکسان، درصد بالاتری نسبت به نقشه وزن‌دهی تحلیل حساسیت دارند که نشان‌دهنده تأثیر تحلیل حساسیت در کاهش مساحت این مناطق است. علاوه بر این، تفاوت‌های مکانی نیز اهمیت دارند. به‌عنوان مثال، در مناطق جنوب‌غربی، تأثیر وزن بالای لایه‌های مرتبط با تراکم زهکشی و فاصله از چاه در نقشه تحلیل حساسیت موجب ارتقای این مناطق از کلاس نامناسب یا متوسط به کلاس مناسب شده است. با توجه به نتایج، می‌توان اهمیت روش وزن‌دهی را در انتخاب مناطق مناسب درک کرد. روش هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی نیز محدودیت‌هایی دارند که از جمله آن‌ها می‌توان توجه کم‌تر به انتخاب تصمیم‌گیران و مسائل اقتصادی اشاره کرد، چرا که ممکن است برخی مناطق باوجود مناسب‌بودن جهت انتخاب برای MAR از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نباشند. همچنین ممکن است این مناطق جزو مناطق مسکونی و ممنوعه باشند که این مناطق باید در انتخاب نهایی حذف شوند. مهم است که در پژوهش‌های آتی مسائل اقتصادی، محیط‌زیستی و نظرات کارشناسان و تصمیم‌گیران موردتوجه قرار گیرد. درک رفتار رسوبات و نقش آن‌ها در نفوذپذیری و تغذیه آبخوان از عوامل کلیدی در موفقیت پروژه‌های MAR است. توصیه می‌شود در مطالعات آتی، تأثیر مستقیم رسوبات رسی و شنی بر توزیع و نرخ تغذیه نیز به‌صورت دقیق‌تری بررسی شود.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Managed Aquifer Recharge
2. Aquifer Storage and Recovery
3. Aquifer Storage Transfer and Recovery
4. Multi-Influencing Factor
5. Analytical Hierarchy Process
6. Spatial Multi Criteria Decision Making
7. Multi Criteria Decision Analysis
8. Euclidean Distance
9. Hillshade

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Abdullah, T. O., Ali, S. S., Al-Ansari, N. A., & Knutsson, S. (2015). Groundwater vulnerability mapping using lineament density on standard DRASTIC model: Case study in Halabja Saidadiq basin, Kurdistan region, Iraq. *Engineering*, 07(10), 644-667.
- Ahani Amineh, Z. B., Hashemian, S. J. A. D., & Magholi, A. (2017). Integrating spatial multi criteria decision making (SMCDM) with geographic information systems (GIS) for delineation of the most suitable areas for aquifer storage and recovery (ASR). *Journal of hydrology*, 551, 577-595.
- Al-Ghobari, H., Dewidar, A., & Alataway, A. (2020). Estimation of surface water runoff for a semi-arid area using RS and GIS-Based SCS-CN method. *Water (Switzerland)*, 12(7).
- Alkhatib, J., Engelhardt, I., & Sauter, M. (2021). Identification of suitable sites for managed aquifer recharge under semi-arid conditions employing a combination of numerical and analytical techniques. *Environmental Earth Sciences*, 80(17).

- ARWA. (2018). *Water resources evaluation report*. Retrieved from Alborz Regional Water Authority. (In Persian).
- Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., ..., & Sapiiano, M. (2019a). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27(1), 1-30.
- Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., ..., & Sapiiano, M. (2019b). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27(1), 1-30.
- Jakeman, A. J., Barreteau, O., Hunt, R. J., Rinaudo, J. D., & Ross, A. (2016). *Integrated groundwater management* (p. 762). Springer Nature.
- Kazakis, N. (2018). Delineation of suitable zones for the application of Managed aquifer recharge (MAR) in coastal aquifers using quantitative parameters and the analytical hierarchy process. *Water (Switzerland)*, 10(6).
- Khorsandi, A. (2009). *Hashtgerd plain semi_detailed geology and quality of water resources report*. Retrieved from ParsRai Ab consulting engineering company. (In Persian).
- Kourakos, G., Brunetti, G., Bigelow, D. P., Wallander, S., & Dahlke, H. E. (2023). Optimizing managed aquifer recharge locations in California's Central Valley using an Evolutionary multi-Objective genetic algorithm coupled with a hydrological simulation model. *Water Resources Research*, 59(5).
- Letz, O., Siebner, H., Avrahamov, N., Egozi, R., Eshel, G., & Dahan, O. (2021). The impact of geomorphology on groundwater recharge in a semi-arid mountainous area. *Journal of Hydrology*, 603.
- Maréchal, J. C., Bouzit, M., Rinaudo, J. D., Moiroux, F., Desprats, J. F., & Caballero, Y. (2020). Mapping economic feasibility of managed aquifer recharge. *Water (Switzerland)*, 12(3), 1-13.
- Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N., & Voudouris, K. (2015). A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *Journal of Hydrology*, 525, 197-208.
- Olivares, E. A. O., Torres, S. S., Jiménez, S. I. B., Enríquez, J. O. C., Zignol, F., Reygadas, Y., & Tiefenbacher, J. P. (2019). Climate change, land use/land cover change, and population growth as drivers of groundwater depletion in the Central Valleys, Oaxaca, Mexico. *Remote Sensing*, 11(11).
- Ringleb, J., Sallway, J., & Stefan, C. (2016). Assessment of Managed Aquifer Recharge through Modeling—A Review. *Water*, 8(12), 2073-4441.
- RIWEM. (2022). *Identification of uncertainties and errors in estimation of water balance components and providing the appropriate solutions*. Retrieved from Research Institute of Water Engineering and Management, Tarbiat Modares University. (In Persian).
- Roshun, S. H., Habibinejad Roshan, M., Shahedi, K., & Chormański, J. (2022). Preparation of curve number map and estimation of runoff height using geographic information system and remote sensing in North Karun basin. *Journal of RS and GIS for Natural Resources*, 13(3), 6-9. (In Persian).
- Sadeghi, A. R., Hosseini S, M., Yamani, M., & Jafar Beiglou, M. (2022). Site-selection of groundwater artificial recharge in Sharif-Abad aquifer with emphasis on hydrogeomorphological characteristics. *Journal of Earth Science Researches*, 13(1), 100-116. (In Persian).
- Sallway, J., Bonilla Valverde, J. P., Vázquez López, F., Junghanns, R., & Stefan, C. (2019). Suitability maps for managed aquifer recharge: A review of multi-criteria decision analysis studies. *Environmental Reviews*, 27(2), 138-150.
- Sandoval, J. A., & Tiburan, C. L. (2019). Identification of potential artificial groundwater recharge sites in Mount Makiling Forest Reserve, Philippines using GIS and analytical hierarchy process. *Applied Geography*, 105, 73-85.
- Valverde, J. P. B., Blank, C., Roidt, M., Schneider, L., & Stefan, C. (2016). Application of a GIS multi-criteria decision analysis for the identification of intrinsic suitable sites in Costa Rica for the application of Managed Aquifer Recharge (MAR) through spreading methods. *Water (Switzerland)*, 8(9).
- Varouchakis, E. A., Kalaitzaki, E., Trichakis, I., Corzo Perez, G. A., & Karatzas, G. P. (2023). An integrated method to study and plan aquifer recharge. *Hydrology Research*, 54(1), 1-13.
- Vaux, H. (2011). Groundwater under stress: The importance of management. *Environmental Earth Sciences*, 62(1), 19-23.

- Wulder, M. A., Coops, N. C., Roy, D. P., White, J. C., & Hermosilla, T. (2018). Land cover 2.0. *International Journal of Remote Sensing*, 39(12), 4254-4284.
- Zarate, E., Hobley, D., MacDonald, A. M., Swift, R. T., Chambers, J., Kashaigili, J. J., Mutayoba, E., Taylor, R. G., & Cuthbert, M. O. (2021). The role of superficial geology in controlling groundwater recharge in the weathered crystalline basement of semi-arid Tanzania. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36.
- Zende, A. (2014). Analysis of surface runoff from Yerala River basin using SCS-CN and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 4, 508-516.