

تحلیل مکانی مناطق مناسب تغذیه مدیریت شده آبخوان با استفاده از روش هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی:

مطالعه موردی آبخوان محدوده مطالعاتی هشتگرد

سید محمدمهدی عباسی^۱ | حامد کتابچی^۲ ✉

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

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

چکیده

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 راهکار 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 ۱ 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.

کلمات کلیدی: آبخوان هشتگرد، تغذیه مدیریت شده آبخوان، مناطق مناسب، هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی

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 به واسطه ویژگی‌های خاص خود، در شرایط بحرانی به عنوان مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده این نیازها به شمار 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^1) می‌باشد. تغذیه مدیریت شده آبخوان به مجموعه‌ای از روش‌ها اشاره دارد که برای حفظ و تقویت منابع آب زیرزمینی به کار 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). هر کدام 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 به سادگی می‌توان تزریق آب توسط چاه تفسیر کرد. مهم‌ترین و پراستفاده‌ترین روش‌های این بخش ASR^2 و $ASTR^3$ 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 انجام شده 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 برای آن‌ها می‌باشد. انتخاب این مناطق نیازمند انجام تحقیقات 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 به سادگی 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 بر اساس نوع MAR انتخاب و سپس وزن‌دهی با روش‌های مختلف و اغلب بر اساس قضاوت کارشناسی انجام شده است. برخی لایه‌ها به دلیل اهمیت بالا در تمامی مطالعات مورد استفاده قرار گرفتند. به عنوان مثال لایه شیب، کاربری اراضی و تراکم زهکشی به دلیل تاثیر بالایی که بر روش‌های پخش دارند، در بیشتر مطالعات مورد استفاده قرار

گرفتند. در (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 کاربری اراضی، 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 به غیر 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 تاثیر گرفتند مانند تراکم خطواره، فاصله از چاه‌های پمپاژ و کاربری اراضی. همچنین در این جدول به روش 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 et al. (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	Anthemount as Basin, Greece	AHP ⁵ and sensitivity analysis
Ahani Amineh et al. (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 et al. (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 et al. (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 et al. (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 موثر بر MAR به صورت توأمان پرداخته‌اند. به علاوه 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 بعلاوه لایه انتقال آبخوان (Kazakis, 2018; Ahani Amineh et al., 2017) به دلیل نقش آن در سرعت و نحوه حرکت آب در آبخوان و هدایت الکتریکی (Ahani Amineh et al., 2017) به دلیل اهمیت کیفیت آبخوان در پروژه‌های MAR انتخاب شدند که ۱۲ لایه مورد استفاده را تشکیل می‌دهند. در این مطالعه، از هر کدام از عوامل تأثیرگذار بر MAR بسته به نوع آن، یک یا چند لایه اطلاعاتی انتخاب شده و تأثیر هر عامل در انتخاب مناطق مناسب مورد توجه قرار گرفت. به علاوه، در وزن‌دهی از تحلیل حساسیت به جای تأثیر قضاوت کارشناسی استفاده شده است. همچنین در پایان برای اهمیت وزن‌دهی در تعیین مناطق مناسب مورد بحث و مقایسه قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. 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° و ۲۹' تا ۵۱° و عرض جغرافیایی ۳۵° و ۴۷' تا ۳۶° و ۷' 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، فشند، 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. بر اساس گزارش بیلان منطقه هشتگرد که از سال ۱۳۷۹-۸۰ تا ۱۳۹۷-۹۸ انجام شده، در این بازه زمانی سطح آب ۱۸ میلیون متر مکعب افت کرده است که مقدار افت سالانه

تراز آبخوان را حدوداً ۹۰ سانتی متر می‌کند. همچنین میزان برداشت آب بر اساس آمار برداری در دوره سوم (۹۸-۱۳۹۷) ۳۳۴ میلیون متر مکعب بوده که ۸۴ درصد یعنی ۲۸۰ میلیون متر مکعب 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).

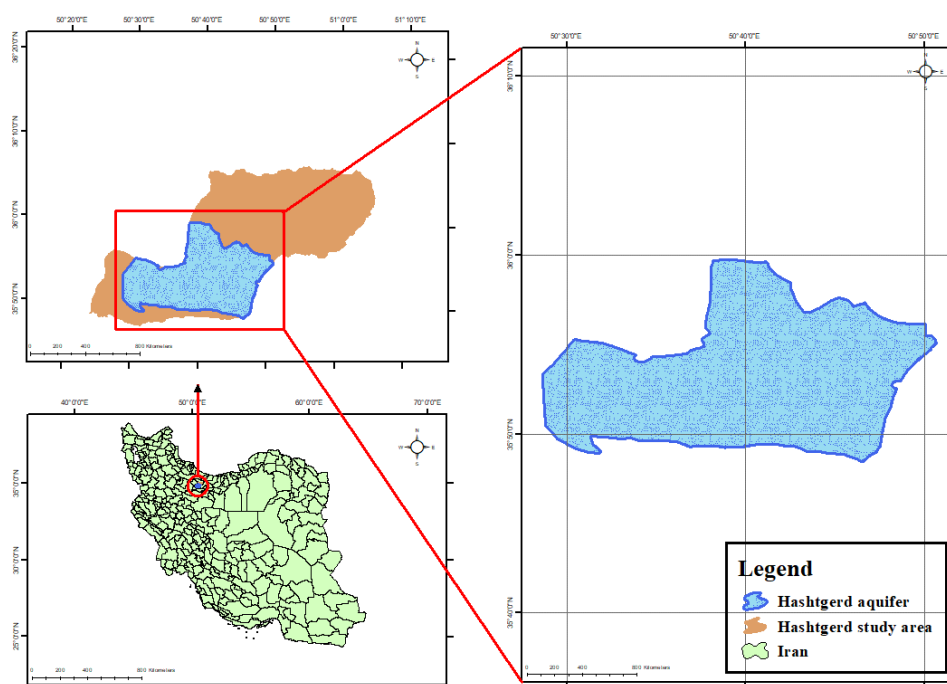


Figure 1. Hashtgerd study area

۲.۲. روش کار

در این تحقیق 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 بر اساس تأثیر بر MAR از ۱ تا ۱۰ ارزش‌گذاری شدند. در مرحله بعد هر لایه بر اساس تحلیل حساسیت وزن‌دهی شد. پس از آن لایه‌ها با هم ترکیب شده و مناطق مناسب برای MAR رسم گردید. در نهایت نقشه به دست آمده به پنج کلاس بسیار مناسب، مناسب، متوسط، نامناسب و بسیار نامناسب تبدیل شد. برای مقایسه و تأکید بر اهمیت وزن‌دهی، یک نقشه هم‌پوشانی شده با وزن یکسان نیز رسم شد که با وزن‌دهی با تحلیل حساسیت مقایسه شد. شکل ۲ مراحل انجام کار و منابع مورد استفاده را نشان می‌دهد.

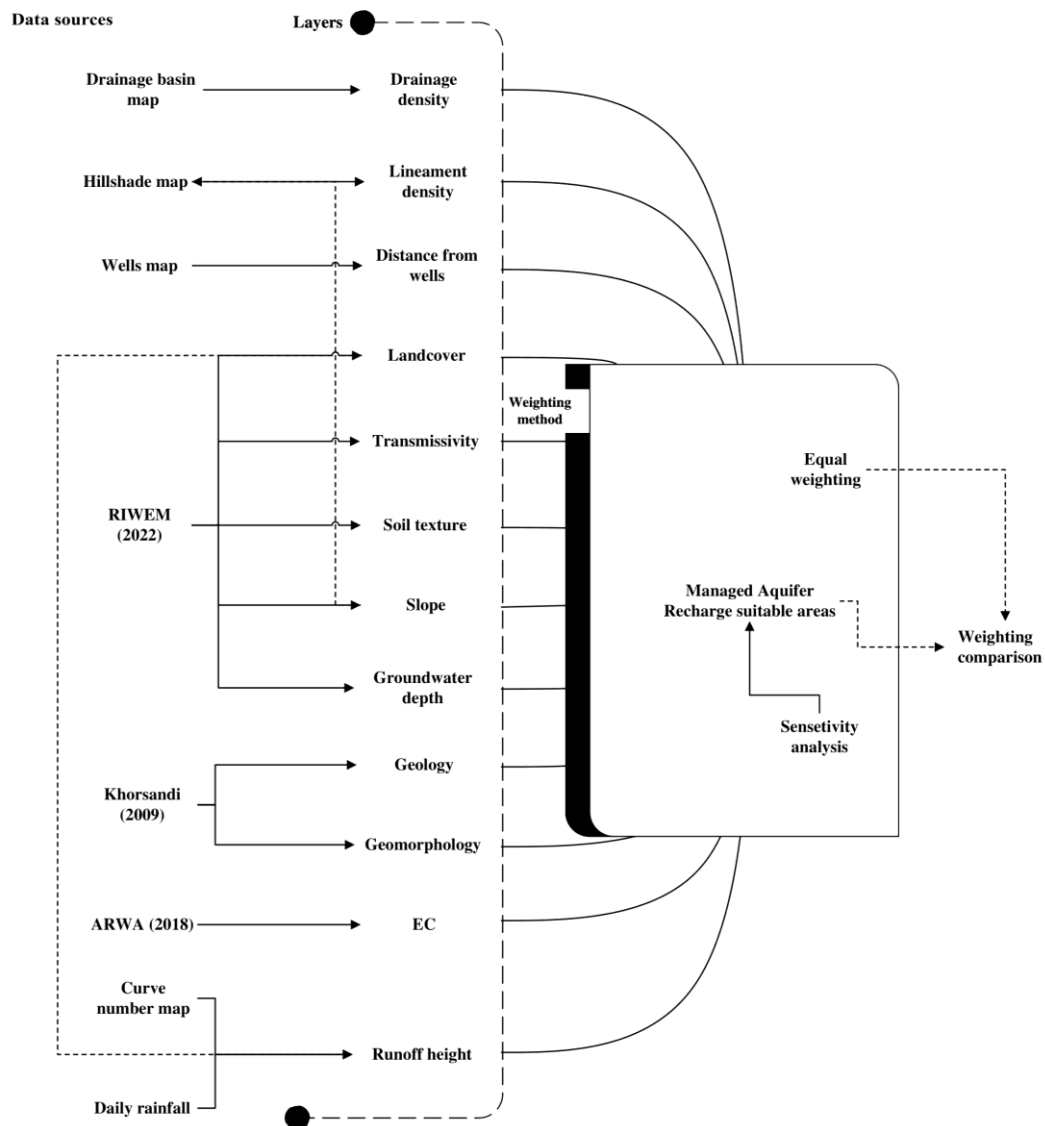


Figure 2. Methodology

لایه‌های اطلاعاتی

تراکم زهکشی

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

تراکم زهکشی بر حسب کیلومتر بر کیلومتر مربع، L_i طول هر آبراهه بر حسب کیلومتر و A مساحت کل حوضه آبریز بر حسب کیلومتر مربع می باشد.

$$D = \frac{\sum L_i}{A} \quad (1)$$

فاصله از چاه

هر چقدر یک منطقه به حریم چاه نزدیک تر باشد، از نظر ارزش MAR پایین تر 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 آلاینده ها و افزایش کیفیت آب می شود. برای تهیه این بخش، از مختصات جغرافیایی چاه ها که توسط (RIWEM (2022 ارائه شده است، استفاده شد. سپس با بهره گیری از ابزار Euclidean Distance در محیط GIS، محدوده تأثیر هر چاه مشخص شده و نقشه فاصله از چاه ها تولید شد.

شیب

شیب به عنوان یکی از مهم ترین ویژگی های توپوگرافی موثر 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 می تواند اثرات نامطلوب بر حوضچه نفوذ داشته باشد (Valverde et al., 2021). اطلاعات این بخش از (RIWEM (2022 به دست آمده است.

بافت خاک

بافت خاک نشان دهنده میزان نفوذ آب به خاک است؛ به همین دلیل، از مهم ترین ویژگی های خاک به شمار می رود. خاک هر چه درشت دانه تر باشد، مقدار آب بیشتری از خود عبور می دهد و تغذیه آبخوان را سریع تر می کند (Sandoval and Tiburan, 2019). برای نقشه بافت خاک نیز از اطلاعات (RIWEM (2022 استفاده شده است.

کاربری اراضی

یکی از عوامل مهم در شناسایی مناطق مناسب MAR، کاربری اراضی است. کاربری اراضی معمولاً به عنوان مجموعه ای از طبقات سلسله مراتبی توصیف می شود که هر کدام مجموعه های زیستی و غیرزیستی غالب را نشان می دهند (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 and Tiburan, 2019). این نقشه از میانگین سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۹ کاربری اراضی RIWEM (2022 استخراج شده است.

تراکم خطواره

خطواره مشخص‌کننده ساختار و ساختمان سنگ زیرین است. رابطه نزدیکی بین تراکم خطواره و جریان آب زیرزمینی وجود دارد. هر چه تراکم خطواره بیشتر باشد، حرکت آب به شکستگی‌ها و نفوذ به اعماق زمین بیشتر می‌شود اما باید توجه داشت که مقادیر بالای تراکم خطواره احتمال حرکت آلودگی به سمت آب‌های زیرزمینی را افزایش می‌دهد (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 نرم‌افزار Geomatica خطواره رسم می‌شود.

عمق سطح آبخوان

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

زمین‌شناسی

زمین‌شناسی با تاکید بر جنس سنگ مهم‌ترین پارامتر در پتانسیل آب زیرزمینی است. هر محیط متخلخل/سنگی نفوذپذیری مشخصی دارد و یک مقدار آب را می‌تواند از خود عبور دهد، به همین دلیل برای تغذیه اهمیت بالایی دارد. زمین‌شناسی اطلاعات از گسل‌ها و شکستگی‌های زمین را نشان می‌دهد. همچنین زمین‌شناسی تاثیر بسزایی در کیفیت و توزیع رسوبات آبرفتی را نشان می‌دهد (Zende, 2014; Zarate et al., 2021). در پژوهشی که توسط (Sallwey et al., 2019) انجام شد، لایه زمین‌شناسی را یکی از بیشترین لایه‌هایی 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 زمین‌شناسی از (Khorsandi (2009) استفاده شد.

ژئومورفولوژی

منظور از ژئومورفولوژی، واحدهایی می‌باشند که رخنمون‌های سطحی مانند دشت، تراس، آتشفشان، تپه، دره، کوه و غیره هستند. تفاوت لایه‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی در این است که انسان در ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی تأثیر بیشتری داشته است (Sandoval & Tiburan, 2019). رابطه مستقیمی میان ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و تغذیه آبخوان وجود دارد (Letz et al., 2021). در این بخش نیز از نقشه ژئومورفولوژی (Khorsandi (2009) استفاده شد.

ارتفاع رواناب

ارتفاع رواناب که رابطه معکوس با نفوذپذیری دارد؛ یکی از پارامترهایی است که می‌تواند در انتخاب مناطق مناسب کمک بکند. در این بخش از روش SCS-CN استفاده می‌شود. مزیت این روش این است که می‌توان بدون نیاز به داده‌های زیاد و پیچیده بتوان به جواب‌های مناسب رسید (Al-Ghobari et al., 2020). ورودی‌های 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 بدست می‌آید (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.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

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 بر اساس رابطه ۳ حاصل شد. در این رابطه P میانگین روزهای دارای بارندگی در نظر گرفته شد.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (3)$$

هدایت الکتریکی

برای در نظر گرفتن تاثیر 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).

قابلیت انتقال

قابلیت انتقال آبخوان یکی از ویژگی‌های مهم است که توانایی آبخوان را در دریافت تغذیه مشخص می‌کند. بر اساس 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.

تحلیل حساسیت

پس از ارزش‌گذاری لایه‌ها، روی لایه‌ها تحلیل حساسیت انجام شد. به این صورت که وزن هر لایه $\pm 5\%$ 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 وزنی 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.

$$AveChange_i = \frac{|M(Main) - M(A_Layer_i)| + |M(Main) - M(B_Layer_i)|}{2} \quad (4)$$

$$S = \sum_{i=1}^{12} AveChange_i \quad (5)$$

$$W_i = \frac{AveChange_i}{S} \quad (6)$$

در نهایت با توجه به رابطه ۷ نقشه هم‌پوشانی شده رسم شد. در رابطه زیر W_i وزن لایه i ، S_i ارزش هر لایه از ۱ تا ۱۰ و SM نقشه هم‌پوشانی شده می‌باشد.

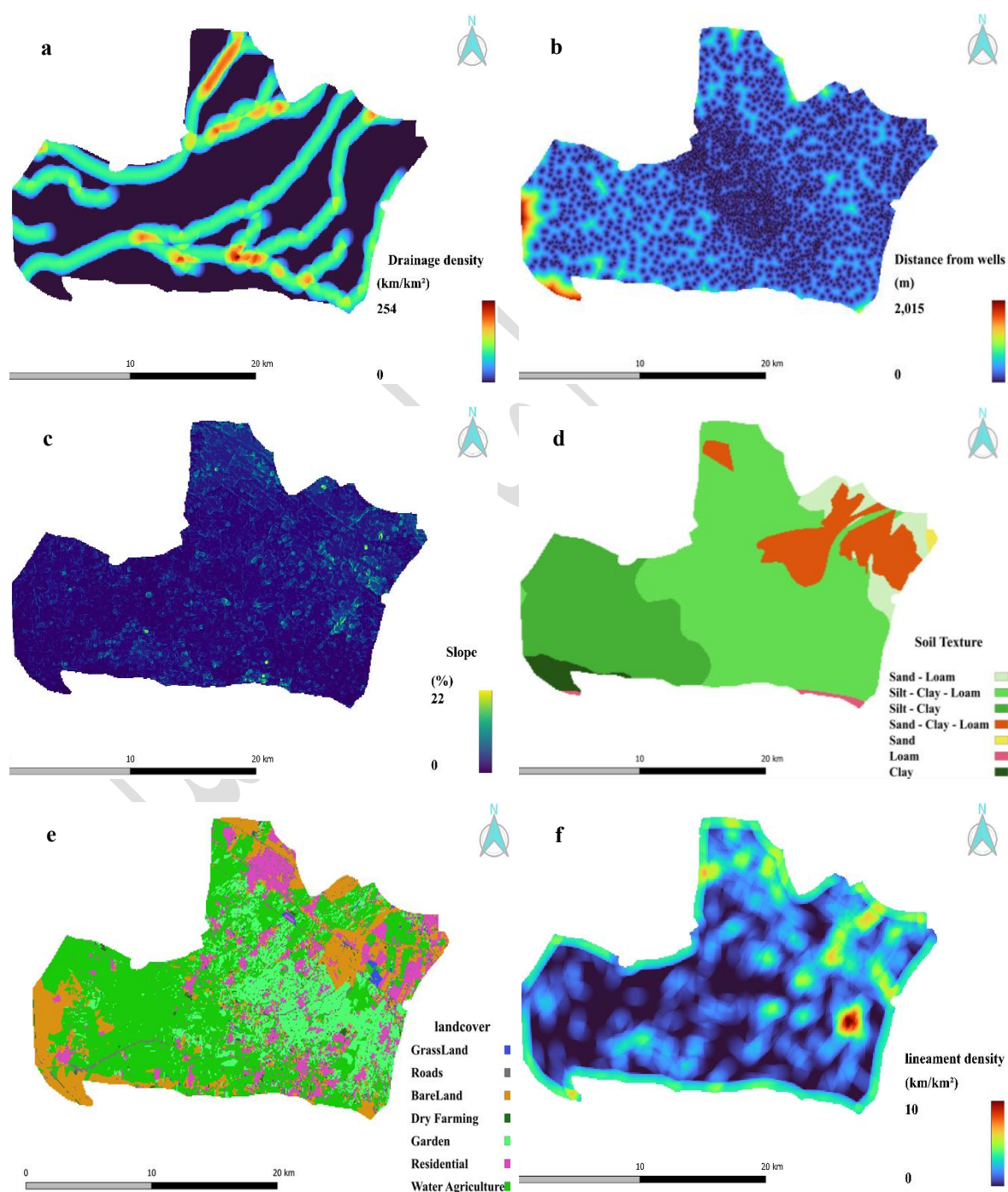
$$SM = \sum_{i=1}^{12} W_i \times S_i \quad (7)$$

۳. نتایج و بحث

شکل ۳ لایه‌های اطلاعاتی ترسیم شده را نشان می‌دهد. با توجه به نقشه 3-a تراکم زهکشی در بخش‌های شمال شرقی و جنوب شرقی به نسبت بیشتر از مناطق دیگر است. بر اساس نقشه 3-b در مناطق مرکزی، تعداد چاه بیشتر است؛ در نتیجه، بیشترین حریم در مرکز آبخوان قرار دارد. شیب منطقه (نقشه 3-c) به طور کلی در بخش شرقی آبخوان بیشتر است اما بسیاری از مناطق در وضعیت با شیب زیادی نیستند. بر اساس نقشه 3-d بخش شمال شرقی بافت مناسب و بخش مرکزی و غربی

بافت خاک نامناسبی برای MAR دارد. هرچه خاک درشت‌دانه تر باشد نفوذ به آن بیشتر اتفاق می‌افتد. بنابراین برای تغذیه به ترتیب بافت شن، شن - لوم، لوم، رس - لوم، سیلت - رس - لوم، سیلت - رس و رس مناسب است. طبق نقشه به دست آمده (3-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 3-f می‌توان استنباط کرد که بخش شرقی به خصوص شمال شرقی دارای تراکم خطواره بیشتری نسبت به سایر مناطق است. با حرکت از جنوب و جنوب غربی به سمت شمال و شمال غربی، عمق سطح آبخوان (نقشه 3-g) افزایش می‌یابد. زمین‌شناسی منطقه (نقشه 3-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 به عنوان یک مانع برای تغذیه عمل می‌کنند، در حالی که رسوبات شنی و ماسه‌ای به دلیل نفوذپذیری بالا، پتانسیل تغذیه بیشتری دارند. بر اساس نقشه ژئومورفولوژی (3-i) آبخوان به پنج بخش تقسیم شده است: دشت سیلابی (PL)، مخروط افکنه (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 درشت بهترین 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 (3-j) نیز، بخش مرکز و شرق، بالاترین ارتفاع رواناب و بخش شمال و شمال شرقی و همچنین جنوب غربی 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 (3-k) به جز بخش جنوب غربی بقیه آبخوان هدایت الکتریکی به نسبت پایینی دارند

و هرچه به مرکز نزدیکتر می‌شود، هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد. با توجه به نقشه 1-3 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 به منظور تغذیه دارند. برای ۱۲ نقشه ارائه شده در شکل ۳ بسته به بازه تغییرات آن‌ها، ارزش گذاری لایه‌ها از ۱ تا ۱۰ انجام شد. بدیهی است که مقدار ۱۰ به منزله بیشترین ارزش و مقدار ۱ کمترین ارزش است.



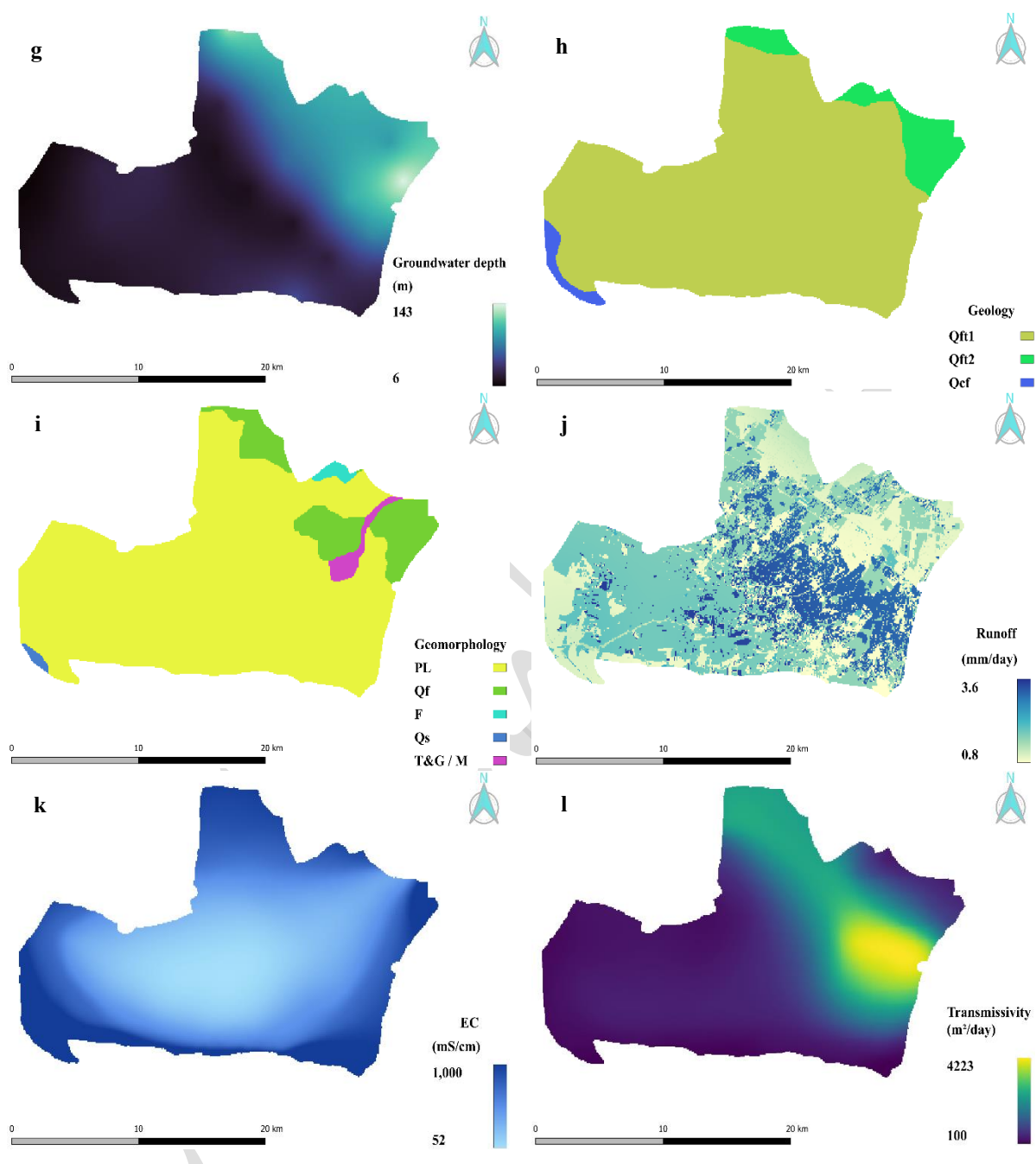


Figure 3. Layers: (a) Drainage density Map (b) Distance from wells map (c) Slope map (d) Soil texture map (e) Land use/Land cover Map (f) Lineament density map (g) Groundwater depth map (h) Geology map (i) Geomorphology map (j) Runoff height map (k) Electrical conductivity map (l) Transmissivity map

۱.۳. تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت نشان‌دهنده 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	7.8	7.8	5.7	5.7	
Drainage density	A*	7.9	7.9	5.8	8.7
	B**	7.7	7.7	5.6	
Distance from wells	A	7.5	7.5	5.5	19.1
	B	8.1	8.1	6	
Slope	A	7.9	7.9	5.9	17
	B	7.7	7.7	5.6	
Soil texture	A	7.7	7.7	5.6	10
	B	8	8	5.8	
Land cover	A	7.8	7.8	5.7	4.2
	B	7.9	7.9	5.8	
Lineament density	A	7.7	7.7	5.6	13.1
	B	8	8	5.9	
Groundwater depth	A	7.9	7.9	5.7	3.1
	B	7.8	7.8	5.8	
Geology	A	7.8	7.8	5.7	1.1
	B	7.8	7.8	5.8	
Geomorphology	A	7.9	7.9	5.8	9
	B	7.7	7.7	5.6	
Runoff height	A	7.9	7.9	5.8	5.6
	B	7.7	7.7	5.6	
EC	A	7.9	7.9	5.8	8
	B	7.8	7.8	5.6	
Transmissivity	A	7.9	7.9	5.7	1.1
	B	7.7	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 هم‌پستگی با لایه با وزن یکسان یا شامل شدن لایه در یک لایه دیگر (مانند نقشه کاربری اراضی در ارتفاع رواناب) باشد.

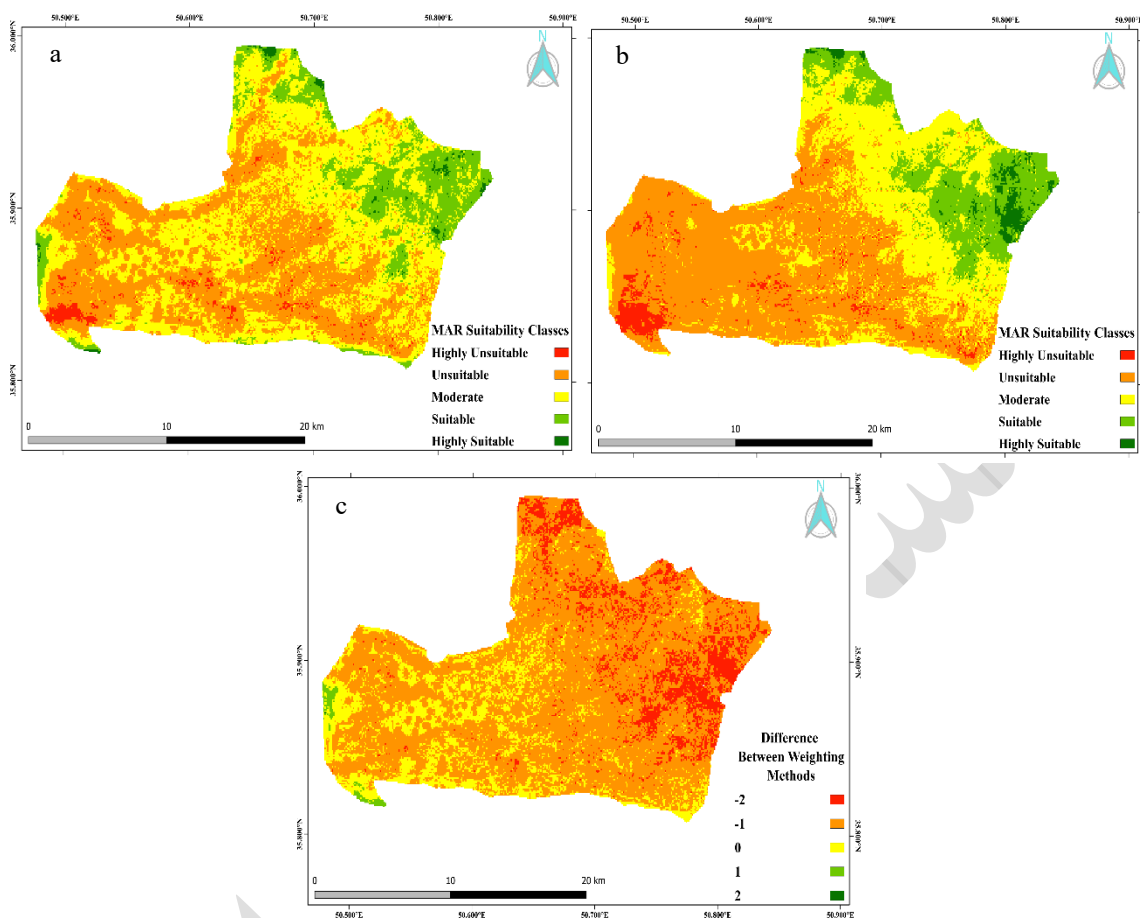


Figure 4. Managed Aquifer Recharge suitable areas (a) Sensitivity analysis weighting method (b) Equal weighting method (c) Difference between two weighting methods

با توجه به شکل ۴ بخش a می‌توان استنباط کرد که بهترین مکان برای MAR به روش پخش سیلاب بخش شمال و شمال شرقی است. بخش مرکزی آبخوان به دلیل بافت خاک نامناسب برای نفوذ، عمق سطح آبخوان پایین، ارتفاع رواناب بالا (که نشأت گرفته از نوع خاک نیز می‌باشد) و همچنین تراکم زهکشی بالا مناطق مناسبی جهت پخش سیلاب به حساب نمی‌آیند و امتیاز پایینی گرفتند. بخش کوچکی از جنوب و جنوب غربی نیز با وجود وضعیت نامناسب از ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی به دلیل بافت خاک نسبتاً مناسب، ارتفاع رواناب پایین و به ویژه 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 به دلیل ارتفاع کم و ویژگی‌های رسوبی جوان، بهترین مناطق زمین‌شناسی می‌باشند و نفوذپذیری بالایی دارند. مناطقی که به عنوان 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 بخش b نیز (که نقشه نقاط مناسب در شرایط وزن یکسان را نشان می‌دهد) در مجموع به نقشه به دست آمده 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 به دست آمده با تحلیل حساسیت) نسبت به b (نقشه با وزن یکسان) کمتر است. بخش جنوب و جنوب غربی 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.

شکل ۴ نقشه c نیز نشان دهنده 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؛ در حالی که اعداد منفی مشخص‌کننده مناطقی است که مقادیر b از a بیشتر است. به عنوان 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 جنوب غربی آبخوان در وزن‌دهی با تحلیل حساسیت، در کلاس مناسب واقع شده؛ در حالی که 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 هر کدام از دسته‌ها را برای دو وزن‌دهی نشان می‌دهد و فراوانی هر کلاس در دو نقشه را با یکدیگر مقایسه می‌کند.

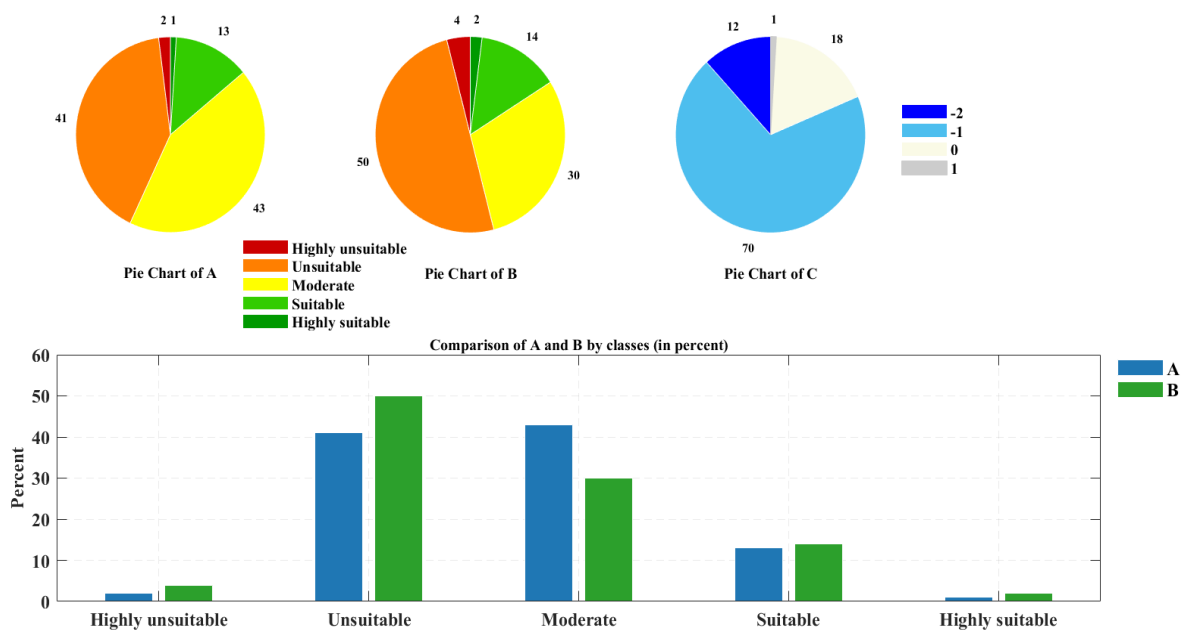


Figure 5. Weighting methods' and their difference pie charts and comparison of weighting method frequencies

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 به دست آمده در وزن‌دهی با روش مورد استفاده، به ترتیب ۱ 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 عمدتاً 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 به عنوان 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 علیرغم موفق بودن در بسیاری از پروژه‌ها در کشورهای مختلف، نمی‌تواند به تنهایی تمامی مشکلات کاهش سطح آب زیرزمینی را رفع کند و تنها زمانی موفقیت‌آمیز خواهد بود که به همراه 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 به درستی 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. به طور 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. به عنوان مثال، در مناطق جنوب غربی، 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 علیرغم مناسب بودن جهت انتخاب برای MAR از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نباشند. همچنین ممکن است این مناطق جزء مناطق مسکونی و ممنوعه باشند که این مناطق باید در انتخاب نهایی حذف شوند. مهم است که در تحقیقات آتی مسائل اقتصادی، محیط‌زیستی و نظرات کارشناسان و تصمیم‌گیران مورد توجه 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 به صورت 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

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. سپاس گذاری

...

۸. 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 Saidasadiq 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.
- Jakemann, A., Randall, O., Hunt, J., & Andrewross, J.-D. (2016). *Integrated Groundwater Management Concepts, Approaches and Challenges*.
- 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), 2073–2441.
- 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., Vásquez 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, Abhijit. (2014). Analysis of surface runoff from Yerala River basin using SCS-CN and GIS. *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 4, 508–516.

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

Abstract

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.

Keywords: Hashtgerd Aquifer, Managed Aquifer Recharge (MAR), Overlaying of Information Layers, Suitable Areas.