

# Investigation the possibility of using Govejeh Bel fractured rocks aquifer to supply drinking water to Ahar city

Abdorrezza Vaezi<sup>1\*</sup> and Fatemeh Safari<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Professor, Department of Earth Sciences, Faculty Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> MSc Graduate of Environmental Geology, Department of Earth Sciences, Faculty Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Resived: 08 April 2024

Acsepted: 22 September 2024

## Extended abstract

### Introduction

The Govejeh Bel basin, with extensive outcrops of igneous, metamorphic, and sedimentary formations and adequate rainfall (342.2 mm annual precipitation), has significant potential for storing and transferring groundwater through fractured media. These hard formation units, located in elevated areas, can supply drinking water to Ahar city without the need for pumping stations. Most springs in the basin originate from hard formations, with their concentration in the center and north indicating the development of aquifers in these units. Overextraction of groundwater through wells and the limitation of alluvial resources have shifted water resource management toward utilizing hard formation water sources. This study investigates the quantity and quality of groundwater resources in the Govejeh Bel basin to identify methods for sustainable water management and assess their suitability as an emergency drinking water source for Ahar city.

### Materials and methods

The study area is located 10 km southwest of Ahar city within the Aharchai River basin, which ultimately joins the Aras River. Remote sensing and GIS techniques, including the Analytic Hierarchy Process (AHP), Weighted Overlay, and Ordered Weighted Averaging (OWA) methods, were used for data analysis. Landsat 8 satellite images were processed to generate raster maps for the Normalized Difference Humidity Index (NDHI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). In the AHP method, criteria were ranked and compared pairwise, with weights assigned based on their importance. These weighted layers were overlaid to create a groundwater potential map. Fieldwork involved sampling five groundwater sources and Govejeh Bel River water, followed by hydrochemical analysis of eight major ions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ), TDS, pH, SAR, %Na, and TH. Electrical conductivity (EC), dissolved solutes, and chloride ion concentrations were assessed to evaluate groundwater quality for drinking and agricultural purposes. Meteorological data from Ahar's synoptic station over the past 20 years were also analyzed. The spatial distribution of springs was used to validate groundwater potential maps.

### Results and discussion

Using AHP, Weighted Overlay, and OWA methods, groundwater potential maps were generated based on lithology, line density, elevation, humidity index, slope, drainage density, aspect, and vegetation index. The OWA method showed the highest agreement with spring locations, with approximately 50% of springs situated in areas of medium to high groundwater potential. Qualitative analysis revealed an increase in salinity and EC from upstream to downstream, with EC values ranging from 310 to 1,444  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Chloride ion concentrations followed a similar pattern, suggesting a dominant role of sodium and chloride in groundwater salinity. Schuler's diagram indicated that most groundwater in the basin is suitable for drinking due to the absence of pollutant formations such as salt, clay, or marl. These findings align with studies on hard and karst formations in western Urmia, which also report good-quality groundwater.

### Conclusions

The southwestern part of the basin exhibits high groundwater potential. Validation of groundwater potential maps using spring locations confirmed the reliability of the OWA method. The groundwater quality assessment demonstrated increasing salinity toward the basin outlet, but most groundwater remains suitable for drinking. Watershed operations, such as biological measures or flood and sediment control structures, can enhance infiltration and aquifer recharge in the hard formations. To quantify aquifer potential and

\* Corresponding Author: r.vaezi@tabrizu.ac.ir

estimate extractable water volumes, geophysical surveys and exploratory drilling in high-potential areas are recommended.

**Keywords:** Alluvial resources, Groundwater, Infiltration, OWA, Potential assessment

Cite this article: Vaezi, A., Safari, F., 2025. Investigation the possibility of using Goojeh Bel fractured rocks aquifer to supply drinking water to Ahar city. Watershed Engineering and Management 16(4), 500-522.

© 2025, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



## بررسی امکان استفاده از آبخوان سازند سخت گویجه بل برای تأمین آب شرب شهر اهر

عبدالرضا واعظی<sup>۱\*</sup> و فاطمه صفری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، زمین‌شناسی زیست محیطی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

### چکیده مبسوط

#### مقدمه

حوضه گویجه بل به دلیل برون‌زدگی وسیع سازندهای آذرین، دگرگونی و رسوبی و میزان بارش مناسبی که دریافت می‌کند، می‌تواند پتانسیل ذخیره و انتقال منابع آب سازند سخت را داشته باشد. این واحدهای سازند سخت از یک طرف کیفیت خوبی داشته، از طرف دیگر به دلیل قرار گرفتن در ارتفاعات می‌تواند بدون ایستگاه پمپاژ برای تأمین آب شرب شهر اهر مورد توجه قرار گیرد. بیشتر چشمه‌های موجود در حوضه گویجه بل از سازندهای سخت خارج می‌شوند که تمرکز این چشمه‌ها در مرکز و شمال حوضه حاکی از توسعه آبخوان سازند سخت در این واحدها است. محدودیت منابع آبرفتی و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌ها منجر به کاهش شدید منابع آبرفتی شده است و مدیریت عرضه آب را به سمت منابع آب سازند سخت معطوف کرده است. حدود ۶۵ درصد حوضه به دلیل برون‌زدگی وسیع سازندهای آذرین، دگرگونی و رسوبی و میزان بارش مناسبی که دریافت می‌کند (حدود ۳۴۲/۲ میلی‌متر در سال)، می‌تواند پتانسیل ذخیره و انتقال منابع آب سازند سخت را داشته باشد. هدف از این پژوهش، بررسی و شناخت منابع آب زیرزمینی از نظر کمی و کیفی و بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی در آبخوان سازند سخت منطقه گویجه بل است که می‌تواند در مواقع بحرانی برای تأمین آب شرب شهر اهر مورد استفاده قرار گیرد. بخش اعظم آب آشامیدنی مردم شهرستان اهر از مخزن سد ستارخان در مسیر رودخانه به تصفیه‌خانه شهر اهر تأمین می‌شود که احتمال آلودگی در طول مسیر رودخانه به وسیله پساب‌های حاصله از معادن مس وجود دارد و احتمال بهره‌مندی از منابع آب سطحی را محدود می‌کند. همچنین به دلیل گسترش فعالیت‌های کشاورزی و باغداری در این منطقه و محدودیت منابع آبرفتی از یک طرف و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌ها، منجر به کاهش شدید منابع آبرفتی شده است و مدیریت عرضه آب را به سمت منابع آب سازند سخت معطوف کرده است.

### مواد و روش‌ها

منطقه گویجه بل در ۱۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان اهر واقع شده است و بخشی از حوزه آبخیز رودخانه اهرچای است که پس از پیوستن به رودخانه قره‌سو به رودخانه ارس ملحق می‌شود. در این پژوهش از دو روش سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی (روش تحلیل سلسه مراتبی (AHP) و روش هم‌پوشانی وزنی (Weighted Overlay) و میانگین‌گیری وزنی درجه‌ای ((OWA) Ordered Weighted Average) برای تجزیه و تحلیل داده‌ها بهره گرفته شده

است. در روش سنجش از دور، از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸، برای تهیه نقشه رستری شاخص رطوبت اختلاف نرمال و نقشه رستری شاخص پوشش گیاهی اختلاف نرمال استفاده شد. در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، داده‌های معیارها بر اساس اهمیت هر معیار، از مقیاس ۱ تا ۹ رتبه‌بندی شده و به صورت دوتایی، مقایسه می‌شوند. در روش هم‌پوشانی وزنی، با توجه به تأثیر و اهمیت مختلف هر یک از لایه‌ها نسبت به یکدیگر، به هر یک از لایه‌ها بر اساس اهمیت آن لایه در آن موضوع مورد بررسی، وزنی تخصیص داده شده است. روش میانگین‌گیری وزنی درجه‌ای نیز برای رتبه‌بندی معیارها بر اساس نظرات کارشناسی و یا از طریق مقایسه زوجی برای کنترل سطح جبران‌پذیری معیارها نسبت به معیارهای دیگر بهره گرفته شده است. در این پژوهش، نمونه‌برداری از پنج منبع آب زیرزمینی و آب رودخانه گویجه‌بل انجام و از نظر هیدروشیمی مورد تحلیل قرار گرفت. این نتایج شامل تحلیل هشت یون اصلی (سدیم، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، کلر، کربنات، بی کربنات و سولفات) و اندازه‌گیری پارامتر TDS و pH و محاسبه سه پارامتر SAR، Na و TH است. در این بررسی، وضعیت هدایت الکتریکی، میزان املاح محلول، میزان یون کلر و کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه از نظر شرب در منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک اهر (شامل داده‌های بارش، دما و تبخیر) در بازه زمانی ۲۰ سال گذشته استفاده شد. از داده‌های موقعیت چشمه‌ها به‌منظور تعیین تراکم آنها در بخش صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفت.

### نتایج و بحث

به‌منظور تعیین پتانسیل منابع آب زیرزمینی حوضه گویجه‌بل، لایه‌های اطلاعاتی شامل لیتولوژی، تراکم خطواره‌ها، اختلاف ارتفاع، شاخص رطوبت، شیب، تراکم آبراهه، جهت شیب و شاخص پوشش گیاهی تهیه و با استفاده از روش AHP، weighted overlay و OWA نقشه پهنه‌بندی و میزان هم‌پوشانی معیارهای در نظر گرفته شده، مشخص شد. لایه‌های تهیه شده بر اساس اهمیت نسبی هر یک، با استفاده از روش AHP با یکدیگر مقایسه و وزن نسبی هر لایه تعیین شد. با تأثیر وزن‌های نسبی به دست آمده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) روی لایه‌های رستری ایجاد شده به نسبت تأثیری که در پتانسیل‌یابی دارند، وزنی بین ۱ تا ۹ اختصاص داده شد. سپس لایه‌ها در بخش weighted overlay هم‌پوشانی پیدا کردند تا نقشه نهایی پتانسیل به‌دست آید. در روش میانگین‌گیری وزنی درجه‌ای با استفاده از نقشه‌های رستری به دست آمده، نقشه‌های فازی تهیه و در نرم‌افزار ARCGIS، نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی به‌دست آمد. در نهایت، به‌منظور صحت‌سنجی نقشه‌های حاصل از دو روش OWA و Weighed overlay، از موقعیت چشمه‌ها برای صحت‌سنجی نقشه‌های پتانسیل‌یابی بهره گرفته شد و نتیجه آن وجود حدود ۵۰ درصد از چشمه‌ها در مناطق با پتانسیل متوسط به بالا بوده است. برای بررسی کیفیت آب به‌منظور امکان‌سنجی تامین آب شرب منطقه، وضعیت هدایت الکتریکی، میزان املاح محلول، میزان یون کلر و کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه از نظر شرب و کشاورزی مورد بررسی قرار گرفتند. بر این اساس، میزان هدایت الکتریکی از ارتفاعات به طرف خروجی حوضه افزایش می‌یابد و روند کلی تغییرات آن حاکی از افزایش EC از بالادست جریان به طرف پایین‌دست است. این مقدار در نمونه S1، ۳۲۵ و در نمونه S2 به ۳۸۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌رسد. تغییرات یون کلر نیز مانند تغییرات EC است به عبارت دیگر به نظر می‌رسد نقش کلر (و به تبع آن سدیم) در شوری منابع آب زیرزمینی منطقه بیش از سایر یون‌ها است. از دی‌گرام شولر برای تعیین کیفیت آب برای شرب استفاده شده، بخش عمده‌ای از آب‌های زیرزمینی منطقه کیفیت خوبی برای آشامیدن دارند که این وضعیت نتیجه فقدان سازندهای آلاینده مانند واحدهای نمکی، رسی و مارنی وسیع در منطقه است. این نتایج مشابه قابلیت شرب منابع آب در سازندهای سخت و کارستی غرب ارومیه است که دارای آب با کیفیت خوب برای شرب است.

### نتیجه‌گیری

بر اساس نقشه پهنه‌بندی، بخش جنوب غربی حوضه پتانسیل بالایی برای منابع آب زیرزمینی دارد. بررسی ارتباط بین تعداد چشمه‌ها و چاه‌ها و مناطق با پتانسیل منابع آبی مختلف و انطباق حدود ۵۰ درصدی چشمه‌ها نشان داد که نقشه

پتانسیل‌یابی با روش OWA بیشترین انطباق را با موقعیت چشمه‌ها دارد. همچنین کیفیت منابع آب زیرزمینی منطقه نیز مورد بررسی قرار گرفته، نتایج حاصل بیانگر افزایش شوری از ارتفاعات به سمت مرکز و خروجی حوضه است. در عین حال میزان EC از ۳۱۰ تا ۱۴۴۴ میکروزیمنس بر سانتی‌متر متغیر است. بخش عمده‌ای از آب‌های زیرزمینی محدوده، کیفیت خوبی برای آشامیدن دارند که این وضعیت نتیجه عدم وجود سازندهای آلاینده مانند واحدهای نمکی، رسی و مارنی در منطقه است. بنابراین، نتایج حاصل شده از روش OWA، هدف اصلی این پژوهش که بررسی پتانسیل آب زیرزمینی در سازندهای سخت است را به دست می‌دهد. در منطقه گویجه بل، عملیات آبخیزداری به روش بیولوژیک و یا از طریق ساخت سازه‌های کنترل سیلاب و رسوب می‌تواند منجر به افزایش نفوذپذیری شده و میزان تغذیه از طریق نزولات جوی را افزایش دهد. هر عملیات آبخیزداری که منجر به کاهش سرعت رواناب‌ها و در نتیجه افزایش نفوذ آن شود، می‌تواند به تغذیه آبخوان‌های سازند سخت کمک کند. به‌منظور تعیین پتانسیل کمی آبخوان و تخمین حجم آب قابل استحصال، پیشنهاد می‌شود عملیات ژئوفیزیک و حفاری چاه‌های اکتشافی در مناطق امیدبخش (دارای پتانسیل بالای آب زیرزمینی) صورت گیرد.

### واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، پتانسیل‌یابی، منابع آبرفتی، نفوذپذیری، OWA

#### مقدمه

در پژوهشی توسط Vaezihir and Tabarmayeh, (2016)، پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در سازندهای سخت با استفاده از روش‌های AHP<sup>1</sup> و SAW<sup>2</sup> در حوضه آلمانه مورد بررسی قرار گرفته که مقایسه نتایج روش‌های مذکور با هم‌پوشانی موقعیت چشمه‌های موجود در منطقه و بررسی ارتباط بین تعداد چشمه‌ها و موقعیت قرارگیری آنها بر روی مناطقی با آسیب‌پذیری متفاوت بیانگر نتایج بهتر روش AHP نسبت به SAW در محدوده مورد مطالعه است که نشان می‌دهد بیش از ۵۰ درصد منطقه دارای پتانسیل منابع آبی متوسط به بالایی است. بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط Vaezihir et al., (2019) روی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی موجود در واحدهای کارستی و سازند سخت کوه مورو- صوفیان با به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره SAW، AHP و F-AHP<sup>3</sup> نشان می‌دهند که مدل F-AHP و SAW نتایج مشابهی را ارائه می‌دهد. نتیجه این پژوهش نشان داد بخش مرکزی تاقدیس مورو پتانسیل بالایی از آب زیرزمینی را به‌ویژه در یال شمالی دارد.

یک پژوهش روی پتانسیل‌یابی منابع آب زیرزمینی در حوزه آبخیز خرم آباد با استفاده از روش شاخص آماری توسط Falah et al., (2017) صورت گرفته است. نتیجه این مطالعه نشان می‌دهد که سهم مناطق با

واحدهای زمین‌شناسی سنگی، دارای تخلخل اولیه و ثانویه است. تخلخل اولیه مربوط به تخلخل بین دانه‌هاست که در زمان رسوبگذاری به وجود می‌آید و تخلخل ثانویه نتیجه عملکرد شکستگی‌ها و انحلال است. سنگ‌های رسوبی، آذرین و دگرگونی در این گروه گنجانده شده است. به‌عنوان ویژگی‌های هیدرولیکی، این سنگ‌ها عمدتاً تحت تأثیر شکستگی قرار می‌گیرند که به‌عنوان سنگ‌های شکسته شناخته می‌شوند. برخلاف آبرفت‌ها، سازندهای سخت به‌طور کلی محیط‌های ناهمسانگرد و ناهمگن را نشان می‌دهند (Singhal, 2008).

سازندهای سخت می‌توانند آب را در شبکه‌هایی از تخلخل‌های اولیه (ماتریکس) و یا تخلخل‌های ثانویه (شکستگی‌ها) ذخیره و منتقل کنند. علاوه بر این، در مناطقی که در معرض شرایط خاص آب و هوایی قرار می‌گیرند، این سنگ‌ها تحت هوازگی گسترده قرار می‌گیرند که می‌توانند شرایط مطلوبی برای نفوذ و ذخیره آب‌های زیرزمینی ایجاد کنند. ظرفیت ذخیره‌سازی سازندهای سخت به نوع تخلخل، تعداد دسته درزه‌ها و ارتباط شکستگی‌ها بستگی دارد (Larsson Panel, 1984).

<sup>3</sup> Fuzzy-Analytical Hierarchy process

<sup>1</sup> Analytic Hierarchy Process

<sup>2</sup> Simple Additive Weighting

است. در مناطق گنیس شبه جزیره‌ای، گرانیته و شیست زیرین قرار دارد. آب زیرزمینی ۲۷ درصد از سطح خالص زیر آبیاری را تشکیل و مرحله توسعه آب زیرزمینی منطقه ۴۶ درصد است.

پژوهشی در خصوص تعیین پتانسیل آب زیرزمینی توسط (Das (2017) در هند انجام شده است. در این مطالعه از تلفیق تکنیک‌های سنجش از دور و GIS برای ترسیم مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی برای مدیریت آب زیرزمینی در بنگال غربی استفاده شده که در دامنه شرقی فلات چوتاناگپور واقع شده است. نتایج نشان داد، بر اساس داده‌های حاصل از چاه‌های با خروجی متوسط (۵۰-۱۰۰ لیتر در هر دقیقه) در منطقه، پتانسیل متوسط تا زیاد هستند.

در این راستا اعتبارسنجی نتایج با داده‌های خروجی چاه، رابطه خوبی با توجه به پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی مشاهده شده نشان داد. Benjmel et al., (2020) نقشه مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی را با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و GIS و تجزیه و تحلیل داده‌های چند معیاره را در مراکش تهیه کردند. در این مطالعه از ۱۱ عامل زمین‌شناسی، توپوگرافی و هیدرولوژی تأثیرگذار بر توزیع منابع آبی استفاده شده است. براساس مدل AHP، GIS و سنجش از دور، مطالعه مناطق با توجه به پتانسیل هیدروژئولوژیکی آنها نقشه‌برداری و طبقه‌بندی شده است.

بخش‌های دارای پتانسیل مطلوب ۱۷ درصد، بخش‌های پتانسیل متوسط ۶۴ درصد و مناطق نامطلوب ۱۸ درصد از کل سطح حوضه را پوشش می‌دهد. نقشه پتانسیل آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه با مقایسه داده‌های ۱۵۹ چاه پراکنده در حوضه تأیید شده است. Adesunloro et al., (2022) در مطالعه‌ای پتانسیل آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک صدای الکتریکی عمودی<sup>۲</sup> در ایالت اکیته جنوب غربی نیجریه را مورد ارزیابی قرار دادند. در مجموع ۱۰ VES با استفاده از پیکربندی الکتروود شلمبرگر انجام شد. داده‌ها به صورت کمی با استفاده از تطبیق منحنی جزئی و تکنیک‌های تکرار کامپیوتری برای ایجاد پارامترهای ژئوالکتریک مرتبه اول تفسیر شدند. تجزیه و تحلیل

پتانسیل زیاد و خیلی زیاد ۴۶ درصد از سطح کل محدوده مورد مطالعه است که در نواحی شمال تا جنوب شرق و همچنین در نواحی مرکزی و غربی محدوده مطالعاتی دیده می‌شوند. Teimouri and Asadi, (2021) پژوهشی بر روی تعیین پتانسیل آب زیرزمینی منطقه تربت‌جام با استفاده از روش بیشینه آنتروپی و تحلیل سلسله مراتبی با استفاده از مدل بیشینه آنتروپی و عوامل فاصله و تراکم گسل، سنگ‌شناسی، شیب، جهت شیب، فاصله از آبراهه و تراکم زهکشی، طبقات ارتفاعی، کاربری اراضی، انحنای دامنه، شاخص رطوبت توپوگرافیک و شاخص موقعیت توپوگرافیک انجام و برای ارزیابی این دو روش، از منحنی تشخیص عملکرد نسبی<sup>۱</sup> استفاده شد. نتایج نشان داد که به‌کارگیری روش‌های تحلیل سلسله مراتبی و روش بیشینه آنتروپی، ضمن صرفه‌جویی در زمان و هزینه، قابلیت مناسبی در پیش‌بینی پتانسیل آب زیرزمینی دارند و روش بیشینه آنتروپی برتری بیشتری نسبت به روش تحلیل سلسله مراتبی دارد.

در مطالعه‌ای Panabokke and Perera, (2005) روی منابع آب زیرزمینی در سریلانکا، مشخص شده که آب زیرزمینی در سنگ‌های سخت دگرگونی در زون سنگی هوازده یا رگولیت، همچنین در زون هوازده عمیق‌تر از این سازند سخت وجود دارد که با وجود تحت فشار بودن، به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب قابل استفاده است. در ایالت کارناتا، واحدهای سنگی تخلخل اولیه را ندارند. بنابراین، وجود و حرکت آب زیرزمینی در طول تخلخل ثانویه‌ای که در نتیجه هوازده‌گی یا شکستگی ایجاد شده‌اند، جریان دارد. مطالعه‌ای در مورد وجود آب‌های زیرزمینی توسط Sivaramakrishnan et al., (2015) روی وجود آب‌های زیرزمینی در سازند سخت تحت ساختار زمین‌شناسی مشخص انجام شده است که نشان داد لایه‌های گنیس در مقایسه با بازالت در دو منطقه مختلف نزدیک به هم، یک آبخوان بهتر است.

در منطقه بازالتی، آب زیرزمینی ۸۸ درصد از سطح خالص زیر آبیاری را تشکیل می‌دهد و تنها منبع قابل اعتماد برای بخش‌های خانگی، کشاورزی و صنعتی است و مرحله توسعه آب زیرزمینی در این منطقه ۹۴ درصد

<sup>2</sup> Vertical Electrical Sounding (VES)

<sup>1</sup> Receiver Operating Characteristic (ROC)

## مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز منطقه گویجه‌بل با وسعتی معادل ۷۴۶۲/۸ هکتار در ۱۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان اهر واقع شده است (شکل ۱). این حوزه بخشی از حوزه آبخیز رودخانه اهرچای است که پس از پیوستن به رودخانه قره‌سو به رودخانه ارس ملحق می‌شود. بیشینه ارتفاع حوزه ۲۴۹۵ متر و کمینه ارتفاع در محل خروجی حوزه ۱۳۷۳/۲ متر از سطح دریاست.

حوزه گویجه‌بل بر اساس روش آمبرژه دارای آب و هوای نیمه‌خشک سرد بو، و متوسط بارندگی در آن ۳۴۲/۲ میلی‌متر در سال است. راه اصلی دسترسی به این منطقه جاده اصلی تبریز-اهر است که این جاده از جنوب حوزه در محدوده گردنه گویجه‌بل به‌صورت جنوبی-شمالی وارد آن شده، در راستای شمال شرق در محدوده خروجی حوزه از آن خارج می‌شود (شکل ۱). مراکز سکونتی حوزه گویجه‌بل شامل روستاهای دامن آباد، گوره‌درق، زنجیر بلاغ، یاجیلو و گمش آباد می‌شود.

مورفولوژی حوزه عمدتاً شامل کوهستان و تپه ماهور است و از واحد ژئومورفولوژی دشت و رودخانه تنها بخش رودخانه آن وجود دارد. حوزه گویجه‌بل به سه واحد هیدرولوژیکی مستقل به نام‌های G1، G2 و G3 و یک واحد هیدرولوژیکی غیرمستقل به نام G-int تقسیم شد که واحد G3 خود به هفت زیر واحد تقسیم می‌شود. این تقسیم‌بندی در شکل ۱، ارائه شده است.

حوزه آبخیز گویجه‌بل بر اساس تقسیم‌بندی‌های Nabavi (1976)، جزء زون البرز غربی است ولی بر اساس اشتوکلین و درویش‌زاده و نیز تازه‌ترین پهنه‌بندی رسوبی-ساختاری ایران که توسط Aghanabati (2004) ارائه شده است، این محدوده در پهنه مرکزی فلات ایران قرار می‌گیرد. در منطقه مورد مطالعه در طول دوران پالئوژئوتیک رسوبات دریایی کم‌ژرفای قاره‌ای انباشته شده است که نهشته‌گذاری تا پس از ژوراسیک نیز ادامه داشته است. سنگ‌های آتشفشانی منطقه که بیشتر از نوع آندزیت و تراکی آندزیت به همراه انواع مختلفی از مواد پیروکلاستیک با سن ائوسن است، در اثر فاز پیرنه به وجود آمده است.

تنوع واحدهای سنگی-رسوبی در حوزه گویجه‌بل بسیار زیاد است (شکل ۲) به‌طوری‌که مجموعه‌ای از

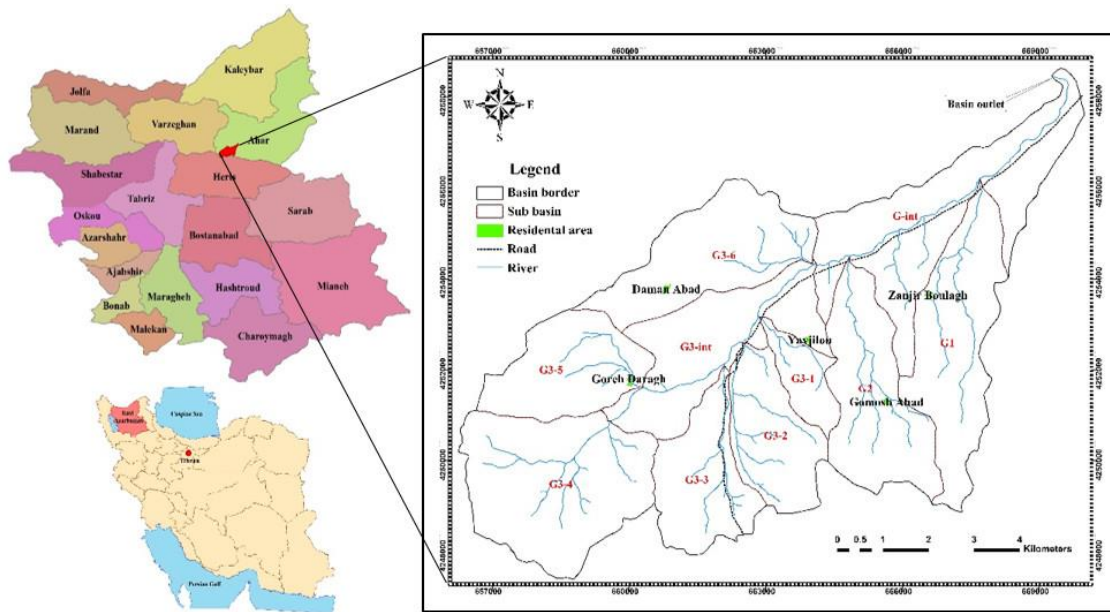
حاصل از نتایج VES نشان می‌دهد که ماسه‌های لایه بالایی در عمق ۲/۳ - ۷۶/۲ متر غیراشباع هستند. در حالی که ماسه‌ها در عمق کمتر از ۱۰۰ متر در برخی از محل‌های نمونه‌برداری اشباع شده و واحدهای آبخوان در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهند. گمانه‌ها/چاه‌های عمیق را می‌توان در این نقاط در عمق ۸۰ تا ۱۰۰ متر ذکر کرد.

شهرستان اهر (آذربایجان شرقی) با جمعیتی بالغ بر ۱۵۰ هزار نفر مرکز اصلی استفاده از آب شرب در این حوزه رودخانه اهرچای است. بخش اعظم آب آشامیدنی مردم شهرستان اهر از مخزن سد ستارخان در مسیر رودخانه اهرچای به تصفیه‌خانه شهر اهر، با هدف تأمین آب شرب بهداشتی شهر اهر و مناطق تحت پوشش هدایت می‌شود. با توجه به این‌که منطقه جزء مناطق معدنی کشور به‌ویژه کانسارهای بزرگ مس است، احتمال آلودگی در طول مسیر رودخانه به‌وسیله پساب‌های حاصله از این معادن وجود دارد که احتمال بهره‌مندی از منابع آب سطحی را محدود می‌کند و از طرفی به‌دلیل گسترش فعالیت‌های کشاورزی و باغداری در این منطقه، که جزء فعالیت‌های اصلی و مهم ساکنان است و محدودیت منابع آبرفتی از یک طرف و برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی از طریق چاه‌ها از آن، منجر به کاهش شدید منابع آبرفتی شده است و مدیریت عرضه آب را به سمت منابع آب سازند سخت معطوف کرده است.

حوزه گویجه‌بل به‌دلیل برون‌زدگی وسیع سازندهای آذرین، دگرگونی و رسوبی و میزان بارش مناسبی که دریافت می‌کند، می‌تواند پتانسیل ذخیره و انتقال منابع آب سازند سخت را داشته باشد. آب موجود در واحدهای سازند سخت از یک طرف کیفیت خوبی داشته و از طرف دیگر، به‌دلیل قرار گرفتن در ارتفاعات می‌تواند بدون ایستگاه پمپاژ جهت تأمین آب شرب شهر اهر مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، هدف از این پژوهش بررسی و شناخت منابع آب زیرزمینی از نظر کمی و کیفی و بررسی وضعیت منابع آب زیرزمینی در آبخوان سازند سخت منطقه گویجه‌بل است که می‌تواند در مواقع بحرانی برای تأمین آب شرب شهر اهر مورد استفاده قرار گیرد.

شیل و سنگ آهک‌های تخریبی)، سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری که واحد پیروکلاستیکی تفکیک نیافته (EVI) (مجموع دو واحد برش‌ها، توف برش‌ها و گدازه‌های آندزیتی) است و در شمال حوضه ترکیبی از این دو واحد در مجاورت هم دیده می‌شوند.

سنگ‌های آتشفشانی و رسوبی به همراه واحدهای آبرفتی در کنار هم قرار گرفته‌اند. جنوب غربی حوضه را واحدهای رسوبی شبیه فیلیش (K-Pef) (طبقات ماسه‌سنگی، ماسه‌سنگ آهکی، سنگ آهک‌های ماسه‌ای، شیل‌ها، شیل‌های آهکی و سیلتستون‌ها) تشکیل می‌دهد، بخش جنوبی آن شامل واحد Pesh



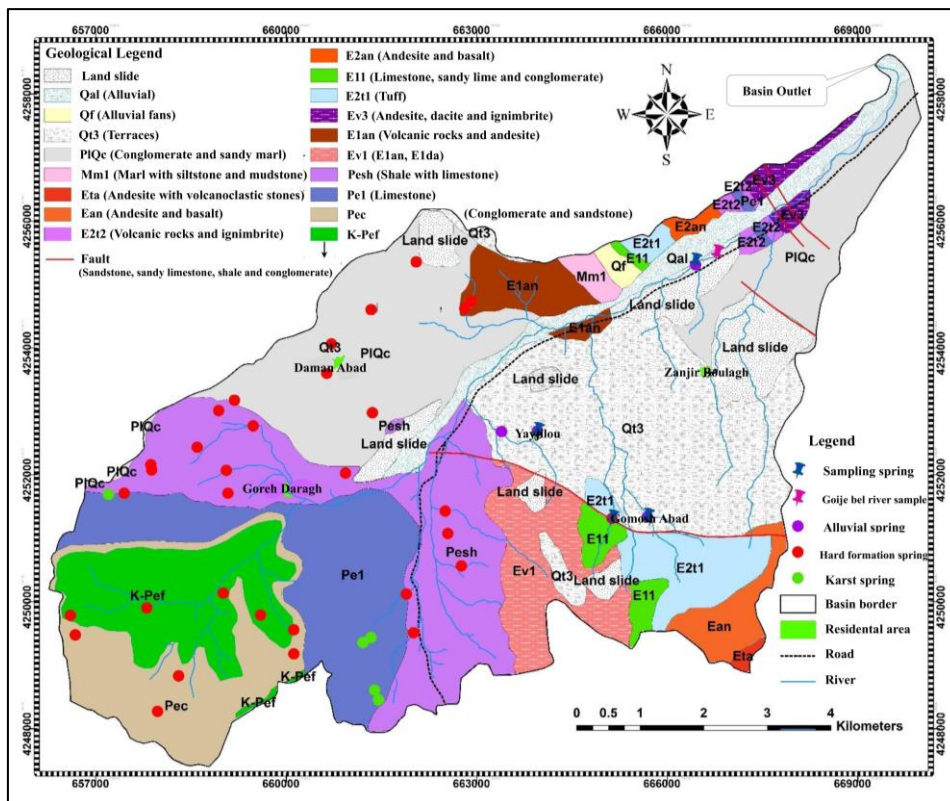
شکل ۱- نقشه پایه و موقعیت منطقه مورد مطالعه (حوضه آبخیز گویجه بل)

Fig. 1. Base map and location of the studied area (Goijeh Bel Watershed)

در حوضه گویجه‌بل، به دلیل این که جز زون البرز غربی ایران است، روند واحدهای ساختمانی (چین‌ها، گسل‌ها و شکستگی‌ها) از جهت یافتگی بلوک زاگرس پیروی می‌کنند و روند شمال غربی-جنوب شرقی دارند. این گسل‌ها بیشتر از نوع معکوس بوده، از روند گسل اصلی تبریز پیروی می‌کنند. انطباق واحدهای دو طرف رودخانه گویجه‌بل نشان می‌دهد که کل محدوده حوضه، یالی از یک چین بزرگ هستند که محور آن در جنوب غربی حوضه و خارج از آن قرار دارد. این چین از نوع تافدیس برگشته بوده، به دلیل تداخل با چین‌های دیگر منطقه، خم شدگی در محور آن دیده می‌شود. امتداد محور این چین شمال غربی-جنوب شرقی است.

همچنین، در این بخش، واحد E2an (گدازه‌های آندزیتی، تراکی آندزیتی، تراکی بازالتی)، واحد E2t2 (سنگ‌های آذرآواری از نوع توف برش‌های اپی‌کلاستیک با ترکیب آندزیتی تا بازالتی) بخش‌های مرکزی، شرقی و غربی حوضه نیز شامل واحد کنگلومرای پلیوسن PIQC (کنگلومرای کمتر تحکیم‌یافته دارای میان لابه‌های ماری ماسه‌ای و سیلتی) و واحد کنگلومرای Pec (سنگ‌های کربناته تخریبی و پلاژیک، کوارتزیت‌ها، شیل‌ها، کنگلومراهای کهن‌تر و قطعات سنگ‌های آتشفشانی و دگرگونی کهن)، Pe1 (سنگ آهک) و پادگانه‌های آبرفتی جوان (Qt3) با کاربری کشاورزی و باغبانی، آبرفت‌های مخروط افکنه‌ای جوان (Qf) و آبرفت‌های رودخانه‌ای (Qal) است.





شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی حوضه گویجه بل  
 Fig. 2. Geological map of Goijeh Bel basin

از منابع آبرفتی مورد توجه واقع شده‌اند، ولی این نوع منابع در مناطقی که مصرف آب زیرزمینی بالاست (مانند حوضه گویجه بل) یا مناطق بیابانی و خشک می‌تواند از اهمیت زیادی برخوردار باشد. این سفره‌ها در آن دسته از سنگ‌ها که فاقد تخلخل اولیه بوده، در اثر وجود درز و شکاف و تخلخل و نفوذپذیری ثانویه قابلیت ذخیره و انتقال آب را دارند، تشکیل می‌شوند.

سنگ‌های متبلور آذرین و دگرگونی همچنین سنگ‌های رسوبی نظیر آهک‌ها و ماسه‌سنگ‌ها می‌توانند سفره‌هایی با ویژگی سازند سخت ایجاد کنند. عمده‌ترین ویژگی این آبخوان‌ها، تفاوت زیاد در خصوصیات هیدرودینامیکی آنها از نقطه‌ای به نقطه دیگر است. آب موجود در این آبخوان‌ها به علت دارا بودن مقادیر کم املاح، کیفیت بالایی برای استفاده دارد. شناسایی سفره‌های موجود در سازندهای سخت منطقه مانند واحدهای آتشفشانی ائوسن و کنگلومرای PIQC و واحدهای تخریبی کرتاسه-پالئوسن که در حوضه گویجه بل وجود دارند می‌تواند بخشی از نیازهای آبی منطقه را تأمین کند. در حوضه گویجه بل آبخوان‌های موجود در ارتفاعات جنوبی منطقه را آبخوان‌های

سفره‌های آب زیرزمینی منطقه را از دو دیدگاه می‌توان بررسی کرد، آزاد یا تحت فشار بودن و جنس بدنه سفره. از دیدگاه اولیه کلیه آبخوان‌های محلی موجود در حوضه گویجه بل از نوع آبخوان آزاد است که در آبرفت‌های جوان، مخروط‌افکنه‌های آبرفتی و آبرفت‌های رودخانه‌ای تشکیل شده‌اند. از دیدگاه دوم دو نوع سفره آب زیرزمینی، سفره‌های آبرفتی و سفره‌های سازند سخت در این منطقه وجود دارد. سفره‌های با بدنه آبرفتی که عمدتاً در بخش شمالی وجود دارند، سفره‌های عادی هستند که در بیشتر مناطق توسعه دارند. این آبخوان‌ها در آبرفت‌های منطقه تشکیل شده‌اند و ارتباط هیدروژئولوژیکی آنها از طریق همین آبرفت‌ها و آبرفت‌های جوان کف آبراهه‌ها برقرار است. آبخوان آبرفتی اصلی حوضه در مرکز و شرق منطقه قرار گرفته است.

نوع دوم آبخوان‌های موجود در منطقه از نوع آبخوان سازند سخت است که در واحدهای لیتولوژیک غیرآبرفتی که دارای تخلخل ثانویه هستند، تشکیل شده‌اند. سفره‌های موجود در سازند سخت منطقه گویجه بل به دلیل ذخیره و آبدهی نسبتاً پائین آنها، کمتر

کارستی در آهک‌های واحد Pel صورت گرفته است که هر پنج پارامتر لازم برای کارست‌زایی را دارا است. این آهک‌ها از خلوص بالایی برخوردار بوده و علاوه بر دارا بودن درز و شکاف فراوان در ارتفاعات منطقه قرار گرفته‌اند و بارش زیادی دریافت می‌کنند. قرار گرفتن تمام یا بخشی از حوزه آبخیز پنج چشمه در این واحد می‌تواند حاکی از وجود آبخوان‌های کارستی در واحد Pel باشد.

خصوصیات هیدروژئولوژیکی و هیدروشیمیایی هر منطقه ارتباط زیادی با ویژگی‌های سازندهای آن منطقه دارد. درز و شکاف‌ها و گسل‌ها بر کاهش سرعت رواناب سطحی، نفوذ بیشتر آب سطحی در زمین و تغذیه آب‌های زیرزمینی مؤثر بوده و علاوه بر نفوذ بیشتر آب در زمین، باعث ظهور آب زیرزمینی در سطح زمین به صورت چشمه می‌شود. تأثیری از وجود گسل‌ها و درزو شکاف‌ها به‌طور مستقیم در پیدایش چشمه‌ها در منطقه وجود ندارد و چشمه‌های منطقه تحت تأثیر گسل‌ها نبوده، بلکه چشمه‌ها عمدتاً از نوع کنتاکتی و تماسی و در اثر زمین لغزش به وجود آمده‌اند.

سفره‌های آبرفتی منطقه (و نه سازند سخت) در واحدهای کوآترنری دشت قرار دارند، این واحدها شامل آبرفت‌های عهد حاضر (Qal)، آبرفت‌های با کاربری کشاورزی (Qt3) و آبرفت‌های مخروط افکنه‌ای (Qf) هستند. واحد Qt3 و Qf به دلیل مرتفع بودن، به‌عنوان تغذیه‌کننده واحد Qal محسوب می‌شود، این واحدها پهنه‌های نسبتاً مرتفعی هستند که به‌وسیله آبراهه‌ها و واحدهای Qal بریده شده‌اند. به همین دلیل، با وجود این که این واحدها به‌عنوان سفره، در انتقال و ذخیره آب زیرزمینی نقش دارد ولی به دلیل توپوگرافی آن و بار هیدرولیکی حاکم بر آب زیرزمینی موجود در آن، به صورت یک سفره تغذیه‌کننده آبرفت‌های Qal عمل می‌کنند.

به دلیل گسترش سطحی نسبتاً وسیع واحد Qt3 در بخش‌های مرکزی و شرقی حوضه، آبخوان‌های با ویژگی‌های هیدرودینامیکی بالا در منطقه توسعه یافته است. آبخوان‌های آبرفتی منطقه سهم اصلی را در ذخیره و انتقال آب زیرزمینی ندارند، تنها یک پنجم از مساحت حوضه را واحدهای آبرفتی تشکیل می‌دهند و از نظر

سازندهای سخت تشکیل می‌دهند. از ۴۱ دهنه چشمه موجود در حوضه گویچه‌بل ۳۲ دهنه از سازندهای سخت (به استثناء آهکی) خارج می‌شوند که تمرکز این چشمه‌ها در مرکز و شمال حوضه و در واحدهای Pesh و PIQC بیشتر بوده، می‌تواند حاکی از توسعه آبخوان سازند سخت در این واحدها باشد.

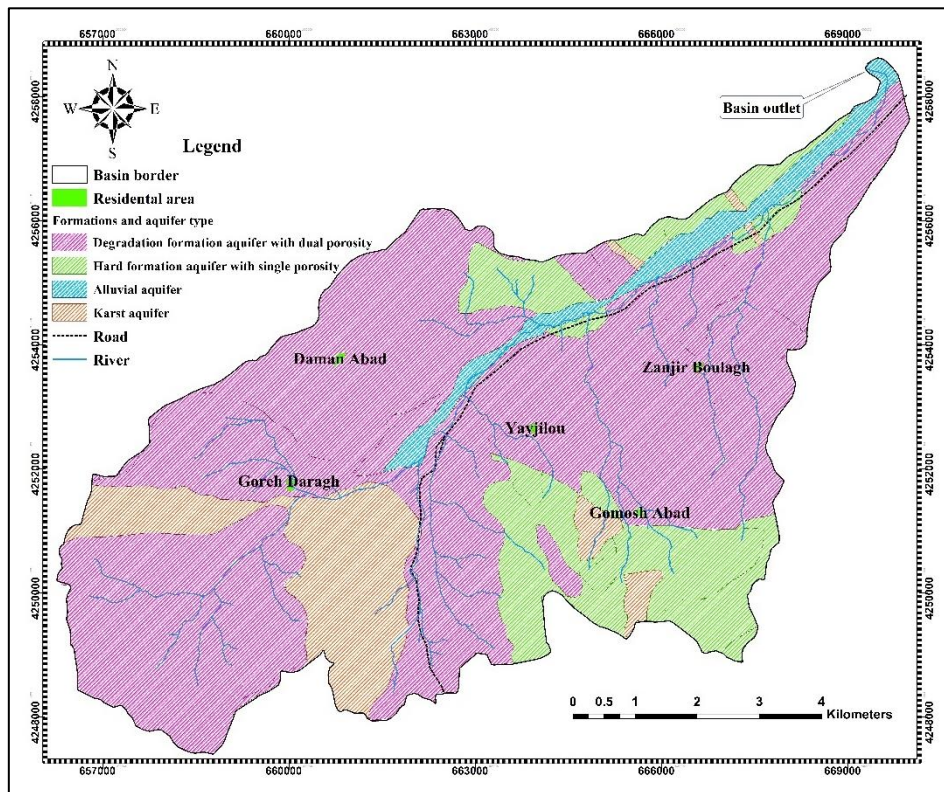
یکی از انواع آبخوان‌های سازند سخت، آبخوان‌های کارستی است که در واحدهای انحلال‌پذیر مانند آهک، گچ و نمک تشکیل می‌شوند. آبخوان‌های آهکی به دلیل کیفیت بسیار خوب از نظر هیدروشیمیایی در بسیاری از مناطق جهان و از جمله در ایران مورد توجه بوده، هم اینک سهم عمده‌ای از منابع آب موجود در منطقه زاگرس مربوط به این آبخوان‌ها است.

عواملی که بر توسعه کارست در سازندهای آهکی مؤثر است شامل: ۱- میزان گسترش درز و شکاف‌ها، ۲- نوع و درجه خلوص آهک، ۳- سطح اساس فرسایش، ۴- ضخامت و توسعه واحدهای آهکی و ۵- بارش است و در واحدهای E1 و E3 عوامل ۱، ۳ و ۵ برای توسعه کارست مهیا بوده است ولی فراهم نبودن شرایط از نظر دو عامل دیگر باعث شده است که فرایند کارست‌زایی در منطقه در حد پیشرفته صورت نگیرد و تنها به ایجاد شکل‌های سطحی مانند انواع کارن‌ها در سطح آهک محدود شود. آهک‌های موجود در دو واحد E1 و E3 از نوع آهک توفی و ماسه‌ای بوده، در نتیجه ناخالص هستند و قابلیت انحلال کمتری دارند و به‌طور جزئی کارستی شده‌اند و اشکال عالی کارستی مانند غار یا Sinkhole در آنها دیده نمی‌شود و عمدتاً به شکل اشکال سطحی مانند کارن و Rain Pit نمایان شده است. فقدان وجود حتی یک چشمه در دو واحد فوق‌الذکر حاکی از عدم توسعه کارست در آنها است. لایه‌های آهکی موجود در واحد Pesh بسیار نازک لایه بوده، توسعه کارست در آن تنها شامل انحلال‌های جزئی است.

با این حال جریان آب زیرزمینی از طریق درز و شکاف‌های این آهک‌ها وجود دارد و به صورت زیرزمینی واحدهای مجاور را تغذیه می‌کنند. عبور زون‌های گسلی متعدد از مجاورت حوضه به گسترش درز و شکاف در آهک‌ها کمک کرده است. ولی فرایند انحلال نتوانسته است که باعث توسعه کارست و ایجاد آبخوان‌های کارستی در این آهک‌ها شود. توسعه واقعی آبخوان‌های

در حوضه گویجه‌بل به تعداد ۴۱ دهانه چشمه وجود دارد که از این تعداد چهار دهانه (معادل ۹/۸ درصد) از آنها از آبخوان‌های آبرفتی حوضه خارج می‌شوند. شکل ۲، موقعیت انواع چشمه‌های موجود در حوضه را از نظر نوع آبخوان نشان می‌دهد. این نقشه همچنین بیانگر وجود پنج چشمه (۱۲/۲ درصد) در آبخوان کارستی موجود در آهک‌های Plc و بقیه یعنی ۳۲ چشمه در سازند سخت و تخریبی حوضه (Kpef, Pec, E1an, PIQc, Pesh) است. بر این اساس احتمال وجود آبخوان سازند سخت در تأمین منابع آب زیرزمینی حوضه ۷۸ درصد است (شکل ۲). بنابراین سفره‌های سازند سخت نقش به‌سزایی در تأمین آب مورد نیاز حوضه دارند.

گسترش، اهمیت آبخوان سازند سخت در منطقه بیشتر است. از نظر هیدروژئولوژی حوضه گویجه‌بل از چهار نوع شامل آبخوان سازند با تخلخل دوگانه (سنگ‌های رسوبی)، آبخوان سازند سخت با تخلخل یگانه ثانویه (سنگ‌های آذرین)، آبخوان کارستی و آبخوان آبرفتی تشکیل یافته است (شکل ۳). عوامل متعددی باعث شده است که حوضه گویجه‌بل از نظر آب زیرزمینی غنی بوده، منابع بهره‌برداری متعددی از نوع چاه، چشمه و قنات در آن توسعه یابد. مصارف متعدد کشاورزی و شرب باعث توسعه منابع بهره‌برداری در حوضه گویجه‌بل شده است. تراکم این منابع در مرکز و جنوب منطقه بیشتر از سایر مناطق است.



شکل ۳- انواع آبخوان‌های منطقه از نظر نوع تخلخل  
 Fig. 3. Types of aquifers in the area in terms of porosity

در محیط نرم‌افزار ENVI انجام شده است که از طریق انجام تصحیحات مورد نیاز بر روی تصاویر و بهره‌گیری از نرم‌افزارهای مناسب تصاویر، نقشه رستری شاخص

روش‌های تجزیه و تحلیل: در این پژوهش از دو روش سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی برای تجزیه و تحلیل داده‌ها بهره گرفته شده است:

- سنجش از دور

در این بخش پردازش و تفسیر تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ با قدرت تفکیک مکانی ۱۵ متر (سال ۲۰۱۸)

نظریه برای مقابله با مشکلات پیچیده تکنولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی است. استفاده از روش AHP، برای ارزیابی معیارهای ارزیابی در تصمیم‌گیری چند معیار<sup>۳</sup> در زمینه‌های مختلف مفید است. AHP برای مدیریت ریسک به دلیل تنوع عوامل خطر و دستیابی به یک عامل خطر مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، مستلزم مشارکت فعال تصمیم‌گیران در دستیابی به یک توافق است و به آنها مبنایی منطقی برای تصمیم‌گیری می‌دهد (Dey, 2004).

AHP بر مبنای مقایسه زوجی بنا نهاده شده که قضاوت و محاسبات را آسان می‌کند، همچنین میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم را نشان می‌دهد. تمامی مقایسه‌ها در فرایند تحلیل سلسله مراتبی، به صورت زوجی انجام و پس از تعیین اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر، نباید نرخ سازگاری سامانه از ۰/۱ بیشتر باشد، که نرخ سازگاری از تقسیم شاخص سازگاری بر میانگین شاخص سازگاری محاسبه می‌شود. مقدار میانگین شاخص سازگاری نیز توسط Saaty and Vargas, 1991 برای ماتریس‌های در ابعاد مختلف آماده شده است.

در آخرین مرحله AHP، داده‌های معیارها به تعدادی از کارشناسان ارائه می‌شود تا با مقایسه معیارها ماتریسی به دست آید که معیارها را به ترتیب اهمیت هر معیار رتبه‌بندی می‌کند. کارشناسان باید هر عامل را با استفاده از مقیاس ۱ تا ۹ رتبه‌بندی کنند (Dawotola, 2010). پس از ایجاد ماتریس مقایسه دوتایی، وزن نسبی برای معیارهای مختلف مشتق می‌شود. وزن نسبی معیارهای هر سطح با توجه به عنصر سطح بالا به‌عنوان اجزای عنصر مرتبط با بزرگترین مقدار خاصی از ماتریس مقایسه آنها محاسبه می‌شود. سپس وزن‌ها از طریق سلسله مراتب به‌منظور تولید نقشه‌های ترکیبی جمع‌بندی می‌شوند (Dey, 2004).

- هم‌پوشانی وزنی<sup>۴</sup>

در بسیاری از تحلیل‌های مناسب، برخی از معیارهای واجد شرایط از سایر معیارها اهمیت بیشتری دارند (Flitter et al., 2013). مدل شاخص هم‌پوشانی

رطوبت اختلاف نرمال<sup>۱</sup> (Hardisky et al., 1983) و نقشه رستری شاخص پوشش گیاهی اختلاف نرمال<sup>۲</sup> (Rouse et al., 1974) تهیه شد.

- شاخص رطوبت اختلاف نرمال (NDMI)

NDMI دارای پتانسیلی برای شناسایی مناطق مرطوب مدنظر است. در NDMI، مقادیر بالا نشان‌دهنده وجود رطوبت بیشتر در مناطق پرآب است و مقادیر پایین رطوبت خاک را نسبت به خاک خشک نشان می‌دهد. ارزش NDMI بیش از ۰/۲ نشان‌دهنده سطح خاک مرطوب با توانایی بسیار خوب آب‌های زیرزمینی و ۰/۱ تا ۰/۲ نشان‌دهنده خاک خیس و خشک با قابلیت‌های متوسط است (Sahu, 2014).

- شاخص پوشش گیاهی اختلاف نرمال (NDVI)

شاخص‌های پوشش گیاهی به‌طور گسترده به‌عنوان معیارهایی برای تجزیه و تحلیل تغییرات پوشش اراضی از جمله پوشش گیاهی و عوامل دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Morawitz et al., Koh et al., 2006). NDVI یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای پایش تغییرات پوشش گیاهی است (Binh et al., 2005) که از طریق نسبت‌گیری نوارهای قرمز و مادون قرمز نزدیک به‌دست می‌آید (Alavi Panah, 2006). اساس این شاخص بر این مبنا است که کلروفیل موجود در ساختار گیاهان قادر است نور قرمز را جذب و لایه مزوفیل برگ نیز قادر است نور مادون قرمز نزدیک را منعکس سازد (Firouzi et al., 2019). NDVI یکی از شاخص‌های مبتنی بر نسبت و نشان‌دهنده ارتباط مابین پارامترهای پوشش گیاهی شامل توده زنده برگ و سطح برگ سبز است که این امر برای تشخیص پوشش گیاهی ارزش در خور توجهی دارد. دامنه تغییرات NDVI بین -۱ و +۱ است (Ebrahimi, 2010).

- روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرایند سلسله مراتب تحلیلی (AHP) (Saaty, 1977, 1982, 1986, 1988, Saaty and Vargas, 1982, 1977, 1986, 1988, Saaty and Alexander, 1989) یک

<sup>1</sup> Normalized Difference Moisture Index (NDMI)

<sup>2</sup> Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

<sup>3</sup> Multiple Criteria Decision Making (MCDM)

<sup>4</sup> Weighted Overlay (WO)

برگ، در ایران بیشتر معمول است. در این دیاگرام مقادیر یون‌ها را در ستون قائم نشان می‌دهند و تقسیمات ستون‌ها لگاریتمی است. نتایج تجزیه شیمیایی آب‌ها را به صورت خطوط شکسته در این نمودارها نشان می‌دهند (Sedaghat, 1999). در این دیاگرام آب‌ها به شش رده خوب تا غیر قابل آشامیدن تقسیم‌بندی می‌شوند. غلظت عناصر اصلی بر حسب میلی گرم بر لیتر و پارامتر سختی بر حسب درجه سختی فرانسوی (۱۰ میلی گرم در لیتر کربنات کلسیم) است. یکی از مزیت‌های مهم این دیاگرام نسبت به دیاگرام‌های مثلی این است که غلظت واقعی پارامترها رسم می‌شود (Asghari Moghaddam, 2010).

در این دیاگرام تنها بر اساس مقادیر کلسیم، منیزیم، مجموع یون‌های سدیم و پتاسیم، کلر، یون سولفات، بیکربنات، کل مواد جامد (TDS) و سختی کل (TH) کیفیت آب به شش طبقه خوب، بد، قابل قبول، موقتاً قابل شرب، نامناسب و غیرقابل شرب تقسیم می‌شود و خبری از عناصر نادر، فلزات سنگین و سایر آلاینده‌های میکروبی نیست.

### نتایج و بحث

**پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی حوضه:** به منظور شناسایی مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی در حوضه گویجه بل، از لایه‌های اطلاعاتی شامل لیتولوژی، تراکم شکستگی، اختلاف ارتفاع، شاخص رطوبت، شیب، تراکم آبراهه، جهت شیب و شاخص پوشش گیاهی استفاده شده و با بهره‌گیری از روش AHP، weighted overlay و ordered weighted average نقشه پهنه‌بندی تهیه شد.

لایه لیتولوژی: لیتولوژی عاملی است که کنترل کمیت و کیفیت آب‌های زیرزمینی را در یک منطقه مشخص می‌کند (Bhuvaneshwaran et al., 2015). سنگ‌شناسی بر روی تخلخل و نفوذپذیری سنگ‌های آبخوان اثر می‌گذارد (Chowdhury et al., 2003). نوع سنگ‌شناسی، بافت و درجه خلوص سنگ‌ها نقش مهمی در تخلخل، نفوذپذیری و تمرکز جریان آب زیرزمینی در داخل سنگ‌ها ایفا

امکان ترکیب نقشه‌های بسیار مختلفی را امکان‌پذیر می‌سازد. در این بررسی از روش چند معیاره استفاده شده است که این مدل به صورت رابط زیر تعریف می‌شود (Murray, 2003).

$$S = \frac{\sum_i^m W_i S_{ij}}{\sum_i^m W_i} \quad (1)$$

که در آن، S امتیاز هر یک از سطوح،  $W_i$  وزن لایه ورودی  $i$ ام و  $S_{ij}$  امتیاز طبقه  $j$ ام از لایه  $i$ ام است. در این مدل، علاوه بر اینکه به هر یک از طبقات لایه‌های مختلف وزن خاصی تعلق می‌گیرد، با توجه به تأثیر و اهمیت مختلف هر یک از لایه‌ها نسبت به یکدیگر می‌توان به هر یک از لایه‌ها بر اساس اهمیت آن لایه در آن موضوع مورد بررسی، وزنی تخصیص داد که این مورد یکی از ویژگی‌های این مدل در ترکیب لایه‌ها به شمار می‌آید (Kao, 1997).

### - میانگین‌گیری وزنی درجه‌ای<sup>۱</sup>

روشی جدید در تصمیم‌گیری OWA روش میانگین وزن‌دار مرتب چند معیاره است که می‌تواند منجر به نتایج قابل اطمینانی شود (Feizizadeh and Blaschke, 2012). عملگر OWA روشی برای رتبه‌بندی معیارها و پرداختن به عدم اطمینان اثر متقابل آنها است (Yager, 1991). توانایی روش OWA در این است که منجر به درجه‌بندی پیوسته سناریوهایی بین عملگر اشتراک (خطر ناسازگاری-ریسک‌ناپذیری) و عملگر اجتماع (ریسک‌پذیری) می‌شود. این درجه‌بندی پیوسته به وسیله وزن سراسری (کلی) و محلی انجام شده است. وزن سراسری ابتدا بر اساس قضاوت تصمیم‌گیرندگان و یا از طریق مقایسه زوجی برای کنترل سطح جبران‌پذیری معیارها نسبت به معیارهای دیگر تعیین می‌شوند؛ در حالی که وزن‌های محلی به‌طور تدریجی اضافه شده و حذف معیارها و قدرت نفوذ برای کنترل سطح عدم اطمینان و ریسک‌پذیری را فراهم می‌کند (Rahnama et al., 2012).

**کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب:** برای بررسی آب منطقه مورد مطالعه، از دیاگرام نیمه لگاریتمی شولر استفاده شده است. این دیاگرام از نظر سرعت عمل، سهولت مقایسه و نشان دادن تعداد زیادی نمونه در یک

<sup>1</sup> Ordered Weighted Average (OWA)

محل تشکیل آبخوان نقش موثر دارند و البته با توجه به انطباق تقریبی طبقات ارتفاعی و شیب با یکدیگر، سامانه جریان آب زیرزمینی در اغلب موارد متأثر از شیب سطح زمین است. عامل توپوگرافی به صورت دو نمایه افزایش ارتفاع نسبت به سطح اساس فرسایش محلی و شیب در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، در ارتفاعات زیاد نفوذ آب به درون زمین کمتر و رواناب بیشتر است. جهت تهیه لایه ارتفاعی از نقشه DEM<sup>۱</sup> محدوده مورد نظر استفاده شد (شکل ۴- c).

لایه شاخص رطوبت اختلاف نرمال (NDMI): میزان رطوبت خاک می‌تواند نشانه‌ای از وجود منابع آب زیرزمینی در منطقه باشد. مقادیر بالاتر از ۰/۱ نشان دهنده سطح رطوبت بالا و مقادیر پائین (نزدیک به -۱) نشان دهنده سطح رطوبت پائین است. برای تهیه این لایه از تصویر لندست ۸ با استفاده از دو باند ۵ و ۷ (رابطه ۲) با انتقال به محیط GIS استفاده شد (شکل ۴- d).

$$NDMI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} \quad (2)$$

لایه شیب: شیب عامل مهمی برای شناسایی مناطق دارای پتانسیل آب زیرزمینی است. درجه بالای شیب در رواناب سریع و افزایش میزان فرسایش با احتمال نفوذ ضعیف، نشان دهنده عدم تغذیه آب زیرزمینی است (Magesh et al., 2011). مناطق مسطح قادر به نگهداری بارندگی و تسهیل تغذیه به آب‌های زیرزمینی هستند در حالی که در منطقه پرشیب آب به سرعت روان می‌شود (Sisay, 2007).

مناطق دارای رده شیب ۰ تا ۲ درجه (بسیار خوب) که تقریباً مسطح و نرخ نفوذ نسبتاً بالا است. مناطق با شیب دو تا پنج درجه (خوب) برای ذخیره‌سازی آب‌های زیرزمینی با توجه به توپوگرافی کم، مناسب است. مناطق دارای شیب پنج تا نه درجه (متوسط) موجب رواناب نسبتاً زیاد و نفوذ کم و مناطقی با شیب نه تا ۲۲ درجه شیب و رواناب بالاتری دارند. شیبی که بیش از ۲۲ درجه است، به دلیل داشتن شیب زیاد، بیشترین میزان رواناب و نفوذ کم دارد (Sewnet et al., 2018).

می‌کند. بر اساس اهمیت سازندها و سنگ‌ها در تشکیل منابع آب زیرزمینی حوضه وزن‌های مناسب برای هر لایه اعمال و نقشه لیتولوژی منطقه تهیه شد. برای سازندهای سخت نفوذپذیر مثل ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سنگ‌های آهکی، وزن بیشتر، کمترین وزن به رسوبات آبرفتی عهد حاضر که جزء سازند سخت نیستند، تعلق گرفت و سنگ‌های آذرین وزن‌های متوسط را دریافت کردند (شکل ۴- a).

لایه تراکم شکستگی: خطواره‌ها از ویژگی‌های خطی یا انحنایی ساختاری هستند که از طریق تصاویر ماهواره‌ای به وسیله خطوط نسبتاً خطی آنها شناسایی می‌شوند. خطواره‌ها نشان‌دهنده مناطق گسلی و شکستگی هستند که باعث افزایش تخلخل و نفوذپذیری ثانویه می‌شوند. چگالی خطی یک ناحیه می‌تواند به طور غیرمستقیم پتانسیل آب زیرزمینی را نشان دهد، زیرا حضور خطواره‌ها معمولاً نشان‌دهنده یک ناحیه نفوذپذیر و مناطق با چگالی بالای خطوط برای مناطق با پتانسیل مناسب آب زیرزمینی هستند (Haridas et al., 1998). خطواره‌ها به خصوص آنهایی که از مناطق ضعیف زمین‌شناسی مانند شکستگی، مفاصل، گسل‌ها و مناطق محصور هستند، مناطق قابل تغذیه مناسب هستند.

اگر تراکم خطواره‌ها بیشتر باشد، احتمال تغذیه آب‌های زیرزمینی بیشتر است و بنابراین پتانسیل خوبی برای توسعه آب‌های زیرزمینی دارند (Bhuvaneswaran et al., 2015). برای تهیه لایه تراکم شکستگی از گسل‌های موجود منطقه به همراه شکستگی‌ها که از روی تصاویر ماهواره‌ای لندست ۸ استخراج و با استفاده از تابع چگالی خط نقشه تراکم شکستگی با اختصاص وزن بیشتر به مناطق متراکم و وزن کمتر به مناطق با تراکم کمتر، استفاده شده است. بر اساس شکل ۴- b، بیشترین تراکم شکستگی‌ها در بخش جنوب غرب منطقه مشاهده می‌شود.

لایه اختلاف ارتفاع: طبقات ارتفاع از عوامل مؤثر در پتانسیل یابی منابع آب زیرزمینی است که نقش مهمی در ضریب رواناب و نفوذپذیری دارند. این عوامل در گرادیان هیدرولیکی و جهت حرکت آب زیرزمینی و

<sup>3</sup> Shortwave Infrared

<sup>1</sup> Digital Elevation Model

<sup>2</sup> Near Infrared

کند را نشان می‌دهد. بدین ترتیب در تراکم زهکشی کمتر، احتمال تغذیه یا پتانسیل آب‌های زیرزمینی بالاتر است (Waikar and Nilawar, 2014). نقشه تراکم آبراهه بر اساس آبراهه‌های موجود در منطقه و با استفاده از تابع چگالی تراکم خطی در محیط GIS به دست آمد (شکل ۴- f).

لایه جهت شیب: جهت شیب نشان‌دهنده رطوبت، پوشش گیاهی و ارتباط آن با باد باران و ویژگی‌های بستر سنگ است که به نوبه خود بر ویژگی‌های فیزیکی مواد، شیب و خاک و به تبع آن پتانسیل آب‌های زیرزمینی تاثیر می‌گذارد (Ghimire et al., 2017). برای تهیه این لایه از مدل رقومی ارتفاع در محیط GIS بهره گرفته شد (شکل ۵- a).

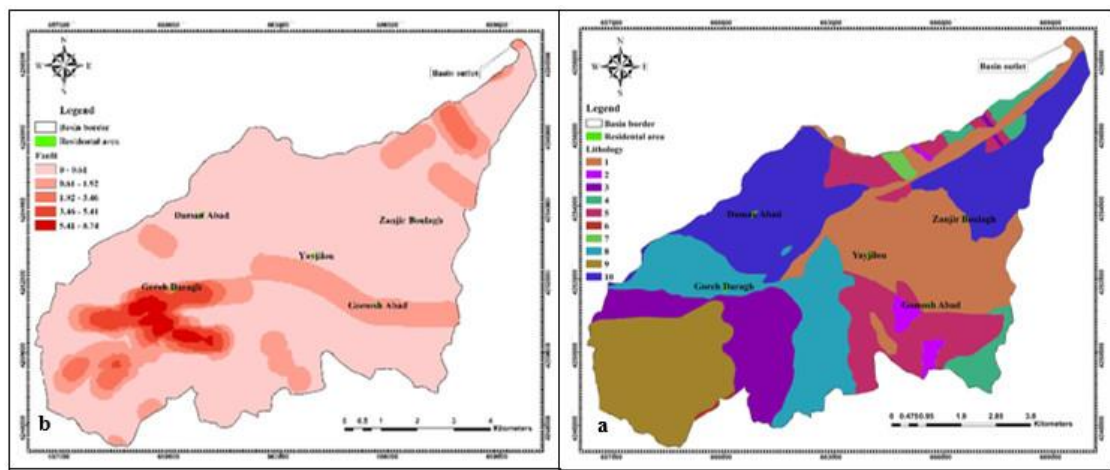
لایه شاخص پوشش گیاهی (NDVI): در مقادیر شاخص پوشش گیاهی از دو نوار ۵ (RED) و نوار ۴ (NIR) تصاویر لندست ۸ و شاخص پوشش گیاهی نرمال شده NDVI (رابطه ۳) استفاده شد (شکل ۵- b).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (3)$$

لایه شیب بر اساس مدل رقومی ارتفاع در محیط GIS تهیه شد (شکل ۴- e).

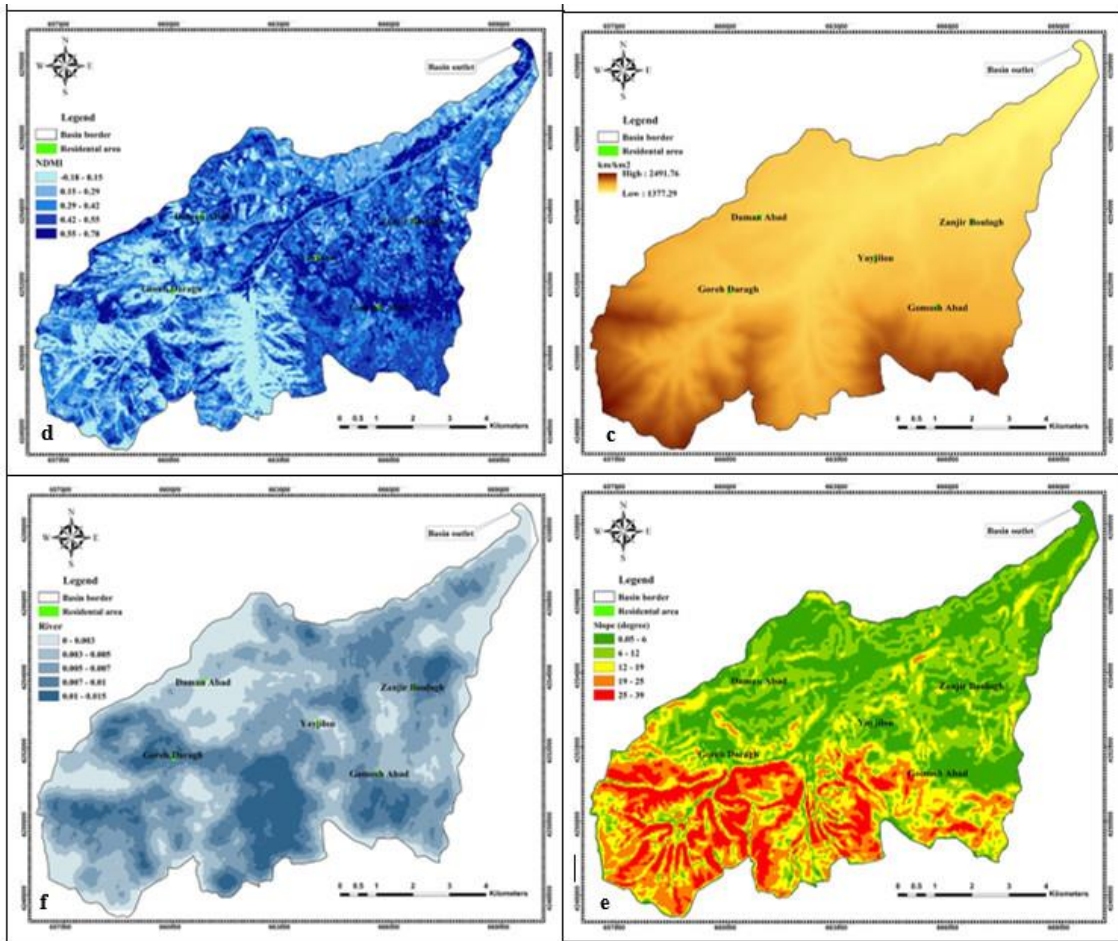
لایه تراکم آبراهه: یک حوضه زهکشی، یک واحد طبیعی تخلیه رواناب به یک نقطه مشترک است. شبکه زهکشی در تشریح حوضه‌ها کمک می‌کند. تراکم زهکشی و نوع زهکشی اطلاعات مربوط به رواناب و نفوذپذیری را ارائه می‌دهد. بافت زهکشی درشت رسوبات سنگین متخلخل و نفوذپذیر را نشان می‌دهد؛ در حالی که بافت زهکشی خوب در سازه‌های کمتر نفوذ راجع است. گسل‌های عمده و برخی شکستگی‌ها گاهی اوقات دو یا چند حوضه زهکشی را متصل می‌کنند و به‌عنوان کانال‌ها عمل می‌کنند.

الگوی تخلیه، ویژگی‌های سطح و همچنین شکل زیرزمین را نشان می‌دهد (Horton, 1945). تراکم زهکشی بالا به علت مواد زیرسطحی ضعیف یا غیرقابل نفوذ، پوشش گیاهی کم است. تراکم زهکشی کم منجر به بافت زهکشی درشت می‌شود، در حالی که تراکم زهکشی بالا منجر به بافت زهکشی خوب می‌شود. تراکم زهکشی رواناب را در یک منطقه مشخص می‌کند یا به عبارت دیگر، میزان نسبی آب بارشی که می‌تواند نفوذ



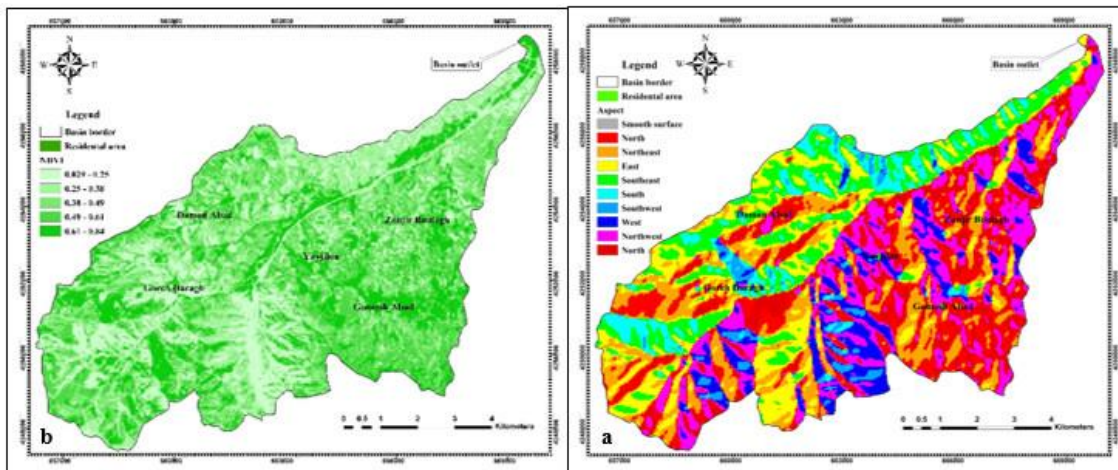
شکل ۴- نقشه‌های تهیه شده برای پتانسیل یابی a: لایه لیتولوژی، b: لایه تراکم گسل و شکستگی‌ها، c: لایه اختلاف ارتفاع، d: لایه شاخص رطوبت (NDMI)، e: لایه شیب، f: لایه تراکم آبراهه‌ها

Fig. 4. The maps prepared for potential detection a: Lithology layer, b: Fault and fracture density layer, c: Topography layer, d: NDMI, e: Slope layer, f: River density layer



ادامه شکل ۴

Fig. 4. Continued



شکل ۵- نقشه‌های تهیه شده برای پتانسیل یابی a: لایه جهت شیب، b: لایه شاخص پوشش گیاهی (NDVI)

Fig. 5. The maps prepared for potential detection a: Aspect layer, b: NDVI layer

روش AHP با یکدیگر مقایسه و وزن نسبی هر لایه تعیین شد (جدول ۱).

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) - به منظور پتانسیل‌یابی حوضه گویچه‌بل، لایه‌های تهیه شده بر اساس اهمیت نسبی هر یک، با استفاده از



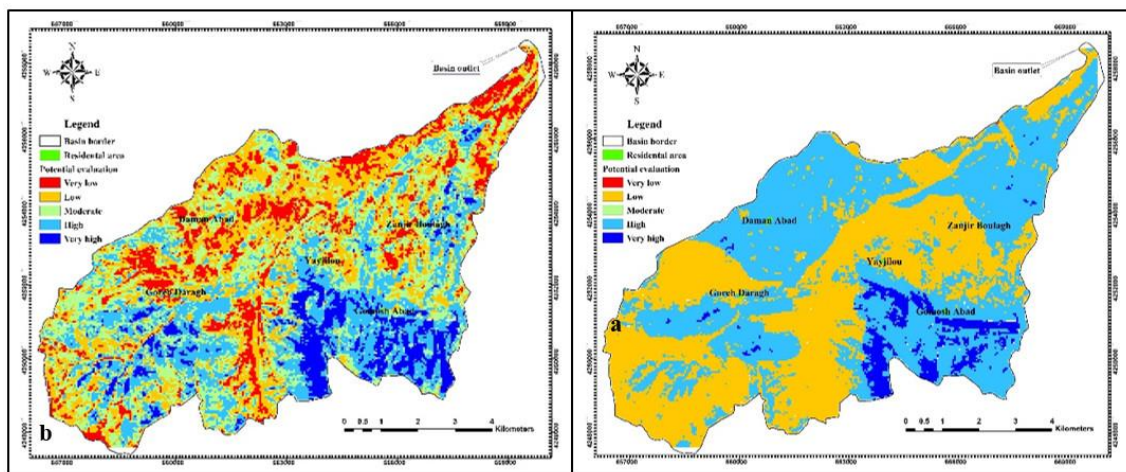
جدول ۱- ماتریس مقایسه دوتایی و وزن نسبی تعیین شده

Table 1. Pairwise comparison matrix and determined relative weight

Criterion	Lithology	Fault	Topography	NDMI	Slope	Rivrr	Aspect	NDVI	Weight of relative
Lithology	1	2	2	4	5	6	6	7	0.31
Fault	0.5	1	2	3	4	5	5	6	0.23
Topography	0.5	0.5	1	2	3	4	4	5	0.16
NDMI	0.25	0.33	0.5	1	2	3	3	4	0.10
Slope	0.2	0.25	0.33	0.5	1	2	2	3	0.6
River	0.16	0.2	0.25	0.33	0.5	1	1	2	0.4
Aspect	0.16	0.2	0.25	0.33	0.5	1	1	2	0.4
NDVI	0.14	0.16	0.2	0.25	0.33	0.5	0.5	1	0.3

روش میانگین گیری وزنی درجه ای (OWA) -  
 در این روش با استفاده از نقشه های رستری به دست آمده، نقشه های فازی تهیه و در نرم افزار ARC GIS، نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی به دست آمد (شکل ۶- b). بر اساس نقشه حاصل شده، نواحی جنوب غربی حوضه بیشترین پتانسیل را از لحاظ منابع آب زیرزمینی دارا هستند.

روش هم پوشانی وزنی (WO) -  
 با تأثیر وزن های نسبی به دست آمده از فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) روی لایه های رستری ایجاد شده به نسبت تأثیری که در پتانسیل یابی دارند، وزنی بین ۱ تا ۹ اختصاص داده شد. سپس لایه ها در بخش weighted overlay هم پوشانی پیدا کردند تا نقشه نهایی پتانسیل به دست آید (شکل ۶- a). نواحی جنوب شرقی و جنوب غربی حوضه دارای بیشترین پتانسیل از نظر منابع آب زیرزمینی هستند.



شکل ۶- نقشه پتانسیل منابع آب زیرزمینی a: بر اساس روش WO، b: بر اساس روش OWA  
 Fig. 6. Map of the potential of groundwater resources a: based on the WO method, b: based on the OWA method

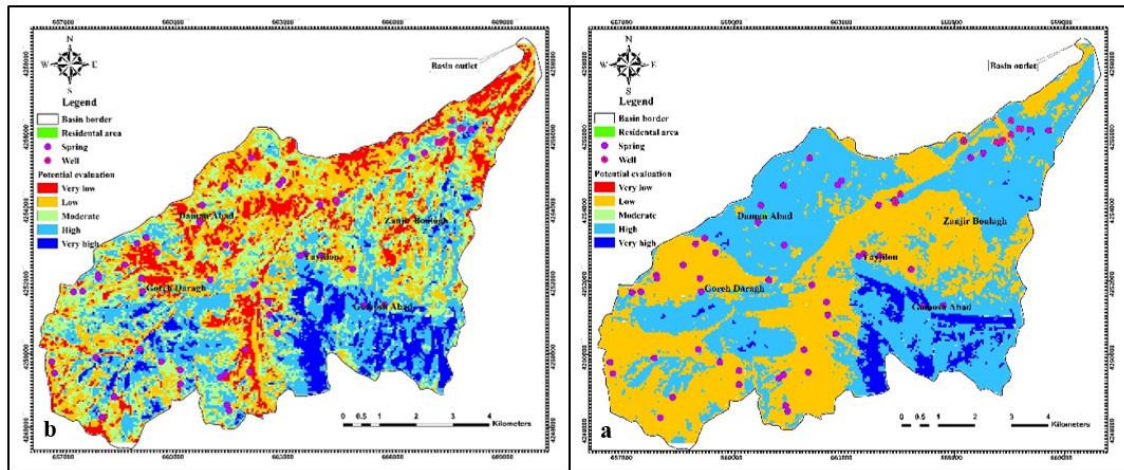
مناطق با پتانسیل منابع آبی مختلف بر اساس جدول ۲ نشان می دهد که در هر دو روش در حدود ۵۰ درصد چشمه ها در مناطق با پتانسیل متوسط به بالا قرار گرفته اند. همچنین نتایج صحت سنجی نشان می دهد که نقشه پتانسیل یابی با روش OWA بیشترین انطباق را با موقعیت چشمه ها دارد.

صحت سنجی نقشه ها: در آخرین مرحله به منظور صحت سنجی نقشه های حاصل از دو روش OWA و WO، از چشمه های موجود و چاه های حفر شده در سازندهای سخت حوضه استفاده شد. با توجه به این که تراکم چشمه ها بیانگر وجود منابع آب زیرزمینی در منطقه است، از موقعیت چشمه ها برای صحت سنجی نقشه های پتانسیل یابی بهره گرفته شد (شکل های ۷- a و ۷- b). بررسی ارتباط بین تعداد چشمه ها و چاه ها و

جدول ۲- ارتباط بین روش‌های OWA و Weighed overlay با چشمه‌ها برای حوضه گویجه بل

Table 2. Correlation between OWA and Weighted overlay methods with springs for Goijeh Bel basin

WO method			OWA method		
Groundwater resource potential	Number of springs	Percentage of springs	Groundwater resource potential	Number of springs	Percentage of springs
Very low	0	0	Very low	9	15
low	33	53	low	18	29
Moderate	0	0	Moderate	22	35
High	28	45	High	10	16
Very high	1	2	Very high	3	5



شکل ۷- نقشه صحت‌سنجی پتانسیل منابع آب زیرزمینی a: براساس روش WO و b: بر اساس روش OWA

Fig. 7. Validation map of groundwater resources potential a: based on WO method and b: based on OWA method

الکتریکی، میزان املاح محلول، میزان یون کلر و کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه از نظر شرب در منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

**تغییرات هدایت الکتریکی و میزان عناصر اصلی در آب زیرزمینی:** با توجه به مقادیر هدایت الکتریکی اندازه‌گیری شده در سطح منطقه نقشه پلان تغییرات EC در سطح حوضه تهیه شد (شکل ۸- a). این نقشه نشان می‌دهد که مقدار EC از ارتفاعات به طرف خروجی حوضه افزایش می‌یابد و روند کلی تغییرات آن حاکی از افزایش EC از بالادست جریان به طرف پایین‌دست است که مؤید جهت جریان آب زیرزمینی منطقه نیز است.

به طوری که در زیرحوضه G2 مقدار EC در نمونه S1 (روستای گمش‌آباد) ۳۲۵ میکروزیمنس بر سانتی‌متر و در نمونه S2 (چشمه شرشر) به ۳۸۱ میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌رسد. در حوضه گویجه‌بل واحد شورکننده اصلی واحد مارنی Mm1 است که در شمال حوضه قرار گرفته است ولی این واحد مساحت زیادی ندارد. بخش

بررسی کیفی امکان استفاده از آب‌های سازند سخت برای تأمین آب شرب: برای بررسی وضعیت هیدروشیمیایی آب‌های زیرزمینی منطقه، در ضمن بازدید از حوضه مورد مطالعه از پنج منبع آب زیرزمینی و آب رودخانه گویجه‌بل نمونه آب تهیه و به آزمایشگاه ارسال شد تا مورد تجزیه هیدروشیمی قرار گیرد. با توجه به اینکه زمان نمونه‌برداری انتهای فصل خشک بود، بنابراین آب رودخانه گویجه‌بل مربوط به دبی پایه این رودخانه بوده، کاملاً از طریق چشمه‌ها و آب زیرزمینی تأمین می‌شد، به همین دلیل می‌توانست نماینده وضعیت آب زیرزمینی حوضه باشد.

این نتایج شامل تحلیل هشت یون اصلی و اندازه‌گیری پارامتر TDS<sup>۱</sup> و pH و محاسبه سه پارامتر SAR<sup>۲</sup>، Na<sup>۳</sup> و TH<sup>۴</sup> است. پارامتر EC<sup>۴</sup> چون تا زمان انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه تغییر می‌کند. به همین دلیل، مقدار این پارامتر بلافاصله پس از نمونه‌برداری در محل، اندازه‌گیری شد. در این بررسی، وضعیت هدایت

<sup>4</sup> Electrical Conductivity

<sup>1</sup> Total Dissolved Solids

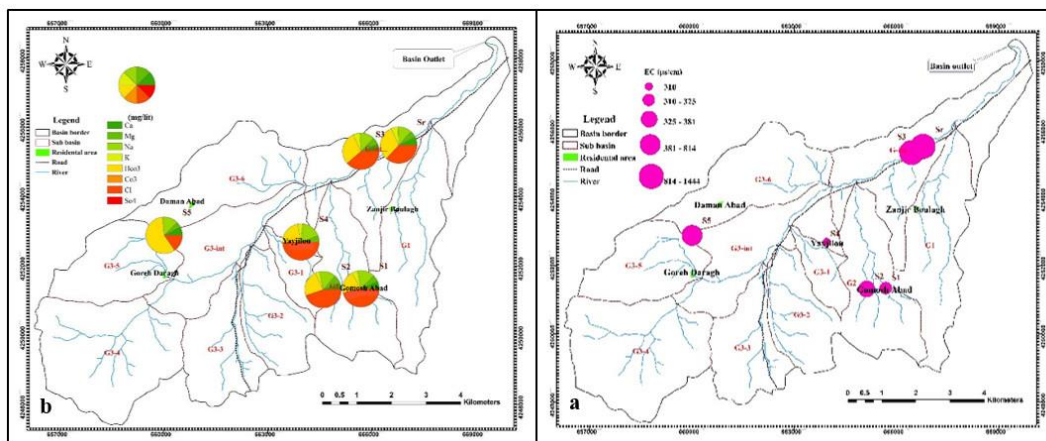
<sup>2</sup> Specific Absorption Rate

<sup>3</sup> Total Hardness

بر اساس عناصر اصلی موجود در نمونه‌ها، نقشه تغییرات عناصر اصلی تهیه شد (شکل ۸- b). تغییرات یون کلر برای حوضه گویجه‌بل دقیقاً همانند تغییرات EC است به عبارت دیگر به نظر می‌رسد نقش کلر (و به تبع آن سدیم) در شوری منابع آب زیرزمینی منطقه بیش از سایر یون‌ها است. واحدهای مارنی و شیلی از مهمترین منابع تامین کننده کلر و سدیم موجود در آب زیرزمینی است. بیشترین غلظت یون کلر مربوط به آب رودخانه گویجه‌بل و کمترین غلظت آن چشمه یایجیلو است که به ترتیب در پایین دست و بالادست جریان آب زیرزمینی حوضه قرار دارند. بخشی از کلر مشاهده شده در نمونه رودخانه گویجه‌بل و چشمه پل دایلار مربوط به نمک پاشی جاده به خصوص در محدوده گردنه گویجه‌بل است که در زمستان به طور مکرر دچار یخبندان می‌شود. در مورد بی‌کربنات نیز بیشترین میزان آن مربوط به نمونه گوره‌درق به علت حضور سنگ‌های آهکی در بالادست چشمه بوده، کمترین آن در چشمه‌های یایجیلو و گمش‌آباد مشاهده می‌شود. در مورد سایر عناصر تغییرات قابل توجهی در نمونه‌ها دیده نمی‌شود.

شیلی واحدهای کرتاسه و پلیوسن نیز به طور جزئی باعث افزایش EC و شوری نسبی آب‌های زیرزمینی منطقه شده است. کمترین مقدار EC در منابع انتخابی تحلیل شده مربوط به نمونه S4 (چشمه یایجیلو) در مرکز حوضه است. مقادیر EC در نمونه‌های S1 و S2 نیز کم است. هر سه چشمه فوق در زیرحوضه‌هایی قرار گرفته‌اند که منحصرأ از واحدهای آتشفشانی و آذرآواری تشکیل شده‌اند.

بیشترین مقادیر EC به نمونه S3 (چشمه پل دایلار) و رودخانه گویجه‌بل (نمونه Sr) مربوط می‌شود که نزدیک خروجی بوده، در پایین دست واحدهای شورکننده حوضه (واحدهای شیلی Pec) (با ترکیبات سنگ‌های کربناته تخریبی و پلاژیک، کوارتزیت‌ها، شیل‌ها، کنگلومراهای کهن‌تر و قطعات سنگ‌های آتشفشانی و دگرگونی کهن)، K-Pef (با ترکیبات طبقات ماسه‌سنگی، ماسه‌سنگ آهکی، سنگ آهک‌های ماسه‌ای، شیل‌ها، شیل‌های آهکی و سیلتستون‌ها) و Pesh (با ترکیب شیل و سنگ آهک‌های تخریبی)) قرار دارند.



شکل ۸- a: تغییرات میزان هدایت الکتریکی و b: تغییرات عناصر اصلی در حوضه گویجه‌بل  
 Fig. 8. a: Changes in electrical conductivity and b: Changes in the main elements in Goyjeh Bel Basin

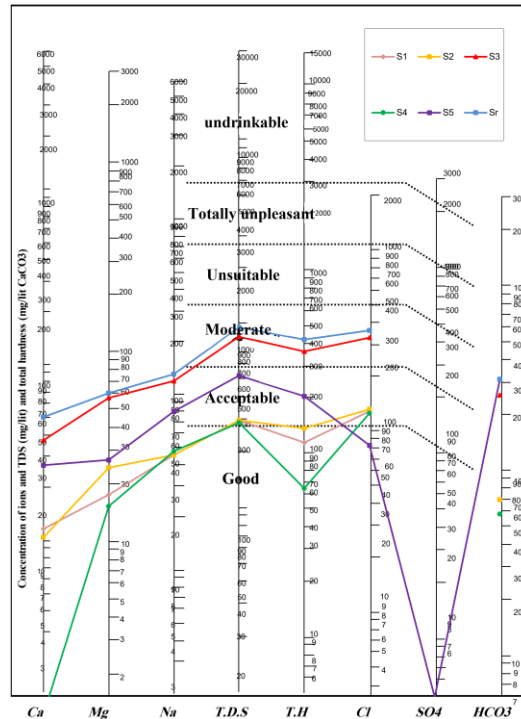
برای بررسی کیفیت آب از نظر شرب از نمودارهای لگاریتمی شولر استفاده شده است. این دیاگرام نشان می‌دهد (شکل ۹) که چشمه‌های شرشر، گمش‌آباد و یایجیلو کیفیت بسیار بالایی برای آشامیدن دارند و در رده خوب قرار دارند. ولی چشمه پل دایلار، گوره‌درق و آب رودخانه گویجه‌بل کیفیت قابل قبول تا نامناسب دارند. با توجه به این دیاگرام‌ها، بخش

کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب: آب آشامیدنی باید فاقد رنگ، بو و طعم بوده و به لحاظ عناصر و مواد شیمیایی موجود در آن در محدوده مجاز که به‌وسیله سازمان‌های بهداشتی تعیین شده است قرار گیرد. به‌طور مثال pH مطلوب برای آب شرب ۷-۸/۵ است و یا همانطور که قبلاً اشاره شد غلظت یون کلر در آب آشامیدنی نباید بیش از ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر باشد.

شرب منابع آب در سازندهای سخت و کارستی غرب ارومیه دارای آب با کیفیت خوب برای شرب است (Jafarian et al., 2018). طبیعی است صرفاً اکتفا کردن به این دیگرام برای صدور مجوز شرب منطقی نیست و لازم است غلظت عناصر نادر، فلزات سنگین و سایر آلاینده‌های میکروبی نیز مورد سنجش قرار گیرند.

عمده‌ای از آب‌های زیرزمینی منطقه کیفیت خوبی برای آشامیدن دارند که این وضعیت نتیجه فقدان سازندهای آلاینده مانند واحدهای نمکی، رسی و مارنی وسیع در منطقه است.

موقعیت واحدهای آلاینده نشان می‌دهد که بهترین کیفیت آب‌های زیرزمینی مربوط به جنوب حوضه است و بدترین کیفیت مربوط به چشمه‌های شمال شرق حوضه در محدوده خروجی آن است که مشابه قابلیت



شکل ۹- کیفیت آب از نظر شرب برای چند چشمه انتخابی در حوضه گویجه‌بل

Fig. 9. Water quality in terms of drinking for some selected springs in the Goijeh Bel Basin

استفاده از روش AHP، weighted overlay و OWA نقشه پهنه‌بندی و میزان هم‌پوشانی معیارهای در نظر گرفته شده مشخص شد. بر اساس نتایج روش AHP و weighted overlay نواحی جنوب شرقی و جنوب غربی حوضه دارای بیشترین پتانسیل از نظر منابع آب زیرزمینی هستند.

نتایج OWA هم نشان‌دهنده دارا بودن بیشترین پتانسیل در نواحی جنوب غربی حوضه هستند. در هر دو روش در حدود ۵۰ درصد چشمه‌ها در مناطق با پتانسیل متوسط به بالا قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج صحت‌سنجی نشان می‌دهد که نقشه پتانسیل‌یابی با روش OWA بیشترین انطباق را با موقعیت چشمه‌ها دارد و از آنجا که آب شرب روستاهای واقع در مناطق

### نتیجه‌گیری

با مطالعه خصوصیات فیزیکوشیمیایی منابع آب زیرزمینی حوضه گویجه‌بل می‌توان نتیجه گرفت که در محدوده مورد مطالعه از دیدگاه خصوصیات هیدرولیکی، تنها آبخوان‌های نوع آزاد و از دیدگاه جنس بدنه سفره، دو نوع آبخوان آبرفتی و سازند سخت وجود دارد. ارتباط هیدرولیکی بین دو نوع آبخوان آبرفتی و سازند سخت وجود دارد که در بعضی مواقع باعث ایجاد چشمه در محل برخورد این دو نوع آبخوان شده است.

به‌منظور تعیین پتانسیل منابع آب زیرزمینی حوضه گویجه‌بل، لایه‌های اطلاعاتی شامل لیتولوژی، تراکم خطواره‌ها، اختلاف ارتفاع، شاخص رطوبت، شیب، تراکم آبراهه، جهت شیب و شاخص پوشش گیاهی تهیه و با

سیلاب و رسوب می‌تواند منجر به افزایش نفوذپذیری شده و میزان تغذیه از طریق نزولات جوی را افزایش دهد.

هرچه قدر میزان نفوذ افزایش یابد منجر به تغذیه آبخوان خواهد شد. عملیات بیولوژیک که شامل افزایش پوشش گیاهی است و نیز برنامه‌های آبخیزداری و کنترل سیل و رسوب می‌تواند به نگهداشت رواناب در روی سازندهای سخت، کاهش سرعت آن و در نتیجه افزایش نفوذپذیری آن کمک کند. هر کار آبخیزداری که منجر به کاهش سرعت روانابها، معطل شدن آب باران و در نتیجه نفوذ آن شود، می‌تواند به تغذیه آبخوان‌های سازند سخت کمک کند.

### تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از شرکت آرمان گستر آتیه به‌دلیل در اختیار گذاشتن بخشی از اطلاعات مورد استفاده، صمیمانه قدردانی می‌شود.

### تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

مرتفع در حوضه گویجه بل و در بیشتر مناطق کشور وابسته به چشمه‌ها است و این چشمه‌ها از سازندهای سخت ناشی می‌شوند، این چشمه‌ها می‌تواند منبع مناسبی برای مدیریت صحیح آب شرب باشد. مقدار شوری و TDS از ارتفاعات به طرف مرکز حوضه و خروجی آن افزایش می‌یابد و روند کلی تغییرات آن حاکی از افزایش آن از جنوب غرب به طرف شمال شرق است که مؤید جهت جریان آب زیرزمینی نیز است.

به طوری که کمترین مقدار EC مربوط به نمونه S4 (چشمه یایجیلو) با مقدار ۳۱۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر در مرکز حوضه است و بیشترین مقادیر مربوط به نمونه S3 (چشمه پل دایلار) و رودخانه گویجه بل (نمونه Sr) با میزان حدودی ۱۴۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر نزدیک خروجی بوده و در پایین‌دست واحدهای شورکننده حوضه قرار دارند. بخش عمده‌ای از آب‌های زیرزمینی محدوده کیفیت خوبی برای آشامیدن دارند که این وضعیت نتیجه عدم وجود سازندهای آلاینده مانند واحدهای نمکی، رسی و مارنی در منطقه است. بنابراین نتایج حاصل شده از روش OWA، هدف اصلی این پژوهش که بررسی پتانسیل آب زیرزمینی در سازندهای سخت است را به دست می‌دهد. در منطقه گویجه بل، عملیات آبخیزداری به روش بیولوژیک و یا از طریق ساخت سازه‌های کنترل

### منابع مورد استفاده

- Adesunloro, G.M., Olumodeji, I., Itakorode, O.D., 2022. Geo-electrical investigation of ground water potential using vertical electrical sounding. *J. Advanc. Res. Rev.* 15, 322-329.
- Aghanabati, A., 2004. *Geology of Iran*. Geological Organization of The Country (in Persian).
- Alavi Panah, K., 2006. *Application of remote sensing in earth science*. Iran: University of Tehran, 496 pages (in Persian).
- Asghari Moghaddam, A., 2010. *Principles of groundwater knowledge*. First Edition. Publications of University of Tabriz. 349 pages (in Persian).
- Ayazi, M.H., Pirasteh, S., Rizvi, S.M., Safari, H., Ramli, F.M., Pradhan, B., S.M. Rizvi, S.M., 2010. Using ERS-1 synthetic aperture radar for flood delineation, Bhuj Taluk, Kuchch District Gujarat, India. *Int. Geoinform. Res. Dev. J.* 1, 13-22.
- Benjmel, K., Amraoui, F., Boutaleb, S., Ouchchen, M., Tahiri, A., Touab, A., 2020. Mapping of groundwater potential zones in crystalline terrain using remote sensing, GIS techniques, and multicriteria data analysis, case of the Ighrem Region, Western Anti-Atlas, Morocco. *J. Water.*
- Bhuvaneshwaran, C., Ganesh, A., Nevedita, S., 2015. Spatial analysis of groundwater potential zones using remote sensing, GIS and MIF techniques in upper Odai sub-watershed, Nandiyar, Cauvery basin, Tamilnadu. *Int. J. Curr. Res.* 7, 20765-20774.
- Binh, T.N.K.D., Vromant, N., Hung, N.T., Hens, L., Boon, E.K., 2005. Land cover changes between 1968 and 2003 in Cai Nuoc, Ca Mau Peninsula, Vietnam. *J. Environ. Develop. Sustain.* 7, 519-536.
- Chowdhury, A., Jha, M.K., Machiwal, D., 2003. Application of remote sensing and GIS in groundwater studies: an overview. *Proceedings of The International Conference on Water and Environment (WE-2003)*. *J. Ground Water Pollu.* 39-50.

- Das, S., 2017. Delineation of groundwater potential zone in hard rock terrain in Gangajalghati block, Bankura district, India using remote sensing and GIS techniques, *Model. J. Earth Syst. Environ.* 3, 1589-1599.
- Ebrahimi, M., 2010. Calculating the vegetation percentage using artificial neural networks and plant indices to improve the modified vertical drought index (Shitour Basin, Yazd). MSc Thesis, 15 pages (in Persian).
- Falah, F., Daneshfar, M., Ghorbaninejad, S., 2017. Application of the statistical index model in groundwater potential mapping in the Khorramabad Plain. *J. Water Sustain. Develop.* 4, 89-98 (in Persian).
- Feizizadeh, B., Blaschke, T., 2013. GIS-multicriteria decision analysis for landslide susceptibility mapping: comparing three methods for the Urmia lake basin, Iran. *J. Nat. Hazards* 65, 2105-2128.
- Firouzi, F., Tavosi, T., Mahmoudi, P., 2019. Investigating the sensitivity of NDVI and EVI vegetation indices to dry and wet years in arid and semi-arid regions, case study: Sistan plain, Iran. *J. Geograph. Data (SEPEHR)*, 28, 163-179 (in Persian).
- Ghimire, M., Chapagian, P.S., Shrestha, S., 2017. Mapping of groundwater spring potential zone using geospatial techniques in the Central Nepal Himalayas: A case example of Melamchi-Larke Area. *J. Earth Syst. Sci.* 17, 00305.
- Hardisky, M.A., Klemas, V., Smart, R.M., 1983. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogram. Engin. Remote Sens.* 49, 77-83.
- Haridas, V.R., Aravindan, S., Girish, G., 1998. Remote sensing and its applications for groundwater favourable area identification. *Q JGARC.* 6, 18e22.
- Horton, R.E., 1945. Erosional development of streams and their drainage density: hydrophysical approach to quantitative geomorphology. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 56, 275-370.
- Jafarian, H., Vaezihir, A., Pirkharati, H., 2018. Determining the factors affecting the hydrochemistry of groundwater resources in the hard and karst formations of western Urmia. *J. Hydrogeomorph.* 15, 75-94 (in Persian).
- Kao, J.J., Lin, H.Y., 1997. Multifactor Spatial analysis for landfill siting. *J. Environ. Engin.* 122, 902-908.
- Koh, C.N., Lee, P.F., Lin, R.S., 2006. Bird species richness patterns of northern Taiwan: primary productivity, human population density, and habitat heterogeneity. *J. Diver. Distribu.* 12, 546-554.
- Magesh, N.S., Chandrasekar, N., Soundranayagam, J.P., 2011. Morphometric evaluation of Papanasam and Manimuthar watersheds, parts of Western Ghats, Tirunelveli district, Tamil Nadu India: a GIS approach. *J. Environ. Earth Sci.* 64, 373-381.
- Morawitz, D., Blewett, T., Cohen, A., Alberti, M., 2006. Using NDVI to assess vegetative land cover. 277-295.
- Murray, J., Ogden, A.T., Mcdaniel, P.M., 2003. Development of a GIS database for ground water recharge assessment of the Palo use. *J. Soil Sci.* 11, 759-768.
- Nabavi, M., 1976. An introduction to the geology of Iran. Geological Organization of the country.
- Panabokke, C.R., Perera, A.P.G.R.L., 2005. Groundwater resources of sri lanka. Sri Lanka: Water Resources Board, Chapter 1, 29 pages.
- Panel, P., Larsson, I., 1984. Ground water in hard rocks. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 234 pages.
- Rahnama, M., Aquajni, H., Fattahi, M., 2012. Integrating multi-criteria evaluation techniques with geographic information Systems for landfill site selection: a case study using ordered weighted average in Mashhad. *J. Geograph. Environ. Hazard.* 1, 87-106 (in Persian).
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings, Third ERTS Symposium, NASA SP-351*, 1, 309-317.
- Saaty, T.L., 1977. Scaling method for priorities in hierarchical structures. *J. Math. Psychol.* 15, 234-281.
- Saaty, T.L., 1987. Exploring the interface between the hierarchies, multiple objectives and the fuzzy sets, *Fuzzy Set. Syst.* 1, 57-68.
- Saaty, T.L., 1980. *The analytical hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation.* McGraw-Hill, London, England, 287 pages.
- Saaty, T.L., 1982. *Decision making for leaders,* Lifetime Learning Publications, Belmont, CA, 291 pages.
- Saaty, T.L., 1986. *Decision making for leaders: The analytic hierarchy process for decisions in complex environments,* RWS, Pittsburgh, 199 pages.
- Saaty, T.L., 1988. *Multicriteria decision making: The analytic hierarchy process,* RWS, Pittsburgh.
- Saaty, T.L., Alexander, J.M., 1989. *Conflict resolution: The analytic hierarchy approach.* *J. Computer Sci.*
- Saaty, T.L., Vargas, L.G., 1991. *Prediction, projection and forecasting.* Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 251 pages.
- Sahu, A., 2014. Identification and mapping of the water-logged areas in Purba Medinipur part of Keleghai river basin, India: RS and GIS methods. *J. Adv. Geosci.* 2, 59-65.

- Sedaghat, M., 1999. Land and water resources (groundwaters), Payam Noor University Publications (in Persian).
- Singhal, B.B.S., 2008. Nature of Hard Rock Aquifers: Hydrogeological Uncertainties and Ambiguities, Dynamics in hard rock aquifers, Chapter 2, 20-39 pages.
- Sisay, L., 2007. Application of remote sensing and GIS for groundwater potential zone mapping in Northern Ada'a plain (Modjo catchment). J. Earth Sci.
- Sivaramakrishnan, J., Asokan, A., Sooryanarayana, K.R., Hegde, S.S., Benjamin, J., 2015. Occurrence of Ground Water in Hard rock under distinct Geological setup. International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering, India. J. Aqua. Procedia 4, 706-712.
- Teimouri, M., Asadi, A., 2021. Delineation of groundwater potential zones in Torbate Jam district using maximum entropy and AHP methods. J. Watershed Engin. Manage. 13, 339-354 (in Persian).
- Vaezihir, A., Tabarmayeh, M., 2016. Evaluation of potential groundwater resources in fractured rocks using AHP and SAW methods, case study: Almaneh Basin, Marivan, Iran. J. Water Soil 30, 1461-1477 (in Persian).
- Vaezihir, A., Vafadar, M., Aghaie, V., 2019. Evaluation of groundwater potential in the karstic and hard rock formations of Moro Mountain using AHP, SAW and F-AHP methods. J. Geograph. Space 18, 215-234 (in Persian).
- Waikar, M.L., Nilawar, A.P., 2014. Identification of groundwater potential zone using remote sensing and GIS Technique. Int. J. Innov. Res. Sci. Engin. Technol. 3, 12163-12174.
- Yager, R.R., 1991. Connectives and quantifiers in fuzzy sets. J. Fuzzy Sets Syst. 40, 39-76.