

مقدمه

آب‌های زیرزمینی یکی از مهم‌ترین و فراوان‌ترین منابع آبی شیرین هستند که ۹۷ درصد آب شیرین دنیا (به جز یخچال‌ها و یخ‌های قطبی) را تشکیل می‌دهند، ولی متأسفانه در بین اغلب جوامع اهمیت آن ناشناخته است [۱۵]. از این رو، اقدامات زیست‌محیطی پایدار برای حفاظت و مدیریت مناسب آن یا انجام نمی‌شود یا بسیار دیر انجام می‌شود. لذا، برداشت بی‌رویه آب از این منابع، باعث شده تقریباً در اکثر دشت‌های ایران مقدار تغذیه در اثر بارش و یا آب برگشتی آبیاری کم‌تر از مقدار تخلیه در اثر برداشت شود [۴، ۵ و ۲۶]. بدین جهت، حفظ کیفیت منابع آبی از اهمیت فراوان برخوردار است و آلودگی و افت کیفیت آن باعث می‌شود این منابع غیرقابل استفاده شده و موجب به خطر افتادن سلامت انسان شود [۷ و ۲۲].

در تجزیه و تحلیل آب‌های زیرزمینی، تعیین غلظت عناصر و املاح موجود در آب از ارزش و اهمیت بسزایی برخوردار است؛ بنابراین در طراحی سامانه‌های آبی در تأمین آب کشاورزی، آب شرب، آب موردنیاز صنعت و تعیین تیپ غالب آب و نوع آن از مقادیر غلظت املاح استفاده می‌شود [۳۳، ۳۶ و ۲۹]. منیزیم، سدیم و پتاسیم از عناصر مهم موجود در آب و خاک هستند که در کشاورزی نیز اهمیت زیادی دارند. غلظت بالای این عناصر در آب باعث ایجاد طعم نامطلوب در آن می‌شود. از طرفی غلظت بالای سولفات منیزیم و سولفات سدیم مزه آب را تلخ می‌کند و آب‌هایی که کلر آن‌ها زیاد است شورمه می‌باشند. هم‌چنین از دیگر عناصر مهم آب به‌خصوص در کشاورزی می‌توان به کلسیم، منیزیم و ترکیبات آن‌ها اشاره کرد. البته این دو عنصر ذکر شده به خاطر اهمیت در پارامتر سختی آب، در صنایع نیز دارای اهمیت زیادی هستند. با توجه به اهمیت عناصر بیان‌شده در این بخش، تحقیقات زیادی در زمینه کیفیت آب و بررسی املاح و پارامترهای بیان‌شده با روش‌های مختلف طبقه‌بندی صورت گرفته است [۲۱ و ۳۲].

یکی از مهم‌ترین روش‌هایی که امروزه در تجزیه و تحلیل کیفی منابع آب موردبررسی قرار می‌گیرد روش تحلیل آماری چند متغیره است. این روش دارای سازوکارهای تحلیلی مختلف از جمله خوشه‌بندی است [۸ و ۱۱]. پژوهش‌های زیادی در زمینه بررسی کیفی آب زیرزمینی به روش آماری چند متغیره در ایران و سایر نقاط جهان انجام شده است. دردی محمودی و همکاران [۱۲] به بررسی آب‌های زیرزمینی شهرستان آستانه با کمک تحلیل آماری چند متغیره پرداختند. بر اساس نتایج تحقیق، روش خوشه‌بندی منتج

ارزیابی و طبقه‌بندی کیفی آب زیرزمینی دشت اردبیل

جواد رضانی مقدم^{۱*}، علی رسول‌زاده^۲ و شاهین فضابخش^۳

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۱۱/۰۱ تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۱۱/۲۷

DOI: 10.22034/WMI.2024.2020912.1050

چکیده

ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی در هر منطقه از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش وضعیت کیفی آب زیرزمینی دشت اردبیل موردبررسی قرار گرفته است. بدین منظور از منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل ۳۲ نمونه آب از چاه‌های مختلف جمع‌آوری و پارامترها و عناصر کیفی مهم آن (به‌طور نمونه هدایت الکتریکی، اسیدیته، سدیم، منیزیم، کلر، بی‌کربنات و سختی آب) اندازه‌گیری شدند. کیفیت آب زیرزمینی، با استفاده از دیاگرام گیبس و تحلیل خوشه‌ای موردبررسی قرار گرفت. نسبت گیبس I و II به ترتیب از ۰/۱۱ تا ۰/۸۳ و ۰/۱۶ تا ۰/۸۶ با میانگین ۰/۳۶ و ۰/۵۷ متغیر بود. بیش‌تر نمونه‌های آب، مربوط به ناحیه غالب برهم‌کنش سنگ-آب بودند. هم‌چنین بر اساس آنالیز خوشه‌ای، کیفیت خوشه اول و دوم (در نمودار شولر) از نظر شرب به ترتیب در محدوده مناسب و نامناسب قرار گرفتند. از طرفی بر اساس طبقه‌بندی ویلکوکس، آب زیرزمینی مورد مطالعه به چهار طبقه تقسیم شد که بهترین کیفیت مربوط به طبقه C2-S1 (تقریباً مناسب کشت) بود. به‌طور کلی می‌توان گفت کیفیت آب زیرزمینی در خوشه دوم برای مصارف کشاورزی و شرب مضر بوده ولی خوشه اول برای مصارف کشاورزی و شرب تقریباً مناسب بود.

واژگان کلیدی: آبخوان اردبیل، تحلیل خوشه‌ای، شاخص

WQI، نمودار پایپر.

۱- استادیار دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی،
Email: j_ramazani@uma.ac.ir

۲- استاد دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی

به پیدایش سه خوشه شد که خوشه اول نامناسب‌ترین و خوشه سوم مناسب‌ترین کیفیت را داشتند. هم‌چنین از دیدگاه کشاورزی، کیفیت آب مناسب بود و آب‌های قسمت میانی دشت، دارای بهترین کیفیت بود. نصرتی و همکاران [۲۵] به مطالعه و ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی شهرستان ملارد، استان تهران با استفاده از تحلیل آماری چند متغیره (روش تحلیل خوشه‌ای) پرداختند. نتایج نشان داد در تحلیل خوشه‌ای کیفیت آب در خوشه سوم از مطلوبیت پایین‌تری برخوردار بود و در هر خوشه سه عامل به‌عنوان مهم‌ترین عامل‌های کیفیت آب با مجموع واریانس ۹۲/۸، ۸۳/۲ و ۸۸/۹ به ترتیب در خوشه همگن یک، دو و سه تغییرات کیفیت آن خوشه را توجیه می‌کردند. خورانورانگا و خالد [۱۹] با استفاده از شاخص کیفیت آب و روش‌های آماری چند متغیره کیفیت آب زیرزمینی منطقه بلوچستان پاکستان را ارزیابی کردند. نتایج روش‌های آماری چند متغیره نشان داد فعالیت‌های انسانی و طبیعی در تغییر هیدروشمی آب زیرزمینی منطقه دخالت دارد و باید اقدامات لازم جهت حفظ سلامت افراد محلی آن منطقه در مصرف آب زیرزمینی موردتوجه قرار گیرد. ترابلسی و زواری^۲ [۳۸] با استفاده از مدل‌سازی ژئوشیمیایی و روش‌های آماری چند متغیره شامل تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی و تحلیل مؤلفه اصلی، کیفیت آب زیرزمینی شمال و شمال‌شرقی تونس را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد کیفیت آبخوان در اثر عوامل مختلف، از جمله ساختار زمین‌شناسی آبخوان و هم‌چنین فعالیت انسانی، الگوی شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی تغییر کرده و سبب شده مقدار نیترات در ۸۴ درصد چاه‌های واقع در منطقه آبیاری حوضه، افزایش یابد.

سبزواری و همکاران [۳۴] با کمک نمودار ویلکوس و شولر، منابع آب زیرزمینی دشت بروجرد- درود را از دیدگاه کشاورزی و شرب بررسی کردند. نتایج تحقیق بیانگر بهبود ۳۰ درصدی کیفیت آب بین دو بازه زمانی سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۵ بود. هم‌چنین آب زیرزمینی بر اساس طبقه‌بندی ویلکوکس دارای کیفیت خوب و قابل‌قبول برای کشاورزی بود.

نصرتی و همکاران [۲۵] مطالعاتی بر روی کیفیت آب استان گلستان (با روش تحلیل آماری) انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که بر اساس شاخص NSFQI، کیفیت آب از بالادست (با مقدار شاخص ۵۵) به سمت پایین‌دست (با مقدار شاخص ۳۵) در منطقه مورد مطالعه کاهش یافته است. هم‌چنین بر اساس این مطالعه، برای مدیریت کیفیت آب، باید بر روی کنترل انتشار بار آلودگی از منابع آلاینده (نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای) تمرکز کرد.

فضابخش و همکاران [۱۵] با استفاده از روش آماری چند متغیره، کیفیت آبخوان اردبیل را بررسی کردند. بر اساس ماتریس همبستگی، غلظت فلزاتی مانند آرسنیک، باریم، اسکاندیم، سیلیسیم، روی و وانادیم همبستگی چندانی با یون‌های اصلی نشان نداد. لذا

این محققین نتیجه گرفتند ورود این عناصر به آب‌های زیرزمینی و آلودگی ناشی از آن به علت فعالیت‌های انسانی است. احمدی [۳] تغییرات کیفی آب زیرزمینی دشت ورامین تهران را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد بر اساس شاخص کیفی آب در سال ۱۳۸۷، ۵۱/۴۲ درصد منطقه دارای آب نامناسب از نظر شرب بود که این مقدار در سال ۱۳۹۷ به ۴۵ درصد کاهش یافته است. فشائی و قوچانیان [۱۴] ارزیابی مکانی متغیرهای کیفی منابع آب زیرزمینی را باهدف کاربرد آن در کشاورزی و شرب را در دشت مه‌ولات- فیض‌آباد انجام دادند. نتایج نشان داد آب منطقه مورد مطالعه از نظر کشاورزی قابل‌استفاده بوده ولی برای شرب در بازه مطلوب قرار نداشت.

همان‌طور که در تحقیقات بالا بیان شد کیفیت آب زیرزمینی در مناطق مختلف کشور با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و طبقه‌بندی شده‌اند. از طرفی انجام تحقیقاتی مشابه برای بررسی کیفی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل که در تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و شرب دشت اردبیل بسیار مهم هستند امری ضروری به نظر می‌رسید. بر اساس گزارش شرکت آب منطقه‌ای اردبیل ۹۵ درصد آب زیرزمینی دشت اردبیل در بخش کشاورزی و بقیه در سایر موارد (به‌خصوص شرب) مصرف می‌شود؛ بنابراین مطالعه حاضر به‌منظور شناخت بهتر فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی غالب بر آبخوان دشت اردبیل و دسته‌بندی کیفی آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل خوشه‌ای، انجام شد.

داده‌ها و روش‌ها

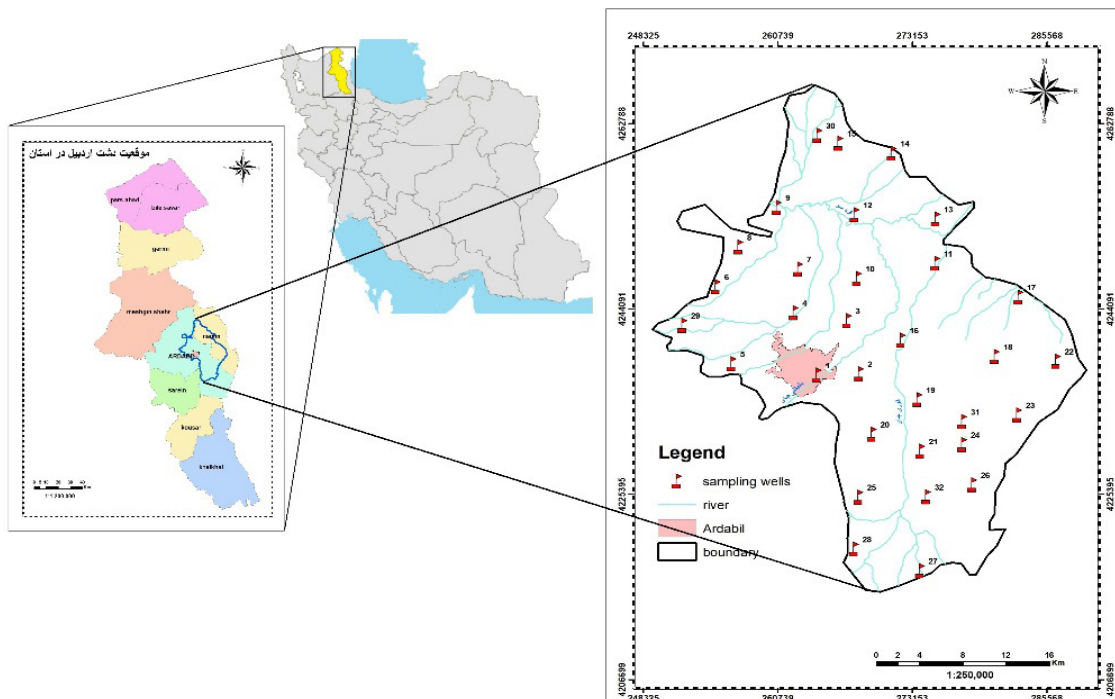
منطقه مورد مطالعه

آبخوان دشت اردبیل در شمال غرب ایران، با مساحت ۱۲۱۷/۱۸ کیلومتر مربع در محدوده بین ۴۵° ۰۸' ۴۸" تا ۳۷° ۳۰' ۴۸" طول شرقی و ۱۵° ۰۲' ۳۸" تا ۳۱° ۳۱' ۳۸" عرض شمالی واقع شده است. شکل ۱ موقعیت چاه‌های نمونه‌برداری را، در دشت اردبیل نشان داده است. دشت اردبیل مشرف بر ارتفاعات بخش غربی رشته‌کوه‌های البرز و در امتداد دامنه شرقی سبلان و با مساحت تقریبی در حدود ۹۹۰ کیلومتر مربع قرار دارد. متوسط بارندگی سالانه در ایستگاه سینوپتیک اردبیل برابر با ۳۰۴ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه برابر با ۹ درجه سانتی‌گراد است. هم‌چنین حداکثر بارش سالانه با ۵۰۱ میلی‌متر نیز در همین ایستگاه در سال ۱۳۸۶-۸۵ و حداقل بارش سالانه با ۱۵۵/۹ میلی‌متر مربوط به سال ۱۳۸۹-۹۰ ایستگاه فرودگاه اردبیل می‌باشد [۱۶].

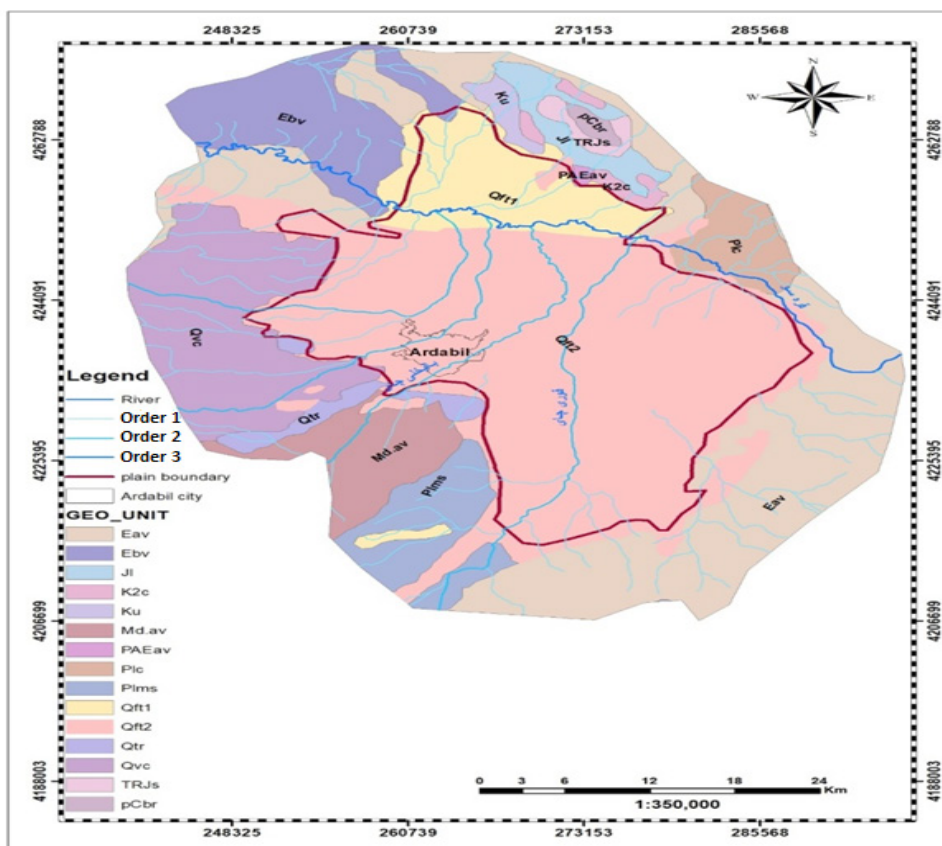
ساختار زمین‌شناسی دشت اردبیل مانند واحد زمین ساختی البرز آذربایجان بوده و غالباً متغیر است. فعالیت‌های تکتونیکی منطقه و فعالیت‌های آتشفشانی کوه سبلان در دوران سوم، عوامل اساسی در شکل‌گیری ساختمان زمین‌شناسی منطقه می‌باشند. گستره رسوبات آبرفتی کواترنری و عصر حاضر در سطح دشت اردبیل قابل‌توجه بوده و سرتاسر دشت و حواشی آن را می‌پوشاند. رسوبات آبرفتی

1. Khanoranga and Khalid

2. Trabelsi and Zouari



شکل ۱: موقعیت دشت اردبیل و چاه‌های نمونه‌برداری کیفیت آب



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی محدوده دشت اردبیل

شمالی دشت دارای واحد زمین‌شناسی Q^{H1} (رسوبات پادگانه آبرفتی قدیمی و مخروط‌افکنه‌ها) است (شکل ۲) [۲۸].

ذکر شده از شن، ماسه، رس و به مقدار بسیار کم کنگلومرا تشکیل شده است. قسمت اعظم دشت اردبیل در واحد زمین‌شناسی Q^{H2} (رسوبات پادگانه آبرفتی جوان و مخروط‌افکنه‌ها) واقع شده و بخشی از قسمت

نمونه برداری و سنجش نمونه‌های کیفیت آب

در این تحقیق که در تابستان سال ۱۳۹۸ انجام شد، از ۳۲ چاه از دشت اردبیل نمونه‌برداری صورت گرفت. نمونه‌ها از خروجی پمپ چاه‌ها بعد از حداقل یک ساعت برداشته و سپس در آزمایشگاه دانشگاه محقق اردبیلی آنالیز شد. در این پژوهش، در انتخاب موقعیت چاه‌ها سعی شد تا حد ممکن نقاط نمونه‌برداری از توزیع مکانی یکنواختی در سطح دشت برخوردار باشند (شکل ۱). همچنین موقعیت جغرافیایی مکان نمونه‌برداری با GPS مدل GARMIN تحت سیستم متریک ثبت شد.

عناصر موردبررسی جهت ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل شامل؛ هدایت الکتریکی آب، اسیدیت، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم، کلرید، فسفر، گوگرد، سولفات، نترات، بی‌کربنات و نسبت جذبی سدیم بودند. این پارامترها به‌خصوص به خاطر اهمیت در بخش کشاورزی که در دشت اردبیل سهم بسزایی از آب به آن اختصاص دارد موردبررسی قرار گرفتند. هرکدام از این عناصر به روش مخصوص خود اندازه‌گیری شدند. مقدار اسیدیت آب با کمک pH متر و سولفات و نترات با دستگاه اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شدند. همچنین کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم، فسفر و گوگرد با کمک دستگاه پلاسمای جفت شده القائی - طیف‌سنج (ICP-MS) اندازه‌گیری شدند [۶]. برای اندازه‌گیری هدایت الکتریکی آب از EC متر استفاده شد و مقادیر غلظت بی‌کربنات و کلرید به روش تیتراسیون تعیین شدند. پارامتر نسبت جذب سدیم (SAR) و سختی کل (TH) از معادلات رایج محاسبه شدند [۳۰]. در این پژوهش، برای تجزیه و تحلیل عناصر کیفی آب زیرزمینی دشت اردبیل از روش تحلیل خوشه‌ای که از روش‌های آماری چندمتغیره است استفاده گردید. همچنین کارهای آماری این تحقیق، با کمک نرم‌افزار SPSS v22 انجام شد.

تحلیل خوشه‌ای شامل روش‌های خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، تجزیه خوشه‌ای چند میانگینی و خوشه‌بندی میانگین فازی می‌باشند. در این پژوهش از روش خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی برای گروه‌بندی نمونه‌های آب زیرزمینی دشت اردبیل استفاده شد. در روش سلسله‌مراتبی نمودار گرافیکی دندروگرامی ارائه می‌شود که در آن خوشه‌بندی به‌صورت خودکار انجام می‌شود ولی در سایر روش‌ها باید تعداد خوشه‌ها از قبل تعیین شوند. همچنین در روش سلسله‌مراتبی یک نمونه می‌تواند به‌تنهایی تشکیل یک خوشه را بدهد [۱۳]. نمونه‌های آب زیرزمینی با روش سلسله‌مراتبی و روش اتصال وارد گروه‌بندی شدند. همچنین برای اندازه‌گیری تفاوت بین گروه‌ها از روش فاصله اقلیدسی استفاده شد. از طرفی، برای تشخیص تفاوت بین خوشه‌ها (در تحلیل خوشه‌ای)، از نمودار شولر، پایپر و ویلکوکس استفاده شد. در این پژوهش، با کمک طبقه‌بندی ویلکوکس، کیفیت آب کشاورزی تعیین شد. در طبقه‌بندی ویلکوکس، آب کشاورزی بر اساس میزان هدایت الکتریکی (EC) و نسبت جذب سدیم (SAR) به چهار گروه باکیفیت عالی، خوب، متوسط و نامناسب و ۱۶ طبقه

تقسیم‌بندی شده است [۴۰].

گیبز [۱۷] دو نمودار برای درک مکانیسم‌های کیفی آب‌های سطحی پیشنهاد کرد. این نمودارها به‌طور گسترده برای مطالعه مکانیسم‌های اصلی حاکم بر کیفیت آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱ و ۱۸]. نمودار گیبز اساساً به دو نسبت بستگی دارند که با روابط ریاضی ۱ و ۲ محاسبه می‌شوند:

$$\text{SGibbs ratio I: } \frac{Cl^-}{(Cl^- + HCO_3^-)} \quad (1)$$

$$\text{Gibbs ratio II: } \frac{Na^+ + K^+}{(Na^+ + K^+ + Ca^{2+})} \quad (2)$$

که در رابطه‌های ۱ و ۲: Na، Ca و K به ترتیب مقادیر غلظت سدیم، کلسیم و پتاسیم در نمونه آب موردبررسی (برحسب میلی‌اکی والان بر لیتر) می‌باشند. این دو نسبت در مقابل مجموع مواد جامد محلول در آب (TDS) رسم می‌گردد.

به‌طور کلی، کیفیت آب‌های زیرزمینی می‌تواند متأثر از سه مکانیسم طبیعی شامل برهم‌کنش سنگ-آب، فرآیند تخمیر و اثر بارش جوی باشد و انحلال و فرآیندهای تبادل یونی و اکسایش و کاهش، از مکانیسم‌های برهم‌کنش سنگ و آب محسوب می‌شود. مواد معدنی موجود در سنگ‌ها به‌طور کامل و یا جزئی با توجه به مقاومت آن‌ها در برابر هوازدگی شیمیایی در آب حل شده و ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی را تغییر می‌دهد. نمودار گیبز به‌طور گسترده در مطالعات مختلف آب‌های زیرزمینی یا آب‌های سطحی برای ارزیابی عوامل غالبی که در کیفیت آب دخیل هستند، استفاده شده است.

شاخص کیفی آب (WQI) به‌طور گسترده‌ای برای ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای اهداف شرب در مناطق مختلف جهان استفاده می‌شود. مقدار WQI بر اساس تجزیه و تحلیل فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی محاسبه می‌شود. وزن‌های هر پارامتر بر اساس تأثیر آن بر کیفیت آب به آن اختصاص داده می‌شود. شاخص کیفی آب با استفاده از روش پیشنهادشده توسط دردور و همکاران^۱ [۱۰]. به شرح زیر محاسبه گردید:

- تعیین وزن W_i : در مرحله اول، وزن W_i را برای هر یک از ۱۲ پارامتر فیزیکی و شیمیایی با توجه به اهمیت نسبی آن در کیفیت کلی آب برای اهداف آشامیدنی اختصاص داده می‌شود. خلاصه‌ای از پارامترها و مقادیر در جدول ۱ ارائه شده است.

- نیترات، نیتريت و TDS حداکثر وزن ۵ داده شده است. آن‌ها به‌عنوان پارامترهایی در نظر گرفته می‌شوند که بیش‌تر کیفیت آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. حداقل وزن ۱ به منیزیم اختصاص داده شد، زیرا به‌ندرت نقش مهمی در کیفیت آب زیرزمینی ایفا می‌کند. وزن‌های بین ۱ تا ۵ به سایر پارامترها اختصاص داده شد.

1. Gibbs
2. Derdour

جدول ۱: وزن و وزن نسبی پارامترهای شیمیایی اعمال شده برای محاسبه WQI [۳۹]

پارامتر شیمیایی	واحد	وزن W_i	وزن نسبی W_i
pH	-	۴	۰/۱۰۵
EC	$\mu\text{S/cm}$	۴	۰/۱۰۵
TDS	mg/L	۵	۰/۱۳۲
TH	mg/L	۲	۰/۰۵۳
Ca ²⁺	mg/L	۲	۰/۰۵۳
Mg ²⁺	mg/L	۱	۰/۰۲۶
Na ⁺	mg/L	۳	۰/۰۷۹
Cl ⁻	mg/L	۳	۰/۰۷۹
So ₄ ²⁻	mg/L	۴	۰/۱۰۵
No ₃ ⁻	mg/L	۵	۰/۱۳۲
HCO ₃	mg/L	۳	۰/۰۷۹
K ⁺	mg/L	۲	۰/۰۵۲
مجموع	-	۳۴	۱/۱۰۰

رابطه ۵ محاسبه شد.

$$WQI = \sum_{i=1}^n q_i \times W_i \quad (5)$$

WQI محاسبه شده را می توان به پنج کلاس اصلی طبقه بندی کرد: آب عالی، خوب، ضعیف، بسیار ضعیف و نامناسب برای مصارف آشامیدنی (جدول ۲).

نتایج و بحث

مقادیر اندازه گیری شده عناصر کیفی منابع آب زیرزمینی دشت اردبیل در جدول (۳) ارائه شده است.

هم چنین، در جدول (۳) حد مجاز عناصر بر اساس معیار WHO [۳۹] ذکر شده است. نتایج نشان داد مقدار دامنه تغییرات (اختلاف بیشینه و کمینه مقادیر) در بیشتر عناصر مانند کلر، سولفات، کلسیم، منیزیم و سدیم زیاد است. لذا می توان گفت اکثر عناصر اندازه گیری شده، تغییرات شدیدی در سطح دشت دارند. pH یک ویژگی اساسی است که اسیدیته و قلیایی بودن آب های زیرزمینی را توصیف می کند. نتایج حاکی از آن است که نمونه های آب زیرزمینی تقریباً ماهیت اسیدی دارند و pH آن از ۶/۰۹ تا ۷/۳۳ با میانگین ۶/۸۲ متغیر است (جدول ۳). طبق استانداردهای آب شرب WHO [۳۹]، حداکثر حد مجاز غلظت pH در آب ۸/۵ است. تمام نمونه های آب زیرزمینی، دارای غلظت pH کم تر از حداکثر حد مجاز بودند (جدول ۳). مقدار EC در آب های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه از ۴۲۵/۰ تا ۷۲۲۰/۰ میکروزیمنس بر سانتی متر با میانگین ۱۷۹۰/۱ میکروزیمنس بر سانتی متر متفاوت بود. نتایج نشان داد ۴۷/۹ درصد نمونه های آب زیرزمینی فراتر از حد مجاز بودند (جدول ۳).

TDS انواع مختلفی از مواد معدنی موجود در آب را به شکل محلول نشان می دهد؛ بنابراین یک پارامتر مهم در آب شرب و سایر استانداردهای کیفیت آب است. جدول ۳ نشان می دهد که TDS از ۲۷۲/۰ تا ۴۶۲۰/۸ میلی گرم بر لیتر، با مقدار متوسط از ۱۱۴۵/۶ میلی گرم بر لیتر در سطح دشت متغیر است. حدود ۲۱/۹ درصد از نمونه های آب زیرزمینی محتوای TDS را بالاتر از مقدار استاندارد WHO [۳۹] نشان می دهد. آب زیرزمینی دشت اردبیل بر اساس طبقه بندی دیویس و دثویست [۹] به چهار دسته تقسیم شد. بر این اساس ۲۱/۹ درصد مطلوب برای شرب، ۳۷/۴ درصد مجاز برای شرب، ۳۴/۴ درصد مفید برای آبیاری و ۶/۳ درصد نامناسب برای شرب و آبیاری بودند که نمونه های نامناسب برای شرب و آبیاری مربوط به جنوب غربی دشت قرار بودند. از طرفی بر اساس طبقه بندی سویر و مک کارتلی [۳۵] آب زیرزمینی دشت اردبیل دارای سختی بالایی بود، به طوری که هیچ نمونه ای در رده آب نرم قرار نگرفت و ۶۸/۷ درصد از نمونه ها در رده آب خیلی سخت قرار

جدول ۲: طبقه بندی کیفیت آب بر اساس مقادیر WQI [۱]

مقدار WQI	کیفیت آب
کم تر از ۵۰	عالی
۵۰ تا ۱۰۰	خوب
۱۰۰ تا ۲۰۰	ضعیف
۲۰۰ تا ۳۰۰	بسیار ضعیف
بیش تر از ۳۰۰	نامناسب برای مصارف آشامیدنی

- محاسبه وزن نسبی: وزن نسبی W_i با استفاده از رابطه ۳ تعیین شد.

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

که در رابطه ۳: W_i وزن هر پارامتر، w_i وزن نسبی و n تعداد پارامترهاست.

- تخصیص مقیاس رتبه بندی کیفیت: در مرحله سوم، یک مقیاس رتبه بندی کیفیت (q_i) برای هر پارامتر با استفاده از رابطه ۴ اختصاص داده می شود:

$$q_i = \frac{C_i - C_{ip}}{S_i - C_{ip}} \times 100 \quad (4)$$

که در رابطه ۴، q_i رتبه کیفی است. C_i غلظت پارامتر شیمیایی هر نمونه آب (mg/L)، S_i استاندارد آب آشامیدنی برای هر پارامتر شیمیایی (mg/L) و C_{ip} مقدار ایده آل هر پارامتر شیمیایی در آب خالص که برای تمام پارامترها صفر در نظر گرفته می شود به جز pH که مقدار آن ۷ است [۱].

- محاسبه شاخص کیفی آب (WQI): شاخص کیفی آب از

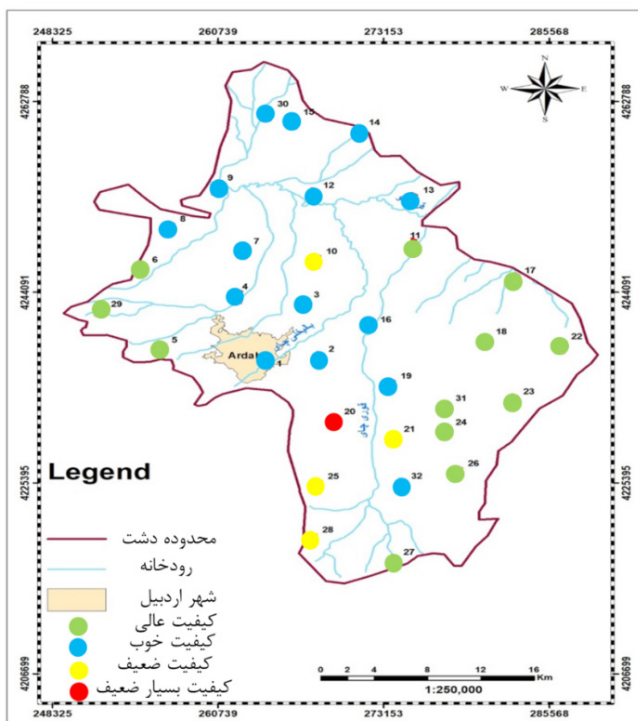
1. Davis and De Wiest
2. Sawyer and McCarty

جدول ۳: خلاصه‌ای از آمار نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی و مقایسه آن با حداکثر حد مجاز WHO برای مصارف شرب

پارامتر شیمیایی	واحد	بیشینه	کمینه	میانگین	انحراف معیار	حداکثر حد مجاز (WHO)	درصد نمونه‌های بیش از حد مجاز
pH	-	۷/۳۳	۶/۰۹	۶/۸۲	۰/۲۹	۸/۵	۰/۰
EC	μS/cm	۷۲۲۰/۰۰	۴۲۵/۰۰	۱۷۹۰/۰۶	۱۵۷۴/۵۹	۱۵۰۰/۰	۴۷/۹
TDS	mg/L	۴۶۲۰/۸۰	۲۷۲/۰۰	۱۱۴۵/۶۴	۱۰۰۷/۷۳	۱۵۰۰/۰	۲۱/۹
TH	mg/L	۲۳۹۷/۰۰	۹۹/۳۶	۵۰۹/۱۱	۵۲۹/۸۹	۵۰۰/۰	۲۵/۰
Ca ²⁺	mg/L	۳۲۹/۰۰	۲۶/۴۰	۱۰۶/۹۹	۸۰/۷۳	۲۰۰/۰	۱۵/۶
Mg ²⁺	mg/L	۳۹۵/۰۰	۵/۹۰	۵۸/۹۴	۸۶/۰۳	۱۵۰/۰	۶/۳
Na ⁺	mg/L	۸۲۵/۰۳۰۰	۲۱/۴۰۳۰	۱۷۲/۵۳	۱۹۱/۵۵	۲۰۰/۰	۲۴/۷
K ⁺	mg/L	۴۱/۷۵	۰/۸۸	۶/۸۳	۸/۹۵	۱۲/۰	۱۲/۵
HCO ₃ ⁻	mg/L	۹۶۴/۰۷	۱۲۲/۰۳	۳۶۹/۱۹	۱۷۹/۶۶	۳۰۰/۰	۵۸/۱
Cl ⁻	mg/L	۱۷۷۲/۵۰	۴۲/۵۴	۲۷۳/۴۱	۳۳۳/۲۷	۶۰۰/۰	۹/۴
So ₄ ²⁻	mg/L	۶۶۹/۸۱	۱۲/۲۶	۳۰۲/۳۸	۱۸۸/۳۳	۴۰۰/۰	۳۷/۵
No ₃ ⁻	mg/L	۶/۹۷	۱/۰۷	۳/۵۸	۱/۹۳	۵۰/۰	۰/۰

جدول ۴: مقادیر WQI همراه با طبقه‌بندی کیفی آب

شماره نمونه	مقادیر WQI	کیفیت آب	شماره نمونه	مقادیر WQI	کیفیت آب
۱	۶۶/۹	خوب	۱۷	۲۵/۴	عالی
۲	۷۳/۳	خوب	۱۸	۱۹/۹	عالی
۳	۶۵/۹	خوب	۱۹	۹۴/۶	خوب
۴	۵۲/۶	خوب	۲۰	۲۱۵/۵	بسیار ضعیف
۵	۴۴/۹	عالی	۲۱	۱۱۶/۶	ضعیف
۶	۴۰/۳	عالی	۲۲	۱۹/۱	عالی
۷	۶۰/۴	خوب	۲۳	۱۹/۱	عالی
۸	۵۶/۸	خوب	۲۴	۲۳/۸	عالی
۹	۵۶/۲	خوب	۲۵	۱۷۰/۹	ضعیف
۱۰	۱۱۳/۸	ضعیف	۲۶	۲۱/۲	عالی
۱۱	۳۸/۷	عالی	۲۷	۱۹/۷	عالی
۱۲	۹۵/۶	خوب	۲۸	۱۵۲/۲	ضعیف
۱۳	۵۳/۹	خوب	۲۹	۴۱/۶	عالی
۱۴	۶۹/۵	خوب	۳۰	۶۹/۳	خوب
۱۵	۵۴/۰	خوب	۳۱	۳۲/۲	عالی
۱۶	۵۳/۰	خوب	۳۲	۶۷/۴	خوب

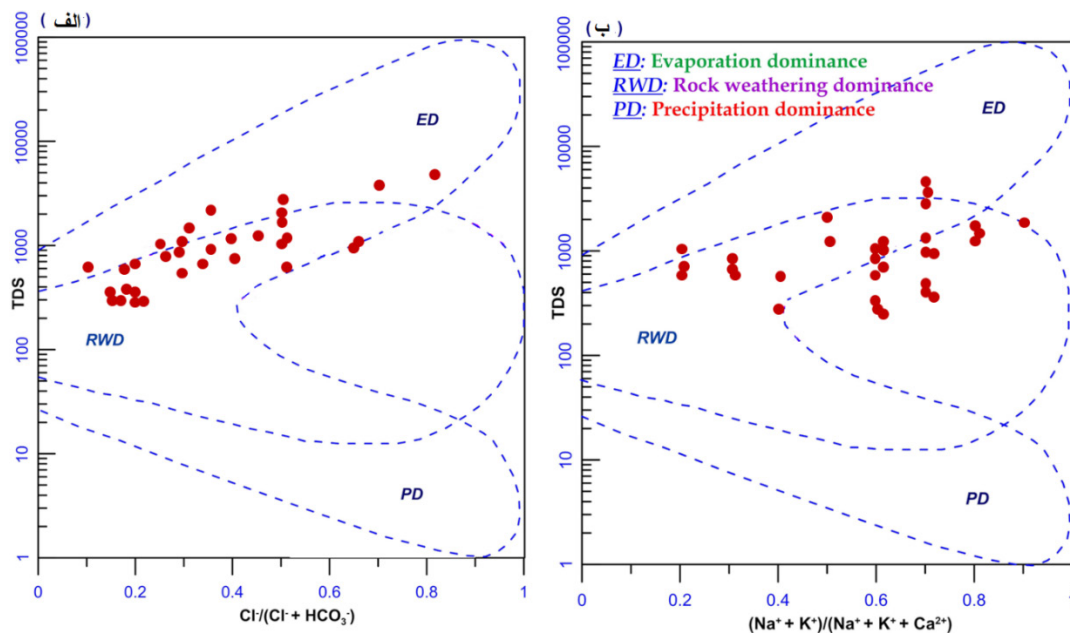


شکل ۳: پراکنش کیفیت آب دشت اردبیل بر اساس شاخص WQI

بر اساس نتایج این تحقیق، تنها ۱۵/۶، ۶/۳ و ۲۴/۷ درصد از کل نمونه‌ها به ترتیب دارای کلسیم، منیزیم و سدیم بالاتر از حد مجاز برای شرب بودند (جدول ۳). هم‌چنین مقدار غلظت پتاسیم کم بوده که دلیل آن را می‌توان مقاومت بالای فلدسپار پتاسیم نسبت به پدیده هوازدگی دانست. هم‌چنین حضور ذرات رس و جذب پتاسیم توسط رس نیز می‌تواند از دلایل غلظت کم عنصر پتاسیم در آب زیرزمینی دشت اردبیل باشد [۳۰ و ۳۱].

گرفتند. هم‌چنین بر اساس مطالعه جین و همکاران [۲۰]، مصرف آب شرب با سختی (TH) زیاد می‌تواند منجر به خطرات سلامتی مانند مشکلات کلیوی و تشکیل سنگ کلیه شود که این امر بیانگر اهمیت میزان TH در آب می‌باشد. خوشبختانه بر اساس نتایج کیفی آب زیرزمینی دشت اردبیل، تنها ۶/۳ درصد از کل نمونه‌های آب زیرزمینی بالاتر از حد مجاز حداکثر ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بودند.

1. Jain



شکل ۴: موقعیت نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه بر روی دیاگرام گیبس، الف) نسبت گیبس I، ب) نسبت گیبس II

استفاده از روش‌های آماری چند متغیره تحلیل خوشه‌ای

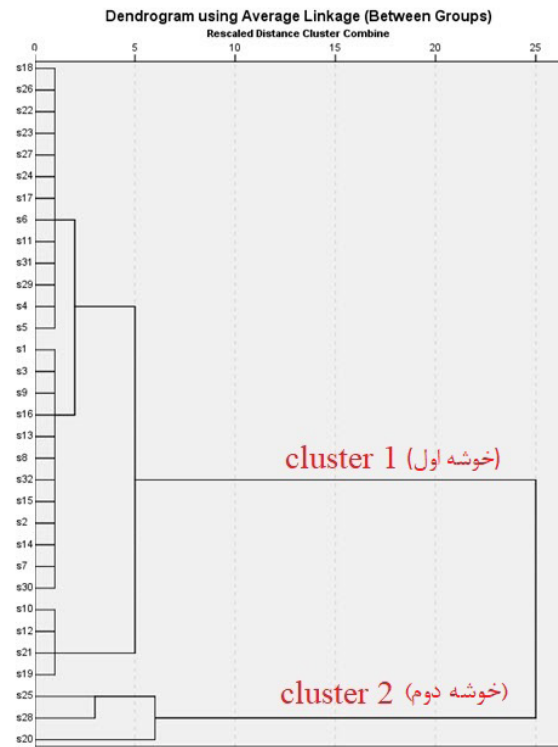
شکل (۵) نمودار گرافیکی دندروگرامی خوشه‌بندی آب زیرزمینی دشت اردبیل را نشان می‌دهد. در این شکل، خط جداکننده گروه‌ها به‌عنوان پیش‌فرض در نرم‌افزار در امتداد نمودار درختی و در فاصله کم‌تر از ۲۵ رسم شد؛ بنابراین نمونه‌های بافاصله‌اتصالی کم‌تر از ۲۵ در خوشه مشابهی قرار می‌گیرند و همان‌طور که مشاهده می‌شود نمونه‌های موردنظر در فاصله‌اتصالی کم‌تر از ده جدا شدند. هرچه نمونه‌ها در فاصله‌اتصالی کم‌تری تشکیل خوشه دهند، نشان‌دهنده شباهت بیشتر خصوصیات شیمیایی نمونه‌هاست. در نهایت نمونه‌ها به دو خوشه‌ی اول و دوم تقسیم شدند. بیش‌تر نمونه‌ها در خوشه اول قرار دارند. در خوشه دوم نمونه‌های ۲۵، ۲۸ و ۲۰ قرار گرفته‌اند. هر سه این نمونه در یک امتداد عمودی در جنوب غربی دشت واقع شدند (شکل‌های ۱ و ۳).

نمونه‌های خوشه اول در فاصله‌اتصالی کم‌تری (کم‌تر از ۵) گروه‌بندی شده‌اند که نشان‌دهنده شباهت زیاد این نمونه‌ها می‌باشد. در خوشه دوم، به علت این‌که در فاصله‌اتصالی بیش‌تر از ۵ تشکیل خوشه داده‌اند، نسبت به خوشه اول شباهت کم‌تری باهم دارند. میانگین هدایت الکتریکی نمونه‌های موجود در خوشه اول، ۱۳۶۷ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. این نمونه‌ها تمام قسمت دشت (به‌جز بخشی از جنوب غربی) را شامل می‌شوند. نمونه‌های خوشه دوم در قسمت جنوب غربی دشت قرار گرفتند. میانگین هدایت الکتریکی این خوشه ۵۸۸۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر است. محققان زیادی با توجه اهمیت و کارایی روش تحلیل خوشه‌ای در بررسی کیفیت آب از آن استفاده کرده‌اند [۱۲ و ۲۳]. تحقیق نادری و همکاران [۲۳] در بررسی کیفیت آب در استان گلستان نشان داد مقادیر هدایت الکتریکی و غلظت املاح وابستگی بالایی داشته و در

مقادیر شاخص کیفی آب (WQI) برای هر ۳۲ نمونه آب محاسبه گردید (جدول ۴).

هم‌چنین پراکنش کیفی آب بر اساس WQI در دشت مورد مطالعه در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود بهترین کیفیت آب مربوط به نواحی غرب و جنوب شرقی دشت اردبیل و ضعیف‌ترین کیفیت آب مربوط به نواحی جنوب غربی می‌باشد. احتمالاً دلایل اصلی این روند تغییر کیفیت مربوط به روند عمومی آب‌های زیرزمینی و تأثیر سازندها از جمله سازندهای تبخیری و نمکی (مانند هالیت، ژپس و ...) در آب‌زیرزمینی و انحلال کانی‌های موجود در این سازندها (سازندهای میوسن و پلیوسن) می‌باشد که به‌نوعی می‌توان منشأ آن را زمین‌زاد بیان کرد [۱۵].

بر اساس نتایج این تحقیق، مقادیر نسبت گیبس از ۰/۱۱ تا ۰/۸۶ متغیر بود و میانگین نسبت گیبس I و II به ترتیب برابر ۰/۳۶ و ۰/۵۷ به دست آمد (شکل ۴). هم‌چنین نتایج نشان داد اکثر نمونه‌های آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه در ناحیه RWD که به‌عنوان ناحیه غالب برهم‌کنش سنگ-آب شناخته می‌شود، قرار گرفتند (شکل ۴). بنابراین، این پدیده نشان می‌دهد که برهم‌کنش سنگ-آب یا تسلط هوازدگی سنگ عمدتاً کنترل‌کننده شیمی یون اصلی است. از طرفی مطابق شکل ۴، هیچ نمونه‌ای در ناحیه اثر بارش‌های جوی قرار نگرفته است که این یعنی کیفیت آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه متأثر از بارش‌های جوی نمی‌باشد. نتایج تحقیقات نارسیما و سودارشن [۲۴] و ادمالا و همکاران [۲] بیانگر این بود که برهم‌کنش سنگ و آب عامل غالبی است که عمدتاً بر شیمی آب‌های زیرزمینی تأثیر گذاشته، هم‌چنین علت اصلی افزایش محتوای فلوراید در آب‌های زیرزمینی است.



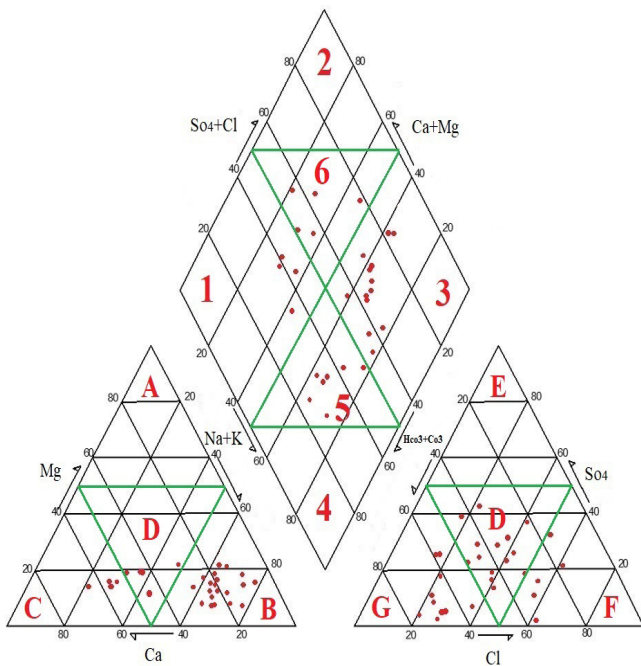
شکل ۵: نمودار خوشه‌ای نمونه‌های منابع آب دشت اردبیل

موجود در هر خوشه (شکل ۵) در نمودار شولر، پایپر و ویلکوکس ترسیم شد تا تفاوت خوشه اول و خوشه دوم مشخص شود (شکل ۶ و ۷).

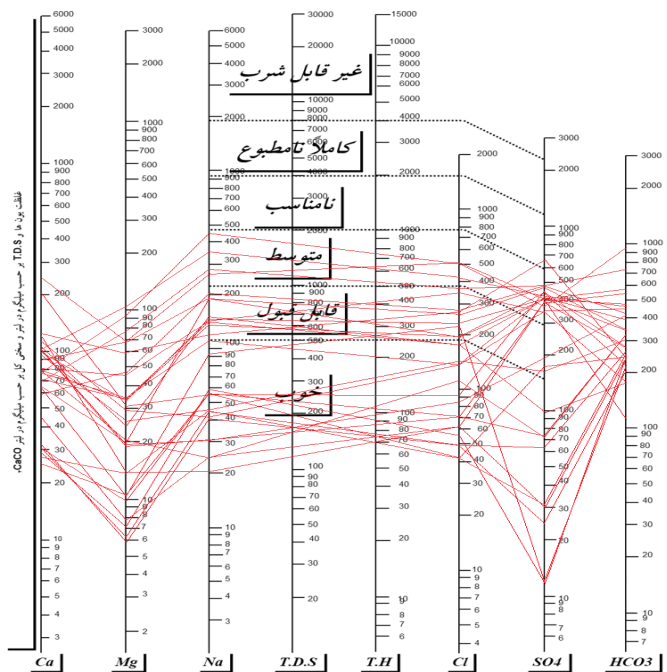
نمودار شولر ترسیم شده برای خوشه اول (شکل ۶) نشان می‌دهد که نمونه آب این دسته از لحاظ شرب در محدوده متوسط تا خوب

یک خوشه قرار گرفتند. هم‌چنین اسیدیته با یون‌های موجود در آب دارای وابستگی قوی نبود.

به‌منظور یافتن تفاوت بین خوشه‌ها در روش تحلیل خوشه‌ای، نمودار دندروگرامی حاصل با روش گرافیکی (نمودار پایپر، شولر و ویلکوکس) مورد مقایسه قرار گرفت. غلظت عناصر اصلی نمونه‌های



نمودار پایپر برای خوشه اول



نمودار شولر برای خوشه اول

شکل ۶: نمودار پایپر و شولر برای خوشه اول

اول دارد و از لحاظ شرب در محدوده نامناسبی قرار گرفته است. با توجه به نمودار رسم شده کاتیون و آنیون غالب این گروه از آب‌ها به ترتیب سدیم و کلر می‌باشد. نمودار پایپر برای خوشه دوم نشان می‌دهد از نظر کاتیونی تیپ آب برای تمام نمونه‌ها سدیمی (ناحیه B) است. از این رو، رخساره غالب برای کاتیون‌ها سدیمی می‌باشد. از نظر آنیونی نیز تمام نمونه‌ها دارای رخساره کلروره (ناحیه F) است. در قسمت لوزی میانی نیز تمام نمونه‌ها در ناحیه سه قرار دارند و با توجه به نواحی نه‌گانه رخساره آب زیرزمینی، تیپ آب در ناحیه سه، قلیابیت غیرکربناته (شور) است. به‌طور کلی رخساره هیدروشمیمی غالب آب در خوشه دوم سدیم-کلرید (Na-Cl) می‌باشد. این نوع رخساره معمولاً معرف آب‌های زیرزمینی شور با سختی بالاست [۳۷].

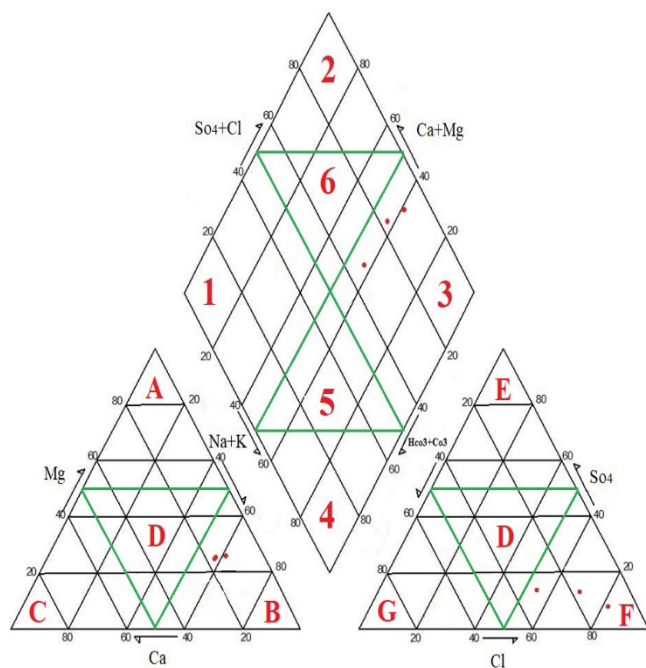
بر اساس رقوم ارتفاعی سطح آب‌زیرزمینی (تراز هیدرولیکی آب زیرزمینی) در چاه‌های پیژومتریکی واقع در دشت اردبیل، نقشه هم‌سطح آب زیرزمینی تهیه و جهت جریان عمود بر آن، در دشت در شکل ۸ ترسیم شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد خوشه دوم در جنوبی غربی دشت واقع شده است. نظر به جهت آب زیرزمینی از جنوب به شمال غرب دشت (شکل ۸)، تأثیر این نوع رخساره به سمت شمال دشت محتمل است. مقدار متوسط WQI برای خوشه اول و دوم به ترتیب ۵۴/۰ و ۱۷۹/۵ می‌باشد.

از نظر شاخص کیفی آب (WQI)، کیفیت آب خوشه اول خوب و خوشه دوم ضعیف برای مصارف شرب طبقه‌بندی می‌گردد. نمودار ویلکوکس نیز برای خوشه اول و دوم در یک نمودار ترسیم شد (شکل ۹).

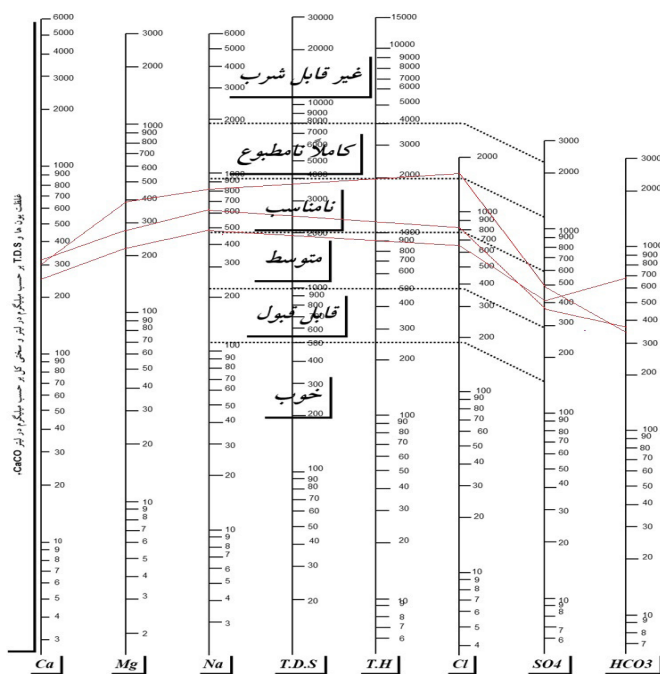
قرار دارد. همان‌طور که از نمودار شولر مشخص است، بیش‌ترین غلظت در کاتیون و آنیون‌ها به ترتیب مربوط به سدیم، بی‌کربنات، سولفات و کلر می‌باشد. سبزواری و همکاران [۳۴] نیز با کمک نمودار شولر به بررسی کیفیت آب دشت بروجرد- دورود پرداختند که نتایج نشان داد کیفیت آب در طبقه خوب و قابل قبول قرار دارد. با توجه به نمودار پایپر در خوشه اول، نحوه بیان تیپ و رخساره آب برای ۶۹ درصد از نمونه‌ها سدیمی (ناحیه B)، ۱۴ درصد کلسیمی (ناحیه C) و ۱۷ درصد دارای رخساره ترکیبی (ناحیه D) می‌باشند. با توجه به درصد کاتیون‌ها، رخساره آب سدیمی است. از نظر آنیونی نیز ۵/۴۸ درصد از نمونه‌ها دارای رخساره ترکیبی (ناحیه D)، ۵/۳۴ درصد بی‌کربناته (ناحیه G) و ۱۷ درصد دارای رخساره کلروره (ناحیه F) می‌باشد.

با توجه به درصد آنیون‌ها، رخساره آب بی‌کربناته-کلروره است در قسمت لوزی میانی نیز ۱۴ درصد در ناحیه یک، ۴۵ درصد در ناحیه سه، ۲۴ درصد در ناحیه پنج و ۱۷ درصد از نمونه‌ها در ناحیه شش قرار دارند (شکل ۶). هم‌چنین با توجه به نواحی نه‌گانه رخساره آب زیرزمینی، رخساره آب در ناحیه یک، سختی کربناته (موقت)، ناحیه سه قلیابیت غیرکربناته (شور) و در ناحیه پنج و شش اختلاط متعادل یون‌ها می‌باشد. به‌صورت کلی تیپ (رخساره هیدروشمیمی) غالب آب در خوشه اول می‌تواند بی‌کربنات سدیم (Na-HCO₃) و این نوع رخساره معمولاً معرف آب‌های زیرزمینی شیرین و عمیق می‌باشد [۱۳].

نمودار شولر و پایپر [۲۷] برای خوشه دوم در شکل ۷ رسم شد. نتایج شکل ۷ نشان داد نمونه آب این خوشه تفاوت زیادی با خوشه



نمودار پایپر برای خوشه دوم



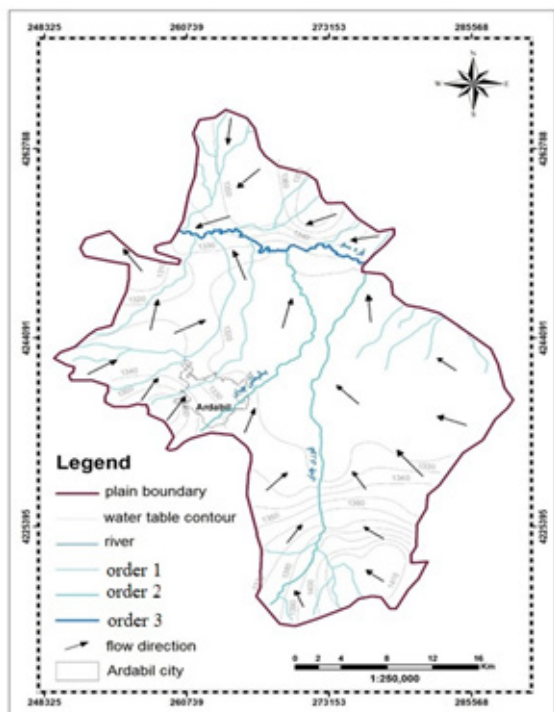
نمودار شولر برای خوشه دوم

شکل ۷: نمودار پایپر و شولر برای خوشه دوم

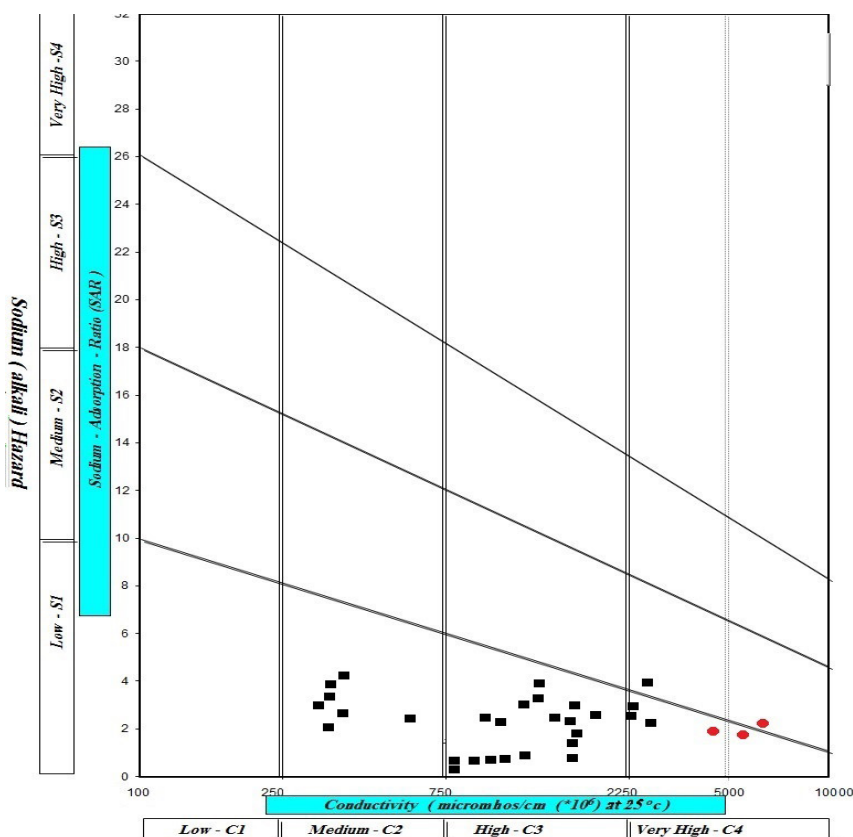
در این روش برای شوری آب از معیار هدایت الکتریکی و برای سدیم از معیار نسبت جذب سدیم (SAR) استفاده شده است. شوری آب‌ها به چهار گروه و SAR آن‌ها نیز به چهار دسته تقسیم و لذا از ترکیب این دو، ۱۶ نوع آب طبقه‌بندی شده است. در این طبقه‌بندی، علامت شوری و S علامت سدیم است. علامت ۱ برای مقادیر کم، ۲ برای متوسط، ۳ برای زیاد و ۴ برای خیلی زیاد به کار برده شده است. باید توجه داشت در این طبقه‌بندی، گیاه، شرایط آب و هوایی و خاک در نظر گرفته نشده است. لذا فقط به عنوان تخمین اولیه باید از آن استفاده شود.

با توجه به نمودار ویلکوکس (شکل ۹)، نمونه‌های خوشه اول با خوشه دوم متفاوت بوده و نمونه‌های خوشه دوم دارای شوری بالاتری می‌باشند. به‌طور کلی ۵۶/۲۵ درصد از نمونه‌ها دارای شوری زیاد و سدیم کم (C3-S1)، ۲۱/۸۸ درصد از نمونه‌ها دارای شوری متوسط و سدیم کم (C2-S1)، ۱۵/۶۲ درصد از نمونه‌ها دارای شوری خیلی زیاد و سدیم کم (C4-S1) (نمونه‌های ۱۰، ۱۲، ۱۹، ۲۸ و ۲۵) و ۶/۲۵ درصد از نمونه‌ها دارای شوری خیلی زیاد و سدیم متوسط می‌باشند (C4-S2) (نمونه‌های ۲۰ و ۲۱).

با توجه به جدول رده‌های مختلف آب و نوع کیفیت بر اساس طبقه‌بندی ویلکوکس [۴۰]، رده‌های C4-S1 و C4-S2 خیلی شور و برای مصارف کشاورزی مضر می‌باشند. رده C3-S1 شور و برای کشاورزی تمهیدات لازم باید اعمال شود و رده C2-S1 کمی شور



شکل ۸: جهت جریان آب زیرزمینی دشت اردبیل



شکل ۹: نمودار ویلکوکس برای خوشه اول (مربع‌ها) و خوشه دوم (دایره‌ها)

Kuwait.

5- Ahmadi, T., Ziaei, A.N., Rasoulzadeh, A., Davary, K., Esmaili, K., and Izady, A. 2015. Mapping groundwater recharge areas using CRD and RIB methods in the semi-arid Neishaboer Plain, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 8 (5): 2921-2935.

6- Alipour, A., Rahimi, J., and Azarnivand, A. 2017. Groundwater quality analysis for drinking and agricultural purposes-a prerequisite for land use planning in the arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Range and Watershed Management*. 70(2): 423-434 (In Persian).

7- Bezaatpour, J., Fatehifar, E., and Rasoulzadeh, A. 2020. CFD investigation of natural gas leakage and propagation from buried pipeline for anisotropic and partially saturated multilayer soil. *Journal of Cleaner Production*. 277: 123940.

8- Bodrud- Doza, Md., Bhuiyan, M. A. H., Didar- Ul Islam, S. M., Morshedul Haque, Md., Fatema, K. J., Ahmed, N., Rakib, M. A., and Atiur Rahman, Md. 2019. Hydrogeochemical investigation of groundwater in Dhaka City of Bangladesh using GIS and multivariate statistical techniques. *Journal of Groundwater for Sustainable Development*. 8: 226-244.

9- Davis, S.N., and DeWiest, R.J. 1966. *Hydrogeology*. Wiley, Newyork.

10- Derdour, A. Guerine, L., and Allali, M. 2021. Assessment of drinking and irrigation water quality using WQI and SAR method in Maâder sub-basin, Ksour Mountains, Algeria, *Sustainable Water Resources Management*.

11- Esmaeilbeiki, F., Nikpour, M.R., Sing, V.K., Kisi, O., Sihag, P., and Sanikhani, H. 2020. Exploring the application of soft computing techniques for spatial evaluation of groundwater quality variables. *Journal of Cleaner Production*. 276: 124206.

12- Dordi Mahmoodi, M., Moradian Harehdasht, A. R., and Nadiri, A. 2016. Water resources of Astaneh city and studying effective factors on it with statistical, graphical methods and GIS. *Journal of Environmental Geology*. 10(35): 66-78 (In Persian).

13- Fakhari, M. S., Ashari Moghadam, A., Barzegar, R., Kazemian, N., and Najib, M. 2016. Investigating the origin of some heavy metals in groundwater of Marand plain using multivariate statistical methods. *Journal of Water and Soil*

و برای مصارف کشاورزی تقریباً مناسب می‌باشند. مطالعه سبزواری و همکاران [۳۴] نیز در تحقیقی مشابه نشان داد که ۹۱ درصد آب زیرزمینی دشت بروجرد- دورود در رده C2- S1 و باقیمانده در رده C3- S1 قرار دارند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق کیفیت آب زیرزمینی دشت اردبیل با کمک روش‌ها و شاخص‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. به‌طور نمونه نتایج تحلیل خوشه‌ای نشان داد جنوب غربی دشت در خوشه دوم و بقیه دشت در خوشه اول قرار دارد. کیفیت آب زیرزمینی خوشه اول برای مصارف شرب خوب بوده، درحالی‌که خوشه دوم نامناسب برای شرب است. نتایج نشان داد کیفیت آب اکثراً تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بوده و در اثر برهم‌کنش سنگ و آب به وجود آمده است. هم‌چنین بر اساس شاخص WQI بهترین و بدترین کیفیت آب زیرزمینی به ترتیب مربوط به نواحی غرب و جنوب شرقی دشت (۳۷/۵ درصد) و نواحی جنوب غربی (۳/۱ درصد) بودند. از طرفی مطابق نتایج نمودار ویلکوکس، هدایت الکتریکی خوشه دوم بالاتر بود، به‌طوری‌که ۵۶/۲۵ درصد نمونه‌های آن دارای EC زیاد و سدیم کم (C3- S1)، ۲۱/۸۸ درصد نمونه‌ها دارای EC متوسط و سدیم کم (C2- S1) و بقیه دارای EC زیاد بودند (C4- S1 و C4- S2).

نظر به هزینه بالای اندازه‌گیری‌ها، این اندازه‌گیری یک‌بار در سال انجام شده است، بهتر است در صورت امکان، اندازه‌گیری‌ها در ماه‌های مختلف تکرار شود. هم‌چنین مقادیر فلزات سنگین به‌ویژه برای مصارف شرب نیز بررسی شوند.

منابع

1- Adimalla, N., and Qian, H. 2019. Groundwater quality evaluation using water quality index (WQI) for drinking purposes and human health risk (HHR) assessment in an agricultural region of Nanganur, south India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 176: 153-161.

2- Adimalla, N., Vasa, S.K., and Li, P. 2018. Evaluation of groundwater quality, Peddavagu in Central Telangana (PCT), South India: an insight of controlling factors of fluoride enrichment. *Modeling Earth Systems and Environment*. 4(2): 841-852.

3- Ahmadi, A. 2022. Investigation of groundwater quality changes in Varamin Plain of Tehran. *Water and Soil Management and Modeling*. 2(1): 14-26 [In Persian].

4- Ahmadi, T., Ziaei, A.N., Davary, K., Faridhosseini, A., Izady, A., and Rasoulzadeh, A. 2012. Estimation of groundwater recharge using various methods in Neishaboer Plain, Iran. 5th international groundwater symposium,

temporal comparisons of water quality parameters and health of Ziarat River using NSFQI quality Index and statistical analysis. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 51(6): 1353-1372 (In Persian).

24- Narsimha, A., and Sudarshan, V. 2017. Assessment of fluoride contamination in groundwater from Basara, Adilabad District, Telangana State, India. *Apply Water Science*. 7(6): 2717-2725.

25- Nosrati, K., Rajabi Eslami, A., and Sayadi, M. 2018. The analysis and classification of water quality using a multivariate static technique in the city of Mallard, Tehran. *Journal of Hydrogeomorphology*. 5(15): 171-190 (In Persian).

26- Pahlevani Majdabady, M., Rasoulzadeh, A., Kanooni, A., and Ahmadzadeh, G. 2020. Estimation of groundwater recharge originating from agricultural irrigation and rainfall in Shyramyn plain, Iran. *Irrigation and Drainage*. 69(1): 107-120.

27- Piper, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Journal of Transactions of the American Geophysical Union*. 25(6): 914- 928.

28- Piran Gharni, S., Javid, A., and Ghoddousi, J. 2018. Effect of geological formation on the quality of groundwater (Case study: Ardebil Plain). *Journal of Environmental science and technology*. 20(3): 1-10 (In Persian).

29- Pirzadeh, B., and Asvar, T. 2020. Determining spatial and temporal variations of groundwater quality parameters using GIS and interpolation methods (case study: Sirjan plain). *Journal of Irrigation and water engineering*. 11(2): 266-275 (In Persian).

30- Ramesh, K., and Agadeeswari, P. B. J. 2012. Hydrochemical characteristics of groundwater for domestic and irrigation purposes in Periyakulam Taluk of Theni district, Tamil Nadu. *Research Journal of Environment Sciences*. 1(1): 19-27.

31- Rao, N. S., Rao, P.S., Reddy, G.V., Nagamani, M., Vidyasagar, G., and Satyanarayana, N. L. V. V. 2011. Chemical characteristics of groundwater and assessment of groundwater quality in Varaha River Basin, Visakhapatnam District, Andhra Pradesh, India. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*. 184: 5189-5214.

32- Rasoulzadeh, A., and Moosavi, S. A. A. 2007. Study

Science. 26(2.2): 237-253 (In Persian).

14- Fashae, M., and Ghoochian, M. 2022. Spatial evaluation of qualitative parameters of groundwater resources with the aim of its application in agriculture and drinking (Case study: Mehvalat-Feyzabad plain). *Water and Soil Management and Modeling*. 2(2): 28-44 (In Persian).

15- Fazabakhsh, Sh., Rasoulzadeh, A., Ramezani moghadam, J., and Esmailian, M. 2022. Investigation of groundwater quality using multivariate statistical methods in Ardabil plain aquifer, *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 13(2):333-353 (In Persian).

16- Ghafari, H., Rasoulzadeh, A., Raof, M., and Esmeali, A. 2018. Estimation of natural groundwater recharge using WTF method (case study: Ardabil plain aquifer). *Journal of Civil and Environmental Engineering*. 48(1): 43-52 (In Persian).

17- Gibbs, R.J. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*. 17: 1088-1090.

18- Khalili, R., Montaseri, H., Mottaghi, H., and Jalili, M.B. 2021. Water quality assessment of the Talar River in Mazandaran province based on a combination of water quality indicators and multivariate modeling. *Water and Soil Management and Modeling*. 1(4): 30-47 (In Persian).

9- Khanoranga, A., and Khalid, S. 2019. An assessment of groundwater quality for irrigation and drinking purposes around brick kilns in three districts of Balochistan province, Pakistan, through water quality index and multivariate statistical approaches. *Journal of Geochemical Exploration*. 197: 14-26.

20- Jain, C.K., Bandyopadhyay, A., and Bhadra, A. 2010. Assessment of ground water quality for drinking purpose, District Nainital, Uttarakhand, India. *Environmental Monitoring and Assessment*. 166: 663-676.

21- Lalehzari, R., and Tabatabaie, S. H. 2010. Groundwater quality analysis in Shahrekord aquifer. *Journal of Environmental Studies*. 36(53): 55-62 (In Persian).

22- Manzoori, Y., Kashi, G., Tashii, H., Mamoodkhani, R., and Jahangiri, M. 2020. Evaluation of cadmium, arsenic and mercury Concentrations in the drinking water distribution network in Ardabil City in 2018. *Journal of Health*. 11(3): 325-337 (In Persian).

23- Naderi, M. H., Pourgholami-Amiji, M., Khoshravesht, M., Ghoghghi, A., and Arab, N. 2020. Evaluation of spatial-

- 37- Sikdar, P. K., Sarkar, S. S., and Palchoudhury, S. 2001. Geochemical evolution of groundwater in the quaternary aquifer of Calcutta and Howrah, India. *Asian Journal of Earth Sciences*. 19: 579-594.
- 38- Trabelsi, R., and Zouari, K. 2019. Coupled geochemical modeling and multivariate statistical analysis approach for the assessment of groundwater quality in irrigated areas: A study from North Eastern of Tunisia. *Journal of Groundwater for Sustainable Development*. 8: 413-427.
- 39- W.H.O. 2017. Guidelines for drinking-water quality. 4th edit, incorporating 1st addendum, 653 World Health Organization, Geneva.
- 40- Wilcox, L. V. 1955. Classification and use of irrigation waters, USDA, Circular 969, Washington: Salinity Laboratory.
- of groundwater recharge in the Vicinity of Tashk Lake Area, *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*. 31 (B5): 509-521.
- 33- Rooshanak, R., Moor, F., and Keshavarzi, B. 2015. The Study of geochemistry contamination of heavy metals in travertine deposits and soil in Gorveh- Takab region, NW Iran. *Journal of Environmental Geology*: 8(29): 33-42 (In Persian).
- 34- Sabzevari, Y., Nasrolahi, A. H., and Yonesi, H. A. 2020. Investigation of temporal-spatial variations of groundwater resources quality in Borujerd-Dorood plain. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 11(1): 325-337 (In Persian).
- 35- Sawyer, C., and McCarthy, P. 1967. *Chemical and sanitary engineering*, 2nd edn. McGraw-Hill, New York.
- 36- Shamsaldin, H., Jalali, V., and Jafari, A. 2016. 36- Evaluation of environmental pollution indices around the copper Plant of Sarcheshmeh. *Journal of Agricultural Engineering*. 38(2): 35-53 (In Persian).



Abstract

Evaluation and Classification of the Groundwater Quality of Ardabil PlainJ. Ramezani Moghaddam^{1*}, A. Rasoulzadeh² and Sh. Fazabakhsh³

Received: 2024/01/21 Accepted: 2024/02/16

It is crucial to assess the groundwater quality in each region. This study focused on evaluating and analyzing the groundwater quality of the Ardabil plain. To achieve this, 32 water samples from various wells were collected and elements and quality parameters (such as electrical conductivity, acidity, sodium, magnesium, chlorine, bicarbonate and water hardness) were measured. Groundwater quality was investigated using Gibbs diagram and Cluster analysis. Gibbs ratio I and II ranged from 0.11 to 0.83 and 0.16 to 0.86, respectively, with an average of 0.36 and 0.57. Most of the water samples fall in the zone of rock dominance. Also, based on the cluster analysis, the quality of the first and second clusters (in Schuler's diagram) were placed in the good and poor range for drinking purposes, respectively. On the other hand, based on Wilcox's classification, the studied groundwater was divided into four classes, and the best quality was C2-S1 class (almost suitable for cultivation). In addition, it can be concluded that the quality of groundwater in the second cluster is not useful for agricultural and drinking purposes, but the first cluster was almost suitable for agricultural and drinking purposes.

Keywords: Ardabil aquifer, Cluster analysis, Piper diagram, WQI.

1. Assistant Professor of Faculty of Agriculture and Natural Resources - University of Mohaghegh Ardabili - Ardabil - Iran, Email: j_ramezani@uma.ac.ir

2. Professor of Faculty of Agriculture and Natural Resources - University of Mohaghegh Ardabili - Ardabil - Iran,

3. Master's degree in irrigation and drainage