

بررسی کیفیت آب‌زیرزمینی دشت آبرفتی ارومیه با بکارگیری روش‌های آماری چندمتغیره و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی

زهرا شیخی آلماآباد^{۱*}، حسین پیرخراطی^۲ و حسن رحمانپور^۳

۱- دانش‌آموخته دکترا زمین‌شناسی زیست‌محیطی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

نویسنده مسئول: Z.Sheikhi@urmia.ac.ir *

نوع مقاله: کاربردی

پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۸

دریافت: ۱۴۰۲/۲/۲۱

چکیده

در دهه‌های اخیر، بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب‌زیرزمینی به دلیل افزایش شهرنشینی و فعالیت‌های کشاورزی و همچنین تأثیر تغییرات آب و هوایی، منجر به کاهش سطح و تغییرات هیدروژئوشیمیایی آب‌های زیرزمینی شده است. این مطالعه بر روی کیفیت آب زیرزمینی و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی (تکامل و منشاء) در دشت آبرفتی ارومیه، واقع در استان آذربایجان غربی، شمال غربی ایران صورت گرفته است. برای این منظور از نتایج ۶۳ حلقه چاه در بهار و تابستان سال ۱۴۰۰ استفاده شد. از نرم‌افزارهای SPSS و GIS جهت تحلیل داده‌ها استفاده گردید. براساس نمودار پایپر دو تیپ برای آب‌های زیرزمینی شناسایی شد که بر این اساس تیپ و رخساره‌ی ۶۷ درصد نمونه‌ها بی‌کربناته کلسیک و ۱۷ درصد نمونه‌ها بی‌کربناته منیزیک می‌باشد. همبستگی بی‌کربنات با پارامتر کل جامدات محلول ($R=0/858$)، کلر ($R=0/86$)، سولفات ($R=0/885$)، منیزیم ($R=0/922$)، کلسیم ($R=0/819$)، پتاسیم ($R=0/532$) و سدیم ($R=0/756$) می‌باشد. بررسی همبستگی‌ها بین عناصر و پارامتر کل جامدات محلول ($R>0/5$) نشانگر برهمکنش‌های ژئوشیمیایی مانند فرآیندهای اکسیداسیون-کاهش و تبادل یونی در نمونه‌های آب زیرزمینی می‌باشد. روش‌های تجزیه و تحلیل مؤلفه‌های اصلی و تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی به منظور تعریف عوامل کنترل اصلی مؤثر بر هیدروژئوشیمی دشت آبرفتی ارومیه نشان داد که نمونه‌های آب دارای تکامل‌های متفاوت از هم می‌باشند. سه خوشه در تحلیل خوشه‌ای، خوشه اول ۱۷/۷ درصد نمونه‌ها با میانگین کل جامدات محلول ۱۲۱۴/۲ میلی‌گرم بر لیتر، خوشه دوم ۳۱/۶ درصد نمونه‌ها با میانگین کل جامدات محلول ۶۹۷/۹ میلی‌گرم بر لیتر (بیشترین کانی‌سازی) و خوشه سوم ۵۱/۶ درصد نمونه‌ها با میانگین کل جامدات محلول ۴۳۱/۶ میلی‌گرم بر لیتر (کمترین کانی‌سازی) به دست آمد. دو مؤلفه‌ی اصلی توسط روش آنالیز تحلیل عاملی استخراج شد که ۷۵/۶ درصد از کل واریانس را نشان می‌دهند. وجود کانی‌های تبخیری بخصوص ژپس و هالیت، نفوذ آب شور دریاچه‌ی ارومیه، تبادل یونی و هوازدهی کانی‌های کلسیت و دولومیت منشأ عناصر در دشت آبرفتی ارومیه می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: ارومیه، آب زیرزمینی، آنالیز تحلیل عاملی

۱- پیشگفتار

تغییر می‌یابد (پوفاره و همکاران، ۲۰۱۴). پارامترهای مربوط به کیفیت آب و پایش دوره‌ای آن‌ها اطلاعاتی در مورد روند تغییرات کیفی آب در مورد اثرات توسعه و تغییرات آب و هوایی به تصمیم‌گیرندگان می‌دهد (نیوگومبو و همکاران، ۲۰۱۹). از این رو این مطالعه به بررسی شناسایی فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی کنترل‌کننده شیمی آب و منشأ پارامترهای کیفی به کمک روش‌های آماری چندمتغیره پرداخته است. مطالعات بسیاری در این زمینه صورت گرفته که می‌توان در جهان به مطالعات سنتنو و همکاران (۲۰۲۳)، در بحث ایجاد شاخص‌های مبتنی بر کاربرد روش‌های آماری چندمتغیره در کشور

آب با کیفیت و مقدار کافی از منابع مختلف، ستون اصلی توسعه اقتصادی یک منطقه است. تقاضا برای آب با افزایش شهرنشینی، کشاورزی و توسعه صنعتی به سرعت در حال افزایش است. تغییر کاربری اراضی و فعالیت‌های کشاورزی معمولاً منجر به تشدید کاهش کیفیت آب می‌شود (سلمانه و همکاران، ۲۰۲۲). کیفیت آب‌های زیرزمینی تا حد زیادی تحت تأثیر فرآیندهای طبیعی (سنگ‌شناسی)، وضعیت منابع تغذیه (تعامل با سایر سفره‌های عمیق) و عوامل انسانی همانند فعالیت‌های کشاورزی، ورود فاضلاب به منابع آبی و همچنین بهره‌برداری بیش از حد آبخوان

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مطالعاتی دشت آبرفتی ارومیه در استان آذربایجان غربی یکی از دشت‌های حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه که بین مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. مساحت کلی دشت ارومیه ۲۱۶۶/۲ کیلومتر مربع می‌باشد که حدود ۴/۱ درصد کل حوضه آبریز دریاچه ارومیه را در بر می‌گیرد. بلندی‌های مشرف به دریاچه ارومیه بیشتر از جنس سنگ‌های آذرین- دگرگونی و کربناته است. آبخوان‌های آبرفتی منطقه حاصل حمل سازندهای زمین‌شناسی اطراف است که به سوی دریاچه روند نسبتاً منظمی از تغییر اندازه‌ی ذره‌های آبرفتی است. مخروط‌افکنه‌های وسیعی در دامنه‌های بلندی مشرف به دریاچه در اثر فعالیت رودخانه‌ها ایجاد شده است که دانه‌بندی آن مناسب و نفوذپذیری آن زیاد است (دادآفرید و همکاران، ۱۳۹۸). در شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت محدوده و ایستگاه‌های نمونه‌برداری و در جدول ۱ نام ایستگاه و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری ارائه شده است.

۲-۲- جمع‌آوری و آنالیز نمونه‌ها

در این تحقیق از نتایج ۶۳ حلقه چاه عمیق، چاه نیمه عمیق، قنات و چشمه در بهار و تابستان سال ۱۴۰۰ واقع در دشت آبرفتی ارومیه تهیه شده توسط سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی، استفاده شد. در شرایط کلی، پس از ثبت موقعیت نمونه‌ها با استفاده از GPS قابل حمل، نمونه‌های آب در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند تا برای بررسی آنالیز فیزیوشیمیایی به آزمایشگاه منتقل شوند. در حین نمونه‌برداری، پارامترهای pH، هدایت الکتریکی (EC) و کل جامدات محلول (TDS) با استفاده از دستگاه‌های پرتابل کالیبره شده، اندازه‌گیری شده‌اند. آنالیز عناصر سدیم (Na^+) و پتاسیم (K^+) توسط دستگاه نورسنج شعله‌ای، سختی کل^۱ (TH)، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، بی‌کربنات (HCO_3^-) و کلراید (Cl^-) به روش تیتراسیون با اتیلن دی‌امین تترا استیک اسید^۲ صورت می‌گیرد. مقدار سولفات (SO_4^{2-})، در نمونه‌های آبی

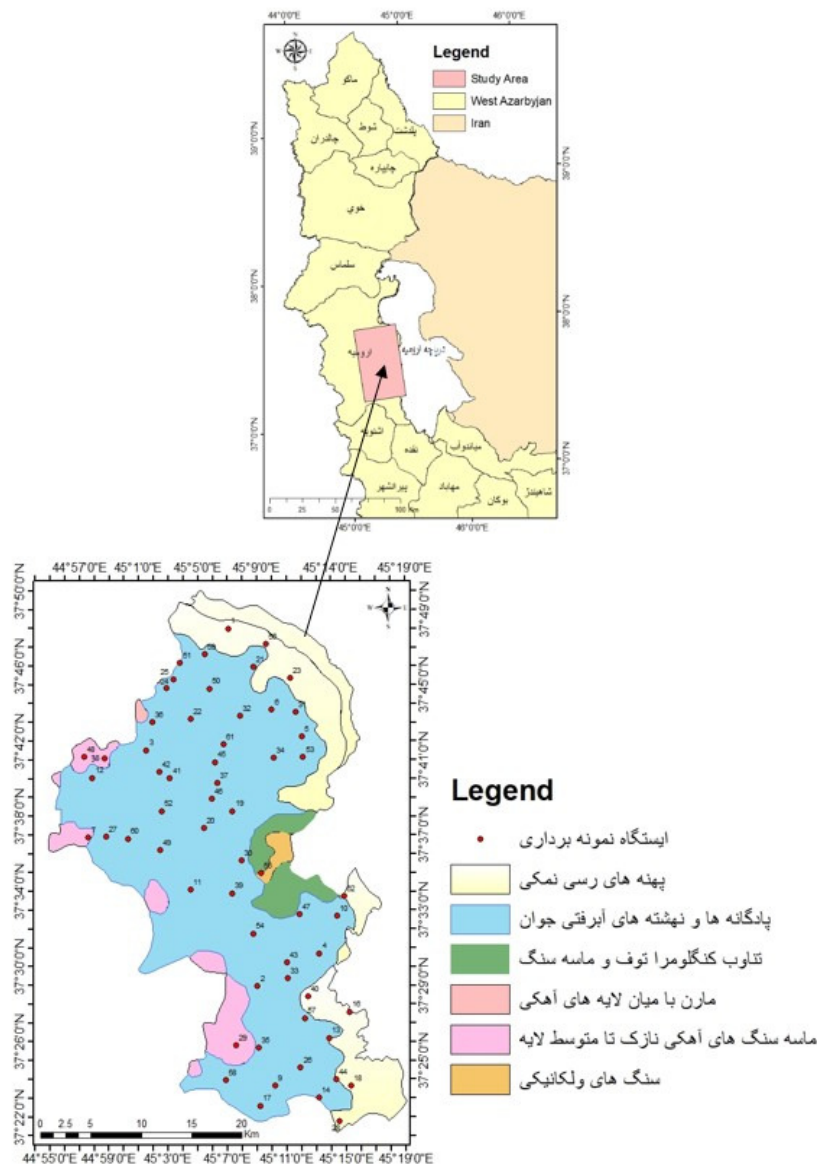
برزیل، چو و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه صورت گرفته برای بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب مخزن با استفاده از تکنیک‌های آماری چندمتغیره در کشور کره، سمیتو و همکاران (۲۰۲۳)، با بکارگیری نتایج آماری چندمتغیره و نمودارهای پراکندگی فرآیند تبادل یونی در کشور پاکستان برای شناسایی ویژگی‌های کیفیت آب برای اهداف خانگی و کشاورزی را می‌توان عنوان نمود. همچنین در سال‌های پیشین ال‌اوستا و همکاران (۲۰۲۲)، ابوزید و همکاران (۲۰۲۲) و جهان و همکاران (۲۰۲۰) مطالعاتی در این زمینه ارائه داده‌اند. در ایران نیز مطالعات کواری و همکاران (۱۴۰۱)، در مبحث کیفیت آب زیرزمینی دشت ارسنجان با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره، فضابخش و همکاران (۱۴۰۱)، در جهت بررسی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره در آبخوان دشت اردبیل و مصطفی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) با تعیین ایستگاه‌ها و پارامترهای مهم فیزیوشیمیایی سنجش کیفیت آب سطحی حوضه گرگانرود با روش‌های آماری چندمتغیره را ترتیب دادند. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های آماری چندمتغیره در مطالعات هیدروژئوشیمیایی منابع آبی، می‌تواند در شناسایی منشأ و تکامل آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. با نظر به آنچه عنوان شد، روش طراحی تحقیق در این مطالعه شامل تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی، بکارگیری روش‌های آماری چندمتغیره، بررسی تیپ و رخساره منابع آبی و ارزیابی کیفیت آب و برهم‌کنش سنگ-آب در دشت آبرفتی ارومیه، واقع در استان آذربایجان غربی می‌باشد. چرا که با توجه به خشک شدن دریاچه ارومیه، مسائل مربوط به ارزیابی کیفیت آب در این منطقه بسیار نگران‌کننده است و تحقیقات در مورد مطالعات هیدروژئوشیمیایی محدود است. در نتیجه، فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی (تکامل)، منشأ، و کیفیت منابع آب در منطقه ضعیف می‌باشد. علاوه بر این، منشأ پارامترهای کیفیت آب و آلودگی منجر به عدم قطعیت در درک فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی اصلی که شیمی آب را کنترل می‌کنند، شده است. همچنین با شناسایی منشأ می‌تواند روش‌های تصفیه آب آشامیدنی را به طور قابل توجهی تغییر دهند.

^۲ EDTA

^۱ Total Hardness

می‌شود (عبادتی و هوشمندزاده، ۲۰۱۴). در این مطالعه تمامی نمونه‌ها از منظر تعادل بار یونی در دامنه‌ای استاندارد کمتر از مقدار ۵ درصد قرار گرفته است. $RE = \frac{\sum(Cations - Anions)}{\sum(Cations + Anions)} \times 100$ به منظور بررسی و تحلیل آماری از نرم‌افزار SPSS ورژن ۲۶ و جهت تهیهی دیاگرام و مدل‌های مختلف هیدروشیمیایی از نرم‌افزار AqQa و برای تهیهی نقشه‌ها از نرم‌افزار ARC Map استفاده شد.

به روش رنگ‌سنجی آنالیز می‌شود (آلیم و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به لزوم کنترل کیفیت نمونه‌ها، اعتبارسنجی روش‌های تحلیلی با کالیبراسیون مناسب ابزارها و بررسی دقت و خطی بودن آن‌ها انجام شد. تعادل آنیون‌ها و کاتیون‌ها پس از بررسی مجدد اندازه‌گیری‌های میدانی در آزمایشگاه، محاسبه شد. خطای تعادل بار یونی یا خطای عکس‌العمل، باید مجموع کاتیون‌ها باید برابر با مجموع آنیون‌ها باشد که با استفاده از فرمول زیر محاسبه



شکل ۱. موقعیت محدوده‌ی مورد مطالعه در ایران و آذربایجان غربی، نقشه زمین‌شناسی دشت آبرفتی ارومیه (برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ ارومیه سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور)، به همراه ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Fig. 1. The location of the studied area in Iran and West Azerbaijan, Geological map of the alluvial plain of Urmia (taken from the 1:100,000 Urmia map of the Geological and Mineral Exploration Organization of the country), along with the sampling stations

جدول ۱. نام و مختصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری دشت آبرفتی ارومیه

Table 2. Names and coordinates of the sampling stations of Urmia alluvial plain

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	شماره ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
۱	اراضی باشلانیشو	۵۱۰۳۹۶	۴۱۸۳۶۲۴	۳۲	ساری بگلوی چراغ	۵۱۱۵۸۲	۴۱۷۵۰۲۱
۲	اراضی قره آغاج	۵۱۳۳۱۳	۴۱۴۸۴۰۰	۳۳	ساری بگلوی معین	۵۱۶۳۱۸	۴۱۴۹۱۸۵
۳	اراضی لک	۵۰۲۲۶۴	۴۱۷۱۶۳۹	۳۴	ساریچالو	۵۱۴۹۳۶	۴۱۷۰۹۱۲
۴	اسلاملو	۵۱۹۴۵۷	۴۱۵۱۶۲۵	۳۵	ساعتلوی بیلر-کیفی	۵۱۳۴۵۸	۴۱۴۲۳۳۱
۵	اصلو	۵۱۷۷۳۴	۴۱۷۳۰۰۹	۳۶	ساعتلوی بیگلر	۵۰۲۸۶۸	۴۱۷۴۳۷۲
۶	آباجالوسفلی	۵۱۴۷۱۸	۴۱۷۵۶۲۳	۳۷	سعیدلو	۵۰۹۲۹۵	۴۱۶۸۳۸۰
۷	آشنا آباد	۴۹۶۵۱۲	۴۱۶۳۰۵۱	۳۸	سنجی	۴۹۱۹۱۱	۴۱۷۵۴۸۴
۸	آغیلاغ	۵۰۸۵۰۵	۴۱۱۲۹۵۱	۳۷	سنگرمیرعبداله	۵۱۰۷۸۹	۴۱۵۷۵۴۷
۹	بالانچ	۵۱۵۰۷۳	۴۱۳۸۵۷۴	۴۰	شاهین آباد	۵۱۸۳۰۷	۴۱۴۷۳۸۱
۱۰	بالدرلو	۵۲۱۱۸۸	۴۱۵۵۳۱۲	۴۱	شیخ سرمست	۵۰۴۵۹۳	۴۱۶۹۴۷۵
۱۱	پارک کارگر	۵۰۶۶۷۷	۴۱۵۷۸۹۲	۴۲	شیخ سرمست	۵۰۳۵۲۴	۴۱۶۹۴۷۵
۱۲	تازه کندجنیزه	۴۹۶۸۹۱	۴۱۶۸۹۱۶	۴۳	طسمالو	۵۱۶۲۰۵	۴۱۵۰۷۵۰
۱۳	تپه ترکمان	۵۲۰۴۳۶	۴۱۴۳۲۹۲	۴۴	عربلوی باراندوز	۵۲۱۱۳۷	۴۱۳۹۳۳۱
۱۴	تپه مهکی	۵۱۹۴۲۳	۴۱۳۷۴۱۶	۴۵	عیسی لوی زمی	۵۰۹۰۸۲	۴۱۷۰۴۵۸
۱۵	ترسه بولاغ	۵۱۱۸۰۷	۴۱۱۵۱۵۹	۴۶	غفاربهی	۵۰۸۷۴۳	۴۱۶۶۸۶۸
۱۶	تکیه اردشاهی	۵۲۲۴۸۳	۴۱۴۵۸۶۶	۴۷	قامت	۵۱۷۴۶۲	۴۱۵۵۵۰۱
۱۷	تومتر	۵۱۳۵۷۸	۴۱۳۶۶۰۳	۴۹	قرالر طسوج	۴۹۶۰۷۴	۴۱۷۰۹۸۱
۱۸	جبل کندی	۵۲۲۶۳۱	۴۱۳۸۶۱۴	۵۰	قره حسنلو	۵۰۳۶۴۱	۴۱۶۱۷۷۲
۱۹	چیچکلوی باش قلعه	۵۱۰۸۳۰	۴۱۵۶۶۴۲	۵۱	قشلاق شکور	۵۰۸۵۳۲	۴۱۷۷۶۹۶
۲۰	چیچکلوی حاج آقا	۵۰۷۹۷۵	۴۱۶۳۹۴۷	۵۲	کریم آباد	۵۰۵۶۱۸	۴۱۸۰۲۵۵
۲۱	حیدرلوی سفلی	۵۱۲۸۸۹	۴۱۷۹۸۲۰	۵۳	گرد آباد	۵۰۳۷۷۹	۴۱۶۵۶۴۲
۲۲	خالد آباد	۵۰۶۶۵۲	۴۱۷۴۷۲۵	۵۴	گزنق	۵۱۷۸۳۱	۴۱۷۰۹۵۲
۲۳	خانسان	۵۱۶۵۳۹	۴۱۷۸۷۳۳	۵۵	گوگ تپه	۵۱۲۸۸۳	۴۱۵۳۵۷۹
۲۴	خانقاه سرخ	۵۰۳۳۸۱	۴۱۷۸۵۷۱	۵۶	الله لوی الیاس	۵۱۳۶۶۸	۴۱۵۹۵۰۷
۲۵	خانقاه سرخ	۵۰۳۳۸۱	۴۱۷۸۵۷۱	۵۷	مرنگلو	۵۱۴۱۴۹	۴۱۸۲۰۸۱
۲۶	خضر آباد	۵۱۷۵۹۴	۴۱۴۰۳۸۲	۵۸	مقدم	۵۱۸۰۱۲	۴۱۴۵۲۵۹
۲۷	درزم	۴۹۸۲۶۸	۴۱۶۳۱۰۷	۵۹	نیولی	۵۱۰۱۴۲	۴۱۳۹۱۴۸
۲۸	دولاما	۴۲۰۴۱۰	۴۱۳۳۶۵۱	۶۰	وقاصلوی علیا	۵۰۸۰۵۲	۴۱۸۱۰۷۱
۲۹	دیدان خان مصطفی	۵۱۱۱۹۴	۴۱۴۲۵۷۶	۶۱	ولینده	۵۰۰۴۵۰	۴۱۶۲۹۱۶
۳۰	ریحان آباد	۵۱۱۶۹۱	۴۱۶۰۷۸۹	۶۲	یاغمرعلی	۵۰۹۹۳۱	۴۱۷۲۱۹۸
۳۱	زرمالو	۵۱۷۰۶۹	۴۱۷۵۳۹۰	۶۳	یووالار	۵۲۱۹۱۸	۴۱۵۷۲۹۸

۲-۳- روش‌های آماری

تحلیل خوشه‌ای سلسله مراتبی^۱: تحلیل خوشه‌ای برای تعیین میزان شباهت نسبی به کار می‌رود. این شباهت بین پارامترها، همگنی در ویژگی‌های اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. این روش آماری کاربرد زیادی در بررسی داده‌های چندمتغیره از جمله بررسی ارتباط بین متغیرها، سازماندهی نمونه‌ها در قالب ساختارهای معنی‌دار و نمایش از ترکیب کل آب زیرزمینی یک منطقه به تعداد محدودی از خوشه‌ها دارد. تحلیل خوشه‌ای مجموعه از متغیرها را در داخل خوشه‌های همگن جای می‌دهد (شرستا و کازاما،

۲۰۰۷). این روش یک روش خوشه‌ای مستقل و کمی است که به طبقه‌بندی آب‌های زیرزمینی به گروه‌های منسجم امکان می‌دهد که براساس سنگ‌شناسی آبخوان، زمان ذخیره‌سازی و همبستگی با پارامترهای کیفیت آب قابل بررسی شوند (رائو و چایدھاری، ۲۰۱۹). در این روش از طبقه‌بندی نمونه‌ها به روش اقلیدسی استفاده می‌شود. فاصله‌ی اقلیدسی کوتاه‌ترین فاصله بین دو نقطه است و برطبق رابطه فیثاغورث محاسبه می‌شود. براساس روش تجمیع وارد (Ward) که از نظر تشکیل خوشه‌های کم و بیش همگن که از نظر ژئوشیمیایی متمایز هستند،

^۱ HCA: Hierarchical cluster analysis

پارامترها فیزیکوشیمیایی و نمونه‌های استفاده می‌شود (زاکاریا و همکاران، ۲۰۲۱).

همبستگی پیرسون: ضریب همبستگی پیرسون که به نام‌های ضریب همبستگی گشتاوری و یا ضریب همبستگی مرتبه صفر نیز نامیده می‌شود، توسط کارل پیرسون معرفی شده است. این ضریب به منظور تعیین میزان رابطه، نوع و جهت رابطه بین دو متغیر مورد استفاده می‌گیرد. مقدار ضریب همبستگی پیرسون بین ۱ تا -۱ می‌باشد. اگر مقدار به دست آمده مثبت باشد، به این معنی است که تغییرات دو متغیر به طور هم‌جهت اتفاق می‌افتد، یعنی با افزایش در هر متغیر، متغیر دیگر نیز افزایش می‌یابد. برعکس اگر مقدار منفی باشد، یعنی اینکه دو متغیر در جهت عکس هم عمل می‌کنند. یعنی با افزایش مقدار یک متغیر دیگر کاهش می‌یابد. اگر مقدار متغیر صفر به دست آمد، نشان می‌دهد که هیچ رابطه‌ای بین دو متغیر وجود ندارد و اگر ۱ شد، همبستگی مثبت کامل و اگر -۱ شد، همبستگی منفی است (صانعی‌سیستانی، ۱۴۰۰).

گروه‌بندی می‌شوند (چیتراکار و همکاران، ۲۰۲۰؛ میر و قانی، ۲۰۱۹).

آنالیز مؤلفه‌های اصلی: تحلیل مؤلفه‌های اصلی یکی از روش‌های تبدیل داده است که برای ایجاد یک ساختار اساسی در یک مجموعه چندمتغیره به کار می‌رود (دیویس، ۱۹۸۶). تحلیل مؤلفه‌های اصلی تبدیلی در فضای برداری است که بیشتر برای کاهش ابعاد مجموعه داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. PCA مؤلفه‌های اصلی را شناسایی کرده و به جای بررسی تمام ویژگی‌ها، یک سری ویژگی‌هایی که ارزش بیشتری دارند را تحلیل کرده و استخراج می‌کند. در تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر مبنای معیار کایزر مؤلفه‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند که مقدار بردار ویژه آن‌ها بزرگ‌تر یا مساوی یک باشد. مقدار بردار ویژه ۱ یعنی ویژگی مورد بررسی دارای بیشترین ارزش و تأثیر را در تحلیل دارند. در نتیجه همه عواملی که حاوی یک واریانس بیشتر از متغیرهای اصلی استاندارد شده باشد، پذیرفته می‌شوند (دیویس، ۱۹۸۶). این روش برای پایش کیفیت آب زیرزمینی و ایجاد ارتباط بین

جدول ۲. توصیف آماری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی در چاه‌های آب زیرزمینی دشت آبرفتی ارومیه (عناصر به mg/l و EC به $\mu\text{s/cm}$).

Table 2. Statistical description of physical and chemical parameters in underground water wells of Urmia alluvial plain (elements in mg/l and EC in $\mu\text{s/cm}$).

Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ²⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	EC	TH	TDS	pH	
۳۰	۱۳/۲	۴/۶	۳/۹	۱۴۰/۳	۳/۵	۱۹/۲	۳۵۰	۱۵۰	۲۲۷/۵	۷	کمترین
۲۲۴	۱۴۴	۱۶۷/۹	۱۱/۷	۷۳۲	۳۴۳	۶۳۸/۴	۲۶۰۰	۱۱۶۰	۱۶۹۰	۸/۲	بیشترین
۹۰/۴	۴۶/۹	۳۸/۵	۴/۳	۳۵۸/۸	۵۸/۸	۱۳۲/۵	۹۸۹/۲	۴۲۱/۶	۶۴۳	۷/۸	میانگین
۳۵/۶	۲۸/۸	۳۴/۵	۱/۴	۱۰۸/۵	۶۳/۹	۱۰۳/۲	۴۶۷/۳	۱۹۰/۷	۳۰۳/۸	۰/۲	انحراف استاندارد
۷۵	۵۰	۲۰۰	۱۲	۱۲۰	۲۵۰	۲۵۰	۱۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۸/۵	WHO استاندارد

(محمدزاده و همکاران، ۱۴۰۰). نتایج حاصل از تحلیل عناصر نشان داد که به ترتیب بیشترین آنیون‌ها $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na} > \text{K}$ و در میان کاتیون‌ها $\text{HCO}_3 > \text{SO}_4 > \text{Cl}$ می‌باشد. شرایط pH نمونه‌ها کمی قلیایی و در حدود استاندارد سازمان بهداشت جهانی، EC شرایط استاندارد و TDS شور بودن آب‌های زیرزمینی را نشان می‌دهد. ۲۵ درصد نمونه‌ها دارای سختی بالاتر از حدود استاندارد سازمان بهداشت جهانی می‌باشند. تجزیه و تحلیل ماتریس همبستگی نشان داده است که آن‌ها با کل جامدات محلول (TDS) همبستگی دارند و همچنین سهم عمده‌ای در شوری آب‌های زیرزمینی دارند.

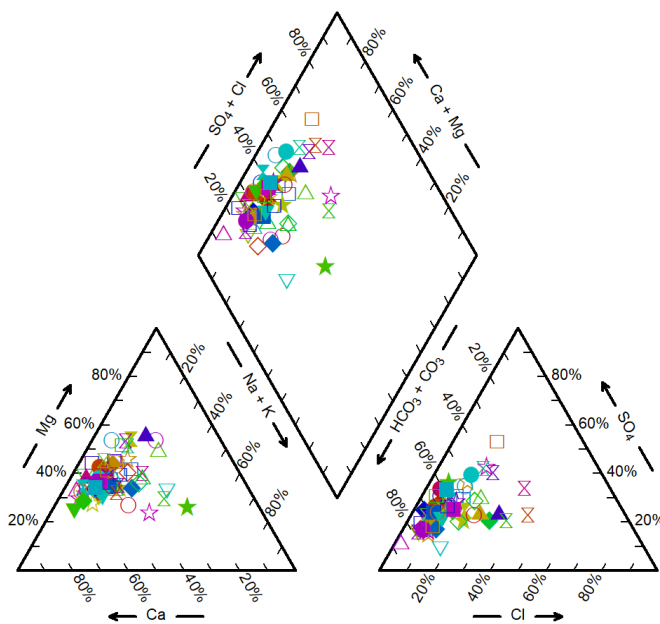
۳- یافته‌ها

جدول ۲ شامل نتایج آماری خصوصیات فیزیکی و شیمیایی در ایستگاه‌های آب زیرزمینی مورد آنالیز از جمله حداقل، حداکثر، میانگین، و انحراف استاندارد و مقدار استاندارد سازمان بهداشت جهانی (۲۰۱۷) می‌باشد. براساس میانگین عناصر، کلسیم و منیزیم (عناصر قلیایی خاکی) بیشتر از سدیم و پتاسیم (عناصر قلیایی) می‌باشد. همچنین آنیون اسید ضعیف (بی‌کربنات) بیشتر از آنیون اسیدهای قوی (سولفات و کلر) می‌باشد. وجود یون سولفات در آب‌های زیرزمینی منجر به اسیدی شدن، کمک کننده به سختی آب و پذیرنده مهم الکترون در فرآیند احیا است

۳-۱- دیاگرام پایپر

نمودار پایپر به طور گسترده‌ای برای نشان دادن طبقه‌بندی شیمی نمونه‌های آب و روند کیفیت آن استفاده می‌شود (حسین‌نیا و حسن‌زاده، ۲۰۲۳). نمودار پایپر به سادگی شباهت‌ها و تفاوت‌های بین نمونه‌های آب زیرزمینی و اختلاط آن‌ها را آشکار می‌کند. نمونه‌های آب با کیفیت مشابه تمایل به قرار گرفتن با یکدیگر در یک گروه را دارا هستند. گونه‌های کاتیونی یونی اصلی در آب زیرزمینی به طور کلی شامل سدیم، منیزیم، کلسیم و پتاسیم و گونه‌های آنیونی کربنات‌ها، سولفات و کلراید می‌باشد. اصطلاح رخساره‌های هیدروشیمیایی برای توصیف گروه‌های آب در یک سفره آب زیرزمینی استفاده می‌شود که در ترکیب شیمیایی آن‌ها متفاوت است (فتر، ۲۰۱۸). براساس نمودار پایپر در شکل ۲، تیپ و رخساره‌ی آب

زیرزمینی ۶۷ درصد بی‌کربنات کلسیک و ۱۷ درصد نمونه‌ها بی‌کربنات منیزیک، ۴ درصد نمونه‌ها بی‌کربنات سدیک و در مجموع ۹ درصد نمونه‌ها به نسبت مساوی به صورت سولفات کلسیک و منیزیک و نیز کلرید کلسیک و منیزیک می‌باشند. مطالعات نشان می‌دهد که تکامل شیمی آب تحت فرآیندهای برهمکنش آب-سنگ می‌باشد. علاوه بر این سرعت هوازگی نیز عامل کنترل‌کننده‌ی املاح موجود در آب است. در این میان هوازگی تبخیری‌ها و کربنات‌ها بیشتر از هوازگی سیلیکات‌ها می‌باشد (لی و همکاران، ۲۰۱۸). بر این اساس، تکامل یا تغییر مکانی ترکیب چند یون اصلی در آب‌های زیرزمینی می‌تواند برای ردیابی نوع سفره‌آب و فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی در حال انجام در منطقه مورد مطالعه استفاده شود (گولر و همکاران، ۲۰۰۲).



شکل ۲. دیاگرام پایپر نمونه‌های آب زیرزمینی دشت آبرفتی ارومیه

Fig. 2. Piper diagram of underground water samples of Urmia alluvial plain

۳-۲- همبستگی بین کل جامدات محلول و سایر پارامترها

رابطه بین یون‌های اصلی و TDS در جدول ۳ نشان داده شده است که نشان می‌دهد همبستگی قابل‌توجهی میان یون‌ها و کل جامدات محلول ($R > 0/5$) وجود دارد. این همبستگی‌ها نشانگر برهم‌کنش‌های ژئوشیمیایی مانند فرآیندهای فرآیندهای اکسیداسیون-کاهش و تبادل یونی می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه محدوده‌ی مورد مطالعه

مطالعات صورت گرفته توسط حبیب‌زاده و همکاران (۱۴۰۰)، نشان می‌دهد که سیلاب‌های شمال دریاچه‌ی ارومیه دارای تیپ بی‌کربنات و رخساره سدیک-کلسیک است. علاوه بر این، در تایید نتیجه‌ی حاصل از دیاگرام پایپر مطالعه‌ی صورت گرفته توسط کوبی‌نژاد قزوینی و همکاران (۱۳۹۵) نشان دادند که تیپ غالب آب‌های زیرزمینی رسوبات کواترنری دشت آبرفتی ارومیه بی‌کربنات کلسیک، منیزیک و سدیک می‌باشد.

همچون دولومیت و کلسیت می‌باشد. بلندی‌های مشرف به دریاچه ارومیه بیشتر از جنس سنگ‌های آذرین- دگرگونی و کربناته است (دادآفرید و همکاران، ۱۳۹۸).

دارای وسعت بالایی است، تنوع فرآیندهای حاکم نیز در آن بالاست. همبستگی بالای کل جامدات محلول با کربنات ($R=0/858$) عمدتاً به دلیل وجود آهک و کانی‌های کربناته

جدول ۳. نتایج حاصل از بررسی همبستگی بین عناصر با استفاده از روش پیرسون

Table 3. The results of examining the correlation between elements using the Pearson method

	pH	TDS	TH	EC	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻
pH	۱	-۰/۶۰۸	-۰/۶۰۶	-۰/۶۰۸	-۰/۴۹۸	-۰/۶۱۰	-۰/۴۸۷	-۰/۴۲۸	-۰/۴۲۲	-۰/۷۳۴	-۰/۴۹۳
TDS		۱	۰/۹۵۴	۰/۹۸۷	۰/۸۸۵	۰/۸۵۸	۰/۵۲۳	۰/۷۵۶	۰/۹۲۲	۰/۸۱۹	۰/۸۶۰
TH			۱	۰/۹۶۴	۰/۸۸۰	۰/۸۵۴	۰/۵۲۴	۰/۵۶۳	۰/۹۳۸	۰/۸۷۵	۰/۷۷۳
EC				۱	۰/۸۸۵	۰/۸۵۸	۰/۵۳۲	۰/۷۵۶	۰/۹۲۲	۰/۸۱۹	۰/۸۶۰
SO ₄ ²⁻					۱	۰/۶۶۴	۰/۴۵۲	۰/۶۲۳	۰/۸۳۵	۰/۷۵۶	۰/۶۳۴
HCO ₃ ⁻						۱	۰/۴۵۹	۰/۶۱۹	۰/۸۵۶	۰/۶۷۰	۰/۶۰۲
K ⁺							۱	۰/۳۵۸	۰/۴۶۲	۰/۵۰۰	۰/۴۵۵
Na ⁺								۱	۰/۵۹۳	۰/۴۰۱	۰/۷۴۳
Mg ²⁺									۱	۰/۶۵۱	۰/۷۲۰
Ca ²⁺										۱	۰/۶۸۲
Cl ⁻											۱

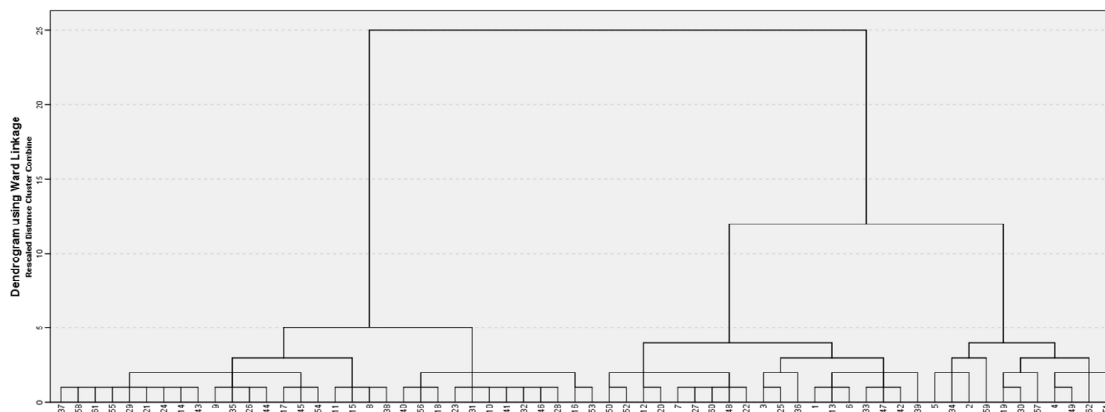
کل جامدات محلول و سختی کل ($R=0/954$) نیز مشاهده شد. این امر به این دلیل است که مقدار سختی کل کل نمک‌های کربناته و غیرکربناته را شامل می‌شود و کل جامدات محلول برابر مجموع غلظت همه یون‌های موجود در آب می‌باشد. مواد محلول در آب ممکن است از نظر ماهیت آلی یا معدنی باشند. همبستگی بین کل جامدات محلول و pH مشاهده نشد. نداشتن همبستگی بین دو پارامتر نشان می‌دهد که انحلال عناصر از فازهای سنگی به طور مستقیم مرتبط با شرایط pH آب‌های زیرزمینی نیست و میزان انحلال‌پذیری سنگ‌ها و رسوبات نیز تأثیرگذار است. همبستگی منفی pH همچنین به دلیل محدود بودن تغییرات pH در نمونه‌ها و همچنین افزایش انحلال‌پذیری کاتیون‌ها با کاهش pH است. همبستگی یون‌های دارای شعاع یونی مشابه با امکان تعویض یونی، احتمالاً نشانگر تأثیر سازندهای زمین‌شناسی با منشأ مشترک و مکانیسم‌ها انحلال یا انتقال مشابه آن‌ها می‌باشد (اصغری‌مقدم و همکاران، ۱۳۹۹). همبستگی مثبت و بالای پارامترهای کاتیونی و آنیونی با مقدار کل جامدات محلول نشان دهنده انحلال کانی‌ها در آب زیرزمینی است، که منجر به بالا رفتن غلظت آن‌ها در آب‌های منطقه شده است. به طور کلی عوامل اصلی کنترل کننده ترکیب شیمیایی آب‌های زیرزمینی در منطقه عبارتند از تبخیر و انحلال به طور کلی برهمکنش آب-سنگ و تبادل یونی می‌باشد.

آنیون‌های کلر با کل جامدات محلول با همبستگی $0/86$ و آنیون سولفات با کل جامدات محلول با همبستگی $0/885$ می‌باشد که نشان از احتمال شوری منابع آبی دارد. سولفات از منابع مختلفی وارد آب‌های زیرزمینی می‌گردد، که منبع عمده آن می‌تواند عوامل زمین‌شناسی مانند انحلال کانی‌های تبخیری مانند گچ، انیدریت و اکسایش مواد سولفیدی نظیر پیریت می‌باشد. از سایر عوامل آتمسفریک و انسان‌ساز همچون ورود زهاب کشاورزی و فاضلاب‌های انسانی و همچنین واکنش‌های شیمیایی و باکتری‌های احیاکننده سولفات اشاره کرد (محمدزاده و همکاران، ۱۴۰۰). وجود کلراید در آب‌های زیرزمینی می‌تواند ناشی از منابع متعددی از جمله هوازدگی خاک، سازندهای زمین‌شناسی حاوی نمک (هالیت) باشد (سیلمانه و همکاران، ۲۰۲۲). کل جامدات محلول با منیزیم ($R=0/922$) و با کلسیم ($R=0/819$) همبستگی بالایی نشان می‌دهد. منشأ کلسیم و منیزیم سازندهای کربناته در منطقه است. با توجه به بالا بودن غلظت کربنات، انحلال کانی‌های کربناته در منطقه نیز ممکن است. کل جامدات محلول با سدیم ($R=0/756$) و پتاسیم ($R=0/532$) نیز همبستگی مثبت بالایی را نشان می‌دهد. منشأ یون سدیم و پتاسیم انحلال کانی‌های تبخیری و همچنین آلبیت موجود در آندزیت‌های و پلاژیوکلازهای موجود در منطقه، هوازدگی سنگ‌های مافیک و تبادل یونی می‌باشد (خسروانی و همکاران، ۱۳۹۶). همبستگی مثبت بالا بین

۳-۳- تجزیه و تحلیل آماری چندمتغیره

آنالیز عامل‌های اصلی و آنالیز تحلیل خوشه‌ای برای نمونه‌های مورد مطالعه صورت گرفت. روش آنالیز تحلیل خوشه‌ای به روش Ward صورت گرفت، چرا که این روش برای تشکیل خوشه‌هایی که کم و بیش همگن هستند و از نظر ژئوشیمیایی از خوشه‌های دیگر متمایز هستند، موفق‌تر می‌باشد (کلوتیر و همکاران، ۲۰۰۸). همچنین از تبدیلات مقیاس Z برای استاندارد نمودن داده‌ها با میانگین صفر و انحراف استاندارد ۱ استفاده شد. طبقه‌بندی داده‌ها براساس روش فاصله ژئومتریکی اقلیدوسی صورت گرفت. تمایز روش آنالیز تحلیل خوشه‌ای این است که تعداد خوشه‌های حاصل از پردازش داده‌ها مشخص در ابتدا مشخص نیست. نتایج حاصل از آنالیز تحلیل خوشه‌ای نمونه‌های آب زیرزمینی دشت آبرفتی ارومیه در شکل ۳ ارائه شده است. دندوگرام سه خوشه را مشخص می‌کند. میانگین پارامترهای نمونه‌های آب این سه خوشه به

تفکیک در جدول ۴ آورده شده است. خوشه‌ی اول شامل ۱۱ نمونه، خوشه‌ی دوم ۱۹ نمونه و خوشه‌ی سوم ۳۲ نمونه می‌باشد. خوشه‌ی اول (۱۷/۷ درصد از کل نمونه‌ها) با بیشترین میانگین کل جامدات محلول، ۱۲۱۴/۳ میلی‌گرم بر لیتر دارای بیشترین کانی‌سازی است. عناصر با بیشترین مقدار در این خوشه جای می‌گیرند. خوشه‌ی دوم (۳۰/۶ درصد از کل نمونه‌ها) با مقدار میانگین کل جامدات محلول کمتر از خوشه‌ی اول ۶۹۷/۹ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. تنها مقدار میانگین پتاسیم ۴/۱ میلی‌گرم بر لیتر نزدیک مقدار میانگین پتاسیم خوشه‌ی اول با میانگین ۴/۶ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. خوشه‌ی سوم که بیشترین تعداد نمونه‌ها (۵۱/۶ درصد از کل نمونه‌ها) را شامل می‌شود، دارای میانگین کل جامدات محلول ۴۳۱/۶ میلی‌گرم بر لیتر و کمترین مقدار میانگین پارامترها در این خوشه قرار دارد. بنابراین نمونه‌های آب دارای کمترین کانی‌سازی می‌باشند.



شکل ۳. نتایج حاصل از آنالیز تحلیل خوشه‌ای نمونه‌های آب زیرزمینی دشت آبرفتی ارومیه

Fig 3. The results of cluster analysis of underground water samples of Urmia alluvial plain

جدول ۴. میانگین مقادیر پارامترهای فیزیکوشیمیایی برای خوشه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴

Table 4. Average values of physicochemical parameters for clusters 1, 2, 3 and 4

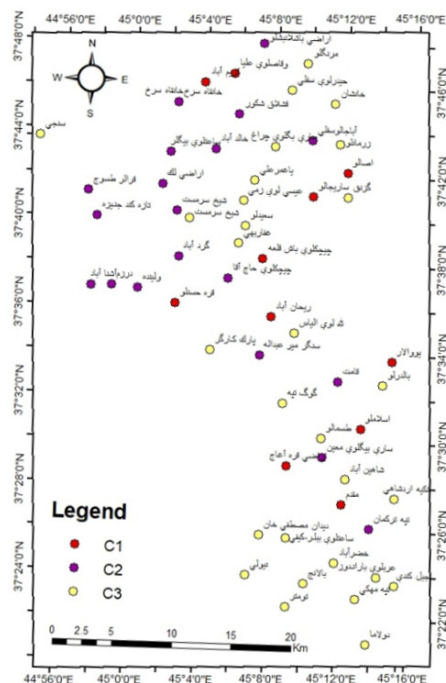
خوشه	TDS	pH	TH	EC	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻
۱	۱۲۱۴/۳	۷/۷	۷۷۰/۴	۱۸۶۸/۱	۲۸۸	۵۳۷/۳	۴/۶	۸۲/۳	۹۹/۸	۱۴۱/۸	۱۷۱/۱
۲	۶۹۷/۹	۷/۷	۴۶۱/۸	۱۰۷۳/۶	۱۶۱/۴	۳۹۷/۴	۴/۱	۴۱/۵	۴۸	۱۰۴/۷	۵۰/۴
۳	۴۳۱/۶	۸	۲۹۰/۶	۶۴۴	۶۹/۶	۲۸۷/۴	۱/۵	۲۱/۹	۳۰/۶	۶۵/۱	۲۵/۳

دوم بخش شمال غربی دشت و خوشه‌ی سوم در بخش جنوبی و شمال شرقی دشت غالب می‌باشد. این شکل امکان درک رفتار فیزیکوشیمیایی آبخوان، تکامل هیدروژئوشیمیایی در طول مسیرهای جریان (وادی)، تفکیک مناطق تغذیه و تخلیه آب‌ها و انجام مدل‌سازی

تغییرات مکانی خوشه‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. هر خوشه به طور جداگانه با نماد رنگی مشخص شده است، که نشان‌دهنده‌ی موقعیت نقاط نمونه‌برداری و تعداد ایستگاه‌های مربوط به هر خوشه می‌باشد. خوشه‌ی اول به صورت پراکنده و اغلب در بخش شرقی دشت، خوشه‌ی

همبستگی فراهم می‌کند. معیار کریزر (کریزر، ۱۹۶۰)، برای تعیین تعداد کل اجزای اصلی مهم استفاده شد. مؤلفه‌ی اول تمامی پارامترها به غیر از pH همبستگی مثبت و قوی نشان می‌دهند و ۴۷/۴ درصد از واریانس را نشان می‌دهد. مؤلفه‌ی دوم هیچ کدام از پارامترها همبستگی مثبت بالایی نشان نداده و ۲۸/۲ درصد از کل واریانس را نشان می‌دهند.

معکوس ژئوشیمیایی در آینده را ممکن می‌سازد. به طور کلی، این گروه با فرآیندهای برهمکنش سنگ-آب، زمان اقامت آب زیرزمینی در آبخوان چند لایه و نوع تغذیه متمایز می‌شوند (بنهون و همکاران، ۲۰۲۱). دو مؤلفه اصلی توسط روش آنالیز تحلیل عاملی استخراج شد (جدول ۵) که ۷۵/۶ درصد از کل واریانس را نشان می‌دهند. این روش امکان کاهش پارامترهای فیزیکوشیمیایی را با



شکل ۴. تغییرات مکانی خوشه‌های تحلیل سلسله مراتبی نمونه‌های آب زیرزمینی دشت آبرفتی ارومیه

Fig. 4. Spatial changes of hierarchical analysis clusters of underground water samples of Urmia alluvial plain

جدول ۵. آنالیز تحلیل عاملی، ارزش ویژه و کل واریانس برای پارامترهای کیفیت آب دشت ارومیه

Table 5. Analysis of factor analysis, eigenvalue and total variance for water quality parameters of Urmia Plain

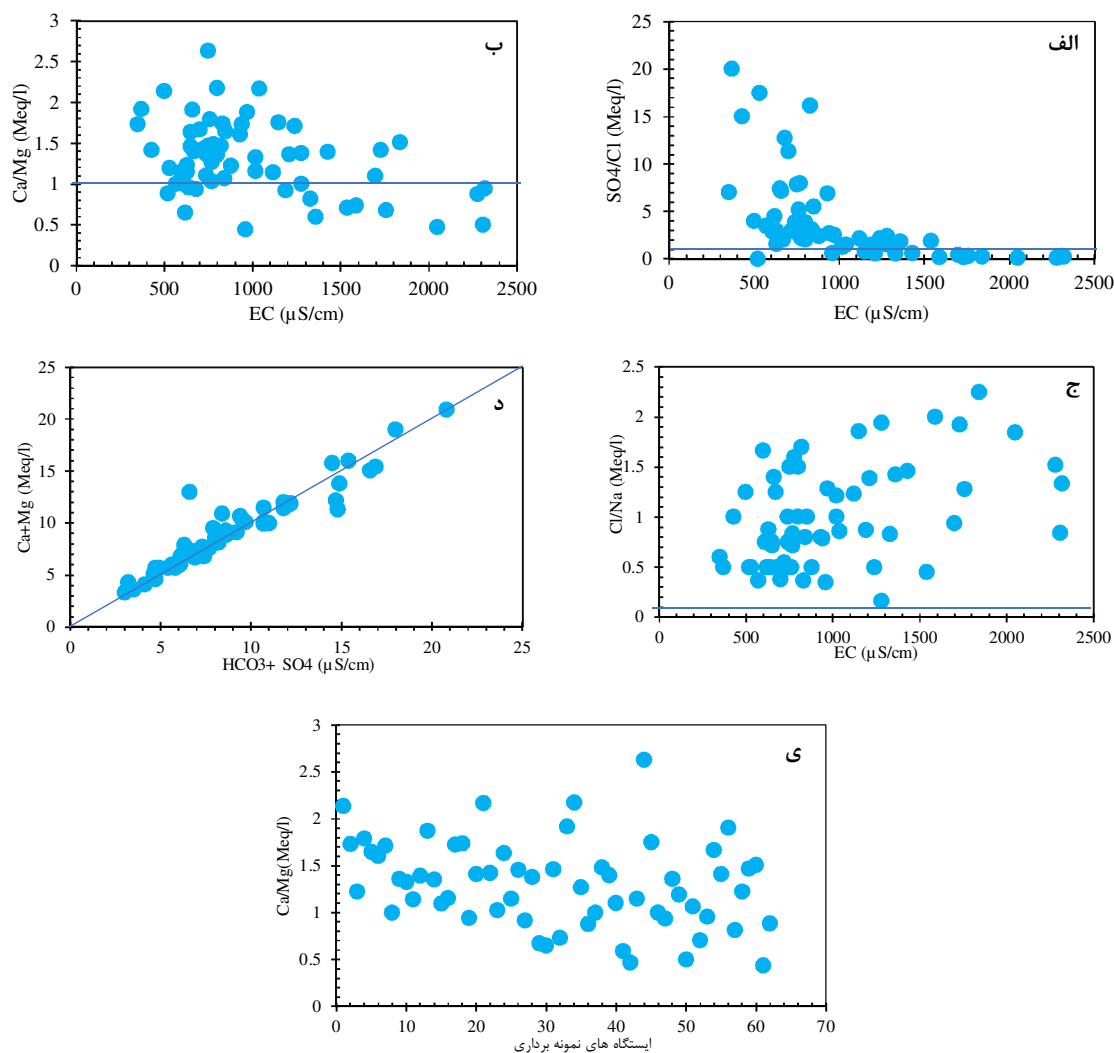
Cl ⁻	TDS	pH	TH	EC	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	
۰/۸۴۱	۰/۹۹۳	-۰/۶۰۸	۰/۹۶۸	۰/۹۹۳	۰/۸۷۹	۰/۸۶۸	۰/۵۹۴	۰/۷۳۰	۰/۹۰۶	۰/۸۴۹	عامل اول
۰/۳۳۹	۰/۰۳۴	۰/۲۲	-۰/۱۱۲	-۰/۱۶۴	۰/۰۹۷	۰/۱۴۹	۰/۴۸۹	-۰/۲۴	-۰/۲۳۱	۰/۴۰۱	عامل دوم
						ارزش ویژه		تغییرپذیری (%)		واریانس تجمعی (%)	
						۷/۵		۴۷/۴		۴۷/۴	
						۲/۶		۲۸/۲		۷۵/۶	
						عامل اول					
						عامل دوم					

۳-۴- منشأ یون‌های اصلی در آب‌های زیرزمینی
غلظت یون‌های اصلی توسط برهم‌کنش‌های پیچیده بین بسیاری از عوامل و مکانیسم‌های مختلف کنترل می‌شود. فرآیندهای شیمیایی کنترل‌کننده آب شامل انتقال آب از تشکیلات رسوبی مانند آبرفت، ماسه، شن، کانی‌های تبخیری، رسوبات و غیره است. شکل ۵ اثر قابل توجه یون‌های Ca+Mg-Cl/Na-EC, SO₄/Cl-EC, Ca/Mg-EC

۳-۴- منشأ یون‌های اصلی در آب‌های زیرزمینی
غلظت یون‌های اصلی توسط برهم‌کنش‌های پیچیده بین بسیاری از عوامل و مکانیسم‌های مختلف کنترل می‌شود. فرآیندهای شیمیایی کنترل‌کننده آب شامل انتقال آب از تشکیلات رسوبی مانند آبرفت، ماسه، شن، کانی‌های تبخیری، رسوبات و غیره است. شکل ۵ اثر قابل توجه یون‌های Ca+Mg-Cl/Na-EC, SO₄/Cl-EC, Ca/Mg-EC

عناصر در آب است. هنگامی که تبادل یون یک فرآیند ژئوشیمیایی مهم برای کنترل ترکیب آب‌زیرزمینی است، رابطه بین نمودار کلسیم در مقابل منیزیم بر سولفات در مقابل کربنات مبادله یونی باید خطی با شیب ۱:۱ باشد (فیشر و مولیکن، ۱۹۹۷). انحلال کانی‌های فرومینزین نیز می‌تواند منشأ منیزیم در آب باشد. هنگامی که غلظت کلر نسبت به سدیم افزایش می‌یابد، به این معنی است که کلر در طی هوازدگی کربنات آزاد می‌شود (دیتش، ۱۹۹۷). روند تغییرات عناصر به عنوان تابعی از EC، نشان می‌دهد که EC با سولفات تغییر نمی‌کند، در حالی که یون‌های کلرید با افزایش شوری، افزایش می‌یابند.

دارند، انحلال دولومیت باید رخ دهد، در حالی که اغلب نمونه‌ها دارای غلظت بالاتری از کلسیم بوده و سهم بیشتر کلسیت را نشان می‌دهند (کشیت‌همیومند و لاشرم، ۲۰۲۰). وجود کربنات‌ها و سیلیکات‌ها در رسوبات می‌تواند به روند هوازدگی کمک کند. در شکل ۵-ج، $Cl/Na-EC$ ، وجود غلظت بالاتر سدیم در آب‌های زیرزمینی نسبت به کلر می‌تواند نشان‌دهنده وجود تشکیلات تبخیری از جمله هالیت در مسیر آب‌های زیرزمینی (خلیف و بودخا، ۲۰۱۸) و یا نفوذ آب شور زیر دریاچه ارومیه به سمت آب شیرین زیرزمینی باشد. نمودار شکل ۵-د $Ca+Mg-SO_4+HCO_3$ نشانگر فرایند تبادل یونی و علاوه بر آن انحلال هم‌زمان کانی‌های کلسیت، دولومیت و ژپس منشأ



شکل ۵. نسبت یون‌های الف - $Ca/Mg-EC$ ، ب - $SO_4/Cl-EC$ ، ج - $Cl/Na-EC$ ، د - $Ca+Mg-SO_4+HCO_3$ و ی - $Ca-Mg$
 Fig. 5. Ratio of ions A- $Ca/Mg-EC$, B- $SO_4/Cl-EC$, C- $Cl/Na-EC$, D- $Ca+Mg-SO_4+HCO_3$ and E- $Ca-Mg$

۴- نتیجه‌گیری

بیشترین تعداد نمونه‌ها را داشت، کمترین کانی‌سازی را نشان می‌دهد. کانی‌سازی خوشه‌ی دوم در بین دو خوشه اول و سوم قرار می‌گیرد. در مرحله‌ی بعدی با تهیه‌ی چارچوب مفهومی هیدروژئولوژیکی و نقشه GIS ارائه شده در این مطالعه، تجسم پیوندهای نظری خاصی بین زمین‌شناسی، و نوع گردش هیدرولیکی زیرزمینی در آبخوان را امکان‌پذیر می‌سازد. نمونه‌های خوشه‌ی اول که دارای بیشترین غلظت از عناصر هستند، نمونه‌ها برداشت شده از نزدیک روستاها و مناطق مشرف به دریاچه ارومیه می‌باشند. نمونه‌های خوشه‌ی دوم منطقه تغذیه در بخش‌های شمال نقشه و خوشه‌ی سوم بخش‌های جنوبی نقشه را شامل می‌شوند. بنابراین نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل‌های سلسله‌مراتبی به صورت مطلوبی می‌توانند مناطق را از هم تفکیک کنند، که این امر در خصوص شناسایی مناطق آلوده می‌تواند کاربردهای وسیعی داشته باشد. دو مؤلفه‌ی اصلی توسط روش آنالیز تحلیل عاملی استخراج شد. مؤلفه‌ی اول تمامی پارامترها به غیر از pH همبستگی مثبت و قوی نشان می‌دهند که دارای بیشترین واریانس هستند. مؤلفه‌ی دوم هیچ کدام از پارامترها همبستگی مثبت بالایی نشان نداد. استفاده از روش‌های HCA و PCA در نمونه‌های آب می‌تواند آب‌های منطقه را به سه گروه تقسیم کند. هر گروه بیشترین همبستگی و مشابه‌ترین عناصر در نمونه‌های آب را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از منشأیابی عناصر با روش نسبت‌های یونی نشان داد که وجود کانی‌های تبخیری بخصوص ژپس و هالیت، نفوذ آب شور دریاچه‌ی ارومیه، تبادل یونی و هوازدهی کلسیت و دولومیت می‌توانند منجر به افزایش عناصر در آب‌های زیرزمینی دشت آبرفتی ارومیه شوند.

References

- Abuzaid, A. S., & Jahin, H. S (2022) Combinations of multivariate statistical analysis and analytical hierarchical process for indexing surface water quality under arid conditions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 248, 104005. doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104005.
- Aleem, M., Shun, C. J., Li, C., Aslam, A. M., Yang, W., Nawaz, M. I., & Buttar, N. A (2018) Evaluation of groundwater quality in the vicinity of Khurrianwala industrial zone, Pakistan. *Water*, 10: 1321. doi.org/10.3390/w10101321.
- Asgharai Moghaddam, A., Nadiri, A. A., & Sadeghi Aghdam, F (2020) Investigation of hydrogeochemical characteristics of

فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی و روش‌های چندمتغیره به عنوان یک رویکرد روش‌شناختی در ارزیابی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مسائل مربوط به کیفیت آب مانند شوری آب‌های زیرزمینی نگرانی اصلی پروژه‌های توسعه منابع آب و همچنین سلامت انسان (تامین آب آشامیدنی) است. تقاضای آب زیرزمینی برای شرب و آبیاری در شهر ارومیه، با در نظر گرفتن تغییرات آب و هوایی، باعث استفاده بیش از حد از منابع آب زیرزمینی در منطقه شده است. کانی‌های تبخیری ژپس و هالیت، کانی‌های کربناته دولومیت و کلسیت، کانی‌های سیلیکاته عوامل اصلی توضیح دهنده ترکیب یونی آب زیرزمینی منطقه مورد مطالعه است. فرآیندهای انسانی نیز نقش مهمی در منطقه مورد مطالعه دارند، بخصوص استفاده از آب در بخش کشاورزی و ورود پساب‌های کشاورزی به آب‌های زیرزمینی منطقه شامل ورود کود، سموم و آفت‌کش‌ها و همچنین باقی‌مانده‌های گیاهی. تغذیه آب‌های زیرزمینی محدوده‌ی مورد مطالعه اساساً توسط آب‌های رودخانه‌های شهرچای، نازل‌چای و باراندوزچای در شهر ارومیه صورت می‌گیرد. با توجه به غالب بودن رخساره بی‌کربناته کلسیک و منیزیک در نمونه‌های آب زیرزمینی دشت ارومیه این نوع آب‌ها وجود سختی را در آب نشان می‌دهند. بنابراین سه عامل کنترل‌کننده‌ی کیفیت آب در محدوده که کنترل‌کننده‌ی میزان املاح آن است، شامل انحلال کانی‌های تبخیری، انحلال کربناته‌ها و هوازدهی سیلیکات‌ها می‌باشد. منشأ آب‌های زیرزمینی محدوده می‌تواند سازندهای کربناته (آهک، کلسیت و دولومیت) و رسوبات تبخیری (ژپس) باشد. ۴ درصد نمونه‌ها رخساره‌ی بی‌کربناته سدیک بودند که می‌توانند مؤید اختلاط آب‌های شیرین و شور باشد. سهم فرآیندهای تبادل یونی معکوس، غلبه فلزات قلیایی خاکی کلسیم و منیزیم بر قلیاها سدیم و پتاسیم و آنیون‌های اسید ضعیف بی‌کربناته بر آنیون اسیدهای قوی کلر و سولفات در منطقه مطرح است.

روش‌های آنالیز مؤلفه‌های اصلی و تجزیه و تحلیل سلسله‌مراتبی برای شناسایی وجود گروه‌ها و ارتباط‌های مختلف بین نمونه‌های آب استفاده می‌شود. مرحله‌ی اول با بررسی نتایج تجزیه و تحلیل سلسله‌مراتبی نمونه‌ها به سه گروه تقسیم‌بندی شدند، که گروه اول با میانگین از کل جامدات محلول دارای بالاترین کانی‌سازی بود و گروه سوم که

- Fetter, C. W (2018) Applied hydrogeology. Waveland Press.
- Fisher, R. S., & Mullican, III, WF (1997) Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeology journal*, 5: 4-16. doi.org/10.1007/s100400050102.
- Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., & Turner, K. A (2002) Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology journal*, 10: 455-474. doi.org/10.1007/s10040-002-0196-6.
- Habibzadeh, A., Goodarzi, M., & Rafiei, M (2022) Application of Quality Method for Qualitative Flood Analysis in Flood Irrigation (case study north Uremia Lake flood). *Hydrogeomorphology*, 8 (29): 21-1. 10.22034/hyd.2022.44851.1579 (in Persian).
- Hosseini, M., & Hassanzadeh, R (2023) Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes using GIS, hydrochemical facies and water quality indices: case study of Rafsanjan plain, Kerman province, Iran. *Applied Water Science*, 13 (3): 84. (in Persian).
- Jahin, H. S., Abuzaid, A. S., & Abdellatif, A. D (2020) Using multivariate analysis to develop irrigation water quality index for surface water in Kafr El-Sheikh Governorate, Egypt. *Environmental Technology & Innovation*, 17: 100532. doi.org/10.1016/j.eti.2019.100532.
- Kaiser, H. F (1960) The application of electronic computers to factor analysis. *Educ Psychol Meas* 20 (1): 141-151.
- Kavari, B., Esmailpour, Y., Mousavi, A. A., Bazrafshan, O., & Holisaz, A (2023). Factor analysis and zoning of qualitative parameters of groundwater resources in Arsanjan Plain, Fars Province. *Journal of Range and Watershed Management*, 75 (4): 607-626. (in Persian).
- Khelif, S., & Boudoukha, A (2018) Multivariate statistical characterization of groundwater quality in Fesdis, East of Algeria. *Journal of Water and Land Development*. doi: 10.2478/jwld-2018-0026.
- Khosrovani, A., Shiri, Z (2017) Hydrogeochemistry and qualitative assessment of water resources in the Quaternary sediments of Southeast Faruj (North Khorasan) in terms of drinking and industrial uses, *Quaternary Journal of Iran*, 3 (3): 265-276 (in Persian).
- Kokbeinjad, A., Mohammadzadeh, V., Soleimani, M (2015) Survey of qualitative changes of underground water located in Quaternary sediments of Urmia Plain, *Quantitative Geomorphology Research*, Year, 5 (3): 93-110 (in Persian).
- groundwater of Naqadeh plain aquifer and heavy metal pollution index (HPI). *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 29: 97-110. doi.org/10.22071/gsj.2018.127310.1464 (in Persian).
- Centeno, N., Cecconello, S. T., Vieira, R. R., Guedes, H. A. S., Reichardt, K., & Timm, L. C (2023) Methodological proposal for the establishment of a water quality index using multivariate analysis based on Brazilian legislation. *Environmental Earth Sciences*, 82(8).
- Chitrakar, P., Baawain, M. S., Sana, A., & Al-Mamun, A (2020) Multivariate statistical technique in the assessment of coastal water quality of Oman. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 15(3): 141-153.
- Cho, Y. C., Im, J. K., Han, J., Kim, Sh., Kang, T., & Lee, S (2023) Comprehensive Water Quality Assessment Using Korean Water Quality Indices and Multivariate Statistical Techniques for Sustainable Water Management of the Paldang Reservoir, South Korea. *Water*, 15(3): 509. doi.org/10.3390/w15030509.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., & Savard, M. M (2008) Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3-4): 294-313. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.015.
- Dadafarid, S., Hessari, B., Abghari, H (2019) Modelling of interaction between Urmia Lake water level and costal aquifer with GMS, *Iranian Water Research Journal*, 13: 129-137 (in Persian).
- Davis, J. C (1986) Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons Inc New York, 646 p.
- Deutsch, W. J., & Siegel, R (1997) Groundwater geochemistry: fundamentals and applications to contamination. CRC press.
- Ebadati, N., Hooshmandzadeh, M. and Behzad, N (2014) A comparison of the correlation Matrix and Man-Kendal correlation statistical methods for analyzing the qualitative parameters of Dez River water. *J Magnt Res Rep*, 2: 986-1001. (in Persian).
- El Osta, M., Masoud, M., Alqarawy, A., Elsayed, S., & Gad, M (2022) Groundwater suitability for drinking and irrigation using water quality indices and multivariate modeling in makkah Al-Mukarramah province, Saudi Arabia. *Water*, 14(3): 483. doi.org/10.3390/w14030483.
- Fazabakhsh, S., Rasoulzadeh, A., Ramezani Moghadam, J., & Esmailian, M (2022) Investigation of Groundwater Quality Using Multivariate Statistical Methods in Ardabil Plain Aquifer. *Irrigation and Water Engineering*, 13(2): 333-353 (in Persian).

- 1396, Master thesis of University of Sistan and Baluchistan (in Persian).
- Selmane, T., Dougla, M., Hasbaia, M., Ferhati, A., & Redjem, A (2022) Hydrogeochemical processes and multivariate analysis for groundwater quality in the arid Maadher region of Hodna, northern Algeria. *Acta Geochimica*, 41 (5): 893-909. doi.org/10.1007/s11631-022-00553-y.
- Shrestha, S., Kazama, F (2007) Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Journal of Environmental Modeling & Software*, 22 (4): 464-475. doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.001.
- Yenehun, A., Dessie, M., Azeze, M., Nigate, F., Belay, A. S., Nyssen, J., Walraevens, K (2021) Water resources studies in headwaters of the Blue Nile Basin: a review with emphasis on lake water balance and hydrogeological characterization. *Water*, 13 (11): 1469. doi.org/10.3390/w13111469.
- Zakaria, N., Anornu, G., Adomako, D., Owusu-Nimo, F., & Gibrilla, A (2021) Evolution of groundwater hydrogeochemistry and assessment of groundwater quality in the Anayari catchment. *Groundwater for Sustainable Development*, 12: 100489. doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100489.
- Kshetrimayum, K. S., & Laishram, P (2020) Assessment of surface water and groundwater interaction using hydrogeology, hydrochemical and isotopic constituents in the Imphal river basin, Northeast India. *Groundwater for sustainable development*, 11: 100391. doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100391.
- Li, X., Wu, H., Qian, H., & Gao, Y (2018) Groundwater chemistry regulated by hydrochemical processes and geological structures: a case study in Tongchuan, China. *Water*, 10(3): 338. doi.org/10.3390/w10030338
- Martins, M. A., Tomasella, J., & Dias, C. G (2019) Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. *Agricultural water management*, 216: 339-350. doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.011.
- Mir, R. A., & Gani, K. M (2019) Water quality evaluation of the upper stretch of the river Jhelum using multivariate statistical techniques. *Arabian Journal of Geosciences*, 12: 1-19. doi.org/10.1007/s12517-019-4578-7.
- Mohammadzadeh, H., Bonyabadi, M., & Jangjoo, F (2021) Investigating the Source and Factors Affecting Sulfate Concentration and Isotopic ($\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}$) Variations in Water Resources of Sarpol-e Zahab Region. *Water and Soil*, 35 (5): 645-658. (in Persian).
- Mostafazadeh, R., Haji, K., Azarndel, H., & Ghasemi, A (2022) Determining the Important stations and Physicochemical Parameters of Surface water Quality Measurement in Gorgan-Rud Basin (Iran) Using Multivariate Statistical Techniques. *Irrigation and Water Engineering*, 13 (1): 421-439. (in persian).
- Pophare, A. M., Lamsoge, B. R., Katpatal, Y. B., & Nawale, V. P (2014) Impact of over-exploitation on groundwater quality: A case study from WR-2 Watershed, India. *Journal of earth system science*, 123: 1541-1566. doi.org/10.1007/s12040-014-0478-0.
- Rao, N. S., & Chaudhary, M (2019) Hydrogeochemical processes regulating the spatial distribution of groundwater contamination, using pollution index of groundwater (PIG) and hierarchical cluster analysis (HCA): a case study. *Groundwater for Sustainable Development*, 9: 100238. doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100238
- Samtio, M. S., Jahangir, T. M., Mastoi, A. S., Lanjwani, M. F., Rajper, R. H., Lashari, R. A., Noonari, M. W (2023) Impact of rock-water interaction on hydrogeochemical characteristics of groundwater: Using multivariate statistical, water quality index and irrigation indices of chachro sub-district, thar desert, sindh, Pakistan. *Groundwater for Sustainable Development*, 20: 100878. doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100878.
- Sanei Sistani, S (2019) The effect of the moon's gravity on earthquakes in Iran from 1300 to

Investigating the quality of underground water in the alluvial plain of Urmia by using multivariate statistical methods and hydrogeochemical processes

Z. Sheikhi Almanabad^{1*}, H. Pirkharrati² and H. Rahmanpour³

1- Ph. D. (graduated), in environmental geology, Urmia University, Urmia, Iran

2- Assoc. Prof., Dept., of Geology, Urmia University, Urmia, Iran

3- M. Sc. (graduated), in Economic Geology, Urmia University, Urmia, Iran

* Z.Sheikhi@urmia.ac.ir

Received: 2023.5.12 Accepted: 2023.7.30

Abstract

In recent decades, excessive exploitation of underground water resources due to increasing urbanization and agricultural activities, as well as the effect of climate change, has led to a decrease in the level and hydrochemical changes of underground water. This study was conducted on the quality of underground water and hydrogeochemical processes (evolution and origin) in the alluvial plain of Urmia, located in West Azarbaijan province, northwestern Iran. For this purpose, the results of 63 wells in the spring and summer of 1400 were used. SPSS and GIS software were used for data analysis. Based on the Piper diagram, two types of groundwater were identified, according to which the type and facies of 67% of the samples are calcic bicarbonate and 17% of the samples are magnesian bicarbonate. The correlation of bicarbonate with total dissolved solids parameter is ($R=0.858$), chlorine ($R=0.86$), sulfate ($R=0.885$), magnesium ($R=0.922$), calcium ($R=0.819$), potassium ($R=0.532$) and sodium ($R=0.756$). Examining the correlations between elements and total dissolved solids parameter ($R<0.5$) indicates geochemical interactions such as oxidation-reduction and ion exchange processes in groundwater samples. The methods of principal component analysis and hierarchical cluster analysis in order to define the main control factors affecting the hydrochemistry of Urmia alluvial plain showed that the water samples have different evolutions. Three clusters were found in the cluster analysis, the first cluster was 17.7% of the samples with an average total dissolved solids of 1214.2 mg/liter, the second cluster was 31.6% of the samples with an average total dissolved solids of 697.9 mg/liter (the most mineralization), and the third cluster was 51.6% of the samples with an average total Dissolved solid of 431.6 mg/liter (the least mineralization). Two main components were extracted by the method of Principal Component analysis, which represent 75.6% of the total variance. The presence of evaporite minerals, especially gypsum and halite, infiltration of salt water from Urmia Lake, ion exchange and weathering of calcite and dolomite minerals are the sources of elements in the alluvial plain of Urmia.

Keywords: Urmia, Underground water, Principal Component Analysis

Introduction

The water demand is increasing rapidly with increasing urbanization, agriculture, and industrial development. Land use change and agricultural activities usually lead to the intensification of water quality reduction. The quality of underground water is largely influenced by natural processes (lithology), the state of food sources (interaction with other deep aquifers), and human factors such as agricultural activities, the entry of sewage into water sources, and also by excessive exploitation. The aquifer changes. Water quality parameters and their periodic monitoring provide decision-makers with information about the trend of water quality changes regarding the effects of development

and climate change. Therefore, this study investigated the identification of hydrochemical processes that control water chemistry and the origin of quality parameters with the help of multivariate statistical methods.

The research design method in this study includes the analysis of laboratory results, the use of multivariate statistical methods, the investigation of the type and facies of water resources, and the evaluation of water quality and rock-water interaction in the alluvial plain of Urmia, located in West Azarbaijan province. Because due to the drying up of Lake Urmia, the issues related to water quality assessment in this area are very worrying and the research on hydrogeochemical studies is limited. As a

result, hydrogeochemical processes (evolution), origin, and quality of water resources in the region are weak. In addition, the origin of water quality parameters and pollution has led to uncertainty in the understanding of the main hydrogeochemical processes that control water chemistry. Also, by identifying the source, they can significantly change the drinking water purification methods.

Material and Methods

The study area of Urmia alluvial plain in West Azarbaijan province is one of the plains in the catchment area of Lake Urmia. In this research, the results of 125 deep wells, semi-deep wells, aqueducts, and springs in the spring and summer of 1400 located in the alluvial plain of Urmia prepared by the regional water organization of West Azarbaijan province were used.

Hierarchical cluster analysis (HCA: Hierarchical cluster analysis): Cluster analysis is used to determine the degree of relative similarity. This similarity between the parameters shows homogeneity in the measured characteristics. This statistical method is widely used in investigating multivariate data, including investigating the relationship between variables, organizing samples in the form of meaningful structures, and displaying the total composition of the underground water of a region in a limited number of clusters. Cluster analysis places a set of variables into homogeneous clusters.

Principal component analysis (PCA): Principal component analysis is one of the data transformation methods used to create a basic structure in a multivariate set. The principal component analysis is a transformation in vector space that is mostly used to reduce the dimensions of data sets. PCA identifies the main components and instead of examining all the features, it analyzes and extracts a series of features that have more value.

Discussion of Results & Conclusions

According to the predominance of calcic and magnesian bicarbonate facies in the underground water samples of Urmia Plain, these types of water show the presence of hardness in the water. Therefore, the three controlling factors of water quality in the range that controls the number of solutes include the dissolution of evaporative minerals,

dissolution of carbonates, and weathering of silicates. The source of underground water in the area can be carbonate formations (lime, calcite, and dolomite) and evaporative deposits (gypsum). 4% of the samples were bicarbonate-sodic facies, which can confirm the mixing of fresh and salt water. The contribution of reverse ion exchange processes, the predominance of alkaline earth metals calcium and magnesium over sodium and potassium alkalis, and the anions of weak bicarbonate acids over the anions of strong chlorine and sulfate acids in the region are discussed. The results of the elemental analysis showed that most anions are carbonate > sulfate > chloride and among cations calcium > magnesium > sodium > potassium. The pH conditions of the samples are slightly alkaline and within the standard of the World Health Organization, EC standard conditions and TDS shows the salinity of the underground water. 25% of the samples have a hardness higher than the standard limits of the World Health Organization. Correlation matrix analysis has shown that they are correlated with total dissolved solids (TDS) and are also major contributors to groundwater salinity. Principal component analysis and hierarchical analysis methods are used to identify the existence of different groups and relationships between water samples. In the first stage, by examining the results of the hierarchical analysis, the samples were divided into three groups, the first group had the highest mineralization with the average of all dissolved solids, and the third group, which had the largest number of samples, had the lowest mineralization. It shows mineralization. The mineralization of the second cluster is located between the first and third clusters. In the next step, preparing the hydrogeological conceptual framework and the GIS map presented in this study, enables the visualization of certain theoretical links between geology and the type of underground hydraulic circulation in the aquifer. The samples of the first cluster, which have the highest concentration of elements, are the samples taken from the villages and areas overlooking Urmia Lake. The samples of the second cluster of the feeding zone are included in the northern parts of the map and the third cluster in the southern parts of the map. Therefore, the results of the hierarchical analysis can separate the regions in a favorable way, which can have wide applications

regarding the identification of contaminated areas. Two main components were extracted by the Principal Component Analysis method. The first component of all parameters, except for pH, shows a positive and strong correlation, which has the highest variance. The second component did not show a high positive correlation with any of the parameters. The use of HCA and PCA methods in water samples can divide the waters of the region into three

groups. Each group shows the most correlation and the most similar elements in water samples. The results of determining the origin of elements using the method of ion ratios showed that the presence of evaporite minerals, especially gypsum and halite, infiltration of salt water from Lake Urmia, ion exchange, and weathering of calcite and dolomite can lead to the increase of elements in the waters. The underground alluvial plain of Urmia.