

## تأثیر شوراب پلایای میقان اراک بر کیفیت آب زیرزمینی به روش آمار چندمتغیره

فریدون قدیمی\*<sup>۱</sup> و سارا آزاديفر<sup>۲</sup>

۱- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

نویسنده مسئول: ghadimi@Arakut.ac.ir \*

نوع مقاله: پژوهشی

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۵

دریافت: ۱۴۰۰/۸/۲۵

## چکیده

پلایای میقان در حوضه آبریز اراک مهم‌ترین قطب استخراج سولفات سدیم در ایران است. پلایا از دو بخش جزیره در مرکز و دریاچه در حاشیه تشکیل شده است. استخراج سولفات سدیم در جزیره با تشکیل حوضچه‌های مصنوعی همراه است. پساب شرکت سولفات سدیم و فاضلاب تصفیه شده مهم‌ترین منابع آب سطحی پلایای میقان هستند. تأثیر نوسانات شوراب بر کیفیت آب چاه‌های کشاورزی حاشیه پلایا از اهداف مقاله است. استفاده از آمار تک و چند متغیره نظیر آزمون مقایسه میانگین‌ها، تحلیل عاملی، خوشه‌ای و متمایز کننده جهت مقایسه شوراب پلایا با منابع آب زیرزمینی استفاده شد. در ۲۲ نمونه مقدار متغیرهای کیفی هدایت الکتریکی، قلیائیت، کل جامد محلول، pH، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم، کلر، سولفات و بی‌کربنات تعیین گردید. اختلاف در کل جامدات محلول، pH، سولفات و کلر، سه گروه آب نظیر شوراب حوضچه، شوراب دریاچه و آب زیرزمینی به روش آمار چند متغیره را مشخص نمود. تحلیل چند متغیره نشان داد متغیرهای کیفی از چند منشاء هستند. شوری آب پلایای میقان و آب زیرزمینی مربوط به آنیون‌ها و کاتیون‌هایی بوده که منشاء آن‌ها طبقات گچی و نمکی بخش شمالی، قلیائیت و بی‌کربنات ناشی از انحلال سنگ‌های آهکی طبقات جنوبی حوضه آبریز میقان است. ارزیابی نمودار نسبت‌های سدیم به کلر و نمودار گیبس حاکی از نفوذ آب شور پلایای میقان بر آب زیرزمینی چاه‌های کشاورزی دشت، خصوصاً در حاشیه پلایا است.

واژه‌های کلیدی: کیفیت آب زیرزمینی، متغیرهای هیدروژئوشیمیایی، نفوذ شوراب، تحلیل آماری، پلایای میقان اراک

## پیشگفتار

آب زیرزمینی، مسیرهای جریان، مخلوط‌شدگی توده‌های مختلف آب و بهره‌برداری انسان از آب مهم‌ترین عواملی هستند که کیفیت آب زیرزمینی را تعیین می‌کنند (عبدالله و خلیلی، ۲۰۱۸؛ بوسیکو و همکاران، ۲۰۱۸؛ صادقی و بابا علی، ۱۳۹۹؛ نوین‌پور و عارف، ۱۳۹۹). شرایط طبیعی حاکم بر حوضه پلایا می‌تواند در ترکیب شیمیایی پلایاها مؤثر باشد. سنگ‌های حوزه بالادست هر پلایایی ترکیب شیمیایی منابع آب و خاک آن را تعیین می‌کنند (شیخ فخرالدینی و عباس‌نژاد، ۱۳۹۴). در اثر تجزیه سنگ‌های آذرین، عناصری چون سیلیس، پتاسیم، سدیم و آلومینیوم وارد آب‌های زیرزمینی می‌شوند (خدابخش و همکاران، ۱۳۹۵). در اثر انحلال سنگ‌های آهکی ترکیباتی چون کلسیم، منیزیم و یون‌های بی‌کربنات به آب اضافه می‌شوند. طبقات گچی و نمکی با افزایش یون‌های سولفات و کلر در آب همراهند (شهبازی و فیض‌نیا، ۱۳۹۰). از طرفی، پلایاها مرکزی ایران از جمله پلایای میقان اراک شور بوده و شوری آن‌ها به دلیل دخالت‌های انسانی به سفره‌های

در عصر آنتروپوسن، چرخه آب خشکی‌ها نتیجه تغییرات جهانی آب و هوایی، تغییر در کاربری اراضی و استفاده بشر از آب تغییر یافته است (هان و همکاران، ۲۰۲۱؛ تانگ، ۲۰۲۰). فعالیت‌های انسانی منجر به ذوب یخچال‌ها، تغییر در رژیم آب رودخانه‌ها، نیاز شدید آبی، پمپاژ آب زیرزمینی، نفوذ آب شور و افت شدید آب زیرزمینی شده که اثرات آن‌ها در آفریقا، استرالیا، چین، اروپا، آمریکا و خصوصاً آسیا دیده می‌شود (والتر و لئونارد، ۲۰۲۰؛ ژو و همکاران، ۲۰۲۰). افت سطح آب زیرزمینی ناشی از بهره‌برداری بیش از حد مجاز و تغییرات آب و هوایی (تغییر در بارش و تغذیه) سبب نفوذ جانبی آب شور دریاها و پلایاها و بالآمدگی پهنه‌های آب زیرزمینی شور عمیق شده‌اند (وحیدی‌پور و همکاران، ۲۰۲۱).

کیفیت آب زیرزمینی به فرآیندهای طبیعی و فعالیت‌های انسانی بستگی دارد (بهرامی‌نسب و همکاران، ۱۳۹۹). واکنش‌پذیری آب و سنگ، انحلال کانی‌ها، زمان ماندگاری

۱۳۸۲). پلایای میقان اراک یکی از پلایاهای ایران مرکزی بوده که شور است. مهم‌ترین منابع آبی تغذیه‌کننده پلایا را آب‌های زیرزمینی، فاضلاب‌های تصفیه شده شهر اراک و پساب شرکت سولفات سدیم تشکیل می‌دهد. منابع آلاینده طبیعی چون سازندهای گچی و نمکی در بخش شمالی پلایای میقان گسترش دارند (قدیمی و قمی، ۲۰۱۳). هدف از این تحقیق، ارزیابی تأثیر متغیرهای کیفی آب پلایا در دو کاربری حوضچه‌های مصنوعی (حفر شده توسط شرکت املاح ایران در بخش مرکزی جزیره جهت استحصال ماده معدنی سولفات سدیم) و کاربری دریاچه (در پیرامون جزیره مرکزی) بر آب زیرزمینی نظیر چاه‌های کشاورزی اطراف پلایا به روش‌های آمار تک و چند متغیره است.

### مواد و روش‌ها

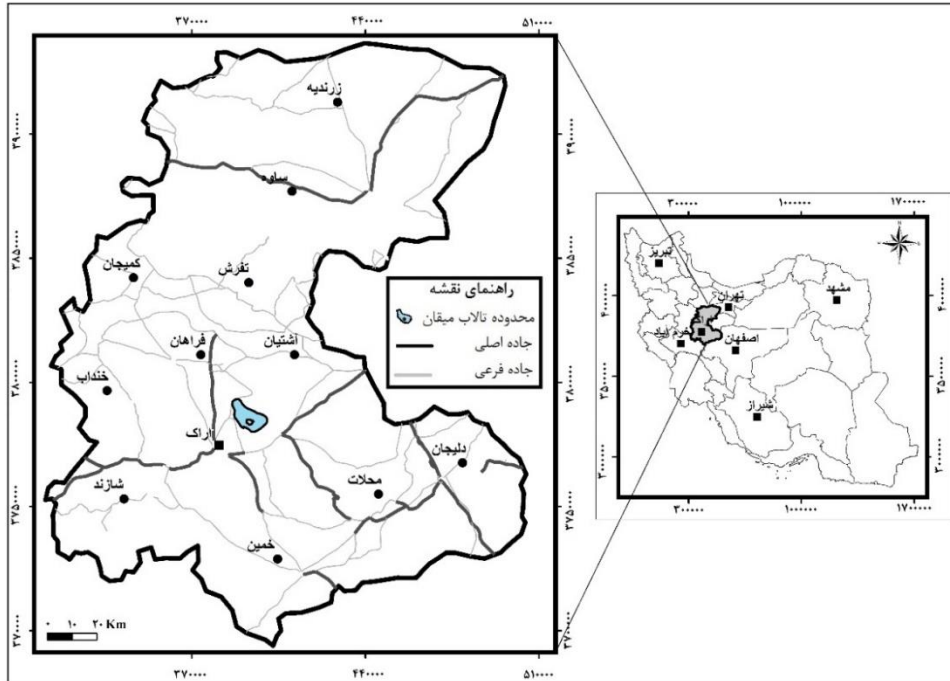
#### موقعیت جغرافیایی منطقه

در حوضه آبریز بسته و داخلی اراک با مساحت ۵۵۰۰ کیلومتر مربع، حدود ۶۲ درصد از مساحت حوضه را ارتفاعات، ۳۶ درصد دشت و ۲ درصد (۱۱۰ کیلومتر مربع) را پلایای میقان تشکیل می‌دهد (شکل‌های ۱ و ۲). بلندترین نقطه ارتفاعی حوضه مربوط به کوه نقره‌کمر تفرش با ارتفاع ۳۱۷۰ متر از سطح دریا در شمال شرق و پست‌ترین نقطه ارتفاعی حوضه مربوط به پلایای میقان با ارتفاع ۱۶۵۰ متر از سطح دریا است. درجه حرارت و بارندگی متوسط سالیانه حوضه اراک به ترتیب ۱۴ درجه سانتی‌گراد و ۳۵۰ میلی‌متر است. پلایا از دو بخش جزیره در مرکز و دریاچه در اطراف تشکیل شده که عمق متوسط آب در دریاچه و در ماه‌های مرطوب یک متر است. استخراج سولفات سدیم مربوط به شرکت املاح ایران از جزیره انجام می‌گیرد. آبرفت پلایای میقان با ضخامتی بالغ بر ۳۰۰ متر بر روی سنگ‌های آهکی کرتاسه واقع شده و دو گسل بزرگ تلخاب در شمال و گسل تبرته در جنوب پلایا، گودی بزرگ پلایا را از ارتفاعات جدا می‌کند (قدیمی و قمی، ۲۰۱۳). عملیات استخراجی در جزیره میقان منجر به تشکیل حوضچه‌های مصنوعی متعددی شده که عمق حداکثر برخی از آن‌ها به ۶ متر می‌رسد. در ماه‌های خشک (تیر، مرداد، شهریور، مهر و آبان) دریاچه فاقد آب و حوضچه‌ها آب دارند. بخش حجیم آب در حوضچه‌های جزیره ناشی از عملیات استخراجی معدن کاری است. دائمی

آب زیرزمینی دشت‌های مجاور راه یافته است. این پدیده که تحت جبهه پیشرونده شوری در آبخوان‌ها معروف بوده، نوعی آلودگی انسانی است که در اکثر آبخوان‌های ساحلی و آبخوان‌های مرکزی ایران دیده می‌شوند (مظفری‌زاده و سجادی، ۱۳۹۲؛ عزیزی و همکاران، ۱۳۹۶). قدیمی و قمی (۲۰۱۲) نشان دادند، بالا بودن یون‌های کلر و سولفات در برخی از چاه‌های نزدیک به پلایای میقان (چاه ده‌نمک و چاه راهزان) ناشی از اختلاط آب شور و شیرین بوده که جبهه شور پلایای میقان به سمت آبخوان اراک در حال پیشروی است. مطالعات ما و همکاران (۲۰۱۳) در آب‌های زیرزمینی حوضه دانه‌نگ شمال غرب چین و هم‌چنین مطالعات اینسدل (۲۰۱۲) در آب‌های زیرزمینی دشت سواحل اقیانوس اطلس در اروپا و مطالعات هیگل و همکاران (۲۰۱۳) نشان داد که منشاء ترکیباتی چون هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، کلر، سولفات، پتاسیم، منیزیم و سدیم ناشی از مخلوط‌شدگی دو آب شیرین و شور می‌باشد. روزرخ و همکاران (۱۳۹۶) با بررسی منابع آب زیرزمینی دشت هرزندات، نقش انحلال سنگ‌های آهکی را در افزایش سختی بیان نمودند. ابراهیمی محمدی (۱۳۹۶) با بررسی هیدروشیمیایی چاه‌های منطقه زربوار به نقش سازندهای زمین‌شناسی در ترکیب شیمیایی آب منطقه تأکید داشته و فرآیند انحلال سنگ‌های آهکی را در افزایش میزان کربنات آب مؤثر دانست. پساب شرکت املاح ایران (برداشت سولفات سدیم از حوضچه‌های جزیره مرکزی) دارای هدایت الکتریکی، جامدات محلول، سولفات و کلر بالا است (اله‌دادی و قدیمی، ۱۳۹۲). حدود ۶۰ درصد از آب چاه‌های کشاورزی اطراف پلایای میقان با توجه به هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، سولفات و کلر تقریباً شور هستند. به دلیل خشکسالی‌های پی‌درپی اخیر، برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و حفر چاه‌های غیر مجاز، سطح آب زیرزمینی بسیاری از دشت‌ها افت نموده است (جعفری و بخشنده مهر، ۱۳۹۱). افزایش برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی دشت رشکان و کاهش ذخایر این سفره‌ها و در نتیجه افزایش تمرکز و غلظت یون‌ها و وجود واحدهای تبخیری باعث شوری آب‌ها شده است (حق‌پرست و همکاران، ۱۳۹۳). شور شدن آب زیرزمینی در دشت شبستر حاکی از نفوذ آب شور دریاچه ارومیه به سفره آب زیرزمینی دشت مجاور دارد (اصغری‌مقدم و محمدی،

تصفیه شده در ماه‌های خشک سال، تنها منبع آب دائمی حوضچه‌های بخش جزیره است. بنابراین آب در پلایای میقان اراک از دو منشاء طبیعی و انسان‌زاد می‌باشد.

بودن آب در حوضچه‌ها به دلیل عمق حوضچه‌ها و تمرکز آن‌ها در مرکز پلایا و از طرفی ورود ۲۰۰ لیتر بر ثانیه (فصول خشک) تا ۸۰۰ لیتر بر ثانیه (فصول مرطوب) آب تصفیه شده فاضلاب شهر اراک به پلایا است. به عبارتی آب



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی پلایای میقان اراک در استان مرکزی

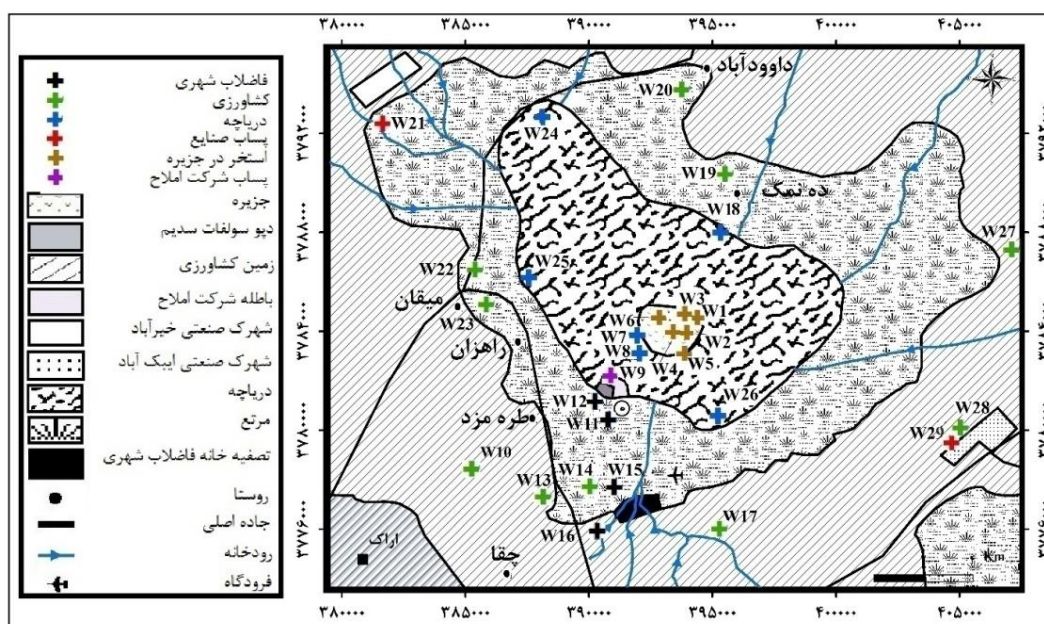


شکل ۲. موقعیت جزیره و دریاچه پلایای میقان

## روش بررسی

کشاورزی را در پیلای میقان نشان می‌دهد. آب‌ها ضمن عبور از صافی و اسیدی شدن در pH کم‌تر از ۲ به آزمایشگاه معتمد در یتیم جنوب در اراک جهت تجزیه‌های شیمیایی ارسال گردید. هدایت الکتریکی به کمک دستگاه WTW Universal Conductivity Meter Multi Line P4 Set، غلظت ترکیبات کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم، کلر و سولفات به روش کروموتوگرافی، بی‌کربنات به روش تیتراسیون تعیین گردیدند.

جهت تأثیر شوراب پیلای میقان بر کیفیت آب زیرزمینی چاه‌های اطراف سه گروه نمونه‌برداری شامل حوضچه‌های مرکزی (۶ نمونه)، دریاچه (۶ نمونه) و چاه‌های کشاورزی (۱۰ نمونه) و سه نمونه تکراری (جهت تعیین دقت نتایج آزمایشات) توسط ظروف پلی‌اتیلن که با اسید کلریدریک و سپس آب مقطر شسته شده، برداشت گردید. شکل ۳ کاربری‌های مختلف از آب و زمین و موقعیت نمونه‌های برداشت شده از آب‌های سطحی پیلای و آب چاه‌های



شکل ۳. کاربری‌های مختلف آب و زمین در محدوده پیلای میقان

انتظار شخص از آزمایشگاه و نوع دستگاه تجزیه بستگی داشته که معمولاً ۱۰ درصد انتخاب می‌شود. از آن جایی که نمونه‌های آب به آزمایشگاه معتمد در یتیم جنوب واقع در اراک ارسال شد، لذا دقت آزمایشگاه مورد ارزیابی قرار گرفت.

## بررسی‌های آماری

اکثر محاسبات و روش‌های آماری نیازمند داده‌های نرمال هستند (ری‌من و فیل زوموسر، ۲۰۰۰). چنانچه منحنی توزیع مجموعه‌ای از داده‌ها مطابق با منحنی توزیع نرمال باشد، آن منحنی را منحنی نرمال و آن مجموعه داده‌ها را داده‌های نرمال گویند. از خصوصیات توزیع نرمال می‌توان انطباق سه آماره میانگین، میانه و مد و شکل زنگوله متقارن را نام برد (قدیمی و قمی، ۱۳۹۵). جهت

## تعیین دقت نتایج آزمایشات

در هنگام ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه سه نمونه از کل نمونه‌ها به عنوان نمونه‌های تکراری با کدگذاری محرمانه انتخاب و به آزمایشگاه ارسال تا نتایج آزمایشگاه کنترل و از دقت نتایج اطمینان حاصل گردد. جهت تعیین دقت آزمایش از روش محاسباتی استفاده شد (رابطه ۱). در این روش که معمولاً برای محاسبه دقت غلظت عناصر و یا متغیرها به کار می‌رود خطای تجزیه نمونه‌های تکراری از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (حسنی‌پاک، ۱۳۶۲).

$$R = \frac{2}{n} \sum \frac{|x_1 - x_2|}{x_1 + x_2} \times 100 \quad (1)$$

که در آن  $n$  تعداد نمونه‌های تکراری،  $x_1$  نتیجه تجزیه نمونه،  $x_2$  نتیجه تجزیه نمونه تکراری و  $R$  خطای نسبی تجزیه است. لازم به توضیح است حد دقت تعریف شده به

یا دوری و نزدیکی نمونه‌ها از میانگین گروه متغیرها مشخص شده و وضعیت نمونه در هر گروه را با نزدیک‌ترین میانگین تعیین می‌کند. لازم به توضیح است تمامی تحلیل‌های آماری چند متغیره در نرم‌افزار Statistica نسخه ۱۲ انجام گرفت. جهت تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت آب‌های شور پلایای میقان و آب‌های زیرزمینی اطراف آن از آزمون مقایسه میانگین داده‌ها به روش آزمون‌های فیشر، t استیودنت و همچنین از آزمون سطح احتمال (p-value) استفاده شد. در آزمون‌های فیشر و t استیودنت مقدار محاسباتی هر متغیر (هدایت الکتریکی، قلیائیت، کل جامد محلول، pH، کلسیم، منیزیم، پتاسیم، سدیم، کلر، سولفات و بی‌کربنات) در سطح اطمینان ۹۵ درصد (خطای ۵ درصد) با مقدار جدول و یا مقدار بحرانی مقایسه شد. در صورت کمتر بودن مقدار فیشر و t استیودنت محاسباتی از مقدار بحرانی بدیهی است اختلافی بین میانگین دو متغیر وجود نداشته و هر دو از یک جامعه هستند. در آزمون سطح احتمال نیز چنانچه مقدار آن بیش از ۰/۰۵ باشد اختلافی بین میانگین دو جامعه متغیرها وجود ندارد (قدیمی و قمی، ۱۳۹۵). همچنین از نمودارهای مثلثی با ترکیبات کاتیونی (کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم) و آنیونی (کلر، سولفات و بی‌کربنات) جهت طبقه‌بندی آب‌ها و از نمودارهای Na-Cl، نمودار HCO<sub>3</sub>/Na در مقابل Ca/Na و نمودار گیس جهت ارتباط ترکیب شیمیایی با خصوصیات سنگ‌شناختی آبخوان استفاده شد.

### نتیجه و بحث

#### غلظت ترکیبات اصلی

جهت ارزیابی دقت داده‌ها از رابطه (۱) استفاده شد. از آنجایی که تکرار نمونه‌های MW6 نمونه MW23، تکرار نمونه MW15، نمونه MW24 و تکرار نمونه MW22، نمونه MW25 بوده، لذا برخی از شاخص‌های مهم از جمله هدایت الکتریکی (EC)، قلیائیت<sup>۶</sup>، کل جامدات محلول (TDS)، یون سولفات (SO<sub>4</sub>)، یون کلر (Cl) و بی‌کربنات (HCO<sub>3</sub>) به روش محاسباتی مورد آزمون قرار گرفت (جدول ۱).

استانداردسازی و نرمال کردن داده‌های اولیه از تبدیلات لگاریتم نسبتی مرکزی<sup>۱</sup> استفاده شد (رابطه ۲) (کارنزا، ۲۰۱۱).

$$\text{clr}(x) = \ln \frac{x_i}{x_j} \quad (2)$$

X<sub>i</sub> مقدار اولیه داده‌ها و X<sub>j</sub> میانگین هندسی داده‌ها است. در ارزیابی داده‌ها از آمار چند متغیره تحلیل عاملی<sup>۲</sup>، خوشه‌ای<sup>۳</sup> و متمایز کننده<sup>۴</sup> استفاده شد. تحلیل عاملی به گروهی از روش‌های آماری چند متغیره اطلاق می‌شود که هدف اولیه آن تفسیر ساختار ماتریس واریانس-کوواریانس مجموعه‌ای از داده‌های چند متغیره است. تحلیل عاملی بین مجموعه‌ای متشکل از متغیرهای گوناگون که به ظاهر بی‌ارتباط هستند، رابطه خاصی را تحت یک مدل فرضی برقرار می‌کند. بنابراین از اهداف اصلی تحلیل عاملی، کاهش ابعاد داده‌ها است. فرض اساسی در به‌کارگیری این تکنیک، وجود الگویی زیر بنایی یا مدلی خطی در تعیین مفاهیم پیچیده ارتباطی بین متغیرها است. این ارتباط در قالب یک عامل در این مدل فرضی ظاهر می‌شود. با اعمال تحلیل عاملی ابعاد داده‌ها از تعداد زیادی عامل به تعداد کمتری کاهش پیدا می‌کند (کیم، ۲۰۰۵). در تحلیل عاملی برخی از عوامل نقش کمی در توجیه تغییرپذیری متغیرهای اولیه دارند. در این صورت می‌توان این عوامل را نادیده گرفت و از این طریق تعداد متغیر مورد بررسی و در نتیجه بعد فضای مورد مطالعه را کاهش داد. ساده‌ترین روش برای شناسایی تعداد عوامل استفاده از مقادیر ویژه<sup>۵</sup> است. چنانچه مقدار مقادیر ویژه کمتر از یک باشد معیاری برای شناسایی تعداد عامل‌ها است (کیزر، ۱۹۵۸). تحلیل خوشه‌ای یکی از روش‌های چند متغیره است که هدف از آن دست یافتن به ملاکی برای طبقه‌بندی هر چه مناسب‌تر متغیرها و یا نمونه‌ها بر اساس تشابه هر چه بیشتر درون‌گروهی و اختلاف هر چه بیشتر بین‌گروهی است. در اینجا ملاک شباهت ضریب همبستگی و الگوریتم خوشه‌بندی روش وارد<sup>۶</sup> و فاصله پیرسون<sup>۷</sup> بوده است. تحلیل تفکیکی<sup>۸</sup> احتمال تفکیک دو یا چند گروه را براساس چندین متغیر ارزیابی می‌نماید (مانلی، ۱۹۹۴). در تحلیل تفکیکی، فاصله ماهلانوبیس<sup>۹</sup> و

<sup>6</sup> Ward method

<sup>7</sup> Pearson r

<sup>8</sup> Discriminate analysis

<sup>9</sup> Mahalanobis distances

<sup>10</sup> Alkalinity

<sup>1</sup> Central Logratio (Clr)

<sup>2</sup> Factor analysis

<sup>3</sup> Cluster analysis

<sup>4</sup> Discriminant analysis

<sup>5</sup> Eigenvalue

جدول ۱. تعیین دقت آزمایشات شیمیایی شرکت در یتیم اراک  
(تمامی ترکیبات به میلی‌گرم در لیتر و هدایت الکتریکی به موس بر سانتی‌متر مربع)

کد آب	بی‌کربنات	کلر	سولفات	جامدات محلول	قلیائیت	هدایت الکتریکی
MW6	۴۴۰	۶/۴	۵/۹	۹/۴	۶۲۰	۱۴۰
MW15	۳۲۰	۳۵۵	۱۲۵	۷۹۸	۳۴۰	۱/۲
MW22	۲۴۰	۳۵۵	۱۶۶	۶۰۳	۲۵۶	۹۰۱
MW23	۴۴۰	۶/۱	۵/۹	۹/۷	۶۲۰	۱۴۵
MW24	۳۲۰	۳۵۵	۱۱۵	۷۹۷	۳۲۰	۱/۲
MW25	۲۴۰	۳۵۵	۱۸۶	۶۰۵	۲۵۲	۹۰۳
R%	۰	۰/۰۱	۳/۳	۰/۱۰	۰/۷	۰/۲۲

میلی‌گرم در لیتر) و آب زیرزمینی (۲۲۸۴ میلی‌گرم در لیتر) است. پتاسیم در حوضچه ۴۰ برابر (۳۸۱ میلی‌گرم در لیتر) و در دریاچه ۳۳ برابر (۳۲۱ میلی‌گرم در لیتر) آب زیرزمینی (۹/۶ میلی‌گرم در لیتر) است. منیزیم در حوضچه ۱۷ (۲۴۴۵ میلی‌گرم در لیتر) و دریاچه ۱۳ برابر (۱۷۵۶ میلی‌گرم در لیتر) آب زیرزمینی (۱۳۱ میلی‌گرم در لیتر) است. بدیهی است میزان منیزیم در حوضچه از دریاچه بیشتر است. سدیم در حوضچه ۵۶ برابر (میلی‌گرم در لیتر میلی‌گرم در لیتر ۵۵۲۳۸) و در دریاچه ۳۶ برابر (۳۵۵۸۶ میلی‌گرم در لیتر) آب زیرزمینی (۹۷۹ میلی‌گرم در لیتر) است. همچنین سدیم در حوضچه بیشتر از دریاچه است.

### تحلیل‌های آماری

در ارزیابی متغیرها به روش عاملی با استفاده از مقدار ویژه کمتر از یک، سه عامل تعیین گردید (جدول ۳ و شکل ۴). در عامل اول متغیرهای هدایت الکتریکی (EC)، بار کل جامدات محلول (TDS)، یون‌های سولفات، کلر، پتاسیم، منیزیم و سدیم با بار عاملی بیش از ۰/۷ بیشترین تأثیر و سهم آن ۶۲/۸۴ درصد است. در عامل دوم متغیرهای قلیائیت و بی‌کربنات بیشترین تأثیر و سهم آن ۱۴/۴۶ درصد است. لازم به توضیح است علامت بار عاملی دو متغیر قلیائیت و بی‌کربنات مخالف هم و لذا دو منشاء متفاوت را نشان دادند. مهم‌ترین متغیر در عامل سوم کلسیم با ۱۰/۳۰ درصد سهم است. سهم سه عامل در تحلیل عاملی ۸۷/۶۱ درصد است. ضمناً متغیر pH به دلیل بار عاملی کمتر از ۰/۷ از تحلیل عاملی حذف گردید.

با توجه به جدول ۱ بدیهی است، خطای نسبی تجزیه (R%) طبق رابطه (۱) کمتر از ۱۰ درصد بوده، لذا دقت داده‌ها مورد اطمینان می‌باشد. ارزیابی مقدار میانگین متغیرهای نمونه آب‌های حوضچه و دریاچه میقان و همچنین آب زیرزمینی طبق جدول ۲ نشان داد pH آن‌ها عمدتاً قلیایی است. pH آب زیرزمینی و دریاچه مشابه (۷/۴-۷/۲) و pH حوضچه (۸/۵) به مراتب بیشتر است. هدایت الکتریکی حوضچه ۴۰ و دریاچه ۵۴ برابر آب زیرزمینی است. هدایت الکتریکی حوضچه (۱۵۴ موس بر سانتی‌متر مربع) کمتر از دریاچه (۲۰۹ موس بر سانتی‌متر مربع) است. میانگین قلیائیت دریاچه (۳۴۸ میلی‌گرم در لیتر) مشابه آب زیرزمینی (۳۳۸ میلی‌گرم در لیتر) و مقدار آن در دریاچه و آب زیرزمینی از حوضچه (۵۵۱ میلی‌گرم در لیتر) کمتر است. مقدار کل جامدات محلول حوضچه ۶۱ و دریاچه ۸۴ برابر آب زیرزمینی است. به عبارتی مقدار کل جامدات محلول حوضچه و دریاچه به ترتیب ۱۰۲۶۹۵ و ۱۴۰۰۵۹ میلی‌گرم در لیتر و آب زیرزمینی ۱۶۷۰ میلی‌گرم در لیتر است. مقدار کل جامدات محلول در دریاچه بیش از حوضچه است. مقدار سولفات (SO<sub>4</sub>) در دریاچه ۵ برابر (۲۹۴۲۳۳ میلی‌گرم در لیتر) و حوضچه (۵۷۰۷۳ میلی‌گرم در لیتر) و به مراتب بیشتر از آب زیرزمینی (۳۳۲ میلی‌گرم در لیتر) هستند. کلر (Cl) در دریاچه (۹۰۲۴۷ میلی‌گرم در لیتر) بیشتر از حوضچه (۷۹۷۰۲ میلی‌گرم در لیتر) و بیشتر از آب زیرزمینی (۹۳۹ میلی‌گرم در لیتر) است. بی‌کربنات (HCO<sub>3</sub>) در حوضچه، دریاچه و آب زیرزمینی تقریباً مشابه است (۴۰۷-۵۵۲ میلی‌گرم در لیتر). مقدار کلسیم در حوضچه (۴۱۶۳ میلی‌گرم در لیتر) بیشتر از دریاچه (۸۲۸

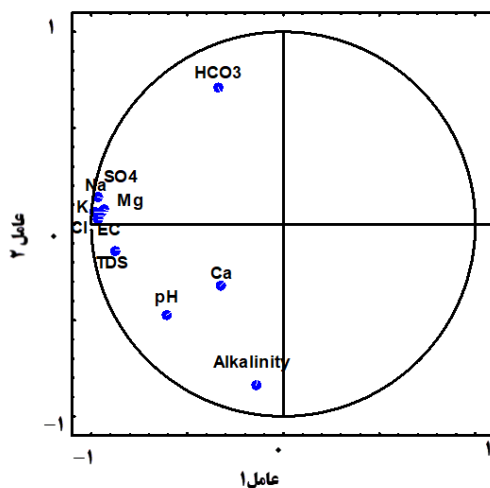
جدول ۲. پارامترهای آماری متغیرها در شوراب (حوضچه و دریاچه) و آب زیرزمینی (تمامی ترکیبات به میلی‌گرم در لیتر و هدایت الکتریکی به موس بر سانتی‌متر مربع)

موقعیت	متغیر	pH	هدایت الکتریکی	قلیائیت	مواد جامد	سولفات	کلر	بی‌کربنات	کلسیم	پتاسیم	منیزیم	سدیم
حوضچه	میانگین	۸/۵	۱۵۴	۵۵۱	۱۰۲۶۹۵	۵۷۰۷۳	۷۹۷۰۲	۴۰۷	۴۱۶۳	۳۸۱	۲۴۴۵	۵۵۲۳۸
	حداقل	۸/۳	۱۴۰	۴۸۸	۹۳۷۳۱	۴۰۲۰۰	۶۳۸۰۰	۳۶۰	۲۸۳۷	۳۱۵	۱۸۴۳	۴۲۵۷۵
	حداکثر	۸/۷	۱۶۹	۶۲۰	۱۱۳۱۱۶	۷۴۹۰۰	۱۰۱۷۴۱	۴۴۰	۴۹۳۷	۴۴۸	۳۲۵۳	۷۶۹۶۷
دریاچه	میانگین	۷/۴	۲۰۹	۳۴۸	۱۴۰۰۵۹	۲۹۴۲۳۳	۹۰۲۴۷	۵۵۲	۸۲۸	۳۲۱	۱۷۵۶	۳۵۵۸۶
	حداقل	۶/۹	۱۳۰	۱۳	۸۷۱۰۰	۲۰۶۰۰	۲۳۱۰۰	۱۷۰	۲۸۱	۵۷	۱۳۹	۳۷۵۶
	حداکثر	۸/۱	۴۹۰	۶۴۰	۳۲۸۳۰۰	۸۷۵۰۰۰	۱۹۶۳۰۰	۱۳۲۰	۲۴۳۳	۹۶۷	۵۵۹۹	۹۸۱۳۱
آب زیرزمینی	میانگین	۷/۲	۳/۹	۳۳۸	۱۶۷۰	۳۳۲	۹۳۹	۴۸۴	۲۲۸۴	۹/۶	۱۳۱	۹۷۹
	حداقل	۶/۴	۰/۶	۱۶	۴۳	۷۲	۱۷۷	۲۰۰	۴۷۵	۴	۱۵	۷۱
	حداکثر	۷/۶	۹/۸	۱۰۸۰	۶۵۹۹	۸۲۳	۳۳۶۷	۱۶۰۰	۶۵۱۳	۲۱	۳۷۰	۵۵۳۲

جدول ۳. بار عاملی متغیرها در تحلیل عاملی

(تمامی ترکیبات به میلی‌گرم در لیتر و هدایت الکتریکی به موس بر سانتی‌متر مربع)

متغیر	عامل اول	عامل دوم	عامل سوم
pH	-۰/۶۱	-۰/۴۷	۰/۱۰
EC	-۰/۹۴	۰/۰۶	-۰/۱۵
Alkalinity	-۰/۱۴	-۰/۸۴	۰/۰۱
TDS	-۰/۸۹	-۰/۱۴	-۰/۳۳
SO <sub>4</sub>	-۰/۹۷	۰/۱۴	-۰/۱۵
Cl	-۰/۹۶	۰/۰۴	-۰/۱۳
HCO <sub>3</sub>	-۰/۳۴	۰/۷۱	۰/۴۲
Ca	-۰/۳۳	-۰/۳۲	۰/۸۵
K	-۰/۹۸	۰/۰۶	۰/۰۱
Mg	-۰/۹۳	۰/۰۷	۰/۲۱
Na	-۰/۹۷	۰/۰۲	۰/۰۲
بار ویژه	۶/۹۱	۱/۵۹	۱/۱۳
درصد واریانس کل	۶۲/۸۵	۱۴/۴۶	۱۰/۳۰
درصد تجمعی واریانس	۶۲/۸۴	۷۷/۳۰	۸۷/۶۱

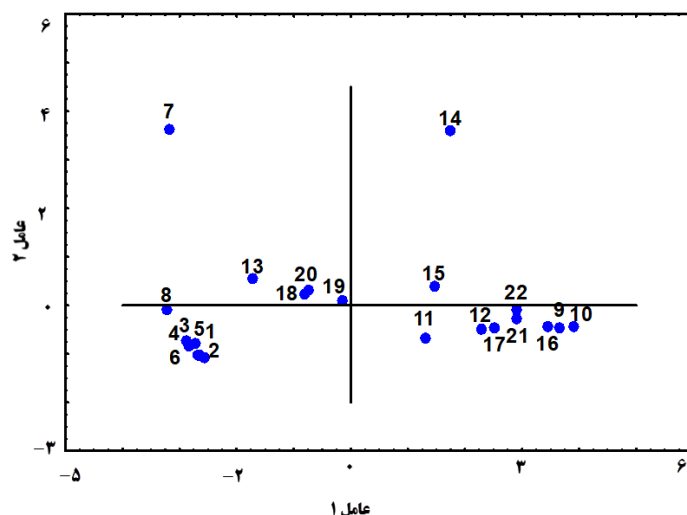


شکل ۴. تفکیک متغیرها در عامل یک و دو از تحلیل عاملی

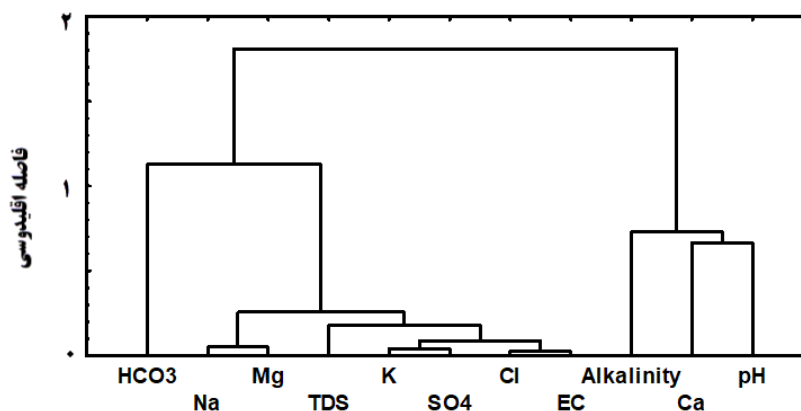
در شکل ۵ از تحلیل عاملی مشخص شد نمونه‌های آب ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ حوضچه در یک گروه قرار می‌گیرند. همچنین نمونه ۸ از شوراب دریاچه دارای ترکیب مشابه حوضچه و نمونه ۷ از دریاچه ترکیب متفاوت با آب‌های منطقه دارد. نمونه‌های ۱۳، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ دریاچه نیز در گروه مجزایی قرار گرفته است. نمونه ۱۴ مربوط به چاه کشاورزی روستای دهنک دارای ترکیب متفاوت است. نمونه‌های ۱۰، ۹، ۱۱، ۱۲، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۲۱ و ۲۲ مربوط به آب چاه‌های کشاورزی نیز در گروه متفاوتی قرار گرفته که از نظر ترکیب شیمیایی متفاوت از شوراب حوضچه و دریاچه می‌باشد. در شکل‌های ۶ و ۷ جهت تأیید بار عاملی متغیرها و نمونه‌ها از تحلیل خوشه‌ای استفاده شد. با توجه به فاصله اقلیدوسی ۰/۵ بدیهی است ۴ خوشه و یا منشاء قابل تفکیک است. خوشه (HCO<sub>3</sub>)، خوشه (Mg, Na), EC, Cl, SO<sub>4</sub>, K, TDS, و خوشه (Ca). البته pH خوشه مجزایی تشکیل داده که مغایرت با

تحلیل عاملی دارد. ارزیابی نمونه‌ها در آب‌ها نشان داد نمونه‌های ۱ تا ۶ مربوط به شوراب حوضچه و نمونه‌های ۷ و ۸ از شوراب دریاچه از نظر ترکیب شیمیایی در یک گروه قرار می‌گیرند. نمونه‌های ۱۳، ۱۹، ۱۸ و ۲۰ نیز از نظر ترکیب شیمیایی مشابه و در یک گروه می‌باشند. تمامی نمونه‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۲۱، ۲۲ از چاه‌های منطقه نیز ترکیب شیمیایی متفاوت از شوراب حوضچه و دریاچه داشته، لذا در گروه جداگانه‌ای قرار گرفته که تماماً تأییدی بر تحلیل عاملی است.

در شکل ۸ از تحلیل تفکیک، ترکیب شیمیایی شوراب حوضچه‌ها متفاوت از شوراب دریاچه و آب زیرزمینی است. همچنین ترکیب شیمیایی شوراب دریاچه متفاوت از آب زیرزمینی بوده و فقط ترکیب یک نمونه از آب چاه (چاه ده نمک) به ترکیب آب دریاچه شبیه است. تفاوت ترکیب چاه ده نمک نیز از آب‌های زیرزمینی منطقه در تحلیل عاملی تأیید شد.

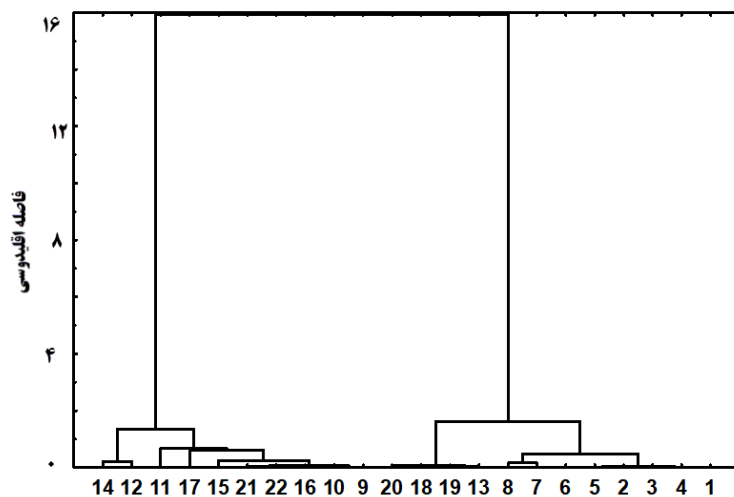


شکل ۵. بار عاملی نمونه‌ها در تحلیل عاملی

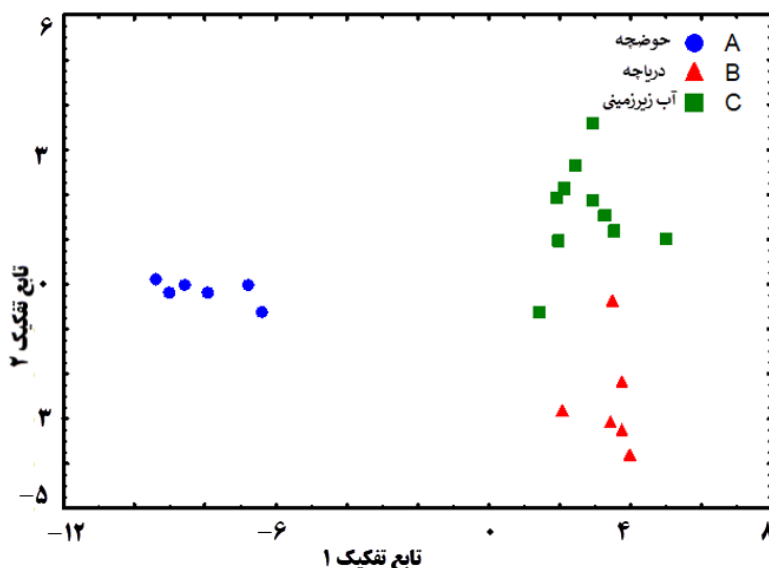


شکل ۶. تفکیک متغیرهای شیمیایی به روش تحلیل خوشه‌ای





شکل ۷. تفکیک نمونه‌های مختلف آب در تحلیل خوشه‌ای



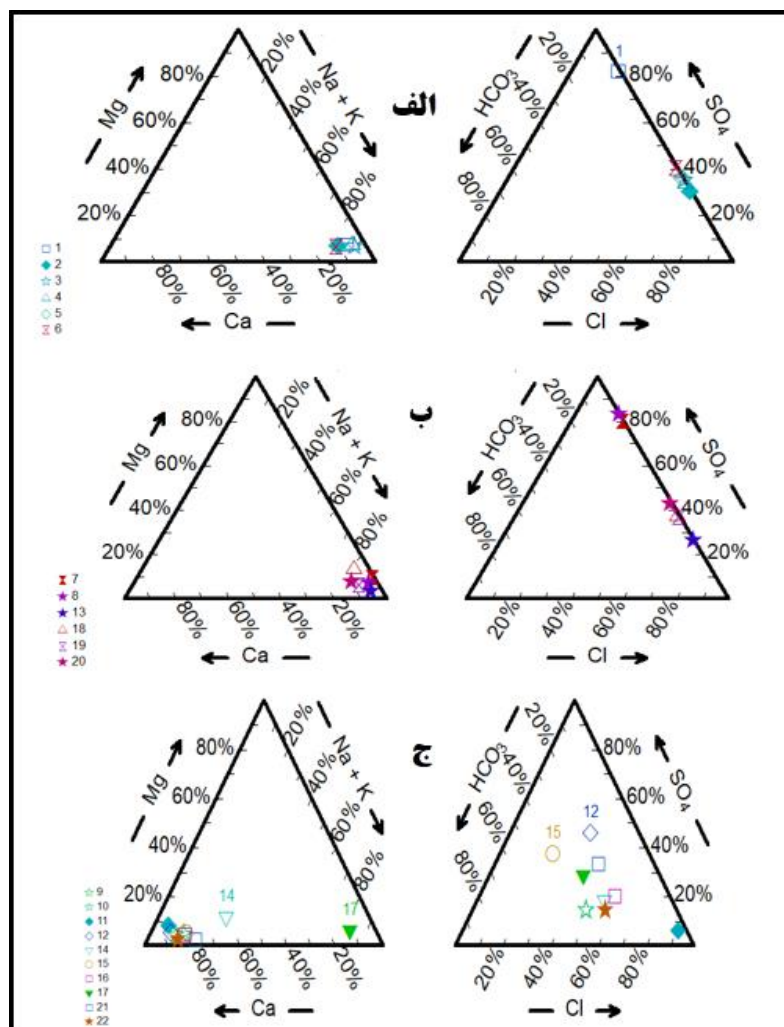
شکل ۸. تحلیل تفکیکی در طبقه‌بندی گروه‌های مختلف آب

در حالی که ۶۷ درصد شوراب دریاچه از نوع  $(Na - SO_4)$  و ۳۳ درصد از نوع  $(K) + (Cl) + (SO_4 - Cl)$  است. حدود ۶۰ درصد ترکیب آب زیرزمینی از نوع  $(Ca + Na - K) + (Cl - )$  درصد ۲۰  $(K) + (Cl + HCO_3)$  درصد ۱۰  $SO_4$  درصد ۱۰  $(Ca + Na - K) + Cl$  و ۱۰ درصد  $HCO_3$  است. بنابراین، ترکیب کاتیونی شوراب‌ها در حوضچه و دریاچه می‌تواند نوع سدیم و آنیون آن کلر و سولفات است. نتایج شرکت املح ایران در حوضچه میقان جهت استخراج سولفات سدیم نشان داد غلظت کلرید سدیم ۱۴/۹۵، سولفات سدیم ۷/۷۰، سولفات منیزیم ۲/۵۰ و سولفات کلسیم ۰/۵۲ درصد است. بنابراین کلرید سدیم و سولفات سدیم دو ترکیب اصلی شوراب پلایای میقان است. از طرفی این بررسی در گل معدنی

ارزیابی ترکیب شیمیایی شوراب حوضچه و دریاچه میقان و مقایسه آن با ترکیب شیمیایی آب زیرزمینی اطراف دریاچه نشان داد، ترکیب شیمیایی کاتیونی  $(Na, Mg, Ca)$  و آنیونی  $(K, SO_4, Cl, HCO_3)$  دو آب حوضچه و دریاچه مشابه هستند (شکل ۹ الف و ب). ترکیب کاتیونی و آنیونی آب اکثر چاه‌های کشاورزی متفاوت از شوراب حوضچه و دریاچه میقان است. چاه ۱۷ (بین روستای میقان و روستای راهزان) غنی از سدیم و پتاسیم و ترکیب کاتیونی مشابه با شوراب حوضچه و دریاچه میقان دارد (شکل ۹). ضمناً چاه شماره ۱۱ (روستای مبارک آباد به سمت کویر میقان) از نظر  $Cl$  غنی است. براساس نمودار استیف ۸۳ درصد ترکیب شوراب در حوضچه‌ها از نوع  $(Na - SO_4)$  و  $(K) + (Cl)$  درصد از نوع  $(Na - K) + (SO_4 - Cl)$  است.

زیرزمینی منطقه عمدتاً کلسیم-سدیم و کلر-بی‌کربناته بوده و در چاه شماره ۱۱ (روستای مبارک آباد به سمت پلایای میقان) آنیون غالب کلر است. در چاه‌های ۱۲ (روستای ابراهیم آباد) و ۲۲ (پایین دست شهرک صنعتی خیرآباد) آنیون غالب کلر و سولفات است.

استخراجی نشان داد، غلظت متوسط کلرید سدیم ۳/۸۰، سولفات سدیم ۲۰/۴۹، سولفات منیزیم ۰/۶۲ و سولفات کلسیم ۶/۷۰ درصد است. بنابراین سولفات سدیم (کانی گلوپریت) و سولفات کلسیم (کانی ژیس) ترکیب اصلی گل سولفات سدیم‌دار را تشکیل داده است. ترکیب آب‌های



شکل ۹. بررسی ترکیب شیمیایی آب‌های منطقه در نمودار مثلثی

محاسباتی کمتر از سطح احتمال ۹۵ درصد (خطای ۰/۰۵) بوده، بنابراین سه نوع آب از نظر pH با هم اختلاف داشته (علامت -) و از سه جامعه متفاوت می‌باشند ( $A \neq B \neq C$ ) (جدول ۴). لازم به توضیح است دو جامعه شوراب حوضچه و دریاچه میقان از نظر تمامی متغیرها مشابه ( $A=B$ ) و تنها از نظر pH و یون کلسیم تفاوت دارند ( $A \neq B$ ). دو آب شوراب حوضچه با آب زیرزمینی تنها از نظر قلیائیت و بی‌کربنات مشابه و در سایر متغیرها تفاوت دارند. همچنین دو آب دریاچه و آب زیرزمینی از نظر قلیائیت، یون‌های بی‌کربنات، سولفات و منیزیم از یک جامعه هستند.

جهت تعیین تأثیر متغیرها در تفکیک و تشابه نوع آب‌های منطقه از آزمون اختلاف میانگین جوامع استفاده شد (قدیمی و قمی، ۱۳۹۵). آماره‌های آزمون جوامع شوراب حوضچه، شوراب دریاچه و آب زیرزمینی با استفاده از آزمون t استیودنت و آزمون سطح احتمال (P-value) نشان داد در خصوص pH چون t استیودنت محاسباتی برابر ۶ برای دو آب حوضچه (A) و دریاچه (B) و ۶/۲۴ برای دو آب حوضچه (A) و آب زیرزمینی (C) و برابر ۶- برای دو آب دریاچه (B) و آب زیرزمینی (C) بیش از مقدار بحرانی (t استیودنت برابر ۱/۹۴) و همچنین سطح احتمال

جدول ۴. محاسبه  $t$  استیودنت و سطح احتمال متغیرها در شوراب حوضچه (A)، شوراب دریاچه (B) و آب زیرزمینی (C) (علامت - نشان دهنده یک و علامت + نشان دهنده دو یا چند جامعه است)

متغیر	نوع آب	$t$ -استیودنت	سطح احتمال	علامت $t$ -استیودنت	علامت سطح احتمال	تشابه جوامع
pH	A-B	۶/۰۰	۰/۰۰۲	-	-	$A \neq B \neq C$
	A-C	۶/۲۴	۰/۰۰۱	-	-	
	B-C	-۶/۰۰	۰/۰۰۲	-	-	
هدایت الکتریکی	A-B	-۱/۰۲	۰/۳۵۰	+	+	$A=B \neq C$
	A-C	۲۸/۷۰	۰/۰۰۱	-	-	
	B-C	۳/۶۲	۰/۰۱۵	+	-	
قلیائیت	A-B	۲/۰۳	۰/۰۹۰	+	-	$A=B=C$
	A-C	۱/۵۰	۰/۱۹۰	+	+	
	B-C	-۰/۰۷	۰/۹۴۰	+	+	
مواد محلول کل	A-B	-۱/۰۳	۰/۳۵۰	+	+	$A=B \neq C$
	A-C	۲۷/۸۷	۰/۰۰۱	-	-	
	B-C	۳/۷۰	۰/۰۱۰	-	-	
سولفات	A-B	-۱/۴۴	۰/۲۱۰	+	+	$A \neq C, B=C, A=B$
	A-C	۱۲/۴۸	۰/۰۰۱	-	-	
	B-C	۱/۸۱	۰/۱۳۰	+	+	
کلر	A-B	-۰/۳۸	۰/۷۱۷	+	+	$A=B \neq C$
	A-C	۱۳/۷۲	۰/۰۰۱	-	-	
	B-C	۲/۸۵	۰/۰۳۶	+	-	
بی‌کربنات	A-B	-۰/۸۴	۰/۴۴۰	+	+	$A=B=C$
	A-C	-۰/۷۷	۰/۴۸۰	+	+	
	B-C	-۰/۱۱	۰/۹۱۰	+	+	
کلسیم	A-B	۸/۷۶	۰/۰۰۱	-	-	$A \neq B, A=C, B \neq C$
	A-C	۰/۷۶	۰/۴۸۰	+	+	
	B-C	-۱/۹۸	۰/۱۰۰	+	-	
پتاسیم	A-B	۰/۳۷	۰/۷۲۰	+	+	$A=B \neq C$
	A-C	۱۵/۹۹	۰/۰۰۱	-	-	
	B-C	۱/۹۸	۰/۱۰۰	+	-	
منیزیم	A-B	۰/۷۲	۰/۵۰۰	+	+	$A=B, A \neq C, B=C$
	A-C	۱۰/۳۷	۰/۰۰۱	-	-	
	B-C	۱/۶۳	۰/۱۶۰	+	+	
سدیم	A-B	۱/۰۲	۰/۳۵۰	+	+	$A=B \neq C$
	A-C	۹/۸	۰/۰۰۱	-	-	
	B-C	۱/۹۹	۰/۱۰۰	+	-	

حوضچه برابر ۱۴۰ و دریاچه برابر ۱۳۰ موس سانتی‌متر مربع است). به دلیل نزدیک بودن چاه‌های آب زیرزمینی به دریاچه میقان در حاشیه، pH آب دریاچه و آب زیرزمینی مشابه هستند. بنابراین سولفات و منیزیم شوراب حاصل از دریاچه بر برخی از چاه‌های حاشیه میقان تأثیر گذاشته است.

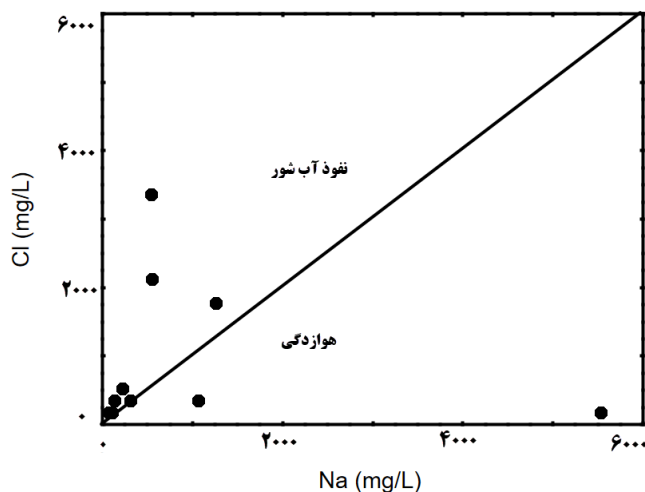
علت تفاوت در pH سه نوع آب، تأثیر آب شیرین است. آب دریاچه و چاه‌ها به دلیل واقع شدن در حاشیه جزیره و تأثیر آب زیرزمینی شیرین، بدیهی است pH آن‌ها خنثی است (pH برابر ۷/۴ برای دریاچه و ۷/۲ برای آب زیرزمینی). مقدار pH حوضچه قلیایی تر (pH برابر ۸/۵) و هدایت الکتریکی بیشتر است (هدایت الکتریکی شوراب

در منطقه هواز دگی حاکی از اهمیت  $\text{HCO}_3$  در نتیجه هواز دگی کانی‌های کربناته است (قدیمی، ۲۰۱۲). به علاوه، هواز دگی کانی‌های کربناته سبب شده که آب‌های دورتر از پلایای میقان از تیپ  $\text{Ca-HCO}_3$  باشند. در نمودار  $\text{Na/HCO}_3$  در مقابل  $\text{Na/Ca}$  اکثر نمونه‌ها در محدوده هواز دگی و دو نمونه در محدوده انحلال کانی‌های تبخیری قرار دارند (شکل ۱۱). نمودار گیبس با توجه به اثر متقابل کل مواد جامد (TDS) و  $\text{Na + K / Na-K-Ca}$  (جهت ارتباط ترکیب شیمیایی با خصوصیات سنگ‌شناختی آبخوان) محدوده‌هایی از قبیل رسوب‌گذاری، تبخیر و هواز دگی را نشان داد (گیبس، ۱۹۷۰). در چاه‌های منطقه، برخی نمونه‌ها در منطقه تبخیر (نفوذ آب شور) و برخی دیگر در منطقه هواز دگی قرار گرفتند (شکل ۱۲). لذا علاوه بر فرآیندهای هواز دگی شیمیایی، نفوذ آب شور از خاک‌های زیرسطحی نیز می‌تواند فرآیندهای هیدروژئوشیمیایی را نیز در منطقه کنترل نمایند (جلالی، ۲۰۰۹). آب در پلایای میقان اراک در حوضچه‌های مصنوعی و دریاچه متمرکز شده است. آب‌هایی چون پساب شرکت املاح معدنی، فاضلاب تصفیه شده شهری اراک وارد پلایای میقان می‌شوند. بالا بودن غلظت ترکیبات شیمیایی چون هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، سولفات و کلر در حوضچه‌ها و دریاچه ماهیت شوراب بودن آب در پلایای میقان را نشان داد. بررسی منشاء شوری آب میقان نشان داد، متغیرهای شور کننده از قبیل آنیون‌های سولفات و کلر و همچنین کاتیون‌هایی چون پتاسیم و سدیم مربوط به سنگ‌های گچی و نمکی موجود در ارتفاعات شمالی (منطقه آستیان) حوضه میقان است (عبدی و رحیم‌پور، ۱۳۹۱). روند مشابهی نشان داد، انحلال کانی‌های تبخیری از ارتفاعات دشت تربت حیدریه و انتقال به آب‌های زیرزمینی سبب شده، کلیه آب‌های دشت از تیپ کلرور سدیک و سولفات سدیم باشند (نخعی و همکاران، ۱۳۹۰). بررسی ورودی‌های آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی به پلایای میقان نشان داد که آب‌های شمالی دارای تیپ  $\text{Na-Cl-SO}_4$  و آب‌های جنوبی از تیپ  $\text{Ca-HCO}_3$  هستند. مخلوط شدگی آب‌های منابع فوق با آب پلایای میقان تیپ  $\text{Ca-Na-HCO}_3\text{-SO}_4$  را سبب شده است (مهاجرانی و امینی، ۱۳۷۹). همخوانی سولفات و کلر آب‌های کشاورزی تقریباً شور با سولفات و کلر آب پلایای میقان حاکی از شوری آب چاه‌های منطقه توسط آب میقان است. غلظت

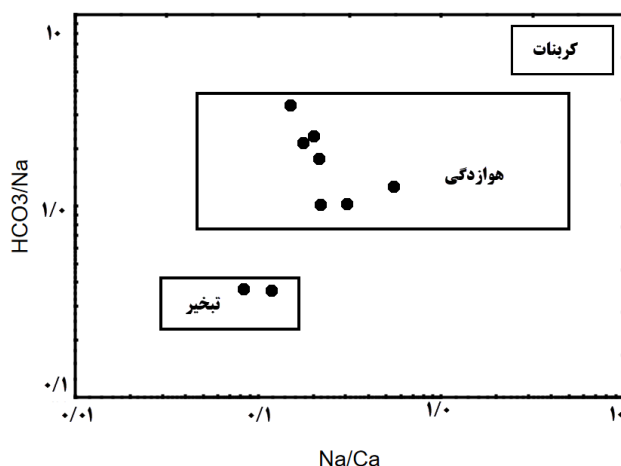
متغیرهای هیدروشیمیایی با توجه به تحلیل‌های عاملی و خوشه‌ای از چهار عامل یا منشاء برخوردارند. در عامل اول متغیرهای هدایت الکتریکی، کل جامدات محلول، کلر، سولفات، پتاسیم، منیزیم و سدیم حاکی از هم‌منشایی و طبیعی بودن عناصر داشته که عمدتاً خاص شوراب حوضچه مصنوعی و دریاچه پلایای میقان است. وجود لایه‌های گچی و نمکی در عمق ناشی از پیشروی شوراب پلایای میقان در منطقه می‌تواند در افزایش ترکیبات مورد نظر در آب‌های زیرزمینی اطراف میقان مؤثر باشند (قدیمی و قمی، ۲۰۱۲). در عامل دوم وجود متغیرهای بی‌کربنات و قلیائیت در شوراب پلایا و آب‌های زیرزمینی اطراف آن می‌تواند منشاء طبیعی داشته باشد. پراکندگی این ترکیبات در نواحی جنوب شرقی اراک می‌تواند ناشی از انحلال سنگ‌های آهکی کرتاسه ارتفاعات جنوبی اراک در افزایش بی‌کربنات باشد (قدیمی و همکاران، ۲۰۱۶). منشاء قلیائیت آب از سنگ‌های آهکی یا دولومیت در طبیعت است. هنگام عبور آب از خلال سنگ‌های حاوی آهک (کربنات کلسیم) و دولومیت (کربنات کلسیم و منیزیم) بر روی سطح زمین، آب مواد معدنی را با خود حمل می‌نماید. هنگامی که سنگ آهک و دولومیت در آب حل شوند، نیمی از مولکول آن کلسیم یا منیزیم بوده که سختی آب را ایجاد نموده و نیمی دیگر شامل کربنات‌ها بوده که قلیائیت آب را به وجود می‌آورند (سلگی و همکاران، ۱۳۹۷). منشاء قلیائیت شوراب و آب چاه‌های اطراف میقان (با توجه به تیپ آب از نوع کلسیم-بی‌کربنات) ارتفاعات آهکی و دولومیتی کرتاسه بخش جنوبی حوضه آبریز اراک است (قدیمی و قمی، ۲۰۱۲). کلسیم در عامل سوم شرکت داشته و ارتباط نزدیکی با سختی آب دارد. سختی آب نیز نتیجه وجود املاحی چون منیزیم، کلسیم، استرانسیم، آهن، آلومینیوم، مس و منگنز بوده که با بی‌کربنات، کلر، سولفات، سیلیکات و نترات به صورت محلول در آب وجود دارند. سختی به صورت غلظت کاتیون‌های چند ظرفیتی در محلول تعریف می‌شود. سختی برابر با مجموع یون‌های کلسیم و منیزیم است (روحانی قدیکلابی و همکاران، ۱۳۹۶). منشاء سختی آب چاه‌های منطقه، ناشی از ارتفاعات آهکی و دولومیتی ارتفاعات جنوبی اراک است. نمودار Cl در مقابل Na نشان داد چاه‌های حاشیه پلایای میقان به دلیل نفوذ آب شور عمدتاً در بالای خط ۱:۱ و در سمت Cl قرار دارند (شکل ۱۰). وجود برخی از چاه‌ها

عباس‌نژاد، ۱۳۹۴؛ خدابخش و همکاران، ۱۳۹۵). بخش جنوبی تالاب میقان را سنگ‌های آهکی و دولومیتی کرتاسه تشکیل داده که مهم‌ترین منشاء بی‌کربنات در آب پلايای میقان و چاه‌های منطقه هستند (قدیمی و قمی، ۲۰۱۳).

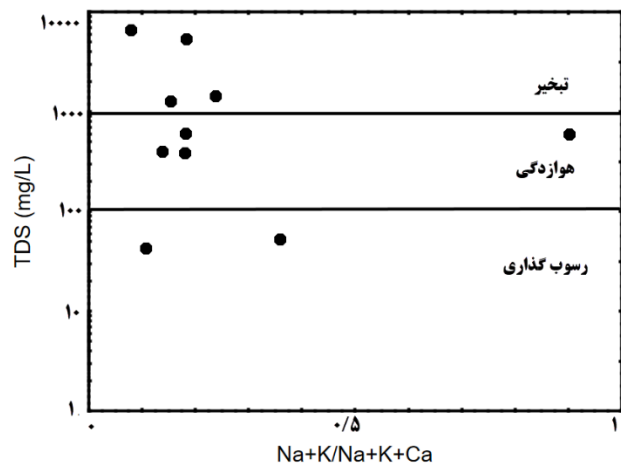
یون بی‌کربنات در ترکیب آب دریاچه پلايای میقان و برخی از چاه‌های بخش جنوبی حاشیه پلايای حاکی از وجود سنگ‌های آهکی است. در اثر انحلال سنگ‌های آهکی و دولومیتی ترکیبات بی‌کربنات حاصل شده که به آب‌های سطحی و زیرزمینی هدایت می‌شوند (شیخ فخرالدینی و



شکل ۱۰. نمودار Na-Cl تعیین کننده ترکیبات شیمیایی غالب



شکل ۱۱. نمودار  $HCO_3/Na$  در مقابل  $Ca/Na$  تعیین کننده ترکیبات شیمیایی غالب



شکل ۱۲. نمودار TDS در مقابل  $Na+K/Na+K+Ca$  (نمودار گیبس)

## نتیجه‌گیری

پلایای میقان در مرکز حوضه آبریز داخلی اراک تحت تأثیر سازندهای گچی، نمکی و آهکی زمین‌شناسی حوضه بالادست، غنی از ترکیبات اصلی کاتیونی (کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم) و آنیونی (بی‌کربنات، سولفات و کلر) گردیده است. این ترکیبات کیفیت آب پلایا و آب زیرزمینی اطراف را تغییر و سبب شور شدن آن‌ها شده‌اند. منابع آب زیرزمینی، آب‌های سطحی و خصوصاً ورود فاضلاب تصفیه شده شهر اراک به پلایا با تغییر کیفی و کمی آب پلایا همراه بوده است. پیشروی جبهه آب شور در چاه‌های اطراف پلایا با دخالت انسان به خوبی مشهود است. برداشت بی‌رویه از آب چاه‌های کشاورزی، حفر بالای چاه‌های غیرمجاز که با افت شدید سطح آب زیرزمینی همراه بوده از عوامل انسانی در شور شدن آب چاه‌ها می‌باشد. از عواقب پیشروی در آینده شور شدن خاک‌های کشاورزی، پوک شدن آن‌ها و ایجاد فروچاله در روستاها و شهر اراک است. بنابراین نظارت بر برداشت آب زیرزمینی، ممانعت از حفر چاه‌های غیرمجاز، عملیات آبخیزداری در بالادست و سرشاخه‌ها و عملیات آبخوان‌داری در دشت اراک، جلوگیری از توسعه برنامه‌های کشاورزی و اجرای عملیات بهینه در مصرف آب کشاورزی در اطراف پلایای میقان از خطرات و عواقب آینده دشت می‌کاهد. از نتایج برنامه‌های تغذیه آب سطحی، پیشروی آب شیرین به سمت پلایا و پسروی آب شور است. از طرفی ضمن حفظ حقایق پلایا پیشنهاد می‌گردد به جای ورود مستقیم پساب تصفیه شده آب اراک به پلایا، اقدامات لازم جهت تغذیه آن به آبخوان دشت اراک صورت گیرد.

## منابع

- ابراهیمی‌محمدی، ش (۱۳۹۶) تعیین خصوصیات هیدروژئوشیمیایی و کیفیت آب چشمه‌ها و چاه‌ها در منطقه دریاچه زریوار، نشریه اکوهیدرولوژی، دوره ۴، شماره ۴، ص ۱۰۴۹-۱۰۶۰.
- اصغری‌مقدم، ا، محمدی، ع (۱۳۸۲) علل شوری سفره‌های آب زیرزمینی دشت شبستر، نشریه دانش کشاورزی، دوره ۱۳، شماره ۳، ص ۶۹-۷۸.
- الهدادی، م، قدیمی، ف (۱۳۹۲) بررسی اثرات محیط زیستی معدن سولفات سدیم بر تالاب میقان، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین‌المللی تخصصی علوم زمین.
- بهرامی‌نسب، رویا، پیرخراطی، ح، عباس‌فام، ع. ر، شیخی‌آلمان‌آباد، ز (۱۳۹۹) ارزیابی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت کهریز و مقایسه روند تغییرات آن در طی سال‌های اخیر، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۴، شماره ۲۸، ص ۱۷-۱.
- جعفری، ر، بخشنده مهر، ل (۱۳۹۱) بررسی تغییرات مکانی شوری و قلیائیت آب‌های زیرزمینی استان اصفهان با استفاده از زمین‌آمار، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، شماره ۶۸، ص ۴۶-۵۷.
- حسنی‌پاک، ع، ا (۱۳۶۲) اصول اکتشافات ژئوشیمیایی، مرکز نشر دانشگاهی، ۶۰۱ ص.
- حق‌پرست، م، پیرخراطی، ح، محمدی، ع (۱۳۹۳) بررسی منشأ شوری آب‌های زیرزمینی دشت رشکان، دومین همایش ملی و تخصصی پژوهش‌های محیط زیست ایران.
- خدابخش، س، رفیعی، ب، افشارنیا، م، کبیری، ش، اخلاص‌مند، ر (۱۳۹۵) شناسایی خاستگاه مواد محلول آب رودخانه خررود قزوین با روش آماری، فصلنامه کوآترنری، دوره ۲، شماره ۴، ص ۳۶۷-۳۷۸.
- رزخ، ج، اصغری‌مقدم، آ، نادری، آ. آ (۱۳۹۶) بررسی ویژگی‌های هیدروژئوشیمی و تقسیم‌بندی کیفی منابع آب زیرزمینی دشت هارزندات برای اهداف مختلف با استفاده از روش‌های هیدروژئوشیمیایی، فصلنامه تکنولوژی محیط زیست، دوره ۱۹، شماره ۵، ص ۹۲-۹۷.
- روحانی قدیکلابی، ک، فروغی‌فرد، ه، عبدولیان، ا، زاهدی، م. ر (۱۳۹۶) نکات کیفی آب، قلیائیت و سختی، مجله آبریزان زینتی، شماره ۳، ص ۲۳-۲۹.
- سولگی، ا، خدادادی، ت، استرش، آ (۲۰۱۸) بررسی وضعیت هیدروژئوشیمیایی آب آشامیدنی شهر دره‌شهر و تعیین کیفیت کاربری‌های مختلف، مجله تحقیقات سلامت، شماره ۳، ص ۲۱۴-۲۳۲.
- شیخ فخرالدینی، س، عباس‌نژاد، ا (۱۳۹۴) بررسی تأثیر هوازدگی بر هیدروژئوشیمی رودخانه‌های زهکش کننده سنگ‌های آتشفشانی (رودخانه بیدخوان بردسیر کرمان)، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، شماره ۵۳، ص ۲۰۳-۲۲۶.
- شهبازی، ر، فیض‌نیا، س (۱۳۹۰) تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر کاهش کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در حوزه کویر مرکزی، نشریه پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۱، ص ۹۳-۱۰۴.
- صادقی، م، باباعلی، ح. ر (۱۳۹۹) تحلیل مکانی و زمانی پارامترهای کیفی منابع آب زیرزمینی و سطحی دشت الشتر با روش ANOVA و مدل‌های زمین‌آمار، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۴، شماره ۲۷، ص ۸۴-۷۲.

- Ghadimi, F., Ghomi, M (2013) Geochemical evaluation of drinking water in Arak City, Iran, *Iranian Journal of Earth Sciences*, 5: 54 -65.
- Ghadimi, F., Ghomi, M., Azimi, R (2016) Sources of nitrate and bromide contaminants of groundwater in alluvial aquifer of Arak, Iran, *Journal of Tethys*, 4 (2): 100–115.
- Gibbs, R. J (1970) Mechanism controlling world water chemistry, *Science*, 17: 1088– 1090.
- Jalali, M (2009) Geochemistry characterization of groundwater in an agricultural area of Razan, Hamadan, Iran, *Environmental Geology*, 56: 1479– 1488.
- Ju, Y., Massoudieh, A., Green, C. T., Lee, K. K., Kaown, D (2020) Complexity of groundwater age mixing near a seawater intrusion zone based on multiple tracers and Bayesian inference, *Science of The Total Environment*, 753, 141994.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.1>
- Han, X., Yin, T., Haiming, L., Lu, Z., Thanh, ND, CHEN, D., Qihong, T (2021) Saltwater intrusion into groundwater systems in the Mekong Delta and links to global change, *Advances in Climate Changes Research*, 12: 342-352.
- Heagle, D., Hayashi, M., Kamp, G (2013) Surface–subsurface salinity distribution and exchange in a closed-basin prairie wetland, *Journal of Hydrology*, 478: 1–14.
- Kaiser, HF (1958) The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis, *Psychometrika*, 23: 187-200.
- Kim, J., Kim, R., Lee, J., Cheong, T., Yum, B., Chang, H (2005) Multivariate statistical analysis to identify the major factors governing groundwater quality in the coastal area of Kimje, South Korea, *Hydrological Process*, 19: 1261–1276.
- Maa, J., He, J., Qi, S., Zhu, G., Zhao, W., Edmunds, M., Zhao, Y (2013) Groundwater recharge and evolution in the Dunhuang Basin, northwestern China, *Applied Geochemistry*, 28: 19–31.
- Manly Bryan, FJ (1994) *Multivariate Statistical Methods: A Primer*. 2nd Ed. Chapman and Hall; London, England. 215 p.
- Reimann, C., Filzmoser, P (2000) Normal and lognormal data distribution in geochemistry: death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. *Environmental Geology*, 39: 1001–1014.
- Tang, Q (2020) Global change hydrology: terrestrial water cycle and global change, *China Earth Sciences*, 63: 459-462.
- Vahidipour, M., Raeisi, E., van der Zee, S (2021) Active saltwater intrusion of shrinking Bakhtegan -Thask Lakes in South Iran threatens the freshwater resources of coastal aquifers, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 34: 100790.
- عبدی، ل.، رحیم‌پورناب، ح (۱۳۹۱) هیدرولوژی و هیدروشیمی پلایای میقان در ارتباط به سازندهای زمین‌شناسی منطقه، شانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- عزیزی، ف.، اصغری‌مقدم، ا.، نظامی، ا. ح (۱۳۹۶) ارزیابی شوری آب زیرزمینی و تبیین منشاء یون‌ها در آبخوان ساحلی دشت ملکان با استفاده از نسبت‌های یونی، *مجله محیط شناسی*، دوره ۴۳، شماره ۳، ص ۴۳۷-۴۵۴.
- قدیمی، ف.، قمی، م (۱۳۹۵) تجزیه و تحلیل آماری داده‌های اکتشافی ژئوشیمیایی (با کارکرد در محیط Statistica)، دانشگاه صنعتی اراک، ۳۳۳ ص.
- مهاجرانی، ش.، امینی، ع (۱۳۷۹) رسوب‌شناسی کویر میقان با نگرشی ویژه و نحوه گسترش نهشته‌های تبخیری، چهارمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- مظفری‌زاده، ج.، سجادی، ز (۱۳۹۲) بررسی علل شوری و نفوذ آب شور رودهای دالکی و حله به آبخوان برازجان، *مجله مهندسی منابع آب*، دوره ۶، شماره ۱۶، ص ۶۹-۷۸.
- نخعی، م.، ودیعتی، م.، صابری نصر، ا (۱۳۹۰) ارزیابی تحولات هیدروژئوشیمیایی دشت تربت حیدریه، پانزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- نوبین‌پور، ع.، عارف، س (۱۳۹۹) ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت ارومیه جهت اهداف آب شرب با استفاده از روش GQI در محیط نرم‌افزار ArcGIS، نشریه یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۴، شماره ۲۷، ص ۲۶-۱۶.
- Abdalla, F., Khalil, R (2018) Potential effects of groundwater and surface water contamination in an urban area, Qus City, Upper Egypt, *Journal of African Earth Sciences*, 141: 164-178.
- Busico, G., Cuoco, E., Kazakis, N., Colombani, N., Mastrocico, M., Tedesco, D., Voudouris, K (2018) Multivariate statistical analysis to characterize/discriminate between anthropogenic and geogenic trace elements occurrence in the Campania Plain, Southern Italy, *Environmental Pollution*, 234: 260-269.
- Carranza, E. J. M (2011) Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. *Journal of geochemical exploration*, 110(2): 167-185.
- Einsiedl, F (2012) Sea-water/groundwater interactions along a small catchment of the European Atlantic coast, *Applied Geochemistry*, 27: 73–80.
- Ghadimi, F., Ghomi, M (2012) Statistical analysis of the hydrogeochemical evolution of groundwater in alluvial aquifer of Arak Mighan playa, Markazi Province, Iran, *Journal of Water Sciences Research-JWSR*, 4(1): 31-45.

Walther, M., Leonard, S (2020) Post-pumping seawater intrusion at the field scale: Implications for coastal aquifer management, *Advances in Water Resources*: 103561. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.10356>



## The effect of Arak Mighan Plain Salt on groundwater quality by multivariate statistical method

F. Ghadimi<sup>1\*</sup> and S. Azadifar<sup>2</sup>

1- Assoc. Prof., Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- M. Sc., student. Dept., of Mining Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

\* ghadimi@Arakut.ac.ir

Received: 2021/11/16 Accepted: 2022/2/14

### Abstract

Mighan playa is the most important extraction point of sodium sulfate in Iran. The playa consists of two parts, the island in the center and the lake in the margin. Extraction of sodium sulfate on the island is associated with the formation of artificial ponds. Sodium sulfate company effluent and treated wastewater are the most important sources of surface water in Mighan playa. The effects of salinity over groundwater quality is one of the objectives in this article. The univariate and multivariate statistics such as mean comparison test, factor, cluster and discriminant analysis was used to compare saline playa with groundwater resources. In 22 samples, it was determined variables of electrical conductivity, alkalinity, total soluble solids, pH, calcium, magnesium, potassium, sodium, chlorine, sulfate and bicarbonate. It identified three water groups such as pond brine, lake brine and groundwater by differences in total soluble solids, pH, sulfate and chlorine. Multivariate analysis showed that qualitative variables are of several origins. The salinity of Mighan playa water and groundwater is related to anions and cations that originate from the gypsum and saline layers of the northern part, alkalinity and bicarbonate due to the dissolution of limestone in the southern floors of the Mighan catchment. Evaluation of the sodium to chlorine ratio and Gibbs diagram show the influence of infiltration Mighan playa saline water on the groundwater, especially in the playa margin.

**Keywords:** Groundwater quality, Hydrogeochemical variables, Brine infiltration, Statistical analysis, Arak Mighan Playa