

تعیین منشأ شوری آب زیرزمینی با استفاده از ویژگی‌های هیدروشیمیایی و روش تحلیل عاملی

❖ حسین نوروزی قوشبلاغ*؛ دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

❖ اصغر اصغری مقدم؛ استاد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

منطقه ملکان یکی مناطق بسیار فعال کشاورزی شمال غرب کشور است که نیاز آبی آن از منابع آب زیرزمینی تأمین می‌شود. متأسفانه وجود حدود شش هزار چاه بهره‌برداری در دشت و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی باعث افت شدید سطح آب و به تبع آن افزایش شوری آبخوان دشت ملکان گردیده است. به همین منظور با پراکندگی مناسب، ۲۷ نمونه از منابع آب منطقه ملکان، جمع‌آوری گردیده و مورد آنالیز هیدروشیمیایی قرار گرفت. نتایج آنالیز نمونه‌های برداشت شده با نمونه آب دریاچه از نظر هیدروشیمی عناصر اصلی، مقایسه گردید. سپس از مطالعات ژئوفیزیکی، دیگرام‌های ژئوشیمیایی، نسبت‌های مختلف یونی و تحلیل عاملی برای بررسی منشأ شوری استفاده شد. نتایج نشان داد که منشأ شوری فزاینده در آبخوان‌های دشت‌های اطراف دریاچه، این است که در انتهای دشت‌ها شیب بسیار کم و رسوبات فوق‌العاده دانریز می‌باشد، در نتیجه وقتی جریان‌های زیرزمینی با چنین رسوباتی برخورد می‌کنند، حرکت آن‌ها کند شده و آب در اثر نیروی کاپیلاری بالا آمده و سطح آب زیرزمینی نزدیک به سطح زمین می‌گردد، در نهایت عمق کم آب زیرزمینی باعث تبخیر شدید و افزایش شوری آب زیرزمینی می‌شود. علاوه بر این پخش جریان‌های سطحی در قسمت‌های انتهایی دشت باعث تبخیر و به وجود آمدن نمک‌زارهایی می‌شود که در اثر بهره‌برداری زیاد، جریان تدریجی آب‌ها به طرف بالادست حوضه برقرار شده و باعث شوری آبخوان‌ها می‌شود. همچنین وجود لجن‌های شور باقیمانده از دریاچه قدیم در زیر آبرفت‌ها و سازندهای دارای نمک باعث می‌شود که بر اثر برداشت زیاد از آبخوان‌ها و پایین رفتن سطح آب زیرزمینی، بالا آمدن آب شور در قسمت‌های زیرین لایه‌های رسی اتفاق افتاده و آب شور به چاه برسد.

کلید واژگان: دشت ملکان، دریاچه ارومیه، نفوذ آب شور، هیدروشیمی، تبخیر.

۱. مقدمه

کشاورزی و (۶) پساب‌های شور ناشی از فعالیت‌های انسانی.

یکی از مشکلاتی که منابع آب زیرزمینی را تهدید می‌کند وارد شدن آب‌های شور به داخل لایه‌های آبدار و یا به عبارت دیگر شور شدن لایه‌های آبدار زیرزمینی است. اگر در یک آبخوان ساحلی بیش از میزان تغذیه برداشت شود بار هیدرولیکی سفره آب شیرین کاهش می‌یابد و در نتیجه آب شور تا زمانی که یک تعادل جدید بین آب شور و شیرین به وجود آید به سمت ساحل پیشروی می‌نماید که وسعت نفوذ آب شور به عواملی مانند هندسه آبخوان، هدایت هیدرولیکی، انیزوتروپی، تخلخل آبخوان، دبی پمپاژ آب زیرزمینی و میزان تغذیه آب زیرزمینی و فاصله چاه‌های پمپاژ از خطوط ساحل بستگی دارد [۳]. این امر بخصوص در مناطقی ساحلی و یا نقاطی که آب شور در اعماق پایین‌تر وجود دارد از اهمیت بیشتری برخوردار است. اغلب منابع آب زیرزمینی شیرین در نزدیکی آب دریا و یا آب‌های زیرزمینی طبیعی شور یا پساب‌های شور قرار گرفته‌اند.

دریاچه‌ی ارومیه در اثر رویدادهای زمین‌ساختی و در میوسن میانی، بعد از فروافتادگی چاله‌ی تبریز-ارومیه، چاله‌ی مزبور را اشغال می‌کند و حالت ژئوسنکلینالی دارد [۲۷]. دریاچه ارومیه یک دریاچه نسبتاً جوان است و بعد از آخرین فعالیت یخچالی و بر اثر فعالیت‌های تکتونیکی پدید آمده است. این دریاچه از نظر زمین‌شناسی در بین دو سیستم فعال گسل تبریز در شمال و گسل زرینه‌رود در جنوب واقع شده است. افزایش دما و افزایش تبخیر باعث کاهش شدید سطح آب دریاچه ارومیه شده است و دشت‌های اطراف دریاچه ارومیه با افزایش شدید شوری آب زیرزمینی مواجه شده‌اند. شکل ۱ تغییرات دریاچه ارومیه را در بازه زمانی ۴۲ ساله را نشان می‌دهد.

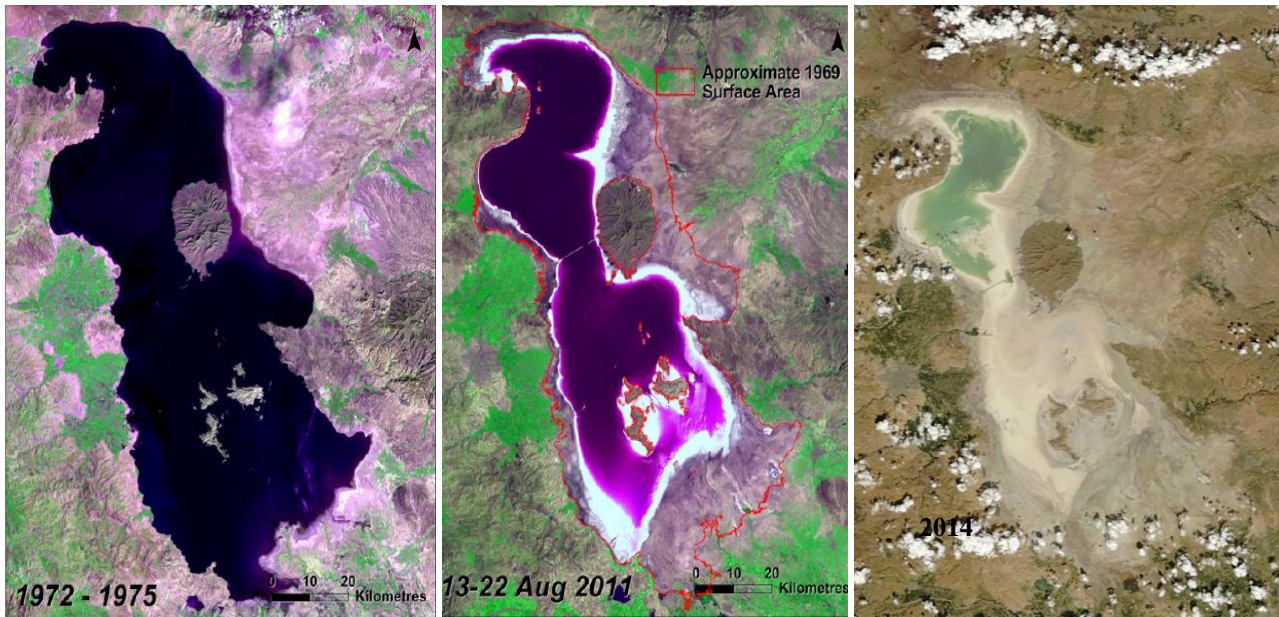
استفاده از ژئوشیمی در بررسی ارتباط بین منابع آب مختلف خصوصاً در مناطق ساحلی در تحقیقات بسیاری صورت پذیرفته است [۲۱، ۲۰، ۱۹، ۸، ۷، ۵]. گرگیچ و اصغری مقدم [۲۵] ارتباط هیدرولیکی

نیاز روزافزون به آب شیرین در کشورهای جهان به ویژه کشورهای در حال توسعه، مشکل آلودگی و عدم وجود قوانین مبتنی بر اصول علمی، باعث به وجود آمدن خسارت‌های جبران‌ناپذیری بر منابع آب زیرزمینی شده است. محدودیت منابع آب سطحی و بهره‌برداری بیش از اندازه از آبخوان‌ها و همچنین ورود آلاینده‌ها از طریق فعالیت‌های کشاورزی، شهری و صنعتی باعث تحمیل خسارت‌های جبران‌ناپذیری بر آب‌های زیرزمینی می‌شود [۲۶]. علاوه بر آن به دلیل رخنمون سازندهای تبخیری در بخش وسیعی از کشور، آب‌های زیرزمینی موجود در آن‌ها از کیفیت مناسبی برخوردار نیستند. از سوی دیگر ضعف مدیریتی در کنترل منابع آب سطحی و زیرزمینی کشور موجب گردیده تا خواسته یا ناخواسته این منابع در معرض آلودگی و افزایش شوری قرار گیرند. بدین لحاظ با توجه به اهمیت موضوع و پیامدهای نامطلوب بر اکوسیستم و زندگی مردم، مطالعه تغییرات کمی و کیفی منابع آب زیرزمینی و کشف علل آن و ارائه راهکارهای پیشگیرانه از اهداف مطالعات هیدروشیمیایی می‌باشد.

شور شدن آب زیرزمینی در حال تبدیل به یک مشکل بسیار جدی در سرتاسر جهان است، به گونه‌ای که مسئله شوری به‌عنوان رایج‌ترین نوع آلودگی آب زیرزمینی در مناطق ساحلی در نظر گرفته می‌شود. به دلیل عدم کنترل برداشت آب زیرزمینی تغییراتی در سامانه طبیعی جریان آب زیرزمینی ایجاد می‌شود که این امر در مناطق ساحلی باعث نفوذ آب دریا به سفره‌های ساحلی است. به طور کلی شش منبع برای شوری آب زیرزمینی وجود دارد [۲۲]: (۱) نفوذ آب شور دریا به آبخوان ساحلی، (۲) آب شوری که در اثر تبخیر از لاگون‌های جزر و مدی یا حوضه‌های بسته به‌وجود آمده است، (۳) نمکی که از گنبد‌های نمکی داخل سازندهای زمین‌شناسی پخش هستند، (۴) آب شور دریا که در طی زمان‌های زمین‌شناسی گذشته وارد آبخوان شده است، (۵) جریان‌های برگشتی به رودخانه‌ها از زهکشی زمین‌های

در انتهای دشت باشد. همچنین کیفیت آب‌های زیرزمینی مناطقی از ایالت کارناتا‌کا به کمک ویژگی‌های هیدروشیمیایی مورد بررسی قرار گرفت [۲۴].

دشت آذرشهر با دریاچه ارومیه را با استفاده از مدل‌سازی معکوس هیدروشیمیایی مطالعه نمودند و نتایج آن‌ها نشان داد که دلیل اصلی شوری آب زیرزمینی در این منطقه می‌تواند مربوط به تبخیر



شکل ۱. تصویر ماهواره لندست از محدوده دریاچه ارومیه الف) سال ۲۰۱۴، ب) سال ۲۰۱۱، ج) ۱۹۷۵

معکوس کاتیون Na توسط تبادل گر گرفته‌شده و کاتیون‌های Ca^{++} و Mg^{++} رها می‌گردد که این فرآیند منجر به تغییر کیفیت آب از Na-Cl به Ca-Cl یا Mg-Cl می‌شود [۱۶، ۱۴، ۱]. تصورات قبلی از شوری منابع آب زیرزمینی در دشت‌های اطراف دریاچه ارومیه بر این بوده است که عامل اصلی شوری آب زیرزمینی در این مناطق ناشی از نفوذ آب شور به آبخوان‌ها و پیشروی آن به سمت بالادست می‌باشد، اما در این مطالعه سعی گردیده است که هیدروشیمی آب زیرزمینی بررسی شده و منشأ شوری در آبخوان دشت ملکان با استفاده از داده‌های هیدروشیمیایی، هیدروژئولوژیکی و تحلیل عاملی بررسی گردد.

عموماً نسبت‌های شیمیایی $\text{Ca}^{++} / \text{Mg}^{++}$ ، $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ ، $\text{Ca}^{++} / (\text{Hco}_3^- + \text{So}_4^{--})$ و بررسی ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن را به عنوان شاخص‌های تشخیص منبع شوری و ارتباط هیدرولیکی سفره‌های ساحلی با منبع آب دریای مجاور آن‌ها شناخته می‌شوند [۱۵]. نفوذ آب شور در نوار ساحلی باعث می‌شود که تیپ آب‌های زیرزمینی بدون گذر از حالت سولفات‌ها و بدون تبعیت از توالی آنیونی چیبوتارو تبدیل به کلروه شده و هرچه به نوار ساحلی نزدیک‌تر شویم تیپ آب کلرو سدیک (Na-Cl) گردد که این الگو نشان‌دهنده تغییر شیمیایی کیفیت آب در اثر واکنش تعویض یونی به علت نفوذ آب شور و اختلاط آب شور و شیرین می‌باشد. در اثر فرآیند هیدروشیمیایی تعویض یونی

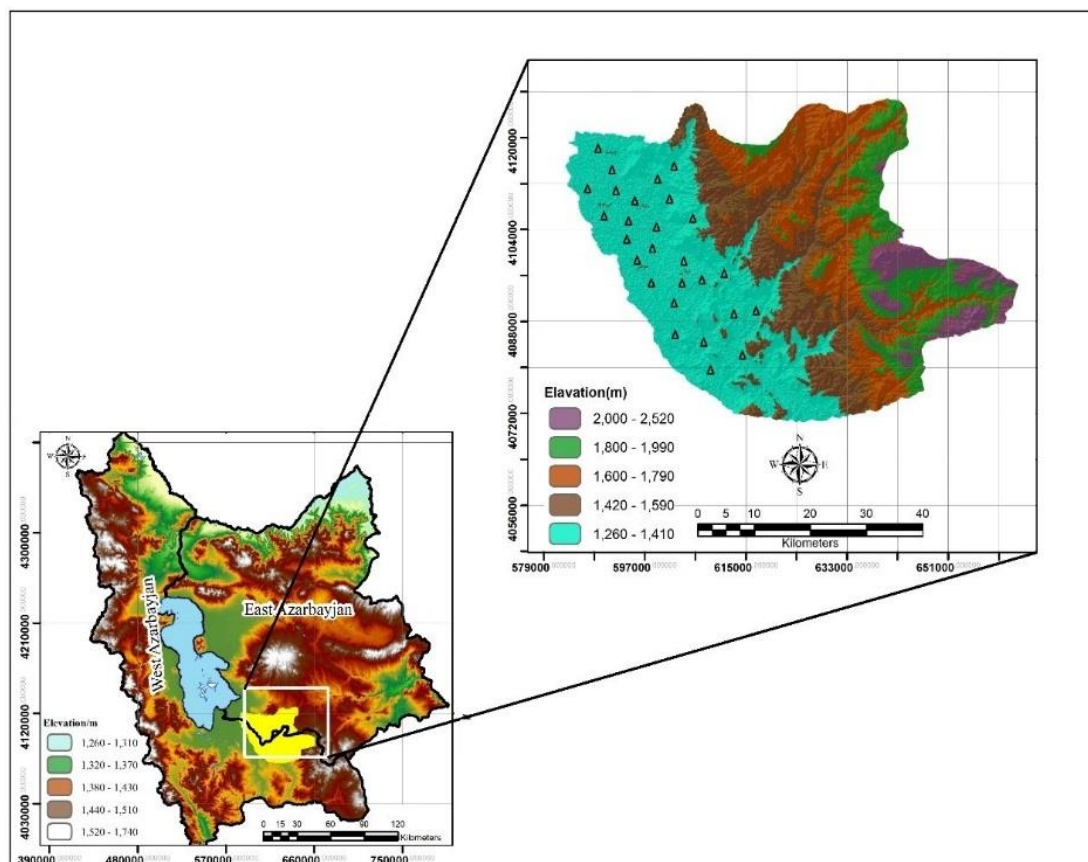
۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. ویژگی‌های زمین‌شناسی، هیدرولوژی،

هیدروژئولوژیکی و ژئوفیزیکی منطقه مورد مطالعه

دشت ملکان با وسعتی تقریباً برابر با ۴۵۰ کیلومترمربع در جنوب استان آذربایجان شرقی و در جنوب شرق دریاچه ارومیه با مختصات ۴۵ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۶ دقیقه طول شرقی نسبت به نصف النهار مبدأ و بین ۳۶ درجه و ۵۳ دقیقه الی ۳۷ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی نسبت به خط استوا واقع شده (شکل ۲) و جزء زون زمین‌ساختاری البرز-آذربایجان محسوب می‌شود [۲۷]. متوسط ارتفاع دشت ملکان ۱۳۲۰ متر بوده و اختلاف ارتفاع آن از رأس دشت تا انتهای دشت ۴۵ متر می‌باشد. دشت ملکان از نظر تقسیمات طبیعی در حوزه آبریز دریاچه ارومیه قرار دارد

و این حوزه بر اساس روش تجربی آمبرژه [۶] و با استفاده از آمار ایستگاه ملکان طی دوره ۳۰ ساله (۱۳۶۵-۱۳۹۴)، دارای اقلیم سرد و نیمه‌خشک می‌باشد. دشت ملکان در محل دلتای رودخانه‌های مردق‌چای و لیلان‌چای واقع شده است و یکی از قطب‌های کشاورزی شمال غرب کشور محسوب می‌شود که بخش قابل توجهی از نیاز آبی این دشت توسط آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود. دشت ملکان از جمله دشت‌های آبرفتی مجاور دریاچه ارومیه می‌باشد که به واسطه افزایش بی‌رویه در استخراج آب زیرزمینی در سال‌های اخیر با خطر بالا رفتن مقدار شوری مواجه گردیده که منجر به کاهش کیفیت آب زیرزمینی منطقه می‌گردد. به این ترتیب لزوم مطالعات علمی، اصولی و هدفمند منابع آب زیرزمینی به منظور مدیریت کمی و کیفی این منابع در منطقه مورد مطالعه ضرورت پیدا می‌کند.

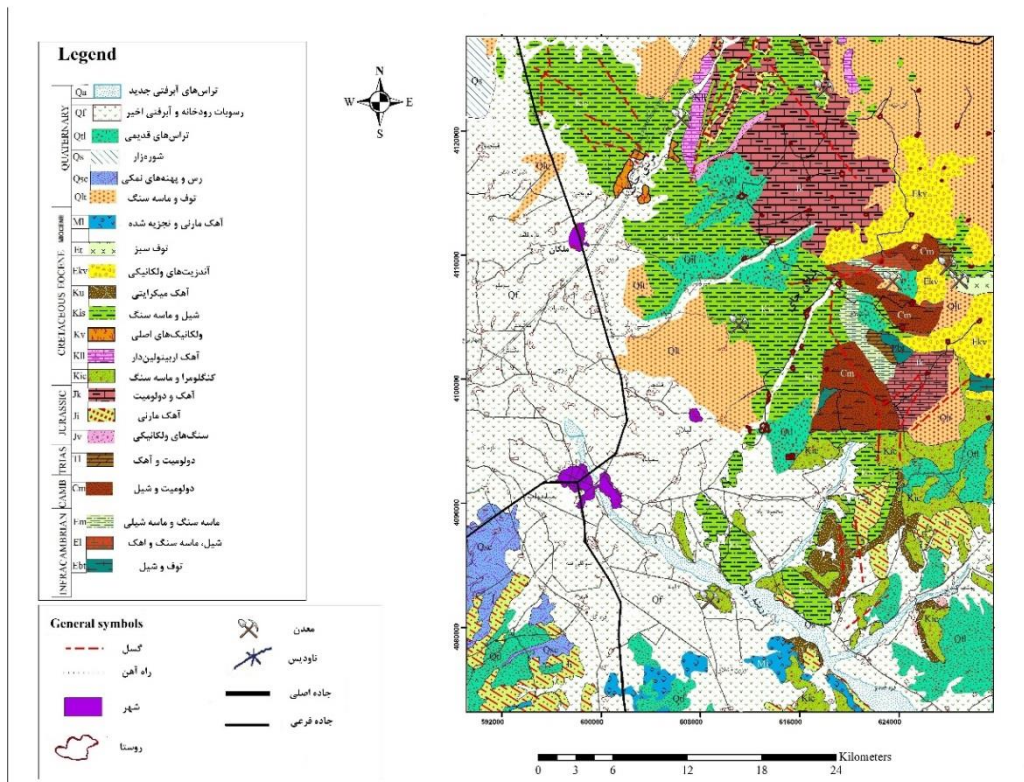


شکل ۲. موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری

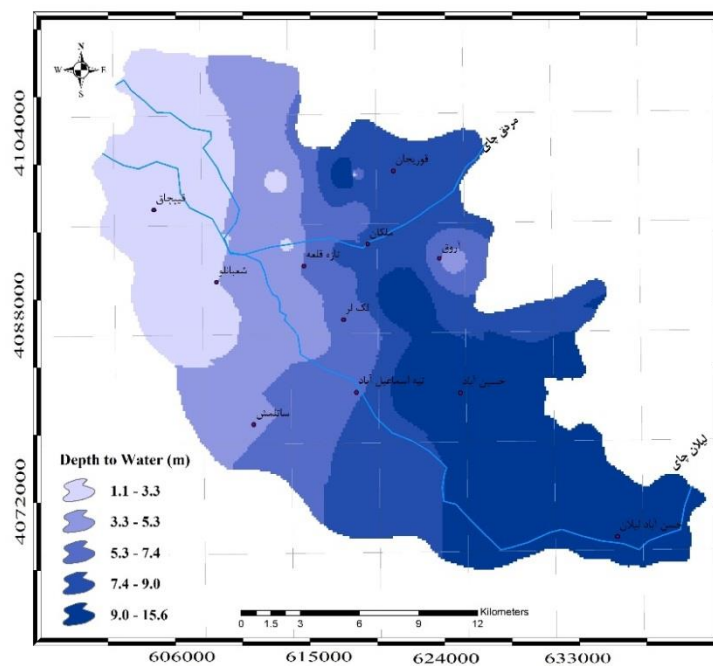
منطقه ملکان دارای سازندهای زمین‌شناسی مختلفی می‌باشد. سازند لالون که در قسمت شرق و سازند روتنه در دوره پرمین در جنوب منطقه برون‌زد دارد، سازند شمشک قسمت شرق و شمال شرقی منطقه را پوشانده است و سازند لار مربوط به دوره تریاس و ژوراسیک در قسمت شمال و شمال شرق منطقه دیده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، بخش اعظمی از مساحت منطقه در بخش غربی مربوط به رسوبات آبرفتی دوره کواترنر است و بخش کمی از آن‌ها در بخش شمال غرب دارای پهنه‌های رسی-نمکی هستند. در قسمت جنوب و جنوب شرقی دشت مجموعه رسوبات آهک و مارن-ژیپس دیده می‌شود که مربوط به دوره کرتاسه و مجموعه سنگ‌های پیروکلاستیک و رس‌سنگ‌ها مربوط به دوره پلیوسن می‌باشند. آبخوان دشت از نوع آزاد می‌باشد که اکثراً از پادگانه‌های آبرفتی قدیمی، پادگانه‌های آبرفتی جدید، مخروط‌افکنه‌ها و رسوبات رودخانه‌ای تشکیل یافته است و مواد اصلی تشکیل دهنده آبخوان رسوبات ماسه، سیلت و رس می‌باشد که بر اساس نقشه‌های هم‌ضخامت رسوبات آبرفتی، لاگ‌های حفاری و داده‌های ژئوفیزیکی، در قسمت‌های بالایی دشت، ذرات تشکیل دهنده سفره دانه‌درشت بوده و هر چه به سمت مرکز دشت و نواحی خروجی و به سمت دریاچه ارومیه نزدیک می‌شویم رسوبات دانه‌ریزتر می‌باشند و دارای هدایت هیدرولیکی کمتری می‌باشد. بیشترین ضخامت آبرفت دشت ملکان مربوط به بخش میانی و منطقه شهری ملکان می‌باشد [۲۸، ۲۹]. بیشترین ضخامت آبرفت در این قسمت ۷۰ متر می‌باشد [۱۷]. هرچه از این بخش به سمت حواشی آبخوان نزدیک‌تر می‌شویم، از ضخامت آبرفت کاسته می‌شود. تغییرات مکانی عمق سطح آب زیرزمینی با استفاده از آمار ۲۷ پیژومتر واقع در دشت در شکل ۴ نشان داده شده است که از رأس مخروط‌افکنه‌ها به سمت پای دشت کاهش می‌یابد. واژه‌ی انتقال‌پذیری یا قابلیت انتقال که سهولت حرکت آب را از میان آبخوان در کل ضخامت توصیف می‌کند و می‌تواند نقش مهمی در پیشرفت شوری به سمت

قسمت‌های بالاتر آبخوان، داشته باشد در شکل ۵ به‌صورت توزیع مکانی نشان داده شده است. بیشترین قابلیت انتقال در مرکز دشت می‌باشد. بر اساس نقشه‌های هم‌ضخامت رسوبات آبرفتی، لاگ‌های حفاری و داده‌های ژئوفیزیکی، در قسمت‌های بالایی دشت، ذرات تشکیل دهنده سفره دانه‌درشت بوده و قابلیت انتقال دشت نیز در این مناطق بالا می‌باشد و هر چه به سمت مرکز دشت و نواحی خروجی و به سمت دریاچه ارومیه نزدیک می‌شویم رسوبات دانه‌ریزتر شده و قابلیت انتقال نیز کاهش می‌یابد [۲۷]. همچنین بالا بودن مقدار قابلیت انتقال در قسمت مرکزی و بخصوص در منطقه شهری ملکان به دلیل بالا بودن ضخامت رسوبات آبرفتی در این قسمت می‌باشد. ضریب ذخیره این دشت که با روش بیلان جزءبه‌جزء محاسبه شده است و با استفاده از روش مذکور، مقدار متوسط ضریب ذخیره آبخوان در حدود ۳/۲ درصد می‌باشد. گرادیان هیدرولیکی مطلق که مسئول حرکت آب زیرزمینی و مهاجرت ماده حل شونده در آن می‌باشد در دشت ملکان در نقاط مختلف متفاوت می‌باشد و به‌طور کلی در ورودی‌های دشت میانگین ۰/۰۰۶ و در خروجی‌ها نیز در حدود ۰/۰۰۱ می‌باشد [۲۳]. محاسبات بیلان آب زیرزمینی برای سال آبی ۹۵-۹۴ حاکی از این است که در محدوده بیلان، تغییرات حجم آب آبخوان منفی می‌باشد؛ به‌طوری‌که در سال مذکور، تخلیه از آن به میزان ۴/۹۳ میلیون مترمکعب بیشتر از میزان تغذیه می‌باشد. با توجه به هیدروگراف واحد دشت ملکان، سطح آب زیرزمینی در طول سال بیلان، ۰/۳۷ متر افت داشته است [۲۳]. بر اساس بررسی‌های هیدروژئولوژیکی، رسوبات کواترنری بیشتر سازندهای آبدار منطقه را در بر گرفته‌اند و آبدهی خوبی دارند. این نهشته‌ها شامل رسوبات رودخانه‌ای (Qal)، در طرفین رودخانه‌های دائمی و فصلی به‌صورت کم شیب، رسوبات واریزه‌ای Qt2 و Q1 در دامنه‌ها و رسوبات Qt1 در تراس‌های مرتفع می‌باشند. سنگ‌های با توان آبدهی متوسط نیز بیشتر در سازندهای شمشک، لالون و واحدهای ماسه سنگی-شیلی کرتاسه یافت می‌شوند که

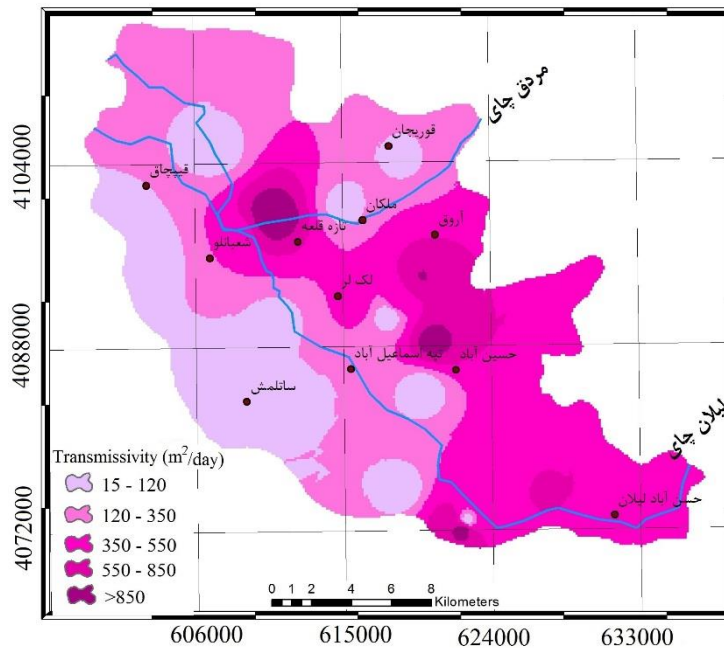
قسمت اعظم منابع آب منطقه ملکان را تشکیل می دهند.



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه



شکل ۴. تغییرات مکانی عمق سطح آب زیرزمینی دشت ملکان



شکل ۵. توزیع مکانی قابلیت انتقال آبخوان دشت ملکان

آن در شکل ۶ آورده شده است. در جدول ۱ مقاومت ویژه سازندهای زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه آورده شده است. بر اساس جدول زیر، لایه آبدار دارای مقاومت ویژه ۱۰ تا ۳۰ اهم-متر می‌باشد. رسوباتی مارنی دارای مقاومتی بین ۵ تا ۱۵ اهم-متر و همچنین مقاومت ویژه توف‌های آبدار بین ۱۰ تا ۳۰ اهم-متر می‌باشد [۱۷].

به منظور بررسی خصوصیات هیدروژئولوژی لایه‌های مختلف زمین و برآورد کمی ضخامت آن‌ها در دشت ملکان تعداد ۱۰۲ عدد سونداژ ژئوالکتریک در راستای ۱۶ پروفیل طراحی شده است [۱۷]. همچنین تعداد ۱۶ مقطع ژئوالکتریک در راستای شمال‌شرق-جنوب‌غرب و شمال‌غرب-جنوب‌شرق تهیه گردیده است که دو نمونه از

جدول ۱. حدود تغییرات مقاومت ویژه ظاهری دشت ملکان

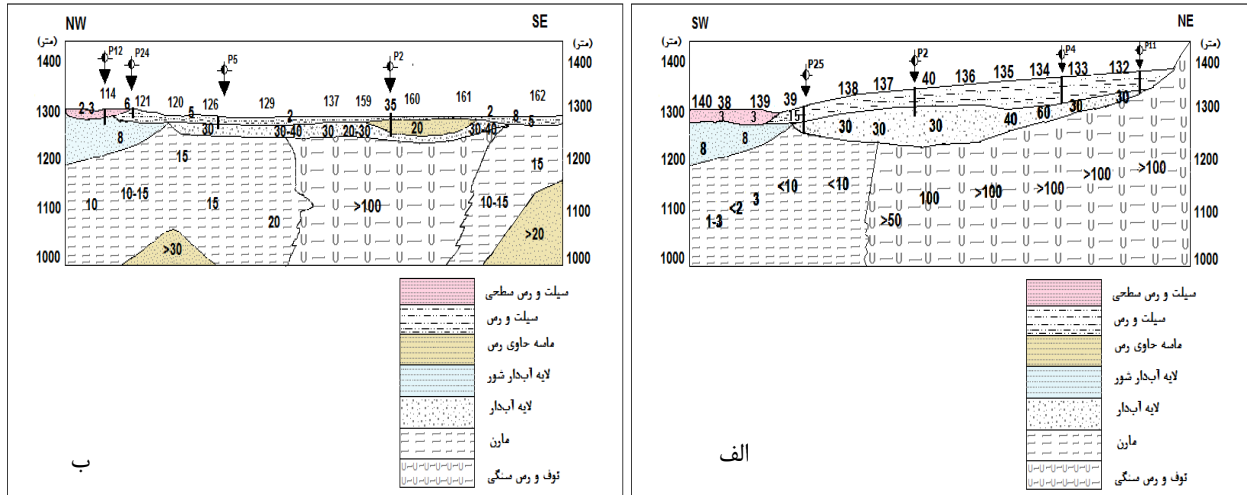
| حدود تغییرات مقاومت ویژه ظاهری (اهم-متر) | لایه‌های زمین | ردیف |
|--|-----------------------------------|------|
| ۱۰ - ۱۵ | رس سطحی | ۱ |
| < ۵ | رس شور سطحی | ۲ |
| ۱۰ - ۳۰ | ماسه، شن و قلوه‌سنگ حاوی آب شیرین | ۳ |
| ۵ - ۱۵ | رسوبات مارنی | ۴ |
| ۱۰ - ۳۰ | توف‌های آبدار | ۵ |

مقاومت مخصوص ۳ تا ۱۰ اهم-متر پوشانده شده است که ضخامت این پوشش گاهی به ۲۰ متر نیز می‌رسد.

بر اساس مقاطع آورده شده در شکل ۶، آبرفت‌های دوران کواترنری اکثراً به‌وسیله پوششی از رس شور با

زیرزمینی، میزان مقاومت ویژه مواد زمین‌شناسی کاهش می‌یابد [۱۷].

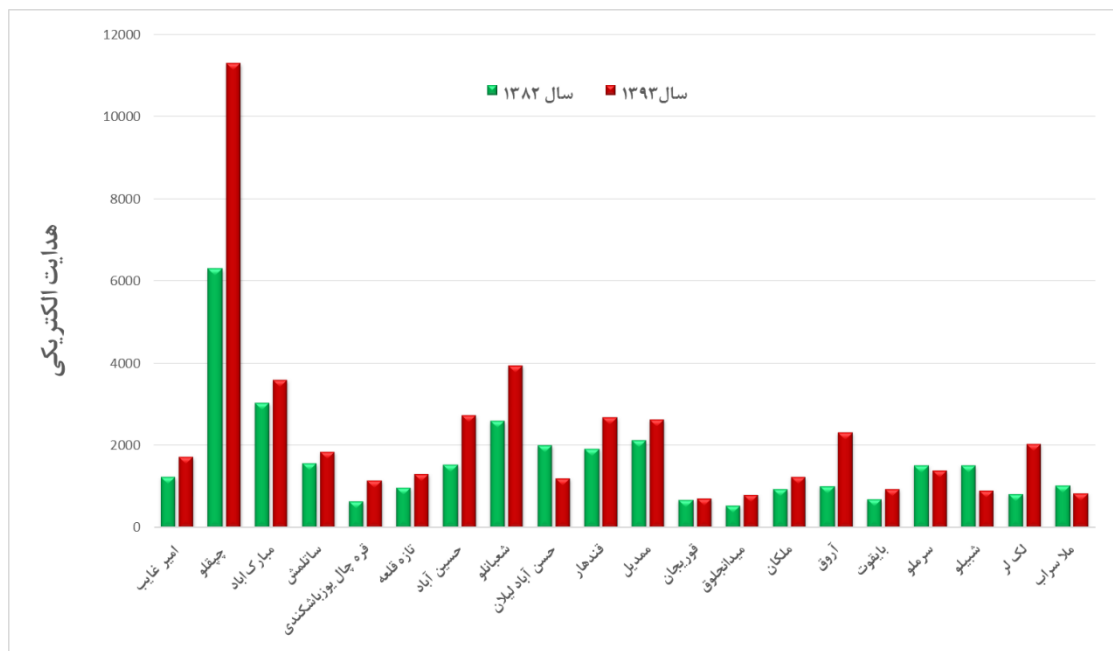
همچنین از قسمت شرق آبخوان به سمت غرب، به علت ریزدانه شدن رسوبات و افزایش املاح محلول آب‌های



شکل ۶. مقاطع ژئوالکتریک دشت ملکان. الف) راستای شمال شرق - جنوب غرب، ب) راستای شمال غرب - جنوب شرق

میزان شوری موجود در آب است، روند افزایشی داشته و از سمت مرز غربی و شمال غربی آبخوان که در مجاورت دریاچه است در حال پیشروی است (شکل ۷).

رسم میزان هدایت الکتریکی برای محدوده مطالعاتی نشان داد که با گذر زمان و در فاصله بین سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۹۳ میزان هدایت الکتریکی که مشخصه بارزی از



شکل ۷. مقایسه هدایت الکتریکی (میکروزیمنس بر سانتی‌متر) آب زیرزمینی دشت ملکان در سال ۱۳۸۲ و ۱۳۹۳

می‌باشند نمونه‌برداری انجام گرفت. آنالیزهای هیدروشیمیایی نمونه‌ها در آزمایشگاه آب‌شناسی دانشگاه تبریز انجام پذیرفت. خصوصیات آماری داده‌های هیدروشیمیایی در جدول ۲ آورده شده است. همچنین جدول ۳ نتیجه آنالیز نمونه آب دریاچه را بیان می‌کند.

۲.۲. هیدروشیمی منطقه مورد مطالعه

با توجه به اینکه بدون آنالیز شیمیایی تعیین منشأ آب زیرزمینی ممکن نیست، به همین منظور در شهریورماه ۱۳۹۳ با پراکندگی مناسب، ۲۷ نمونه از منابع آب منطقه ملکان، خصوصاً چاه‌های این منطقه که اکثراً کم‌عمق

جدول ۲. خصوصیات آماری داده‌های هیدروشیمیایی

| Parameter | Unit | Min | Max | Mean | Std. Deviation | Skewness | Variance | Kurtosis |
|------------------|------------------------|--------|-------|--------|----------------|----------|----------|----------|
| Mn | ppm | ۰/۰۰۱ | ۰/۸۹ | ۰/۲۰ | ۰/۳۲ | ۱/۳۷ | ۰/۱۰۳ | ۰/۲۷ |
| Fe | ppm | ۰/۰۰۳ | ۰/۶۳ | ۰/۱۳ | ۰/۱۷۸ | ۰/۰۷ | ۰/۰۳۲ | ۳/۳۳ |
| Cr | ppm | ۰۰۳۰ | ۰/۰۱ | ۰/۰۰۶۷ | ۰/۰۰۲ | ۰/۵۸ | ۰ | -۰/۸۵ |
| Al | ppm | -۰/۰۲۹ | ۰/۲۶ | ۰/۱۰۵ | ۰/۰۸۵ | ۰/۵۵ | ۰/۰۰۷ | -۰/۳۷ |
| As | ppm | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۴ | ۰/۰۲۴ | ۰/۰۱۵ | -۰/۳۵ | ۰ | -۱/۳۴ |
| Ca | meq/L | ۲/۸۸ | ۲۴/۵۷ | ۱۱/۶۶ | ۷/۴۸ | ۰/۷۶ | ۵۵/۹ | -۰/۸۲ |
| Mg | meq/L | ۰/۶۴ | ۱۶/۶۴ | ۶/۷۱ | ۳/۵۶ | -۰/۵۳ | ۱۲/۴۳ | ۰/۴۶ |
| K | meq/L | ۰/۱۲ | ۰/۶۳ | ۰/۲۵ | ۰/۱۳۶ | ۱/۹۹ | ۰/۰۱۹ | ۳/۱۸ |
| Na | meq/L | ۱/۳۸ | ۵۲/۳۱ | ۱۸/۶۴ | ۱۵/۹۸ | ۱/۵۸ | ۲۴۰ | ۱/۱۱ |
| HCO ₃ | meq/L | ۳/۱۹ | ۲۸/۶۵ | ۷/۵۷ | ۶/۷۷ | ۲/۸ | ۴۵/۸۶ | ۶/۳۳ |
| SO ₄ | meq/L | ۲/۵۳ | ۱۱/۶۴ | ۵/۵۶ | ۲/۶۶ | ۱/۰۷ | ۷/۱ | ۰/۳۷ |
| NO ₃ | meq/L | ۰/۰۲ | ۲/۳۴ | ۰/۶۹ | ۰/۷۳ | ۰/۹۲ | ۰/۵۳ | -۰/۰۲ |
| Cl | meq/L | ۳/۵۳ | ۶۵/۷۶ | ۲۱/۲۳ | ۲۰/۸۴ | ۰/۹۷ | ۴۳۴ | -۰/۳۶ |
| Ec | μS/cm | ۹۵۰ | ۲۹۹۰۰ | ۳۲۹۱ | ۳۰۴۴ | ۱/۲۵ | ۹۲۶۵۵۸۰۰ | ۰/۲۵ |
| pH | | ۶/۲۸ | ۷/۶۷ | ۷/۰۹ | ۰/۴۴ | -۰/۵۵ | ۰/۱۹ | -۰/۶۴ |
| TH | mg/L CaCO ₃ | ۵۰۱ | ۵۶۰۸ | ۱۷۸۱ | ۱۶۶۳ | ۱/۲۵ | ۲۷۶۶۸۰۰ | ۰۲۵ |
| Sio ₂ | meq/L | ۰/۱۹ | ۲/۱۲ | ۱/۱۴ | ۰/۰۶ | -۰/۰۶ | ۰/۳۶ | -۰/۹۶ |
| TDS | mg/L | ۷۱۲ | ۷۷۲۱ | ۲۴۶۸ | ۲۲۸۳ | ۱/۲۵ | ۵۲۱۲۰۰۰ | ۰/۲۶ |

جدول ۳. غلظت عناصر اصلی در آب دریاچه ارومیه

| Parameter | K ⁺ | Na ⁺ | Mg ⁺⁺ | Ca ⁺⁺ | SO ₄ ⁻⁻ | Cl ⁻ | HCO ₃ ⁻ | CO ₃ ⁻⁻ |
|-------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Concentration (meq/lit) | ۹۹ | ۳۶۰۰ | ۲۲۶۲ | ۱۸ | ۶۵۵ | ۵۳۰۰ | ۲۶/۱ | ۰ |

بررسی و تجزیه شیمیایی مداوم منابع آب زیرزمینی، اندازه‌گیری حرکات جزر و مد و مقایسه آن با تغییرات محل سطح جدایی آب شور و شیرین، روش‌های ژئوفیزیک، بررسی‌های زمین‌شناسی و مطالعات ایزوتوپی است [۲۲]. برای نیل به این هدف از پارامترهای

۳.۲. بررسی منشأ آب زیرزمینی

۱.۳.۲. نسبت‌های ژئوشیمیایی

نفوذ آب شور معمولاً با روش‌ها و ابزارهای مختلفی قابل رصد شدن می‌باشد. این روش‌ها شامل حفر چاه‌های اکتشافی و رصد سطح ایستابی چاه‌های مشاهده‌ای،

هیدروشیمیایی و نشان دادن تفاوت‌ها و شباهت‌ها بین نمونه‌های آب استفاده می‌گردد. با استفاده از این نمودار می‌توان پیشرفت تغییرات در شیمی کاتیون‌ها و آنیون‌ها را در جهت مسیر جریان سیستم آب زیرزمینی بررسی کرد [۴].

یکی دیگر از روش‌های مناسب برای تعیین منشأ و مقایسه ترکیب شیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی، نمودار استیف می‌باشد. در این نمودار نیز همانند دیاگرام پایپر، سه رخساره سدیمی، منیزیمی و کلسیمی و همچنین سه تیپ بی‌کربناته، سولفات و کلروره برای انواع آب‌ها در نظر گرفته می‌شود. دیاگرام‌های استیف می‌توانند با مقایسه نمونه‌ها با نمودارهای Pattern برای به دست آوردن منشأ آن‌ها راه‌حلی مفید و سریع باشند، به‌طوری‌که در این دیاگرام‌ها اختلاف بین آنالیزهای شیمیایی متفاوت به‌خوبی نشان داده می‌شوند [۱۳] که منشأ داده‌ها بر اساس دیاگرام‌های تیپ ارائه‌شده توسط هانسلو (۱۹۹۵) تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۶ ب).

۳.۳.۲. تحلیل عاملی^۱

فرآیندهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژیکی معمولاً پیچیده هستند و این پیچیدگی با توزیع‌های غیریکنواخت در بسیاری از اندازه‌گیری‌ها نمایان‌تر می‌شود. اندازه‌گیری‌های زمانی و مکانی فرآیندهای فیزیکی و یا شیمیایی معمولاً نمی‌توانند به‌وضوح فرآیندهای اصلی حاکم را آشکار سازند. آنالیزهای چند متغیره سعی می‌کنند فرآیندهای اصلی حاکم را با کاهش داده‌ها و طبقه‌بندی، تفسیر یا آشکار کنند. تحلیل عاملی ارتباط بین واریانس- کوواریانس یک تعداد از متغیرهای کمی مشاهده‌ای است که برحسب چند کمیت اصلی تصادفی اما غیر مشاهده‌ای که عامل نامیده می‌شود، بیان می‌شود. تعدادی از متغیرها که بیش‌ترین همبستگی را با یکدیگر دارند عامل اصلی نامیده می‌شوند [۱۹]. در

گونگونی همچون کاتیون‌های اصلی (Ca, Mg, Na) و آنیون‌های اصلی (Cl, SO₄, HCO₃) و عناصر فرعی (Li, Br, I, K) و بعضی ایزوتوپ‌های محیطی (¹⁸O, ²H, ¹⁴C) استفاده می‌گردد. در سال‌های اخیر از این اجزا شیمیایی و یا نسبت‌های آن‌ها جهت تفکیک منابع شوری استفاده شده است [۱۶]. حالت عمومی آب‌های شور غالب بودن کلر و سدیم با نسبت مولی ۰/۸۶ و مازاد بودن کلر نسبت به عناصر قلیایی (سدیم و پتاسیم) است. همچنین منیزیم به‌صورت بسیار زیادی بیشتر از کلسیم است یعنی (Mg⁺⁺/ Ca⁺⁺ = 4.5-5). در عوض آب شیرین قاره‌ای به‌وسیله ترکیب شیمیایی بسیار متغیر شناخته می‌شود، اگرچه آنیون‌های غالب آن HCO₃⁻, SO₄⁻ و Cl⁻ می‌باشد [۲]. اگر آلودگی انسان‌زاد وجود نداشته باشد، کاتیون اصلی Ca⁺⁺ و Mg⁺⁺ است و به میزان بسیار کمتر قلیایی‌های Na⁺ و K⁺ در بسیاری از موارد Ca⁺⁺ بر Mg⁺⁺ غالب است. محلول‌های دریایی به‌صورت ویژه‌ای به‌وسیله نسبت Mg⁺⁺ > SO₄⁻ + HCO₃⁻ شناخته می‌شوند درحالی‌که آب‌های جوی (رقیق یا شور) حتی اگر به‌وسیله ترکیبات دریایی دچار تغییر شوند، نسبت Na⁺ > Cl⁻ را نشان می‌دهند. نسبت‌های شیمیایی Na⁺/Cl⁻، Ca⁺⁺ / Mg⁺⁺، SO₄/Cl⁻ و (HCO₃⁻ + CO₃⁻) / Cl⁻ به‌عنوان شاخص‌های تشخیص منبع شوری ارائه می‌شوند [۱۶].

۲.۳.۲. دیاگرام‌های هیدروشیمیایی

تحلیل‌های حاصل از دیاگرام‌های هیدروشیمیایی در حل بسیاری از مسائل نظیر تعیین وضعیت کیفی آب‌های منطقه، تیپ‌های آبی، مکانیسم‌های حاکم و تأثیر سازندهای مختلف بر کیفیت آب و غیره اهمیت دارند. دیاگرام‌های پایپر و استیف دو مورد از مهم‌ترین دیاگرام‌هایی هستند که برای تعیین منشأ آب زیرزمینی استفاده می‌شوند. از نمودارهای پایپر به دلایل مانند، نمایش گرافیکی شیمی آب به‌منظور طبقه‌بندی آب‌هایی با ترکیب شیمیایی مختلف، برای تعیین آب‌هایی که آمیختگی نشان می‌دهند، تعیین رخساره‌های

دریا و آب‌های فوق شور می‌باشد. همچنین آنیون‌های غالب به ترتیب در جهت عمومی جریان و همگام با تغییر تیپ غالب آب از HCO_3^- شروع به SO_4^{2-} در میانه جریان و Cl^- در انتهای مسیر جریان تبدیل می‌شود که نشان‌دهنده سیر طبیعی تغییر تیپ آب در اثر حرکت در محیط متخلخل است. آنیون غالب برای آب دریاچه نیز Cl^- می‌باشد؛ که صفت بارز آب‌های فوق شور است. بر اساس دیاگرام پایپر، آب زیرزمینی در نمونه‌های مربوط به منطقه تغذیه، بخصوص در ورودی رودخانه‌ها از نوع بیکربنات کلسیم می‌باشد. بخش‌های غربی آبخوان و به سمت دریاچه ارومیه، به دلیل وجود شوره‌زارهای دریاچه دارای تیپ کلرید سدیم بوده و نیز نشانگر محل‌های خروجی یا تخلیه آب زیرزمینی می‌باشد. ترکیب شیمیایی آب در این زون به ترکیب آب دریا متمایل می‌شود. نمونه‌های قرارگرفته در قسمت‌های میانی دشت، مربوط به منطقه‌ای می‌باشند که در این ناحیه هیچ آنیون و کاتیونی غالب نیست. شکل ۵ نمودار پایپر نمونه‌های برداشت شده از منطقه مطالعاتی و دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد.

شکل ۶ دیاگرام استیف گروه‌های مختلف نمونه‌های آب، برای منطقه مورد مطالعه و دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. منشأ داده‌ها بر اساس دیاگرام‌های تیپ ارائه‌شده توسط هانسلو (۱۹۹۵) به ۴ دسته تقسیم شد که در شکل (۶ الف) نشان داده شده است. دسته A نشان از منشأ آهکی و دولومیتی این نمونه‌ها دارند که بیشتر در نمونه‌های قسمت‌های شرقی و شمال شرقی مشاهده می‌گردد. دسته B منشأ آب از سازندهای شیلی واقع در قسمت شرق و جنوب شرق را نشان می‌دهد و دسته C نشان‌دهنده آب‌هایی با منشأ سازندهای تبخیری می‌باشد. نمونه‌های واقع در شمال غرب و غرب منطقه در دسته D قرار گرفتند که حاکی از تأثیر پهنه‌های نمکی پایین دست جریان و تبخیر بیش از اندازه می‌باشد. با توجه به اینکه آب‌های زیرزمینی قسمت غربی دشت در عمق ۱ تا ۴

حقیقت تحلیل عاملی اطلاعات یک ماتریس از داده با n متغیر را خلاصه می‌کند، برای این منظور تعدادی عامل جدید را شناسایی می‌کند، تعداد عامل‌ها از تعداد متغیرها کم‌تر است. این عامل‌ها در حقیقت بیان‌کننده متغیرهای اصلی است که اطلاعات کمی را از دست داده‌اند [۱۸]. همبستگی هر متغیر با هر عامل بار عاملی^۱ نامیده می‌شود [۱۲]. در بررسی‌های هیدروژئوشیمیایی نتایج آنالیزهای شیمیایی آب و داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی صحرائی که تحت فرآیندهای فیزیک و شیمیایی موجود در سفره آبدار تغییر می‌کنند به‌عنوان متغیرهای مشاهده‌ای در نظر گرفته شده‌اند [۱۲]. عامل‌ها در واقع سازوکارهای مؤثر بر روی ترکیب آب زیرزمینی را نشان می‌دهند [۱۰]. تفسیر و تعیین منشأ هر یک از این عامل‌ها بر اساس بارهای عاملی، شرایط هیدروژئولوژیکی، زمین‌شناختی و فرآیندهای هیدروشیمیایی صورت می‌گیرد.

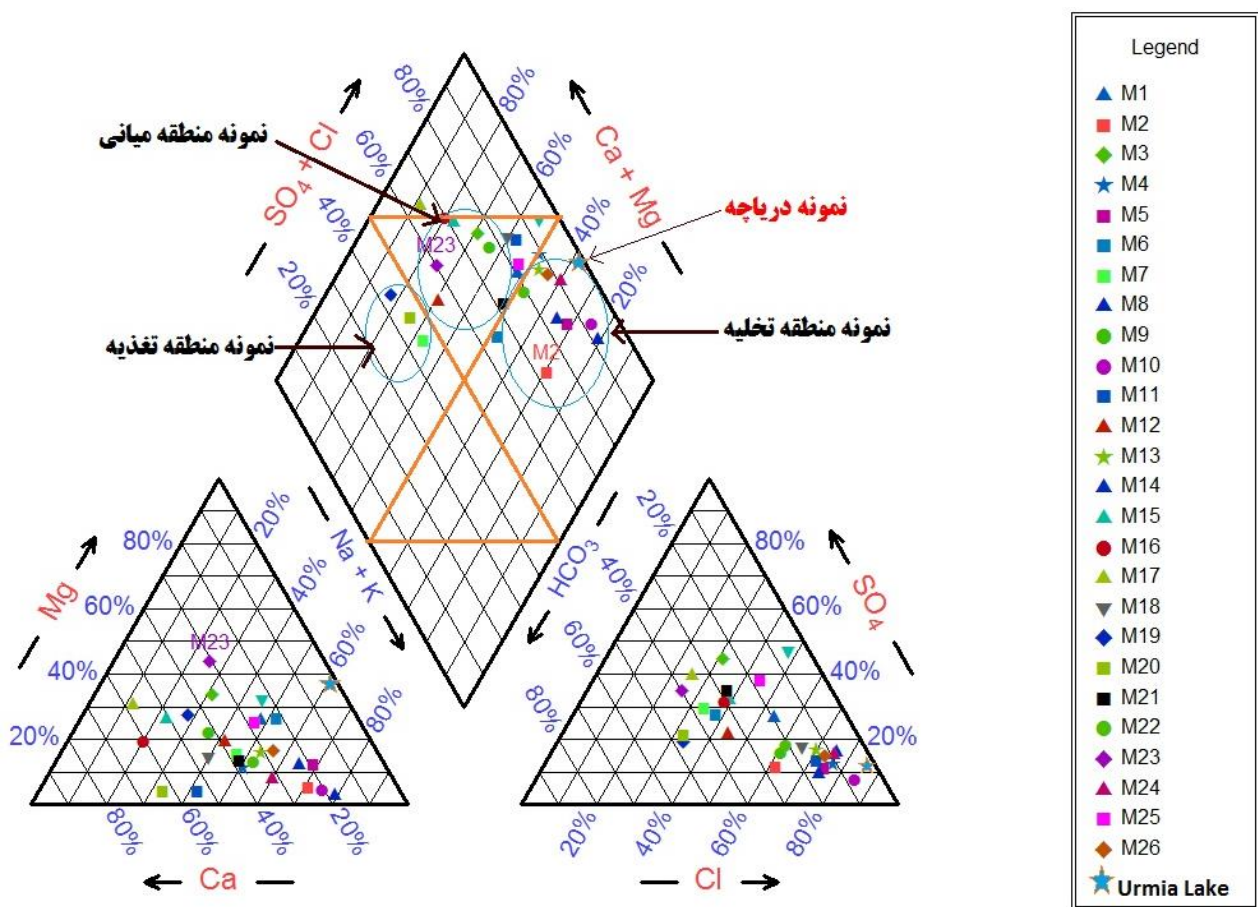
۳. نتایج و بحث

۳.۱. مطالعات هیدروژئوشیمیایی

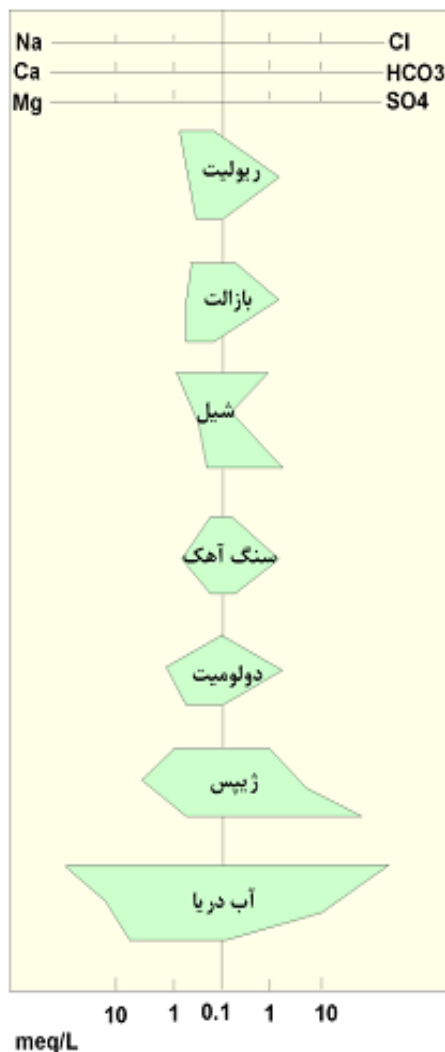
مطالعات هیدروژئوشیمیایی آبخوان‌ها می‌تواند اطلاعات مفیدی را در رابطه با تأثیر مواد تشکیل‌دهنده آبخوان و منطقه، مسیر جریان آب، تأثیر سنگ کف، نواحی تغذیه و تخلیه، نواحی تبخیر از آب زیرزمینی و تأثیر آب‌های سطحی بر آب زیرزمینی و کیفیت آب زیرزمینی از نظر شرب، کشاورزی و صنعت در اختیار دهد. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی نمونه‌های آب برداشت‌شده از دشت ملکان و مقایسه آن با ترکیب شیمیایی آب دریاچه ارومیه نشان داد که بیشترین میزان کاتیون‌ها در آب زیرزمینی و آب دریاچه به ترتیب متعلق به Ca^{++} و Na^+ می‌باشد که اولی مشخصه آب‌های شیرین قاره‌ای و دومی مشخصه بارز آب

Na^+/Cl^- متعلق به شمال غرب و غرب آبخوان می‌باشد که به علت ترکیب آب شور نزدیک به ترکیب آب دریاچه، میزان کلراید آن بسیار بیشتر از سدیم می‌باشد. یک از مشخصه‌های بارز نفوذ آب شور به آبخوان ساحلی نسبت Ca^{++} / Mg^{++} است که با غنی‌شدگی Ca^{++} نسبت به غلظتش در آب دریا مشخص است. نسبت‌های بزرگ‌تر از ۱ مشخصه بارز آب قاره‌ای هستند و هرچه به آب شور نزدیک می‌شوند این نسبت کوچک‌تر می‌شود. چنانکه مشاهده می‌شود این نسبت در آب دریاچه ارومیه به ۰/۰۱ می‌رسد. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد نمونه‌های واقع در غرب و شمال غرب منطقه مانند نمونه‌های روستاهای چقلو و قیچاق (شکل ۵ ب) از نسبت کمتر برخوردار هستند که نشان‌دهنده نزدیکی به دریاچه ارومیه و وجود شورزارها می‌باشد.

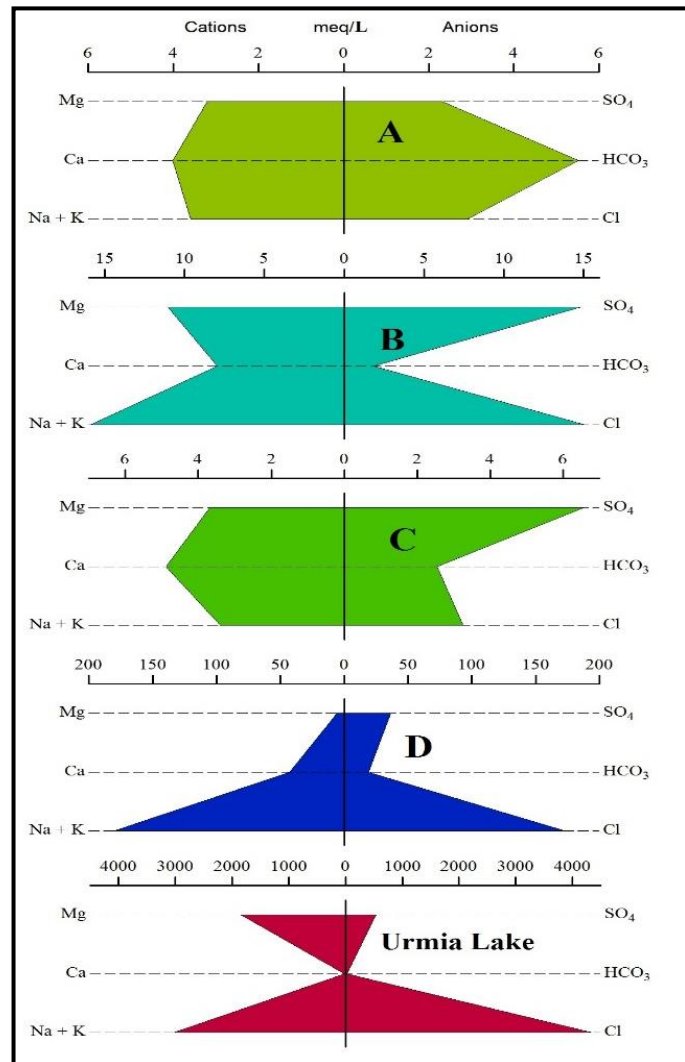
متری وجود دارد، افزایش شدید شوری در اثر وجود سازندهای ریزدانه با نفوذپذیری بسیار کمتر که باعث می‌شود آب در اثر نیروی کاپیلاری بالا بیاید و در عمق کم واقع شود و در نهایت عمق کم آب زیرزمینی باعث تبخیر شدید و افزایش شوری آب زیرزمینی می‌شود. جدول شماره ۴ نسبت‌های ژئوشیمیایی را که یکی از راه‌های پایش نفوذ آب شور دریا می‌باشد، برای ۲۷ نمونه آب زیرزمینی آبخوان دشت ملکان را نشان می‌دهد. نسبت Na^+/Cl^- در نفوذ آب شور معمولاً کمتر از مقادیر دریاست (یعنی نسبت مولار < 0.86). از سویی دیگر نسبت بالای ۱ عموماً مشخصه فعالیت‌های انسان‌زاد نظیر فاضلاب شهری است؛ بنابراین نسبت‌های پایین Na^+/Cl^- ترکیب‌شده با دیگر پارامترهای ژئوشیمیایی می‌تواند نفوذ آب شور، حتی در مقادیر غلظت پایین کلراید در مراحل اولیه شور شدن را بازگو کند [۲]. کمترین میزان نسبت



شکل ۸. نمودار پایپر نمونه‌های برداشت‌شده از منطقه مطالعاتی و دریاچه ارومیه



ب



الف

شکل ۹. الف) دیاگرام‌های استیف برای داده‌های مربوط دشت ملکان و دریاچه ارومیه، ب) دیاگرام‌های تیپ ارائه شده توسط هانسلو (۱۹۹۵).

می‌دهد، مقادیر این نسبت برای آب‌های منطقه بین $0/98 - 0/17$ متغیر بوده و مقدار آن برای آب شور دریاچه در حدود $0/12$ می‌باشد که با توجه به این مقادیر، نمونه آب‌های واقع در غرب و شمال غرب دارای مقدار پایین‌تری از این نسبت می‌باشند که نشان‌دهنده ترکیب مشابهی با ترکیب آب دریاچه می‌باشد.

با توجه به این آب که میزان و شدت آلودگی در آب‌های منطقه تا حدودی متفاوت می‌باشد. بنابراین از نسبت $Cl/HCO_3 + CO_3$ برای ارزیابی نفوذ آب شور و نیز طبقه‌بندی شدت آلودگی استفاده شد که بر این اساس برای مقادیر کمتر از $0/5 >$ این نسبت مولی تأثیر نداشتن آب شور، برای مقادیر $0/5 - 6/6$ تأثیر کم تا متوسط آب شور و برای مقادیر بالاتر از $6/6$ تأثیر شدید آب شور بیان می‌شود. همچنین مقایسه نسبت مولی SO_4 / Cl نشان

جدول ۴. نسبت‌های ژئوشیمیایی نفوذ آب شور برای نمونه‌های منطقه مطالعاتی

| مکان نمونه‌برداری | Na/Cl | Ca/mg | Cl/Hco3+co3 | So ₄ /Cl |
|--------------------|-------|-------|-------------|---------------------|
| امیر غایب | ۰/۹۸ | ۱/۰۱ | ۷ | ۰/۴۸ |
| چپقلو | ۰/۴۴ | ۰/۸۹ | ۲/۳۰ | ۰/۱۷۷ |
| مبارک‌آباد | ۰/۶۱ | ۱/۱۱ | ۶/۹۵ | ۰/۱۶۲ |
| دوچی | ۰/۸۷ | ۱/۰۸ | ۵/۲۱ | ۰/۱۴ |
| ساتلمش | ۱/۴۳ | ۴/۸۴ | ۰/۹۶ | ۰/۷۱۷ |
| قره چال یوزباشکندی | ۱/۳۹ | ۲/۴۹ | ۰/۹۲ | ۰/۸۶۴ |
| قیچاق | ۰/۳۲ | ۰/۴۱ | ۸/۹۹ | ۰/۲۰۹ |
| حسین آباد | ۰/۷۰ | ۱/۹۲ | ۱/۰۱ | ۰/۵۲ |
| اوزون اوبا | ۰/۸۵ | ۰/۸۷ | ۳/۱ | ۰/۴۲ |
| شعبانلو | ۰/۶۰ | ۱/۰۱ | ۴/۷۸ | ۰/۱۸ |
| حسن آباد لیلان | ۰/۹۱ | ۲/۰۵ | ۰/۲۳ | ۰/۹۱ |
| قندهار | ۰/۹۳ | ۲/۰ | ۰/۵۷ | ۰/۶۳ |
| ممدیل | ۰/۸۵ | ۱/۸۸ | ۰/۷۵ | ۰/۵۴ |
| قوریجان | ۲/۵۴ | ۱/۹۷ | ۰/۴۱ | ۰/۸۰۸ |
| میدانجلوق | ۱/۴۸ | ۳/۱۸ | ۰/۳۴ | ۰/۸۰۷ |
| ملکان | ۰/۹۹ | ۱/۹۲ | ۰/۷۳ | ۰/۹۲ |
| آروق | ۰/۹۶ | ۳/۱۷ | ۰/۸۷ | ۰/۶۱ |
| بایقوت | ۰/۸۸ | ۱/۶۳ | ۰/۷۰ | ۰/۵۶ |
| سرمو | ۱/۱۲ | ۱۶/۵۱ | ۰/۷۰ | ۰/۶۴ |
| شیلو | ۱/۱۹ | ۲/۹۲ | ۰/۵۴ | ۰/۹۳ |
| لک لر | ۰/۸۳ | ۲/۷۴ | ۱/۱۰ | ۰/۳۴ |
| ملا سراب | ۰/۸۸ | ۳/۷۱ | ۰/۶۴ | ۰/۹۸ |
| مهماندار | ۰/۸۳ | ۴/۲۵ | ۸/۰۵ | ۰/۳۲ |
| دمیرچی | ۲/۹۶ | ۱/۱۴ | ۰/۷۹ | ۰/۸۵ |
| تپه اسماعیل آباد | ۱/۳۶ | ۱/۶۸ | ۱/۰۱ | ۰/۴۳ |
| حاجی بهزاد | ۱/۳۶ | ۰/۷۲ | ۰/۸۸ | ۰/۹۸ |
| دریاچه ارومیه | ۰/۶۸ | ۰/۰۱ | ۲۰۳ | ۰/۱۲ |

۲.۳. بررسی منشأ شوری آب زیرزمینی

منطقه ملکان در سالیان اخیر با مشکل تنزل کیفی آب زیرزمینی مواجه می‌باشد و به سبب قرار گرفتن در قسمت جنوب شرق دریاچه ارومیه، تصورهای قبلی بر این باور است که شوری آب زیرزمینی این منطقه در اثر نفوذ آب شور دریاچه می‌باشد. در این منطقه شوری آب‌های زیرزمینی در مسیر جریان به واسطه واکنش‌های شیمیایی با مواد سفره، زمان توقف و اختلاط آب‌های مختلف افزایش می‌یابد و آب‌های زیرزمینی در مناطق تخلیه کیفیتی پایین‌تر از آب

زیرزمینی در مناطق تغذیه دارند که این امر به علت واکنش‌های بین آب-سنگ و امکان اختلاط با آب شور در طی مسیر جریان می‌باشد [۱۶]. طبق اصل چیبوتارو در جهت جریان آب زیرزمینی یون کلرید افزایش می‌یابد به همین دلیل در خروجی‌های دشت افزایش یون کلرید تا حدی متعارف می‌باشد؛ اما در میزان شوری زیاد، همبستگی بالایی بین مقدار یون کلرید با مقدار هدایت الکتریکی مشاهده می‌شود و جزء اصلی‌ترین عامل افزایش هدایت الکتریکی در منطقه می‌باشد که می‌تواند نفوذ آب شور را بیان کند اما به

دانه‌ریز می‌باشد، در نتیجه وقتی جریان‌های زیرزمینی با چنین رسوباتی برخورد می‌کنند حرکت آن‌ها کند و سطح آب زیرزمینی نزدیک به سطح زمین می‌گردد. علاوه بر این جریان‌های سطحی نیز در این مناطق پخش می‌شود. در نتیجه تبخیر این آب‌ها باعث به وجود آمدن نمک‌زارهایی می‌شود و جریان تدریجی این آب‌ها به طرف بالادست حوضه باعث شوری آبخوان‌ها می‌شود.

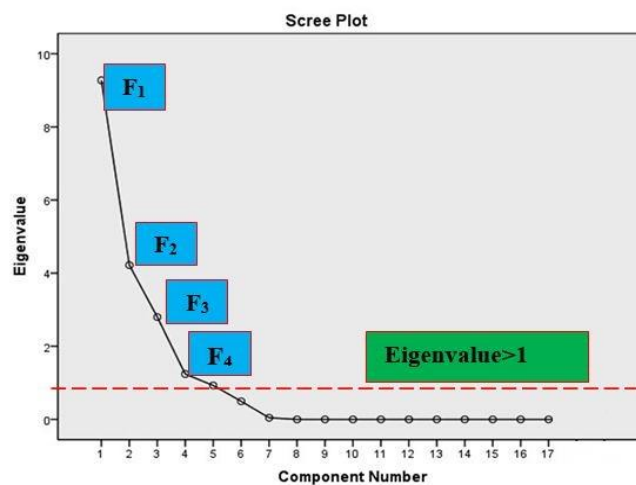
۳.۳. تحلیل عاملی

در مطالعه هیدروژئوشیمی دشت ملکان از روش تحلیل عاملی برای شناخت عوامل و میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر روی ترکیب آب زیرزمینی استفاده شده است. متغیرهای مشاهده‌ای بکار برده شده در مطالعات هیدروژئوشیمی شامل نتایج آنالیزهای شیمیایی آب می‌باشد. تحلیل عاملی دارای سه مرحله‌ی تهیه ماتریکس همبستگی از تمام متغیرها، استخراج عامل‌ها و تفسیر نتایج می‌باشد [۹]. اساس ماتریکس همبستگی، ضریب همبستگی پیرسون می‌باشد. در مرحله بعد عوامل را از میان پارامترها پیدا کرده، از میان عوامل حاصله اولین فاکتور بیشترین واریانس را شامل می‌شود و به ترتیب عوامل بعدی مقادیر کمتری از واریانس را نشان می‌دهند. ضرایب بالای (۱ تا -۱) پارامترهای به دست آمده (مثبت یا منفی) که تشکیل‌دهنده هر یک از عوامل هستند نشان‌دهنده تأثیر بالای آن متغیر (مثبت یا منفی) می‌باشد. همچنین می‌توان از چرخش عامل‌ها برای تفسیر ساده‌تر عوامل مؤثر ماتریس عامل‌های حاصله استفاده کرد که به این وسیله ماتریس عامل‌ها به یک ساختار ساده اورتوگنال تبدیل می‌شوند. در این روش از چرخش عامل‌ها به روش واریمکس استفاده شده است. جهت بررسی دقیق متغیرها، برای انتخاب عوامل مؤثر بر سیستم، مقادیر ویژه، درصد واریانس و واریانس تجمعی محاسبه شد و استخراج مقادیر ویژه حاصل از ماتریس ترانهاده داده‌های استاندارد شده، منجر به استخراج عامل-

دلیل فاصله بیش از ۱۵ کیلومتر دریاچه ارومیه با مکان‌های مورد مطالعه و وجود سازندهای رسی با نفوذپذیری بسیار کم که در قسمت‌های خروجی دشت قرار دارند و نفوذپذیری آن‌ها در حدود 10^{-4} m/day می‌باشد، امکان اینکه شوری دشت ملکان فقط در اثر نفوذ آب شور دریاچه ارومیه باشد، وجود ندارد؛ زیرا با وجود حدود ۱۵ کیلومتر سازند رسی هزاران سال طول می‌کشد تا آب شور دریاچه به آبخوان دشت ملکان برسد. با توجه به اینکه آب‌های زیرزمینی قسمت غربی دشت در عمق ۱ تا ۴ متری وجود دارد، افزایش شدید شوری در اثر وجود سازندهای ریزدانه با نفوذپذیری بسیار کمتر که باعث می‌شود که آب در اثر نیروی کاپیلاری بالا بیاید و در عمق کم واقع شود و در نهایت عمق کم آب زیرزمینی باعث تبخیر شدید و افزایش شوری آب زیرزمینی می‌شود و با برداشت آب جریان آب زیرزمینی به سمت بالادست آبخوان برقرار می‌شود و در نتیجه برقراری این جریان، شوری به قسمت‌های بالادست آبخوان نیز توسعه پیدا می‌کند. در مکان‌هایی که نسبت‌های هیدروشیمیایی و دیاگرام‌های پایپر و استیف شباهتی را با نمونه آب دریاچه نشان می‌دهند و نفوذ آب شور را تداعی می‌کنند، این‌گونه بیان می‌گردد، با توجه به مقطع ژئوفیزیکی و وجود لجن‌های شور باقیمانده از دریاچه قدیم در زیر آبرفت‌ها و سازندهای دارای نمک، بر اثر برداشت زیاد از آبخوان‌ها و پائین رفتن سطح آب زیرزمینی بالا آمدن آب شور در قسمت‌های زیرین لایه‌های رسی اتفاق می‌افتد. در قسمت‌های دیگر دشت با توجه به کشاورزی زیاد در فصول تابستان و بهار، میزان شوری در اثر بازگشت جریان آب کشاورزی در فصل آبیاری بالا در مناطق مرکزی دشت افزایش را نشان می‌دهد، ولی در فصول آبیاری پایین میزان هدایت الکتریکی تغییر چندانی ندارد و وابسته به تعامل آب-سنگ سازندهای زمین‌شناسی که از کانی‌های گچی و نمکی برخوردارند می‌باشد. همچنین علت دیگر بر منشأ شوری فزاینده در آبخوان‌های دشت‌های اطراف دریاچه، این است که در انتهای دشت‌ها شیب بسیار کم و رسوبات فوق‌العاده

بیشترین واریانس را شامل می‌شوند، انتخاب می‌گردند. نتایج حاصل از کاربرد تحلیل مؤلفه اصلی در جدول‌های ۶ و ۷ به ترتیب ماتریس عامل‌ها و ماتریس عامل‌ها بعد از چرخش واریمکس نشان داده شده است. جهت به دست آوردن مجموعه عناصری که در هر مؤلفه جای می‌گیرند، باید در هر ستون، عناصری را که بار عاملی آن‌ها بالاست (معمولاً بیش از ۰/۶)، انتخاب نموده و در یک گروه طبقه‌بندی نمود.

های اصلی گردید. طبق شکل ۷ چهار عامل مؤثر که مقادیر ویژه بیشتر از یک دارند به‌عنوان عوامل اصلی شناسایی شده‌اند که ۹۲/۳۷ درصد از تغییرات واریانس کل را شامل می‌شود و برای تفسیرهای بعدی به‌کاربرده می‌شوند. جدول ۵ مقادیر ویژه، درصد واریانس و واریانس تجمعی را نشان می‌دهد. درصد واریانس هر یک از پارامترها نشان از اهمیت آن پارامتر در هیدروشمی منطقه دارد؛ بنابراین از این میان، چهار عامل اول که



شکل ۱۰. نمودار عامل‌های استخراجی همراه با مقادیر ویژه آن‌ها

جدول ۵. عامل‌های استخراجی و مقادیر واریانس آن‌ها

| متغیر | Initial Eigenvalues | | | Extraction Sums of Squared Loadings | | | Rotation Sums of Squared Loadings | | |
|-------|--------------------------|--------------------------|-------------|-------------------------------------|---------------|-------------|-----------------------------------|---------------|-------------|
| | Total | % of Variance | Cumulative% | Total | % of Variance | %Cumulative | Total | % of Variance | Cumulative% |
| ۱ | ۹/۲۷۵ | ۴۸/۸۱۴ | ۴۸/۸۱۴ | ۹/۲۷۵ | ۴۸/۸۱۴ | ۴۸/۸۱۴ | ۸/۰۴۹ | ۴۲/۳۶۱ | ۴۲/۳۶۱ |
| ۲ | ۴/۲۱۹ | ۲۲/۲۰۵ | ۷۱/۰۱۹ | ۴/۲۱۹ | ۲۲/۲۰۵ | ۷۱/۰۱۹ | ۵/۲۲۵ | ۲۷/۵۰۲ | ۶۹/۸۶۴ |
| ۳ | ۲/۷۹۹ | ۱۴/۷۳۱ | ۸۵/۷۵۰ | ۲/۷۹۹ | ۱۴/۷۳۱ | ۸۵/۷۵۰ | ۲/۶۰۳ | ۱۳/۷۰ | ۸۳/۵۶۴ |
| ۴ | ۱/۲۴۰ | ۶/۵۲۶ | ۹۲/۲۷۷ | ۱/۲۴۰ | ۶/۵۲۶ | ۹۲/۲۷۷ | ۱/۶۵۵ | ۸/۷۱۳ | ۹۲/۲۷۷ |
| ۵ | ۰/۹۲۸ | ۴/۸۸۵ | ۹۷/۱۶۱ | | | | | | |
| ۶ | ۰/۴۹۵ | ۲/۶۰۷ | ۹۹/۷۶۸ | | | | | | |
| ۷ | ۰/۰۴۴ | ۰/۲۳۲ | ۱۰۰ | | | | | | |
| ۸ | $۴/۰۴۷ \times 10^{-16}$ | $۲/۱۳ \times 10^{-15}$ | ۱۰۰ | | | | | | |
| ۹ | $۳/۲۵۳ \times 10^{-16}$ | $۱/۷۱۲ \times 10^{-15}$ | ۱۰۰ | | | | | | |
| ۱۰ | $۲/۲۰۵ \times 10^{-16}$ | $۱/۱۶۱ \times 10^{-15}$ | ۱۰۰ | | | | | | |
| ۱۱ | $۱/۹۸۹ \times 10^{-16}$ | $۱/۰۴۷ \times 10^{-15}$ | ۱۰۰ | | | | | | |
| ۱۲ | $۳/۰۴۴ \times 10^{-17}$ | $۱/۶۰۲ \times 10^{-16}$ | ۱۰۰ | | | | | | |
| ۱۳ | $-۶/۳۹۳ \times 10^{-17}$ | $-۳/۳۶۵ \times 10^{-16}$ | ۱۰۰ | | | | | | |
| ۱۴ | $-۳/۳۶۴ \times 10^{-16}$ | $-۱/۷۷۱ \times 10^{-15}$ | ۱۰۰ | | | | | | |
| ۱۵ | $-۴/۱۶۴ \times 10^{-16}$ | $-۲/۱۹۱ \times 10^{-15}$ | ۱۰۰ | | | | | | |
| ۱۶ | $-۶/۶۰۹ \times 10^{-16}$ | $-۳/۴۷۸ \times 10^{-15}$ | ۱۰۰ | | | | | | |
| ۱۷ | $-۷/۳۱۷ \times 10^{-16}$ | $-۳/۸۵۱ \times 10^{-15}$ | ۱۰۰ | | | | | | |

جدول ۶. ماتریس عوامل

| متغیر | فاکتور ۱ | فاکتور ۲ | فاکتور ۳ | فاکتور ۴ |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| EC | ۰/۹۱۵ | ۰/۳۷۷ | ۰/۱۰۲ | -۰/۵۷ |
| PH | -۰/۰۵۹ | -۰/۵۳۲ | -۰/۳۰۱ | ۰/۳۸۱ |
| Ca | ۰/۹۲۴ | ۰/۳۵۶ | -۰/۱۳ | -۰/۰۴۶ |
| Mg | ۰/۱۵۳ | ۰/۸۷۶ | ۰/۵۸۳ | -۰/۰۱۶ |
| Na | ۰/۹۸۳ | ۰/۰۶۶ | ۰/۰۰۳ | -۰/۱۰۷ |
| K | ۰/۹۷۶ | ۰/۰۷۱ | -۰/۰۹۵ | -۰/۱۴۹ |
| HCO3 | -۰/۴۶ | -۰/۰۵۴ | -۰/۱۳۸ | -۰/۵۳۶ |
| Cl | ۰/۹۰۱ | ۰/۴۲ | -۰/۰۴ | -۰/۹۴ |
| SO4 | -۰/۰۷ | ۰/۳۱ | ۰/۸۹۴ | ۰/۲۴ |
| NO3 | -۰/۲۳۲ | -۰/۱۹۸ | ۰/۸۹۳ | ۰/۲۷۴ |
| F | -۰/۰۱۸ | -۰/۲۶۱ | ۰/۳۱۱ | ۰/۸۸۴ |
| SiO2 | -۰/۰۵۱ | ۰/۵۸۳ | -۰/۰۷۸ | -۰/۰۱۰۴ |
| Mn | ۰/۳۲۳ | ۰/۹۲ | -۰/۰۱۵ | ۰/۳۰۸ |
| Cr | ۰/۹۶۳ | -۰/۰۲۵ | -۰/۲۰۲ | -۰/۱۰۹ |
| Al | ۰/۱۰۲ | ۰/۹۴۵ | ۰/۰۴۴ | -۰/۰۴۳ |
| Fe | ۰/۱۷۸ | ۰/۹۴۱ | -۰/۰۸ | -۰/۰۷ |
| As | -۰/۵۴۴ | ۰/۳۷۶ | -۰/۵۸۵ | ۰/۲۵۱ |

جدول ۷. ماتریس عوامل بعد از چرخش عامل‌ها

| متغیر | فاکتور ۱ | فاکتور ۲ | فاکتور ۳ | فاکتور ۴ |
|-------|----------|----------|----------|----------|
| EC | ۰/۹۸۶ | -۰/۰۶۳ | ۰/۱۲۷ | ۰/۰۵۰ |
| PH | -۰/۸۲۲ | -۰/۲۲۲ | -۰/۱۲۶ | ۰/۳۵۶ |
| Ca | ۰/۹۷۸ | -۰/۱۲۱ | -۰/۰۷۷ | ۰/۱۵۱ |
| Mg | ۰/۵۰۴ | ۰/۷۱۴ | ۰/۴۳۴ | -۰/۱۷۷ |
| Na | ۰/۹۱۰ | -۰/۳۸۶ | ۰/۰۶۸ | ۰/۰۳۶ |
| K | ۰/۹۱۰ | -۰/۳۹۷ | -۰/۰۳۸ | -۰/۰۳۵ |
| HCO3 | ۰/۴۶۰ | -۰/۳۱۸ | -۰/۲۷۶ | -۰/۴۰۱ |
| Cl | ۰/۹۹۷ | -۰/۰۳۲ | ۰/۰۴۹ | ۰/۰۴۱ |
| SO4 | ۰/۰۵۹ | ۰/۴۶۳ | ۰/۸۵۲ | -۰/۱۲۰ |
| NO3 | -۰/۳۱۹ | ۰/۰۹۱ | ۰/۹۱۵ | -۰/۱۳۷ |
| F | -۰/۲۲۸ | -۰/۱۱۸ | ۰/۶۵۴ | ۰/۶۷۴ |
| SiO2 | ۰/۳۵۷ | ۰/۷۵۱ | -۰/۲۳۳ | -۰/۰۲۵ |
| Mn | ۰/۶۹۶ | ۰/۶۶۵ | -۰/۰۸۸ | ۰/۱۳۳ |
| Cr | ۰/۸۴۷ | -۰/۴۹۰ | -۰/۱۰۹ | ۰/۱۰۵ |
| Al | ۰/۵۲۶ | ۰/۷۸۹ | -۰/۰۹۴ | ۰/۰۰۹ |
| Fe | ۰/۵۹۵ | ۰/۷۲۹ | -۰/۲۱۱ | ۰/۰۳۲ |
| As | -۰/۳۵۸ | ۰/۴۲۹ | -۰/۵۵۱ | ۰/۴۰۲ |

۴. نتیجه گیری

کاهش بارندگی و برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در حاشیه دریاچه ارومیه به خصوص در منطقه ملکان باعث افت آب سطح آب، کاهش منابع آبدهی، پیشروی آب شور به داخل آبخوان‌ها و آلودگی چاه‌های بهره‌برداری قسمت‌های غربی و شمال غربی این منطقه شده است. در مطالعه حاضر با استفاده از روش‌های ژئوشیمیایی، منشأ شوری و نفوذ آب شور دریاچه ارومیه به آبخوان مورد بررسی قرار گرفت. بررسی آنالیز شیمیایی نمونه‌های گردآوری شده از آب زیرزمینی آبخوان دشت ملکان نشان می‌دهد که تیپ آب‌های منطقه به‌طور عمده کربناته‌کلسیک و کلروکلسیک می‌باشد و هرچه به نوار ساحلی نزدیک‌تر می‌شویم تیپ آب در اثر پیشروی شوری کلرو سدیک می‌گردد. پایین بودن مقدار نسبت مولی Na^+/Cl^- و SO_4/Cl^- و همچنین بالا بودن نسبت مولی $Cl^-/HCO_3^- + CO_3^{2-}$ آب‌های قسمت غربی و شمال غربی منطقه، نشان می‌دهد که ترکیب این آب‌ها نزدیک به ترکیب آب دریاچه می‌باشد. نسبت‌های ژئوشیمیایی استفاده شده نشان می‌دهند که آبخوان دشت ملکان با نفوذ آب شور از آب محبوس در لایه‌های نمکی نیمه تراوای شمال غرب و غرب آبخوان می‌باشد. وجود لجن‌های شور باقیمانده از دریاچه قدیم در زیر آبرفت‌ها و سازندهای دارای نمک باعث می‌شوند که بر اثر برداشت زیاد از آبخوان‌ها و پائین رفتن سطح آب زیرزمینی بالا آمدن آب شور در قسمت‌های زیرین لایه‌های رسی اتفاق می‌افتد و جریان تدریجی این آب‌ها به طرف بالادست حوضه باعث شوری آبخوان می‌شود.

مدل عاملی به‌کاررفته برای ۴ عامل و ۱۷ متغیر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحلیل عاملی نشان‌دهنده آن است که این عامل‌ها حدود ۹۲/۲۷٪ از کل میزان اشتراک را در بر دارند. به‌طوری‌که از این مقدار ۴۲/۳۶٪ به‌وسیله عامل یک، ۲۷/۵٪ توسط عامل دو، ۱۳/۷٪ توسط عامل سه و ۸/۷٪ به‌وسیله عامل چهار تبیین می‌شود (جدول ۵). در عامل یک ارتباط قوی میان یون‌های کلسیم، سدیم، پتاسیم، کلر و هدایت الکتریکی نشان‌دهنده فرآیندهای شیمیایی انحلال نمک، پدیده بالآمدگی آب شور در نتیجه برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی نسبت داد، زیرا یون کلر و سدیم دارای بار عاملی زیادی هستند. عامل دوم با توجه به ارتباط مابین یون‌های آلومینیم، منگنز، منیزیم و آهن می‌تواند به هوازدگی شیمیایی و فرسایش سنگ‌های مافیک و الترامافیک (گابرو، آنورتوزیت و ورلیت حاوی کانی‌های پلاژیوکلاز و فرومنیزین‌دار الیوین، هورنبلند و پیروکسن) منطقه نسبت داده شود. پارامترهای عامل سوم نشان‌دهنده تأثیر فاضلاب‌های خانگی، فعالیت‌های کشاورزی و استفاده از کودهای شیمیایی نترات دار می‌باشد. عامل چهارم را نیز می‌توان نتیجه هوازدگی شیمیایی آمفیبولیت‌ها (حاوی کانی آمفیبول) و گابروها (حاوی کانی آمفیبول) در منطقه دانست. پارامترهای فاکتور اول، دوم، چهارم با توجه به منشأ این پارامترها، نشان‌دهنده روند کلی (یا طبیعی) آب زیرزمینی و تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر آن می‌باشند که به این فاکتورها زمین‌زاد^۱ گفته می‌شود. پارامترهای مؤثر در فاکتور سوم نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی و یا کشاورزی می‌باشد که فاکتور انسان‌زاد^۲ گفته می‌شود.

1 Geogenic

2 Anthropogenic

References

- [1] Appelo C.A.J. and Postma D. (1999). *Geochemistry groundwater and pollution*. Balkema, Rotterdam.
- [2] Bear, J. and Cheng, A. H. D. (2010). *Modeling groundwater flow and contaminant transport*, Springer.
- [3] Costodio, Ch. and Broggeman, G.A. (1987). Ground water problem in coastal Aquifer, UNESCO.
- [4] Domenico, P.A. and Schwartz, F.W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley & Sons, New York.
- [5] Dongmei, H., Claus, K., Xianfang, S., Guoqiang, X. and Jilong, Y. (2011). Geochemical and isotopic evidence for paleo-seawater intrusion into the south coast aquifer of Laizhou bay, China. *Applied Geochemistry*.
- [6] Emberger, L. (1952). Sur le quotient pluviothermique. *C.R. Sciences*, 234, 2508-2511.
- [7] Garing, C., Luquot, L., Pezard, P. A. and Gouze, P. (2013). Geochemical investigations of saltwater intrusion into the coastal carbonate aquifer of Mallorca, Spain. *Applied Geochemistry*, 14, 1221-1243.
- [8] Gopinath, S. and Srinivasamoorthy, K. (2015). Application of geophysical and hydro geochemical tracers to investigate salinization sources in Nagapatinam and Karaikal coastal aquifers, South India. *International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE)*.
- [9] Guler, C., McCray, J.E., Thyne, G.D. and Turner, A.K. (2002). Evaluation of Graphical and Multivariate Statistical Methods for Classification of Water Chemistry Data, *Journal of Hydrogeology*, 121, 2131-2145.
- [10] Gurunadha, V.V.S., Dhar, R.L. and Subrahmanyam, K. (2001). Assessment of Contaminant Migration in Groundwater from an Industrial Development Area, Medak District, Andhra Pradesh, India, *Water, Air and Soil Pollution*, 128, 369-389p.
- [11] Han, D. M., Song, X. F., Currell, M., Yang, J. L. and Xiao, G. Q. (2014). Chemical and isotopic constraints on evolution of groundwater salinization in the coastal plain aquifer of Laizhou bay, China, *Journal of Hydrology*, 123, 1897-2012.
- [12] Ho, C. (2001). Effect of land use and Urbanization on Hydrochemistry and Contamination of Groundwater from Taejon Area, Korea, *Journal of hydrology*, Vol. 253:149-210p.
- [13] Hounslow, A.W. (1995). *Water quality data analysis and interpretation*, Lewis publishers, CKC press, LLC.
- [14] Jian, Z. (1999). Hydrochemical indexes of seawater intrusion and comprehensive judgment on intrusive degree. *Chinese Geographical Science*, 9, 151-158.
- [15] Jones, B. F., Vengosh, A., Rosenthal, E. and Yechieli, Y. (1999). Geochemical investigations. Chapter 3. In: *Seawater intrusion into coastal aquifers concepts, methods and practices*, Kluwer.
- [16] Richter, B.C., Kreitler, C.W. and Bledsoe, B.E. (1993). *Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization*. CRC, New York.
- [17] Regional water organization of East Azerbaijan state. (2006). *Report of Groundwater studies for Malekan plain* (48p).
- [18] Stossel, R.K. (1997). Delineating the Chemical Composition of the Salinity Source for Saline Groundwater: An Example from East-Central Canadian Parish, Luisiana. *Ground water*, 35(3), 409-417p.
- [19] Suk, H. and Lee, K. (1999). Characterization of Groundwater Hydrochemical System through Multivariate Analysis: Clustering into Groundwater Zones, *Journal of Groundwater*, 37, 358-367.
- [21] Suma, C. S., Srinivasamoorthy, K., Saravanan, K., Faizalkhan, A., Prakash, R. and Gopinath, S. (2015). Geochemical modeling of groundwater in Chinnar River Basin: A source identification perspective. *International Conference on Water Resources, Coastal and Ocean Engineering (ICWRCOE)*.
- [21] Tillman, F. D., Oki, D. S., Johnson, A. G., Barber, L. B. and Beisner, K. R. (2014). Investigation of geochemical indicators to evaluate the connection between inland and coastal groundwater systems near Kaloko-Honokohau national historical park, Hawaii, *Applied Geochemistry*, 43, 456-469.
- [22] Todd, D.K. and Mays. (2005). *Groundwater hydrology*. Third Edition. John Wiley and Sons.

- [23] Norouzi, H., Asghari Mogaddam, A. and Nadiri, A.A. (2015). Determining vulnerable areas of Malikan Plain Aquifer for Nitrate, Using Random Forest method. *Journal of Environmental Studies*, 41(4), 923-94.
- [24] Annapoorna, H., Janardhana, M., R. (2015). Assessment of groundwater quality for drinking purpose in rural areas surrounding a defunct copper mine, *Aquatic Procedia*, 4, 685-692.
- [25] Gorgij, A., Moghaddam, A. (2016). Feasibility Study for Hydraulic Connection in Azarshahr Plain Coastal Aquifer and Urmia Lake, by Geochemical Ratios and Inverse Modeling, *Journal of environmental studies*, 42(1), 65-80.
- [26] Asghari, M.A., Fijani, E. and Nadiri, A. (2010). Groundwater Vulnerability Assessment Using GIS-Based DRASTIC Model in the Bazargan and Poldasht Plains, *Journal of Environmental Studies*, 35(4), 52-67.
- [27] Shahrabi, M., 1972. Description of Geological Map of Urmia, Geological Survey of Iran, 81 p.
- [28] Norouzi, H., Nadiri, A.A., Moghaddam, A.A. (2018). Identifying the Susceptible Area of Malikan Plain Aquifer to contamination using Fuzzy methodes, *Journal of environmental studies*. 44(2): 205-221. DOI: 10.22059/jes.2018.253576.1007616
- [29] Norouzi, H., Nadiri, A.A., Moghaddam, A.A., Gharekhani, M. 2018. Comparing Performans of Fuzzy Logic, Artificial Neural Network and Random Forest Models in Transmissivity Estimation of Malekan Plain Aquifer, *Journal of ecohydrology*. 5(3): 739-751. DOI: 10.22059/ije.2018.239914.707