



دوره ۳۵، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۳۷، زمستان ۱۴۰۱، صفحه‌های ۶۲-۴۷
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/WMRJ.2022.357963.1455

مقاله‌ی پژوهشی



پژوهش‌های آب‌نخرداری

ارزیابی دامنه‌ی نفوذ آب شور دریاچه‌ی مهارلو به آبخوان ساحلی با ویژگی‌های آب‌شیمیایی

وحیده شیخی

دستیار پژوهشی آزمایشگاه مرکزی، دانشگاه شیراز

کامران زارع

کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه شیراز

محمد زارع

(نویسنده‌ی مسئول)* استاد بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز

همراه: ۰۹۱۷۳۱۶۰۶۱۴

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: zarem@shirazu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳ اسفند ۱۴۰۰ تاریخ پذیرش: ۳۱ خرداد ۱۴۰۱

چکیده

مدیریت اندوخته‌های آب شیرین در سفره‌های ساحلی دریاچه‌های شور نیازمند درک پویایی سامانه‌ی جریان و تکامل زمین‌شیمیایی است. تکامل آب‌زمین‌شیمیایی شوری آب‌سفره‌های ساحلی در تأثیر پدیده‌های نفوذ آب شور دریاچه، یا ورود مستقیم آب شور به آن بسیار پیچیده است. هدف از این پژوهش بررسی دامنه‌ی نفوذ و ورود آب شور دریاچه‌ی مهارلو به سفره‌ی ساحلی آبخوان مهارلو با سنجش‌های آب‌شیمیایی، و بررسی تکامل آب‌شیمیایی آب‌های زیرزمینی آن است. اطلاعات افت‌وخیز سطح ایستابی و دگرگونی‌های (تغییرات) مکانی، ژرفایی و زمانی ترکیب شیمیایی و شوری آب زیرزمینی سفره، و روش‌های گوناگونی از جمله بررسی نقشه‌های سطح ایستابی و شوری، نمودار تکامل آب‌شیمیایی آب، نمودار استیف و نسبت یون کلرید به برومید به کار برده شد. برپایه‌ی نتیجه‌ی به‌دست‌آمده در دوره‌ی پژوهش (بهمن ۱۳۹۷ تا بهمن ۱۳۹۸) بلندی سطح ایستابی در منطقه‌ی وسیعی از آبخوان پایین‌تر از بلندی کف دریاچه است، که باعث شده است در شیب معکوس آبی، آب شور دریاچه مستقیماً وارد آبخوان شود. از این رو، علاوه بر پدیده‌ی معمول نفوذ آب شور به دلیل اختلاف چگالی و غلظت، شوری آبخوان به‌شدت از ورود مستقیم آب شور اثر می‌گیرد. آبخوان از نظر شوری و تأثیر آب دریاچه بر شوری آن به سه پهنه تقسیم شد: منطقه‌ی اول از حاشیه‌ی دریاچه تا فاصله‌ی بیشینه‌ی ۱۰۰۰ متر که کاملاً در تأثیر ورود آب شور دریاچه است، منطقه‌ی دوم (میانی) از ۱۰۰۰ متری تا حدود ۱۵۰۰ متر که در تأثیر هر دو پدیده‌ی نفوذ آب و ورود آب شور دریاچه است، و منطقه‌ی سوم از ۱۵۰۰ متر تا حدود ۲۲۰۰ متر در دامنه‌ی مرز کارستی جنوبی که منطقه‌ی تغذیه‌ی آبرفتی آبخوان است، و کیفیت آب آن برای کشاورزی بسیار مناسب است.

واژگان کلیدی: شیب غلظت، تکامل زمین‌شیمیایی، پیش‌روی آب شور

مقدمه

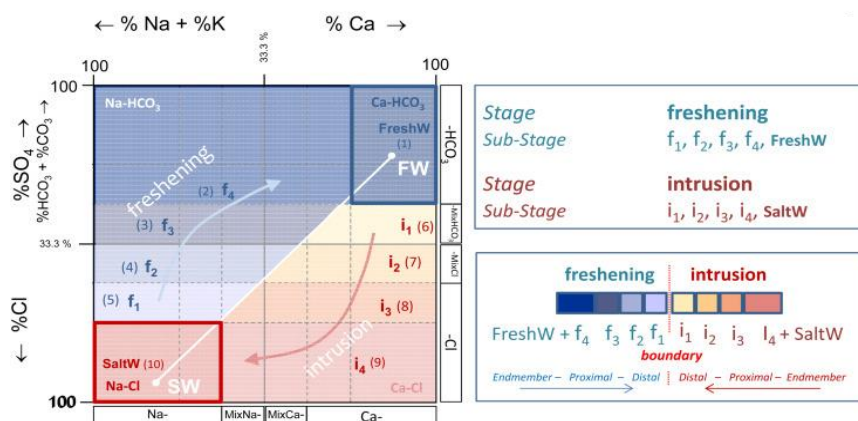
آبخوان‌های منطقه‌ی ساحلی دریاها و دریاچه‌ها اغلب مهم‌ترین منبع تأمین آب کشاورزی، آشامیدنی و صنعت است، و به‌طور معمول اندوخته‌های آب شیرین آن در برابر خطر تداخل و نفوذ آب‌های شور مجاور است. به‌طور معمول تداخل و نفوذ آب شور به‌دلیل اختلاف چگالی آب شیرین زیرزمینی و آب شور مجاور است (تاد و میز ۲۰۰۵). از طرفی، در شرایطی که سطح ایست‌آبی به‌علت برداشت بیش‌ازحد تغذیه‌ی آبخوان به‌شدت افت کند، به‌طوری‌که بلندی سطح ایست‌آبی پایین‌تر از بلندی تراز آب شور دریاچه باشد، آب شور در شیب آبی به‌شیوه‌ی جانبی یا عمودی به درون آبخوان برده می‌شود (تاد و میز ۲۰۰۵). این روی‌داد موجب تخریب شدیدتر کیفیت آب آبخوان می‌شود. مدیریت نفوذ آب شور و شورشدن آبخوان در این منطقه‌های ساحلی، به‌ویژه در جاهایی که رشد برداشت از چاه‌ها سریع است، از دیدگاه اندازه‌ی برداشت و شناخت دامنه‌ی نفوذ شورشدگی ضروری است. به‌این‌منظور باید سامانه‌ی پویای جریان و تکامل زمین‌شیمیایی آب زیرزمینی بررسی شود. از طرفی، نوع شیمیایی آب شناسایی، و برای کاربردهای گوناگون رده‌بندی شود.

شورشدن آب چاه‌های آب‌کشی در منطقه‌های ساحلی به‌طور معمول و مستقیمانه به‌دلیل نفوذ و جابه‌جایی آب شور رخ می‌دهد. اگر کاهش کیفیت آب آب‌کشی شده از چاه منفرد تنها بر اثر نفوذ یا بالآمدن مخروط آب شور زیرین باشد آن را می‌توان با مدیریت کردن اندازه و مدت آب‌کشی مهار کرد (تاد و میز ۲۰۰۵). اما اگر دلیل کاهش کیفیت حرکت آب شور از دریاچه بر اثر شیب معکوس آبی در سطح وسیعی از آبخوان باشد، نیازمند بررسی تراز آبی، تعیین برداشت اندازه‌ی مطلوب، و تعیین دامنه‌ی نفوذ شورشدگی آبخوان است. تغییر کیفیت آب آبخوان شامل فرآیندهای پیچیده‌ی زمین‌شیمیایی از جمله برهم‌کنش آب و خاک و ورود آلاینده‌های انسان‌زاد نیز است. شوری آب زیرزمینی به‌طور کلی در تأثیر عامل‌هایی مانند جریان هم‌رفتی ناپایدار آب شور، تبخیر از آب‌های کم‌ژرفا و انحلال کانی‌های تبخیری در ترکیب رسوب‌ها، ترکیب آب تغذیه‌شده، و شرایط فصل‌تر و خشک است. دادوستد یونی نیز از مهم‌ترین واکنش‌های شیمیایی در آب است که در آبخوان‌های ساحلی به‌علت تفاوت ترکیب کاتیونی آب دریاچه و آبخوان پیرامون رخ می‌دهد، و این سازوکارها در بخش‌های گوناگون آبخوان ساحلی متفاوت است (آندرسون و همکاران ۲۰۰۵، اپلو و پستما ۲۰۰۵، بارلو و ریچارد ۲۰۱۰). برای مدیریت کردن درست آبخوان‌های ساحلی ضروری است منشا و سازوکار افزایش شوری با روش‌های گوناگون مانند به‌کارگیری تحلیل‌های آب‌زمین‌شناختی، ایزوتوپ‌های محیطی، و روش‌های زمین‌فیزیک و شبیه‌سازی بار آبی شناخته شود

(ورنر و همکاران ۲۰۱۳). اثرها و رفتار نفوذ آب شور در شرایط متعارف تعادل آبی در جهان به‌خوبی بررسی شده است (بارلو و ریچارد ۲۰۱۰، نسیم و همکاران ۲۰۱۸، شی و همکاران ۲۰۱۸ و گیمنز فورکادا ۲۰۱۹-۲۰۱۰). گیمنز فورکادا (۲۰۱۰، ۲۰۱۹) طرحی بر پایه‌ی درصد غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی داد، که در بررسی نفوذ آب شور به آب شیرین آبخوان، و شیرین‌شدن (کاهش شوری) آب زیرزمینی شورشده سه پدیده‌ی نفوذ، اختلاط و تکامل شیمی آب بر اثر دادوستد یونی را در نظر می‌گیرد. این روش تنها درصد کاتیون‌ها (سدیم و کلسیم) و آنیون‌های اصلی (بیکربنات، سولفات و کلر) را که پویایی نفوذ آب شور و لب شور را تعیین می‌کنند در نظر می‌گیرد. قیگلییری و دیگران (۲۰۱۲) نشان دادند که زمانی که فرآیندهای پیچیده ساده‌سازی می‌شود، و یون‌های با موقعیت‌های ثانویه (غیر از دو عضو پایانی آب شیرین و آب شور) در نظر گرفته نمی‌شود، می‌توان برخی از یون‌های کم‌اهمیت‌تر را کنار گذاشت. با این روی‌کرد، در این روش رخساره‌ها تابعی از درصد کاتیون‌های کلسیم و سدیم، و درصد آنیون‌های کلر و بیکربنات (یا سولفات) نسبت به جمع همه‌ی کاتیون‌ها و آنیون‌ها تعیین می‌شود. هنگامی که نسبت کاتیون و یا آنیون کم‌تر از ۰/۵ است، ولی بیش‌تر از هر یک از دیگر کاتیون‌ها و یا آنیون‌ها است، رخساره Mix دانسته می‌شود. در نمودار شکل ۱ محور افقی درصد‌های مجزای سدیم و کلسیم نسبت به جمع کل کاتیون‌ها از جمله منیزیم (میلی‌اکی‌والان در لیتر) است، که واکنش‌های دادوستد بازی را نشان می‌دهد. محور عمودی نمودار نیز نشان‌دهنده‌ی آنیون‌ها است که با درصد‌های کلر (آنیون غالب آب شور) و بیکربنات یا سولفات (آنیون‌های غالب آب شیرین) نسبت به کل آنیون‌ها معرفی می‌شود. در مرحله‌ی نفوذ آب شور، آبخوان در تأثیر دو فرآیند هم‌زمان است (افزایش شوری) و موجب آغاز شدن واکنش دادوستد یونی معکوس می‌شود، و نتیجه‌ی آن تولید رخساره‌ی Ca-Cl است. پس از آن، ترکیب آب زیرزمینی به سوی آب شور (Na-Cl) تغییر رخساره می‌دهد. در زمان فرآیند شیرین‌شدگی، تغذیه با آب شیرین موجب انجام واکنش‌های دادوستدی مستقیم و تولید رخساره‌های سدیم بیکربنات می‌شود. سرانجام، آب کم‌کم با آب شیرین ترکیب، و آبخوان دوباره احیا می‌شود (گیمنز فورکادا ۲۰۱۰). در نمودار شکل ۱ محدوده‌های نفوذ به زیرمحدوده‌های نفوذ ۱ تا ۱۴ و محدوده‌های شیرین‌شدگی به زیرمحدوده‌های شیرین‌شدگی f۱ تا f۴ (رخساره‌های اصلی) تقسیم شده‌است. اولین زیرمحدوده‌ها (f۱ یا ۱) برای هر محدوده دورترین رخساره‌های مرزی را نشان می‌دهد، که حد نهایی منطقه‌ی میان دو جریان را تعریف می‌کنند، و نشان‌دهنده‌ی مرز واکنش پویایی سفره‌ی آب و داخل‌شدن آب شور به آب

بیش‌تر مشهود است. نمونه‌هایی که در محدوده‌ی آب شیرین است در وضعیت شیرین‌شدگی دانسته می‌شود، هر چند در محدوده‌ی نفوذ آب شور در آب شیرین باشد. به همین ترتیب، فرض بر این است که نمونه‌هایی که در محدوده‌ی آب شور است جزوی از وضعیت نفوذ است، حتی اگر در وضعیت شیرین‌شدگی باشد.

شیرین یا برعکس در زمان‌های گوناگون است. می‌توان آن را شرایط تقابل میان دو جریان مخالف در نظر گرفت، که برای داخل شدن به سفره رقابت می‌کنند، و نماینده‌ی پویایی روند است. در مقابل، رخساره‌های f_4 و i_4 نزدیک‌ترین ارتباط را با عضوهای نهایی آب شیرین یا شور (FW, SW) دارند. زیر رخساره‌های فرعی i_2, i_3, f_2 و f_3 نشان‌دهنده‌ی ترازهای میانی است که معمولاً دادوستد کاتیون در آن‌ها



شکل ۱- نگاره‌ی تکامل رخساره‌های آب‌شیمیایی (HFE).

و قابلیت هدایت الکتریکی با فاصله از چاه‌ها نسبت عکس دارد. این دریاچه به دلیل خشک‌سالی‌ها و کاهش حجم آب وارد شده در دو دهه‌ی گذشته، به‌ویژه دهه‌ی پشت‌سر در شرایط خشکی فصلی طولانی است. به‌علت این کم‌بارشی‌ها، و گسترش زمین‌های کشاورزی در منطقه، از اندوخته‌های آب زیرزمینی آبخوان‌های پیرامون دریاچه با رشدی بیش‌تر از سرعت متوسط تغذیه‌ی آبخوان‌ها برداشت و آب‌کشی می‌شود. کاسته‌شدن از تراز آب و پهنه‌ی دریاچه برخی از کشاورزان را ترغیب کرده‌است که به حریم آب‌شناسی دریاچه تجاوز کنند، و سطح زمین‌های کشاورزی خود را گسترش دهند، و آب آبیاری را با لوله از جاهای دورتر (نزدیک به محل تغذیه‌ی آبخوان) به این زمین‌ها بیاورند. این کار برهم خوردن شرایط تعادل تراز آبی را افزایش داده‌است. هدف از پژوهش پیش‌رو شناخت سازوکار، دامنه‌ی تاثیر نفوذ، و جریان آب دریاچه‌ی مهارلو به آبخوان مهارلو، بزرگ‌ترین آبخوان در حاشیه‌ی این دریاچه در استان فارس است. بررسی این موضوع با روی‌کرد جریان آب، نیازمند کندن چند چاه مشاهده‌ی و نمونه‌برداری بود، اما در زمان این پژوهش امکانات لازم در دست نبود، و این پژوهش با بررسی شیوه‌ی دگرگونی (تغییرات) آب‌شیمیایی چاه‌های بهره‌برداری موجود انجام شد.

در ایران پژوهش‌هایی بر دریاچه‌های شور داخلی مانند ارومیه، بختگان، و مهارلو انجام شده‌است، هرچند به موضوع دامنه‌ی تاثیر شوری آن‌ها بر آبخوان‌های پیرامون توجه نشده‌است. مهم‌ترین دلیل‌های شور شدن دریاچه‌ی مهارلو تبخیر شدید از سطح آب دریاچه، وجود گنبد نمکی سروستان، و چشمه‌های نمکی آن است (زک و گات ۱۹۷۵). صدیقی (۲۰۰۰) در ارزیابی آلودگی‌های زمین‌شناسی و فاضلاب آورده به رودخانه‌ی خشک و به دریاچه‌ی مهارلو، از چند نقطه درون دریاچه در فصل تر و خشک، و چند نقطه در طول رودها (خشک، سلطان‌آباد در ایستگاه پل فسا، چشمه‌های شور گنبد نمکی سروستان، چشمه‌ی بَرَم‌دَلک و چشمه‌ی بَرَم‌شور) نمونه‌برداری کرد. تجزیه‌ی شیمیایی نشان داد که نمک و آب دریاچه آلوده به فلزهای سنگین است، و منشأ بیش‌تر آن انسان‌زاد است. خسروی و همکاران (۲۰۱۸) سازوکار حرکت آرسنیک میان آب دریاچه و رسوب‌های کف آن را بررسی کردند. قادر (۲۰۰۹) نشان داد که در چاه‌های حاشیه‌ی شمال شرقی دریاچه‌ی مهارلو آب با حرکت از بلندی‌ها به سوی دریاچه به‌طور طبیعی ماده‌ی جامد بیش‌تری را در خود حل می‌کند، و قابلیت هدایت الکتریکی آن تا حدودی افزایش می‌یابد. افزایش قابلیت هدایت الکتریکی در چاه‌های نزدیک به دریاچه بیش‌تر ناشی از نفوذ آب شور دریاچه به آبخوان است،

مواد و روش‌ها

ویژگی‌های منطقه‌ی مورد مطالعه

این پژوهش در آبخیز شیراز-سروستان در پیرامون دریاچه‌ی شور مهارلو انجام شد. ژرفای دریاچه کم است، و بر پایه‌ی مشاهده‌ها، به‌طور معمول تراز آب دریاچه در طول سال افت‌وخیز زیادی دارد، به‌طوری‌که در زمستان تا میانه‌ی بهار به تدریج به بیشینه می‌رسد، و سپس بر اثر تبخیر از دریاچه کاهش می‌یابد و تا پایان تابستان به کمینه می‌رسد. تبخیر آب باعث می‌شود که به تدریج شوری و در نتیجه چگالی آب افزایش یابد، و با اضافه‌شدن جریان‌های ورودی زمستانه و بهار، آب دوباره رقیق شود و چگالی کاهش یابد. این پدیده در هر سال تکرار می‌شود، و منجر به این می‌شود که تعادل پویای آب شور و شیرین برعکس هم عمل کند، و باعث پیچیده‌شدن ارزیابی دامنه‌ی نفوذ آب شور دریاچه شود. این حالت در دریاچه‌ی آزاد که شرایط ثابت است، رخ نمی‌دهد. از طرف دیگر، برداشت بیش‌ازحد از آبخوان این پیچیدگی را افزایش می‌دهد، به‌طوری‌که بر اثر برداشت بی‌رویه، تراز ایست‌آبی آبخوان به شدت افت می‌کند و پایین‌تر از بلندی کف دریاچه می‌ماند. در نتیجه، آب شور دریاچه بر اثر ایجاد این شیب معکوس آبی، به درون آب زیرزمینی آبخوان حرکت می‌کند (کمیت‌های تحقیقات سازمان آب منطقه‌ی فارس ۲۰۲۱).

روش پژوهش

داده‌های مدل ماموریت پستی‌بلندی رادار شاتل^۱ برای بررسی‌های بعدی بیرون‌آورده شد، در GIS پردازش شد، مدل رقومی ارتفاعی^۲ (دی‌ای‌ام) حوزه‌ی شیراز-سروستان تهیه شد، و محدوده‌ی دریاچه‌ی مهارلو در حوزه روی نقشه‌ی زمین شناسی ۱:۱۰۰,۰۰۰ (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور) مشخص شد (شکل ۲). با بررسی نقشه‌ی دی‌ای‌ام، پایین‌ترین بلندی کف دریاچه ۱۴۶۱ متر، و بر پایه‌ی

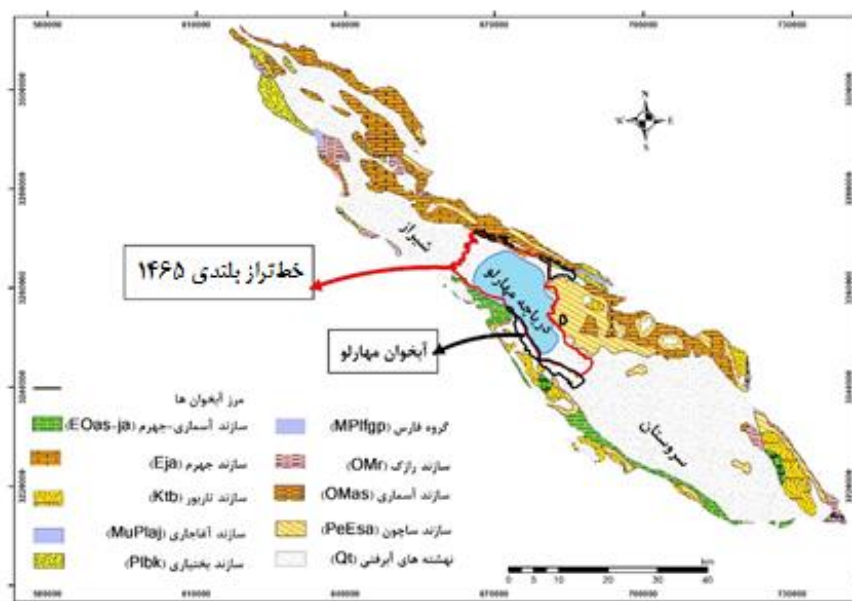
بالاترین داغ‌آب تاریخی مشاهده‌شده‌ی صحرایی، منطبق بر خط تراز بسته‌ی ۱۴۶۵ متر حد نهایی گسترش آب دریاچه گرفته شد، و ژرفای بیشینه‌ی آن حدود ۴ متر برآورد شد. با نقشه‌ی دی‌ای‌ام، خط تراز بلندی ۱۴۶۵ متر (مرز دریاچه) بیرون‌آورده و روی نقشه‌ی زمین‌شناسی رسم شد (شکل ۲). بررسی‌های صحرایی نشان داد که همه‌ی منطقه‌های درون این خط تراز ویژگی‌های دریاچه‌ی شور، رسوب‌های دریاچه‌ی و پلایا دارد. زمین‌های آبخور آبخوان‌های پیرامون دریاچه با نقشه‌ی پستی‌بلندی و Google Earth مشخص، و مرز آن‌ها نسبت به خط تراز ۱۴۶۵ متر دریاچه در GIS رسم شد. بر این پایه، جز دو آبخوان شیراز و سروستان، ۸ آبخوان دیگر در پیرامون دریاچه هست. این آبخوان‌ها از یک سو با دریاچه، و از سوی دیگر با سازند کارستی سروک (تغذیه‌کننده‌ی اصلی) هم‌مرز است. مهارلو بزرگ‌ترین این ۸ آبخوان است و برای پژوهش انتخاب شد.

عملیات صحرایی و نمونه‌برداری

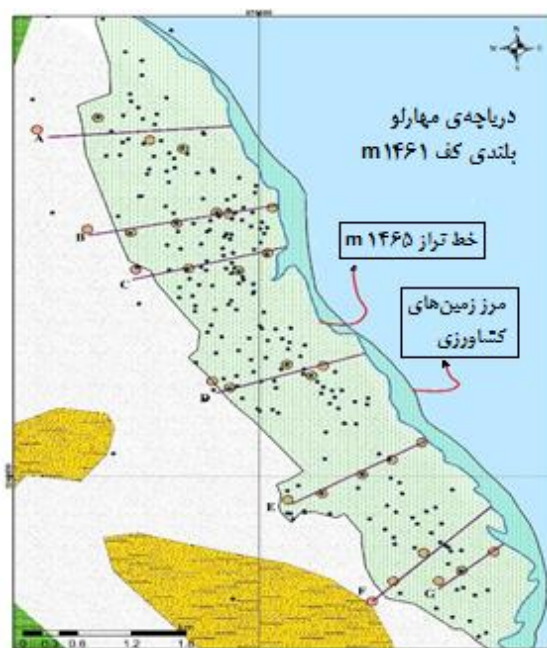
همه‌ی چاه‌های آبخوان مهارلو با داده‌های ۱۳۸۸ روی نقشه رسم شد. در مرحله‌ی اول در کنش‌های صحرایی همه‌ی اندوخته‌های آبی بررسی، و موقعیت، بلندی و ژرفای آب در آن‌ها اندازه گرفته‌شد. به دلیل امکان دسترسی، اجازه‌ی مالکان چاه، و جاده‌های دسترسی، چند چاه کشاورزی و چند چاه رهاشده در نزدیک دریاچه که قبلاً آب شیرین داشتند، انتخاب شد. چاه‌های منتخب در طول ۷ مسیر عمود بر ساحل دریاچه (برش‌های A، B، C، D، E، F و G) در شکل ۳ نشان داده شده‌است. شناسه‌گذاری چاه‌ها روی برش‌ها در این نقشه با نشانگان هر برش و شماره‌ی آن‌ها، از نزدیک‌ترین فاصله به دریاچه شروع می‌شود و ادامه می‌یابد. برای نمونه، چاه A۱ روی برش A، و در نزدیک‌ترین موقعیت به خط تراز ۱۴۶۵ متر است.

1 - Shuttle Radar Topography Mission, SRTM

2 - DEM



شکل ۲- نقشه‌ی زمین‌شناسی حوزه‌ی شیراز-سروستان، دریاچه‌ی مهارلو، و خط تراز بلندی ۱۴۶۵ در پیرامون دریاچه به همراه موقعیت آبخوان‌های پیرامون دریاچه.



شکل ۳- موقعیت برش‌های هفت‌گانه در آبخوان مهارلو.

ویژگی‌های اندازه‌گیری و تواتر آن‌ها

اندازه‌گیری‌های صحرایی و درجای ژرفای سطح آب در چاه نسبت به نقطه‌ی مبنا و قابلیت هدایت الکتریکی دو ماهانه از بهمن ۱۳۹۷ تا بهمن ۱۳۹۸ انجام شد. قابلیت هدایت الکتریکی آب نسبت به ژرفای آب از سطح ایست‌آبی با دستگاه خودکار آکوامستر، که این ویژگی را پیوسته در ژرفا ثبت می‌کند، اندازه گرفته شد. اگر تغییر مهمی مشاهده می‌شد نمونه‌ی از آن ژرفا برای تجزیه‌ی شیمیایی برداشته می‌شد. اگر نه، با نمونه‌گیری تدریجی از همه‌ی ستون آب نمونه برداشته می‌شد. اگر چاه در کار آب‌کشی بود، و امکان توقف آب‌کشی نبود نمونه از آب خروجی گرفته می‌شد. آنیون و کاتیون‌های اصلی و برم در سه دوره، اسفند ۱۳۹۷، مهر ۱۳۹۸ و بهمن ۱۳۹۸ در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز با دستگاه کرماتوگرافی یونی مدل متروم^۲ اندازه گرفته شد.

نتایج و بحث

بررسی نقشه‌ی سطح ایست‌آبی

رسم نقشه‌های سطح ایست‌آبی با بلندی لبه‌ی چاه و ژرفای تراز آب آن‌ها در همه‌ی دوره‌های اندازه‌گیری (شکل ۴، برای نمونه در بهمن ۱۳۹۷) نشان داد که در همه‌ی زمان‌ها بلندی تراز ایست‌آبی در پهنه‌ی وسیعی از آبخوان پایین‌تر از بلندی کف دریاچه است. در نتیجه مشخص شد که شرایط شور شدن آب چاه‌ها نه تنها ممکن است به علت نفوذ آب شور و اختلاف چگالی باشد، که شرایط آب‌پویایی سفره با شرایط متعارف تعادل آبی نفوذ آب شور کاملاً همخوان نیست. در این شرایط حرکت و ورود آب شور به آبخوان از سوی دریاچه ممکن است عامل مهمی در شور کردن آب باشد. از این رو دامنه‌ی شورشدگی آبخوان و منطقه‌بندی شوری آن با روش ویژگی‌های آب‌شیمیایی انجام شد.

دگرگونی شوری آب چاه‌ها

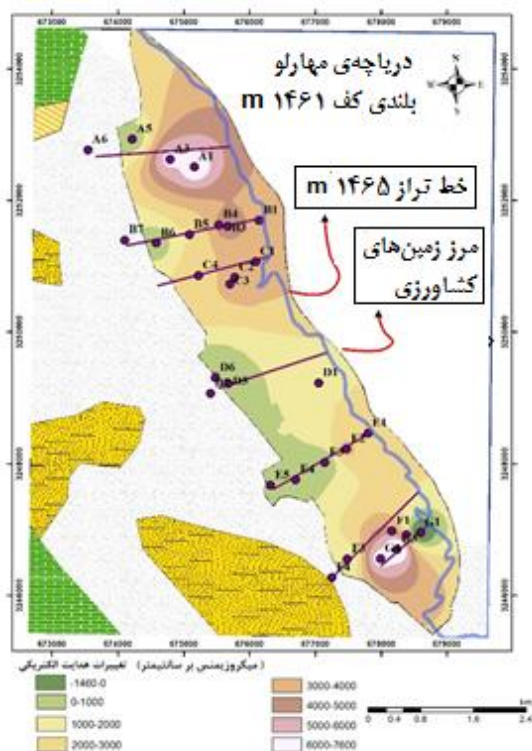
دگرگونی شوری در طول برش‌های هفت‌گانه با نشانگر قابلیت هدایت الکتریکی در پهنه‌ی آبخوان و در ستون ژرفایی آب چاه‌ها در زمان‌های گوناگون بررسی شد. نقشه‌های قابلیت هدایت الکتریکی دو ماهانه‌ی بهمن ۱۳۹۷ تا بهمن ۱۳۹۸

در پهنه‌ی آبخوان نشان داد که به طور کلی همیشه اندازه‌ی شوری از مرز دریاچه به سوی دامنه‌ی بلندی‌ها کاهش دارد، هر چند شوری در محدوده‌ی شمال‌غربی بیش‌تر از بخش‌های جنوب‌شرقی آبخوان است. مقایسه‌ی نقشه‌ی بهمن ۱۳۹۷ و فروردین ۱۳۹۸ (برای نمونه) نشان می‌دهد که شوری در شمال‌غربی آبخوان در بهمن ۱۳۹۷ به علت کم‌بارشی ماه‌های پیش از آن نسبت به فروردین ۱۳۹۸ که بارش بسیار بود، بسیار بیش‌تر است. هر چند با شروع فصل خشک، کاهش بارندگی‌ها، شروع به کار چاه‌های کشاورزی، و اضافه برداشت از آبخوان، تشدید شوری در این بخش به خوبی پیدا است. به طور کلی بارش‌های زمستانه و بهاره تاثیر کمی بر کاهش شوری دارد، و برداشت آب با آب‌کشی و در نتیجه کاهش تراز ایست‌آبی تاثیر بیش‌تری بر افزایش شوری آبخوان دارد. بررسی دگرگونی شوری در دوره‌ی این پژوهش با رسم نقشه‌ی هم‌تغییر قابلیت هدایت الکتریکی، و روش درون‌یابی IDW در GIS میان بهمن ۱۳۹۷ و بهمن ۱۳۹۸ (نقشه‌ی بهمن ۱۳۹۷ منهای بهمن ۱۳۹۸، شکل ۵)، نشان می‌دهد که دگرگونی در این دوره از ۱۴۶۰- تا ۷۶۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر است.

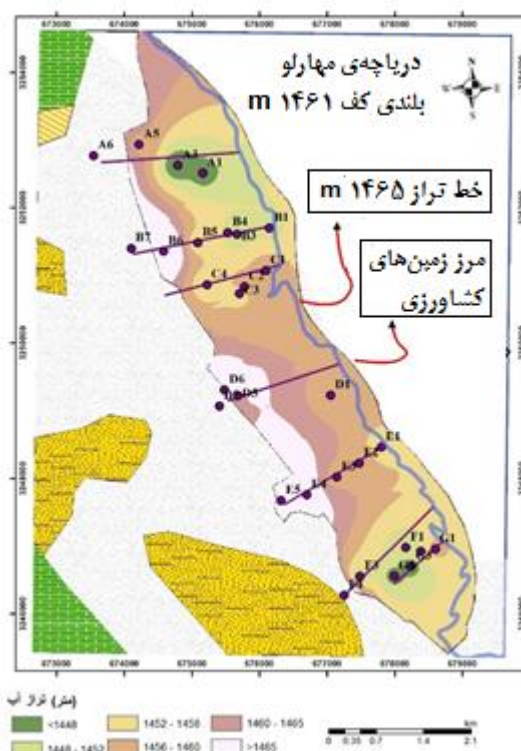
بر پایه‌ی این نقشه، شوری در منطقه‌های جنوب‌شرقی و شمال‌غربی افزایش و منطقه‌های میانه جنوبی در بهمن ۱۳۹۸ کاهش داشت. به دلیل دگرگونی کم‌تر در میانه‌ی جنوبی می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌ترین رشد سرعت تغذیه‌ی آبخوان در این بخش است که نزدیک‌تر به ساختارهای کارستی است.

بررسی دگرگونی ژرفایی شوری

نتیجه‌ی بررسی دگرگونی ژرفایی در مسیر برش‌های ۷ گانه در زمان‌های گوناگون (برای نمونه رخساره‌ی B در شکل ۶) نشان می‌دهد که نخست، دگرگونی بسیار کمی در دوره‌ی زمانی پژوهش مشهود است. دوم، با دور شدن از مرز دریاچه (موقعیت خط تراز بلندی ۱۴۶۵ متر)، شوری در ابتدای مسیر بسیار زیاد است، با شیب کمی کاهش می‌یابد، سپس با شیب بسیار بیش‌تری کاهش می‌یابد، و سرانجام به محدوده‌ی بی‌میرسد که کاهش فراوان می‌یابد. رشد سرعت از آن جا به سوی دامنه‌ی بلندی‌ها و مرز تغذیه، کاهش بسیار کمی می‌یابد.



شکل ۵- نقشه‌ی هم تغییر قابلیت هدایت الکتریکی آب آبخوان مهارلو برای دوره‌ی بهمن ۱۳۹۷ و بهمن ۱۳۹۸.



شکل ۴- نقشه‌ی تراز ایست‌آبی آبخوان مهارلو، بهمن ۱۳۹۷.

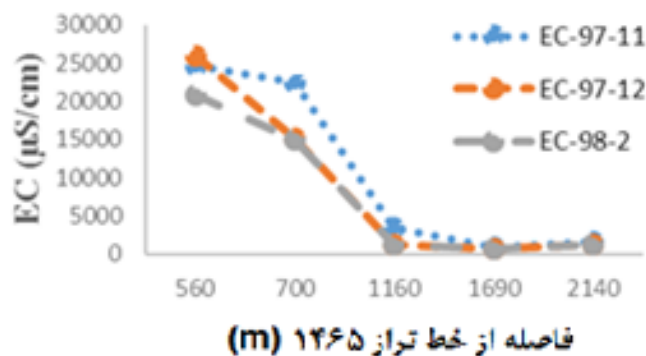
متر (متغیر در برش‌های گوناگون) نسبت به کنار دریاچه تا ابتدای شروع منطقه‌ی بعدی ادامه دارد. در برخی از چاه‌ها لایه‌بندی شوری هست، و شوری در ژرفای برخی به بیش از ۲۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر مشاهده می‌شود. به دلیل فاصله و پراکندگی این چاه‌ها، می‌توان تا حدودی فرض کرد که محدوده‌ی زبانه‌ی آب شور تا این فاصله گسترش یافته‌است. منطقه‌ی پیش از این محدوده در طرف دریاچه، منطقه‌ی است که آب شور دریاچه به‌طور کامل به آبخوان نفوذ کرده است، و پس از آن منطقه‌ی است که چاه‌های آن از شوری دریاچه اثر نمی‌گیرد. این محدوده میان منطقه‌ی پیشین تا فاصله‌ی حدود ۱۵۰۰ متر کشیده می‌شود.

۳- محدوده‌ی نزدیک به مرز تغذیه از سازندهای آهکی جنوبی و جنوب شرقی که کیفیت آن بسیار خوب و ثابت است، آب لایه بندی ژرفایی ندارد، و آب چاه‌ها از دیدگاه اندازه‌ی شوری تقریباً در یک بازه‌ی نزدیک به هم و با قابلیت هدایت الکتریکی بسیار کم است. به دلیل این که قابلیت هدایت الکتریکی در این منطقه کم و در بلندی‌های کارستی مرز جنوبی است، این محدوده منطقه‌ی تغذیه‌ی آبخوان دانسته می‌شود. سرچشمه‌های شوری احتمالی تأثیری بر کاهش کیفیت آب

به دلیل این مشاهددها و بررسی دگرگونی شوری در پهنه‌ی آبخوان می‌توان به‌طور کلی پهنه‌ی آبخوان را به سه محدوده ناحیه‌بندی کرد. هر چند مرز این تقسیم‌بندی در بخش‌های گوناگون آبخوان کمی متغیر است، و بر حسب تعداد چاه‌ها و اندازه‌ی آب‌کشی، ویژگی‌های خاک، نوع کشت باغ یا زراعت یک‌ساله، نزدیک بودن به کوه‌پایه، و پیش‌روی دریاچه، مرزها با آن چه در تقسیم‌بندی زیر آمده است تا حدودی فرق می‌کند. ۱- منطقه‌ی نزدیک به دریاچه تا فاصله‌ی ۶۰۰-۱۰۰۰ متر (متغیر در بخش‌های گوناگون آبخوان) که آب شور دریاچه بر اثر شیب آبی معکوس وارد آبخوان می‌شود، و قابلیت هدایت الکتریکی آب زیرزمینی و شوری در آن بسیار است. هر چند شاهدهایی مانند چند چاه کم‌ژرفای ره‌اشده نشان می‌دهد که در گذشته که برداشت از آبخوان در تعادل با تغذیه‌ی آن بود، تراز ایست‌آبی بالاتر از بلندی دریاچه بود. کم‌ژرفا بودن چاه‌ها نیز نشان می‌دهد که کشاورزان با تجربه‌ی که به‌دست آورده‌اند، ژرفای چاه را تا بالاتر از زبانه‌ی آب شور^۴ می‌کنند. ۲- منطقه‌ی میانی که قابلیت هدایت الکتریکی و شوری آب در آن به تدریج کاهش می‌یابد، تا محدوده‌ی بی که بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند. این محدوده در فاصله‌ی ۶۰۰-۱۰۰۰

بخش‌های گوناگون) تا حدود ۲۲۰۰ متر که آخرین چاه در آبرفت است ادامه دارد.

این منطقه ندارد، و زبانه‌ی نفوذ آب شور در آن گسترش نیافته است. این محدوده از فاصله‌ی حدود ۱۵۰۰ متر (متغیر در



شکل ۶- دگرگونی قابلیت هدایت الکتریکی در دوره‌های نمونه‌برداری آبخوان مهارلو در مسیر برش B نسبت به فاصله از خط تراز ۱۴۶۵.

به‌طوری‌که می‌توان با مقایسه‌کردن الگوی نمونه‌ها در نمودارهای رده‌بندی از آن‌ها بهره گرفت، جوری که اختلاف شکل الگوها مربوط به اختلاف اندازه‌ی نسبی یون‌های شیمیایی آب و منشاءهای گوناگون آب باشد. برای نمونه، نمودارهای استیف برای جاهایی در مسیر برش B در مهر ۱۳۹۸ در شکل ۷ نشان داده شده است. نمونه‌های آب آبخوان به سه رده تقسیم شد. رده‌ی اول نمونه‌های نزدیک به بلندی‌های آهکی و منطقه‌ی تغذیه، رده‌ی دوم بیش‌تر نمونه‌های منطقه‌ی میانی آبخوان، و رده‌ی سوم بیش‌تر نمونه‌های نزدیک به دریاچه‌ی مهارلو است. موقعیت مکانی جاهای هر گروه تا حد بسیار زیادی منطبق بر منطقه‌های تقسیم‌بندی به‌دست‌آمده از بررسی نقشه‌های قابلیت هدایت الکتریکی است (جدول ۲).

بررسی ویژگی‌های آب‌شیمیایی آبخوان مهارلو

تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های آب در طول برش‌های هفت‌گانه در سه نوبت (اسفند ۱۳۹۷، مهر ۱۳۹۸ و بهمن ۱۳۹۸) انجام شد (جدول ۱). برای تاییدکردن منطقه‌بندی شوری، دامنه‌ی اثر شوری دریاچه با نتیجه‌ی تجزیه‌های شیمیایی به روش‌های نمودار استیف (اپلو و پستما ۲۰۰۵)، نسبت کلر به برم (سریده‌هان و سننیل ناتان ۲۰۱۶)، و نمودار تکامل رخساره‌های آب‌شیمیایی^۵ (گیمنز فورکادا ۲۰۱۰، ۲۰۱۹) بررسی شد.

نمودار استیف

در نمودار استیف همه‌ی یون‌های اصلی آب بررسی می‌شود،

جدول ۱- عمق و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب زیرزمینی آبخوان مهارلو در فصل تر و خشک.

	فصل خشک			فصل تر		
	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max
Depth	۲۸/۸	۶/۶	۶۱	۲۶/۹	۷/۱۱	۶۰/۲
EC	۴۱۱۴	۶۱۰	۲۹۰۰۰	۴۰۵۲/۷	۵۸۲	۲۶۰۰۰
Na	۲۰۰/۱	۱۳/۹	۱۰۶۰/۴	۱۴۵/۹	۲۵/۴	۵۹۶/۲
K	۸	۰/۸	۲۷/۵	۷/۳	۰/۷	۲۶/۳
Ca	۲۳۰/۴	۳۴/۸	۲۱۴۰/۳	۱۷۳	۳۴/۵	۱۳۰۰/۱
Mg	۱۲۸	۳۴	۱۲۲۸/۹	۹۸/۴	۳۱/۰	۹۲۵/۱
Li	۰/۱	۰/۰۱	۰/۶	۰/۱	۰/۰۱	۰/۵
CO ₃	۱۱/۴	۰/۰	۴۲	۸/۰	۰	۲۴
HCO ₃	۳۴۷/۵	۲۰۱/۳	۹۰۸/۹	۳۰۱/۶	۱۸۹/۱	۴۲۷
SO ₄	۱۸۲/۴	۸/۶	۸۰۸/۷	۱۶۵/۲	۱۸/۸	۳۵۵/۳
Cl	۷۰۳/۹	۷	۷۸۷۷/۲	۴۴۵/۸	۶	۴۶۳۲/۲
Br	۱/۱	۰/۱	۷/۹	۰/۹	۰/۱	۴/۴

جدول ۲- نتیجه‌ی رده‌بندی آب آبخوان مهارلو به روش‌های گوناگون، بهمن ۱۳۹۸.

جاهای اندازه‌گیری شده	
روش HFE	
رده ۱	A5, A6, B5, B6, C2, C4, C5, D2, D4, E5, F3, F4
رده ۲	C1, D3, D5, D6, E1, E2, E3, E4
رده ۳	A1, A3, B1, G1, G3, G4
روش Stiff	
رده ۱	A6, B6, B7, F3, F4
رده ۲	A5, B5, C1, C2, C4, C5, D2, D3, D6, e1, E2, E3, E5
رده ۳	A1, A3, B1, E4, G1, G3, G4
روش Cl/Br	
رده ۱	A6, B6, C5, F3, F4
رده ۲	B5, C1, C2, D2, D3, D4, D5, D6, E1, E2, E3, E4, E5
رده ۳	A1, A3, B1, B3, G1, G3, G4

کند کاهش می‌یابد (دیویس و دیویس ۱۹۹۶). نسبت Cl/Br در برابر Cl در شکل ۸ (برای مهر ماه ۱۳۹۸ برای نمونه) روی محورهای لگاریتمی رسم شده است. برای مقایسه و رده‌بندی روی این شکل خطی که نسبت Cl/Br آن برای همه‌ی اندازه‌های کلر ۳۰۰ است نیز نشان داده شده است. شکل نشان می‌دهد که در گروه ۱ (رده‌ی ۱) بیش‌تر نمونه‌هایی است که از دریاچه دور است و کم‌تر از شوری دریاچه تاثیر می‌گیرد. رده‌ی ۳ گروهی است که بیش‌تر نزدیک به دریاچه است و بسیار با آب دریاچه در تماس است. رده‌ی ۲ که در شکل میان این دو گروه است مربوط به منطقه‌ی میانی است.

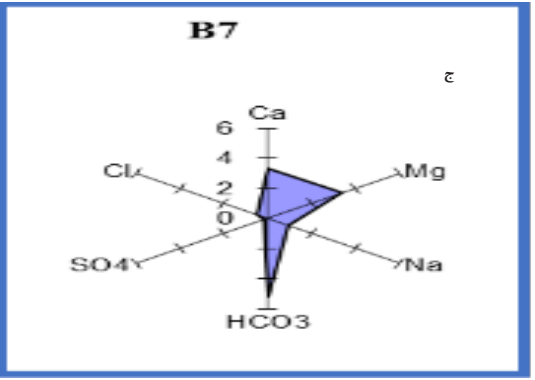
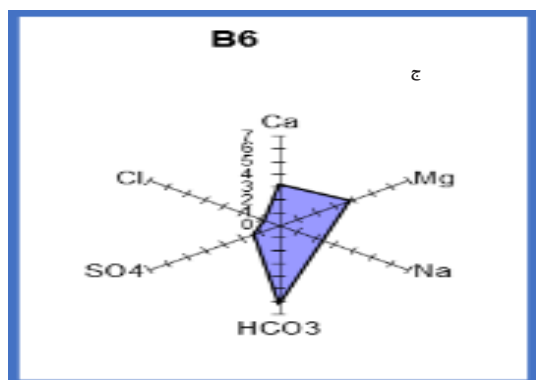
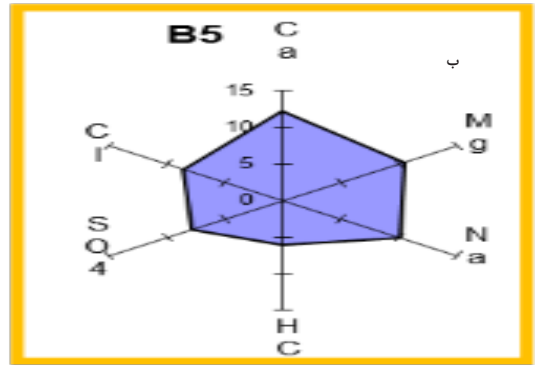
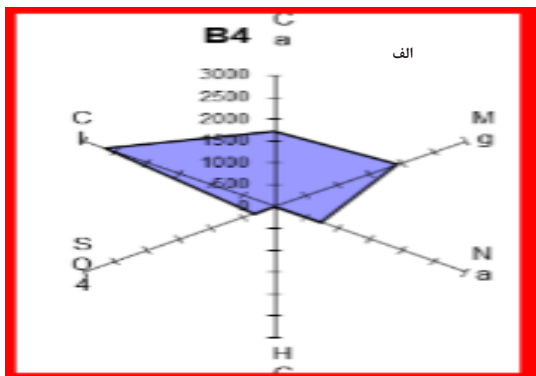
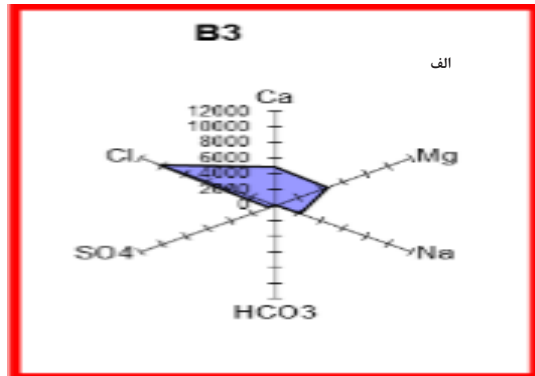
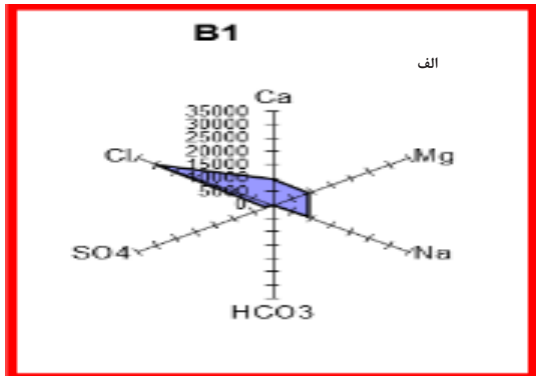
نسبت یون کلراید به برماید (Cl/Br)

نسبت‌های هالوژنی از جمله ردیاب‌های رایجی می‌باشند که در مطالعات شناسایی منابع شوری در آب‌های زیرزمینی استفاده می‌شود و در این روش فرض بر این است که هالوژن‌ها دارای رفتاری پایدار و بدون تغییر دارند. در این پژوهش از نسبت کلر به برم جهت تعیین کیفیت و مطالعه آلودگی آب‌های زیرزمینی و نفوذ آب شور دریاچه به آبخوان شیرین استفاده شده‌است. این نسبت در آب‌های زیرزمینی کم‌ترفا در حدود ۳۰۰ است. اگر این آب با آب شور دریا برخورد داشته باشد این نسبت افزایش، و اگر با آب تازه که تبخیر نشده‌است برخورد

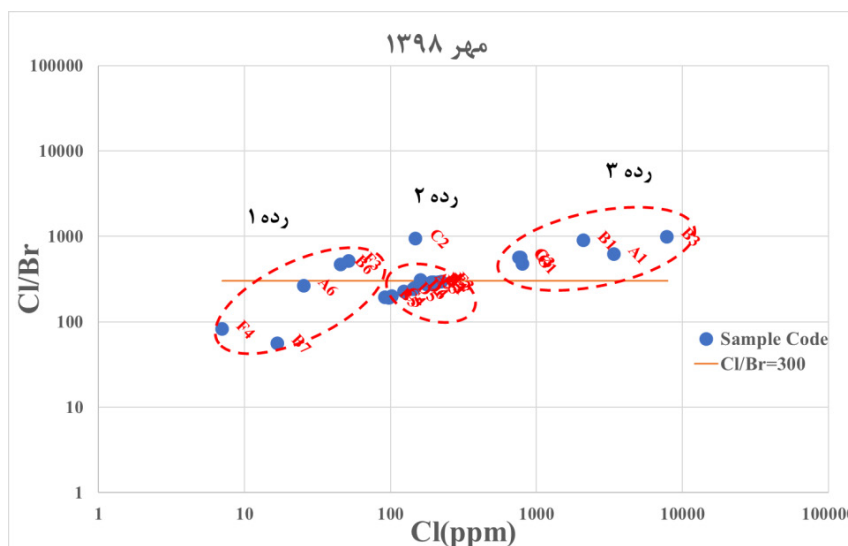
ارزیابی دامنه‌ی نفوذ آب شور دریاچه‌ی مهارلو به آبخوان ساحلی...

نتیجه‌ی به‌دست‌آمده از هر روش، شماره‌ی نمونه‌های هر رده در جدول ۲ آورده شده است.

این گروه‌بندی تا حدود زیادی منطقه‌بندی نتیجه‌گیری شده در بخش‌های پیش را تایید می‌کند. برای مقایسه‌کردن



شکل ۷- رده‌بندی آب زیرزمینی آبخوان مهارلو با نمودار استیف برای نمونه‌های روی مسیر برش B، مهر ۱۳۹۸.
الف: رده‌ی ۳، ب: رده‌ی ۲، ج: رده‌ی ۱.



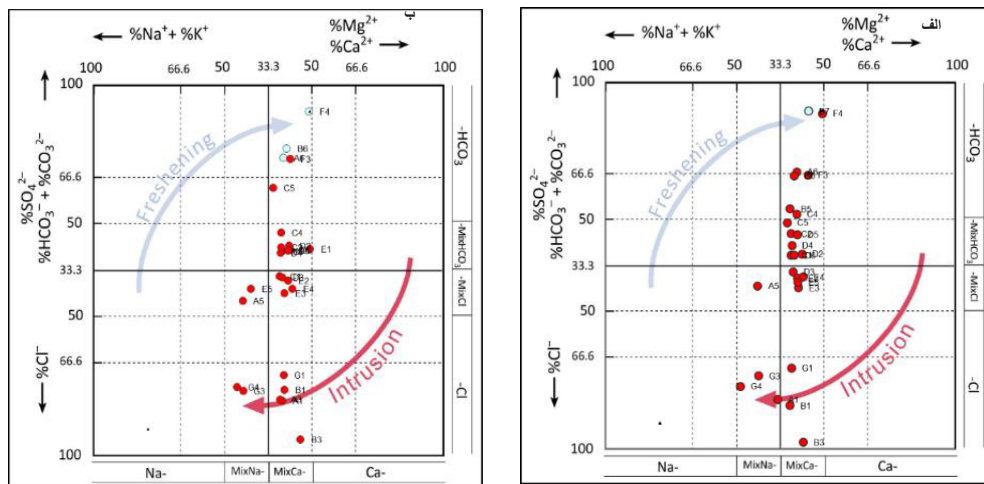
شکل ۸- دگرگونی Cl/Br در برابر غلظت Cl در نمونه‌های آبخوان مهارلو، مهر ۱۳۹۸.

شورابه شدن (Na-Cl) می‌رود. در وضعیت شیرین‌شدگی، به سوی چپ و بالای خط ۳۳/۳، فرآیند دادوستد یونی مستقیم به آرامی رخ می‌دهد، و آب Na را جذب می‌کند و Ca را پس می‌دهد، تا به رخساره‌ی Na-HCO₃-SO₄ می‌رسد. بررسی موقعیت نمونه‌های آب در نمودارهای HFE در دو دوره‌ی بررسی نشان می‌دهد که بیش‌تر نمونه‌ها در دوره‌ی زمانی خشک (مهر ۱۳۹۸) و تر (بهمن ۱۳۹۸) بی‌تغییر است، و در جاهای مشترک همان رخساره‌ی پیشین خود را دارد. این بیانگر نبود تأثیر مهم دگرگونی فصلی بر شیمی آب است. بر پایه‌ی توزیع و موقعیت نمونه‌های آب زیرزمینی بر نمودار رخساره‌های آب‌شیمیایی (شکل ۹)، و تعیین جاها در زیرمحدوده‌های نفوذ I1 تا I4 و زیرمحدوده‌های شیرین‌شدگی I1 تا I4، نقشه‌ی پهنه‌بندی آبخوان مهارلو برای مهر و بهمن ۱۳۹۸ تهیه شد (شکل ۱۰ و ۱۱). دامنه‌ی نفوذ آب شور (قرمز) در نزدیک دریاچه است، و به تدریج به سوی میانه‌ی آبخوان از شدت شوری کاسته می‌شود (رنگ قرمز به تدریج به رنگ زرد تبدیل می‌شود)، و در نزدیک مرز جنوبی و بلندی‌ها به آب شیرین تبدیل می‌شود (به رنگ آبی نزدیک می‌شود). هر چند منطقه‌هایی با تعداد کم اطلاعات رسم‌شده در شکل ۱۰ و ۱۱ هست، و باید با تکمیل کردن اطلاعات و برداشت و تحلیل نمونه‌های بیش‌تر آب در این منطقه‌ها درجه‌ی اطمینان این نقشه‌ها را افزایش داد.

در حالتی که آب شیرین واردشده به آبخوان باعث شیرین‌شدن نسبی آب شور آبخوان یا نفوذ آب شور به درون آب شیرین آبخوان شود، روش‌های پیشین امکان شناسایی دقیق تکامل رخساره‌های شیمیایی آب را ندارد. چرا که آب شیرین شورشده یا آب شور شیرین‌شده علاوه بر پدیده‌ی اختلاط از دو فرآیند دادوستد یونی مستقیم (به سوی راست)، و دادوستد یونی معکوس (به سوی چپ) نیز تأثیر می‌گیرند (رابطه‌ی ۱).



بنابراین در پژوهش‌های مربوط به شورشدن یا شیرین‌شدن آب زیرزمینی، در نظر گرفتن هر سه پدیده با هم اهمیت دارد. نمودار گیمنز فورکادا (۲۰۱۰، ۲۰۱۹) در بررسی نفوذ و شیرین‌شدن آب زیرزمینی هر سه پدیده را در نظر می‌گیرد. موقعیت نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان مهارلو در نمودار HFE برای مهر ۱۳۹۸ و بهمن ۱۳۹۸ در شکل ۹ نشان داده شده است. در شرایط نفوذ آب شور دریاچه، به سوی پایین و زیر خط افقی ۳۳/۳٪ افزایش اولیه‌ی شوری و دادوستد معکوس Na/Ca رخ می‌دهد، که با نوع MixCa-Cl مشخص می‌شود. حضور نمونه‌ها در این محدوده بیانگر رخساره‌های متأثر از دادوستد کاتیونی معکوس (Na/Ca) است. این نوع از آب سرانجام به سوی ترکیب

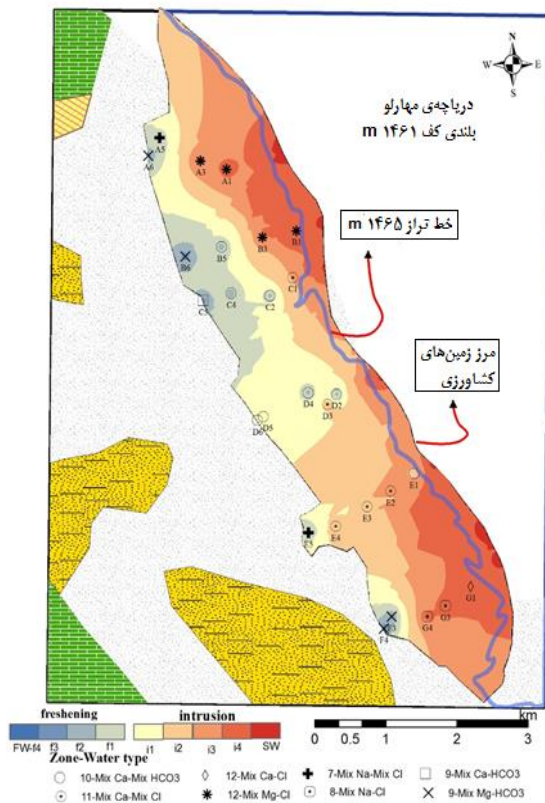


شکل ۹- پراکندگی و موقعیت نمونه‌های آب زیرزمینی آبخوان مهارلو بر نمودار دگرگونی رخساره‌های آب‌شیمیایی. الف: مهر ۱۳۹۸، ب: بهمن ۱۳۹۸.

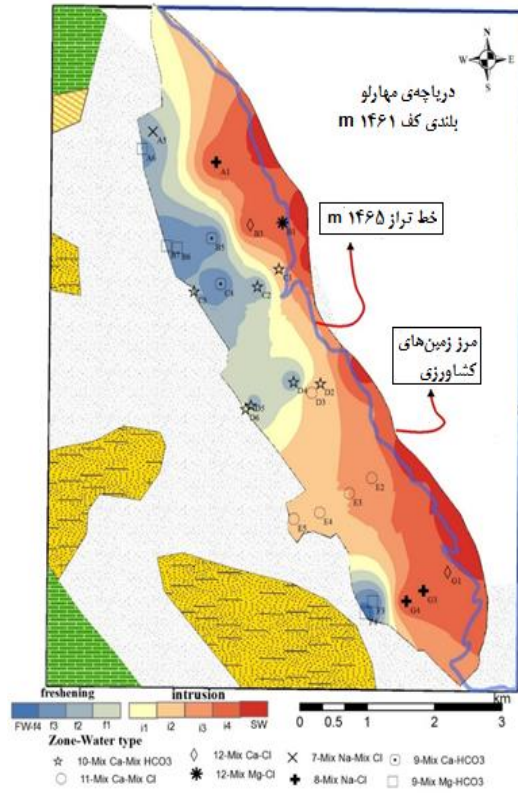
نتیجه‌گیری

دریاچه تا فاصله‌ی بیشینه‌ی ۱۰۰۰ متر که کاملاً متأثر از ورود آب شور دریاچه است و آب آن بسیار شور است، محدوده‌ی هدایت الکتریکی آب به تدریج کاهش می‌یابد، و به حد بسیار دلخواه می‌رسد، و منطقه‌ی سی از ۱۵۰۰ متر تا حدود ۲۲۰۰ متر در دامنه‌ی بلندی‌های کارستی جنوبی که منطقه‌ی تغذیه‌ی آبرفت آبخوان است و کیفیت آب بسیار در حد دلخواه کشاورزی است. این منطقه‌بندی با نتیجه‌ی تجزیه‌ی شیمیایی نمونه‌های آب چاه‌ها و غلظت آنیون و کاتیون‌های اصلی با روش‌های نمودار استیف، نسبت کلر به برم و نمودار تکامل رخساره‌های آب‌شیمیایی نیز بررسی شد. نتیجه‌ی به‌دست آمده از این روش‌ها منطقه‌بندی پیش‌گفته را تایید کرد. اگر به نتیجه‌ی نقطه‌به‌نقطه‌ی جاهای نمونه‌برداری در این روش‌ها توجه کنیم (جدول ۲، برای نمونه برای بهمن ۱۳۹۸)، و نتیجه‌ی نمودار تکامل رخساره‌های آب‌شیمیایی را مبنای بگیریم، درجه‌ی انطباق نتیجه‌ی روش‌های دیگر بررسی، با این روش در حد بسیار زیاد ارزیابی می‌شود. در این حالت نقشه‌ی نهایی ارزیابی دامنه‌ی نفوذ آب شور به درون آبخوان مهارلو برپایه‌ی روش HFE به‌دست می‌آید (شکل ۹). پیشنهاد می‌شود که جلوی هر برداشت اضافی، و جابه‌جایی و کف‌شکنی چاه‌های موجود که باعث پیش‌روی دامنه‌ی شورشدگی به سوی منطقه‌ی تغذیه‌ی آبخوان می‌شود گرفته شود.

علت شور شدن آب چاه‌های آبخوان مهارلو و دامنه‌ی نفوذ آب شور دریاچه مهارلو در این پژوهش بررسی شد. ویژگی‌های آب شیمیایی چاه‌های آب‌کشی به کار برده شد. بهتر بود که برای اندازه‌گیری ویژگی‌های آب‌شیمی از چند چاه مشاهده‌ی نمونه‌برداری شود، اما این کار به دلیل محدودیت‌ها ممکن نشد، و چاه‌های آب‌کشی موجود در شرایطی که خاموش یا رها شده بود به کار برده شد. با کنار گذاشتن این محدودیت، نتیجه‌ی به‌دست آمده اعتبار زیادی دارد. نقشه‌ی بلندی تراز ایست‌آبی نشان داد که به علت برداشت بیش‌از اندازه‌ی تغذیه، و نبود تعادل تراز آب زمین‌شناسی در آبخوان مهارلو، بلندی تراز ایست‌آبی در پهنه‌ی وسیعی از آبخوان، پایین‌تر از بلندی کف دریاچه است، و در نتیجه شرایط شور شدن آب چاه‌ها نه تنها به علت نفوذ آب شور و اختلاف چگالی آب شور و شیرین، بل که ورود آب شور دریاچه به دلیل شیب معکوس آبی و ورود آب دریاچه نیز است. بنابراین برای بررسی دامنه‌ی نفوذ آب شور به درون آبخوان، و منطقه‌بندی کردن شوری آب روش‌هایی که بیش‌تر برپایه‌ی ویژگی‌های شیمیایی و غلظت یون‌ها (نمودار تکامل آب‌شیمیایی آب، نمودار استیف و نسبت یون کلرید به برومید) است به کار برده شد. بررسی دگرگونی ژرفایی قابلیت هدایت الکتریکی ستون آب چاه‌ها در ۷ دوره‌ی دوماهه نشان داد که پهنه‌ی آبخوان از دیدگاه شوری و دامنه‌ی نفوذ آب شور دریاچه به آبخوان به سه منطقه تقسیم می‌شود، محدوده‌ی از کنار



شکل ۱۱- دامنه‌ی نفوذ آب شور به آبخوان مهارلو بر حسب رخساره‌های گوناگون در نمودار HFE روی نقشه‌ی زمین‌شناسی، بهمن ۱۳۹۸.



شکل ۱۰- دامنه‌ی نفوذ آب شور به آبخوان مهارلو بر حسب رخساره‌های گوناگون در نمودار HFE روی نقشه‌ی زمین‌شناسی، مهر ۱۳۹۸.

استان فارس به خاطر حمایت مالی این پژوهش سپاس‌گزاری می‌کنیم.

سپاس‌گزاری از کمیته‌ی محترم تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌یی

- Andersen MS, Nyvang V, Jakobsen R, Postma D. 2005. Geochemical processes and solute transport at the seawater/freshwater interface of a sandy aquifer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(16): 3979–3994.
- Appelo CAJ, Postma D. 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2nd Edition, Balkema, Rotterdam. 673 p.
- Barlow PM, Reichard EG. 2010. Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeology Journal*, 18(1): 247–260.
- Davis SN, DeWiest RJM. 1966. *Hydrogeology*. John Wiley and Sons, New York, 463 p.
- Ghader F. 2009. Investigating changes in salinity relative to the depth to determine the boundary between saltwater and fresh water in a coastal aquifer located on the northwest margin of Maharlu Lake. M.Sc. Thesis, Shiraz University.
- Ghiglieri G, Carletti A, Pittalis D. 2012. Analysis of salinization processes in the coastal carbonate aquifer of Porto Torres (NW Sardinia, Italy). *Journal of Hydrology*, 432(1): 43–51.
- Giménez-Forcada E. 2010. Dynamic of seawater interface using hydrochemical Facieses evolution diagram. *Ground Water*, 48(2): 212–216.
- Giménez-Forcada E. 2019. Use of the hydrochemical facies diagram (HFE D) for the evaluation of salinization by seawater intrusion in the coastal Oropesa Plain: Comparative Analysis with the Coastal Vinaroz Plain, Spain. *Hydro Research*, 2(1): 76–84.
- Khosravi R, Zarei M, Bigalke M. 2018. Characterizing major controls on spatial and seasonal variations in chemical composition of surface and pore brine of Maharlu Lake, Southern Iran. *Aquatic Geochemistry*, 24(1): 27–54.
- Naseem S, Bashir E, Ahmed P, Rafique T, Hamza S, Kaleem M. 2018. Impact of seawater intrusion on the geochemistry of groundwater of Gwadar District, Balochistan and its appraisal for drinking water quality. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(1): 281–293.
- Pujari PR, Soni AK. 2008. Sea water intrusion studies near Kovaya limestone mine, Saurashtra coast, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 154(1–4): 93–109.
- Regional Water Company of Fars, Research Committee. 2021. Assessing the intrusion of saline water of Maharlu Lake to the coastal aquifers of the southeastern part and identifying their source of salinity, 119 p. (In Persian).
- Seddighi E. 2000. Investigating geological and sewage pollution entering the Shiraz Khoshk River and Maharlu Lake with emphasis on heavy metals pollution. M.Sc. Thesis, Shiraz University.
- Shi X, Wang Y, Jiao JJ, Zhong J, Wen H, Dong R. 2018. Assessing major factors affecting shallow groundwater geochemical evolution in a highly urbanized coastal area of Shenzhen City, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 184 (17): 17–27.
- Sridharan M, Senthil Nathan D. 2016. Hydrochemical facies and ionic exchange in coastal aquifers of puducherry region, India: Implications for Seawater Intrusion. *Earth Systems and Environment*, 1(5): 1–14.
- Tajul Baharuddin MF, Taib S, Hashim R, Zainal Abidin MH, Rahman NI. 2013. Assessment of seawater intrusion to the agricultural

- sustainability at the coastal area of Carey Island, Selangor, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(10): 3909–3928.
- Todd D, Mays L. 2005. *Groundwater hydrology*. 3rd Edition, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, 652 p.
- Werner AD, Bakker M, Post VEA, Vandenhede A, Lu C, Ataie-Ashtiani B, Simmons CT, Barry DA. 2013. Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges. *Advances in Water Resources*, 51(1): 3–26.
- Zak I, Gat JR. 1975. Saline waters and residual brines in the Shiraz-Sarvestan basin, Iran. *Chemical Geology*. 16(1): 179–183.



Watershed Management Research

VOL. 35, No.4, Ser. No: 137, Winter 2023, pp. 47 -62

DOI: 10.22092/WMRJ.2022.357963.1455

Research Paper



Evaluation of the Intrusion Extent of Maharlu Lake Saline Water into the Maharlu Coastal Aquifer Using Hydrochemical Parameters

Vahideh Sheykhi

Research Assistant, Central Laboratory, Shiraz University, Shiraz, Iran

Kamran Zare

School of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Mohammad Zare

(Corresponding Author)* Department of Earth Sciences, Shiraz University, Shiraz, Iran

Corresponding Author Email: zare@shirazu.ac.ir

Received: 04 March 2022

Accepted: 21 June 2022

Abstract

The management of freshwater resources in the coastal aquifers of salt lakes requires understanding the dynamics of the flow system, geochemical evolution, etc. The salinity of coastal aquifers is mainly due to direct saltwater intrusion, or is associated with complex geochemical interaction of lake and Ground water. The purpose of this study is to investigate the extent of intrusion and entry of saline water of Maharlu Lake into the coastal aquifer of the Maharlu aquifer, employing hydrochemical parameters and delineating the chemical evolution of its groundwater. The information used in this study includes the water level fluctuations and spatial, depth, and temporal changes in water salinity, and the chemical composition of the aquifer groundwater. For this purpose, several methods including water table maps and salinity changes, diagram of hydrochemical evolution of water, Stiff diagram, and chloride to bromide ions ratio have been used. According to the results obtained in the whole study period (February 1997 to February 1998), the water table elevation of a large area of the aquifer is lower than the elevation of the lake floor and, therefore, the Lake saline water flows into the aquifer under the reverse hydraulic gradient. Hence, in addition to the normal phenomenon of saline water intrusion, which occurs due to density gradients, aquifer salinization is also strongly influenced by the entry of saline water under the influence of hydraulic gradients. Based on the results of this study, the aquifer in terms of salinity and the effect of the Lake water on its salinity is subdivided into three zones, including; an area that starts from the lake margin up to a maximum distance of 1000 meters, which is completely affected by the entry of saline lake water, an area starts from 1000 meters to about 1500 meters as a middle area affected by both phenomena and the area from 1500 meters to about 2200 meters, located in the foothills of the southern karst boundary, the alluvial feeding area of the aquifer, which its water quality is relatively suitable for agriculture.

Keywords: Density gradient, geochemical evolution, salt water intrusion