

# جمهوری اسلامی ایران

وزارت نیرو

شرکت سهامی مدیریت منابع آب ایران

شرکت سهامی آب منطقه ای فارس

کمیته تحقیقات

## خلاصه گزارش طرح

ارزیابی دامنه نفوذ آب شور دریاچه مهارلو به آبخوان‌های ساحلی بخش جنوب شرقی و تشخیص منشأ شوری آنها

سازمان مجری: دانشگاه شیراز

پژوهشگر: دکتر محمد زارع

### مقدمه

در بسیاری از مناطق ساحلی، آب زیرزمینی به عنوان مهمترین منبع تأمین آب مورد نیاز مصارفی همچون کشاورزی، شرب و صنعت می‌باشد. به طور معمول منابع آب شیرین این نواحی در معرض تداخل و نفوذ آبهای شور دریا یا دریاچه مجاور قرار دارند. تداخل و نفوذ آب شور (Saltwater Intrusion) به دلیل اختلاف چگالی آب شیرین زیرزمینی و آب شور مجاور می‌باشد. از طرفی در شرایطی که به علت برداشت بیش از حد تغذیه به آبخوان، افت شدید در سطح ایستابی ایجاد گردد، بطوریکه ارتفاع سطح ایستابی پائین تر از ارتفاع سطح آب شور قرار گیرد، آب شور تحت گرادیان هیدرولیکی به داخل آبخوان بصورت جانبی یا عمودی انتقال می‌یابد. این امر موجب تخریب شدیدتر کیفیت آب آبخوان میگردد.

پرداختن به مساله نفوذ آب شور در مناطق ساحلی بویژه در مواردی که با رشد سریع برداشت از چاهها مواجه می‌باشیم به لحاظ مدیریت برداشت از آبخوان ضروری است. مدیریت منابع آب شیرین در آبخوانهای ساحلی نیازمند شناخت دینامیک سیستم جریان و تکامل ژئوشیمیایی آب زیرزمینی می‌باشد. از طرفی، شناسایی تیپ شیمیایی آب، رده بندی آب برای مصارف مختلف و ارزیابی مقدار آب زیرزمینی قابل دسترس نیز سودمند می‌باشد. شورشدن آب چاه‌های پمپاژ در مناطق ساحلی، معمولاً و مستقیماً به دلیل پدیده نفوذ و یا انتقال آب شور رخ میدهد، مدیریت کیفیت آب پمپاژ شده از یک چاه در صورتیکه کاهش کیفیت در اثر پدیده نفوذ و up coning به تنهایی باشد با مدیریت مقدار و مدت پمپاژ قابل انجام است. اما در صورتیکه کاهش کیفیت به دلیل حرکت آب شور از دریاچه در اثر گرادیان هیدرولیکی معکوس که در سطح وسیعی از آبخوان ایجاد شده است باشد، مستلزم مطالعه بیلان و انطباق دادن مقدار کل برداشت از چاه‌ها با مقدار تغذیه به آبخوان می‌باشد. در عین حالیکه از نظر نباید دور داشت که تغییر کیفیت آب آبخوان شامل فرآیندهای پیچیده ژئوشیمیایی از جمله برهمکنش آب و خاک و ورود آلاینده‌های انسانزاد نیز می‌باشد. بطورکلی هدف از این مطالعه شناخت سازوکار و دامنه نفوذ آب شور در آبخوان‌های حاشیه دریاچه مهارلو و بصورت موردی مطالعه آبخوان مهارلو به عنوان بزرگترین آبخوان حاشیه دریاچه می‌باشد.

## متن اصلی

-منطقه مورد مطالعه و مطالعات پیشین

مطالعه حاضر در حوزه آبخیز شیراز-سروستان و در اطراف دریاچه شور مهارلو انجام شده است. عمق دریاچه کم، و بصورت فصلی بین ۰ تا حداکثر حدود ۴ متر تغییر می کند (بزرگترین طول متوسط آن حدود ۳۰ کیلومتر و عرض متوسط آن برابر با ۱۰ کیلومتر). در دو دهه گذشته خصوصاً دهه اخیر، به دلیل خشکسالی ها و کاهش حجم آب ورودی، این دریاچه در شرایط بحرانی قرار گرفته است. از طرفی شواهد زیادی وجود دارد که منابع آب زیرزمینی با نرخی بالاتر از تغذیه آبخوانهای اطراف در حال برداشت است. این شرایط منجر به کاهش سطح آب دریاچه گردیده و برخی از کشاورزان را ترغیب نموده که به حریم دریاچه تجاوز و سطح زمینهای کشاورزی خود را توسعه دهند.

سطح آب دریاچه در طول سال نوسان زیادی دارد، بطوریکه در زمستان تا اواسط بهار سطح آب بتدریج به حداکثر و سپس در اثر تبخیر از دریاچه، سطح آب کاهش یافته و تا اواخر تابستان به حداقل میرسد. بطور کلی در اثر تبخیر به تدریج شوری و در نتیجه چگالی آب افزایش مییابد و با اضافه شدن جریان های ورودی زمستانه و بهاره، آب رقیق میشود و چگالی کاهش مییابد. این پدیده در طول هر سال تکرار میگردد و منجر میشود که تعادل دینامیکی آب شور و شیرین برعکس یکدیگر عمل نماید و باعث پیچیده شدن ارزیابی دامنه نفوذ آب شور دریاچه گردد. از طرف دیگر برداشت بیش از حد آب از آبخوان توسط چاههای پمپاژ این پیچیدگی را افزایش میدهد.

اثرات و رفتار نفوذ آب شور در شرایط متعارف تعادل هیدرولیکی در سطح جهانی به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته است که بطور مثال میتوان به پژوهشهای (Post, 2005, Kinzelbach et al., 2003 Samsudin et al., 2008), Barlow and Reichard, 2010, Tajul Baharuddin et al., 2013 اشاره کرد. هرچند شوری آب زیرزمینی به طور کلی تحت تاثیر عواملی همچون جریان همرفتی ناپایدار آب شور، تبخیر از آبهای کم عمق و انحلال کانی های تبخیری ترکیب رسوبات، تبخیر و تعرق، ترکیب آب تغذیه شده، شرایط فصل تر و خشک می باشد. تبادل یونی یکی از مهمترین واکنش های شیمیایی است که در آبخوانهای ساحلی به علت تفاوت ترکیب کاتیونی آب دریاچه و آبخوان اطراف رخ می دهد این مکانیزم ها در بخش های مختلف یک آبخوان ساحلی متفاوت می باشد (Anderson et al 1988; Backalowicz 1944; Apello and Postma 2005; Barlow, 2010). جهت مدیریت صحیح آبخوان های ساحلی ضروری است منشأ و مکانیزم افزایش شوری در این نوع آبخوانها توسط روش های مختلف از جمله: بکارگیری آنالیزهای هیدروژئوشیمیایی، ایزوتوپهای محیطی، و همچنین روشهای ژئوفیزیک و مدل سازی بار هیدرولیکی انجام پذیرد (Werner et al., 2013).

در رابطه با دریاچه مهارلو و آبخوانهای اطراف آن مطالعاتی که انجام گرفته است عمدتاً در رابطه با علل شوری دریاچه و آلودگی های آن می باشد که به اختصار به چند مورد اشاره می شود؛ بر اساس مطالعات انجام شده توسط Gat و Zak در سال ۱۹۷۵، مهمترین منابع ایجاد شوری در دریاچه مهارلو شامل این موارد می باشد: تبخیر شدید از سطح آب دریاچه، وجود گنبد نمکی سروستان و چشمه های نمکی آن که این نمک ها با جریان سطحی شسته شده و به سمت دریاچه منتقل می شود، شوری رودخانه سلطان آباد که به دریاچه می ریزد. به علاوه چشمه های شور حاشیه دریاچه نیز منجر به ایجاد شوری در دریاچه مهارلو می شود (زیرک باش، ۱۳۸۵). همچنین وجود سازندهای رازک و هرمز از عوامل دیگر شوری دریاچه محسوب میشوند. سمیعی در سال ۱۳۷۹ تغییرات سطح آب دریاچه مهارلو و تأثیر آن بر منابع آبی مجاور را مورد بررسی قرار داد. او به منظور بررسی تغییرات ۱۸ ساله سطح آب دریاچه مهارلو از تصاویر ماهواره ای در فروردین و شهریور استفاده کرد. سپس تأثیر تغییرات سطح آب این دریاچه را بر سطح ایستابی و هدایت الکتریکی منابع آبی اطراف مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. او به منظور شبیه سازی اثر تغییر کاربری بر میزان رواناب، از مدل SWAT استفاده کرده و میزان رواناب خروجی حوزه را شبیه سازی کرد. او با بررسی تصاویر ماهواره ای نشان داد ضمن وجود نوسان در مساحت دریاچه، روند کلی کاهشی در مقدار آن وجود دارد. او همبستگی آماری معنی دار میان سطح آب دریاچه و سطح آب چاههای شرق آن پیدا کرد. اما در چاههای غرب دریاچه فقط یک چاه که کمترین فاصله با دریاچه را داشت همبستگی معنی دار با آب دریاچه نشان می داد. صدیقی (۱۳۷۸) آلودگیهای زمین شناسی و فاضلاب ورودی به رودخانه خشک و سپس ورودی به دریاچه مهارلو را مورد ارزیابی قرار داد. ایشان از رودخانه سلطان آباد در محل ایستگاه پل فسا، چشمه های شور در گنبد نمکی سروستان، چشمه برم دلک و چشمه برم شور و همچنین تعدادی نقطه درون دریاچه در فصل تر و خشک نمونه برداری نمود. این نمونه ها از نظر فلزات سنگین و آلودگی های شیمیایی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان دادند نمک و آب دریاچه مهارلو آلوده به فلزات سنگین و کلیفرم می باشد و آلودگی ها منشأ انسانزاد دارند. قادر و زارع در سال ۱۳۸۷ با مطالعه بر روی چاههای حاشیه شمال شرقی دریاچه مهارلو به این نتیجه رسیدند که آب با

حرکت در جهت جریان از ارتفاعات به سمت دریاچه، به طور طبیعی مواد جامد بیشتری را در خود حل کرده و مقدار هدایت الکتریکی آن افزایش می یابد. اما در چاههای نزدیک به دریاچه افزایش هدایت الکتریکی ناشی از نفوذ آب شور دریاچه به آبخوان، بیشتر خواهد بود و مقدار هدایت الکتریکی در آنها با فاصله از چاهها نسبت عکس دارد.

مواد و روش ها

در این مطالعه ابتدا داده های مدل رقومی ارتفاعی زمین پروژه (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) جهت بررسیهای بعدی استخراج، و در محیط GIS پردازش، و مدل رقومی ارتفاعی (DEM) حوزه شیراز سروستان تهیه و محدوده دریاچه مهارلو در حوزه آبخیز شیراز- سروستان بر روی نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰،۰۰۰ سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور مشخص گردید (شکل الف). با بررسی نقشه DEM، پائین ترین ارتفاع کف دریاچه ۱۴۶۱ متر مشخص، و بر اساس بالاترین داغ آب مشاهده شده صحرائی، منطبق بر کانتور بسته ۱۴۶۵ به عنوان حد نهایی توسعه آب دریاچه در این مطالعه در نظر گرفته شد و عمق حداکثر دریاچه برابر با حدود ۴ متر برآورد گردید. با استفاده از نقشه DEM، کانتور ارتفاعی ۱۴۶۵ استخراج و بر روی نقشه زمین شناسی رسم گردید (شکل الف). بررسیهای صحرائی نشان میدهد که کلیه مناطق داخل این کانتور خصوصیات دریاچه شور، رسوبات دریاچه ای و پلایا را دارد. اراضی آبخور آبخوان های اطراف دریاچه با استفاده از نقشه توپوگرافی و Google Earth مشخص، و رمز آنها نسبت به کانتور ۱۴۶۵ دریاچه در محیط GIS رسم گردید. بر این اساس به غیر از دو آبخوان شیراز و سروستان، تعداد ۸ آبخوان دیگر در اطراف دریاچه وجود دارد. موقعیت این آبخوانها در شکل اب نشان داده شده است و با استفاده از اطلاعات آماربرداری در دسترس آب منطقه ای فارس موقعیت منابع آب این آبخوانها بصورت Point map در محیط GIS تهیه گردید. رمز آبخوانها و موقعیت چاههای بهره برداری در هر آبخوان به طور جداگانه بر روی نقشه Google Earths پیاده و ارائه گردیده است. قابل ذکر است که زمینهای تحت کشت برخی از آبخوانها پایین تر از کانتور ۱۴۶۵ قرار گرفته و بعبارت دیگر بنظر میرسد بخشی از سطح دریاچه در زمانهاییکه آب دریاچه پسروی طولانی دارد، توسط کشاورزان کشت و توسط چاههای دورتر از دریاچه آبیاری میگردد.

از میان ۸ آبخوان فوق الذکر آبخوان مهارلو به عنوان بزرگترین آبخوان جهت ادامه مطالعات انتخاب گردید. بدین منظور تعدادی از چاه های پمپاژ واقع در طول ۷ مسیر عمود بر ساحل دریاچه (پروفیل های A، B، C، D، E، F و G) جهت مطالعه انتخاب (شکل ج) و نسبت به اندازه گیری پارامترهای فیزیکی، شیمیائی و ایزوتوبی آب در عمق لایه آبدار در هر ۲ ماه یکبار و در ۷ دوره (بهمن ۱۳۹۷- بهمن ۱۳۹۸) اقدام گردید.

رسم نقشه های سطح ایستابی با استفاده از اندازه گیری ارتفاع چاه و عمق سطح آب آنها در ۵ دوره (اندازه گیریهای تیر و مهر ۹۸ به علت روشن بودن چاهها، در بررسیهای تراز سطح آب حذف شدند) نشان داد که ارتفاع سطح ایستابی در سطح وسیعی از آبخوان پائین تر از ارتفاع کف دریاچه میباشد و نتیجتاً شرایط شور شدن آب چاه ها تنها به علت نفوذ آب شور و اختلاف چگالی نمیشد و شرایط هیدرودینامیکی سفره با شرایط متعارف تعادل هیدرولیکی نفوذ آب شور منطبق نیست. لذا جهت بررسی دامنه نفوذ آب شور به داخل آبخوان و منطقه بندی شوری آب از روشهای رده بندی تیپ آنها، عمدتاً بر مبنای خصوصیات شیمیائی و غلظت یون ها استفاده گردید. روشهای بکار برده شده شامل موارد دیگرام تکامل رخساره های هیدروشیمیایی (HFE)، استیف، نسبت کلر به مجموع آنیونها، نسبت کلر به برم، تعیین درصد اختلاط، رابطه غلظت کلر با ایزوتوپ اکسیژن ۱۸ و خوشه بندی به روش آنالیز آماری میباشد.

### نتایج و دستاوردهای حاصل از تحقیق

تغییرات روند هدایت الکتریکی بصورت تغییرات عمقی، مکانی و زمانی در نقاط واقع در ۷ پروفیل مورد بررسی قرار گرفت.

-تغییر عمقی هدایت الکتریکی

بررسی تغییرات عمقی و لایه بندی عمقی آب با استفاده از دستگاه آکوامستر نشان داد که در منطقه نزدیک به ارتفاعات آهکی، لایه بندی عمقی آب از لحاظ میزان شوری وجود ندارد. با توجه به اینکه میزان هدایت الکتریکی در این منطقه پایین بوده و به نوعی منطقه تغذیه آبخوان محسوب می شود، منابع شوری احتمالی در کاهش کیفیت آب این منطقه تاثیر نداشته و زبانه نفوذ آب شور در این منطقه گسترش نیافته است. در منطقه میانی آبخوان (۶۰۰ متری تا ۹۰۰ متری از کنار دریاچه) در تعدادی از چاهها لایه بندی شوری و افزایش شوری با افزایش عمق در برخی موارد به بیش از ۲۰۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر مشاهده شد. با توجه به فاصله و پراکندگی این نقاط، میتوان تا حدودی محدوده اینترفیس را در این فاصله فرض نمود. بعبارت دیگر منطقه قبل از این محدوده به طرف دریاچه، منطقه ای است که صرفاً آب شور دریاچه بطور کامل به آبخوان نفوذ نموده و محدوده بعد از این، منطقه ای است که چاههای آن تحت تاثیر شوری دریاچه قرار نمیگیرند. از طرفی در منطقه نزدیک به دریاچه نیز

لايه‌بندی مشاهده نشد. این چاهها در مجاورت دریاچه بوده و مقدار شوری برخی از آنها بسیار بالا می‌باشد. طبق بررسی‌های انجام شده عمق اغلب این چاهها بسیار کم بوده و این احتمال وجود دارد که طبق تجربه کشاورزان و تجربه افراد بومی، در زمان‌های قبل که آبخوان در حال تعادل بوده، چاه به نحوی حفر شده که عمق آن به مرز تداخل آب شور و شیرین نرسد.

- تغییر مکانی هدایت الکتریکی

مقایسه هدایت الکتریکی، در پهنه آبخوان و مقایسه نقشه تغییرات ماههای بهمن ۹۷ و اردیبهشت ۹۸ نشان می‌دهد که مقدار شوری در شمال شرق محدوده نسبت به سایر دوره‌های اندازه‌گیری افزایش داشته است. اما بخش جنوبی از این روند تبعیت نمی‌نماید. مقدار شوری در شمال شرق دریاچه در ماه‌های بعد از بهمن ۹۷ به علت شروع روند کاهش بارندگی افزایش داشته است، هر چند که بارش‌های شدید فروردین ۹۸ تا حدودی باعث کاهش شوری شده است ولی با شروع فصل خشک و کاهش بارندگی‌ها و شروع به کار چاههای کشاورزی و اضافه برداشت از آبخوان تشدید شوری در این بخش اتفاق افتاده است.

نقشه هم‌تغییر هدایت الکتریکی بهمن ۹۷ و بهمن ۹۸، نشان داد که این تغییرات در این دوره زمانی از منفی ۱۴۶۰ تا ۷۶۰۰ میکروزیمنس بر سانتیمتر می‌باشد. بر اساس این نقشه مناطق جنوب شرقی و شمال غربی افزایش و مناطق میانه جنوبی در بهمن ۹۸ کاهش شوری داشته‌اند. با توجه به تغییرات کمتر در میانه جنوبی میتوان نتیجه‌گیری نمود که این بخش که نزدیکتر به تشکیلات کارستی است، بیشترین نرخ تغذیه آبخوان را به عهده دارد. بررسی تغییرات زمانی هدایت الکتریکی آب در نقاط پروفیل‌های ۷ گانه نسبت به فاصله از کانتور ۱۴۶۵ متر در لبه دریاچه و در گام‌های نمونه برداری رسم گردید (به عنوان مثال شکل ۲ برای پروفیل A). بطور کلی با توجه به نتایج حاصل از بررسی‌های هدایت الکتریکی در بالا منطقه بندی و رده بندی نمونه‌های آب تلویحاً به صورت زیر ارائه میگردد:

آبخوان مهارلو به سه منطقه تقسیم میگردد. هر چند مرز این تقسیم بندی در بخشهای مختلف آبخوان کمی متغیر است و بر حسب مقدار پمپاژ، خصوصیات خاک، نوع کشت باغ یا زراعت یکساله، نزدیک بودن به کوهپایه، پیشروی دریاچه و ... با ارقامی که در تقسیم بندی زیر آمده است فرق میکند. این تقسیم بندی شامل:

- ۱- منطقه نزدیک به دریاچه تا فاصله حدود ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ متری که در بخش‌های مختلف متغیر است و در اثر گرادیان هیدرولیکی معکوس (ارتفاع کف دریاچه بالاتر از سطح ایستابی آبخوان) آب شور دریاچه وارد آبخوان میگردد و آب زیر زمینی دارای هدایت الکتریکی بالا و شور است. هر چند این منطقه، با توجه به شواهدی از جمله تعدادی چاه کم عمق متروکه نشان از این دارند که در زمانهای قبل که برداشت از آبخوان در حال تعادل با تغذیه آن بوده است، سطح ایستابی بالاتر از ارتفاع دریاچه بوده و کم عمق بودن چاه‌ها نیز نشان میدهد که کشاورزان با تجربه‌ای که بدست آورده بوده‌اند، عمق چاه را تا بالاتر از اینترفیس آب شور و شیرین حفر نمیکرده‌اند.
- ۲- منطقه بینابینی (میانی یا اینترفیس) که هدایت الکتریکی و شوری آب بتدریج کاهش می‌یابد تا محدوده‌ای که بعد از آن تقریباً ثابت میماند. این محدوده بین منطقه قبلی تا فاصله حدود ۱۵۰۰ متر قرار دارد.
- ۳- محدوده نزدیک به مرز تغذیه از سازند‌های آهکی جنوبی و جنوب شرقی که دارای کیفیت نسبتاً خوب و ثابت است.

به منظور تایید بررسی دامنه نفوذ آب شور به داخل آبخوان و تعیین دامنه و منطقه بندی شوری آب تقسیم بندی فوق‌الذکر با استفاده از نتایج آنالیزهای شیمیایی به چند روش شامل دیاگرام استیف، نسبت کلر به مجموع آنیونها، نسبت کلر به برم، تعیین درصد اختلاط، رابطه غلظت کلر با ایزوتوپ اکسیژن ۱۸، خوشه بندی به روش آنالیز آماری و دیاگرام تکامل رخساره‌های هیدروشیمیایی (HFE) نیز استفاده گردید که در گزارش اصلی به تفصیل بیان گردیده است. در ادامه خلاصه‌ای از روش دیاگرام HFE آورده می‌شود.

- رده بندی آب آبخوان مهارلو با استفاده از دیاگرام HFE

روشهای ذکر شده قبلی امکان شناسایی دقیق تکامل فاسیسه‌های شیمیایی آب در حالتی که آب شیرین تغذیه شده به آبخوان باعث شیرین شدن نسبی آب شور آبخوان (Freshening) و یا نفوذ آب شور به داخل آب شیرین آبخوان (Intrusion) شود را ندارند. چرا که "آب شیرین شور شده" و یا "آب شور شیرین شده علاوه بر پدیده اختلاط (Mixing) تحت تاثیر دو فرآیند تبادل یونی مستقیم (به طرف راست) و تبادل یونی معکوس (به طرف چپ) نیز مطابق رابطه زیر قرار میگیرند.



بنابراین در مطالعات مربوط به شورشیدن یا شیرین شدن آب زیرزمینی در نظر گرفتن هر سه پدیده با هم اهمیت دارند. Gimenez-Forcada, (2010) دیاگرامی ارائه داده است که در بررسی نفوذ و شیرین شدن آب زیر زمینی هر سه پدیده را مد نظر قرار میدهد.

شکل ۳ دیاگرام HFE را در محدوده های نفوذ (Intrusion) به زیرمحدوده های نفوذ  $I_1$  تا  $I_4$  و محدوده های شیرین شدگی (Freshening) را به زیرمحدوده های شیرین شدگی  $f_1$  تا  $f_4$  نشان میدهد. اولین زیرمحدوده ها ( $f_1$  یا  $I_1$ ) برای هر محدوده دور ترین رخساره های مرزی را نشان می دهند که حد نهائی منطقه بین دو جریان را تعریف میکنند و نشان دهنده مرز واکنش دینامیکی سفره آب و داخل شدن آب شور به آب شیرین و یا برعکس شیرین به شور در زمان های مختلف میباشد که می توان آن را شرایط تقابل بین دو جریان مخالف در نظر گرفت که برای "داخل" شدن به سفره رقابت می کنند و نماینده پویایی روند فرایند میباشد. در مقابل، رخساره های  $f_4$  و  $I_4$  نزدیکترین ارتباط را با اعضای نهائی آب شیرین یا آب شور (FW, SW) دارند. زیر رخساره های فرعی  $I_2$ ،  $I_3$ ،  $f_2$  و  $f_3$  نشان دهنده سطوح متوسط و بینابینی میباشند که معمولاً تبادل کاتیون در آنها بیشتر مشهود است. نمونه هایی که در محدوده آب شیرین قرار گرفته اند متعلق به فاز شیرین شدگی به حساب می آیند، هر چند آنها در محدوده نفوذ آب شور در آب شیرین باشند. به همین ترتیب، فرض بر این است که نمونه هایی که در محدوده آب شور قرار دارند به فاز نفوذ تعلق دارند، حتی اگر در فاز شیرین شدگی قرار بگیرند.

در شکل ۴ موقعیت نمونه های آب زیرزمینی آبخوان مهارلو را در دیاگرام HFE برای دو دوره مورد مطالعه مهر ۹۸ و بهمن ۹۸ نشان داده شده است. اکثر نمونه ها در محدوده اطراف خط اختلاط (محدوده های ۴، ۷، ۱۰، ۱۳) واقع شده اند که حاکی از اختلاط ساده یا بدون واکنشهای تبادل یونی است. در زمان نفوذ آب شور دریاچه، به سمت پائین و زیر خط افقی ۳۳/۳ درصد، یک افزایش اولیه شوری و تبادل معکوس Na/Ca رخ میدهد که با تیپ MixCa-Cl (محدوده ۱۲)، تکامل از محدوده ۹ به ۱۰، ۱۱ و ۱۲، مشخص میشود. حضور نمونه ها در محدوده ۱۱ و ۱۲ بیانگر رخساره های متأثر از تبادل کاتیونی معکوس (Na/Ca) میباشند. این تیپ از آب نهایتاً به سمت ترکیب شورابه (Na-Cl)، محدوده ۴، تکامل از ۱۲، ۸ به ۴، حرکت می کند. در فاز شیرین شدگی، به سمت چپ و بالای خط ۳۳/۳، فرایند تبادل یونی مستقیم به آرامی رخ میدهد و آب اقدام به جذب Na و پس دهی Ca می کند تا اینکه به رخساره Na-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>، محدوده ۱ میرسد (تکامل از محدوده ۴ به ۳، ۲ و ۱). قرارگیری برخی از نمونه ها در محدوده های ۷، ۹ و ۱۰ نشان میدهد که همپوشانی در خط اختلاط بین آب شور و شیرین به دلیل تبادل کاتیونی مستقیم رخ میدهد. بررسی موقعیت نمونه های آب در نمودارهای HFE در دو دوره مورد بررسی نشان میدهد که اکثر نمونه ها در دوره زمانی خشک (مهر ۹۸) و تر (بهمن ۹۸)، بدون تغییر و در نقاط مشترک دارای رخساره قبلی خود میباشند و این بیانگر عدم تأثیر چشمگیر تغییرات فصلی بر شیمی آب در دوره مورد مطالعه است.

بر اساس شکل ۳ و تعیین موقعیت نقاط در زیرمحدوده های نفوذ  $I_1$  تا  $I_4$  و زیرمحدوده های شیرین شدگی  $f_1$  تا  $f_4$  است. نقشه پهنه بندی آبخوان مهارلو برای مهر ماه و بهمن ماه ۹۸ در شکل ۵ رسم گردیده است. با توجه به اطلاعات راهنمای نقشه این شکل مشخص میگردد که دامنه نفوذ آب شور با رنگ قرمز در نزدیک دریاچه و به تدریج به طرف میانه آبخوان از شدت شوری کاهش یافته (بر روی نقشه رنگ قرمز به تدریج به رنگ زرد تبدیل میشود) و در نزدیک مرز جنوبی و ارتفاعات به آب شیرین تبدیل میشود (روی نقشه به رنگ آبی نزدیک میشود).

-نتایج آنالیز ایزوتوپی نمونه ها

ایزوتوپیهای پایدار نمونه های ارائه شده در شکل ۶ الف رسم شده و با خط آب بارش منطقه مهارلو (Maharlo Meteoric Water Line, MMWL) ارائه شده توسط مرکز تحقیقات آب ایران (۱۹۸۹) مقایسه شده اند. تمام نمونه ها در زیر خط MMWL قرار گرفته اند و معادله خط روند آنها  $\delta H = 4.82 \delta O - 4.84$  است. مقایسه شیب کمتر این خط در مقایسه با شیب MMWL ( $\delta H = 8.11 \delta O + 22$ ) نشان می دهد که نمونه های آب زیرزمینی مهارلو غنی شده اند. غنی شدگی عمدتاً می تواند اختلاط با آب غنی شده دریاچه در معرض تبخیر دوره ای شدید باشد. با توجه به این که شیب خط نمونه های اندازه گیری شده مهارلو (۴/۸۱)، میتوان نتیجه گیری نمود که شور شدن آب سفره مهارلو نیز به علت نفوذ آب شور دریاچه مهارلو است. اما از آنجا که اثر نفوذ آب دریاچه به تدریج کاهش می یابد، هر چند تا فاصله حدودی بیش از نیمه فاصله نسبت به خط ساحلی اتفاق می افتد، و در بررسی انجام شده به روش دیاگرام HFE (مبحث قبلی) دامنه نفوذ مشخص گردید، برای تأیید آن نتیجه گیری ها که در شکل های ۶ تا ۸ نشان داده شد، موارد زیر مورد بررسی قرار میگیرد.

-بررسی انطباق نتایج ایزوتوپی با نتایج نمودار HFE

شکل ۶ مربوط به نمایش ایزوتوپی نمونه هائی میباشد که در رده f4 دیاگرام HFE قرار دارند و در منطقه ای دور از دریاچه و نزدیک به منطقه تغذیه قرار گرفته اند. همانطور که انتظار داریم شیب خط ترند آنها (۶/۴۳) در حدود شیب خط نمونه های آبخوان عمقی (DGW) برم شورا است که تحت تأثیر و نفوذ آب شور قرار نگرفته اند. در صورتیکه نمونه های f3 نیز به نمونه های f4 اضافه شود (شکل ۷)، از آنجا که نمونه های f3 به مقدار کمی تحت نفوذ شوری دریاچه دارای کیفیت پائین تری نسبت به f4 میباشند شیب خط آنها به ۵/۶۶ کاهش مییابد. از طرفی نمایش نتایج ایزوتوپی نمونه هائی که در رده i4 قرار دارند در شکل ۸ ارائه شده است. شیب خط ترند آنها نسبت به f4 بسیار کمتر (۲/۹) از رده f4 بوده و نشان میدهد که این نمونه ها به شدت تحت تأثیر نفوذ آب دریاچه میباشند. بررسی نقاط مربوط به رخساره های دیگر به علت تعداد کم نقاط و یا واقع شدن آنها در منطقه انتقالی (Transition Zone) و یا تغییرات نسبتاً سریع فصلی نتایج قابل استنادی را ارائه نمیدهند.

در پایان با توجه به انطباق نتایج بررسی ایزوتوپی نمونه های آب چاه های آبخوان مهارلو با بررسی از روش دیاگرام HFE با اطمینان خوبی شکل ۵ دامنه نفوذ آب شور دریاچه را نشان میدهند. لازم به ذکر است که این شکل ها نیز دارای مناطقی با تعداد کم اطلاعات رسم شده اند و در صورت لزوم میتوان نسبت به تکمیل کردن اطلاعات و برداشت نمونه های آب در این مناطق و انجام آنالیزهای لازم درجه اطمینان این نقشه ها را افزایش داد.

## تشکر و قدردانی

از کمیته محترم تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه ای استان فارس به خاطر حمایت مالی سپاسگزاری می نمائیم.

## References

- Giménez-Forcada E (2010) Dynamic of seawater interface using hydrochemical facies evolution diagram. *Ground Water* 48(2):212-216
- Pujari PR, Soni AK (2008) Sea water intrusion studies near Kovaya limestone mine, Saurashtra coast, India. *Environ Monit Assess* 154(1-4):93-109.
- Tajul Baharuddin M.F, Taib S., Hashim R., Zainal Abidin M.H., and Rahman N.I. 2013. Assessment of seawater intrusion to the agricultural sustainability at the coastal area of Carey Island, Selangor, Malaysia. *Arab J Geosci*, 6(10), 3909–3928.
- Todd, David & Mays, Larry (2005). *Ground water hydrology* New York, Argosy Publishing

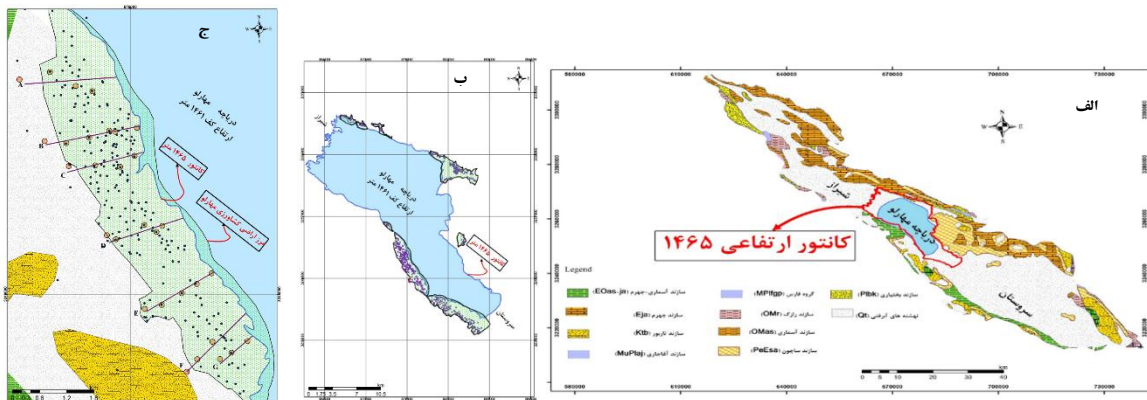
## Introduction

In many coastal areas, groundwater is the most important source of water supply for uses such as agriculture, drinking and industry. Normally, the freshwater resources of these areas are exposed to the intrusion and inflow of saline waters of the sea or the adjacent lake. Saltwater intrusion is due to the difference between the density of fresh water and the adjacent saline water. On the other hand, in conditions where, due to overexploitation of the aquifer recharge potential, a severe drop in the water table is created, so that the water table head is lower than the elevation of the saline water, and the saline water transfers into the aquifer laterally or vertically due to the hydraulic gradient. This causes more severe degradation of the aquifer water quality.

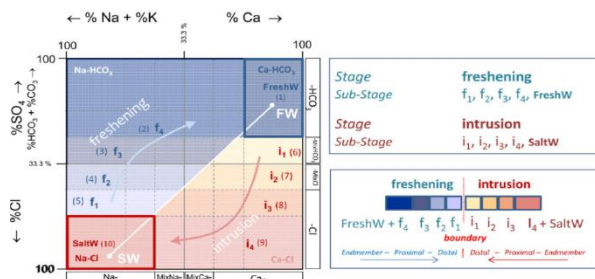
Addressing the issue of saline water intrusion in coastal areas, especially in cases where we are facing a rapid growth of pumping from wells, is essential in terms of the aquifer water management. Management of freshwater resources in coastal aquifers requires understanding of the dynamics of the flow system and the geochemical evolution of the groundwater. On the other hand, identifying the chemical type of water, classifying water for different uses and evaluating the amount of available groundwater is also useful.

Deterioration of water quality and elevating salinity of pumping water in coastal areas usually occurs directly due to the intrusion or transfer of saline water. Quality management of water pumped from a single well can be performed by managing the rate and duration of pumping, in case that the quality reduction is due to the intrusion phenomenon and upconing. However, if the increase of the salinity and under grading of the quality is due to the movement of saline water from the lake due to the inverse hydraulic gradient and creating drawdown in a large area of the aquifer, it is necessary to study the water balance and adapt the total amount of the wells discharge to the aquifer recharge. At the same time, it should not be overlooked that changes in aquifer water quality include complex geochemical processes such as the interaction of soil and water and the entry of anthropogenic pollutants.

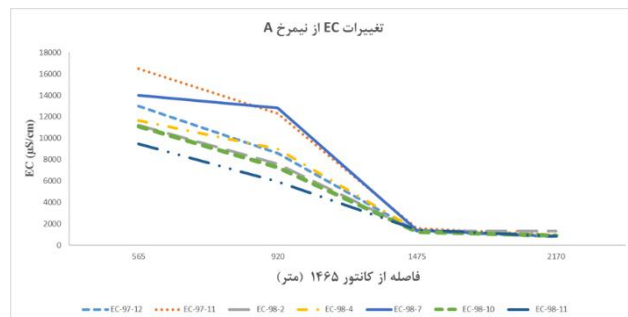
Overall, the purpose of this study is to understand the mechanism and the extent of the saline water movement and intrusion from the Maharlu Lake into the aquifers around it, and as a case study, the Maharlu aquifer, the largest aquifer around the Lake.



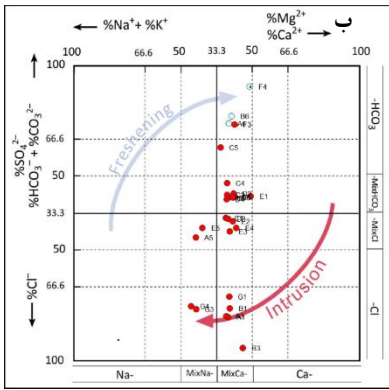
شکل ۱: الف) نقشه زمین شناسی حوزه شیراز-سروستان، موقعیت دریاچه مهارلو و کانتور دریاچه تا ارتفاع ۱۴۶۵ (ب) پیاده سازی موقعیت منابع آب آبخوانهای اطراف دریاچه مهارلو (ج) موقعیت ۷ مسیر پروفیل عمود بر خط ساحلی دریاچه در آبخوان مهارلو و چاههای منتخب



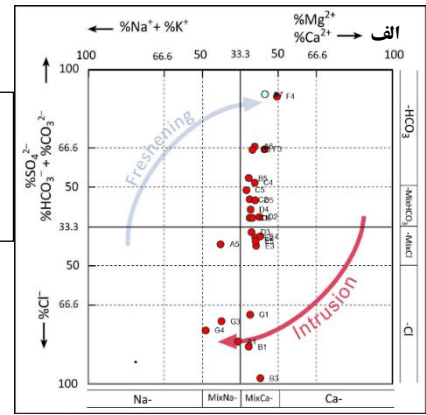
شکل ۳: دیاگرام تحولات رخساره های هیدروشیمیایی



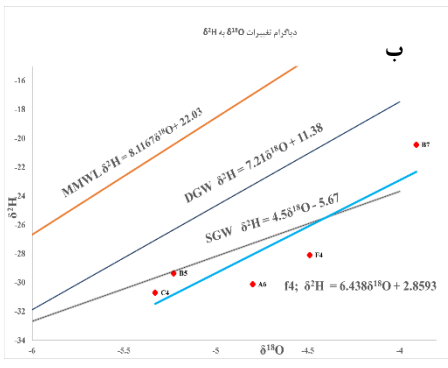
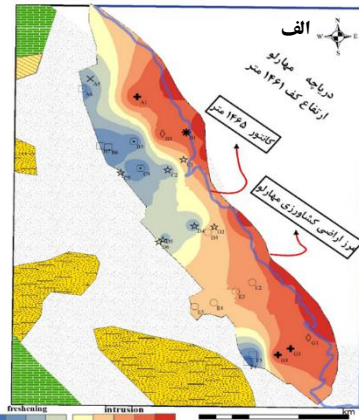
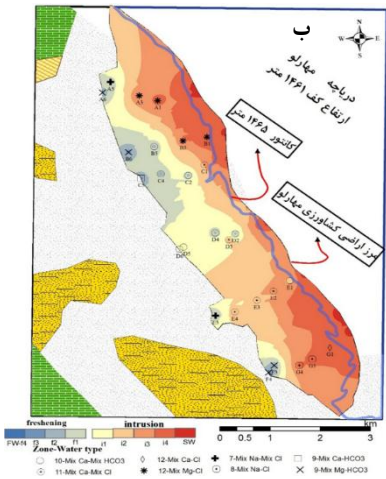
شکل ۲: تغییرات EC دوره های نمونه برداری آبخوان مهارلو نسبت به فاصله از کانتور ۱۴۶۵ در مسیر پروفیل A



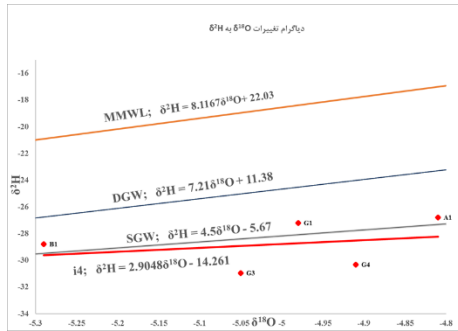
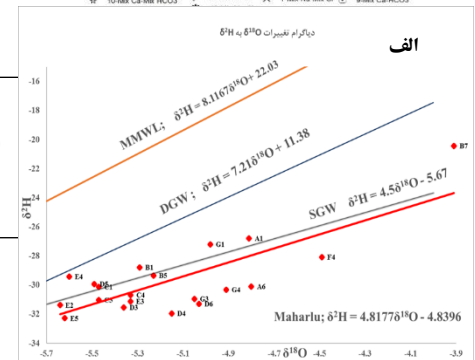
شکل ۴ توزیع و موقعیت نمونه های آب زیرزمینی آبخوان مهارلو بر دیاگرام تحولات رخساره های هیدروشیمیایی، الف (مهر ۹۸، ب) بهمن ۹۸



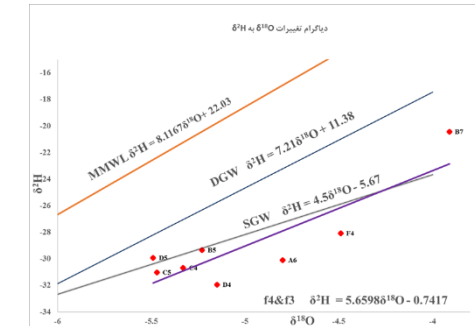
شکل ۵ دامنه نفوذ آب شور بر حسب رخساره های مختلف الف) در مهر ۹۸، ب) بهمن ۹۸



شکل ۶ دیاگرام نتایج تغییرات  $\delta^{18}O$  به  $\delta^2H$  در الف) تمام نمونه های آب مورد بررسی، ب) در نمونه های آب مربوط به رخساره f4



شکل ۸ دیاگرام نتایج تغییرات  $\delta^{18}O$  به  $\delta^2H$  در نمونه های آب مربوط به رخساره



شکل ۷ دیاگرام نتایج تغییرات  $\delta^{18}O$  به  $\delta^2H$  در نمونه های آب مربوط به رخساره