

مقدمه

با افزایش روز افزون جمعیت و توسعه جوامع بشری در دنیا، نیاز به تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت بیش از پیش افزایش یافته است. حدود بیش از ۷۰ درصد جمعیت جهان در مجاورت سواحل دریاها، دریاچه‌ها و یا منابع آب‌های سطحی قرار دارند. بیش از ۴۰ درصد آنها مستقیماً در سواحل دریاها، دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها زندگی می‌کنند [۳۴]. با افزایش جمعیت و نیاز بیش‌تر به آب شرب و بهداشت با کمیت و کیفیت مناسب، در طی ۳۰-۴۰ سال اخیر برداشت آب از آبخوان‌های ساحلی توسعه یافته و مشکلات نفوذ آب شور یا کاهش کیفیت در آبخوان‌های شیرین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل بسیاری از کشورها مانند آمریکا، چین، فیلیپین، اندونزی، مراکش، استرالیا و سایر کشورها است [۲۴، ۲۶، ۳۹]. در نواحی میانی و پایین‌دست استان مازندران ۶۳/۱ درصد از کل آب مصرفی به‌وسیله آب‌های زیرزمینی (چشمه‌ها و چاه‌ها) و ۳۶/۹ درصد از آب‌های سطحی تأمین می‌شود [۲۸]. با بهره‌برداری بی‌رویه و کاهش فشار پیژومتریک، تعادل هیدرولیکی آبخوان‌های ساحلی آب دریا برهم خورده و آب شور با شروع به پیشروی، این منابع را در معرض خطر آلودگی قرار داده است [۳۱]. از اهم عواملی که باعث تغییر کیفیت و شوری آب‌های زیرزمینی می‌گردند، برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، تغییر وضعیت هیدرو-اقلیمی، ساختارهای زمین‌شناسی ناحیه‌ای، هیدرولوژی و بالاخره اثر آب دریا بر آبخوان دشت‌های ساحلی قابل ذکر است [۲، ۱۱].

در شرایط طبیعی آب‌های شیرین زیرزمینی موجود در سفره‌های آبدار آزاد و یا تحت فشار ساحلی به دریا یا دریاچه‌ها تخلیه می‌شوند و خط تماس متحرکی بین آب‌های شیرین و شور به‌عنوان مرز مشترک ایجاد می‌گردد که حد تداخل^۴ نامیده می‌شود [۳۷]. مرز جدا کننده آب شور و شیرین به‌صورت منطقه باریکی به ضخامت حداقل چند متر می‌باشد که دو سیال عملاً در هم آمیخته و به آن منطقه پراکندگی می‌گویند. ضخامت این منطقه به عوامل متعددی مانند پدیده انتشار مولکولی^۵ (تفاوت چگالی دو محیط)، وجود جریان‌های آب شیرین زیرزمینی (اختلاف وزن مخصوص دو محیط)، بهره‌برداری از سفره‌های آب زیرزمینی و تغییرات فصلی سطح ایستابی و جزر و مد دریا بستگی دارد [۱۷].

بهره‌برداری سنگین از آبخوان‌های ساحلی بر روی گرداندن

مقایسه روش‌های ژئوالکتریک و ژئوالکترومغناطیس در تعیین حد تداخل آب شور و شیرین در آبخوان‌های غرب و شرق بابلسر

محمد گلشن^۱، اباذر اسمعیلی‌عوری^۲ و کیوان خرمی^۳
تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۰

چکیده

آب‌های زیرزمینی از مهم‌ترین و قابل اعتمادترین منابع آبی برای کشاورزی و شرب می‌باشند. در مناطق ساحلی به‌دلیل نفوذ آب شور دریا تعیین حد تداخل آب شور و شیرین برای ساکنین این مناطق از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. در این تحقیق خصوصیات آبخوان‌های ساحلی غرب و شرق بابلسر با استفاده از مطالعات ژئوالکتریک و ژئوالکترومغناطیس بررسی شد، که این روش‌ها از دقیق‌ترین روش‌های موجود در این زمینه می‌باشند. برای این منظور شش مقطع مطالعاتی عمود بر خط ساحلی در این مناطق انتخاب شدند، در هر مقطع در امتداد خط ساحلی، ابتدا ۱۰ نقطه مطالعاتی با فاصله‌های ۵۰ متری و سپس پنج نقطه مطالعاتی با فاصله‌های ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ متری انتخاب شدند. جهت تعیین حد تداخل آب شور با روش ژئوالکتریک از اطلاعات چاه‌های اکتشافی نیز استفاده شد. با توجه به اطلاعات مشاهداتی در برخی نقاط نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده نشان داد که روش ژئوالکترومغناطیس نسبت به روش ژئوالکتریک از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان داد که عمق تداخل آب شور و شیرین در نقاط مطالعاتی واقع در مقاطع غرب بابلسر نسبت به مقاطع شرق بابلسر بیشتر می‌باشد. به‌طور کلی با توجه به عمق‌های تداخل به‌دست آمده آسیب پیشروی آب شور در هر دو منطقه وجود دارد و لازم است با استفاده از عملیات مدیریتی از افزایش پیشروی آب شور در این مناطق جلوگیری شود.

کلید واژه‌ها: زمین‌شناسی، لایه‌های زمین، حد تداخل، نواحی ساحلی، دریای مازندران.

۱- دکتری آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۲- نویسنده مسئول و دانشیار گروه آبخیزداری، دانشگاه محقق اردبیلی، پست الکترونیک: esmaliouri@uma.ac.ir

۳- دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشگاه ارومیه

جدول ۱- مشخصات مکانی مقاطع انتخابی در محدوده مطالعاتی غرب بابلسر

Table 1. Sections characters in selected sections in West of Babolsar

| مقطع W3 Section W3 | | مقطع W2 Section W2 | | مقطع W1 Section W1 | | شماره Number |
|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------|
| Y (UTM) | X (UTM) | Y (UTM) | X (UTM) | Y (UTM) | X (UTM) | |
| 4062245.37 | 639139.68 | 4061815.62 | 637163.54 | 4061420.35 | 635309.25 | 1 |
| 4062200.29 | 639160.7 | 4061770.33 | 637184.27 | 4061373.64 | 635329.63 | 2 |
| 4062154.38 | 639176.84 | 4061724.44 | 637200.81 | 4061326.8 | 635346.42 | 3 |
| 4062107.28 | 639194.87 | 4061677.67 | 637218.32 | 4061277.7 | 635366.84 | 4 |
| 4062061.63 | 639214.36 | 4061632.52 | 637239.84 | 4061231.35 | 635382.3 | 5 |
| 4062015.87 | 639236.62 | 4061586.39 | 637260.97 | 4061184.2 | 635400.32 | 6 |
| 4061968.91 | 639255.53 | 4061538.37 | 637279.34 | 4061138.71 | 635419.54 | 7 |
| 4061920.24 | 639270.63 | 4061490.21 | 637294.97 | 4061086.28 | 635440.32 | 8 |
| 4061874.61 | 639294.68 | 4061444.48 | 637318.35 | 4061037.87 | 635458.11 | 9 |
| 4061821.44 | 639310.57 | 4061391.38 | 637334.41 | 4060986.96 | 635476.2 | 10 |
| 4061723.56 | 639349.08 | 4061293.46 | 637373.82 | 4060891.28 | 635517.35 | 11 |
| 4061535.67 | 639427.29 | 4061105.72 | 637452.49 | 4060703.35 | 635595.68 | 12 |
| 4061255.48 | 639524.83 | 4060825.66 | 637549.5 | 4060416.11 | 635692.24 | 13 |
| 4060873.75 | 639658.76 | 4060444.85 | 637682.38 | 4060039.47 | 635823.92 | 14 |
| 4059494.56 | 640007.47 | 4059109.59 | 637988.67 | 4058742.46 | 636207.39 | 15 |

هیدروژئوشیمی [۱۳]، غلظت کاتیون و آنیون [۳۰]، معادلات تجربی [۳۴]، مدل‌های کامپیوتری [۹] و ژئوالکترومغناطیس [۸] مطالعاتی انجام شده است ولی مطالعاتی با استفاده از روش ژئوالکتریک و ژئوالکترومغناطیس انجام نشده است که در این تحقیق به این موضوع پرداخته شده است و حد تداخل آب شور و شیرین در مناطق غرب و شرق بابلسر بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

جهت بررسی وضعیت آبخوان‌های ساحلی در محدوده‌های مطالعاتی غرب و شرق بابلسر خط ساحلی به طول ۴۰۰۰ متر انتخاب شد و در امتداد هر کدام از خط‌های ساحلی سه مقطع مطالعاتی عمود بر خط ساحلی تعیین شدند. فاصله بین این نقاط مطالعاتی در فاصله ۵۰۰ متری خط ساحلی ۵۰ متر و سپس ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ متر می‌باشند. میانگین بارندگی و درجه حرارت سالانه در این منطقه در طی دوره ۱۳۹۶-۱۳۳۲ به ترتیب ۸۸۸ میلی‌متر و ۱۶/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. موقعیت و مختصات نقاط مطالعاتی بر حسب سیستم مختصات متریک در شکل شماره ۱ و جدول‌های شماره ۱ و ۲ آورده شده است.

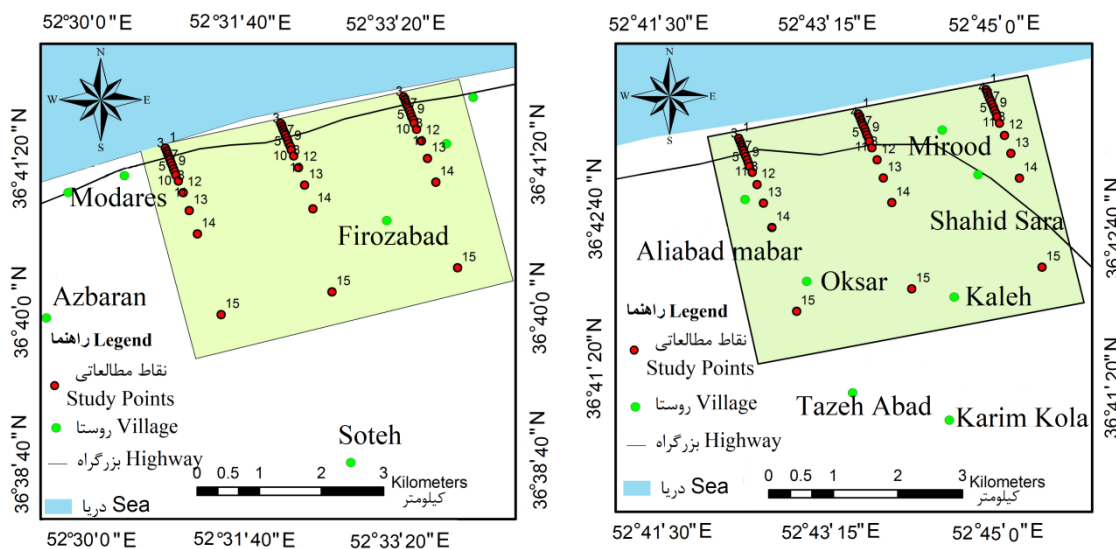
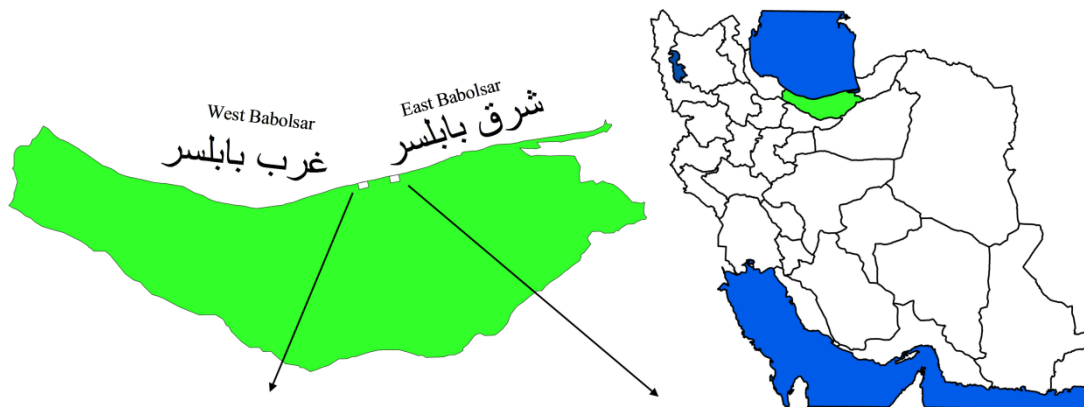
تعیین حد تداخل بین آب شور و شیرین در مقاطع مطالعاتی
برای تعیین حد تداخل در مناطق ساحلی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که در این تحقیق از تلفیق روش‌های نوین ژئوالکتریک و ژئوالکترومغناطیس برای این منظور استفاده شد. با توجه به نتایج

هیدرولیک تأثیر نموده و سبب می‌گردد تا حد تداخل آب شور و شیرین به سمت خشکی پیشروی کند که چنین پدیده‌ای با نام پیشروی آب شور مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۱، ۶]. آب شور دارای چگالی بیشتری می‌باشد و در زیر آب شیرین قرار می‌گیرد اگرچه در سیستم‌های چند لایه به دلیل وجود آب شور ممکن است آب شور در بالای آب شیرین قرار گیرد [۳۲].

گزارش اولیه درباره نفوذ آب شور دریا به سمت خشکی در سال ۱۸۵۵ توسط بردوایت [۵] منتشر گردید در آن توضیحاتی مختصر درباره ازدیاد شوری آب‌های پمپاژ شده از چاه‌های نواحی لندن و لیورپول انگلیس داده شده است. روش‌های مختلفی برای بررسی حد تداخل آب شور و شیرین ارائه شده است که اولین معادله در رابطه با تعیین حد تداخل آب شور به صورت مشترک توسط دو دانشمند به نام‌های گیبین [۱۵] و هرزبرگ [۱۹] ارائه شده است. سپس روش‌های دو بعدی و توسعه یافته‌تر توسط محققینی مانند گلور [۱۶]، بیر و داگان [۴]، جوسلین‌دجونگ [۲۱] و وروریچ [۳۸] ارائه شد.

با توجه به اهمیت تعیین حد تداخل آب شور و شیرین استفاده از روش‌های مطالعاتی دقیق‌تر مانند ژئوالکتریک و ژئوالکترومغناطیس در سال‌های اخیر توسعه یافته است و مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است [۳۶، ۲۲، ۲۴، ۷، ۲۰، ۳۹]. در داخل کشور جهت تعیین حد تداخل آب شور و شیرین از روش‌هایی مانند

1. Salt Water Intrusion



شکل ۱- آبخوان‌های ساحلی شرق و غرب بابلسر واقع در استان مازندران

Fig 1. The coastal eastern and western aquifers of Babolsar in Mazandaran province

جدول ۲- مشخصات مکانی مقاطع انتخابی در محدوده مطالعاتی شرق بابلسر

Table 1. Sections characters in selected sections in East of Babolsar

| مقطع E۳ | | مقطع E۲ | | مقطع E۱ | | شماره |
|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|--------|
| Section W3 | | Section W2 | | Section W1 | | Number |
| Y (UTM) | X (UTM) | Y (UTM) | X (UTM) | Y (UTM) | X (UTM) | |
| 4066004.76 | 656121.74 | 4065625.66 | 654145.52 | 4065249.38 | 652291.37 | 1 |
| 4065959.51 | 656142.73 | 4065579.84 | 654167 | 4065202.56 | 652311.52 | 2 |
| 4065913.68 | 656158.55 | 4065533.35 | 654182.76 | 4065155.54 | 652329.33 | 3 |
| 4065866.53 | 656176.11 | 4065486.61 | 654201.51 | 4065106.12 | 652348.61 | 4 |
| 4065820.76 | 656197.73 | 4065441.17 | 654221.36 | 4065060.37 | 652365.82 | 5 |
| 4065775.62 | 656218.3 | 4065395.13 | 654242.37 | 4065013.72 | 652382.37 | 6 |
| 4065727.09 | 656237.57 | 4065347.53 | 654262.12 | 4064967.68 | 652402.62 | 7 |
| 4065679.38 | 656252.93 | 4065299.42 | 654277.85 | 4064915.77 | 652422.47 | 8 |
| 4065633.66 | 656276.38 | 4065253.31 | 654301.37 | 4064866.29 | 652440.36 | 9 |
| 4065580.7 | 656292.14 | 4065200.59 | 654316.29 | 4064815.38 | 652458.64 | 10 |
| 4065482.42 | 656331.28 | 4065102.19 | 654356.42 | 4064720.95 | 652500.18 | 11 |
| 4065294.51 | 656410.31 | 4064915.25 | 654434.73 | 4064532.78 | 652577.28 | 12 |
| 4065014.35 | 656507.14 | 4064634.78 | 654531.94 | 4064245.96 | 652674.39 | 13 |
| 4064632.74 | 656640.47 | 4064253.56 | 654664.36 | 4063869.18 | 652805.19 | 14 |
| 4063254.72 | 656990.31 | 4062918.91 | 654970.62 | 4062571.26 | 653189.63 | 15 |

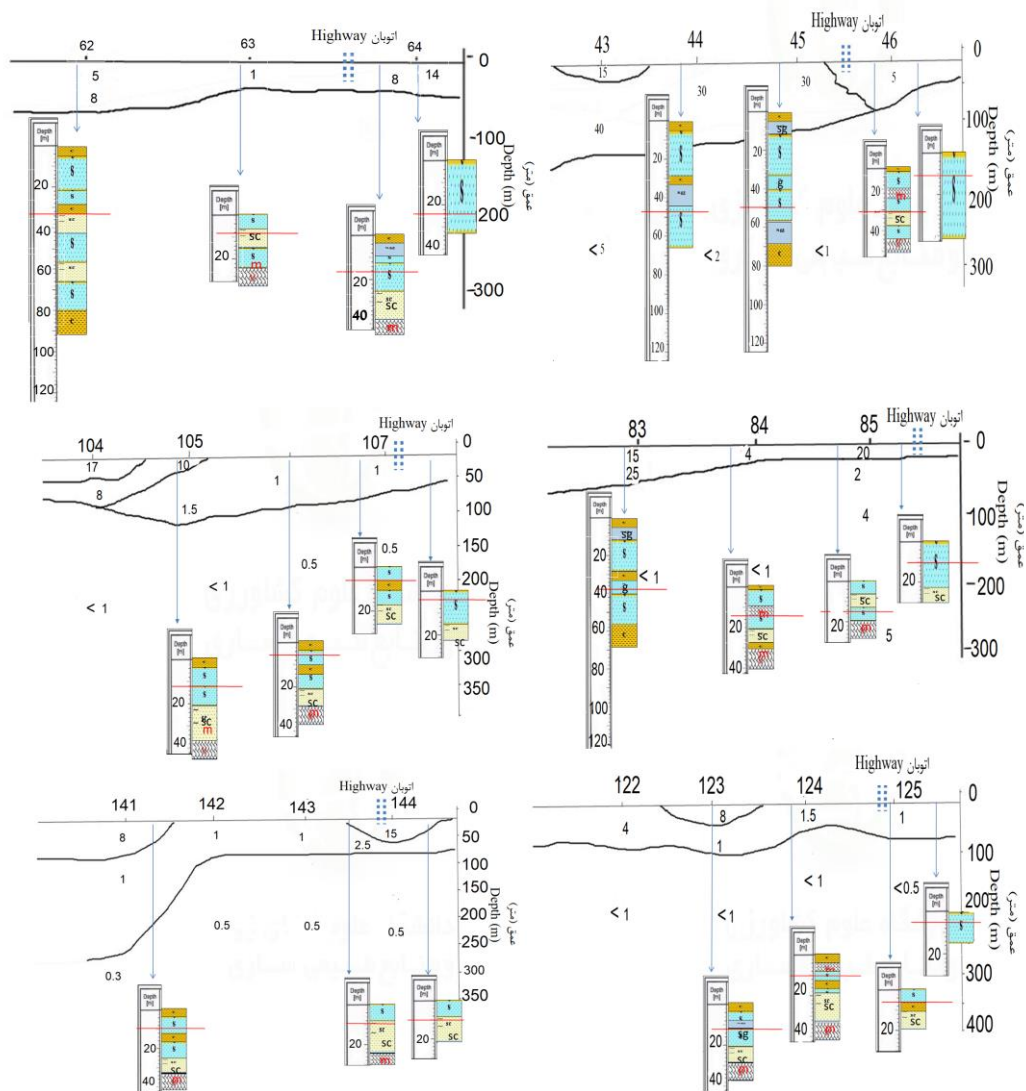
به شناخت بهتر آبخوان‌ها می‌نماید، که در صورت انجام صحیح، بسیاری از فاکتورهای مهم هیدروژئولوژیکی جهت انجام طرح‌های مختلف شناخت آب‌های زیرزمینی تعیین می‌شود. در مناطقی که دارای تعداد چاه‌های مشاهداتی کمتری می‌باشند استفاده از این روش حائز اهمیت بالایی می‌باشد و با استفاده از این مطالعات می‌توان خصوصیات آبخوان‌های آبرفتی از جمله ضخامت آبرفت، تغییر جنس و نوع دانه‌بندی، جنس و عمق سنگ کف، عمق تقریبی آب شور و شیرین و کیفیت شیمیایی را به دست آورد [۲۹]. جهت تعیین این پارامترها، نقشه‌های ژئوالکتریک مربوط به مقاطع مطالعاتی تهیه و اطلاعات تقریبی اولیه آماده‌سازی شد. مقاطعی که دارای مقاومت ویژه بالایی می‌باشند از لحاظ شرایط آب زیرزمینی کیفیت مناسبی دارند و با کاهش مقاومت ویژه احتمال وجود آب زیرزمینی کاهش یافته و درصد ذرات ریز شن و ماسه افزایش پیدا می‌کند. شکل شماره ۲ مقدار مقاومت ویژه بر حسب اهم‌متر در مقاطع

مطالعات اکتشافی و شرایط واقعی (چاه‌های بهره‌برداری و چاه‌های گمانه) مقایسه بین نتایج حاصل از روش‌های مطالعاتی و اطلاعات مشاهداتی انجام شد و پس از تعیین بهترین روش با مطابقت بیشتر، حد تداخل آب شور و شیرین تعیین و روش بهینه برای مطالعه سایر مناطق استان و یا سایر مناطق با شرایط مشابه پیشنهاد شد.

در بعضی از مناطق، منابع آبی با غلظت بیش از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ممکن است به‌عنوان آب خانگی مورد استفاده قرار گیرد [۱۰]، [۲۵] و غلظت آب بین ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر برای نوشیدن بسیار شور است [۱۲]، از طرفی آب دریا دارای غلظت مواد جامد محلول تقریباً ۳۵۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد، بنابراین آنچه که در این تحقیق به‌عنوان آب شور بیان می‌شود آبی است که دارای غلظت مواد جامد محلول بیش از ۳۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر باشد.

روش ژئوالکتریک

مطالعات ژئوالکتریک یکی از روش‌هایی است که کمک شایانی



شکل ۲- مقاطع ژئوالکتریک و لوگ چاه‌های اکتشافی در آبخوان‌های ساحلی غرب و شرق بابلسر
Fig 2. Geo-Electric sections and exploratory wells logs in coastal aquifers of the West and East of Babolsar

جدول ۳- مشخصات آبخوان زیرزمینی در مقاطع مطالعاتی غرب بابلسر

Table 4. Groundwater aquifer characterizes in West Babolsar studies Sections

| نفوذ پذیری (K) | | | ضخامت آبخوان (m) | | | قابلیت انتقال (m ² /day) | | | گرادیان هیدرولیکی (%) | | | شماره Number |
|------------------|------|-------|-------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------|--------|------------------------|-------|-------|-----------------|
| Infiltration (K) | | | Aquifer Depth (m) | | | Transitivity (m ² /day) | | | Hydraulic Gradient (%) | | | |
| W3 | W2 | W1 | W3 | W2 | W1 | W3 | W2 | W1 | W3 | W2 | W1 | |
| 3.86 | 1.50 | 10.67 | 22 | 20 | 15 | 85 | 30 | 160 | 0.22 | 0.494 | 0.058 | 1 |
| 4.14 | 1.67 | 9.67 | 21.34 | 20.14 | 16.5 | 88.36 | 33.54 | 159.62 | 0.222 | 0.491 | 0.059 | 2 |
| 4.29 | 1.84 | 9.24 | 21.06 | 21.35 | 17.12 | 90.37 | 39.35 | 158.26 | 0.225 | 0.48 | 0.059 | 3 |
| 4.52 | 1.93 | 8.24 | 20.68 | 21.68 | 19.41 | 93.52 | 41.92 | 160 | 0.227 | 0.488 | 0.061 | 4 |
| 4.90 | 1.88 | 7.59 | 20.15 | 21.94 | 21.64 | 98.83 | 41.24 | 164.35 | 0.23 | 0.486 | 0.06 | 5 |
| 5.82 | 1.80 | 7.25 | 21.38 | 22.45 | 24.59 | 124.42 | 40.34 | 178.35 | 0.232 | 0.484 | 0.061 | 6 |
| 4.94 | 1.75 | 6.36 | 27.37 | 23.68 | 28.75 | 135.34 | 41.37 | 182.97 | 0.234 | 0.481 | 0.061 | 7 |
| 3.97 | 1.78 | 4.72 | 35.98 | 24.34 | 40.1 | 142.78 | 43.24 | 189.35 | 0.236 | 0.479 | 0.064 | 8 |
| 3.65 | 1.78 | 3.86 | 40.21 | 24.93 | 50.36 | 146.67 | 44.47 | 194.37 | 0.239 | 0.477 | 0.062 | 9 |
| 3.14 | 1.78 | 3.52 | 47.95 | 25.46 | 54.39 | 150.48 | 45.22 | 191.52 | 0.241 | 0.475 | 0.065 | 10 |
| 3.38 | 1.76 | 3.03 | 50.92 | 26.32 | 60.84 | 172.35 | 46.35 | 184.63 | 0.246 | 0.458 | 0.068 | 11 |
| 3.58 | 1.77 | 2.79 | 53.31 | 27.47 | 64.65 | 190.87 | 48.67 | 180.31 | 0.256 | 0.442 | 0.072 | 12 |
| 3.63 | 1.76 | 2.61 | 58.62 | 27.53 | 70.32 | 212.63 | 48.37 | 183.52 | 0.274 | 0.441 | 0.082 | 13 |
| 3.79 | 1.68 | 2.31 | 62.65 | 29.43 | 76.43 | 237.22 | 49.38 | 176.39 | 0.278 | 0.441 | 0.097 | 14 |
| 3.85 | 1.67 | 2.13 | 65 | 30 | 80 | 250 | 50 | 170 | 0.311 | 0.439 | 0.11 | 15 |

تعیین شکل هندسی سطح تداخل آب شور و شیرین در این مقاطع تعیین شده است. بر اساس نقشه‌ها و اطلاعات موجود از آبخوان‌های مطالعاتی، مشخصات هیدروژئولوژیکی مقاطعی که جهت بررسی و محاسبه وضعیت هندسی حد تداخل آب شور و شیرین انتخاب شده‌اند استخراج و نتایج مربوط به هر منطقه مطالعاتی به صورت جداگانه در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده است

بررسی خصوصیات آبخوان‌های زیرزمینی نشان می‌دهد که قابلیت انتقال در غرب بابلسر بین ۳۰ تا ۲۵۰ مترمربع بر روز و در شرق بابلسر بین ۳۰ تا ۹۰ مترمربع بر روز می‌باشد، که با مطالعات وزارت نیرو [۳۲] و گلشن [۱۷] منوط بر پایین بودن قابلیت انتقال در مناطق نزدیک به خط ساحلی مطابقت دارد. درحالی‌که ضخامت متوسط آبخوان در مناطق مطالعاتی به‌طور متوسط برابر با ۲۵ متر می‌باشد، که نشان دهنده منابع آب زیرزمینی قابل اعتماد در این مناطق می‌باشد. به‌طور کلی نتایج حاصل از بررسی خصوصیات آب‌های زیرزمینی در این مناطق نشان داد که وضعیت آبخوان ساحلی در غرب بابلسر از لحاظ شیب هیدرولیکی، قابلیت انتقال، ضخامت آبخوان و ضریب نفوذپذیری نسبت به شرق بابلسر مناسب‌تر می‌باشد.

نتایج روش‌های ژئوالکتریک و ژئوالکترومغناطیس با جمع‌آوری اطلاعات حاصل از بررسی خصوصیات آبخوان‌های زیرزمینی و اطلاعات چاه‌های اکتشافی اقدام به تعیین حد تداخل بین آب شور و شیرین با استفاده از روش ژئوالکتریک شد. حداقل عمق تداخل آب شور احتمالی تعیین شده با استفاده از این روش در آبخوان‌های ساحلی مطالعاتی تقریباً برابر با ۴ متر می‌باشد که

ژئوالکتریک مطالعاتی در پروفیل‌های طولی را نشان می‌دهد. روش ژئوالکترومغناطیس

روش ژئوالکترومغناطیس یکی از جدیدترین و دقیق‌ترین روش‌های مورد استفاده برای تعیین حد تداخل بین آب شور و شیرین می‌باشد، که در سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۰، ۳، ۲۴]. در دستگاه ژئوالکترومغناطیس مورد استفاده در این تحقیق از فرکانس‌های طبیعی (مگنتوتلوریک) و مصنوعی^۱ استفاده شده‌است که اختلاف فاز بین صفر تا ۹۰ درجه بین آنتن‌ها و سنسورهای گیرنده ایجاد می‌کند. فاز صفر و ۹۰ درجه به ترتیب نشان دهنده عدم وجود و وجود آب زیرزمینی می‌باشد. در مناطقی که آب زیرزمینی وجود دارد فرکانس ثانویه دریافتی توسط دستگاه نشان دهنده عمق آب شور می‌باشد. دستگاه بعد از واسنجی شدن با استفاده از چاه‌های مشاهداتی در نقاط مطالعاتی نصب شد. موقعیت نصب دستگاه در هر منطقه با استفاده از دستگاه GPS^۲ ثبت و همراه با اطلاعات برداشت شده به نرم‌افزار GIS^۳ 10.5 انتقال داده شدند.

نتایج

به‌منظور بررسی وضعیت تداخل آب شور دریا و آب شیرین آبخوان ساحلی، با توجه به ویژگی‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان در مجاورت ساحل، شش مقطع انتخاب شده و مؤلفه‌های مربوط به

1. VLF
2. Global positioning system
3. Geographical Information System

جدول ۴- مشخصات آبخوان زیرزمینی در مقاطع مطالعاتی شرق بابلسر

Table 4. Groundwater aquifer characterizes in East Babolsar studies Sections

| ضریب نفوذ پذیری (K) | | | ضخامت آبخوان (متر) | | | قابلیت انتقال (مترمربع بر روز) | | | گرادیان هیدرولیکی (درصد) | | | شماره Number |
|--------------------------|------|------|--------------------|-------|-------|------------------------------------|----|----|--------------------------|-------|-------|-----------------|
| Infiltration Coefficient | | | Aquifer Depth (m) | | | Transitivity (m ² /day) | | | Hydraulic Gradient (%) | | | |
| E3 | E2 | E1 | E3 | E2 | E1 | E3 | E2 | E1 | E3 | E2 | E1 | |
| 1.67 | 5.00 | 2.67 | 18 | 10 | 15 | 30 | 50 | 40 | 0.137 | 0.27 | 0.512 | 1 |
| 1.75 | 4.98 | 2.47 | 17.52 | 10.24 | 15.4 | 30.7 | 51 | 38 | 0.135 | 0.271 | 0.516 | 2 |
| 1.79 | 4.91 | 2.34 | 17.21 | 10.58 | 15.8 | 30.8 | 52 | 37 | 0.135 | 0.277 | 0.52 | 3 |
| 1.89 | 4.67 | 2.26 | 16.5 | 11.34 | 16.4 | 31.2 | 53 | 37 | 0.134 | 0.276 | 0.53 | 4 |
| 1.96 | 4.60 | 2.14 | 16.1 | 11.74 | 16.8 | 31.59 | 54 | 36 | 0.133 | 0.275 | 0.533 | 5 |
| 2.15 | 4.43 | 2.03 | 15.47 | 12.41 | 17.2 | 33.2 | 55 | 35 | 0.132 | 0.273 | 0.536 | 6 |
| 2.28 | 4.43 | 1.94 | 15.14 | 12.87 | 17.5 | 34.5 | 57 | 34 | 0.131 | 0.275 | 0.54 | 7 |
| 2.44 | 4.86 | 2.13 | 14.61 | 12.35 | 17.8 | 35.6 | 60 | 38 | 0.131 | 0.273 | 0.54 | 8 |
| 2.66 | 5.28 | 2.22 | 13.68 | 12.11 | 18 | 36.4 | 64 | 40 | 0.131 | 0.272 | 0.541 | 9 |
| 2.93 | 5.58 | 2.05 | 12.65 | 11.65 | 20.5 | 37.1 | 65 | 42 | 0.132 | 0.274 | 0.543 | 10 |
| 3.15 | 6.01 | 2.01 | 12.34 | 11.32 | 22.41 | 38.85 | 68 | 45 | 0.131 | 0.273 | 0.47 | 11 |
| 3.40 | 6.32 | 2.55 | 12.01 | 11.07 | 23.57 | 40.85 | 70 | 60 | 0.13 | 0.273 | 0.55 | 12 |
| 4.13 | 7.10 | 2.72 | 11.68 | 10.42 | 25.69 | 48.27 | 74 | 70 | 0.129 | 0.267 | 0.554 | 13 |
| 4.46 | 7.62 | 3.03 | 12.42 | 10.23 | 26.37 | 55.38 | 78 | 80 | 0.128 | 0.261 | 0.56 | 14 |
| 5.00 | 8.00 | 3.33 | 12 | 10 | 27 | 60 | 80 | 90 | 0.126 | 0.256 | 0.562 | 15 |

جدول ۵- تعیین حد تداخل بین آب شور و شیرین با روش ژئوالکتریک در مقطع غرب بابلسر

Table 5. Interference between fresh and salt water using Geo-Electrical method in West Babolsar

| سنگ کف Bed Rock | | آب شور احتمالی | مقطع | نام منطقه |
|--|--|---|----------|--------------------------------|
| Second Layer لایه دوم | First Layer لایه اول | Probably Saltwater | Section | Area Name |
| 45 (100), 44 (120), 43 (150), 46 (80) | 46 45 (100), 44 (120), 43 (150), (10) | 45 (100), 43 (150), 44 (120) 46 (5) | W1 | غرب بابلسر West Babolsar |
| 64 (40) 63 (20), 62 (20), 84 (10), 85 (20) 83 (45), | 64 (40) 63 (20), 62 (20), 85 (20) 84 (10), 83 (45), | 64 (20) 63 (6), 62 (6), 85 (15) 84 (6), 83 (30), | W2 W3 | |

جدول ۶- تعیین حد تداخل بین آب شور و شیرین با روش ژئوالکتریک در مقطع شرق بابلسر

Table 6. Interference between fresh and salt water using Geo-Electrical method in East Babolsar

| سنگ کف Bed Rock | | آب شور احتمالی | مقطع | نام منطقه |
|--|---|---|---------|----------------------------------|
| Second Layer لایه دوم | First Layer لایه اول | Probable Saltwater | Section | Area Name |
| 106 (10), 107 105 (40), 104 (60), (10) | 106 (10), 107 105 (20), 104 (45), (10) | 106 (5), 105 (15), 104 (30), 107 (5) | E1 | شرق بابلسر East Babol- sar |
| 125 (6) 124 (6), 123 (30), 122 (20), (80) | 125 124 (6), 123 (30), 122 (20), (6) | 122 (16), 123 (15), 124 (4), 125 (4) | E2 | |
| 144 143 (10), 141 (20), 142 (10), (80) | 144 142 (10), 143 (10), 141 (20), (60) | 144 142 (5), 143 (5), 141 (10), (40) | E3 | |

مطالعاتی غرب بابلسر و شرق بابلسر به ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. علاوه بر روش ژئوالکتریک در این تحقیق برای دقت بیشتر مطالعات

بسیار نزدیک به سطح زمین است و هم چنین حداکثر عمق آب شور احتمالی به طور متوسط برابر با ۱۵۰ متر تعیین شد. نتایج حاصل از بررسی های انجام شده با استفاده از روش ژئوالکتریک برای مقاطع

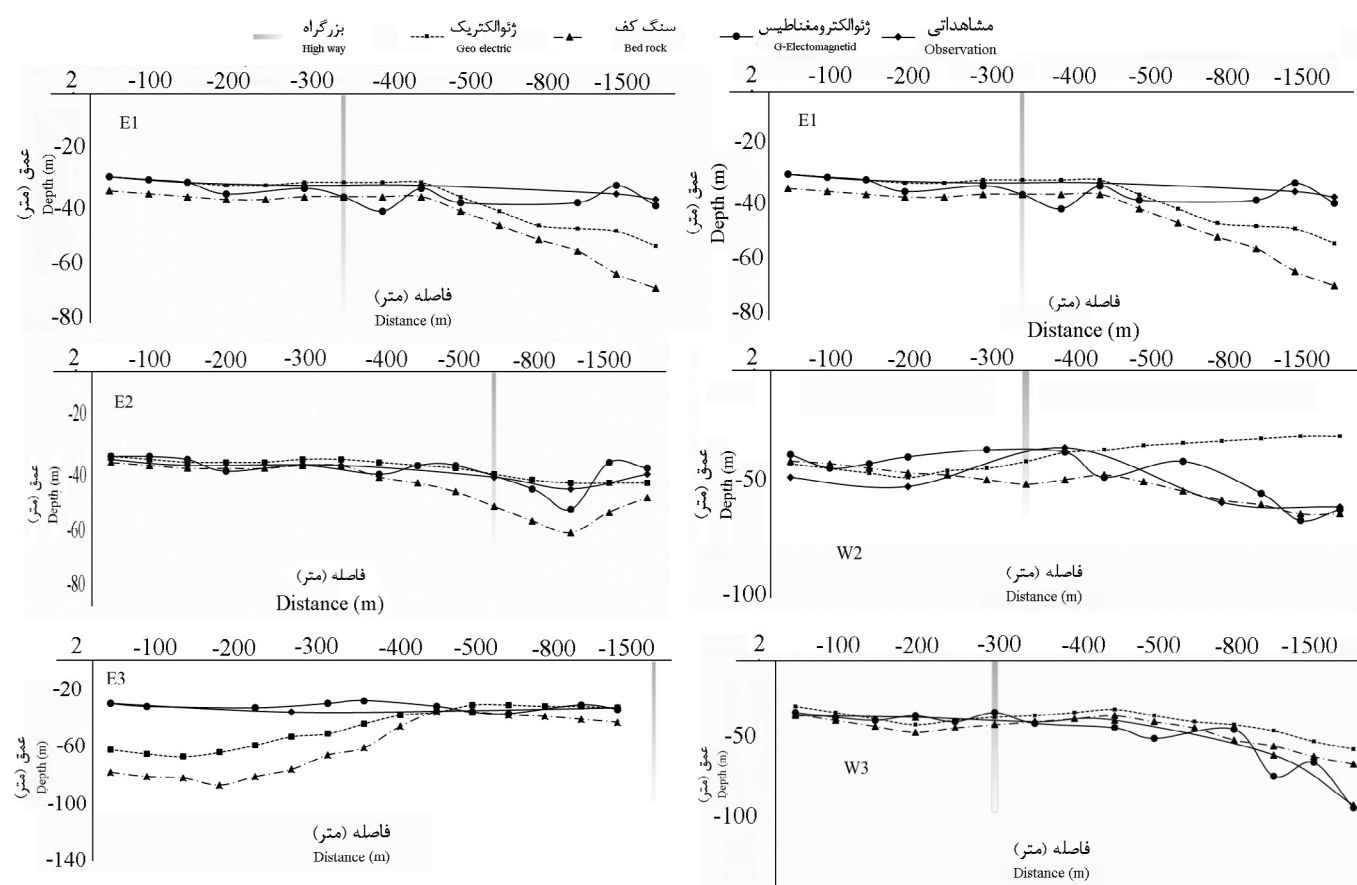
حل نشده را می‌توان دلیل این موضوع بیان کرد. برای مقاطع دوم و سوم غرب بابلسر و مقاطع اول و دوم شرق بابلسر مقادیر حاصل از روش‌های مطالعاتی به مقادیر مشاهداتی نزدیک می‌باشند و هر دو روش از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند. در حالی که در مقطع سوم شرق بابلسر روش ژئوالکتریک حد تداخل آب شور و شیرین را نسبت به داده‌های مشاهداتی در عمق بیشتری نشان داده است که در مطالعه انجام شده به وسیله همی و همکاران [۲۰] بیشتر نشان دادن عمق تداخل با روش ژئوالکتریک بیان شده است. متوسط عمق تداخل آب شور در مقاطع مطالعاتی برای آبخوان غرب بابلسر با استفاده از روش‌های ژئوالکتریک و ژئوالکترومغناطیس به ترتیب برابر با ۶۵ و ۲۳ متر و در منطقه شرق بابلسر به ترتیب برابر با ۳۹ و ۳۴ متر به دست آمد که با توجه به متوسط عمق تداخل مشاهداتی در آبخوان‌های غرب بابلسر (۲۷ متر) و شرق بابلسر (۲۱ متر) می‌توان بیان داشت که روش ژئوالکترومغناطیس از دقت مناسبی برخوردار می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد این روش نسبت به مطالعات انجام شده به وسیله روش‌های تجربی و مدل‌سازی در سواحل استان مازندران [۲۳، ۳۴] از دقت بیشتری برخوردار می‌باشد. در مطالعه عمادی [۸] به بالا بودن دقت روش ژئوالکترومغناطیس در تعیین عمق تداخل آب شور در سواحل خلیج فارس اشاره شده است. همچنین نتایج

و مقایسه کارایی روش‌ها از اطلاعات روش ژئوالکترومغناطیس نیز برای تعیین حد تداخل آب شور و شیرین استفاده شد. نتایج حاصل از این روش در مقایسه با روش ژئوالکتریک و اطلاعات مشاهداتی برای مقاطع مطالعاتی (W، مقطع غرب بابلسر و E، مقطع شرق بابلسر) در شکل ۳ نشان داده شده است.

نتایج نشان داد بین مقادیر حد تداخل تعیین شده با روش‌های ژئوالکتریک و ژئوالکترومغناطیس با داده‌های مشاهداتی در سطح پنج درصد معنی‌داری وجود دارد. همبستگی پیرسون بین نتایج حاصل از روش‌های مطالعاتی و داده‌های مشاهداتی به ترتیب ۰/۸۳ و ۰/۹۲ می‌باشد که نشان دهنده همبستگی بالا می‌باشد بنابراین می‌توان بیان کرد که روش‌های مطالعاتی در منطقه مطالعاتی از عملکرد مناسبی برخوردار می‌باشند.

بحث و نتیجه‌گیری

در مقطع مطالعاتی غرب بابلسر عمق سنگ کف با حد تداخل تعیین شده به وسیله روش ژئوالکتریک هم‌پوشانی دارند که تعیین دقیق حد تداخل را مشکل می‌سازد. با توجه به پژوهش انجام شده به وسیله مک نیل [۲۷] تأثیر گذاری عوامل مختلفی مانند تخلخل، دما، مواد رسی با ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و تمرکز الکترولیزهای



شکل ۳- نتایج حاصل از روش‌های مختلف مطالعاتی برای تعیین حد تداخل آب شور و شیرین

Fig 3. The results of different methods studies to determine the extent of interaction of fresh and salt water

امکان پیشروی آب شور وجود دارد از این روش برای مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب‌تر این مناطق استفاده شود.

منابع

1. Abdul Nassir, S.S. Loke, M.H. Lee, C.Y. Nawawi, M.N.M. 2000. Salt-water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys. *Geophysical Prospecting*. 48: 647-661.
2. Atkinson, S. F. Miller, G. Curry, D. and Lee, S. 1986. Saltwater intrusion, environmental and groundwater institute, university of Oklahoma, noeman, ok, usa: lewis publishers. [This book discusses the fundamentals of saltwater intrusion problems].
3. Barlow, P. M. and Reichard, E. G. 2010. Salt water intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeology Journal*. 18(1): 247-260.
4. Bear, J. and Dagan, G. 1964. Some exact solutions of interface problems by means of the hodograph method, *Geophysical Research*. 69(8): 1563-1572.
5. Braithwaite, F. 1855. On the infiltration of salt-water into the springs of wells under London and Liverpool, Minutes of the proceedings of the institution of civil engineers. 14: 507-509.
6. Dam, J. C. 1999. Exploitation, restoration and management. In *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers—Concepts, Methods and Practices* (pp. 73-125). Springer Netherlands.
7. Duque, C. Calvache, M. L. Pedrera, A. Martín-Rosales, W. and López-Chicano, M. 2008. Combined time domain electromagnetic soundings and gravimetry to determine marine intrusion in a detrital coastal aquifer (Southern Spain). *Journal of Hydrology*. 349(3): 536-547.
8. Emadi, S. 2011. Applying the new method to study the possibility of electromagnetism in coastal aquifers and administrative discharge. Fifteenth Congress of the Geological Society in Iran. (In Persian).
9. Fatemi, S.E. Ashteiani, B. A. 2009. Effect of seawater intrusion in coastal aquifer simulation of contaminant discharge in Talar sub-basin. May, Fourth National Congress of Civil Engineering, Tehran University. (In Persian)
10. Feth, J.H. 1965. Preliminary map of the conterminous United States showing depth to and quality of shallowest ground water containing more than 1,000 parts per million dissolved solids: U.S. Geological Survey Hydrologic Investigations Atlas 199, 31 p

مطالعات انجام شده با روش ژئوالکترومغناطیس در سایر مناطق مطالعاتی نشان دهنده دقت بالای این روش می‌باشد [۲۰، ۷، ۳۹].

با بررسی عمق تداخل به دست آمده از روش‌های مطالعاتی می‌توان بیان داشت که حد تداخل آب شور و شیرین در مقاطع شرق بابلسر نسبت به مقاطع غرب بابلسر در عمق کمتری می‌باشند و ضخامت آب زیرزمینی در این مناطق کمتر می‌باشد که در تحقیق گلشن [۱۷] به کم بودن حد تداخل در مقاطع شرقی آبخوان‌های ساحلی دریای مازندران نسبت به مقاطع غربی مانند نور و محمودآباد اشاره شده است. با توجه به نزدیکی تراز آب زیرزمینی به سطح زمین در این مناطق آب بیشتری در معرض افزایش دمای سطح زمین قرار می‌گیرد [۳۵، ۱۸] و مقدار تبخیر از سطح این منابع بیشتر می‌باشد. بنابراین لازم است تا در این مناطق با احتیاط بیشتری نسبت به برداشت آب زیرزمینی اقدام شود.

استان مازندران در قسمت شمالی کشور واقع شده است و با توجه به نزدیکی به دریای خزر و وجود کوه‌های مرتفع البرز مقدار بارندگی در این استان بیشتر می‌باشد و پر بارش‌ترین استان کشور می‌باشد که باعث تشکیل آبخوان‌های زیرزمینی پر آب در این منطقه شده است از طرف دیگر برخی از آبخوان‌های این استان با توجه به هم‌جوار بودن با دریای خزر در معرض کاهش کیفیت آب زیرزمینی می‌باشند. کاهش کیفیت آب زیرزمینی به دلیل پیشروی آب شور دریا در سال‌های اخیر از مهم‌ترین معضلات این استان بوده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده مناطق شرقی دریای خزر نسبت به مشکل پیشروی آب شور حساس‌تر تشخیص داده شده‌اند، بنابراین آبخوان‌های ساحلی غرب و شرق بابلسر برای مطالعه مورد نظر تعیین شدند. روش‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل روش ژئوالکترونیک و ژئوالکترومغناطیس می‌باشند. این روش‌ها از عملکرد مناسبی برای بررسی خصوصیات آب‌های زیرزمینی برخوردار می‌باشند و در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق با هدف تعیین حد تداخل آب شور و شیرین در مقاطع مطالعاتی از این روش‌ها استفاده شد. برای این منظور شش مقطع مطالعاتی عمود بر ساحل دریا در مناطق مطالعاتی انتخاب شد و در امتداد هر کدام از این مقاطع ۱۵ نقطه مطالعاتی انتخاب شد. با توجه به نتایج خصوصیات آبخوان‌های زیرزمینی و حد تداخل آب شور و شیرین در این مناطق مشخص شد.

با مقایسه عمق تداخل تعیین شده به وسیله روش‌های مطالعاتی نسبت به داده‌های مشاهداتی می‌توان بیان کرد که روش ژئوالکترومغناطیس نتایج قابل قبولی ارائه داده است. عمق تداخل با این روش در مقاطع غرب بابلسر بین ۳۴- تا ۹۷- و در مقاطع شرق بابلسر بین ۲۹- تا ۳۴- تعیین شد که بسیار نزدیک به داده‌های مشاهداتی در این مقاطع به ترتیب بین ۳۶- تا ۹۵- و ۲۹- تا ۳۳- می‌باشد. کارایی این روش در تعیین عمق تداخل آب شور و شیرین در بیشتر مطالعات انجام شده مورد قبول ارزیابی شده است و با توجه به اهمیت تعیین حد تداخل آب شور در مناطق ساحلی پیشنهاد می‌شود در مناطقی که

23. Kazeminehad, M. 2010. Study the advance of salt-water due to indiscriminate withdrawal of groundwater resources. The first national conference on water resources management, coastal land. (In Persian)
24. Kontar, E. A. and Ozorovich, Y. R. 2006. Geo-electromagnetic survey of the fresh/salt water interface in the coastal southeastern Sicily. *Continental Shelf Research*, 26(7): 843-851.
25. Krieger, R.A. Hatchett, J.L. and Poole, J.L. 1957. Preliminary survey of the saline-water resources of the United States: U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1374, 172 p.
26. Kronkosky, C. E. and Etehadtavakkol, A. 2016. September. Regional Saltwater Disposal Facility Planning Utilizing Data Analytic Methods. In *Unconventional Resources Technology Conference*. Unconventional Resources Technology Conference.
27. McNeill, JD. 1980 Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers. 375 Geonics, Ltd., Mississauga, Canada. Technical Note TN-6.
28. Mehrdadi, N., Zand, A. D. and Matloubi, A. A. 2007. Natural and human-induced impacts on coastal groundwater. *Environment Research*, 1(2): 170-178.
29. Misut, P.E. Voss, C.L. 2007. Freshwater-saltwater transition zone movement during aquifer strong and recovery cycles in Brooklyn and Queens, New York City, USA. *Hydrology*. 337: 87 – 103.
30. Moghimi, H., Kocak, K. and Novinpour, E. A. The study of Caspian Sea salt water intrusion to aquifer of Ghaem shahr plain. *International Bulletin of Water Resources and Development*. 1 (1): 10-29. (In Persian)
31. Nowroozi, A.A. Horrocks, S.B. Henderson, P. 1999. Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey. *Journal of Applied Geophysics*. 42: 1–22.
32. Report of the Ministry of Energy. 2003. Study interface between salt water and fresh water in Caspian Sea coastal aquifers. (In Persian)
33. Report of the Ministry of Energy. 2010. Directory Privacy determination beaches, lakes and wetlands. Department of Strategic Planning and Control, Publication 534. (In Persian).
34. Safarzadeh, M. Ebrahimi, F. Khorasanizadeh, A. 2010.
11. Foyle, A., Henry, V. J. and Alexander, C.R. 2002. mapping the threat of seawater intrusion in a regional coastal aquifer-aquitard system in the southeastern United States, *environmental geology*, no. 43, pp. 151-159
12. Freeze, R. A. and Cherry, J. A. 1979. *Ground water*, Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall. This is a widely used textbook discusses groundwater studies with applications to many geological problems including saltwater intrusion.
13. Garah, M. M. Raghimi, M. and Tahmasebi, A. 2008. Salt water intrusion in water wells by using of hydrogeochemistry study (Case study: Sari city). *Agriculture Science Nature Resource*, 15 (4), 1-14. (In Persian)
14. Ghyben, W. 1889. Notes on the probable results of the proposed well drilling near Amsterdam, *Inst. Ing. Tijdschr*, 1888-89. The Hague, 21.
15. Glover, R.E., 1959. The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. *J. Geophysics. Resource*. 64(4).
16. Gholami, V. and Jafari, M. 2010. Investigation about factors of ground water salinity in modeling of ground water salinity on the coasts of Mazandaran Province. *Watershed Management Research Journal*. 86, 81-87. (In Persian)
17. Golshan, M. 2016. Simulation Saltwater Intrusion in Coastal Aquifers of Nur, Mahmodabad and Feridonkenar. Ministry of Energy, Iran Water Resources Management Company Mazandaran Regional Water Company. (In Persian)
18. Hassan, S. T. 2008. Assessment of groundwater evaporation through groundwater model with spatio-temporally variable fluxes.
19. Herzberg, A. 1901. The water supply on parts of the North Sea coast. *Gasbeleucht Wasserversorg*, 44: 815-819.
20. Himi, M. Tapias, J. Benabdelouahab, S. Salhi, A. Rivero, L. Elgettafi, M. and Casas, A. 2016. Geophysical characterization of salt water intrusion in a coastal aquifer: The case of Martil-Alila plain (North Morocco). *Journal of African Earth Sciences*.
21. Josselin de Jong, G. D. 1960. Singularity distributions for the analysis of multiple fluid flow through porous media. *Geophysical Research*, 65(11): 3739-3758.
22. Kafri, U. and Goldman, M. 2005. The use of the time domain electromagnetic method to delineate saline groundwater in granular and carbonate aquifers and to evaluate their porosity. *Journal of Applied Geophysics*, 57(3): 167-178.

37. Todd D. K., and Mays, I. W. 2005. Ground water hydrology, John Wiley & son, New York, 3th edition, 636p.
38. Verruijt, A., 1969. An interface problem with a source and a sink in the heavy fluid. *Hydrology*. 8: 197-206.
39. Yao, R. J. Yang, J. S. Wu, D. H. Xie, W. P. Gao, P. and Wang, X. P. 2016. Geostatistical monitoring of soil salinity for precision management using proximally sensed electromagnetic induction (EMI) method. *Environmental Earth Sciences*. 75(20): 1362.
- The level of the Caspian Sea coastal interface between fresh and salt water aquifers. The first national conference on water resources management, coastal land. October, SANRU. (In Persian)
35. Schulz, S. Horovitz, M. Rausch, R. Michelsen, N. Mallast, U. Köhne, M. and Merz, R. 2015. Groundwater evaporation from salt pans: Examples from the eastern Arabian Peninsula. *Journal of Hydrology*. 531: 792-801.
36. Stewart, M. T. 1982. Evaluation of electromagnetic methods for rapid mapping of salt-water interfaces in coastal aquifers. *Ground Water*. 20(5): 538-545.

Abstract

Comparing the Geo-Electric and Geo-Electromagnetic Methods in Determining Saltwater and Fresh Water Interference in the West and East of Babolsar Aquifer

M. Golshan¹, A. Esmali Ouri² and K. Khorrami³

Received: 25-12-2016 Accepted: 11-12-2018

Groundwater is one of the most reliable sources of available water for agriculture and drinking. In coastal areas due to saltwater intrusion, determining the interface between fresh and salt water for these area residents is very important. In this study, the characteristics of coastal aquifers was evaluated using geo-electrical and geo-electromagnetic methods in the eastern and western aquifers of Babolsar. These methods have high accuracy in this field. For this purpose in the study area, six sections in the coastline were chosen, in each section in the coastal line, 10 study points were selected with 50 meters distance, then, were selected five study points with 100, 200, 300, and 400 meters distance apart. In order to determine saltwater interface with geo-electric method, the observation wells were used. Regarding the observation data in many points, the results of the study methods showed that the geo-electromagnetic have high accuracy in comparison to the geo-electric method. Also, the results showed that the interface between saltwater and fresh water in the west of Babolsar sections are more than east of Babolsar sections. Overall, with regard to calculated interface depth in both regions, the saltwater intrusion exists and it is necessary to tackle saltwater intrusion in these areas using Best Management Practices.

Keywords: *Geology, Ground layers, Aquifer, interface, Coastal area, Caspian Sea bottom of form*

1. Ph.D., Watershed, Sari University of Agriculture Science and Natural Resource.

2. Corresponding author and Associate Professor, University of Mohaghegh Ardabili, Email: esmaliouri@uma.ac.ir

3. Ph.D. student, Watershed, Urmia University.