

Comparison of Geoelectric, Electromagnetic and Verruijt Methods for Determination of the Subsurface Saline and Fresh Interface in Coastal Aquifer

SEYED MEHDI EMADI¹, ALI SHAHNAZARI^{2*}, ZOHRESADAT RIAZI-RAD³

1. Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
3. Assistant Professor, Department of Geophysics, Islamic Azad University, Chalus Branch. Chalus, Iran

(Received: Aug. 4, 2017- Revised: Feb. 27, 2018- Accepted: March. 4, 2018)

ABSTRACT

Due to the downfall of groundwater table caused by the drilling of several illegal wells, unlimited groundwater extraction and sea water intrusion, the precise identification of saline groundwater zone in shorelines is highly crucial. This research was conducted to compare three different methods (geoelectric, electromagnetic, Verruijt equations) to detect the interface of subsurface fresh and saline water in western and eastern part of Babolsar city, northern Iran. Due to the insufficient hydrogeological data in the study area such as occurred spread across the Mazandaran province, the Verruijt equations could not predict the saline and fresh water interfaces precisely, but the geoelectric method showed relatively higher precision. The results of both studied sites (eastern and western part of Babolsar city) were approximately identical. The electromagnetic method with the highest significant correlation ($R=0.97$ and 0.81 ; $CCC=0.95$ and 0.80) and the lowest errors ($ME=-2.22$ and 0.28 ; $RMSE=4.83$ and 1.96) respectively in the western and eastern part of the area and also the insignificant t-test was identified as the best approach for accurate prediction of the saline and fresh water interfaces. Considering the insufficient hydrogeological data in shoreline of Mazandaran province and due to the high performance, rapid determination and more reliability of the electromagnetic-based data, this method could be recommended for determination of the subsurface saline and fresh interface in coastal aquifer.

Keywords: Saline water, aquifer parameters, saline and fresh water interface, electromagnetic, geoelectric.

مقایسه روش‌های ژئوالکتریک، الکترومغناطیس و ورویچ در تعیین سطح آب شور و شیرین آبخوانهای ساحلی

سید مهدی عمادی^۱، علی شاهنظری^{۲*} و زهره سادات ریاضی راد^۳

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۳. استادیار، گروه ژئوفیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد چالوس، چالوس، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۵/۱۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۲/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۲/۱۳)

چکیده

افت سطح آب زیرزمینی و پیشروی آب شور دریا در پی برداشت‌های بی‌رویه و حفر تعداد زیاد چاه، اهمیت شناسایی دقیق‌تر پارامترهای آبخوان‌های ساحلی را جهت کنترل نفوذ آب شور دوچندان می‌کند. در این تحقیق تعیین مرز تداخل آب شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی غرب و شرق شهرستان بابلسر (استان مازندران) به‌وسیله روش‌های ژئوالکتریک، الکترومغناطیس و معادلات ورویچ مورد مقایسه قرار گرفت. به‌علت عدم وجود اطلاعات هیدروژئولوژیکی کافی در این منطقه (همانند سایر مناطق استان)، نتایج حاصل از معادلات ورویچ دقت بالایی نداشته اما روش ژئوالکتریک دارای دقت نسبتاً بیشتری از آن است. روش الکترومغناطیس با داشتن بیشترین همبستگی ($R=0.97^{**}$ و $CCC=0.81^{**}$) و کمترین خطا ($ME=2/22-$ و $RMSE=4/83$) و $1/96$) به‌ترتیب در مناطق غرب و شرق منطقه و عدم معنی‌داری آزمون t بین داده‌های تخمینی و مشاهده‌ای، دارای بیشترین دقت بود و به‌واسطه سرعت بالاتر، اطمینان‌پذیری بیشتر و استفاده کمتر از نیروی انسانی، کارآمدی بالایی را برای به‌روزرسانی اطلاعات تداخل آب شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: بابلسر، پارامترهای آبخوان، پیشروی آب شور، مرز تداخل آب شور و شیرین

مقدمه

بیش از ۷۰ درصد جمعیت جهان در مجاورت سواحل دریاها، دریاچه‌ها و یا منابع آب سطحی سکونت دارند. با افزایش جمعیت و نیاز بیشتر به آب با کیفیت مناسب برای مصارف شرب و بهداشت، برداشت آب از آبخوان‌های ساحلی در طی ۳۰ الی ۴۰ ساله اخیر به شکل بی‌رویه‌ای فزونی یافته است. در نتیجه مشکلات مربوط به نفوذ آب شور به آبخوان‌ها و کاهش کیفیت آب شیرین آنها به‌عنوان یکی از مهمترین مشکلات در برخی از کشورها مانند آمریکا، ژاپن، فیلیپین، اندونزی، مراکش، استرالیا و مخصوصاً ایران شناخته شده است (Glynn and Plummer 2005). بهره‌برداری بی‌رویه و کاهش پتانسیل آب زیرزمینی به واسطه افزایش جمعیت، توسعه شهرک‌های تفریحی-توریستی، شهرک‌های صنعتی و پرورش ماهی، تعادل هیدرولیکی جریان آب زیرزمینی را برهم زده و پیشروی آب شور، منابع آب زیرزمینی شیرین را در معرض خطر شوری جدی قرار داده است (Perera et al., Young-kim et al. 2007). همچنین عواملی مانند تغییرات

آب و هوایی (کاهش نزولات جوی و افزایش دما) و افزایش سطح آب دریا (Toofan-Tabrizi, 2008)، بر روی مرز آب شور و شیرین تأثیر گذاشته و سبب شده است تا آب شور دریا تا فواصل بسیار دوری از ساحل در سفره‌های آب زیرزمینی پیشروی کند (Todd and Mays, 2005; Strack, 2016).

برای بررسی سطح تماس و محاسبه نظری مرز آب شور و شیرین دو شیوه متداول وجود دارد (Gemtzi and Telikas, 2007). در شیوه نخست سطح تماس به‌صورت یک صفحه باریک در نظر گرفته می‌شود و در هر مقطع عرضی عمود بر ساحل، پروفیل خط تماس آب شور محاسبه و ترسیم می‌گردد. در روش دوم، سطح تماس را به شکل یک ناحیه‌ی با ضخامت مشخص و محدود در نظر می‌گیرند. محل و ضخامت تماس در هر دو شیوه، با استفاده از معادلات جریان زیرزمینی و انتقال شوری بدست می‌آید و مقدار آن، وابسته به ویژگی‌های هیدروژئولوژی آبخوان می‌باشد. در این راستا معادلات متعددی توسط محققین مختلف (Verruijt, 1980; Kashef, 1983; Jalbert et al., 2000; Kacimov, 2002; Bakker, 2006) پیشنهاد شده است.

با توجه به کمبود پارامترهای آب زیرزمینی در برآورد حد تداخل آب شور و شیرین در شرایط استاتیک و دینامیک بر

* نویسنده مسئول: aliponh@yahoo.com

نیازهای شرب و صنعت در مناطق ساحلی استان مازندران از جمله، افت سطح آب زیرزمینی، تداوم خشکسالی، برداشت غیر اصولی از آبخوان‌های ساحلی و پیشروی آب شور دریا، شناسایی و کنترل حرکت آب شور در این آبخوان‌ها برای مدیریت و برنامه‌ریزی درازمدت و صحیح بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور ارائه روش کارآمد ژئوفیزیکی یا معادلاتی برای تعیین سطح برخورد آب شور و شیرین با تخمین درست، می‌تواند گام مؤثری در داده‌برداری‌های گسترده جهت ارائه نتایج صحیح داشته باشد. هدف از این تحقیق مقایسه کارایی دو شیوه ژئوفیزیکی از قبیل ژئوالکتریک و الکترومغناطیس و استفاده از معادلات و رویچ در شناسایی سطح برخورد آب شور و شیرین در آبخوان‌های ساحلی شهرستان بابلسر در استان مازندران می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شامل بخش‌هایی از مناطق شرقی و غربی ساحل شهرستان بابلسر واقع در استان مازندران می‌باشد (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه در محدوده‌ی عرض جغرافیایی ۴۰۶۲۲۴۵ تا ۶۵۲۲۹۱ تا ۶۳۵۳۰۹ و طول جغرافیایی ۴۰۶۶۰۰۴ قرار دارد. به‌منظور تعیین سطح برخورد آب شور و شیرین به‌وسیله سه روش ذکر شده، دو محدوده در غرب (C1 الی C3) و شرق (D1 الی D3) شهر ساحلی بابلسر انتخاب گردید. در هر یک از محدوده‌های مطالعاتی غرب و شرق بابلسر، یک مسیر به طول ۳۰۰۰ متر در امتداد ساحل دریا انتخاب (سه مقطع با فاصله ۱۵۰۰ متر) شد. در امتداد عمود بر این مسیر، ۶ مقطع مطالعاتی که سه مقطع در غرب و سه مقطع در شرق بابلسر قرار دارد تعیین شد. برای هر مقطع ۱۵ محل برای بررسی‌های نظری مشخص گردید که با توجه به عدم وجود اطلاعات کامل هیدروژئولوژیکی صحرایی، ۹ محل برای مقایسه سه روش انتخاب شد؛ بنابراین تعداد کل نقاط مطالعاتی ۲۷ نقطه در شرق و ۲۷ نقطه در غرب شهرستان بابلسر و فواصل آن‌ها ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۱۰۰ و ۲۰۰۰ متر از ساحل انتخاب شد. در این تحقیق ملاک انتخاب مرز یا سطح برخورد به آب شور، هدایت الکتریکی (EC) ۴/۵ دسی-زیمنس بر متر می‌باشد. ملاک انتخاب میزان هدایت الکتریکی ذکر شده، استاندارد کیفیت آب شرب، صنعت و آبیاری (کشت برنج و مرکبات) بوده است (MRW, 2004; Alizadeh, 2001). داده‌های نهایی حاصل از روش‌های ذکر شده برای مقایسه با داده‌های مشاهداتی بر اساس سطح ارتفاع منطقه نیولمان شده است.

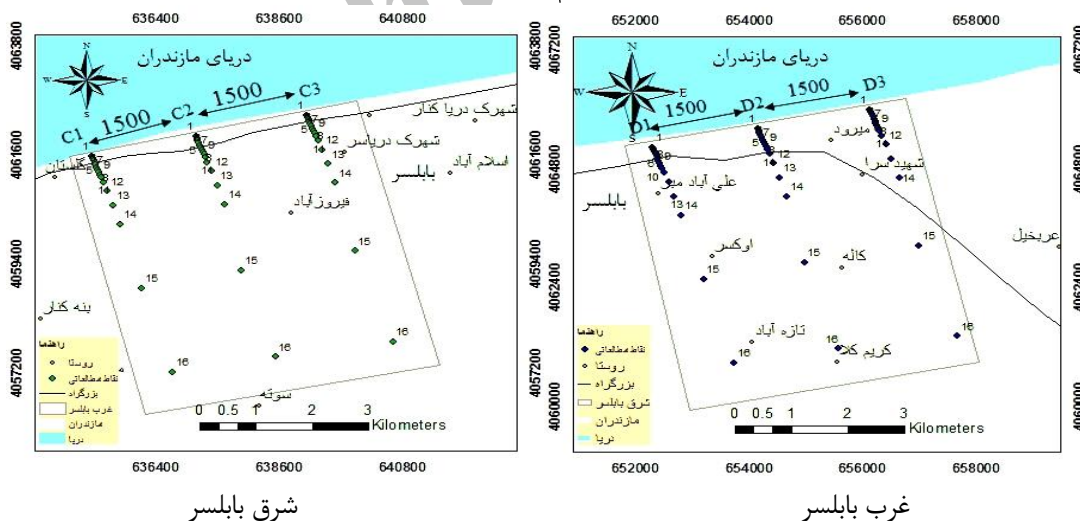
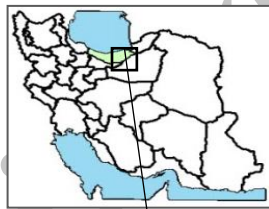
اساس معادلات عنوان شده، از روش‌های مختلف ژئوفیزیکی و بررسی‌های اکتشافی استفاده می‌شود. با استفاده از این مطالعات می‌توان خصوصیات هیدرودینامیکی آبخوان‌های آبرفتی و عمق تقریبی مرز آب شور و شیرین را برآورد نمود (Misut and Voss, 2007). از بین روش‌های مختلف ژئوفیزیکی، استفاده از روش ژئوالکتریک عمومیت بیشتری داشته و در سواحل کشورهایی مانند ایران (Moghimi and Babaei, 2013; Ghorbani-Sehat, 2015)، استرالیا (Ball et al., 2001)، یونان (Acworth and Dasey, 2003)، نیجریه (Oyedele and Momoh, 2009) و تونس (Agoubi et al., 2013) مورد استفاده قرار گرفته است. روش الکترومغناطیس (Goldman et al., 1991; Fitterman and Deszcz-Pan, 2001; Kontar and Ozorovich, 2006) و لرزه-سنجی دو روش دیگر ژئوفیزیکی در زمینه شناسایی سطح برخورد به آب شور و شیرین می‌باشند. از بین روش‌های الکترومغناطیس (مبتنی بر منبع طبیعی)، روش الکترومغناطیس دامنه فرکانس (FDEM)^(۱) و الکترومغناطیس دامنه زمان (TDEM)^(۲) در سواحل ایالت‌های مختلف آمریکا مانند کالیفرنیا (Hoekstra and Blohm, 1990; Hild et al., 1996)، نبراسکا (Ong et al., 2010)، فلوریدا (Kirkegaard et al., 2011)، سواحل عمان (El-Kaliouby and Abdalla, 2015) و سواحل هند (Vignesh et al., 2016) استفاده شده است. روش لرزه-سنجی علی‌رغم دقت بالا در ارائه اطلاعات زیرسطحی، عموماً برای مطالعات کمی منابع آب و نفت کاربرد وسیع‌تری داشته و در زمینه تفکیک آب شور و شیرین کمتر مورد استفاده قرار گرفته است (Reynolds, 1997; Gabr et al. 2012). روش نفوذ رادار به زمین (GPR)^(۳) نیز یکی از روش‌های ژئوفیزیکی (الکترومغناطیس) است که برای مطالعات منابع آب زیرزمینی کم‌عمق و تعیین مرز آب شور و شیرین استفاده می‌شود که با توجه به عمق نفوذ کم و همچنین محدودیت عدم انتقال امواج به لایه‌های زیرسطحی در مناطق دارای لایه‌های رس و مارن، دارای دقت کافی نمی‌باشد (Trenholm and Bentley, 1998). در این راستا به علت اهمیت دقیق‌تر تعیین حد آب‌شور در آبخوانهای ساحلی، تلفیق مطالعات مستقیم (اکتشافی) و غیر مستقیم (ژئوفیزیکی) و یا ارائه روشی کاربردی‌تر در تعیین صحیح سطح مرز آب شور و شیرین با دقت مناسب بسیار پراهمیت می‌باشد (Werner et al., 2013).

با توجه به مشکلات متعدد ایجاد شده در تأمین آب برای

1. Frequency-Domain ElectroMagnetics
2. Time-Domain ElectroMagnetics
3. Ground penetrating radar

(MRW, 2004). اطلاعات هیدروژئولوژیکی از قبیل نقشه هم-ضخامت، سنگ کف، ضریب قابلیت انتقال و تراز آب زیرزمینی بر اساس اطلاعات اخذ شده از چاه‌های مشاهده‌ای آب منطقه‌ای مازندران و چاه‌های حفاری شده در این تحقیق و مقاطع ژئوالکتربیک، ترسیم گردید. سطح آب زیرزمینی بین یک متر در اردیبهشت ماه و ۱/۵ متر در مرداد ماه و متوسط ضخامت اشباع آب شیرین بین ۴ الی ۲۰ متر می‌باشد. متوسط تغییرات هدایت هیدرولیکی بر اساس نتایج آزمایش‌ها، پمپاژ برخی چاه‌های محدوده مطالعاتی برابر ۴ الی ۵ متر در روز می‌باشد (متوسط ضریب قابلیت انتقال آبخوان برابر ۵۰ الی ۱۰۰ متر مربع در روز). حداقل و حداکثر شیب هیدرولیکی در مقاطع غرب بابلسر برابر با ۰/۰۴۵ و ۰/۴۹ درصد و شرق بابلسر نیز ۰/۲۶ و ۰/۱۳۷ درصد است. در زیر به اختصار به سه روش مورد استفاده در تعیین سطح برخورد به آب شور در آبخوان‌های ساحلی اشاره شده است.

مشخصات هیدروژئولوژیکی آبخوان‌های ساحلی مورد مطالعه: آبخوان ساحلی مورد مطالعه یک آبخوان آزاد بوده که در امتداد رسوبات محدوده دشتی (شامل رسوبات رسی- ماسه سنگی، کنگلومرای و مارن) در این مناطق گسترش یافته است. مهمترین رسوبات موجود در آبخوان ساحلی که در لوگ چاه‌های حفاری شده تا عمق ۷۵ متری مشاهده شده است، ماسه‌های خاکستری‌رنگ (تا عمق ۴ متری)، ماسه‌های زرد و قهوه‌ای‌رنگ (از عمق ۴ الی ۶ متری)، ماسه‌های تیره‌رنگ (از اعماق ۶ الی ۳۲ متری) و ماسه‌های رسی و مارنی (از اعماق ۳۲ الی ۷۵ متری) است که حاوی مقادیر زیادی عناصر آهن، مس، منگنز و بقایای درختان پوسیده مدفون شده می‌باشند. سنگ کف آبخوان ساحلی از لایه‌های مارنی تشکیل شده است. برداشت‌های صورت گرفته از آبخوان‌های ساحلی و مخصوصاً مناطق جنوبی آن در طی ۱۰ سال اخیر افزایش یافته به طوری که حفر چاه‌های مجاز و غیرمجاز به تعداد زیاد به‌عنوان یکی از دغدغه‌های وزارت نیرو در این مناطق بوده است



شکل ۱. نقشه محدوده مطالعاتی و مقاطع طولی و عرضی انتخاب شده

$$hf = \sqrt{\frac{2\beta q}{K(1+\beta)}} X \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$h_s = -\sqrt{\frac{q^2}{\beta^2 k^2} \cdot \frac{1-\beta}{1+\beta} + \frac{2qx}{\beta k(1+\beta)}} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در روابط فوق ρ_s چگالی آب شور (گرم بر سانتی متر-مکعب)، ρ_f چگالی آب شیرین (گرم بر سانتی مترمکعب)، h_s ارتفاع آب شور تا سطح آب دریا (متر)، h_f ارتفاع آب شیرین

معادلات ورویج (Verruijt.,1980)

در این روش سطح مشترک آب شور و شیرین بر اساس معادلات زیر تعیین گردید.

$$q = \frac{1}{2} (\rho_s - \rho_f / \rho_f) kb^2 / L \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$L = \frac{1}{2} (\rho_s - \rho_f / \rho_f) kb^2 / q \quad (\text{رابطه ۲})$$

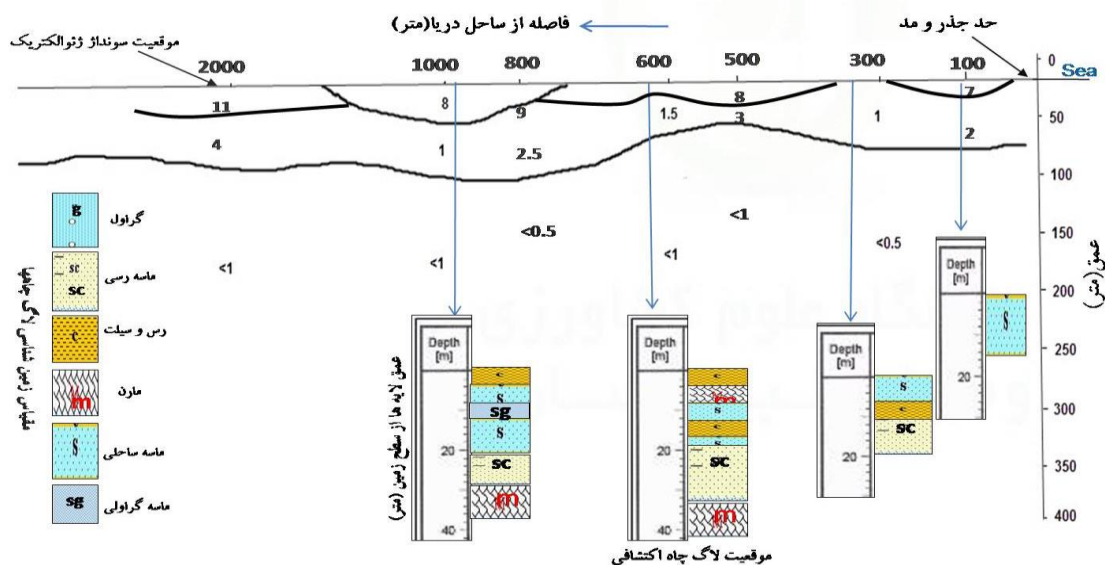
شور از آب شیرین می‌باشد. برای همین منظور ۴۲ سونداژ الکتریکی قائم به روش شلومبرژر (Zomorrodian and Hosseiniye, 2008) در محل مقاطع تعیین شده انجام گردید. با توجه به عدم دقت و تفسیرهای سخت در تفکیک آب شور و شیرین در تحلیل‌های ژئوالکتریک (Acworth and Dasey, 2003; Hwang et al., 2004; Ong et al., 2010)، از لوگ چاه‌های اکتشافی استفاده شد (به‌طور مثال شکل (۲) مربوط به مقطع D_2 در محدوده مطالعاتی شرق بابلسر می‌باشد). بر این اساس، در تفسیر مقاطع ژئوالکتریک، با انجام تصحیحات مختلف هر یک از مقاطع مخصوصاً لایه‌های مزاحم، تفکیک لایه‌های آب شور احتمالی بر اساس تغییر ناگهانی در میزان مقاومت عمودی لایه‌ها بین ۱ الی ۵ اهم‌متر (Moghimi and Babaei, 2013) و سنگ کف نیز از طریق تغییر مقاومت، کمتر از ۲ اهم‌متر و تلفیق آن با اطلاعات لوگ چاه‌های اکتشافی شد.

موجود در لایه آبدار بالای سطح دریا (متر)، q دبی جریان آب شیرین (متر مکعب در روز) و β تفاضل چگالی آب شور دریا و آب شیرین، L طول پنجه آب شور (متر)، b ضخامت اشباعی (متر)، k هدایت هیدرولیکی (متر در روز) و x فاصله از ساحل دریا (متر) می‌باشد.

در این پژوهش چگالی آب دریای خزر معادل با $1/0.25$ گرم بر سانتی‌متر مکعب در نظر گرفته شد که در این صورت میزان β برابر $0/0.25$ خواهد بود (Saffarzadeh et al., 2010; Vafaei et al., 2009).

روش ژئوالکتریک

یکی از روش‌های متداول در تعیین مرز آب شور و شیرین در بررسی‌های ژئوفیزیکی، استفاده از روش ژئوالکتریک است. در این روش مقاومت کمتر از ۵ اهم‌متر (Oyedele and Momoh, 2009) و $1/8$ الی $3/7$ اهم‌متر و کاهش ناگهانی در میزان مقاومت عمودی لایه‌ها، (Khalil, 2006) مقیاس تفکیک آب



شکل ۲. سونداژهای ژئوالکتریک و لوگ چاه‌های اکتشافی در مقطع D_2 در محدوده مطالعاتی شرق بابلسر

آشکار شوند (Zomorrodian and Hosseiniye, 2008). منابع این روش را می‌توان با استفاده از سیگنال‌های طبیعی زمین (غیرفعال مانند مگنتوتلوریک) و یا در میدان دور با استفاده از فرستنده‌های نظامی پر قدرت (Vlf) بکار برد (سیگنال‌های فعال). وجود آب به‌عنوان محیط رسانا و اطراف آن به‌عنوان محیط رسانایی ضعیف و یا نارسا باعث تغییرات جریان‌های الکترومغناطیس یا مغناطیس ثانویه در زمین می‌گردد (Harinarayana et al., 2006; Wait, 1954; Swift, 1967). دستگاه EM95 یک دستگاه الکترومغناطیس مورد استفاده در

روش الکترومغناطیس با دستگاه EM95

در برخورد امواج الکترومغناطیس با هر پدیده، سه فرآیند انعکاس، جذب و عبور ایجاد می‌گردد. در حالت کلی برای تولید میدان مغناطیسی اولیه که در زیر و بالای زمین منتشر می‌شود از پیچه فرستنده یا منبع طبیعی استفاده می‌شود. اگر محیط رسانا در زیرزمین وجود داشته باشد، مؤلفه مغناطیس ناشی از موج تابشی الکترومغناطیس، جریان‌های متناوب در داخل رسانا القاء می‌نماید. جریان‌های ادی به نوبه خود میدان ثانویه الکترومغناطیس ایجاد می‌کنند که می‌توانند به‌وسیله گیرنده

اشباعی با استفاده از فرمول‌های ارائه شده، معادل‌سازی می‌شود. در بخش دوم، با سعی و خطاهای متعدد آزمایشگاهی و صحرایی جداول استاندارد تبدیل تغییرات میدان‌های الکترومغناطیس دریافتی (تغییرات آنومالی) بر اساس تغییرات زاویه آنتن‌های دستگاه (بین صفر تا ۹۰ درجه) به پارامترهای آب زیرزمینی توسط شرکت یاد شده انجام گردید. جهت تعیین سطح آب زیرزمینی، حداکثر بازشدگی آنتن‌ها (۹۰ درجه، شاخص شناسایی وجود لایه آبدار) در محل میله‌های برنجی کوبیده شده به زمین، برابر شدت میدان دریافتی توسط دستگاه بوده است که جهت حذف این میدان باید بر اساس شکل (۳)، دستگاه از محل میله برنجی تا فاصله مشخصی بر روی زمین جهت بازگشت آنتن‌ها به حالت افقی اولیه منتقل شود. فاصله طی شده زمینی (AB) که در شکل (۴) نشان داده شده است، سطح برخورد به آب زیرزمینی از سطح زمین است (MN). تکرار مجدد عملیات فوق از محل میله برنجی تا فاصله مشخصی از سطح زمین (A'B') جهت حذف کامل میدان، برابر ارتفاع لایه غیرقابل نفوذ از سطح زمین می‌باشد (M'N') که به‌عنوان یک فاکتور مهم در بررسی سطح آب شور و شیرین و تغییرات دوره-ای آن است. برای تعیین حد تداخل آب شیرین با آب شور (هدایت الکتریکی بیش از ۴/۵ دسی زیمنس بر متر)، با تغییر سنسور دستگاه و حرکت در امتداد میله برنجی، تغییر فاز میدان الکترومغناطیس حاصل از غلظت بالای یون کلر (M''N'') بر اساس شکل (۴) شناسایی شد. به‌طور خلاصه، جهت برداشت صحرایی در مقاطع تعریف شده، ابتدا دستگاه در مجاورت یک چاه بهره‌برداری و یا مشاهده‌ای هر یک از مقاطع اشاره شده، واسنجی و پس از اطمینان از دریافت اطلاعات (عمق سطح آب شیرین و شور)، با درصد خطای بسیار کم (کمتر از ۱ متر)، مطالعات نقطه‌ای در ۵۴ نقطه انجام گردید.

اطلاعات مشاهده‌ای

جهت تعیین صحت و دقت اطلاعات خروجی از سه روش مطالعاتی، از ۳۱ حلقه چاه اکتشافی (نظارت در حین حفاری) و ۱۱ حلقه چاه بهره‌برداری به اعماق ۳ الی ۷۵ متر استفاده شد. از اطلاعات کمی (سطح آب زیرزمینی) و کیفی (میزان هدایت الکتریکی آب شیرین در لحظه برخورد به آب و تغییرات عمقی کیفیت آب در حین حفاری و یا چاه‌های بهره‌برداری تا لحظه برخورد به میزان شوری ۴/۵ دسی زیمنس بر متر) آب زیرزمینی که در مجاورت مقاطع مطالعاتی تعریف گردید، به‌عنوان اطلاعات مشاهداتی در بررسی‌های آماری استفاده شد.

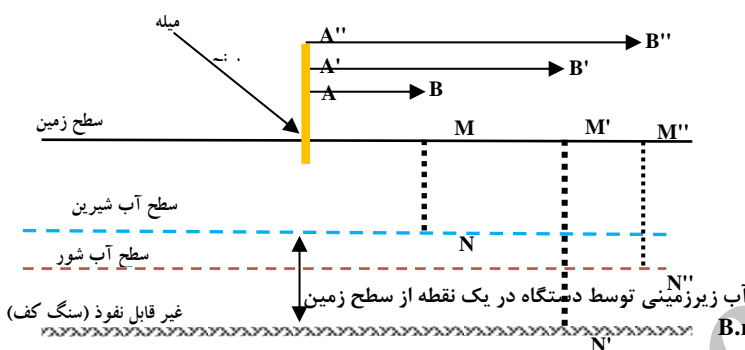
این تحقیق مدل ارتقاء یافته دستگاه VLF_R ساخت شرکت دانش‌گستران آب سارویه در ایران است که با تلفیق روشهای VLF (بکارگیری سنسورهای بسیار حساس در گیرنده‌های امواج در بازه فرکانسهای بسیار کوتاه) موفق به ساخت گیرنده‌هایی گردید که می‌تواند میزان اغتشاشات بسیار کوچک حاصل از وجود آب زیرزمینی را نسبت به مناطق فاقد آب زیرزمینی به صورت اختلاف فاز حداقل و حداکثر با استفاده از جایگزینی تغییرات مقاومت محیط‌های اشباع آب شیرین و تغییرات کیفیت آب شور دریا (افزایش میزان کلر بیش از ۲۷۰ میلی‌گرم بر لیتر) دریافت نماید (Mullern and Erikson, 1982).

در این راستا برای تعیین تغییرات آنومالی‌های الکترومغناطیس، بین آنتن‌ها و سنسورهای گیرنده، زاویه حداقل (صفر) و حداکثر (۹۰ درجه) به‌عنوان مقیاس شدت میدان دریافتی تعریف می‌شود. مناطق فاقد آب زیرزمینی دارای اختلاف فاز صفر و مناطق دارای آب زیرزمینی دارای اختلاف فاز ۹۰ درجه خواهند بود. با توجه به اینکه میدان‌های الکترومغناطیس منتج شده (مغناطیس ثانویه) در داخل دستگاه به‌صورت جریان‌های الکتریکی بسیار ضعیف شده به سنسورها منتقل می‌شوند و از طرفی کنترلی بر روی امواج طبیعی، در عملیات صحرایی وجود ندارد، دریافت و تعیین محدوده فرکانسی آب زیرزمینی، نیاز به تصحیح و دقت بسیار زیادی در تفسیر مقاطع خواهد داشت. بعلاوه امواج مزاحم محلی نیز می‌توانند به‌عنوان یکی از عوامل فرعی باعث تولید خطا شوند. لذا برای تعیین میزان آنومالی میدان‌های الکترومغناطیسی منتج شده در مناطق دارای آب زیرزمینی، زاویه انحراف بین صفر و ۹۰ درجه ملاک تعیین سطح آب زیرزمینی و تفکیک آب شیرین و شور که به‌صورت توأم قابل اندازه‌گیری خواهد بود، قرار گرفت.

به‌طور کلی برای محاسبه سطح آب زیرزمینی و تفکیک آب شیرین و شور به‌وسیله دستگاه، دو بخش (ساختمان دستگاه برای داده‌برداری و فرمول‌های مورد استفاده) دارای اهمیت ویژه هستند. مهمترین قسمت دستگاه، سنسورهای ساخته شده با قابلیت تفکیک مناطق اشباع (دارای لایه آبدار) هستند. با دریافت این میدان‌های ضعیف توسط سنسورهای طراحی شده و اتصال به یک کیت الکترونیکی، اجزاء میدان الکترومغناطیس (طول، عرض، شدت و عمق بازتابش) با اتصال دستگاه از طریق میله‌های برنجی به زمین (واسنجی دستگاه و حرکت بر روی زمین) تعیین و در مرحله نهایی، اجزاء تفکیکی به پارامترهای آب زیرزمینی شامل سطح آب زیرزمینی، سنگ کف و ضخامت



شکل ۳. شمایی از دستگاه در یکی از مقاطع و داده‌برداری با آن در شرق بابلسر



شکل ۴. نحوه تفکیک پارامترهای آب زیرزمینی توسط دستگاه در یک نقطه از سطح زمین

$AB=MN$: (اولین فرکانس دریافتی توسط دستگاه)
 $A'B'=M'N'$: عمیق لایه غیرقابل نفوذ (فرکانس دریافتی دوم): ضخامت اشباعی:
 $MN-M'N'=b$: سطح آب شور (فرکانس دریافتی سوم):
 $A''B''=M''N''$

نتایج و بحث

تخمین سطح برخورد به آب شور در منطقه غرب شهرستان بابلسر جهت تعیین مناسب‌ترین روش از بین سه روش مطالعاتی به لحاظ آماری، از آماره‌های ضریب همبستگی (R)، خطای میانگین^۱ (ME)، میانگین مجذور مربعات خطا^۲ (RMSE) و ضریب همبستگی همگام^۳ (Pc=CCC) که توسط Karunaratne *et al.* (2014) معرفی شد، استفاده خواهد شد که در زیر فرمول‌های محاسباتی آنها آورده شده است.

دقت سه روش تخمینی در برآورد سطح برخورد به آب شور در این منطقه با توجه به اطلاعات مشاهده‌ای (۲۷ نقطه) در جدول (۱) نشان داده شده است. بر اساس آزمون t ، تنها بین داده‌های بدست آمده از روش الکترومغناطیس و داده‌های مشاهده‌ای از لحاظ آماری اختلاف معنی‌داری در سطح ۱ درصد وجود نداشته است. تفاوت زیاد بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی حاصل از روش ژئوالکترونیک و معادلات و رویچ منجر به اختلاف معنی‌دار بین آنها (حتی در سطح ۵ درصد) شده است. همبستگی مثبت و بالای نتایج روش الکترومغناطیس (**۰/۹۷)، نسبت به دو روش تخمینی دیگر خود نشان دهنده دقت بالای این شیوه در مطالعات شناسایی تفکیک آب شور از شیرین می‌باشد. مقدار RMSE در روش الکترومغناطیس در منطقه مورد مطالعه در حدود ۴/۸۳ متر است در حالی که در روش ژئوالکترونیک و معادله و رویچ به ترتیب ۳۲/۴۰ و ۴۱/۸۲ متر است که حاکی از خطای بالای این روش‌ها است. خطای میانگین (ME) در روش الکترومغناطیس به میزان ۲/۲۲- متر می‌باشد که با در نظر گرفتن مقادیر خطای میانگین روش ژئوالکترونیک (۶/۹۶ متر) و معادله و رویچ (**۲۴/۹۳ متر) بسیار پایین و

آنالیزهای آماری

جهت تعیین مناسب‌ترین روش از بین سه روش مطالعاتی به لحاظ آماری، از آماره‌های ضریب همبستگی (R)، خطای میانگین^۱ (ME)، میانگین مجذور مربعات خطا^۲ (RMSE) و ضریب همبستگی همگام^۳ (Pc=CCC) که توسط Karunaratne *et al.* (2014) معرفی شد، استفاده خواهد شد که در زیر فرمول‌های محاسباتی آنها آورده شده است.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$CCC = \frac{2P\sigma_X\sigma_Y}{\sigma^2_X + \sigma^2_Y + (\mu_x - \mu_y)^2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در این معادلات، y_i مقدار مشاهده‌ای از پارامترهای بدست آمده، \hat{y}_i مقدار برآورد شده توسط روش‌های مختلف برآوردی، P ضریب پیرسون، μ_x و μ_y میانگین داده‌ها و σ_x^2 و σ_y^2 واریانس داده‌ها می‌باشند.

1. Mean Error
2. Root mean square error
3. Concordance correlation coefficient (CCC)

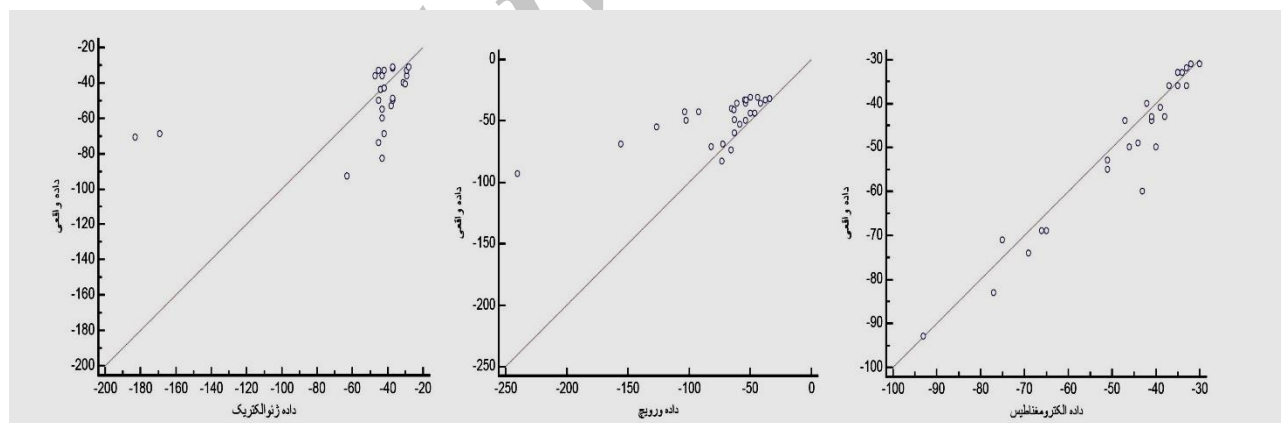
مشاهداتی خوب عمل نکرده‌اند و در بیشتر موارد بیشتر از مقدار مشاهداتی برآورد داشته‌اند. به طور مثال، همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، در مقطع C_3 روش و رویچ تنها در فاصله ۱۵۰ متر و روش ژئوالکتریک در فاصله ۸۰۰ متر نسبت به اطلاعات مشاهداتی دارای دقت نسبتاً مناسبی است. این در حالی است که روش الکترومغناطیس در اکثر نقاط دارای دقت مناسبی می‌باشد. در این منطقه تفکیک لایه‌های آب شور و سنگ کف از طریق روش ژئوالکتریک به‌علت تغییرات بسیار اندک مقاومت لایه‌ها دارای دقت کمی بوده و تنها در مناطقی که لوگ چاه‌های اکتشافی وجود داشته است و تنوع لایه‌های رسوبی کمتر بوده (تا فاصله ۸۰۰ متری ساحل)، امکان تفسیر صحیح فراهم شده است.

قابل قبول می‌باشد. با وجود همبستگی معنی‌دار (R) بین مقادیر تخمین زده شده بوسیله روشهای ژئوالکتریک و ورویچ با داده‌های مشاهداتی، این روش‌ها دارای ضریب همبستگی همگام پایینی هستند. در واقع این دو روش با وجود همبستگی با داده‌های مشاهداتی، دارای پیش‌بینی بیشتر از مقدار مشاهداتی می‌باشند. ضریب همبستگی همگام بالا در روش الکترومغناطیس (۰/۹۵) نشان‌دهنده آن است که این روش به صورت ۱:۱ در زاویه ۴۵ درجه محور مختصات، دارای تخمین بسیار بالا و نزدیک به مقدار مشاهداتی است. در شکل (۵) همبستگی همگام داده‌های مشاهداتی و داده تخمینی سه روش نشان داده شده است. روش ژئوالکتریک و ورویچ با فاصله زیاد از محور ۴۵ درجه در تخمین داده‌های

جدول ۱. نتایج مربوط به مقایسه روش‌های مختلف با در نظر گرفتن کل داده‌ها از سه منطقه غرب بابلسر

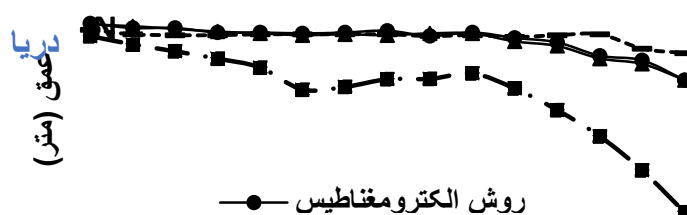
آماره‌ها	نتایج روش الکترومغناطیس	نتایج روش ژئوالکتریک	نتایج روش ورویچ
همبستگی (R)	۰/۹۷**	۰/۴۵*	۰/۶۶**
RMSE	۴/۸۳	۳۲/۴۰	۴۱/۸۲
ME	-۲/۲۲	۶/۹۶	۲۴/۹۳
CCC	۰/۹۵	۰/۲۴	۰/۳۵
مقدار P در آزمون t	p=۰/۲۱	p=۰/۰۴۵	p=۰/۰۰۰۱

** نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۱ درصد و * نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۵ درصد



شکل ۵. همبستگی بین مقادیر مشاهداتی بدست آمده از سطح برخورد به آب شور و داده‌های روش الکترومغناطیس (راست)، ورویچ (وسط) و ژئوالکتریک (چپ) در غرب بابلسر

فاصله از دریا (متر)



شکل ۶. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مختلف در تعیین حد تداخل آب شور و شیرین در مقطع C_3 غرب بابلسر

مشاهداتی بسیار نزدیک هستند. به طور مثال، همان‌طور که در شکل (۸) نشان داده شده است، در مقطع D₁ روش ورویچ تنها در فواصل ۶۰ تا ۸۰۰ متر و روش ژئوالکتریک در فاصله ۶۰۰ متر نسبت به اطلاعات مشاهداتی دارای دقت نسبتاً مناسبی هستند اما در سایر فواصل، داده‌های بدست آمده نتایج بسیار غیرقابل اطمینانی را نشان می‌دهند. این در حالی است که روش الکترومغناطیس در اکثر نقاط به غیر از فاصله ۲۰۰۰ متری که خطای ۲ متری را نشان داده، دارای دقت بسیار مناسبی می‌باشد. در تفسیر سونداژهای ژئوالکتریک در این مقاطع نیز علی‌رغم استفاده از لوگ چاه‌های اکتشافی برای تفسیر بهتر تفکیک آب شور، مشخص گردید که تنها در فواصل نزدیک ساحل (تا فاصله ۵۰۰ متری) این روش توانسته با تخمین تقریباً متوسطی پاسخگو باشد.

روش ورویچ به علت عدم وجود داده‌های هیدروژئولوژیکی (با دقت و توزیع مکانی نامناسب) دقت بالایی نداشت (El-، 2014; Camp et al., 2015; Kaliouby and Abdalla). روش ژئوالکتریک علاوه بر هزینه و زمان زیاد مطالعات، به‌علت وجود آنومالی‌های حاصل از مواد معدنی و آلی موجود در سازندهای زمین‌شناسی (پساب‌های خانگی)، به‌تنهایی دارای دو اشکال عمده در بررسی‌ها شامل ۱- سیگنال‌های استفاده شده جهت تفکیک آب شور و شیرین در مناطق مختلف ثابت نبوده و به لحاظ تجربی در مناطق مختلف متفاوت می‌باشند که نیاز به بررسی و تفسیرهای مهندسی دقیق‌تر دارند و ۲- بسیاری از این سیگنال‌ها در مناطق مختلف تحت تأثیر سازندهای زمین‌شناسی متفاوت و مواد آلاینده موجود در رسوبات قرار می‌گیرند (Oyedele K. F. and E I. Momoh., 2009) و تفسیر مشابه‌ای در خصوص نفوذ آب شور خواهند داشت که تفکیک آنها سخت می‌باشد (Werner et al., 2013). این مشکلات باعث ایجاد خطاهای متعددی در مطالعات می‌شود. این در حالی است که روش الکترومغناطیس پیشنهادی با توجه به واسنجی محلی سریع و رفع نواقص ذکر شده بالا، دقت مناسبی در زمینه برخورد آب شور به شیرین را به همراه داشته است.

تخمین سطح برخورد به آب شور در منطقه شرق شهرستان بابلسر

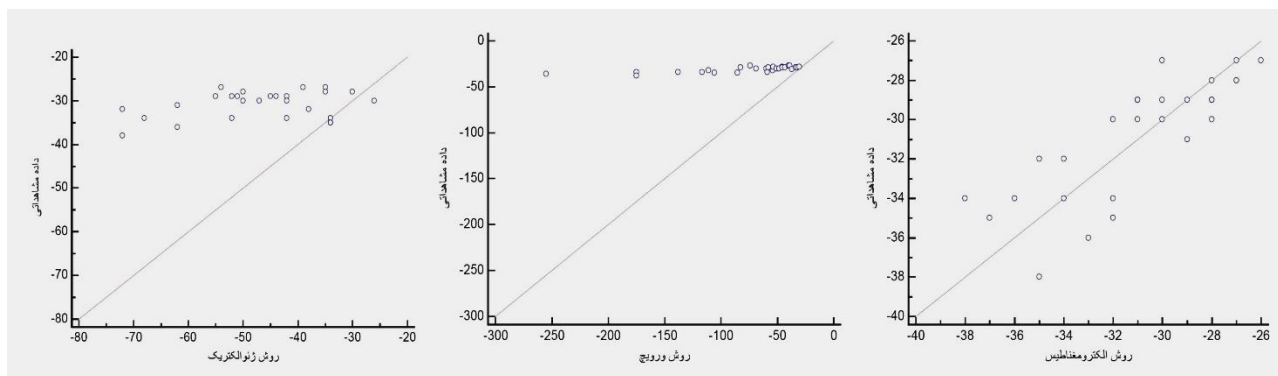
در منطقه شرق بابلسر برخلاف مناطق غربی سطح برخورد به آب شور در ارتفاع بسیار کمتری از سطح زمین قرار دارد. دقت سه روش تخمینی در این منطقه با توجه به اطلاعات مشاهده‌ای (۲۷ نقطه) در جدول (۲) نشان داده شده است. بر اساس آزمون t، تنها بین داده‌های بدست آمده از روش الکترومغناطیس و داده‌های مشاهداتی اختلاف معنی‌دار وجود نداشته است. همبستگی مثبت و بالای روش الکترومغناطیس (۰/۸۱) در این منطقه نسبت به دو روش تخمینی دیگر خود نشان دهنده دقت بالای این شیوه در مطالعات شناسایی تفکیک آب شور از شیرین است. البته این مقدار همبستگی در مقایسه با منطقه غرب بابلسر کمتر بوده که علت اصلی آن ضخامت بسیار اندک آب شیرین است. بین مقادیر مشاهده‌ای و تخمینی حاصل از روش ژئوالکتریک و معادلات ورویچ تفاوت زیاد بوده و منجر به اختلاف معنی‌دار (در سطح ۱ درصد) شده است. مقدار RMSE در روش الکترومغناطیس در این منطقه در حدود ۲ متر است در حالی که در روش ژئوالکتریک و معادله ورویچ به ترتیب ۱۹/۸۵ و ۶۹/۳۵ متر است که نشان از خطای بسیار بالای این روش‌های متداول در تفکیک آب شور و شیرین در نواحی ساحلی است. خطای میانگین (ME) در روش الکترومغناطیس به میزان ۰/۲۸ متر می‌باشد که با در نظر گرفتن مقادیر خطای میانگین روش ژئوالکتریک (۱۶ متر) و معادله ورویچ (۴۷ متر) بسیار پایین است. ضریب همبستگی همگام بالا در روش الکترومغناطیس (۰/۸۰) نشان‌دهنده تخمین بسیار نزدیک به مقدار مشاهداتی است در حالی که دو روش ژئوالکتریک و ورویچ دارای ضریب همبستگی همگام کمی هستند.

نتایج حاصل از تفکیک سطح برخورد به آب شور در این منطقه مشابه غرب بابلسر بوده است. همان‌طور که در شکل (۷) مشخص است، روش ژئوالکتریک و ورویچ با فاصله زیاد از محور ۴۵ درجه در تخمین داده‌های مشاهداتی فاقد دقت کافی بوده اما داده‌های بدست آمده از روش الکترومغناطیس به داده‌های

جدول ۲. نتایج مربوط به مقایسه روش‌های مختلف با در نظر گرفتن کل داده‌ها از سه منطقه مورد مطالعه در شرق بابلسر

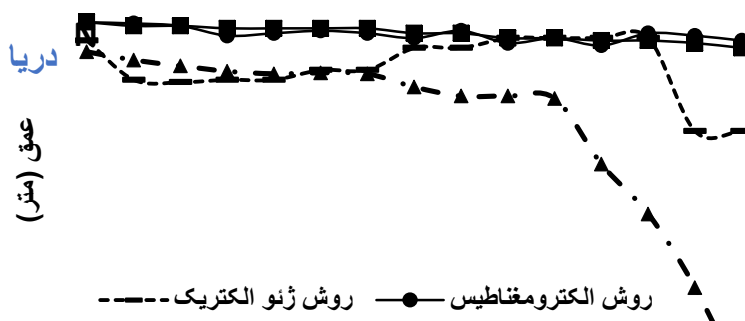
آماره‌ها	نتایج روش الکترومغناطیس	نتایج روش ژئوالکتریک	نتایج روش ورویچ
همبستگی (R)	۰/۸۱**	۰/۳۲ ^{ns}	۰/۷۷**
RMSE	۱/۹۶	۱۹/۸۵	۶۹/۳۵
ME	۰/۲۸	۱۶/۰۴	۴۷/۴۴
CCC	۰/۸۰	۰/۰۶	۰/۰۵
مقدار P در آزمون t	P = ۰/۶۵	P < ۰/۰۰۱	P < ۰/۰۰۱

^{ns}: عدم معنی‌داری؛ ^{**}: نشان‌دهنده معنی‌داری در سطح ۱ درصد



شکل ۷. همبستگی بین مقادیر مشاهداتی بدست آمده از حد تداخل آب شور و شیرین و داده‌های روش الکترومغناطیس (راست)، وروج (وسط) و ژئوالکتریک (چپ) در شرق بابلسر

فاصله از دریا (متر)



شکل ۸. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مختلف در تعیین حد تداخل آب شور و شیرین در مقطع D1 شرق بابلسر

نتیجه‌گیری کلی

حل معادلات به پارامترهای آب زیرزمینی همچون سنگ کف و ضریب قابلیت انتقال است که عملاً اطلاعات آن به میزان کافی و با دقت مناسب چه در آبخوان‌های ساحلی و چه در کل کشور وجود ندارد. سومین روش مورد استفاده در این تحقیق، روش الکترومغناطیس است که نتایج حاصل از این روش نشان داد که مقادیر ثبت شده با استفاده از این دستگاه به لحاظ آماری بسیار نزدیک به مقادیر مشاهداتی می‌باشند. به‌طور کلی نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در آبخوان ساحلی شهرستان بابلسر، دستگاه الکترومغناطیس با دقت قابل قبولی عمق تداخل آب شور و شیرین را برآورد کرده است. لذا پیشنهاد می‌شود با بکارگیری روش الکترومغناطیس پیشنهادی در این تحقیق در سایر مناطق کشور، ضمن تعیین عمق تداخل آب شور و شیرین در مدت زمان بسیار مناسب، هزینه بررسی‌های اکتشافی کاهش یابد و اطلاعات لازم برای مدل‌های مختلف نظری و تصمیم‌گیری فراهم شود.

در این تحقیق از روش‌های وروج، ژئوالکتریک و الکترومغناطیس برای تعیین حد تداخل آب شور و شیرین استفاده شد. نتایج حاصل از روش ژئوالکتریک نشان داد که این روش برای تعیین حد تداخل آب شور و شیرین دارای دقت بالایی نبوده و در بسیاری از مقاطع امکان تشخیص دقیق سنگ کف از آب شور وجود ندارد؛ بنابراین استفاده از این روش باید با ملاحظات زیادی انجام گیرد. همچنین بهره‌گیری از کارشناسان باتجربه و اطلاعات چاه‌های اکتشافی می‌تواند منجر به تولید نتایج قابل اطمینان‌تری گردد. رابطه تجربی وروج نیز به‌طور تقریبی عمق تداخل آب شور و شیرین را تعیین کرده است که این عمق برای مقاطع مطالعاتی بیشتر از عمق مشاهداتی می‌باشد و با افزایش فاصله از ساحل دریا این اختلاف بیشتر شد و در انتهای مقاطع مطالعاتی عمق آب شور را پایین‌تر از عمق سنگ کف نشان داد؛ بنابراین می‌توان بیان داشت که این روش نیز دارای دقت بالایی نمی‌باشد که علت اصلی آن وابسته بودن

REFERENCES

Acworth RI, Dasey GR. (2003) Mapping of the hypothec zone around a tidal creek using a combination of borehole logging, borehole electrical tomography and cross-creek electrical

imaging, New South Wales, Australia. *Hydrogeol* 11: 368-77.

Agoubi, B Kharroubi A, Abichou T, Abida H. (2013) Hydrochemical and geoelectrical investigation of

- Marine Jeffara Aquifer, Southeastern Tunisia, *Appl Water Sci.* 3: 415–429
- Alizadeh, A. (2001) Applied hydrology. Emam-Reza University press. 39 edition. 800 pp. (In Farsi).
- Bakker, M. (2006) Analytic solutions for interface flow in combined confined and semi-confined, coastal aquifers, *Advances in Water Resources* 29: 417–425
- Ball, J., Donnelley, L., Erlanger, P., Evans, R., Kollmorgen, A., Neal, B., Shirley, M., (2001) *Inland Waters*, Australia State of the Environment Report 2001. Theme Report. CSIRO Publishing and Department of the Environment and Heritage, Canberra, ACT.
- Blanco, R.I., MelodieNaja, G., Rivero, R. G., Price, R.M. (2013) Spatial and temporal changes in groundwater salinity in south Florida. *Applied Geochemistry*. 38(10) 48-58.
- Camp, Mark., Mtoni, Yohana., Mjemah, Ibrahimu., Bakundukize, Charles and Walraevens, K. (2014). Investigating seawater intrusion due to groundwater pumping with schematic model simulations: The example of the Dar es Salaam coastal aquifer in Tanzania. *Journal of African Earth Sciences*, 96: 71–78.
- El-Kaliouby H. and Abdalla O. (2015) Application of time-domain electromagnetic method in mapping saltwater intrusion of a coastal alluvial aquifer, North Oman. *Journal of Applied Geophysics*. 115: 59–64
- Fitterman, D.V. and Deszcz-Pan, M. (2001) Geophysical Mapping of Saltwater Intrusion in Everglades National Park. First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers Monitoring, Modeling and Management, Morocco. pp 21-34.
- Gabr A, Murad A, Baker H, Bloushi K, Arman H, Mahmoud S. (2012) The use of seismic refraction and electrical techniques to investigate groundwater aquifer, Wadi Al-ain, United Arab Emirates (UAE). Water resources and wetlands, Editors: Petre Gâştescu, William Lewis Jr., Petre Breţcan Conference Proceedings, 14-16 September 2012, Tulcea – Romania.
- Gemitzi, A. and Telikas, D. (2007) HYDRA model: Simulation of salt intrusion in coastal aquifer using Visual basic and GIS. *Environmental Modelling & Software*. 22 (7): 924–936.
- Ghorbani-Sehat, S. (2015) Evaluation of saline water intrusion of desert into the Damghan aquifer and determination of salinity and quality if it using geoelectric resistivity. Msc Dissrtation, Shahrood University of Technolog, 123 pp. (In Farsi).
- Glynn, P. D and L. N. Plummer. (2005) Geochemistry and the understanding of groundwater system. *Hydrogeology J.* 13: 263–287.
- Goldman M, Gilad D, Ronen A, Melloul A. (1991) Mapping of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel by the time domain electromagnetic method. *Geoexploration*. 28 (2): 153-174.
- Harinarayana, T., Abdul Azeez, K. K., Murthy, D.N., Veeraswamy, K., EknathRao, S. P., Manoj, C. and Naganjaneyulu, K., (2006) Exploration of geothermal structure in Pug geothermal field, Ladakh Himalayas, India by magnetotelluric studies. *Journal of Applied Geophysics*. 5: 280–295.
- Hild, J. F., Blohm, R. J., Lahti, R. M. and Blohm, M. W. (1996) Geophysical Surveys for Groundwater Exploration in Northern Guam. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. 331-341. pp.
- Hoekstra, P. and Blohm, M. (1990) *Case Histories of Time Domain Electromagnetic Soundings*. In: Ward, S.H. (Ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics*, vol. 2: Environmental and Groundwater, SEG Investigations in Geophysics, no. 5.
- Hwang, S., Shin, J., Park, I. and Lee, S. (2004) Assessment of Seawater Intrusion Using Geophysical Well Logging and Electrical Soundings in a Coastal Aquifer, Youngkwang-gun, Korea. *Exp. Geophys.* 35. 99-164.
- Jalbert, M., Dane, J. H. Abriola, L. M. Pennel, K. D. (2000) *A nondimensional evaluation of tracer sensitivity to density effects*. *Ground Water*. 38: 226–233.
- Kacimov, A. R., (2002) Analytical solutions in a hydraulic model of seepage with sharp interfaces, *Journal of Hydrology*, 258: 179-186.
- Karunaratne, S.B., Bishop, T.F.A., Baldock, J.A., Odeh, I.O.A. (2014) *Catchment scale mapping of measureable soil organic carbon fractions*. *Geoderma*, 219: 14-23.
- Kashef, A. I., (1983) Harmonizing Ghyben-Herzberg interface with rigorous solutions, *Ground Water* 21: 153-159.
- Khalil, H. M. (2006) Geoelectric resistivity sounding for delineating salt water intrusion in the Abu Zenima area, west Sinai, Egypt. *Journal of Geophysics Engineering*. 243-251.
- Kirkegaard C, Sonnenborg TO, Auken E, Jorgensen F. (2011) Salinity distribution in heterogeneous coastal aquifers mapped by airborne electromagnetics. *Vadose Zone J.* 10: 125–35.
- Kontar, E.A. and Ozorovich, Y. R. (2006) Geoelectromagnetic survey of the Fresh/saltwater Interface in the Coastal Southeastern Sicily. *Continental Shelf Research*. 26: 343-851.
- Mullern and Erikson (1982). Testing VLF measurements in order to locate saline groundwater. *Geological Survey of Sweden*, 1:1-14.
- Moghimi, H., Babaei, A. (2013). The study of Caspian Sea salt water Intrusion to Ghaemshahr plain aquifer. *International Bulletin of Water Resources and Development*. 1(1): 10-29. In Farsi.
- MRW (Mazandaran Regional Water), (2004). *Investigation of the subsurface saline and fresh interface in coastal aquifer*. Ministry of Power, Iran. 456 pp. (In Farsi).
- Ong JB, Lane JW, Zlotnik VA, Halihan T, White EA. *www.SED.ir*

- (2010) Combined use of frequencydomain electromagnetic and electrical resistivity surveys to delineate nearlake groundwater flow in the semi-arid Nebraska Sand Hills, USA. *Hydrogeol J.* 18: 1539–45.
- Oyedele, K.F., Momoh, E.I.(2009). Evaluation of Sea water Intrusion in Freshwater Aquifers in a Lagoon Coast: A Case Study of the University of Lagos Lagoon, Akoka, Nigeria, *New York Science Journal*, (3), 15-54.
- Perera, E. D. P., Jinno, K., Tsutsumi. , A. Hiroshiro, Y. (2008) *Numerical study of salinity variation in acoastal aquifer*. *Stoch Environ Res Risk Assess* A. 23:1582-1588.
- Reynolds J. M., (1997) *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons, LTD. England, pp. 796.
- Saffarzadeh, M.M., Ebrahimi, F., Khorasan-zadeh, E. (2010) *investigation of saline and fresh waterface in caostal aquifer of Caspian Sea*. 1st nation conference on managemnt of water in cauastal land. *Sari university of Agrictural Sciences and Natural Resources*, 14-17 oct, 45-54pp. (In Farsi).
- Strack, O.D.L. (2016) Salt water interface in a layered coastal aquifer: The only published analytic solution is in error, *Water resources Research*, 52 (2): 1502-1506.
- Swift, C. M., (1967) A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the south west United States. PhD. Thesis, M. I. T, Cambridge, Mass.
- Todd D. K. , and Mays, I. W. (2005) *Ground water hydrology*. John Wiley & Sons, New York, 3th edition, 636 p.
- Trenholm, N. M., and Bentley, L. R. (1998) *The Use of Ground-Penetrating Radar to Accurately Determine Water Table Depths*. Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems. 829-838
- Vafaei, F., Fatemi, S.A. Ashtiyani, B. E. (2009) Moddeing the sea water instrusio in caustal aquifer of Babol watershed. 2th internation symposium of Enrironment, Babol, 15-19 pp. (In Farsi).
- Verruijt. A., (1980) *The rotation of a vertical interface in a porous medium*, *Water Resource Research*, 16, 239–240.
- Vignesh A, Ramanujam N, Swapan Kumar B and Rasool QA. (2016) Application of Time Domain Electromagnetic (Tdem) Methods for Mapping of Salt Fresh Water Intrusions and Evaluate The Porosity in Carbyn’s Cove, Wandoor and Khurumedhera Beaches in South Andaman, *Journal of Coastal Zone Management* 18 (4): 1-5.
- Wait, J.R. (1954) *Onthe relation between telluric currents and the earth’s magnetic field*. *Geophysics*, 19, 281-289.
- Werner, A.D., Vincent, M.B., Post, E.A., Vandenbohede, A., Lu, C., Ataie-Ashtiani, B., Simmons, C.T., Barry, D.A., (2013) *Seawater intrusion processes, investigation and management: recent advances and future challenges*. *Adv. Water Resour.* 51: 3–26.
- Young-kim, K., MinChon, C. and HwaPark,K (2007) A simple method for locating the fresh water saltwater interface using pressure data. *Groundwater*. 45: 223-228.
- Zomorrodian, H., Hosseiniye, H. (2008) *Applied geophysics*. Tehran University press. 1260 pp. (In Farsi).