

ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی آهک امام حسن با استفاده از توموگرافی ژئوالکتریک و آنالیز حساسیت قاطع ژئوالکتریک (مطالعه موردی: آهک امام حسن، چوار - ایلام)

مهدی تاج آبادی

دانشجوی دکتری آبشناسی، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز

حمیدرضا ناصری

دانشیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

فرشاد علیجانی

استادیار دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی

روح الله آدینه وند

دانشجوی دکتری آبشناسی، بخش علوم زمین، دانشگاه شیراز

تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۱۳

تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۴

mhd.tajabadi@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش با استفاده از توموگرافی مقاومت ویژه پتانسیل آب زیرزمینی آهک امام حسن در منطقه چوار استان ایلام مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور پنج نیمرخ ژئوالکتریک با طول ۵۰۰ متر و فاصله الکترودی ۲۰ متر با استفاده از آرایش دوقطبی- دوقطبی متوالی برداشت شد. پس از ارزیابی صحت داده‌های ژئوالکتریک با استفاده از مقاطع حساسیت بلوک‌های مدل و تهیه مدل‌های هموار نیمرخ‌ها، شبه مقاطع مقاومت ویژه به پیروی از تکنیک بهینه‌سازی غیرخطی و وارونسازی به روش حداقل مربعات ترسیم شد. در نهایت با استفاده از شبه مقاطع مقاومت ویژه، مقاطع زمین‌شناسی آنها ترسیم شد. بررسی این مقاطع نشان می‌دهد که به دلیل انحلال پذیری و ستبرای کم، متراکم و فاقد شکستگی بودن آهک‌های گورپی، قابلیت ذخیره آب زیرزمینی پایین می‌باشد. در مقابل تفسیر نیمرخ شاهد در نزدیکی سازند ایلام، احتمال وجود پتانسیل‌های مناسب آب زیرزمینی در این منطقه را پیشنهاد می‌کند.

کلمات کلیدی: آهک امام حسن، توموگرافی مقاومت ویژه، آرایش دوقطبی- دوقطبی، آنالیز حساسیت و مدل وارون، منطقه چوار.

مقدمه

محدوده مورد مطالعه در ۱۸ کیلومتری شمال غربی شهر ایلام و سه کیلومتری شمال بخش چوار قرار دارد (شکل ۱، الف). از لحاظ جغرافیایی در فواصل ۳۳ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه عرض جغرافیایی و ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۱ دقیقه طول جغرافیایی واقع شده است. دسترسی به محدوده از طریق جاده آسفالتی ایلام- ایوان و در ادامه از طریق جاده خاکی منتهی به پتروشیمی ایلام امکان پذیر است (شکل ۱، الف). با توجه به مدل زمین رقومی محدوده مورد مطالعه در حد فاصل تاقدیس کوه گنو در جنوب غرب و آهک‌های تله زنگ و آسماری در شمال و شمال شرق و کوه شش-کلان در جنوب واقع شده است (شکل ۱، ب). کوهها از نوع صخره ساز می‌باشند. از جمله ارتفاعات موجود در محدوده، می‌توان به قله کوه‌های مانشت با ارتفاع ۳۶۵۶ متر و دالاهو در شمال شرقی محدوده اشاره کرد. حداقل ارتفاع نیز حدود ۱۴۴۰ متر در محدوده شهر چوار می‌باشد. با توجه به نقشه همباران استان ایلام، بارندگی متوسط محدوده مورد مطالعه ۶۵۰ میلیمتر در سال می‌باشد (اداره کل هواشناسی استان ایلام، ۱۳۸۷). محدوده مورد مطالعه بر اساس تقسیم‌بندی اشتوکلین (Stocklin, 1972). در پهنه زاگرس چین خورده جای گرفته است. این پهنه شامل تاقدیس‌ها و ناودیس‌هایی با پهنای زیاد تا کم، طویل و تا حدودی مرتفع است.

نظر به روند افزایش جمعیت کره زمین و به ویژه نرخ بالای آن در کشور ما، رشد شدید تقاضا و مصرف آب و کاهش شدید ذخایر آب سطحی و زیرزمینی، به کارگیری روشهای موثر اکتشافی و بهره برداری از منابع آب اجتناب ناپذیر می‌باشد. از میان روشهای مختلف اکتشاف منابع آب، روشهای ژئوالکتریکی سهم قابل ملاحظه‌ای را در حل مشکل اکتشاف آب داشته‌اند. به طوری که سریع و ارزان بودن روش مقاومت ویژه و در دسترس بودن امکانات دستگاهی و روشهای مدل‌سازی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی (Direct Current)، استفاده این روش در ارزیابی پتانسیل آب در سازندهای درز و شکافدار را توجیه پذیر می‌نماید. یکی از پیشرفتهای جدید در سالهای اخیر، استفاده از پیمایش‌های مدل‌سازی/توموگرافی دوبعدی برای به تصویر درآوردن مناطق با زمین‌شناسی تقریباً پیچیده می‌باشد. با وجود پیشرفتهای بسیار در زمینه ابزارهای سنجش مقاومت ویژه و نرم افزارهای تصویرساز الکتریکی، تفسیر داده‌های ژئوالکتریک پارامترهای بسیاری را در بر می‌گیرد و این تفسیر زمانی سخت‌تر می‌گردد که بعضی از پارامترهای مهم شامل (پایداری، نیرومندی و یگانگی مدل) در شبیه‌سازی مقاومت ویژه در نظر گرفته نشوند (Cardarelli and Fischanger, 2005). به طور کلی مقاومت ویژه یک سنگ خاص یا نمونه خاک به فاکتورهایی از جمله تخلخل، درجه اشباع سدگی از آب و غلظت نمک‌های محلول بستگی دارد (Griffith and Barker, 1993).

زمین‌شناسی منطقه شامل واحدهای کرتاسه به بعد می‌شود (آقانیاتی، ۱۳۸۳). قدیمی‌ترین واحدهای سنگی در این محدوده گروه بنگستان شامل سازندهای سروک، سورگه و ایلام با سن کرتاسه زیرین (آلبین-کنیاسین) می‌باشند. در محدوده مورد مطالعه بیشترین گسترش و پراکندگی مربوط به سازند گورپی می‌باشد که با آبرفتها و مخروط افکنه‌های قدیمی و جدید پوشیده شده است (شکل ۲). از لحاظ زمین‌ریخت‌شناسی سازندهای پابده و گورپی دارای توپوگرافی پست و تپه ماهوری می‌باشند و سازندهای آهکی آسماری و ایلام - سروک ارتفاعات محدوده را تشکیل می‌دهند.

تاکنون مطالعات ژئوالکتریک به طور گسترده در سرتاسر دنیا به منظور اکتشاف آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است. به عنوان مثال vincenz (1968) برای اکتشاف آب زیرزمینی در سیستم‌های درزو شکافدار و ساختارهای جریانی تحقیقات گسترده‌ای را انجام داد و با توجه به حضور میان لایه‌های رسی در سازندهای آهکی، مشکلات ناشی از کاهش ژئوالکتریکی در سازندهای آهکی با میان لایه‌های رسی را تشریح کرد. Smith and Vozoff (1984) و Tripp et al. (1984) روش بهینه سازی حداقل مربعات با تفاضل محدود را برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری به کار گرفتند. لی در سال ۱۹۷۲، روش وارون‌سازی حداقل مربعات را برای مدل‌سازی توده‌هایی با مرزهای تدریجی بین لایه‌های همگن، بروک و بارکر در سال ۱۹۹۵ و الینکا و یارمانسی در سال ۲۰۰۰ روش وارون‌سازی نیرومند را برای مدل‌سازی داده‌های حاصل از ساختارهای ساده‌ای نظیر هورست و گرابن استفاده کرده‌اند (Loke and Barker, 1995; Olayinka and Yaramanci, 2000).

دی گروت-هدلین و کانستابل در سال ۱۹۹۰ مدل وارون‌سازی با محدودیت همواری را ارائه دادند که مطابقت بیشتری با ساختارهای زمین‌شناسی واقعی دارد (de Groot-Hedlin and Constable, 1990). ساساکی مقاومت ویژه در داخل گمانه برای آرایه‌های قطبی-قطبی، قطبی - دوقطبی و دوقطبی - دوقطبی را با هم مقایسه کرد (Sasaki, 1992).

لوک و بارکر از روش وارون برای نقشه برداری ژئوفیزیکی و تهیه شبه مقاطع حاصل از پیمایش‌های ورنر و ونر-شلومبرژه استفاده کردند (Loke and Barker, 1996) و داهلین و بینگ با استفاده از چهار مدل مصنوعی، یک مقایسه عددی بین تصویرسازی دوبعدی با هشت آرایه الکترودی انجام دادند (Dahlin and Bing, 2001). ناصری و همکاران (۱۳۸۷، روش توמוگرافی را برای شناسایی سامانه حاکم بر کارست تاقدیس آسماری واقع در جنوب شرق مسجد سلیمان به کار گرفتند و همچنین هیدروژئولوژی نا متعارف سازند آسماری در تاقدیس کمردراز ایذه را مورد بررسی قرار دادند (ناصری و همکاران، ۱۳۹۰).

در این مطالعه توמוگرافی الکتریکی دوبعدی در ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی در یک محیط آهکی-مارنی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور پنج نیمرخ ژئوالکتریک با آرایه دوقطبی - دوقطبی استفاده شده که شامل چهار نیمرخ در بخشهای آهکی سازند گورپی بوده و یک نیمرخ در نزدیکی آهک ایلام در دماغه تاقدیس گنو که جهت صحت‌سنجی داده‌ها و شناسایی آبخوان آبرفتی می‌باشد.

مزیت مهم مدل توמוگرافی دوبعدی نسبت به روش سونداژ مقاومت ویژه (مدل یک بعدی) این است که علاوه بر نشان دادن تغییرات مقاومت ویژه در جهت قائم، تغییرات در جهت افقی، در امتداد یک خط پیمایش، را نیز نشان

می‌دهد. در این حالت فرض می‌شود که مقاومت ویژه در جهت عمود بر خط پیمایش بدون تغییر باقی می‌ماند (Griffith and Barker, 1993). ناصری و علیجانی، ۱۳۹۱ با تلفیق نتایج آزمون پمپاژ و ژئوالکتریک سیستم‌های کارست سازندهای آسماری و ایلام-سروک را مورد بررسی قرار دادند. ولی تاکنون بر روی سازند آهکی امام حسن مطالعه‌ای صورت نگرفته است.

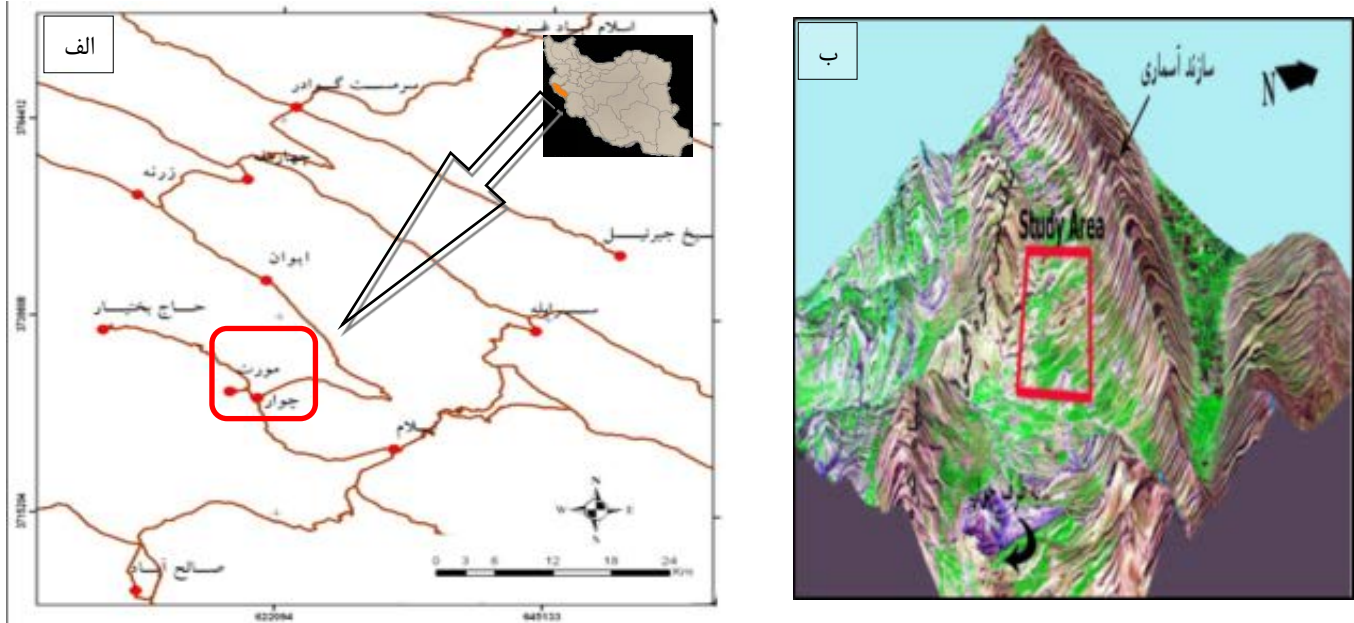
نتیجه نهایی توמוگرافی دو بعدی به دست آوردن مقطع مقاومت ویژه مدل وارون می‌باشد که تغییرات زیرسطحی مقاومت ویژه را نشان می‌دهد. البته باید توجه داشت که با اتکا به مقطع مقاومت ویژه مدل وارون، به تنهایی نمی‌توان در مورد لایه‌های زمین‌شناسی و وضعیت آب‌دار بودن آن‌ها نظر داد. برای تصمیم‌گیری قاطع در مورد لیتولوژی و وضعیت آب زیرزمینی نیاز به اطلاعات بیشتری در مورد وضعیت زمین‌شناسی زیر سطحی منطقه می‌باشد که این اطلاعات از طریق ستون زمین‌شناسی چاه‌های اکتشافی و بهره‌برداری موجود در منطقه و یا بررسی‌های ژئوفیزیک قدیمی به دست می‌آید.

روش کار

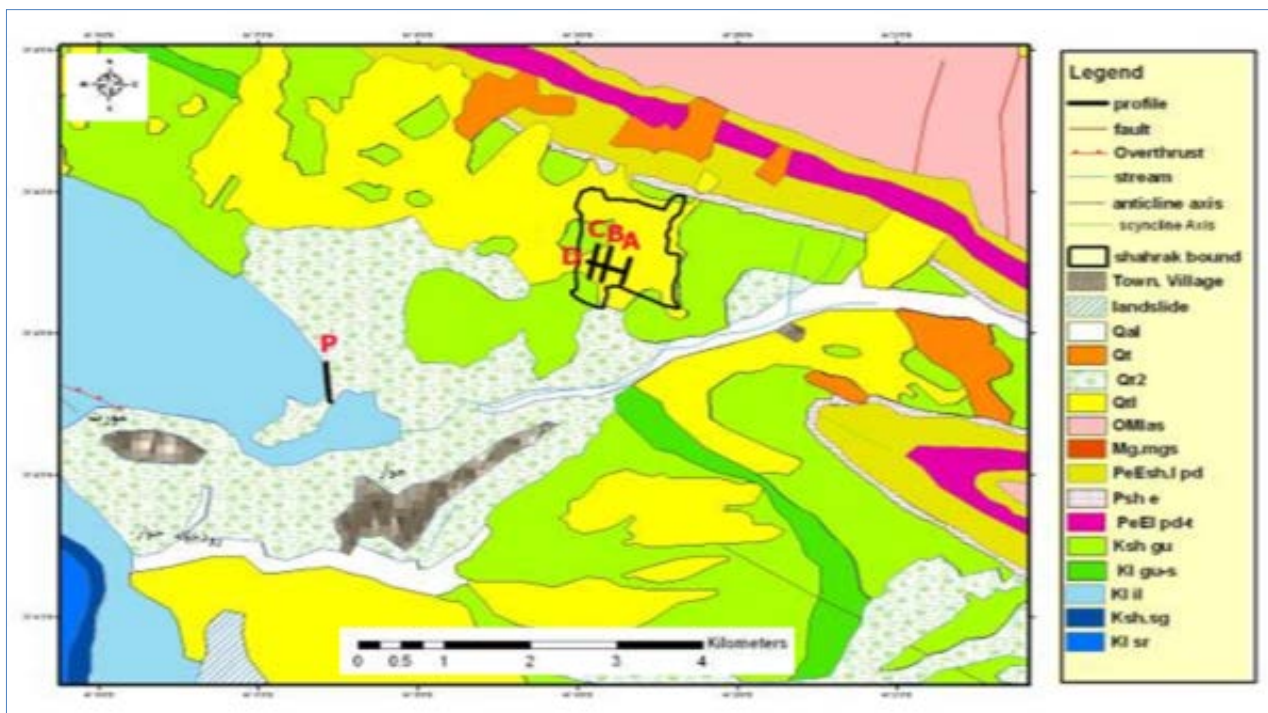
در بررسی‌های ژئوالکتریک انتخاب بهترین آرایش ژئوالکتریک برای یک پیمایش مقاومت ویژه به نوع ساختاری وابسته است که باید نقشه آن تهیه شود، همچنین حساسیت دستگاه رزیستیویته متر و میزان نوفه موجود در محدوده نیز در انتخاب نوع مناسب آرایش تأثیرگذار هستند. در این تحقیق تابع حساسیت در آرایش دوقطبی-دوقطبی به عنوان مکمل روش توמוگرافی مقاومت ویژه در شناسایی پتانسیل آب در آهک‌های سازند ایلام نیز استفاده شده است. داده‌ها مورد نیاز برای این پژوهش با برداشت پنج نیمرخ ژئوالکتریک با آرایه دوقطبی-دوقطبی در نزدیکی شهر چوار برداشت شد.

چهار نیمرخ اول شامل نیمرخ‌های C,B,A با راستای N10E و نیمرخ D با راستای N80W بر روی آبرفت‌ها و مخروط افکنه‌های قدیمی (قرار گرفته بر روی آهک‌های مارنی سازند گورپی) و نیمرخ پنجم (نیمرخ P) بر روی آبرفت‌ها و مخروط افکنه‌های جوان در ۲/۵ کیلومتری محدوده مورد مطالعه (به عنوان نیمرخ شاهد) برداشت گردیده است (شکل ۲). در این مطالعه با توجه به ساختار منطقه، آرایش دو قطبی-دوقطبی جهت پیمایش ژئوالکتریک به کار گرفته شد. مزیت این آرایش نسبت به سایر روش‌های ژئوالکتریک، قدرت تفکیک بالای آن در به تصویر کشیدن ساختارهای قائم از جمله گسل خوردگی و شکستگی می‌باشد (Dahlin and Bing, 2001).

بر اساس مقایسه‌ی صورت گرفته توسط زو و همکاران نشان داده شده که از بین سه آرایش شلومبرژه، دوقطبی-دوقطبی و ورنر، آرایش دوقطبی-دوقطبی به نحو بهتری در شناسایی زونهای گسلی و شکافدار موثر می‌باشد (Zhou et al., 2002). در این آرایش دو پارامتر a و n مطرح است که a فاصله الکترودی و عدد n برابر با نسبت فاصله الکترودهای داخلی جریان و پتانسیل به فاصله دوقطبی پتانسیل یا دوقطبی جریان در دو طرف آرایش می‌باشد. با استفاده از این آرایش تعداد ۱۴۰ نقطه داده با $n=7$ در امتداد نیمرخ P به طول ۵۰۰ متر و فاصله الکترودی ۲۰ متر برداشت گردید. لازم به ذکر است که در آرایش دوقطبی-دوقطبی برای برگردان کردن داده‌های مقاومت ویژه ظاهری حاصل از عملیات صحرائی، نرم‌افزار وارون‌سازی مقاومت ویژه، Res2dinv، استفاده شد و با استفاده از مدل‌سازی وارون مدل دوبعدی مقاومت ویژه زمین ساخته شد.



شکل ۱. الف) موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه ب) مدل زمین رقومی محدوده مورد مطالعه.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه و موقعیت پروفیل های ژئوالکتریک بر روی آن (بر گرفته با تغییرات از نقشه ۱ به ۱۰۰۰۰۰ سازمان زمین شناسی کشور).

برای وارون سازی با این نرم افزار ابتدا مقادیر مقاومت ویژه ظاهری، فاصله الکترودی، عدد n و ارتفاع محل قرارگیری الکترودهای جریان و پتانسیل در قالب مخصوص آرایش دوقطبی-دوقطبی تهیه و با پسوند داده ای (*dot) ذخیره می شود (Loke, 1999). در این تحقیق از روش نیمرخ برداری الکتریکی (که به کاوش با فاصله های ثابت نیز معروف است) برای تعیین تغییرات جانبی مقاومت ویژه و از توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در مرحله تفسیر استفاده شده است. به این صورت که الکترودهای جریان و پتانسیل در یک فاصله ثابت نگه داشته می شوند و به طور پیشرونده در امتداد یک نیمرخ حرکت داده می شوند (Kearey et al., 2003).

روش وارون پیش فرض که توسط این نرم افزار استفاده می شود بر اساس تکنیک بهینه سازی غیرخطی و روش حداقل مربعات با محدودیت همواری می باشد (Knodel et al., 2007; De Groot-Hedlin and Constable, 1990). این روش وارون مربع اختلافات بین مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده و محاسبه ای را کاهش می دهد و مدل های مقاومت ویژه زمین با تغییرات تدریجی در امتداد زون های مقاومت ویژه مختلف را تولید می کند. (شکل ۳) ترتیب مراحل روش حداقل مربعات در وارون سازی داده های مقاومت ویژه که توسط نرم افزار Res2dinv به کار گرفته می شود را نشان می دهد. مقطع حساسیت مدل وارون نیز با استفاده از مدل حساسیت لینک شده به نرم افزار Res2dinv به دست می آید.

در تجسس دوبعدی عموماً تکنیک وارون‌سازی به روش حداقل مربعات با محدودیت همواری به کار گرفته می‌شود که بر اساس معادله زیر است (Loke and Barker, 1996):

$$(J^T J + uF)d = J^T g$$

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$$

که در آن

J : ماتریس مشتقات جزئی

u : عامل میرایی

d : بردار انحراف مدل

g : بردار تفاضل

T : نشان دهنده پارامترهای محاسبه‌ای

f_x : فیلتر هموارساز افقی

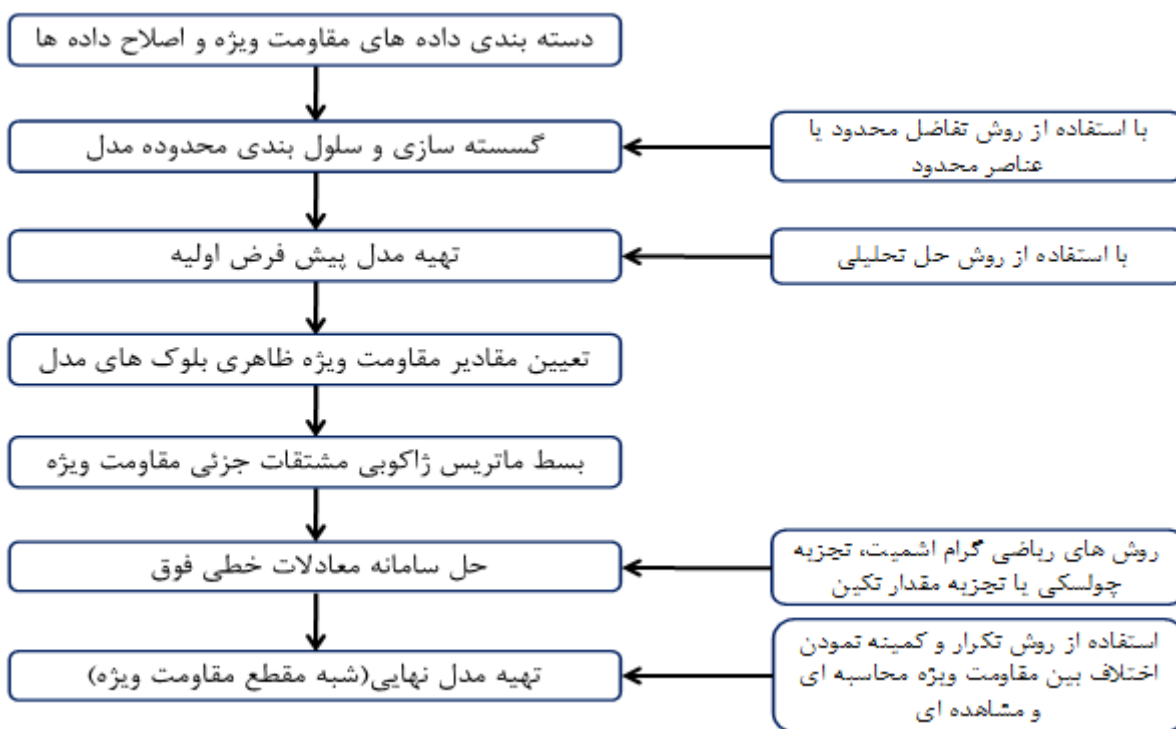
f_z : فیلتر هموارساز عمودی

می باشد.

در برداشت داده‌های نیمرخ‌های ژئوالکتریکی، هر تغییری در مقدار مقاومت ویژه سطح زیرین چه تأثیری بر پتانسیل اندازه‌گیری شده توسط یک آرایش

خاص خواهد گذاشت که این موضع را با تابع حساسیت نشان می‌دهند. به عبارت دیگر تابع حساسیت نشان دهنده واکنش هر آرایش الکترودی خاص نسبت به ساختارهای زیرسطحی است. (شکل ۴) نمودار کنتوری تابع حساسیت برای آرایش دوقطبی-دوقطبی در یک نیم فضای همگن را نشان می‌دهد. در آرایش دوقطبی-دوقطبی بیشترین مقادیر حساسیت بین جفت الکتروود جریان و همین طور جفت الکتروود پتانسیل وجود دارد و در فاصله بین آنها کمترین مقدار را دارد. در این مطالعه آرایش دوقطبی - دوقطبی با فاصله الکتروودی ۲۰ متر برای پنج نیمرخ A, B, C, D و P استفاده شده است.

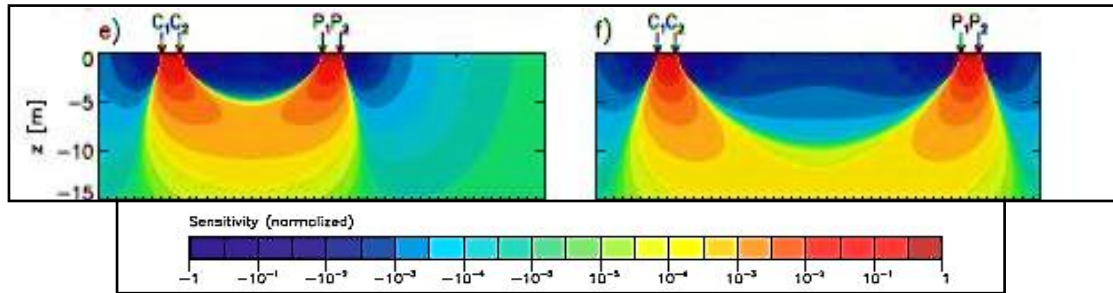
این آرایش با اندازه‌گیری یکسری داده های مقاومت ویژه ظاهری در دو راستای افقی و قائم مقدمات لازم جهت تهیه مدل‌های دو بعدی واقعی را فراهم می‌کند (Loke and Barker, 1996; Loke, 1999). شبه مقاطع مقاومت ویژه دو بعدی مربوط به محدوده مورد مطالعه توسط نرم افزار Res2dinv و با استفاده از داده‌های جمع آوری شده توسط دستگاه سنجش مقاومت ویژه تهیه شده‌اند. مقاطع ترسیم شده که به صورت دو شبه مقطع و یک مقطع مقاومت ویژه می‌باشد (که به ترتیب شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده، شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری محاسبه ای توسط مدل و مقطع مقاومت ویژه مدل وارون می‌باشند) (Griffith and Barker, 1993) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۳. فلوچارت مراحل روش وارون حداقل مربعات در وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه

مقاومت ویژه ظاهری، داده‌ها وارد کامپیوتر شد و پس بررسی و تحلیل اولیه، اقدام به حذف داده‌های غلط و اضافی گردید. داده‌ها پس از تصحیح در قالب فرمت مناسب به نرم افزار وارون‌سازی معرفی شد. سپس شبه مقاطع مقاومت ویژه به دو روش ممکن رسم گردید و در نهایت نتایج حاصل از آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

الگوی کنترولی حساسیت در محل الکترودها تقریباً قائم است. به همین دلیل آرایش دوقطبی- دوقطبی به تغییرات افقی در مقاومت ویژه بسیار حساس است و برای به تصویر کشیدن ساختارهای قائم به کار می‌رود (Knodel et al., 2007). بعد از اتمام عملیات صحرایی و برداشت ارقام



شکل ۴. تابع حساسیت در آرایش دوقطبی- دوقطبی (Knodel et al., 2007)

بحث

شبه مقاطع (pseudo sections) مقاومت ویژه آن‌ها با استفاده از نرم افزار Res2dinv ترسیم شد که در اینجا به منظور رعایت اختصار از بین شبه مقاطع چهارگانه تنها شبه مقطع D (عمود بر سه شبه مقطع A، B و C) انتخاب شده که نتایج توموگرافی ژئوالکتریک و آنالیز حساسیت آن ارائه و نتایج حاصل از این شبه مقاطع با شبه مقطع P مقایسه شده است.

در آرایش دوقطبی- دوقطبی مقادیر بالای حساسیت در زیر دوقطبی‌های جریان و پتانسیل رخ می‌دهد و این حالت برخلاف سایر آرایش‌ها است که تقریباً بیشترین مقادیر حساسیت آنها متعلق به مرکز آرایش می‌باشد. مقادیر حساسیت معیاری از مقدار اطلاعات درباره مقاومت ویژه بلوکهای مدل حاوی داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد، به طور کلی هر چه مقدار حساسیت بلوکی بالاتر باشد، مقدار مقاومت ویژه مدل از منطق بالاتری برخوردار است (Loke, 1999). از آنجایی که تابع حساسیت در نزدیکی الکترودها مقادیر بسیار بالایی دارد، لذا معمولاً بلوکهای نزدیک به سطح مقادیر حساسیت بالاتری دارند. علاوه بر این بلوکهای نزدیک به کناره‌ها و کف مدل حساسیت نیز مقادیر حساسیت بالاتری دارند و این مهم به دلیل اندازه بزرگتر این بلوک‌ها در نتیجه گسسته‌سازی با روشهای تفاضل محدود و عناصر محدود می‌باشد. برای رسم مقاطع حساسیت بلوکهای مدل در این مطالعه، مقادیر حساسیت محاسبه‌ای با تقسیم کردن بر مقادیر حساسیت متوسط به هنجار شده‌اند. در این مطالعه با توجه به آنالیز حساسیت، لایه‌های رسی از لایه‌های آبدار بازشناخته شد.

آنالیز حساسیت نیمرخ D: نیمرخ D عمود بر نیمرخ‌های قبلی و نزدیک به انتهای آنها داده برداری شده است. در سمت راست مقطع حساسیت این نیمرخ، بلوکهایی با حساسیت بسیار پایین مشاهده می‌شود. حساسیت بلوکهای مدل در قسمت پایین سمت راست بسیار کمتر از سمت چپ می‌باشد. این امر می‌تواند به دو دلیل حاصل شود، یکی به علت اینکه تمرکز نقاط داده- ای در سمت راست بیشتر از سمت چپ میباشد و عامل دیگر تفاوت سنگ- شناختی در دو طرف نیمرخ می‌باشد و اما از آنجایی که نقاط داده در سمت چپ و راست نیمرخ تفاوتی ندارند، لذا دلیل دوم منطقی‌تر به نظر می‌رسد، به این ترتیب که درصد شیل و مارن گورپی در سمت راست نیمرخ بیش از سمت چپ می‌باشد. در مرکز مقطع حساسیت نیمرخ D بلوکهای با مقادیر حساسیت بالا مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان دهنده آهک‌های مارنی باشد (شکل ۵، الف).

به طور کلی در بررسی‌های ژئوالکتریکی، زمانی که محیط مورد بررسی یک محیط آواری باشد، نهشته‌های رسی، رس ماسه‌ای و ماسه رسی مقاومت ویژه کمتری نسبت به نهشته‌های گراول و ماسه دارند و اگر در محیط مورد بررسی نهشته‌های کربناته نیز وجود داشته باشد، در این حالت مقاومت ویژه سنگ‌های کربناته بیشتر از نهشته‌های آواری می‌باشد. مقاومت ویژه آب زیرزمینی از یک تا ۲۰۰ اهم‌متر (بسته به غلظت نمکهای محلول و لیتولوژی محل) متغیر است. اما بایستی در نظر داشت که در مقادیر مقاومت ویژه رده- های مختلف سنگ‌ها و خاک‌ها همبوشانی وجود دارد (Loke, 1999). مسئله مهمی که به ویژه در این پژوهش نیز به آن توجه شده است، همراهی لایه‌های شیل و مارن با لایه‌های آهکی است که می‌تواند در تفسیر نتایج حاصل ابهام ایجاد کند. در مورد یک حفره زیرزمینی، اگر سنگ میزبان در نهشته‌های آواری (ماسه سنگ، شیل و نهشته رسی) قرار داشته باشد، در این صورت حفره خشک به وسیله مقاومت ویژه بالاتر شناخته می‌شود زیرا در این حالت هوا به صورت عایق عمل می‌کند. به هر حال در این نوع سنگ‌ها فرض وجود حفره‌های طبیعی مشکل است و این حفره‌ها در صورت وجود به صورت مصنوعی ایجاد شده‌اند. حفره‌های طبیعی اساساً به سنگهای کربناتی نسبت داده می‌شود. حفره‌ها با شکل‌ها و ابعاد مختلف در سنگ‌های آهکی، در نتیجه شکستگی ایجاد شده و در اثر هوازدگی شیمیایی گسترش می‌یابند. در سنگ‌های آهکی اگر حفره خالی و حاوی هوا باشد به وسیله مقاومت ویژه بسیار بالا شناخته می‌شود و اگر سنگ خردشده باشد دارای مقاومت ویژه پایین‌تری خواهد بود و با افزایش درجه خردشدگی سنگ، تباین بین مقاومت ویژه حفره و سنگ میزبان آشکارتر می‌شود. اگر حفره‌های آهکی با آب یا رس پر شوند، در نتیجه با مقاومت ویژه پایین‌تر متمایز می‌شوند، زیرا مقاومت ویژه آب و رس پایین‌تر از سنگ‌های کربناته خردشده می‌باشد (Samanovac and Alvanja., 2007). در حالت کلی در سنگ‌های آواری، می‌توان چنین استنباط کرد که مقادیر مقاومت ویژه بسیار پایین (کمتر از ۲۰ اهم‌متر)، سازند رسی توده‌ای را نشان می‌دهند و سازندهای با مقاومت ویژه متوسط (۲۰ تا ۱۵۰ اهم‌متر) نشان دهنده نهشته‌های ضخیم‌تر (ماسه و گراول) با نفوذپذیری نسبتاً بالا می‌باشند، مقادیر از ۱۵ تا ۱۰۰ اهم‌متر را نیز می‌توان به عنوان آبخوان در نظر گرفت (Loke and Barker, 1995).

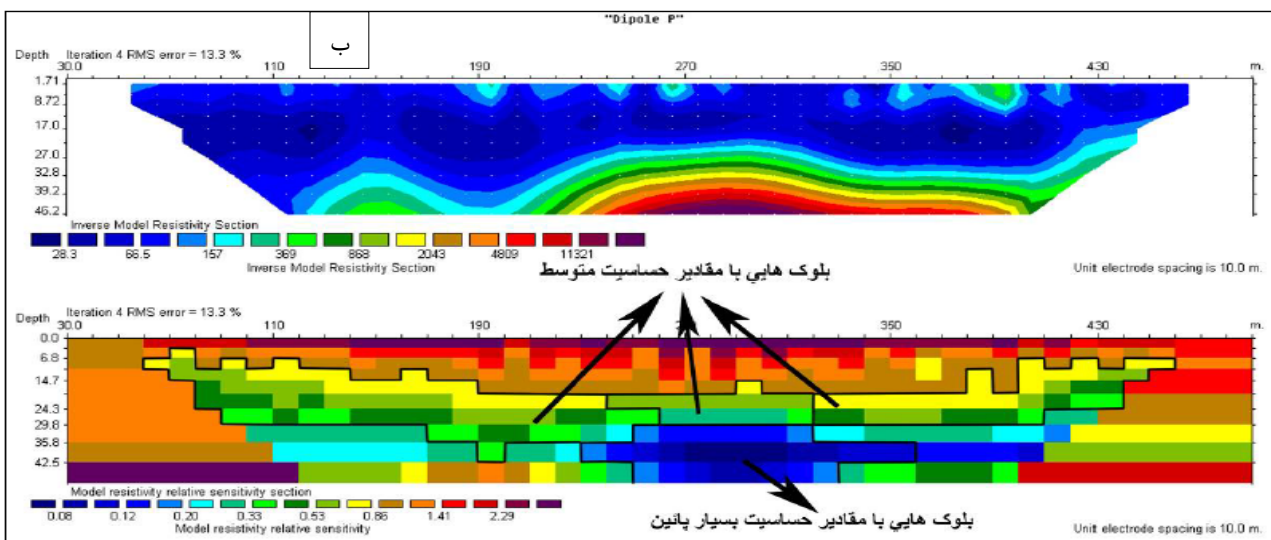
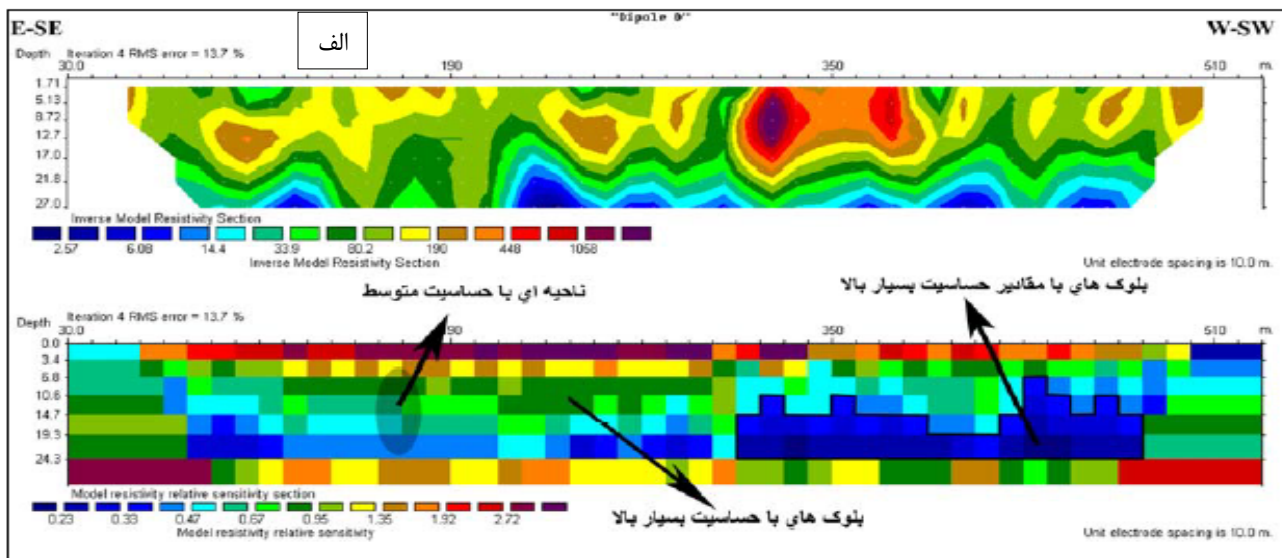
در طول نیمرخ‌های A، C و D به ترتیب تعداد، ۷۰، ۸۵ و ۹۰ نقطه داده (point datum) با $n = 5$ و در طول نیمرخ‌های B و P به ترتیب تعداد ۸۷ و ۱۴۰ نقطه داده با $n = 6, 7$ داده برداری شده، سپس آنالیز حساسیت و

۱۳/۷ به دست آمده است و توسط آن مقطعی از زمین به فاصله افقی ۴۶۰ و عمق ۳۰ متر شبیه سازی می شود (شکل ۶).

بررسی بی‌هنجاری‌های مقاومت ویژه در امتداد این نیمرخ نشان می‌دهد که یک بی‌هنجاری مقاومت ویژه بالا در فاصله ۳۲۰ متری و نزدیک به سطح زمین، یک بی‌هنجاری مقاومت ویژه متوسط در فاصله ۱۷۵ و عمق ۱۵ متری و در نهایت یک بی‌هنجاری مقاومت ویژه پایین در فاصله ۲۲۰ متری مقطع وجود دارد. در فاصله ۱۵۰ تا ۲۵۰ متری این نیمرخ رسوبات با اندازه متوسط دیده می‌شود و در این قسمت لایه‌های مارنی در عمق بیشتری قرار دارند. این قسمت تقریباً مشابه با قسمت‌های انتهایی نیمرخ‌های A و B می‌باشد.

آنالیز حساسیت نیمرخ P: نکته‌ای که در مقطع حساسیت نیمرخ P قابل توجه است انطباق سلول‌هایی با مقادیر حساسیت بسیار پایین با توده‌هایی با مقادیر مقاومت ویژه بالا در مدل وارون می‌باشد که این می‌تواند ناشی از شکستگی یا وجود آب زیرزمینی در سازند ایلام باشد. در مقطع حساسیت این نیمرخ سه محدوده مجزا با مقادیر حساسیت متوسط نیز مشاهده می‌شود که محدوده بلوکی سمت چپ گسترش بیشتری دارد که بیانگر عمق آبرفت بیشتر در سمت چپ نیمرخ می‌باشد (شکل ۵، ب).

توموگرافی ژئوالکتریک نیمرخ D: نیمرخ D در راستای شرق - جنوب شرق، غرب - شمال غرب انتخاب شده است. محل تقاطع این نیمرخ با نیمرخ‌های A، B و C در فاصله ۳۰۰ متری از ابتدای این نیمرخ‌ها می‌باشد. مقطع مدل هموار نیمرخ D بعد از چهار مرحله تکرار با خطای RMS برابر با

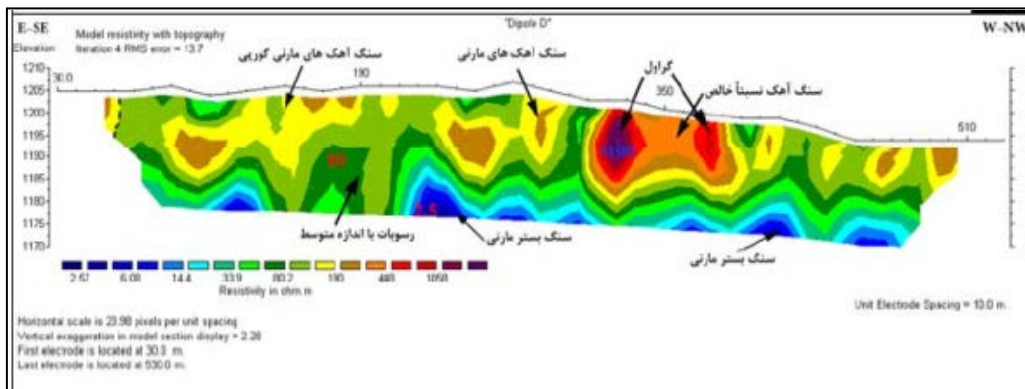


شکل ۵. مقادیر حساسیت سلول‌های مدل که در وارون‌سازی؛ الف) نیمرخ D و ب) نیمرخ P استفاده شده است.

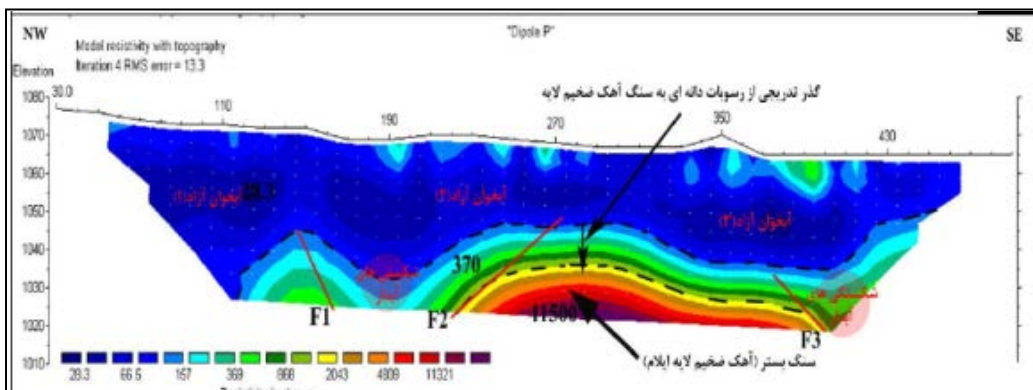
با توجه به مدل سازی هموار آبدار بودن این لایه ها کاملاً مشخص می شود. با توجه به این شبه مقطع این طور نتیجه گرفته می شود که ستبرای آبرفت در طول این نیمرخ در پاره ای از نقاط به بیش از ۴۰ متر می رسد، ضمن اینکه آبخوان این منطقه از طریق گسل های احتمالی و شکستگی هایی، با سازند های سروک - ایلام مرتبط می باشد. با این تفسیر فاصله های ۷۰، ۱۹۰ و ۳۵۰ متری این نیمرخ را می توان برای حفر چاه در نظر داشت. نتایج حاصل از چاه اکتشافی پتروشیمی ایلام (شرکت سهامی آب منطقه ای استان ایلام، ۱۳۸۲) در مجاورت این نیمرخ نیز نتایج فوق را تایید می کند.

با توجه به مشابهت مقاطع A, B, C با مقطع D به منظور رعایت اختصار در ادامه تنها تصاویر مربوط به شبه مقطع های مقاومت ویژه و حساسیت برای نیمرخ های A, B, C در شکل های شماره ۸ تا ۱۰ آورده شده و از تفسیر مجدد آنها خودداری گردیده است.

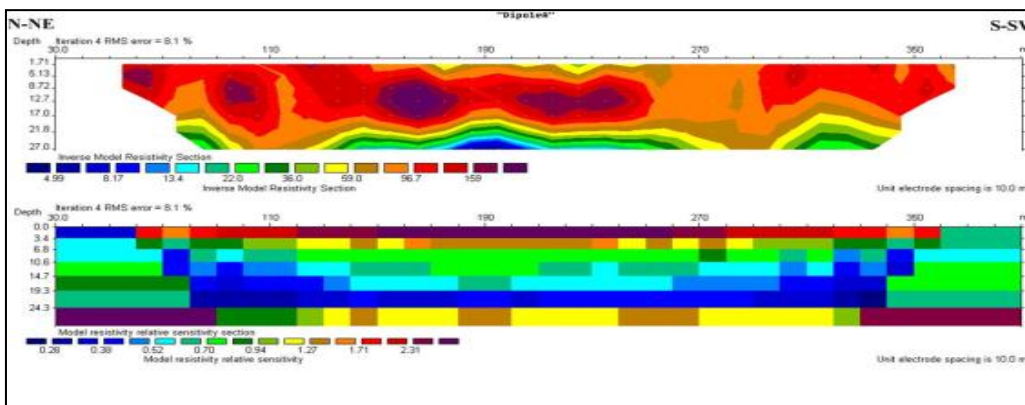
در طول این نیمرخ از سمت شرق به غرب بر ستبرای سنگ بستر ماری افزوده و از ستبرای سنگ آهک های ماری گورپی کاسته می شود. توموگرافی ژئوالکتریک نیمرخ P: این نیمرخ در فاصله ۲/۵ کیلومتری جنوب باختری محل نیمرخ A، بر روی آبرفت ها و مخروط افکنه های جوان و در مجاورت سازند ایلام قرار دارد. این نیمرخ دارای راستای شمال غرب - جنوب شرق می باشد. مدل هموار این نیمرخ بعد از چهار مرحله تکرار با خطای RMS برابر با ۱۳/۳ به دست آمده است و توسط آن مقطعی از زمین به فاصله افقی ۴۰۰ و عمق ۴۶ متر شبیه سازی می شود (شکل ۷). با توجه به داده های حاصل از این نیمرخ و لاگ چاه اکتشافی پتروشیمی ایلام در مجاورت آن مقادیر مقاومت ویژه اکتسابی در نیمرخ های ژئوالکتریک A تا D مورد صحت سنجی قرار گرفته اند. در شبه مقطع آن سه زون با مقاومت ویژه ۲۸-۷۰ اهم متر قابل تفکیک است که به صورت سه آبخوان آزاد در نظر گرفته شده است.



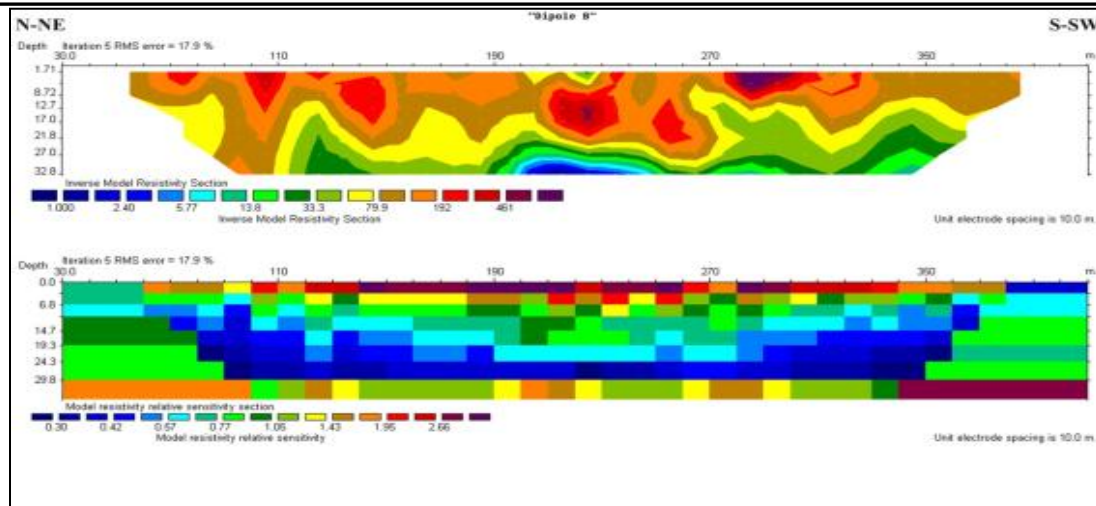
شکل ۶. شبه مقطع مقاومت ویژه حاصل از مدل هموار نیمرخ D



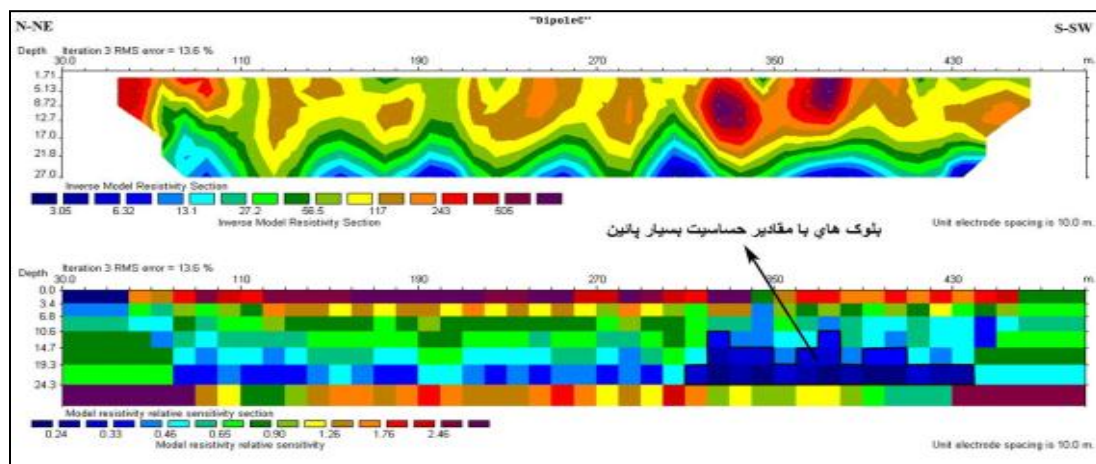
شکل ۷. شبه مقطع مقاومت ویژه حاصل از مدل هموار نیمرخ P



شکل ۸. شبه مقطع مقاومت ویژه حاصل از مدل هموار و مقطع حساسیت نیمرخ A



شکل ۹. شبه مقطع مقاومت ویژه حاصل از مدل هموار و مقطع حساسیت نیمرخ B



شکل ۱۰. شبه مقطع مقاومت ویژه حاصل از مدل هموار و مقطع حساسیت نیمرخ C

نتیجه گیری

در این مقاله توموگرافی الکتریکی در ارزیابی پتانسیل آب زیرزمینی آهک‌های امام حسن سازند گورپی در منطقه چوار واقع در شمال ایلام به کار گرفته شد. انتخاب آرایش الکترودی مناسب در پیمایش‌های مقاومت ویژه نقش مهمی را در یک عملیات ژئوالکتریک موفق و تفسیر مناسب ایفا می‌کند و در این انتخاب خصوصیات هدف مورد بررسی، حساسیت‌های هر آرایه الکترودی به شکل‌های زمین‌شناسی مشخص و بودجه پروژه بسیار مهم می‌باشد. از آنجایی که هدف این مطالعه اکتشاف آب در سازندهای آهکی بود و با توجه به موقعیت خاص محدوده از آرایش دوقطبی-دوقطبی استفاده شد تا هم پهنه‌های شکستگی و گسلی در صورت وجود شناسایی شوند و هم از عمق بررسی متوسط این آرایش برای شناخت سنگ کف محدوده استفاده شود. با توجه به نمودارهای حساسیت نیمرخ‌های ژئوالکتریک که دارای دقت کافی بوده و همچنین با توجه به مقاطع وارون ترسیم شده، می‌توان در مورد پتانسیل آب زیرزمینی این محدوده اظهار نظر نمود. نکته جالب دیگر در این مطالعه تفاوت مقطع حساسیت نیمرخ‌های A, B, C و D با مقطع حساسیت نیمرخ P بود که با توجه به آن لایه‌های رسی از لایه آبدار بازشناخته شد.

با توجه به نتایج حاصل از توموگرافی نیمرخ‌های A, B, C و D، آهک‌های امام حسن و سیمره در زیر آبرفت‌های قدیمی در منطقه چوار وجود ندارند و سنگ‌شناسی غالب گورپی در منطقه چوار شیل و آهک نازک‌لایه مارنی می‌باشد. لذا حفر چاه بر روی آبرفت‌ها و مخروط افکنه‌های قدیمی توصیه نمی‌شود. نتایج تفسیر داده‌های برداشتی در امتداد نیمرخ P نشان داد که در شبه مقطع آن سه زون با مقاومت ۷۰ - ۲۸ اهم‌متر قابل تفکیک است که به صورت سه آبخوان آزاد در نظر گرفته شدند. از بین آبخوان‌های این نیمرخ آبخوان شماره یک دارای گسترش بیشتری است. با این تفسیر فاصله-های ۷۰، ۱۹۰، ۷۰ متری این مقطع می‌تواند به منظور تأمین آب منطقه چوار راهگشا باشد که از بین آنها فاصله ۷۰ متری از اولویت بیشتری برخوردار است.

تشکر و قدر دانی

نویسندگان از معاونت پژوهشی دانشگاه شهید بهشتی که کلیه هزینه‌های مربوط به عملیات ژئوالکتریک را تأمین نموده سپاسگزاری می‌نمایند. همچنین از شرکت سهامی آب منطقه‌ای استان ایلام برای در اختیار گذاشتن داده‌های مورد نیاز تقدیر و تشکر می‌شود. از داوران محترم مجله محترم زمین شناسی کاربردی پیشرفته نیز به خاطر نظرات ارزشمندشان قدردانی می‌شود.

منابع

- آقابات، س.ع.، ۱۳۸۳، "زمین شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۶۸ ص.
- اداره کل هواشناسی استان ایلام، ۱۳۸۷، "رسم نقشه های خطوط هم بارش و تفسیر آنها"، سایت رسمی اداره کل هواشناسی استان ایلام.
- ناصری، ح. ر.، علیجانی، ۱۳۹۱، "تحلیل سیستم های کارست سازندهای آسماری و ایلام - سروک در جنوب غرب ایذه"، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، جلد ۱، شماره ۳.
- ناصری، ح. ر.، علیجانی، نخعی، م و محرایی نژاد، ع.، ۱۳۹۰، "هیدروژئولوژی نا متعارف سازند آسماری در تاقدیس کمردراز ایذه"، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، جلد ۱، شماره ۱.
- ناصری، ح. ر.، علیجانی، ف؛ و میرزایی، س.ح.، ۱۳۸۷، "توموگرافی ژئوالکتریک کارست تاقدیس آسماری (جنوب شرق مسجد سلیمان)"، مجله علوم دانشگاه شهید چمران.
- سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور "نقشه زمین شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ ایلام."
- شرکت سهامی آب منطقه ای استان ایلام، ۱۳۸۲، "مشخصات چاه آهکی پتروشیمی ایلام واقع در منطقه تنگ حمام چوار."
- Cardarelli, E., and Fischanger F., 2005, "2D data modelling by electrical resistivity tomography for complex subsurface geology", *Geophys Prosp*, Vol.54, pp.121-133.
- Dahlin, T., and Bing, Z., 2001, "A numerical comparison of 2D resistivity imaging with eight electrode arrays", Department of Geotechnology, Lund University, Box.118, S-221 00, lund, Sweden.
- De Groot-Hedlin, C., and Constable, S., 1990, "Occams inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data", *Geophysics*, Vol.55, pp.1613-1624.
- Griffith, D.H., and Barker, R.D., 1993, "Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology", *Journal of Applied Geophysics*, Vol.29, pp.211-226.
- Kearey, P., Brooks, M., and Hill, I., 2003, "An introduction to geophysical exploration", 3rd ed, Blackwell Publishing, 262p.
- Knodel, K., Lang, G., and Voigt, H.J., 2007, "Environmental Geology; handbook of field method and case studies", Springer, 1357p.
- Loke, M.H., 1999, "Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2D and 3D surveys; The theory and practice of electrical imaging", *EEGS European section 5th meeting, badapast hungary*, 61p.
- Loke, M.H., and Barker, R. D., 1995, "Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections", *Geophysics*, Vol. 60, No. 6, pp. 1682-1690.
- Loke, M.H., and Barker, R. D., 1996, "Rapid least- squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-newton method", *Geophysical Prospecting*, Vol. 44, pp. 131-152.
- Marzan, I., 2005, "Geophysical survey for water perspectives in an arid pastoralagro pastoral context: Zone1 Afar Region in Ethiopia" *Action Contre La Faim*, 28p.
- Olayinka, A., and Yaramanci, U., 2000, "Assessment of the reliability of apparent resistivity data", *Geophysical Prospecting*, Vol. 48, pp. 293-316.
- Owen, R.J., Gwavava, O., and Gwaze, P., 2004, "Multi-electrode resistivity survey for groundwater exploration in the Harare greenstone belt, Zimbabwe", *Hydrogeology Journal*, Vol.14, pp.244-252.
- Samanovac, F., and Alvanja, S.D., 2007, "Determination of resolution limits of electrical tomography on the block model in a homogenous environment by means of electrical modeling", *Rud-Geo-naft.zb*, Vol. 10, pp. 47-56.
- Sasaki, Y., 1992, "Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation", *Geophysical Prospecting*, Vol. 40, pp. 453-464.
- Smith, N.C., and Vozoff, R., 1984, "Two dimensional DC resistivity inversion for dipole-dipole resistivity data", *Geophysics*, Vol. 54, pp. 254-262.
- Stocklin, J., 1972, "Lexique Stratigraphique International", Vol. III, Fascicule 9 b, Iran.
- Tripp, A.C., Hahmann, G.W., and Swift Jr, C.M., 1984, "Two dimensional resistivity inversion", *Geophysical Prospecting*, Vol.49, pp.1708-1717.
- Vincenz, A., 1968, "Resistivity investigation of limestone aquifers in Jamaica", *Geophysics*, Vol. 33, pp. 980-994.
- Zhou, W., Beck, B.F., and Adams, L., 2002, "Effective slsctrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography", *Environmental Geology*, Vol. 42, pp. 922-928.