

تخمین متغیرهای هیدرولیکی آبخوان دشت بجنورد با استفاده از

داده‌های سونداژ الکتریکی

مجید الطافی دادگر^۱، حسین محمدزاده^۲، روح الامین بهرامی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران dadgarmajid77@yahoo.com

۲- استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مرکز تحقیقات آب، مشهد، ایران

۳- کارشناس، مجتمع عالی آموزشی و پرورشی صنعت آب و برق خراسان

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۱۱ تاریخ تصویب: ۱۳۹۱/۶/۲۸

چکیده

ارزیابی صحیح متغیرهای هیدرولیکی آبخوان (T,K) جهت مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی و ارائه راه کارهای مدیریتی مناسب امری ضروری است. رایج ترین و مفید ترین روش در تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان، انجام آزمایش پمپاژ بر روی چاه‌های آب است. اما این روش نه تنها نیازمند شرایط لازم است بلکه دارای محدودیت‌هایی نظیر صرف وقت و هزینه‌های نسبتاً بالا است. تلفیق نتایج حاصل از داده‌های ژئوالکتریکی با نتایج حاصل از تفسیر داده‌های صحرایی اندازه‌گیری شده، اندکی از هزینه‌ها را کاهش می‌دهد. در این تحقیق تعداد ۶۶ سونداژ قائم الکتریکی به روش مقاومت ویژه با آرایه شلومبرژه در دشت بجنورد برداشت شده است که از این تعداد، ۲۶ سونداژ جهت تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان انتخاب شده است. داده‌های صحرایی به کمک نرم افزار IPI، پردازش و تصحیح و با در نظر گرفتن ستون چینه‌شناسی چاه‌ها، مقاومت واقعی و ضخامت لایه‌های زیر سطحی تعیین گردید. با استفاده از اطلاعات سونداژهایی که در مجاورت چاه‌های آزمایش پمپاژ قرار داشتند و مقاومت آب اندازه‌گیری شده در این چاه‌ها، مقاومت عرضی اصلاح شد و سپس قابلیت انتقال محاسبه گردید ($T = 0.003 \times R_T - 143/6$) که با قابلیت انتقال حاصل از آزمایش پمپاژ انطباق قابل قبولی دارد. همچنین با محاسبه فاکتور سازند از روی کیفیت آب‌ها، مقدار متغیر هدایت هیدرولیکی ($K = 0.02 \times F^{3/292}$) برای سایر نقاط دشت تعیین و نقشه هم هدایت هیدرولیکی و نقشه هم قابلیت انتقال دشت بجنورد با استفاده از ArcGIS ترسیم شده است.

واژگان کلیدی: متغیرهای هیدرولیکی، تخمین، سونداژ الکتریکی، فاکتور سازند

مقدمه

به منظور مدیریت منابع آب‌های زیرزمینی و ارائه راه کارهای مدیریتی مناسب، کسب دانش در رابطه با متغیرهای هیدرولیکی و توصیف کمی آبخوان، امری حیاتی است. رایج‌ترین و دقیق‌ترین روش تعیین متغیرهای هیدرولیکی آبخوان (هدایت هیدرولیکی (K))، قابلیت انتقال (T) و ضریب ذخیره (S)، تجزیه داده‌های حاصل از آزمایش پمپاژ چاه می‌باشد. در عین حال ارزیابی این متغیرها با این روش با

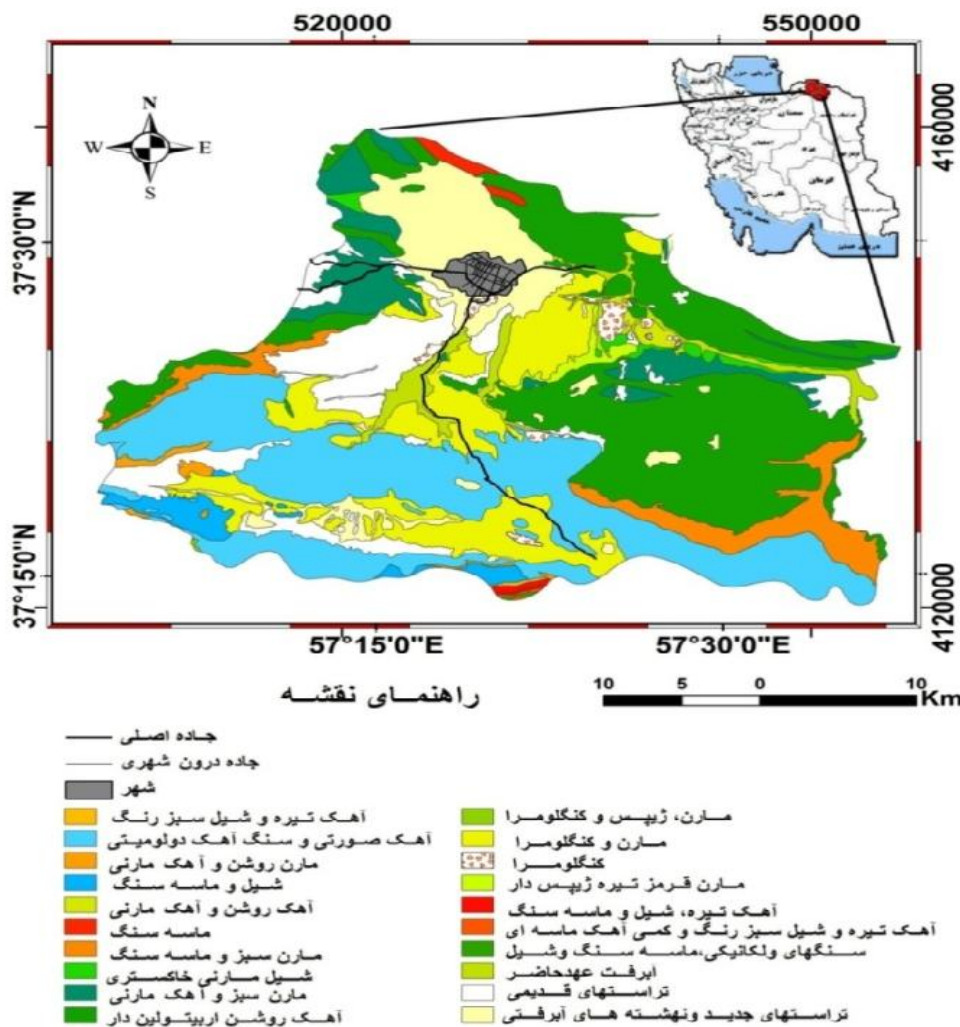
محدودیت‌هایی نیز همراه است. معادلات محاسبه متغیرهای هیدرولیکی در آزمایش پمپاژ تنها زمانی صادق است که فرضیات مربوط به نوع آبخوان ماهیت جریان سیال، نرخ پمپاژ و ذخیره چاه برقرار باشند. محدودیت دیگر این روش صرف وقت و هزینه‌های نسبتاً سنگین به منظور حفاری و آزمایش پمپاژ در چاه‌های اکتشافی است. یکی از روش‌های پیشنهادی جهت تخمین خواص هیدرولیکی آبخوان استفاده از روش‌های ژئوالکتریک سطحی است. از این رو به منظور بهینه‌سازی نسبت اطلاعات و دقت مورد نیاز به صرف وقت و جلوگیری از هزینه‌های اضافی در حفاری‌ها، ترکیب اطلاعات ژئوالکتریک سطحی با اندازه‌گیری‌های مستقیم صحرایی می‌تواند مفید واقع شود. در سطوح ذرات، مسیر الکتریکی مشابه مسیر هیدرولیکی است. این امر نشان می‌دهد که متغیرهای ژئوالکتریک باید با متغیرهای هیدرولیکی مرتبط باشند. چگونگی رسانش الکتریکی در درون منافذ ذرات و پیرامون آنها به صورت یونی بوده و مقاومت الکتریکی یک سازند، توسط تخلخل و مقاومت آب کنترل می‌شود [28]. محققان متعددی ارتباط بین متغیرهای هیدرولیکی و ژئوالکتریک را مطالعه کردند. Jones و همکارش Buford در سال ۱۹۵۱، فاکتور سازند و نفوذپذیری برخی از نمونه‌های ماسه را اندازه‌گیری کردند و متوجه شدند، هر چقدر اندازه دانه‌ها افزایش می‌یابد به ترتیب فاکتور سازند و نفوذپذیری ذاتی افزایش می‌یابند. Groft در سال ۱۹۷۱، رابطه بین نفوذپذیری ذاتی آبخوان و فاکتور سازند را برای بدست آوردن دامنه تخلخل ماسه بررسی کرد. Kelly در سال ۱۹۷۷، یک رابطه تجربی بین مقاومت الکتریکی آبخوان و هدایت هیدرولیکی و یک رابطه لگاریتمی بین فاکتور سازند و هدایت

هیدرولیکی برای رسوبات یخچالی ارائه کرد. Niwas و همکارش Singhal در سال ۱۹۸۱ و ۱۹۸۵، یک رابطه تحلیلی بین مقاومت عرضی (R_T) و قابلیت انتقال (T) در یک محیط همگن و ایزوتروپ برای رسوبات یخچالی در جزیره راد (Rhode) ارائه و کاربرد رابطه خود را با در نظر گرفتن پارامتر کیفیت آب و تصحیح مقاومت عرضی توسعه دادند. این دو دانشمند همچنین روابطی تحلیلی بین قابلیت انتقال و متغیرهای Dar-zarrouk ارائه دادند و برخی از دانشمندان [7,14] از مفهوم این متغیرها برای تعیین خصوصیات هیدرولیکی آبخوان و عده‌ای [4,6,19,21] نیز از انطباق بین متغیرهای ژئوالکتریکی و هیدرولیکی به منظور تخمین متغیرهای هیدرولیکی سایر نقاط استفاده کردند. به طور کلی در سه دهه اخیر سایر محققان تلاش کردند تا روابط تجربی بین متغیرهای مختلف آبخوان و متغیرهای حاصل از سونداژ الکتریکی ارائه دهند [8,13,17,18,20,22]. در این مطالعه با بررسی و تفسیر نتایج سونداژ قائم الکتریکی (VES) که با آرایه شلومبرژه انجام گرفته و انطباق آن با اطلاعات ستون چینه شناسی چاه‌های گمانه و بهره‌برداری منطقه، روابط بین متغیرهای ژئوالکتریکی و هیدرولیکی بررسی شده است و سپس با استفاده از نتایج حاصل از همبستگی بدست آمده متغیرهای هیدرولیکی در سایر نقاط دشت بجنورد ارزیابی شده است که می‌تواند در مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی به کار گرفته شود.

" $37^{\circ}13'57''$ و " $37^{\circ}35'$ شمالی و طول‌های جغرافیایی " $57^{\circ}25'03''$ و " $57^{\circ}14'40''$ شرقی در مرکز استان خراسان شمالی قرار گرفته است (شکل ۱).

موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه

حوضه آبریز رودخانه بابامان بجنورد با وسعتی حدود ۱۲۸۰ کیلومترمربع در بین عرض‌های جغرافیایی



شکل ۱- زمین شناسی و موقعیت حوضه آبریز دشت بجنورد

متر در سال، در منطقه‌ای با شرایط آب و هوای خشک و نیمه خشک قرار دارد. منطقه مورد مطالعه در حوضه رسوب‌گذاری کپه داغ و بخش‌های جنوبی آن در کمربند بینالود قرار دارد. قدیمی‌ترین سنگ‌هایی که در حوضه کپه داغ نهشته شده‌اند مربوط به شیل و ماسه سنگ‌های سازند کشف رود با سن ژوراسیک میانی است. قدیمی‌ترین واحدهای زمین شناسی موجود در حوضه دشت بجنورد متعلق به دوره ژوراسیک

آبرفت و سفره آب دشت بجنورد تحت تاثیر جریان‌های سطحی و زیرزمینی رودخانه‌های فیروزه و بازخانه قرار دارد که در جنوب شرقی منطقه با پیوستن به رودخانه چناران، رودخانه بابامان را تشکیل می‌دهند. ناحیه کوهستانی حوضه آبریز بجنورد با حداکثر ارتفاع ۲۹۰۰ متر از سطح دریا، حدود ۱۰۳۲ کیلومتر مربع وسعت دارد. از این رو آب و هوای این حوضه نسبتاً سرد و با متوسط بارندگی ۳۱۷/۶ میلی

الکترودها مقدار اختلاف پتانسیل (V) و جریان الکتریکی (I) ثبت می‌شود و مقاومت ظاهری (a) از رابطه ۱ بدست می‌آید:

$$a = k \times (\Delta V / I) \quad (1)$$

در این رابطه ضریب k ، فاکتور هندسی آرایه است و به ترتیب و نوع آرایش الکترودها بستگی دارد. در صورتی که آرایه الکترودها شلومبرژه باشد و الکترودهای جریان و پتانسیل نسبت به ایستگاه مرکزی به صورت قرینه آرایش یافته باشند، فاکتور

هندسی k به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$k = \frac{(AM \times AN)}{MN} \quad (2)$$

در این مطالعه به منظور تعیین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان دشت بجنورد، از ترکیب نتایج حاصل از روش ژئوالکتریک و اطلاعات هیدروژئولوژیکی و نتایج حاصل از تجزیه داده‌های آزمایش پمپاژ پنج حلقه چاه استفاده شده است. کارهای میدانی ژئوفیزیکی این مطالعه شامل ۶۶ سونداژ قائم الکتریکی با آرایه شلومبرژه (با حداکثر فاصله الکترودها برابر با ۸۰۰ متر) می‌باشد که در بهار سال ۱۳۹۰ و در طی یک دوره یک ماهه انجام شده است [۲]. انتخاب محل نقاط سونداژ با هدف پوشش کل منطقه و با توجه به شرایط هیدروژئولوژی و همچنین مجاورت با چاه‌های گمانه و بهره‌برداری به منظور کالیبره کردن اطلاعات ژئوفیزیکی صحرائی با ستون چینه‌شناسی این چاه‌ها صورت گرفته است. در این مطالعه، از کل ۶۶ سونداژ برداشت شده در دشت تعداد ۲۶ سونداژ که دارای خطای کمتر، پراکندگی مناسب و در مجاورت با چاه‌های دارای داده‌های کیفی آب بودند، انتخاب شدند. شکل (۲-الف) موقعیت نقاط سونداژ انتخاب شده، چاه‌های آزمایش پمپاژ، چاه‌های دارای لوگ زمین شناسی و موقعیت مقطع ژئوالکتریک انتخاب

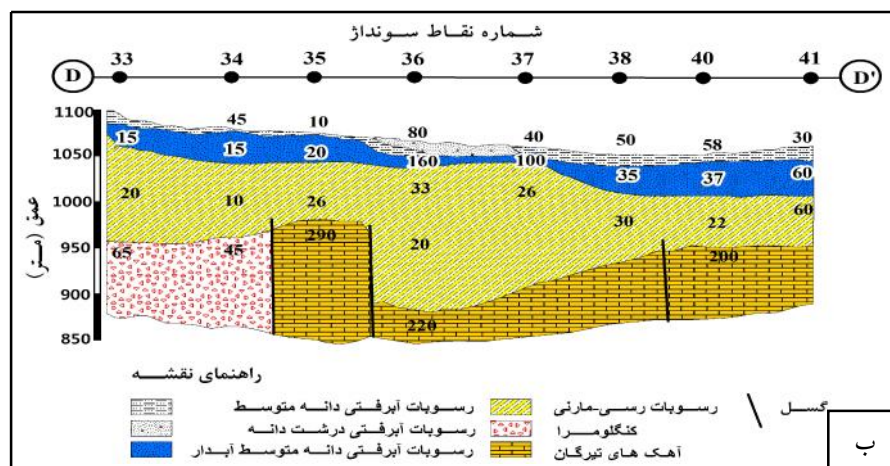
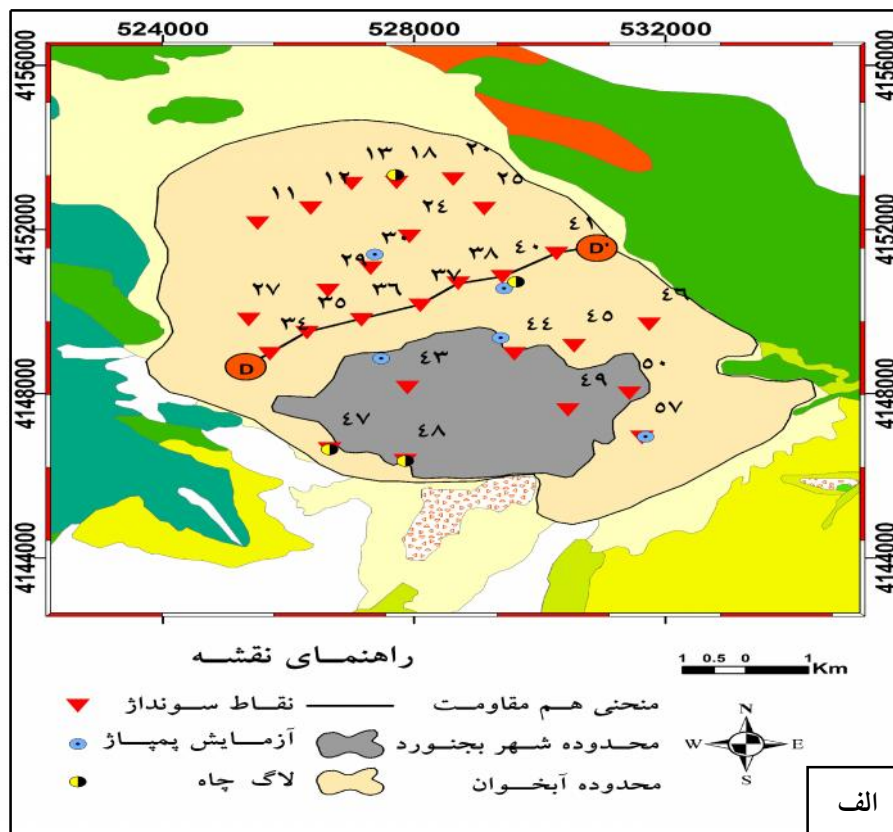
می‌باشد (شکل ۱). به طور کلی بخش اعظم سطح حوضه آبریز دشت بجنورد را واحدهای زمین شناسی مزوزوئیک، شامل ژوراسیک و کرتاسه تشکیل می‌دهند. رسوبات کواترنری تشکیل دهنده آبخوان بجنورد شامل سه گروه اصلی راندگی‌های قدیمی تراست‌های جدید و رسوبات آبرفتی رودخانه‌ای هستند [۱].

روش تحقیق

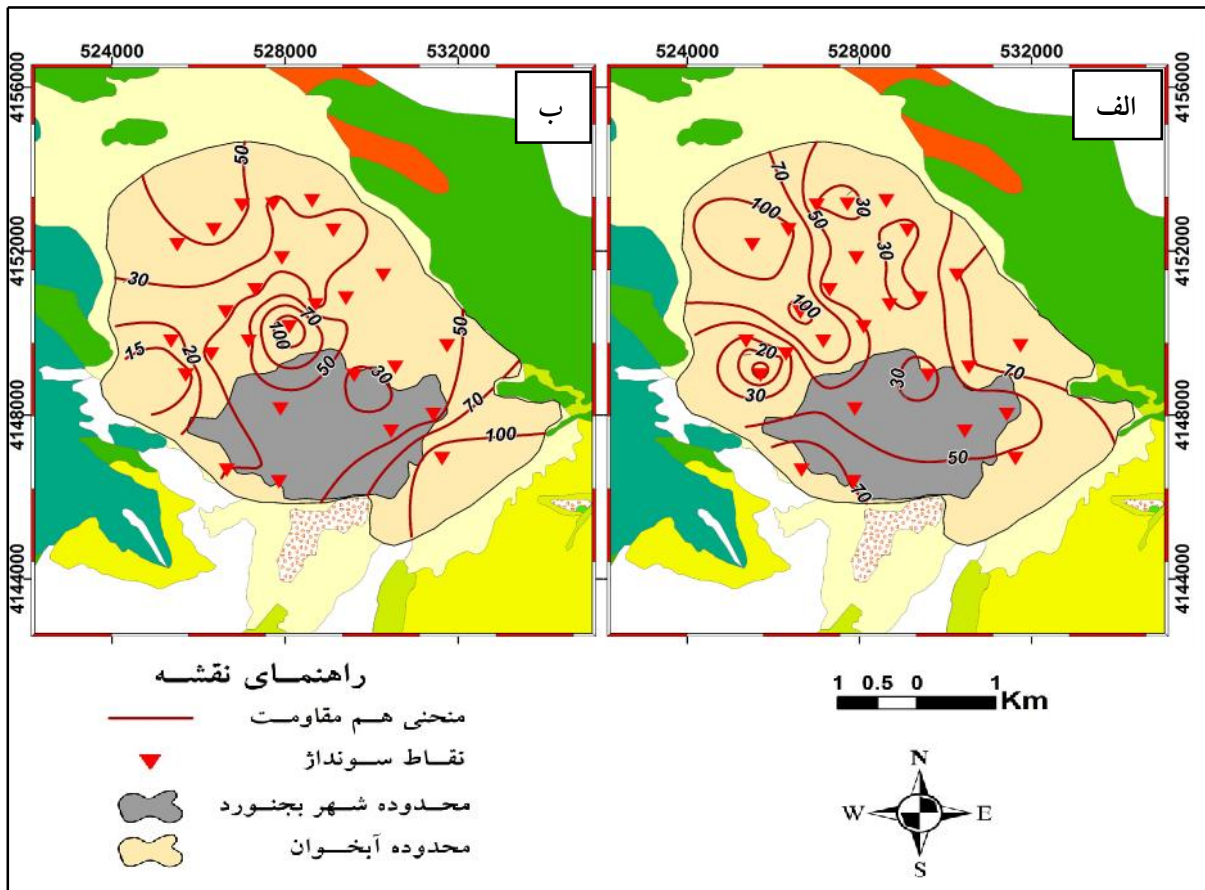
روش ژئوالکتریک (مقاومت سنجی سطحی) یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها در بررسی منابع آب زیرزمینی است. مقاومت زمین وابسته به پارامترهای زمین شناسی در زیر سطح زمین شامل نوع سنگ و خاک، تخلخل و درجه اشباعیت است. روش سونداژ الکتریکی قائم (VES) اطلاعاتی در ارتباط با تغییرات توالی لایه‌ها نسبت به عمق، ضخامت و مقاومت آنها فراهم می‌کند. از این روش سونداژ الکتریکی قائم در بررسی لایه‌بندی‌های افقی یا نزدیک به افق ارزشمند است. روش مقاومت الکتریکی شامل القای جریان الکتریکی به درون زمین و ثبت اختلاف پتانسیل ایجاد شده در لایه‌های مختلف است. هر چند که در مطالعات ژئوالکتریک یک منطقه می‌توان از آرایش‌های مختلفی استفاده نمود ولی آرایش الکترودی رایج در سونداژ قائم الکتریکی، آرایه شلومبرژه است. در این آرایه چهار الکترودها شامل دو الکترودهای (M, N) و دو الکترودهای پتانسیل (A, B) ، در یک خط بر روی سطح زمین قرار می‌گیرند. سونداژ الکتریکی قائم در آرایه شلومبرژه با ثابت در نظر گرفتن یک ایستگاه مرکزی در بین الکترودها انجام می‌شود و فاصله الکترودهای جریان به تدریج افزایش می‌یابد تا عمق بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. در هر جایگاهی

۲- ب یکی از مقاطع ژئوالکتریکی بدست آمده از داده های ژئوفیزیکی را نشان می دهد. جهت تفسیر بهتر و تصحیح اطلاعات مربوط به نقاط سونداژ از ستون چینه شناسی چاه های موجود در مجاورت سونداژها نیز استفاده شده است. شکل (۳- الف و ب) به ترتیب منحنی های هم مقاومت ظاهری با فاصله الکترود جریان ۱۰۰ متر و ۴۰۰ متر را نشان می دهد.

شده در دشت بجنورد را نشان می دهد. اطلاعات صحرائی مربوط به سونداژها را به نرم افزار IPI وارد نموده و با تفسیر اولیه منحنی های سونداژ با استفاده از روش آباک (انطباق جزئی منحنی های استاندارد) متغیرهای ضخامت (h) و مقاومت () لایه های مختلف زمین شناسی ارزیابی و این متغیرها برای تفسیر اطلاعات سونداژها استفاده شده است. شکل



شکل ۲ الف- موقعیت نقاط سونداژ انتخابی، لوگ چاه ها، محل چاه های آزمایش پمپاژ و مقطع ژئوالکتریکی در دشت بجنورد
 ب- مقطع ژئوالکتریکی در راستای D-D' (کلیه اعداد بر حسب اهم- متر می باشد)



شکل ۳- الف- منحنی هم مقاومت ظاهری با فاصله الکتروود جریان ۱۰۰ متر، ب- منحنی هم مقاومت ظاهری با فاصله الکتروود جریان ۴۰۰ متر

رابطه بین قابلیت انتقال (T) و مقاومت عرضی

آبخوان (R_T)

رابطه (۳) نشان می‌دهد، در آبخوان متخلخل، همگن و همسان، قابلیت انتقال ($T = K \times b$) متناسب است با مقاومت عرضی آبخوان ($R_T = a \times b$)، که با اعمال ضریب ثابت B به صورت رابطه (۴) در می‌آید [16].

$$T \propto R_T \quad (3)$$

$$T = B \times R_T \quad (4)$$

ضریب ثابت B بستگی به هدایت هیدرولیکی (K) و هدایت الکتریکی آبخوان دارد ($B = K \times EC$). در معادله (۴) فرض بر تغییرات مقاومت آبخوان و در نتیجه تغییرات مواد آبخوان و ضریب پیچاپیچی منافذ متصل به هم بوده و تغییرات کیفیت آب ثابت فرض

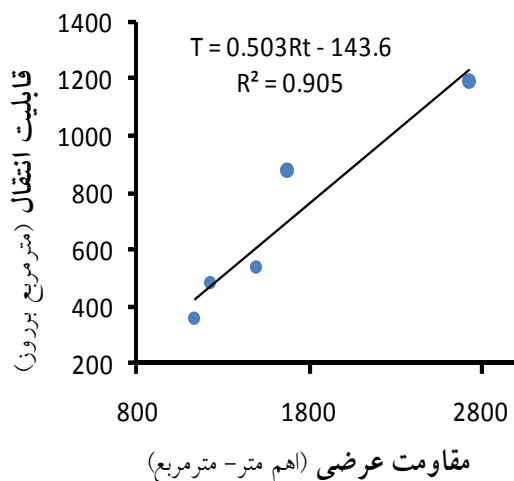
شده است. با توجه به اینکه مقاومت سازندهای زمین شناسی بیشتر تحت تاثیر تخلخل و مقاومت آب است، Niwas و همکارش Singhal در سال ۱۹۸۳ با دخالت دادن تغییرات مقاومت آب، مقاومت عرضی را اصلاح (رابطه ۵) و با جایگزینی در رابطه (۴) رابطه (۶) را بدست آوردند:

$$R'_T = R_T \times (\bar{\rho}_w / \rho_{wi}) \quad (5)$$

$$T = (K \times EC) \times R'_T \quad (6)$$

که در آن، R'_T و EC به ترتیب مقاومت عرضی اصلاح شده و هدایت الکتریکی، ρ_{wi} ؛ مقاومت آب در محل مورد نظر و $\bar{\rho}_w$ ؛ مقاومت متوسط آب در آبخوان است.

استفاده برای اندازه گیری سطح آب و محاسبه ضرایب هیدرودینامیکی سفره از چاه اکتشافی اراضی سوهنی بسیار دور می باشد (طبق گزارشات شرکت آب منطقه ای خراسان شمالی)، در منطقه نتایج حاصل از پمپاژ، همبستگی بسیار ضعیفی با نتایج حاصل از ژئوالکتریک دارد. از این رو، نتایج حاصل از پمپاژ چاه اکتشافی اراضی سوهنی در نظر گرفته نشده است. با استفاده از رابطه خطی بدست آمده (رابطه ۷) قابلیت انتقال در محل سایر نقاط سونداژ که آزمایش پمپاژ در این مناطق وجود نداشت محاسبه شده (جدول ۲) و نقشه هم قابلیت انتقال محاسبه شده و نقشه قابلیت انتقال آبخوان دشت بجنورد ترسیم شده است (شکل ۵).

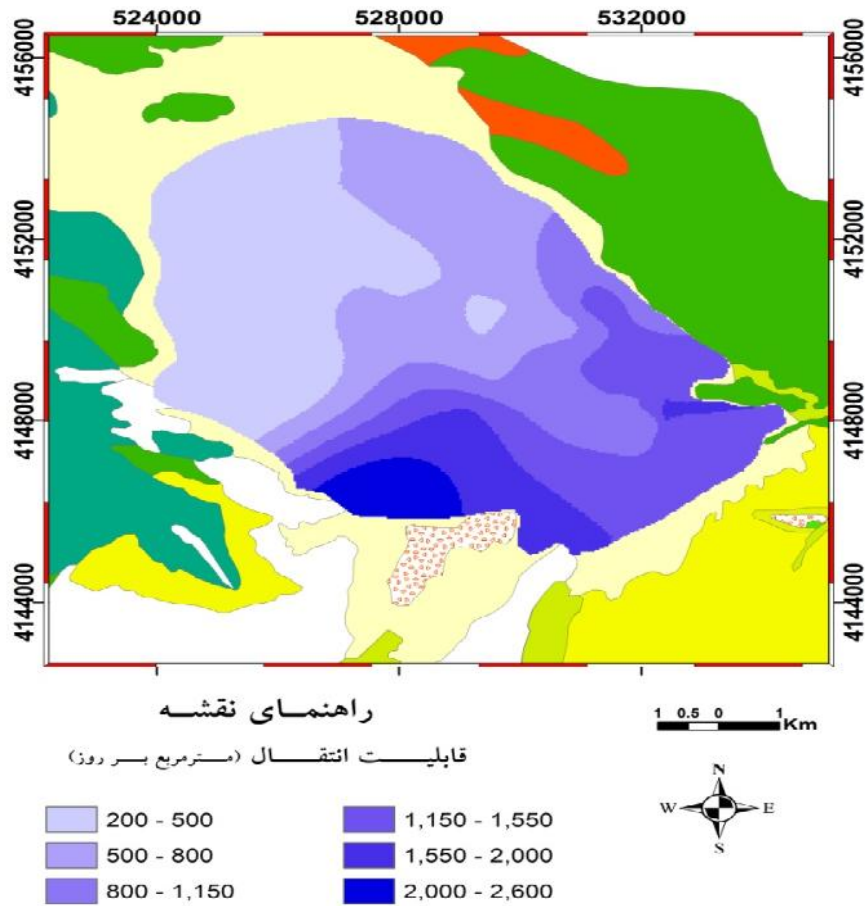


شکل ۴- نمودار رابطه بین قابلیت انتقال (T) و مقاومت عرضی (R_T)

در این تحقیق، مقدار عددی مقاومت آب (w)، با استفاده از مقدار اندازه گیری شده هدایت الکتریکی آب (EC) در چاه های اطراف نقاط سونداژ محاسبه ($w = 10^4/EC$) و با استفاده از روش های درون یابی برای کل منطقه مورد مطالعه بدست آمده است. نکته مهم در رابطه با تصحیح مقاومت عرضی با استفاده از داده های کیفی آب زیرزمینی (EC)، اندازه گیری هدایت الکتریکی همزمان با برداشت سونداژ الکتریکی در محل مورد نظر است. در این تحقیق از داده های کیفی مربوط به دوره برداشت سونداژ جهت تصحیح مقاومت عرضی استفاده گردیده است. با استفاده از رابطه (۱) مقاومت ظاهری (a) برای نقاط سونداژ محاسبه و سپس با توجه به ضخامت اشباع سفره (b) بدست آمده از اطلاعات ژئوفیزیکی، مقاومت عرضی ($R_T = a \times b$) برای نقاط سونداژ نیز محاسبه و مقادیر بدست آمده با استفاده از ضریب تصحیح (معادله ۵)، اصلاح گردیده است. در نهایت با استفاده از اطلاعات مربوط به آزمایشات پمپاژ چاه های اطراف نقاط سونداژ، انطباق بین قابلیت انتقال آبخوان (T) و مقاومت عرضی اصلاح شده (R'_T) مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۱ و شکل ۴). همان گونه که در شکل (۴) دیده می شود، همبستگی ($R^2 = 0.905$) قابل قبولی بین این متغیرها وجود دارد (رابطه ۷).

$$T = 0.503 \times (R'_T) - 143.6 \quad (7)$$

قابل ذکر است که آزمایشات پمپاژ در دشت در دو حلقه چاه اکتشافی و چهار حلقه چاه بهره برداری انجام گرفته است (شکل ۲). با بررسی نتایج حاصل از این آزمایشات، به دلیل اختلاف مقدار قابلیت انتقال بین آزمایش رفت و برگشت، مقدار میانگین در نظر گرفته شده است. از آنجا که چاه پیژومتری مورد



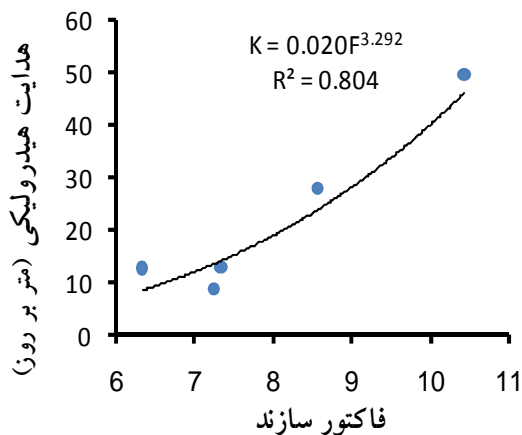
شکل ۵- نقشه هم قابلیت انتقال محاسبه شده

جدول ۱- مقایسه مقادیر قابلیت انتقال (T) و هدایت هیدرولیکی (K) اندازه گیری شده از طریق آزمایش پمپاژ و محاسبه شده از طریق سونداژ ژئوالکتریکی در محل چاه در دشت بجنورد

EC mho/cm μ	w ohm-m	F	R _T hm-m ²	R' _T ohm-m ²	T m ² /day	T* m ² /day	K m/day	K* m/day	سونداژ	محل چاه
۱۷۸۵	۵/۶	۷/۲۵	۱۹۰۴	۱۱۳۴	۳۵۸	۴۲۷	۹	۱۳	۳۰	اکتشافی کهنه کن
۱۶۶۶	۶	۶/۳۳	۱۴۶۱	۱۲۷۷	۴۸۳	۴۹۸	۱۲	۹	۴۰	بهره برداری اراضی شاقه
۱۹۶۰	۵/۱	۸/۵۵	۱۲۱۰	۲۷۷۰	۸۷۷	۶۹۹	۲۷	۲۳	۴۳	بهره برداری کهنه کن
۱۹۲۳	۵/۲	۷/۳۴	۱۹۹۴	۱۴۹۷	۵۳۶	۶۰۹	۷	۱۴	۴۴	بهره برداری بجنورد
۳۹۸۵	۲/۵۲	۱۰/۴۵	۲۴۵۰	۲۷۳۳	۱۱۱۸	۱۲۳۱	۴۵	۴۵	۵۷	بهره برداری ینگى قلعه

* مقادیر محاسبه شده از طریق سونداژ ژئوالکتریکی در محل چاه

بوده و به دلیل کمبود داده های کیفی آب زیرزمینی از محاسبات حذف شده اند.



شکل ۶- نمودار رابطه بین هدایت هیدرولیکی (K) و فاکتور سازند (F)

جدول ۲- مقادیر قابلیت انتقال (T) و هدایت هیدرولیکی (K) محاسبه شده در نقاط سونداژ

شماره نقاط سونداژ	R_T ohm-m ²	T m ² /day	F	K m/day
۱۱	۱۰۵۵	۳۸۷	۸/۸۸	۲۶/۵
۱۲	۱۱۰۱	۴۱۰	-	-
۱۳	۱۲۴۴	۴۸۲	۸	۱۸
۱۸	۱۳۵۸	۵۳۹	۶/۵	۹
۲۰	۱۴۵۰	۵۸۵	۱۰/۳	۴۳
۲۴	۱۱۷۸	۴۴۹	۶/۹۵	۱۲
۲۵	۱۴۷۳	۵۹۷	۶/۷	۱۰
۲۷	۸۵۶	۲۸۷	۳/۸	۱/۶
۲۹	۱۰۳۰	۳۷۴	-	-
۳۴	۷۳۸	۲۲۷	-	-
۳۵	۸۲۰	۲۶۹	-	-
۳۶	۱۶۷۶	۶۹۹	۶/۱۵	۸
۳۷	۱۶۲۷	۶۷۴	-	-
۳۸	۱۳۲۴	۵۲۲	۶/۱۶	۸
۴۱	۱۸۷۰	۷۹۷	۸/۴	۲۲
۴۵	۲۳۳۹	۱۰۳۳	-	-
۴۶	۲۷۴۹	۱۲۳۹	-	-
۴۷	۴۰۷۴	۱۹۰۵	-	-
۴۸	۵۳۲۴	۲۵۳۴	-	-
۴۹	۲۶۶۶	۱۱۹۷	-	-
۵۰	۲۳۳۴	۱۰۳۰	۸/۴	۲۲

ارتباط بین هدایت هیدرولیکی (K) و فاکتور سازند (F)

Archi در سال ۱۹۴۲، ثابت کرد که مقاومت بخش اشباع آبخوان (sat) که فاقد رس و هیدروکربن هستند با مقاومت آب (w) موجود در حفرات متناسب است (رابطه ۸)، که این تناسب با اعمال ضریب ثابت و بدون بعد F (به نام فاکتور سازند) به صورت رابطه ۹ در می آید:

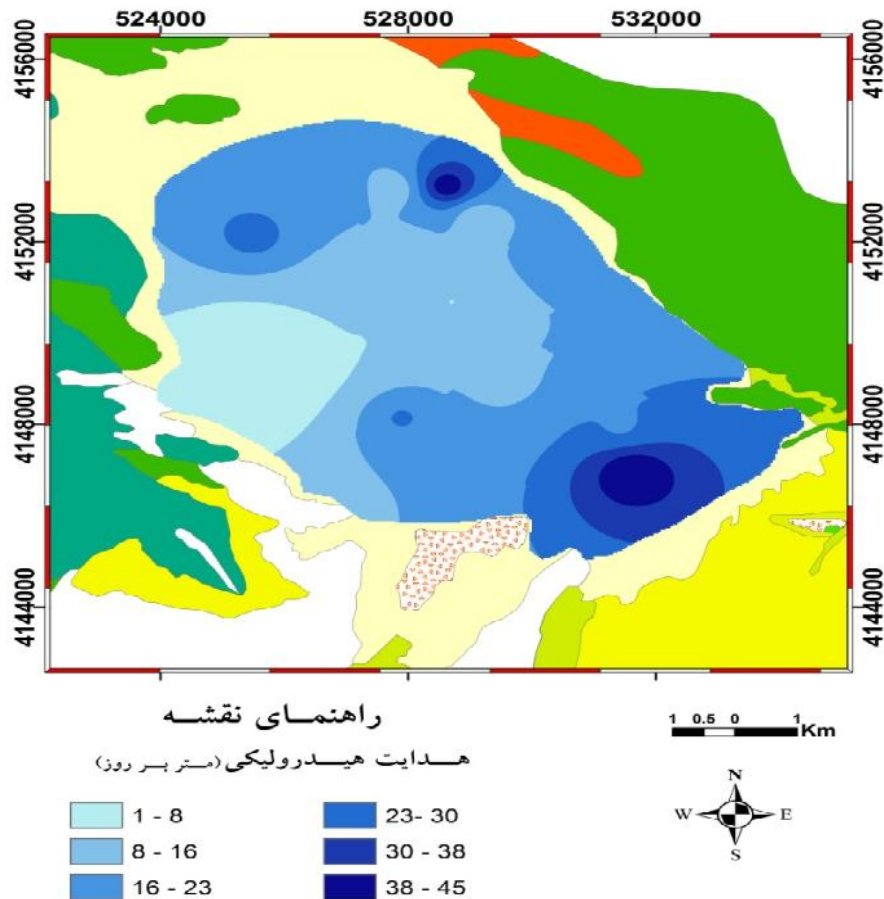
$$sat \propto \rho_w \quad (۷)$$

$$sat = F \times w \quad (۸)$$

پس از Archie، برخی دیگر از محققان [8,9] اثر ناهمسانی و لایه بندی آبخوان را بر رابطه بین خواص هیدرولیکی و الکتریکی آبخوان مطالعه و از این رابطه (رابطه ۱۰) جهت تخمین هدایت هیدرولیکی در مناطقی که آزمایش پمپاژ وجود نداشت استفاده کردند:

$$K = A \times F^m \quad (۹)$$

که در آن، A و m ضرایب و ثابت های تجربی هستند. با استفاده از مقدار مقاومت آب اندازه گیری شده در چاه ها و مقاومت بخش اشباع آبخوان، فاکتور سازند ($F = sat/\rho_w$) در نقاط سونداژ محاسبه و با اطلاعات مربوط به هدایت هیدرولیکی (K) بدست آمده از آزمایشات پمپاژ انطباق داده شده است (جدول ۱ و شکل ۶). با توجه به همبستگی موجود مقادیر ضرایب A و m به ترتیب برابر ۰/۰۲ و ۳/۲۹۲ تعیین شده است. با استفاده از رابطه ۱۰ و مقادیر بدست آمده برای ضرایب A و m، هدایت هیدرولیکی در سایر نقاط دشت تخمین زده شده است (جدول ۲ و شکل ۷). در برخی از نقاط سونداژ به دلیل دور بودن از چاه های نمونه برداری آب جهت محاسبه فاکتور سازند، ارقام نفوذپذیری محاسبه شده، دور از واقعیت



شکل ۷- نقشه هم هدایت هیدرولیکی ارزیابی شده

نتیجه گیری

نزدیکی بین متغیرهای هیدرولیکی محاسبه شده با مقادیر فراهم شده از آزمایش پمپاژ وجود دارد به طوری که رابطه بین قابلیت انتقال (T) حاصل از نتایج آزمایش پمپاژ و مقاومت عرضی آبخوان که از روش سونداژ قائم الکتریکی بدست آمده است به صورت $(T=0.053 \times R_T - 143/6)$ با همبستگی قابل قبول ($R^2=0.905$) می باشد. علاوه بر آن رابطه بین هدایت هیدرولیکی با فاکتور سازند به صورت $(K=0.02 \times F^{3/292})$ با همبستگی نسبتاً قابل قبول ($R^2=0.804$) می باشد. بنابراین تلفیق اطلاعات سونداژ الکتریکی قائم با داده های آزمایش پمپاژ، ثابت می کند که مطالعات ژئوفیزیکی اهمیت زیادی در تخمین متغیرهای آبخوان دارد.

با توجه به اینکه امروزه مدل سازی جریان آب زیرزمینی و انتقال آلودگی به عنوان یکی از موثرترین و مهمترین ابزار در مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار می گیرد، ارزیابی متغیرهای هیدرولیکی آبخوان به منظور فراهم کردن اطلاعات مورد نیاز در مدل سازی آب زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است. حفاری چاه های اکتشافی جهت تعیین متغیرهای هیدرولیکی آبخوان اغلب پرهزینه و زمان بر است. از طرفی چون در مرحله واسنجی مدل سازی می توان متغیرهای ارزیابی شده هیدرولیکی را تصحیح نمود بنابراین تخمین این متغیرها با استفاده از اطلاعات سونداژ قائم الکتریکی (VES) به عنوان یک مقدار اولیه ورودی به مدل می تواند مفید واقع گردد. بر پایه مطالعات و نتایج این تحقیق ارتباط

- 14- Massoud, O., Santos, F., Khalil, M.A., Taha, A., and Abass, A. (2010), "Estimation of aquifer hydraulic parameters from surface geophysical measurements: a case study of the upper cretaceous aquifer, Central Sinai, Egypt," *Hydrogeology*, 18(3), pp.699-710.
- 15- Niwas, S., and Singhal, D.C. (1985) "Aquifer transmissivity of porous media from resistivity data," *Hydrology*, 82, pp.143-153.
- 16- Niwas, S., Singhal, D.C., (1981). Estimation of aquifer transmissivity from Dar-Zarrouck parameters in porous media, *Hydrology*, 50, pp.393-399.
- 17- Onuoha, K.M., and Mbazi, F.C.C. (1988) "Aquifer transmissivity from electrical sounding data: The case of Ajali Sandstone aquifer South West of Enugu," *Groundwater and mineral resource*, Germany, pp. 17-30.
- 18- Sopupios, P.M., Kouli, M., Vallianatos, F., Vafidis, A., and Stavroulakis, G. (2007) "Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: a case study of Keritis Basin in Chania (Crete-Greece)," *Hydrology*, 338, pp.122-131.
- 19- Yadav, G.S. (1995), "Relating hydraulic and geoelectric parameters of the Jayant aquifer, India," *Hydrology*, 167, pp.23-38.
- 20- Yadav, G.S., and Abolfazli, H. (1998) "Geoelectrical soundings and their relationship to hydraulic parameters in semiarid regions of Jalore, Northwestern India," *Applied Geophysics*, 39(1), pp.35-51.
- 21- Yadav, G.S., Kumar, R., Singh, P.N., and Singh, S.C. (1993), "Geoelectrical soundings for aquifer characterization around Jayant Colony-Singrauli, Sidhi District," *Geophysics*, 14(3), pp.121-131.
- 1- شرکت مهندسين مشاور مهار آب عمران گستر، (۱۳۸۶) گزارش مطالعات نیمه تفصیلی منابع آب زیرزمینی دشت بجنورد، شرکت آب منطقه ای خراسان شمالی، ۳۵۱ ص.
- ۲- شرکت مهندسين مشاور آبکاو شرق، (۱۳۹۰)، گزارش مطالعات تکمیلی ژئوفیزیک دشت بجنورد، شرکت آب منطقه ای خراسان شمالی، ۱۷۸ ص.
- 3- Archie, G.E. (1942), "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics," *petroleum Transactions*, 146, pp.54-62.
- 4- Batatneh, A.T. (2009), "A hydrogeophysical model of the relationship between geoelectric and hydraulic parameters: Central Jordan," *Water Resource and Protection*, 1(6) pp.400-407.
- 5-Croft, M.G. (1971), "A method of calculating permeability from electric logs," *Geological Survey Research*, 750, pp.256-269.
- 6- Ekwe, A.C., Nnodu, I.N., Ugwumbah, K.I. and Onwuka, O.S. (2010), "Estimation of aquifer hydraulic characteristics of low permeability formation from geosounding data: a case study of Oduma town, Enugu State," *Earth Sciences*, 4(1), pp.19-26.
- 7- Ekwe, A.C., Onu, N.N., and Onuoha, K.M. (2006), "Estimation of aquifer hydraulic characteristics from electrical sounding data: the case of middle Imo River basin aquifer, South-Eastern Nigeria," *Spatial Hydrology*, 6(2) pp.121-132.
- 8- Frolich, R., and Kelly, W.E. (1985), "The relation between transmissivity and transverse resistance in a complicated aquifer of glacial outwash deposit," *Hydrology*, 79(2) pp.215-229.
- 9- Huntley, D. (1986), "Relations between hydraulic conductivity and electrical resistivity in granular aquifers," *Ground Water*, 24 pp.466-474.
- 10- Jones, P.H., and Buford, T.B. (1951) "Electric logging applied to groundwater exploration," *Geophysics*, 16(1), pp.151-139.
- 11- Kelly, W.E. (1977a), "Electrical resistivity for estimating permeability," *Geotechnical Engineering*, 103(10), pp.1165-1168.
- 12- Kelly, W.E. (1977b), "Geoelectric sounding for estimating hydraulic conductivity," *Ground Water*, 15 (6), pp. 420-425.
- 13- Kosinski, W.K., and Kelly, W.E. (1981) "Geoelectric sounding for predicting aquifer properties," *Ground Water*, 19 (2), pp.163-171.

