

## اکتشاف آب زیرزمینی کارستی با استفاده از توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و سنجش

## از دور، شمال شرق خوزستان

لیلا میرزایی<sup>۱</sup>، محمدکاظم حفیظی<sup>۲\*</sup> و محمدعلی ریاحی<sup>۲</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۸/۱۰/۱۸، پذیرش نهایی: ۹۹/۳/۲۰)

## چکیده

با توجه به رشد سریع جمعیت و تغییرات اقلیمی انتظار می‌رود در آینده نزدیک منابع آب زیرزمینی به‌طور فزاینده‌ای جهت تأمین آب شرب مورد استفاده قرار گیرند. روش‌های مقرون‌به‌صرفه و کارآمد برای اکتشاف آب‌های زیرزمینی به‌ویژه در مناطق آهکی می‌توانند به‌عنوان ابزاری مناسب جهت شناخت پتانسیل هیدروژئولوژی کارستی به‌کار گرفته شوند. این مقاله روش اکتشافی مبتنی بر سنجش از دور و GIS را به‌منظور شناسایی نواحی با پتانسیل بالا آب زیرزمینی و توموگرافی ژئوالکتریک را به‌منظور تعیین محل دقیق حفاری چاه‌های آب آرایه می‌دهد. در این مطالعه یک مدل هیدرو-تکتونیکی شامل لایه‌های مؤثر بر هیدروژئولوژی کارست، برای تشخیص مناطق با پتانسیل آب زیرزمینی زیاد در کارست ایذه، شمال شرق خوزستان، به‌کار گرفته شد. سنجش از دور همراه با GIS برای تلفیق لایه‌های فاصله از منطقه تخلیه، اختلاف تراز ارتفاعی، چگالی شکستگی‌ها، شیب، و چگالی تقاطع شکستگی‌ها به‌کار گرفته شد. وزن پارامترهای مدل براساس اهمیت آنها بر هیدروژئولوژی کارست بین ۱ تا ۵ تعیین شد. به‌منظور تعیین محل دقیق نقاط مناسب حفاری در مناطق با پتانسیل زیاد، عملیات داده برداری ژئوالکتریک در دو پروفیل با آرایه دوقطبی-دوقطبی انجام، و سپس توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی دوبعدی در مناطق انجام شد. براساس نتایج توموگرافی ژئوالکتریک در آهک آسماری ایذه، مقاومت ویژه الکتریکی زیاد (بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم‌متر) بیانگر آهک خشک می‌باشد که در هنگام وجود آب در آنها مقاومت ویژه الکتریکی (تا حدود ۵۰-۱۵۰ اهم‌متر) کاهش می‌یابد. حفرات خشک با بی‌هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی در پروفیل جاموشی با مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۴۰۰ اهم‌متر و در سایت غرب ایذه با مقاومت ویژه الکتریکی بسیار زیاد (۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ اهم‌متر) در زمینه آهکی قابل تشخیص است. لایه‌های مارنی و آهک مارنی با نفوذپذیری کم، می‌توانند با مقاومت ویژه الکتریکی بسیار کم (کمتر از ۲۰ اهم‌متر) از لایه‌های آهک آب‌دار (حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ اهم‌متر) تشخیص داده شوند. حفاری یک حلقه چاه آهکی با آبدی زیاد (۶۱ لیتر در ثانیه) و افت کم (۰/۴۸ متر) در پاییز ۱۳۹۸ در کارست غرب ایذه نمایانگر کارایی تلفیق روش‌های اکتشافی به‌کار گرفته شده می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: اکتشاف آب زیرزمینی، کارست، توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، سنجش از دور، خوزستان.

## ۱. مقدمه

ابزاری مهم برای توسعه سیستماتیک و برنامه‌ریزی منابع آب در نظر گرفته می‌شود (البیه، ۲۰۱۵). تاکنون بیش از ۲۰۰ مقاله در مجلات معتبر بین‌المللی در ارتباط با پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی انجام شده است (دیاز-الکید و مارتینز-سانتوز، ۲۰۱۹). در این مقالات بیش از ۲۰ معیار مختلف در ارتباط با پتانسیل آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته که در اغلب آنها هشت معیار شامل زمین‌شناسی، خطواره، زمین‌ریخت، خاک، پوشش زمین، بارش، چگالی زه‌کشی، و شیب مورد استفاده قرار گرفته است. روش‌های جدید با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای شاخص‌های پوشش گیاهی، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک

با توجه به بحران آب در چند دهه اخیر، آینده‌نگری در جهت یافتن راه‌حل‌هایی برای مقابله با این مسأله حیاتی، یک امر مهم به‌شمار می‌آید. تأمین آب از توده‌های کارستی و سازنده‌های سخت به‌علت داشتن کیفیت خوب و حجم بالایی از آب به‌عنوان یک منبع غنی می‌تواند راه‌کار مناسبی برای مقابله با این مسأله باشد. تأمین آب شرب از آب‌های زیرزمینی گزینه اساسی در نواحی خشک و نیمه‌خشک، در جایی که خشک‌سالی‌ها متداول می‌باشند و منابع آب سطحی اغلب در دسترس نمی‌باشند، می‌باشد (لاماس و مارتینز-سانتوز، ۲۰۰۵).

پهنه‌بندی پتانسیل یا نقشه‌برداری آب زیرزمینی به‌عنوان

و ناهنجارهای حرارتی را استخراج کرده و مورد استفاده قرار داده‌اند. تلفیق داده‌ها عموماً از طریق قضاوت کارشناسی و تا حد کمتر توسط فنون یادگیری ماشین (Machine-learning techniques) انجام می‌شود. در حالی که تحقیقات در ارتباط با پتانسیل آب‌زیرزمینی از سال‌های قبل انجام شده است (ساندر و همکاران، ۱۹۹۶؛ جایسوال و همکاران، ۲۰۰۳؛ پارسید و همکاران، ۲۰۰۸)، با این حال بیش از ۵۰ درصد مقالات منتشرشده در این ارتباط مربوط به سال ۲۰۱۲ به بعد می‌باشند. اکثر این مطالعات موردی در خاورمیانه، آفریقا، و آسیای جنوبی انجام شده است. براساس مرور این تحقیقات مشخص شده که ۲۲ درصد آنها در حوضه‌های رسوبی، ۴۲ درصد در نواحی سنگ آذرین، و ۳۶ درصد در محیط‌های زمین‌شناسی مختلط انجام شده که از لحاظ اقلیمی بیش از ۹۵ درصد این مطالعات نیز در نواحی خشک و نیمه‌خشک انجام شده است (دیاز-الکید و مارتینز-سانتوز، ۲۰۱۹). فنون سنجش از دور (RS) و GIS کاربرد زیادی در تعیین پتانسیل آب‌زیرزمینی دارند. تصاویر ماهواره‌ای و سنسورهای هواپرد می‌توانند اطلاعات بارزشی در ارتباط با متغیرها و فرآیندهای هیدروژئولوژیک به‌ویژه با تلفیق با دیگر معیارها در محیط GIS به‌دست دهند (پارسید و همکاران، ۲۰۰۸؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ اویکونومیدیس و همکاران، ۲۰۱۵؛ پناهی و همکاران، ۲۰۱۷؛ پارکس و همکاران، ۲۰۱۷؛ پاترا و همکاران، ۲۰۱۸).

جهت پی‌بردن به خصوصیات هیدروژئولوژیک مناطق زیر سطح زمین و تشخیص بهترین نقطه جهت حفاری چاه‌ها در توده‌های کارستی و سازندهای سخت عموماً مطالعات ژئوفیزیکی به‌روش مقاومت‌ویژه انجام می‌شود. در این روش توزیع و تغییر شکل میدان‌های الکتریکی در یک توده سنگ توسط ورود یک جریان مصنوعی از طریق الکترودهای فرستنده ارزیابی می‌شود. جریان در توده سنگ‌ها به‌علت اختلاف پتانسیل بین نقاط ورودی جریان برقرار می‌شود. هدف اندازه‌گیری مقاومت‌ویژه

ژئوالکتریکی تعیین توزیع مقاومت‌ویژه زیرسطحی می‌باشد. آرایه‌های متفاوتی برای این روش تاکنون پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفته که در این میان آرایه متقارن شلومبرژه (Schlumberger array) و آرایه دوقطبی-دوقطبی (Dipole-Dipole) در مناطق آهکی کارایی بیشتری نشان داده است (ژو و همکاران، ۲۰۰۰؛ چالیکاکیس و همکاران، ۲۰۱۱؛ متولی و همکاران، ۲۰۱۲؛ رولیا و سوتجیننگسی، ۲۰۱۸). این روش‌ها در پهنه‌های کارستی جهت تفکیک بین بخش‌های لیتولوژیکی و تعیین خصوصیات آنها و همچنین تعیین عمق کارستی‌شدگی شدید رسوبات کربناته کاربرد دارد.

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های بسیاری در برنامه‌های کامپیوتری اکتشاف داده‌ها و روش‌های وارون‌سازی (Inversion) دو و سه‌بعدی داده‌های ژئوفیزیکی صورت گرفته است. به‌طوری‌که تصویرسازی (Imaging) یا توموگرافی مقاومت‌ویژه (Electrical resistivity tomography or ERT) به‌طور فزاینده‌ای در اکتشاف الکتریکی مناطق کارستی همراه با حفرات زیرسطحی آب‌دار، رس دار و بدون آب و رس به‌کار گرفته می‌شود (لوک و بارکر، ۱۹۹۵؛ داهلین، ۱۹۹۶؛ اولدنبرگ و لی، ۱۹۹۹؛ سامانواک و الوینچ، ۲۰۰۷).

با استفاده از مقاطع الکتریکی حاصل از وارون‌سازی داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی و تفسیر آنها می‌توان پتانسیل آب‌زیرزمینی (الیل و همکاران، ۲۰۱۰)، عمق سنگ کف، عمق برخورد به آب و ضخامت آبخوان (گوپتا و همکاران، ۲۰۱۵)، تفکیک ساختارهای کارستی و فروچاله‌های آب‌دار از خشک، شناسایی مناطق گسلی و خردشده (ساربوداک و هاوکینز، ۲۰۱۹)، و ناهنجاری‌های کارستی (بهارتی، ۲۰۱۶؛ پرنیس و همکاران، ۲۰۱۸) را شناسایی کرد. در سالیان اخیر استفاده از توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی با آرایه‌های مختلف در ایران توسط محققین مختلف انجام شده است (حفیظی و رادان، ۱۳۸۶؛ ملامحمدی زاده و قربانی، ۱۳۹۱؛ اسدی و همکاران، ۱۳۹۸).

شهرستان ایذه در شمال شرق استان خوزستان قرار دارد. با کاهش بارندگی در سال‌های اخیر، بروز خشک‌سالی شدت بیشتری گرفته و به دنبال آن خیلی از شهرهای ایران از جمله شهرستان ایذه با بحران جدی آب مواجه شده‌اند. در حال حاضر آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین‌کننده آب این شهرمی باشد که به علت خشک‌سالی‌های اخیر و استحصال بی‌رویه، سطح ایستابی آبخوان آبرفتی افت پیدا کرده به طوری که تعداد زیادی از چاه‌های عمیق و نیمه عمیق بخش کشاورزی و شرب با کاهش شدید آبدهی مواجه شده‌اند.

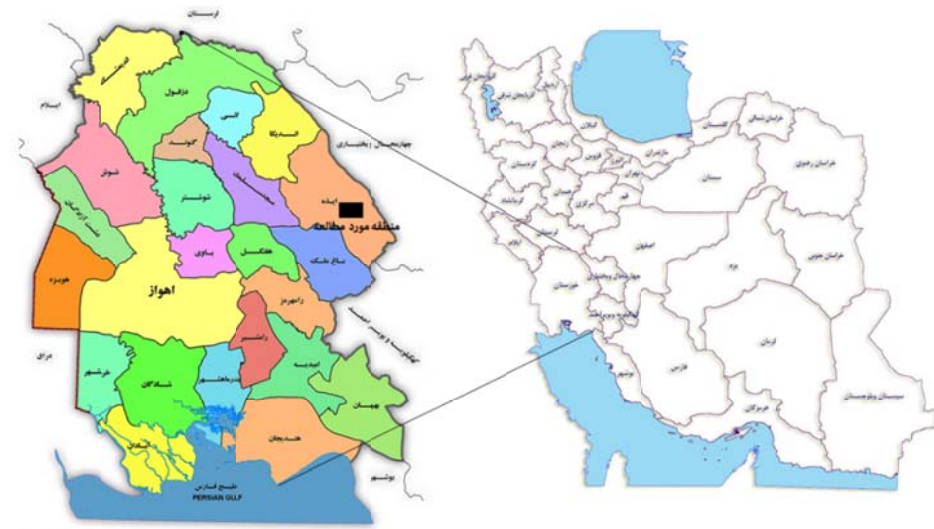
طی دو دهه اخیر در آهک‌های سازند آسماری در مناطق مختلف ایذه چاه‌های آهکی جهت تأمین آب شرب ایذه حفاری شده‌اند. از سال ۱۳۹۴ آبدهی بعضی چاه‌های آهکی ایذه در سازند آسماری کاهش پیدا کرده و حفر چاه‌های جدید و جایگزین با عمق بیشتر ضرورت پیدا کرده است. با این حال در طی سالیان اخیر عدم به‌کارگیری مطالعات مناسب منجر به حفاری ناموفق چاه‌های آب و هدر رفتن هزینه شده است. بر این اساس مطالعات پتانسیل‌یابی آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک سنجش از دور و مدل‌سازی آب زیرزمینی کارستی ایذه در محیط GIS به منظور شناخت نواحی با پتانسیل زیاد آب زیرزمینی به‌کار گرفته شد و سپس با انجام مطالعات ژئوالکتریک به‌روش مقاومت ویژه و توپوگرافی مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به تعیین محل دقیق چاه‌های آب اقدام شد.

در این مقاله سازند آهکی آسماری ایذه در ناودیس نعل‌اسبی و تاقدیس چال خشک به‌عنوان سایت هدف جهت اکتشاف آب زیرزمینی کارستی مورد بررسی قرار گرفته است. شهر ایذه از نظر جغرافیایی در ۴۹ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۰ درجه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۵۰ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (شکل ۱). بارش سالانه میانگین ایذه بر اساس اطلاعات و آمار سازمان آب و برق خوزستان در طی دوره ۱۳ ساله ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷ برابر ۵۵۰ میلی‌متر می‌باشد (کلانتری و همکاران،

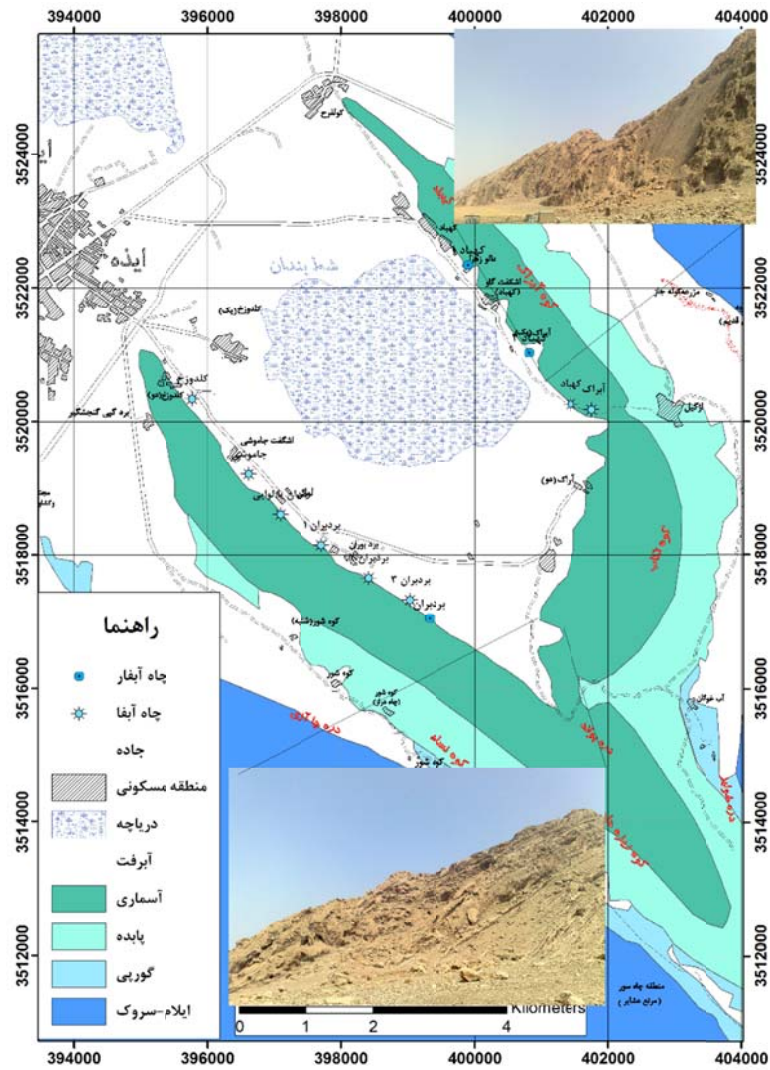
(۱۳۹۸).

دشت ایذه از لحاظ زمین‌شناسی در ناحیه زاگرس چین‌خورده یا زاگرس خارجی قرار می‌گیرد. دشت مذکور در داخل ناودیس بسته‌ای با محور شمال غربی- جنوب شرقی قرار دارد. دماغه جنوب شرقی ناودیس به‌صورت نعل‌اسبی است که دریاچه آب‌بندان را محصور کرده است. سازندهای زمین‌شناسی که در منطقه مورد مطالعه رخنمون دارند مربوط به کرتاسه زیرین تا عهد حاضر می‌باشند (شکل ۲). سازندهای آهکی ایلام- سروک قدیمی‌ترین سنگ‌های بیرون‌زده در منطقه هستند که بر روی آن سازند شیلی گورپی، سازند مارنی پابده، سازند آهکی آسماری، و آبرفت‌های عهد حاضر به‌ترتیب قدمت قرار گرفته‌اند. گسترش پدیده‌های انحلالی در اعماق لایه‌های آهکی تاقدیس آسماری احتمالاً باعث ایجاد حفرات و مجاری وسیع شده و مخزن عظیم آب کارستی را به‌وجود آورده است. سیستم‌های درز و شکاف و سیمای کارستی نظیر چاهک، غار و کارن در این سازند گسترش دارند. مهم‌ترین عارضه چین‌خوردگی در منطقه مورد مطالعه، ناودیس نعل‌اسب مانند سازند آسماری می‌باشد (شکل ۲). این سیما در حقیقت ناودیس پلانژ داری با شیب به‌سمت شمال غرب می‌باشد. این ناودیس، مخزن اصلی آبخوان کارستی می‌باشد. مساحت رخنمون سازند آسماری در این ناودیس حدود ۲۰ کیلومتر مربع می‌باشد.

حفاری‌های اکتشافی و چاه‌های بهره‌برداری در یال‌های سیمای نعل‌اسبی نمایانگر وجود آبخوانی با قابلیت آبدهی بالا در این سیما می‌باشد. کل عمق چاه‌های موردنظر در سازند آسماری می‌باشد و از آب ذخیره‌شده در خلل و فرج و شکستگی‌ها و مجاری این سازند برداشت می‌شود. تعداد ۱۱ حلقه چاه با دبی ۳۰ الی ۵۰ لیتر بر ثانیه (بر اساس اطلاعات جمع‌آوری‌شده در سال آبی ۹۸-۱۳۹۷) که تأمین آب شرب شهر ایذه و روستاهای حومه از آنها صورت می‌گیرد، در سازند آسماری و در سیمای نعل‌اسبی حفر شده‌اند.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه.



شکل ۲. نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (سیستم مختصات UTM-WGS84- Zone39).

## ۲. روش پژوهش

در این مقاله، پتانسیل‌یابی آب‌زیرزمینی با استفاده از تکنیک سنجش از دور و مدل‌سازی آب‌زیرزمینی کارستی ایزده در محیط GIS به‌منظور شناخت نواحی با پتانسیل زیاد آب‌زیرزمینی به‌کارگرفته شد و سپس با انجام مطالعات ژئوالکتریک به‌روش مقاومت‌ویژه و توپوگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی نسبت به تعیین محل دقیق چاه‌های آب اقدام شد.

با توجه به شرایط خاص هیدروژئولوژی کارستی ایزده و اطلاعات در دسترس، پنج عامل اصلی مؤثر بر پتانسیل آب کارستی مورد تحلیل مکانی واقع شده است. پنج پارامتر معیار به‌کار گرفته‌شده در مدل، شامل فاصله از محل تخلیه، تراز ارتفاعی، چگالی طول شکستگی‌ها، چگالی تقاطع شکستگی‌ها، و شیب توپوگرافی می‌باشند. در این راستا اطلاعات مورد نیاز با استفاده از منابع داده‌های مختلف و با فرمت‌های گوناگون جمع‌آوری شده و به محیط GIS وارد شد، سپس جهت تهیه نقشه نهایی پتانسیل آب‌زیرزمینی ابتدا با توجه به مقالات مختلف (محمدی و همکاران، ۲۰۱۴) و با استفاده از تابع طبقه‌بندی مجدد هر یک از این پنج عامل (نقشه‌های معیار) در محدوده ارزش‌های ۱ تا ۱۰ نرخ‌بندی شدند. سپس این لایه‌ها به‌روش قضاوت کارشناسی بر اساس مقالات موجود (محمدی بهزاد و همکاران، ۲۰۱۸؛ آبرامز و همکاران، ۲۰۱۸) وزن‌دهی و تلفیق شدند. در این تحقیق برای تلفیق نقشه‌های معیار، از مدل هم‌پوشانی خطی وزنی با توجه به وزن معیارها و کلاس‌های مربوط به هر یک از آنها استفاده شده است. در نهایت نقشه پتانسیل آب‌زیرزمینی منطقه تهیه شده است. روش هم‌پوشانی خطی وزنی (Weighted linear combination or WLC) رایج‌ترین روش در تحلیل ارزیابی چندمعیاری است. این تکنیک، روش امتیازدهی نیز نامیده می‌شود. این روش بر مبنای مفهوم میانگین وزنی استوار است. روش WLC یک روش تصمیم‌گیری برای حصول نقشه‌های ترکیبی با استفاده از GIS می‌باشد که اغلب با مدل‌های تصمیم‌گیری

(decision models) در GIS استفاده می‌شود (مالکزیفسکی، ۲۰۰۰). این روش برای تحلیل‌های کاربری اراضی و آمایش زمین، انتخاب سایت، و مسایل ارزیابی منابع مورد استفاده قرار می‌گیرد (هرزفلد و مریان، ۱۹۹۵؛ لوری و همکاران، ۱۹۹۵). دلیل اصلی محبوبیت این روش، کاربرد آسان آن در محیط GIS با استفاده از عملگر Map algebra و مدل‌سازی کارتوگرافیک می‌باشد (بری، ۱۹۹۳). روش GIS/WLC شامل مراحل زیر است (مالکزیفسکی، ۲۰۰۰): (۱) تعریف مجموعه لایه‌های اطلاعاتی مؤثر بر هدف و تهیه آنها؛ (۲) تهیه لایه‌های معیار با نرخ‌بندی آنها؛ (۳) تعیین وزن‌های معیار (وزن‌ها به‌صورت اهمیت نسبی هر معیار بر تابع هدف تعیین می‌شوند)؛ (۴) ترکیب لایه‌های معیار با ضرب کردن وزن در لایه‌ها و جمع کردن آنها؛ (۵) رتبه‌بندی نقشه نهایی. تکنیک هم‌پوشانی (Overlay technique) در محیط GIS می‌تواند لایه‌های معیار را به‌منظور حصول نقشه ترکیبی (نقشه خروجی) تلفیق نماید.

با توجه به آن‌که هدف اصلی تنها یک سازند، یعنی سازند آهکی آسماری می‌باشد بنابراین در مدل مذکور از لایه مهم لیتولوژی صرف‌نظر شده است. عامل تراز ارتفاعی به‌علت این‌که حرکت آب در داخل درزه‌ها تحت تأثیر نیروی ثقل بوده و جهت جریان آب‌زیرزمینی همیشه از تراز انرژی بالا به تراز انرژی پایین‌تر رخ می‌دهد، اهمیت دارد. مکان‌هایی با تراز ارتفاعی پایین نسبت به اطراف به‌عنوان محل‌های مناسب برای تجمع آب‌زیرزمینی و تشکیل مخزن در نظر گرفته شده و به مناطق با تراز ارتفاع کمتر امتیاز بیشتری اختصاص یافته است. با بررسی‌های انجام‌شده در تاقدیس‌های خوزستان استنباط شده است که شیب‌های بیشتر، تأثیر مثبت در پتانسیل آب‌زیرزمینی کارست دارند، زیرا لایه‌های پرشیب بیشتر تکتونیزه شده‌اند و در نتیجه شدت کارست‌شدگی در آنها بالاتر است. عامل‌های در ارتباط با شکستگی‌ها به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بر روی هیدروژئولوژی سنگ‌های آهکی تأثیر می‌گذارند در این مقاله برای تهیه لایه‌های مرتبط با

واحدهای زمین‌شناسی، مجراهایی با نفوذپذیری بالا جهت عبور آب و حرکت آن به نقاط پایین‌تر درون زمین ایجاد می‌شود و این محل‌ها نقاطی هستند که اهمیت آنها در پتانسیل آب‌زیرزمینی سازندهای سخت و آهکی بیشتر می‌باشد. امتیازدهی لایه‌های اطلاعاتی در جدول ۱ ارایه شده است.

پنج لایه معیار تهیه‌شده براساس اهمیت آنها در پتانسیل آب‌زیرزمینی وزن‌های ۱ تا ۵ داده‌شده و با یکدیگر تلفیق شدند. براساس قضاوت کارشناسی مبتنی بر تجربیات پیشین و مقالات محققین دیگر، وزن‌ها از ۵ تا ۱ به ترتیب برای اختلاف ارتفاع با محل تخلیه، فاصله از محل تخلیه، چگالی تقاطع شکستگی‌ها، چگالی طول شکستگی‌ها، و شیب اعمال شد و به روش هم‌پوشانی شاخص تلفیق شد (جدول ۱).

شکستگی‌ها، ابتدا شکستگی‌های احتمالی با بازبینی بصری تصویر ماهواره ایکونوس منطقه استخراج می‌شد. البته استخراج خطواره‌ها (شکستگی‌ها) بایستی بر اساس شرایط منطقه و شناخت خصوصیات ساختاری آن صورت بگیرد. در این تحقیق برای کاهش خطا و بالا بردن دقت کار شکستگی‌ها به صورت دستی (بصری) از روی تصویر ماهواره‌ای ایکونوس و با کمک افزونه Arcbrutite در ArcGIS استخراج شدند. با توجه به این‌که شکستگی‌ها در انتقال آب و توسعه کارست، افزایش تخلخل، و افزایش حجم ذخیره آب کارستی، نقش مثبت دارند، بنابراین هرچقدر فاصله از آنها و یا تقاطع آنها کمتر شود میزان پتانسیل آب‌زیرزمینی کارستی بیشتر می‌شود. با توجه به این‌که درمحل تلاقی شکستگی‌ها، به دلیل ایجاد فضاهایی در سازندها و

جدول ۱. نرخ دهی و وزن‌دهی لایه‌های مورد استفاده جهت پتانسیل‌یابی آب‌زیرزمینی ناودیس نعل‌اسبی ایذه.

شیب توپوگرافی (درصد) - وزن: ۱		چگالی طول شکستگی‌ها (کیلومتر بر کیلومتر مربع) - وزن: ۲		فاصله از محل تخلیه (متر) - وزن: ۴	
نرخ	مقدار اصلی	نرخ	مقدار اصلی	نرخ	مقدار اصلی
۱	۰-۶	۱	۰-۳/۲۵	۹	۰-۱۲۲۰
۲	۶-۱۲	۲	۳/۲۵-۶/۵	۸	۲۴۰-۱۲۲۰
۳	۱۲-۱۸	۴	۶/۵-۹/۷۵	۷	۲۴۰-۳۶۶۰
۴	۱۸-۲۴	۵	۹/۷۵-۱۳	۶	۳۶۶۰-۴۸۸۰
۵	۲۴-۳۰	۷	۱۳-۱۶/۲۵	۵	۴۸۸۰-۶۱۰۰
۶	۳۰-۳۶	۸	۱۶-۲۵-۱۹/۵	۴	۶۱۰۰-۷۳۲۰
۷	۳۶-۴۲	۹	۱۹/۵-۲۲/۷۵	۳	۷۳۲۰-۸۵۴۰
۸	۴۲-۴۸	۱۰	۲۲/۷۵-۲۶	۲	۸۵۴۰-۹۷۶۰
۹	۴۸-۵۴			۱	۹۷۶۰-۱۰۹۸۰
۱۰	۵۴-۶۰			۰	۱۰۹۸۰-۱۲۲۰۰
چگالی تقاطع شکستگی‌ها تعداد نقطه بر کیلومتر مربع - وزن: ۳		اختلاف تراز ارتفاعی با محل تخلیه (متر) - وزن: ۵			
نرخ	مقدار اصلی	نرخ	مقدار اصلی		
۱	۰-۰/۸۱۵	۹	۰-۹۴		
۲	۰/۸۱۵-۱/۶۳	۸	۹۴-۱۸۸		
۳	۱/۶۳-۲/۴۴۵	۷	۱۸۸-۲۸۲		
۴	۲/۴۴۵-۳/۲۶	۶	۲۸۲-۳۷۶		
۵	۳/۲۶-۴/۰۷۵	۵	۳۷۶-۴۷۰		
۶	۴/۰۷۵-۴/۸۹	۴	۴۷۰-۵۶۴		
۷	۴/۸۹-۵/۷۰۵	۳	۵۶۴-۶۵۸		
۸	۵/۷۰۵-۶/۵۲	۲	۶۵۸-۷۵۲		
۹	۶/۵۲-۷/۳۳۵	۱	۷۵۲-۸۴۷		
۱۰	۷/۳۳۵-۸/۱۵				

نرم‌افزار وارون‌سازی داده‌های ژئوالکتریکی Res2DInv تنظیم، و سپس توسط این نرم‌افزار مورد وارون‌سازی قرار گرفتند. پارامترهای مورد استفاده برای وارون‌سازی هر دو مقطع مشابه لحاظ شد و توپوگرافی جهت نرمال کردن ارتفاع توپوگرافی واقعی سطح زمین اعمال شد. بر اساس مزایای ارایه‌شده در نرم‌افزار Res2DInv، الگوریتم رابوست (Robust algorithm) برای معکوس‌سازی انتخاب شد زیرا این الگوریتم تغییرات خالص بیشتری در مقاومت‌ویژه الکتریکی بین بخش‌های مختلف مقطع به دست می‌دهد. به هر حال، در انتخاب مقطع نهایی، به دلیل نامشخص بودن هندسه مرزهای ساختارهای کارستی، تأثیر تغییرات مقاومت‌ویژه الکتریکی ناشی از سنگ زمینه و اطراف آن می‌بایست احتیاط لازم صورت گیرد. پس از مدل‌سازی مقاومت‌ویژه الکتریکی، خروجی‌ها به صورت مقاطع عرضی توموگرافی در مدل دوبعدی ERT به دست آمد. سپس با تفسیر آنها مقاطع لیتوژئوالکتریکی تهیه و در نهایت براساس نتایج یافته‌های ژئوالکتریک دو محل جهت حفاری چاه آب در کارست ایزه پیشنهاد شد.

### ۳. اندازه‌گیری‌ها و مشاهدات

جهت پتانسیل‌یابی آب‌زیرزمینی در ناودیس نعل‌اسبی ایزه، لایه‌های اطلاعاتی از منابع مختلف استخراج شدند که نقشه‌های حاصل در شکل ۳ ارایه شده است. دو نقطه انتهایی یال‌ها به‌عنوان نقاط تخلیه اصلی سیستم کارست ناودیس نعل‌اسبی ایزه در نظر گرفته شد. دو نقطه مذکور در دو یال با توجه به جریان آب‌زیرزمینی در ناودیس نعل‌اسبی که از دماغه پلانژدار ناودیس در جنوب شرق در امتداد یال‌ها به سمت شمال غرب می‌باشد، انتخاب شد. در مدل رقومی ارتفاعی ناودیس نعل‌اسبی، ارتفاع آهک از ۸۳۵ متر در نقاط تخلیه انتهایی شمال غربی یال‌های ناودیس تا ۱۶۸۲ متر نسبت به سطح دریا متغیر است. با کسر کردن مدل رقومی ارتفاعی (DEM) منطقه از ارتفاع حداقل نقطه تخلیه (۸۳۵ متر)، لایه اختلاف ارتفاع با محل تخلیه تهیه شد. در لایه مذکور ارتفاعات حداکثر در

برداشت‌های ژئوفیزیکی به‌روش توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی (ERT) دوبعدی در دو پروفیل و با آرایه دوقطبی-دوقطبی انجام شد. البته بر اساس نتایج پتانسیل‌یابی آب‌زیرزمینی دو پروفیل در ناودیس نعل‌اسبی برای انجام مطالعات ژئوالکتریک با آرایه‌های شلومبرژه و دوقطبی-دوقطبی پیشنهاد شد. پس از داده‌برداری سونداژهای شلومبرژه و با توجه به عدم امکان داده‌برداری در موقعیت پیشنهادی پروفیل دوقطبی-دوقطبی در جنوب ناودیس نعل‌اسبی با آهک غرب ایزه جایگزین شد. مدل‌های ERT به‌منظور تشخیص و ترسیم شکستگی‌های اصلی و گسل‌ها، و حفرات موردتفسیر قرار گرفتند. بررسی‌های ژئوالکتریک جهت تشخیص حفرات در بخش‌های مختلف سازند کارستی آسماری ایزه به‌منظور تعیین محل‌های مناسب حفر چاه آب به‌کار گرفته شده است. دو پروفیل با آرایه دو قطبی-دو قطبی (یکی با فاصله الکترودی ۲۰ متری تا پرش ۱۱ و طول ۳۸۰ متر برای بررسی تا عمق ۶۰ متری و دیگری با فاصله الکترودی ۴۰ متر تا پرش ۱۰ و طول ۶۴۰ متر برای بررسی تا عمق ۱۳۰ متر) به‌منظور شناخت حفرات و مناطق خردشده با ابعاد متفاوت در مناطق مختلف عمقی کارست داده‌برداری شده است. داده‌برداری با استفاده از دستگاه ژئوالکتریک IP-RS مارک ARES با توان فرستنده ۸۵۰ وات ساخت GF Instruments کشور چک انجام شده است.

داده‌های اندازه‌گیری‌شده پروفیل‌های دوبعدی مرتب شده و به‌شکل شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه الکترودی منحنی‌بندی شدند. شبه‌مقاطع مقاومت‌ویژه الکتریکی ظاهری فقط دید عمومی از توزیع مقاومت‌ویژه زیرسطحی به دست می‌دهد و به دلیل هموارشدگی داده‌ها، تغییرات شدید مقاومت‌ویژه الکتریکی سنگ‌ها و تأثیر آرایه الکترودی بر اندازه‌گیری مقادیر مقاومت‌ویژه ظاهری، نمی‌توانند تصویر واضحی از زیرزمین به دست دهند. بنابراین به‌منظور ارایه بهتر و واقعی‌تر توزیع مقاومت‌ویژه الکتریکی زیر سطحی، می‌بایست روی داده‌های ژئوالکتریکی مدل‌سازی وارون انجام شود. بدین‌منظور داده‌های برداشتی به‌فرمت ورودی

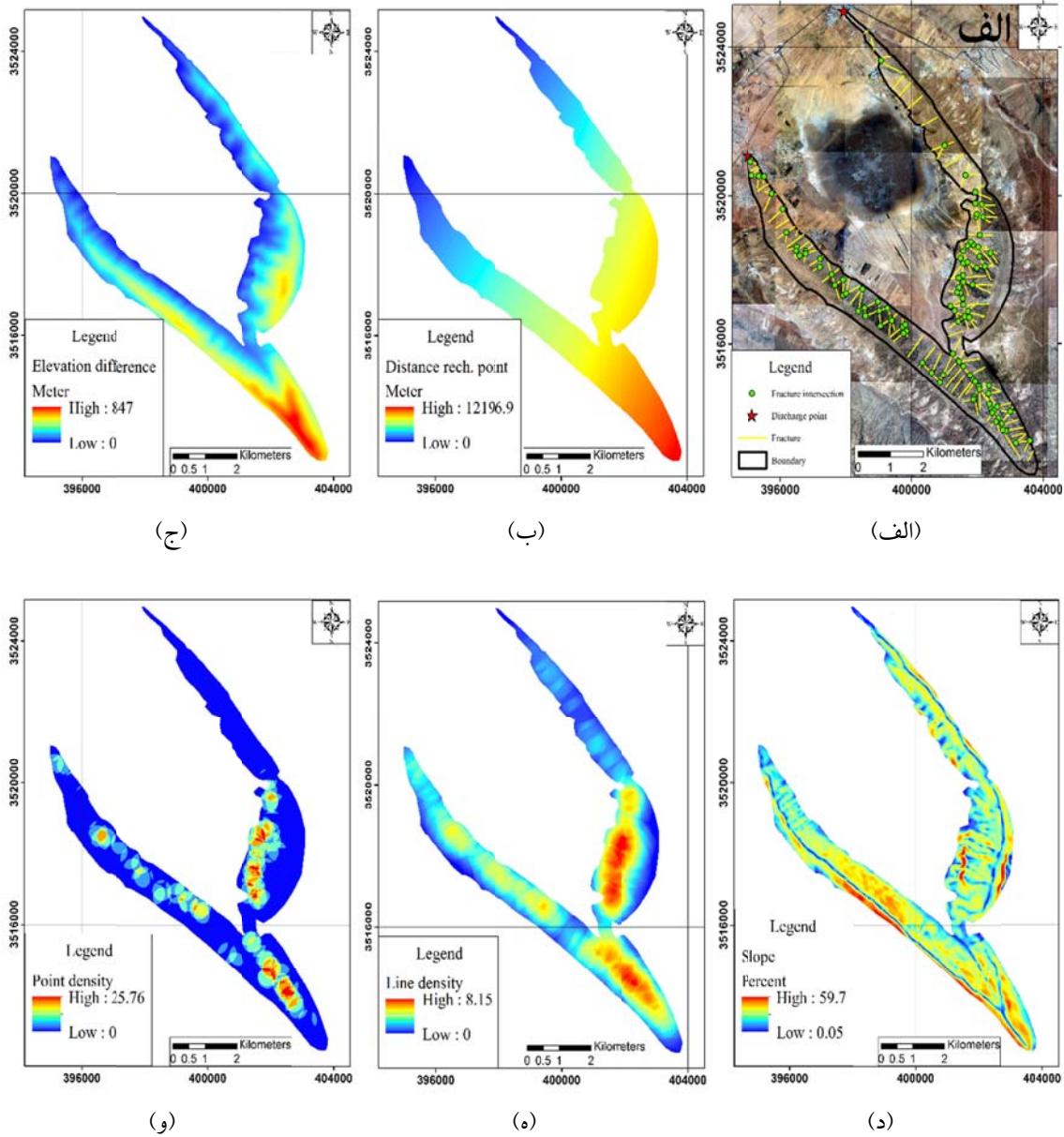
دیگری در محل بسته شدن ناودیس رخ داده است. با توجه به آن که پنج لایه معیار دارای واحدهای متفاوتی هستند برای تلفیق آنها نیاز به هم‌مقیاس‌سازی می‌باشد. لایه‌ها براساس اهمیت آنها بر پتانسیل آب‌زیرزمینی در ۱۰ گروه طبقه‌بندی مجدد (Reclassify) شدند (شکل ۴). تراکم بیشتر چگالی تقاطع و طول شکستگی‌ها و شیب بیشتر با اهمیت بیشتر نرخ‌بندی شد. اختلاف ارتفاع کمتر و فاصله کمتر با محل تخلیه با اهمیت بیشتر بر پتانسیل آب‌زیرزمینی نرخ‌بندی شد. سپس با استفاده از رابطه زیر تلفیق لایه‌ها با روش هم‌پوشانی شاخص انجام شد:

$$\text{GWP index} = (5 * \text{ED}) + (4 * \text{DP}) + (3 * \text{PD}) + (2 * \text{LD}) + (1 * \text{S}) \quad (1)$$

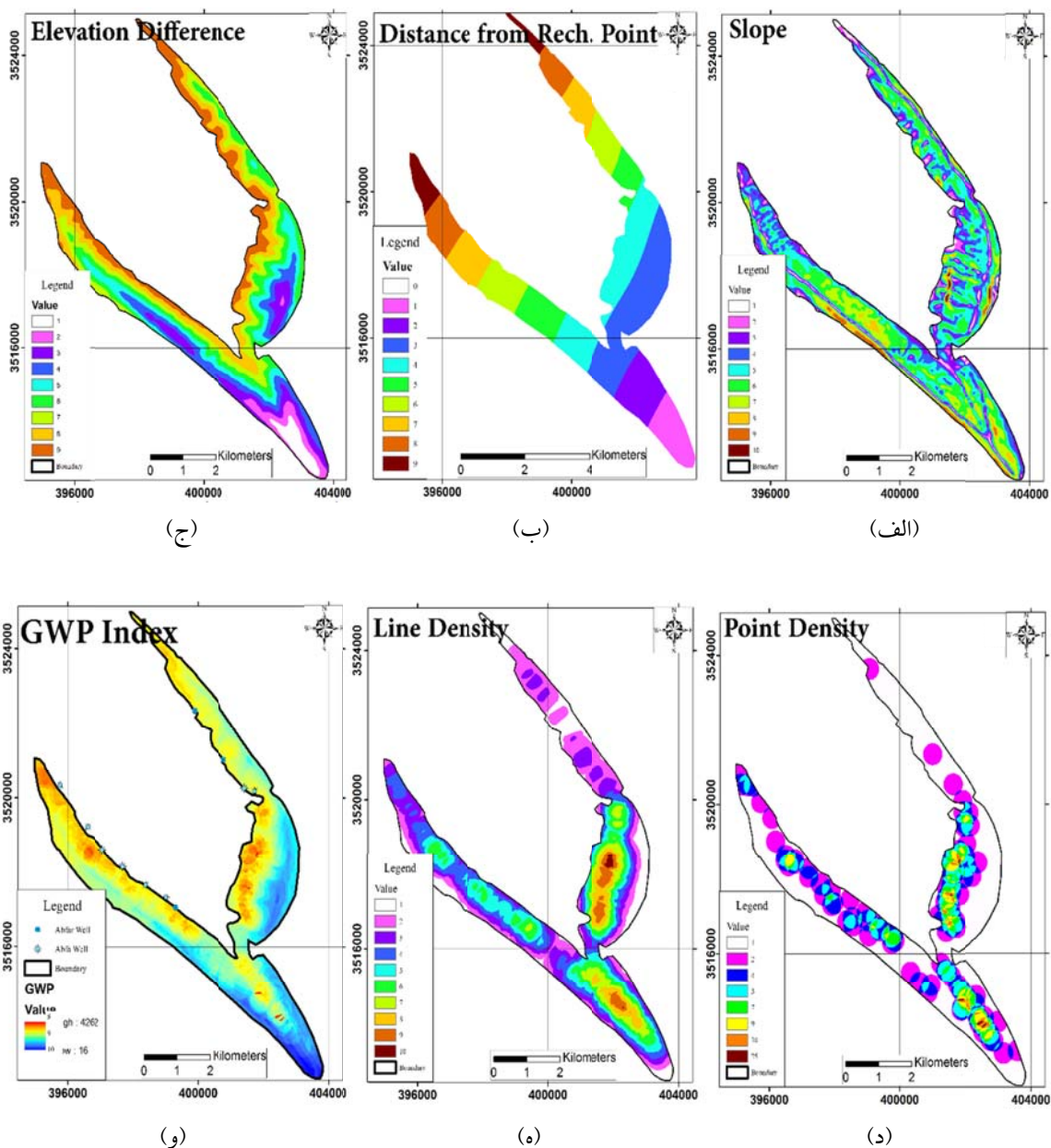
که GWP index شاخص پتانسیل آب‌زیرزمینی، ED اختلاف ارتفاع با محل تخلیه، DP فاصله با نقاط تخلیه، PD چگالی تقاطع شکستگی‌ها، LD چگالی طول شکستگی‌ها، و S شیب می‌باشند. بر اساس رابطه ۱، پتانسیل آب‌زیرزمینی کارست نعل‌اسبی ایزه محاسبه و در شکل ۴ ارایه شده است. در شکل ۵ نقشه طبقه‌بندی پتانسیل آب‌زیرزمینی ارایه شده است. براساس نقشه مذکور مناطق با پتانسیل خیلی‌زیاد در یال غربی و جنوب شرق ناودیس در امتداد راندگی آبراهه قرار دارند. تمرکز چاه‌های آهکی آب شرب ایزه در یال جنوب‌غربی نیز مؤید صحت نتایج پتانسیل‌یابی می‌باشند. در ادامه در نقاط با پتانسیل زیاد داده‌برداری ژئوالکتریک با روش مقاومت‌ویژه الکتریک و آرایه شلومبرژه انجام شد. سپس براساس تفسیرهای اولیه دو پروفیل P1 و P3 برای انجام داده‌برداری با آرایه دوقطبی-دوقطبی و تعیین محل دقیق حفاری چاه‌های آب انتخاب شد (شکل ۴). با توجه به مشکلات موجود در سایت آبراک، واقع در محل با پتانسیل زیاد آب‌زیرزمینی در جنوب شرق ناودیس نعل‌اسبی، عملاً امکان داده‌برداری در سایت P3 وجود نداشت و به‌جای آن پروفیل P2 در غرب ایزه برای مطالعات ژئوالکتریک انتخاب شد.

جنوب شرق و در دماغه پلانژدار ناودیس قرار دارد. لایه شیب نیز براساس اعمال دستور Slope بر روی DEM در محیط GIS تهیه شد. مقدار شیب از ۰/۰۰۵ تا حدود ۶۰ درصد متغیر است. مقادیر شیب حداکثر در امتداد راندگی آبراک در جنوب شرق ناودیس وجود دارد. البته افتادگی پشت آهک آسماری در محل تماس با سازند مارنی گورپی در حاشیه بیرونی ناودیس وجود دارد که به‌لحاظ پتانسیل آب‌زیرزمینی فاقد اهمیت است. لایه فاصله از محل تخلیه با تعیین نقاط تخلیه در دو انتهای یال‌های ناودیس و بافر زدن در GIS تهیه شد. حداکثر فاصله از محل‌های تخلیه، برابر ۱۲/۲ کیلومتر می‌باشد. نقشه شکستگی با استفاده از تصویر ایکونوس و اعمال الگوریتم Lineament Extraction تهیه شد. این الگوریتم مربوط به نرم‌افزار PCI Geomatica می‌باشد و انواع عوارض خطی از جمله شکستگی‌ها را از روی یک باند استخراج می‌کند و نتیجه را به‌صورت یک فایل وکتور در اختیار کاربر قرار می‌دهد. خطواره‌های استخراج‌شده اتوماتیک، شامل ساختارهای دست‌ساز بشر مانند جاده‌ها و کانال‌ها و یا ساختارهای طبیعی مانند گسل‌ها، شکستگی‌ها، مرز لیتولوژی و یا شبکه زه‌کشی می‌باشند. بنابراین برای استخراج شکستگی‌ها باید شرایط منطقه و شناخت خصوصیات ساختاری آن را در نظر گرفت تا بتوان از بین خطواره‌های مختلف، شکستگی‌ها را استخراج کرد. در این مقاله برای کاهش خطا و بالا بردن دقت کار شکستگی‌ها، خطواره‌های اتوماتیک منطبق بر شکستگی‌ها، به‌صورت نظارت‌شده از روی تصویر ماهواره‌ای ایکونوس و با کمک افزونه Arcbrutle در ArcGIS تصحیح شدند. چگالی تقاطع و طول شکستگی‌ها نمایانگر بیشترین مقادیر در جنوب شرق ناودیس می‌باشد. یال جنوب‌غربی ناودیس نسبت به یال شمال شرقی آن تراکم شکستگی بیشتری نشان می‌دهد. حداکثر مقادیر چگالی طول شکستگی‌ها و چگالی تقاطع شکستگی‌ها در دو منطقه در جنوب شرق ناودیس، یکی در محل راندگی آبراک و در

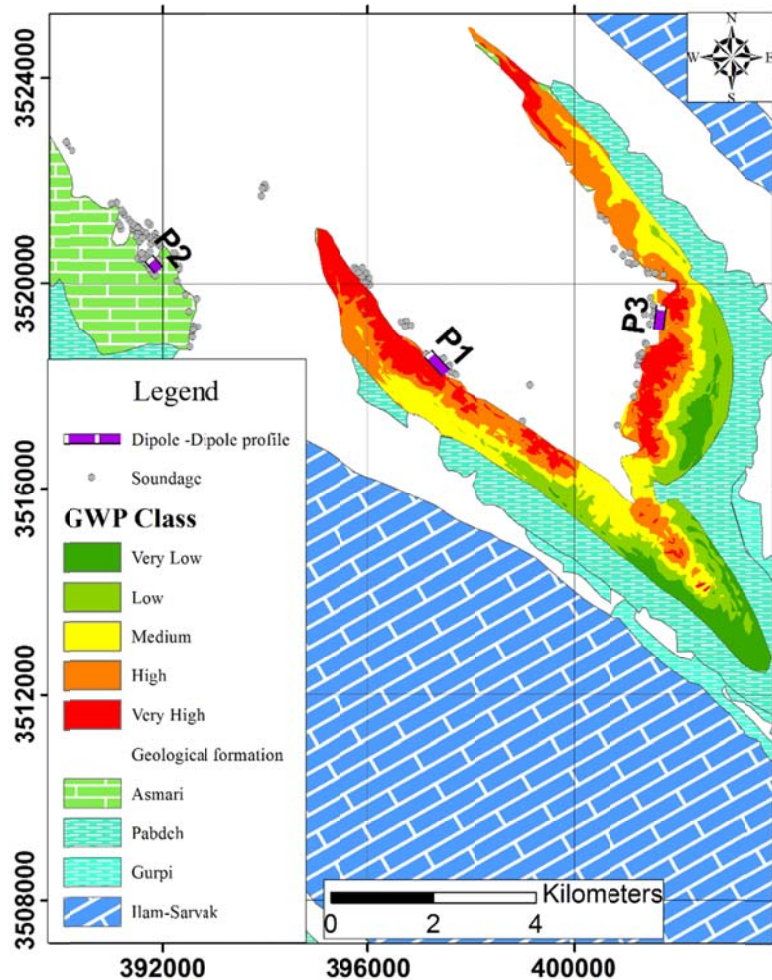




شکل ۳. لایه‌های مورد استفاده جهت پتانسیل‌یابی آب‌یرزمینی ناودیس نعل‌اسبی ایذه. الف) نقشه شکستگی‌ها و تقاطع آنها بر روی تصویر ماهواره ای، ب) لایه فاصله از نقاط تخلیه، ج) لایه اختلاف ارتفاع با محل تخلیه، د) لایه شیب، ه) لایه چگالی طول شکستگی‌ها، و) لایه چگالی تقاطع شکستگی‌ها.



شکل ۴. لایه‌های نرخ‌بندی شده و نقشه نهایی پتانسیل‌یابی آب‌رزمینی ناودیس نعل‌اسبی ایذه. الف) لایه طبقه‌بندی مجدد شیب، ب) لایه طبقه‌بندی مجدد فاصله از نقاط تخلیه، ج) لایه طبقه‌بندی مجدد اختلاف ارتفاع با محل تخلیه، د) لایه طبقه‌بندی مجدد چگالی تقاطع شکستگی‌ها، ه) لایه طبقه‌بندی مجدد چگالی طول شکستگی‌ها، و) لایه نهایی شاخص پتانسیل آب‌رزمینی.



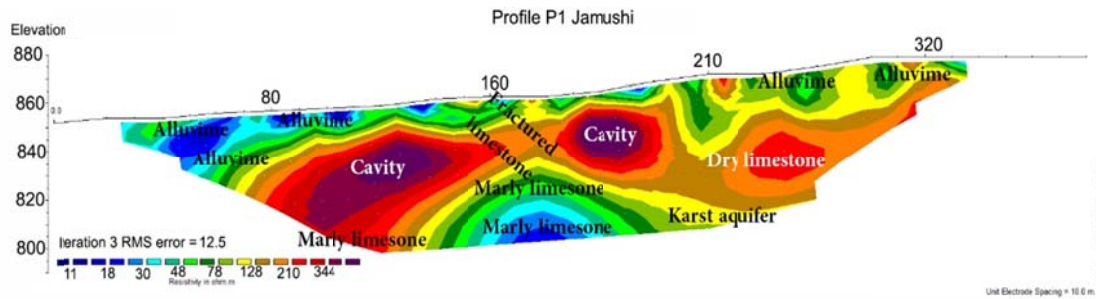
شکل ۵. نقشه طبقه‌بندی شده پتانسیل یابی آب زیرزمینی کارست ایذه و موقعیت پروفیل‌های دو قطبی-دوقطبی و سونداژهای ژئوالکتریک.

مذکور تا متر ۱۴۰ متر بر روی واریزه خرده‌سنگ و مارنی قرار دارد. مقاومت ویژه آهک خشک بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ اهم‌متر تغییر می‌نماید. ناهنجاری با مقاومت زیاد (حدود ۴۰۰ اهم‌متر) در متر ۱۰۰ تا ۱۲۰ متری و ۱۸۰ تا ۲۰۰ متری وجود دارد که احتمالاً مبین آهک کارستی حفره‌دار خشک می‌باشد. کاهش مقاومت ویژه از عمق حدود ۴۰ متری برخوردار به آبخوان کارستی آهک آسماری را نشان می‌دهد. بر اساس مقطع ژئوالکتریک تفسیر شده بهترین نقطه جهت حفاری چاه آب در متر ۲۲۰ متری توصیه می‌شود (شکل ۷ الف). در بخش میانی پروفیل و در عمق مقاومت ویژه الکتریکی به کمتر از ۳۰ اهم‌متر کاهش می‌یابد که منطبق با لایه آهک مارنی مرطوب می‌باشد.

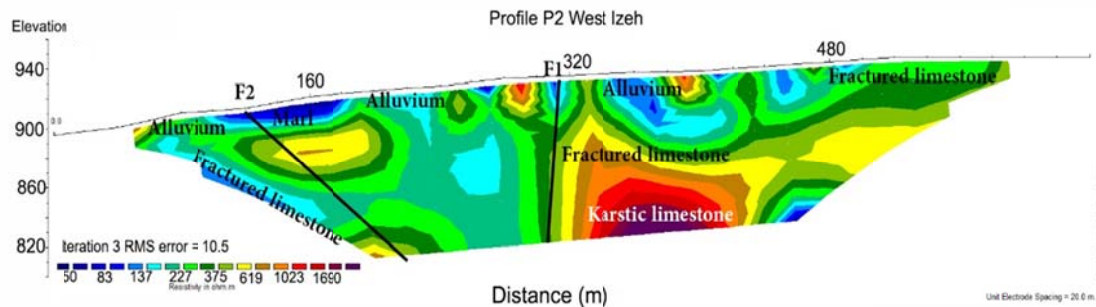
نتایج حاصل از تو موگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) مقاطع دو قطبی-دوقطبی در شکل ۶ و تفسیر لیتوژئوالکتریک آنها در شکل ۷ ارائه شده است. مقطع P1 به طول ۳۸۰ متر در یال غربی ناودیس نعل‌اسبی ایذه داده برداری شده است به طوری که چاه آهکی آب شرب روستای جاموشی، واقع در یال غربی ناودیس نعل‌اسبی، در ۲۰۰ متری شمال غرب ابتدای پروفیل مذکور قرار دارد. مقاومت ویژه الکتریکی مقطع تو موگرافی شده بین ۱۰ تا ۳۴۴ اهم‌متر متغیر می‌باشد (شکل ۶-الف). بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۸، عمق سطح آب در این سایت بین ۴۰ تا ۵۰ متر متغیر می‌باشد. مقاومت ویژه الکتریکی مقطع تو موگرافی شده بین ۱۰ تا ۴۰۰ اهم‌متر متغیر است. مقطع

F1 و F2، مقاومت ویژه الکتریکی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ اهم متر است که با افزایش عمق کاهش می‌یابد که احتمالاً نمایانگر لایه‌های عمقی آهک مارنی می‌باشد. در شرق گسل F1 و در بازه ۳۲۰ تا ۴۰۰ متری لایه‌های عمقی شامل آهک‌های کارستی با مقاومت ویژه الکتریکی بیش از ۱۲۰۰ اهم متر می‌باشد که به‌عنوان محل مناسب جهت حفاری چاه آب متراژ ۳۴۰ متر پیشنهاد شده است (شکل ۷-ب). با توجه به عمق نفوذ ۱۱۰ متری آرایه دو قطبی-دوقطبی، جهت اطمینان از پیشنهاد محل مناسب برای حفاری اقدام به سونداژزنی شلومبرژه شد. سونداژهای شلومبرژه برداشت شده، وجود آب زیرزمینی غنی کارستی در محل پیشنهادی را تأیید کرده است (شکل ۸). در مقطع مذکور ضخامت واریزه خردسنگ و مارنی کمتر از ۱۰ متر می‌باشد.

مقطع P2 به طول ۶۴۰ متر در یال شمال شرقی تاقدیس چال خشک در سایت غرب ایذه داده‌برداری شده است. مقاومت ویژه الکتریکی مقطع توموگرافی شده بین ۱۰ تا ۲۰۰۰ اهم متر متغیر می‌باشد (شکل ۶-ب). بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده سطح آب زیرزمینی در سال ۱۳۹۸، عمق سطح آب در این سایت بین ۸۰ تا ۱۰۰ متر متغیر می‌باشد. در مقطع توموگرافی آرایه دو قطبی-دوقطبی دامنه مقاومت ویژه الکتریکی بین ۱۰ تا ۲۰۰۰ اهم متر متغیر می‌باشد. در مقطع توموگرافی، دو گسل احتمالی F1 و F2 تشخیص داده شده که با تغییرات شدید و ناگهانی در توموگرام مقاومت ویژه الکتریکی خود را نشان می‌دهند. در غرب گسل F1 و به موازات گسل زون با مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۱۰۰ اهم متر وجود دارد که احتمالاً آهک خرد شده می‌باشد. در بازه بین گسل‌های

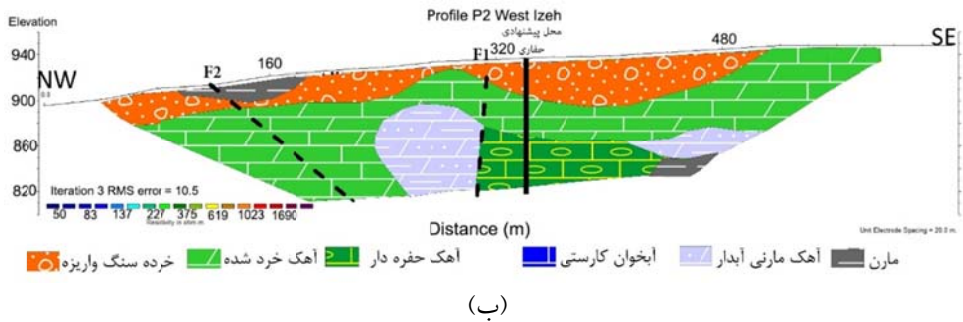
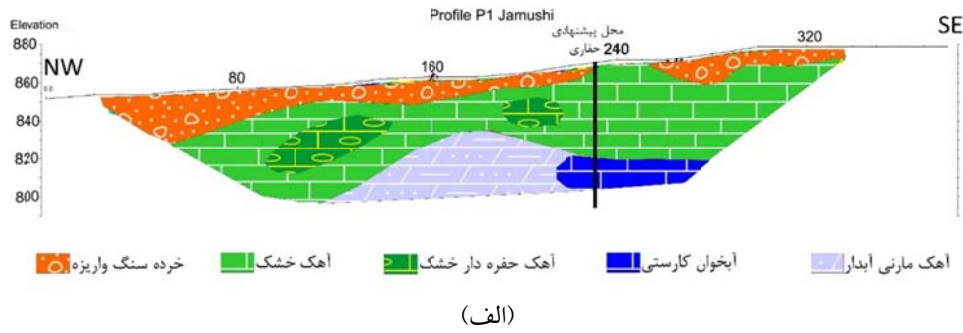


(الف)

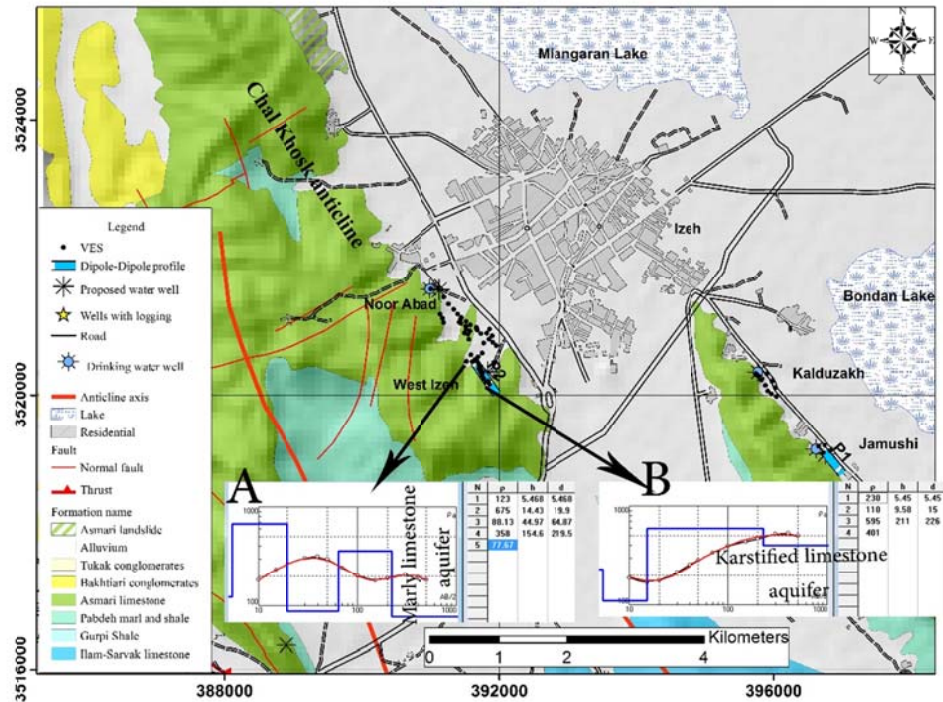


(ب)

شکل ۶. مقاطع ERT پروفیل‌های دوقطبی-دوقطبی ایذه. الف) پروفیل P1 در سایت جاموشی (ناودیس نعل اسبی) و ب) پروفیل P2 در سایت غرب ایذه.



شکل ۷. مقاطع لیتولوژی تفسیرشده براساس توپوگرافی های دوقطبی-دوقطبی الف) پروفیل P1 در سایت جاموشی (ناودیس نعل‌اسبی) و ب) پروفیل P2 در سایت غرب ایذه.



شکل ۸. تفسیر سونداژهای شلومبرژه تأییدکننده نتایج توپوگرافی مقاومت ویژه در سایت غرب ایذه، (A) سونداژ ابتدای پروفیل نمایانگر لایه آهک ماری ابدار با مقاومت ویژه الکتریکی ۷۷ اهم‌متر و عمق برخورد به آب ۱۰۹ متری، (B) سونداژ منطبق با متر از ۳۴۰ متری پروفیل P1 نمایانگر برخورد به آبخوان کارستی با مقاومت ویژه الکتریکی ۴۰۱ اهم‌متر و عمق برخورد به آب ۱۱۳ متری.

حفاری چاه‌های آب آهکی نیاز است تا از برداشت‌های ژئوالکتریکی (مقاومت‌ویژه الکتریکی و قطبش القایی) به‌منظور واسنجی نقشه‌ها و تعیین نقطه دقیق حفاری استفاده شود.

یکی از مهم‌ترین عوامل برای تعیین قابل‌اعتماد بودن نقشه‌های پتانسیل آب‌زیرزمینی، کیفیت و مقیاس لایه‌های اطلاعاتی می‌باشد. در این روش‌ها لایه‌های اطلاعاتی از ۴ یا ۵ لایه اصلی تا بیش از ۱۰ تا ۱۲ لایه متغیر است. تفکیک‌پذیری لایه‌های اطلاعاتی و عدم‌قطعیت ذاتی در استخراج لایه‌ها بسیار متغیر است. بدین‌منظور با استفاده از طبقه‌بندی مجدد (Reclassification) می‌توان لایه‌های اطلاعاتی با تفکیک‌پذیری ریز و درشت را با یکدیگر ترکیب کرد (مناپ و همکاران، ۲۰۱۳؛ بیش، ۲۰۱۷؛ داشو و همکاران، ۲۰۱۷؛ جهان و همکاران، ۲۰۱۸). این روش ساده‌سازی اغلب غیر قابل‌اجتناب و گاهی لازم است. به‌رحال در پتانسیل‌یابی آب‌زیرزمینی در مقیاس منطقه ای، عدم‌صحت محلی داده‌ها می‌تواند از ترکیب لایه‌های با مقیاس مختلف حاصل شود. هرچند که در نواحی آبرفتی مناطق هموار با شبکه زه‌کشی توسعه ضعیف نسبت به مناطق شیب‌دار پتانسیل آب‌زیرزمینی بیشتری دارند (حقی زاده و همکاران، ۲۰۱۷؛ مارتین-لوشز و همکاران، ۲۰۱۸)، ولی در مناطق آهک لایه‌های شیب‌دار متأثر از نیروهای تکنونیک‌ی دارای خردشدگی بیشتر و بالطبع پتانسیل کارست‌شدگی و آب‌زیرزمینی زیادتری هستند. در این قبیل موارد می‌بایست نقشه‌های پتانسیل آب‌زیرزمینی به‌عنوان ابزاری جهت بهینه‌سازی کارهای میدانی اکتشافی همانند ژئوفیزیک به‌ویژه در مقیاس محلی مورد استفاده قرار گیرند (ابدالا، ۲۰۱۲؛ محمدی و همکاران، ۲۰۱۴؛ مندل و همکاران، ۲۰۱۶).

در مرحله تعیین محل‌های مناسب جهت حفاری چاه‌های آهکی، می‌توان از روش‌های ژئوالکتریک به‌ویژه توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی یا ERT در مناطقی که پتانسیل بیشتری دارند استفاده کرد. بر اساس نتایج توموگرافی ژئوالکتریک در آهک آسماری ایذه،

براساس یافته‌های حاصل از این مطالعه درنهایت دو نقطه در سایت‌های جاموشی و غرب ایذه جهت حفاری چاه آب آهکی پیشنهاد شد. حفاری چاه غرب ایذه در پاییز ۱۳۹۸ تا عمق نهایی ۲۷۲ متر حفاری انجام شد که در عمق ۱۱۰ متری به آب رسید. در طی حفاری چاه غرب ایذه مطابق با نتایج ژئوفیزیک از عمق ۴۵ متری با برخورد به حفره دیگر برگشت مواد خردشده حفاری (Cutting) به سطح رخ نداده است. در خاتمه حفاری سطح آب‌زیرزمینی در چاه در عمق ۷۰ متری قرارگرفته است. بر اساس اطلاعات پمپاژ چاه مذکور، آبدهی چاه بین ۴۷ تا ۶۱ لیتر در ثانیه با افت حداکثر ۰/۴۸ متر و برگشت سریع سطح آب در طی ۲۰ دقیقه پس از خاموش کردن پمپ (بیانگر آبدهی عالی) می‌باشد.

#### ۴. بحث

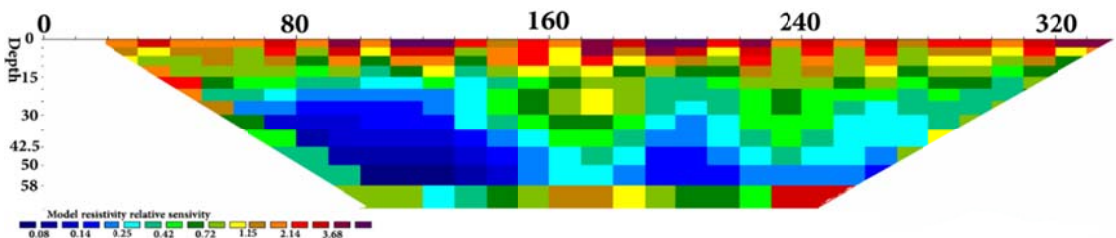
نقشه پتانسیل آب‌زیرزمینی به‌منظور تعیین مناطق مستعد جهت توسعه بهره‌برداری آب‌زیرزمینی به‌ویژه در مناطق کارستی به‌کار گرفته می‌شود. بدین‌منظور می‌بایست اطلاعات دقیق زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی براساس نقشه‌ها و تصاویر ماهواره‌ای در محیط GIS به‌صورت لایه‌های معیار مختلف تلفیق شوند. با توجه به پیچیدگی‌ها و عدم‌قطعیت موجود در نرخ‌بندی و وزن‌دهی لایه‌ها، این نقشه‌ها اغلب به‌صورت نقشه‌های رنگی با مقیاس نسبی متغیر از خیلی کم (Very low) تا بسیار زیاد (Very High) ارائه می‌شوند. نقشه‌های پتانسیل آب‌زیرزمینی بر اساس داده‌های کمی به‌دست می‌آیند. یکی از محدودیت‌های مطالعات پتانسیل‌یابی آب‌زیرزمینی عدم‌وجود اعتبارسنجی (Validation) می‌باشد. برطبق نظر دیاز-آلکید و مارتینز-سانتوز (۲۰۱۹) بیش از ۷۰ درصد مطالعات پتانسیل‌یابی آب‌زیرزمینی فاقد سازوکار مستحکم اعتبارسنجی می‌باشند که البته در مطالعات مقدماتی و شناخت به‌ویژه در مناطق فاقد اطلاعات هیدروژئولوژی قابل‌پذیرش می‌باشد (دیاز-آلکید و مارتینز-سانتوز، ۲۰۱۹). به‌ر حال جهت استفاده کاربردی از نتایج این مطالعه در تعیین محل

Res2Dinv، پارامتر اصلی مقاومت ویژه الکتریکی می باشد.

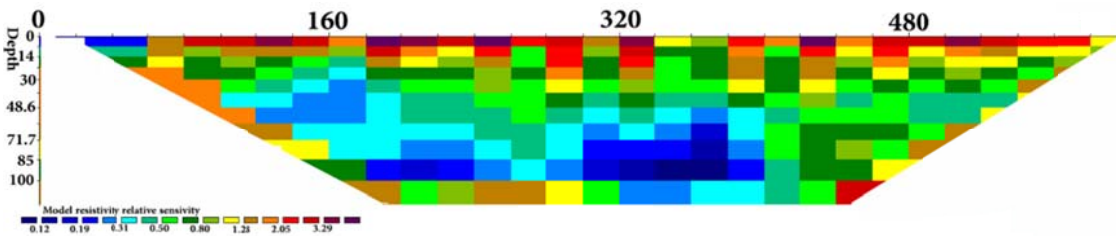
ارتباط بین پارامترهای مدل و پاسخ مدل به صورت مقطع دوبعدی مقاومت ویژه الکتریکی با روش المان محدود برای توموگرافی کارست ایذه مشخص شده است. روش در نظر گرفته شده برای هموارسازی داده ها روش مارکوارت-لونبرگ (Marquardt-Levenberg) می باشد که عملاً بهترین نتیجه را برای ساختارهای فشرده، در محلهایی که عرض و ضخامت کمتر از عمق باشد، به ویژه در نواحی کارستی، به دست می دهد. محیط ساختار زیرسطحی در Res2Dinv توسط شبکه بندی به یک سری سلول های مستطیلی تقسیم می شود که موقعیت سلول ها ثابت بوده و در طی فرآیند وارون سازی منحصرأ مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی و قطبش القایی سلول ها تغییر می نماید. تغییر ناگهانی لیتولوژی یا برخورد به حفره یا غار در آهک توسط تفکیک پذیری سلول ها و با حالت تدریجی تغییر مقاومت ویژه الکتریکی مشخص می شود. مقاطع حساسیت مدل سازی آرایه دو قطبی-دوقطبی در دو سایت ایذه در شکل ۹ نشان داده شده است.

مقاومت ویژه الکتریکی زیاد (بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم متر) بیانگر آهک خشک می باشد که در هنگام وجود آب در آنها مقاومت ویژه الکتریکی (تا حدود ۵۰-۱۵۰ اهم متر) کاهش می یابد. حفرات خشک با بی هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی در پروفیل جاموشی با مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۴۰۰ اهم متر و در سایت غرب ایذه با مقاومت ویژه الکتریکی بسیار زیاد (۱۵۰۰ تا بیش از ۲۰۰۰ اهم متر) در زمینه آهکی قابل تشخیص است. لایه های مارنی و آهک مارنی با نفوذ پذیری کم، می توانند با مقاومت ویژه الکتریکی بسیار کم (کمتر از ۲۰ اهم متر) از لایه های آهک آب دار (حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ اهم متر) تشخیص داده شوند.

یکی از مسائل موجود در توموگرافی ژئوالکتریک و مدل سازی معکوس داده ها، حساسیت مقاطع توموگرافی می باشد. در وارون سازی داده های ژئوالکتریک، در واقع هدف یافتن مقطعی از زمین می باشد که پاسخی مشابه با مقادیر اندازه گیری شده به دست دهد. در واقع مقطع لیتولوژی زمین بر اساس یک مدل ایده آل ریاضی از داده های ژئوالکتریک تبیین می شود. پاسخ مدل، داده های مصنوعی مربوط به پارامترهای انتخابی مدل می باشد که از روابط ریاضی حاکم بر مدل تولید می شوند. در



(الف)



(ب)

شکل ۹. مقاطع حساسیت نسبی مقاطع توموگرافی دوقطبی-دوقطبی (الف) پروفیل P1 در سایت جاموشی (ناودیس نعل اسبی) و (ب) پروفیل P2 در سایت غرب ایذه.

در هردو سایت آرایه حساسیت مدل‌های توموگرافی از سطح به عمق کاهش می‌یابد. حساسیت نسبی مدل‌ها در بخش بالایی مقطع بیشتر می‌باشد و با افزایش عمق از میزان حساسیت مدل کاسته می‌شود. احتمالاً این به دلیل تغییرات شدید مقاومت ویژه سطحی و روند تدریجی تغییر مقاومت در عمق می‌باشد.

##### ۵. نتیجه‌گیری

این مقاله یک روش به‌روز تلفیقی پتانسیل‌یابی آب‌زیرزمینی با استفاده از RS/GIS و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) را برای تعیین محل حفاری چاه آب در آهک آسماری ایذه ارائه می‌دهد. از میان لایه‌های مختلفی که بتوان در پتانسیل آب‌زیرزمینی مناطق کارستی استفاده کرد لایه‌های فاصله از محل تخلیه، اختلاف ارتفاع با محل تخلیه، چگالی تقاطع شکستگی‌ها، چگالی طول شکستگی‌ها، و شیب به ترتیب اهمیت قرار دارند. با توجه به قابلیت استفاده گسترده تکنیک‌های RS/GIS، از این روش‌ها برای استخراج لایه‌های اطلاعاتی مورد نیاز در منطقه ایذه استفاده شد. تراکم بیشتر چگالی تقاطع و طول شکستگی‌ها و شیب بیشتر با اهمیت بیشتر نرخ‌بندی شد. اختلاف ارتفاع کمتر و فاصله کمتر با محل تخلیه با اهمیت بیشتر بر پتانسیل آب‌زیرزمینی نرخ‌بندی شد. براساس نقشه پتانسیل‌یابی آب‌زیرزمینی نهایی، مناطق با پتانسیل خیلی زیاد در یال غربی و جنوب شرق ناودیس در امتداد راندگی آبراک مشخص شدند. تمرکز چاه‌های آهکی آب شرب ایذه در یال جنوب‌غربی نیز مؤید صحت نتایج پتانسیل‌یابی می‌باشند. در ادامه در نقاط با پتانسیل زیاد توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی به‌منظور تعیین محل دقیق حفاری چاه‌های آب در دو پروفیل انجام شد. بر اساس نتایج توموگرافی ژئوالکتریک در آهک آسماری ایذه، مقاومت ویژه الکتریکی زیاد (بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم‌متر) بیانگر آهک خشک می‌باشد که در هنگام وجود آب در آنها مقاومت ویژه الکتریکی (تا حدود ۵۰-۱۵۰ اهم‌متر) کاهش می‌یابد. حفرات خشک با بی‌هنجاری مقاومت ویژه الکتریکی در پروفیل جاموشی با

مقاومت ویژه الکتریکی حدود ۴۰۰ اهم‌متر و در سایت غرب ایذه با مقاومت ویژه الکتریکی بسیار زیاد (۱۵۰۰ تا بیش از ۲۰۰۰ اهم‌متر) در زمینه آهکی قابل تشخیص است. لایه‌های مارنی و آهک مارنی با نفوذپذیری کم، می‌توانند با مقاومت ویژه الکتریکی بسیار کم (کمتر از ۲۰ اهم‌متر) از لایه‌های آهک آب‌دار (حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰ اهم‌متر) تشخیص داده شوند. براساس مقاطع ژئوالکتریک حاصل از تفسیر توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در نهایت دو نقطه در سایت‌های جاموشی و غرب ایذه جهت حفاری چاه آب آهکی پیشنهاد شد که حفاری یک حلقه چاه آب با موفقیت در پاییز ۱۳۹۸ در سایت غرب ایذه انجام شد.

برای دستیابی نتایج مطلوب اکتشافات آب‌زیرزمینی در مناطق کارستی، پتانسیل‌یابی آب‌های زیرزمینی همراه با کارهای میدانی ژئوالکتریک می‌تواند با هزینه کم به کار گرفته شود. کاربرد فنون سنجش از دور و GIS با تلفیق قدرت یادگیری رایانه‌ای همراه با قضاوت کارشناسی در اکتشاف آب‌های زیرزمینی بسیار زیاد است. کیفیت اطمینان از نتایج پتانسیل‌یابی آب‌زیرزمینی کارستی بر اساس تلفیق معیارها، می‌تواند با استفاده از روش‌های اکتشافی ژئوالکتریک مورد واسنجی قرار گیرد.

##### مراجع

- اسدی، ع.، پورکرمانی، م. و قلمکاری، س.، ۱۳۹۸، ارزیابی و اکتشاف منابع آب‌زیرزمینی با شناسایی ساختار لایه‌ای زمین با استفاده از روش زمین الکتریسته در دشت رونیز؛ غرب استهبان، نشریه مهندسی منابع آب، ۴۰، ۳۹-۴۹.
- حفیظی، م.ک. و رادان، م. ی.، ۱۳۸۶، وارون‌سازی ترکیبی داده‌های مقاومت ویژه با آرایه‌های شلومبرژه و دوقطبی- دوقطبی به‌منظور تعیین مسیر درز و شکافهای آب‌دار، مجله فیزیک زمین و فضا، (۲) ۶۹، ۳۳-۷.
- کلانتری، ن.، علیجانی، ا.، علیجانی، ف. و دانشیان، ح.، ۱۳۹۸، بررسی تغییرات متفاوت سطح آب‌زیرزمینی



توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی دوبعدی در اکتشاف آب‌های زیرزمینی برای اعماق زیاد: مطالعه مورد دشت نوق رفسنجان، اولین کنفرانس ملی فناوری‌های معدن‌کاری ایران، یزد.

در آبخوان‌های کارستی ایذه و لالی، شمال خوزستان، با تأکید بر سنجش ازدور، فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۹(۳۵)، ۱-۱۳. ملامحمدی زاده، م. و قربانی، ا.، ۱۳۹۱، کاربرد

- mapping, *Hydrogeology Journal*, doi:10.1007/s10040-019-02001-3.
- Elbeih, S. F., 2015, An overview of integrated remote sensing and GIS for groundwater mapping in Egypt, *Ain Shams Engineering Journal*, 6, 1-15.
- Gupta, G., Patil, J. D., Maiti, S., Erram, V. C., Pawar, N. J., Mahajan, S. H. and Suryawanshi, R. A., 2015, Electrical resistivity imaging for aquifer mapping over Chikotra basin, Kolhapur district, Maharashtra, *Environmental Earth Sciences*, 73(12), 8125-8143.
- Haghizadeh, A., Moghaddam, D. D. and Pourghasemii, H. R., 2017, GIS-based bivariate statistical techniques for groundwater potential analysis (an example of Iran), *Journal of Earth System Sciences*, 126:109. doi.org/10.1007/s12040-017-0888-x.
- Herzfeld, U. C. and Merriam, D. F., 1995, Optimization techniques for integrating spatial data, *Mathematical Geology* 27, 559-586.
- Jahan, C. S., Rahaman, M. F., Arefin, R., Ali, M. S. and Mazumder, Q. H., 2018, Delineation of groundwater potential zones of Atrai-Sib river basin in north-west Bangladesh using remote sensing and GIS technique, *Sustainable Water Resources Management*, doi.org/10.1007/s40899-018-0240-x.
- Jaiswal, R. K., Mukherjee, S., Krishnamurthy, J. and Saxena, R., 2003, Role of remote sensing and GIS techniques for generation of groundwater prospect zones towards rural development: an approach, *International Journal of Remote Sensing*, 24(5), 993-1008.
- Llamas, M. R. and Martínez-Santos, P., 2005, Intensive groundwater use: silent revolution and potential source of social conflict, *Journal of Water Resources Planning Management* 131(5), 337-341.
- Loke, M. H. and Barker, R. D., 1995, Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections, *Geophysics*, 60(6), 1682-1690.
- Lowry Jr., J., H., Miller, H. J. and Hepner, G. F., 1995, A GIS-based sensitivity analysis of community vulnerability to hazardous contaminations on the Mexico/U.S. Border. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61, 1347-1359
- Malczewski, J. 2000, On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches, *Transactions in*
- Abdalla, F., 2012, Mapping of groundwater prospective zones using remote sensing and GIS techniques: a case study from the central Eastern Desert, Egypt, *Journal of African Earth Sciences*, 70, 8-17.
- Abrams, W., Ghoneim, E., Shew, R., LaMaskin, T., Al-Bloushi, K., Hussein, S., AbuBakr, M., Al-Mulla, E., Al-Awar, M. and El-Baz, F., 2018, Delineation of groundwater potential (GWP) in the northern United Arab Emirates and Oman using geospatial technologies in conjunction with simple additive weight (SAW), analytical hierarchy process (AHP), and probabilistic frequency ratio (PFR) techniques, *Journal of Arid Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2018.05.005>.
- Alile, O. M., Ujuanbi, O. and Evbuomwan, I. A., 2010, Geoelectric investigation of groundwater in Obaretin Iyanomon Locality, Edostate, Nigeria, *Geology and Mining Research*, 3(1), 13-20.
- Bashe, B. B., 2017, Groundwater potential mapping using remote sensing and GIS in Rift Valley Lakes Basin, Weito Sub Basin, Ethiopia, *International Journal of Science and Engineering Researches*, 8(2), 43-51.
- Berry, J. K., 1993, Cartographic modeling: The analytical capabilities of GIS, In: Goodchild M, Parks B and Steyaert L (eds) *Environmental Modeling with GIS*, Oxford, Oxford University Press, 58-74.
- Bharti, R., 2016, The vertical electrical sounding (VES) procedure to delineate potential groundwater aquifer in Guna Madhya Pradesh, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 24, 253-256.
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R. and Bosch, F. P., 2011, Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview, *Hydrogeology Journal*, 19(6), 1169-1180.
- Dahlin, T., 1996, 2D resistivity surveying for environmental and engineering application, *First Break*, 14, 275-283.
- Dasho, O. A., Ariyibi, E. A., Akinluyi, F. O., Awoyemi, M. O. and Adebayo A. S., 2017, Application of satellite remote sensing to groundwater potential modeling in Ejigbo area, southwestern Nigeria, *Modeling Earth System Environment*, 3, 615-633.
- Díaz-Alcaide, S. and Martínez-Santos, P., 2019, Review: Advances in groundwater potential

- GIS, 4(1), 5–22.
- Manap, M. A., Sulaiman, W. N. A., Ramli, M. F., Pradhan, B. and Surip, N., 2013, A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the upper Langat Basin, Malaysia, *Arabian Journal of Geoscience*, 6, 1621–1637.
- Mandal, U., Sahoo, S., Munusamy, S. B., Dhar, A., Panda, S. N., Kar, A. and Mishra, P. K., 2016, Delineation of groundwater potential zones of coastal Groundwater Basin using multi-criteria decision making technique, *Water Resources Management*, 30, 4293–4310.
- Martín-Loeches, M., Reyes-López, J., Ramírez-Hernández, J., Temiño-Velan, J. and Martínez-Santos, P., 2018, Comparison of RS/GIS analysis with classic mapping approaches for siting low-yield boreholes for hand pumps in crystalline terrains: an application to rural communities of the Caimbambo province, Angola, *Journal of African Earth Sciences*, 138, 22–31.
- Metwaly, M., Elawadi, E., Moustafal, S. R., Al Fouzan, F., Mogren, S. and Al Arifi, N., 2012, Groundwater exploration using geoelectrical resistivity technique at Al-Quwy'ya area Central Saudi Arabia, *International Journal of the Physical Sciences*, 7(2), 317–326.
- Mohammadi, Z., Alijani, F. and Rangzan, K., 2014, DEFLOGIC: a method for assessment of groundwater potential in karst terrains: Gurpi anticline, southwest Iran, *Arabian Journal of Geoscience*, 7, 3639–3655.
- Mohammadi-Behzad, H. R., Charchi, A., Kalantari, N., Nejad, A. M. and Vardanjani, H. K., 2018, Delineation of groundwater potential zones using remote sensing (RS), geographical information system (GIS) and analytic hierarchy process (AHP) techniques: a case study in the Leylia–Keynow watershed, southwest of Iran, *Carbonates and Evaporites*, <https://doi.org/10.1007/s13146-018-0420-7>.
- Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N. and Voudouris, K., 2015, A GIS/remote sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece, *Journal of Hydrology*, 525, 197–208.
- Oldenburg, D. W. and Li, Y. G., 1999, Estimating depth of investigation in DC resistivity and IP surveys, *Geophysics*, 64, 403–416.
- Panahi, M. R., Mousavi, S. M. and Rahimzadegan, M., 2017, Delineation of groundwater potential zones using remote sensing, GIS and AHP technique in Tehran–Karaj plain, Iran, *Environmental Earth Science* 76(79.), <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7126-3>.
- Parks, S., Byrnes, J., Abdelsalam, M. G., Dávila, D. A. L., Atekwana, E. A. and Atya, M. A., 2017, Assessing groundwater accessibility in the Kharga Basin, Egypt: a remote sensing approach, *Journal of African Earth Sciences*, 136, 272–281.
- Patra, S., Mishra, P. and Mahapatra, S. C., 2018, Delineation of groundwater potential zone for sustainable development: a case study from Ganga alluvial plain covering Hooghly district of India using remote sensing, geographic information system and analytic hierarchy process, *Journal of Clean Production*, 172, 2485–2502.
- Prasad, R. K., Mondal, N. C., Banerjee, P., Nandakumar, M. V. and Singh, V. S., 2008, Deciphering potential groundwater zone in hard rock through the application of GIS, *Environmental Geology*, 55(3), 467–475.
- Prins, C., Thuro, K. and Krautblatter, M., 2018, The effectiveness of an inverse Wenner-Schlumberger array for geoelectrical karst reconnaissance, on the Swabian Alb High Plain, New Line Wendlingen–Ulm, Southwestern Germany, *IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings*, San Francisco, California, 3, 115–122.
- Rolia, E. and Sutjningsih, D., 2018, Application of geoelectric method for groundwater exploration from surface (A literature study), In: *AIP Conference Proceedings*, doi:10.1063/1.5042874.
- 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, *Rudarsko Geološko Naftni Zbornik*, 19(1), 47–56.
- Sander, P., Chesley, M. M. and Minor, T. B., 1996, Groundwater assessment using RS and GIS in a rural groundwater project in Ghana: lessons learned, *Hydrogeology Journal*, 4, 40–49.
- Saribudaka, M. and Hawkins, A., 2019, Hydrogeophysical characterization of the Haby Crossing fault, San Antonio, Texas, USA, *Journal of Applied Geophysics*, doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.01.009.
- Zhou, W., Beck, B. F. and Stephenson, J. B., 2000, Reliability of dipole-dipole electrical resistivity tomography for defining depth to bedrock in covered karst terranes, *Environmental Geology*, 39, 760–766.

## Exploration of Karst Groundwater using Electrical Resistivity Tomography and Remote Sensing, North East Khuzestan

Mirzaei, L.<sup>1</sup>, Hafizi, M. K.<sup>2\*</sup> and Riahi, M. A.<sup>2</sup>

1. M.Sc. Student, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 8 Jan 2020, Accepted: 9 June 2020)

### Summary

Groundwater is the largest available freshwater resource in the world. Aquifers provide drinking water to at least 50% of the global population, and account for 43% of all water used for irrigation. Groundwater resources can be expected to be increasingly relied upon, in the near future, as a consequence of rapid population growth and global environmental change. Cost-effective and efficient techniques for groundwater exploration, especially in karstic regions, can be used to as an appropriate tool to recognition of karst hydrogeological potential.

This paper provides a method based on the RS/GIS for the recognition of high groundwater potential areas and geoelectrical tomography for precise determination of the water well drilling location. Groundwater mapping has been defined as a tool for systematic development and planning of water resources (Elbeih, 2015). Hydrogeological maps provide spatially distributed information about aquifers, including their geological, hydrogeological and hydrochemical characteristics .

In this study, a hydro-tectonic model include effective layers on karst hydrogeology applied for the recognition of the high groundwater potential in karstic areas of Izeh, northeast Khuzestan. The combination of remote sensing and GIS used to overlay the major layers, i.e. distance from discharge point, elevation difference, fracture density, slope, and fracture intersection density. Generally, high altitude regions have a low groundwater potential and more groundwater can be found at lower altitudes; therefore, the altitude map generated from the DEM represents difference to known elevation of the discharge points. The areas away from the discharge point generally have lower probability of groundwater occurrence. The distance analysis in GIS was used to determine the map of distance from discharge point. Slope angle can be considered as a surrogate of surface runoff velocity and vertical percolation which affects recharge processes. However, in this study, the slope angle was considered as a positive factors on groundwater potential in the karstic areas. Geological fractures can have a significant effect on storage and flow of groundwater reservoirs. Especially in areas with shallow bedrock fractures, water infiltration can be enhanced due to increased porosity and hydraulic conductivity (Rao et al. 2001). The fracture locations in the study area were determined from the remote sensing techniques. The parameter are weighted from 1 to 5 based on their importance in karst hydrogeology.

For the exact determination of the water well drilling locations in high groundwater potential areas, the geoelectrical operation is done in two profiles using Dipole-Dipole array followed by electrical resistivity tomography. Over 20 boreholes have been drilled in karstic aquifer of Izeh for supplying the residence with drinking water. Despite the common use of geology for improving the siting of boreholes, some of the drilled holes does not deliver enough water to be equipped. The ERT method is used to determine the electrical resistivity distribution of the subsurface. Resistivity of the limestone rocks is linked to several parameters including type of limestone, cavity, water content, marl layer, electrical conductivity of water and the layer thickness. Because of different respective electrical resistivities in karstic areas, the ERT method provides useful results on the geometry of bedrock and aquifer. In an ERT survey, after inversion of the field data, the method provided a two-dimensional (2D) resistivity model of a section of the underground. Field data processing was performed with RES2DINV software. The parameters used in the inversion were the same for both of profiles, and topography was taken to normalize profile elevations to the actual ground surface. A robust algorithm was chosen for the inversion, because it provides more net changes in resistivity between different parts of the section. However, care must be taken when studying the final sections, because the geometry and boundaries of the structures are not always clearly identified and may be influenced by changes in resistivity due to rocks outside the plane of the section. The interpreted sections must be understood as an indication of the approximate location of the lithological boundaries, and not as its true geometry. The interpretation of the resistivity sections for all the ERT profiles has been drawn with the help of the correlation between the resistivity and the lithology along with the hydrogeologic data, and taking into account the continuity of the resistivity values at the crossing of the profiles. Overall, a very complicated structure is interpreted with the presence of dry and wet limestones, cavities, and marly layers interbedded with carbonates. Finally, two locations were proposed for drilling of water wells in the Izeh karstic area .

The drilling of a high yield water well (discharge of 61 L/S) and the low drawdown (0.48 m) in the karst of west Izeh at autumn 2019 indicates the effectiveness of the integration of the applied exploration methods. This work shows the power of geoelectrical method in poorly understood and tectonically complex areas in addition to the RS/GIS groundwater potential mapping to evaluate karst hydrogeology.

**Keywords:** Groundwater Exploration, Karst, Electrical Resistivity Tomography, Remote Sensing, Khuzestan.

\* Corresponding author:

hafizi@ut.ac.ir