

بررسی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیکی آبخوان دشت قلعه‌تل، شمال شرق خوزستان، با استفاده از تجسس عمیق ژئوالکتریک

فرشاد علی‌جانی^{۱*}، میثم حاجی‌زاده^۲، حمیدرضا ناصری^۳، لیلا میرزایی^۴

۱- استادیار گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۲- دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۳- استاد گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران

۴- کارشناس ارشد مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

* نویسنده مسئول: falijani2000@yahoo.co.uk

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۸/۰۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۴

چکیده

استخراج آب از منابع آب زیرزمینی طی دهه‌های اخیر رو به افزایش است. دشت قلعه‌تل یکی از دشت‌های بحرانی ایران، واقع در استان خوزستان می‌باشد که برای رفع نیازهای آبی منطقه لزوم مکان‌یابی مناسب آب زیرزمینی در این دشت احساس می‌گردد. همچنین، با وجود افت کلی سطح آب زیرزمینی در سال‌های اخیر در گستره دشت، افت سطح آب در بعضی از چاه‌های مشاهده‌ای در امتداد خاصی، کمتر از سایر مناطق دشت می‌باشد. بر این اساس لزوم انجام مطالعات ژئوالکتریک عمیق در دشت قلعه‌تل به منظور مسیریابی سازندها در زیر آبرفت و تعیین ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیکی دشت قلعه‌تل احساس گردید. بدین منظور استفاده تلفیقی از تحلیل هیدروژئولوژی و مطالعه ژئوالکتریک در دشت قلعه‌تل انجام شد که طی آن ۸۶ سونداژ الکتریکی عمودی (VES) با آرایه شلومبرژه در شش پروفیل داده‌برداری گردید. تفسیر یک‌بعدی تمامی سونداژهای ژئوالکتریک با نرم‌افزار IPI2WIN به منظور تعیین جنس و ضخامت لایه‌های زیر سطحی انجام شد و توموگرافی ژئوالکتریک زیر سطحی نیز با نرم‌افزار RES2DINV صورت گرفت. به منظور ارائه تصویر مناسب از زیر زمین، نقشه‌های توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) تهیه شدند. عمق نفوذ بالغ بر ۴۵۰ متر در مقاطع توموگرافی به خوبی توانسته است سنگ بستر دشت قلعه‌تل را مشخص کند. نتایج نشان داد، سازندهای آهک آسماری، کنگلومرای بختیاری و مارن پابده سنگ بستر دشت قلعه‌تل را تشکیل می‌دهند. سنگ بستر نواری شکل آهک آسماری در عمق زیاد، با پتانسیل بالای آب زیرزمینی در طول دشت، علت ناهمگنی هیدروژئولوژیکی در دشت قلعه‌تل می‌باشد، که باعث شده است تا چاه‌هایی به فاصله بسیار کم از یکدیگر، رفتارهای هیدروژئولوژیکی متفاوتی نشان دهند. واژه‌های کلیدی: سنگ بستر، ژئوالکتریک، ناهنجاری هیدروژئولوژی، توموگرافی، قلعه‌تل.

مقدمه

مطالعات لازم در زمینه پتانسیل‌یابی کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی و همچنین برنامه‌ریزی دقیق و اصولی جهت بهره‌برداری بهینه از منابع آب موجود در هر منطقه اعمال شود. در حال حاضر بخش عمده آب مورد نیاز شرب شهرهای شمال شرق استان خوزستان از جمله قلعه‌تل، از منابع آب‌های زیرزمینی تأمین می‌گردد. وقوع خشکسالی‌های اخیر، رشد جمعیت و به تبع آن افزایش تقاضای آب، تأمین آب شرب

استخراج آب از منابع آب زیرزمینی جهت مصارف شرب در طی چند دهه اخیر افزایش بسیاری یافته است. در کشور ایران که در زمره مناطق خشک و نیمه خشک قرار دارد، استفاده بهینه از منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی از اهمیت بسزایی برخوردار است. لذا همزمان با رشد جمعیت، صنایع و کشاورزی در کشور و نیاز مبرم آن‌ها به آب، لازم است پیش از انجام بهره‌برداری،

گرفته است. به طوری که تصویرسازی یا توموگرافی مقاومت ویژه به طور فزاینده‌ای در اکتشافات ژئوالکتریکی مناطق آب در مناطق آبرفتی و کارستی به کار گرفته می‌شود (خالقی و همکاران، ۱۳۹۷؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ پرینس و همکاران، ۲۰۱۸؛ هسو و همکاران، ۲۰۱۰؛ مارتینز-مورنو و همکاران، ۲۰۱۴؛ ردهونیا و همکاران، ۲۰۱۶؛ کارداری و دیدونو، ۲۰۱۷؛ ساریبوداک و هاوکینز، ۲۰۱۹). الیل و همکاران (۲۰۱۰) از روش سونداژ الکتریکی عمودی (VES) برای بررسی پتانسیل وجود آب زیرزمینی در نیجریه استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که روش مقاومت ویژه الکتریکی، علاوه بر تعیین مناطق دارای آب زیرزمینی، توانایی تشخیص عمق سنگ بستر و تفکیک ساختارهای زمین‌شناسی مختلف را نیز دارا است. بهارتری (۲۰۱۶) با بررسی زون‌های گسلی خردشده و درز و شکاف‌های سنگ‌ها در عمق، با استفاده از روش ژئوالکتریک، پتانسیل این زون‌ها را جهت ذخیره آب زیرزمینی تخمین زد و وجود آبخوان مستعد و مناسب در برداشت آب زیرزمینی را مشخص نمود. گائوتام و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مقاطع الکتریکی حاصل از معکوس‌سازی داده‌های مقاومت ویژه و مقایسه آن‌ها با هم، عمق سنگ کف، عمق برخورد به آب و ضخامت آبخوان را مشخص کردند. پرینس و همکاران (۲۰۱۸) کارایی آرایه ونر-شلومبرژه معکوس را در شناسایی ژئوالکتریکی منطقه کارستی به شدت ناهنجار در جنوب غرب آلمان مورد بررسی قرار دادند. مقاطع دوبعدی ERT (با آرایه ونر-شلومبرژه معکوس و فاصله الکترودی ۲ متر) نهشته‌های رسی و لومی رسنا (با مقاومت ویژه الکترودی کمتر از ۶۰ اهم‌متر) را از سنگ آهک خردشده و یا هوازده (با مقاومت ویژه الکترودی ۶۰ تا ۲۴۰ اهم‌متر) به خوبی تفکیک نمودند. ساریبوداک و هاوکینز (۲۰۱۹) مطالعات هیدروژئوفیزیکی تصاویر دوبعدی را با توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، پتانسیل خودزا و EM در منطقه کارستی ادوارد در تگزاس آمریکا انجام دادند.

در این تحقیق منطقه گسلی با مقدار مقاومت ویژه کم (به دلیل

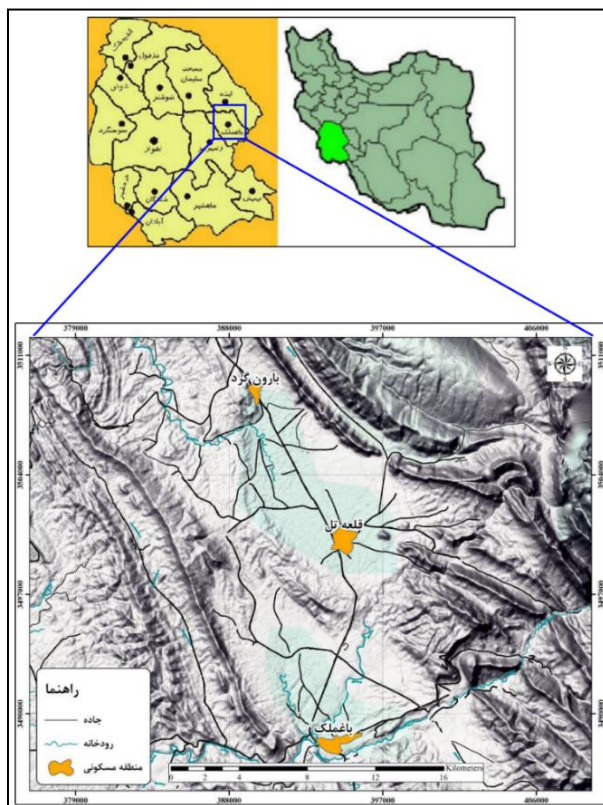
شهرستان قلعه‌تل را با مشکل مواجه نموده است. دشت قلعه‌تل یکی از دشت‌های بحرانی استان خوزستان از لحاظ منابع آب زیرزمینی آبرفتی می‌باشد که برای رفع نیازهای آبی منطقه لزوم مکان‌یابی مناسب آب زیرزمینی در این دشت احساس می‌گردد. علاوه بر این، با وجود افت کلی سطح آب زیرزمینی در سال‌های اخیر در گستره دشت، افت سطح آب در بعضی از چاه‌های مشاهده‌ای در امتداد خاصی، کمتر از سایر مناطق دشت می‌باشد و در این امتداد چاه‌هایی (که کف شکنی شده‌اند) با آبدهی زیاد وجود دارند که پس از رخداد خشکسالی‌های اخیر تغییرات آبدهی چندانی نداشته‌اند. با این حال در مجاورت چاه‌های پرآب، برخی چاه‌ها نیز وجود دارد که تا عمق ۲۰۰ متری نیز حفاری شده ولی آبدهی آن‌ها تغییر چندانی نیافته است. بر این اساس لزوم انجام مطالعات ژئوالکتریک عمیق (تا عمق بیش از ۴۰۰ متر) در دشت قلعه‌تل به منظور مسیریابی سازندها در زیر آبرفت و تعیین ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیکی دشت قلعه‌تل احساس می‌شود. نواحی کارستی معمولاً همراه با ساختارهای زمین‌شناسی پیچیده‌ای بوده که نیازمند تکنیک‌های اکتشافی دقیق می‌باشند. به دو دلیل روش‌های ژئوفیزیک نقش مهمی را در ساخت مدل‌های دوبعدی و سه‌بعدی زیر سطحی دارا می‌باشند؛ اولاً بر اساس نتایج ژئوفیزیک، موقعیت بهینه و تعداد گمانه‌های اکتشافی مورد نیاز تأمین می‌شود که می‌تواند صرفه‌جویی مهمی در هزینه‌های اکتشافی به عمل آورد. ثانیاً روش‌های ژئوفیزیک می‌توانند پوشش پیوسته‌ای از اطلاعات زیرسطحی ناحیه مورد بررسی به دست آورند، که می‌تواند داده‌های حاصل از گمانه‌ها را جهت تهیه مدل‌های زمین‌شناسی با مناطق اطراف پیوند دهند. سازندهای کارستی به دلیل آنکه منابع آب زیرزمینی مهمی را در زاگرس تشکیل می‌دهند، بسیار مورد توجه می‌باشند. این سازندها دارای ساختارهای زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی پیچیده‌ای هستند. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های بسیاری در سامانه‌های کامپیوتری اکتشاف داده‌ها و نرم‌افزارهای وارون‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی ژئوفیزیکی صورت

مذکور قرار گرفته است، در ۱۵۰ کیلومتری شمال شرق اهواز واقع شده است. محدوده مورد مطالعه بین ۳۸۸۰۰۰ تا ۴۰۰۰۰۰ طول جغرافیایی و ۳۴۹۶۰۰۰ تا ۳۵۰۸۰۰۰ عرض جغرافیایی واقع گردیده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. محدوده مورد مطالعه در تقسیم‌بندی زمین‌شناسی ایران، جزئی از زاگرس چین‌خورده محسوب می‌شود، این زون شامل تاقدیس‌ها و ناودیس‌هایی با پهنای زیاد تا کم، طویل و تا حدودی مرتفع است، روند عمومی این منطقه تقریباً شمال‌غربی - جنوب‌شرقی است. سازندهای زمین‌شناسی منطقه شامل واحدهای سنگی دوران دوم و سوم و رسوبات کواترنری هستند. آهک‌های نازک‌لایه ایلام-سروک قدیمی‌ترین سنگ‌های منطقه هستند که بر روی آن‌ها سازندهای مارنی پابده و گورپی، سازند آهکی آسماری، لایه‌های گچ و مارن سازند گچساران، کنگلومرای بختیاری و رسوبات آبرفتی به‌ترتیب قدمت قرار می‌گیرند (آقانباتی، ۱۳۸۳). شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

رسی بودن زون برشی گسل) تشخیص داده شد. مطالعات اکتشافی انجام‌شده در دشت قلعه‌تل تاکنون نتوانسته است پاسخ مناسبی را درباره ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیک موجود در آبخوان آبرفتی ارائه دهد که علت اصلی آن عدم شناسایی دقیق وضعیت کارست زیرسطحی سازند آسماری به عنوان سنگ بستر آبرفت می‌باشد. یکی از روش‌های مناسب برای رسیدن به پاسخ ابهامات موجود در دشت قلعه‌تل، تجسس ژئوالکتریک سوندینگ و پروفایلینگ با آرایه شلومبرژه با طول فرستنده جریان ۱۸۰۰ متر (عمق نفوذ حدود ۴۵۰ متر) و بازبینی مجدد هیدروژئولوژی دشت بر اساس یافته‌های جدید اکتشافی به منظور شناسایی دلیل ناهنجاری‌های موجود و اکتشاف منابع آب کارستی جدید می‌باشد که در این تحقیق به آن پرداخته خواهد شد.

موقعیت و زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، در جنوب و غرب شهر ایذه در شمال شرق استان خوزستان و در حد فاصل شهرستان‌های باغملک و ایذه واقع شده است. شهرستان قلعه‌تل که در جنوب شرق دشت



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه.

مواد و روش‌ها

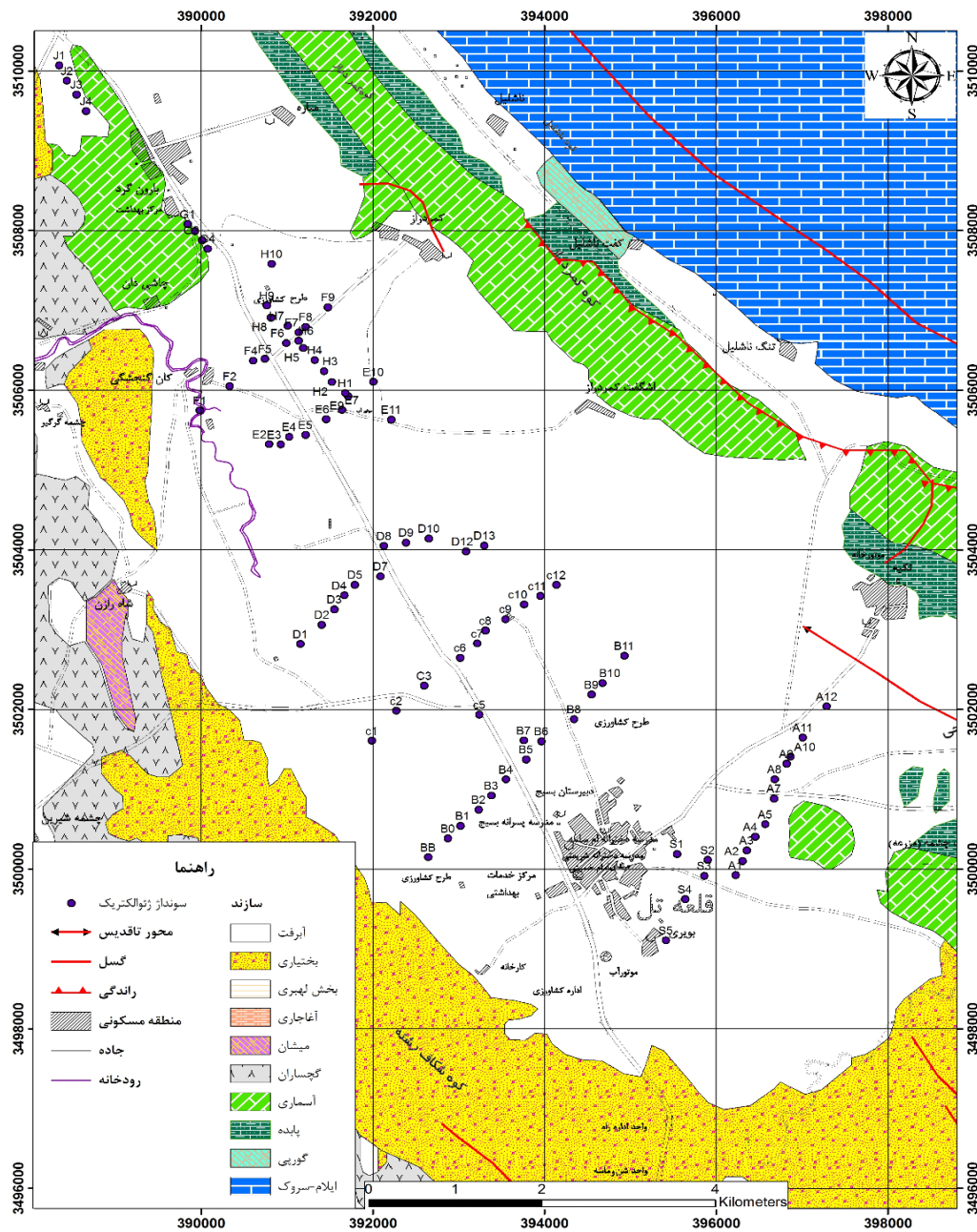
همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد هدف اصلی این تحقیق، مسیریابی زیرسطحی آهک آسماری با استفاده از روش ژئوالکتریکی می باشد. برای رسیدن به این هدف پس از شناسایی منطقه، داده هایی از قبیل نقشه‌های توپوگرافی و زمین‌شناسی، گزارش‌های زمین‌شناسی، تکتونیکی و ژئومورفولوژی دشت قلعه‌تل جمع آوری و مورد بررسی اولیه قرار گرفت. آمار و اطلاعات مربوط به آب‌های زیرزمینی منطقه شامل اطلاعات مربوط به چاه‌های حفر شده در محدوده مورد مطالعه، داده‌های سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای، نقشه موقعیت منابع آب (چاه، قنات و چشمه)، آمار و مشخصات هیدروژئولوژیک منابع آب منطقه قلعه‌تل از سازمان آب و برق خوزستان جمع‌آوری شد.

داده‌برداری ژئوالکتریک به روش مقاومت ویژه با آرایه شلومبرژه توسط نویسندگان در سال ۱۳۹۶ انجام گردید. در این مطالعه، تعداد ۸۶ سونداژ الکتریکی عمودی (VES) با طول فرستنده جریان (AB) از ۱۰۰۰ تا ۱۸۰۰ متر، در شش پروفیل به‌کار برده شد. موقعیت پروفیل‌ها و سونداژهای به‌کار رفته‌شده در شکل ۲ نمایش داده شده است. متوسط تعداد داده مقاومت الکتریکی در هر سونداژ برابر ۱۶ قرائت بود. در این تحقیق تفسیرهای یک بعدی داده‌های مقاومت ویژه توسط نرم‌افزار IPI2WIN و تفسیرهای دوبعدی با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV صورت گرفته است. نرم‌افزار IPI2WIN به‌منظور تفسیر یک‌بعدی داده‌های حاصل از یک خط برداشت، در روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و پلاریزاسیون القایی طراحی شده است. هدف در IPI2WIN و نرم‌افزارهای مشابه، تفکیک رخساره‌های مختلف زمین‌شناسی با استفاده از عملیات معکوس‌سازی است. به عبارت دیگر طراحان این نرم‌افزار، همه عوامل مؤثر بر مقاومت ویژه‌ی زیر سطح زمین را در قالب یک رابطه ریاضی، بیان نموده‌اند و مدلی از مقاومت ویژه زیرسطحی تهیه کرده‌اند. در عملیات معکوس‌سازی صورت پذیرفته در IPI2WIN پارامترهای مدل

یادشده آن‌قدر تغییر داده می‌شوند تا مجموعه‌ای از مقادیر مقاومت ویژه به دست آید که بیشترین شباهت را به داده‌های مشاهده‌ای (اندازه‌گیری شده در صحرا) داشته باشند. به منظور ارائه تصویر مناسب از زیر زمین، می‌بایست شبه مقطع داده‌های مقاومت الکتریکی با استفاده از تکنیک معکوس‌سازی مبتنی بر سلول وارون گردند (لوک و بارکر، ۱۹۹۶). این بررسی‌ها معمولاً توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) نامیده می‌شوند. توموگرافی مقاومت الکتریکی به عنوان ابزاری ارزشمند در مطالعات زیرسطحی شناخته می‌شود (ژو و همکاران، ۱۹۹۹). اصول روش توموگرافی الکتریکی شامل تقسیم‌بندی سطح دو بعدی به تعدادی سلول به‌منظور تعیین مقاومت درون هر سلول می‌باشد به‌طوری که بتوانند پاسخ مدل را به‌خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت دهند. فنون توموگرافی مقاومت الکتریکی دوبعدی (ERT) به‌طور فزاینده‌ای در دو دهه گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در حال حاضر نیز یکی از موفق‌ترین ابزارها در بررسی‌های زمین‌شناسی زیرسطحی می‌باشند. در یک تجسس دوبعدی ERT، داده‌های میدانی در طول یک مقطع به صورت شبه مقاطع مقاومت الکتریکی ظاهری جمع‌آوری می‌شوند و توزیع مقاومت الکتریکی واقعی زیرسطحی به‌وسیله فنون معکوس‌سازی به‌دست می‌آید. تصویربرداری ژئوفیزیکی با توموگرافی مقاومت الکتریکی (ERT) دوبعدی در شش پروفیل در دشت قلعه‌تل انجام شد. مدل‌های ERT به منظور تشخیص سنگ بستر آبرفتی مورد تفسیر قرار گرفتند. توانایی تصویر پردازی دوبعدی مقاومت الکتریکی برای تشخیص سازند آهکی آسماری، بخش آبدار آن و رسوبات آبرفتی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

داده‌های اندازه‌گیری‌شده پروفیل‌های دوبعدی مرتب‌شده و به شکل شبه مقاطع مقاومت الکترونی منحنی‌بندی شدند. شبه مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری فقط دید عمومی از توزیع مقاومت زیرسطحی به‌دست می‌دهد و به دلیل هموارشدگی داده ها، تغییرات شدید مقاومت الکتریکی سنگ‌ها و تأثیر آرایه

الکترودی بر اندازه‌گیری مقادیر مقاومت، نمی‌تواند تصویر آرایه‌های هندسی الکترودی مختلف، شبه مقاطع متفاوتی به واضحی از زیر زمین به‌دست دهند. این بدان معنی است که دست می‌دهند.



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت سونداژهای ژئوالکتریک

جهت ارائه بهتر و واقعی‌تر توزیع مقاومت الکتریکی زیرسطحی، الکتریکی معکوس با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV انجام می‌بایست معکوس‌سازی شبه مقاطع انجام شود. پس از عملیات صحرایی ژئوالکتریک، داده‌های میدانی مقاومت الکتریکی به رایانه انتقال داده شده و به فرمت قابل قبول برای نرم‌افزارهای توموگرافی الکتریکی مرتب گردیدند. مدل‌سازی مقاومت

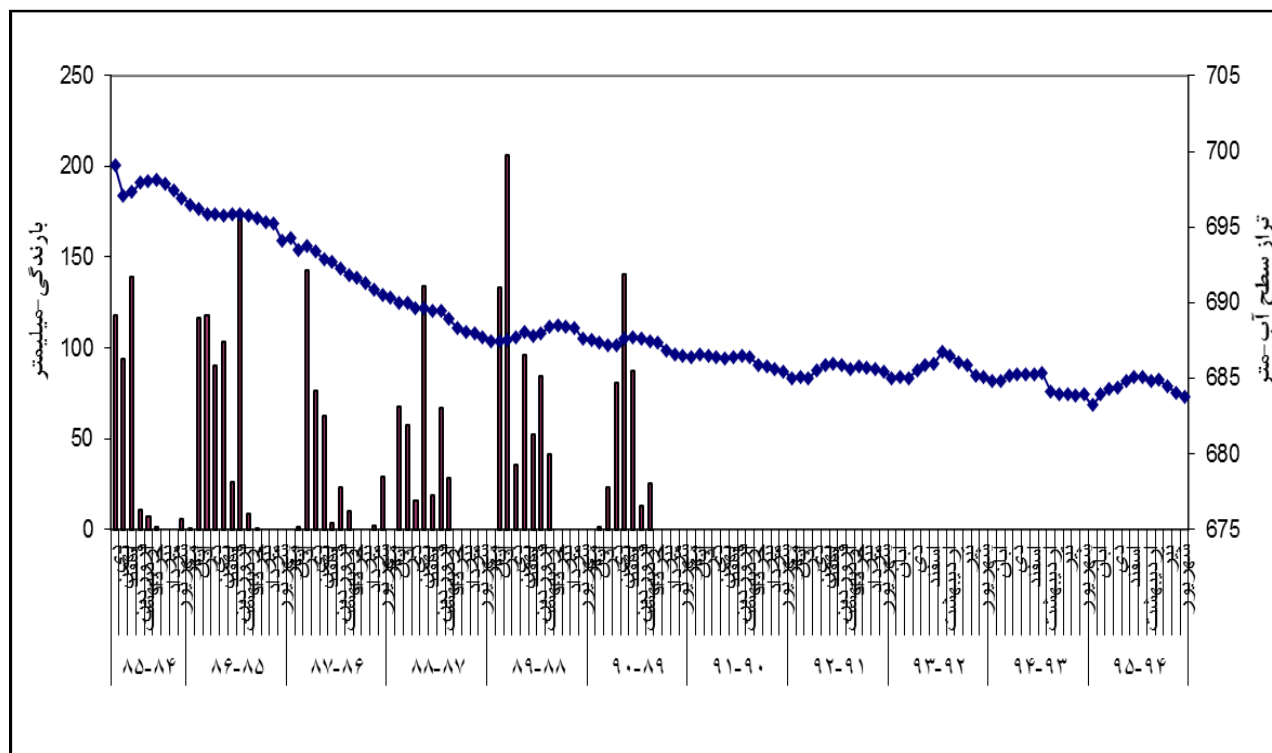
الکتریکی معکوس با استفاده از نرم‌افزار RES2DINV انجام گردید. خروجی به صورت مقاطع عرضی در مدل دوبعدی به‌دست آمد. جهت ارزیابی تغییرات سطح آب و حجم لایه آبدار باید از داده‌های سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای استفاده کرد. بدین منظور از هیدروگراف معرف آبخوان و نقشه هم‌تراز آب زیرزمینی دشت

سال‌های ۸۵ تا ۸۹ سطح آب زیرزمینی حدود ۱۲ متر افت داشته که به‌طور میانگین افتی برابر ۳ متر در سال را نشان می‌دهد. در مقابل، در بازه زمانی سال‌های ۸۹ تا ۹۵، هیدروگراف یک روند تقریباً ثابت و متعادلی را طی کرده است و طی یک بازه ۷ ساله، مجموع افتی برابر با ۲ متر پدید آمده که به‌طور میانگین افتی برابر با ۰/۳ متر در سال را نشان می‌دهد. در طول کل دوره، خردادماه ۸۵ بالاترین و مهرماه ۹۴ پایین‌ترین سطح آب را دارد. شکل ۴ نقشه هم‌سطح آب زیرزمینی دشت قلعه‌تل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، تراز سطح آب از ۸۲۳ تا ۸۶۶ متر متغیر می‌باشد. مقاطع ورودی جریان زیرزمینی در بخش‌های شمال‌غرب و غرب آبخوان (سازندهای آسماری و بختیاری) و مقاطع خروجی جریان زیرزمینی در جنوب و جنوب‌شرق آبخوان (سازندهای بختیاری و پایده) قرار دارند. به‌طور کلی جهت جریان آب‌های زیرزمینی از بخش‌های شمالی و غربی به سمت بخش‌های جنوبی و شرقی می‌باشد.

قلعه‌تل استفاده شد. در انتها بر اساس یافته‌های ژئوالکتریک، زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی، نقشه لیتولوژی سنگ بستر آبخوان آبرفتی ارائه و دلایل ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیک مورد بحث قرار گرفت.

نتایج و بحث

در این تحقیق به‌منظور بررسی ناهنجاری‌های هیدروژئولوژیکی و ردیابی آب زیرزمینی در دشت قلعه‌تل، از داده‌های سطح آب چاه مشاهده‌ای به همراه مطالعات ژئوالکتریک استفاده شده است. جهت ارزیابی تغییرات سطح آب و حجم لایه آبدار باید از داده‌های سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای استفاده کرد. در محدوده قلعه‌تل تعداد ۱۵ چاه مشاهده‌ای موجود می‌باشد که با استفاده از آن‌ها هیدروگراف معرف آبخوان و نقشه هم‌سطح آب زیرزمینی دشت قلعه‌تل تهیه شد. شکل ۳ هیدروگراف معرف آب زیرزمینی دشت قلعه‌تل را نشان می‌دهد. با توجه به هیدروگراف، روند تغییرات سطح آب دشت به‌صورت نزولی می‌باشد. در بازه زمانی

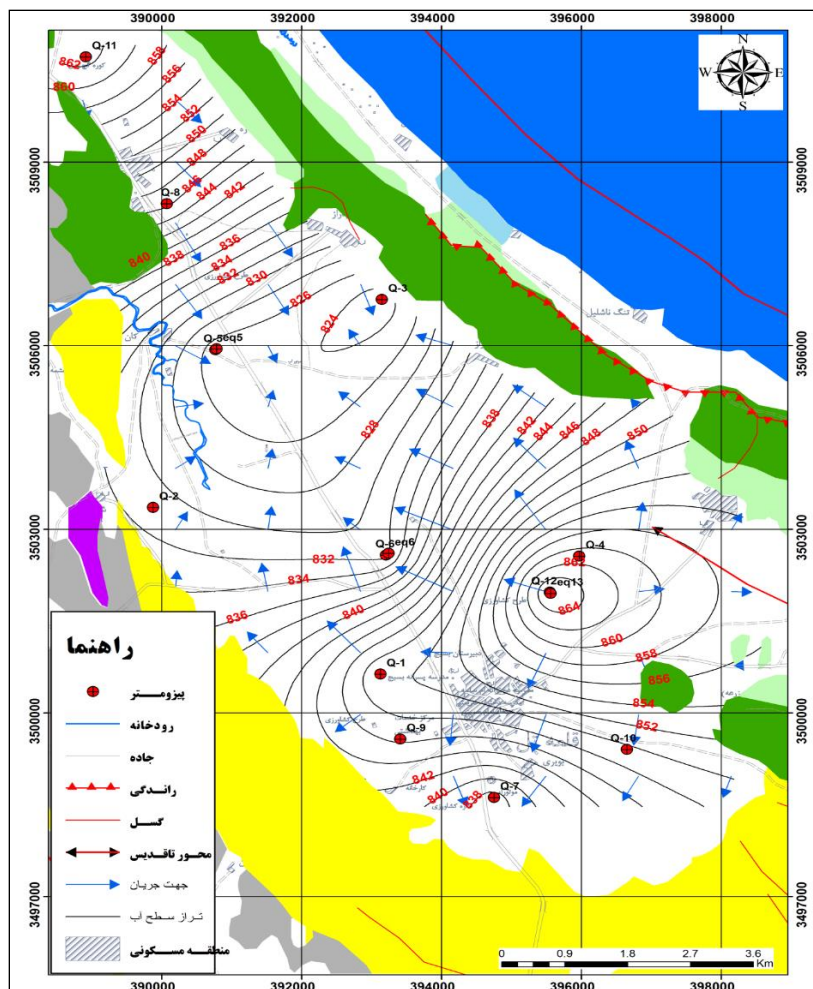


شکل ۳- هیدروگراف معرف آبخوان قلعه تل (برای سال‌های ۸۴-۹۵).

کمردراز در سازند آسماری که تا زیر دشت قلعه تل کشیده شده است تبیین گردد. از آنجا که طبق نقشه همپتانسیل آب زیرزمینی دشت قلعه تل (شکل ۴)، جهت جریان عمومی آب‌های زیرزمینی از بخش‌های شمالی و غربی به سمت بخش‌های جنوبی و شرقی دشت می‌باشد، هرگونه تغییر در آبدهی چشمه هلايجان به عنوان محل تخلیه اصلی آبخوان کمردراز، می‌تواند بر حجم و کیفیت آب بخش‌های جنوبی تأثیر بگذارد. آب چشمه هلايجان دارای کیفیت مطلوب با هدایت الکتریکی بین ۴۵۰ تا ۵۰۰ میکرو موهس بر سانتی‌متر می‌باشد. دبی مجموع سه دهنه چشمه هلايجان در سال‌های با بارش میانگین بین ۲۰۰ تا ۱۲۰۰ لیتر در ثانیه متغیر بوده است ولی رخداد دو سال خشک‌سالی مداوم در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۷ باعث خشک شدن و مرگ چشمه برای اولین بار در سالیان اخیر در مرداد ۸۷ شده است. رودخانه هلايجان از چشمه‌های هلايجان سرچشمه گرفته و به سمت شمال غرب ادامه یافته و رودخانه مرغاب را تشکیل می‌دهد. هر چند که چشمه هلايجان از تابستان ۱۳۸۷ خشک شده است ولی رودخانه پایین دست، آبرفت دشت هلايجان (که عمده تغذیه زیرزمینی آن توسط آبخوان کارستی کمردراز انجام می‌شود) را زهکشی می‌نماید. در طی بارش‌های پاییزه و زمستانه سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ چشمه هلايجان مجدد آبدار شده ولی دوباره در خرداد ماه همان سال خشک شده است. پس از رخداد بارش‌های کمی بیش از میانگین در پاییز و زمستان ۱۳۹۷، دوباره چشمه هلايجان آبدار شده است، بطوریکه آبدهی آن در بهمن ۹۷ به حدود ۲۰۰ لیتر بر ثانیه رسیده است.

از نقطه نظر هیدروژئولوژی، منطقه مورد مطالعه دارای دو نوع آبخوان آبرفتی و کارستی می‌باشد. در تمامی گستره دشت قلعه تل، آبخوان آبرفتی در بخش بالایی وجود داشته و در اعماق یا به سنگ بستر نفوذناپذیر می‌رسد و یا به آبخوان کارستی تغییر پیدا می‌کند. در محدوده مورد مطالعه، آبخوان کارستی کمردراز در سنگ آهک سازند آسماری (الیگومیوسن) تشکیل گردیده و از زیر توسط سازند نفوذناپذیر پابده محدود شده است. در یال شمال شرقی تاقدیس کمردراز رخنمون سازند گچساران وجود ندارد ولی در یال جنوب غربی، سازند آسماری در بعضی نقاط توسط سازند گچساران پوشیده شده است. حفاری سه حلقه چاه آهکی توسط سازمان آب و برق خوزستان در اطراف دماغه شمال غربی تاقدیس کمردراز نمایانگر وجود آبخوان کارستی با قابلیت انتقال و ذخیره زیاد می‌باشد. سازند آسماری در تاقدیس کمردراز از جنوب شرقی به زیر آبرفت دشت بارانگرد فرو می‌رود و در زیر دشت قلعه تل امتداد یافته تا در شمال قلعه تل در کوه هفت چشمه دوباره رخنمون می‌یابد که در جنوب شرق دشت قلعه تل نیز دو حلقه چاه آهکی با آبدهی زیاد حفاری شده است. یال شمال شرقی تاقدیس در دشت بارانگرد ارتفاع پیدا نموده و حالت برگشته ناودیسی می‌یابد. ناودیس معلق مذکور از دو طرف توسط سازند پابده محصور شده است و عملاً در تنگ کرد رخنمون آهک مذکور نمایانگر خاتمه آبخوان می‌باشد.

هرچند مطالعات ژئوفیزیکی انجام‌شده در این مطالعه، در محدوده جنوب غربی تاقدیس کمردراز و در دشت قلعه تل صورت گرفته است، اما لازم به ذکر است که محل تخلیه اصلی آبخوان کارستی



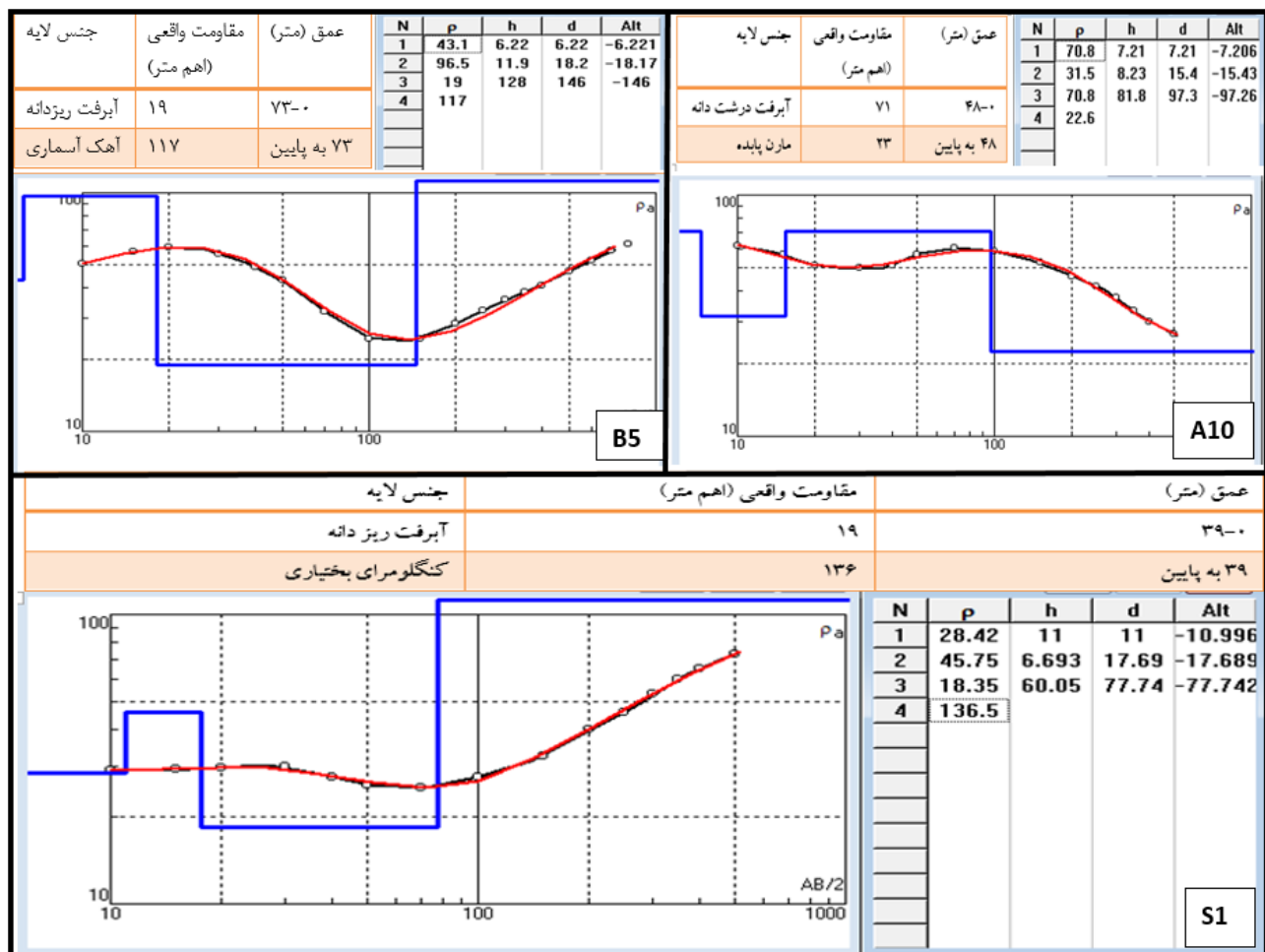
شکل ۴- جهت جریان آب زیرزمینی در نقشه هم‌پتانسیل آب زیرزمینی دشت قلعه تل (فروردین ۱۳۹۵).

سونداز منتخب که جنس سنگ بسترهای آهکی، مارنی و کنگلومرای را به خوبی نشان می‌دهند ارائه شده است (شکل ۵). موقعیت این سونداژها در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در سونداز A10 سنگ بستر مارنی از عمق ۴۸ متر، در سونداز B5 سنگ بستر آهک آسماری از عمق ۷۳ متر و در سونداز S1 سنگ بستر کنگلومرای بختیاری از عمق ۳۹ متر به ترتیب با مقاومت‌های ۲۳، ۱۱۷ و ۱۳۶ شروع می‌شود؛ بر اساس تفسیر سایر سونداژها، مشاهده شد که سنگ بستر تمامی سونداژها یکی از واحدهای آهک آسماری، کنگلومرای بختیاری و یا مارن پابده به ترتیب با میانگین مقاومت های واقعی ۱۰۰، ۱۴۰ و ۱۰ اهم‌متر می‌باشد که عمق شروع سنگ بستر در بازه ۳۰ تا ۸۰ متر در طول دشت قلعه‌تل متغیر

با تلفیق یافته‌های زمین‌شناسی، هیدروژئولوژی، و ژئوالکتریک، می‌توان در مورد جنس و عمق برخورد به سنگ بستر آبرفت دشت قلعه‌تل و وضعیت آب زیرزمینی در سنگ بستر به جمع بندی رسید. پس از انجام عملیات ژئوالکتریک صحرایی، مدل‌سازی معکوس سونداژهای داده‌برداری شده به صورت یک بعدی با استفاده از نرم‌افزار IPI2 انجام گرفت. در این عمل منحنی‌های مقاومت ویژه الکتریکی در مقابل عمق نفوذ برای سونداژهای مختلف تهیه شده و مورد تفسیر قرار گرفته است. پس از ورود داده‌ها به نرم‌افزار IPI2 برای هر سونداژ اقدام به مدل‌سازی معکوس برای تعیین ضخامت و مقاومت الکتریکی واقعی لایه‌ها گردید. نتایج مربوط به ضخامت و مقاومت ویژه لایه‌ها برای سونداژهای مختلف بررسی شدند. در این بخش سه

های A, B, C, D, E و F که با استفاده از نرم افزار RES2DINV تهیه شده، نشان داده شده است. پروفیل های مذکور، به ترتیب دارای ۹، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸ و ۷ سونداژ می باشند که موقعیت هر کدام در شکل ۲ نشان داده شده است. دامنه تغییرات مقاومت الکتریکی از ۵ تا بیش از ۳۰۰ اهم متر در دشت قلعه تل متفاوت است و عمق برخورد به سنگ بستر در کل دشت، در بازه ۳۰ تا ۸۰ متر تغییر می کند. مطابق این شکل ها، طیف رنگ های آبی تا بنفش نشان دهنده افزایش مقاومت سازندهای زیرین بوده که اطلاعات استخراج شده از این نقشه ها، نتایج به دست آمده از تفسیر یک بعدی سونداژها را که قبلا ذکر شد، تایید می کند.

است. با استفاده از اطلاعات به دست آمده از تفسیرهای ژئوالکتریک که با لوگ سنگ شناسی چاه های بهره برداری موجود منطقه نیز تا حد امکان صحت سنجی شدند و بر اساس عمق سنگ کف به دست آمده به صورت جداگانه برای هر سونداژ، نقشه توزیع عمق سنگ کف آبرفت دشت قلعه تل به صورت رده بندی شده بر اساس عمق تهیه گردید (شکل ۶). طبق این شکل، به طور کلی عمق سنگ کف آبرفت از کم تر از ۱۰ متر تا حدود ۲۰۰ متر در دشت قلعه تل متغیر است. به طور کلی از جنوب شرق به سمت شمال غرب دشت، ضخامت آبرفت افزایش می یابد. روند مشخصی در تغییرات ضخامت آبرفت در پروفیل های مختلف به چشم نمی خورد. در شکل ۷ شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده، محاسباتی و مدل توموگرافی معکوس پروفیل



شکل ۵- مدل الکتریکی سونداژهای A10، B5 و S1 و جدول های پارامتر آنها

گردید این تحقیقات جهت روشن شدن موضوع مورد ابهام انجام شود، وجود چاه‌هایی با آبدی بالا در روندی جنوب شرقی-شمال غربی از قلعه‌تل تا بارانگرد می‌باشد. عمده این چاه‌های پر آب پس از کف شکنی تا اعماق بیش از ۱۵۰ متر، در عمق بین ۹۰ تا ۱۲۰ متری به لایه‌ای سفیدرنگ و متراکم برخورد می‌نمودند که توسط ناظرین حفاری این لایه به عنوان گراول آبدار و نه سنگ بستر آهکی معرفی شده است.

جمع‌بندی کلی این تحقیق با نقشه سازندهای سنگ بستر (تفسیر شده بر اساس مطالعات ژئوالکتریک) که چاه‌های پر آب عمیق (تا عمق بیش از ۱۵۰ متر) بر روی آن مشخص گردیده در شکل ۹ نشان داده شده است. چاه‌های پر آب مذکور احتمالاً به آهک آسماری برخورد نموده‌اند و از آب کارست بهره‌برداری می‌نمایند.

عدم تطابق نتایج بررسی‌های ژئوالکتریک و افت‌های متفاوت در چاه‌های مشاهده‌ای با سنگ بستر یکسان در ارتباط با جنس متفاوت لایه‌های آبخوان آبرفتی و ضخامت متفاوت آبرفت می‌باشد. به‌طور مثال در چاه‌های مشاهده‌ای با سنگ بستر پابده باید افت زیادی را متحمل شده باشند ولی با توجه به لیتولوژی و جنس آبرفت در مناطق با آبخوان درشت‌دانه افت کمتر و در مناطق با آبرفت ریزدانه افت بیشتر بوده است. در بعضی مناطق مرزی سنگ بستر آهک آسماری و پابده و در منطقه سنگ کف پابده چاه‌های پر آب نیز دیده می‌شود که این آبدی زیاد عمدتاً به دلیل لایه‌های با آبدی بالا در خرده‌سنگ‌های آهکی باقی مانده در آبرفت می‌باشد.

نتیجه‌گیری

مجموعه نقشه‌های توموگرافی و تفسیرهای ژئوالکتریک برای پروفیل‌های سونداژزنی در منطقه مورد مطالعه حاکی از وجود سه نوع سنگ بستر در دشت قلعه‌تل است که شامل سنگ بستر آهک آسماری، کنگلومرای بختیاری و سازند پابده می‌باشد، که اگر با نقشه چینه‌شناسی بستر آبخوان آبرفتی قلعه‌تل تلفیق شود،

با استفاده از مقاومت‌هایی که برای لایه‌های مختلف آبخوان در هر سونداژ و بر اساس تفسیر یک‌بعدی ژئوالکتریک به دست آمد، نقشه پراکندگی مقاومت آبخوان به‌صورت رده‌بندی شده تهیه شد (شکل ۸). بر اساس این نقشه میزان مقاومت آبخوان کم‌تر از ۲۰ اهم‌متر (لایه ریز دانه سیلتی) تا بیش از ۶۰ اهم‌متر (لایه درشت دانه گراولی) متغیر است. به‌طور کلی در پروفیل‌های داده‌برداری شده از سمت جنوب غرب به سمت شمال شرق میزان مقاومت آبرفت افزایش می‌یابد. بهترین آبدی‌ها در آبرفت دشت قلعه‌تل مربوط به دامنه مقاومت بین ۳۰-۷۰ اهم‌متر می‌باشد. مقاومت‌های کمتر از ۳۰ اهم‌متر به دلیل دانه‌ریز بودن رسوبات و مقاومت بیش از ۷۰ اهم‌متر واسطه متراکم شدن رسوبات درشت‌دانه مبین آبدی کم آبخوان آبرفتی می‌باشد.

چینه‌شناسی بستر آبخوان آبرفتی قلعه‌تل که بر اساس تفسیر سونداژهای ژئوالکتریک به‌دست آمده است نشان‌دهنده آن است که در قسمت میانی پروفیل‌های برداشت شده جنس سنگ بستر آبرفت آهک آسماری با پتانسیل آب زیرزمینی بالا می‌باشد. در عمق مورد تجسس ژئوالکتریک (حداکثر ۴۵۰ متر) در تعدادی از سونداژها جنس سنگ بستر دوم نیز مشخص گردیده است. سنگ بستر دوم در ۶ سونداژی که به کنگلومرای بختیاری برخورد نموده‌اند، آهک آسماری می‌باشد. این بدان معنی است که سازند گچساران یا به‌طور کامل فرسایش یافته و یا در دره قدیمه حاصل از عملکرد گسل پی‌سنگی ایذه-هندیجان کنگلومرای بختیاری نهشته شده است و یا آن که سازند گچساران با ضخامت کم (احتمالاً کم‌تر از ۵۰ متر) در بین بختیاری و آسماری وجود دارد که به دلیل رزولیشن عمیق کمتر سونداژهای ژئوالکتریک با آرایه شلومبرژه عملاً سازند گچساران قابل تشخیص نمی‌باشد.

با استفاده از اطلاعات عمق و جنس سنگ کف که از تفسیرهای ژئوالکتریک حاصل شدند، سونداژهایی که سنگ کف یکسانی را نشان می‌دادند، به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده و نقشه زیرسطحی جنس سنگ کف تهیه گردید (شکل ۹). ناهنجاری هیدروژئولوژیکی مهم مشخص شده در دشت قلعه‌تل که باعث

دلیل دانه ریز بودن رسوبات و مقاومت بیش از ۷۰ اهم متر به واسطه متراکم شدن رسوبات درشت دانه مبین آبدهی کم آبخوان آبرفتی می باشد.

نتایج مشخص نمود که توموگرافی ژئوالکتریک دوبعدی عمیق با آرایه شلومبرژه، سازندهای آهک آسماری، کنگلومرای بختیاری، و مارن پابده سنگ بستر دشت را در نواری از قلعه تل تا بارانگرد تشکیل می دهد. آرایه شلومبرژه به واسطه عمق نفوذ زیاد و حساسیت جانبی اندک برای هدف این تحقیق کاملاً مناسب بوده است.

نتایج تفسیرها و توموگرام های ژئوالکتریک با استفاده از داده های چاه های آب با آبدهی زیاد که در سازندهای سنگ بستر کف شکنی شده و آبدهی زیادی دارند مورد صحت سنجی قرار گرفته است. جهت کف شکنی چاه های کشاورزی در آینده می توان از نتایج ژئوالکتریک این تحقیق استفاده نمود تا از هزینه های بیهوده حفاری جلوگیری شود.

همچنین لازم است مطالعات بیلان آبخوان آبرفتی قلعه تل با تفکیک چاه هایی که کف شکنی شده و احتمالاً از کارست آب برداشت می کنند بازنگری شود. با توجه به مشکلات چندین ساله جهت تأمین آب شرب روستاهای شمال قلعه تل، می توان با حفاری عمیق در سنگ بستر آهکی در سونداژهایی که سنگ بستر به آهک آسماری برخورد می کند، آب این روستاها را تأمین کرد.

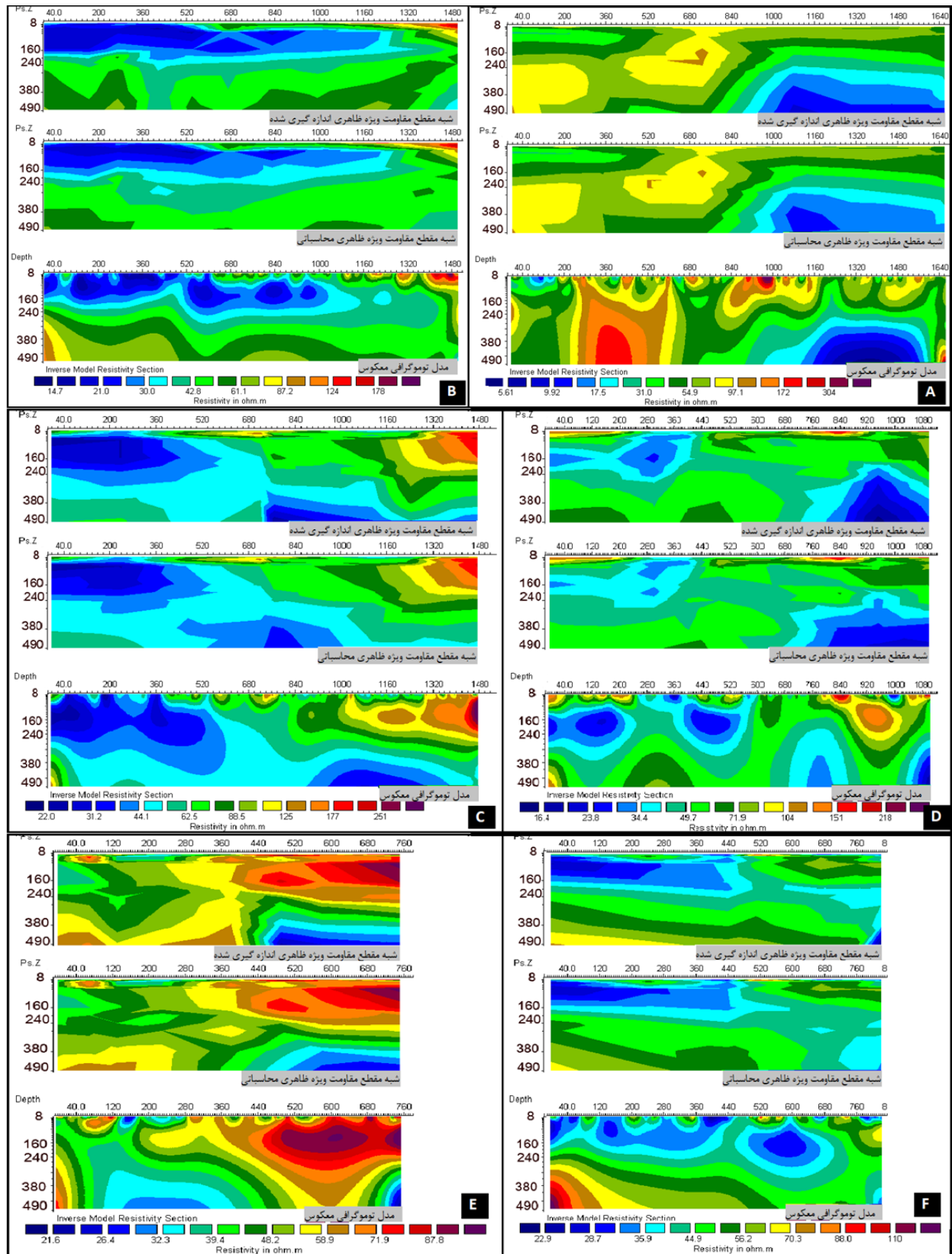
نشان دهنده آن است که در قسمت میانی پروفیل های ژئوالکتریک برداشت شده در دشت، در یک محدوده نواری شکل، جنس سنگ بستر آبرفت، آهک آسماری با پتانسیل آب زیرزمینی بالا می باشد که باعث شده است تا چاه های حفر شده در این ناحیه به آهک آسماری برخورد کرده و آبدهی بالایی داشته باشند و به دلیل خاصیت ناهمگنی آبخوان های کارستی، به فاصله جانبی کوتاهی از این سنگ بستر نواری شکل که در امتداد شمال غربی-جنوب شرقی کشیده شده است، آبدهی چاه ها به مقدار زیادی کاهش پیدا کند.

در نتیجه، ترسیم و تصویر سنگ بستر نواری شکل آهکی سازند آسماری در دشت قلعه تل به راحتی می تواند وجود ناهنجاری هیدروژئولوژیکی این دشت را توجیه کند. در صورتی که با بررسی هیدروگراف چاه های مشاهده ای و نقشه هم پتانسیل آب زیرزمینی دشت قلعه تل عملاً ناهنجاری هیدروژئولوژیکی که بتوان آن را به رفتار متفاوت سازندهای سنگ بستر نسبت داد مشخص نمی باشد.

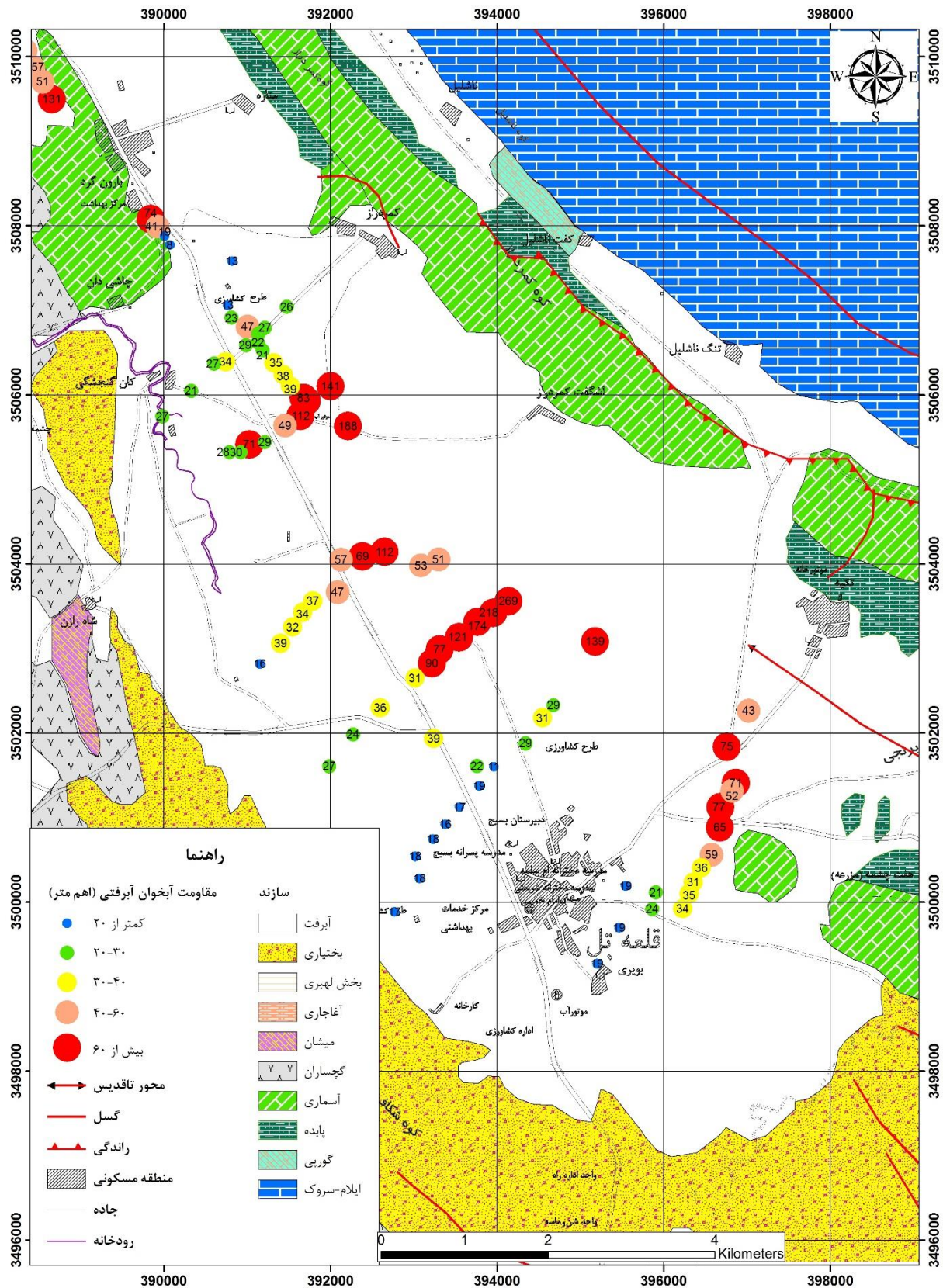
بیشترین افت چاه های مشاهده ای مربوط به چاه های با سنگ بستر پابده می باشد. نوسانات ماهانه در هیدروگراف چاه های مشاهده ای که سنگ بستر آن ها کنگلومرای بختیاری است به نسبت بیشتر می باشد.

بهترین آبدهی ها در آبرفت دشت قلعه تل مربوط به دامنه مقاومت بین ۷۰-۳۰ اهم متر می باشد. مقاومت های کمتر از ۲۰ اهم متر به

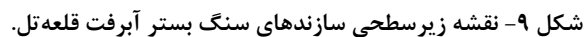




شکل ۷- شبه مقاطع مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده ، محاسباتی و مدل توموگرافی معکوس پروفیل های A, B, C, D, E و F.



شکل ۸- نقشه پراکندگی مقاومت ویژه آبخوان آبرفتی قلعه‌تل.



منابع

احمدی، ف.، علیجانی، ف.، ناصری، ح.ر. ۱۳۹۶. کاربرد روش‌های
سنجش ازدور و ژئوالکتریک در اکتشاف آب‌های زیرزمینی
مناطق کارستی جنوب کوهدشت، لرستان، هیدروژئولوژی،
دوره ۲، شماره ۲، صفحات ۲۹-۴۳.

این مقاله از پروژه تحقیقاتی با عنوان "مسیریابی زیرسطحی آهک‌های آسماری و ایلام-سروک از بارانگرد تا قلعه‌تل با استفاده از تجسس عمیق ژئوالکتریک با هدف یافتن آب زیرزمینی کارستی" به مشاوره معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شهید بهشتی و با حمایت و پشتیبانی مالی دفتر پژوهش‌های کاربردی سازمان آب و برق خوزستان استخراج شده است.

- A., López-Chicano, M., Martín-Rosales, W. 2014. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain). *Journal of Applied Geophysics*, 107, 149-162.
- Prins, C., Thuro, K., 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.
- Prins, C., Thuro, K., Krautblatter, M., Schulz, R. 2018. Testing the effectiveness of an inverse Wenner-Schlumberger array for geoelectrical karst void reconnaissance, on the Swabian Alb high plain, new line Wendlingen-Ulm, southwestern Germany. *Engineering Geology*, 249, 71-76.
- Redhaouia, B., Ilondo, B.O., Ountsche, B., Gabtni, H., Sami, K., Bédir, M. 2016. Electrical resistivity tomography (ERT) applied to karst carbonate aquifers: case study from Amdoun, Northwestern Tunisia. *Pure and Applied Geophysics*, 173, 4, 1289-1303.
- Saribudaka, M., 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., Stephenson, B.J. 1999. Defining the bedrock/overburden boundary in covered karst terranes using dipole-dipole electrical resistivity tomography. In: Powers M.H., Ibrahim A.B., Cramer L. (eds): *Proc Symp Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, Oakland, California, 14-18 March 1999. *Environmental and Engineering Geophysical Society*, Colorado, 331-339.
- خالقی، ف.، حیدریان، م.ح.، فاتح دیزجی، ع. ۱۳۹۷. مکان یابی مناطق مستعد آب زیرزمینی در واحدهای آذرآواری با روش ژئوالکتریک (مطالعه موردی منطقه کال واقع در جنوب دماوند). *هیدروژئولوژی*، دوره ۳، شماره ۲، صفحات ۸۲-۹۴.
- Alile, O.M., Ujuanbi, O., Evbuomwan, I.A. 2010. Geoelectric investigation of groundwater in Obaretin Iyanomon Locality, Edostate, Nigeria. *Geology and Mining Research*, 3(1), 13-20.
- Bharti, R. 2016. The vertical electrical sounding (VES) procedure to delineate potential groundwater aquifer in Guna Madhya Pradesh. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*, 24(2), 253-256.
- Cardarelli, E., De Donno, G. 2017. Multidimensional electrical resistivity survey for bedrock detection at the Rieti Plain (Central Italy). *Journal of Applied Geophysics*, 141, 77-87.
- Gautam, G., Patil, J.D., Maiti, S., Erran, V.C., Pawar, N.J., Mahajan, S.H., Suryawanshi, R.A. 2014. Electrical resistivity imaging for aquifer mapping over Chikotra basin, Kolhapur district, Maharashtra. *Environ Earth Science*, DOI 10.1007/s12665-014-39715.
- Hsu, H-L., Yanites, B. J., Chen, C., Chen, Y.G. 2010. Bedrock detection using 2D electrical resistivity imaging along the Peikang River, central Taiwan. *Geomorphology*, 114(3), 406-414.
- Loke, M.H., Barker, R.D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Martínez-Moreno, F.J., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Teixido, T., Ruano, P., Peña, J.A., González-Castillo, L., Ruiz-Constá,