

## مطالعات ژئوتکنیکی در گستره سد خوانسار به روش رادار نفوذی به زمین تقویت شده

هاشم رنجی رودپشتی<sup>۱\*</sup>، علیرضا علیاری<sup>۲</sup>، فرشاد جمالی<sup>۳</sup>، علیرضا لیاقت<sup>۴</sup> و لئونید کرینیسکی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup>کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی، شرکت مهندسی مشاور زمین‌آبی، تهران، ایران  
<sup>۳</sup>دانش آموخته دکتری زلزله‌شناسی، شرکت مهندسی مشاور زمین‌آبی، تهران، ایران  
<sup>۴</sup>کارشناس ارشد رسوب‌شناسی، شرکت مهندسی مشاور زمین‌آبی، تهران، ایران  
<sup>۵</sup>کارشناس ارشد زمین‌شناسی، شرکت روسی VNIISMI

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۰۵)

### چکیده

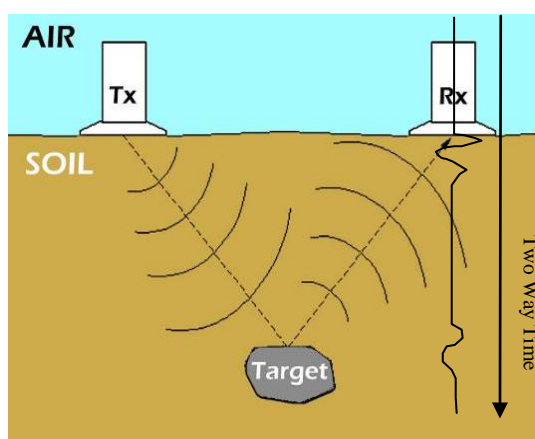
روش رادار نفوذی به‌طور گسترده‌ای در به تصویر کشیدن اهداف زیرسطحی کم‌عمق استفاده شده است و کاربردهای فراوانی در علوم مختلف دارد. این روش در به تصویر کشیدن گسل‌ها و پراکنش شکاف‌ها در درون سنگ (زمین‌شناسی مهندسی) موفقیت فراوانی را نشان داده است. یکی از اهداف مقاله حاضر، نشان دادن توانایی روش رادار نفوذی به زمین در انجام مطالعات ژئوتکنیکی، به ویژه در محدوده‌های رسانای سدها، به‌منظور ارزیابی و تعیین خصوصیات ژئوفیزیکی آنها است. مقاله حاضر دربرگیرنده نتایج حاصل از مطالعات ژئوتکنیکی به روش رادار نفوذی به زمین در محدوده سد خوانسار می‌باشد. یکی از مشکلات موجود در این سد وجود فضاهای خالی و مجراهای احتمالی گذر آب و درزه و شکستگی‌های احتمالی می‌باشد. وارد شدن آب به این حفره‌ها، به مرور زمان می‌تواند استحکام سد را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین، شناسایی این فضاهای خالی و مجراها، برای مقاوم‌سازی و ترمیم کف سد خوانسار بسیار حائز اهمیت است. بدین‌منظور برای تعیین محل قرارگیری خط سنگ بستر و خط هسته رسی با آبرفت، تعیین سطح آب زیرزمینی، تعیین فضاهای خالی و مجراهای احتمالی گذر آب در سنگ، آبرفت و بدنه سد از روش رادار نفوذی به زمین استفاده شده است. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های روش رادار نفوذی، قدرت نفوذ کم در محیط‌های با رسانندگی بالا مانند رس‌ها و خاک‌های شور و آبدار است. بنابراین، هدف دیگر این مطالعه، به تصویر کشیدن توانایی نسل متفاوتی از سامانه رادار نفوذی به زمین برای شناسایی اهداف عمیق در محیط‌های رسانا (مانند مطالعات ژئوتکنیکی حاضر) می‌باشد. در این مقاله همچنین سعی شده است با تشریح خصوصیات اصلی این نسل از رادار نفوذی به زمین، راه برای مطالعات آینده در این زمینه و انجام تحقیقات بیشتر هموار گردد. برخلاف سامانه‌های رادار نفوذی معمول، این نوع از رادار نفوذی قادر به نفوذ و ثبت داده تا عمق بسیار زیاد (۲۵۰ متر) می‌باشد. این سامانه با ثبت مستقیم امواج رادار (بدون تبدیل استروبوسکوپی) و به‌کارگیری دایپل‌های دارای مقاومت، قادر به نفوذ زیاد، حتی در زمین‌های رسی و شور، بوده که برای سامانه‌های معمول رادار نفوذی غیرممکن می‌باشد. در این مطالعه از آنتن با بسامد ۲۵ هرتز و فرستنده با توان ۱۰۰۰۰ وات برای مطالعات زیر سطحی تا عمق بیش از ۱۰۰ متر استفاده شده است. همچنین، ۹۹۱۶ متر پروفیل رادار نفوذی در محدوده مطالعاتی برداشت گردیده و با وجود رسانندگی بالای زمین در محل سد، داده‌های بسیار مناسبی تا عمق حدود ۱۰۰ متر دریافت شده است. بر پایه تحلیل داده‌های برداشت شده و تلفیق آنها با اطلاعات زمین‌شناختی، بی‌هنجاری‌هایی در برخی از نواحی سد بر روی پروفیل‌ها شناسایی شده‌اند. تفکیک لایه‌های زمین‌شناختی تا عمق حدود ۱۰۰ متر نشان‌دهنده کارایی این سامانه حتی در زمین‌های رسانا است. همچنین در تفسیرها و مدل‌های ارائه شده از پروفیل‌های رادار نفوذی، عمق سنگ بستر، بی‌هنجاری مربوط به ناپکناختی ساختاری ناشی از وجود یک کانال قدیمی مدفون، بی‌هنجاری موجود در اطراف کالورت سد و نفوذ آب به آن و گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در اطراف سد، تفکیک شده است.

**واژه‌های کلیدی:** تقویت شده، رادار نفوذی، ژئوتکنیک، سد خوانسار، لوزا

## ۱. مقدمه

همکاران، ۲۰۰۹؛ رویین و هابارد، ۲۰۰۵)، اکتشاف آبخوان در سنگ‌های سخت (تراواسوس و همکاران، ۲۰۰۴) و آبرفت (هاراری، ۱۹۹۶؛ کاردیمونا و همکاران، ۱۹۹۸) و شناسایی اجسام مدفون مانند لوله و قنات (النوامی و همکاران، ۲۰۰۰) از کاربردهای گسترده این روش هستند. روش رادار نفوذی همچنین در به تصویر کشیدن گسل‌ها و پراکنش شکاف‌ها در درون سنگ (زمین‌شناسی مهندسی) موفقیت فراوانی را نشان داده است (کریستی و همکاران، ۲۰۰۹؛ دنیس و همکاران، ۲۰۰۹؛ پوسلی و همکاران، ۲۰۱۰؛ مک کلیمونت و همکاران، ۲۰۱۰). نفوذ امواج رادار به داخل زمین، وابستگی زیادی به محتوای آب مواد زیرسطحی دارد (دیویس و آنان، ۱۹۸۹؛ تاپ و همکاران، ۱۹۸۰).

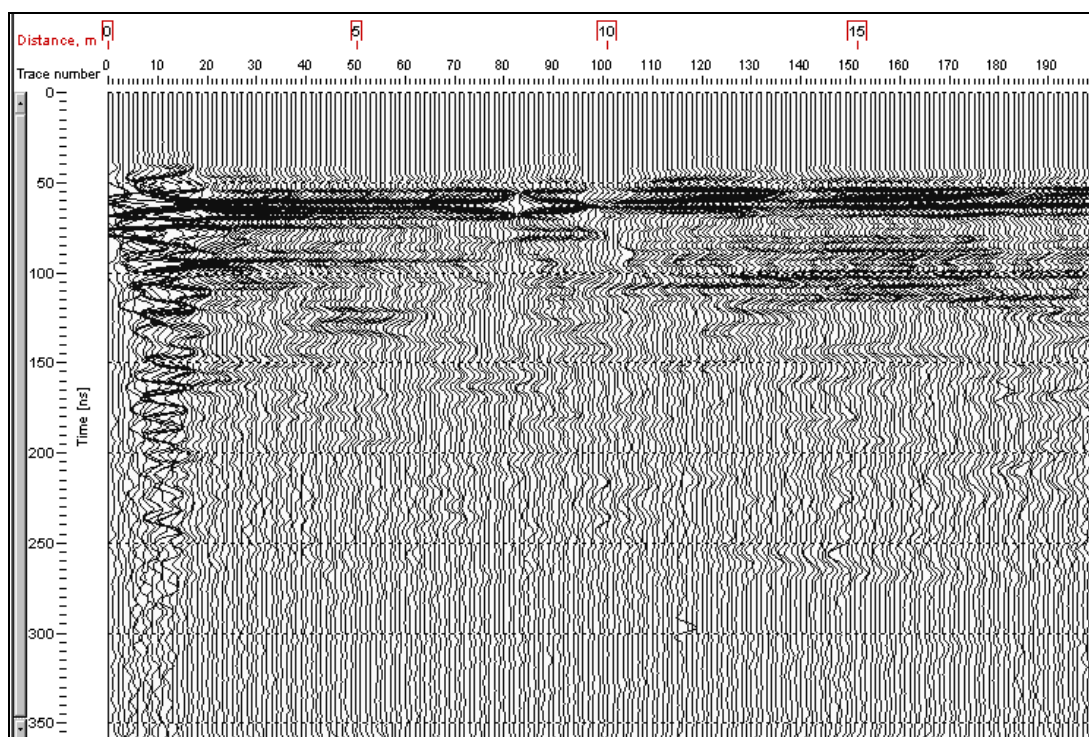
این روش عملکرد بسیار خوبی در زمین‌های دانه‌درشت مانند ماسه و گراول دارد، اما در خاک‌های دانه‌ریز مانند رس، مارن و سیلت و همچنین آب‌های زیرزمینی شور نفوذ آن به شدت کاهش یافته و موج آن میرا می‌شود (رویین و هابارد، ۲۰۰۵). مهم‌ترین محدودیت این روش توان نفوذ کم در محیط‌های با رسانندگی بالا مانند رس‌ها و خاک‌های شور و آبدار می‌باشد (تورسن، ۲۰۰۶).



شکل ۱. طرح‌های از مسیر بازتاب موج از یک بازتابنده عمقی و رد زمانی متناظر با آن (Tx: فرستنده و Rx: گیرنده).

رادار نفوذی به زمین (Ground Penetrating Radar) یک روش ژئوفیزیکی غیرمخرب است که بر مبنای نفوذ امواج الکترومغناطیسی با بسامد بالا به درون زمین به منظور دریافت تصویر زیر سطح عمل می‌کند (دنیس و همکاران، ۲۰۰۹). اساس روش رادار ارسال تپ‌های الکترومغناطیسی نوارگسترده (Ultra-wideband) به زیر سطح و ثبت بازتاب ایجاد شده از سطح مشترک بین لایه‌ها و اجسام است. زمانی که تفاوتی در گذردهی و رسانندگی الکتریکی سطح مشترک مواد وجود داشته باشد، قسمتی از موج الکترومغناطیسی به سطح زمین بازتابیده می‌شود (لین و همکاران، ۲۰۰۹) (شکل ۱). سپس نتیجه به صورت نمودار مسافت-زمان نمایش داده می‌شود (شکل ۲). بر اساس نمودارهای پردازش شده رادار، موقعیت بی-هنجاری‌های الکترومغناطیسی و سطح مشترک لایه‌ها تعیین می‌گردد. عمق نفوذ امواج رادار با توانی از بسامد آنها نسبت معکوس دارد، بدین معنی که با افزایش بسامد امواج، عمق نفوذ به شدت کاهش می‌یابد. زیرا بسامدهای بالا به سرعت در محیط جذب می‌شوند. از طرف دیگر هرچه بسامد بالاتر باشد، توان تفکیک عوارض بیشتر است یعنی می‌توان ابعاد و ضخامت‌های کوچک‌تر را تشخیص داد. بنابراین، هنگام کاوش در اعماق زیاد، از بسامدهای پایین استفاده می‌شود و در نتیجه امکان تفکیک جزئیات کمتر است، درحالی‌که در اعماق کم می‌توان با استفاده از بسامدهای بالا، جزئیات را با دقت زیاد تصویر کرد. بنابراین توان تفکیک افقی و قائم با افزایش عمق، کاهش می‌یابد.

روش رادار نفوذی به طور گسترده‌ای در به تصویر کشیدن اهداف زیرسطحی کم عمق استفاده شده است و کاربردهای فراوانی در علوم مختلف دارد. اکتشافات باستان‌شناسی (گرانجین و همکاران، ۲۰۰۰؛ نگری و همکاران، ۲۰۰۸)، مطالعات زمین‌آشناختی (لین و



شکل ۲. نمونه یک مقطع رادار نفوذی به زمین که از مجموعه‌ای از ردها تشکیل شده است و می‌توان سطوح بازتابنده را در آن مشاهده کرد.

دستگاه نسبت به دستگاه‌های رادار نفوذی معمول می‌باشد. این ویژگی توانایی آن را به سامانه رادار نفوذی داده که حتی در زمین‌های بسیار رسانا مانند خاک‌های رسی، مارنی، خیس، شور که برای دیگر سامانه‌های رادار نفوذی ناممکن است، نفوذ زیادی داشته باشد.

ویژگی‌های اصلی این سامانه رادار نفوذی عبارتند از:

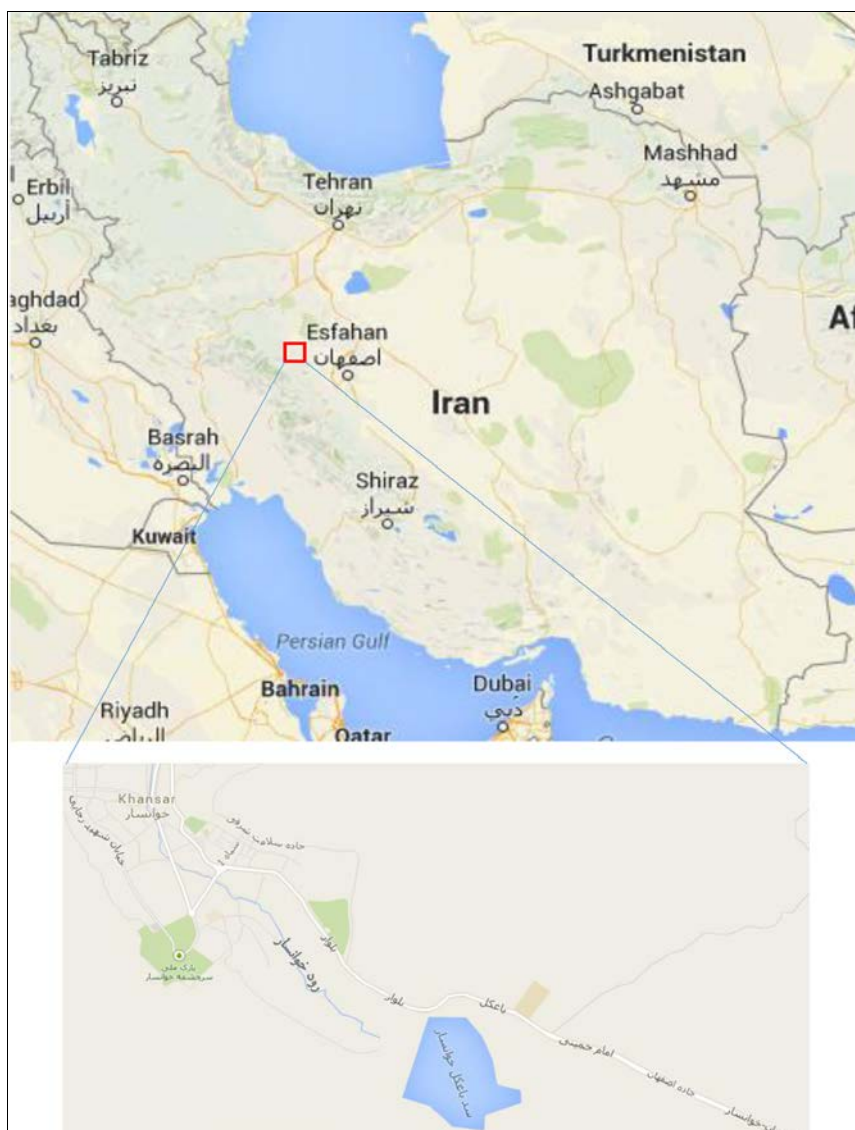
- ۱- استفاده از فرستنده با توان بسیار بالا بر پایه کاف جرقه هیدروژن (Hydrogen spark-gap) (جین لیانگ و همکاران، ۲۰۰۷) برای دریافت امواج بازتابی با کیفیت مناسب‌تر، ۲- هم‌زمان‌سازی فرستنده و گیرنده توسط موج ارسالی از طریق هوا به منظور اجتناب از جفت‌شدگی آنها، ۳- ثبت مستقیم موج به جای تبدیل استروبوسکوپی (Stroboscopic) و ۴- استفاده از دوقطبی‌های دارای مقاومت به‌عنوان فرستنده و گیرنده (آنتن‌های نواری).

یکی از اهداف مطالعه حاضر به تصویر کشیدن توانایی فناوری رادار نفوذی به زمین لوزا (Loza) در شناسایی اهداف عمیق است. در مطالعات اخیر در محدوده سد خوانسار سعی شده تا کاربردی بودن این نسل متفاوت از رادار نفوذی به زمین در شناسایی ساختارهای زمین‌شناختی، تعیین فضاهای خالی و مجراهای احتمالی آبگذر در سنگ، آبرفت و بدنه سد تا عمق حدود ۱۰۰ متر نشان داده شود.

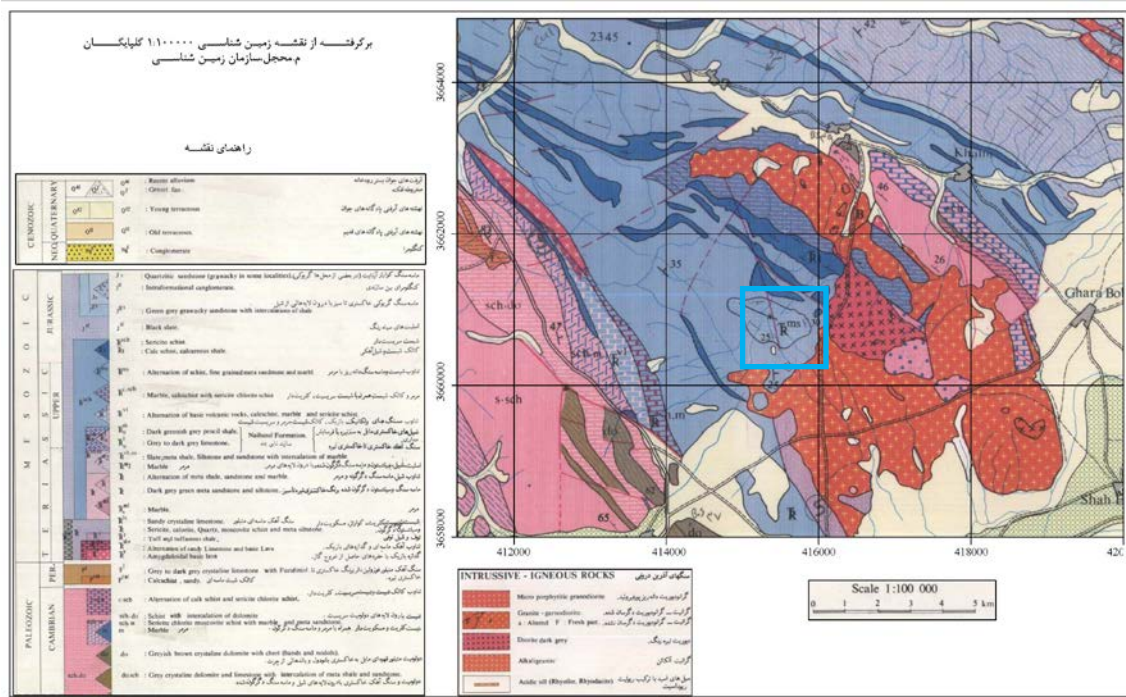
این سامانه رادار نفوذی تقویت شده (Enhanced power) یک دستگاه رادار قابل حمل تک‌تپ می‌باشد که شرکت روسی وینسمی (VNIISMI Ltd) آن را طراحی کرده است. مدل N رادار نفوذی لوزا به‌منظور مطالعات عمیق طراحی شده است. افزایش توان بیشینه دستگاه به اندازه ۱۰۰۰۰ برابر یکی از ویژگی‌های بارز این

(مخترعین دستگاه) در اولین آزمایش رادیویی طراحی کردند. باید توجه داشت که علیرغم افزایش توان بیشینه، به دلیل کاهش دفعات تکرار موج، میانگین توان ارسالی نسبت به رادارهای معمول به میزان ۱۰ برابر کاهش یافته است (ایستد، ۱۹۹۱ قسمت اول و دوم؛ سیمن، ۱۹۹۶؛ راهنمای دستگاه، ۲۰۰۸).

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این سامانه، ثبت مستقیم امواج بدون تبدیل آن به حوزه بسامد است. فرآیند تبدیل غیرخطی معمولاً باعث تغییر در موج اصلی می‌شود. همچنین این سامانه رادار نفوذی از یک فرستنده با مقدار توان بیشینه ۱۰ کیلووات جهت دستیابی به عمق و تفکیک‌پذیری مناسب بهره می‌برد. این نوع فرستنده، مدل جدیدی از فرستنده جرقه‌ای است که پوپوو و مارکونی



شکل ۳. موقعیت محدوده مطالعاتی سد خوانسار بر روی نقشه ایران.



شکل ۴. موقعیت محدوده مورد مطالعه (چهارضلعی آبی رنگ) در گستره سد خوانسار بر روی نقشه زمین شناسی گلباگان (مجله، ۱۳۷۱).

سد مخزنی خوانسار از نوع خاکی با هسته رسی است و حجم مخزن آن ۵ میلیون متر مکعب است. طول تاج این سد ۷۷۰ متر، عرض تاج آن ۱۰ متر و ارتفاع آن از پی ۳۸ متر است. گستره مورد مطالعه در جنوب شهر خوانسار و در دامنه خاوری کوه‌های زاگرس واقع است (شکل ۳). یکی از مشکلات موجود در این سد، وجود فضاهای خالی و مجراهای احتمالی گذر آب و درزه شکستگی‌های احتمالی می‌باشد. وارد شدن آب به این حفره‌ها، به مرور زمان می‌تواند استحکام سد را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین، شناسایی این فضاهای خالی و مجراها، برای مقاوم‌سازی و ترمیم کف سد خوانسار بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور، برای تعیین محل قرارگیری خط سنگ و خط هسته رسی با آبرفت و سنگ، تعیین سطح آب زیرزمینی، تعیین فضاهای خالی و مجراهای احتمالی گذر

از این دستگاه در مطالعات مختلف (مانند زمین شناسی مهندسی، منابع آب و اکتشاف معدن) در ایران و خارج از ایران استفاده شده که حاصل آن دست‌یابی به نتایج بسیار مناسب از لحاظ عمق نفوذ و دقت بوده است. به علاوه، عملکرد این فناوری در مطالعات مختلف به اثبات رسیده است (آبرامو و همکاران، ۲۰۰۴؛ برکوویت و همکاران، ۲۰۰۶؛ کوپیکین و همکاران ۲۰۰۷). در ادامه یکی از مطالعات اخیر انجام شده با این سامانه در زمینه مطالعات ژئوتکنیک شرح داده خواهد شد. این مطالعات برای دستیابی به اطلاعات زمین‌شناختی و ساختاری تا ژرفای ۱۰۰ متر از سطح زمین با استفاده از تجهیزات فوق در محدوده سد خاکی خوانسار واقع در استان اصفهان انجام پذیرفته است.

۲ ویژگی‌های سد خوانسار و زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه

### ۳ بررسی با رادار نفوذی به زمین در محدوده مورد

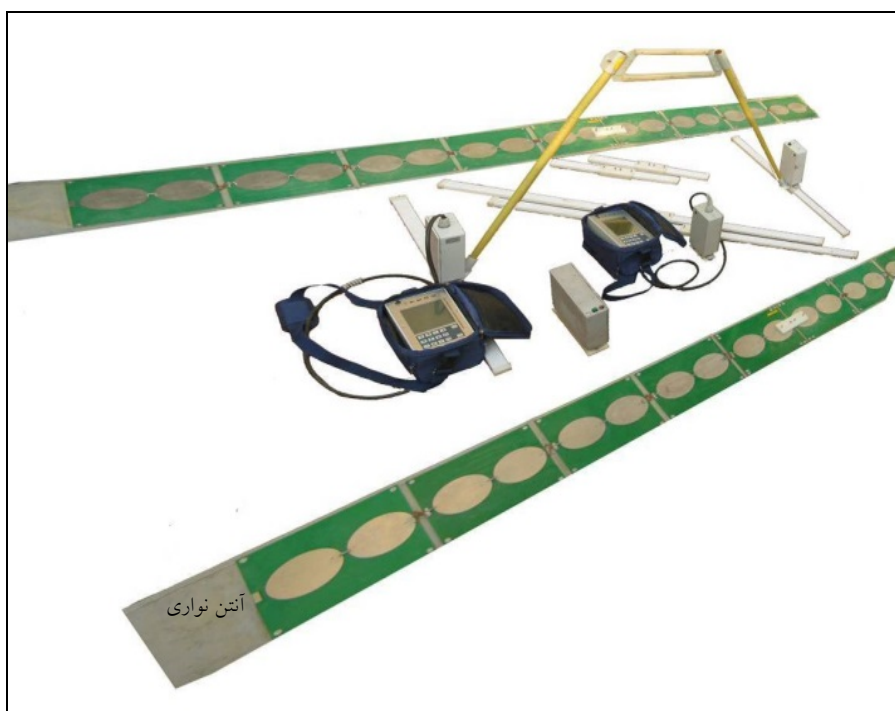
#### مطالعه

در این مطالعه نسل جدیدی از دستگاه‌های رادار نفوذی ساخت کشور روسیه به کار گرفته شد که از نظر قدرت امواج ارسالی و عمق نفوذ، از سامانه‌های تجاری رایج در بازار بسیار قوی‌تر است. سامانه مورد استفاده یک دستگاه رادار لوزا مدل N (ساخت شرکت وینسیمی روسیه) با آنتن‌های ۲۵ مگاهرتز غیرپوشیده (Unshielded) به طول ۶ متر بوده است. نمونه‌هایی از این آنتن‌ها با بسامدهای مختلف و دستگاه فرستنده و گیرنده در شکل ۵ نمایش داده شده‌است. فاصله فرستنده و گیرنده شش متر و قدم‌های برداشت در این مطالعات یک متر بوده است. سرعت متوسط موج (به منظور تبدیل به عمق زمان رسید) با توجه به مصالح زیرسطحی در محدوده مورد مطالعه ۰/۱۱ متر بر ثانیه انتخاب شده است.

آب در سنگ، آبرفت و بدنه سد از روش رادار نفوذی به زمین استفاده شده است.

از دیدگاه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه در گستره مرکزی پیش‌کوه‌های زاگرس قرار گرفته است. شکل ۴ موقعیت محدوده مورد مطالعه را بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گلپایگان نشان می‌دهد. واحدهای زمین‌شناختی گستره سد خوانسار را می‌توان به سه گروه، به شرح زیر، تقسیم کرد:

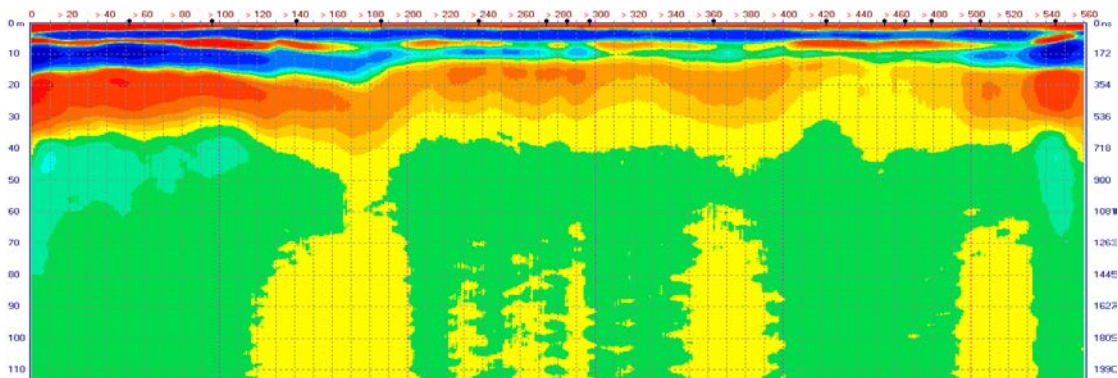
- واحدهای آهکی که سازنده ارتفاعات اصلی حاشیه باختری شهر خوانسار است.
- واحدهای شیستی که اغلب تشکیل‌دهنده تپه ماهورهای فرسایش‌یافته حاشیه خاوری رودخانه خوانسار است.
- نهشته‌های آبرفتی جوان که بستر رودخانه و دامنه‌های حاشیه آن را پوشانده است.



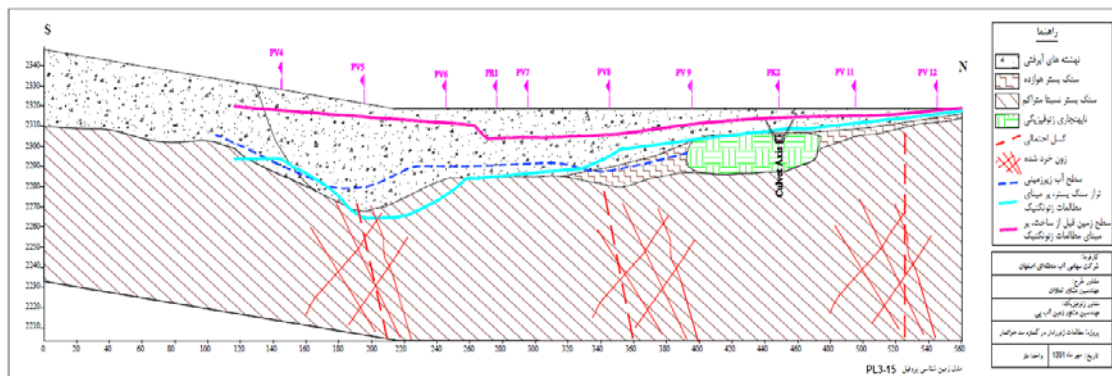
شکل ۵. دستگاه رادار نفوذی لوزا ساخت شرکت وینسیمی روسیه. گیرنده، فرستنده معمولی و ۱۸ کیلووات، آنتن نواری ۵۰ مگاهرتز با ۳ متر طول، آنتن‌های عصایی ۳۰۰ (۰/۵ متر)، ۱۵۰ (۱ متر)، ۱۰۰ (۱/۵ متر) مگاهرتز.



شکل ۶. نمایی از برداشت پروفیل‌های رادار نفوذی (الف) بر روی محور (ب) سطح شیبدار پایین دست سد خوانسار.



(الف)



(ب)

شکل ۷. الف) رادارگرام پردازش شده مربوط به پروفیل PI3-15. ب) مدل زمین‌شناختی به دست آمده از تفسیر داده‌های رادار نفوذی.

نفوذی در محدوده مطالعاتی برداشت شده است. شکل ۱۰ نقشه موقعیت پروفیل‌های برداشت شده بر روی سد خوانسار را نشان می‌دهد (شرکت مهندسی مشاور زمین-آب‌پی، ۱۳۹۱). برای پردازش و تحلیل داده‌ها از برنامه کرات (Krot) استفاده شده است. برای پردازش داده‌ها در

در این مطالعه، با استفاده از تجهیزات فوق، دستیابی به اطلاعات زمین‌شناختی و ساختاری تا ژرفای ۱۰۰ متر از سطح زمین امکان پذیر شده است. در شکل ۶ تصاویری از نحوه برداشت پروفیل‌های رادار نفوذی در گستره سد خوانسار نشان داده شده است. ۹۹۱۶ متر پروفیل رادار

شمالی برداشت گردیده است. طیف رنگ‌های موجود در رادار گرام نشان‌دهنده تغییر در قطبش موج از مثبت (قرمز) به منفی (آبی) می‌باشد.

یکی از ویژگی‌های بارز قابل شناسایی بر روی این پروفیل، تفکیک نهشته‌های رسوبی و سنگ بستر است. ژرفای سنگ بستر (با قطبش منفی) در بخش‌های میانی این پروفیل دارای بیشترین مقدار بوده و از ۴۰ متر تجاوز می‌کند. سنگ بستر در بخش‌هایی از این پروفیل دچار شکستگی‌هایی بوده که به‌ویژه در فواصل ۲۰۰، ۳۷۰ و ۵۱۰ متری از ابتدای جنوبی پروفیل توسعه یافته است. به دلیل خردشدگی و نیز رطوبت بالاتر این بخش‌ها نسبت به محیط اطراف، سیگنال رادار نفوذی در این ناحیه تضعیف بیشتری یافته و تغییر بسامد آن مشهود می‌باشد. بر روی مدل زمین‌شناختی این پروفیل (شکل ۷ ب)، سطح زمین قبل از ساخت سد (خط قرمز) و نیز تراز سنگ بستر بر مبنای مطالعات ژئوتکنیک (رنگ سبز) ترسیم شده است (شرکت مهندسی مشاور زمین‌آبی، ۱۳۹۱). ژرفای سنگ بستر در مدل زمین‌شناختی به‌دست آمده از تفسیر داده‌های رادار نفوذی و مدل به‌دست آمده از مطالعات ژئوتکنیک انطباق خوبی را نشان می‌دهند. زون بی‌هنجاری حاشیه کالورت که تا حدی به سمت جنوب و پایین آن متمایل گردید است، از بی‌هنجاری‌های مهم دیگر بر روی رادار گرام این پروفیل است که از روی تغییرات شدت موج دریافتی (تضعیف آن) و تغییر بسامد آن مشخص گردیده است. همچنین در این پروفیل با بیشترین وضوح، بی‌هنجاری مربوط به نایکنواختی ساختاری ناشی از وجود یک کانال قدیمی مدفون، منعکس گردیده است (در فاصله ۲۰۰ متری از ابتدای پروفیل). این کانال قدیمی مدفون بر روی یک زون شکستگی استقرار یافته است. به نظر می‌رسد که این کانال قدیمی تا سطح سنگ بستر عمق داشته و باعث شکستگی بخش‌هایی از آن شده و در طول زمان‌های زمین‌شناختی این کانال با نهشته‌های رسوبی پر

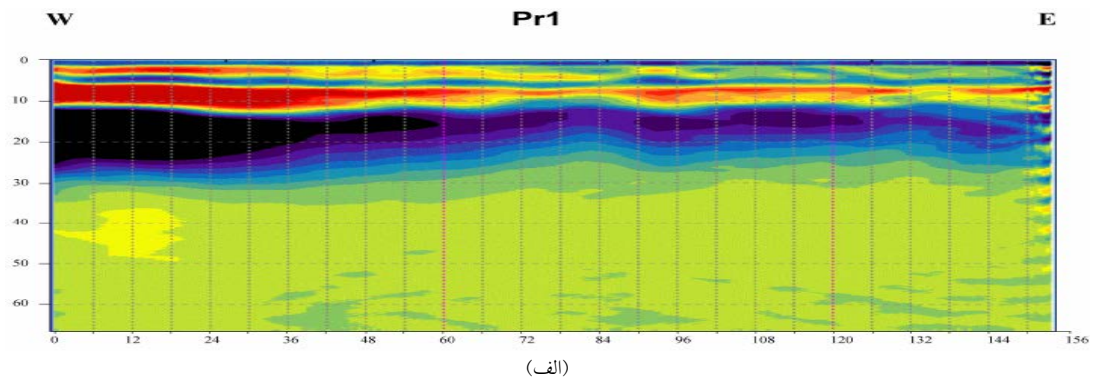
این نرم‌افزار، ابتدا طول پروفیل‌ها با استفاده از اندازه‌گیری‌های انجام گرفته در هنگام برداشت تنظیم و فاصله بین ردها تصحیح می‌شود. پردازش‌های اعمال شده بر روی رادار گرام‌های هر پروفیل شامل تصحیح زمان صفر (Zero time adjustment)، صافی‌های میان‌گذر متناسب با بسامد مرکزی آنتن و بهره (Gain) است.

#### ۴ تفسیر پروفیل‌های رادار نفوذی برداشت شده در گستره سد خوانسار

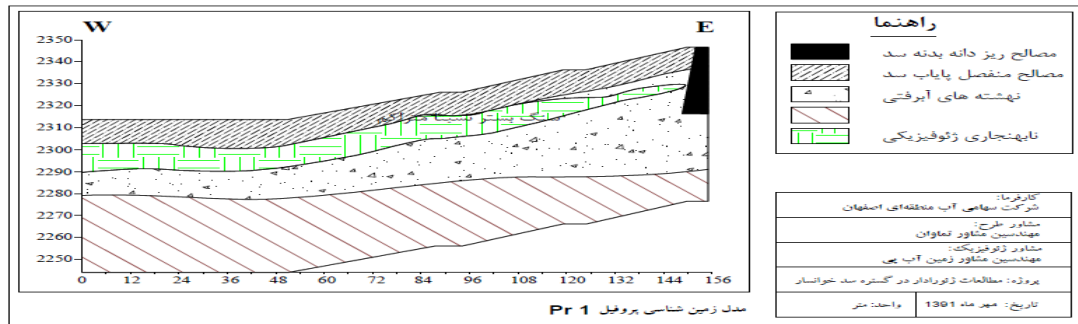
پروفیل‌های برداشت شده رادار نفوذی بر روی سد خوانسار که با هدف تعیین محل قرارگیری خط سنگ بستر و خط هسته رسی با آبرفت، تعیین سطح آب زیرزمینی، تعیین فضا‌های خالی و مجراهای احتمالی گذر آب در سنگ، آبرفت و بدنه سد طراحی شده است، در دو رده کلی قابل دسته‌بندی هستند. ۱- پروفیل‌های طولی در راستای تاج سد که بر روی تاج سد، برم‌های اول و دوم، خاکریز پایاب و در پشت سد (بر روی پایین‌ترین سطح ریپ‌رپ و در کنار لبه آب) برداشت گردیده‌اند و ۲- پروفیل‌های عرضی (عمود بر تاج سد) که در مسیرهای قابل برداشت در راستای رودخانه و به منظور پیگیری بی-هنجاری‌های احتمالی شناسایی شده بر روی پروفیل‌های طولی اجرا گردیده‌اند (شکل ۱۰).

سه پروفیل از پروفیل‌های برداشت شده در محدوده مورد مطالعه، در این بخش تفسیر گردیده و برای هر یک از پروفیل‌ها سعی بر آن است که یک مدل زمین‌شناسی متناسب با تفسیرهای رادار نفوذی ارائه شود. فواصل و ژرفای ارائه شده بر روی پروفیل‌ها بر حسب متر است. رادار گرام پردازش شده و مدل زمین‌شناسی (به‌دست آمده از داده‌های رادار نفوذی و زمین‌شناسی) مربوط به پروفیل PI3-15 در شکل ۷ نشان داده شده است. این پروفیل به طول ۵۶۰ متر بر روی دومین برم سد (دومین برم بعد از تاج سد به سمت پایین‌دست) با راستای جنوبی



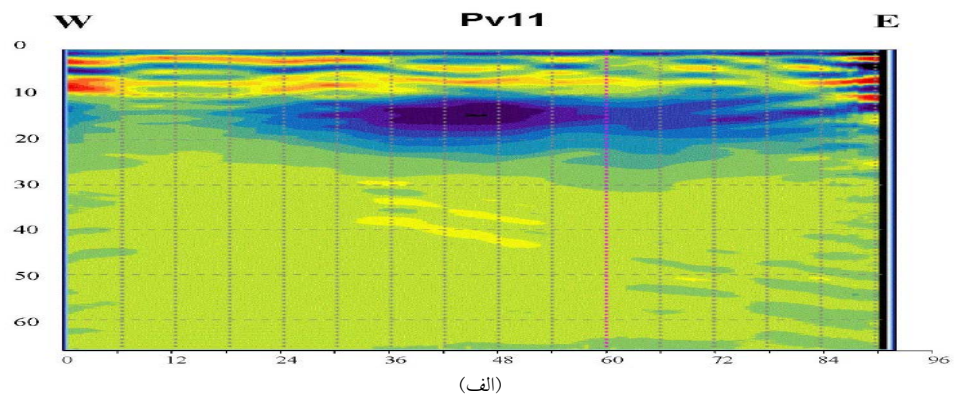


(الف)

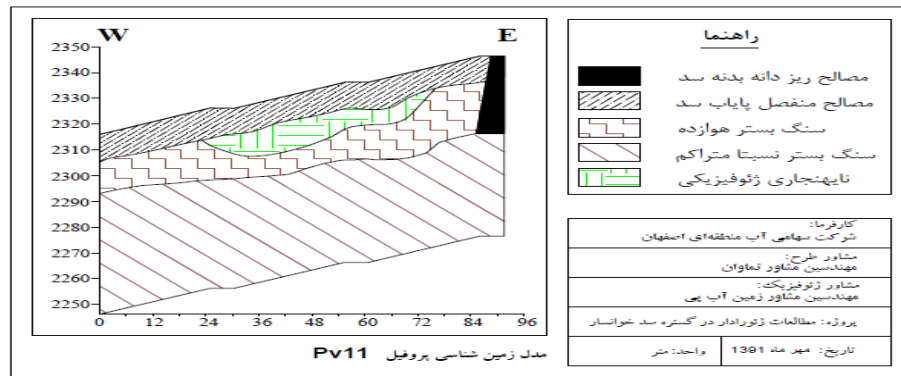


(ب)

شکل ۸ الف) رادارگرام پردازش شده مربوط به پروفیل Pr1. ب) مدل زمین‌شناختی به دست آمده از تفسیر داده‌های رادار نفوذی.

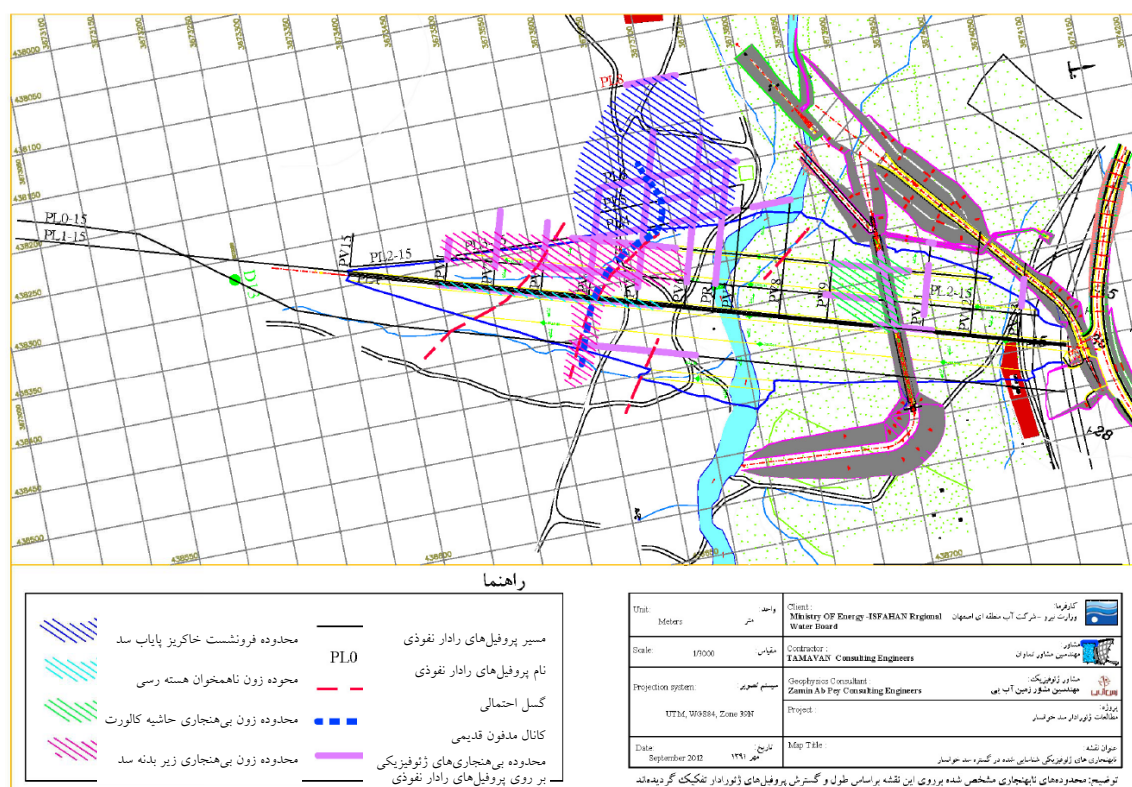


(الف)



(ب)

شکل ۹ الف) رادارگرام پردازش شده مربوط به پروفیل Pv11. ب) مدل زمین‌شناختی به دست آمده از داده‌های رادار نفوذی.



شکل ۱۰۱. نقشه محل زون‌های سست و ناهمگون در بدنه، هسته رسی و پایاب سد و همچنین مسیر کانال قدیمی شناسایی شده از طریق داده‌های رادار نفوذی.

حفاری‌های انجام شده، بی‌هنجاری موجود در اطراف کالورت سد و نفوذ آب به آن را تایید می‌کند. پروفیل Pr1 با طولی معادل ۱۵۶ متر با راستای باختری-خاوری بر روی بخش‌های پایین دست پایاب سد برداشت گردیده است (شکل ۸). براساس رادارگرام پردازش شده این پروفیل، در زیر مصالح منفصل پایاب که ضخامت حدود ۱۰ متر دارند، بی‌هنجاری ژئوفیزیکی تا عمق حدود ۲۰ متر (با پلاریته منفی) قابل شناسایی است. نهشته‌های آبرفتی تا تراز ارتفاعی ۲۲۸۰ متر بر روی رادارگرام قابل تفکیک هستند. سنگ کف که دارای قطبش منفی است، از عمق ۳۰-۴۰ متر شروع می‌شود. توده‌های خاک مرطوب و سست شناسایی شده در امتداد این پروفیل‌ها، سبب نشست در این گستره و بین پایه سد و تپه ساخته شده از مصالح خاک دستی شده است.

شده است. این فرضیه با وضعیت توپوگرافی سنگ بستر در این بخش از رودخانه نیز در انطباق است. مقاطع زمین‌شناختی و پروفیل‌های رادار نفوذی این ناحیه نیز نشان‌دهنده تغییرات قائم در سنگ بستر است. بنابراین سه شکستگی و زون خردشده شناسایی شده بر روی پروفیل رادار نفوذی، که مهم‌ترین آن (احتمالاً مربوط به کانال قدیمی مدفون) در فاصله ۲۰۰ متری از ابتدای پروفیل قرار دارد، می‌تواند یکی از عوامل آبگذری در سد باشد.

وجود کانال قدیمی مدفون که با روش رادار نفوذی آشکار شده است، به وسیله حفاری‌های فشرده بعدی در محل سد تایید شده است. بر روی این پروفیل، سطح آب زیرزمینی نیز متمایز گشته است. بررسی این پروفیل نشان‌دهنده وجود سازه کالورت در فاصله حدود ۴۳۸ متری از ابتدای این پروفیل می‌باشد. سقف سازه کالورت در ژرفای حدود ۱۲ متری قرار گرفته است. لازم به ذکر است،

دستگاه‌های رادار نفوذی معمول می‌باشد. تفکیک لایه‌های زمین‌شناختی تا عمق حدود ۱۰۰ متر در این مطالعات نشان‌دهنده کارایی این سامانه حتی در زمین‌های رسانای اطراف سد می‌باشد.

پروفیل‌های برداشت شده رادار نفوذی بر روی سد خوانسار را می‌توان در دو رده کلی، پروفیل‌های طولی برداشت شده در راستای تاج سد و پروفیل‌های واقع در راستای رودخانه، دسته‌بندی کرد. برپایه تحلیل داده‌های رادار نفوذی برداشت‌شده و تلفیق آن با اطلاعات زمین‌شناختی، بی‌هنجاری‌هایی در برخی از نواحی سد بر روی پروفیل‌ها شناسایی شده‌اند. بی‌هنجاری قابل شناسایی بر روی پروفیل‌های PI3-15 را می‌توان به وجود یک کانال زهکش قدیمی مرتبط دانست. مسیر تعیین شده کانال مدفون قدیمی را حفاری‌های بعدی تایید کرده‌اند. به نظر می‌رسد که این کانال قدیمی تا سطح سنگ بستر عمق داشته و بخش‌هایی از آن را نیز بریده است. در طول زمان‌های زمین‌شناختی این کانال با نهشته‌های رسوبی پر شده است. توده‌های خاک مرطوب و سست شناسایی شده در امتداد پروفیل Pr1، سبب نشست در این گستره و بین پایه سد و تپه ساخته شده از مصالح خاک دستی شده است.

علاوه بر این، نهشته‌های آبرفتی، عمق سنگ بستر، بی-هنجاری مربوط به نایکنواختی ساختاری ناشی از وجود یک کانال قدیمی مدفون، بی‌هنجاری موجود در اطراف کالورت سد و نفوذ آب به آن و گسل‌ها و شکستگی‌های موجود در اطراف سد، بر روی رادار گرام‌ها تفکیک شده‌اند. حفاری‌های انجام شده بعدی، با هدف شناسایی کانال قدیمی مدفون و نیز بی‌هنجاری موجود در محدوده کالورت، اطلاعات به دست آمده از رادار نفوذی را تایید کرده‌اند. همچنین این اطلاعات با داده‌های ژئوتکنیکی تهیه شده نیز همخوانی دارند.

پروفیل Pv11 با طولی معادل ۹۰ متر با راستای باختری-خاوری بر روی پایاب سد برداشت گردیده است (شکل ۹). همانند پروفیل Pr1 در این پروفیل نیز مصالح منفصل پایاب سد تا عمق حدود ۱۰ متر قابل تشخیص است. بر روی رادار گرام پردازش شده این پروفیل در بخش‌های میانی بی‌هنجاری وسیعی با قطبش منفی (و تغییر در شدت بازتاب موج دریافتی) قابل شناسایی می‌باشد (در فاصله ۲۵ تا ۷۰ متری) که به احتمال فراوان در نتیجه تغییر شکل خاک‌های این محدوده، شکل گرفته است. براساس تفسیر رادار گرام، همان‌طور که در مقطع زمین‌شناختی این پروفیل مشخص است، از عمق حدود ۱۰ متر تا ۳۰ متر سنگ بستر هوازده و از عمق ۳۰ متری سنگ بستر تفکیک گردیده است. شکل ۱۰ محل زون‌های سست و ناهمگون در بدنه، هسته رسی و پایاب سد و همچنین مسیر کانال قدیمی شناسایی شده از طریق داده‌های رادار نفوذی را نمایش می‌دهد.

##### ۵ نتیجه‌گیری

وجود فضاهای خالی و مجراهای احتمالی گذر آب و درزه و شکستگی‌های احتمالی از مشکلات موجود در سد خوانسار می‌باشد. مطالعات ژئوفیزیکی با روش رادار نفوذی به زمین در گستره سد خوانسار به منظور ارزیابی و تعیین خصوصیات ژئوفیزیکی این سد، شناسایی این فضاهای خالی و مجراهای احتمالی گذر آب انجام پذیرفته است. وارد شدن آب به این حفره‌ها، به مرور زمان می‌تواند استحکام سد را تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین، شناسایی این فضاهای خالی و مجراها، برای مقاوم‌سازی و ترمیم کف سد خوانسار بسیار حائز اهمیت است. در این مطالعه از آنتن با بسامد ۲۵ مگاهرتز و فرستنده با توان ۱۰ کیلووات برای مطالعات زیر سطحی تا عمق بیش از ۱۰۰ متر استفاده شده است. افزایش توان بیشینه دستگاه به اندازه ۱۰۰۰۰ برابر یکی از ویژگی‌های بارز این دستگاه نسبت به

- Davis, J. L., and Annan, A. P., 1989, Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy: *Geophysical Prospecting*, 37, 531–551.
- Denis, A., Huneau, F., Hoerlé, S., and Salomon, A., 2009, GPR data processing for fractures and flakes detection in sandstone: *J. Appl. Geophys.*, 68, 282–288.
- Grandjean, G., Gourry, J. C., and Bitri, A., 2000, Evaluation of GPR techniques for civil-engineering applications study on a test site: *J. Appl. Geophys.*, 45, 141–156.
- Harari, Z., 1996, Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes: *J. Appl. Geophys.*, 36, 43–52.
- Isted, G. A., 1991, Guglielmo Marconi and the History of Radio - Part I: General Electric Company, p.l.c., GEC Review, Volume 7.
- Isted, G. A., 1991, Guglielmo Marconi and the History of Radio - Part II: General Electric Company, p.l.c., GEC Review, Volume 7.
- Jin-Liang L., Yin Y., Zhan T., Feng J. H., and Zhong H. H., 2007, Application of a self-breakdown hydrogen spark gap switch on high power pulse modulator. *Plasma Science: EEE 34th International Conference*, 17–22 June, Albuquerque;
- NM.<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=4345408>.
- Kopeikin, V. V., Krasheninnikov, I. V., Morozov, P. A., Popov, A. V., Guangyou, F., Xiaojun, L., and Bin, Z., 2007, Experimental verification of LOZA-V GPR penetration depth and signal quality: *Advanced Ground Penetrating Radar*, 4th International Workshop, Naples, Italy, 27–29 June, 230 – 233.
- Lin, M. C., Kang, Y. M., Lee, K. F., and Hsu, H. C., 2009, A study on the technologies for detecting underground water level and processing image: *Int. J. Appl. Sci. and Engineering*, 7(1), 61–68.
- تقدیر و تشکر  
نویسندگان از شرکت آب منطقه‌ای اصفهان به دلیل کمک فراوان در انجام این مطالعات قدردانی می‌نمایند.
- مراجع  
مهندسین مشاور زمین‌آب‌پی، ۱۳۹۱، گزارش مطالعات ژئوفیزیک به روش رادار نفوذی در گستره سد خوانسار: ویرایش دوم.  
محل، م.، ۱۳۷۱، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ گلبایگان: سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.  
Abramov, A. P., Vasiliev, A. G., Kopeikin, V. V., and Morozov, P. A., 2004, Underwater ground penetrating radar in archeological investigation below sea bottom: 10<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar, 21–24 June, Delft, Netherlands.  
Al-Nuaimy, W., Huang, Y., Nakhkash, M., Fang, M. T. C., Nguyen, V. T., and Eriksen, A., 2000, Automatic detection of buried utilities and solid objects with GPR using neural networks and pattern recognition: *J. Appl. Geophys.*, 43, 157–165.  
Berkuit, A. I., Kozlykov, A. N., Belinskij, A. B., Merkulov, S. V., Vasiliev, A. G., Kopeikin, V. V., and Morozov, P. A., 2006, Enhanced power ground penetrating radars “LOZA”: Experience with 3D mapping to locate archaeological objects: 11<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar, June 19–22, Columbus Ohio, USA.  
Cardimona, S., Clement, W. P., and Kadinsky-Cade, K., 1998, Seismic reflection and ground-penetrating radar imaging of a shallow aquifer: *Geophysics*, 63, 1310–1317.  
Christie, M., Tsoflias, G. P., Stockli, D. F., and Black, R., 2009, Assessing fault displacement and off-fault deformation in an extensional tectonic setting using 3-D ground-penetrating radar imaging: *J. Appl. Geophys.*, 68, 9–16.

- Simons, R. W., 1996, Guglielmo Marconi and Early Systems of Wireless Communication: General Electric Company, p.l.c., GEC Review, Volume 11.
- Topp, G. C., Davis, J. L., and Annan, A. P., 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines: *Water Resour. Res.*, 16, 574–582.
- Travassos, J. D. M., and Luiz Menezes, P. D. T., 2004, GPR exploration for groundwater in a crystalline rock terrain: *J. Appl. Geophys.*, 55, 239–248.
- Turesson, A., 2006, Water content and porosity estimated from ground-penetrating radar and resistivity: *J. Appl. Geophys.*, 58, 99–111.
- User's guide of Subsurface sounding set (geoprobe) LOZA-N, 2008, Mechanical Tools Institute VNIISMI, Moscow.
- McClymont, A. F., Green, A. G., Kaiser, A., Horstmeyer, H., and Langridge, R., 2010, Shallow fault segmentation of the Alpine fault zone, New Zealand revealed from 2- and 3-D GPR surveying: *J. Appl. Geophys.*, 70(4), 343–354.
- Negri, S., Leucci, G., and Mazzone, F., 2008, High resolution 3D ERT to help GPR data interpretation for researching archaeological items in a geologically complex subsurface: *J. Appl. Geophys.*, 65, 111–120.
- Pauselli, C., Federico, C., Frigeri, A., Orosei, R., Barchi, M. R., and Basile G., 2010, Ground penetrating radar investigations to study active faults in the Norcia Basin (central Italy): *J. Appl. Geophys.*, 72, 39–45.
- Rubin, Y., and Hubbard, S. S., 2005, *Hydrogeophysics*: Springer, 185–213.