

بررسی علل فرار آب از سد مخزنی آرباتان در آذربایجان شرقی

محمد کشاورز بخشایش^{۱*}، محمدعلی عبادی^۲ و مهدی تلخابلو^۳

۱- زنجان، دانشگاه پیام نور مرکز زنجان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه آزاد اهر

۳- تهران، خیابان شهید مفتاح، دانشگاه تربیت معلم

* keshavarzm@yahoo.com

دریافت: ۹۱/۴/۲۷ پذیرش: ۹۲/۲/۱۴

چکیده

بررسی دلایل فرار آب از سد مخزنی آرباتان واقع در استان آذربایجان شرقی و در ۵۰ کیلومتری شمال شرق تبریز، هدف اصلی تحقیق حاضر است. گنجایش نهایی سد ۲۷ میلیون مترمکعب بوده و آب آن از طریق یک کانال بتونی به طول ۲۶ کیلومتر از سرشاخه‌های تلخه رود تامین شده است. این سد در سال ۱۳۸۴ آگیری شده و ۵ سال بعد به دلیل فرار آب، مخزن آن تخلیه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که ساختگاه بر روی سازند تبخیری و مارن‌های ژئوسداز با میان لایه‌های ژئوسداز قرار گرفته و در عمق ۳۵ متری، یک لایه نمکی نیز در محدوده مخزن شناسایی شده است. به نظر می‌رسد که آب از طریق انحلال لایه‌های ژئوسداز و ایجاد فروچاله‌ها به لایه نمک رسیده و باعث انحلال آن و تشکیل کانال‌های زیرزمینی شده است که در نهایت منجر به فرار کامل آب از مخزن گردیده است. روند عمومی فروچاله‌های داخل مخزن، امتداد شکاف‌های ایجاد شده در اثر فرونشست زمین و نیز یکسان بودن امتداد دهانه‌های ریزشی در پایین دست سد با امتداد لایه‌بندی منطقه، از شواهد تایید این نتیجه‌گیری هستند.

واژه‌های کلیدی: سد آرباتان، فرار آب، انحلال نمک، لایه‌های ژئوسداز، آذربایجان شرقی

مقدمه

دوباره‌ای را جهت علت‌یابی و ترمیم احتمالی آن در دستور کار قرار دهد. بررسی‌های صحرایی نشانگر حضور سنگ‌های تبخیری در محدوده ساختگاه است. سنگ‌های تبخیری، رسوبات شیمیایی هستند که پس از تغلیظ نمک‌های محلول در آب بر اثر فرآیند تبخیر رسوب کرده‌اند. ژئوسداز ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$)، انیدریت (CaSO_4)، سنگ نمک (NaCl) و پتاس (KCl) فراوان‌ترین انواع کانی‌ها و سنگ‌های تبخیری هستند [۶]. وقوع انحلال و ایجاد کارست در این نوع سنگ‌ها باعث ایجاد فروچاله‌ها، غارهای زیرزمینی، جریان آب زیرزمینی نامشهود و ایجاد چشمه‌ها شده و در برخی موارد نیز باعث ایجاد فرونشست‌هایی در ابعاد بزرگ می‌شود [۱]. برای وقوع پدیده انحلال سازند گچی، چهار شرط الزامی است [۸].

(۱) وجود یک توده از جنس سنگ‌های تبخیری،
(۲) منبع آب زیرزمینی که از املاح کلرید سدیم یا سولفات کلسیم اشباع نباشد،

سد آرباتان در استان آذربایجان شرقی، در ۵۰ کیلومتری شمال شرق شهر تبریز و در ۲۵ کیلومتری غرب شهرستان هریس احداث شده است (شکل ۱). ساختگاه این سد در موقعیت جغرافیایی $38^{\circ}10'$ عرض شمالی در حوضه آبریز آجی‌چای واقع شده است. مخزن این سد در یک گودی طبیعی زمین واقع شده که ۶ بند خاکی (Dyke) مجزا بخش‌های حاشیه‌ای آنرا محدود کرده است. این سد به منظور بهره‌برداری از منابع آب و خاک و فراهم آوردن امکانات برای تولیدات کشاورزی در منطقه آرباتان هریس، با توجه به محدودیت‌های دسترسی به منابع آب و شرایط نامساعد اقلیمی و در جهت استفاده از منابع آب‌های سطحی که به صورت فصلی در منطقه وجود دارند احداث گردیده است [۲]. آب سد از طریق یک کانال بتونی به طول ۲۶ کیلومتر از سرشاخه‌های تلخه‌رود تامین شده است.

فرار آب از مخزن سد سبب تا بهره‌بردار آن (سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی) مطالعات ژئوتکنیکی

همه جانبه پیش از اجرای روش علاج بخشی در این نوع سدها از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. در این راستا مطالعه حاضر به منظور شناسایی دلایل فرار آب و همچنین عوامل موثر در وقوع این پدیده در سد آرباتان به انجام رسیده است.

زمین‌شناسی

محور و مخزن سد بر روی سازندهای تخریبی-تبخیری قرمز رنگ شامل مارن‌های ژئوپس‌دار، سیلتستون، ماسه-سنگ و کنگلومرا قرار گرفته است. واحدهای سنگی مذکور متعلق به میوسن تحتانی تا فوقانی و احتمالاً معادل سازند قرمز بالایی هستند [۳]. بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که حضور واحد مارن‌های ژئوپس‌دار در منطقه غالب بوده و برونزد سایر واحدهای سنگی در اولویت بعدی قرار دارند. مارن‌های مذکور به رنگ‌های مختلف قرمز، قهوه‌ای، خاکستری و زیتونی دیده می‌شوند. درصد فراوانی ژئوپس‌ها در داخل مارن‌ها در قسمت‌های مختلف متفاوت است. در بخش‌هایی از آن، بلورهای ژئوپس در داخل لایه مارن به صورت پراکنده و مجزا از هم قرار گرفته‌اند به طوری که در داخل مارن به صورت (Embedded) می‌باشند. در بخش‌هایی نیز میزان بلورهای ژئوپس زیاد شده و به صورت میان لایه‌های نازک و پیوسته در آمده‌اند. در هر دو حالت فراوانی مارن بیش‌تر از گچ است. لایه‌های مذکور در قسمت‌هایی از حواشی شرقی و غربی مخزن سد آرباتان و نیز در بخش شرقی محور D سد، در داخل مخزن قابل مشاهده هستند.

از نظر زمین‌شناسی ساختمانی، گستره محور و مخزن سد در ساحل راست رودخانه آچی چای یال تاقدیس بزرگی است که محور آن دارای راستای کلی SW-NE می‌باشد [۶]. محور تاقدیس مذکور در بالادست مخزن سد، بر روی زمین و در عکس‌های هوایی و ماهواره‌ای و در نقشه زمین‌شناسی قابل تشخیص بوده و به سمت شمال شرق دارای میل (Plunge) می‌باشد. امتداد لایه‌ها از بالادست مخزن سد تا پایین دست آن در یک راستا نبوده و در قسمت‌های مختلف، جهت یافتگی‌های متفاوتی نشان می‌دهند. بنابراین مشخصات هندسی لایه‌های سنگی منطقه شامل امتداد، جهت شیب و حتی زاویه شیب لایه‌ها از بالا دست پروژه تا پایین دست آن متفاوت می‌باشد. تغییرات یادشده به صورت تدریجی و نرم اتفاق

۳) محل خروجی (یا زهکش) که از این طریق مواد انحلال یافته بتوانند به بیرون هدایت شوند،
۴) انرژی لازم برای برقراری جریان آب از میان توده سنگ فراهم شود.

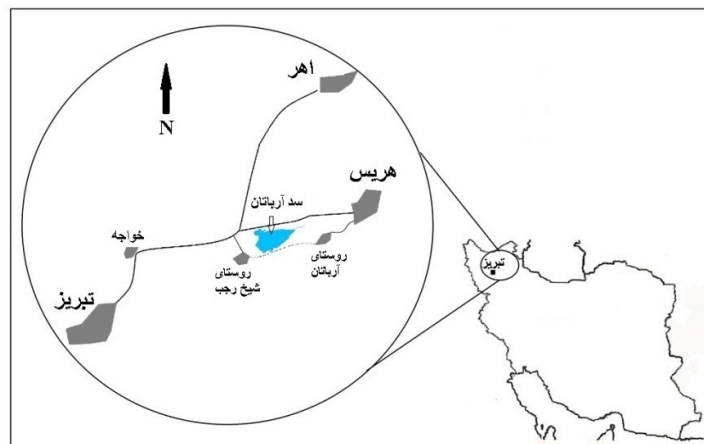
پدیده فرار آب از مخازن به دلیل انحلال سازندهای گچی و نمکی و یا به دلیل حضور انحلال‌های کارستی در سازندهای کربناتی، توسط محققین مختلف در ایران و کشورهای دیگر مورد مطالعه قرار گرفته است. به دلیل گستردگی سازندهای تبخیری در ایران، پدیده انحلال این نوع سازندها در مخازن و پی سازه‌های آبی احداث شده بر روی این نوع سنگ‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات بر روی سد قیصرق در آذربایجان شرقی نشان داده است که انحلال میان لایه‌های ژئوپسی سبب فرار پیش‌رونده آب از مخزن این سد شده است [۵]. بررسی‌های اداره مهندسی ارتش آمریکا بر روی سد موصل عراق که در سال ۱۹۸۵ آبگیری شده است نیز نشانگر عملکرد انحلال لایه‌های انیدریتی و ژئوپسی در وقوع پدیده فرار آب از مخزن این سد پس از یکسال و نیم از آبگیری آن می‌باشد [۱۰]. هم‌چنین بعد از اتمام عملیات ساختمانی سد Quail Creek Dike واقع در ایالت یوتای آمریکا، درزه‌های سنگ بستر در اثر بار مخزن باز شده و باعث افزایش جریان نشت آب از پی و بستر سازه شده و موجب بروز فروچاله‌ها و نشت آب کدر در پائین دست سد گردید. ادامه پدیده انحلال درزه‌ها باعث تشدید فرسایش و شستشوی مصالح بین بدنه سد و پی گردیده و در نهایت منجر به خرابی بدنه سد گردیده است [۴]. خرابی این سد علیرغم علاج بخشی آن با احداث یک دیواره آب بند، نشانگر پیچیدگی قابل توجه مطالعه فرار آب از سدها در اثر انحلال ژئوپس نسبت به سازندهای کربناتی است. چراکه آبگیری مخزن سد به صورت یک کاتالیزور عمل کرده و با ایجاد انرژی لازم برای نفوذ آب در پی و تراوش آب در توده گچی زیر پی، موجب تسریع در شروع و گسترش بیش‌تر انحلال در توده گچی و نمکی نسبت به آهک می‌شود. هم‌چنین بار هیدرولیکی ایجاد شده در اثر آبگیری مخزن، باعث شستگی و ضعیف شدن برخی پرشدگی‌های رسی موجود در بین درزه‌های توده گچی شده و باعث افزایش جریان تراوش از مسیره‌ها و حفرات موجود در سنگ می‌شود که این امر به افزایش انحلال کمک می‌کند. از این‌رو به نظر می‌رسد که انجام مطالعات

۳/۵ متر نشست کرده است (شکل ۲-الف). نقطه ابتدایی نشست زمین به محور سد محدود نبوده و از داخل مخزن سد شروع شده و از زیر دیواره گذشته و تا پایین دست آن ادامه یافته است. بررسی‌های صحرایی، طول آنرا بین ۱۵۰ الی ۲۰۰ متر در داخل مخزن نشان می‌دهد (شکل ۲-ب). از پدیده‌های زمین‌شناسی مرتبط با پدیده فرار آب، پیدایش ۳ عدد دهانه فروچاله در داخل مخزن سد (بالادست محور D) می‌باشد (شکل ۲-ج). همچنین بر اثر وقوع پدیده فرار آب و عوارض ناشی از آن، توپوگرافی زمین در پایین‌دست سد تغییر یافته و دره کم‌عمق (با عمق تقریبی ۳ الی ۴ متر) به وجود آمده است (شکل ۲-د). بررسی‌های صحرایی نشان می‌دهد که پدیده فرار آب از مخزن، علاوه بر ایجاد فروچاله‌ها و شکست زمین، سبب ایجاد نشست لایه‌های سطحی (Settlement) در پایین دست محور (D) شده است. این فرونشست‌ها با دهانه قیفی شکل و شیب تند دیواره‌های آن به تعداد ۱۳ عدد در خط‌القعر فرونشست زمین و در محدوده‌ای به فاصله ۵۵۰ متر در پایین دست محور D ایجاد شده‌اند و تنها یک مورد از این ریزش‌ها در انتهای مسیر فرار آب و در مجاورت دره شوربولاغی دیده می‌شود (شکل ۲-و). در این محل چشمه جدیدی همزمان با فرار آب از سد ظاهر شده است. از عوارض دیگر، پیدایش شکاف‌های طولی متعدد در عرض حدود ۱۰۰ متر از جناحین محل نشست زمین در پایین دست می‌باشد. در طول این شکاف‌ها، زمین به طرف خط القعر دره افتادگی داشته و به صورت پله‌ای نشست کرده است (شکل ۲-ی).

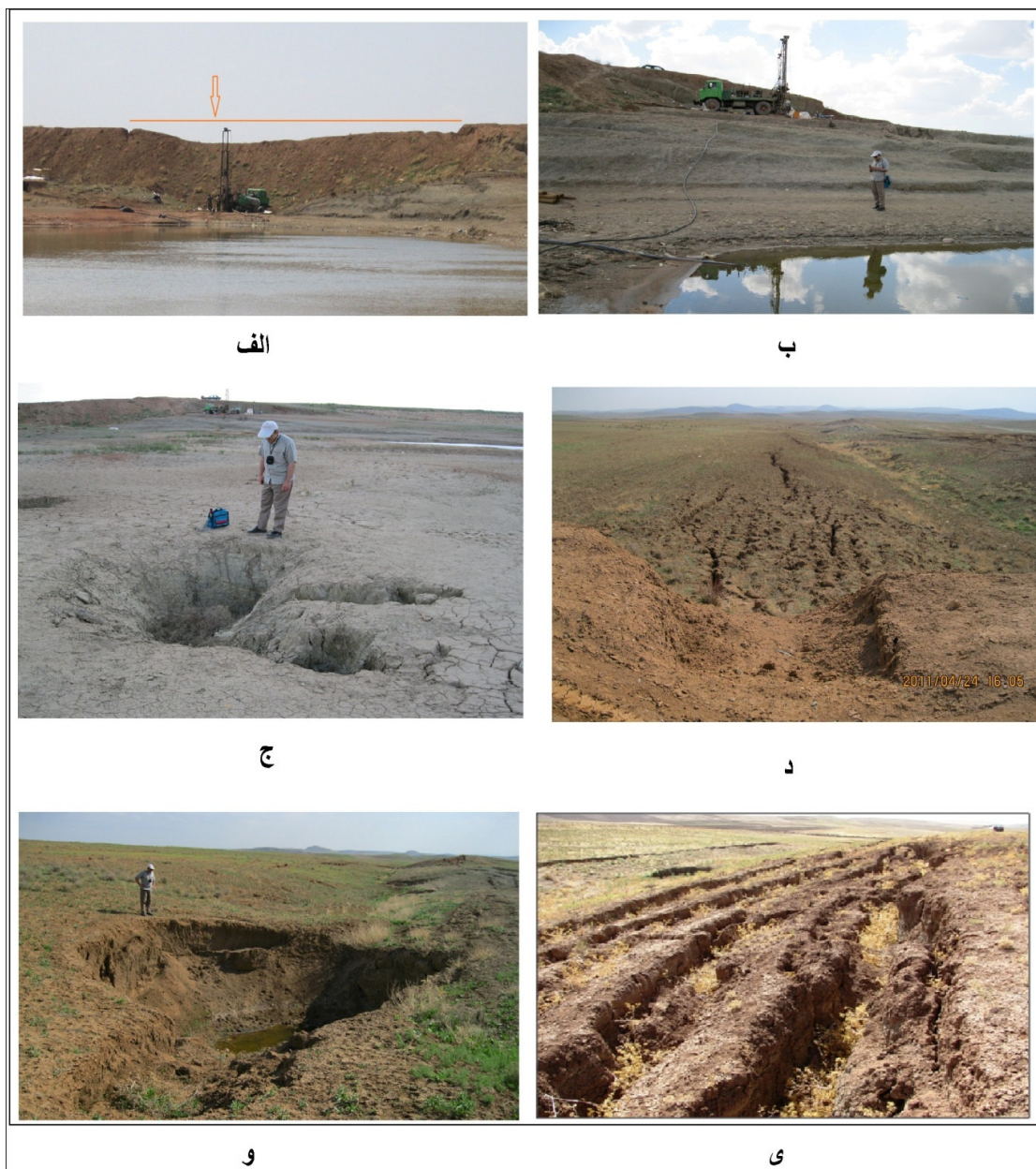
افتاده و تغییرات شدیدی در مشخصات هندسی لایه‌ها (گسیختگی و گسلش) در منطقه طرح دیده نمی‌شود. در یک بررسی هوایی، جهت امتداد لایه‌ها (یا خط رخنمون لایه‌ها در روی زمین) از حالت خط راست به وضعیت قوس‌دار (منحنی) تبدیل شده است (شکل ۳). وقوع این نوع تغییر شکل در مارن‌های ژئوسپار را می‌توان به انعطاف‌پذیری آن‌ها در برابر نیروهای تکتونیکی نسبت داد. براساس برداشت‌های صحرایی و بررسی تصاویر ماهواره‌ای، وضعیت استقرار لایه‌ها در ارتفاعات شرقی مخزن بصورت (090/20NW) می‌باشد. این روند تا یک سوم انتهای مخزن حفظ شده و از آنجا تا محورهای سد، چرخش و انحنای تدریجی در امتداد لایه‌ها بسمت جنوب‌غرب مشاهده می‌شود. به طوری که در محل محور D مشخصات هندسی لایه‌ها به (015/40NW) تغییر می‌کند. وضعیت لایه‌بندی مذکور تا چند ده متری پایین‌دست محور سد ادامه دارد که مجدداً به سمت پایین دست (دره شوربولاغ) امتداد لایه‌ها دست‌خوش انحنای تدریجی بسمت غرب و شمال‌غرب می‌گردد. در این محل امتداد و شیب لایه‌ها به صورت (095/35NE) اندازه‌گیری شده است.

مشکلات و عوارض ایجاد شده در سد

این سد خاکی شامل شش دیواره است (شکل ۴) که بعد از ۶ سال از آبیگری آن، سد دچار فرار آب از زیر دیواره D شده که همین امر باعث نشست دیواره و مخزن در این محل گردیده است. مسأله بارزی که در ارتباط با فرار آب به چشم می‌خورد، نشست محسوس زمین در طول پدیده مذکور می‌باشد به طوری که محور D سد به میزان تقریبی



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی سد آرباتان با مختصات $46^{\circ}52'$ طول شرقی و $38^{\circ}10'$ عرض شمالی در حوضه آبریز آجی چای.



شکل ۲. الف) نشست دیواره D سد، ب) نشست زمین در داخل مخزن، ج) فروچاله‌های لایه ژیبسی در داخل مخزن، د) فرونشست پایین دست دیواره D و) نمونه‌ای از فروچاله‌های پایین دست سد، ی) فرونشست پله‌ای زمین در جناحین دره پایین دست دیواره D.

طریق چشمه‌های قدیمی موجود و یا چشمه تازه ایجاد شده تخلیه گردیده است.

چنان‌که ذکر گردید از عوارض ناشی از رخداد فرار آب از این سد، ایجاد شکاف سطحی در پایین دست دیواره معیوب و در تکیه‌گاه‌های آن است. این شکاف‌ها با طول حدود ۱/۵ کیلومتر تا درون مخزن نیز امتداد یافته‌اند (شکل ۴). طولی بالغ بر ۱/۵ کیلومتر، سرتاسری بوده و از داخل مخزن سد تا نزدیکی محل تخلیه آب (دره

مطالعات صحرایی

در اولین بررسی‌های به عمل آمده صحرایی که بلافاصله پس از وقوع رویداد فرار آب صورت گرفت، مشخص گردید که آب مخزن سد آرباتان از زیر محور D به صورت زیر سطحی در راستای تقریبی شمال شرق-جنوب غرب و پس از طی حدود ۱/۵ کیلومتر در محل دره شوربولاغی (در فاصله تقریبی یک کیلومتری شرق روستای شیخ‌رجب) از

ضخامت‌های متفاوت از چند سانتی‌متر تا چند ده‌سانتی‌متر دیده می‌شوند.

به نظر می‌رسد در فاصله بین فروچاله‌های موجود و نیز در پیرامون آن‌ها، سطح زمین در پنج یا شش نقطه به شکل دایره یا بیضی نشست کرده باشد. قطر اشکال مذکور تا حدود ۱۵ متر متغیر بوده و میزان نشست آن‌ها به ۵۰-۲۰ سانتی‌متر بالغ می‌شود. محل‌های یادشده را می‌توان به عنوان استعدادهای بالقوه و یا حتی بالفعل پیدایش فروچاله‌های بعدی در نظر گرفت که فعلاً در مرحله اولیه تشکیل هستند [۱].

بررسی‌های صحرایی در ارتباط با دهانه‌های ریزشی (Collapse) نشان می‌دهد که آرایش نقاط ریزشی بر روی یک خط مستقیم نبوده و بر روی قوسی واقع شده‌اند که تابع امتداد شکاف‌های به وجود آمده و به عبارتی تابع جهت امتداد لایه‌های زمین می‌باشد. بخش‌های ریزشی دارای ابعاد مختلف هستند به طوری که قطر دهانه آن‌ها از ۳ تا ۱۲ متر متغیر می‌باشد. عمق قیف‌ها به ۳ تا ۵ متر بالغ می‌گردد و در داخل برخی از آن‌ها سطح آب زیرزمینی قابل رویت است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که از ابتدای پیدایش پدیده فرار آب مخزن و با گذشت زمان، ابعاد فروچاله‌ها به طور دائمی افزایش یافته است.

شوربولاغی) کشیده شده‌اند. فاصله بین شکاف‌های موجود در خط‌الرأس طرفین دره ایجاد شده به حدود ۱۰۰ متر می‌رسد که بیانگر عرض نشست زمین می‌باشد. امتداد شکاف‌های مذکور به صورت خط راست نبوده و در طول خود از داخل مخزن سد تا انتهای مسیر در نزدیکی دره شوربولاغی، دارای انحنا و قوس می‌باشند. انحنای مذکور که در سطح زمین نیز قابل رویت است با امتدادهای E10N در داخل مخزن تا S30E در محل دره شوربولاغی قابل اندازه‌گیری است. به طور کلی می‌توان ادعا نمود که مشخصات امتداد شکاف‌ها در هر نقطه، تابع مشخصات هندسی لایه‌های زمین‌شناسی (جهت و امتداد لایه‌ها) در آن نقطه است. از دیگر عوارض مرتبط با پدیده فرار آب از سد آرباتان تشکیل سه عدد فروچاله تکامل یافته در داخل مخزن و در بالادست محور D است که دهانه هر سه فروچاله یادشده بر روی رخنمون تشکیلات انحلال‌پذیر ژیبس مارن‌دار قرار گرفته‌اند. تشکیلات مذکور از محور سد به سمت داخل مخزن به طول تقریبی ۱۵۰ متر کشیده شده و در راستای موازی محور D، در عرض حدود ۵۰ متر دارای رخنمون هستند. ادامه رخنمون تشکیلات مذکور به سمت درون مخزن به دلیل پوشیده شدن توسط رسوبات داخل آن، پنهان گردیده است. لایه‌های گچی این سازند با



شکل ۳. (تصویر پانورامای جناح راست مخزن) - مشخصات هندسی لایه‌های سنگی منطقه شامل جهت امتداد، جهت شیب و حتی زاویه شیب لایه‌ها از بالا دست پروژه تا پایین دست آن متفاوت می‌باشد.



شکل ۴. موقعیت محورهای سد به همراه محل فرو نشست و مسیر فرار آب بر روی تصویر ماهواره‌ای.

عمق ۳-۴ متری مقطع کانال به طور واضح قابل تشخیص نیست. در این محدوده از کانال، امکان افزایش عمق حفاری جهت دسترسی به مقطع دست نخورده که نمایانگر مشخصات لایه‌ها باشد، به علت ریزش دیواره‌های کانال و بالا بودن سطح آب زیرزمینی میسر نگردید (شکل ۵). با وجود بهم خوردگی و آشفستگی لایه‌ها در این محدوده از کانال، آثار فراوان ژئوپس و ژئوپس انحلال یافته در این بخش از مخزن قابل توجه است. این آثار و شواهد را می‌توان به صورت ادخال و پراکنده و همچنین به صورت نشانه‌های باقی‌مانده از لایه‌بندی اولیه مشاهده نمود. در محدوده ما بین نقاط B' و A'، واقع در جناح راست مخزن، وضعیت استقرار ساختارهای زمین‌شناختی از جمله تناوب لایه‌های مارن ژئوپس‌دار و ژئوپس و انیدریت، امتداد لایه‌ها، شیب و سمت شیب لایه‌ها کاملاً مشخص و واضح در مقطع کانال قابل مشاهده است (شکل ۵). در حالت کلی مشخصات استقرار لایه‌ها در محدوده نقاط A'-B' به صورت 035/50NW قابل اندازه‌گیری است. در این محدوده لایه‌های ژئوپس به صورت لایه‌های مجزا در توالی لایه‌های مارنی به ضخامت‌های متفاوت که گاه به ۸۰ الی ۱۰۰ سانتی‌متر نیز می‌رسد، دیده می‌شوند.

عملیات حفر کانال و مطالعه پروفیل آن

به منظور شناسایی و تعیین مشخصات لایه‌های ژئوپس و مارن‌های ژئوپس‌دار و گسترش این نوع تشکیلات در جناحین سد و داخل مخزن، پیشنهاد حفر کانال یک ترانشه اکتشافی به عمق حدود ۴ متر در تمام عرض مخزن سد به مرحله اجرا در آمد. برداشت‌های صحرائی از وضعیت استقرار لایه‌های زمین‌شناختی به ویژه توالی رخنمون و گسترش لایه‌های ژئوپس در مقطع کانال اطلاعات با ارزشی حاصل آورد. به طور کلی مشخص گردید که لایه‌های ژئوپس و مارن‌های ژئوپس‌دار علیرغم دارا بودن وضعیت‌های زمین ساختاری متفاوت، در غالب طول مقطع کانال حفر شده رخنمون دارند (شکل ۵).

حضور لایه‌های ژئوپس در جناح چپ مخزن به علت ویژگی و رفتار الاستیکی خاص تشکیلات مذکور، متأثر از تکتونیک منطقه و آثار ناشی از تبدیل انیدریت به ژئوپس در هنگام بالا آمدن و هیدراته‌شدن که غالباً منجر به تشکیل لایه‌بندی کاذب ناشی از افزایش حجم می‌گردد که به صورت ناهماهنگ دیده می‌شوند [۴]. می‌توان این وضعیت را از نقطه (A) تا نقطه (B) تعقیب نمود (شکل ۵). از نقطه B تا B' به دلیل تاثیرات ناشی از آبیگری مخزن، سازندهای زمین‌شناختی مقطع کانال کاملاً آشفته و بهم‌خورده بوده و وضعیت استقرار لایه‌ها و توالی آن‌ها در

مطالعات زیرسطحی

پس از انجام بررسی‌های سطحی و به منظور ارزیابی شرایط زیرسطحی محدوده مخزن و پی محور D مطالعات ژئوتکنیکی عمیق نیز در ساختگاه انجام پذیرفته است. اکتشافات زیرسطحی توسط مشاور پروژه و به منظور تعیین عمق لایه‌های مشکل آفرین به انجام رسیده و نتایج آن در مطالعه حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. این مطالعات با حفر گمانه‌های ماشینی در امتداد بالادست و پایین دست محور فوق، بالادست خروجی‌های آب مخزن مشرف به محور D و همچنین در داخل مخزن سد به انجام رسیده است. در مجموع ۱۱ گمانه با عمق حداکثر ۶۰ متر در موقعیت‌های یادشده توسط مشاور پروژه حفاری گردیده است (شکل ۷).

الف) بررسی خواص نفوذپذیری بخش آبرفت

در گمانه‌های مطالعاتی، میزان نفوذپذیری لایه‌های آبرفتی و سنگی اعماق زمین اندازه‌گیری شده است در مجموع تعداد ده مورد آزمایش نفوذپذیری صحرایی لوفران در بخش آبرفتی گمانه‌های فوق به روش بار ثابت (Constant

Head) صورت گرفته است که نتایج آن‌ها در جدول (۱) ارائه شده است. میزان نفوذپذیری مصالح روباره و آبرفتی مخزن سد، در حد نفوذپذیری کم تا نفوذناپذیر اندازه‌گیری شده است که بیش‌ترین مقدار آن مربوط به مقطع ۳-۶ متری گمانه BH2 به میزان $3 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ می‌باشد. آبگذری‌های بیش از 10^{-3} cm/sec (نفوذپذیری‌های متوسط و زیاد)، رویت نشده است. متوسط آبگذری بخش آبرفتی در گمانه‌های محورهای D و E حدود $3/7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ می‌باشد. در امتداد محور (AA')، علیرغم بعد مسافت بین گمانه BH10 و گمانه‌های BH11 و BH12 متوسط ضریب نفوذپذیری در حد $2/8 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ اندازه‌گیری شده است. با توجه به اعداد فوق، رقم آبگذری میانگین برای کل ساختگاه، حدود $2 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ارزیابی می‌شود که در محدوده نفوذپذیری کم واقع می‌گردد. مصالح روباره‌ای، عمدتاً از جنس سیلت و رس بوده و یا در صورت درشت دانه بودن (شن و ماسه‌ای)، توسط اجزای ریزدانه پر شده اند و به همین دلیل میزان نفوذپذیری بخش آبرفتی نیز اندک است.

جدول ۱. نتایج آزمایشات نفوذپذیری لوفران در بخش آبرفتی گمانه‌ها.

موقعیت گمانه‌ها	نام گمانه	تعداد آزمایش	مقطع آزمایش (m)	K (cm/sec)
محورهای قبلی	BH1	۱	۰/۵-۳	$1/2 \times 10^{-5}$
	BH2	۲	۰-۳	$1/1 \times 10^{-4}$
			۳-۶	$3/0 \times 10^{-3}$
	BH4	۱	۰-۳	$8/6 \times 10^{-4}$
	BH6	۱	۰-۳	$2/6 \times 10^{-6}$
	BH7	۱	۰/۵-۳	$2/2 \times 10^{-6}$
محور پیشنهادی AA'	BH11	۲	۰-۳/۲	$1/2 \times 10^{-5}$
			۳/۲-۶	$5/0 \times 10^{-5}$
	BH12	۲	۰-۳	$9/8 \times 10^{-7}$
			۳-۶	$1/0 \times 10^{-4}$

ناخالصی نمک که در معرض انحلال توسط آب‌های زیرسطحی قرار گرفته‌اند، مواردی از نفوذپذیری زیاد (۱۰۰ > Lu) نیز ثبت شده است. از جمله این موارد می‌توان به اعماق ۳۰-۲۵ متر گمانه BH1، ۳۵-۳۰ متر گمانه BH4 و ۳۵-۲۸ متر گمانه BH9 اشاره نمود. منشاء آب‌های زیرزمینی منطقه، عمدتاً آب دریاچه سد می‌باشد. علیرغم نفوذپذیری کم سازندهای آبرفتی حاضر در سطح منطقه و نفوذناپذیری ذاتی سازند ماری ساختگاه، ارتباط آب دریاچه سد با اعماق زیر ۲۵ متر سوال برانگیز است. این مسأله با وجود لایه ضخیم ژیبسی در محور D که با زاویه حدود ۴۰ درجه به سمت محور E شیب دارد توجیه می‌گردد. لایه مذکور نقش رابط بین آب مخزن سد و لایه‌های نمکی موجود در اعماق زمین را ایفا می‌کند. طبیعی است در چنین شرایطی آب زیرزمینی، عمل تخریب و انحلال لایه‌های نمک‌دار را انجام داده و به مرور زمان، سبب تشکیل حفره‌ها و کانال‌های عمیق زیرزمینی در محل انحلال لایه‌های نمکی می‌گردد که علاوه بر گسترش جانبی به موازات محور D، شاهد توسعه آن به سمت پایین دست محور تا نزدیکی محل چشمه‌های آب شور، نیز هستیم. در اثر پیدایش این پدیده‌های زیرزمینی که در اعماق ۲۵ الی ۴۰ متری سطح زمین تکوین یافته‌اند، عوارضی چون فروچاله‌های داخل مخزن، شکاف‌های طویل موازی هم به طول چند کیلومتر که از داخل مخزن سد تا محل چشمه‌های شوردره کشیده شده‌اند، افتادگی و نشست پله‌ای زمین در امتداد شکافهای مذکور، دهانه‌های ریزشی متعدد در پایین دست محور D، پدید آمده‌اند.

مجموعه عوامل فوق موجب گردیده‌اند که به مرور زمان، ضمن شدت یافتن پدیده انحلال نمک در لایه‌های تحتانی زمین، شاهد افزایش وسعت طولی و ازدیاد قطر کانال‌ها (یا تونل‌های) زیرزمینی باشیم. مصالح دهانه‌های ریزشی به داخل کانال‌های یاد شده ریزش نموده و توسط جریان آب زیرزمینی از منطقه خارج شده‌اند. انتقال مصالح خاک و سنگ مارن به پایین دست (تهی‌شدن منطقه) به همراه ریزش سقف کانال‌های عمیق یادشده، نشست زمین در امتداد تونل‌ها، پیدایش چند رشته شکاف طویل موازی هم و نشست پله‌ای در طول شکاف‌ها را توجیه می‌نماید. در نهایت با کنار هم قرار دادن پدیده‌های مذکور، مسئله فرار آب مخزن سد آرباتان قابل تفسیر است (شکل ۶).

ب) بررسی نتایج آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد (SPT)

در بررسی‌های ژئوتکنیکی به روش صحرایی به منظور پی بردن به میزان استحکام و مقاومت لایه‌های آبرفتی، اقدام به انجام آزمایش ضربه و نفوذ استاندارد گردیده است. در حین حفاری و در بخش آبرفتی گمانه‌ها، در تناوب‌های دو متری یا در هر تغییر لایه، یک آزمایش نفوذ استاندارد انجام گردیده و اعداد SPT (N Value) برای آن‌ها محاسبه شده است. در جدول (۲) نتایج آزمایشات مذکور به همراه محاسبات (N Value) برای هر مقطع آزمایش و به حالت میانگین برای هر گمانه آورده شده است. همانگونه که از مندرجات جدول (۲) مشخص است، استحکام صحرایی میانگین مصالح آبرفتی در محورهای D و E در حد خیلی سفت و برای محور پیشنهادی (A.A)، در حد خیلی سفت تا سخت برآورد شده است. بر همین اساس، میانگین استحکام صحرایی مصالح آبرفتی کل ساختگاه در حد خیلی سفت تعیین شده است.

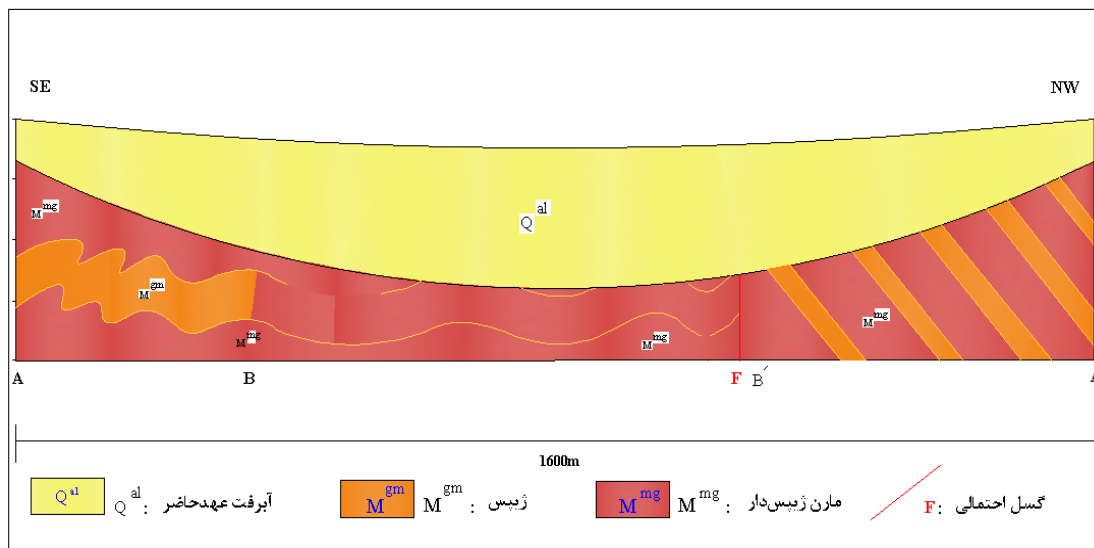
بررسی خواص نفوذپذیری سنگ

در بخش سنگی گمانه‌های فوق نیز، تعداد ۱۱۵ آزمایش نفوذپذیری به منظور سنجش مقدار آبگذری بستر سنگی انجام شده است [۱]. این عملیات عمدتاً با استفاده از مسدود کننده (پکر) و با آب تحت فشار (آزمایش لوژان) و به روش از بالا به پایین و حداکثر در مقاطع پنج متری صورت گرفته است. با توجه به اهمیت وجود ناخالصی نمک با درصدهای مختلف در بین لایه‌های سنگی ماری و نظر به تاثیر زیاد آن بر روی مشخصات توده سنگ از جمله انسجام و نفوذپذیری (فرار آب از طریق مجاری حاصل از انحلال نمک)، ضمن تقسیم‌بندی کلی سنگ کف به دو نوع عمده مارن خالص و مارن نمک‌دار یا نمک مارن‌دار، جنس عمومی زمین در مقابل هر یک از مقاطع آزمایش لوژان درج شده است.

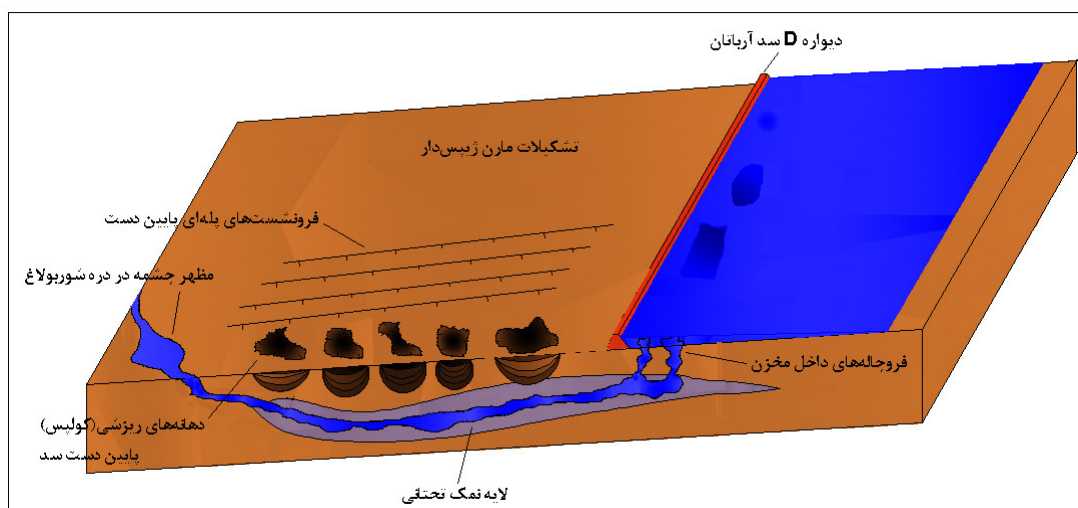
بررسی و مقایسه نتایج آزمایشات نفوذپذیری در سازندهای یاد شده نشان می‌دهد که در شرایط عادی پی سد (خشک و غیر اشباع)، اعداد نفوذپذیری در هر دو جنس زمین، تفاوت چندانی با هم ندارند و عمدتاً در رده نفوذ ناپذیر قرار می‌گیرند. این مسأله حتی در خصوص سنگ نمک خالص که در اعماق برخی از گمانه‌ها مغزه‌گیری شده‌اند نیز صادق است. با این حال، در سازندهای سنگ‌کف حاوی

نمک پس از تشکیل در حوضه رسوبی، می‌تواند تحت تاثیر وزن لایه‌های فوقانی و تنش‌های تکتونیکی به محیط‌های کم فشار مهاجرت نموده و در آن‌جا تجمع نماید. لذا به تدریج ضخامت لایه نمک در یک قسمت پر فشار کاسته شده و در بخش‌های کم فشار بر ضخامت آن افزوده می‌گردد [۹ و ۷]. مهاجرت نمک می‌تواند به شکل توده‌های و حجیم در ابعاد بزرگ صورت بگیرد و یا به صورت کم حجم در فضاهای بین لایه‌ای و حتی در داخل شکاف‌های کششی سنگ‌ها به شکل دایک نفوذ نماید [۱۱].

همان‌گونه که از نمونه‌های به دست آمده از گمانه‌های مطالعاتی مشخص است، لایه نمکی در اکثریت قریب به اتفاق گمانه‌های حفر شده قابل مشاهده هستند. ضخامت این لایه در گمانه‌های مختلف، یکسان نیست. در گمانه BH5 با کمترین ضخامت (حدود ۷۵ سانتی‌متر) و در گمانه BH3 با بیشترین ضخامت (حدود ۱۵ متر) شناسایی شده است. تغییر ضخامت لایه نمکی در بخش‌های مختلف، ناشی از ماهیت نمک و خاصیت شکل‌پذیری آن به دلیل مهاجرت بین لایه‌های زمین است. معمولا



شکل ۵. مقطع ترانسه اکتشافی حفر شده در داخل مخزن سد آرباتان.



شکل ۶. مقطع شماتیک از نحوه فرار آب از مخزن سد آرباتان.



شکل ۷. موقعیت قرارگیری گمانه‌های مطالعاتی نسبت به محور D سد آرباتان.

جدول ۲. نتایج ضربات نفوذ استاندارد در بخش آبرفتی.

موقعیت	گمانه	تعداد آزمایش	عمق آزمایش (m)	تعداد ضربات SPT	N SPT	متوسط N SPT	توصیف استحکام
محورهای قبلی	BH1	۱	۲-۲/۴۵	۴-۷-۱۳	۲۰	۲۰	خیلی سفت
	BH2	۲	۲-۲/۴۵	۱۱-۱۲-۱۳	۲۵	۲۱	خیلی سفت
				۱۴-۸-۹	۱۷		
	BH4	۱	۲-۲/۴۵	۷-۱۰-۱۳	۲۳	۲۳	خیلی سفت
	BH6	۱	۲-۲/۴۵	۱۲-۱۹-۲۲	۴۱	۴۱	سخت
BH7	۱	۲-۲/۴۵	۱۰-۱۲-۱۵	۲۷	۲۷	خیلی سفت	
محور پیشنهادی AA'	BH11	۲	۲-۲/۴۵	۳-۶-۱۰	۱۶	۱۷	خیلی سفت
				۴/۲-۴/۶۵	۱۸		
	BH12	۲	۲-۲/۴۵	۱۱-۱۴-۱۹	۳۳	۳۳	سخت
				۴-۴/۴۵	۳۲		

است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که مخزن و محور سد آرباتان بر روی تناوبی از سازندهای رسوبی متشکل از مارن‌های ژئوپس‌دار و گاه با میان لایه‌های خالص ژئوپس قرار گرفته است. نمونه‌های به دست آمده از حفاری‌های ژئوتکنیکی، بیانگر وجود یک لایه نمکی در زیر سازندهای مارنی و ژئوپسی است. لایه نمکی مذکور به دلیل ویژگی‌های الاستیکی خود در اثر اعمال تنش‌های تکتونیکی که منجر به چین‌خوردگی سازندهای تخریبی-

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی دلایل فرار آب از سد مخزنی آرباتان واقع در استان آذربایجان شرقی هدف اصلی این تحقیق بوده است. بدین منظور بررسی‌های صحرایی و ژئوتکنیکی نسبتاً کاملی در محدوده ساختگاه به انجام رسیده است. حفاری‌های ژئوتکنیکی این پروژه توسط مهندسین مشاورانو به انجام رسیده که نتایج آن با بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی در قالب تحقیق حاضر تلفیق و مورد استفاده قرار گرفته

- [۳] سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۵) شرح نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ زمین‌شناسی خواجه، تهران، ایران.
- [۴] عبادی، م. ع (۱۳۹۱) بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی جهت تعیین علت فرار آب از سد آرباتان، پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه زمین‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر.
- [۵] مرادی، غ.، عباس‌نژاد، ع (۱۳۸۹) بسترهای ژئوسپی و مطالعه موردی سد قیصرق سراب، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد.
- [۶] معماریان، ح (۱۳۸۷) زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- [7] Gutierrez, F., Cooper, A.H (2002) Evaporate dissolution subsidence in the historical city of Calatayud, Spain: damage appraisal, mitigation and prevention. *Natural Hazards*, 25, p: 259-288.
- [8] James, A.N. and Lupton, A.R (1978) Gypsum and anhydrite in foundations of hydraulic structures, *Geotechnique*: 3 (28), p: 249- 272.
- [9] James, A.N (1992) Soluble materials in civil engineering, Ellis Horwood Ltd., England.
- [10] Julie R. Kelley, et al (2007) Geologic Setting of Musol Dam and Its Engineering Implications, US Army Engineer Research and Development Center.
- [11] Vendeville, B.C. and Jackson, M.P.A (1992) The rise of diapirs during thin-skinned extension. *Mar. Pet. Geol.*, 9, p: 354-371.
- [12] Von Thun, J. L. (1990) The Quail Creek Dike Failure, Dam Foundation Engineering, Tenth Annual USCOLD Lecture, New Orleans, Louisiana, United States Committee on Large Dams.

تبخیری منطقه شده است به مناطق کم فشار مهاجرت نموده است [۱۲]. از اینرو ضخامت آن در بخش‌های مختلف ساختگاه متغیر است. آب مخزن از طریق انحلال لایه‌های ژئوسپ خود را به لایه نمکی زیرین رسانده و با توجه به قابلیت انحلال بسیار بالای نمک، با ایجاد کانال‌های انحلالی به طرف پایین دست سد حرکت کرده است. مسیر حرکت آب منطبق بر امتداد لایه‌بندی عمومی تشکیلات زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی بوده است. این امر به مرور زمان افزایش یافته و با انحلال بیش‌تر لایه‌های زیرین، سطح زمین نیز در همین امتداد نشست کرده و با ریزش سقف کانال‌های انحلالی، فروچاله‌های متعددی در امتداد نشت آب تشکیل یافته است. بررسی عکس‌های هوایی منطقه و برداشت‌های صحرایی بیانگر نقش ناچیز گسل‌های تکتونیک در وقوع پدیده فرا رآب از مخزن سد آرباتان است.

در پایان ذکر این نکته ضروری است که در کشور ما پهنه‌های وسیعی از نهشته‌های تبخیری وجود دارند. این نوع سازندها در علم زمین‌شناسی مهندسی در گروه سازندهای مشکل آفرین طبقه‌بندی می‌شوند. از این رو، اجرای پروژه‌های آبی در این گونه مناطق مستلزم شناسایی دقیق این نوع سازندها و پیش بینی تمهیدات مناسب برای جلوگیری از خسارت‌های احتمالی است. امری که متأسفانه در زمان مطالعات مربوط به این سد نادیده گرفته شده است.

قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند که از کمک‌های فکری و عملی مدیریت آب و خاک سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی و کارشناسان شرکت مهندسی مشاور آنو خصوصاً از آقایان مهندس دباغیان، مهندس سجودی و مهندس نسودی صمیمانه تشکر نمایند.

منابع

- [۱] آنو، شرکت مهندسی مشاور (۱۳۹۰) گزارش مطالعات پروژه علاج بخشی سد آرباتان، تبریز.
- [۲] سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی (۱۳۸۲) گزارشات تکمیلی طرح تامین آب، آبرسانی، توزیع آب و عمران اراضی آرباتان هریس.