

## ارزیابی امکان احیاء مخزن سد آرباتان هریس با اجرای پتوی رسی

میرمحسن موسوی<sup>۱</sup>، محمدرضا ملک پور<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۹/۲۵

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه عمران، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران

۲- استادیار و عضو هیات علمی دانشگاه، گروه عمران، واحد آذرشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، آذرشهر، ایران

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mreza.malekpoor@yahoo.com

### چکیده

نشست آب از بدنه و مخزن سد، یکی از مشکلات جدی در احداث آنها می باشد که علاوه بر خسارت های مالی، می تواند تبعات منفی زیست محیطی و اجتماعی زیادی نیز به همراه داشته باشد. سد آرباتان شهرستان هریس، یکی از سد هایی است که در حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع شده است و به دلیل عدم انجام مطالعات دقیق، دچار پدیده نشست شده و نهایتاً غیرقابل استفاده گردیده است. بررسی محل احداث سد نشان می دهد که مخزن آن بر روی رسوبات تبخیری قرار گرفته و نفوذ آب باعث ایجاد تعدادی فروچاله و کانال های فرار آب در لایه های زیرین شده و در نهایت موجب تخلیه آب سد گردیده است. هدف از این مقاله، امکان سنجی فنی و اقتصادی احیای دوباره این سد با استفاده از پتوی رسی برای پوشش کف مخزن آن می باشد. برای این منظور، پس از شناخت خصوصیات زیرسطحی مخزن، مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار SEEP/W انجام می شود. همچنین با استفاده از روش بنت، میزان تراوش آب، در حالتی که سد دارای پتوی رسی می باشد، تعیین می گردد. بررسی نتایج حاصل از دو روش عددی و بنت نشان می دهد که مقدار تراوش آب از مخزن سد پوشیده با پتوی رسی، به ترتیب برابر ۲۳۵۶۹ و ۵۸۴۰۰۰ مترمکعب در مدت ۱۸۰ روز خواهد بود. بنابراین با وجود مقدار زیاد تراوش، کارآیی این روش برای احیای این سد مفید و راهگشا خواهد بود. بطور کلی این حجم نشست ممکن است منجر به گسیختگی دوباره بدنه سد و پتوی رسی گردد.

کلمات کلیدی: سد آرباتان، مدلسازی عددی، روش بنت، پتوی رسی، اقتصادی

## Feasibility Study of Arbatan Dam Reservoir Restoration by Clay Blanket

M. M. Moosavi<sup>1</sup>, M. R. Malekpoor<sup>2\*</sup>

Received: 22 September 2016 Accepted: 16 December 2017

1-M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Azarshahr Branch, Islamic Azad University, Azarshahr, Iran

2- Assist. Prof., Department of Civil Engineering, Azarshahr Branch, Islamic Azad University, Azarshahr, Iran

\* Corresponding Author, Email: mreza.malekpoor@yahoo.com

### Abstract

Water leakage from dam reservoir and body is one of the most concerning issues in establishment of such large projects, which in addition to wasting costs brings lots of negative social and environmental consequences. One of the dams of Urmia lake catchment area, which suffers leakage phenomenon being unusable, consequently, due to not doing exact geotechnical studies is Arbatan reservoir of Heris town. Investigation of the dam establishment site shows that the dam reservoir has been placed on evaporative sediments and water penetration has resulted in formation of some sinkholes and water escape channels in the lower substrates and the dam discharge. So the aim of the present research study is to evaluate use of clay blanket for covering the reservoir floor and its restoration. To do so, after identifying subterranean features of the reservoir using SEEP/W numerical model and bent method, leakage amount of water was determined under clay blanket application state. Results of the two numerical and bent methods indicated that leakage amount of the dam reservoir covered with clay blanket are 23569 and 584000 cubic meter, respectively, within 180 days. So, with huge amount of leakage, efficiency of the method will not be effective and a good solution for the dam restoration. In general, such amount of leakage might result in repeated rapture in the dam body and clay blanket. So under such conditions, success of every investment related to this dam will confront high level of uncertainty.

**Key words:** numerical model, Bent method, leakage, sinkhole, Economic

### مقدمه

مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این وجود، در تعداد قابل توجهی از آنها، علیرغم صرف هزینه ای بیش از هزینه احداث اولیه سد، پس از چند سال، سد دچار مشکل گردیده و خسارت کلانی بر اقتصاد وارد می‌شود. در نقاط مختلف جهان سدهای زیادی روی سازندهای کارستیک و تبخیری ساخته شده اند. در مقایسه با سازندهای کارستیک، گزارشات و منابع کمی در مورد

در دهه های اخیر، تعدادی از سدهای خاکی در کشور بدون در نظر گرفتن ملاحظات فنی احداث شده اند و به همین دلیل، برخی از آنها به دلایل مختلف، از جمله: وجود مشکل در ساختگاه، دارا بودن نشت آب، فرار بیش از حد آب و غیره، از حیز انتفاع خارج شده و امکان بهره‌برداری مجدد از آنها در هاله‌ای از ابهام قرار گرفته است. برای ترمیم این سدها راهکارهای مختلفی

و در سال ۲۰۰۹ آبیگری شده است. این سد علیرغم اتخاذ تمام تدابیر لازم از قبیل اجرای دیوار آب بند، پرده تزریق، بلانکت رسی و غیره از ناحیه تکیه‌گاه سمت چپ داخل مخزن با ایجاد تعدادی فروچاله دچار افزایش نشست شده است.

پروژه‌های سدسازی در ایران نیز از چنین آسیب‌هایی مصون نبوده و مواردی نظیر سد لار به علت احداث در مناطق کارستی تا حدی ناموفق بوده و در مدت ۳۵ سال اخیر برای کاهش فشار هیدرواستاتیکی آب مخزن سد و ممانعت از توسعه مسیرهای فرار آب، هیچ‌گاه بیش از یک‌سوم ظرفیت آن پر نشده است. مجاری رودخانه ماندنی در تشکیلات کارستی این سد به وجود آمده است که این مجاری از چند ده متری زیر پی بدنه سد عبور کرده و علیرغم قرار دادن بلوک‌های چندین متر مکعبی با آسانسور در این مجاری، میزان جریان خروجی کاهش نیافته است. سد مارون نیز دارای مشکل نشست و فرار آب بوده و به علت وجود سازندهای آسماری و سنگ‌های کربناته در تکیه‌گاه و شالوده، نیازمند بررسی دقیق برای اطمینان از عدم آسیب‌پذیری بیشتر می‌باشد (وفائیان ۱۳۹۴). سد بزرگ گتوند در استان خوزستان نیز از جمله سدهایی است که بر روی نهشته‌های تبخیری احداث و دارای مشکلات زیادی است که از جمله آن انحلال نمک است (گوتیرز و همکاران ۲۰۱۴).

استان آذربایجان شرقی یکی از مناطق پیشرو در صنعت سدسازی در دهه‌های اخیر بوده است. در تعدادی از سدهای احداث شده در این استان، نظیر سد قیصرق سراب (مرادی و عباس نژاد ۱۳۸۹)، سد برنلیق حسین خان، سد سهند و سد آرباتان شهرستان هریس، وجود تشکیلات قابل انحلال در آب باعث بروز مشکل نشست و فرار آب شده است. سد آرباتان در اثر نشست یکی از محورهای آن و ایجاد تعدادی فروچاله در داخل مخزن، با پدیده نشست و فرار آب مواجه و پس از ایجاد کانال‌های زیرزمینی، تخلیه و از حیز انتفاع خارج شده است. بلا تکلیف ماندن سد آرباتان در مدت ۸ سال گذشته، علاوه بر تبعات زیست محیطی و عدم استفاده

سازندهای تبخیری در مخازن سدها در دسترس می‌باشد (گوتیرز و همکاران ۲۰۱۴). منطقه غرب آمریکا از جمله نقاطی است که تشکیلات زمین‌شناسی آن حاوی مواد معدنی قابل حل در آب می‌باشد و سدهای زیادی با موفقیت در این مناطق احداث شده است. برای مثال سد کلرادو بر روی چنین تشکیلات مشکل داری احداث گردیده است (گوتیرز و همکاران ۲۰۱۴). از جمله سدهای مسئله‌دار دیگر، سد موصل عراق می‌باشد. این سد از نظر تشکیلات زمین‌شناسی در روی لایه‌های متناوبی از ژیبس، انیدرید، مارن و لای سنگ‌قرار

گرفته است (سیساکیان و همکاران ۲۰۱۴). به حداقل رساندن نشست از چنین ساختگاه‌هایی می‌تواند یکی از روش‌های جلوگیری از پدیده انحلال لایه‌های زیر سطحی مخزن باشد (گوزینا و همکاران ۱۹۹۱). سدهای سیویتلا، لیزیانا و ویلتابرا در ایتالیا، سدهای کوبر، مونتینجاقن و کانالز در اسپانیا، سد کپلی در هند، سد می در ترکیه و سد پیردیکاس در یونان به علت فرار آب از سنگ‌های آهکی شالوده، تکیه‌گاه یا مخزن آنها ناموفق بوده و امکان آبیگری و استفاده اقتصادی از آنها فراهم نشده است (وفائیان ۱۳۹۴). همچنین تا به حال ۳۴ سد مشکل‌دار وابسته به کارست‌های گچی احداث شده که ۱۲ مورد آن با شکست فاجعه‌بار مواجه شده است (گوتیرز و همکاران ۲۰۱۴). از جمله سدهای مشکل‌دار که علیرغم اتخاذ تدابیر لازم و استفاده از جدیدترین تکنولوژی روز در دهه‌ی اول قرن ۲۱ احداث شده است؛

سد لالوتتای اسپانیا می‌باشد. گوتیرز و همکاران (۲۰۱۴) گزارش نموده‌اند که این سد از لحاظ فنی دارای یک ساختگاه منحصر به فرد می‌باشد. این سد از جمله سدهای نادر در جهان است که بر روی یک فروچاله<sup>۴</sup> کارستی ناشی از انحلال رسوبات تبخیری ساخته شده

<sup>۱</sup>-Gypsum

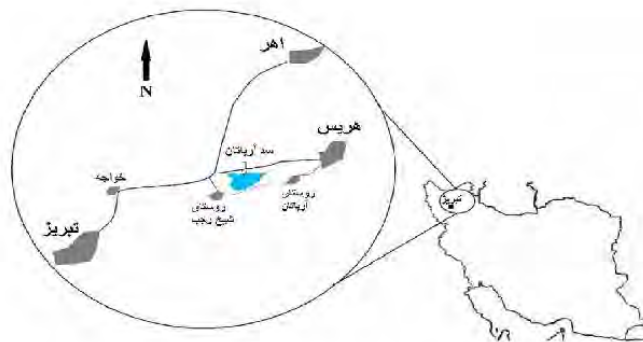
<sup>۲</sup>-Marl

<sup>۳</sup>-Siltstone

4-Sinkhole

باشد. لذا در این مطالعه به امکان احیاء دوباره سد آرباتان با اجرای بلانکت رسی پرداخت شده و میزان نفوذپذیری آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در پایان با مد نظر قرار دادن وضعیت نفوذپذیری مخزن، پی و جنس ساختگاه، در خصوص سرمایه گذاری یا عدم سرمایه گذاری برای احیاء آن نتیجه گیری می‌شود.

۳۸° شمالی می‌باشد. موقعیت جغرافیایی سد آرباتان در کشور ایران و استان آذربایجان شرقی، در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- محل احداث سد آرباتان در کشور ایران و استان آذربایجان شرقی

(محور D) در سال ۱۳۸۸، مخزن کاملاً تخلیه و به جهت زیاد بودن فرار آب، امکان آبیگری مجدد آن میسر نگردید. پلان و مسیر فرار آب در زمان پر بودن مخزن سد، در شکل ۲ نشان شده است. در شکل ۲ پلان سد و محل فرار آب و در شکل ۳، نشست محور D نشان داده شده است. میزان این نشست حدود ۳ متر می‌باشد.

از منابع و پتانسیل‌های محل، باعث ایجاد یاس و ناامیدی در میان مردم منطقه گردیده است که برای جلوگیری از این قبیل ناهنجاری‌ها، تعیین تکلیف این سد، در سریع‌ترین زمان ممکن، ضروری به نظر می‌رسد. یکی از راهکارهای متداول برای ممانعت از نفوذ آب به داخل لایه‌های زیرین مخزن، استفاده از پتوی رسی می‌-

## مواد و روش‌ها

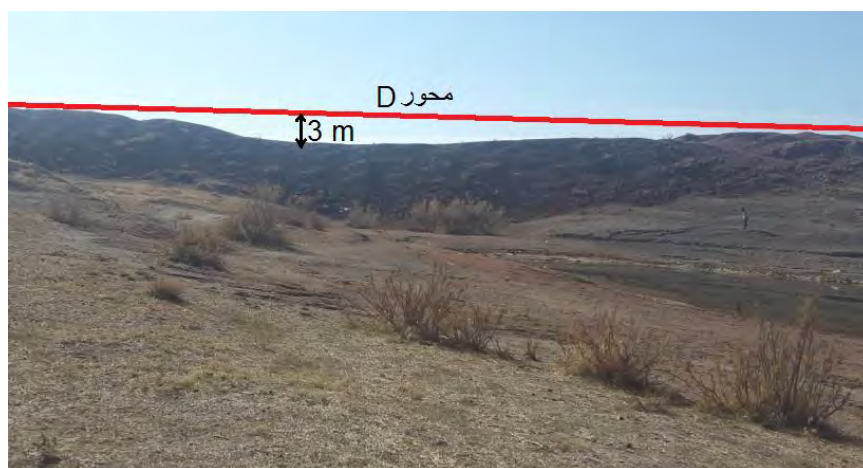
### موقعیت سد آرباتان

سد آرباتان در شمال غرب کشور و در ۵۰ کیلومتری شمالشرق تبریز واقع شده است. این سد دارای طول و عرض جغرافیایی بترتیب "۵۲'۵۴" ۴۶° شرقی و "۴۴'۱۰"

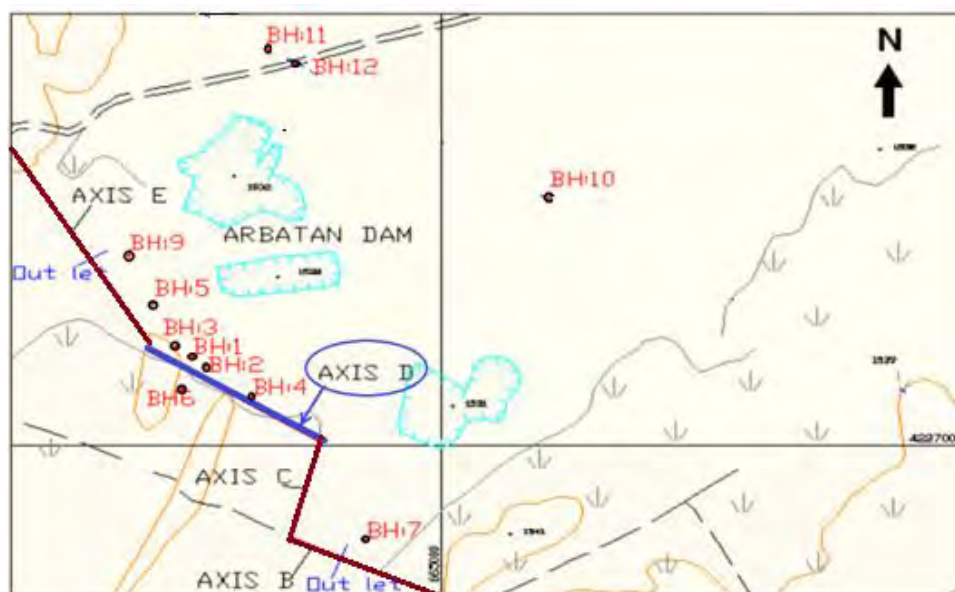
مطالعات اولیه در خصوص این سد در سال ۱۳۶۳ توسط اداره کل کشاورزی استان آذربایجان شرقی آغاز و عملیات اجرایی اولیه آن در همان سال شروع شد. پس از مدتی توقف در عملیات اجرایی به دلایل فنی، مجدداً عملیات اجرایی آن در سال ۱۳۷۲ شروع و در سال ۱۳۸۱ خاتمه یافته و آبیگری سد در همین سال انجام گرفت. پس از شروع آبیگری، نشست و فرار آب از مخزن سد پدیدار شده و با نشست یکی از محورهای آن



شکل ۲- موقعیت سد آرباتان، محورها و مسیر تخلیه آب آن



شکل ۳- نمایی از میزان نشست محور D در سد آرباتان



شکل ۴- موقعیت قرار گیری گمانه‌های مطالعاتی نسبت به محور نشست کرده D

## مطالعات انجام شده

## گمانه زنی اکتشافی

برای تعیین ابعاد هندسی این سد و گستره زیرسطحی آن و همچنین به منظور شناخت کامل ماهیت پدیده فرار آب، تعداد ۱۱ عدد گمانه اکتشافی در پایین-دست (گمانه BH<sub>6</sub>) و بالادست (سایر گمانه ها به جز BH<sub>6</sub>) محور D حفر گردید. موقعیت گمانه‌های اکتشافی و مختصات مکانی آنها به ترتیب در شکل ۴ و جدول ۱ آورده شده است.

عمق گمانه‌ها از ۵۰ تا ۶۵ متر متغیر بوده و پس از حفر آنها، ضخامت آبرفت کف مخزن تعیین گردیده است. نفوذپذیری کف مخزن نیز در محل هفت گمانه حفر شده، در لایه‌های مختلف خاک، اندازه‌گیری شده است. برای تعیین نفوذپذیری، تعداد ۱۱۵ آزمایش نفوذپذیری انجام شده است که از این تعداد آزمایش، ۱۰۸ مورد به روش لوژان و ۷ مورد دیگر به دلیل عدم امکان نصب پکر، به روش لوفران صورت گرفته است.

جدول ۱- مختصات گمانه‌های اکتشافی حفر شده در بستر مخزن سد

مختصات جغرافیایی		عمق نهایی		
X	Y	گمانه	نام گمانه	ردیف
۶۶۴۵۸۶	۴۲۲۷۱۸۰	۶۵	BH <sub>1</sub>	۱
۶۶۴۶۰۹	۴۲۲۷۱۶۰	۶۰	BH <sub>2</sub>	۲
۶۶۴۵۶۰	۴۲۲۷۲۰۰	۶۰	BH <sub>3</sub>	۳
۶۶۴۶۸۶	۴۲۲۷۰۹۹	۵۰	BH <sub>4</sub>	۴
۶۶۴۵۲۰	۴۲۲۷۲۸۹	۵۰	BH <sub>5</sub>	۵
۶۶۴۵۶۹	۴۲۲۷۱۱۴	۵۰	BH <sub>6</sub>	۶
۶۶۴۸۷۲	۴۲۲۷۸۰۸	۵۰	BH <sub>7</sub>	۷
۶۶۴۴۸۰	۴۲۲۷۳۸۶	۵۰	BH <sub>9</sub>	۸
۶۶۴۱۷۶	۴۲۲۷۵۰۷	۶۰	BH <sub>10</sub>	۹
۶۶۴۷۱۴	۴۲۲۷۸۰۶	۵۰	BH <sub>11</sub>	۱۰
۶۶۴۷۵۸	۴۲۲۷۷۸۰	۵۷	BH <sub>12</sub>	۱۱

## مطالعات ژئوفیزیکی

برای تکمیل مطالعات زیرسطحی و شناخت بهتر مناطق انحلال یافته، از مطالعات ژئوفیزیکی به روش لرزه-نگاری شکست مرزی، استفاده شده است. با استفاده از این روش، ناهنجاری‌های ناشی از انحلال لایه‌های ژئوپس و نمک که به صورت میان لایه‌هایی در بین رسوبات مارنی درون مخزن سد آرباتان قرار گرفته است، شناسایی شده است. موقعیت خطوط لرزه‌نگاری

انجام شده در داخل مخزن سد در شکل ۵ آورده شده است.

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود برای انجام مطالعات لرزه نگاری تعداد ۶ خط مبنا در نظر گرفته شده است و ۳۸ پروفیل که تعدادی از آنها در شکل جانمایی شده اند، با چشمه‌های انرژی انفجاری و مکانیکی به ترتیب با فواصل ژئوفن ۵ و ۱۰ متری، حفر گردیده‌اند.



شکل ۵- موقعیت پروفیل‌های لرزه‌نگاری انجام شده در داخل مخزن سد آرباتان

ارتفاع آب پشت سد، طول معادل بلانکت رسی بر حسب متر و ضخامت هسته در پی سد می‌باشد. برای مطالعه میزان تراوش آب از بدنه و پی سد، علاوه بر روش بنت، از مدل‌سازی عددی اجزای محدود با استفاده از نرم افزار مدل SEEP/W از مجموعه نرم افزارهای Geo/office 2012 استفاده گردیده است. در این روش، یک مدل هندسی از مقاطع عرضی دو بعدی، شامل مجموعه بدنه سد و بخشی از پی آن، در نرم افزار رسم گردیده و سپس لایه‌بندی پی که از نتایج کاوش‌های زیرزمینی و مطالعات ژئوفیزیک استخراج شده در مدل وارد و مقادیر نفوذپذیری به مصالح اختصاص داده شده است. پس از رسم مدل و اختصاص مشخصات مصالح، در مرحله بعد با در نظر گرفتن شرایط مرزی جریان و هد آب در نقاط معلوم، معادلات جریان آب در مدل به روش اجزای محدود حل شده و حجم فرار آب تخمین زده شده است. شرایط مرزی برای قسمت پایین دست سد، تراز سطح زمین و در بالادست حداکثر تراز آب نرمال دریاچه در نظر گرفته شده است. مقدار نفوذپذیری اجزای بدنه سد، شامل هسته، پوسته و فیلترها از اطلاعات سایر پروژه-

#### ارزیابی اجرای بلانکت رسی

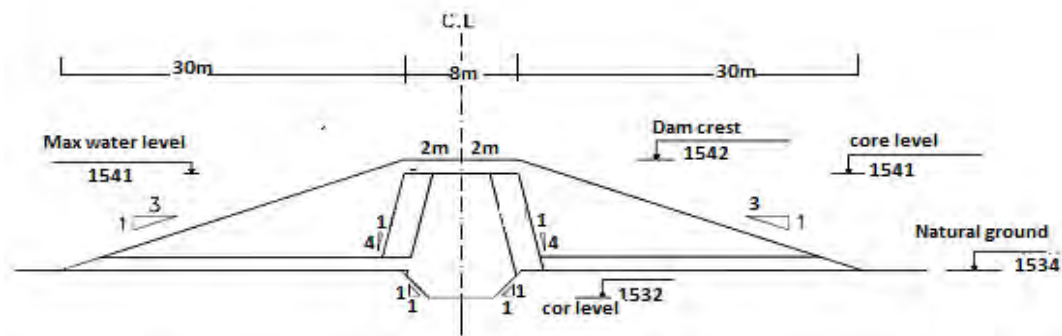
پس از شناخت وضعیت زیر مخزن و ساختگاه سد، امکان استفاده از بلانکت رسی در بستر، به عنوان یکی از راهکارهای احیاء سد، به دو روش دستی و مدل-سازی عددی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. همان طور که قبلاً نیز ذکر شده، از روش بنت برای محاسبات دستی استفاده شده است. به این صورت که یک لایه رسی با نفوذپذیری بسیار کم بعنوان پوشش بستر در نظر گرفته شده و میزان آب تراوش یافته از آن برآورد گردیده است. در این محاسبه ارتفاع آب ۷ متر، ضخامت پتوی رسی ۹۰ سانتی‌متر، ضریب نفوذپذیری بلانکت و ضریب نفوذپذیری پی به ترتیب  $10^{-6}$  و  $10^{-4}$  متر بر ثانیه و ضخامت لایه پی ۲۰ متر در نظر گرفته شده و از طریق رابطه زیر میزان تراوش محاسبه گردیده است.

$$q = k_f \cdot z_f \times \frac{H}{x_r + x_d} \quad [1]$$

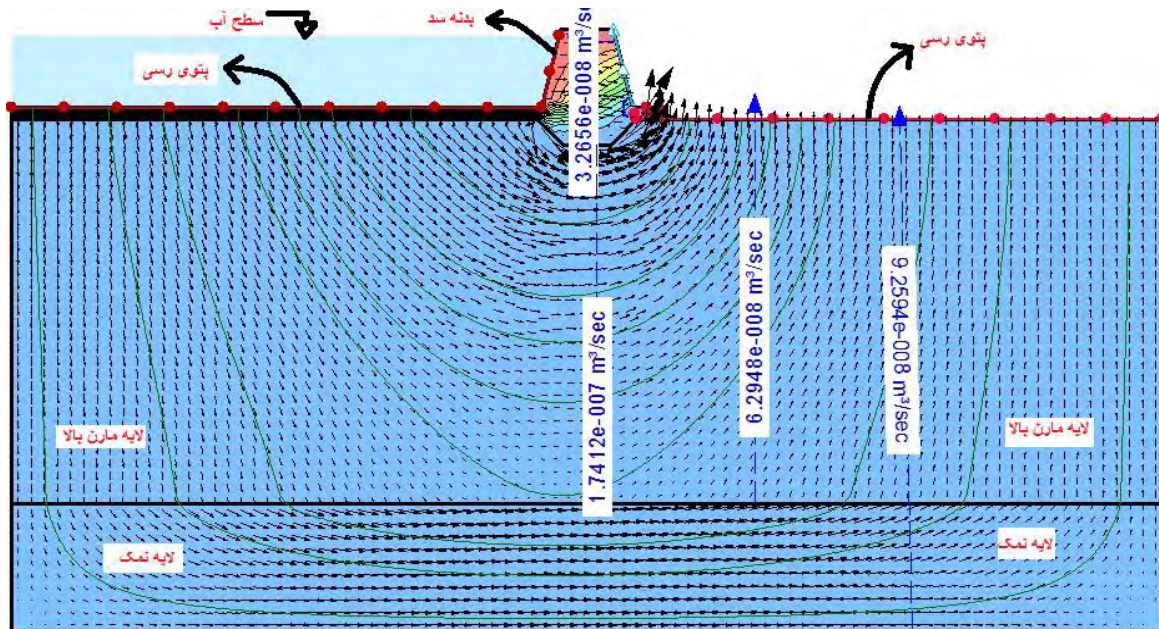
در رابطه فوق؛  $q$  میزان تراوش بر حسب مترمکعب بر ثانیه در متر،  $x_r$ ،  $H$ ،  $z_f$ ،  $k_f$  و  $x_d$  به ترتیب ضریب نفوذپذیری پی، ضخامت پی،

نمایش داده شده است. شکل ۸ مدل ترواش آب از بدنه و لایه‌های پی سد، شامل پتوی رسی، لایه مارن فوقانی و لایه نمک را نشان می‌دهد.

های مشابه در منطقه استخراج گردیده است و لایه‌های تشکیل دهنده زمین نیز با استفاده از نتایج آزمایش‌های برجا تعیین شده است. در شکل ۶ مقطع دو بعدی سد



شکل ۶- برش عرضی بدنه سد آرباتان در مدل اجزاء محدود



شکل ۷- دبی ترواش یافته از بدنه و پی سد آرباتان در صورت اجرای پتوی رسی کف مخزن

فروچاله‌های ایجاد شده، آبرفت در اثر آبشستگی از بین رفته است.

جهت شناخت بیشتر پدیده‌های زیرزمینی و پی بردن به ماهیت و مشخصات فیزیکی و هندسی مخزن و ساختگاه سد، با استفاده از نتایج حفاری‌های ژئوتکنیک و جمع‌آوری اطلاعات زیرسطحی گمانه‌ها، اقدام به رسم برش‌های زیرسطحی از طریق درونبایی و اطلاعات لاگ گمانه‌ها شده است. این مقاطع به موازات محورهای  $D$  و  $E$  و در جهت عمود بر محور  $D$  و در وسط مخزن سد ترسیم گردیده است. مقاطع زمین

## نتایج و بحث

### مطالعات میدانی

برای شناسایی توالی لایه‌های زیرزمین، نتایج گمانه‌های حفر شده تحلیل شدند. در جدول ۲، ضخامت سنگ بستر و لایه آبرفتی بستر سد در ۱۱ مورد گمانه‌ی اکتشافی آورده شده است. از اطلاعات گمانه شماره ۸، به دلیل دست‌خورده بودن نمونه‌ها استفاده نشده است. در محل واقع شدن گمانه  $BH_3$ ، ضخامت آبرفت برابر صفر می‌باشد که نشان می‌دهد موقع تخلیه آب از طریق



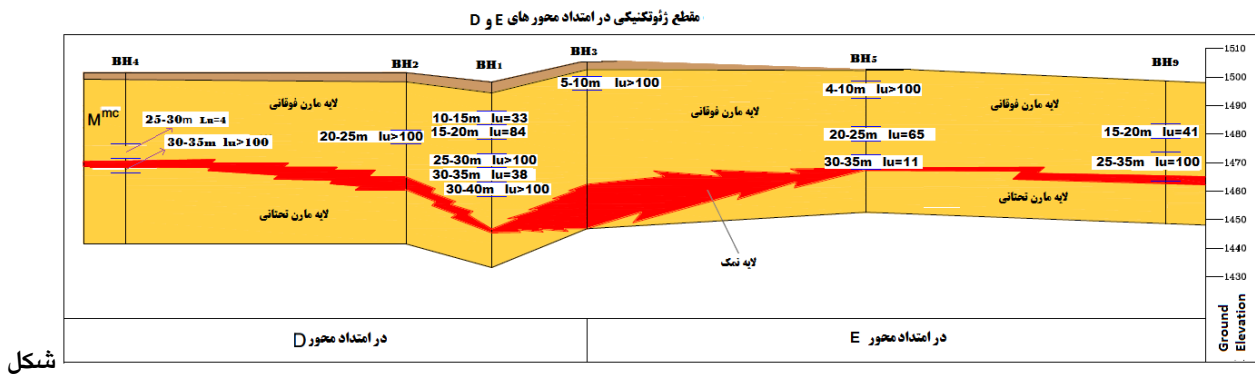
لایه‌های ژیبسی، سنگ نمک به ضخامت ۰/۷۵ الی ۱۵ متر و لایه مارن تحتانی می باشد. شکل ۸ نشان می دهد که حداقل ضخامت لایه نمک مربوط به گمانه  $BH_5$  با ضخامت حدود ۰/۷۵ متر و بیشترین آن مربوط به گمانه  $BH_3$  حدود ۱۵ متر می باشد.

شناسی رسم شده در شکل‌های ۸ و ۹ نشان داده شده است. برای ترسیم این پروفیل ها از نتایج آزمون های آزمایشگاهی نمونه‌ها نیز استفاده شده است. بررسی نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که توالی لایه‌های ساختمانی سد به ترتیب از بالا به پایین شامل رسوبات مخزن به ضخامت ۱۰ الی ۱۵ متر، مارن فوقانی با میان

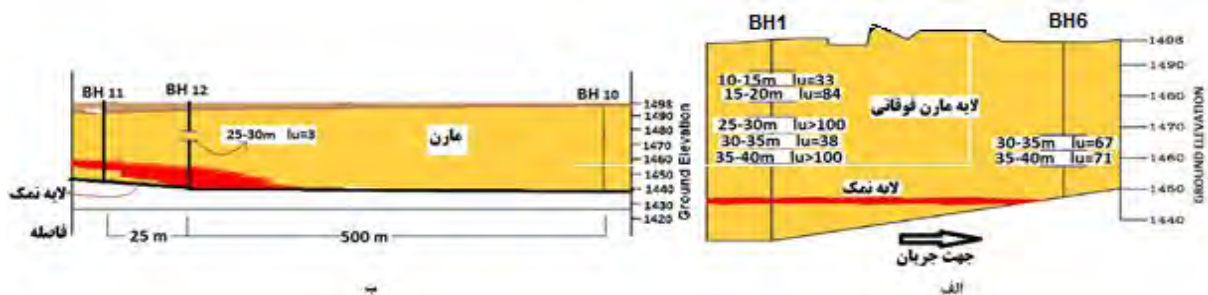
محل گمانه‌های اکتشافی

جدول ۲- ضخامت سنگ بستر و لایه آبرفتی بستر سد در

نام گمانه	$BH_1$	$BH_2$	$BH_3$	$BH_4$	$BH_5$	$BH_6$	$BH_7$	$BH_9$	$BH_{10}$	$BH_{11}$	$BH_{12}$
ضخامت آبرفت (m)	۳/۸	۴/۷	۰	۲/۴	۰/۳	۳/۲	۴	۰/۲	۰/۴	۶	۴/۲
ضخامت سنگ بستر (m)	۶۱/۲	۵۵/۳	۶۰	۴۷/۶	۴۹/۴	۴۶/۸	۴۶	۴۹/۸	۵۹/۶	۴۶	۵۲/۸



۸-مقطع طولی زمین شناسی در امتداد محورهای D و E



شکل ۹-الف) مقطع ژئوتکنیکی عمود بر محور D (ب) گمانه‌های حفر شده در داخل مخزن

بررسی این شکل نشان می‌دهد که وضعیت انحنای لایه-ی نمک از توپوگرافی سطح زمین پیروی می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که قبل از پدیده انحلال و فرونشست زمین، لایه نمک و سطح زمین به صورت

افت تراز موجود در بین گمانه‌های  $BH_2$  و  $BH_3$  به مرکزیت  $BH_1$  در شکل ۸ (که در موقعیت نشست زمین در محور معیوب حفر شده است) می‌تواند ناشی از انحلال نمک و فرونشست زمین در این محدوده باشد.

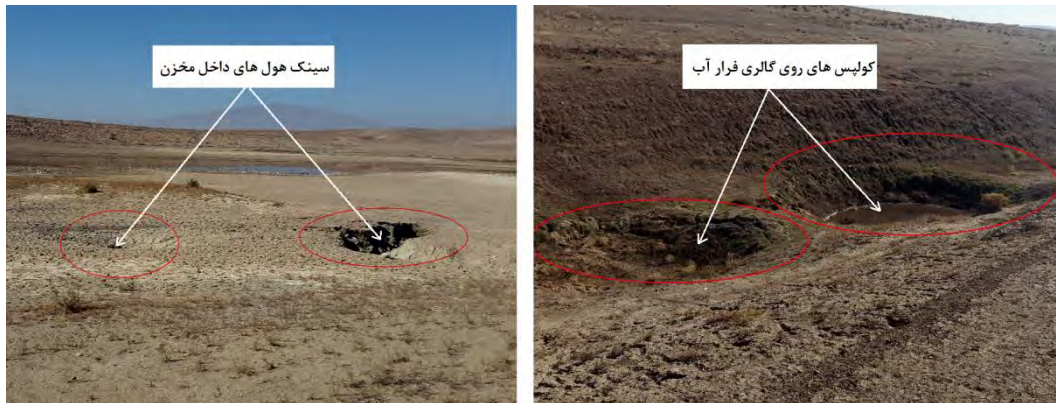
تدریج پدیده انحلال شدت یافته، قطر و طول کانال‌های زیرزمینی افزایش و با ایجاد شدن گالری زیرزمینی به طول ۱/۵ کیلومتر در جهت شمال شرق، جنوب غرب آب سد تخلیه گردد. فرونشست زمین از حدود ۲۰۰ متری داخل مخزن شروع و تا محل ظهور آب در پایین دست ادامه یافته است. مصالح ریزشی به داخل گالری زیرزمینی، توسط آب زیرزمینی نفوذ یافته از سد، از منطقه خارج گردیده است. وفائیان (۱۳۹۴) با گزارش نمودن این که نهشته‌های تبخیری مانند ژپیس، انیدریت و نمک به علت امکان حل شدن آنها در آب، راه را برای فرار آب مخزن باز می‌کنند، صحت مطالعات انجام شده را تایید می‌نماید. همچنین در این گزارش توصیه شده است که از احداث سد در محل‌هاییکه مخزن آن گچ و آهک‌های قابل انحلال داشته باشد؛ مخصوصاً لایه‌های گچ دار، اجتناب شود. فهیمی و سروش (۱۳۸۹) نیز احداث سد در روی موادی نظیر سنگ آهک، ژپیس، اندرید و کربنات کلسیم را باعث گسیختگی آنها اعلام نموده‌اند. در خصوص سد آرباتان نیز با آگیری مخزن سد به مرور زمان، آب به درون لایه مارن نفوذ کرده و باعث انحلال مواد ژپوسی درون آن لایه شده است. با انحلال میان لایه‌های ژپوسی، مقدار تخلخل لایه مارن افزایش یافته و نفوذ آب در آن تسریع شده است. با نفوذ بیشتر آب به اعماق پایین‌تر، آب به لایه نمکی زیر مخزن سد راه پیدا کرده است و به علت قابلیت انحلال سریع نمک در آب، نسبت به ژپیس و خواص خمیری آن، پدیده انحلال به تدریج در داخل آن لایه رخ داده و در نتیجه باعث فروریزش در داخل لایه‌های نمک شده است و در نهایت، شرایط لازم برای نشست لایه‌های سطحی فراهم شده است. تصویر فروچاله‌های ایجاد شده در داخل مخزن سد و ریزش‌های عمقی ایجاد شده در روی گالری فرار آب در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ایجاد دره‌ای کم عمق به عرض ۸۰ متر و نشست زمین در سرتاسر مسیر فرار آب از اثرات پدیده فوق می‌باشد.

افقی بوده است که پس از نشست، حالت انحنایی پیدا کرده است. با توجه به نتایج گمانه‌های  $BH_1$  و  $BH_6$  که امتداد آنها عمود بر محور آسیب دیده سد (D) و گمانه‌های  $BH_{10}$  و  $BH_{11}$  و  $BH_{12}$  که در داخل مخزن سد حفاری شده است؛ لایه‌ی نمک‌دار در جهت عمود بر محور سد هم توسعه یافته است. با توجه به فاصله زیاد گمانه‌های  $BH_{10}$  و  $BH_{12}$  و عدم وجود گمانه اکتشافی در بین این دو گمانه اقدام به رسم مقطع زمین شناسی نشده است ولی درهمه‌ی گمانه‌های اکتشافی لایه‌ی نمک مشاهده شده است.

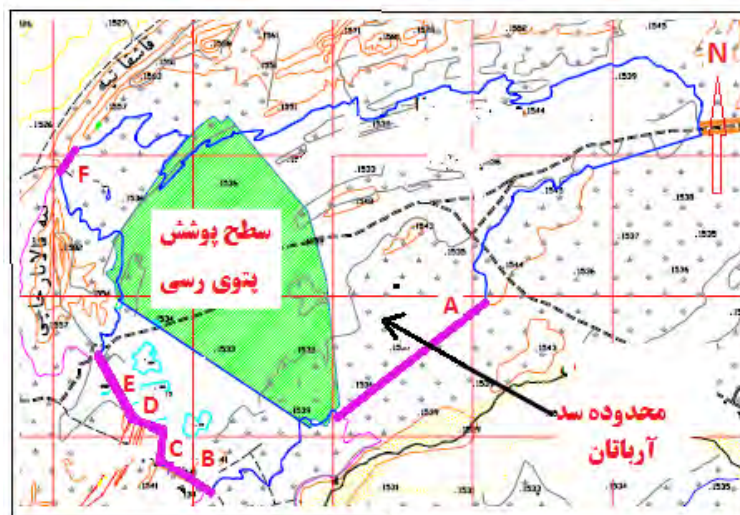
بررسی نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های برداشت شده نشان می‌دهد؛ که در لایه‌ی مارن نزدیک به سطح زمین، ژپیس داخل آن به مرور زمان طی دوره زمانی سپری شده، انحلال و میزان املاح گچ آن لایه کاهش یافته است. همچنین به علت خالی بودن فضای بین این لایه‌ها به دلیل انحلال املاح، وزن مخصوص خشک به شدت کاهش و نفوذپذیری افزایش یافته است؛ ولیبه علت عدم توسعه جبهه انحلال به مارن‌های واقع در عمق‌های بیشتر، دانسیته خشک بالا بوده و دارای درصد گچ بیشتری هستند.

به منظور تکمیل مطالعات و کسب اطلاعات بیشتر از وضعیت چینه‌های زمین زیر ساختگاه و مخزن سد، اقدام به انجام مطالعات ژئوفیزیک شده است. این مطالعات به دلیل نزدیکی مقادیر دانسیته‌ی لایه‌های زمین، قادر به تفکیک لایه‌های مارن و نمک از همدیگر نبوده، ولی وقوع پدیده انحلال در حوالی محور آسیب دیده (D) و عدم توسعه این پدیده به لایه‌ی نمک در قسمت‌های دیگر مخزن سد را تایید می‌نماید. با توجه به نفوذ آب به لایه‌ی نمک در حوالی محور D و انحلال آن، ایجاد حفره و گالری در زیر سد و توسعه آن تا چند صد متر دورتر، امری طبیعی به نظر می‌رسد. در اثر ظهور این پدیده‌ی زیرزمینی که در اعماق ۲۵ تا ۴۰ متری عمق زمین به وقوع پیوسته است؛ عوارضی نظیر نشست زمین، ریزش‌های عمقی<sup>۱</sup> و فروچاله‌ها به وجود آمده‌اند. مجموعه عوامل فوق سبب شده است که به

<sup>۱</sup> -Collapse



شکل ۱۰- تصویر فروچاله های داخل مخزن سد آرباتان و ریزش های عمقی روی گالری



شکل ۱۱- پلان سد آرباتان (کل سطح مخزن، سطح پتوی رسی و محورهای سد)

### ارزیابی عملکرد بلانکت رسی

متر و ضریب نفوذ پذیری متوسط پی و پتوی رسی به ترتیب برابر با  $10^{-6} \times 1/4$  و  $10^{-8}$  متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین با فرض احداث بلانکت رسی، نتایج مدل سازی عددی نشان می دهد که علیرغم اجرای پتوی رسی، نشت آب از بدنه و پی سد به میزان ۲۳۵۰۰ مترمکعب در طول ۱۸۰ روز خواهد بود. با توجه به داده های در دسترس در مدل سازی عددی، مقدار نشت برای ۳۶ درصد سطح بستر سد برآورد گردیده است که اگر به ۱۰۰٪ سطح مخزن تعمیم داده شود، این مقدار به ۶۵۲۷۷ متر مکعب افزایش خواهد یافت. در شکل ۱۱ سطح پتوی رسی نسبت به کل مخزن نشان داده شد است.

برای جلوگیری از فرار آب در سدها، ایجاد بلانکت رسی به عنوان پوشش نفوذ ناپذیر، یکی از راهکارهای معمول می باشد. در این مقاله، با فرض احداث بلانکت رسی با استفاده از روش های رایج، میزان نشت آب از سد آرباتان محاسبه شده است. با استفاده از روش بنت میزان نشت آب بدنه و پی سد ۵۶۵۰۰۰ متر مکعب در ۱۸۰ روز برآورد گردیده است. در این روش، محاسبه طول واقعی پتوی رسی اجرا شده به طور متوسط بر اساس نقشه توپوگرافی و نقشه های موجود، ۱۲۹۰ متر برآورد شده است. ارتفاع بیشینه آب پشت سد، ۷ متر، ضخامت پتوی رسی ۰/۹ متر، طول معادل برابر با ۱۲۳

فهارس بهاء سال ۱۳۹۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی، حدود ۷۵ میلیارد تومان و جهت اجرای خطوط انتقال آب و سازه‌های اصلی توزیع آب حدود ۴۰ میلیارد تومان هزینه برآورد شده است. اگر تمام اراضی پایاب سد به سیستم آبیاری تحت فشار با راندمان ۶۰ درصد تجهیز و بر اساس گزارش موسسه تحقیقات خاک و آب (۱۳۷۴) نیاز متوسط آبیاری محصول گندم (محصول منتخب از تناوب زراعی که دارای حداقل نیاز آبی می باشد) ۶۰۶۶ متر مکعب در هکتار (بر آورد شده برای دشت تبریز) در نظر گرفته شود، با آب ذخیره شده در سد می‌توان حدود ۲۵۰۰ هکتار زمین زراعی را مدیریت نمود. بنابراین هزینه تأمین آب هر هکتار زمین زراعی حدود ۶۰ میلیون تومان خواهد بود که برای سرمایه‌گذاری در بخش کشاورزی مبلغ قابل توجهی می‌باشد. در الگوی کشت پیشنهادی، محصولات گندم، جو، سورگوم و به مساحت اندکی یونجه مدنظر بوده است.

همچنین با توجه به مصوبه‌ی شماره‌ی ۵۲۱۳۹/ت/۵۳۸۳۴ مورخه‌ی ۱۳۹۴/۰۵/۰۱ هیات محترم وزیران دولت مبنی بر عدم ایجاد هر گونه نیاز جدید آبی در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه، بسیاری از پروژه‌های تأمین آب در دست اجرا در این حوضه تعطیل و اعتباری جهت تکمیل آنها تخصیص نیافته است و آبرگیری برخی از سدها از جمله سد شهید مدنی تبریز و تعدادی از سدهای در حال ساخت استان آذربایجان غربی در هاله‌ای از ابهام قرار گرفته‌اند. احداث یک سد فقط شامل طراحی و رعایت نمودن مسائل فنی نبوده و مباحث اقتصادی و زیست محیطی و تأثیرات احداث سد در منطقه بر سرمایه‌گذاری‌ها و فعالیت‌های موجود، از جمله مواردی است که باید مورد توجه جدی قرار گیرد. انجام بررسی‌های اقتصادی و محاسبه هزینه‌ها در هر پروژه‌ای، براساس یک سری معیارها و فهارس بها مربوط توسط مهندسين مشاور و یا کارشناسان ذیصلاح به طور تقریباً دقیق قابل استخراج است. آنچه با ابهام و پیچیدگی‌های مفصل همراه است و معمولاً به آسانی به نتیجه نمی‌رسد، محاسبه اثرات مثبت و منفی احداث سد در آن منطقه و تغییر سیستم زیست-

مطالعات قبلی نشان داده است که پوشاندن کف مخزن با لایه‌های نفوذناپذیر و نیز کاربرد تزریق سیمان در محل‌های فرار آب منجر به ممانعت از نشت آب نمی‌گردد، زیرا به هر حال نفوذ اندک آب به آنها به تدریج حفره‌ها را گسترده نموده و موجب خرابی نهایی می‌گردد (وفائیان ۱۳۹۴). با اجرای پتوی رسی، علیرغم کلیه تمهیدات، به علت قابل نفوذ بودن مصالح، همواره مقداری آب از طریق بدنه و پی سد به بخش‌های پایین دست نفوذ خواهد کرد (رحیمی ۱۳۸۲). این عمل در سدهای احداث شده بر روی رسوبات تبخیری دیر یا زود باعث گسیختگی سد خواهد شد.

مسئله اصلی دیگر در گزینه آب‌بندی مخزن سد با پتوی رسی، جستجوی منبع قرضه مناسب (حدود ۱/۹ میلیون متر مکعب رس برای سد آرباتان) برای تأمین مصالح مورد نیاز می‌باشد. منبع قرضه مورد نظر بایستی دارای حجم کافی با یک ضریب اطمینان مناسبی از مصالح ریزدانه رسی بوده و کیفیت مصالح از نظر مشخصات پلاستیسیته و عاری بودن از مواد گچی در حد قابل قبول باشد. از جمله مسائل مهم دیگر می‌توان منبع قرضه خاک رس، وجود معارض، اقتصادی بودن فاصله حمل تا پای کار، کیفیت عملیات اجرایی، کیفیت مصالح مصرفی را نام برد. وجود هرگونه نقص در مشخصات فنی اجرایی، مانند نامناسب بودن وضعیت تراکم یا پایین بودن کیفیت مصالح، باعث کاهش تأثیرگذاری پتوی رسی در کاستن از تراوش و جریان ورودی به لایه‌های زیرین خواهد بود.

### ارزیابی اقتصادی و قانونی احیای سد آرباتان

علاوه بر مسائل فنی، احیای این سد از نظر اقتصادی و قانونی هم دارای مشکلاتی است که در ذیل به آن پرداخته شده است. با توجه به حجم آب قابل ذخیره‌ی اندک برآوردی (۱۵/۳ میلیون متر مکعب) و حجم بالای مصالح مورد نیاز، محدودیت منابع قرضه، مشکلات فنی ذکر شده و اعتبار مورد نیاز بسیار زیاد به ازای هر هکتار اراضی پایاب، این سد دارای توجیه اقتصادی کافی نبوده و سرمایه‌گذاری در آن نیاز به تأمل بیشتری دارد. برای احداث مجدد این سد بر اساس

محاسبات انجام شده به روش‌های مدل‌سازی عددی و روابط تئوری نشانگر وجود مقدار قابل توجهی نشت آب از مخزن سد، علیرغم اجرای پتوی رسی، به لایه‌های زیرین می‌باشد. باتوجه به قرار گرفتن این سد در روی رسوبات تبخیری و سازندهای مشکل‌آفرین، اگر چنین تراوشی از سد به وقوع بپیوندد، احتمال گسیختگی محور و پتوی رسی زیاد بوده و مزیت احتراز از سرمایه‌گذاری در سد، بسیار بیشتر از سرمایه‌گذاری در آن است. بر اساس تفاسیر و مستندات فنی، اقتصادی و زیست محیطی، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که علاوه بر لحاظ نشدن مسائل فنی- اقتصادی در ساخت سد، ساختگاه سد آرباتان از نظر زمین‌شناسی نیز برای احداث سد دارای محدودیت‌های زیادی می‌باشد. در مطالعات اولیه این سد بیشتر به مرفولوژی منطقه پرداخت شده و مطالعات ژئوتکنیک و زمین‌شناسی زیرسطحی مغفول مانده است. به نظر می‌رسد احیاء این سد با اجرای پتوی رسی به علت نفوذ حجم قابل توجهی آب به لایه‌های زیرین سد با عدم قطعیت زیادی همراه باشد. بنابراین به نظر می‌رسد متولیان امر روشنگری‌های لازم را در این خصوص انجام داده و ذینفعان این پروژه را از حالت بلاتکلیفی خارج و کاربری مناسبی برای مخزن سد تعریف نمایند.

#### سپاسگزاری:

مطالعات زمین‌شناسی زیرسطحی و ژئوتکنیک این مقاله با اعتبارات عمرانی سازمان جهاد کشاورزی استان آذربایجان شرقی صورت گرفته است. بدینوسیله از همکاری صمیمانه مدیران و کارشناسان آن سازمان نهایت قدردانی و تشکر به عمل می‌آید.

محیطی و حیات طبیعی آن ناحیه و سایر شرایط موجود می‌باشد. بر اساس گزارش کشاورز و همکاران (۱۳۹۲)، شوری آب‌های زیرسطحی و چشمه‌های هم‌جوار، تغییر شکل ظاهری زمین، عوارض اجتماعی کانال آب ۲۶ کیلومتری متروکه از جمله عوارض زیست محیطی این سد اعلام شده است. از دیگر تبعات زیست محیطی آن می‌توان به عوارض ناشی از برداشت ۱/۹ میلیون متر مکعب مصالح از منبع قرصه و تأثیر آگیری سد برکاهش ورودی آب به دریاچه ارومیه را نام برد.

#### نتیجه‌گیری کلی

نتایج این تحقیق نشان داد که مشکل عمده سد آرباتان انتخاب محل نامناسب برای احداث آن بوده است. انتخاب محل مذکور صرفاً به دلایل ریخت‌شناسی بوده و جنبه‌های فنی و مهندسی در این انتخاب تأثیر کمی داشته است. وجود مارن، گچ و نمک که در فرهنگ زمین‌شناسی مهندسی از آنها به عنوان سازندهای مشکل‌آفرین یاد می‌شود، از معضلات قابل ذکر این ساختگاه محسوب می‌شود. به استناد منابع علمی مختلف، احیاء و علاج بخشی سدهایی که بر روی تشکیلات کارستی و رسوبات تبخیری احداث شده‌اند؛ عموماً ناموفق بوده و در شرایط معمول، احداث سد در چنین مناطقی توصیه نشده است. اعلام نظر قطعی در خصوص سازندها و وضعیت زمین‌شناسی زیرسطحی یک منطقه با اطلاعات اندک موجود منطقی نمی‌باشد، ولی با توجه به جمیع جهات نتایج ذیل قابل استنباط می‌باشد.

لازمه‌ی عدم بروز مشکل فنی و گسیختگی بدنه سد و پتوی رسی در سد آرباتان، آبیندی کامل مخزن سد و جلوگیری از نفوذ آب به لایه‌های زیرین می‌باشد.

#### منابع مورد استفاده

- Archives of Water and Soil Management, Technical and Engineering Affairs, Jihad and Agricultural Organization, Tabriz.  
Bibordi, M., 1993. Principles of Land Drainage. University of Tehran Publications.

- Cooper, A.H., Gutiérrez, F., 2013. Dealing with gypsum karst problems: hazards, environmental issues and planning. In: Frumkin, A. (Ed.), *Treatise on Geomorphology. Karst Geomorphology*. vol. 6. Elsevier, Amsterdam, pp. 451–462.
- Ebadi, M.A., 2012. Investigation of engineering geology to determine the cause of water escape from the Arbatan Dam, MSc thesis, Department of Geology, Islamic Azad University, Ahar Branch.
- Ebrahimi, M., 2014. Improvement of the hydromechanical behavior of soil dam using composite protective layers (CFRD) and optimal thickness design of flexible core, MSc thesis, Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Islamic Azad University, Ahar Branch.
- Fahimi Fard, A. and Soroush, H., 2010. *Principles of Foundation Design in Dam Construction*. Amir Kabir University of Technology Publication.
- Galve, J.P., Gutiérrez, F., Lucha, P., Bonachea, J., Remondo, J., Cendrero, A., Gutiérrez, M., Gimeno, M., Pardo, G., Sánchez, J., 2009. Sinkholes in the salt-bearing evaporate karst of the Ebro River valley upstream of Zaragoza City (NE Spain). *Geomorphological mapping and analysis as a basis for risk management. Geomorphology* 108, 145–158.
- Ghanbari, A., 2003. *Engineering Geology and Earthquake*. Fruzsh Publication, Tabriz.
- Guerrero, J., Gutiérrez, F., Galve, J.P., 2012. Large depressions, thickened terraces and gravitational deformation in the Ebro River valley (Zaragoza area, NE Spain). Evidence of glauberite and halite interstratalkarstification. *Geomorphology* 196, 162–176.
- Gutiérrez, F., Desir, G., Gutiérrez, M., 2003. Causes of the catastrophic failure of an earth dam built on gypsiferous alluvium and dispersive clays (Altorricón, Huesca Province, NE Spain). *Environ. Geol.* 43, 842–851.
- Gutierrez, F., Mozafari, M., Carbonel, D., Gómez, R., Raeisi, E., (2014). Leakage problems in dams built on evaporites. The case of La Loteta Dam (NE Spain), a reservoir in a large karstic depression generated by interstratal salt dissolution. *Engineering Geology* 185, 139-154.
- Guzina, B.J., Sarić, M., Petrović, N., 1991. Seepage and dissolution at foundations of a dam during the first impounding of the reservoir. *7th International Congress on Large Dams, Vienna*, pp. 1459–1475.
- Julie R. Kelley, et al (2007) *Geologic Setting of Mosul Dam and Its Engineering Implications*, US Army Engineer Research and Development Center.
- Keshavarz Bakhshayesh, M., Talkhablu, M. and Ebadi, M.A., 2013. Study and evaluation of environmental impacts of salt dissolution and water escape from the Arbatan reservoir in East Azarbaijan. *8th Iranian Engineering and Environmental Geology Congress, September 17-18, Ferdowsi University of Mashhad*.
- Kiyani, M., Sadrekarimi, J., Fakhri, B., 2008. Gypsum dissolution effects on the performance of a large dam. *IJ. Trans.* 21, 143–150.
- Milanovic, P., 2004. *Water Resources Engineering in Karst*. CRC Press, Boca Raton.
- Milanovic, P., 2011. Dams and reservoirs in karst. In: Van Beynen, P.E. (Ed.), *Karst Management*.
- Moradi, G., Abbasnejad, A.R., 2011. The investigation of extra seepage of the Gheisaragh Dam and remedial method. *6th International Congress on Civil Engineering*, pp. 1–6 (Semnan, Iran).
- Moradi, Q. and Abbas Nezhad, A., 2010. Gypsy Substrates and Case Study of Sarab Qeysarq Dam. *5th National Congress of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad*.
- Rahimi, H., 2003. *Embankment Dams*. University of Tehran Publications.
- Sissakian, V.J., Al-Ansari, N., Knutsson, S., 2014. Karstification effect on the stability of Mosul Dam and its assessment, North Iraq. *Engineering* 6, 84–92.
- Wafaeian M. 2015. *Theoretical and Practical Information on Earth Dams*. Arkan Danesh Publication, Esfahan.