

نشت آب و تاثیر انحلال در پایداری سد بار نیشابور

محمدتقی کرباسی معروف^۱، حمیدرضا ناصری^۲ و فرشاد علیجانی^۳

۱. دانشجوی دکتری هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران
۲. استاد، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران
۳. استادیار، گروه زمین‌شناسی معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۸

چکیده

سد بار در شمال غرب شهر نیشابور و در خارج بستر رودخانه بار، با هدف تامین آب شرب شهر نیشابور و کارخانه فولاد ساخته شده است. بیلان آبی سد بار حکایت از وجود ۳۵ تا حداکثر ۷۰ درصد نشت آب از مخزن سد طی شش دوره آبیگیری آزمایشی می‌کند. نشت قابل توجه و غلظت بالای املاح در آب نشت یافته، علاوه بر تاثیر بر برنامه‌ریزی منابع آب و تخصیص‌های پیش‌بینی شده، تهدیدی برای پایداری سد محسوب می‌شود. تحلیل هیدروگراف چاه‌های مشاهده‌ای نشان از نشت عمده آب از بخش مرکزی پی ساخت‌گاه سد اصلی و به میزان کمتر از سایر نواحی می‌کند. مدل‌سازی نشت آب با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW نشان می‌دهد، ۷۵ درصد حجم آب نشت یافته از پی ساخت‌گاه سد اصلی عبور می‌کند. تجزیه شیمیایی نمونه‌های آب نشت یافته از افزایش غلظت املاح به بیش از پنج تا ۱۰ برابر، بخصوص در نواحی مرکزی و جناح چپ مخزن سد حکایت می‌کند. با تلفیق داده‌های مدل‌سازی نشت آب از مخزن سد، نتایج نمونه‌برداری‌های هیدروشیمیایی، تحلیل سری‌زمانی میزان نشت و بیلان جرمی آب مخزن سد، مقدار ماده انحلال یافته در اثر نشت آب از پی ساخت‌گاه سد اصلی محاسبه شده است. در نهایت تاثیر انحلال بر افزایش پوکی بررسی شد و نتایج نشان داد حداکثر توسعه سالانه پوکی در بخش میانی محور سد اصلی در حدود ۰/۰۶ درصد می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: انحلال ساخت‌گاه سد، سد بار، مدل‌سازی نشت.

مقدمه

پایداری سدها به‌طور کامل به چگونگی و میزان نشت آب از بدنه، پی و تکیه‌گاه‌های ساخت‌گاه وابسته است و در نبود مدیریت آن می‌تواند به شکست سد منجر شود (Wang et al., 2018). افزایش نفوذپذیری در گذر زمان و کاهش ظرفیت باربری پی، موجب افزایش ریسک، کاهش پایداری و در نهایت تخریب سدها می‌شوند (Piqueras et al., 2012). علاوه بر این افزایش نفوذپذیری (به‌دلیل پدیده انحلال) تشدیدکننده فرسایش درونی نیز هست. بررسی‌ها نشان داده مهم‌ترین عامل شکست در سدهای خاکی، فرسایش درونی می‌باشد (Sjodahl et al., 2008). در قرن گذشته ۲۰۰ سد شکسته و به کشته شدن بیش از ۱۱۱۰۰ نفر در سراسر جهان منجر شده است (Sammen et al., 2017).

* نویسنده مرتبط: H-nassery@sbu.ac.ir

متداول ترین تکنیک‌های مورد استفاده به منظور مطالعه نشست آب از مخازن سدها شامل: اندازه‌گیری‌های هیدرومتری، روش‌های ژئوفیزیکی، اندازه‌گیری ایزوتوپ‌های محیطی، استفاده از ردیاب‌های مصنوعی و مدل‌سازی عددی می‌باشد (Li et al., 2017). به‌طور کلی بررسی‌های کمی از جمله تهیه بیان و رفتارسنجی جریان آب از مخزن تا پایاب سد همراه با مدل‌سازی عددی اولین گام‌ها در تحلیل نشست از سدها می‌باشد. سرعت جریان آب نشست یافته از پی و جناح راست سد دوستی در سازند نيزار-کلات با استفاده از سری‌های زمانی در بازه اسپکترال، با توسعه مربعات تابع کوه‌رنسی با استفاده از داده‌های روزانه تراز آب در مخزن سد، گمانه‌ها و آبدی چشمه‌ها بررسی شده است (Mozafari et al., 2018). به‌منظور بررسی کارایی پرده آب‌بند در پی ساخت‌گاه سد، عملیات ردیابی با تزریق اورانیوم انجام شد. نتایج ردیابی وجود جریان افشان از میان پرده را نشان داد. با این حال محل‌های عمده نشست، در پایین‌دست ردیاب شناسایی نشد. با استفاده از تابع اسپکترال کوه‌رنسی^۱ تاخیر زمانی تغییرات سطح آب در محل تزریق، گمانه‌ها و آبدی چشمه‌های پایین‌دست بررسی شد. رگرسیون خطی تغییرات سطح آب و تحلیل سری‌های زمانی داده‌ها نشان داد، زمان تاخیر به اولین زمان دریافت ردیاب نزدیک می‌باشد (Mozafari et al., 2018). همچنین به‌منظور ارزیابی میزان نشست آب از پی ساخت‌گاه سد باز علی پاکستان دو المان آب‌بند: اجرای پتوی رسی در مخزن و ایجاد دیواره آب‌بند با مدل‌سازی در نرم‌افزار Seep/W 2D مورد بررسی واقع شد (Ullah et al., 2019). نتایج تحقیق نشان داد، اجرای پتوی رسی به طول ۱۰۰ متر منجر به کاهش نشست به میزان ۵۸/۷ درصد خواهد شد و به لحاظ اقتصادی و کارایی بسیار موثرتر از ایجاد دیوار آب‌بند است. پژوهش انجام شده توسط نبی زاده و جعفری (۱۴۰۰) نشان داد با تهیه مدل عددی با نرم‌افزار MODFLOW می‌توان تغییرات مکانی و زمانی میزان تغذیه سطحی را با دقت مناسب محاسبه کرد. تغذیه آبخوان سرخس حدود ۱۵ درصد بارندگی سالیانه و حدود ۲۰ درصد آب برگشتی مصارف می‌باشد.

هیدروشیمیایی آب نشست یافته با هدف ارزیابی و سنجش پایداری سد شامل: ۱. پیاده کردن داده‌های هیدروشیمیایی در نمودارها با هدف سهولت مقایسه دیداری، ۲. محاسبه شاخص‌های اشباع برای هر نمونه، ۳. محاسبه تفاوت‌ها و تغییرات داده‌ها بین آب نشست یافته و کیفیت شیمیایی مخزن، ۴. بررسی تاثیر پدیده اختلاط و توسعه موازنه بیان هیدروشیمیایی برای نمونه‌ها و ۵. تعیین نوع کانی‌ها و واکنش انحلال هیدروشیمیایی بسیار با اهمیت است (Craft et al., 2007). حل تحلیلی، بررسی تغییرات غلظت سولفات و سایر یون‌ها و مدل‌سازی تجربی مقدار ماده از دست رفته از پی سد، تغییرات نرخ انحلال در گذر زمان و تغییر تخلخل موثر در پهنه ساخت‌گاه سد کاسپ اسپانیا بررسی شده است (Piqueras et al., 2012). در زمان آنگیری نشست از سه ناحیه: تونل زهکش پس از سه ماه از شروع آنگیری سد به میزان ۲۰۰ لیتر بر ثانیه، نشست از ناحیه کانال انحراف سیلاب به میزان ۱۰ لیتر بر ثانیه، نشست از پی سد به میزان ۳۰ لیتر بر ثانیه مشاهده شد. پی‌ساخت‌گاه سد از رسوبات ماری غنی از گچ و سایر کانی‌های تبخیری از جمله: هالیت، آنهیدریت، تناردیت، میرابلیت، گلوبریت، اپسومیت تشکیل شده است. سه پدیده انحلال، تغییر کانی گلوبریت به ژپیس و فرسایش فیزیکی، منجر به افزایش حفرات در پی سد می‌شود. در مقابل انبساط آنهیدریت، کریستالیزاسیون ژپیس و سولفات‌ها باعث کاهش حفرات و نفوذپذیری می‌شود. نمونه‌برداری سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۸ از پی‌سازه‌ها از افزایش غلظت املاح محلول حکایت می‌کند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد بررسی‌های هیدروشیمیایی ابزار عملی مهمی در پیش‌بینی نشست و وضعیت بحرانی آن دارد (Piqueras et al., 2012). در فاصله سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ نمونه‌برداری کیفیت شیمیایی از آب نشست یافته گستره ساخت‌گاه سد برق آبی لیجیاکسیا چین انجام شد و توزیع مکانی و زمانی نتایج آنالیزها با استفاده از نمودارهای هیدروشیمیایی و تجزیه و تحلیل آماری بررسی شد (Jixiang et al., 2018). نتایج تحقیق نشان می‌دهد:

1. Spectral Coherency function

2. Lijiaxia

فرعی) در خارج بستر رودخانه بار در دره‌ای عریض بر روی پی آبرفتی ایجاد شده است. با شروع آبیگری، افت به نسبت سریع سطح آب در مخزن، نشان از نشت و عدم آب‌بندی آن داشت که با پیدایش فروچاله‌ها به تایید رسید. بنابراین اجرای پتوی رسی (بلانکت) با هدف آب‌بندی مخزن و کاهش نشت در دستور کار قرار گرفت. وجود پی آبرفتی با ضخامت قابل توجه و فراوانی بالای کانی‌های با قابلیت انحلال زیاد (به‌ویژه گچ)، همچنین غلظت بالای املاح در آب نشت یافته نسبت به آب مخزن، اهمیت نقش انحلال در افزایش نشت، افزایش پوکی و در نهایت تهدید پایداری سازه و تامین آب شهر نیشابور را نشان داد. به‌منظور رفتارسنجی سد بار، اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در ۱۱ گمانه پایاب سد اصلی، پیرومترهای الکتریکی پی و نمونه‌برداری هیدروشیمیایی در گمانه‌ها و زهکش‌ها انجام شده است.

گستره مورد مطالعه

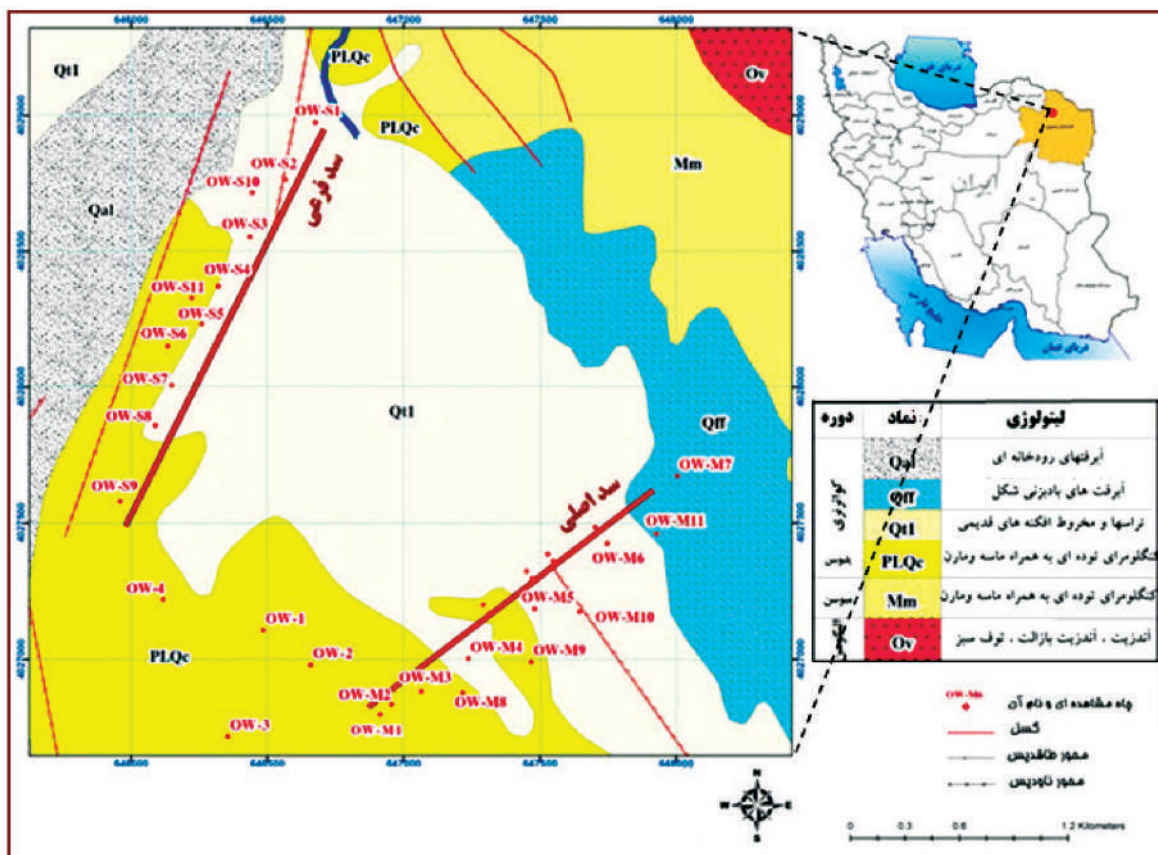
سد بار مهم‌ترین گزینه تامین آب شرب شهر نیشابور در افق میان و بلندمدت می‌باشد. در شکل ۱ موقعیت و خلاصه مشخصات سد ارائه شده است. مشکلات اجتماعی، خسارت مخزن و صدمات زیست‌محیطی موجب شده، مخزن در خارج از بستر رودخانه بار و در دره‌ای عریض بر روی پی آبرفتی با ساخت دو سد خاکی (اصلی و فرعی) ساخت شود. با اجرای بند انحرافی بر روی رودخانه بار و کانال انتقال به طول ۲۰۰ متر، سیلاب‌های رودخانه در مخزن سد ذخیره می‌شود. مخزن سد بار در ابتدای دره‌ای که حاصل فرسایش سنگ‌های مارنی-کنگومرائی دوران سوم و رسوب‌گذاری تراس‌های رودخانه‌ای قدیم و جدید دوران چهارم زمین‌شناسی قرار دارد (شکل ۱). واحدهای مارنی-رسی گچ‌دار میوسن به‌صورت نواری طویل در تمامی حاشیه شمالی مخزن قابل مشاهده‌اند. ضلع جنوبی ساخت‌گاه سد را رسوبات کنگلومرای رودخانه‌ای کواترنر تشکیل داده است. به دلیل تشابه خصوصیات توده کنگلومرای با تحکیم یافتگی ضعیف با رسوبات روباره، در عمل شناسایی عمق سنگ کف را ناممکن ساخته و نمی‌توان بر پایه حفاری‌های ژئوتکنیک انجام شده مرز مشخصی را به این مهم اختصاص داد (شرکت آبیوی، ۱۳۹۴).

شاخص کیفیت آب در گالری دسترسی پی سد بالاتر از گالری‌های جناح راست و چپ است. بنابراین جلوگیری از نشت از پی سد نسبت به اطراف مهم‌تر می‌باشد. همچنین تغییرات قابل توجه در کیفیت آب در گالری سمت راست نشان از ارتباط هیدرولیکی بالاتر این ناحیه می‌کند. بررسی مکانیسم نشت از ساخت‌گاه سد آغ‌چای (آذربایجان غربی) از مطالعات هیدروژئولوژی، داده‌های ژئوتکنیک، زمین‌شناسی و نمونه‌برداری کیفیت شیمیایی استفاده شده است (واعظی و اسماعیل‌نیا، ۱۳۹۴). نتایج تحقیق نشان داد، محل نشت از واحد کنگلومرا و مارن سازند قم است و با توجه به انحلال کانی‌های هالیت و ژپس، انحلال منجر به توسعه مجاری خواهد شد.

علاوه بر بررسی‌های هیدروشیمیایی استفاده از ردیاب‌های طبیعی از جمله: درجه حرارت، هدایت الکتریکی، پارامترهای هیدروشیمیایی و ایزوتوپ‌های پایدار، در شناسایی منشأ آب نشت یافته از مخزن سد و تعیین محل و نفوذپذیری بخش‌های مختلف ساخت‌گاه مخازن بسیار متداول است (Bedmar and Araguas, 2002). تزریق ردیاب رنگی و آزمایش XRF در گستره سد ارمغان ترکیه نشان داد، رس موجود در آب نشت یافته از سد، مواد پرکننده حفرات کارستی تکیه‌گاه است و ارتباطی با هسته رسی سد ندارد. همچنین ناحیه کارستی شده جناح راست سد، عامل اصلی انتقال آب از مخزن به پایاب است (Unal et al., 2008). در پژوهشی مشابه با استفاده از اندازه‌گیری‌های هیدرومتری و تکنیک‌های ردیابی، هیدروشیمیایی و محیطی، منشأ چشمه‌های موجود در جناح چپ سد گلوریا آندرا پارادش هندوستان شناسایی شد (Noble and Ansari, 2017). نتایج این تحقیق نشان می‌دهد منشأ آب چشمه‌های پایاب سمت چپ سد و از ناحیه مخزن می‌باشد. اندازه‌گیری‌های هیدرومتریک اثبات کرد منشأ آب از تراز ۲۰۹ متر سد است. چشمه‌های با آبدی اندک پایاب، متاثر از جریان افشان هستند و می‌تواند از اختلاط آب مخزن و آب زیرزمینی باشد. سد مخزنی بار در ۲۳ کیلومتری شمال غرب شهر نیشابور با هدف تامین آب شرب شهر و کارخانه فولاد نیشابور ساخته شده است. مخزن سد بار با ساخت دو سد خاکی (اصلی و

(NaCl) محتمل تشخیص داده شده است (شرکت آبپوی، ۱۳۹۴). با تحلیل لاگ حفاری ۲۲ گمانه اکتشافی در محدوده مخزن و پایاب سد اصلی، دانه‌بندی رسوبات گستره ساخت‌گاه سد بار مورد بررسی قرار گرفت. رسوبات درشت‌دانه آبرفتی در اندازه‌های ماسه درشت، شن، قلوه‌سنگ و حتی قطعات درشت‌تر، عمده لیتولوژی آبرفت پی سد در بخش مرکزی و جنوبی مخزن را تشکیل داده‌اند. در مقابل در ناحیه شمالی مخزن و ساخت‌گاه سد اصلی، رسوبات ریزدانه سیلتی-رسی گسترش دارند.

بخشی از رسوبات واریزه‌ای-آبرفتی از ناحیه مرکزی تا شمال مخزن متأثر از فرسایش و رسوب‌گذاری واحدهای مارنی-رسی گچدار میوسن بوده و با دانه‌بندی سیلتی-رسی دارای نفوذپذیری و تراکم اندک و غنی از کانی‌های تبخیری از قبیل گچ و در برخی نقاط نمک، هستند. این رسوبات در بخش‌های مرکزی بر روی رسوبات درشت‌دانه‌تر و در بخش‌های شمالی بر روی رسوبات مارنی-رسی میوسن قرار دارند. علاوه بر گچ وجود سایر کانی‌های تبخیری از جمله: آنهیدریت ($CaSO_4$)، تئاردیت (Na_2SO_4)، میرابیلیت ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) اپسومیت ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) و هالیت



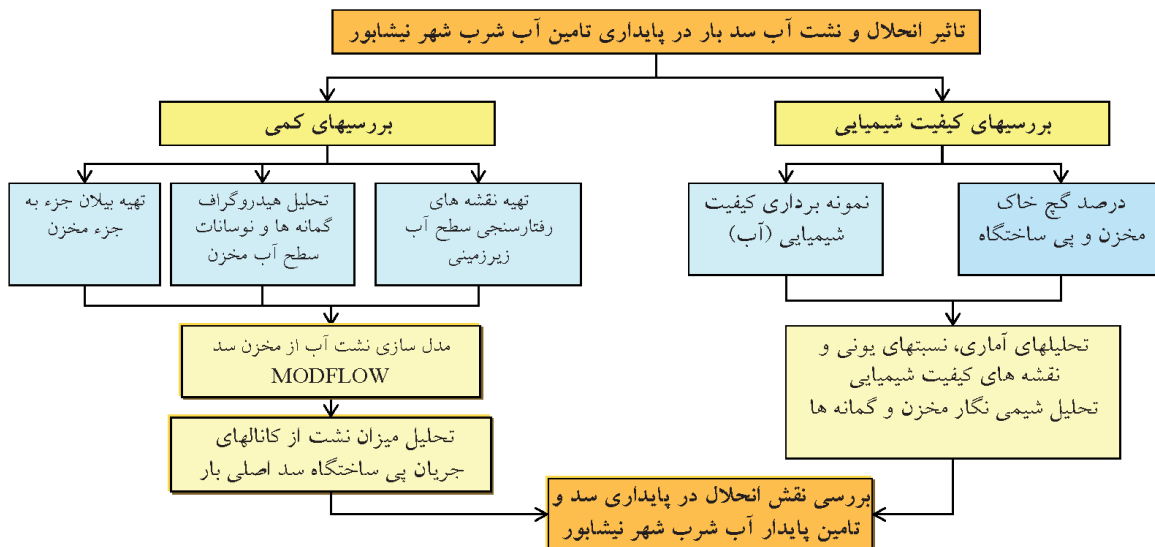
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی گستره ساخت‌گاه مخزن سد بار و موقعیت چاه‌های مشاهده‌ای (شرکت آبپوی، ۱۳۹۴)

روش مطالعه

آب شرب شهر نیشابور مورد بررسی قرار گیرد (شکل ۲). ۳۰ مرحله نمونه‌برداری کیفی (با همکاری آب منطقه‌ای خراسان رضوی) در بازه‌های زمانی دو تا شش ماهه، در طی دوره پنج ساله (۱۳۹۳ لغایت ۱۳۹۸)، از مخزن سد، چاه‌های

نشست قابل توجه آب از مخزن سد بار و غلظت بالای املاح در آب نشست یافته سبب شده پایداری تامین آب از سد با ابهام جدی مواجه شود. به همین دلیل در این پژوهش سعی شد با تحلیل‌های کمی و کیفی، پایداری تامین

مشاهده‌ای و دو رشته قنات پایاب سد برداشت شده است. علاوه بر این رفتارسنجی کمی سطح آب زیرزمینی با تهیه نقشه هم‌تراز، هیدروگراف چاه‌ها، تهیه بیلان مخزن و مدل‌سازی نشت آب بررسی شده است. در نهایت با توجه به بررسی‌های کمی و کیفی، در خصوص پایداری تامین آب از سد بار قضاوت شده است.



شکل ۲. فرایند بررسی تاثیر انحلال بر پایداری تامین آب شرب شهر نیشابور

بررسی‌های کمی

سد بار بر اساس اطلاعات سطح آب چاه‌های مشاهده‌ای و پیژومترهای الکتریکی (نشان‌دهنده فشار آب منفذی در محل نصب) تهیه شده است (شکل ۴). نقشه هم‌تراز سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد جبهه اصلی نشت آب در گستره سد بار، از بخش میانی محور سد اصلی است و نشت از ناحیه سد فرعی و بخش جنوبی مخزن به میزان کمتر صورت می‌گیرد.

رابطه عمومی بیلان آب مخزن سدها و یا دریاچه‌ها به شکل زیر می‌باشد:

$$Q_{in} + P = Q_{out} + E + S + \Delta V \quad \text{رابطه ۱:}$$

که: Q_{in} و Q_{out} به ترتیب مقدار جریان ورودی و خروجی، P مقدار بارندگی، E مقدار تبخیر، S تلفات نشت، ΔV تغییرات حجم آب در مخزن می‌باشد. داده‌های تبخیر و بارش در ایستگاه تبخیرسنجی محل سد اندازه‌گیری شده است. نشت آب از مخزن سد بار (مجهول رابطه بیلان) به صوت روزانه طی سال‌های ۱۳۹۳ لغایت ۱۳۹۸ بر پایه اطلاعات اندازه‌گیری شده: میزان ورودی به مخزن، تبخیر، بارش، تنظیم روزانه آب (تنظیم یا انتقال آب برای کارخانه

تهیه بیلان آبی مخازن آب سطحی و تالاب‌ها برای بررسی رفتار هیدرولیکی و ارتباط آب سطحی و زیرزمینی لازم و ضروری است (اکبری و همکاران، ۱۳۹۷). آنگیبری مخزن سد بار به صورت آزمایشی از سال ۱۳۹۲ آغاز و تاکنون هر ساله انجام شده است. پس از اولین آنگیبری با توجه به حجم بالای نشت آب و پدیدار شدن فروچاله‌ها، طرح اجرای پتوی رسی در کف مخزن در دستور کار قرار گرفت و تا سال ۱۳۹۵ تکمیل شد (پتوی رسی شامل لایه‌ای از رس متراکم به ضخامت ۰/۶ تا ۱/۲ متر با هدف کاهش نفوذپذیری و افزایش گرادیان هیدرولیکی در سرتاسر کف مخزن اجرا شده است). در حال حاضر با وجود اجرای پتوی رسی، کماکان میزان نشت آب بالا است و این میزان به بیش از ۴۰ درصد کل حجم آنگیبری می‌رسد (شکل ۳). اندازه‌گیری‌های کمی در گستره سد بار شامل: دبی جریان آب در کانال انتقال آب به مخزن، نوسانات سطح آب در مخزن سد، اندازه‌گیری دبی زهکش‌ها و اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی در ۲۶ چاه مشاهده‌ای در اطراف مخزن سد می‌باشد. نقشه هم‌تراز سطح آب زیرزمینی در گستره مخزن



شکل ۳. نمایی از فروچاله‌های پدیدار شده در پتوی رسی مخزن سد بار

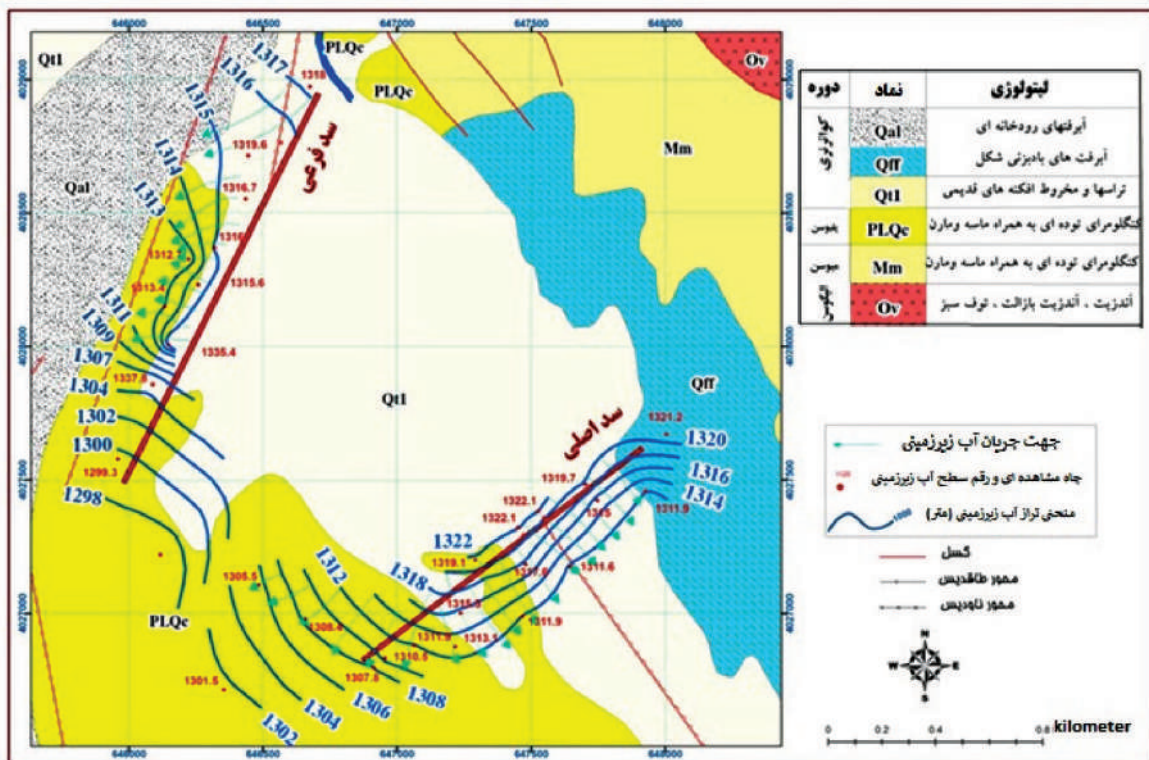
محورهای x ، y و z به موازات محورهای اصلی هدایت الکتریکی، h بار پیزومتری، Q شار گذر حجمی جریان به صورت تغذیه/تخلیه و S_p ضریب ذخیره ویژه می‌باشد. MODFLOW یک مدل آب زیرزمینی سه بعدی تفاضل محدود می‌باشد و استاندارد بین‌المللی برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی جریان آب زیرزمینی و ارتباط متقابل آب زیرزمینی/آب سطحی را در نظر می‌گیرد. نرم افزار GMS یک رابط گرافیکی جامع مدل‌سازی آب زیرزمینی است که نرم‌افزار MODFLOW را به صورت پیش‌پردازنده و پس‌پردازنده پشتیبانی می‌کند (McDonald and Harbaugh, 1988).

فولاد نیشابور) و تغییرات حجم آب مخزن محاسبه شده است. جدول ۱ خلاصه نتایج محاسبه بیلان و شکل ۵ مقدار عوامل ورودی و خروجی مخزن نشان داده شده است.

در این پژوهش برای مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی از معادله سه بعدی جریان (رابطه ۲) در محیط متخلخل اشباع برای آبخوان تحت فشار، ناهمگن، ناهمسان و با شرایط ناپایدار عبارت است از:

$$\text{رابطه ۲: } \frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - Q = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

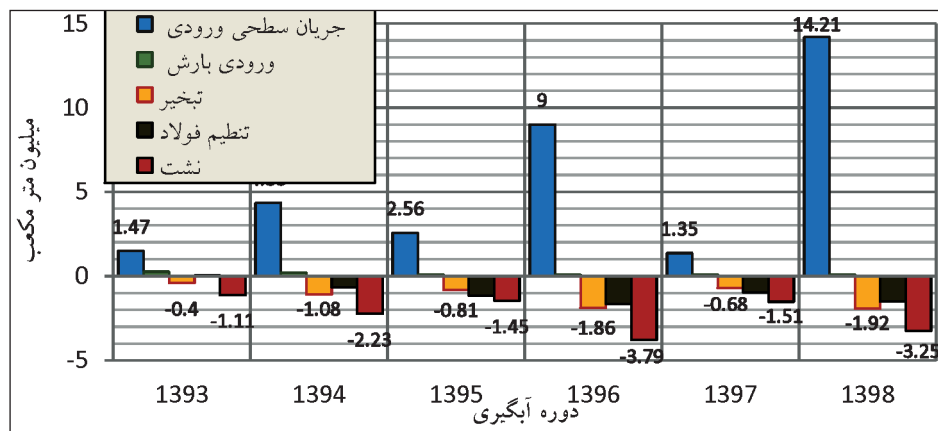
که در آن: K_{xx} ، K_{yy} ، K_{zz} هدایت هیدرولیکی در جهت



شکل ۴. نقشه هم‌تراز سطح آب زیرزمینی گستره ساخت‌گاه سد بار بر اساس اطلاعات سطح آب تیر ماه ۱۳۹۶

جدول ۱. خلاصه نتایج محاسبه بیلان مخزن سد بار طی شش دوره آبیگری (ارقام به میلیون متر مکعب)

آبیگری		V1	V2	VΔ	Q _{in}	P	SUM _{in}	E	Q _{out}	S	SUM _{out}
شروع	خاتمه										
۱۳۹۳/۰۲/۴	۱۳۹۳/۰۲/۲۲	۰/۲۳	۰/۴۲	۰/۲	۱/۴۷	۰/۲۴	۱/۷۱	۰/۴	۰	۱/۱۱	۱/۵۱
۱۳۹۳/۱۲/۰۱	۱۳۹۴/۰۲/۱	۰/۴۲	۰/۹	-۰/۴۷	۴/۳۳	۰/۱۹	۴/۵۲	۱/۰۸	۰/۶۴	۲/۲۳	۴/۰۵
۱۳۹۴/۱۲/۱۹	۱۳۹۵/۰۳/۰۳	۰/۹	۰/۱۳	-۰/۷۷	۲/۵۶	۰/۰۸	۲/۶۴	۰/۸۱	۱/۱۴	۱/۴۵	۳/۴
۱۳۹۵/۱۱/۰۹	۱۳۹۶/۰۲/۰۱	۰/۱۳	۱/۸۹	۱/۷۶	۹	۰/۰۵	۹/۰۵	۱/۸۶	۱/۶۴	۳/۷۹	۷/۲۹
۱۳۹۶/۱۲/۶	۱۳۹۷/۰۲/۲۶	۱/۸۹	۰/۱۶	-۱/۷۲	۱/۳۵	۰/۰۸	۱/۴۳	۰/۶۸	۰/۹۵	۱/۵۱	۳/۱۵
۱۳۹۷/۱۲/۱۳	۱۳۹۸/۰۳/۱۴	۰/۱۶	۷/۷۷	۷/۶۱	۱۴/۲۱	۰/۰۷	۱۴/۲۷	۱/۹۲	۱/۵	۳/۲۵	۶/۶۷



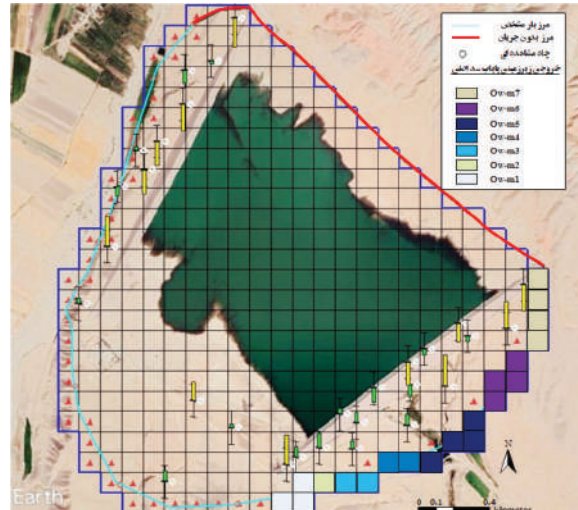
شکل ۵. خلاصه نتایج محاسبه بیلان مخزن سد بار طی شش دوره آبیگری (ارقام به میلیون متر مکعب)

تحلیل‌های کیفیت شیمیایی

نمونه‌برداری دوره‌ای از سال ۱۳۹۳ تا سال ۱۳۹۸ از آب مخزن سد، زهکش‌های پایاب (سه زهکش vnoch) و ۲۶ گمانه پایاب سدهای اصلی و فرعی انجام شده است. علاوه بر این وجود گچ به شکل پراکنده در میان رسوبات در بخش‌هایی از مخزن به‌طور کامل نمایان است و فرض انحلال گچ در مسیر جریان تقویت می‌شود. مولفه‌های هیدروشیمیایی مورد اندازه‌گیری نمونه‌های آب علاوه بر کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی، دما، هدایت الکتریکی و pH می‌باشد (لازم به ذکر است با توجه به میزان نشت اندک از گستره سد فرعی و اهداف تحقیق، فقط تاثیر انحلال بر پایداری سد اصلی مورد بررسی قرار گرفت). در جدول ۲ حداقل و حداکثر غلظت هریک از پارامترهای هیدروشیمیایی و در جدول ۳ نتایج تجزیه شیمیایی نمونه‌های گستره سد اصلی بار در سال ۱۳۹۶ ارائه شده است. مقایسه غلظت آنیون‌ها در آب مخزن و چاه‌های مشاهده‌ای پایاب نشان از افزایش قابل توجه غلظت سولفات در آب نشت یافته می‌باشد.

شبیه‌سازی آبخوان گستره ساخت گاه سد بار با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW در ناحیه‌ای مشتمل بر ۶۷۵ سلول و هر سلول به ابعاد ۱۰×۱۰ متر تقسیم شده است (شکل ۷). مرزهای مدل شامل مرز با جریان مشخص (ناحیه شمالی مخزن مرز بدون جریان و سایر مناطق مرز با جریان مشخص) برای مدل تعریف شده و شبیه‌سازی برای دو حال پایدار و ناپایدار انجام شده است. مقادیر سطح ایستابی در چاه‌های مشاهده‌ای (۲۶ چاه) و فشار پیزومتری در گمانه‌های الکتریکی (پنج گمانه) در ابتدای فروردین ماه سال ۱۳۹۶ برای شبیه‌سازی حالت پایدار و داده‌های فروردین تا دی ماه سال ۱۳۹۶ با در نظر گرفتن دوره‌های تنش ۱۰ روزه، برای مدل‌سازی شرایط ناپایدار انتخاب شده است. مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی با استفاده از نتایج آزمایش‌های لوفران و دانه‌بندی، برای گستره مدل‌سازی تعیین شده و واسنجی به روش سعی و خطا و خودکار (با استفاده از کد PEST و تعیین دامنه تغییرات) برای پهنه به‌صورت بهینه انجام شده است.

طول دوره آماری از تحول شیمیایی متفاوت آب نشستی در بخش‌های مختلف حکایت می‌کند (شکل ۷). در چاه OW-M6 نوسانات شدید هدایت الکتریکی در آنگیری‌های اولیه مشاهده می‌شود. ولی از سال ۱۳۹۵ روندی یکنواخت‌تر با متوسط هدایت الکتریکی ۵۰۰۰ میکروموس بر سانتیمتر مشاهده می‌شود. آنچه در سری‌زمانی تغییرات هدایت الکتریکی مشخص است، روندی مبنی بر کاهش هدایت الکتریکی و بهبود کیفیت آب مشاهده نمی‌شود. نوسانات هدایت الکتریکی در طول سری‌زمانی تحت تاثیر: دوره‌های آنگیری مخزن و افزایش نشست، تاثیر افزایش فشار و انتقال آب در تعادل با رسوبات پی (با افزایش تراز آب در مخزن) و افزایش نسبی هدایت الکتریکی آب مخزن در پایان دوره آنگیری می‌باشد.



شکل ۶. مدل‌سازی، شبکه‌بندی، شرایط مرزی و سلول‌های جریان زیرزمینی خروجی گستره سد اصلی بار

تغییرات هدایت الکتریکی و کاتیون‌ها و آنیون‌های اصلی، از آب مخزن تا چاه‌های مشاهده‌ای پایاب سد در

جدول ۲. حداقل و حداکثر غلظت مولفه‌های هیدروشیمیایی برداشت شده از مخزن و پایاب سد اصلی بار (غلظت‌ها برحسب میلی‌اکی‌والان بر لیتر)

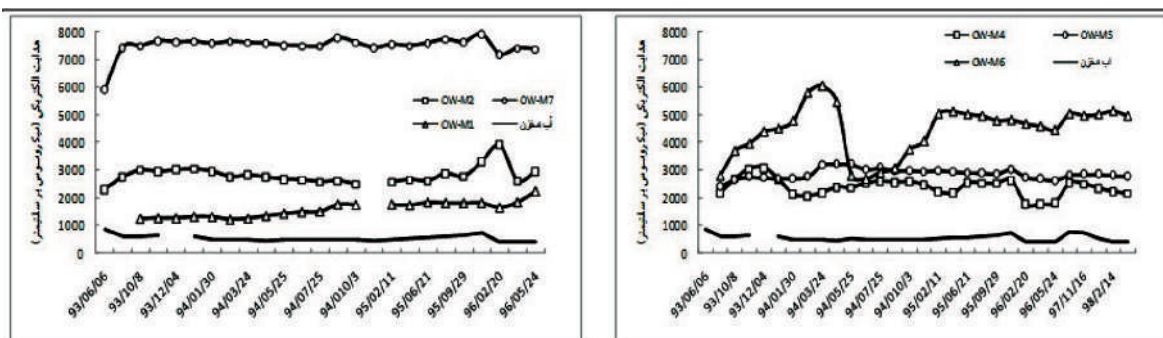
ANIONS			CATIONS				PH	EC		
SO4	Cl	HCO3	K	Na	Mg	Ca				
۳/۶	۱	۲	۰/۲	۱/۸	۳	۲/۲	۸/۰۵	۷۱۷	max	مخزن
۲/۷	۰/۵	۲	۰/۰۹	۱/۳	۲/۳	۲	۷/۸	۵۵۶	min	
۹	۱/۷	۵/۶	۰/۱	۱۵/۵	۱/۳	۱/۲	۸/۳۷	۱۸۱۰	max	OW-M1
۸	۱/۸	۵/۴	۰/۱۵	۱۵/۷	۰/۸	۰/۷	۸/۴۲	۱۷۳۸	min	OW-M2
۲۶	۴/۴	۱/۷	۰/۱	۷	۱۰	۱۸	۷/۶	۳۳۲۰	max	OW-M3
۲۵	۴	۱/۵	۰/۰۷	۶/۵	۷/۱	۱۷/۶	۷/۹۴	۲۶۶۰	min	OW-M3
۱۱۴	۱۱/۵	۳/۶	۰/۲۵	۱۲۵	۴	۱۲	۸/۲۳	۱۰۲۷۰	max	OW-M4
۹۴/۵	۸	۳/۵	۰/۱	۱۰۲	۴/۹	۷/۷	۸/۰۳	۸۵۴۰	min	OW-M4
۲۲/۵	۱/۵	۲/۱	۰/۱۵	۷	۶/۸	۱۳	۷/۸۱	۲۶۳۰	max	OW-M5
۱۷/۴	۱/۹	۲/۳	۰/۲	۷/۵	۷/۵	۷/۵	۸/۰۱	۲۱۹۰	min	OW-M5
۲۴/۵	۲/۷	۲/۵	۰/۱	۹	۴/۵	۱۷/۵	۷/۸	۳۰۴۰	max	OW-M6
۲۴	۳/۱	۲/۵	۰/۱	۱۱	۵/۷	۱۵	۷/۶۸	۲۹۵۰	min	OW-M6
۳۳	۱۸	۲/۸	۰/۱۳	۳۴	۷	۱۸	۷/۸۶	۵۱۳۰	max	OW-M6
۳۵	۱۰	۲/۸	۰/۱۵	۲۸/۵	۶/۴	۱۷	۷/۷۴	۴۸۲۰	min	OW-M7
۶۱	۱۴	۲/۱	۰/۱۴	۵۷	۶	۲۱	۷/۷۵	۷۹۳۰	max	OW-M7
۶۰	۱۳/۴	۲/۳	۰/۲	۵۵	۶/۹	۱۸/۷	۷/۸۵	۷۵۰۰	min	V-NOCH1
۲۳	۱	۲/۵	۰/۰۹	۲	۴/۷	۲۲/۳	۷/۷	۲۴۶۰	max	V-NOCH1
۲۳/۲	۱	۲/۱	۰/۰۸	۱/۸	۴	۲۳/۵	۷/۷	۲۴۴۰	min	V-NOCH1

سنگ‌های مارنی-رسی غنی از رسوبات تبخیری در بخش شمالی مخزن و توالی لایه‌های آبرفتی حاصل از فرسایش آنها تا بخش میانی مخزن، دلیل اصلی افزایش غلظت املاح در آب زیرزمینی است.

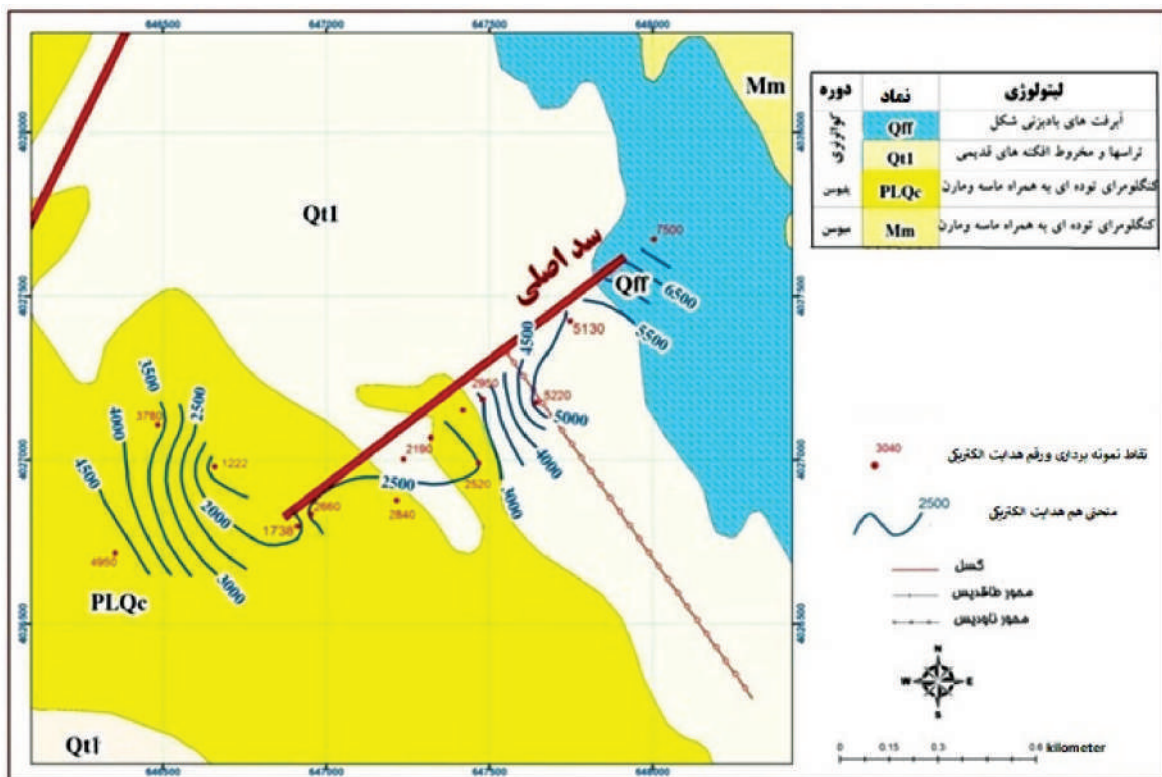
تغییرات هدایت الکتریکی آب زیرزمینی از جناح راست تا بخش میانی اندک است (شکل ۹). از ناحیه میانی تا جناح چپ، افزایش هدایت الکتریکی شدت داشته و این افزایش در امتداد محور و در مسیر جریان آب مشاهده می‌شود.

جدول ۳. متوسط کل مواد جامد محلول در چاه‌های مشاهده‌ای پایاب سد اصلی بار (میلی‌گرم بر لیتر)

سال	ماه	مخزن	OW-M1	OW-M2	OW-M3	OW-M4	OW-M5	OW-M6	OW-M7
۱۳۹۶	۲	۲۶۳/۹۷	۱۰۳۹/۵	۲۴۷۵/۹	۴۴۹۸/۲	۱۱۱۹/۵۱	۱۷۳۲/۵	۲۹۴۸/۴	۴۵۳۶
۱۳۹۶	۴	۲۶۳/۹۷	۱۱۵۶/۶۸	۱۶۵۰/۶	۳۴۷۷/۶	۱۱۲۲/۶۶	۱۶۹۴/۷	۲۸۹۱/۷	۴۶۷۴/۶
۱۳۹۶	۵	۲۶۶/۴۹	۱۴۱۱/۲	۱۸۷۱/۱	۳۸۲۴/۱	۱۱۵۶/۰۵	۱۶۶۳/۲	۲۸۰۹/۸	۴۶۴۹/۴
۱۳۹۶	۸	۳۰۴/۹۲	۱۱۳۹/۶۷	۱۸۲۰/۷	۳۲۷۶	۱۶۰۰/۲	۱۸۳۳/۳	۳۱۳۱/۱	۴۸۷۶/۲
۱۳۹۶	۹	۳۲۱/۹۳	۱۱۳۷/۱۵	۱۷۵۱/۴	۲۸۵۳/۹	۱۶۰۰/۲	۱۸۰۸/۱	۳۰۲۴	۴۸۱۳/۲
۱۳۹۶	۱۱	۲۹۸/۶۲	۱۱۴۰/۳	۲۰۹۱/۶	۲۶۴۶	۱۶۵۶/۹	۱۹۱۵/۲	۳۰۳۶/۶	۴۹۹۵/۹
متوسط		۲۸۶/۷	۱۱۷۰/۸	۱۹۴۳/۶	۳۴۲۹/۳	۱۳۷۵/۹	۱۷۷۴/۵	۲۹۷۳/۶	۴۷۵۷/۶



شکل ۷. تغییرات هدایت الکتریکی آب مخزن و گمانه‌های پایاب سد بار

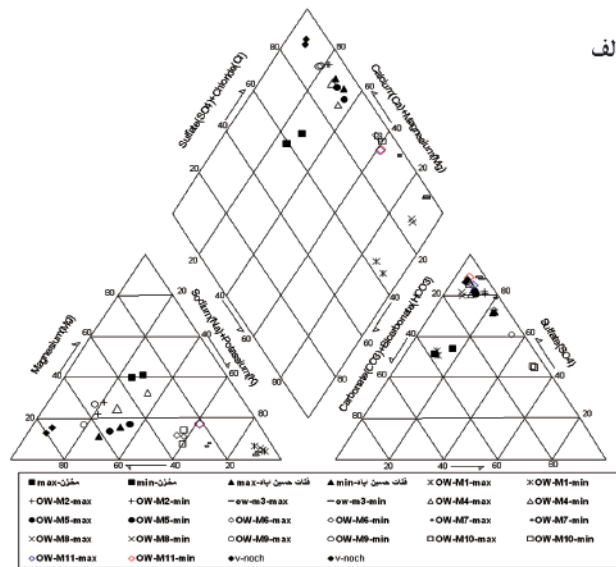
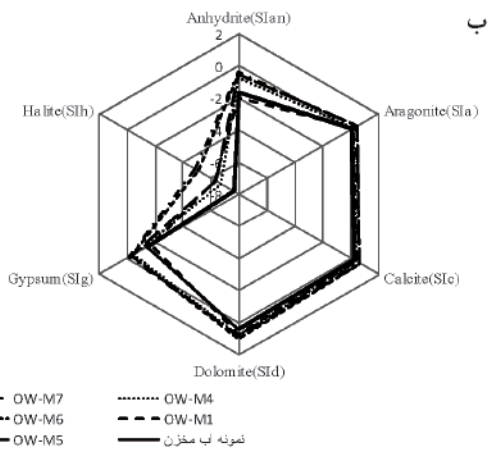


شکل ۸. هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در پهنه سد اصلی بار

رخساره آن سدیک-کلسیک می‌باشد. در این ناحیه با توجه به افزایش غلظت املاح و یون کلر، از انحلال کانی‌ها به همراه گچ در مسیر جریان آب نشستی حکایت می‌کند. البته ورود کودها و سموم کشاورزی، فاضلاب خانگی نیز می‌تواند موجب افزایش غلظت سولفات شود (محمودلو و همکاران، ۱۳۹۹) ولی با توجه به نبود این منابع، انحلال کانی‌های سولفات‌ها دلیل اصلی افزایش غلظت سولفات است.

محاسبه نمایه اشباع با استفاده از نرم‌افزار PHREEQC ۲/۸۵/۰۶ نشان می‌دهد: آب مخزن در گستره فوق اشباع نسبت به کانی‌های کربناته (SIa، SIc و SIa)، تحت اشباع نسبت به ژئیس و انیدریت (SIg و SIan) و به‌طور کامل تحت اشباع نسبت به هالیت است. نمایه اشباع آب نشست یافته نیز وضعیتی مشابه با مخزن دارد با این تفاوت که از سمت راست پایاب به سمت چپ، نمایه اشباع نسبت به ژئیس و انیدریت به وضعیت متعادل و نسبت به هالیت به تدریج کاهش و وضعیت تحت اشباع را نشان می‌دهد (شکل ۹-ب).

تحول شیمیایی آب در مسیر جریان نشان می‌دهد آب مخزن دارای تیپ سولفات-بی‌کربناته و رخساره منیزیک-کلسیک است. در مسیر نشست تا محل زهکش‌های زیر بدنه، تیپ آب به‌طور کامل سولفات‌ها و رخساره آن به‌طور کامل کلسیک می‌شود (شکل ۹-الف). بنابراین انحلال سولفات کلسیم (گچ) در مسیر جریان آب از مخزن تا زیر بدنه سد، مهم‌ترین واکنش شیمیایی اتفاق افتاده است. در بخش جنوبی محور سد (OW-M1) کیفیت آب به لحاظ نسبت‌های آنیونی تنها با افزایش غلظت املاح، مشابه آب مخزن است ولی نسبت کاتیونی آن بسیار متفاوت و رخساره آن به‌طور کامل سدیک می‌باشد (شکل ۱۰). انحلال سولفات سدیم دلیل اصلی افزایش غلظت املاح و قرارگیری آب در گستره شورابه‌ها است (OW-M3 و OW-M1). در بخش میانی تیپ آب سولفات‌ها و رخساره آن کلسیک است. با توجه به افزایش غلظت املاح محلول در آب، انحلال گچ (ژئیس) مهم‌ترین عامل تعیین‌کننده کیفیت آب در این ناحیه است. در جناح چپ (شمال محور) تیپ آب سولفات-کلروره و



شکل ۹. الف) نمودارهای پایپر، ب) تغییرات نمایه‌های اشباع نمونه آب مخزن و چاه‌های پایاب سد اصلی بار

می‌باشد. با استفاده از نتایج بیلان جزء به جزء، استخراج رابطه نشست-ارتفاع آب و سطح گستره آب در مخزن سد، از طریق بسته تغذیه برای هر یک از گام‌های زمانی به مدل وارد شده است. به‌منظور صحت‌سنجی مدل، داده‌های مشاهداتی

بحث

آب نفوذ یافته از مخزن سد بار پس از اشباع بی‌آبرفتی از سه ناحیه: بی‌سد اصلی، بی‌سد فرعی و تکیه‌گاه جنوبی مخزن به سمت پایاب نشست می‌کند. نشست آب از بستر مخزن سد ورودی به پهنه مدل‌سازی در محیط نرم‌افزار MODFLOW

۱۳۹۶ در مجموع ۳۵۷۴ تن ماده از پی ساخت گاه سد اصلی بار انحلال یافته است. با توجه به تفاوت قابل توجه میزان نشت آب از بخش‌های مختلف پی، مقدار ماده حل شده تفاوت قابل توجهی را نشان می‌دهد. گستره چاه مشاهده‌ای OW-M5 در بخش میانی محور سد با ۱۴۸۳/۴ تن ماده حل شده، مقطع بحرانی است و افزایش پوکی و به تبع آن افزایش نفوذپذیری و توسعه پدیده‌های فرسایشی، ریزشویی و در نهایت کاهش ظرفیت باربری پی را در این ناحیه شاهد خواهیم بود.

با فرض انحلال یکنواخت در پی ساخت گاه محور سد اصلی بار، میزان افزایش پوکی خاک پی محاسبه شده است (جدول ۵). در این جدول متوسط وزن مخصوص خاک پی برابر ۱/۶ گرم بر سانتیمتر مکعب (داده‌های نمونه‌برداری‌های گمانه‌ها) لحاظ شده و متوسط ضخامت، عرض مقطع عبوری جریان و طول مسیر جریان بر اساس مدل مفهومی تهیه شده مورد توجه قرار گرفت. همان‌گونه که مشخص است در مقطع بحرانی (OW-M5) میزان افزایش پوکی سالانه حدود ۰/۰۶۲ درصد و در طول عمر مفید ۴۰ ساله سد، برابر ۲/۵ درصد محاسبه می‌شود. ذکر این نکته ضروری است در صورت وجود افق‌هایی با درصد بالای کانی‌های با قابلیت انحلال زیاد در اعماق (در حفاری‌ها و ترانشه‌برداری‌های انجام شده چنین افق‌هایی دیده نشده است) تمرکز جریان و تشدید فرایند انحلال می‌تواند به صورت تهدید بالقوه مطرح باشد و لازم است در این خصوص مطالعات تکمیلی انجام شود.

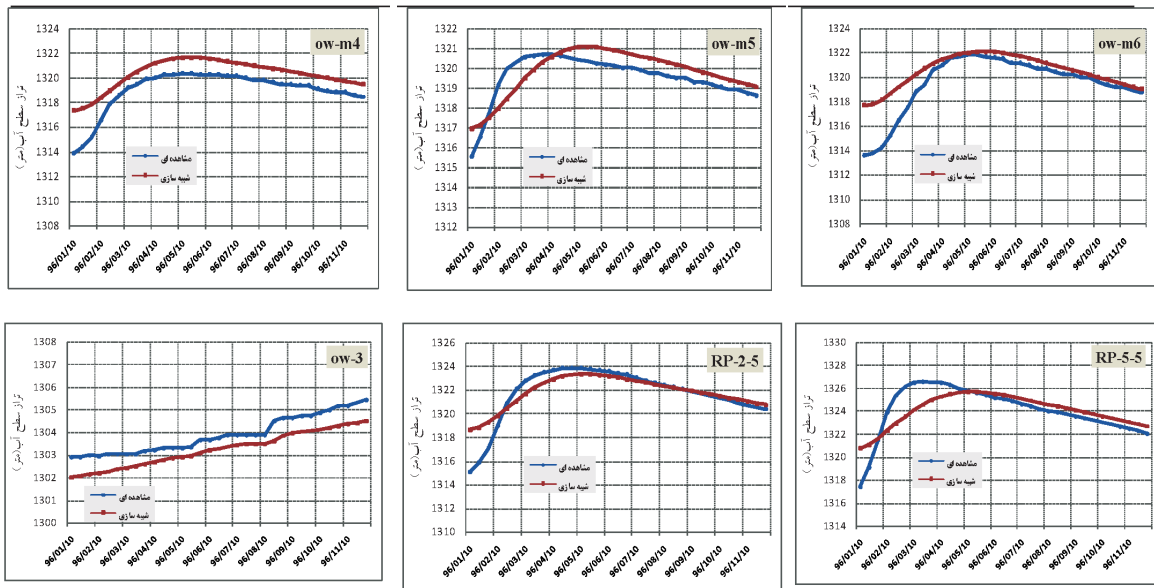
بهمن ماه سال ۱۳۹۶ و پارامترهای مرحله واسنجی به مدل داده شد. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی معیار متوسط قدر مطلق خطا برابر دو به دست آمد و نشان می‌دهد مقدار خطا در ناحیه قابل قبول قرار دارد. در شکل ۱۰ مقادیر تراز سطح آب زیرزمینی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای نشان داده شده است (نتایج شبیه‌سازی انطباق نا اندازه‌ای مناسب با داده‌های مشاهده‌ای دارد).

نتایج مدل‌سازی و محاسبه حجم آب عبوری در طی آبگیری سال ۱۳۹۶ نشان می‌دهد؛ در مجموع از پی سد اصلی بار ۲/۳، از ناحیه جنوبی مخزن ۰/۶ و از پی سد فرعی ۰/۱۵ میلیون متر مکعب آب به خارج از گستره بیلان جریان یافته است. بر این اساس حدود ۷۵ درصد آب نشت یافته از مخزن سد از پی سد اصلی عبور می‌کند. این میزان در پی سد فرعی تنها پنج درصد است. مقایسه میزان نشت آب از بخش‌های مختلف پی ساخت گاه سد اصلی نیز نشان می‌دهد در هفت مقطع انتخابی (شکل ۶)، بخش مرکزی (گستره چاه‌های مشاهده‌ای OW-M4 و OW-M5) حدود ۷۷ درصد کل حجم آب عبوری از پی سد اصلی و ۵۸ درصد کل حجم آب نشت یافته از مخزن سد بار اتفاق می‌افتد.

با مدل‌سازی و تعیین میزان نشت آب از بخش‌های مختلف پی سد اصلی بار (جدول ۴) و مشخص بودن کیفیت شیمیایی آب نشت یافته (شش مرحله نمونه‌برداری کیفیت شیمیایی در سال ۱۳۹۶، (جدول ۳) می‌توان جرم ماده حل شده در بخش‌های مختلف پی ساخت گاه سد اصلی بار را محاسبه کرد (جدول ۵). بر این اساس در طی آبگیری سال

جدول ۴. آب زیرزمینی خروجی از آبخوان آبرفتی گستره مدل‌سازی سد بار (ارقام هزار متر مکعب)

ناحیه	پی سد اصلی							بخش جنوبی مخزن	پی سد فرعی
	OW-M1	OW-M2	OW-M3	OW-M4	OW-M5	OW-M6	OW-M7		
خروجی زیرزمینی	۱۰۸	۱۴۱	۱۲۲	۷۹۲	۹۹۷	۸۷	۶۳	۵۹۸	۱۵۲



شکل ۱۰. مقایسه سطح آب شبیه‌سازی و مشاهده‌ای در تعدادی از چاه‌های مشاهده‌ای و گمانه‌های الکتریکی

جدول ۵. جرم ماده حل از پی ساخت گاه سد اصلی بار در آبیگری سال ۱۳۹۶

عنوان	OW-M1	OW-M2	OW-M3	OW-M4	OW-M5	OW-M6	OW-M7
جرم ماده حل شده (تن)	۹۵/۵	۲۳۳/۶	۳۸۳/۴	۸۶۲/۷	۱۴۸۳/۴	۲۳۳/۸	۲۸۱/۷
حجم ماده حل شده (متر مکعب)	۶۰	۱۴۶	۲۴۰	۵۳۹/۲	۹۲۷	۱۴۶	۱۷۶
عرض مقطع عبور جریان (متر)	۱۰۰	۱۰۰	۱۶۰	۲۴۰	۳۴۰	۳۳۰	۲۸۰
متوسط ضخامت آبرفت پی سد (متر)	۳۷	۳۰	۲۸	۲۵	۲۲	۱۵	۱۰
متوسط طول مسیر جریان از مخزن (متر)	۳۰۰	۲۷۰	۲۳۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰	۲۷۰
درصد پوک شدگی سالانه پی (%)	۰/۰۵	۰/۰۱۸	۰/۰۲۳	۰/۰۴۵	۰/۰۶۲	۰/۰۱	۰/۰۲

نتیجه‌گیری

داد سالانه ۳۵۷۴ تن ماده از پی سد اصلی بار و ۱۴۸۳ تن از بخش میانی آن انحلال می‌یابد. همچنین محاسبات نشان می‌دهد، میزان افزایش پوکی سالانه در بخش میانی پی سد اصلی بار برابر ۰/۰۶۲ درصد و مجموع افزایش پوکی پی در عمر مفید ۴۰ ساله سد حدود ۲/۵ درصد است. اگرچه این میزان پوکی در ناحیه مجاز برای کنترل پایداری سد است ولی پیشنهاد می‌شود با تغییر تخصیص آب با توجه به نیاز بالای شهر نیشابور، تنظیم آب در حداقل زمان ممکن با هدف کنترل و کاهش میزان نشست صورت گیرد. علاوه بر این تقویت المان آب‌بند (تقویت پتوی رسی) از جمله راهکارهای پیشنهادی برای کاهش نشست و کنترل پدیده انحلال در پی سد بار است.

تهیه بیلان روزانه آب مخزن سد بار نشان می‌دهد؛ میزان نشست آب ۳۵ تا ۷۰ درصد حجم آب مخزن را شامل می‌شود. نمونه‌برداری‌های کیفیت شیمیایی در گستره سد بار نشان می‌دهد، غلظت املاح در آب نشست یافته پنج تا نه برابر آب مخزن است. مدل‌سازی نشست آب از پی ساخت‌گاه سد بار با استفاده از مدل MODFLOW برای سال ۱۳۹۶ نشان می‌دهد، ۷۵ درصد آب نشست یافته از مخزن سد از پی سد اصلی عبور می‌کند. این میزان در پی سد فرعی تنها پنج درصد است. همچنین جریان نشست بر ناحیه میانی پی محور سد اصلی بار متمرکز است و این ناحیه مقطع بحرانی به لحاظ نشست و انحلال تشخیص داده شده است. نتایج مدل‌سازی و تجزیه شیمیایی نمونه‌های برداشت شده نشان

منابع

- Science and Technology: Water Supply, 17(5), 1447-1457.
- McDonald M.G. and Harbaugh A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model. U.S. Geological survey Techniques of Water-Resources Investigation 6(A1). 586
 - Mozafari, M., Raeisi, E. and Guerrero, J., 2018. Contribution of spectral coherency analysis and tracer test to study leakage at the Doosti Dam reservoir. Iran and Turkmenistan Environmental earth sciences, 77(4), 139.
 - Noble, J. and Ansari, M. A., 2017. Environmental isotope investigation for the identification of source of springs observed in the hill-rock on the left flank of Gollaleru Earthen Dam, Andhra Pradesh, India. Journal of Earth System Science, 126(5), 67.
 - Piqueras, J. M., Perez, E. S. and Menendez-Pidal, I., 2012. Water seepage beneath dams on soluble evaporite deposits: a laboratory and field study (Caspé Dam, Spain). Bulletin of engineering Geology and the Environment, 71(2), 201-213.
 - Sammen, S. S., Mohamed, T. A., Ghazali, A. H., Sidek, L. M. and El-Shafie, A., 2017. An evaluation of existent methods for estimation of embankment dam breach parameters. Natural Hazards, 87(1), 545-566.
 - Sjodahl, P., Dahlin, T. and Johansson, S., 2008. Resistivity monitoring for internal erosion detection at Hallby embankment dam. In Progress in Environmental and Engineering Geophysics: Proceedings of the International Conference on Environmental and Engineering Geophysics, International Conference on E-Commerce E-Business and E-Government (ICEEG) Science Press, 310-316.
 - Ullah, A., Kassim, A., Alam, I. and Junaid, M., 2019 Efficiency analysis of seepage of
 - اکبری، ف.، باقری، ر. و ندری، آ.، ۱۳۹۷. بیلان هیدروژئولوژیک تالاب برم شور در شهرستان هفتکل استان خوزستان. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۲، ۴۸، ۱-۱۰.
 - محمودلو، م.، جندقی، ن. و صیادی، م.، ۱۳۹۹. تکامل هیدروشیمیایی و کاهش کیفیت آب رودخانه گرگانرود. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۴، ۵۵، ۱۲۹-۱۴۵.
 - نبی‌زاده، ن. و جعفری، ه.، ۱۴۰۰. تخمین تغذیه آبخوان مرزی سرخس با استفاده از مدل عددی. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۵، ۵۷، ۱۵-۲۷.
 - شرکت آبپوی، ۱۳۹۴. گزارش مطالعات رفتارنگاری و آب‌بندی مخزن سد بار. وزارت نیرو، شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، ۲۰.
 - واعظی، ع. و اسماعیل‌نیا، ن.، ۱۳۹۴. تعیین لایه نشتی و بررسی مکانیسم نشت از تکیه‌گاه چپ سد آغ‌چای (آذربایجان غربی) با استفاده از مطالعات هیدروژئولوژی. فصلنامه مهندسی آبیاری و آب، ۸، ۳۰.
 - Bedmar, A. P. and Araguas, L. U. I. S., 2002. Detection and the Prevention of Leaks from Dams. CRC Press.
 - Craft, C. D., Pearson, R. M. and Hurcomb, D., 2007. Mineral dissolution and dam seepage chemistry-The Bureau of reclamation experience. In Proceedings of the 2007 National Meeting, Dam Safety 2007.
 - Jixiang, H.U., Fuheng, M.A. and Jiang, H.U., 2018. Characteristics and evolution of seepage water hydrochemistry at dam-site on Lijixia hydropower station. Congres des Grands Barrages, Vienne.
 - Kimble, J. M., Knox, E. G. and Holzhay, C. S., 1993. Soil survey laboratory methods for characterizing physical and chemical properties and mineralogy of soils. In Application of Agricultural Analysis in Environmental Studies, ASTM International.
 - Li, X. Ye, S., Wang, L. and Zhang, J., 2017. Tracing groundwater recharge sources beneath a reservoir on a mountain-front plain using hydrochemistry and stable isotopes. Water

- Baz Ali small dam, Kurram Agency using clay blanket and cut off wall with sand filter. Journal of the Geological Society of Malaysia, 67, 113-118.
- Unal, B., Celik, M. and Yildirim, T., 2008. Evaluation of seepage problems of the Armagan Dam, Kırklareli, northwestern Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 67(3), 335-344.
- Wang, S.W., Xu, Y.L., Gu, C.S. and Bao, T.F., 2018. Monitoring models for base flow effect and daily variation of dam seepage elements considering time lag effect. Water Science and Engineering, 11(4), 344-354.