

بررسی و مدل‌سازی چالش سد گتوند علیا (هیدرودینامیک و شوری مخزن) و ارائه راهکارهای مدیریتی

وحید ندرخانلو^۱، مهدی مظاهری^{۲*}، جمال محمدولی سامانی^۳

۱. کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس (naderkhanloo.7@gmail.com)

۲. استادیار، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس

۳. استاد، گروه سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس (samani_j@modares.ac.ir)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۵/۰۳

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۲

چکیده

یکی از سدهای بزرگ کشور سد گتوند علیا در استان خوزستان است. از مهم‌ترین چالش‌های ایجادشده درباره این سد، وجود توده‌های نمکی در مخزن سد است که پس از آبیگری مستغرق و باعث شوری مخزن می‌شود. این امر در حال حاضر به یکی از مشکلات اساسی مرتبط با این سد در کشور تبدیل شده است. برای حل چالش مذکور راهکارهایی پیشنهاد شده است که از مهم‌ترین آن‌ها مدیریت کیفی مخزن با آبیگری از لایه‌های مختلف است. برای داشتن شناختی جامع از هیدرودینامیک جریان و شوری مخزن این سد، با توجه به اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته از مقدار شوری در اعماق مختلف و جریان ورودی در زمان‌های مختلف، شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و لایه‌بندی حرارتی و شوری با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی برای دوره‌های دوساله از ابتدای آبیگری صورت گرفت. با توجه به اینکه مقدار نرخ انحلال مهم‌ترین پارامتری است که در برآوردهای کمی از میزان انحلال نقش دارد، در این تحقیق، مقدار نرخ انحلال سازندهای نمکی، بر اساس لایه‌بندی شوری درون مخزن سد واسنجی و صحت‌سنجی شد. همچنین، امکان‌پذیری مدیریت کیفی مخزن با توجه به مشکل به‌وجود آمده بررسی و با توجه به نتایج مدل سه‌بعدی راهکارهای مربوط نیز ارائه شد.

کلیدواژه

سازند گچساران، سد گتوند علیا، لایه‌بندی شوری، مدل سه‌بعدی، نرخ انحلال.

۱. سرآغاز

آبادان، شوشتر، خرمشهر و گتوند قرار دارد. سد گتوند دومین مخزن آبی ایران (پس از کرخه) و بزرگ‌ترین مخزن آبی روی رودخانه کارون است. چالش مهم و معروفی که درباره سد گتوند از همان ابتدای آبیگری آن مطرح بوده و هست، وجود توده‌های نمکی غول‌پیکر (معروف به سازندهای گچساران) در مخزن این سد است. پیش‌بینی می‌شد (و می‌شود) که با زیر آب رفتن این توده‌ها، آب موجود در مخزن سد شور شود و تبعات بسیار ناگوار

سد گتوند علیا یکی از بزرگ‌ترین سدهای ایران است که روی رودخانه کارون در جنوب غرب ایران احداث شده است. این سد، در فاصله ۳۸۰ کیلومتری از ریزشگاه رودخانه کارون و در ۱۰ کیلومتری شمال شرقی شهر گتوند در استان خوزستان قرار دارد. به‌لحاظ موقعیت مکانی، سد گتوند آخرین سد احداث‌شده روی رودخانه کارون است و در پایین‌دست آن، دشت خوزستان و شهرهایی چون اهواز،

اعمال مدیریت کیفی در آب مخزن و بررسی امکان‌پذیری آن باید شناختی جامع از هیدرودینامیک جریان توأم با روند لایه‌بندی شوری و تجمع نمک در مخزن داشت. لذا، موضوع اصلی این مقاله شبیه‌سازی سه‌بعدی هیدرودینامیکی و لایه‌بندی شوری و حرارتی مخزن سد گتوند و ارائه راهکارهای مدیریتی برای نیل به هدف مذکور است.

یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی که کیفیت آب دریاچه‌ها و مخازن سدها را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد، فرایند لایه‌بندی شدن پیکره آبی است. اصطلاح لایه‌بندی اشاره به شکل‌گیری لایه‌های افقی آب درون پیکره آبی دارد و نشأت گرفته از تفاوت در مقدار چگالی لایه‌هاست و از آنجا که مقدار چگالی، تابعی از دما، شوری و تراکم‌پذیری است، تغییر در مقدار هر کدام از موارد ذکر شده یا ترکیبی از آن باعث ایجاد پدیده لایه‌بندی می‌شود (Chapra, 1997). افزایش شوری در مخازن سدها ناشی از ورود جریان‌های رودخانه‌ای همراه با غلظت زیاد نمک، تبخیر آب مخزن، ورود جریان‌های آب شور زیرزمینی از مجاور مخزن و انحلال املاح سنگ بستر در آب مخزن است. جریان‌های غلیظ به دلیل چگالی بالا در لایه‌های زیرین آب و نزدیک بستر تجمع می‌یابد و با ایجاد گرادیان شدید شوری بین لایه‌ها، لایه‌بندی شوری را تشکیل می‌دهد. لایه‌بندی‌ای که از اختلاف و گرادیان شدید شوری در لایه‌های عمقی آب شکل می‌گیرد، هالوکلاین نام دارد. هالوکلاین جداکننده دو لایه مونومولیمنیون و میکسولیمنیون است. دریاچه و مخزن سد دارای لایه‌بندی شوری (هالوکلاین) مِرومیکتیک نامیده می‌شود (Nino et al., 2004). مهم‌ترین پارامتری که در برآوردها و ارزیابی‌های کمی از میزان انحلال نقش دارد، مقدار نرخ انحلال است. از عوامل مؤثر بر مقدار نرخ انحلال می‌توان به عوامل فیزیکی-شیمیایی نظیر فشار، دمای آب و سرعت جریان و عوامل محیطی چون وسعت سطح رخنمون نمک و وقوع لغزش در دیواره سازه‌ها اشاره کرد. افزایش در

محیط‌زیستی برای پایین دست ایجاد کند. توده‌های مذکور در فاصله ۴/۵ کیلومتری از محور سد به سمت بالادست شروع می‌شود و طولی در حدود ۲۲۰۰ متر و ارتفاعی حداکثر برابر ۹۰ متر دارد. حجم این توده‌ها حدود ۶۱/۸ میلیون مترمکعب برآورد شده است (مه‌اب قدس، ۱۳۹۱). لازم به ذکر است که چالش به وجود آمده برای سد گتوند به چالشی ملی تبدیل شده است، به طوری که دستگاه‌های بخشی و فرابخشی بسیاری در این مورد اظهارنظر کرده‌اند. حساسیت این امر به جایی رسید که سازمان حفاظت محیط‌زیست و سازمان بازرسی کل کشور نیز به این مسئله ورود پیدا کردند و سرانجام دستور پیگیری و بررسی موضوع توسط معاون اول رئیس‌جمهور صادر شد.

با توجه به اینکه هزینه حدود ۳۵۰۰۰ میلیارد ریالی احداث سد، آثار نامطلوب محیط‌زیستی، افت کیفیت آب شرب شهری، آب مصرفی مزارع پایین دست و آب‌های زیرزمینی و تبعات سیاسی-اجتماعی ناشی از انحلال سازندها و شور شدن آب مخزن و تجمع نمک درون مخزن راهکارهایی ارائه شد که حمل توده‌های نمکی به خارج از مخزن، قطع ارتباط آب مخزن با توده‌های نمکی با پوشش‌هایی چون ژئوممبرین، احداث پتوی رسی برای کند کردن نرخ انحلال، احداث لوله‌های انتقال در بستر مخزن برای انتقال شوری به خلیج فارس و مدیریت کیفیت آب مخزن از این قرار است (مه‌اب قدس، ۱۳۹۱). از موارد مذکور، مدیریت و بهره‌برداری صحیح از مخزن سد یکی از گزینه‌های کم‌هزینه و بدون دخالت بیشتر در محیط‌زیست برای کاهش شوری مخزن به‌شمار می‌رود. برای دستیابی به گزینه‌های مناسب بهره‌برداری باید مطالعات لایه‌بندی شوری در مخزن سد صورت گیرد. بنابراین، با اعمال مدیریت بهره‌برداری در کیفیت آب از مخزن سد، می‌توان آبیگری را از لایه‌های مختلف انجام داد. همچنین، لایه‌های آب شور مخزن را به صورت جریان آبی با غلظت کمتر به خارج از مخزن هدایت کرد و از مخاطرات استفاده از آب شور در پایین دست سد جلوگیری به عمل آورد. لذا، برای

خروجی آن به سمت رودخانه است. این امر انحلال مداوم لایه های نمکی را در نوسانات تراز آب در نتیجه پیشروی و پسروی آب به درون کانال های کارستی مهیا می کند (داموغ و زارعی، ۱۳۸۹). نتایج حاصل از ارزیابی آثار محیط زیستی احداث سد گتوند نیز نشان می دهد که احداث این سد باعث زهکشی نمک به درون آب، شورشیدن آب های زیرزمینی محدوده منطقه، پراکندگی مواد محلول، ایجاد مواد سمی و آلودگی مواد آلی می شود. (Sayadi et al., 2009).

بقادشتکی و همکاران (۱۳۸۹)، به منظور تعیین نرخ انحلال پذیری سازندهای نمکی گچساران، از آزمایش چرخش آب درون مغزه حفاری استفاده کردند که در شناسایی توسعه فرایند انحلال در سنگ های آهکی به دفعات استفاده می شود. در این روش، عوامل تأثیرگذار در روند انحلال نمک را به ترتیب سرعت گردش آب، سطح نمک در معرض انحلال و حجم آب درگیر در انحلال ذکر کردند. لذا، اثر سرعت های مختلف جریان آب (۰ و ۱ سانتی متر بر ثانیه)، بر میزان نرخ انحلال بررسی و متوسط نرخ انحلال ۱/۱ سانتی متر بر ساعت محاسبه شد. همچنین، نتیجه گرفتند که با افزایش تراز آبیگری درون مخزن، میزان انحلال سازندهای نمکی افزایش خواهد یافت.

حسنوند و همکاران (۱۳۸۹) اثر شاخه های شوراندیکا، شورلالی و شورمرغاب (سه شاخه نهر شور ورودی به مخزن سد گتوند) را بر کیفیت آب مخزن حدود ۳۲ درصد از کل شوری به دست آوردند و باقی را متأثر از سازندهای نمکی موجود در مخزن سد بیان کردند. از سازندهای موجود نیز سازند گچساران و میشان بیشترین تأثیر را بر افزایش شوری داشتند.

حائری و رضائیه (۱۳۹۰)، در بررسی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی انحلال و آب شستگی کارست نمکی در مخازن سدها، مهم ترین عامل ایجاد انحلال و آب شستگی در محیط های کارستی را وجود جریان، گرا دیان هیدرولیکی و مناطق ضعیف در محیط کارستی بیان کردند که به سرعت تحت تأثیر جریان شسته می شود. آن ها اثر

مقدار هر یک از عوامل بیان شده، سبب افزایش در مقدار نرخ انحلال می شود.

در مورد چالش به وجود آمده برای سد گتوند تا به حال تحقیقات زیادی صورت نگرفته است و در زمان انجام تحقیق حاضر، این تحقیق جزء اولین تحقیقات در این زمینه بوده است. در ادامه خلاصه ای از مطالعات مرتبط با سد گتوند ارائه می شود.

طی مطالعه ای روی پارامترهای محیط زیستی رودخانه کارون، کیفیت آب رودخانه از بالادست ایستگاه گتوند تا پایین دست ایستگاه، روند کاهشی داشت. البته، کیفیت آب در فصول گرم سال نسبت به فصول سرد بالاتر بوده است (حسینیان و همکاران، ۱۳۸۵). بررسی تغییرات زمانی میزان شوری آب در ایستگاه گتوند نشان داد که علی رغم اینکه بیشترین دبی رودخانه مربوط به فصل زمستان است، کمترین مقدار شوری مربوط به فصل بهار است. علت این امر را می توان رواناب حاصل از بارندگی و شسته شدن املاح سطح زمین در فصل پاییز و زمستان برشمرد (زارعی و آخوند علی، ۱۳۸۵). از مؤثرترین عوامل در تغییرات کیفی آب مخازن و افزایش شوری، وجود سازندهای زمین شناسی مانند سازندهای گچی نمکی در مخزن سدها است. عامل اصلی کاهش کیفیت منابع آب منطقه ای استان خوزستان وجود سازندهای گچساران و رسوبات حاوی نمک های انحلال پذیر است (زارعی و اژدری، ۱۳۸۵).

کاهش کیفیت آب های زیرزمینی منطقه گتوند کاملاً متأثر از سازندهای زمین شناسی منطقه است و کیفیت آب به گونه ای است که برای مصارف کشاورزی، صنعت و شرب نامناسب و یا دارای محدودیت است (چیت سازان و مظفری زاده، ۱۳۸۶). وقوع بارندگی های شدید در منطقه، نفوذ به درون لایه های نمکی و بالاخره تخلیه به رودخانه از عوامل کاهش کیفیت آب مخزن و شوری جریان است. وجود فروچاله هایی در ارتفاعات بالاتر از تراز نرمال مخزن، رخنمون لایه های ضخیم نمک و شافت های قائم بیانگر ارتباط پیوسته بین دهانه ورودی فروچاله ها و دهانه

بازگشتی به درون رودخانه کای‌تونا از طریق کانال متصل به آن، همچنین مصب آن، با در نظر گرفتن نسبت تداخل آب شیرین و آب شور و برآورد تغییرات شوری درون مصب بوده است (Tuckey, 2009). از مدل MIKE 3 به منظور شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان در پایین‌دست نیروگاه برق‌آبی توسط هج^۲ استفاده شد. نیروگاه برق‌آبی در بالادست آبشار ماسکرات (واقع در آمریکا) احداث شده است. هدف از این تحقیق، بررسی نفوذ جریان آب‌های شور درون رودخانه بوده است (Hatch LTD, 2009).

Jacobs (۲۰۰۷) به منظور بررسی اثر پایه‌های پل بر هیدرودینامیک جریان، روند تغییرات دما و شوری، از مدل MIKE 3 استفاده کردند. پل مذکور، خط ارتباطی بین دو طرف یک مصب در کشور انگلستان است. در واسنجی و اعتبارسنجی مدل از داده‌های برداشت‌شده از سری زمانی نوسانات سطح آب و سرعت و جهت جریان در عمق‌های مختلف استفاده شد. Ryabchenko و همکاران (۲۰۱۰) با شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان خلیج فنلاند توسط چند مدل سه‌بعدی، از جمله مدل MIKE 3 مقایسه‌ای بین آن‌ها انجام دادند. آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل MIKE 3 قابلیت بالاتری در مدل‌سازی شوری نسبت به مدل‌سازی دمایی دارد. Svenningsson (۲۰۱۲) با استفاده از مدل MIKE 3، شبیه‌سازی هیدرودینامیکی جریان منطقه اسکاگراک^۳ را بررسی کردند که از غرب به دریای شمال متصل است. در این تحقیق نوسانات سطح آب و شوری مدل‌سازی شد. Leftheriotis و همکاران (۲۰۱۳) جریان‌های چرخشی بین تالاب‌های مسولونگی و آتلایکو^۴ واقع در خلیج پاترایس^۵ در غرب یونان را از طریق شبیه‌سازی عددی توسط مدل MIKE 3 بررسی کردند. هدف از این تحقیق، شبیه‌سازی لایه‌بندی شوری و دمایی درون تالاب‌ها و بررسی اثر وجود پایه‌های پل و عدم وجود آن در مکان اتصالی بین دو تالاب بر جریان‌های چرخشی بود. نتایج، عدم تأثیر وجود پایه‌های پل بر جریان‌های چرخشی را نشان می‌دهد. در این تحقیق، سعی بر این است که با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی هیدرودینامیکی و شوری مخزن سد

افزایش قطر حفره در سنگ نمک و افزایش سرعت جریان درون حفره سنگ نمک را دلیل افزایش میزان نرخ انحلال بیان کردند و در نهایت درصد وزنی انحلال (نرخ انحلال) را تابعی لگاریتمی از مقدار دبی عبوری از حفره‌های نمونه سنگ نمک بیان کردند. به منظور تعیین و تدقیق نرخ انحلال سازندهای نمکی گچساران با استفاده از مدل آزمایشگاهی با مقیاس ۱:۲۰۰ مخزن، با در نظر گرفتن هندسه منطبق بر توپوگرافی مخزن، به ویژه توپوگرافی محدوده سازندهای نمکی (شیب، جهت شیب، توالی و تناوب بین لایه‌ها)، میزان نرخ انحلال بررسی شد. در این آزمایش، سرعت انتقال آب از بالادست به پایین‌دست در حدود ۲ الی ۳ سانتی‌متر بر ثانیه منظور شد. بر اساس نتایج، به‌طور متوسط، میزان نرخ انحلال در حدود ۳ سانتی‌متر بر ساعت برآورد شد (مه‌اب‌قدس، ۱۳۹۱).

هاشمی‌حیدری و همکاران (۱۳۹۱) با شبیه‌سازی هیدرودینامیکی مخزن سد گتوند با استفاده از مدل MIKE 21، مقادیر مختلفی از ضرایب انحلال سازندهای نمکی را بررسی کردند. آن‌ها بیشتر به بررسی تأثیر ضریب انحلال در میزان پخش و چگونگی حمل شوری در مخزن پرداختند. برای این منظور ضرایب انحلال در محدوده ۰/۱۶۹ تا ۰/۲۵۲ گرم بر سانتی‌متر در مترمربع منظور شد. نتایج حاکی از آن بود که طی ماه‌های نخست آبیگری، به‌ازای مقادیر مختلف ضریب انحلال، تغییرات قابل‌توجهی در مقدار غلظت شوری در مخزن مشاهده نمی‌شود، اما در طول ماه‌های هشتم تا دوازدهم، با افزایش ضریب انحلال، غلظت شوری در مخزن نیز افزایش می‌یابد. سپس در ماه‌های بعد مقدار غلظت روندی رو به کاهش خواهد داشت.

با توجه به اینکه در تحقیق حاضر از نرم‌افزار سه‌بعدی MIKE 3 برای شبیه‌سازی موضوع مورد بحث استفاده می‌شود، در این بخش سابقه‌ای از اهم تحقیقات انجام‌شده با نرم‌افزار مذکور ارائه می‌شود. تاکی شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و نحوه پخش شوری در رودخانه کای‌تونا^۱، همچنین درون مصب آن با مدل MIKE 3 انجام شد. هدف از این شبیه‌سازی، ارزیابی اثر جریان‌های

می‌سازد. در این تحقیق، برای انجام شبیه‌سازی مذکور از مدل تجاری MIKE 3 استفاده می‌شود. مدل MIKE 3 از سال ۱۹۹۸ به بازار ارائه شد و به دلیل قابلیت‌های بالا در شبیه‌سازی هیدرودینامیکی جریان و کیفیت آب در تحقیق‌های مختلفی استفاده می‌شود. این مدل توانایی شبیه‌سازی سه‌بعدی جریان و کیفیت آب در مخازن، سواحل و خورها را با در نظر گرفتن تری و خشکی، مدل‌های آشفتگی مختلف و مواردی چند دارد. این مدل بر اساس حل عددی معادلات ناویر-استوکس بنا نهاده شده است. از این رو، مدل شامل معادلات پیوستگی، مومنتم، انتقال دما و شوری است (DHI, 2009).

۲.۲. داده‌ها و پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی

برای مدل‌سازی سه‌بعدی هیدرودینامیکی و لایه‌بندی شوری و حرارتی مخزن سد گتوند نیاز به داده‌های ورودی و پارامترهای مختلفی است. برای جمع‌آوری و تهیه داده‌های مذکور، بررسی صحت و سقم آن و آماده‌سازی آن برای ورود به مدل سه‌بعدی، زمان و هزینه بسیار صرف شد که این امر یکی از نکات قوت تحقیق حاضر است. جدول ۱ عناوین مهم داده‌های به کار رفته در مدل‌سازی این تحقیق را نشان می‌دهد. ارائه داده‌های مذکور و جزئیات آن در مقاله امکان‌پذیر نیست، زیرا علاوه بر افزایش حجم مقاله، ارتباط مستقیم با موضوع اصلی مقاله ندارد.

گتوند، امکان مدیریت کیفی مخزن، با توجه به چالش به وجود آمده برای آن بررسی شود و پیش‌بینی از وضعیت آن در آینده صورت گیرد و در صورت امکان راهکارهای مدیریتی نیز ارائه شود. نوآوری‌های اصلی این تحقیق عبارت است از شبیه‌سازی سه‌بعدی هیدرودینامیکی و شوری مخزن سد گتوند، کالیبره کردن نرخ انحلال سازندهای نمکی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده و قابل توجه در مخزن سد و ارائه راهکارهای مدیریتی.

۲. مبانی و روش‌ها

در این بخش مبانی و روش تحقیق شامل انتخاب مدل، داده‌ها و پارامترهای مورد نیاز و مراحل مدل‌سازی به‌طور خلاصه تشریح می‌شود.

۱.۲. انتخاب مدل

واضح است که پدیده شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و لایه‌بندی شوری و حرارتی مخزن سد با توجه به ابعاد آن پدیده‌ای سه‌بعدی است و برای محاسبه دقیق متغیرها در صفحه و عمق، نیاز به مدل سه‌بعدی است. همچنین، دلیل دیگر برای به کار بردن مدل سه‌بعدی برای این منظور، موقعیت سازندهای نمکی در مخزن سد است که با توجه به گستردگی آن در یال مخزن و نیاز به محاسبه لایه‌بندی در عمق، استفاده از مدل سه‌بعدی را غیرقابل اجتناب

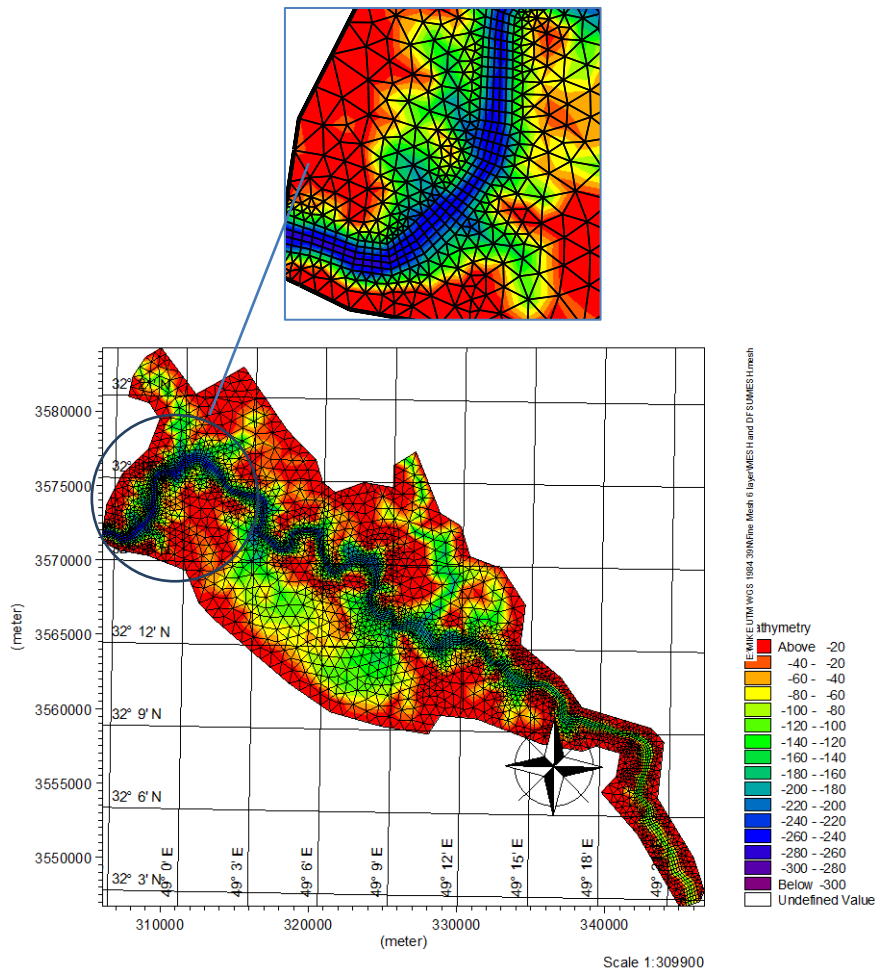
جدول ۱. عناوین مهم داده‌های به کار رفته در مدل‌سازی سه‌بعدی تحقیق حاضر

ردیف	عنوان داده ورودی	مأخذ
۱	بسیمتری مخزن سد (توپوگرافی)	نقشه‌های رقومی با وضوح ۳۰ متر
۲	دمای هوا	ایستگاه هواشناسی منطقه
۳	رطوبت نسبی	ایستگاه هواشناسی منطقه
۴	بارش و تبخیر	ایستگاه هواشناسی منطقه
۵	سرعت و جهت باد	ایستگاه هواشناسی منطقه
۶	دبی و شوری رودخانه کارون (شرط مرزی بالادست)	ایستگاه هیدرومتری گتوند
۷	دبی و شوری رودهای شور ورودی به مخزن	(مهتاب قدس، ۱۳۹۱)
۸	مشخصات توده‌های نمکی	(مهتاب قدس، ۱۳۹۱)
۹	داده‌های شوری مخزن در اعماق و زمان‌های مختلف (جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل)	اندازه‌گیری مستقیم در مخزن سد گتوند

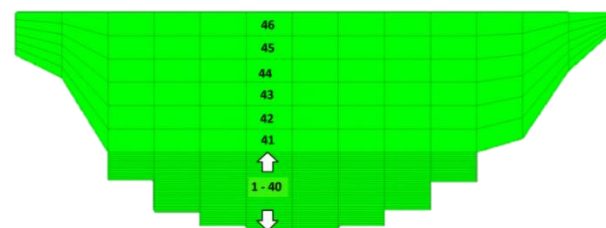
۳.۲. مراحل مدل‌سازی

نوسانات جریان، شبکه‌بندی ترکیبی علاوه بر کاهش زمان اجرای مدل، ناپایداری‌های کمتری را نیز در پی خواهد داشت. شبکه‌های مستطیلی ابعاد تقریبی ۵۰ در ۲۰۰ متر دارد و شبکه‌های مثلثی شامل ۷۲۳۸ المان با حداکثر مساحت ۴۰۰ کیلومترمربع و ۴۷۷۳ گره است. برای شبکه‌بندی عمقی دامنه حل ۴۶ لایه عمقی، ترکیبی از ۴۰ لایه از نوع Z-Level و ۶ لایه از نوع Sigma با ضخامت یکسان انتخاب شد.

الف) شبکه‌بندی دامنه حل و آزمون استقلال نتایج از شبکه برای شبکه‌بندی افقی دامنه حل از دو نوع شبکه منعطف مستطیلی و مثلثی استفاده شده است. مسیر اصلی رودخانه از شبکه‌های مستطیلی با تراکم بالا و سطح مخزن سد با شبکه مثلثی پوشیده شده است. دلیل این نوع شبکه‌بندی این است که با توجه به مسیر اصلی جریان در طول رودخانه و تر و خشک شدن مخزن در طول آبرگیری و



شکل ۱. شبکه‌بندی افقی مخزن سد گتوند علیا



شکل ۲. شبکه‌بندی عمقی مخزن سد گتوند علیا

را با توجه به مقدار نرخ انحلال مد نظر (که بعداً در مورد آن توضیح داده می‌شود)، وارد مخزن سد می‌نمایند. شکل ۳ موقعیت سازندهای نمکی همراه گستره سطح آب بر سازندها در ترازهای مختلف و محل قرارگیری منبع‌های نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

ج) شرایط اولیه

با توجه به اینکه مخزن سد گتوند در مرداد ۱۳۹۰ آبیگری شد و دبی متوسط ماهانه این ماه در رودخانه کارون در محل سد گتوند نیز ۲۵۰ مترمکعب بر ثانیه بود، از این مقدار برای ساخت شرط اولیه قبل از شروع آبیگری استفاده شد. همچنین، نظر به اینکه مقدار متوسط شوری رودخانه کارون قبل از آبیگری در طول این بازه برابر ۰/۳۸۳ قسمت در هزار (PPT) بود، این مقدار شرط اولیه شوری در کل طول رودخانه منظور شد.

د) شرایط مرزی

آبیگری سد گتوند علیا از تاریخ ۱۳۹۰/۵/۶ شروع شد و در چهار مرحله تا ترازهای ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۵ و ۲۰۵ متری آبیگری گردید. در طول دوره آبیگری مقدار دبی ورودی به مخزن به صورت شرط مرزی در بالادست و دبی خروجی از مخزن به صورت شرط مرزی پایین‌دست در بدنه سد به عنوان آبیگر تخلیه‌کننده تحتانی در نظر گرفته شد.

لازم به ذکر است که در شبکه‌بندی عمقی از نوع Sigma ضخامت لایه در نقاط مختلف متناسب با پستی و بلندی‌های بستر متغیر بود، ولی در شبکه‌بندی از نوع Z-Level لایه در تمام نقاط ضخامت ثابتی دارد. دلیل اصلی تراکم زیاد شبکه عمقی در کف مخزن وجود گرا دیان بسیار شدید شوری در کف مخزن است که برای محاسبه دقیق آن، تراکم بالای شبکه مورد نیاز است. لازم به ذکر است که ترکیب فوق برای شبکه‌بندی افقی و قائم پس از صرف زمان و سعی و خطاهای بسیار و حصول اطمینان از عدم وابستگی نتایج مدل به شبکه‌بندی آن (آزمون استقلال نتایج از شبکه) به دست آمده است. شکل ۱ و ۲ به ترتیب شبکه‌بندی افقی و قائم را نشان می‌دهد.

ب) لحاظ کردن توده‌های نمکی در مدل

به منظور لحاظ کردن انحلال سازندهای نمکی در مدل، از قرارداد منبع‌های تولید شوری (سورس شوری) در مدل در محل واقعی این سازندها استفاده شد. منبع‌های نقطه‌ای با فاصله ۵۰ متری و اختلاف ارتفاع ۵ متری سرتاسر سطح سازندهای نمکی را با در نظر گرفتن شیب دیواره پوشش داد. تعداد کل این منبع‌های نقطه‌ای، ۹۴۵ عدد شد. منبع‌های نقطه‌ای به گونه‌ای جای گرفت که با زیر آب رفتن هر کدام از این منبع‌ها، تنها آن منبع فعال می‌شود و شوری



شکل ۳. نحوه چیدمان منبع‌های شوری سازندهای نمکی در مدل سه‌بعدی

۳. واسنجی نرخ انحلال متغیر با زمان

شاید بتوان گفت که واسنجی نرخ انحلال توده‌های نمکی مهم‌ترین بخش تحقیق حاضر است. اثر ترازهای مختلف مخزن، اثر هیدرودینامیکی مخزن، اثر افزایش شوری (گرادیان شوری)، اثر دما و جزآن همگی باعث شده است که انحلال توده‌های نمک در مخزن سد پدیده‌ای پیچیده و غیرخطی باشد، به طوری که نتوان از روابط ساده و سایر مطالعات انجام‌شده در مورد نرخ انحلال برای این مورد خاص استفاده کرد. در مراحل اولیه تحقیق حاضر از روابط ارائه‌شده برای نرخ انحلال (Wagner, 1949) و نرخ انحلال به‌دست آمده سایر محققان استفاده شد، ولی تطابق قابل قبولی بین غلظت‌های محاسباتی و اندازه‌گیری در مخزن به‌دست نیامد. همچنین، تمام روابط موجود و تحقیقات انجام‌شده نرخ انحلال ثابتی را ارائه می‌دهند، در صورتی که واضح است که نرخ انحلال توده‌های نمکی در

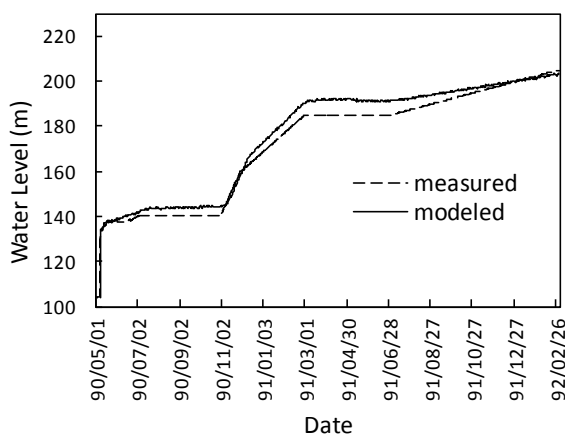
مخزن سد گتوند، با توجه به پیچیدگی موضوع و دخالت عوامل متعدد، به هیچ عنوان ثابت نیست و در طول دوره آبیگری متغیر است. از این رو، یکی از پارامترهای مهمی که در این تحقیق مورد واسنجی و اعتبارسنجی شد، مقدار نرخ انحلال بود. لایه‌بندی شوری تشکیل‌شده در مخزن، ناشی از مقادیر مختلف نرخ انحلال شبیه‌سازی شد و نرخ انحلال صحیح، واسنجی و اعتبارسنجی شد، به طوری که در تعیین نرخ انحلال، از داده‌های اندازه‌گیری‌شده شوری در ترازهای ۸۰ و ۱۲۰ متری به‌عنوان واسنجی مدل و ترازهای ۹۰، ۹۵، ۱۰۰ و ۱۶۰ متری برای اعتبارسنجی مدل استفاده شد. برای این مرحله از تحقیق که شامل اجراهای متعدد مدل سه‌بعدی و مقایسه با داده‌های گسترده اندازه‌گیری‌شده در مخزن سد بود، زمان بسیار زیادی صرف شد. جدول ۲ مقادیر واسنجی‌شده نرخ انحلال را در طول دوره آبیگری نشان می‌دهد.

جدول ۲. مقدار واسنجی‌شده نرخ انحلال در طول دوره آبیگری

ردیف	از تاریخ	تا تاریخ	مقدار نرخ انحلال (سانتی‌متر بر ساعت)
۱	۱۳۹۰/۰۵/۰۷	۱۳۹۰/۰۵/۱۶	۴
۲	۱۳۹۰/۰۵/۱۷	۱۳۹۰/۰۷/۰۱	۱/۵
۳	۱۳۹۰/۰۷/۰۲	۱۳۹۰/۰۸/۳۰	۰/۵
۴	۱۳۹۰/۰۹/۰۱	۱۳۹۰/۱۰/۳۰	۲
۵	۱۳۹۰/۱۱/۰۱	۱۳۹۰/۱۱/۳۰	۳
۶	۱۳۹۰/۱۲/۰۱	۱۳۹۰/۱۲/۲۹	۷
۷	۱۳۹۱/۰۱/۰۱	۱۳۹۱/۰۱/۳۱	۱/۵
۸	۱۳۹۱/۰۲/۰۱	۱۳۹۱/۰۳/۲۹	۱
۹	۱۳۹۱/۰۳/۳۰	۱۳۹۲/۰۲/۳۰	۰/۵

۱.۵. شبیه‌سازی تراز آبرگیری مخزن

شکل ۴ تراز آب مدلسازی شده و مشاهده شده را در طول دوره آبرگیری در مخزن سد گتوند نشان می‌دهد. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، تطابق قابل قبولی بین مقادیر محاسبه شده و مشاهده شده وجود دارد که این امر تا حد زیادی صحت بخش هیدرودینامیکی مدل‌سازی را تضمین می‌کند.



شکل ۴. تراز محاسبه شده و مشاهده شده سطح آب مخزن سد گتوند در طول دوره آبرگیری

۲.۵. لایه‌بندی شوری در ماه‌های مختلف

نتایج لایه‌بندی شوری حاکی است که از همان ابتدای آبرگیری به دلیل افزایش تراز سطح آب و سرعت جریان، سازندهای نمکی دچار انحلال می‌شود و با ایجاد جریان چگال و حرکت رو به جلو، در لایه‌های زیرین مخزن قرار می‌گیرد. این روند به مدت سه ماه باعث تجمع شوری تا ترازهای ۸۰ و حتی ۹۰ متری می‌شود. از این پس، به دلیل ثابت ماندن تراز سطح آب به مدت چهار ماه، از میزان نرخ انحلال کاسته می‌شود، به گونه‌ای که اندک انحلال موجود، تنها باعث ثابت ماندن شوری در تمامی ترازها می‌شود. آبرگیری دوباره سد در تاریخ ۱۳۹۰/۱۱/۰۱ و به عبارتی افزایش تراز سطح آب و مقدار جریان ورودی و خروجی طی ماه‌های بهمن و اسفند، باعث افزایش نرخ انحلال و دلیل تجمع و افزایش شوری در ترازهای بالایی مخزن

لازم به ذکر است که بر اساس تحقیق بقادشتکی و همکاران (۱۳۸۹)، متوسط نرخ انحلال برابر با ۱/۱ سانتی‌متر بر ساعت به دست آمده است. همچنین، آن‌ها ذکر کردند که در ابتدای آبرگیری سد نرخ انحلال ممکن است حتی تا ۲۰ برابر نیز افزایش یابد. همچنین، در آزمایش‌های انجام شده توسط مه‌آب قدس (۱۳۹۱) در مدل فیزیکی ساخته شده از مخزن سد گتوند، متوسط نرخ انحلال برابر با ۳ سانتی‌متر بر ساعت به دست آمد.

۴. راهکارها و سناریوهای مدیریتی

با توجه به شرایط و وضع موجود سد گتوند علیا، در زمان انجام این تحقیق، عمدتاً سه سناریو (راهکار) برای رفع مصل آن وجود دارد:

الف) پوشش گنبدهای نمکی با استفاده از پتوی رسی

ب) مدیریت مخزن یا همان آبرگیری تلفیقی

ج) انتقال شوری تجمع یافته در کف مخزن با استفاده از لوله.

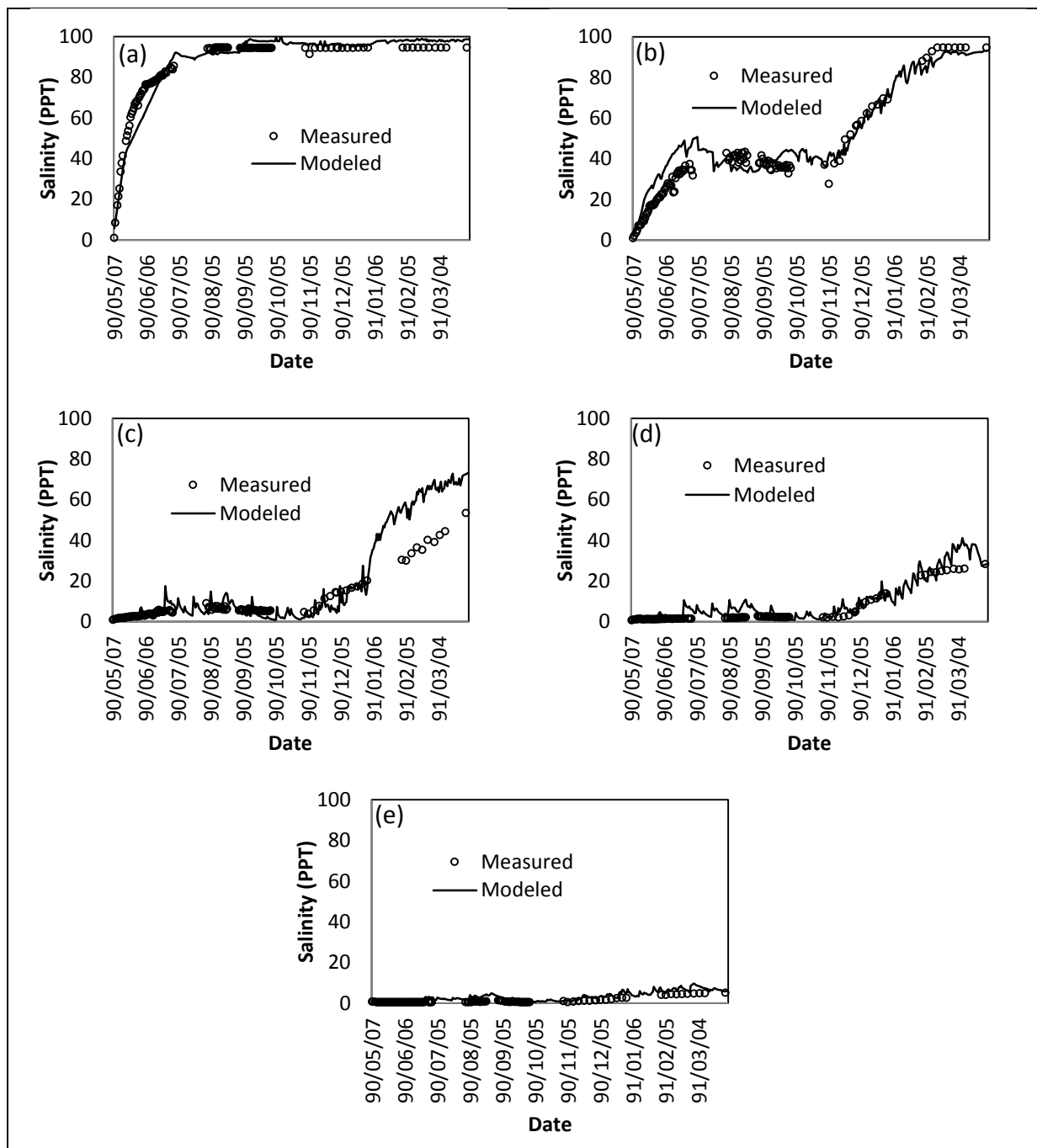
در این تحقیق به دو سناریوی مدیریت مخزن یا همان آبرگیری تلفیقی و انتقال شوری تجمع یافته در کف مخزن با استفاده از لوله توجه شده است. سناریوی آبرگیری تلفیقی کم‌هزینه‌ترین گزینه است که طی آن با آبرگیری با غلظت‌های مختلف شوری از لایه‌های مختلف، کیفیت مورد نیاز آب پایین دست تأمین می‌شود. البته، به علت تجمع فزاینده شوری در کف مخزن شاید این سناریو همیشه قابل اجرا نباشد. سناریوی انتقال شوری توسط لوله نیز در شرایط بحرانی‌تر مخزن قابل اجرا خواهد بود که البته هزینه‌های اجرای آن نیز بالاتر است.

۵. نتایج و بحث

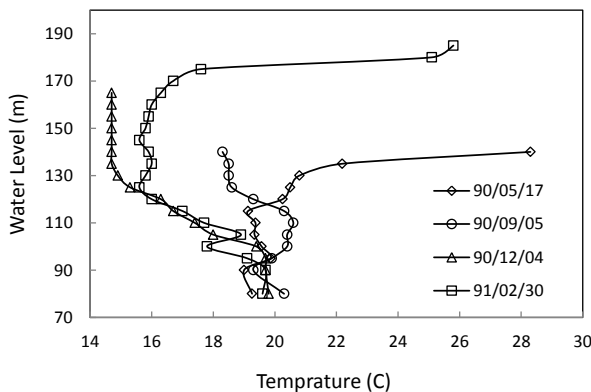
در این بخش نتایج اجرای مدل سه‌بعدی بحث، و پیش‌بینی وضعیت آینده مخزن سد گتوند و راهکارهای مدیریتی ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که اجرای مدل سه‌بعدی برای هر اجرای مدل در طول دوره شبیه‌سازی بین ۷۴ تا ۹۶ ساعت (۳ تا ۴ روز) به طول انجامیده است.

دوره، در ترازهای نزدیک به کف مخزن سد گتوند شوری آب، تقریباً سه برابر شوری آب دریاهاى آزاد است.

است. شکل ۵ مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده شوری را نشان می‌دهد. جالب توجه است که در انتهای



شکل ۵. مقایسه میزان شوری‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در ترازهای (a) ۸۰ متری، (b) ۹۰ متری، (c) ۹۵ متری، (d) ۱۰۰ متری و (e) ۱۲۰ متری



شکل ۶. روند تغییرات دمایی در لایه‌های عمقی آب

۴.۵. روند تجمع شوری و مدیریت کیفی مخزن

هدف اصلی تحقیق حاضر بررسی روند تجمع نمک در مخزن سد گتوند و امکان‌سنجی مدیریت کیفی مخزن (مدیریت شوری) با آبگیری از لایه‌های مختلف، با لحاظ پایین‌دست، همچنین نرخ تجمع نمک در مخزن است. با بررسی این موضوع تا حدی مشخص می‌شود که ابعاد و نحوه مدیریت کیفی مخزن برای حل معضل سد گتوند چگونه خواهد بود. در حقیقت، چکیده نتیجه اجرای مدل سه‌بعدی و همه تلاش‌های مربوط در جهت شفاف‌سازی این موضوع است. با عنایت به این امر و محاسبه میزان نمک تجمع یافته در مخزن سد گتوند در دوره‌ای دو ساله با استفاده از توزیع غلظت سه‌بعدی متغیر با زمان، شکل ۷ به دست آمد. با توجه به این شکل، مقدار جرم نمک تجمع یافته درون مخزن تا انتهای اردیبهشت ۱۳۹۲، برابر با ۱۱/۲ میلیون تن است. از طرفی، همان‌طور که گفته شد، مقدار حجم و جرم کل توده‌های نمکی با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته به ترتیب برابر ۶۱/۸ میلیون مترمکعب و ۱۳۳ میلیون تن نمک برآورد شده است. از این رو، تا تاریخ انتهای مدل‌سازی، همچنان ۱۲۱/۸ میلیون تن نمک انحلال نیافته به صورت سازندهای نمکی باقی مانده است. اگر فرض شود که در ادامه آبگیری (از سال دوم به بعد) با توجه به نتایج واسنجی، میزان انحلال به نرخ تعادلی ۰/۵ سانتی‌متر بر ساعت برسد، مدت زمانی که طول می‌کشد تا سازندهای باقی مانده نیز انحلال یابند، حدود ۵

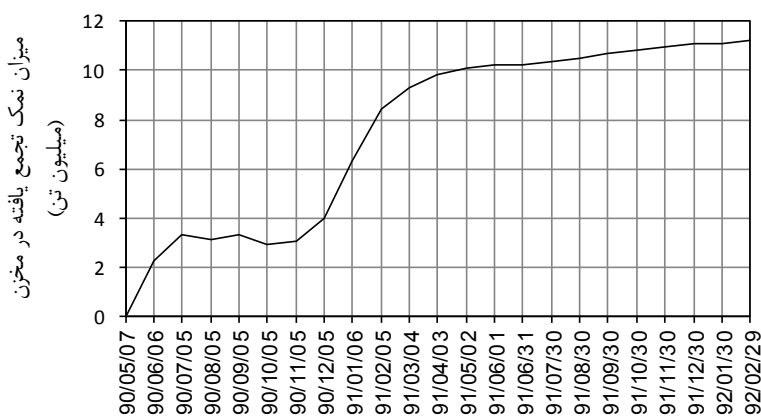
۳.۵. لایه‌بندی حرارتی

با نگاهی اجمالی به نتایج مربوط به لایه‌بندی دما طی دوره‌های آبگیری می‌توان مشاهده کرد که طی آبگیری مخزن در طول مرداد و شهریور، به دلیل نفوذ تشعشعات خورشیدی و گرمای شدید هوا (تا تاریخ ۱۳۹۰/۰۶/۳۱)، لایه‌های سطحی دمای بیشتری نسبت به لایه‌های عمقی دریافت می‌کند، به گونه‌ای که اختلاف دمای آب‌های سطحی با آب‌های عمیق به مقدار ۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و بدین ترتیب دچار لایه‌بندی دمایی (ترموکلاین) شد. سپس، در طول ماه‌های مهر و آبان، با کاهش دمای سطحی آب و از بین رفتن لایه اپی‌لیمنیون، لایه‌بندی یکنواخت دمایی در عمق ایجاد شد. همچنین، طی چهار ماه آتی (آذر، دی، بهمن و اسفند) همین روند ادامه یافت (کاهش دمای آب‌های سطحی از مقدار ۲۵ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۱۳ درجه سانتی‌گراد رسید)، تا اینکه در اواسط فروردین ۱۳۹۱، لایه‌بندی معکوس دمایی در لایه میکسولیمنیون شکل گرفت و لایه‌های سطحی دمای کمتری نسبت به لایه‌های عمقی داشت، اما لایه‌هایی از آب که در لایه مونیمولیمنیون (لایه با شوری بالا) قرار داشت، تقریباً دارای همان مقدار دمای متوسط اولیه ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود و تغییر چندانی نکرد. این امر قاعدتاً می‌بایست باعث ایجاد واژگونی بین لایه‌ها می‌شود، اما به دلیل شور و چگال بودن بیش از حد ترازهای پایینی و نزدیک بستر صورت نگرفت. افزایش دمای هوا و نفوذ دوباره تشعشعات شدید خورشیدی به لایه‌های سطحی آب، از اواسط فروردین ۱۳۹۱ به بعد و در طول ماه‌های اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد و شهریور باعث تشکیل لایه‌بندی حرارتی و ایجاد اختلاف در دمای لایه‌های سطحی با لایه‌های عمیق زیرین به مقدار متوسط ۱۲ درجه سانتی‌گراد شد. شکل ۶ بعضی نتایج مربوط به لایه‌بندی حرارتی را نشان می‌دهد.

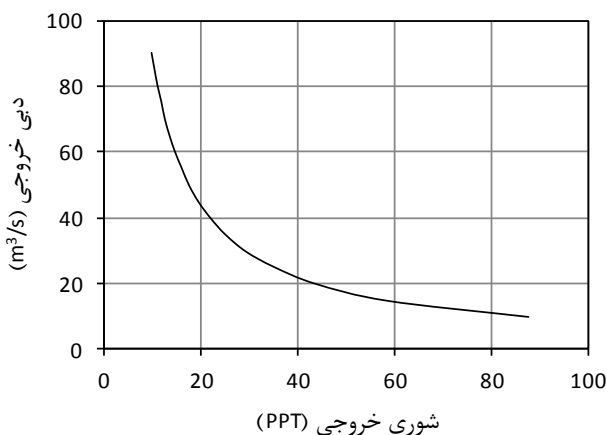
درون مخزن خواهد شد و شرایط مخاطره‌آمیز ناشی از تجمع مقادیر زیاد نمک در مخزن را مرتفع می‌سازد. در غیر این صورت، با کاهش غلظت یا دبی مذکور خروجی، تجمع نمک در مخزن اتفاق خواهد افتاد. البته، لازم به ذکر است که خروج شوری مذکور از مخزن در جهت ایجاد تعادل بین میزان نمک ورودی و خروجی باید با آبیگری تلفیقی از لایه‌های مختلف صورت گیرد که این امر هم‌اکنون در حال انجام است. البته، در این صورت کاهش کیفیت آب خروجی از سد به سمت پایین دست خواهد بود و عواقب آن را نیز نباید دور از ذهن داشت.

سال و ۶ ماه خواهد بود. همچنین، با فرض این مقدار نرخ انحلال تعادلی و نمک وارد شده از رودخانه‌های شور منتهی به مخزن و مرز بالادست، به‌طور متوسط حدود ۸۷۵ کیلوگرم بر ثانیه نمک وارد مخزن می‌شود.

با توجه به مطالب قبل، به‌منظور جلوگیری از انباشت نمک درون مخزن سد، می‌بایست مقدار ۸۷۵ کیلوگرم بر ثانیه به صورت جریان خروجی مدیریت شده از مخزن خارج شود. شکل ۸، مقدار غلظت شوری متناسب با دبی خروجی از مخزن را نشان می‌دهد. برای مثال، دبی خروجی ۳۰ مترمکعب بر ثانیه و غلظت متناسب با آن یعنی، ۲۹/۱۵ قسمت در هزار، باعث عدم تجمع نمک



شکل ۷. روند تجمع نمک درون مخزن سد گتوند



شکل ۸. شوری خروجی از مخزن و دبی خروجی متناظر با آن در ایجاد تعادل در بیلان نمک

وجود شوری‌های بسیار متغیر در مخزن سد در اعماق مختلف، الگوهای متفاوتی از منظر سیکل لایه‌بندی و واژگونی مشاهده شد. نتایج حاکی از آن است که در بعضی مواقع از سال اختلاف دمای آب‌های سطحی با آب‌های عمیق به مقدار ۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و بدین ترتیب دچار لایه‌بندی دمایی (ترموکلاین) شد. گاهی اوقات نیز لایه‌هایی از آب که در لایه مونیوملیمینون (لایه با شوری بالا) قرار داشت، تقریباً دارای همان مقدار دمای متوسط اولیه ۲۰ درجه سانتی‌گراد بود و تغییر چندانی نکرد. این امر قاعدتاً باید باعث ایجاد واژگونی بین لایه‌ها شود، اما به دلیل شور و چگال‌بودن بیش از حد ترازهای پایینی و نزدیک بستر صورت نگرفت.

نکته مهم دیگر این است که با در نظر گرفتن نرخ انحلال تعادلی ۰/۵ سانتی‌متر در ساعت، همچنین شوری وارده از مرز بالادست و رودخانه‌های شور منتهی به مخزن، در زمان مدل‌سازی به میزان ۸۷۵ کیلوگرم در ثانیه تجمع نمک در مخزن وجود خواهد داشت که در صورت عدم تخلیه آن با شورشدن بیش از حد لایه‌ها از کف به سمت بالا، چالش‌های جدی برای سد گتوند علیا به وجود خواهد آمد. با توجه به نتایج می‌توان گفت که مقدار جرم نمک تجمع یافته درون مخزن تا انتهای اردیبهشت ۱۳۹۲، برابر با ۱۱/۲ میلیون تن است. از طرفی، همان‌طور که گفتیم، مقدار حجم و جرم کل توده‌های نمکی با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته به ترتیب برابر ۶۱/۸ میلیون مترمکعب و ۱۳۳ میلیون تن نمک برآورد شده است. از این‌رو، تا تاریخ انتهای مدلسازی، همچنان ۱۲۱/۸ میلیون تن نمک انحلال‌نیافته به صورت سازندهای نمکی باقی‌مانده است. اگر فرض شود که در ادامه آبیگری (از سال دوم به بعد) با توجه به نتایج واسنجی، میزان انحلال به نرخ تعادلی ۰/۵ سانتی‌متر بر ساعت برسد، مدت زمانی که طول می‌کشد تا سازندهای باقی‌مانده نیز انحلال یابد، حدود ۵ سال و ۶ ماه خواهد بود. با تخلیه نمک تجمع یافته از طریق آب خروجی از سد می‌توان از تجمع نمک درون مخزن

۶. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

سد گتوند علیا یکی از مهم‌ترین سدهای کشور است که متأسفانه به دلیل وجود توده‌های نمکی در مخزن آن، وجود مشکلات عدیده‌ای برای آن محتمل است. چالش به وجود آمده برای این سد تا به حال بازخوردهای متفاوت اجتماعی و سیاسی را در پی داشته است، به طوری که سازمان‌های بخشی و فربخشی متعددی به این موضوع ورود کرده‌اند. به دلیل پیچیده‌بودن شرایط مسئله به وجود آمده، همچنین اهمیت آن، پیش‌بینی شرایط آینده این سد امری دشوار است. در اینجا با استفاده از مدل‌سازی عددی سه‌بعدی سعی در پیش‌بینی درست از شرایط کیفی آب مخزن با زمان در اندرکنش با سازندهای نمکی صورت گرفت تا بتوان لایه‌بندی شوری و حرارتی به وجود آمده در مخزن سد را محاسبه کرد تا با استفاده از نتایج مدل بتوان مخزن سد را از منظر تجمع نمک درون آن پایش نمود و راهکارهای مدیریت کیفی آن را ارائه کرد.

یکی از پارامترهای مهم و اثرگذار در مدل‌سازی این پدیده، نرخ انحلال توده‌های نمک است که باید واسنجی شود. برای واسنجی نرخ انحلال از داده‌های اندازه‌گیری شده غلظت در مخزن در اعماق مختلف از تاریخ ۱۳۹۰/۰۵/۰۷ تا ۱۳۹۲/۰۲/۳۰ استفاده شد. بر این اساس، نرخ انحلال از ۰/۵ تا ۷ سانتی‌متر بر ساعت واسنجی شد که در آن نرخ انحلال نهایی تعادلی برابر با ۰/۵ سانتی‌متر بر ساعت به دست آمد. لازم به ذکر است که در زمان‌های ابتدایی آبیگری، قاعدتاً نرخ انحلال بیشتر است که این امر به دلیل خشک‌بودن نسبی توده نمکی است که امکان لغزش‌های توده‌ای را نیز فراهم می‌کند. مهم‌ترین عامل مؤثر در تغییرات نرخ انحلال، تغییرات هیدرودینامیکی جریان در مخزن سد است که با توجه به تغییرات سه‌بعدی آن در مراحل مختلف آبیگری سد، نرخ انحلال متغیری را نتیجه می‌دهد. همچنین، نتایج لایه‌بندی حرارتی مخزن سد گتوند علیا حاکی از آن است که با توجه به تغییرات زیاد دما در منطقه مخزن سد، همچنین

در طول مسیر تا رسیدن به خلیج فارس بررسی کرد. البته، همان‌طور که ذکر شد این موضوع نیازمند بررسی‌ها و مطالعات تکمیلی است.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مراتب قدردانی خود را از «مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی» و «شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران» به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌های اندازه‌گیری و اطلاعات مربوط به سد گتوند علیا، اعلام می‌دارند.

یادداشت‌ها

۱. Kaituna
2. Hatch Ltd.
3. Skagerrak region
4. Messolonghi-Aetoliko lagoons
5. Gulf of Patras

سد جلوگیری کرد که میزان دبی و غلظت شوری در جهت این امر برای برقراری تعادل در بیلان نمک پیشنهاد می‌شود. واضح است که دبی و غلظت شوری جریان تخلیه‌شونده با هم نسبت عکس داشت و تغییرات دبی خروجی در برابر شوری خروجی از تابع هموگرافیکی تبعیت می‌کند. انتقال آب شور از کف مخزن توسط لوله و پمپاژ نیز راهکاری مطرح برای حل معضل سد گتوند علیاست. دبی و شوری مورد انتقال نیز از رابطه‌ای مشابه تبعیت می‌کند. اما این امر بی‌تردید کاهش کیفیت آب پایین‌دست و تبعات مربوط از جمله افت عملکرد زمین‌های کشاورزی، کاهش کیفیت آب شرب شهرهای پایین‌دست و آسیب به محیط‌زیست را به دنبال خواهد داشت. یک راهکار می‌تواند تخلیه شوری در فصل‌های غیرکشت و متناسب با استانداردهای مربوط باشد که این امر نیازمند بررسی‌های تکمیلی در پایین‌دست است. برای مثال، باید با رونمایی جبهه شوری تغییرات مکانی و زمانی آن را

منابع

- بقادشتکی، ب.، خامه‌چیان، م. و نظری، س. ۱۳۸۹. تعیین انحلال‌پذیری توده نمکی عنبل واقع در سد گتوند و تأثیر آن بر کیفیت آب مخزن. اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه.
- چیت‌سازان، م. و مظفری‌زاده، ج. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر سازندهای زمین‌شناسی بر روی کیفیت منابع آب زیرزمینی دشت گتوند. اولین همایش زمین‌شناسی زیست‌محیطی و پزشکی، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- حائری، م. و رضائی، ف. ۱۳۹۰. بررسی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی انحلال و آب‌شستگی کارست نمکی در مخازن سدها. سومین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی دانشگاه تبریز.
- حسنوند، م.، دهرآزما، ب.، حافظی‌مقدس، ن. و کرمی، ر. ۱۳۸۹. ارزیابی آلودگی آب سد گتوند علیا با توجه به شرایط زمین‌شناسی مخزن سد. پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد، مهندسی زمین‌شناسی، گرایش زیست‌محیطی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- حسنیان، س.، پیروش، م.، حسینی زارع، ن. و آخوندزاده، ح. ۱۳۸۵. طبقه‌بندی کیفیت رودخانه‌های کارون و دز در بازه گتوند تا خرمشهر و دزفول تا بامدژ با استفاده از شاخص‌های کیفیت آب و بررسی اتروباکتریاسه‌های جداشده در این مقطع. هفتمین سمینار بین‌المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- داموغ، ن. و زارعی، ح. ۱۳۸۹. بررسی گسترش لایه‌های ضخیم نمکی سازند گچساران در مخزن سد گتوند علیا و تأثیر آن بر کیفیت آب مخزن. اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی منابع آب ایران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه.
- زارعی، ح. و آخوندعلی، ع. ۱۳۸۵. بررسی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب رودخانه کارون در بازه گتوند-شوشتر و تأثیر رود شور بر کیفیت آن. اولین همایش منطقه‌ای بهره‌برداری از منابع آب حوضه‌های کارون و زاینده‌رود (فرصت‌ها و چالش‌ها)، دانشگاه شهرکرد.

زارعی، ح. و اژدری، ع. ۱۳۸۵. کیفیت شیمیایی منابع آب حوضه آبریز سد ابولفارس و تأثیر سازند گچساران بر آن. دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس تهران.

شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس. ۱۳۹۱. بررسی تأثیرات توده گچساران عنبل در مخزن سد گتوند علیا بر کیفیت آب رودخانه کارون و شوری مخزن سد.

هاشمی حیدری، س.، جلیلی قاضی‌زاده، م. و محجوب، د. ۱۳۹۱. بررسی عددی تأثیر ضریب انحلال نمک بر توزیع شوری در مخازن دارای سازند نمکی. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.

Chapra, S.C. 1997. Surface water-quality modeling. New York. McGraw Hill Companies, Inc.

Danish Hydraulic Institute (DHI). 2009. MIKE 3 FM Users' manual. Horsholm, Denmark.

Hatch Ltd. 2009. Salt water intrusion 3D model study: Environmental impact statement for the lower churchill hydroelectric generation project. Prepared for Newfoundland and Labrador Hydro, St. John's, NL.

Jacobs, E. 2007. Forth replacement crossing study: DMRB stage 3 environmental statement. Appendix A9.1: Hydrodynamic Modelling.

Leftheriotis, S., Georgios, A., Georgios, M. and Nikolaos, T. 2013. A numerical study of the hydrodynamic circulation of the Messolonghi–Aetoliko Lagoonal system. Proceedings on Coastal Dynamics International Conference on Coastal Dynamics. Spain.

Nino, Y., Tamburrino, A. and Otono, S. 2004. Stratification and mixing lakes and reservoirs. Hidrodinamica Ambiental.

Ryabchenko, V., Isaev, A., Vankevich, R., Andrejev, O., Bendtsen, J., Erichsen, A., Funkguist, L., Inkala, A., Neelov, I., Rasmus, K., Rodriguez Medina, M., Raudsepp, U., Kuosa, H., Anderson, Th.R., Lehmann, A., Skoan, M.D. and Myreberg, K. 2010. Validation of three-dimensional hydrodynamic models of the Gulf of Finland. Boreal Environment Research, 15(3): 453-479.

Sayadi, A., Khodadadi, A. and Partani, S. 2009. Environmental impact assessment of Gotvand hydro-electric dam on the Karoon River using ICOLD technique. World Academy of Science, Engineering and Technology, 54.

Svenningsson, L. 2012. Validation of two numerical ocean models in Skagerrak. Master of Science Thesis, Sweden, Göteborg.

Tuckey, B. 2009. Kaituna River to maketu estuary re-diversion: Model calibration and initial hydrodynamic impact assessment. Report Prepared for Environment Bay of Plenty.

Wagner, C. 1949. The dissolution rate of sodium chloride with diffusion and natural convection as rate-determining factors. Journal of Physical Chemistry, 53(7): 1030-1033.