

شبیه‌سازی عددی و بررسی آزمایشگاهی انحلال کارست نمکی در مخازن سدها

سیدمهدی هاشمی حیدری*^۱، محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده^۲، مجید احسانی^۳، احمد احمدی^۴، داریوش
محبوب^۵

- ۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۲- استادیار دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، پردیس فنی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی
- ۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه صنعتی اصفهان
- ۴- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود
- ۵- مدیر مطالعات مهندسی، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران

*smhashemi@cv.iut.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۸/۸/۲۰

تاریخ دریافت: ۹۸/۱/۱۸

چکیده

سامانه‌های کارست نمکی از جمله مهمترین منابع آلوده‌کننده محیط‌های آبی به ویژه مخازن سدها به‌شمار می‌روند. که انحلال آن در آب مخزن، کاهش شدید کیفیت آب را در پی دارد. در این پژوهش برای بررسی رفتار کیفی مخزن سد در حضور سازند کارست نمکی، ابتدا بررسی‌های میدانی از مخزن انجام گرفت. سپس برای کالیبراسیون مدل عددی و تعیین ضریب انحلال سازند کارست نمکی، مدل آزمایشگاهی به صورت کانال دوزنقه‌ای طراحی و ساخته شد. سپس مدل آزمایشگاهی با استفاده از مدل عددی MIKE شبیه‌سازی شد. با مقایسه نتایج مربوط به مدل آزمایشگاهی و مدل عددی، مقدار تقریبی ضریب انحلال سازند نمکی موجود در مخزن تعیین و مدل عددی کالیبره شد. در ادامه با تعمیم ضریب انحلال بدست‌آمده به مخزن واقعی و شبیه‌سازی عددی مخزن، رفتار کیفی آن تحلیل و بررسی شد. علاوه‌براین، تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر فرآیند انحلال و توزیع شوری انجام شد و چگونگی اثرگذاری و میزان تأثیر مقادیر ضریب انحلال نمک، دبی، دما، تبخیر و رطوبت نسبی بر توزیع شوری و شرایط کیفی مخزن در اثر انحلال سازند نمکی مطالعه شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند در طراحی و بهره‌برداری از مخازن دارای سازند نمکی مفید باشد.

واژگان کلیدی: مخزن سد، توزیع شوری، ضریب انحلال نمک، مدل‌سازی آزمایشگاهی، مدل MIKE

۱-مقدمه

طوری که، بیش از ۱۱٪ سطح کشورمان را سازندهای کارستی پوشانده است [2]. انحلال‌پذیری فوق‌العاده بالای نمک (در حدود ۳۶۰ گرم بر لیتر) باعث می‌شود تا رخنمون‌های این کانی در مناطق مرطوب به طور کامل انحلال یابد. به همین دلیل نواحی کارست نمکی به‌طور عمده در مناطق با آب‌وهوای گرم و خشک دیده شده است. از آنجایی که مخزن مورد مطالعه در این پژوهش در منطقه گرم و خشک واقع است، رخنمون‌های سطحی نمک در نواحی کارستی قابل مشاهده است. نرخ انحلال این سنگ‌ها در آب به عوامل متعددی شامل میزان آب در دسترس، ساختار سنگ در معرض انحلال، آب‌وهوا (دما، بارندگی، رطوبت نسبی) و پوشش گیاهی وابسته است [3].

نرخ انحلال کارست نمکی به صورت آزمایشگاهی توسط پلامر و همکاران، دری‌برودت و اسونسن و ایسنلوهر بررسی شده است [4-6]. همچنین دری‌برودت و کافمن این پدیده را به صورت عددی مطالعه کردند [7-8]. آلکاتان و همکاران و جسک و همکاران روابطی را برای هر قسمت از فرآیند انحلال به صورت جداگانه ارائه کردند [9-10]. فرامکین تحقیقات میدانی را در ناحیه کارستی نمکی در کوه‌های سدوم انجام داد [11]. او در این پژوهش‌ها با انجام سه نوع نمونه‌گیری مختلف در آب-های موجود و جاری در حوزه مورد مطالعه، میزان غلظت مواد جامد در نمونه‌ها را تحت تأثیر کارست نمکی موجود بررسی کرد. صادقی و خسروی در سال ۲۰۰۳ در مطالعه‌ای آزمایشگاهی تأثیر شکاف در انحلال سنگ آهک را بررسی کردند [12]. حائری در پژوهش آزمایشگاهی بیان کرده که مهمترین عامل ایجاد انحلال و آب‌شستگی، گرادیان هیدرولیکی و ایجاد جریان در محیط کارستی است [2].

باتوجه به ماهیت پیچیده سازوکار انحلال کارست‌ها و قابلیت انحلال‌پذیری زیاد نمک، شناخت هرچه بیشتر فرآیند انحلال سازند نمکی در مخزن سد ضروری است. از طرف دیگر، بررسی چگونگی و میزان اثرگذاری پارامترهای مختلف بر فرآیند انحلال، می‌تواند در مدیریت آب مخزن سد کمک قابل توجهی نماید. هدف از انجام این پژوهش تعیین و بررسی آثار ضریب

بررسی اثر جایگزینی بخشی از مصالح سنگی با ماسه ریخته‌گری... افزایش آگاهی از پیامدهای زیست‌محیطی و تخریبی و مشکلات عدیده ناشی از آن، توجه پژوهشگران و مهندسان را روی مسئله پیش‌بینی الگوی جریان و چگونگی پخش و حمل منابع آلوده کننده حوزه‌های آبی متمرکز کرده است. یکی از مهمترین منابع آلوده‌کننده، وجود سیستم‌های کارستی در محیط‌های آبی به‌ویژه در مخازن سدها است. با توجه به گستردگی مخازن سدهای بزرگ و عدم امکان تغییر محور سدها به دلیل محدودیت‌های مختلف، امکان دارد که پس از آنگیری، آب دریاچه سد با سازندهای کارستی (شامل لایه‌های آهکی، گچی و یا نمکی) ارتباط داشته باشد.

مناطق دارای غارهای انحلالی، مناطق کارستی نامیده می‌شوند. این مناطق معمولاً بر اساس مشخصه‌هایی مانند فروچاله‌ها و دره‌های خشک شناخته می‌شوند. سنگ‌های قابل حل در تمام سطح جهان رخنمون دارند و پدیده کارست را نمی‌توان منحصر به منطقه خاص جغرافیایی نسبت داد [1]. سازندهای کارستی آثار مثبت و منفی فراوانی دارند. یکی از آثار مثبت آن‌ها، وجود منابع آب غنی در این سازندها است. از مهمترین نکات منفی یا ضعف اصلی این مصالح، ضعف آن‌ها در مقابل جریان آب است. معمولاً این مصالح در مقابل آب‌های اسیدی انحلال پیدا می‌کنند، اما از بین این مصالح، گچ و نمک حتی در مقابل آب‌های معمولی (غیر اسیدی) نیز انحلال پیدا می‌کنند. از دیگر مشکلات وجود سازندهای کارستی در مخازن سدها می‌توان به کاهش کیفیت آب مخزن، افزایش شوری در مخزن سد که باعث افزایش EC (هدایت الکتریکی) آب می‌شود، افزایش نشت از پی سد در اثر انحلال کارست، افزایش رانش زمین و زمین لغزش‌ها در محدوده مخزن سد، اشاره نمود. به همین منظور شناخت دقیق مسئله برای حل هرچه بهتر مشکل و مدیریت صحیح منابع آب ضروری است. بررسی پراکندگی کارست‌ها نشان می‌دهد که زمین‌های بسیاری کارستی هستند. به‌عنوان نمونه ۲۵٪ از پهنه کشور آمریکا کارستی است. این مقدار در کشور چین به ۲۰٪ می‌رسد. ایران بعد از کشورهای آمریکا، چین و ترکیه، بالاترین درصد کارست را دارا بوده به

مخزن با مقیاس ۱/۱۰۰ ساخته شد. برای هرچه نزدیکتر کردن شرایط انجام آزمایش به شرایط واقعی مخزن، آزمایش با توجه به سناریوی آبیگری مخزن طراحی و اجرا شده است. جزئیات برنامه آبیگری مخزن و مدل آزمایشگاهی در جدول (۱) قابل مشاهده است. تراز نرمال مخزن ۲۳۵ متر است. مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی با توجه به محل قرارگیری سازند نمکی و ابعاد مخزن تعیین شد. طول مدل آزمایشگاهی ۴۰ متر و ارتفاع مدل برابر ۱/۵ متر در نظر گرفته شد، که به ترتیب معادل با ۴ کیلومتر طول مخزن و ۱۵۰ متر تراز ارتفاعی مخزن است. کف مخزن در تراز ۸۵ متر از سطح دریا قرار دارد و تراز نرمال آبیگری سد در تراز ۲۳۵ متر از سطح دریا قرار دارد. بنابراین ارتفاع نرمال آب پشت مخزن برابر ۱۵۰ متر است. شکل (۱) نمایی از مدل آزمایشگاهی در زمان ساخت را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که به منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی، از نمونه‌های سنگ نمک برداشت شده از سازند نمکی موجود در مخزن استفاده شده است.

در این مرحله با توجه به مقیاس زمانی ۱/۱۰۰ و اینکه آبیگری مخزن تا تراز ۱۸۵ متر طی ۱۰۰ روز انجام می‌گیرد، آبیگری مدل فیزیکی در طی ۲۴ ساعت انجام گرفته است. در یک طول این زمان تراز آب مدل حدود ۱ متر بالا آمده است. در یک ساعت اول آبیگری مدل، دبی ورودی معادل ۱۰ لیتر بر ثانیه توسط پمپ تعبیه شده تنظیم شد و در ادامه این مقدار به ۳ لیتر بر ثانیه کاهش داده شد و تا پایان آزمایش ثابت باقی مانده است. تنظیم دبی خروجی از مدل نیز توسط شیر تعبیه شده در انتهای مدل انجام شده است. پس از شروع آزمایش به تدریج همزمان با بالا آمدن تراز آب، سطح تماس آب با لایه‌های نمک تعبیه شده افزایش یافته و به تدریج نمک توسط جریان آب در داخل مدل حل شده است. میزان غلظت نمک در آب توسط دستگاه TDS سنج در نقاط مشخصی از مدل اندازه‌گیری شده و نتایج آن در بازه‌های زمانی مشخصی ثبت شده است. از این نتایج برای تعیین ضریب انحلال نمک استفاده شد. همچنین متوسط سرعت جریان آب در لایه‌های نمک معادل ۲ سانتی‌متر بر ثانیه اندازه‌گیری شد.

۲-۲- مدل عددی

انحلال نمک و پارامترهای مؤثر از جمله دبی و سرعت جریان دمای هوا، رطوبت نسبی و تبخیر در توزیع نمک در مخزن سد است. همچنین یک شبیه‌سازی توزیع نمک در مخزن برای رفتارنگاری و پیش‌بینی کیفیت آب با در نظر گرفتن منبع آلوده-کننده آن انجام می‌شود. این پژوهش به صورت مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار MIKE استفاده شد. در این تحقیق ابتدا ضریب انحلال سازند نمکی در مخزن سد مورد مطالعه، در مقاطع زمانی مختلف با کمک مدل آزمایشگاهی تعیین و در مرحله بعد با استفاده از مدل عددی MIKE، شرایط مدل آزمایشگاهی شبیه‌سازی و مدل عددی کالیبره شده است. سپس مخزن سد مورد مطالعه با کمک مدل عددی، شبیه‌سازی شده و چگونگی توزیع شوری مخزن سد و رفتار کیفی آن بررسی و پیش‌بینی شده است. همچنین میزان و چگونگی اثرگذاری پارامترهای مؤثر مانند ضریب انحلال نمک، دبی ورودی به مخزن، دمای محیط و تبخیر بر توزیع شوری و شرایط کیفی مخزن مطالعه شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل آزمایشگاهی

تعیین ضریب انحلال سازند نمکی در مخزن با پیچیدگی‌های زیادی همراه است. به منظور تعیین این پارامتر، مدل آزمایشگاهی مربوط به مخزن طراحی و ساخته شد و از نمونه‌های سنگ نمک موجود در مخزن سد، به عنوان سازند نمکی در مدل آزمایشگاهی استفاده شده است. این مدل در شرایط مختلف آزمایش شد و نتایج مربوط به مقادیر غلظت نمک در مقاطع زمانی مختلف به دست آمده است. در مرحله بعد با استفاده از مدل عددی شرایط مدل آزمایشگاهی شبیه‌سازی شد. از مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل عددی، مقادیر ضریب انحلال تعیین و بدین ترتیب مدل عددی کالیبره شد.

بررسی‌ها و نتایج به دست آمده از مطالعات قبلی در خصوص وضعیت توده نمکی و نرخ انحلال نمک و سازند کارستی موجود در مخزن، که در فاصله ۴ کیلومتری از محور سد قرار گرفته است، حاکی از مبهم بودن نرخ انحلال واقعی نمک است. برای تعیین نرخ انحلال نمک، مدل آزمایشگاهی

یکی از پیشرفته‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌های استفاده شده در حوزه‌های آکادمیک، کاربردی و تجاری مدل MIKE است. مدل سه بعدی MIKE سیستم مدل‌سازی عددی پیشرفته غیرهیدرواستاتیکی است که برای اهداف و کاربردهای وسیعی در حوزه‌های مختلف از جمله اقیانوس‌ها، سواحل و بنادر، خلیج، دریاچه‌ها و مخازن سدها توسعه داده شده است. این مدل که توسط شرکت آب و محیط زیست DHI ارائه شده است، توانایی توزیع دوبعدی و سه‌بعدی پارامترهای دما، شوری و دیگر آلاینده‌های مخزن و تحلیل کیفیت آب در نقاط پایین دست سیستم را دارا است.

مدل عددی به صورت زیر بیان شده است:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_S S$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_S + \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + S_S S$$

در معادلات بالا t برابر زمان؛ D_v برابر ضریب پخش عمودی که به مقادیر لزجت ادی و عدد پراتل وابسته است؛ \hat{H} ترم منبع باتوجه به تبادل حرارت آب با هوای بالای مخزن؛ T و S پارامترهای شوری و حرارت؛ F_T و F_S جملات پخش افقی و S مقدار دبی منبع‌های نقطه‌ای است.

برای حل عددی معادلات هیدرودینامیک و معادلات انتقال و پخش از روش حجم محدود استفاده شده است. همچنین از شبکه بی‌سازمان و المان‌های مثلثی برای شبکه‌بندی محدوده استفاده شد. به‌منظور حل معادلات بقای جرم و مومنتم از روش ADI (Alternating Direction Implicit) استفاده شده است. برای حل معادلات ابتدا ترم‌های انتقال، پخش، اصطکاک کف و کوریولیس در معادله مومنتوم برای شارهای سرعت u حل شده و سپس با استفاده از نتایج بدست آمده از این مرحله ترم ثقل و معادله بقاء بوسیله تکنیک ADI حل شده است. در این مدل ترم انتقال به صورت صریح و با استفاده از روش Lax-Wendroff با دقت از مرتبه ۲ محاسبه شده است. برای حل ترم پخش یا آشفتگی از روش نیمه‌ضمنی کرانک-نیکلسون استفاده شده است.

بررسی اثر جایگزینی بخشی از مصالح سنگی با ماسه ریخته‌گری... یکی از پیشرفته‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌های استفاده شده در حوزه‌های آکادمیک، کاربردی و تجاری مدل MIKE است. مدل سه بعدی MIKE سیستم مدل‌سازی عددی پیشرفته غیرهیدرواستاتیکی است که برای اهداف و کاربردهای وسیعی در حوزه‌های مختلف از جمله اقیانوس‌ها، سواحل و بنادر، خلیج، دریاچه‌ها و مخازن سدها توسعه داده شده است. این مدل که توسط شرکت آب و محیط زیست DHI ارائه شده است، توانایی توزیع دوبعدی و سه‌بعدی پارامترهای دما، شوری و دیگر آلاینده‌های مخزن و تحلیل کیفیت آب در نقاط پایین دست سیستم را دارا است.

۲-۱-۲ معادلات حاکم

معادلات استفاده شده در مدل عددی برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و کیفی جریان در مخزن شامل معادلات بقای جرم، مومنتم و انتقال-انتشار شوری و حرارت است. این معادلات آثار مربوط به تغییرات سطح آزاد آب، چرخش زمین، تغییرات چگالی، تغییرات زمانی و مکانی تنش برشی باد در سطح آزاد آب، تغییرات مکانی تنش برشی در کف، میزان تبخیر و درصد رطوبت را در حل معادلات در نظر می‌گیرند. فشار به صورت هیدرواستاتیک فرض شده است [13]. معادله پیوستگی و اندازه حرکت به صورت زیر بیان شده است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial s_{xw}}{\partial z} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial s_{yw}}{\partial z} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial w^2}{\partial z} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial z} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial z} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial z} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{wx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{wy}}{\partial y} + \frac{\partial s_{ww}}{\partial z} \right) + F_w + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial w}{\partial z} \right) + w_s S \quad (4)$$

در معادلات بالا t برابر زمان؛ x, y, z و z محورهای مختصات در جهت‌های سه‌گانه؛ η ارتفاع سطح آب؛ d ارتفاع آب ساکن؛

جدول ۱. مشخصات آبیگری مخزن و مدل آزمایشگاهی

Specifications of dewatering	Stage 1	Stage 2	Stage 3	
	up to 125 meters	125 to 185 meters	constant on 185 meters	
In reservoir	Time (day)	10	90	240
	Depth increase (m)	40	60	0
	Volume Increase (m ³ *106)	175	1435	0
	Average inlet flowrate (m ³ /s)	500	300	300
	Outlet flowrate (m ³ /s)	0	100	300
In the laboratory model	Time (min)	50	1200	2000
	Depth increase (cm)	40	60	0
	Volume Increase (m ³)	31	72.5	0
	Average inlet flowrate (lit/s)	10	3	2
	Outlet flowrate (lit/s)	0	2	2

Table 1. Reservoir and laboratory model dewatering data

شکل ۱. شمای کلی مدل آزمایشگاهی



Fig. 1. General view of experimental set-up

۲-۲-۲ مدل سازی عددی مدل آزمایشگاهی

داده‌های مورد نیاز مدل سازی شامل مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی، سری زمانی دبی ورودی و خروجی، دمای آب و مقدار نمک ورودی، اطلاعات هواشناسی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی و میزان تبخیر هستند. اولین گام در مدل سازی عددی تعیین محدوده، مرزها و شبکه بندی آن است. در این پژوهش برای ساخت فایل شبکه بندی شده کانال ذوزنقه ای در نرم افزار MIKE، نیاز به فایل با پسوند xyz است که حاوی اطلاعات جغرافیایی مربوط به نقاط در محدوده مطالعه شده است. برای مشخص نمودن مختصات توپوگرافی نقاط مدل آزمایشگاهی، هندسه مدل به ۴۰ مقطع با فواصل ۱ متر تقسیم شد و در هر مقطع ۱۰ نقطه و مختصات مربوط به آنها تعیین شد و بدین ترتیب مختصات ۴۰۰ نقطه مشخص و در فایل قرار داده شد. به منظور شبکه بندی محدوده از ۹۸۱ المان مثلثی و ۶۰۵ گره با کوچکترین زاویه برابر با ۳۰ درجه و کمترین مساحت برابر با ۰/۳ مترمربع استفاده شد. گام زمانی مدل سازی برابر ۰/۰۲ ثانیه در نظر گرفته شد. در مرحله بعد داده های هوا شناسی و هیدرودینامیکی به مدل معرفی شدند. در شکل (۲) خطوط تراز سطح آب و مش بندی کانال ذوزنقه ای به تصویر درآمده است

کل ۲. شبکه‌بندی هندسه کانال دوزنقه‌ای شکل

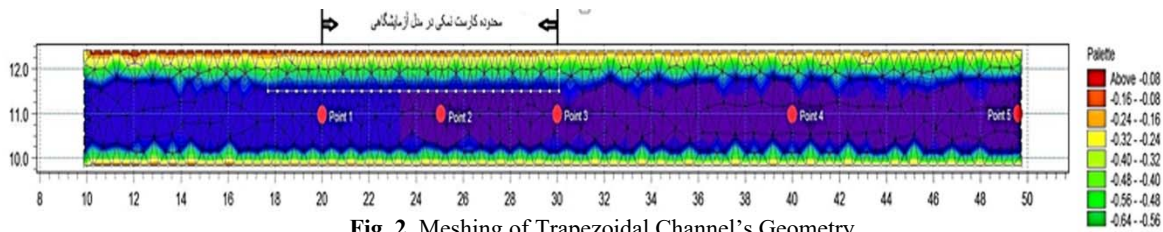


Fig. 2. Meshing of Trapezoidal Channel's Geometry

ساعت است. ضریب انحلال بدست آمده در این قسمت را می‌توان با تقریب قابل قبولی در مورد سایر مخازنی که شرایط مشابهی با مخزن مورد مطالعه دارند استفاده نمود.

شکل ۳. مقایسه مقادیر غلظت نمک در کانال دوزنقه‌ای و نتایج مدل عددی با ضرایب انحلال مختلف

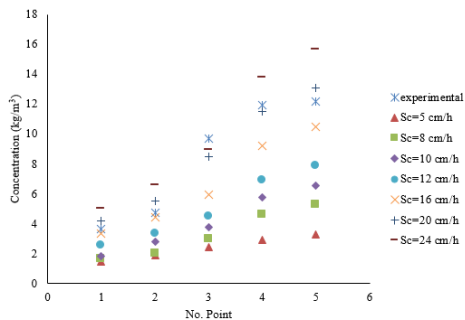


Fig. 3. Comparison of salt concentration values in trapezoidal channels and numerical model results with various dissolution coefficients

شکل ۴. درصد خطای محاسبه شده مقادیر غلظت در ضرایب انحلال مختلف و مقادیر مدل آزمایشگاهی

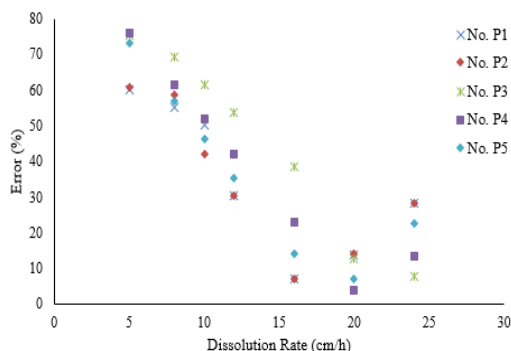


Fig. 4. Calculated error percentage of the concentration values in different dissolution coefficients with the experimental data

۲-۳- مشخصات کلی مخزن سد مطالعه شده

محدوده‌ای از رخنمون‌های سازند نمکی در مخزن که در فاصله ۴ تا ۸ کیلومتری بالادست موقعیت محور سد و در جناح

نقاط قرمز رنگ روی شکل، نشان‌دهنده محل قرائت غلظت نمک در آب کانال است که در فواصل ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متری از ابتدای کانال قرار دارند. محدوده قرارگیری کارست نمکی در شکل (۲) نشان داده شده است. پس از برپایی هندسه مدل عددی و شبکه‌بندی آن، داده‌های هواشناسی و هیدرودینامیکی مورد نیاز طبق سناریوی آبرگیری مدل آزمایشگاهی به مدل عددی معرفی شده است. سپس طول دوره شبیه‌سازی و گام زمانی تعریف شد. از ضریب انحلال در بازه ۵ سانتی‌متر بر ساعت تا ۲۴ سانتی‌متر بر ساعت استفاده شد و مدل در هر مرحله با یک ضریب انحلال اجرا و نتایج مربوطه استخراج شده است. سپس غلظت نمک در هر مرحله از اجرای مدل عددی در نقاط مشخص شده قرائت و با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه شده است. با محاسبه درصد خطای مقادیر اندازه‌گیری شده در مدل آزمایشگاهی و مقادیر استخراج شده در مدل عددی بهترین هماهنگی نتایج صورت گرفت و ضریب انحلال نهایی نمک تعیین شده است. شکل (۳) نشان‌دهنده غلظت نمک در کانال دوزنقه‌ای (مدل آزمایشگاهی) و نتایج مدل عددی با مقادیر ضرایب انحلال مختلف در نقاط مشخص شده کانال (نقاط قرمز رنگ در شکل ۲) است. پس از محاسبه درصد خطای مقادیر قرائت شده غلظت در مدل عددی و کانال دوزنقه‌ای شکل (۴)، مشخص شد که کمترین درصد خطا نسبت به مقادیر مدل آزمایشگاهی، مربوط به مقادیر ضریب انحلال ۲۰ سانتی‌متر بر ساعت است. متوسط درصد خطای اندازه‌گیری شده برای این ضریب انحلال حدود ۱۰٪ است. با توجه به اینکه مقیاس زمان در مدل آزمایشگاهی برابر ۱/۱۰۰ است پس ضریب انحلال واقعی در مخزن مورد مطالعه برابر با ۰/۲ سانتی‌متر بر

داخل مخزن، انتشار خواهد یافت. در این پژوهش اطلاعات مربوط به داده‌های هواشناسی از طریق ایستگاه‌های هواشناسی دریافت شده است. برای شبکه‌بندی محدوده از المان‌های مثلثی با کوچکترین زاویه برابر با ۳۰ درجه و کمترین مساحت برابر با ۱۴۰۰۰ مترمربع استفاده شده است. پس از تهیه نقشه هندسی و شبکه‌بندی مخزن، اطلاعات مربوط به داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی که در بالا ذکر شد برای مدل تعریف شده است. اطلاعات مربوط به طول دوره شبیه‌سازی و گام‌های زمانی نیز در این قسمت مشخص شده است.

مدل‌های عددی برای شروع شبیه‌سازی نیاز به شرایط مرزی دارند. در این مدل‌سازی از شرط مرزی باز و شرط مرزی بسته استفاده شده است. شرط مرزی باز مربوط به مرزهایی است که در آن‌ها گرادیان پارامترهای اساسی قابل ملاحظه است. همچنین در مرزهای بسته شار ورودی و خروجی از آن‌ها به داخل محدوده صفر است. مرزهای ورودی و خروجی مخزن و ناحیه ورود نمک به مخزن از طریق سازند کارستی به عنوان مرزهای باز و به ترتیب دبی ورودی و خروجی مخزن و نرخ ورود نمک به مخزن به عنوان شرط مرزی برای این مرزها در نظر گرفته شده است. مرزهای تماس آب مخزن با خشکی هم به عنوان مرزهای بسته و شرط مرزی سرعت صفر مطابق اصل عدم لغزش برای آن‌ها در نظر گرفته شده است.

برای پارامتر نرخ انحلال نمک، ضریب انحلال تعیین شده در بخش قبل با توجه به مشخصات سازند نمکی به عددی با واحد kg/s تبدیل شده و برای مدل عددی تعریف شده است. بعد از انجام روند تبدیل واحد، مقدار ۱۷۰ کیلوگرم بر ثانیه به عنوان ضریب انحلال برای مدل عددی تعریف و مدل اجرا شده است.

چپ رودخانه قرار دارند، دارای رخنمون‌هایی از لایه‌های ضخیم نمکی است. رسوبات تبخیری مذکور، به ویژه در شرایط وجود جریان آب انحلال‌پذیری دارند. در شکل (۵) خطوط تراز سطح آب و شبکه‌بندی مخزن مورد مطالعه در این پژوهش همراه با موقعیت سازند نمکی و محور سد نشان داده شده است. برای پیاده‌سازی مختصات نقاط از سیستم مختصات UTM (Universal Transverse Mercator) استفاده شده است. وضعیت تغییرات تراز سطح آب دریاچه نیز در نقشه تراز ارائه شده است. به منظور تهیه نقشه تراز مخزن سد، از نقشه‌های توپوگرافی مخزن با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ بهره گرفته شده است و با استفاده از روش میانابایی، خطوط تراز میانابایی و تسطیح شده‌اند.

۲-۴- مدل سازی عددی مخزن

به منظور شبیه‌سازی مخزن یک سد و برپایی مدل نیاز به داده‌های متنوع در محدوده وسیعی از پارامترها مانند توپوگرافی منطقه و نقشه‌های مربوط به هندسه مخزن و تراز خروجی‌ها، سری زمانی دبی و شوری ورودی به مخزن از طریق رودخانه بالادست، اطلاعات هواشناسی شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، میزان تبخیر و درصد ابری بودن هوا، سری زمانی دبی خروجی و نرخ نمک ورودی به مخزن ناشی از سازند نمکی است. در واقع برای مدل‌سازی ناحیه سازند نمکی و چگونگی انحلال نمک در مخزن، نرخ انحلال نمک به دست آمده به عنوان داده ورودی به مدل عددی در محل سازند نمکی در مخزن، تعریف می‌شود. در طی زمان مدل‌سازی، نمک موجود در سازند نمکی براساس نرخ انحلال ورودی به مدل عددی و حل معادلات انتقال-انتشار شوری، وارد جریان مخزن شده و سپس

شکل ۵. توپوگرافی خطوط تراز آب و شبکه‌بندی مخزن

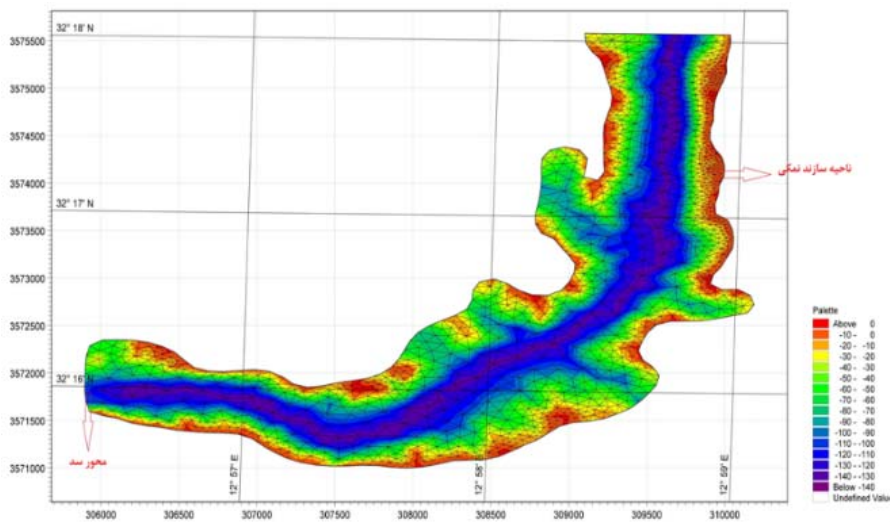


Fig. 5. Bathymetry and reservoir mesh

برای تحلیل نتایج حاصل از شبیه‌سازی، ابتدا نمودار توزیع غلظت در مخزن مورد بررسی قرار گرفته است. چگونگی توزیع غلظت نمک در مخزن سد در طی زمان و در نقطه‌ای نزدیک به ناحیه کارست نمکی در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل محور افقی مقیاس زمان و محور عمودی مقدار غلظت نمک با واحد کیلوگرم بر مترمکعب را نشان می‌دهد. نمودار بالا به سه بازه زمانی مشخص می‌تواند تقسیم شود.

شکل ۷. توزیع غلظت نمک در مجاورت کارست نمکی

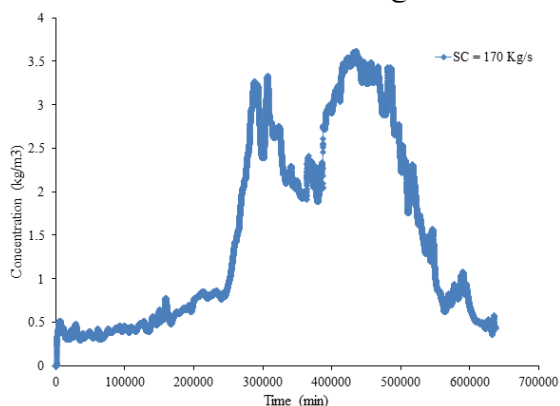


Fig. 7. Distribution of salt concentration in the vicinity of salt karsts

بازه اول دربرگیرنده شش ماه اول آبیگری است که در این بازه زمانی نمودار توزیع غلظت به صورت تدریجی با شیبی کم افزایش می‌یابد. در بازه دوم (شامل پنج ماه) نمودار توزیع غلظت

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبارسنجی مدل عددی با مقادیر اندازه‌گیری شده

معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انتقال-انتشار شوری و حرارت بطور همزمان و با استفاده از شرایط اولیه و مرزی ورودی، توسط مدل عددی حل شد. جهت جریان در مخزن مورد مطالعه با توجه به عملکرد خروجی‌های سد و جهت وزش باد بیشتر به سمت پایین دست مخزن و محور سد است. این موضوع عامل انتقال نمک حل شده به سمت خروجی‌های سد است که در مدل آزمایشگاهی مخزن هم مشاهده شد. در شکل (۶) مقدار غلظت نمک در مخزن سد در اواسط دوره شبیه‌سازی نشان داده شده است. مقدار غلظت مواد حل شده ناشی از سازند نمکی توسط جریان آب به سمت پایین دست مخزن و محور سد حرکت کرده و تجمع مواد محلول در پشت محور سد مشخص است.

شکل ۶. توزیع غلظت نمک در مخزن سد

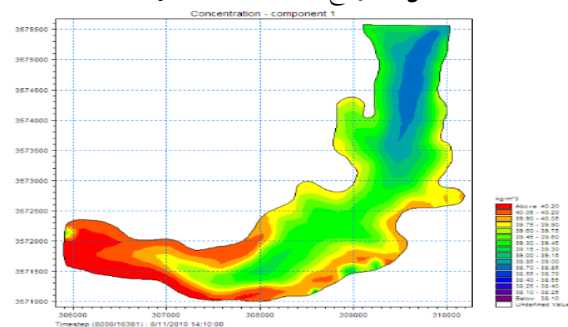


Fig. 6. Distribution of salt concentration in the dam reservoir

کمتر از مقدار واقعی پیش‌بینی کرده است. علت این امر را در چند نکته می‌توان جستجو نمود.

شکل ۸. مقادیر غلظت نمک اندازه‌گیری شده در مخزن و مدل عددی

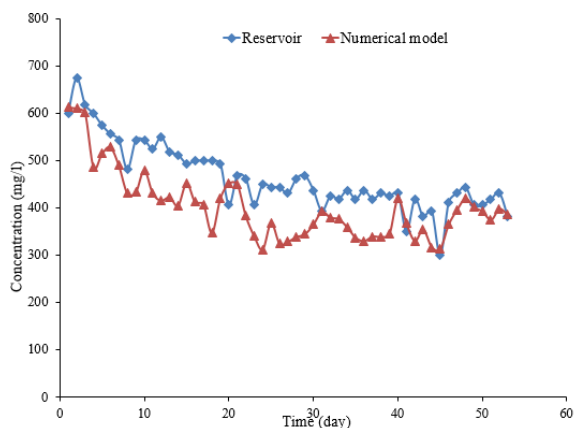


Fig. 8. Measured data of salt Concentration in the reservoir and numerical model

نکته اول اینکه در مدل عددی، مقدار متوسط ضریب انحلال سازند نمکی بصورت یک عدد ثابت فرض شده است، که در واقعیت اینگونه نبوده و با افزایش تراز آبیگری در مخزن این مقدار باتوجه به افزایش سطح تماس آب با سازند نمکی افزایش می‌یابد. نکته دوم اینکه در مدل آزمایشگاهی بخشی از مخزن با رس پوشیده شده است که در مخزن واقعی این امر واقعیت ندارد. بنابراین مقدار ضریب انحلال کمتر از مقدار واقعی آن در مخزن اندازه‌گیری شده است. نکته سوم در تقریب به‌کار رفته در طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی است. در این پژوهش ضریب انحلال به‌کار رفته در مدل عددی با استفاده از انجام آزمایش روی مدل فیزیکی مخزن بدست آمده است. در مدل فیزیکی تنها روش انحلال و ورود نمک به داخل حجم آب، فرآیند انحلال سطحی نمک در اثر تماس سطحی آب با سنگ نمک است. در صورتی‌که در مخزن واقعی بدین شکل نیست. همان‌گونه که پیشتر ذکر شد در بازدیدهای میدانی از مخزن مورد مطالعه، فروچاله‌هایی با ابعاد بزرگ در محدوده سازند کارستی مشاهده شده است. همچنین بلوک‌های نمکی نابرجا حاکی از فروریزش و لغزش لایه‌های نمک در این ناحیه است. با توجه به این نکات بدیهی است که در مخزن واقعی علاوه بر انحلال سطحی، نفوذ آب به داخل حفرات و شکستگی‌های موجود در منطقه و لغزش لایه‌های نمک

با شیبی بسیار تند افزایش یافته است و در نهایت بازه سوم چهارماه آخر دوره مطالعه در نظر گرفته شده که نمودار توزیع غلظت با شیب نسبتاً زیاد کاهش می‌یابد. در خصوص بازه اول نمودار می‌توان بیان کرد که پس از آبیگری مخزن و تماس آب مخزن با سازند کارست نمکی، به تدریج در اثر انحلال نمک در آب و پخش و حمل مقادیر نمک حل شده توسط جریان‌های شکل گرفته در مخزن، مقدار غلظت نمک با شیب ملایمی افزایش یافته است.

در بازه دوم نمودار، پس از افزایش نسبتاً ملایم در میزان غلظت نمک در ماه‌های اول، افزایش ناگهانی شوری ملاحظه شده است. در توجیه نتیجه بدست آمده می‌توان بیان نمود که، میزان دبی ورودی به مخزن در این مرحله کمترین مقدار خود را دارد (۲۲۰ متر مکعب بر ثانیه) و مقدار دبی خروجی تغییر نکرده است (۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه). به همین دلیل روند افزایش حجم مخزن کاهش یافته ولی نرخ ورود نمک به داخل حجم مخزن ثابت است. پس افزایش غلظت حجمی نمک مشاهده شده است. نکته حائز اهمیت دیگر آنکه، شوری طبیعی ورودی به مخزن از طریق رودخانه بالادست در این زمان دارای بیشترین مقدار خود است (حدود ۷۲۵ میلی‌گرم بر لیتر). تلفیق موارد گفته شده به همراه شوری تحمیلی به مخزن از طریق سازند نمکی نقش به‌سزایی در افزایش ناگهانی غلظت نمک در مخزن دارند. با توجه به اینکه در زمان انجام این مطالعه مخزن مورد مطالعه در حال آبیگری بود، قرائت مقادیر غلظت نمک در مخزن انجام گرفته است. پس از دریافت این داده‌ها، به‌منظور اعتباردهی به نتایج مدل عددی، این نتایج با داده‌های مخزن مقایسه شده است.

در شکل (۸) مقادیر اندازه‌گیری شده غلظت نمک در مخزن واقعی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مخزن نشان داده شده است. باتوجه به نتایج شکل (۸)، متوسط در صد خطای مقادیر غلظت نمک اندازه‌گیری شده در مخزن مطالعه شده و مدل عددی، با استفاده از روش MAPE برابر ۱۳/۶۵ درصد محاسبه شده است که با توجه به تقریب به‌کار رفته در طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی مخزن قابل قبول است. همان‌گونه که در شکل (۸) مشخص است تقریباً در بیشتر زمان‌های اندازه‌گیری شده، مدل عددی مقادیر غلظت نمک در مخزن را

پروژه مقادیر غلظت، در اواسط دوره شبیه‌سازی حساسیت بیشتری نسبت به تغییر پارامتر ضریب انحلال از خود نشان می‌دهند. با متوسط‌گیری در تغییرات مقادیر شوری در اثر تغییر ضریب انحلال در دوره میانی شبیه‌سازی، می‌توان نتیجه گرفت که با ۱۰ درصد تغییر در مقدار ضریب انحلال، ۲۱ درصد تغییر در مقادیر شوری ایجاد شده است.

شکل ۹. تغییرات غلظت نمک در اثر تغییر ضریب انحلال در طی زمان شبیه‌سازی

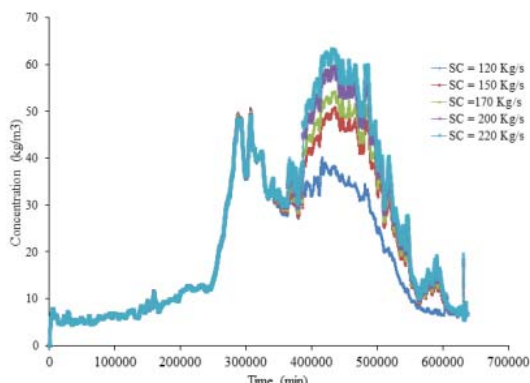


Fig. 9. Changes in salt concentration due to the change in the dissolution coefficient during simulation

شکل ۱۰. تغییرات غلظت نمک در زمان‌های متفاوت به‌ازای ضرایب انحلال مختلف

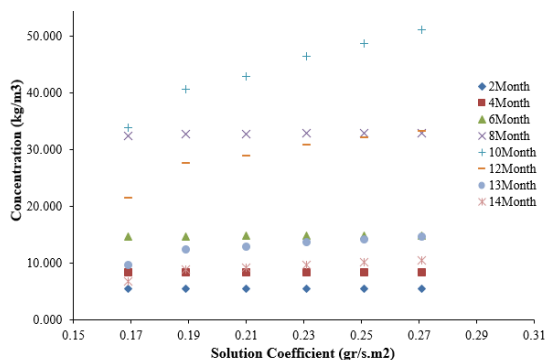


Fig. 10. Changes in salt concentration at different times for various dissolution coefficients

۳-۳- تأثیر دمای محیط بر غلظت نمک

حوزه‌های آبی به دلیل گستردگی و وسعت بسیار زیاد تحت تأثیر پارامترهای آب و هوایی هستند. دمای هوا، میزان تبخیر، رطوبت نسبی، درصد ابری بودن هوا و میزان تابش امواج خورشیدی، میزان بارندگی، بارش برف و تعداد ماه‌های یخبندان از جمله پارامترهای اثرگذار بر هیدرودینامیک حوزه‌های آبی محسوب

بررسی اثر جایگزینی بخشی از مصالح سنگی با ماسه ریخته‌گری... به داخل مخزن از عوامل دیگر ورود نمک به داخل آب مخزن هستند که در مدل آزمایشگاهی این موارد در نظر گرفته نشده است. با در نظر گرفتن موارد ذکر شده، مقدار ضریب انحلال بدست‌آمده از مدل‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی، کمتر از ضریب انحلال واقعی سازند نمکی در مخزن برآورد شده است. همچنین به این موارد، خطای نهفته در مدل‌سازی عددی شامل تقریب‌های به‌کار رفته در استخراج معادلات، روش‌های گسسته-سازی مکانی و زمانی معادلات، روش‌های حل دستگاه معادلات ماتریسی و ... را باید اضافه نمود. در کل با در نظر گرفتن تمامی موارد ذکر شده، مقدار خطای ۱۳/۶۵ درصد قابل قبول بنظر می‌آید.

۲-۳- تأثیر ضریب انحلال بر غلظت نمک

در مطالعات گذشته، مقادیر عددی مختلفی برای ضریب انحلال پیشنهاد شده که علت این موضوع وابستگی و حساسیت این پارامتر به اثر مقیاس است. پس در خصوص تعیین این پارامتر نمی‌توان اظهار نظر قطعی نمود. به‌همین منظور در این پژوهش حساسیت و بررسی تأثیر ضریب انحلال نمک بر چگونگی توزیع شوری در مخزن مطالعه شده است. برای رسیدن به این هدف مقدار ضریب انحلال را در محدوده $(120 < SC < 220)$ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته و دوباره مدل عددی اجرا شده است. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودار تغییرات غلظت نمک در مخزن با ضرایب انحلال مختلف و در بازه‌های زمانی متفاوت نشان داده شده است.

با کمی تأمل در نمودارهای بالا مشاهده می‌شود که در هر دو نمودار که مربوط به دو نقطه در مخزن هستند (شکل ۹ مربوط به نقطه‌ای در نزدیکی کارست نمکی و شکل ۱۰ مربوط به نقطه دیگر که نزدیک به محور سد است)، روند خاصی مشاهده می‌شود. نتیجه مشخص این است که در ماه‌های اول با تغییر مقدار ضریب انحلال، تغییر قابل توجهی در مقدار غلظت نمک در هیچ‌کدام از نمودارها مشاهده نشده است. ولی در ماه‌های هشتم تا دوازدهم با تغییر در مقدار ضریب انحلال مقادیر غلظت تغییر می‌یابند و بعد از آن در ماه‌های بعد این روند افزایش در مقادیر غلظت دوباره کاهش می‌یابد. این بدان معناست که برای این

می‌شوند. دمای هوا به دلیل اینکه سبب تغییر چگالی در لایه‌های ارتفاعی مخزن می‌شود، بر لایه‌بندی حرارتی مخزن و بعد از آن بر هیدرودینامیک و چگونگی توزیع شوری در مخزن تأثیرگذار است. برای بررسی اثر پارامتر دما بر چگونگی توزیع شوری در مخزن، پارامترهای دیگر را ثابت نگه داشته و مدل با تغییر در پارامتر دما دوباره اجرا شده است. برای تحلیل حساسیت مدل در اثر تغییرات دما، مقادیر دما ۱۰٪ کاهش و افزایش داده شد و مدل در هر دو حالت دوباره اجرا شده است. در این تحلیل ضرایب انحلال ۱۲۰ و ۲۲۰ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (۱۱-الف و ۱۱-ب) مقادیر قرائت شده غلظت نمک در دماها و ضرایب انحلال مختلف نشان داده شده است. با بررسی شکل (۱۱) مشخص می‌شود که در هر دو نمودار به ازای افزایش دما در دوره‌های میانی شبیه‌سازی، افزایش در غلظت نمک مشاهده شده است، گرچه میزان افزایش در مقدار غلظت، در ضریب انحلال ۲۲۰ کیلوگرم بر ثانیه نسبت به ضریب انحلال ۱۲۰ کیلوگرم بر ثانیه با شدت بیشتری اتفاق افتاده است. در حالت کلی با افزایش دمای هوا مقدار غلظت نمک در مورد مشابه افزایش می‌یابد و با کاهش دما از مقدار آن کاسته می‌شود. علت این امر را می‌توان در تأثیر دما بر حجم آب مخزن و همچنین اثرگذاری دمای هوا بر لایه‌بندی حرارتی مخزن، جستجو نمود. کاهش نسبی حجم آب مخزن نسبت به حالت اولیه می‌تواند سبب افزایش غلظت وزنی نمک در آب مخزن شود که این امر می‌تواند به علت افزایش نسبی دمای محیط صورت پذیرد. همچنین کاهش نسبی دما نسبت به حالت اولیه می‌تواند سبب کاهش دمای لایه‌های سطحی آب شود. این نکته منتج به جریان‌های چگال در آب مخزن و بهم ریختگی لایه‌های حرارتی می‌شود که این امر تغییر توزیع شوری و کاهش غلظت نمک نسبت به حالت اولیه را سبب می‌شود. با متوسط‌گیری در تغییرات مقادیر شوری در اثر تغییر دما مشخص شد به‌طور متوسط کاهش ۱۰٪ در میزان دمای محیط سبب کاهش ۷/۱ درصدی در مقدار غلظت نمک شده و افزایش ۱۰٪ در دمای محیط، سبب افزایش ۳۰ درصدی مقدار غلظت نمک شده است. در واقع افزایش دما تأثیر بیشتری نسبت به کاهش دما بر میزان توزیع شوری در مخزن دارد.

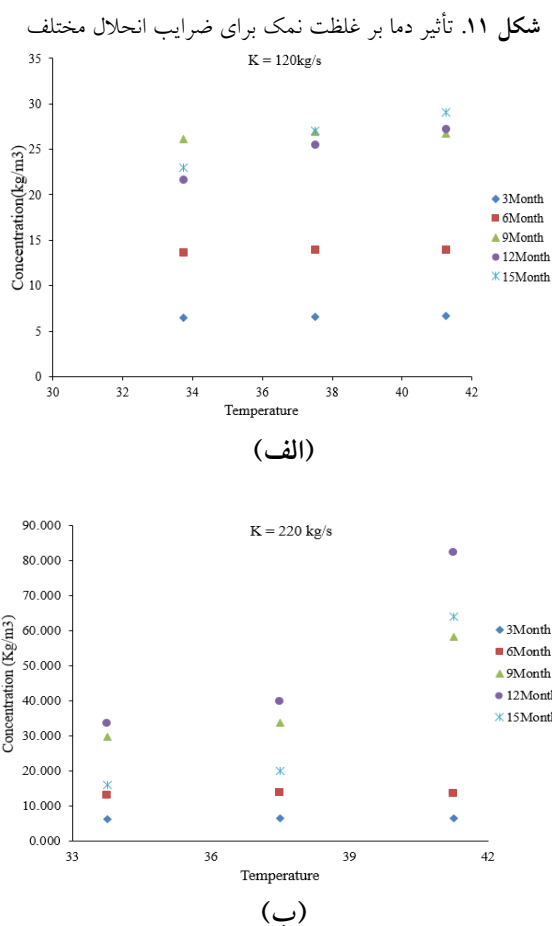


Fig. 11. Effect of temperature on salt concentration for different dissolution coefficients

۳-۴- تأثیر دبی ورودی بر غلظت نمک

حجم آب مخزن توسط چندین پارامتر کنترل می‌شود که مهمترین آن، دبی ورودی و خروجی به مخزن است. مقدار غلظت وزنی و حجمی نمک نیز بستگی به حجم آب موجود در مخزن دارد. برای بررسی میزان تأثیر دبی بر مقدار غلظت نمک سناریویی طراحی و اجرا شد. مقدار دبی سالیانه ورودی به مخزن به وسیله رودخانه بالادست به صورت داده‌های سری زمانی دریافت شد (شکل ۱۲).

محور افقی نشان‌دهنده زمان و محور عمودی نشان‌دهنده دبی ورودی (مترمکعب بر ثانیه) است. سپس مقادیر این داده‌ها به میزان ۱۰٪ کاهش و افزایش داده شد. بعد از اتمام دوره شبیه‌سازی، نتایج حاصل با نتایج اولیه مقایسه و تحلیل شد. شکل (۱۳) نتایج حاصل از شبیه‌سازی در دبی‌های مختلف را نشان می‌دهد. نکته مهم در شکل (۱۳)، تغییرات ناچیز غلظت در نیمه اول شبیه‌سازی نسبت به نیمه دوم شبیه‌سازی در اثر تغییرات دبی است. علت این امر را می‌توان با توجه به نمودار دبی سالیانه رودخانه تشریح کرد. همان‌گونه که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، در نیمه دوم نمودار مقدار دبی ورودی به مخزن با شیب زیادی افزایش می‌یابد. این افزایش ناگهانی در مقدار دبی ورودی، سبب می‌شود که اختلاف بین مقدار دبی کاهش یافته (۱۰٪ کاهش) و مقدار دبی اصلی رودخانه در نیمه دوم نمودار، نسبت به نیمه اول نمودار بیشتر باشد. این امر به دلیل ثابت ماندن دبی خروجی در طول دوره شبیه‌سازی، سبب کاهش بیشتر حجم آب مخزن در مقایسه با نیمه اول نمودار شده و در نتیجه مقدار غلظت حجمی نمک را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد و سبب افزایش بیشتر و قابل ملاحظه در مقادیر غلظت می‌شود. متوسط میزان این تغییرات در طول دوره شبیه‌سازی در اثر ۱۰ درصد کاهش و افزایش دبی، مقدار ۲۱/۱ درصد است که مقدار زیادی از آن مربوط به نیمه دوم دوره شبیه‌سازی است.

شکل ۱۲. دبی ورودی به مخزن از طریق رودخانه

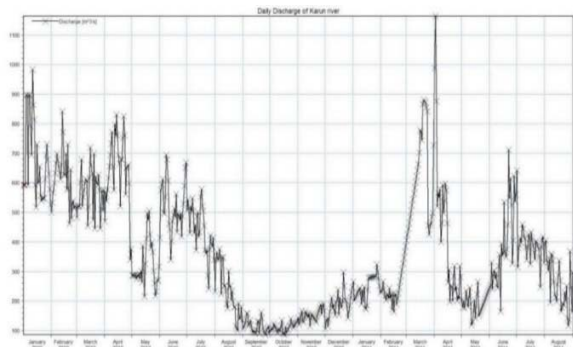


Fig. 12. River discharge into the reservoir

شکل ۱۳. تأثیر دبی بر غلظت نمک

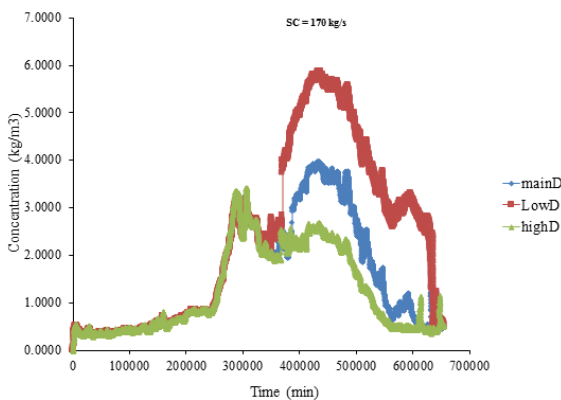


Fig. 13. Effect of discharge on salt concentration

۳-۵- تأثیر تبخیر و رطوبت نسبی بر غلظت نمک

پارامترهای تبخیر و رطوبت نسبی از سطح دریاچه مخزن در تعامل با یکدیگر رفتار می‌کنند. این بدان معناست که زمانی که رطوبت نسبی هوا کاهش می‌یابد میزان تبخیر سطحی افزایش یافته و بالعکس. تأثیر این پارامتر بر چگونگی و میزان توزیع شوری در مخزن سد، به دلیل تأثیر آن بر حجم آب مخزن است. به‌منظور بررسی میزان تغییرات غلظت نمک در آب مخزن تحت تأثیر این پارامتر، داده‌های مربوط به تبخیر سطحی مخزن در طی دوره شبیه‌سازی ۱۰٪ کاهش و افزایش داده شد. در شکل (۱۴) نتایج مربوط به چگونگی اثرگذاری رطوبت نسبی بر غلظت نمک نشان داده شده است. نکته‌ای که در نگاه اول می‌توان دریافت، عدم تغییر مقادیر غلظت نمک در نیمه اول دوره شبیه‌سازی است، موضوعی که در بررسی اثر پارامترهای دیگر نیز مشاهده شده است. در نیمه دوم دوره شبیه‌سازی تغییرات بیشتری نسبت به نیمه اول دوره شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. نکته دیگر این است که با افزایش رطوبت نسبی، میزان غلظت نمک کاهش یافته است. علت این امر اینست که با افزایش رطوبت نسبی، میزان تبخیر از سطح مخزن کاهش می‌یابد که این امر به جهت اینکه تمامی پارامترهای موثر دیگر ثابت فرض شده‌اند، سبب افزایش حجم آب مخزن نسبت به حالت اولیه می‌شود. افزایش حجم آب مخزن سبب کاهش غلظت وزنی و حجمی نمک می‌شود که این مورد در نمودار شکل (۱۴) مشهود است. متوسط میزان تغییرات غلظت نمک در طول دوره شبیه‌سازی در اثر ۱۰٪ کاهش و افزایش در مقدار رطوبت نسبی و تبخیر، ۶/۱ درصد است که

مطالعه شده محسوب نمی‌شوند و غلظت وزنی نمک موجود در آب مخزن در حدود ۰/۸ تا ۰/۹ مقدار مجاز است. ولی در ادامه با توجه به تغییراتی که در شرایط مخزن ایجاد می‌شود روند توزیع شوری در مخزن شدت بیشتری گرفته و مقدار غلظت نمک با گذشت زمان افزایش می‌یابد. در این دوره باید با اتخاذ تدابیر مناسبی، میزان شوری آب مخزن کاهش یابد. با مقایسه مقادیر واقعی غلظت نمک در مخزن پس از آبیگری و مدل عددی می‌توان بیان کرد که متوسط درصد خطای مقادیر غلظت حدود ۱۳/۶۵ درصد است و مدل عددی در بیشتر زمان‌ها مقادیر اندازه-گیری شده غلظت را کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌کند.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت پارامترها نشان داد که به‌طور متوسط پارامتر ضریب انحلال ۲۱٪، دمای هوا ۱۸٪، دبی ۲۱/۱ درصد و رطوبت نسبی ۶/۱ درصد بر مقادیر شوری آب مخزن تأثیرگذار هستند. با توجه به این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که پارامترهای ضریب انحلال نمک و دبی مهمترین عوامل تأثیرگذار بر رفتار توزیع شوری در مخزن هستند. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر غلظت نمک در اواسط دوره بهره‌برداری نسبت به ماه-های ابتدایی حساسیت بیشتری از خود در اثر تغییر در پارامترهای مؤثر نشان می‌دهند. نرخ انحلال و دبی رودخانه ورودی به مخزن از عوامل تأثیرگذار در چگونگی توزیع شوری و میزان غلظت نمک در آب مخزن محسوب می‌شوند. به‌همین دلیل هر عملیاتی که بتواند بر رفتار سازند کارستی تأثیرگذار باشد و یا دبی ورودی به رودخانه را کنترل نماید می‌تواند سبب کاهش مشکل شوری در مخزن شود.

به عنوان نمونه احداث پتوی رسی آب‌بند در طول ناحیه کارستی می‌تواند تا حدی تأثیرگذار باشد. علت این امر این است که لایه آب‌بند رسی می‌تواند زمان تماس آب مخزن با لایه‌های نمک سازند را افزایش داده و نرخ ورود نمک به داخل آب مخزن را کاهش دهد. کاهش نرخ ورود نمک به داخل مخزن سبب تغییر الگوی پخش‌شدگی شوری در مخزن می‌شود و میزان غلظت نمک در طی دوره بهره‌برداری را کاهش می‌دهد. دبی ورودی به مخزن را می‌توان از طریق مخازن بالادست (در صورت وجود) کنترل نمود که از این طریق می‌توان روند پخش و توزیع شوری در مخزن را کنترل نمود که البته این امر نیازمند برنامه‌ریزی بسیار

بیشتر این تغییرات مربوط به نیمه دوم دوره شبیه‌سازی است. نتایج بدست آمده از تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر توزیع شوری می‌تواند برای حل مشکل شوری مخزن استفاده شود بدین صورت که با کنترل پارامترهایی که بیشترین تأثیر را در توزیع شوری دارند،

شکل ۱۴. تأثیر رطوبت نسبی بر غلظت نمک

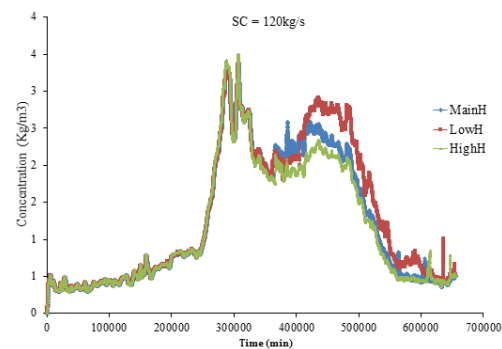


Fig. 14. Effect of Relative Moisture on Salt Concentration

می‌توان میزان غلظت مواد جامد حل شده در آب مخزن را همواره در طی دوره بهره‌برداری از مخزن در حد مقدار مجاز آن ثابت کرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی شده تا با بررسی پارامترهای مؤثر بر توزیع شوری و استفاده از ابزار مدل‌سازی، حتی‌الامکان پیش‌بینی صحیح و شناخت بهتر از سازوکار اندرکنش مخزن و منبع آلوده-کننده (معدن نمک) صورت گیرد. با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی و تطبیق نتایج حاصل از آن‌ها، مقدار ضریب انحلال سازند کارست نمکی در شرایط جریان مخزن حدود ۱۷۰ کیلوگرم بر ثانیه پیش‌بینی شده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مخزن با استفاده از ضریب انحلال بدست‌آمده از مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی، نشان داد که شرایط کیفی آب مخزن در اثر انحلال لایه‌های نمک موجود در سازند کارستی وضعیت مطلوبی نخواهد داشت و حتی در زمان پر بودن کامل مخزن، مقدار مجاز غلظت نمک در آب مخزن می‌تواند به ۳ برابر حد مجاز برسد. نتایج این مطالعه نشان داده که ماه‌های اول بهره‌برداری، نسبتاً ماه‌های بحرانی برای پروژه

- [5] Svensson U. and Dreybrodt W., 1992. Dissolution kinetics of natural calcite minerals in CO₂-water systems approaching calcite equilibrium. *Chemical Geology*, 100(1-2), 129-145.
- [6] Dreybrodt W. and Eisenlohr L., 2000. Limestone dissolution rates in karst environments. *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. Nat. Speleol. Soc.*, USA, 136-148.
- [7] Dreybrodt W., 1988. Processes in Karst Systems (series in physical environment). *Springer-Verlag, Heidelberg*, 140-182.
- [8] Kaufmann G. and Dreybrodt W., 2007. Calcite dissolution kinetics in the system CaCO₃-H₂O-CO₂ at high undersaturation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(6), 1398-1410.
- [9] Alkattan M., Oelkers E.H., Dandurand J.L. and Schott J., 1997. Experimental studies of halite dissolution kinetics, 1 The effect of saturation state and the presence of trace metals. *Chemical Geology*, 137(3-4), 201-219.
- [10] Jeschke A.A., Vosbeck K. and Dreybrodt W., 2001. Surface controlled dissolution rates of gypsum in aqueous solutions exhibit nonlinear dissolution kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(1), 27-34.
- [11] Frumkin A., 1994. Hydrology and denudation rates of halite karst. *Journal of Hydrology*, 162(1-2), 171-189.
- [12] Sadeghi H. and Khosravi F., 2003. Influence of Joint in the Phenomena of Solubility of Limestone. *Journal of Engineering Geology*, 1(2), 193.
- [13] MikebyDHI, Mike21 Scientific Documentation.

دقیق و توجه به محدودیت‌های بهره‌برداری است. استفاده از مدل‌های بهره‌برداری بهینه کمی-کیفی از مخازن سدها نیز می‌تواند در زمینه حل مشکل شوری مفید باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند به مدیریت صحیح منابع آب و ارائه راهکار برای بهره‌برداری مناسب از سدها، در جهت بهبود کیفیت آب مخزن و حل مشکلات موجود ناشی از حضور سازند متشکل از لایه‌های نمکی کمک کند.

References

۵- مراجع

- [1] Haeri, M. Rezaie, F. 2007. Experimental investigation and analysis of dissolution and scouring of halite karst systems in dam reservoirs. M.Sc.Thesis. Faculty of Civil & Environmental Engineering. Sharif University of Technology. Tehran. Iran. (In Persian)
- [2] Parhizgar, M.R. 2007. Investigation of geological hazards in the vicinity of Tang-Sorkh dam in Shiraz. M.Sc.Thesis. Faculty of Civil & Environmental Engineering. Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. (In Persian)
- [3] Veni G., 1999. A geomorphological strategy for conducting environmental impact assessments in karst areas. *Geomorphology*, 31(1-4), 151-180.
- [4] Plummer L.N., Wigley T.M.L. and Parkhurst D.L., 1978. The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5 degrees to 60 degrees C and 0.0 to 1.0 atm CO₂. *American journal of science*, 278(2), 179-216.

Numerical simulation and Experimental investigation of halite karst dissolution in dam reservoirs

S.M. Hashemi Heydari^{1*}, M.R Jalili Ghazizadeh², M. Ehsani³, A. Ahmadi⁴, D. Mahjoob⁵

- 1- Ph.D. Candidate of Water engineering, Faculty of Civil., Isfahan University of Technology
- 2- Assistant Professor., Faculty of water and Environmental Eng., Shahid Beheshti University
- 3- Ph.D. Candidate of Hydraulic structure, Faculty of Civil., Isfahan University of Technology
- 4- Associate Professor., Faculty of Civil Eng., Shahrood University of Technology
- 5- Manager of Engineering studies., IWPCO., Tehran., Iran

*smhashemi@cv.iut.ac.ir

Abstract:

The presence of halite karst systems in dam reservoirs can be one of the crucial sources of pollutants for the water resources. Karstic regions are those with dissolving caves. If the dam is constructed in the regions with reactive rocks it is likely to be endangered by karst phenomenon, dissolution and corrosion of current waters. construction of dams and reservoirs in these formations are associated with high risk. A comprehensive and accurate understanding of the salt dissolution processes facilitates the description of salt karst formations dissolution process in dam reservoirs.

This research was performed based on three bases: field studies, experimental investigation and numerical modeling. For determination of dissolution coefficient, the physical model of the reservoir was built in the form of the trapezoidal channel and samples of salt rock in the reservoir were used in the physical model of karst formation. This model was implemented in different conditions and the results of dissolution amount and salt concentration were measured for different time scales. At the next stage, the physical model was simulated in the numerical model for determining of dissolution coefficient. The numerical model ran with different dissolution coefficients and results were compared with experimental results. With this comparison and adaptation of results, the dissolution rate of halite karst determined and then used in the numerical simulation of the main reservoir. With simulation of main reservoir using dissolution coefficient obtained from laboratory study, the effect of salt karst formation on the reservoir's water quality was analyzed. The influences of effective parameters such as dissolution rate, air temperature, discharge and relative humidity on the water quality of dam reservoir were studied along with carrying out a wide range of sensitivity numerical analysis. To this purpose, a versatile finite volume tool 'MIKE' was used. Using the experimental study and numerical simulation and implementation of results, the dissolution coefficient of salt karst formation was calculated about 0.2 cm/h. Numerical model results showed that early months of operation were not critical to the project and salt concentration in reservoir was in the range of 0.8 to 0.9 of allowable limit. But considering the changes occurring in the reservoir's conditions, the process of salinity distribution increases and salt concentration increases with time. By comparing the salt concentration in reservoir and numerical model, it was found that the average error percentage of concentration values was about 13.65 percent and the numerical model showed the values lower than the reservoir in most times.

The sensitivity analysis of parameters affecting the salinity distribution showed that these parameters have a significant impact on salinity distribution and salt concentration in the reservoir. It was found that with 10 percent changes in studied parameters, dissolution rate with 21%, air temperature with 18%, discharge with 21.1% and relative humidity with 6.1% caused changes in salt concentration of reservoir. According to the results, it is evident that dissolution rate and discharge were the most important factors that influence the behavior of salinity distribution in the dam reservoir.

Keywords: Dam reservoir, Salinity distribution, Halite dissolution coefficient, Experimental modeling, MIKE