

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران و معماری

گروه عمران

شبیه‌سازی عددی و بررسی آزمایشگاهی انحلال کارست نمکی

در مخازن سدها

دانشجو: سید مهدی هاشمی حیدری

استاد راهنما

دکتر احمد احمدی

دکتر محمدرضا جلیلی قاضی‌زاده

استاد مشاور

دکتر داریوش محبوب

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن‌ماه سال ۱۳۹۰

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که در تمامی صحنه‌های زندگی یار و یاور و پشتیبان
من بوده‌اند و همسرم که مصداق کامل مهربانی، وفاداری و فداکاری
است و این اثر، چون تمام زندگی مرهون شکیبایی آنان است

با تشکر از زحمات پدرانۀ و بی‌شائبه جناب آقایان دکتر احمدی و دکتر
جلیلی و راهنمایی‌های ارزنده جناب آقای دکتر محبوب که بی‌شک
بدون زحمات ایشان این اثر بی‌ثمر می‌ماند.

چکیده فارسی

امروزه سدها از سازه‌های آبی مهمی به شمار می‌آیند که در همه نواحی جهان بویژه در نواحی خشک و نیمه خشک برای مدیریت و کنترل آب‌های سطحی احداث می‌شوند. این سازه‌ها در ارتباط تنگاتنگ با شرایط زمین‌شناسی هستند که در آن ساخته شده‌اند. یکی از منابع آلوده کننده، سیستم‌های کارست نمکی در محیط‌های آبی بویژه در مخازن سدها می‌باشد. کارست یکی از شگفت‌انگیزترین پدیده‌های زمین‌شناسی است که به خاطر تعامل تنگاتنگ میان آن با آب‌های زیر زمینی و آب‌های سطحی از اهمیت بسیاری برخوردار است. اگر سد در مناطقی که از سنگ‌های واکنش‌پذیر تشکیل شده است ساخته شود مورد تهدید پدیده کارستی شدن، انحلال و در مواقعی خوردگی آب‌های جاری در حوزه قرار می‌گیرد و ساخت سدها و مخازن در این سازندها با ریسک بالایی همراه می‌گردد.

اساس این تحقیق بر سه محور مطالعات میدانی، استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی استوار می‌باشد. به منظور تعیین ضریب انحلال، مدل فیزیکی مربوط به مخزن بصورت کانال دوزنقه‌ای طراحی و ساخته شد و از نمونه‌های سنگ نمک موجود در مخزن سد به عنوان سازند کارستی در مدل فیزیکی استفاده شد. این مدل در حالت‌های مختلف اجرا و نتایج مربوط به مقدار انحلال و مقادیر غلظت نمک در مقاطع زمانی مختلف بدست آمد. در مرحله بعد مدل آزمایشگاهی جهت تعیین ضریب انحلال نمک در مدل عددی شبیه‌سازی گردید. مدل عددی با ضرایب انحلال مختلف اجرا و نتایج حاصله با داده‌های بدست‌آمده از مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. از طریق این مقایسه و بهترین تطبیق نتایج، میزان نمک ورودی به مخزن در مقاطع مختلف تعیین و وارد مدل عددی شد. در مرحله بعد مدل عددی به مخزن واقعی تعمیم داده‌شد و با شبیه‌سازی مخزن واقعی با استفاده از ضریب انحلال بدست‌آمده از مطالعه آزمایشگاهی، چگونگی تاثیر سازند کارستی نمکی بر شرایط کیفی مخزن مورد تحلیل و بررسی قرارگرفت. در ادامه تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر توزیع شوری و رفتار سازند

نمکی، مانند ضریب انحلال، دبی، دما و رطوبت نسبی انجام شد و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. مدل عددی مورد استفاده، مدل مشهور MIKE^{۲۱} ساخت شرکت DHI می‌باشد.

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 ۰.۲ سانتیمتر بر ساعت محاسبه شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مخزن با استفاده از ضریب انحلال بدست‌آمده از مطالعه آزمایشگاهی، نشان داد که حتی در زمان پر بودن کامل مخزن، مقدار غلظت نمک در آب مخزن می‌تواند به ۳ برابر حد مجاز برسد. نتایج تحلیل مدل عددی نشان داد که ماه‌های اول بهره‌برداری نسبتاً ماه‌های بحرانی برای پروژه مورد مطالعه محسوب نمی‌شوند و غلظت وزنی نمک موجود در آب مخزن در حدود ۰.۸ تا ۰.۹ مقدار مجاز خواهد بود. 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. با مقایسه مقادیر واقعی غلظت نمک در مخزن و مدل عددی مشخص شد که متوسط درصد خطای مقادیر غلظت حدود ۱۳.۶۵ درصد می‌باشد و مدل عددی در اکثر زمان‌های اندازه‌گیری شده مقادیر غلظت را اندکی کمتر از مقادیر واقعی نشان می‌دهد.

در ادامه با انجام تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر توزیع شوری، مشخص شد که این پارامترها تاثیر قابل توجهی در نحوه توزیع شوری و مقدار غلظت نمک در مخزن دارند. این نتایج نشان داد که بطور متوسط با ۱۰ درصد تغییر در پارامترهای بررسی شده، پارامتر ضریب انحلال به میزان ۲۱ درصد، دمای هوا ۱۸ درصد، دبی ۲۱.۱ درصد و رطوبت نسبی ۶.۱ درصد موجب تغییر در مقادیر شوری آب مخزن می‌شوند. با توجه به این نتایج مشهود است که پارامترهای ضریب انحلال نمک و دبی مهمترین عوامل تاثیرگذار بر رفتار توزیع شوری در مخزن هستند.

کلمات کلیدی: مخزن سد، ضریب انحلال، مدل آزمایشگاهی، شبیه‌سازی عددی، مدل MIKE

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه :

۱- بررسی عددی تاثیر ضریب انحلال نمک بر توزیع شوری در مخازن دارای سازند

نمکی -نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، اردیبهشت ۱۳۹۱ دانشگاه صنعتی

اصفهان

۲- NUMERICAL INVESTIGATION OF EFFECTIVE PARAMETERS ON SALINITY STRATIFICATION IN THE DAM RESERVOIRS CAUSED BY THE HALITE KARST SYSTEM, IAHR ۲۰۱۲ CONFERENCE, JUNE ۲۰۱۲, TUM

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۵	۲-۱ هدف تحقیق
۵	۳-۱ فرض تحقیق
۵	۴-۱ روش تحقیق
۸	فصل ۲: مبانی نظری و مطالعات انجام شده
۸	۱-۲ کارست‌ها
۸	۱-۱-۲ تعریف کارست
۱۲	۲-۱-۲ مورفولوژی کارستی
۱۳	۳-۱-۲ انواع کارست
۱۵	۴-۱-۲ فروچاله‌ها
۱۶	۵-۱-۲ رابطه بین شکستگی‌ها و ایجاد حفرات کارستی
۱۶	۶-۱-۲ کارست در مخازن سدها
۱۷	۲-۲ انحلال و پخش‌شدگی
۱۷	۱-۲-۲ تئوری انحلال
۱۹	۲-۲-۲ نرخ جریان انحلال
۲۳	۳-۲-۲ پخش‌شدگی
۲۴	۳-۲ اصول تشابه
۲۶	۴-۲ معادلات هیدرودینامیکی و پخش و حمل

۲۷	۱-۴-۲ معادله پیوستگی
۲۸	۲-۴-۲ معادله اندازه حرکت
۲۹	۳-۴-۲ تنش بستر
۲۹	۴-۴-۲ تنش باد
۳۰	۵-۴-۲ پخش و حمل
۳۱	۵-۲ مطالعات انجام شده

فصل ۳: مشخصات مدل فیزیکی و مطالعه میدانی

۳۵	
۳۶	۱-۳ بررسی‌های میدانی
۴۰	۲-۳ تشریح مخزن مورد مطالعه
۴۲	۳-۳ تشریح مدل فیزیکی و آزمایش

فصل ۴: مدل عددی و شرایط مرزی

۴۸	
۴۹	۱-۴ معرفی مدل MIKE
۴۹	۱-۱-۴ تشریح مدل و حوزه‌های کاربردی
۵۰	۲-۱-۴ روش عددی مورد استفاده
۵۱	۳-۱-۴ شرایط مرزی
۵۲	۲-۴ مدل‌سازی مخزن مورد مطالعه
۵۳	۱-۲-۴ تشریح فرآیند مدل‌سازی مخزن در MIKE

فصل ۵: تحلیل نتایج

۶۳	
۶۴	۱-۵ نتایج شبیه‌سازی عددی مدل فیزیکی

۶۴	۱-۱-۵ ساخت شبکه محاسباتی
۶۹	۲-۱-۵ آماده‌سازی داده‌های ورودی
۷۳	۳-۱-۵ تعیین ضریب انحلال
۷۵	۲-۵ نتایج شبیه‌سازی عددی مخزن مورد مطالعه
۷۸	۳-۵ مقایسه نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی عددی مخزن
۸۲	۴-۵ تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر توزیع شوری در مخزن
۸۲	۱-۴-۵ ضریب انحلال
۸۷	۲-۴-۵ دمای هوا
۹۰	۳-۴-۵ دبی ورودی
۹۲	۴-۴-۵ رطوبت نسبی

۹۷	فصل ۶: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۹۸	۱-۶ خلاصه تحقیق
۹۸	۱-۱-۶ تعریف صورت مسئله تحقیق
۹۸	۲-۱-۶ روش انجام تحقیق
۱۰۰	۲-۶ خلاصه نتایج ارائه‌شده
۱۰۲	۳-۶ پیشنهادات
۱۰۴	منابع

فهرست اشکال

۳۷	شکل (۱-۳)- توده‌های نمکی نابرجا در حاشیه چپ رودخانه مشاهده می‌شود
۳۸	شکل (۲-۳)- شیب لایه بندی و نزدیک به قائم دیواره‌ها در جناح چپ رودخانه بالادست سد

- شکل (۳-۳) - بلوک‌های نمکی در تراز نزدیک به بستر رودخانه بالادست سد ۳۹
- شکل (۴-۳) - خطوط تراز سطح آب مخزن به همراه موقعیت سازند نمکی و محور سد ۴۱
- شکل (۵-۳) - نمایی از مدل آزمایشگاهی ۴۳
- شکل (۱-۴) - مختصات توپوگرافی نقاط مخزن با فرمت xyz ۵۳
- شکل (۲-۴) - منوی ایجاد فایل بسیمتری مخزن ۵۴
- شکل (۳-۴) - منوی تعریف داده‌های بسیمتری مخزن به مدل عددی ۵۵
- شکل (۴-۴) - فایل اولیه بسیمتری مخزن ۵۵
- شکل (۵-۴) - منوی تعریف محدوده بسیمتری مخزن ۵۶
- شکل (۶-۴) - فایل بسیمتری مخزن ۵۷
- شکل (۷-۴) - فایل مش‌بندی مخزن ۵۸
- شکل (۸-۴) - منوی ایجاد فایل‌های سری زمانی ۵۹
- شکل (۹-۴) - پنجره ورود اطلاعات داده‌های سری زمانی ۵۹
- شکل (۱۰-۴) - نمودار رطوبت نسبی در مخزن مورد مطالعه ۶۰
- شکل (۱۱-۴) - منوی ایجاد مدل عددی کامل مخزن ۶۱
- شکل (۱۲-۴) - پنجره ساخت مدل عددی کامل مخزن ۶۲
- شکل (۱-۵) - پنجره ساخت شبکه محاسباتی ۶۶
- شکل (۲-۵) - انتخاب سیستم انتقال مختصات نقاط ۶۶
- شکل (۳-۵) - مختصات نقاط مدل آزمایشگاهی ۶۷
- شکل (۴-۵) - محدوده مدل آزمایشگاهی و مقاطع اندازه‌گیری شده ۶۸
- شکل (۵-۵) - پنجره وارد نمودن مشخصات مش‌بندی مدل آزمایشگاهی ۶۸
- شکل (۶-۵) - شبکه محاسباتی مدل ۶۹
- شکل (۷-۵) - منوی ایجاد فایل شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی ۷۰

- ۷۰ شکل (۵-۸) - پنجره ایجاد فایل شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی
- ۷۱ شکل (۵-۹) - نمودار غلظت نمک حاصل از شبیه‌سازی مدل فیزیکی
- ۷۲ شکل (۵-۱۰) - نمودار سطحی توزیع شوری با ضریب انحلال ۲۴ سانتی‌متر بر ساعت
- ۷۲ شکل (۵-۱۱) - نمودار سطحی توزیع شوری با ضریب انحلال ۲۰ سانتی‌متر بر ساعت
- ۷۳ شکل (۵-۱۲) - نمودار سطحی توزیع شوری با ضریب انحلال ۱۴ سانتی‌متر بر ساعت
- ۷۴ شکل (۵-۱۳) - نمودار مقادیر غلظت نمک در مدل عددی با ضرایب انحلال مختلف و مدل فیزیکی
- ۷۵ فیزیکی
- ۷۷ شکل (۵-۱۴) - نمودار درصد خطای محاسبه شده مقادیر غلظت مدل عددی در ضرایب انحلال مختلف
- ۸۱ انحلال مختلف
- ۸۴ شکل (۵-۱۵) - نمودار توزیع غلظت نمک در نقطه نزدیک به کارست نمکی
- ۸۵ شکل (۵-۱۶) - نمودار غلظت نمک در مخزن و مدل عددی
- ۸۶ شکل (۵-۱۷) - نمودار مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۲ ماهه در نقطه P^۱ با ضرایب انحلال مختلف
- ۸۸ مختلف
- ۹۱ شکل (۵-۱۸) - نمودار مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۲ ماهه در نقطه P^۳ با ضرایب انحلال مختلف
- ۹۱ مختلف
- ۹۳ شکل (۵-۱۹) - نمودار تغییرات غلظت نمک در اثر تغییر ضریب انحلال
- ۹۳ شکل (۵-۲۰) - نمودار مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۳ ماهه و دماهای مختلف
- ۹۴ شکل (۵-۲۲) - نمودار غلظت نمک به ازای دبی‌های مختلف (SC=۱۷۰ kg/s)
- ۹۵ شکل (۵-۲۳) - نمودار دبی اصلی سالیانه رودخانه ورودی به مخزن
- ۹۶ شکل (۵-۲۴) - نمودار رطوبت نسبی بر حسب درصد
- ۹۶ شکل (۵-۲۵) - نمودار تبخیر سطحی از مخزن بر حسب میلی‌متر
- ۹۷ شکل (۵-۲۶) - نمودار تغییرات غلظت نمک به ازای تغییر در رطوبت نسبی (SC=۱۲۰ kg/s)

شکل (۵-۲۷) - نمودار تغییرات غلظت نمک به ازای تغییر در رطوبت نسبی ($SC=170 \text{ kg/s}$)

۹۸

فهرست جداول

- ۴۴ جدول (۱-۳) برنامه آبگیری مخزن واقعی و برنامه اجرای مدل آزمایشگاهی
- ۴۷ جدول (۲-۳) نتایج آزمایش مدل فیزیکی در قالب مقادیر غلظت نمک
- ۷۴ جدول (۱-۵) - نتایج استخراج شده از آزمایش و شبیه‌سازی عددی
- ۷۹ جدول (۲-۵) - نتایج اندازه‌گیری شده مخزن واقعی و مدل عددی
- ۸۳ جدول (۳-۵) - مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۲ ماهه در نقطه P^1 با ضرایب انحلال مختلف
- ۸۴ جدول (۴-۵) - مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۲ ماهه در نقطه P^3 با ضرایب انحلال مختلف
- ۸۷ جدول (۵-۵) - مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۳ ماهه و دماهای مختلف
- ۸۸ جدول (۶-۵) - مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۳ ماهه و دماهای مختلف

فصل اول

کلیات

۱.۱ مقدمه

افزایش آگاهی از پیامدهای زیست محیطی و تخریبی و مشکلات عدیده ناشی از آن، توجه محققین و مهندسان را بر روی مسئله پیش‌بینی الگوی جریان و چگونگی پخش و حمل منابع آلوده‌کننده حوزه‌های آبی متمرکز کرده است. یکی از مهمترین منابع آلوده‌کننده، وجود سیستم‌های کارستی در محیط‌های آبی به‌ویژه در مخازن سدها می‌باشند. امروزه سدها از سازه‌های آبی مهمی به شمار می‌آیند که در همه نواحی جهان بویژه در نواحی خشک و نیمه خشک برای تولید انرژی پاک، مدیریت و کنترل آب‌های سطحی احداث می‌شوند. این سازه‌ها در ارتباط تنگاتنگ با شرایط زمین‌شناسی هستند که در آن ساخته شده‌اند. با توجه به گستردگی مخازن سدهای بزرگ و عدم امکان تغییر محور سدها به دلیل محدودیت‌های مختلف، امکان دارد که پس از آگیری، آب دریاچه سد با سازندهای کارستی (که می‌تواند متشکل از لایه‌های آهکی، گچی و یا نمکی باشند) در تماس قرار بگیرد که به دلیل انحلال پذیری بالای این تشکیلات خصوصاً اگر حاوی نمک باشند، یکی از خطراتی که پس از بهره برداری از سد امکان وقوع دارد کاهش کیفیت آب مخزن خواهد بود. لذا باید در چنین پروژه‌های بزرگی، ریسک‌های موجود در محدوده سد و مخزن بررسی شده و تا حد امکان رفع یا تقلیل یابند.

اگر سد در مناطقی که از سنگ‌های واکنش‌پذیر تشکیل شده است ساخته شود مورد تهدید پدیده کارستی شدن، انحلال و در مواقعی خوردگی آب‌های جاری در حوزه قرار می‌گیرد و ساخت سدها و مخازن در این سازندها با ریسک بالایی همراه می‌گردد (پرهیزگار، ۱۳۸۶). وجود این سازندها می‌تواند باعث به‌وجود آمدن دو مشکل عمده گردد. در محل محور ساخت سدها به دلیل اختلاف ارتفاع بسیار زیاد آب در دو طرف محور، گرا دیان‌های هیدرولیکی بالایی مشاهده می‌شود که باعث افزایش سرعت‌های انحلالی در نواحی کارستی اطراف آن می‌گردد که این امر به نوبه خود می‌تواند باعث ایجاد مسیره‌های نشتی برای آب مخزن و نشست‌های نامتقارن در پی شود که ممکن است به

سازه سد آسیب جدی برساند. موضوع دوم نگرانی در مورد کیفیت آب مخزن است. به‌عنوان مثال نمک از جمله کانی‌هایی می‌باشد که تاثیر بسزایی در کیفیت آب خروجی از مخزن سد دارد. مقادیر مجاز غلظت این کانی در آب شرب و کشاورزی در آیین‌نامه‌های مختلف تعیین شده است. همچنین در تحقیقات گذشته مشخص شده‌است که این کانی قابلیت انحلال فوق‌العاده بالایی دارد (Alkattan et al., ۱۹۹۱). همین موارد سبب می‌شوند تا وجود این سازند کارستی در مخزن سد و انحلال آن در آب مخزن باعث کاهش شدید کیفیت آب مخزن و بروز مشکلات جدی در بهره‌برداری شود. در مطالعه حاضر به بررسی اثر انحلال لایه‌های نمک هنگامیکه در اندر کنش با آب مخزن یکی از سدها قرار می‌گیرند، بر کیفیت آب خروجی و شرایط مخزن آن پرداخته خواهد شد.

شناخت جامع و صحیح از فرایند انحلال نمک، توصیف چگونگی فرآیند انحلال سازندهای کارست نمکی در مخازن سدها را تسهیل می‌نماید. به جهت شناخت واکنش آب-سنگ در صخره‌های کارستی آگاهی کامل از نرخ انحلال و وابستگی آن به شرایط هیدرودینامیکی و ترکیب شیمیایی محلول ضروری می‌باشد. ضریب انحلال به عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های حلال و ماده حل‌شونده، حجم و سرعت جریان حلال درگیر، سطح در معرض تماس، غلظت اشباع، دما، فشار، اسیدیته محیط و تاثیر مواد محلول بستگی دارد.

بدلیل تغییرات متوالی پارامترهای مذکور در زمان آبگیری سد و انحلال کارست نمکی، تعیین دقیق ضریب انحلال نمک با پیچیدگی‌های زیادی همراه می‌باشد. به منظور تعیین این پارامتر مدل فیزیکی مربوط به مخزن طراحی و ساخته شد و از نمونه‌های سنگ نمک موجود در مخزن سد به عنوان سازند کارستی در مدل فیزیکی استفاده شد. این مدل در حالت‌های مختلف اجرا و نتایج مربوط به مقدار انحلال و مقادیر غلظت نمک در مقاطع زمانی مختلف به‌دست آمد. در مرحله بعد مدل آزمایشگاهی جهت تعیین ضریب انحلال نمک در مدل عددی شبیه‌سازی گردید. مدل عددی با ضرایب انحلال مختلف اجرا و نتایج حاصله با داده‌های بدست‌آمده از مدل آزمایشگاهی مقایسه شد. از طریق این

مقایسه و بهترین تطبیق نتایج، میزان نمک ورودی به مخزن در مقاطع مختلف تعیین و وارد مدل عددی شد. ثابت پخش شدگی نیز به عنوان داده ورودی به مدل عددی تعریف شد. در مرحله بعد با استفاده از حل معادلات حاکم بر هیدرودینامیک مخزن (معادلات بقای جرم و مومنتوم) و معادلات پخش و حمل (Advection-Dispersion Equations) توسط مدل عددی، چگونگی تاثیر انحلال کارست نمکی موجود در مخزن بر کیفیت آب مخزن و توزیع شوری آن بررسی شد.

جهت حل معادلات پخش و حمل در حوزه مورد نظر ابتدا نیاز به حل معادلات هیدرودینامیکی مخزن و تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی مخزن مانند سرعت و فشار در محدوده می‌باشد. جهت مدل‌سازی هیدرودینامیکی مخزن پارامترهای هیدرولوژیکی مانند دبی ورودی به مخزن، دبی خروجی از مخزن، سرعت و جهت وزش باد، نیروهای جزر و مدی، دمای هوا، میزان تبخیر، میزان بارندگی، رطوبت نسبی، درصد ابری بودن هوا و پارامترهای هیدرولیکی مانند ضریب ویسکوزیته ادی، ضریب زبری بستر، نیروهای کوریولیس و مورد نیاز می‌باشد.

مدل عددی مورد استفاده، مدل مشهور MIKE21 ساخت شرکت DHI می‌باشد. مدل MIKE سیستم مدلسازی عددی پیشرفته‌ای می‌باشد که جهت کاربردهای وسیعی در حوزه‌های مختلف از جمله اقیانوس‌ها، سواحل و بنادر، خلیج، دریاچه‌ها و مخازن سدها توسعه داده شده است. این مدل قابلیت فوق‌العاده‌ای در شبیه‌سازی جریان‌های یک بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی ناپایدار با در نظر گرفتن تغییرات چگالی، عمق آب و نیروهای خارجی وارد بر حوزه مورد مطالعه همانند نیروهای وابسته به تحولات جوی، تغییر ارتفاع آب ناشی از جزر و مد، جریان‌های ورودی و خروجی و سایر شرایط هیدروگرافی حوزه را دارد. این مدل که توسط شرکت آب و محیط زیست DHI ارائه شده است، توانایی توزیع سه بعدی پارامترهای دما، شوری و دیگر آلاینده‌های مخزن و تحلیل کیفیت آب در نقاط پایین دست سیستم را دارا می‌باشد.

۲.۱ هدف تحقیق

در تعدادی از مقالات مانند (Kaufmann and Dreybrodt, ۲۰۰۶)، (Svensson and Dreybrodt, ۱۹۹۲)، (Jeschke et al., ۲۰۰۰) و (حائری، ۱۳۸۶) مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته ولی به دلیل ماهیت پیچیده مکانیزم انحلال کارستها هنوز ضرورت انجام تحقیقات گسترده‌تر در این زمینه احساس می‌گردد.

هدف از انجام تحقیق حاضر تعیین و بررسی اثرات ضریب انحلال نمک و پارامترهای موثر از جمله دبی و سرعت جریان، دمای هوا و رطوبت نسبی در توزیع نمک در مخزن سد می‌باشد. همچنین یک شبیه‌سازی توزیع نمک در مخزن جهت رفتارنگاری و پیش بینی کیفیت آب با در نظر گرفتن منبع آلوده‌کننده آن انجام می‌شود. نتایج این تحقیق به شناخت بهتر مکانیزم اندرکنش مخزن و منبع آلوده‌کننده (معدن نمک) کمک خواهد کرد. همچنین نتایج این مطالعه می‌تواند به مدیریت صحیح منابع آب و ارائه راهکار جهت بهره برداری مناسب از سدها، در جهت بهبود کیفیت آب مخزن و حل مشکلات موجود ناشی از حضور سازند متشکل از لایه‌های نمکی کمک کند.

۳.۱ فرضیات تحقیق

تحقیق حاضر بر این فرضیه استوار می‌باشد که مدلسازی عددی و شبیه‌سازی مخزن می‌تواند به شناخت اندرکنش معدن نمک و آب مخزن و پیش بینی رفتار مخزن و سازند کارستی کمک نماید و با استفاده از این نتایج برای حل مسئله اقدام نمود.

۴.۱ روش انجام تحقیق (Methodology)

روش انجام این تحقیق مطالعات میدانی، استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی می‌باشد. یکی از روش‌های قابل اطمینان در بررسی کلی مسئله یعنی وجود این سازندها در مخازن سدها و

مشکلات ناشی از آن و پیش بینی رفتار کیفی مخزن در حضور سازند کارست نمکی، شبیه‌سازی عددی و استفاده از مدل‌های ریاضی می‌باشد. مدل عددی مورد استفاده، مدل مشهور MIKE^{۲۱} ساخت شرکت DHI می‌باشد. مدل MIKE سیستم مدلسازی عددی پیشرفته‌ای می‌باشد که جهت کاربردهای وسیعی در حوزه‌های مختلف از جمله اقیانوس‌ها، سواحل و بنادر، خلیج، دریاچه‌ها و مخازن سدها توسعه داده شده است. این مدل قابلیت فوق‌العاده‌ای در شبیه‌سازی جریان‌های یک بعدی، دوبعدی و سه‌بعدی ناپایدار با در نظر گرفتن تغییرات چگالی، عمق آب و نیروهای خارجی وارد بر حوزه مورد مطالعه همانند نیروهای وابسته به تحولات جوی، تغییر ارتفاع آب ناشی از جزر و مد، جریان‌های ورودی و خروجی و سایر شرایط هیدرولیکی حوزه را دارد. این مدل که توسط شرکت آب و محیط زیست DHI ارائه شده است، توانایی توزیع سه بعدی پارامترهای دما، شوری و دیگر آلاینده‌های مخزن و تحلیل کیفیت آب در نقاط پایین دست سیستم را دارا می‌باشد. این مدل از معادلات حاکم بر هیدرودینامیک مخزن (معادلات بقای جرم و مومنتوم) و معادلات پخش و حمل (Advection-Dispersion Equations) برای شبیه‌سازی مخزن استفاده می‌کند.

برای تعیین پارامتر ضریب انحلال مطالعات آزمایشگاهی انجام شد. ابتدا مدل فیزیکی مربوط به مخزن طراحی و ساخته شد و از نمونه‌های سنگ نمک موجود در مخزن سد به عنوان سازند کارستی در مدل فیزیکی استفاده شد. این مدل در حالت‌های مختلف اجرا و نتایج مربوط به مقدار انحلال و مقادیر غلظت نمک در مقاطع زمانی مختلف به دست آمد. در مرحله بعد مدل آزمایشگاهی جهت تعیین ضریب انحلال نمک در مدل عددی شبیه‌سازی گردید. مدل عددی با ضرایب انحلال مختلف اجرا گردید و نتایج حاصله با داده‌های بدست آمده از مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید. از طریق این مقایسه و بهترین تطبیق نتایج، میزان نمک ورودی به مخزن در مقاطع مختلف تعیین شد.

در مرحله بعد شبیه‌سازی مخزن واقعی با استفاده از مدل عددی و نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی انجام شد و چگونگی تاثیر سازند نمکی بر شرایط کیفی مخزن مورد تحلیل و بررسی

قرارگرفت. در ادامه تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر توزیع شوری و رفتار سازند نمکی مانند ضریب انحلال، دبی، دما و رطوبت نسبی انجام شد و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نکته حائز اهمیت در این مسئله این است که هدف اصلی از انجام این تحقیق پیش‌بینی رفتار سازند کارست نمکی در مخزن پس از آبگیری می‌باشد. با استناد به نتایج به دست آمده می‌توان به اتخاذ تصمیمات صحیح و ارائه راهکارهای مناسب و اجرایی برای مقابله با پدیده مورد نظر پرداخت. البته ذکر این نکته لازم است که انحلال مستقیم فقط یکی از فرایندهای حل نمک در مخزن محسوب می‌شود و انحلال ناشی از گردش آب مخزن در توده نمکی و سقوط بلوک‌های نمک در مخزن ناشی از حرکات دامنه‌ای نیز باید مدنظر قرار گیرد.

فصل دوم

مبانی نظری و مطالعات انجام شده

۱.۲ کارست‌ها

۱.۱.۲ تعریف کارست

کارست یکی از شگفت‌انگیزترین پدیده‌های زمین‌شناسی است که به خاطر تعامل تنگاتنگ میان آن با آب‌های زیر زمینی و آب‌های سطحی از اهمیت بسیاری برخوردار است. به مناطقی که دارای غارهای انحلالی می‌باشد مناطق کارستی گفته می‌شود. مناطق کارستی معمولاً بر اساس مشخصه‌هایی نظیر فروچاله‌ها، دره‌های خشک و... شناخته می‌شوند. پدیده کارست منحصر به منطقه خاص جغرافیایی نمی‌باشد. سنگ‌های قابل حل در تمام سطح جهان رخنمون دارند و پدیده کارستی شدن نیز می‌تواند در هر جایی اتفاق بیفتد. بررسی پراکندگی کارست در روی زمین نشان می‌دهد که فراوانی این زمین‌ها بسیار است، به‌عنوان مثال ۲۵ درصد پهناور آمریکا کارستی است. این مقدار در کشور پهناور چین به ۲۰ درصد می‌رسد. ایران بعد از کشورهای آمریکا، چین و ترکیه، بالاترین درصد کارست را داراست و بیش از ۱۱ درصد سطح کشورمان را سازندهای کارستی می‌پوشاند (حائری، ۱۳۸۶). از آنجایی که این منابع کارستی اصولاً در ارتفاعات وجود دارند، دسترسی انسان‌ها به آن‌ها کمتر و به همین دلیل تقریباً دور از آلودگی‌های انسانی هستند.

نام کارست، از منطقه‌ای در یوگسلاوی گرفته شده که در آنجا پوشش‌های سنگی منطقه عمدتاً از سنگ آهک مستعد به حفره‌زایی و تشکیل غار است. بدین ترتیب واژه کارست مترادف با خوردگی سنگ‌های کربناته و دولومیتی توسط آب است که به تدریج با گسترش تحقیقات در این زمینه، واژه کارست امروزه در مورد سنگ‌های سولفات (ژیپس و انیدریت)، سنگ نمک، سنگ‌های پریدوتیت، ماسه سنگ و کنگلومرا استفاده می‌شود. به‌عنوان مثال در مورد سنگ‌های خرد شده کربناته به سد لار در ایران و سنگ‌های خورد شده غیر کربناته به سدهای Mequinenza در اسپانیا، Krematsa در یونان و Yate در کالدونیا اشاره کرد.

عموماً خواص خوردگی و یا انحلال سنگ در آب، در مورد سنگ‌های سولفات‌ها به مراتب بیشتر از سنگ‌های کربناته می‌باشد. سنگ‌های دولومیت معمولاً در مقابل انحلال آب مقاومت بیشتری نشان می‌دهند. مقدار انحلال سنگ‌های کربناته در آب خالص در شرایط مختلف ترکیب شیمیایی آن دارای تغییراتی است، ولی بطور متوسط، درجه اشباع انحلال سنگ آهک در آب خالص بین ۳۵۰-۴۰۰ میلی گرم بر لیتر است. با افزایش ناخالصی‌ها در آب خالص، زمان طولانی‌تری برای انحلال سنگ آهک لازم است. در امتداد گسل‌ها و مناطق خرد شده، کارستی شدن سریعتر اتفاق می‌افتد. به‌طوریکه این پدیده از امتداد گسل‌ها، خطواره‌ها و هر گونه عوامل تکتونیکی تبعیت می‌نماید. مقدار نزولات جوی سالیانه و انحلال گاز کربنیک هوا در آب باران نیز در ایجاد و گسترش کارست نقش مهمی دارند.

هر چه نزولات جوی بیشتر باشد، مسلماً روند کارستی‌شدن شدت می‌یابد. اقلیم سرد، باعث تسریع پدیده کارست آهکی می‌شود. در مقیاس جهانی، انحلال آهک و ژپس توسط آب‌های طبیعی، اشکال گسترده و وسیع کارست (Karst) را ایجاد کرده که برای مهندسی عمران نوعی از شرایط زمین شناسی بسیار متفاوت را بوجود آورده است. غارهای حاصل، تهدیدی بر فونداسیون‌ها خواهد بود که بطور قابل ملاحظه‌ای، عرض این غارها از ضخامت سقفشان بیشتر است. در درجه اول، کارستی شدن و پدیده انحلال و مورفولوژی غاری شکل در سنگ‌هایی گسترش می‌یابند که واجد شرایط (از قبیل شکستگی) بوده و دارای مقاومت تراکم تک محوری در حالت سالم، ۲۰۰-۳۰۰ Mpa باشد. آهک‌های ضعیفتر، گل سفید و رسوبات آهکی سخت نشده که مقاومت کمی دارند، حفرات محدودتری نیز بوجود می‌آورند. رسوبات کربناته دور از ساحل، معمولاً مورفولوژی کارست ندارند. سنگ‌های نمک هم به سرعت حل می‌شوند و مورفولوژی مخصوص به خود را دارند. اقلیم منطقه، به کمک کنترل رژیم‌های جریانی آبی خود، تاثیر زیادی بر توپوگرافی کارستیک دارد. به همین دلیل، کارست‌های بالغ در محیط‌های گرمسیری (tropical) توسعه بیشتری دارند. در مناطق معتدل (temperate)، انحلال

سنگ آهک کاهش می یابد و در رژیم‌های مناطق خشک، یخچالی و برون یخچالی به مقدار مینیمم خود می‌رسد.

در مکان‌هایی که انحلال سنگ بستر با شدت و سرعت بالایی صورت می‌گیرد، برجستگی‌های نامنظم در سطح زمین توسعه می‌یابند و پروسه‌های فیزیکی و شیمیایی دیگری که باعث تغییرات در مورفولوژی و برجستگی‌های سطح زمین می‌شوند از اهمیت کمتری برخوردار می‌شوند. سازندهای کارستی در مناطق متنوعی از جهان یافت می‌شوند. درک و شناخت صحیح از این پدیده و بررسی روند انحلال کارست‌ها که هم در سطح زمین و هم در لایه‌های زیرین کارست‌ها صورت می‌گیرد از دهه ۸۰ تا کنون به سرعت در حال رشد و توسعه می‌باشد اگرچه موفقیت‌های بسیار چشمگیری نیز تا کنون در این زمینه به دست آمده‌اند.

سازندهای کارستی دارای مزایا و معایب فراوانی هستند. یکی از اثرات مثبت آن‌ها وجود منابع آب غنی در این سازندهاست. 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 و در آن‌ها حفره‌های بزرگ ایجاد می‌شود، اما از بین این مصالح، گچ و نمک حتی در مقابل آب‌های معمولی (غیر اسیدی) نیز انحلال پیدا می‌کنند. انحلال سنگ بستر بوسیله آب، پروسه غالب زمین‌شناسی در سازندهای کارستی می‌باشد. تقریباً یک چهارم کل جمعیت جهان بر روی و یا در نزدیکی نواحی کارستی زندگی می‌کنند. شناخت کارست‌ها شاخه‌ای از علوم می‌باشد که در آن دانشمندان زمین‌شناسی، هیدرولوژیست‌ها، جغرافیدان‌ها، شیمیدان‌ها، بیولوژیست‌ها و دانشمندان دیگری از رشته‌های مختلف برای درک و شناخت بهتر موضوع با یکدیگر همکاری می‌کنند. بررسی‌های ژئومورفولوژیکی کارست‌ها در مطالعات ارزیابی تأثیرات زیست محیطی به شدت حائز اهمیت می‌باشند. کارست‌ها و غارهای کارستی در انواع مختلفی از سنگ‌ها از جمله سنگ آهک، سنگ گچ، نمک، کوارتزیت و ... تشکیل و توسعه می‌یابند. فعالیت‌هایی که بشر در نواحی کارستی انجام می‌دهد از جمله هرگونه ساخت و ساز،

کشاورزی، تاسیس منابع آب شیرین، دفع زباله و... نیاز به شناخت جزئی و بسیار دقیق از رفتار سیستم‌های کارستی دارد.

نواحی کارستی قابل دید که دارای رخنمون‌های سطحی می‌باشند بوسیله انحلال‌های سطحی ایجاد می‌شوند. این انحلال بوسیله تماس آب‌های سطحی با سنگ‌های انحلال پذیر کارستی صورت می‌گیرد. نرخ انحلال این سنگ‌ها به عوامل متعددی بستگی دارد از جمله: میزان آب در دسترس، ساختار سنگ در معرض انحلال و آب‌وهوا (دما، بارندگی، رطوبت نسبی، پوشش گیاهی و...). سنگ نمک انحلال پذیرترین نوع از انواع مختلف سازندهای کارستی می‌باشد.

۲.۱.۲ مورفولوژی کارستی (Karst Morphology)

الف) مورفولوژیهای کوچک مقیاس سطحی: شیارهای با عمق کمتر از یک متر، حاصل فرسایش انحلالی سنگ فاقد پوشش شامل :

- Grykes شکستگی هایی که قطعات سنگ آهک را از هم جدا می کند.
- Rundkarren مورفولوژی انحلالی کوچک با عمق و عرض ۵۰-۵۰۰ mm و در نهایت بریدگی‌ها که کارست‌های هرمی (مخروطی) با ارتفاع ۲-۳ m را تشکیل می‌دهند.

ب) مورفولوژی‌های بزرگ مقیاس سطحی: دره‌های خشک، دولین‌ها، فروافتادگی (poljes) با طول و پهنای زیاد و دیواره‌های پرشیب، مخروطها و برج‌ها و تمام اشکال موجود در انواع مختلف کارست‌ها با مقیاس کیلومتری.

ج) اشکال موجود در زیر خاک: مورفولوژی‌های انحلالی پیچیده‌ای از توپوگرافی کارستی با برجستگی‌های محلی که می‌تواند به ده‌ها متر نیز برسد.

د) فروچاله‌ها: فروافتادگی‌های سطحی متنوعی با طول ۱-۱۰۰۰ m بسته به حفرات سنگی زیرین.

ه) غارها: حفراتی با طول چند متر تا ده‌ها متر، تشکیل شده در داخل سنگ تحت انحلال که ممکن است خالی بوده یا با رسوبات پر شده باشند.

۳.۱.۲ انواع کارست

مورفولوژی‌های سطحی بزرگ مقیاس با هم ترکیب شده و اشکال کارستیک مشخصی را بوجود می‌آورند. مجموعه اشکال کارستیک، انواع اصلی کارست‌های آهکی را بوجود آورده که هر کدام ویژگی‌های مشخص به خود را داشته و در رژیم اقلیمی ویژه‌ای بطور وسیع گسترده شده‌اند.

الف) کارستهای یخچالی: (glaciokarst) سطوح سنگی بدون پوشش همراه با سنگ کف آهکی، پرتگاه‌های سنگی و دره‌های عمیق که در عرض‌ها و ارتفاعات بالا که توسط یخچال‌های پلیستوسن شسته شده و گسترش خاک‌های پس از یخچالی کمی دارند، بوجود آمده‌اند.

ب) کارستهای آبرفتی: (fluviokarst) که بصورت یک سیستم درختی مشخصی از دره‌های خشک هستند و قبل از اینکه بوسیله زهکشی زیرزمینی در داخل غارها به دام بیفتند، توسط رودخانه‌ها قطع شده‌اند. اغلب در مناطقی بوجود آمده‌اند که آن مناطق در مراحل سرمای پلیستوسن دور از فرایند یخچالی شدن قرار داشتند.

ج) کارستهای دولین: (doline karst) دارای شبکه‌ای چند ضلعی از میان آب‌هایی که فروافتادگی‌های نزدیک به هم را از هم جدا ساخته است. هر یک با طول ۱۰۰-۱۰۰۰ m که به صورت مورفولوژی‌های غالب، بخاطر زهکشی‌های زیرزمینی، جایگزین دره‌ها شده‌اند. دولین‌ها، مورفولوژی‌های بالغی هستند که در مناطق معتدل با آب و هوای مدیترانه‌ای گسترش پیدا کرده‌اند.

د) کارست مخروطی: (cone karst) تپه‌های آهکی مخروطی یا نیمکروی با ارتفاع ۳۰-۱۰۰ m حالت بینابینی دولین‌های ستاره ای شکل کوچک و حفرات آبرفتی بزرگ. کارست‌های مخروطی، مورفولوژی‌های خیلی بالغی هستند که در میان مناطق گرمسیری محدود شده‌اند.

ه) کارست برجی: (tower karst) از زیباترین اشکال کارستیک با برج‌های جدا از هم و پرشیب با ارتفاع ۵۰-۱۰۰ m بالاتر از دشت‌های کارستی آبرفتی و بارزترین نوع کارست، محدود در مناطق گرمسیری مرطوب و با گسترش طویل و غیر منقطع.

در زیر تقسیمات دیگری نیز برای کارست‌ها وجود دارد؛ مثل کارست‌های مناطق خشکی که محدود هستند؛ ولی در طبقه بندی مهندسی کارست، توجه به مورفولوژی خاص که تاثیر اصلی را در شرایط زمین شناسی دارد از قبیل غارها، فروچاله‌ها و مورفولوژی خاص سطح کارست، مفید خواهد بود. غارها در هر سنگ قابل انحلالی که جریان کافی آب وجود داشته باشد، تشکیل می شود. سرعت جریان آب و درجه تحت اشباع بودن شیمیایی آن میزان ابعاد حفره را تعیین می‌کند که به سطوح لایه بندی و شکستگی‌های تکتونیکی بستگی دارد. بزرگ شدن شبکه شکاف‌های باز و مسیره‌های جریان مناسب، به غارها و حفرات وابسته است. اگر آب خارج شود، رسوبات یا استالاکمیت‌های آهکی بطور کامل یا بخشی، حفرات یا غارها را پر می‌کنند؛ و یا اگر ناپایدار شوند، ممکن است فرو بریزند.

تمام حفرات موجود در بلوک‌های آهکی کارستی از طریق زهکش‌ها به هم متصل هستند. شکاف‌های باریک، دالان‌های رودخانه‌ای عریض و حفرات بزرگ، اجزاء یک سیستم حفره ای (غاری) هستند. بنابراین مورفولوژی حفرات در دوره‌های زمین شناسی آهکی بایستی مورد مطالعه قرار گرفته، به-طوری‌که توزیع حفرات غاری شکل در توده‌های آهکی کشف نشده، قابل پیش بینی نیست و از اینرو یکی از مهمترین مشکلات برای مهندسی عمران خواهد بود.

حرکت آب در توده‌های سنگی مستعد انحلال، نظیر گچ، نمک و آهک، سبب تشکیل فضاهاى انحلالی می‌گردد. اگرچه غارها در شرایط مختلف زمین شناسی و سنگ‌های مختلف می‌تواند وجود داشته باشد، ولی غارهای موجود در طبیعت عمدتاً در سنگ‌های آهکی به وجود آمده‌اند. به مناطقی که دارای غارهای انحلالی می‌باشد مناطق کارستی گفته می‌شود. مناطق کارستی معمولاً بر اساس مشخصه‌هایی نظیر فروچاله‌ها، دره‌های خشک و... شناخته می‌شوند. پدیده کارست منحصر به منطقه خاص جغرافیایی نمی‌باشد. سنگ‌های قابل حل در تمام سطح جهان رخنمون دارند و پدیده کارستی شدن نیز می‌تواند در هر جایی اتفاق بیفتد. در حدود ۱۰ درصد مساحت ایران را سنگ‌های کربناته تشکیل می‌دهد (حائری، ۱۳۸۶). بیشتر گسترش این سنگ‌ها در ناحیه زاگرس است. زاگرس از نواحی پر باران کشور بوده و با توجه به مساعد بودن شرایط آب و هوایی، نواحی کارستی وسیعی در آن تشکیل شده است.

۴.۱.۲ فروچاله ها

فروچاله‌ها حفرات مدوری است که در مناطق کارستی در سطح زمین مشاهده می‌گردد. ابعاد فروچاله‌ها از ۱ تا ۱۰۰ متر متغیر است و ممکن است مدور، کشیده، حالت مخروطی و استوانه‌ای یا بی‌قاعده باشند. فروچاله‌ها با کارست‌هایی که به صورت مجاری با اندازه مختلف در حال زهکشی در زیر زمین و انحلال و شکل‌دهی در طول زمان‌های بسیار زیاد و در حال تغییر مناظر طبیعی با استفاده از نیرویی که در دست دارند هستند، ارتباط دارند. فروچاله‌ها در هر منطقه‌ای از جهان که کارست وجود داشته باشد دیده می‌شوند و در بعضی از مناطق غالب هستند مثل جنوب چین، بسیاری از مناطق حاشیه مدیترانه و فلوریدا که چاله‌های ناشی از کارست منظره نقطه نقطه‌ای به وجود آورده است.

۵.۱.۲ رابطه بین شکستگی ها و ایجاد حفرات کارستی

رابطه بین شکستگی ها و ایجاد حفرات کارستی در سرزمین های آهکی و کلسیتی بسیار مشخص است. نمونه هایی از شکستگی ها و مشاهدات ساختمانی کارستی نشان می دهد که انحلال در مسیرهای شکستگی در سنگ های کربناته، توسط آب های جوی فرورونده در زمین ایجاد می شود. در مناطق و زون های گسله فرایند نفوذ آب ها به درون مناطق کم عمق و از طریق این گسل ها به اعماق نفوذ کرده و فرسایش و انحلال خود را باعث می شوند. حتی آب های آتشفشانی نیز می توانند باعث این حادثه شود. حفرات فروچاله ها در مناطق گسله بسیار بیشتر از مناطق دارای شکستگی هاست. بررسی چنین مخاطراتی در زون های گسله می تواند تعریف، مشخص و مشاهده گردد و می تواند توسط رسوبات دیگر پوشیده شود.

۶.۱.۲ کارست در مخازن سدها

نواحی کارست نمکی به طور عمده در مناطق با آب و هوای گرم و خشک یافت می شوند. علت این امر آن است که در این مناطق رخنمون های سنگ نمک به صورت کامل در اثر پدیده انحلال از بین نمی روند. برخلاف سنگ های کربناته، نمک بوسیله یک واکنش ساده تجزیه پذیر انحلال می یابد. سادگی روند انحلال سنگ نمک این اجازه را می دهد تا فاکتورهای هیدرولوژیکی و زمین شناسی که بر توسعه کارست های نمکی اثرگذار هستند شناسایی شوند. اگرچه نمک سنگ رسوبی متداولی می باشد با این حال رخنمون های سنگ نمک به ندرت در مناطق مرطوب و غیرخشک یافت می شود. انحلال پذیری فوق العاده بالای نمک (در حدود ۳۶۰ گرم بر لیتر) باعث می شود تا رخنمون های این کانی در مناطق مرطوب به طور کامل انحلال یابد به همین دلیل رخنمون های سنگ نمک عمدتاً در مناطق با آب و هوای گرم و خشک یافت می شوند. وجود این سازندها در پی سازه ها مخصوصاً سدها و همچنین در مخازن سدها می تواند خطرناک باشد و باعث مشکلات فراوان شود.

به جهت شناخت واکنش آب-سنگ در صخره‌های کارستی آگاهی کامل از نرخ انحلال و وابستگی آن به شرایط هیدرودینامیکی و ترکیب شیمیایی محلول ضروری می‌باشد. پدیده انحلال به عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های حلال و ماده حل‌شونده، حجم و سرعت جریان حلال درگیر، سطح در معرض تماس، غلظت اشباع، دما، فشار، اسیدیته محیط و تاثیر مواد محلول بستگی دارد.

مشکلات عدیده دیگری که وجود سازندهای کارستی در مخازن سدها به همراه خواهند داشت عبارتند از: کاهش کیفیت آب مخزن، افزایش شوری در مخزن سد که باعث افزایش EC ((هدایت الکتریکی)) آب می‌شود به مقادیری که می‌تواند برای کشاورزی، شرب و سازه‌ها و تجهیزات پایین دست سد خطرآفرین باشد و عوارض جدی زیست‌محیطی به همراه داشته باشد، افزایش نشت از پی سد در اثر انحلال کارست، افزایش رانش زمین و زمین لغزش‌ها در محدوده مخزن سد و به همین جهت شناخت دقیق مسئله در حل هرچه بهتر مشکل و مدیریت صحیح منابع آب لازم است.

۲.۲ انحلال و پخش شدگی

۱.۲.۲ تئوری انحلال

شناخت جامع و صحیح از فرایند انحلال نمک، توصیف چگونگی فرآیند انحلال سازندهای کارست نمکی در مخازن سدها را تسهیل می‌نماید. شناخت پارامترهای تاثیرگذار بر انجام این فرآیند و تحلیل حساسیت اثر هرکدام از پارامترهای مذکور بر روند انحلال، کمک شایانی بر تصمیم‌گیری در مورد نحوه مقابله با این پدیده می‌نماید و منجر به ارائه راهکارهای صحیح و مناسب می‌شود.

دما، حالت اشباع محلول و وجود عناصر فلزی محلول از جمله پارامترهای تاثیرگذار در فرآیند انحلال می‌باشند.

در محیط‌های کارستی، سنگ‌های انحلال‌پذیر همانند نمک، آهک، گچ و... توسط جریان‌های آبی انحلال می‌یابند. در رابطه شماره ۱ معادله جریان در کارست‌ها با معادله پیوستگی گذرای زیر بیان می‌شود (Kaufmann et al., ۲۰۱۰):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K(t) \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K(t) \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K(t) \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1-2)$$

که در این رابطه $K(t)$ هدایت هیدرولیکی، S ذخیره ویژه، $h = p + z$ هد هیدرولیکی که دارای دو مولفه z هد ارتفاعی و p هد فشار می‌باشد، t زمان و x, y, z مولفه‌های محورهای مختصات می‌باشند.

هدایت هیدرولیکی $K(t)$ بدلیل انحلال شیمیایی کارست با زمان افزایش می‌یابد به همین دلیل نسبت به پارامتر زمان بیان می‌شود. برای جریان‌های لامینار رابطه بین هدایت هیدرولیکی و قطر شکاف در کارست بصورت زیر بیان می‌شود:

$$K(t) = \frac{\rho g}{1.07} d(t)^2 \quad (2-2)$$

که $\rho [kg/m^3]$ و $\eta [pa.s]$ به ترتیب چگالی و لزجت آب و $d[m]$ قطر شکاف در هر لحظه از زمان می‌باشد.

قطر شکاف به دلیل انحلال و انتقال مواد سطحی درزه با زمان افزایش می‌یابد. در دو گام زمانی متوالی میزان افزایش در قطر شکاف با معادله زیر داده می‌شود:

$$d(t_i) = d(t_{i-1}) + F \frac{m_{mat}}{\rho_{mat}} (t_i - t_{i-1}) \quad (3-2)$$

$F [mol/m^2/s]$ نرخ جریان انحلال، $m_{mat} [kg/mol]$ جرم مولکولی سنگ کارستی و $\rho [kg/m^3]$ چگالی سنگ کارست می‌باشد.

۲.۲.۲ نرخ جریان انحلال (*Flux rate*)

جریان انحلال در واقع توصیف کننده جداسازی ماده انحلال یافته از سطح رویی سنگ کارستی در واحد سطح و واحد زمان می باشد. این پدیده توسط سه پروسه متوالی کنترل می شود:

➤ واکنش سطحی آب با سنگ و جداسازی یون $NaCl$ از سطح سنگ نمک

(*surface controlled*)

➤ انتقال یون از سطح به داخل حجم محلول از طریق فصل مشترک بین آن ها بوسیله

فرآیندهای پخش و حمل (*Diffusion*) در لایه مرزی با ضخامت ε

(*transport controlled*)

➤ تبدیل دی اکسید کربن به اسید کربنیک که در مورد سنگ نمک کاربرد ندارد

از آنجاییکه ضخامت لایه مرزی ε ، قویاً به شرایط هیدرودینامیکی محلول بستگی دارد و با تغییر آن تغییر می یابد، همچنین بدلیل تناسب معکوس ضخامت لایه مرزی (ε) با ضریب پخش شدگی (D)، انتقال بوسیله پخش شدگی مولکولی تحت شرایط مختلف جریان به طور قابل توجهی تغییر می یابد. در حالت مقادیر بسیار کوچک ε انحلال بوسیله واکنش سطحی در نرخ انحلال بسیار تاثیر گذار می باشد تا آنجاییکه مقادیر غلظت ماده حل شونده در سطح تماس برابر غلظت آن در حجم محلول می باشد. در این حالت نرخ انحلال کنترل شده با سطح (*Surface Controlled Dissolution rate*) می باشد. در حالت مقادیر بزرگتر ε اگر نرخ انحلال در سطح تماس بسیار بالا باشد همانند سنگ نمک، انتقال جرم تماماً توسط پخش شدگی مولکولی (*molecular diffusion*) انجام می گیرد و نرخ انحلال کنترل شده با انتقال (*Transport Controlled Dissolution rate*) می باشد. یعنی پخش شدگی در نرخ انحلال تاثیر می گذارد. در حالت دوم تعیین دقیق نرخ انحلال سطحی با پیچیدگی های فراوانی همراه می باشد به این دلیل که با کوچکترین تغییری در به عنوان مثال شرایط هیدرودینامیکی جریان تغییرات قابل ملاحظه ای در نرخ انحلال مشاهده می شود.

نرخ انحلال بصورت آزمایشگاهی توسط (Plummer et al., ۱۹۷۸) و (Svensson and Dreybrodt, ۱۹۹۲) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین (Dreybrodt, ۱۹۸۸) و (Kaufmann and Dreybrodt, ۲۰۰۷) این پدیده را بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این تحقیقات نرخ انحلال توسط قانون توانی زیر بیان می‌شود:

$$F = k_i \left(m_i - \frac{c}{c_{eq}} \right)^{n_i}, \quad i = 1, n \quad (۴-۲)$$

که در آن F_i برابر با نرخ انحلال، $k_i [mol/m^2/s]$ ضریب نرخ انحلال، m_i ضریب ثابت بدون بعد، $c [mol/m^3]$ غلظت واقعی ماده حل شونده، $c_{eq} [mol/m^3]$ غلظت اشباع ماده حل شونده و n_i توان که بستگی به نسبت غلظت ماده حل شونده به غلظت اشباع دارد. اندیس ۱ نشان‌دهنده مراحل مختلف فرآیند انحلال می‌باشد.

این تحقیقات نشان دادند با توجه به مقدار غلظت ماده حل‌شونده در حلال، روند انحلال را می‌توان به سه مرحله تقسیم کرد که در هر مرحله ضریب انحلال رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد:

➤ $c < ۰.۳c_{eq}$: در این حالت انحلال اولیه با سرعت بسیار بالا با نرخ خطی با قابلیت انتقال جرم بالا صورت می‌پذیرد. در این حالت ضریب نرخ انحلال برابر است با:

$$k_s = \frac{k_s^s k_s^d}{k_s^s + k_s^d} \quad (۵-۲)$$

که در آن $k_s^s [mol/m^2/s]$ و $k_s^d [mol/m^2/s]$ به ترتیب ضریب نرخ انحلال با توجه به واکنش سطحی حلال و ماده حل‌شونده و ضریب نرخ انحلال با توجه به میزان انتقال ماده حل‌شونده به داخل حلال می‌باشند.

برای ضخامت فصل مشترک نازک، انحلال تماماً توسط نرخ واکنش کنترل شده با سطح صورت می‌گیرد یعنی $k_s \cong k$. برای ضخامت‌های بیشتر، پخش شدگی اثر کاهشی بر ضریب انحلال می‌گذارد یعنی

$$k_s < k$$

➤ $0.3c_{eq} < c < 0.9c_{eq}$: در این حالت انحلال با سرعت نسبتاً پایین با نرخ خطی صورت

می‌پذیرد. در این حالت انتقال جرم ماده حل شده با سرعت پایین‌تر از حالت قبل صورت می‌گیرد. در این حالت ضریب نرخ انحلال برابر است با:

$$k_s = \frac{k_s^s k_s^d}{k_s^s + k_s^d} \quad (6-2)$$

پارامترهای موجود همانند مرحله اول تعریف می‌شوند. k_s^d و k_s^s توسط معادلات زیر تعیین می‌شوند:

$$k_s^d = \frac{2Dc_{eq}}{\delta}, \quad k_s^s = \frac{2Dc_{eq}}{\delta} \quad (7-2)$$

$$D [m^2/s] = \text{diffusion factor} \quad \delta [m] = \text{film thickness}$$

که در آن $D [m^2/s]$ ضریب پخش‌شدگی و $\delta [m]$ ضخامت فصل مشترک حلال و ماده حل‌شونده می‌باشد.

مقادیر k_s^s و k_s^d در تحقیقات (Kaufmann and Dreybrodt, ۲۰۰۶) مورد بررسی قرار گرفتند و مقادیر عددی برای آن‌ها پیشنهاد شد.

➤ $c > 0.9c_{eq}$: در این حالت انحلال با نرخ غیر خطی و با مرتبه بالاتر انجام می‌گیرد و با

افزایش تجمع ناخالصی‌ها و غلظت ماده حل‌شونده نرخ انحلال به شدت کاهش می‌یابد. در این حالت ضریب نرخ انحلال برابر است با :

$$k_s = k_s \left(1 - \frac{c_1}{c_{eq}}\right)^{n_1 - n_2} \quad (8-2)$$

در گذشته تحقیقات وسیعی در زمینه ضریب انحلال نمک انجام شده و نتایج آن در قالب مقادیر عددی در شرایط آزمایش برای این پارامتر پیشنهاد شده‌اند. به عنوان مثال در آزمایش‌هایی که (Jeschke et al., ۲۰۰۰) بر روی نمونه‌های سنگ گچ انجام دادند مقادیر $k_1^s = 1.3 * 10^{-4} [mmol/cm^2/s]$ و $n_1 = 1.2 \pm 0.2$ بدست آمد. برای غلظت‌های نزدیک به غلظت اشباع مقادیر $k_1^s = 10 [mmol/cm^2/s]$ و $n_1 \cong 4.5$ پیشنهاد گردید. آلکاتان و همکاران در سال ۱۹۹۷ اقدام به انجام آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های سنگ نمک کردند. در این آزمایش‌ها جهت تعیین ضریب انحلال نمک از روش دیسک چرخان استفاده شد. بدین شکل که سنگ نمک درون مدل آزمایشگاهی مابین دیسک و دیواره فلزی مدل قرار می‌گیرد و بقیه فضای خالی با آب پر می‌شود. دیسک با سرعت‌های مختلف می‌چرخد و جریان آب مابین دیسک و دیواره مدل سبب انحلال سنگ نمک می‌شود (Alkattan et al., ۱۹۹۷). در این آزمایش‌ها مقادیر $k_1^d = 6.7 * 10^{-1} [mmol/cm^2/s]$ و $k_1 = 0.125 [mmol/cm^2/s]$ بدست آمد.

ضخامت لایه مرزی پخش شدگی (diffusion boundary layer)، ε ، بوسیله معادله زیر به ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی ارتباط پیدا می‌کند:

$$\varepsilon = \varepsilon_h \cdot Sch^{-1/3} \quad (9-2)$$

که در این رابطه Sch عدد اشمیت و برابر $Sch = \eta/D$ می‌باشد. همچنین η لزجت دینامیکی محلول و D ثابت پخش شدگی (diffusion constant) می‌باشد.

همچنین (Jeschke et al., ۲۰۰۰) و (Alkattan et al., ۱۹۹۷) روابط زیر را جهت هر قسمت از فرآیند انحلال بصورت جداگانه ارائه دادند. این محققین معادله زیر را برای نرخ انحلال سطحی ارائه دادند:

$$R_s = k_s \left(1 - \frac{c_s}{c_{eq}}\right)^n \quad (10-2)$$

که در این رابطه $k_s [m mol/m^2/s]$ ضریب نرخ انحلال سطحی، $c_s [m mol/cm^3]$ غلظت ماده حل شونده در سطح تماس، $c_{eq} [m mol/cm^3]$ غلظت اشباع ماده حل شونده و n توان که بستگی به نسبت غلظت ماده حل شونده به غلظت اشباع دارد.

معادله زیر نیز بیانگر نرخ انتقال مولکولی از سطح سنگ نمک به داخل حجم محلول در لایه مرزی پخش شدگی به ضخامت ε می‌باشد:

$$R_t = k_t(c_s - c_b) , K_t = \frac{D}{\varepsilon} \cdot c_{eq} \quad (11-2)$$

در این رابطه $k_t [m mol/m^2/s]$ ضریب نرخ انحلال با انتقال، $c_b [m mol/cm^3]$ غلظت ماده حل شونده در حجم محلول و $c_s [m mol/cm^3]$ غلظت ماده حل شونده در سطح تماس حلال و ماده حل شونده و $c_{eq} [m mol/cm^3]$ غلظت اشباع ماده حل شونده در محلول می‌باشد.

۳.۲.۲ پخش شدگی (diffusion coefficient)

طبق تعریف ضریب پخش شدگی D مقدار معینی از یک ماده می‌باشد که در مدت زمان یک ثانیه در واحد سطح تحت تاثیر یک واحد تغییر در عامل خارجی تاثیرگذار بر ماده، پخش می‌شود. این کمیت معمولاً با واحد cm^2/s بیان می‌شود. ضریب پخش شدگی معمولاً به عنوان نسبتی از لزجت ادی (eddy viscosity) بیان می‌شود. ضریب پخش شدگی افقی و عمودی برابر است با:

$$D_h = \frac{A}{\sigma_t} , D_v = \frac{\nu_t}{\sigma_T} \quad (12-2)$$

σ_T در معادله بالا برابر عدد پرناتل می‌باشد. A مساحت سطح و ν_t لزجت ادی می‌باشد.

در مدل MIKE21 ضرایب پخش در راستای افق و در عمق ثابت فرض شده‌اند و مقادیر آن‌ها از روابط زیر و با استفاده از ضریب ویسکوزیته ادی قابل محاسبه می‌باشد.

$$D_{x \text{ or } y} = \beta \phi v_t \quad (2-13)$$

در رابطه بالا β اثر اختلاف پراکنش ذرات جریان (مولکولها) و ذرات رسوبی و ϕ اثر ذرات رسوبی در آشفته‌گی جریان را اعمال می‌کند. مقدار حاصل ضرب این دو ضریب بر اساس نوع جریان معمولاً در محدوده (۰.۹~۱.۱) می‌باشد.

۳.۲ اصول تشابه

یکی از کاربردهای تحلیل ابعادی در سیالات آن است که با توجه به نیاز مهندسان به شبیه‌سازی فرایندهای سینماتیکی و ... نیاز است تا اطلاعات اولیه‌ای را بدست آورده و در طراحی سیستم‌ها مورد توجه قرار داد. برای این کار نیاز است تا ابتدا و قبل از تولید انبوه بر روی یک نمونه به انجام آزمایش‌ها دست زد. همچنین با توجه به محدودیت‌هایی همچون منابع مالی و کمبود قطعات و ... نمی‌توان بر روی نمونه اصلی آزمایش کرد. بر این اساس مهندسی نمونه و مدلی از سیستم را طراحی کرده و با توجه به علم تشابه به آزمایش‌های مورد نظر خود اقدام می‌کنند. برای استفاده از این روش لازم است ابتدا تابعی بی بعد از روابط حاکم بر جسم بدست آورد. پس از این مرحله که دیگر روابط بین متغیرها شناخته شده است نسبت به تشابه‌گیری اقدام می‌شود.

که بیان‌صوری چگونگی تشابه بدین قرار است که اگر تمام پارامترهای بی بعد مربوط به مدل و نمونه واقعی یکسان باشند آنگاه شرایط جریان برای آزمایش مدل کاملاً مشابه است. در متون و نوشته‌های

مهندسی به جای تشابه کامل، نمونه های خاصی از تشابه بررسی می شوند که رایج ترین آنها تشابه هندسی و سینماتیکی و دینامیکی و حرارتی می باشد.

الف) تشابه هندسی

در تشابه هندسی بعد طول مهم است و قبل از پرداختن به هر گونه آزمایش وجود این تشابه باید مشخص شود که تعریف آن چنین است: مدل و نمونه واقعی تنها در صورتی تشابه هندسی دارند که تمام ابعاد جسم همان مختصات سه گانه یک نسبت مقیاس خطی را داشته باشند. به بیانی دیگر آنکه تمام زوایا و جهت های جریان در تشابه هندسی یکسانند و راستای مدل و نمونه واقعی باید نسبت به محیط اطراف همسان باشند.

ب) تشابه سینماتیکی

اساس این تشابه داشتن نسبت تشابه طولی و زمانی یکسان است. یعنی نسبت تشابه سرعت باید برای هر دو یکسان باشد. این موضوع را لانگهار چنین بیان می کند:

حرکت دو سیستم در صورتی از نظر سینماتیکی شبیه است که ذرات متناظر در زمان های متناظر در نقاط متناظر قرار گرفته باشند.

ج) تشابه دینامیکی

بین مدل و نمونه واقعی هنگامی تشابه دینامیکی وجود دارد که نسبت مقیاس طول و زمان و نیرو برای آنها مساوی باشد. در اینجا نیز تشابه هندسی شرط اول است و فقط هنگامی تشابه دینامیکی همزمان با تشابه سینماتیکی برقرار خواهد بود که ضرایب فشار و نیرو برای مدل و نمونه واقعی یکسان باشد. در صورتی که برای جریان تراکم پذیر بایستی عدد رینولدز و ماخ و نسبت گرمای ویژه مدل و نمونه واقعی یکسان باشند و برای جریان تراکم ناپذیر بدون سطح آزاد بایستی اعداد رینولدز مدل و

نمونه واقعی مساوی باشند و با سطح آزاد بایستی اعداد فرود و رینولدز و وبر و کاویتاسیون مدل و نمونه واقعی یکسان باشند.

۴.۲ معادلات هیدرودینامیکی و پخش و حمل

در مبحث تئوری انحلال، معادلات حاکم بر مکانیزم پدیده انحلال و پارامترهای مؤثر در تعیین نرخ و ضریب انحلال که توسط دانشمندان و محققین مختلف بوسیله تحقیقات آزمایشگاهی در بازه‌های زمانی متفاوت ارائه شده بود به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. در این قسمت معادلات هیدرودینامیک و معادلات انتقال (پخش و حمل) مورد بررسی قرار می‌گیرند.

معادلات حاکم بر جریان‌های حوزه‌های آبی همانند سواحل، خلیج‌ها، مخازن سدها و دریاچه‌ها معادلات آب‌های سطحی نامیده می‌شوند. در این معادلات که در ادامه توضیح داده می‌شوند، پارامترهای مؤثر بر این جریان‌ها در نظر گرفته می‌شوند.

این معادلات اثرات مربوط به :

۱. تغییرات سطح آزاد (barotropic effects)
۲. چرخش زمین (Coriolis force)
۳. تغییرات چگالی (equation of state)
۴. اثر تغییرات چگالی افقی در فشار (baroclinic effects)
۵. انتقال حرارت، شوری، و
۶. تغییرات زمانی و مکانی تنش برشی باد در سطح آزاد آب
۷. تغییرات مکانی تنش برشی در کف
۸. تغییرات زمانی و مکانی فشار اتمسفر در سطح آب

۹. منابع متغیر با زمان

۱۰. انتقال حرارت در سطح آزاد

۱۱. میزان تبخیر و درصد رطوبت و ...

را در حل معادلات در نظر می‌گیرند.

معادلات آب‌های سطحی جهت شبیه سازی هیدرودینامیکی و کیفی سیالات نیوتونی از ۴ دسته از معادلات زیر استفاده می‌نماید که عبارتند از:

➤ معادله بقای جرم

➤ معادله بقای مومنوم

➤ معادله بقای شوری و حرارت

➤ معادله حالت که چگالی موضعی را به پارامترهای شوری، دما و فشار مربوط می‌سازد

این ۴ دسته معادله در مجموع در تمامی محورهای مختصات ۷ معادله تشکیل می‌دهند. اساس ریاضیات این معادلات بر پایه معادله بقای جرم و معادلات RANS تراکم ناپذیر در سه جهت با در نظر گرفتن اثر توربولانس و تغییرات چگالی و معادلات بقای شوری و حرارت استوار است. همچنین فرضیه بوسینسک نیز در نظر گرفته می‌شود و فشار نیز بصورت هیدرواستاتیک در نظر گرفته می‌شود.

۱.۴.۲ معادله بقای جرم

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (14-2)$$

که در آن S برابر مقدار دبی منبع‌های نقطه‌ای، x,y,z محورهای مختصات و u,v,w سرعت در جهات محورهای سه‌گانه مختصات می‌باشند.

۲.۴.۲ معادله بقای اندازه حرکت

معادلات اندازه حرکت برای محورهای مختصات x و y به ترتیب عبارتند از:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho \cdot h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \quad (۱۵-۲)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho \cdot h} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \quad (۱۶-۲)$$

در معادلات بالا t برابر زمان؛ x و y محورهای مختصات در جهات سه‌گانه؛ η ارتفاع سطح آب؛ d ارتفاع آب ساکن؛ $h = \eta + d$ ارتفاع کل آب؛ u, v و w پارامترهای سرعت در جهت‌های سه‌گانه می‌باشد؛ $f = 2\Omega \sin \varphi$ پارامتر کوریولیس که در آن Ω برابر نرخ چرخش زاویه‌ای و φ برابر عرض جغرافیایی می‌باشد؛ g برابر شتاب ثقل؛ ρ برابر چگالی آب؛ s_{xx} , s_{xy} و s_{yy} اجزای تانسور تنش ناشی از موج تابش بر سطح آب می‌باشند؛ v_t ضریب ویسکوزیته ادی؛ p_a فشار اتمسفر؛ ρ چگالی مرجع آب؛ S مقدار دبی منبع‌های نقطه‌ای و u_s و v_s مقادیر سرعت متناظر با دبی ورودی آب به داخل حوزه موردنظر می‌باشد.

شرایط مرزی سطحی و تحتانی برای سرعت‌های u, v و w عبارتند از:

در $z = \eta$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho \cdot v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy})$$

در $z = -d$:

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho \nu_t} (\tau_{bx}, \tau_{by})$$

در جملات بالا τ_{sy}, τ_{sx} پارامترهای تنش ناشی از نیروی باد بر سطح آب و پارامترهای τ_{by}, τ_{bx} تنش‌های ناشی از اصطکاک کف به ترتیب در جهات x و y می‌باشد.

۳.۴.۲ تنش بستر

تنش بستر توسط معادله زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{\tau_b}{\rho} = c_f \bar{u}_b |\bar{u}_b| \quad (17-2)$$

که در آن c_f ضریب دراگ و \bar{u}_b سرعت جریان در بستر می‌باشد. ضریب دراگ توسط پارامترهای عدد شزی و عدد مانینگ می‌تواند به شرح زیر تعیین شود.

$$c_f = \frac{g}{C^2} \quad (18-2)$$

که در آن C پارامتر عدد شزی و g شتاب گرانش می‌باشد.

$$c_f = \frac{g}{(Mh^{1/6})^2} \quad (19-2)$$

۴.۴.۲ نیروی باد

در نواحی سطحی آب که توسط یخ پوشیده نمی‌باشد تنش سطحی τ_s توسط رابطه تجربی زیر بیان می‌شود:

$$\bar{\tau}_s = \rho_a c_d |u_w| \bar{u}_w \quad (20-2)$$

که در رابطه بالا ρ_a چگالی هوا، c_d ضریب دراک هوا و \vec{u}_w سرعت باد به فاصله ۱۰ متر روی سطح آب می‌باشد.

۵.۴.۲ معادله انتقال-انتشار شوری و حرارت

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_S S \quad (21-2)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + S_S S \quad (22-2)$$

D_v : ضریب پخش عمودی \hat{H} : ترم منبع با توجه به تبادل حرارت آب با هوا

u_i : سرعت در جهت x_i s & T : حرارت و شوری

F_T, F_s : جملات پخش افقی t : زمان مشخص

S : جملات *source-sink*

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (23-2)$$

در جمله بالا D_h برابر ضریب پخش افقی می‌باشد. ضرایب پخش با استفاده از روابط زیر به ویسکوزیته ادی ارتباط پیدا می‌کنند.

$$D_h = \frac{A}{\sigma_T} \text{ and } D_v = \frac{\nu_t}{\sigma_T} \quad (24-2)$$

که σ_T برابر عدد پرائنل می‌باشد. A مساحت سطح و ν_t لزجت ادی می‌باشد.

شرایط مرزی سطحی و تحتانی برای دما عبارتند از:

در $z = \eta$:

$$D_h \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q_n}{\rho \cdot c_p} + T_p \hat{P} - T_e \hat{E} \quad (25-2)$$

در $z = -d$:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (26-2)$$

که در معادلات بالا Q_n شار گرمای خالص سطحی، c_p گرمای ویژه آب (برابر ۴۲۱۷ ژول بر کیلوگرم بر درجه کلونین می‌باشد)، \hat{E} و \hat{P} هم به ترتیب برابر مقدار میعان و تبخیر با واحد میلی‌متر بر روز از سطح آب می‌باشند. شرایط مرزی سطحی و تحتانی برای شوری عبارتند از :

در $z = \eta$:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0$$

در $z = -d$:

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0$$

معادلات ذکر شده در بالا در مدل عددی به روش حجم محدود حل می‌گردند.

۵.۲ مطالعات انجام شده

یکی از مشکلاتی که ممکن است سدها با آن مواجه باشند، نشستی از پی، مخزن و دیواره خود سد می‌باشد. وجود مصالح کارستی در پی و مخزن سدها معمولاً این مشکل نشستی را به همراه خواهد داشت. کانال‌های کارستی با قطرهایی از چند میلیمتر تا بیش از ۱۰ متر در داخل بعضی از سفره‌های آبی زیرزمینی قابل مشاهده می‌باشند. در سیستم‌های ترک‌دار، هدایت هیدرولیکی سفره‌ها مابین 10^{-8} تا 10^{-5} متر بر ثانیه متغیر می‌باشد و در داخل کانال‌ها به حدود ۰.۱ متر بر ثانیه می‌رسد. این مقادیر

توسط (Ford & Williams, ۱۹۸۹) و (White, ۱۹۸۹) ارائه شده است. مفاهیم مهندسی در این رابطه نیز توسط (James, ۱۹۹۲)، (Breznik, ۱۹۹۸) و (Milanovic, ۲۰۰۰) مورد تحقیق قرار گرفته است.

سیستم‌های کارستی سیستم‌هایی دینامیکی می‌باشند. کانال‌های کارستی در شرایط طبیعی در طول صدها، تا صدها هزار سال ایجاد می‌شوند و فشار هیدرولیکی موجود روی این درزه‌ها و شکاف‌ها باعث می‌شود این حفره‌ها در طول زمان بزرگتر شوند. چنین مفاهیمی مربوط به فرآیندهای دینامیکی مصالح کارستی از دهه ۸۰ تاکنون بسیار مورد توجه قرار گرفته است. جزئیات این فرایندهای دینامیکی و انحلال سنگ‌های آهکی توسط (Dreybrodt & Eisenlohr, ۲۰۰۰) مورد بررسی قرار گرفت و البته در مورد گچ توسط (Jeschke et al., ۲۰۰۰) بررسی شد. اولین مدل‌های مربوط به کانال‌های یک بعدی توسط جیمز در سال ۱۹۹۲ مورد توجه قرار گرفت. سوالی که وی مطرح کرد این بود که آیا افزایش انحلال در محیط‌های کارستی بویژه گچ می‌تواند باعث شکست سد شود؟ وی همچنین در سال ۱۹۹۲ گزارش‌هایی در رابطه با شکست‌هایی را ارائه داد که همه این موارد بدلیل وجود پدیده انحلال در سنگ‌های گچی بوده است. در سال ۱۹۸۸، پالمر یک مدل یک بعدی از انحلال آهک را ارائه داد. او همچنین نتیجه‌گیری کرد که افزایش نشتی در مخزن سد گریت‌فال در آمریکا بدلیل افزایش و پهن شدن کانال‌های آهکی در مخزن بوده است و باعث شده که این کانال‌ها به پایین دست منتقل شده و مسیرهای آب برای نشتی ایجاد کنند.

پالمر در سال ۱۹۸۸ یک تخمین سطحی از شرایط هیدرولیکی موجود در یک معبر آب در داخل مصالح آهکی با پهنای شکاف ۰.۱ سانتیمتر را ارائه کرد که پهن شدن این کانال باعث نشت و افت اساسی هد می‌شود. این موضوع در سال ۱۹۹۲ و ۱۹۹۶ توسط دری‌برودت به اثبات رسید. این کار، پارامترهای بحرانی برای ایجاد شکست در سازه‌های هیدرولیکی را آشکار کرد. برای سازه‌های

هیدرولیکی با $m \geq 0.2^{-1} l^i$ نشستی آب در مدت ۵۰ سال تا ۰.۵ مترمکعب در ثانیه افزایش پیدا خواهد کرد.

فرامکین در سال ۱۹۹۴ تحقیقات میدانی را در ناحیه کارستی نمکی در کوه‌های Sedom انجام داد. او در این تحقیقات با انجام سه نوع نمونه‌گیری مختلف در آب‌های موجود و جاری در حوزه مورد مطالعه میزان غلظت مواد جامد در نمونه‌ها را تحت تاثیر کارست نمکی موجود بررسی نمود. نمونه‌ها به صورت زیر دسته بندی شدند:

۱. نمونه‌برداری دستی از چشمه‌ها، مخازن زیرزمینی، و یک سیل رخ داده در زمان نمونه‌گیری

۲. نمونه برداری خودکار از جریان رودخانه طی مرحله بالآمدن سیل

۳. نمونه برداری از باران بوسیله ایستگاه ثبت لمبرت

پس از بررسی نمونه‌های برداشته شده میزان غلظت یون‌های موجود در نمونه‌ها مشخص شد. آب باران دارای TDS بسیار اندک و ناچیزی می‌باشد. رواناب‌های سطحی که تنها در تماس با سنگ‌های رویی می‌باشند دارای TDS به میزان $9-4 g/l$ می‌باشند. نمونه‌های دیگری که در تماس مستقیم با سنگ نمک بودند دارای TDS بسیار بالاتری به میزان $383-85 g/l$ می‌باشند.

نرخ انحلال بصورت آزمایشگاهی توسط (Plummer et al., ۱۹۷۸) ، (Svensson and Dreybrodt, ۱۹۹۲) و (Eisenlohr, ۲۰۰۰) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین (Dreybrodt, ۱۹۸۸) و (Kaufmann and Dreybrodt, ۲۰۰۷) این پدیده را بصورت عددی مورد بررسی قرار دادند. همچنین (Jeschke et al., ۲۰۰۰) و (Alkattan et al., ۱۹۹۷) روابطی را جهت هر قسمت از فرآیند انحلال بصورت جداگانه ارائه دادند.

در داخل کشور نیز مطالعاتی در سال‌های گذشته در زمینه انحلال کارست‌ها انجام شده‌است. در یک مدل آزمایشگاهی، صادقی و خسروی در سال ۲۰۰۳ تاثیر درزه و شکاف در انحلال سنگ آهک را بررسی کردند. در این تحقیق در سری اول آزمایشات نشان داده شد که با گذشت زمان در همه نمونه‌ها با شکاف ثابت و طول‌های مختلف، سرعت جریان در فشار ثابت با گذشت زمان افزایش یافته است. همچنین افزایش سرعت جریان در نتیجه کاهش طول نمونه را نیز ملاحظه شد.

در یک مدل آزمایشگاهی دیگر بهنام‌طلب (۱۳۸۴) نرخ انحلال برای گچ معمولی (ساختمانی) را ۲۴.۹ سانتیمتر در سال بدست آورد. همچنین ابراز داشت، اگر آب بصورت تحت فشار داخل حفرات یک لایه کارستی در جریان باشد انحلال روندی صعودی دارد ولی اگر جریان بصورت سطح آزاد باشد انحلال روندی نزولی دارد. همچنین این آزمایشات نشان داد که گسترش پدیده انحلال هیچگونه روند مشخصی ندارد.

در مدل آزمایشگاهی دیگر، حائری (۱۳۸۶) نشان داد که مهمترین عامل ایجاد انحلال و آب‌شستگی ایجاد گرا دیان هیدرولیکی و ایجاد جریان در محیط کارستی می‌باشد. عامل مهم دیگر، وجود مناطق ضعیف در محیط بوده که به محض ایجاد جریان در این مناطق به سرعت شسته می‌شود همچنین ملاحظه شد که با گذشت زمان در همه نمونه‌ها با شکاف ثابت و طول‌های مختلف، سرعت جریان در فشار ثابت با گذشت زمان افزایش می‌یابد. همچنین افزایش سرعت جریان در نتیجه کاهش طول نمونه نیز ملاحظه شد. برای بررسی میزان انحلال در شکاف ثابت، با افزایش طول نمونه درصد کاهش وزن و درصد بازشدگی شکاف کم می‌شود. همچنین نشان داد که با افزایش اندازه شکاف سرعت جریان افزایش می‌یابد. در این حالت، با افزایش شکاف نمونه، درصد کاهش وزن و درصد بازشدگی شکاف افزایش می‌یابد.

فصل سوم

مشخصات مدل فیزیکی و مطالعه میدانی

۱.۳ بررسی‌های میدانی

به‌منظور آشنایی هرچه بیشتر با حوزه مورد مطالعه و تسلط هرچه بیشتر بر موضوع مورد تحقیق و فهم و درک مشکلات موجود، بازدید میدانی از محدوده مخزن سد مورد مطالعه انجام گرفت. هدف از انجام این بازدید کسب شناخت و تسلط بیشتر نسبت به موضوع و مشاهده حضوری سازندهای موجود در منطقه به‌خصوص سازند کارستی نمکی و همچنین پدیده‌های زمین‌شناسی ناشی از حضور این سازندها بوده‌است.

مخزن مورد مطالعه با حجم حدود ۴ میلیارد متر مکعب در بخش جنوبی رشته کوه‌های زاگرس ساخته شده‌است. اهداف مهم احداث این مخزن، تولید انرژی، کنترل سیلاب، تنظیم آب جهت کشاورزی و ایجاد جاذبه‌های گردشگری است. تامین آب آشامیدنی شهرهای پائین دست نیز احتمالاً به اهداف آن اضافه خواهد شد. محدوده‌ای از رخنمون‌های سازند نمکی در مخزن که در فاصله‌ی ۴ تا ۸ کیلومتری بالادست موقعیت محور سد و در جناح چپ رودخانه قرار دارند، دارای رخنمون‌هایی از لایه‌های ضخیم نمکی است. رسوبات تبخیری مذکور، به ویژه در شرایط وجود جریان آب بسیار انحلال‌پذیر می‌باشند. به‌دلیل تماس مستقیم مخزن با رسوبات نمکی، مشکلاتی از لحاظ کیفی در آب مخزن می‌تواند ایجاد گردد. به‌هم‌ریختگی ساختاری و نیز مشاهده‌ی باقیمانده‌ی توده‌های نابرجا در حاشیه‌ی راست رودخانه نشانگر وقوع زمین‌لغزش‌های با ابعاد قابل توجه در زمان‌های دورتر و نیز وقوع زمین‌لغزش‌های متعدد با ابعاد کوچکتر بطور سالانه در فصول تر، حاکی از پتانسیل قابل توجه وقوع لغزش در سازند نمکی در این محدوده دارد. در شکل شماره ۱ توده‌های نابرجا در حاشیه چپ رودخانه مشاهده می‌شود.



شکل (۱.۳): توده های نمکی نابرجا در حاشیه چپ رودخانه مشاهده می شود

در محدوده‌ی مورد مطالعه، فروچاله‌های متعددی با ابعاد مختلف (تعدادی از این فروچاله‌ها دارای قطر حدود ۶۰ تا ۷۰ متر و عمق متوسط حدود ۳۰ متر می‌باشند) تشکیل شده‌است. مشاهده‌ی لایه‌های ضخیم نمک در بستر تعدادی از فروچاله‌های بزرگ ثابت نموده‌است که علت اصلی تشکیل فروچاله‌ها انحلال لایه‌های نمکی زیرین است.

بررسی‌های میدانی از موقعیت رخنمون‌های سازند نمکی در محدوده‌ی مورد مطالعه در مخزن سد و حواشی آن نشان داده است که رخنمون‌های یادشده در ساختارهای چین‌خورده‌ای از نوع چین سوراخ‌کننده یا چین بیرون‌زده ایجاد شده‌اند. این نوع ساختار در سازندهای تبخیری دارای واحدهای نمکی ضخیم تشکیل می‌شود. از نشانه‌های ایجاد چنین ساختاری در منطقه، می‌توان به تغییرات شدید میزان شیب لایه‌بندی در مرز سازند نمکی با سازندهای مجاور اشاره نمود. به‌طوریکه با نزدیک‌تر شدن از سمت خارج چین به سمت مرز سازند نمکی با سازند همجوار، میزان شیب لایه‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش ناگهانی زاویه شیب لایه‌بندی در نتیجه نفوذ دی‌پایریسمی نمک از زیر و کنارزدن و سوراخ‌نمودن لایه‌های محصورکننده‌ی رویی ایجاد می‌شود. به همین دلیل نیز در مرز

سازند نمکی با سازند همجوار، شیب لایه بندی بسیار پرشیب تا قائم و در بسیاری موارد نیز برگشتگی لایه‌ها اتفاق افتاده و سبب رانده شدن رخنمون سازند نمکی بر روی رخنمون سازندهای مجاور می‌گردد. در شکل ۲ شیب نزدیک به قائم دیواره دیواره سازند نمکی مشاهده می‌شود.



شکل (۲.۳): شیب لایه بندی و نزدیک به قائم دیواره‌ها در جناح چپ رودخانه بالادست سد

طی بازدید بعمل آمده از منطقه فروچاله‌های متنوعی با ابعاد و قطرهای مختلف مشاهده و شناسایی گردید که نشان‌دهنده انحلال پذیری سازند در تماس با رواناب‌های سطحی می‌باشد. قطر فروچاله‌ها از حدود ۵ تا ۷۰ متر و عمق آنها از ۲ تا ۳۰ متر متفاوت بود. نفوذ آب به درون لایه‌های نمکی و انحلال نمک، سبب کارست‌شدگی شدید در لایه‌های نمکی می‌شود. در بستر تعدادی از فروچاله‌های واقع در ارتفاعات بالاتر از تراز نرمال مخزن، رخنمون لایه‌های ضخیم نمک و شافت‌های قائمی مشاهده شد که نشانگر ارتباط کانالی پیوسته و باز بین دهانه‌ی ورودی فروچاله‌ها واقع در ارتفاعات و دهانه‌ی خروجی آنها به سمت رودخانه است. بنابراین، پس از آبیگری مخزن سد امکان نفوذ آب مخزن از طریق این معابر زیرزمینی به داخل توده‌ی سازند نمکی و انحلال مداوم لایه‌های نمکی بویژه در شرایط نوسانات تراز آب مخزن مهیا می‌شود. در اینصورت ضمن تشدید انحلال نمک، سبب فراخ‌تر شدن کانال‌های

کارستی و افزایش پتانسیل فروریزش و وقوع لغزش خواهد بود. بواسطه‌ی نفوذ سیلاب‌های فصل زمستان به درون فروچاله‌ها و انحلال لایه‌ی نمکی مقادیر قابل توجهی نمک به صورت چشمه‌های شور از راه کانال‌های کارستی و شافت‌های قائم یادشده هرسال در زمان بارندگی به رودخانه‌ی بالادست مخزن وارد می‌شود.

در بررسی‌های میدانی انجام گرفته از منطقه مشاهده شده است که بلوک‌های نمکی نابرجای متعددی در ترازهای نزدیک به بستر رودخانه وجود دارد که در ابعاد نسبتاً بزرگی نیز هستند. این بلوک‌ها از لایه‌های نمکی واقع در رقوم‌های بالاتر به شیوه‌ی واژگونی یا همراه با توده‌های لغزشی رها شده‌اند. در شکل ۳.۳ بلوک‌های نمکی در ترازهای نزدیک به بستر رودخانه بالادست مخزن مشاهده می‌شوند.



شکل (۳.۳): بلوک‌های نمکی در تراز نزدیک به بستر رودخانه بالادست سد

به علت ویژگی خاص سازند نمکی و به هم ریختگی شدید ناشی از خاصیت شکل‌پذیری پلاستیک آن، امکان دقیق ارتباط لایه‌ها مقدور نیست. اما آنچه که می‌توان با توجه به وضعیت کلی ساختاری منطقه بیان نمود، اینست که لایه‌های نمکی زیر بستر رودخانه در واقع معادل لایه‌های نمکی واقع در ترازهای بالاتر از بستر در موقعیت‌های دورتر از رودخانه بوده که با توجه به ساختار تاقدیسی، در موقعیت

رودخانه به سوی عمق ادامه می‌یابد. از لحاظ تاثیرگذاری کیفی، لایه‌های نمکی واقع در زیر بستر رودخانه از اهمیت کمتری برخوردارند، زیرا نخست اینکه در زیر پوششی از رسوبات آبرفتی بستر رودخانه واقع شده و تماس مستقیمی با آب مخزن ندارند و دوم اینکه، با توجه به ایجاد زون بندی شوری در مخزن، انحلال نمک در رقوم‌های نزدیک به بستر نیز کاهش می‌یابد. بررسی‌های میدانی انجام گرفته از محدوده مورد مطالعه نشان از پیچیدگی زیاد مسئله دارد.

۲.۳ تشریح مخزن مورد مطالعه

مخزن مورد مطالعه در تحقیق حاضر، در محدوده طول جغرافیایی ۳۱۲۰۰۰-۳۰۷۰۰۰ و عرض جغرافیایی ۳۵۷۶۰۰۰-۳۵۷۰۰۰ قرار دارد. نقشه‌های توپوگرافی مخزن که دارای مختصات نقاط بصورت طول، عرض و ارتفاع می‌باشد دریافت شد. جهت پیاده‌سازی مختصات نقاط از سیستم مختصات (UTM(Universal Transverse Mercator) استفاده شد. مشخصات بهره‌برداری از مخزن به صورت زیر می‌باشد:

تراز نرمال سطح آب دریاچه.....۲۳۰ متر

تراز حداقل بهره‌برداری از دریاچه سد.....۱۸۵ متر

تراز حداکثر بهره‌برداری از دریاچه سد.....۲۳۴ متر

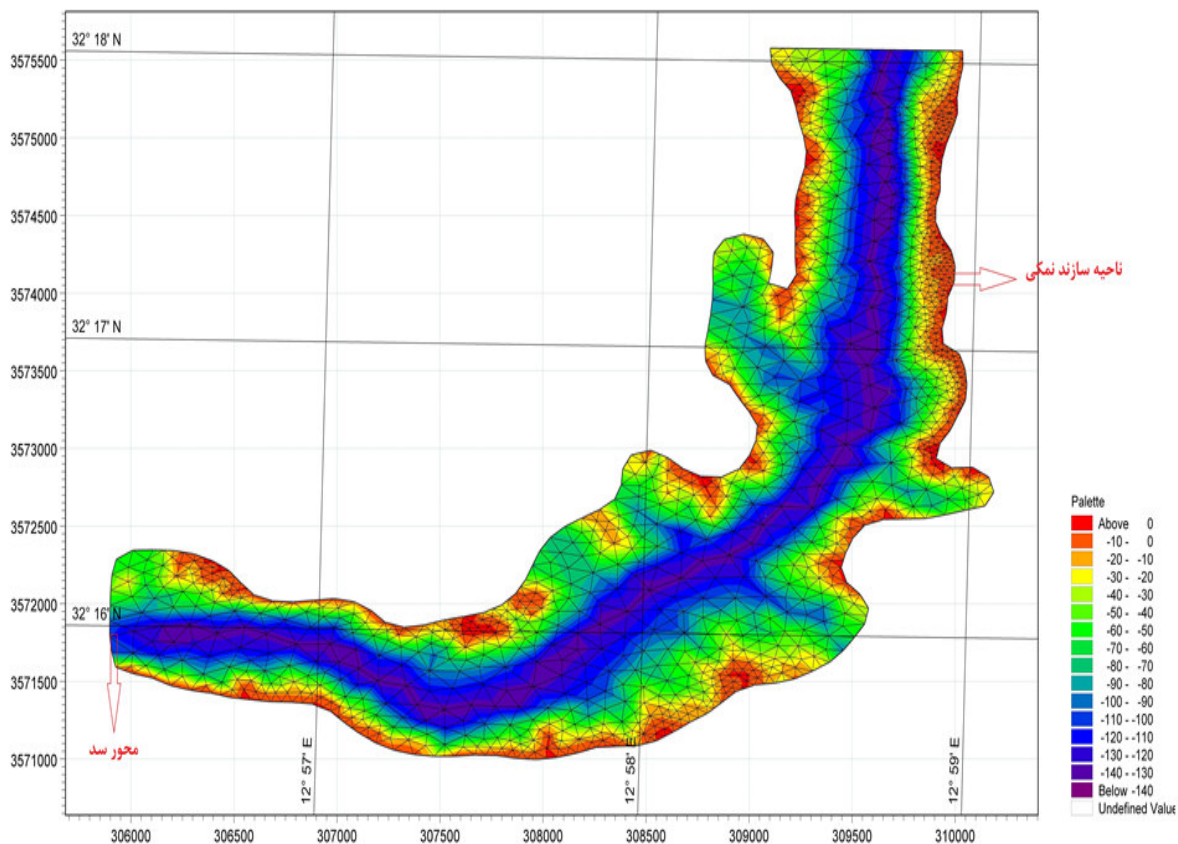
تراز محور آبگیرهای نیروگاه.....۱۶۴.۶ متر

تراز حداکثر سطح آب دریاچه سد.....۲۴۵ متر

تراز ۲۳۰ متر به عنوان سطح آب دریاچه مخزن در نظر گرفته شد. وضعیت تغییرات تراز سطح آب دریاچه در نقشه الکترونیکی تراز ارائه شد. جهت تهیه نقشه الکترونیکی مخزن سد، از نقشه‌های ارائه

شده مخزن با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ بهره گرفته شد و با استفاده از روش میانبایی، خطوط تراز میانبایی و تسطیح شدند. ناحیه دارای سازند کارستی نمکی در کیلومتر ۴ بالادست محور سد آغاز و بطول تقریباً ۲ کیلومتر در طول مخزن به سمت بالادست گسترش می یابد.

در شکل ۴.۳ خطوط تراز سطح آب مخزن مورد مطالعه در تحقیق حاضر همراه با موقعیت سازند نمکی و محور سد نشان داده شده است.



شکل (۴.۳): خطوط تراز سطح آب مخزن به همراه موقعیت سازند نمکی و محور سد

۳.۳ تشریح مدل فیزیکی و آزمایش

همانطور که در فصل‌های قبل ذکر شد تعیین ضریب انحلال نمک و تعیین میزان نمک ورودی به مخزن با پیچیدگی‌های فراوانی همراه می‌باشد. به همین جهت به منظور تعیین این مقدار و نزدیک بودن مقدار تعیین شده و مقادیر واقعی در مخزن، مدل فیزیکی تقریبی مربوط به مخزن توسط شرکت مهندسی مشاور مه‌اب‌قدس و شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، طراحی و ساخته شد و با استفاده از نمونه نمک موجود در سازند نمکی مدل مورد آزمایش قرار گرفت.

بررسی‌ها و نتایج حاصله از مطالعات قبلی صورت گرفته و تحقیقاتی که در گذشته در خصوص وضعیت توده نمکی و نرخ انحلال نمک و سولفات این سازند، که در فاصله ۴ کیلومتری از محور سد قرار گرفته است انجام شده است حاکی از مبهم بودن نرخ انحلال واقعی نمک بود. لذا با درایت و هماهنگی مشاور طرح جهت مشخص شدن نرخ انحلال واقعی نمک معدن و سایر پارامترهای دیگر در آزمایشگاه یک سری مدل‌های اولیه ساخته و تحلیل شد که در نهایت منجر به ساخت مدل واقعی نمک با مقیاس ۱/۱۰۰ در کارگاه سد گردید تا قادر به رفتار سنجی نسبی سازند نمکی باشد.

اهداف اصلی ساخت مدل عبارتند از:

- اطلاع از نرخ انحلال نمک در زمان آگیری
- تأثیر انحلال نمک بر روی کیفیت آب در مخزن
- بررسی وضعیت پایداری توده نمکی بر اثر انحلال نمک
- نحوه لایه بندی نمک حل شده در مخزن

مشخصات هندسی مدل فیزیکی ساخته شده با اعداد تشابه متفاوت در جهات مختلف به شرح ذیل می‌باشد:

- طول مدل برابر ۴۰ متر که با مقیاس ۱/۲۰۰، برابر ۸ کیلومتر از طول مخزن می‌باشد

➤ ارتفاع مدل برابر با ۱۵۰ سانتیمتر که با مقیاس ۱/۱۰۰، ۱۵۰ متر تراز ارتفاعی مخزن انتخاب شده است

➤ کف مدل تراز ۸۵ (تراز بستر رودخانه) فرض شده که تا تراز ۲۳۵ از مخزن قابل مدل سازی می باشد

مقیاس زمان جهت تعیین نرخ انحلال ۱/۱۰۰ فرض شده است. در شکل ۵.۳ نمایی از مدل آزمایشگاهی در حال قراردادن نمونه های سنگ نمک موجود در مخزن در محل مورد نظر مشاهده می شود.



شکل (۵.۳): نمایی از مدل آزمایشگاهی (نمونه های نمک سازند کارستی در محل های مورد نظر قرار داده می شوند)

برنامه اجرای مدل فیزیکی ساخته شده در کارگاه سد با توجه به برنامه آگیری مخزن واقعی طراحی شد. برنامه آگیری مخزن واقعی با توجه به مراحل ذیل به ترتیب اجرا شد.

مرحله اول: آبیگری از تراز ۸۵ (تراز بستر رودخانه) تا تراز ۱۲۵ متر در مدت ۳ روز

مرحله دوم: توقف در تراز ۱۲۵ به مدت ۷ روز (بدون تخلیه)

مرحله سوم: ادامه آبیگری از تراز ۱۲۵ متر الی تراز ۱۸۵ به مدت ۹۰ روز (با در نظر گرفتن افزایش

۰.۷۵ متر ارتفاع آب مخزن در هر روز)

مرحله چهارم: توقف در تراز ۱۸۵ به مدت ۸ ماه (میزان ورودی و خروجی مشابه خواهد بود)

در جدول ۱.۳ برنامه آبیگری مخزن واقعی و برنامه طراحی شده برای اجرای مدل فیزیکی نشان داده

شده است.

جدول (۱.۳): برنامه آبیگری مخزن واقعی و برنامه اجرای مدل آزمایشگاهی

		مرحله اول و دوم آبیگری	مرحله سوم آبیگری	مرحله چهارم آبیگری
برنامه آبیگری مخزن واقعی	مدت زمان آبیگری (روز)	۱۰	۹۰	۲۴۰
	ارتفاع از بستر رودخانه (متر)	۴۰	۶۰	۰
	حجم آب مخزن (میلیون متر مکعب)	۱۷۵	۱۴۳۵	۰
	میانگین دبی ورودی (مترمکعب بر ثانیه)	۵۰۰	۳۰۰	۳۰۰
	دبی خروجی (مترمکعب بر ثانیه)	۰	۱۰۰	۳۰۰
برنامه آبیگری مدل آزمایشگاهی	مدت زمان آبیگری (دقیقه)	۵۰	۱۲۰۰	۲۰۰۰
	ارتفاع از بستر رودخانه (سانتی‌متر)	۴۰	۶۰	۰
	حجم آب مخزن (متر مکعب)	۳۱	۷۲.۵	۰
	میانگین دبی ورودی (لیتر بر ثانیه)	۱۰	۳	۲
	دبی خروجی (لیتر بر ثانیه)	۰	۲	۲

مشخصات دینامیکی مدل فیزیکی با توجه به سناریوی آبیگری مخزن واقعی به شرح ذیل می‌باشد.

- دبی ورودی به مدل تا تراز ۱۲۵متر: ۱۰ لیتر بر ثانیه
- دبی ورودی به مدل از تراز ۱۲۵ تا ۱۸۵متر: ۳ لیتر بر ثانیه
- دبی ورودی به مدل از تراز ۱۸۵متر: ۲ لیتر بر ثانیه
- دبی خروجی از مدل تا تراز ۱۲۵متر: ۰ لیتر بر ثانیه
- دبی خروجی از مدل از تراز ۱۲۵ تا ۱۸۵متر: ۲ لیتر بر ثانیه
- دبی خروجی از مدل از تراز ۱۸۵متر: ۲ لیتر بر ثانیه

پس از ساخت مدل در ابعاد تعیین شده و قرارگیری نمونه‌های نمک در محل مشخص، مدل آماده انجام آزمایش شد. در این مرحله با توجه به مقیاس زمانی ۱/۱۰۰ و اینکه آبیگری مخزن تا تراز ۱۸۵ طی ۱۰۰ روز انجام گرفت، آبیگری مدل فیزیکی در طی ۲۴ ساعت انجام شد. در این مدت تراز آب مدل حدود ۱متر بالا آمد. در یک ساعت اول آبیگری مدل آزمایشگاهی، دبی ورودی معادل ۱۰ لیتر بر ثانیه توسط پمپ تعبیه شده تنظیم گردید و در ادامه این مقدار به ۲ لیتر بر ثانیه کاهش داده شد و تا پایان آزمایش ثابت باقی ماند. قابلیت تنظیم دبی خروجی از مدل نیز توسط شیر تعبیه شده در انتهای مدل داده شد.

پس از شروع آزمایش به تدریج همزمان با بالا آمدن تراز آب، سطح تماس آب با لایه‌های نمک تعبیه شده افزایش می‌یابد و به تدریج نمک توسط جریان آب در داخل مدل حل می‌شود. میزان غلظت نمک در آب توسط دستگاه TDSسنج که در نقاط مشخصی از مدل قرارداد شده اند اندازه گیری شد و نتایج در بازه‌های زمانی مشخص ثبت شدند. از این نتایج در آینده جهت تعیین ضریب انحلال نمک استفاده می‌شود. متوسط سرعت جریان آب در کنار لایه‌های نمک قرارداد شده در مدل آزمایشگاهی معادل ۲ سانتیمتر بر ثانیه می‌باشد.

پس از اتمام مراحل اجرای مدل آزمایشگاهی، نتایج ثبت شده که مقادیر غلظت نمک در نقاط مشخص و بازه‌های زمانی معین بودند در قالب جدول ۲.۳ ارائه شد.

در این جدول ستون‌های دوم و سوم زمان انجام قرائت مقدار غلظت را نشان می‌دهند. ستون‌های پنجم و ششم ارتفاع و دمای هوا را در زمان اندازه‌گیری مشخص می‌کنند. و در نهایت ستون‌های بعدی مقادیر غلظت نمک را با توجه به شماره نقاطی که قرائت در آن‌ها انجام شده است با واحد کیلوگرم بر متر مکعب نشان می‌دهند. پس از انجام آزمایش و تعیین مقادیر غلظت نمک در اثر انحلال لایه‌های نمک استخراج شده از سازند کارست نمکی موجود در مخزن مورد مطالعه، در مرحله بعد با شبیه‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی ضریب انحلال و نرخ ورود نمک به داخل مخزن واقعی تعیین می‌شود.

جدول (۲.۳): نتایج آزمایش مدل فیزیکی در قالب مقادیر غلظت نمک

No	Date	Time	Km	ELE Cm	Temp °c	Reading												
						10	20	30	40	50	55	60	70	80	85	90	95	100
1	89.03.17	11:48	0.00	100	31	2.15												
2	89.03.17	12:10	0.00	100	31.3	2.48												
3	89.03.17	12:20	0.00	105	31.2	2.35												
4	89.03.17	12:30	0.00	109	30.8	2.1	2.12											
5	89.03.17	12:40	0.00	115	31.1	2.12	2.11											
6	89.03.17	12:50	0.00	122	30.6	1.85	1.77											
7	89.03.17	13:00	0.00	124	28.2	2.22	2.02	8.28										
8	89.03.17	13:20	0.00	125	30.8	1.86	2.07	28.9	59.3	77.6								
9	89.03.17	13:40	0.00	126	30.1	2.12	5.4	37	72.3	88.8								
10	89.03.17	13:50	0.00	128	30.1	2.2	10	42	77.1	93.7								
11	89.03.17	13:50	0.00	128	30.1	2.2	10	42	77.1	93.7								
12	89.03.17	14:35	0.00	130	25.6	17.22	27.6	41.8	71.1	105.3								
13	89.03.17	15:05	0.00	131	30.1	19.2	29.2	35.9	87.6	114.9								
14	89.03.17	15:35	0.00	133	30	33.3	33.7	38.5	61.3	105	117.1							
15	89.03.17	16:05	0.00	137	29.1	35.5	35.8	39.4	45.1	94.7	118.9							
16	89.03.17	16:35	0.00	139	28.3	36	36.5	38.6	47.3	96.7	119.5	121.5						
17	89.03.17	16:55	0.00	140	27.7	30	33.7	37.3	51.2	93.4		121.4						
18	89.03.17	17:15	0.00	141	28.8	31.7	33.3	40.7	50	103.4		119.3						
No	Date	Time	Km	ELE Cm	Temp °c	Reading												
						10	20	30	40	50	55	60	70	80	85	90	95	100
19	89.03.17	17:35	0.00	141.5	29	32.5	34.7	42.8	54	105		121						
20	89.03.17	17:55	0.00	142	29	46	46.5	49.7	52	59.2		128						
21	89.03.17	18:25	0.00	143	29.2	41.7	45.3	47	55.6	64.7		115.4						
22	89.03.17	18:45	0.00	144	29	33.2	36.3	47	53.6	77.4		126						
23	89.03.17	19:00	0.00	145	27.7	32.8	42.8	50.1	52.4	64.5		129						
24	89.03.17	19:20	0.00	146	27.6	35.4	39.3	44.9	48.8	53.6		106.8	129					
25	89.03.17	19:40	0.00	147	27.2	34	40.3	46.5	50.6	55		70	130.4					
26	89.03.17	20:00	0.00	148	26.4	36.3	39	43.3	47.5	52.8		108.4	129.7					
27	89.03.17	20:20	0.00	149	25.6	37.6	40.6	44.5	48.9	52.9		109.8	132.2					
28	89.03.17	20:40	0.00	150	25	40.6	41.6	47	52.1	57		111.3	138					
29	89.03.17	21:40	0.00	152	25.5	36.3	37.2	39.8	43.2	51.5		78.5	139.2					
30	89.03.17	22:00	0.00	154	25.2	37.6	40.2	46.8	72	75.4		106.8	141					

فصل چهارم

مدل عددی و شرایط مرزی

۱.۴ معرفی مدل MIKE

مدل‌های شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و کیفی رودخانه-مخزن بر پایه روابط و معادلات هیدرودینامیکی و معادلات انتقال حرارت و آلاینده‌های مختلف نظیر شوری، مواد سمی و تغییرات چگالی شکل می‌گیرند. اغلب این مدل‌ها توانایی شبیه‌سازی تغییرات شوری، حرارت، مواد سمی، BOD, DO و ... را دارا هستند.

جهت شبیه‌سازی و حصول نتایج با دقت بالا، استفاده از روش‌های عددی معتبر و پرکاربرد نیاز می‌باشد. این مدل‌ها با استفاده از روش‌های عددی معتبر و با دقت بالا نتایج با دقت بالا و خطای کم را به کاربر ارائه می‌دهند. مدل عددی مورد استفاده، مدل مشهور MIKE21 ساخت شرکت DHI می‌باشد.

۱.۱.۴ تشریح مدل و حوزه‌های کاربردی

یکی از پیشرفته‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های مورد استفاده چه در حوزه آکادمیک و چه در حوزه‌های کاربردی و تجاری، مدل MIKE می‌باشد.

مدل MIKE سیستم مدل‌سازی عددی پیشرفته غیرهیدرواستاتیکی می‌باشد که جهت کاربردهای وسیعی در حوزه‌های مختلف از جمله اقیانوس‌ها، سواحل و بنادر، خلیج، دریاچه‌ها و مخازن سدها توسعه داده شده است. این مدل قابلیت بالایی در شبیه‌سازی جریان‌های دوبعدی و سه‌بعدی ناپایدار با در نظر گرفتن تغییرات چگالی، عمق آب و نیروهای خارجی وارد بر حوزه مورد مطالعه همانند نیروهای وابسته به تحولات جوی، تغییر ارتفاع آب ناشی از جزر و مد، جریان‌های ورودی و خروجی و سایر شرایط هیدروگرافی حوزه را دارد.

این مدل که توسط شرکت آب و محیط زیست DHI واقع در کشور دانمارک 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 می‌باشد.

حوزه های کاربردی این مدل عبارتند از:

- جریان های ناشی از باد و جزر و مد آب
- جریان های ناشی از تغییرات چگالی و لایه بندی
- شبیه سازی جریان در رودخانه ها
- شبیه سازی در دریاچه های عمیق و مخازن سدها
- ورود نمک به محیط های آبی
- شبیه سازی سونامی، پرش هیدرولیکی، امواج ناشی از سیل ها
- لایه بندی حرارتی در دریاچه ها و مخازن سدها
- انتقال مواد حل نشده و آلودگی ها در محیط های آبی
- انتقال رسوب و

۲.۱.۴ روش عددی مورد استفاده

در اکثر مدل ها سیال بصورت تراکم ناپذیر فرض می شود و فشار اولیه بصورت فشار هیدرواستاتیکی فرض می شود که با داشتن ارتفاع سطح آب بدست می آید. در مدل MIKE از روش تراکم پذیری مصنوعی استفاده می شود که معادله بقای جرم به یک معادله شبه هذلولی تبدیل می شود.

برای حل عددی معادلات هیدرودینامیک و معادلات انتقال و پخش از روش حجم محدود (Finite Volume) استفاده شده است. همچنین از شبکه بی سازمان (Unstructured Mesh) و المان های مثلثی جهت شبکه بندی محدود استفاده می شود.

روش عددی مورد استفاده در این مدل برای حل معادلات بقای جرم و اندازه حرکت (این معادلات پیشتر در فصل دوم توضیح داده شدند)، روش ADI می باشد. جهت حل معادلات بالا ابتدا ترم های انتقال (Advection)، پخش، اصطکاک کف و کوریولیس در معادله اندازه حرکت برای شارهای سرعت

u_i حل می‌شوند و سپس با استفاده از نتایج بدست آمده از این مرحله ترم ثقل و معادله بقاء بوسیله تکنیک ADI حل می‌شوند. در این مدل ترم انتقال به صورت صریح و از روش درجه ۲ دقت در lax-wendroff محاسبه شده‌است. در این روش تغییرات پارامتر اصلی در داخل حجم کنترل بوسیله حجم‌های کنترل قبلی و بعدی تعیین می‌شود. این روش برای حل یک معادله انتقال (Advection) بسیار مناسب می‌باشد. جهت حل ترم پخش یا آشفتگی از روش نیمه ضمنی کرانک نیکلسون استفاده شده است که در آن گرادیان تغییرات پارامتر اصلی بر اساس زمان میانی و مجازی $n+1/2$ تعیین می‌شود. بدین ترتیب برای محاسبه پارامتر اصلی در زمان $n+1$ با استفاده از پارامتر معلوم در زمان n از گرادیان زمانی بین آن‌ها استفاده شده‌است، که این مسئله تقریب بسیار خوبی می‌باشد.

۳.۱.۴ شرایط مرزی

هدف اصلی در مدل‌های عددی حل معادلات دیفرانسیل نسبی مربوط به مسئله می‌باشد. بنابراین مدل‌های عددی نیاز به شرایط مرزی مسئله دارند. داده‌های مرزی مورد نیاز برای حل مسئله عبارتند از:

- فشار و سرعت‌های عمودی و مماسی در مرزهای باز
- ارتفاع و مرزهای حوزه مورد نظر (بسیمتری)
- مقاومت بستر
- سرعت و جهت وزش باد و ضریب تنش برشی
- تغییرات فشار هوا

در مدل‌های عددی دو نوع شرط مرزی استفاده می‌شود. شرط مرزی باز و شرط مرزی بسته. شرط مرزی باز مربوط به مرزهایی می‌شود که در آن‌ها گرادیان پارامترهای اساسی قابل ملاحظه می‌باشد. به‌عنوان مثال در مسئله حاضر، 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 به‌عنوان شرط مرزی برای این مرزها در نظر گرفته می‌شود. مرزهای بسته هم به مرزهایی اطلاق می‌شود که شار ورودی و خروجی از آن‌ها به داخل محدوده صفر می‌باشد. در این مسئله مرزهای تماس آب مخزن با خشکی به عنوان مرزهای بسته و شرط مرزی سرعت صفر مطابق اصل عدم لغزش برای آن‌ها در نظر گرفته شد.

۲.۴ مدل‌سازی مخزن مورد مطالعه

جهت شبیه‌سازی مخزن یک سد و برپایی مدل نیاز به داده‌های متنوع در محدوده وسیعی از پارامترها می‌باشد. این داده‌ها بصورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

۱. توپوگرافی منطقه و نقشه‌های بسیمتری مربوط به هندسه مخزن و تراز خروجی‌ها
۲. سری زمانی دبی و شوری ورودی به مخزن از طریق رودخانه بالادست
۳. اطلاعات هواشناسی شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، رطوبت نسبی، میزان تبخیر و درصد ابری بودن هوا
۴. سری زمانی دبی خروجی
۵. نرخ نمک ورودی به مخزن ناشی از سازند نمکی
۶. طول دوره و گام زمانی شبیه‌سازی

در این تحقیق اطلاعات مربوط به داده‌های هواشناسی از طریق ایستگاه‌های هواشناسی دریافت شد. داده‌های فوق‌الذکر جهت استفاده، باید دارای فرمت خاص مورد نیاز مدل عددی مورد استفاده باشند.

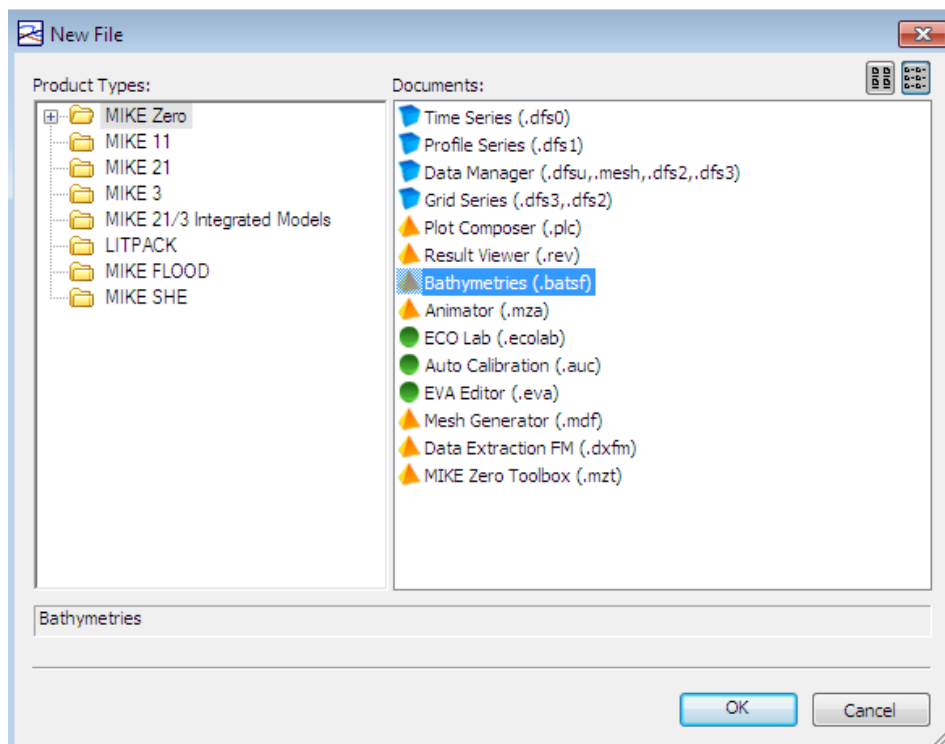
۱.۲.۴ تشریح فرآیند مدل‌سازی مخزن در MIKE

اولین گام در فرآیند مدل سازی تعیین هندسه و محدوده مخزن و تعریف آن به نرم افزار می باشد. جهت تعریف هندسه مخزن، نیاز به مختصات توپوگرافی نقاط بصورت فایل با فرمت XYZ می باشد. مختصات نقاط را می توان از نقشه های توپوگرافی منطقه برداشت نمود. شکل ۱.۴ فایل مختصات نقاط توپوگرافی مخزن را با فرمت XYZ نشان می دهد.

Point ID	X (m)	Y (m)	Z (m)
306846.846	3571951.830	-69.5	
306846.342	3571951.307	-69.4	
306845.744	3571950.747	-69.8	
306845.188	3571950.367	-70.5	
306844.461	3571949.785	-70.8	
306843.670	3571949.195	-71.2	
306842.352	3571948.123	-71.8	
306841.086	3571947.267	-72.6	
306840.209	3571946.796	-73.4	
306839.985	3571946.553	-73.8	
306837.708	3571945.062	-74.6	
306837.242	3571944.782	-75.2	
306836.849	3571944.483	-75.6	
306835.692	3571943.474	-76.1	
306834.967	3571942.714	-76.5	
306834.874	3571942.565	-77.0	
306834.799	3571942.434	-77.6	
306833.988	3571941.266	-78.2	
306833.689	3571940.762	-78.7	
306833.502	3571940.538	-79.3	
306833.110	3571939.884	-79.7	
306832.587	3571938.968	-80.3	
306832.251	3571938.463	-80.9	
306831.964	3571937.902	-81.4	
306831.143	3571936.332	-82.0	
306829.100	3571932.351	-82.5	
306828.951	3571931.921	-83.0	
306828.783	3571931.603	-83.7	
306827.072	3571927.924	-84.2	
306826.936	3571927.651	-84.8	
306826.657	3571927.110	-85.3	
306826.489	3571926.717	-85.8	
306824.659	3571923.627	-86.5	
306824.550	3571923.494	-87.1	
306824.196	3571922.821	-87.7	
306822.694	3571920.564	-88.2	
306822.390	3571920.084	-88.7	
306822.092	3571919.673	-89.3	

شکل (۱.۴): مختصات توپوگرافی نقاط مخزن با فرمت XYZ

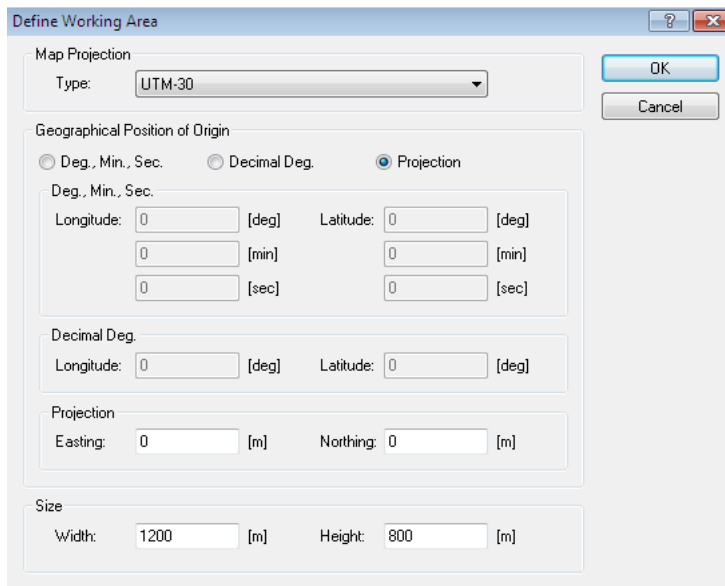
پس از تهیه فایل مختصات نقاط مخزن، گام بعدی تهیه فایل بسیمتری (آبنگاری) مخزن می باشد. برای انجام اینکار از منوی نشان داده شده در شکل ۲.۴ استفاده شد.



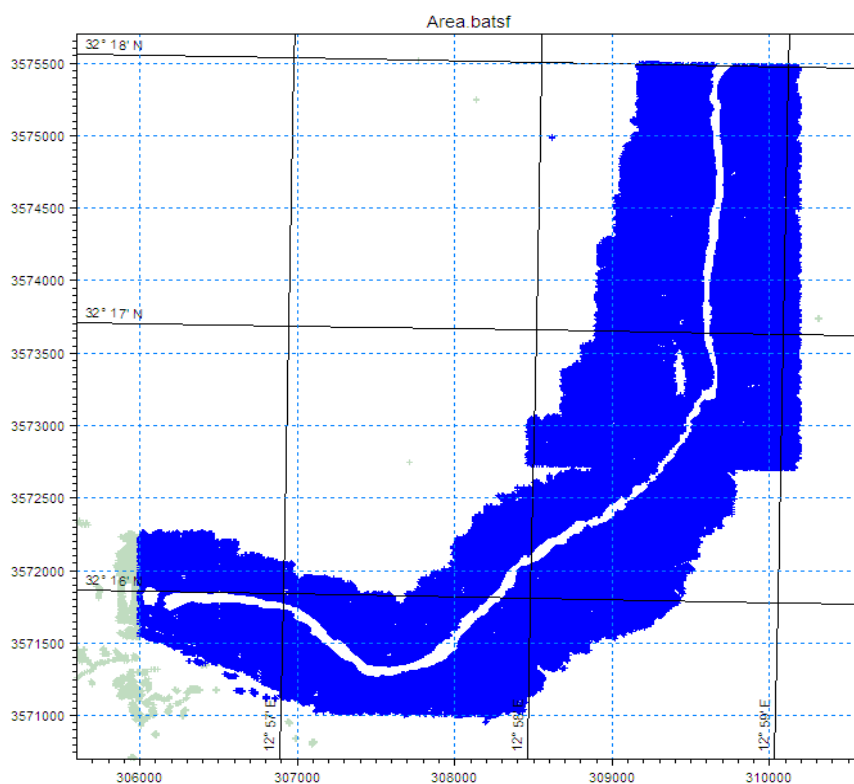
شکل (۲.۴): منوی ایجاد فایل بسیمتری مخزن

پس از کلیک بر روی گزینه مشخص شده در شکل صفحه‌ای مطابق شکل ۳.۴ باز می‌شود. در این پنجره ابتدا سیستم مختصات UTM-۳۰ برای پیاده‌سازی نقاط انتخاب شد. در قسمت بعد با انتخاب گزینه Projection طول و عرض جغرافیایی ابتدای حوزه و طول و عرض کل حوزه وارد شد. در مرحله بعد با انتخاب منوی زیر فایل xyz تولید شده در مرحله قبل وارد فایل بسیمتری شد. صفحه‌ای مطابق شکل ۴.۴ ظاهر می‌شود.

WorkArea→Bathymetry management→New→Model.xyz



شکل (۳.۴): منوی تعریف داده‌های بسیمتری مخزن به مدل عددی



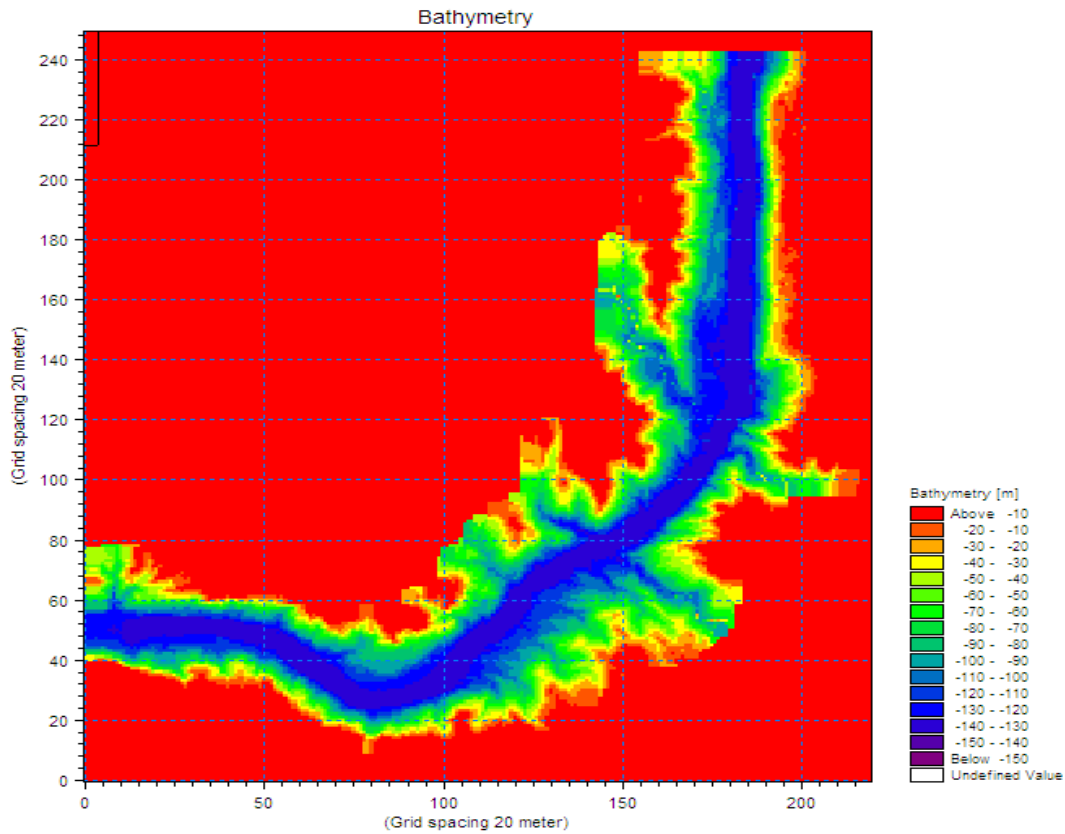
شکل (۴.۴): فایل اولیه بسیمتری مخزن

در گام بعدی باید محدوده تشکیل فایل بسیمتری در پنجره نشان داده شده در شکل ۵.۴ تعیین شود. در قسمت‌های مربوطه طول و عرض جغرافیایی ابتدای محدوده و گام مکانی و تعداد نقاط شبکه‌بندی وارد می‌شود.

شکل (۵.۴): منوی تعریف محدوده بسیمتری مخزن

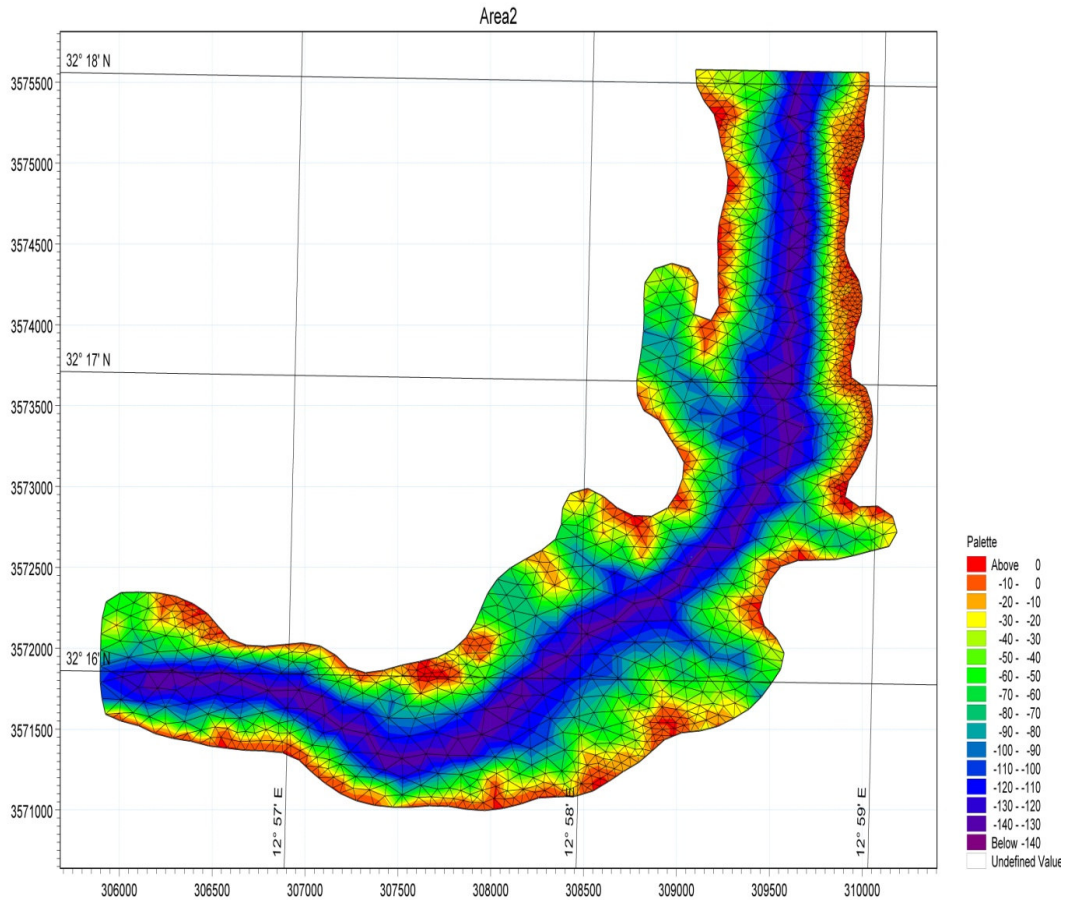
در مرحله بعد مختصات نقاط شبکه‌بندی با استفاده از روش درونیایی و بوسیله نقاط دارای مختصات مشخص که قبلاً وارد فایل شده بود تعیین می‌شود.

پس از این مرحله ساخت فایل بسیمتری مخزن به پایان می‌رسد و در مرحله بعد شبکه بندی این فایل با استفاده از ابزار Mesh Generator انجام می‌شود. در شکل ۶.۴ فایل بسیمتری مخزن مشاهده می‌شود.



شکل (۶.۴): فایل بسیمتری مخزن

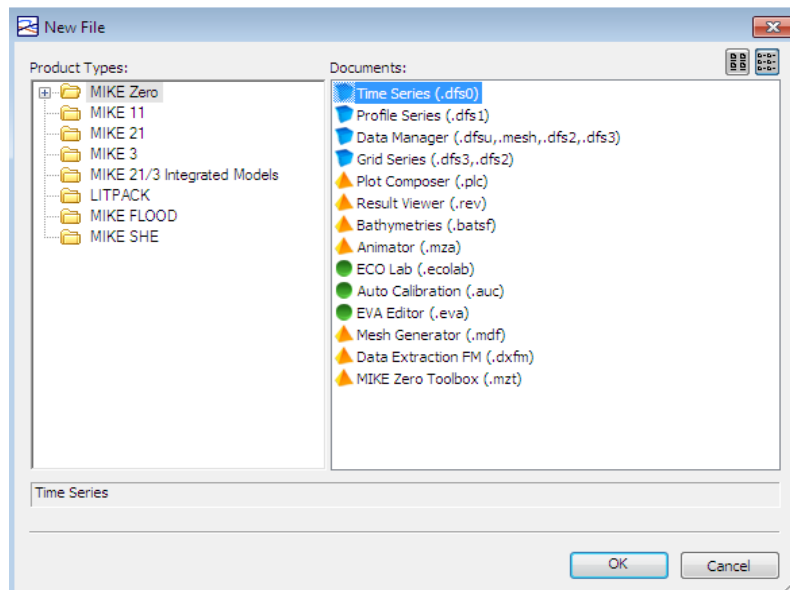
در قسمت Mesh Generator با استفاده از ابزارهای موجود مش بندی محدوده مخزن انجام می شود. جهت شبکه بندی محدوده از المان های مثلثی با کوچکترین زاویه برابر با ۳۰ درجه و کمترین مساحت برابر با ۱۴۰۰۰ مترمربع استفاده شد. فایل مش بندی مخزن در شکل ۷.۴ مشاهده می شود.



شکل (۷.۴): فایل مشبندی مخزن

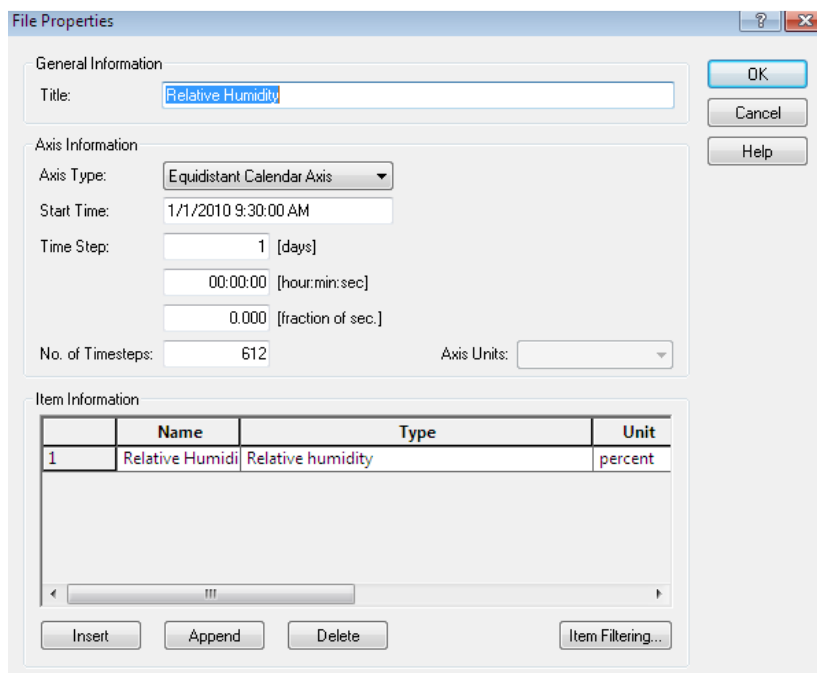
تا این مرحله هندسه مخزن وارد مدل شده‌است و فایل مشبندی مخزن آماده می‌باشد. این فایل در ادامه جهت برپایی مدل عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پس از تعریف هندسه مخزن، گام بعدی آماده نمودن فایل‌های مربوط به داده‌های هیدرودینامیکی، هیدرولوژیکی و آب و هوایی مربوط به محدوده مخزن می‌باشد. برای اینکه بتوان از این داده‌ها در مدل عددی استفاده نمود باید دارای الگو و فرمت خاص مورد نیاز برنامه باشند. اغلب این داده‌ها بصورت سری‌های زمانی می‌باشند و دارای پسوند dfs^0 هستند. به عنوان مثال نحوه ساخت فایل مربوط به رطوبت نسبی نشان داده می‌شود. ابتدا گزینه مشخص شده در شکل ۸.۴ انتخاب می‌شود.



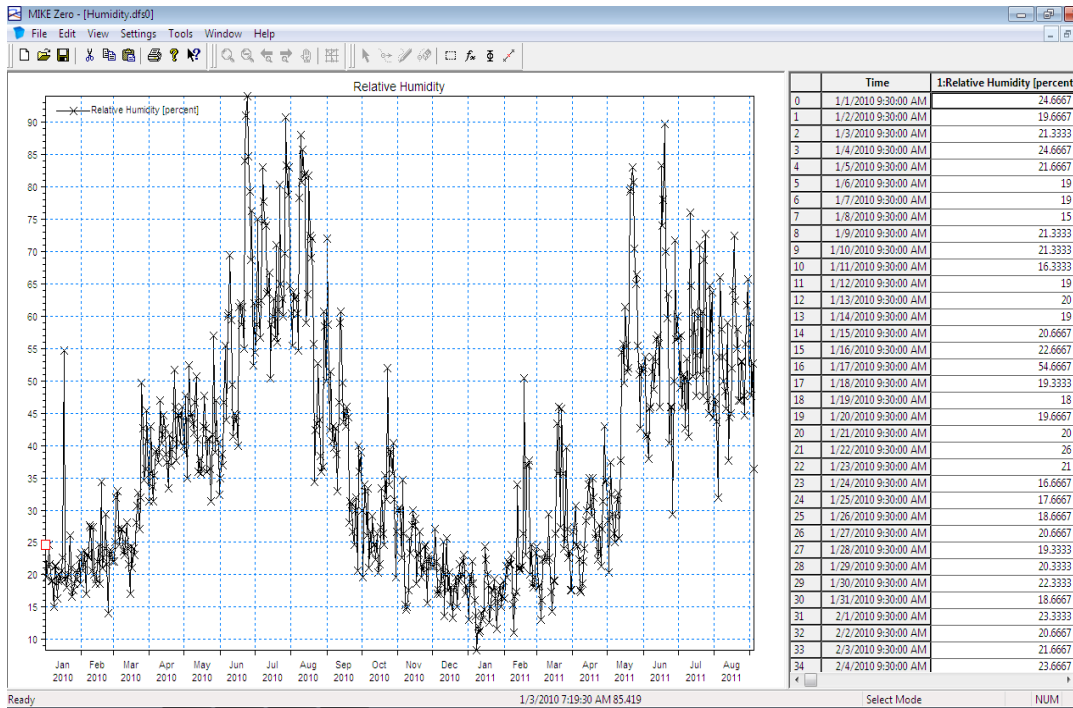
شکل (۸.۴): منوی ایجاد فایل های سری زمانی

بعد از انتخاب گزینه مورد نظر صفحه ای مطابق شکل ۱۰.۴ باز می شود.



شکل (۹.۴): پنجره ورود اطلاعات داده های سری زمانی

در این صفحه اطلاعاتی از قبیل نوع داده ورودی و واحد آن، زمان شروع شبیه‌سازی، تعداد روزهای شبیه‌سازی، اندازه گام زمانی و تعداد گام‌ها مورد نیاز می‌باشد. بعد از وارد نمودن اطلاعات مورد نیاز صفحه ای مطابق شکل ۱۰.۴ باز می‌شود که مقادیر رطوبت نسبی را نشان می‌دهد.



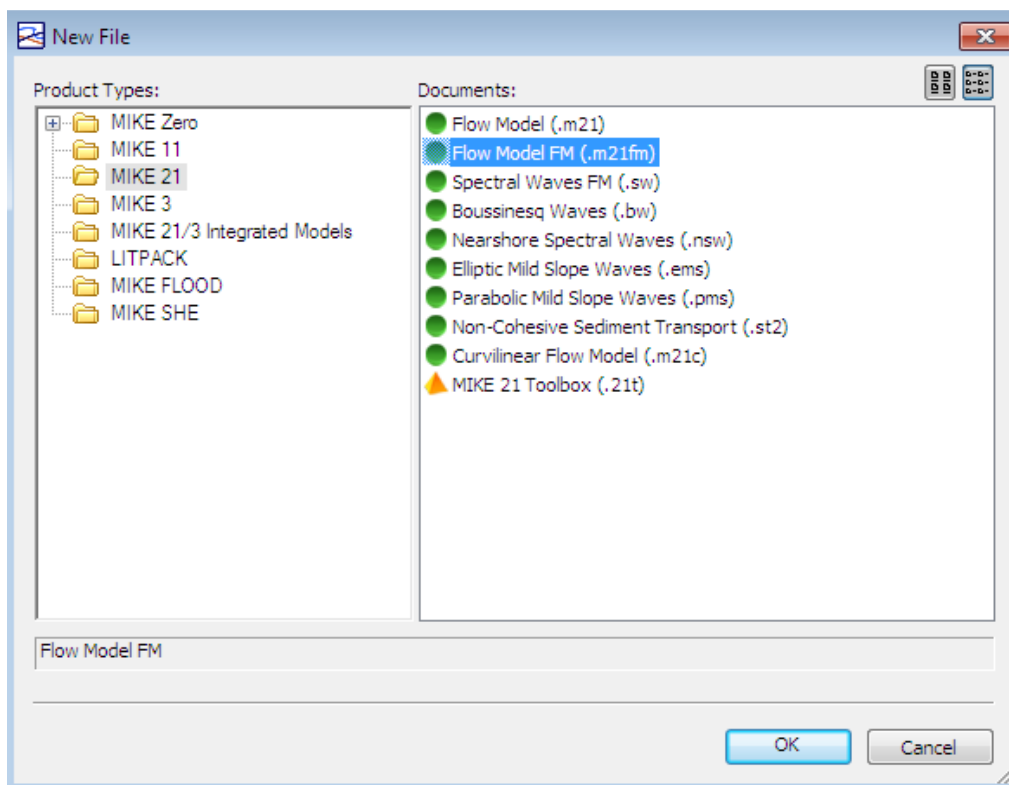
شکل (۱۰.۴): نمودار رطوبت نسبی در مخزن مورد مطالعه

بعد از وارد نمودن مقادیر مربوط به رطوبت نسبی نمودار مربوطه مطابق شکل بالا رسم می‌شود و در نهایت فایل ذخیره می‌شود.

گام آخر برپایی مدل کامل مخزن با استفاده از فایل‌های ساخته شده در مراحل قبل می‌باشد. برای انجام اینکار از منوی زیر استفاده می‌شود:

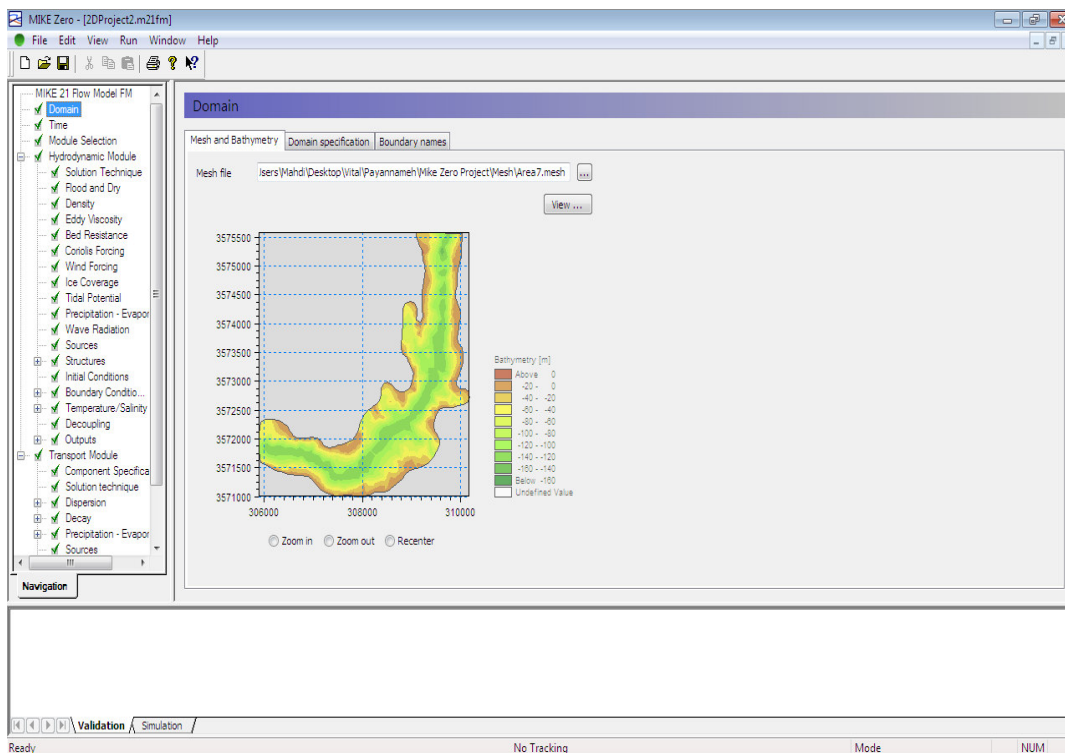
File→New→ File

بعد از آن در پنجره زیر گزینه موردنظر انتخاب می‌شود.



شکل (۱۱.۴): منوی ایجاد مدل عددی کامل مخزن

بعد از انتخاب گزینه مورد نظر پنجره جدیدی باز می‌شود که فایل‌های ساخته شده قبلی و پارامترهای دیگر مورد نیاز جهت برپایی مدل در این قسمت به نرم‌افزار تعریف می‌شوند.



شکل (۱۲.۴): پنجره ساخت مدل عددی کامل مخزن

در قسمت Hydrodynamic Module پارامترهای هیدرودینامیکی به مدل عددی تعریف می‌شوند. در این شبیه‌سازی از گام زمانی ۶۰ ثانیه استفاده شد. برای در نظر گرفتن ضریب لزجت ادی از فرمول smagorinsky formulation با ضریب ثابت ۰.۲۸ استفاده شد. برای در نظر گرفتن اثرات مقاومت و ضریب زبری بستر از پارامتر عدد مانینگ با مقدار $۳۲ \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ استفاده شد. پس از انجام مراحل بالا شبیه‌سازی مسئله در مدل عددی به پایان می‌رسد. با انتخاب منوی زیر اجرای مدل شروع می‌شود.

Run→Start Simulation

در فصل آینده در خصوص نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل عددی مخزن به تفصیل بحث خواهد شد.

فصل پنجم

تحليل نتايج

۱.۵ نتایج شبیه سازی عددی مدل فیزیکی

پس از انجام آزمایش و قرائت مقادیر غلظت نمک در بازه‌های زمانی و در نقاط مشخص در طی دوره آبیگری، به جهت تعیین ضریب انحلال و نرخ ورود نمک به داخل مخزن واقعی شبیه سازی عددی مدل آزمایشگاهی انجام شد. در این بخش از مدل عددی MIKE استفاده شد که در فصل گذشته به تفصیل در مورد آن صحبت شد و در این بخش مراحل مدل سازی مدل آزمایشگاهی توسط این نرم افزار شرح داده شد.

داده‌های مورد نیاز جهت شبیه سازی مدل آزمایشگاهی عبارتند از:

۱. مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی
۲. سری زمانی دبی ورودی و خروجی، دمای آب و مقدار نمک ورودی
۳. اطلاعات هواشناسی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی، میزان تبخیر و درصد ابری بودن هوا

مراحل اساسی یک مدل سازی کامپیوتری عبارتند از:

- ساخت شبکه محاسباتی (مش بندی)
- تعیین ارتفاع آب
- اطلاعات مرزی

۱.۱.۵ ساخت شبکه محاسباتی

یک فایل مش بندی در مدلسازی باید بگونه‌ای ساخته شود که حاوی اطلاعات زیر باشد.

➤ ارتفاع آب در محدوده مدل مشخص باشد

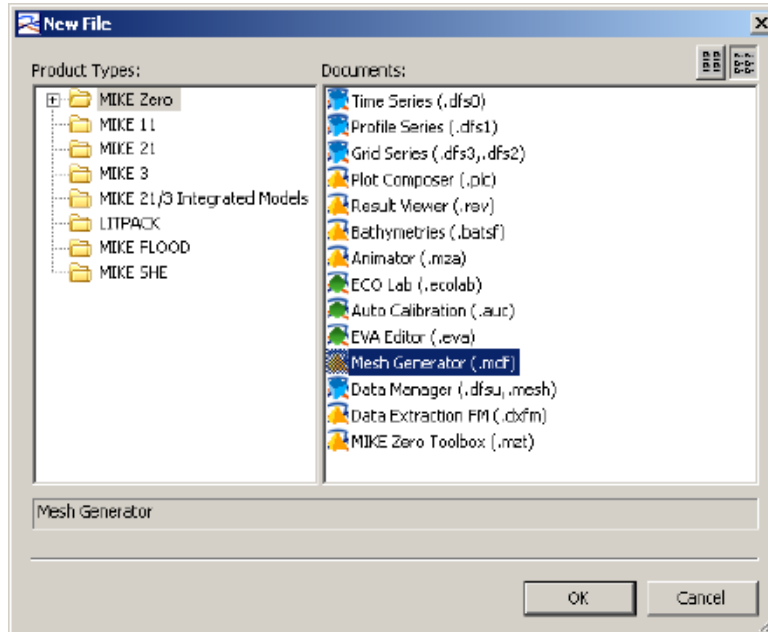
- نتایج شبیه سازی را با دقت مورد نظر ارائه دهد
- زمان شبیه سازی مورد قبول و رضایت کاربر باشد

برای رسیدن به این اهداف مش باید دارای مشخصات زیر باشد :

- ✓ المان مثلثی با زوایای کوچک نداشته باشد
- ✓ دارای مرزهای نرم و بدون شکستگی های زیاد باشد
- ✓ در مکان هایی که گرادیان تغییرات زیاد است دارای رزولوشن بالا باشد
- ✓ دارای مختصات توپوگرافی معتبر و صحیح باشد

برای ساخت یک فایل مش بندی شده در نرم افزار مایک نیاز به فایل با پسوند xyz می باشد که حاوی اطلاعات جغرافیایی مربوط به نقاط در محدوده مورد مطالعه دارد. به همین منظور و جهت مشخص نمودن مختصات توپوگرافی نقاط مدل آزمایشگاهی، هندسه مدل آزمایشگاهی به ۴۰ مقطع با فواصل ۱ متر تقسیم شد و در هر مقطع ۱۰ نقطه تعیین و مختصات مربوط به آنها محاسبه شد و بدین ترتیب

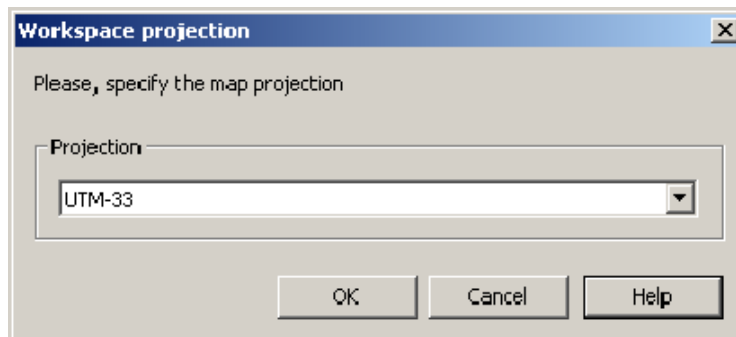
مختصات ۴۰۰ نقطه مشخص و ذخیره شد. تا این مرحله فایل XYZ به عنوان داده ورودی جهت ساخت شبکه آماده شد. فایل مش بندی توسط عملگری با عنوان Mesh Generator تولید می شود.



شکل (۱.۵): پنجره ساخت شبکه محاسباتی

در مرحله بعد باید سیستم پروجکشن تصویر برای انتقال مختصات نقاط انتخاب شود. معمولا سیستم

UTM-۳۳ مناسب می باشد.

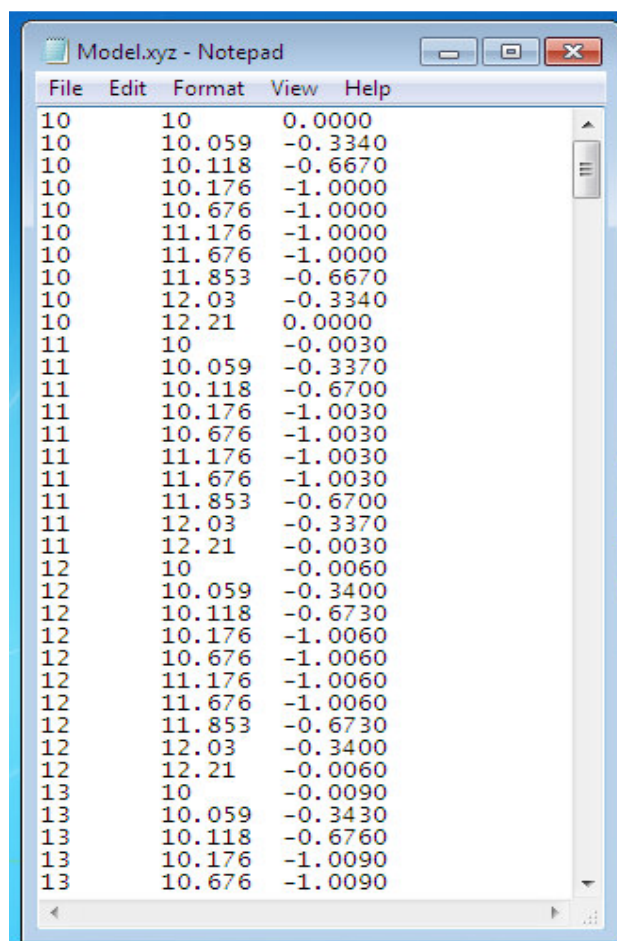


شکل (۲.۵): انتخاب سیستم انتقال مختصات نقاط

در این قسمت فایل مربوط به مختصات نقاط را از طریق منوی

Data→ImportBoundary→Open XYZ file:model.xyz

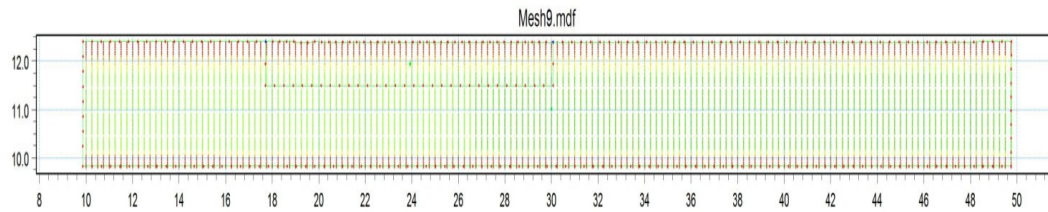
انتخاب می‌نماییم. در شکل ۳.۵ مختصات نقاط مربوط به مدل آزمایشگاهی نشان داده شده است.



Model	X	Y	Z
10	10	0.0000	
10	10.059	-0.3340	
10	10.118	-0.6670	
10	10.176	-1.0000	
10	10.676	-1.0000	
10	11.176	-1.0000	
10	11.676	-1.0000	
10	11.853	-0.6670	
10	12.03	-0.3340	
10	12.21	0.0000	
11	10	-0.0030	
11	10.059	-0.3370	
11	10.118	-0.6700	
11	10.176	-1.0030	
11	10.676	-1.0030	
11	11.176	-1.0030	
11	11.676	-1.0030	
11	11.853	-0.6700	
11	12.03	-0.3370	
11	12.21	-0.0030	
12	10	-0.0060	
12	10.059	-0.3400	
12	10.118	-0.6730	
12	10.176	-1.0060	
12	10.676	-1.0060	
12	11.176	-1.0060	
12	11.676	-1.0060	
12	11.853	-0.6730	
12	12.03	-0.3400	
12	12.21	-0.0060	
13	10	-0.0090	
13	10.059	-0.3430	
13	10.118	-0.6760	
13	10.176	-1.0090	
13	10.676	-1.0090	

شکل (۳.۵): مختصات نقاط مدل آزمایشگاهی

در مرحله بعد مرزها مشخص می‌شوند و محل ورودی و خروجی در مدل تعیین می‌شود. این کار با استفاده از ابزارهای وارد نمودن نقاط و کشیدن خطوط انجام می‌گیرد. در شکل ۴.۵ مقاطع اندازه‌گیری شده و محدوده مدل آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

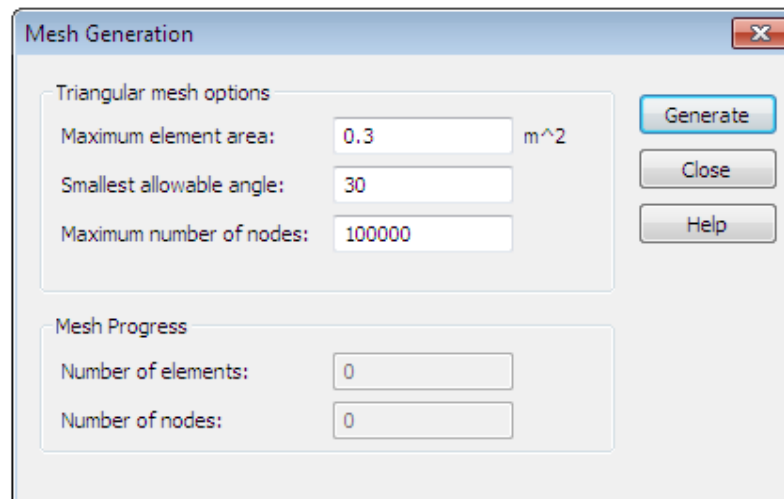


شکل (۴.۵): محدوده مدل آزمایشگاهی و مقاطع اندازه گیری شده

گام بعدی شبکه بندی محدوده با استفاده از المان‌های مثلثی می‌باشد. برای انجام این کار از مسیر زیر اقدام می‌شود.

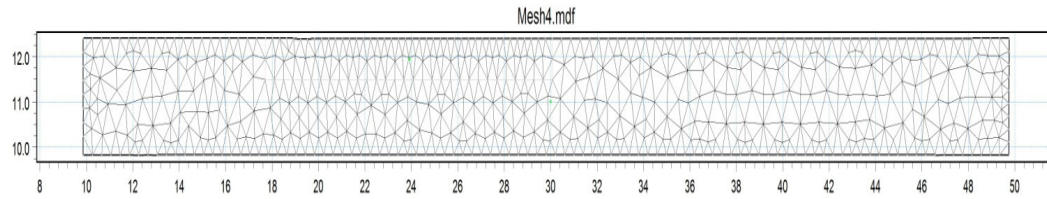
Mesh→Triangulate

پنجره مربوط به تنظیمات شبکه مطابق شکل زیر باز می‌شود که بعد از وارد نمودن مقادیر مشخص شده کلید Generate زده می‌شود.



شکل (۵.۵): پنجره وارد نمودن مشخصات مش بندی مدل آزمایشگاهی

محدوده مش بندی شده مطابق شکل ۶.۵ مشاهده می‌شود.



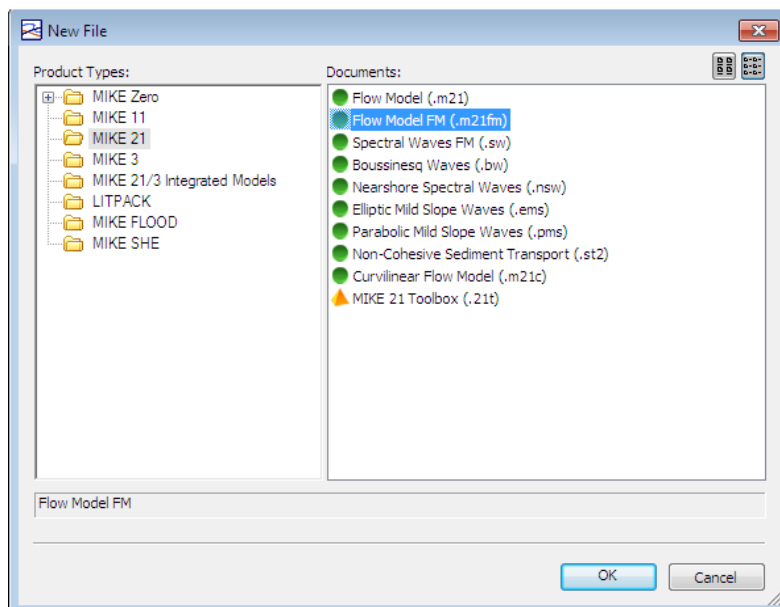
شکل (۶.۵): شبکه محاسباتی مدل

مش تولید شده دارای ۶۰۵ نقطه و ۹۸۰ المان می‌باشد. حداکثر مساحت مش تولیدی ۰.۳ متر مربع و مینیمم زوایای المان آن ۳۰ درجه می‌باشد.

۲.۱.۵ آماده‌سازی داده‌ها

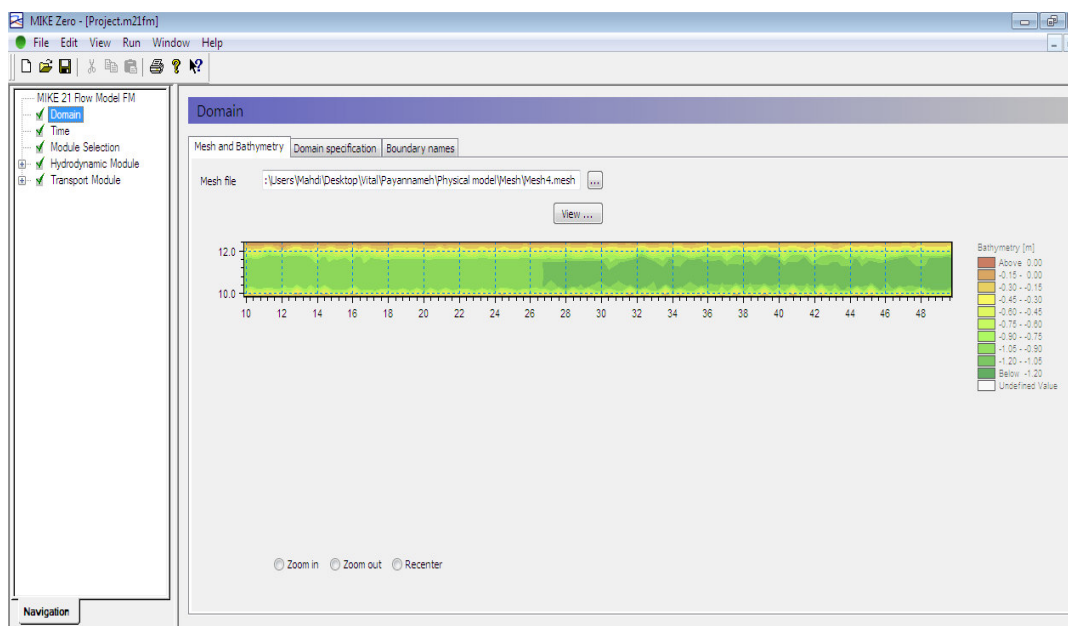
گام بعدی، آماده‌سازی داده‌های ورودی به مدل مطابق فرمت مورد نیاز نرم‌افزار می‌باشد. در نرم افزار مایک چندین فرمت جهت داده‌های ورودی وجود دارد که فرمت مربوط به داده‌هایی که بصورت سری‌های زمانی هستند بصورت dfs_0 می‌باشد. فرآیند آماده‌سازی داده‌های ورودی در فصل ۴ بخش ۲.۲.۴ توضیح داده‌شد.

پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی به مدل و تولید شبکه محاسباتی اقدام به برپایی مدل عددی با استفاده از این داده‌ها می‌شود. برای این کار از منوی نشان داده شده در شکل ۷.۵ استفاده می‌شود.



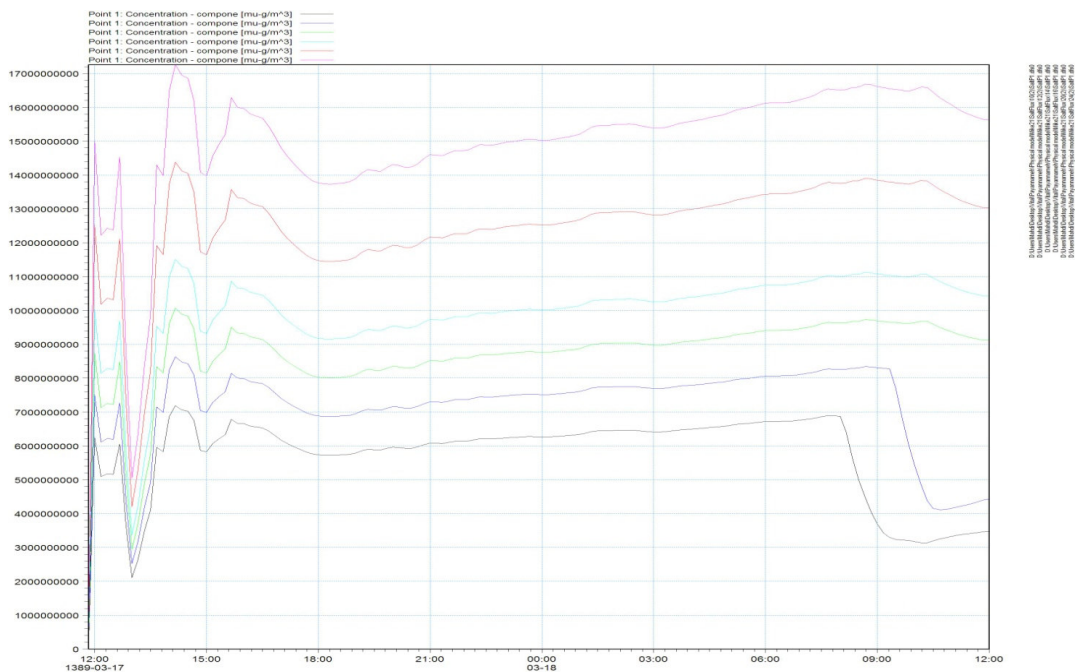
شکل (۷.۵): منوی ایجاد فایل شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی

پس از انتخاب گزینه موردنظر صفحه‌ای مطابق شکل ۸.۵ باز می‌شود که داده‌های مورد نیاز جهت برپایی مدل در این قسمت وارد می‌شود.

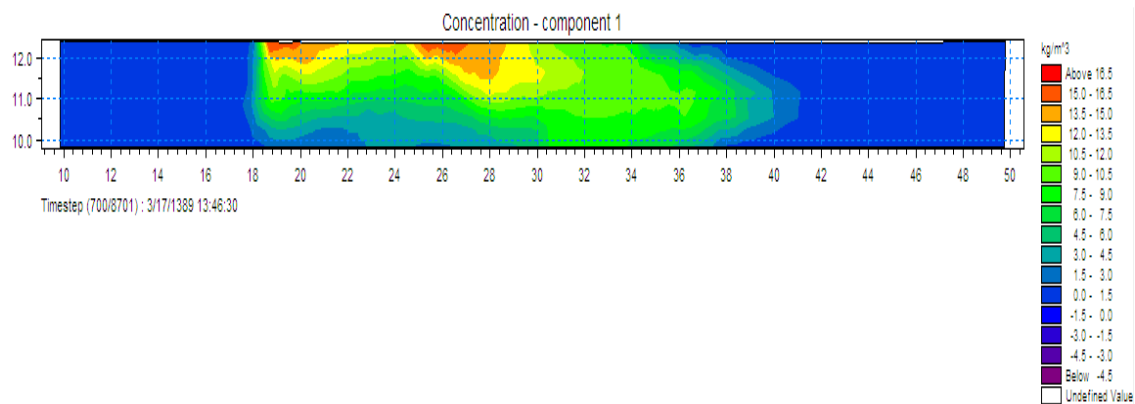


شکل (۸.۵): پنجره ایجاد فایل شبیه‌سازی مدل آزمایشگاهی

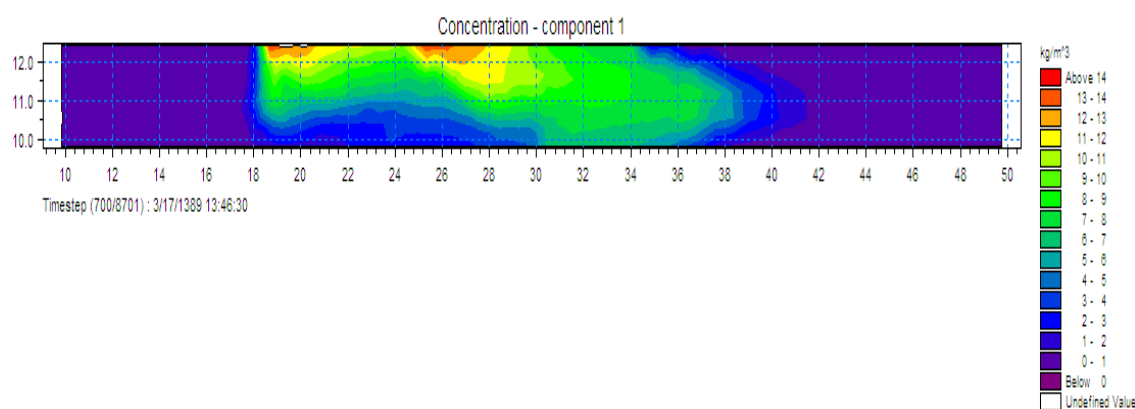
پس از برپایی، مدل با استفاده از ضرایب انحلال مختلف اجرا می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در قالب مقادیر غلظت نمک در نقاطی که در مدل آزمایشگاهی در آن نقاط مقادیر غلظت قرائت شد، در فایل‌های خروجی جداگانه ارائه می‌شود. در شکل ۹.۵ مقادیر غلظت نمک در دوره شبیه‌سازی با ضرایب انحلال مختلف نشان داده شده است. محور افقی نشان‌دهنده زمان و محور عمودی نشان‌دهنده غلظت نمک می‌باشد. در شکل‌های ۱۰.۵ الی ۱۲.۵ توزیع شوری در محدوده شبیه‌سازی شده با ضرایب انحلال مختلف نشان داده شده است.



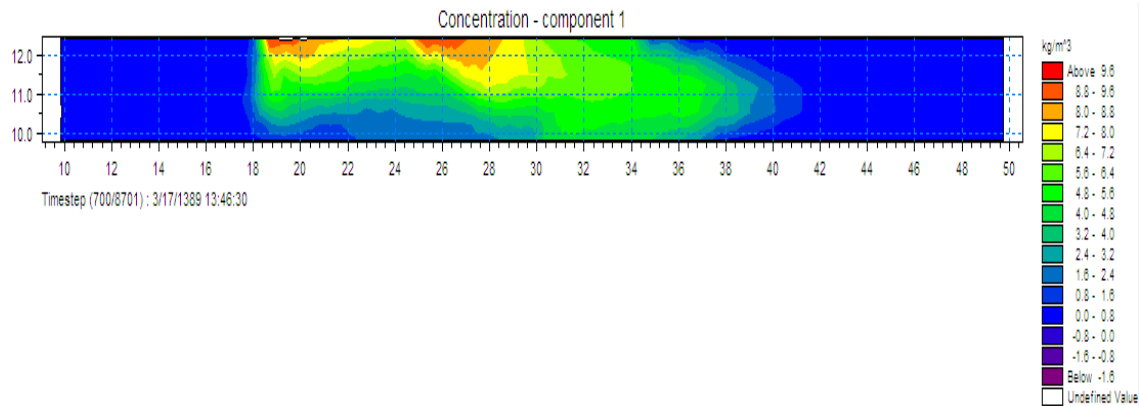
شکل (۹.۵): نمودار غلظت نمک حاصل از شبیه‌سازی مدل فیزیکی



شکل (۱۰.۵): نمودار سطحی توزیع شوری با ضریب انحلال ۲۴ سانتی متر بر ساعت



شکل (۱۱.۵): نمودار سطحی توزیع شوری با ضریب انحلال ۲۰ سانتی متر بر ساعت



شکل (۱۲.۵): نمودار سطحی توزیع شوری با ضریب انحلال ۱۴ سانتی متر بر ساعت

۳.۱.۵ تعیین ضریب انحلال

پس از انجام بررسی‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی با استفاده از مدل MIKE و استخراج نتایج حاصل از این مطالعات، اکنون می‌توان با مقایسه نتایج مربوط به مدل آزمایشگاهی و مدل عددی، ضریب انحلال نمک و نرخ ورود نمک را تعیین نمود.

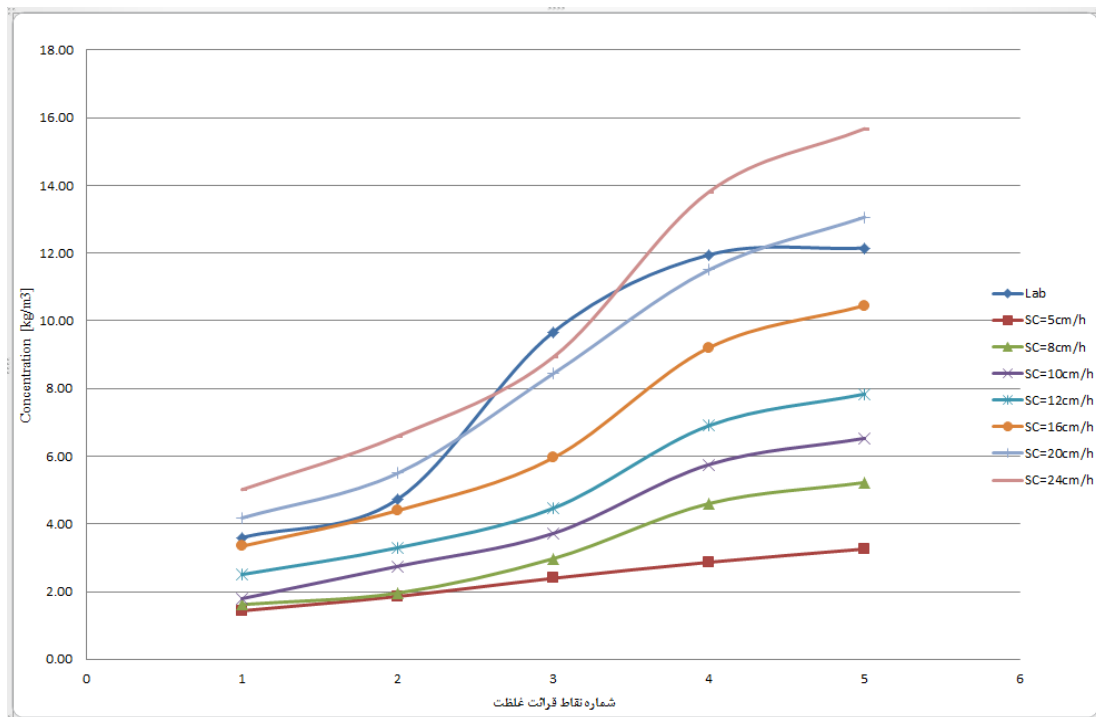
جهت انجام این کار ابتدا باید داده‌های حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و نتایج مربوط به مدل عددی را استخراج نموده سپس با رسم نمودارهای مربوط به این نتایج، بهترین نمودار مربوط به مدل عددی که بیشترین مطابقت را با داده‌های آزمایشگاهی دارد مشخص نمود. ضریب انحلال مربوط به این نمودار که با قراردادن آن در مدل عددی غلظت‌های مربوطه بدست آمدند به عنوان ضریب انحلال نمک در این آزمایش تعیین می‌شود.

داده‌های مربوط به مدل فیزیکی و مدل عددی استخراج شده در جدول ۱.۵ مشاهده می‌شود.

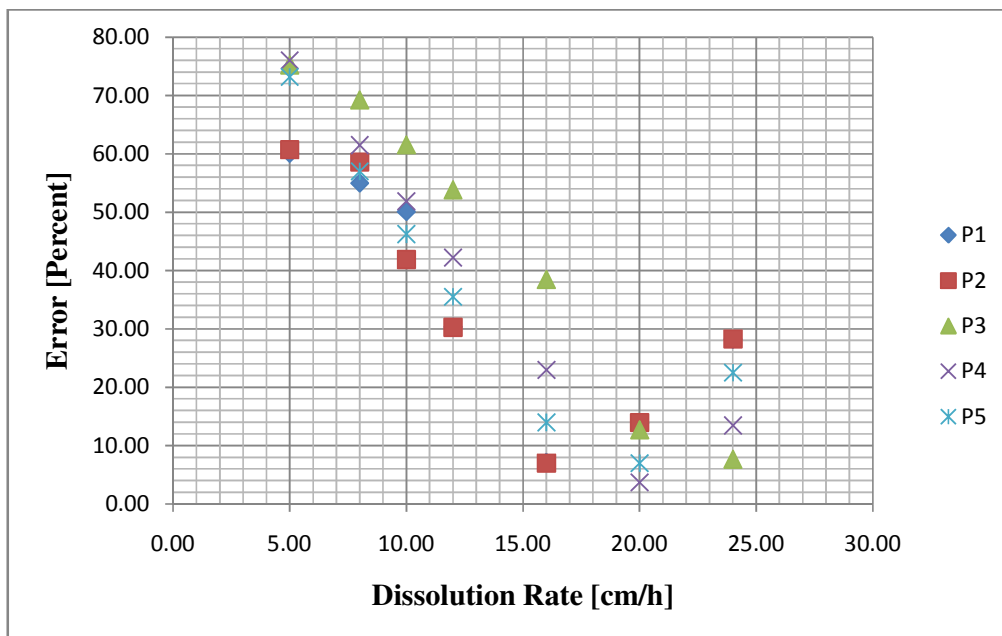
جدول (۱.۵): نتایج استخراج شده از آزمایش و شبیه‌سازی عددی

Time = 16:35								
	مدل فیزیکی	SC=5 cm/h	SC=8cm/h	SC=10cm/h	SC=12cm/h	SC=16cm/h	SC=20cm/h	SC=24cm/h
No. Point	غلظت (kg/m ³)	غلظت (kg/m ³)	غلظت (kg/m ³)	غلظت (kg/m ³)	غلظت (kg/m ³)	غلظت (kg/m ³)	غلظت (kg/m ³)	غلظت (kg/m ³)
1	3.60	1.44	1.62	1.80	2.51	3.34	4.18	5.02
2	4.73	1.86	1.96	2.75	3.30	4.40	5.50	6.60
3	9.67	2.40	2.98	3.72	4.46	5.95	8.44	8.93
4	11.95	2.87	4.60	5.75	6.90	9.21	11.51	13.81
5	12.15	3.26	5.23	6.53	7.84	10.45	13.06	15.68
		درصد خطا	درصد خطا	درصد خطا	درصد خطا	درصد خطا	درصد خطا	درصد خطا
		60.10	55.00	50.12	30.34	7.12	13.86	28.22
		60.68	58.59	41.89	30.27	7.03	13.95	28.30
		75.22	69.22	61.53	53.84	38.45	12.72	7.67
		75.98	61.48	51.85	42.22	22.97	3.71	13.46
		73.17	56.99	46.24	35.48	13.98	7.00	22.50
	Ave. Er (%)	69.03	60.26	50.33	38.43	17.91	10.25	20.03

در شکل‌های ۱۳.۵ و ۱۴.۵ نمودارهای مربوط به مقادیر غلظت نمک و میانگین درصد خطای محاسبه شده نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش مشاهده می‌شود.



شکل (۱۳.۵): نمودار مقادیر غلظت نمک در مدل عددی با ضرایب انحلال مختلف و مدل فیزیکی



شکل (۱۴.۵): نمودار درصد خطای محاسبه شده مقادیر غلظت مدل عددی در ضرایب انحلال مختلف در مقایسه با نتایج مدل فیزیکی

همانطور که در جدول ۱.۵ و شکل‌های ۱۳.۵ و ۱۴.۵ مشاهده می‌شود بهترین مطابقت نمودارهای مربوط به نتایج مدل عددی و داده‌های حاصل از مدل آزمایشگاهی مربوط به نمودار با ضریب انحلال ۲۰ سانتیمتر بر ساعت می‌باشد. برای تعمیم این نتیجه به مخزن واقعی، با توجه به اینکه مقیاس زمان در مدل آزمایشگاهی برابر ۱/۱۰۰ می‌باشد لذا ضریب انحلال واقعی در مخزن مورد مطالعه برابر ۲۰/۱۰۰ می‌باشد که برابر است با ۰.۲ سانتیمتر بر ساعت. ضریب انحلال بدست آمده در این قسمت را می‌توان در مورد سایر مخازنی که شرایط مشابهی با مخزن مورد مطالعه دارند به‌کاربرد.

۲.۵ نتایج شبیه‌سازی عددی مخزن مورد مطالعه

در بخش قبل با استفاده از نتایج آزمایش و شبیه‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی، ضریب انحلال نمک در مخزن سد مورد مطالعه تعیین شد. در فصل چهارم فرآیند مدلسازی عددی مخزن توضیح داده و مدل آماده اجرا شد. مدل عددی مخزن برای شروع شبیه‌سازی به پارامتر ضریب انحلال به‌عنوان داده

ورودی نیاز دارد. ضریب انحلال تعیین شده در بخش قبل با توجه به مشخصات سازند نمکی به عددی با واحد kg/s تبدیل شد تا قابل تعریف به مدل عددی باشد. روند تبدیل واحد ضریب انحلال به شکل زیر می باشد.

$$SC = 20 \text{ cm/h} \rightarrow \text{Scale } 1/100 \rightarrow SC = 0.2 \text{ cm/h} \rightarrow SC = 0.2 * 24 \rightarrow SC = 4.8 \text{ cm/day}$$

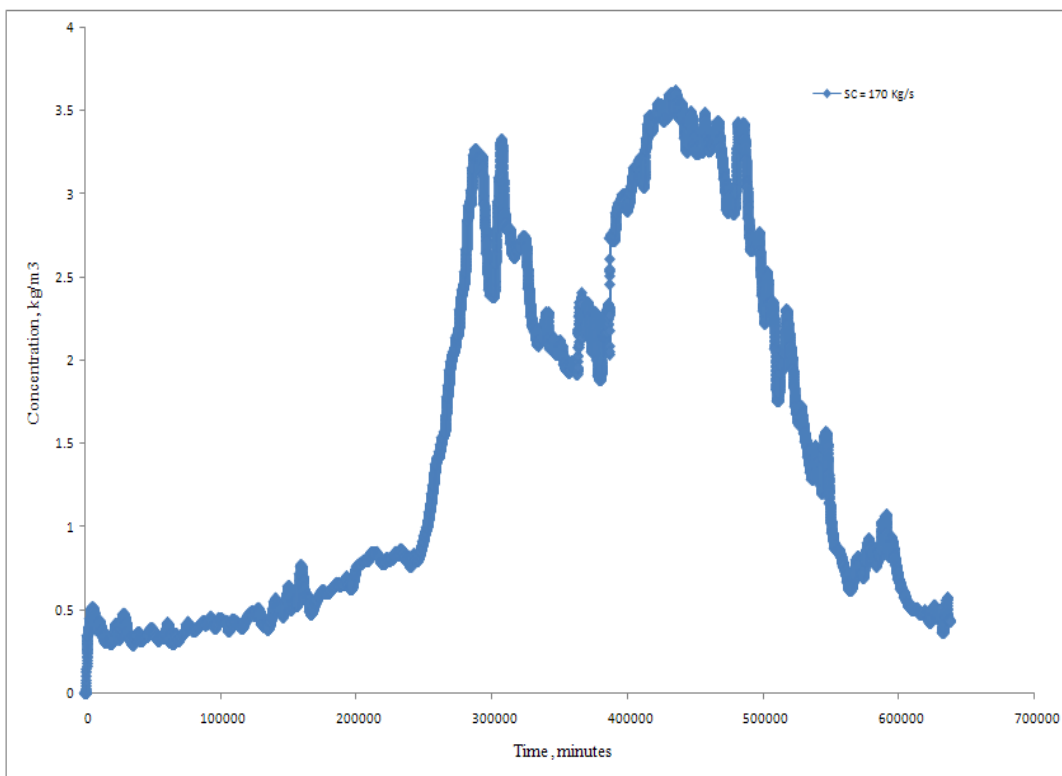
$$SC = \frac{0.048 (m) \times 2000 (m) \times 80 (m)}{24(h) \times 60(\text{min}) \times 60(s)} = 0.08 \text{ m}^3/s$$

$$\rho_{\text{سنگ نمک}} = 2120 \text{ kg/m}^3$$

$$SC = 0.08 \text{ m}^3/s \times 2120 \text{ kg/m}^3 = 169.6 \text{ kg/s} \cong 170 \text{ kg/s}$$

$$\text{وزن نمک حل شده در مخزن در یک سال: } 170 \times 360 \times 24 \times 60 \times 60 = 5361120 \text{ ton/year}$$

جهت شبیه سازی مدل، مقدار ۱۷۰ کیلوگرم بر ثانیه به عنوان ضریب انحلال به مدل عددی تعریف و مدل اجرا شد. برای تحلیل نتایج حاصل از شبیه سازی، ابتدا نمودار توزیع غلظت در مخزن مورد بررسی قرار می گیرد. شکل ۱۵.۵ نمودار توزیع غلظت نمک در مخزن سد را در طی زمان و در نقطه ای نزدیک به ناحیه کارست نمکی نشان می دهد که محور افقی مقیاس زمان و محور عمودی مقدار غلظت نمک با واحد کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. این نمودار روند افزایش یا کاهش غلظت در این نقطه را با گذشت زمان نشان می دهد. SC بیانگر پارامتر ضریب انحلال می باشد. با بررسی و تامل در نتایج این نمودار می توان نحوه توزیع شوری در مخزن را پیش بینی کرد.



شکل (۱۵.۵): نمودار توزیع غلظت نمک در نقطه نزدیک به کارست نمکی

این نمودار را می‌توان به سه بازه‌ی زمانی مشخص تقسیم نمود.

الف) بازه اول را می‌توان شش ماه اول آبیگری تعیین کرد که نمودار توزیع غلظت با شیب کمی در حال افزایش می‌باشد.

ب) بازه دوم پنج ماه بعد در نظر گرفته می‌شود که در این بازه نمودار توزیع غلظت با شیب بسیار تند افزایش می‌یابد.

ج) و در نهایت بازه سوم چهار ماه آخر دوره مطالعه در نظر گرفته شده که نمودار توزیع غلظت با شیب نسبتاً زیاد کاهش می‌یابد.

در خصوص بازه اول نمودار می‌توان این‌چنین اظهار نظر نمود. پس از آبیگری مخزن و تماس آب مخزن با سازند کارست نمکی رفته رفته در اثر انحلال نمک در آب و پخش و حمل مقادیر نمک حل

شده توسط جریان های شکل گرفته در مخزن، مقدار غلظت نمک با شیب نسبتاً ملایمی افزایش می یابد.

در بازه دوم نمودار، همانطور که مشاهده می شود پس از افزایش نسبتاً ملایم در میزان غلظت نمک در ماه های اول، افزایش ناگهانی شوری ملاحظه می شود. نتیجه بدست آمده را به چند دلیل می توان تحلیل کرد. اول اینکه میزان دبی ورودی به مخزن در این مرحله کمترین مقدار خود را دارد (۲۲۰ متر مکعب بر ثانیه) و مقدار دبی خروجی تغییر نمی کند (۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه). به همین دلیل روند افزایش حجم مخزن کاهش می یابد ولی نرخ ورود نمک به داخل حجم مخزن ثابت می باشد. لذا غلظت حجمی نمک افزایش می یابد. همچنین با توجه به نمودارهای تبخیر از سطح مخزن و رطوبت نسبی در محدوده مخزن متوجه می شویم که در زمان افزایش ناگهانی در غلظت، تبخیر دارای کمترین مقدار و رطوبت نسبی دارای بیشترین مقدار خود می باشد که این عوامل در جهت افزایش حجم آب مخزن می باشند.

دوم اینکه شوری طبیعی ورودی به مخزن از طریق رودخانه بالادست در این زمان دارای بیشترین مقدار خود می باشد (حدود ۷۲۵ میلی گرم بر لیتر). تلفیق موارد فوق الذکر به همراه شوری تحمیلی به مخزن از طریق سازند نمکی مطمئناً نقش بسزایی در افزایش ناگهانی غلظت نمک در مخزن دارند. همانطور که از نمودار مشخص است در بحرانی ترین حالت مقدار غلظت نمک به ۳.۶ کیلوگرم بر مترمکعب می رسد.

۳.۵ مقایسه نتایج داده های اندازه گیری شده و شبیه سازی عددی مخزن

در بخش قبل نتایج شبیه سازی عددی مخزن با استفاده از ضریب انحلال بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه در زمان انجام این مطالعه مخزن مورد

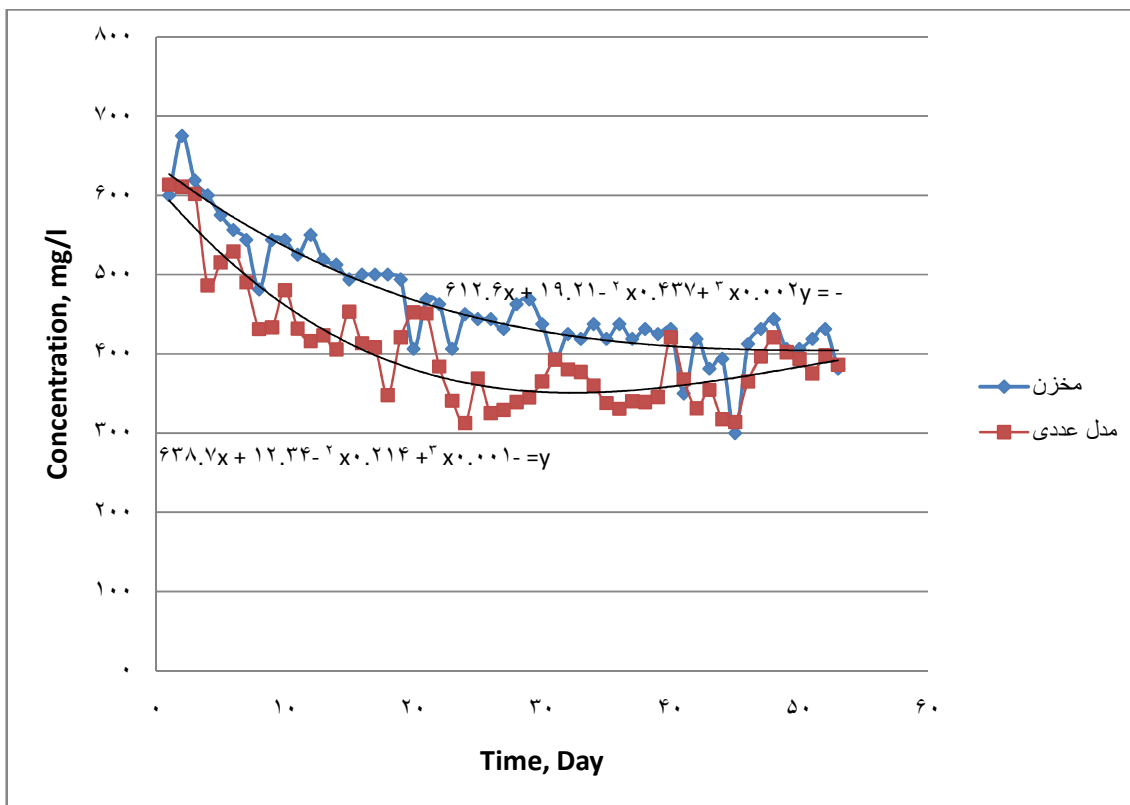
مطالعه در حال آبیاری بود، قرائت مقادیر غلظت نمک در مخزن انجام گرفت. پس از دریافت این داده‌ها، به منظور اعتبار دهی به نتایج مدل عددی، این نتایج با داده‌های مخزن مقایسه شد. در جدول ۲.۵ مقادیر غلظت نمک در مخزن واقعی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مخزن نشان داده شده است.

جدول (۲.۵): نتایج اندازه‌گیری شده مخزن واقعی و مدل عددی

زمان قرائت غلظت (روز)	غلظت نمک در مخزن واقعی (mg/l)	غلظت نمک در مدل عددی (mg/l)	درصد خطا	میانگین درصد خطا
۱	۶۰۰	۶۱۳	۲.۱۹	۱۳.۶۵
۲	۶۷۵	۶۱۱	۹.۵۲	
۳	۶۱۹	۶۰۲	۲.۷۵	
۴	۶۰۰	۴۸۶	۱۸.۹۵	
۵	۵۷۵	۵۱۵	۱۰.۴۲	
۶	۵۵۶	۵۲۹	۴.۸۸	
۷	۵۴۴	۴۹۰	۹.۹۰	
۸	۴۸۱	۴۳۱	۱۰.۴۳	
۹	۵۴۴	۴۳۳	۲۰.۳۱	
۱۰	۵۴۴	۴۸۰	۱۱.۶۹	
۱۱	۵۲۵	۴۳۲	۱۷.۸۰	
۱۲	۵۵۰	۴۱۶	۲۴.۳۸	
۱۳	۵۱۹	۴۲۳	۱۸.۳۹	
۱۴	۵۱۳	۴۰۵	۲۰.۹۲	
۱۵	۴۹۴	۴۵۳	۸.۲۴	
۱۶	۵۰۰	۴۱۳	۱۷.۳۶	
۱۷	۵۰۰	۴۰۸	۱۸.۴۱	
۱۸	۵۰۰	۳۴۸	۳۰.۴۸	
۱۹	۴۹۴	۴۲۱	۱۴.۸۲	
۲۰	۴۰۶	۴۵۲	۱۰.۱۳	
۲۱	۴۶۹	۴۵۱	۳.۸۳	
۲۲	۴۶۳	۳۸۴	۱۶.۹۸	
۲۳	۴۰۶	۳۴۱	۱۶.۱۳	
۲۴	۴۵۰	۳۱۲	۳۰.۵۹	
۲۵	۴۴۴	۳۶۹	۱۶.۹۳	

زمان قرائت غلظت (روز)	غلظت نمک در مخزن واقعی (mg/l)	غلظت نمک در مدل عددی (mg/l)	درصد خطا	
۲۶	۴۴۴	۳۲۵	۲۶.۸۰	
۲۷	۴۳۱	۳۲۹	۲۳.۶۷	
۲۸	۴۶۳	۳۳۹	۲۶.۶۸	
۲۹	۴۶۹	۳۴۵	۲۶.۴۱	
۳۰	۴۳۸	۳۶۵	۱۶.۵۲	
۳۱	۳۹۴	۳۹۳	۰.۳۱	
۳۲	۴۲۵	۳۸۰	۱۰.۵۴	
۳۳	۴۱۹	۳۷۷	۹.۹۹	
۳۴	۴۳۸	۳۶۰	۱۷.۷۷	
۳۵	۴۱۹	۳۳۸	۱۹.۳۷	
۳۶	۴۳۸	۳۳۰	۲۴.۴۷	
۳۷	۴۱۹	۳۴۰	۱۸.۷۷	
۳۸	۴۳۱	۳۳۹	۲۱.۳۸	
۳۹	۴۲۵	۳۴۶	۱۸.۷۰	
۴۰	۴۳۱	۴۲۱	۲.۴۵	
۴۱	۳۵۰	۳۶۸	۴.۷۹	
۴۲	۴۱۹	۳۳۱	۲۰.۹۸	
۴۳	۳۸۱	۳۵۴	۷.۰۴	
۴۴	۳۹۴	۳۱۷	۱۹.۳۹	
۴۵	۳۰۰	۳۱۴	۴.۳۷	
۴۶	۴۱۳	۳۶۵	۱۱.۴۶	
۴۷	۴۳۱	۳۹۷	۸.۰۰	
۴۸	۴۴۴	۴۲۱	۵.۲۳	
۴۹	۴۰.۶	۴۰.۲	۱.۰۵	
۵۰	۴۰.۶	۳۹۳	۳.۱۸	
۵۱	۴۱۹	۳۷۵	۱۰.۴۵	
۵۲	۴۳۱	۳۹۸	۷.۶۳	
۵۳	۳۸۱	۳۸۶	۱.۲۷	

در شکل ۱۶.۵ نمودار مربوط به این نتایج نشان داده شده است.



شکل (۱۶.۵): نمودار غلظت نمک در مخزن و مدل عددی

باتوجه به نتایج جدول ۲.۵، متوسط درصد خطای مقادیر اندازه‌گیری شده در مخزن مورد مطالعه و مدل عددی، ۱۳.۶۵ درصد محاسبه شده‌است که با توجه به تقریب به‌کاررفته در طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی مخزن قابل قبول می‌باشد. همانطور که از شکل ۱۴.۵ مشخص است تقریباً در اکثر زمان‌های اندازه‌گیری شده، مدل عددی مقادیر غلظت نمک در مخزن را کمتر از مقدار واقعی محاسبه کرده است.

علت این امر را در چند نکته می‌توان جستجو نمود. نکته اول اینکه مقدار ضریب انحلال بصورت یک عدد ثابت فرض شده‌است که در واقعیت اینگونه نیست و در ترازهای مختلف مخزن این عدد متفاوت می‌باشد. نکته دوم اینکه در مدل آزمایشگاهی بخشی از مخزن با رس پوشیده شده‌است که در مخزن واقعی این امر واقعیت ندارد. نکته سوم در تقریب به‌کار رفته در طراحی و ساخت مدل آزمایشگاهی می‌باشد. در این تحقیق ضریب انحلال به‌کاررفته در مدل عددی با استفاده از انجام آزمایش بر روی

مدل فیزیکی مخزن بدست آمد. در مدل فیزیکی تنها روش انحلال و ورود نمک به داخل حجم آب، فرآیند انحلال سطحی نمک به کار رفته در مدل فیزیکی در اثر تماس سطحی آب با سنگ نمک می باشد. در صورتی که در مخزن واقعی بدین شکل نیست. همانطور که در بخش ۱.۳ ذکر شد در بازدیدهای میدانی از مخزن مورد مطالعه، فروچاله‌هایی با ابعاد بزرگ در محدوده سازند کارستی مشاهده شد. همچنین بلوک‌های نمکی نابرجا حکایت از فروریزش و لغزش لایه‌های نمک در این ناحیه داشت. 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 به داخل مخزن از عوامل دیگر ورود نمک به داخل آب مخزن هستند که در مدل آزمایشگاهی این موارد در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین مقدار ضریب انحلال نمک مدل آزمایشگاهی اندکی کمتر از ضریب انحلال واقعی نمک در مخزن می باشد ولی مطمئناً اصلی‌ترین عامل ورود نمک به داخل مخزن، انحلال سطحی در اثر تماس لایه‌های نمک سازند کارستی با حجم آب مخزن می باشد.

۴.۵ تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر توزیع شوری در مخزن

۱.۴.۵ ضریب انحلال

در بخش قبل چگونگی تاثیر سازند نمکی بر توزیع شوری در مخزن سد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همانطور که در فصل دوم ذکر شد علاوه بر ضریب انحلال، پارامترهای هیدرودینامیکی و آب‌وهوایی نیز به دلیل تاثیری که در شرایط هیدرودینامیکی مخزن دارند تاثیر بسزایی در روند توزیع شوری در مخزن دارند. به همین دلیل با تحلیل حساسیت، میزان تاثیر هرکدام از این پارامترها مشخص شد.

در طی مطالعات و تحقیقات گذشته، مقادیر عددی مختلفی برای ضریب انحلال پیشنهاد شده است که علت این موضوع وابستگی و حساسیت این پارامتر به اثر مقیاس می باشد. لذا در خصوص تعیین این پارامتر نمی توان اظهار نظر قطعی نمود. به همین جهت در این تحقیق حساسیت و بررسی تاثیر ضریب انحلال نمک بر نحوه توزیع شوری در مخزن مورد مطالعه قرار گرفت. برای این کار مقدار ضریب انحلال را در محدوده ($220 < SC < 120$) در نظر گرفته و مجدداً مدل عددی اجرا شد. به عنوان اولین بررسی دو نقطه در امتداد مخزن و در یک رقوم مشخص در نظر گرفته شد و P_1 و P_3 نامگذاری شدند. در مرحله بعد مدل عددی با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها با ضرایب انحلال مختلف در بازه تعیین شده اجرا شد. مقادیر غلظت نمک در بازه های زمانی ۲ ماهه در نقاط مشخص شده و با ضرایب انحلال مختلف قرائت شدند. در جدول ۳.۵ و ۴.۵ مقادیر غلظت نمک در این نقاط با واحد کیلوگرم بر مترمکعب و در ضرایب انحلال مختلف نشان داده شده است.

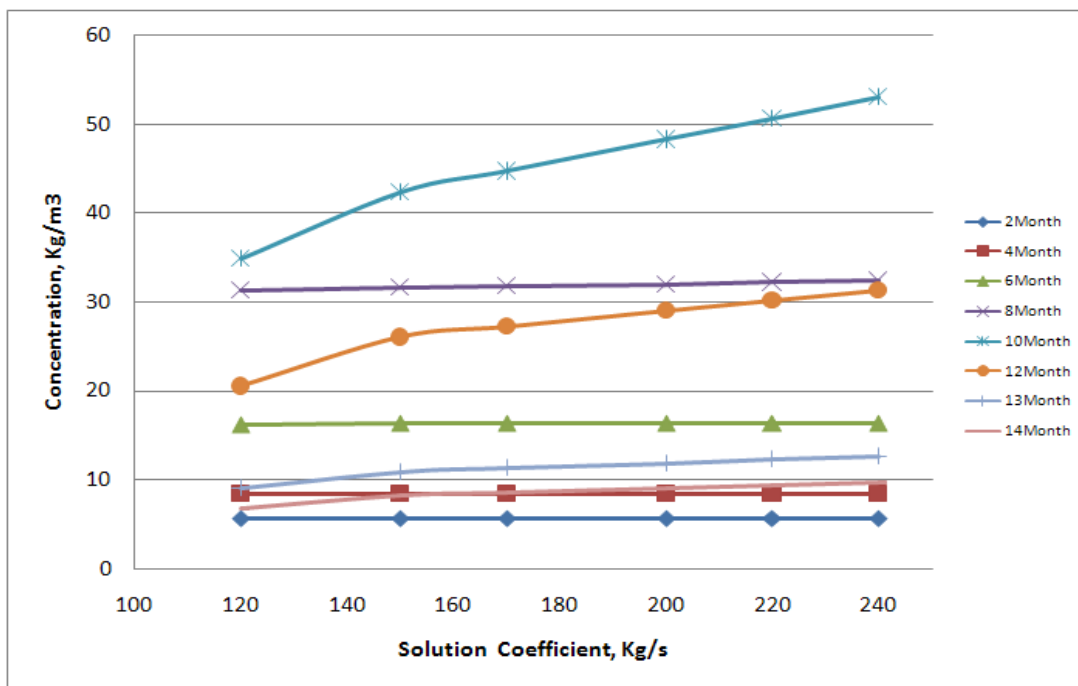
در شکل های ۱۷.۵ و ۱۸.۵ نمودار مربوط به مقادیر غلظت جداول ۳.۵ و ۴.۵ مشاهده می شود.

جدول (۳.۵): مقادیر غلظت نمک در بازه های ۲ ماهه در نقطه P_1 با ضرایب انحلال مختلف

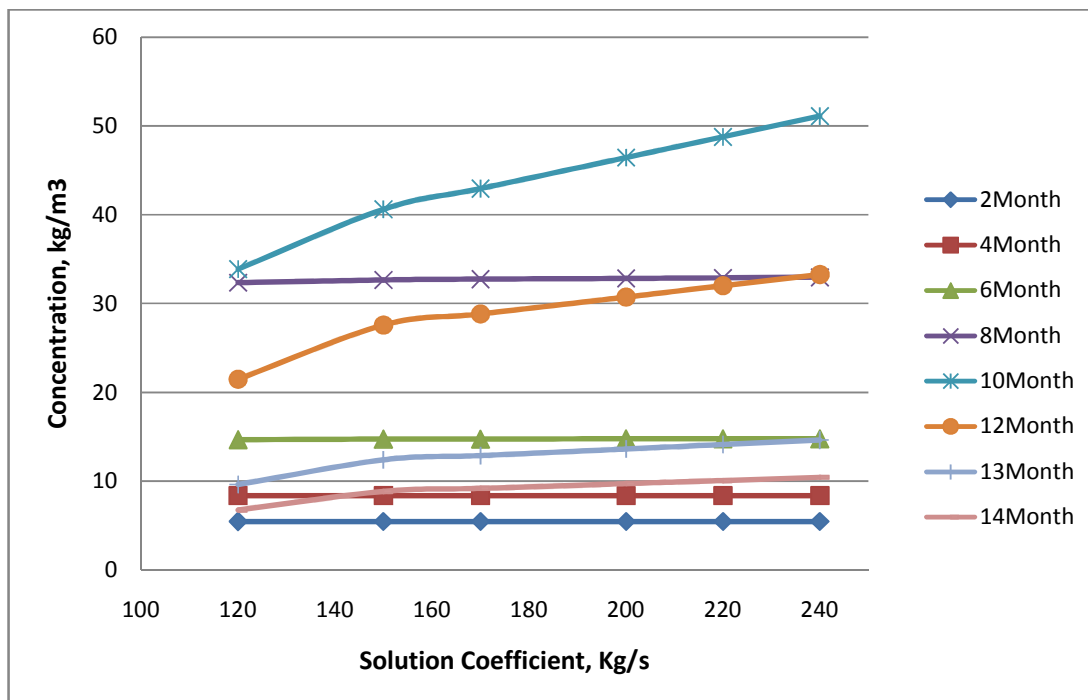
	P_1					
	120	150	170	200	220	240
2Month	۵.۶۷۰	۵.۶۶۳	۵.۶۴۷	۵.۶۳۶	۵.۶۲۲	۵.۶۲۱
4Month	۸.۴۳۰	۸.۴۱۰	۸.۳۸۸	۸.۳۶۷	۸.۳۵۷	۸.۳۵۳
6Month	۱۶.۲۵۳	۱۶.۳۵۹	۱۶.۳۵۵	۱۶.۳۵۵	۱۶.۳۶۱	۱۶.۳۷۴
8Month	۳۱.۲۶۳	۳۱.۵۷۲	۳۱.۷۵۵	۳۲.۰۱۳	۳۲.۱۸۵	۳۲.۳۵۵
10Month	۳۴.۸۳۳	۴۲.۳۱۷	۴۴.۶۸۹	۴۸.۲۸۳	۵۰.۶۷۹	۵۳.۰۷۵
12Month	۲۰.۴۸۷	۲۶.۰۱۶	۲۷.۱۹۳	۲۸.۹۷۸	۳۰.۱۵۸	۳۱.۳۲۵
13Month	۸.۹۹۱	۱۰.۸۷۵	۱۱.۲۶۶	۱۱.۸۷۶	۱۲.۲۸۰	۱۲.۶۸۶
14Month	۶.۸۰۹	۸.۲۹۵	۸.۵۸۲	۹.۰۲۴	۹.۳۲۵	۹.۶۲۲

جدول (۴.۵): مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۲ ماهه در نقطه P^۳ با ضرایب انحلال مختلف

	P ^۳					
	120	150	170	200	220	240
2Month	۵.۴۴۴	۵.۴۵۳	۵.۴۵۵	۵.۴۵۸	۵.۴۵۹	۵.۴۶۰
4Month	۸.۳۸۲	۸.۳۷۷	۸.۳۷۸	۸.۳۸۱	۸.۳۸۳	۸.۳۸۶
6Month	۱۴.۶۸۵	۱۴.۷۲۹	۱۴.۷۵۱	۱۴.۷۷۲	۱۴.۷۸۰	۱۴.۷۸۳
8Month	۳۲.۳۵۹	۳۲.۶۶۶	۳۲.۷۴۴	۳۲.۸۳۴	۳۲.۸۹۴	۳۲.۹۵۱
10Month	۳۳.۸۷۹	۴۰.۶۱۷	۴۲.۹۴۱	۴۶.۴۳۶	۴۸.۷۶۵	۵۱.۰۹۵
12Month	۲۱.۴۸۱	۲۷.۵۸۱	۲۸.۸۳۲	۳۰.۷۳۵	۳۲.۰۰۴	۳۳.۲۶۳
13Month	۹.۶۲۸	۱۲.۳۹۸	۱۲.۸۸۲	۱۳.۶۲۵	۱۴.۱۲۵	۱۴.۶۲۳
14Month	۶.۷۳۵	۸.۸۳۲	۹.۱۷۸	۹.۷۱۵	۱۰.۰۷۶	۱۰.۴۴۰

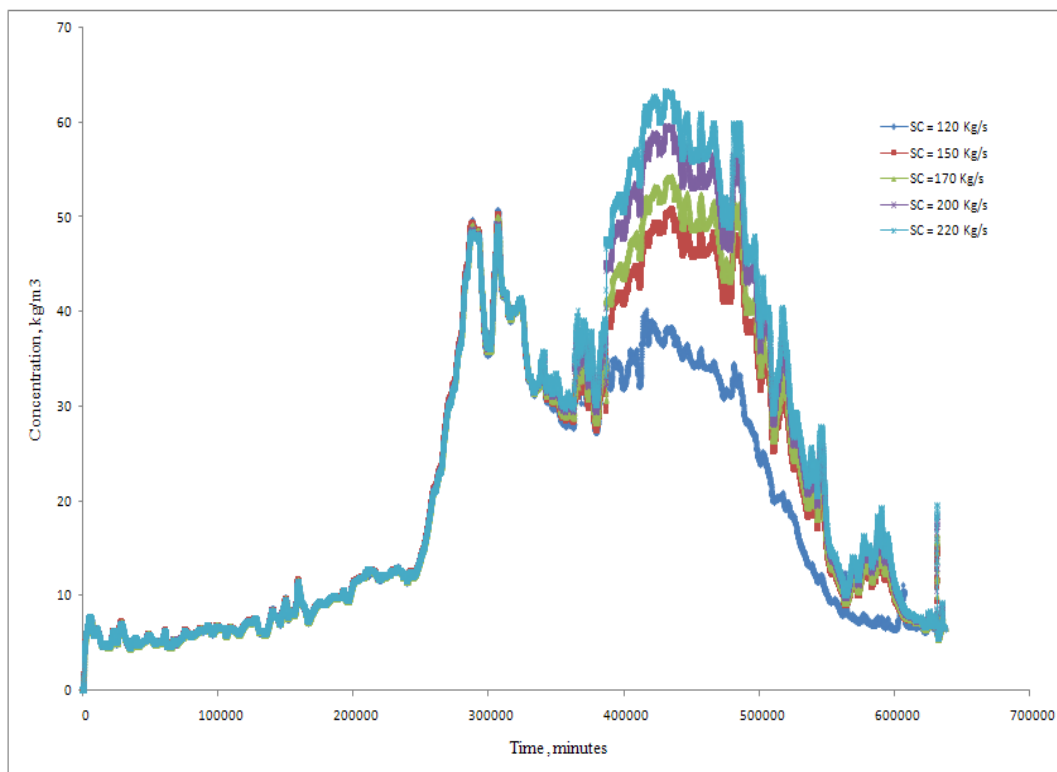


شکل (۱۷.۵): نمودار مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۲ ماهه در نقطه P^۱ با ضرایب انحلال مختلف



شکل (۱۸.۵): نمودار مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۲ ماهه در نقطه P^3 با ضرایب انحلال مختلف

با کمی تامل در نمودارهای بالا مشاهده می‌شود که در هر دو نمودار که مربوط به دو نقطه در مخزن می‌باشند (شکل ۱۷.۵ مربوط به نقطه‌ای در نزدیکی کارست نمکی و شکل ۱۸.۵ مربوط به نقطه دیگر که نزدیک به محور سد است)، روند خاصی مشاهده می‌شود. نتیجه مشخص اینست که در ماه‌های اول با تغییر مقدار ضریب انحلال، تغییر قابل توجهی در مقدار غلظت نمک در هیچ‌کدام از نمودارها مشاهده نمی‌شود. 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 مجدداً کاهش می‌یابد. این بدان معناست که برای پروژه حاضر مقادیر غلظت، در اواسط دوره شبیه‌سازی حساسیت بیشتری نسبت به تغییر پارامتر ضریب انحلال از خود نشان می‌دهند. اگر نمودار مربوط به غلظت نمک با ضرایب انحلال مختلف در یک نقطه به عنوان مثال در نزدیکی ناحیه کارستی و در محل خروجی مخزن را نسبت به زمان رسم نماییم صحت این ادعا بیشتر تایید می‌شود. در شکل ۱۹.۵ نمودار تغییرات غلظت نمک با ضرایب انحلال مختلف مشاهده می‌شود.



شکل (۱۹.۵): نمودار تغییرات غلظت نمک در اثر تغییر ضریب انحلال در نقطه‌ای نزدیک به ناحیه کارست نمکی

همانطور که در نمودار بالا مشاهده می‌شود تغییرات غلظت نمک با تغییر در مقدار ضریب انحلال در ماه‌های میانی شبیه‌سازی مشاهده می‌شود.

در ادامه میزان متوسط درصد تغییرات مقادیر شوری با تغییر در مقدار ضریب انحلال نمک مورد بررسی قرار گرفت. در مقدار مقادیر شوری در نقطه نزدیک به ناحیه کارست نمکی که با استفاده از اجرای مدل با ضرایب انحلال ۲۰۰ و ۲۲۰ کیلوگرم بر ثانیه بدست آمدند، افزایشی معادل ۲۱ درصد مشاهده می‌شود. البته این مقدار متوسط، تغییرات را در کل بازه‌ی شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد و همانطور که قبلاً هم بحث شد مقدار تغییرات در دوران اولیه شبیه‌سازی بسیار ناچیز و بعد از آن شیب تغییرات افزایش می‌یابد و درصد تغییرات نسبت به مقدار متوسط بیشتر می‌شود و بعد از این دوره مجدداً رفتار کاهشی از خود نشان می‌دهد.

۲.۴.۵ دمای هوا

یکی از پارامترهایی که در نحوه توزیع شوری در مخزن موثر می‌باشد، دمای هوا است. حوزه‌های آبی به دلیل گستردگی و وسعت بسیار زیاد تحت تاثیر پارامترهای آب و هوایی می‌باشند. دمای هوا، میزان تبخیر، رطوبت نسبی، درصد ابری بودن هوا و میزا تابش امواج خورشیدی، میزان بارندگی، بارش برف، تعداد ماه‌های یخبندان و ... پارامترهایی هستند که بر هیدرودینامیک حوزه‌های آبی تاثیر می‌گذارند. دمای هوا به دلیل اینکه سبب تغییرات چگالی در لایه‌های ارتفاعی می‌گردد بر پدیده لایه‌بندی حرارتی مخزن تاثیرگذار می‌باشد و به همین دلیل بر هیدرودینامیک مخزن و متعاقباً بر چگونگی توزیع شوری در مخزن تاثیرگذار خواهد بود.

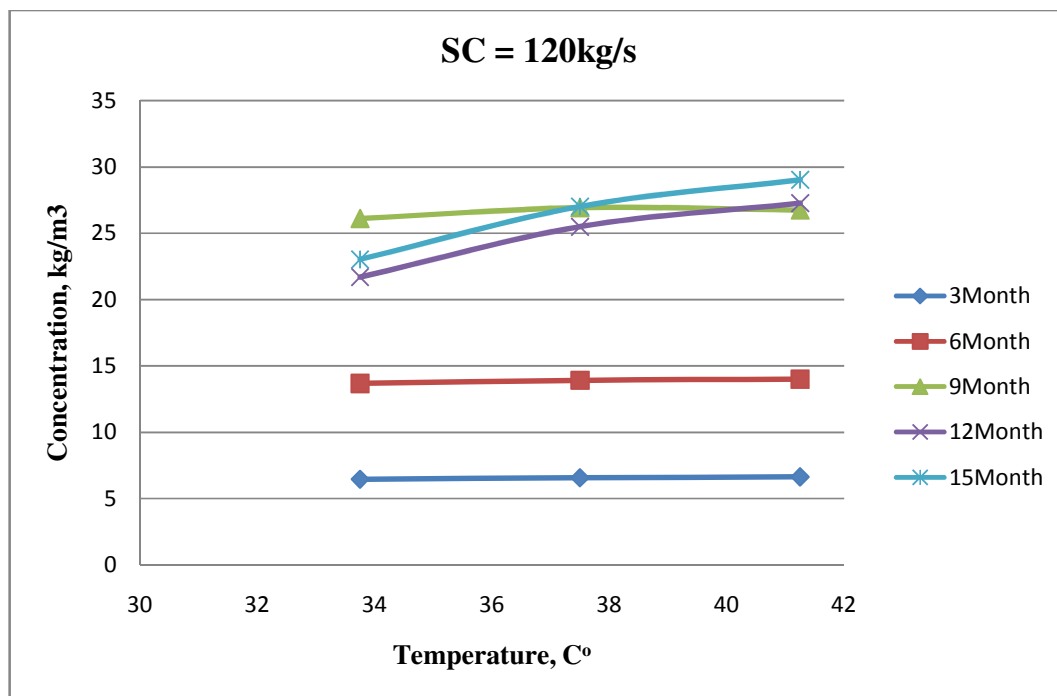
برای بررسی اثر پارامتر دما بر نحوه توزیع شوری در مخزن، پارامترهای دیگر را ثابت نگه داشته و مدل با تغییر در پارامتر دما مجدداً اجرا شد. برای تحلیل حساسیت مدل در اثر تغییرات دما، مقادیر دما ۱۰ درصد کاهش و افزایش داده شد و مدل در هر دو حالت مجدداً اجرا شد. در این تحلیل ضرایب انحلال ۱۲۰ و ۲۲۰ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته شد. پس از اتمام اجرای مدل، مقادیر غلظت نمک در دماها و ضرایب انحلال مختلف قرائت شد. در جداول ۵.۵ و ۶.۵ و شکل‌های ۲۰.۵ و ۲۱.۵ مقادیر قرائت شده غلظت در دماهای مختلف و ضرایب انحلال ۱۲۰ و ۲۲۰ کیلوگرم بر ثانیه و در بازه‌های ۳ ماهه نشان داده شده‌است.

جدول (۵.۵): مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۳ ماهه و دماهای مختلف

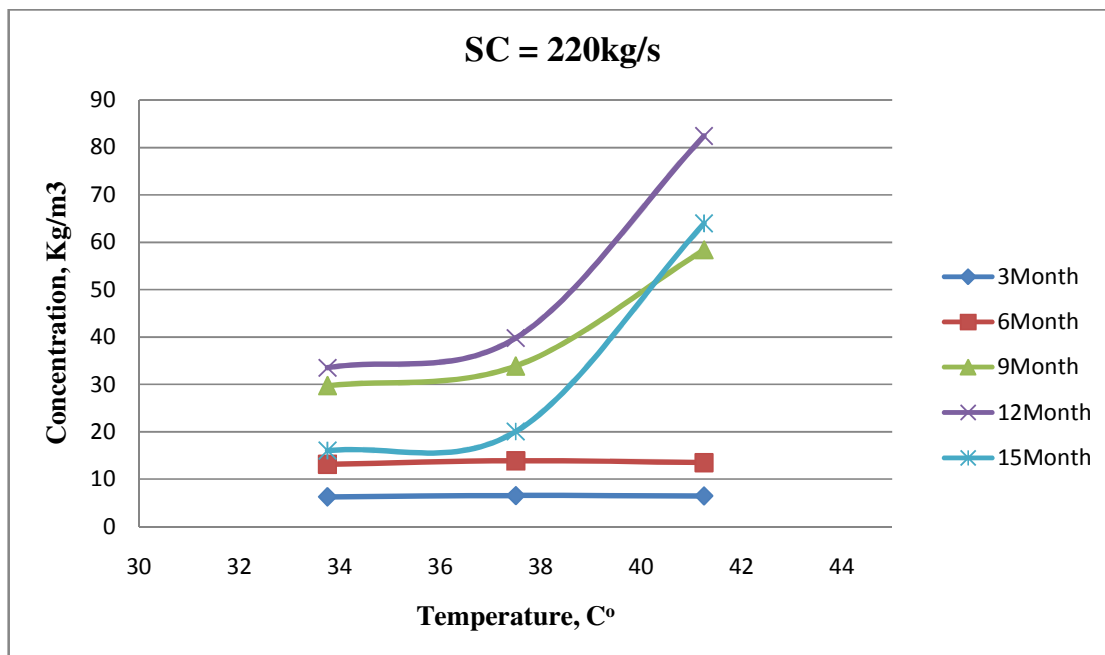
SC = 220 kg/s					
Temp.	T= 3Month	T= 6Month	T= 9Month	T= 12Month	T= 15Month
33.75	6.294	13.181	29.748	33.533	16.074
37.5	6.588	13.904	33.883	39.813	20.092
41.25	6.491	13.514	58.421	82.415	63.991

جدول (۶.۵): مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۳ ماهه و دماهای مختلف

SC = 120 kg/s					
Temp.	T= 3Month	T= 6Month	T= 9Month	T= 12Month	T= 15Month
33.75	6.47504	13.6898	26.1019	21.6905	23.024
37.5	6.585	13.9201	26.9375	25.490	27.024
41.25	6.640	14.004	26.756	27.2739	29.024



شکل (۲۰.۵): نمودار مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۳ ماهه و دماهای مختلف



شکل (۲۱.۵): نمودار مقادیر غلظت نمک در بازه‌های ۳ ماهه و دماهای مختلف

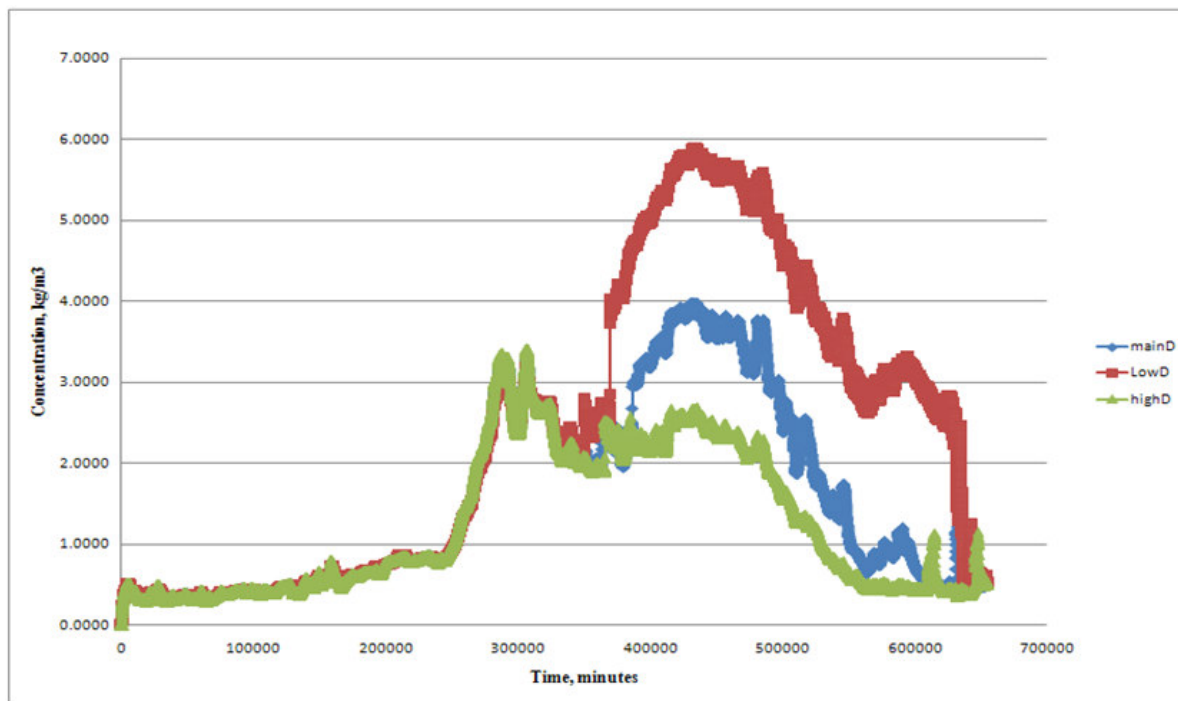
با کمی تامل در شکل‌های ۲۰.۵ و ۲۱.۵ درمی‌یابیم که در هر دو نمودار به ازای افزایش دما در دوره‌های میانی شبیه‌سازی، افزایش در غلظت نمک را شاهد هستیم منتهی این میزان افزایش در مقدار غلظت، در ضریب انحلال ۲۲۰ کیلوگرم بر ثانیه نسبت به ضریب انحلال ۱۲۰ کیلوگرم بر ثانیه با شدت بیشتری صورت می‌گیرد. می‌توان دریافت که در مجموع به‌طور متوسط 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 تاثیر دما بر حجم آب مخزن و همچنین تاثیراتی که بر لایه بندی حرارتی مخزن دارد جستجو نمود. کاهش نسبی حجم آب مخزن نسبت به حالت اولیه می‌تواند سبب افزایش غلظت وزنی نمک در آب مخزن گردد 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 و سبب ایجاد جریان‌های چگال در آب مخزن و بهم ریختگی لایه‌های حرارتی شود که این امر می‌تواند سبب تغییر توزیع شوری و کاهش غلظت نمک نسبت به حالت اولیه شود.

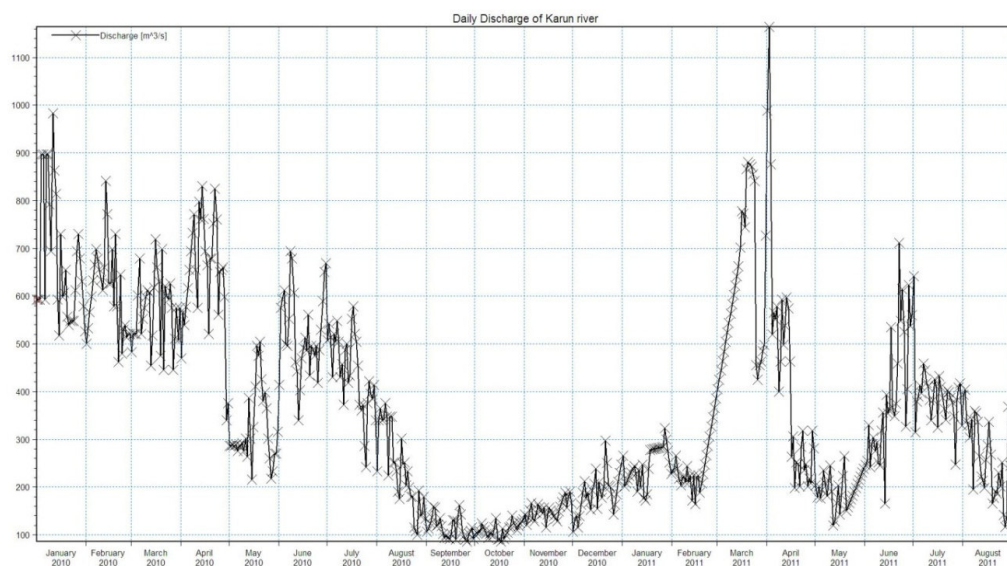
با متوسط‌گیری در تغییرات مقادیر شوری در اثر تغییر دما مشخص شد به‌طور متوسط کاهش ۱۰ درصدی در میزان دمای محیط سبب کاهش ۷.۱ درصدی در مقدار غلظت نمک و افزایش ۱۰ درصدی در دمای محیط سبب افزایش ۳۰ درصدی در مقدار غلظت نمک می‌شود. در واقع اثر افزایش دما بیشتر از اثر کاهش دما بر میزان توزیع شوری در مخزن می‌باشد.

۳.۴.۵ دبی

از پارامترهایی که بر نحوه توزیع شوری در مخزن موثر می‌باشد، دبی ورودی به مخزن است. حجم آب مخزن توسط چندین پارامتر کنترل می‌شود که مهمترین آن، دبی ورودی و خروجی به مخزن می‌باشد. مقدار غلظت وزنی و حجمی نمک نیز بستگی به حجم آب موجود در مخزن دارد. برای بررسی میزان تاثیر دبی بر مقدار غلظت نمک سناریویی طراحی و اجرا شد. مقدار دبی سالیانه ورودی به مخزن به‌وسیله رودخانه بالادست به صورت داده‌های سری زمانی دریافت و مقادیر این داده‌ها به میزان ۱۰ درصد کاهش و افزایش داده شد. با استفاده از داده‌های جدید مدل مجدداً اجرا شد. بعد از اتمام دوره شبیه‌سازی، نتایج حاصل با نتایج اولیه مقایسه و تحلیل گردید. در شکل ۲۲.۵ نمودار مربوط به نتایج حاصل از شبیه‌سازی در دبی‌ها و ضرایب انحلال مختلف نشان داده شده‌است.



شکل (۲۲.۵): نمودار غلظت نمک به ازای دبی های مختلف ($SC=170\text{ kg/s}$)



شکل (۲۳.۵): نمودار دبی اصلی سالیانه رودخانه ورودی به مخزن

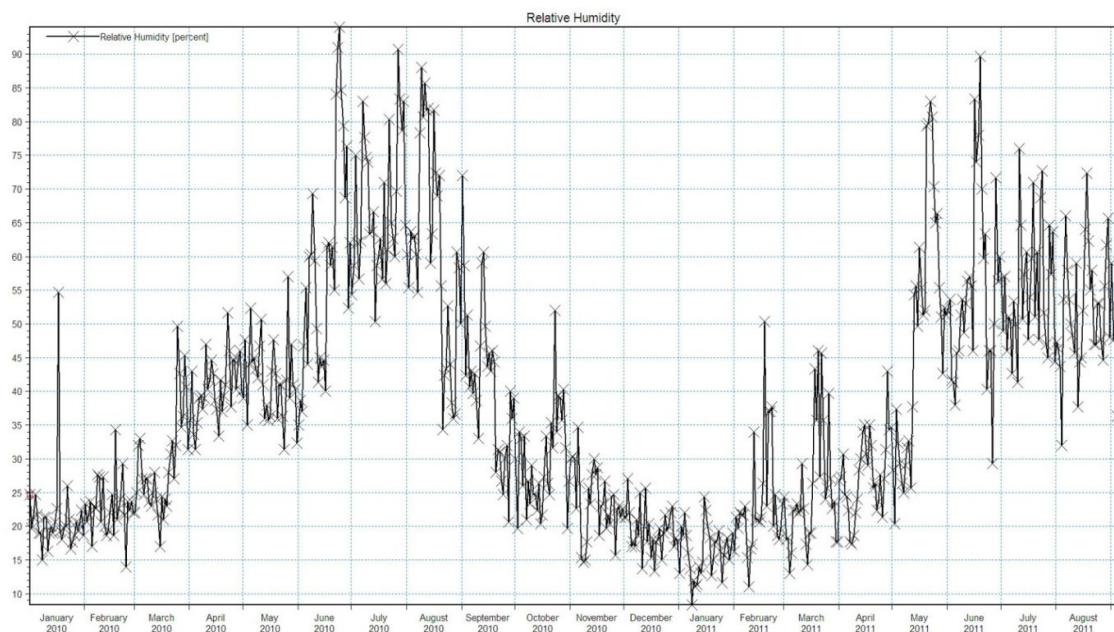
نکته حائز اهمیت در نمودار شکل ۲۲.۵، تغییرات ناچیز غلظت در دوران اولیه شبیه سازی نسبت به نیمه دوم شبیه سازی در اثر تغییرات دبی می باشد. علت این امر را می توان با توجه به نمودار دبی سالیانه رودخانه اینچنین توضیح داد: همانطور که در شکل ۲۳.۵ مشاهده می شود در نیمه دوم نمودار

شاهد افزایش دبی ورودی به مخزن با شیب نسبتاً زیادی می‌باشیم. این افزایش ناگهانی در مقدار دبی ورودی، سبب می‌شود که مقادیر دبی کاهش یافته نسبت به مقادیر اصلی که ۱۰ درصد کاهش داده شده‌اند تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشته که این امر به دلیل ثابت ماندن دبی خروجی، سبب کاهش حجم آب مخزن شده و مقدار غلظت حجمی نمک را بیشتر تحت تاثیر قرار می‌دهد و سبب افزایش زیادی در مقادیر غلظت می‌شود. متوسط میزان این تغییرات در طول دوره شبیه‌سازی در اثر ۱۰ درصد کاهش و افزایش دبی عبارتست از ۲۱.۱ درصد که مقدار زیادی از آن مربوط می‌شود به نیمه دوم دوره شبیه‌سازی. نکته دیگر ثابت ماندن نسبی تغییرات غلظت در اثر تغییر ضریب انحلال می‌باشد که در مورد پارامترهای دیگر معمولاً در ضرایب انحلال مختلف میزان تغییرات نسبت به یک پارامتر خاص متفاوت بوده‌است.

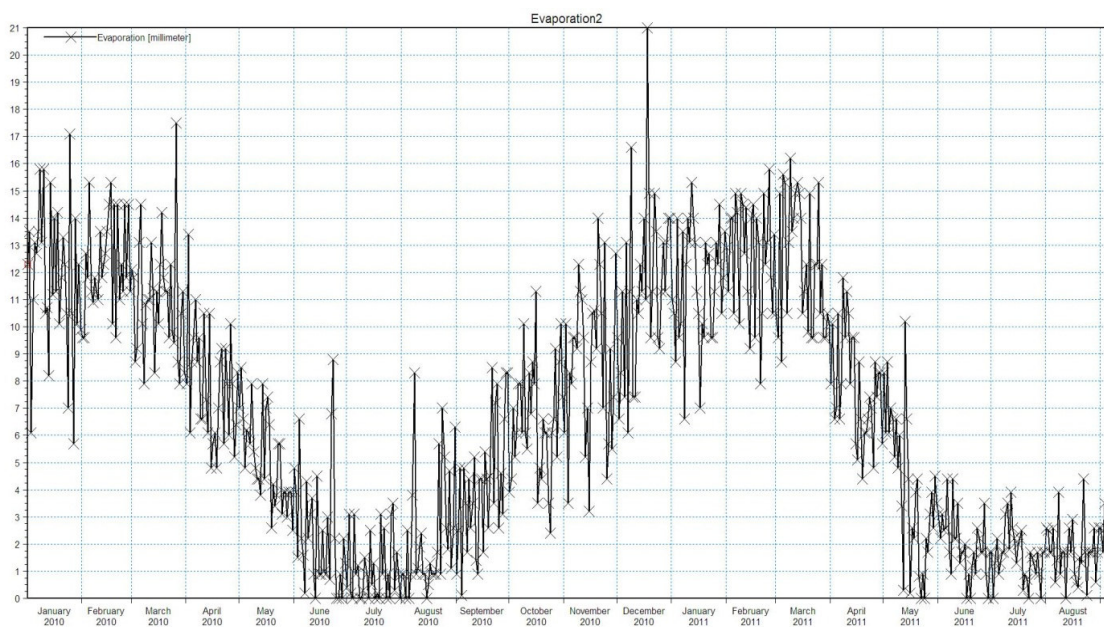
متوسط میزان این تغییرات در طول دوره شبیه‌سازی در اثر ۱۰ درصد کاهش و افزایش دبی عبارتند از: ۲۱.۴ درصد به‌ازای ضریب انحلال ۱۲۰ کیلوگرم بر ثانیه، ۲۱.۱ درصد به‌ازای ضریب انحلال ۱۷۰ کیلوگرم بر ثانیه و ۲۹.۶ درصد به‌ازای ضریب انحلال ۲۲۰ کیلوگرم بر ثانیه که همانطوری که ذکر شد اکثر این تغییرات مربوط می‌شود به نیمه دوم دوره شبیه‌سازی.

۴.۴.۵ رطوبت نسبی

آخرین پارامتری که در این بخش مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد پارامتر رطوبت نسبی و یا تبخیر از سطح دریاچه مخزن می‌باشد که این دو پارامتر در تعامل با یکدیگر رفتار می‌کنند. این بدان معناست که زمانی که رطوبت نسبی هوا کاهش می‌یابد میزان تبخیر سطحی افزایش یافته و بالعکس زمانی که رطوبت نسبی در محیط افزایش می‌یابد میزان تبخیر سطحی کاهش می‌یابد. رابطه عکس رطوبت نسبی و تبخیر سطحی در شکل‌های ۲۴.۵ و ۲۵.۵ مشاهده می‌شود.



شکل (۲۴.۵): نمودار رطوبت نسبی بر حسب درصد

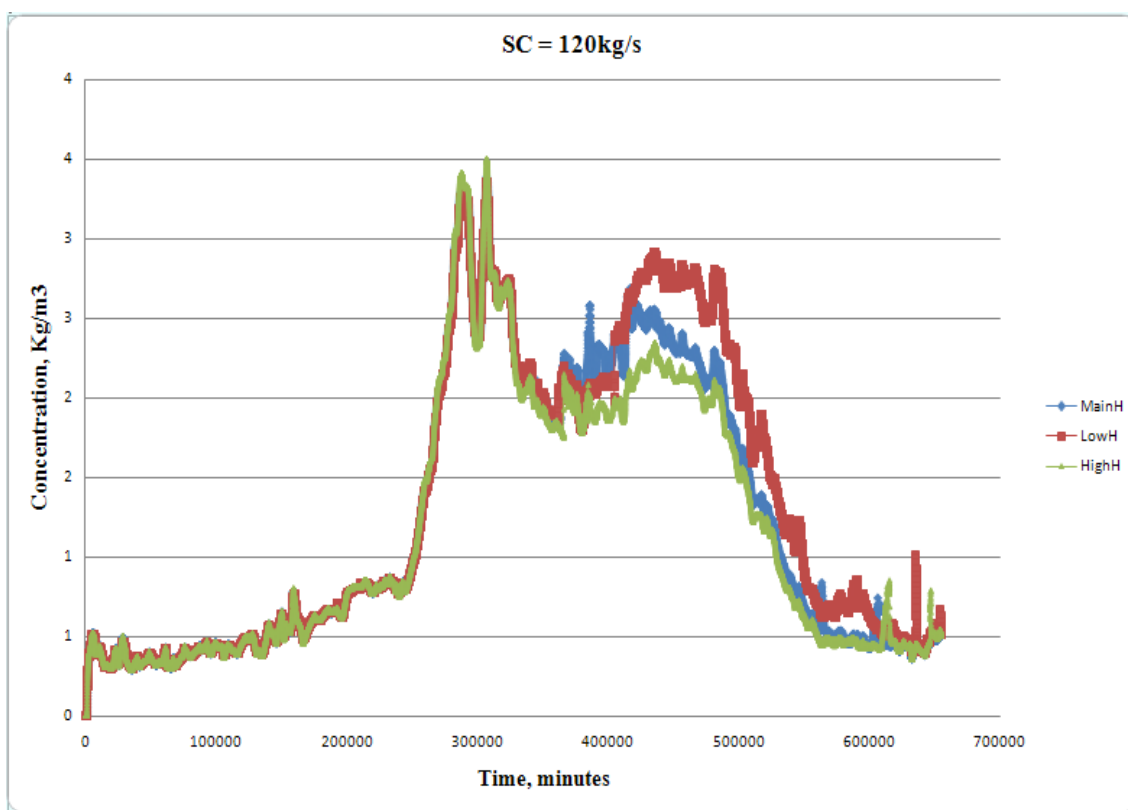


شکل (۲۵.۵): نمودار تبخیر سطحی از مخزن بر حسب میلیمتر

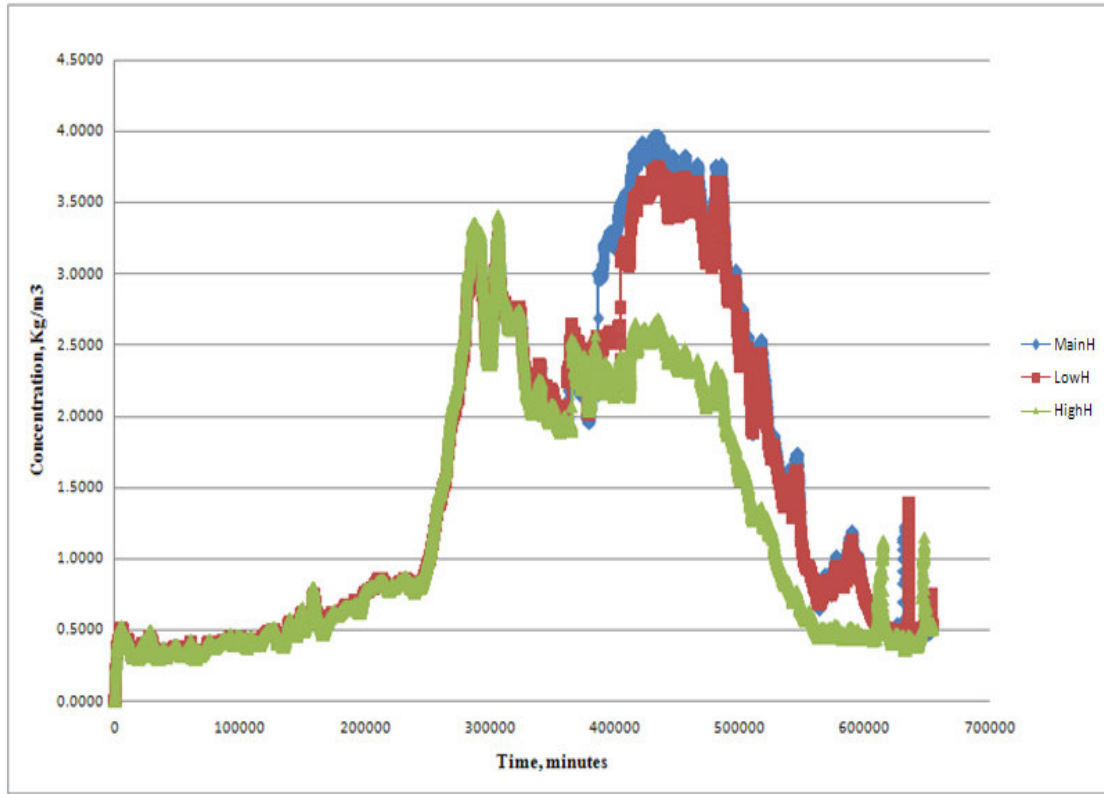
نحوه تاثیر این پارامتر بر نحوه و میزان توزیع شوری در مخزن سد، می تواند بدلیل تاثیر آن بر حجم آب مخزن باشد ولی بدلیل تاثیر نسبتاً ناچیز این پارامتر بر هیدرودینامیک مخزن نسبت به پارامترهای دیگر که در مورد آنها بحث شد نمی توان انتظار تغییرات زیادی را در اثر تغییر این پارامتر داشت.

جهت بررسی میزان تغییرات غلظت نمک در آب مخزن تحت تاثیر این پارامتر هم به مانند قبل عمل می‌کنیم با این توضیح که داده‌های مربوط به تبخیر سطحی مخزن در طی دوره شبیه‌سازی ۱۰ درصد کاهش و افزایش داده شد. در مرحله بعد با استفاده از داده‌های جدید مدل مجدداً اجرا شد و نتایج اولیه و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مجدد، مقایسه گردید.

در شکل‌های ۲۶.۵ و ۲۷.۵ نتایج مربوط به شبیه‌سازی با رطوبت نسبی و ضرایب انحلال مختلف نشان داده شده‌است.



شکل (۲۶.۵): نمودار تغییرات غلظت نمک به ازای تغییر در رطوبت نسبی ($SC=120\text{ kg/s}$)



شکل (۲۷.۵): نمودار تغییرات غلظت نمک به ازای تغییر در رطوبت نسبی ($SC=170 \text{ kg/s}$)

نکته‌ای که در نگاه اول به چشم می‌خورد عدم تغییر مقادیر غلظت نمک در نیمه اول دوره شبیه‌سازی است، موضوعی که در بررسی اثر پارامترهای دیگر نیز مشخص بود. در نیمه دوم دوره شبیه‌سازی تغییرات بیشتری نسبت به نیمه اول به چشم می‌خورد. نکته دیگر این است که با افزایش نسبی رطوبت نسبی، میزان غلظت نمک کاهش می‌یابد. 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 شکل‌های ۲۶.۵ و ۲۷.۵ مشخص می‌باشد. متوسط میزان تغییرات غلظت نمک در طول دوره شبیه‌سازی در اثر ۱۰ درصد کاهش و افزایش در مقدار رطوبت نسبی و تبخیر، ۶.۱ درصد می‌باشد که بیشتر این تغییرات مربوط می‌شود به نیمه دوم دوره شبیه‌سازی.

نتایج بدست آمده از تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر توزیع شوری در این بخش، می‌تواند در جهت حل مشکل شوری مخزن استفاده شود بدین صورت که با کنترل پارامترهایی که بیشترین تاثیر را در توزیع شوری دارند، می‌توان میزان غلظت مواد جامد حل شده در آب مخزن را همواره در طی دوره بهره‌برداری از مخزن در حد مقدار مجاز آن نگه‌داشت.

فصل ششم

جمع بندی و نتیجه گیری

۱.۶ خلاصه تحقیق

۱.۱.۶ تعریف صورت مسئله تحقیق

با توجه به گستردگی مخازن سدهای بزرگ و عدم امکان تغییر محور سدها به دلیل محدودیت‌های مختلف امکان دارد که پس از آبیگری، آب دریاچه سد با سازندهای کارستی (که می‌تواند متشکل از لایه‌های آهکی، گچی و یا نمکی باشند که در این پایان نامه مورد آخر مورد مطالعه قرار گرفت) در تماس قرار بگیرد که به دلیل انحلال پذیری بالای نمک، یکی از خطراتی که پس از بهره‌برداری از سد امکان وقوع دارد کاهش کیفیت آب مخزن خواهد بود. در این مطالعه، مخزن یک سد در معرض سازند کارستی نمکی قرار گرفت که شرایط کیفی و بهره‌برداری از مخزن را تحت‌الشعاع خود قرارداد. پدیده انحلال همواره تابعی از شرایط حلال و ماده حل‌شونده درگیر با آن بوده‌است. این موضوعی است که در تحقیقات گذشته توسط دانشمندان مختلف به اثبات رسیده است. در تحقیق حاضر ماده حل‌شونده، لایه‌های نمک موجود در سازند کارستی و حلال درگیر، حجم آب مخزن می‌باشد.

سوال اصلی این است که آیا با مدلسازی عددی و بررسی آزمایشگاهی، مشکلات ناشی از وجود سازندهای کارستی در مخازن سدها قابل شناسایی و کاهش می‌باشد؟

۲.۱.۶ روش انجام تحقیق

در تحقیق حاضر تلاش براین بود تا با استفاده از ابزار مدلسازی، حتی‌الامکان پیش‌بینی صحیح و درستی از شرایط کیفی مخزن آب سد در اندرکنش با سازند کارست نمکی صورت گیرد تا بتوان با استفاده از این نتایج راه‌کارهایی جهت تسکین مشکل شوری در مخزن ارائه نمود. البته در درجه اول با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، پیشنهاد می‌شود احداث سد در این مناطق صورت نگیرد زیرا امکان دارد در مواردی کلیه اهداف پیش‌بینی شده جهت ساخت سد برآورده نگردد.

روش انجام این تحقیق بر سه محور مطالعات میدانی، استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و مدلسازی عددی استوار بود. ابتدا با مطالعه مدل آزمایشگاهی ضریب انحلال نمک در شرایط مختلف تعیین شد. برای این منظور مدل فیزیکی مربوط به مخزن طراحی و ساخته شد و از نمونه‌های سنگ نمک موجود در سازند کارست نمکی مخزن برای انجام آزمایش استفاده شد. برای اجرای مدل فیزیکی از برنامه آبگیری مخزن استفاده شد. این مدل در حالت‌های مختلف اجرا و نتایج مربوط به مقدار انحلال و مقادیر غلظت نمک در مقاطع زمانی مختلف به دست آمد. در مرحله بعد با شبیه‌سازی عددی مدل آزمایشگاهی و تطبیق نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش مدل فیزیکی، ضریب انحلال نمک و نرخ ورود نمک به داخل مخزن تعیین شد.

یکی از روش‌های قابل اطمینان در بررسی مسئله یعنی وجود سازندهای کارستی نمکی در مخازن سدها و مشکلات ناشی از آن و پیش بینی رفتار کیفی مخزن در حضور سازند کارست نمکی، شبیه‌سازی عددی و استفاده از مدل‌های ریاضی می‌باشد. مدل عددی مورد استفاده، مدل مشهور MIKE21 ساخت شرکت آب و محیط زیست DHI می‌باشد. مدل MIKE سیستم مدلسازی عددی پیشرفته‌ای می‌باشد که جهت کاربردهای وسیعی در حوزه‌های مختلف از جمله اقیانوس‌ها، سواحل و بنادر، خلیج، دریاچه‌ها و مخازن سدها توسعه داده شده است. این مدل از معادلات حاکم بر هیدرودینامیک مخزن (معادلات بقای جرم و مومنتوم) و معادلات پخش و حمل (Advection-Dispersion Equations) برای شبیه‌سازی مخزن استفاده می‌کند.

در مرحله بعد مدل عددی به مخزن واقعی تعمیم داده شد و با شبیه‌سازی مخزن واقعی با استفاده از ضریب انحلال بدست آمده از مطالعه آزمایشگاهی، چگونگی تاثیر سازند کارستی نمکی بر شرایط کیفی مخزن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در ادامه تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر توزیع شوری و رفتار سازند نمکی، مانند ضریب انحلال، دبی، دما و رطوبت نسبی انجام شد و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۲.۶ خلاصه نتایج ارائه شده

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 محاسبه شد.

نرخ ورود نمک به آب و به عبارتی ضریب انحلال نمک، تابعی از ضخامت لایه مرزی پخش‌شدگی می‌باشد و ضخامت لایه مرزی پخش‌شدگی نیز به‌نوبه خود تابعی از ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی می‌باشد. ضخامت لایه مرزی پخش‌شدگی تابعی از سیال نیز می‌باشد. در نتیجه نرخ انحلال نمک ابتدا به نوع سیال در تماس با آن و سپس به شرایط جریان حلال درگیر و کلیه پارامترهایی بستگی دارد که بر ضخامت لایه مرزی هیدرودینامیکی و به تبع آن بر ضخامت لایه مرزی پخش‌شدگی تاثیر می‌گذارند.

شرایط مخزن سد در طی دوره آنگیری و بهره‌برداری از آن می‌تواند شرایط متنوعی می‌باشد و در هر بازه‌ی زمانی شاهد تغییرات در مقادیر داده‌های هیدرولیکی، هیدرودینامیکی و آب‌وهوایی بود که این موضوع را می‌توان در داده‌های مربوط به مخزن مشاهده نمود. این تغییرات می‌توانند سبب شوند تا در طی دوره شبیه‌سازی شاهد تغییرات در شرایط هیدرولیکی و هیدرودینامیکی جریان باشیم که این امر می‌تواند سبب تغییر در نحوه توزیع شوری در مخزن شود. به‌همین دلیل قابل پیش‌بینی بود که در طی دوره شبیه‌سازی با مراحل مختلفی از توزیع شوری در مخزن در اثر انحلال سازند نمکی روبرو شویم.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مخزن با استفاده از ضریب انحلال بدست‌آمده از مطالعه آزمایشگاهی، 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. مقدار ماکزیمم غلظت نمک در نقطه‌ای نزدیک به سازند کارستی

در حدود ۴۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بدست آمد در صورتی که مقدار مجاز غلظت نمک در آب شرب و آب کشاورزی در مراجع مختلف حدود ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر ذکر شده است (Jeschke et al., ۲۰۰۰). این نشان‌دهنده اینست که احداث سد در مناطق دارای سازندهای کارستی که دارای لایه‌های ضخیم نمک می‌باشند سبب افزایش انحلال لایه‌های نمکی موجود در سازند و نیز افزایش احتمال وقوع فروریزش‌ها به داخل مخزن سد خواهد شد.

نتایج تحلیل مدل عددی نشان داد که ماه‌های اول بهره‌برداری نسبتاً ماه‌های بحرانی برای پروژه مورد مطالعه محسوب نمی‌شوند و غلظت وزنی نمک موجود در آب مخزن در حدود ۰.۸ تا ۰.۹ مقدار مجاز خواهد بود. 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 و مدل عددی مشخص شد که متوسط درصد خطای مقادیر غلظت حدود ۱۳.۶۵ درصد می‌باشد و مدل عددی در اکثر زمان‌های اندازه‌گیری شده مقادیر غلظت را اندکی کمتر از مقادیر واقعی نشان می‌دهد.

در ادامه با انجام تحلیل حساسیت پارامترهای موثر بر توزیع شوری، مشخص شد که این پارامترها تاثیر قابل توجهی در نحوه توزیع شوری و مقدار غلظت نمک در مخزن دارند. این نتایج نشان داد که بطور متوسط با ۱۰ درصد تغییر در پارامترهای بررسی شده، پارامتر ضریب انحلال به میزان ۲۱ درصد، دمای هوا ۱۸ درصد، دبی ۲۱.۱ درصد و رطوبت نسبی ۶.۱ درصد موجب تغییر در مقادیر شوری آب مخزن می‌شوند. با توجه به این نتایج مشهود است که پارامترهای ضریب انحلال نمک و دبی مهمترین عوامل تاثیرگذار بر رفتار توزیع شوری در مخزن هستند. همچنین نتایج نشان داد که مقادیر غلظت نمک در اواسط دوره بهره‌برداری نسبت به ماه‌های ابتدایی حساسیت بیشتری از خود در اثر تغییر در پارامترهای موثر نشان می‌دهند.

با انجام تحلیل حساسیت پارامترهایی که پیش‌بینی می‌شد بیشترین تاثیر را در مسئله شوری داشته باشند، مشخص شد که می‌توان با کنترل این پارامترها در صورت امکان باعث کاهش نرخ ورود نمک به آب مخزن شد و الگوی پخش شدگی شوری در مخزن را در جهت مثبت تغییر داد.

۳.۶ پیشنهادات

۱. همانطور که در فصل پنجم مشاهده شد، نرخ انحلال و ورود نمک به داخل مخزن از عوامل تاثیرگذار در نحوه توزیع شوری و میزان غلظت نمک در آب مخزن می‌باشد. به‌همین دلیل هر عملیاتی که بتواند بر رفتار سازند کارستی تاثیرگذار باشد و آنرا کنترل نماید می‌تواند سبب کاهش مشکل شوری در مخزن شود. به عنوان مثال احداث پتوی رسی آب‌بند در طول ناحیه کارستی می‌تواند تا حدی تاثیرگذار باشد. علت این امر اینست 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 پخش شدگی شوری در مخزن می‌شود و میزان غلظت نمک در طی دوره بهره‌برداری را کاهش می‌دهد.
۲. در فصل پنجم مشخص شد که دبی ورودی به مخزن از طریق رودخانه بالادست به‌دلیل تاثیراتی که بر شرایط هیدرودینامیکی مخزن می‌گذارد، تاثیر مستقیم بر روند توزیع شوری در مخزن دارد. به‌همین دلیل با کنترل دبی ورودی به مخزن از طریق مخازن بالادست (در صورت وجود) می‌توان روند پخش و توزیع شوری در مخزن را کنترل نمود که البته این امر نیازمند برنامه‌ریزی بسیار دقیق و توجه به محدودیت‌های بهره‌برداری می‌باشد.
۳. استفاده از مدل‌های بهره‌برداری بهینه کمی-کیفی از مخازن سدها نیز می‌تواند در زمینه تسکین مشکل شوری مفید باشد. مدل‌های بهره‌برداری بهینه کمی، کمیت آب خروجی را با توجه به میزان نیاز آبی پایین‌دست بهینه می‌کنند. با وارد کردن قید کیفی در مدل‌های بهره-

برداری بهینه کمی می‌توان از شرایط موجود مخزن، آب با کیفیت بهتری استحصال نمود. مطالعه حاضر مثال ساده‌ای از استفاده از نتایج مدل‌سازی مربوط به نحوه توزیع شوری در مخزن در طی دوره شبیه‌سازی و شرایط کیفی آب مخزن در دوره‌های مختلف بود. مدل‌سازی‌های تکمیلی با توجه به در نظر گرفتن نیاز آبی پایین دست می‌تواند به مدیریت مخزن کمک کرده و برداشت آب با بهینه کیفیت ممکن را منجر شود.

۴. هم‌اکنون در صنعت تصفیه آب و استفاده از آب پاک، تکنولوژی‌های جدیدی توسط محققان مختلف عرضه شده‌است. یکی از این تکنولوژی‌ها استفاده از غشاهای نفوذناپذیر نانوپلیمر در صنعت تصفیه آب می‌باشد. این غشاها قابلیت جداسازی مواد محلول در آب را دارند. می‌توان با کاربرد و نصب این لایه‌های تصفیه کننده در خروجی‌های سد اعم از تخلیه‌کننده تحتانی، آبیگر کشاورزی، آبیگر نیروگاه و... از میزان غلظت نمک در آب مخزن کاست و آن را به حد کنترل شده رساند. البته باید تدابیری اندیشیده شود تا حتی‌الامکان در سال اول آبیگری از سرریز شدن آب سد جلوگیری شود.

فهرست منابع:

۱. بهنام طلب، احسان، ۱۳۸۴، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی میزان انحلال کارست گچی و روش‌های بهسازی آن‌ها در پی سدهای خاکی و سنگریزه"، دانشگاه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۲. پرهیزگار، محمدرضا، ۱۳۸۶، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، "بررسی مخاطرات زمین‌شناسی در محدوده سد تنگ سرخ شیراز (با نگرشی بر انحلال پذیری ژئوپس)"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس
۳. حائری، س.م و رضائیه، ف، ۱۳۸۶، پایان‌نامه کارشناسی ارشد "بررسی و تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی انحلال و آب‌شستگی کارست نمکی در مخازن سدها"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
۴. فقیهی، م، ۱۳۸۷، "مدلسازی لایه بندی حرارت و شوری در مخزن سد ۱۵ خرداد با استفاده از مدل *DYRESM*"، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب ایران
۵. Veni G. (۱۹۹۸), "A geomorphological strategy for conducting environmental impact assessments in karst areas." Elsevier. *Geom.* ۳۱, ۱۵۱-۱۸۰.
۶. Ford, D.C., Williams, P.W., "Karst Geomorphology and Hydrology." Unwin Hyman, London, ۱۹۸۹.
۷. James, A.N., "Soluble materials in civil engineering." Ellis Horwood Series in Civil Engineering: Ellis Horwood, Chichester, England. ۴۳۴ pp, ۱۹۹۲.
۸. Breznik, M., "Storage Reservoirs and Deep Wells in Karst Regions." A.A Balkema, Rotterdam, ۱۹۹۸.
۹. Milanovic P.T., "Geological Engineering In Karst." Zebra Pub., ۲۰۰۰.
۱۰. Dreybrodt, W., Eisenlohr, L., "Limestone dissolution rates in karst environments." Soc., USA, pp. ۱۳۶-۱۴۸, ۲۰۰۰.
۱۱. Kaufmann G., Romanov D. and Hiller T. (۲۰۱۰), "Modelling three-dimensional karst aquifer evolution using different matrix-flow contributions." *Journal of Hydrology* ۳۸۸, ۲۴۱-۲۵۰.
۱۲. Alkattan M., Oelkers E. H., Dandurand J. L. and Schott J. (۱۹۹۷), "Experimental studies of halite dissolution kinetics. ۱. The effect of saturation state and the presence of trace metals." *Chem. Geol.* ۱۳۷, ۲۰۱-۲۱۹.
۱۳. Plummer L. N., Wigley T. M. L. and Parkhurst D. L. (۱۹۷۸), "The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at ۵° to ۶۰°C and ۰.۰ to ۱.۰ atm CO₂." *Am. J. Sci.* ۲۷۸, ۱۷۹-۲۱۶.

۱۴. Svensson U. and Dreybrodt W. (۱۹۹۲), “*Dissolution kinetics of natural calcite minerals in CO_۲-water systems approaching calcite equilibrium.*” Chem. Geol. ۱۰۰, ۱۲۹-۱۴۵.
۱۵. Dreybrodt W. (۱۹۹۰), “*A model of karstification in the vicinity of hydraulic structures.*” IAHS Publ. no. ۲۰۷, ۱۹۹۳.
۱۶. Dreybrodt W. (۱۹۸۸), “*Processes in Karst Systems.*” Springer Ser. Phys. Environ., Berlin.
۱۷. Kaufmann G. and Dreybrodt W. (۲۰۰۷), “*Calcite dissolution kinetics in the system CaCO_۳-H_۲O-CO_۲ at high undersaturation.*” Geochim. Cosmochim. Acta ۷۱, ۱۳۹۸-۱۴۱۰.
۱۸. Jeschke A., Vosbeck K. and Dreybrodt (۲۰۰۰), “*Surface controlled dissolution rates of gypsum in aqueous solutions exhibit nonlinear dissolution kinetics*” Geochim. Cosmochim. Acta ۶۵, ۲۷-۳۴.
۱۹. Sadeghi, H., Khosravi, F., “*Influence of joint in the phenomena of solubility of limestone.*” Journal of Engineering Geology , Vol.I,NO۲, Summer ۲۰۰۳

Abstract

Dams are one of the major hydraulic structures that are constructed in all regions of the world, especially in arid and semiarid areas for control and management of surface waters. Their structural behavior and operation are in very strong relation with geological conditions of where they are built on. So all possible risks should be reviewed within the dam site and the reservoir and eliminated or reduced as far as possible. The presence of halite karst systems in dam reservoirs can be one of the crucial sources of pollutants for the water resources. Karst is one of the most amazing phenomenon of the geology that is of great importance due to its narrow interaction with underground waters and superficial waters. Karstic regions are those with dissolving caves. If dam is constructed in the regions with reactive rocks it is likely to be endangered by karst phenomenon, dissolution and corrosion of current waters and construction of dams and reservoirs in these formations are associated with high risk. Comprehensive and accurate understanding of the salt dissolution processes facilitates the description of salt karst formations dissolution process in dam reservoirs. Dissolution coefficient is depended to several factors including the characteristics of the solvent and solute, the volume and speed of the involved solvent current, the level of exposure, saturation concentration, temperature, pressure, acidity and the effect of soluble material.

This research was performed based on three basis: field studies, experimental investigation and numerical modeling. For determination of dissolution coefficient, the physical model of reservoir was built in a form of trapezoidal channel and samples of salt rock in the reservoir were used in the physical model 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 numerical model for determining of dissolution coefficient. The numerical model ran with different dissolution coefficient 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 main reservoir. With simulation of main reservoir using dissolution coefficient obtained from laboratory study, the effect of salt karst formation on reservoir 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. MIKE is an integrated numerical modelling system that is developed for use in wide range applications like oceans, coasts and harbors, gulf, lakes and dam reservoirs. This model has the ability of two-dimensional and three-dimensional distribution of parameters like temperature, salinity and other reservoir pollutants and analyzing of water quality in downstream.

Using the experimental study and numerical simulation and implementation of results, the dissolution coefficient of salt karst formation was calculated about 0.5 cm/h. The results of numerical simulation of reservoir showed that the water quality of reservoir is not in good condition and even in full tank, the salt concentration of reservoir reached to 400 mg/l which is almost 3 times higher than the allowed limit of 100 mg/l. 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 reservoir conditions, the process of salinity distribution increases and salt concentration increases with time. By comparing the salt concentration in reservoir and in numerical model, it was found that the average error percentage of concentration values was about 13.60 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 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 dam reservoir.

KEYWORDS

Dam reservoir, dissolution rate, laboratory model, numerical simulation, Mike



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

**Numerical Simulation and Experimental
Investigation of Halite Karst Dissolution in Dam
Reservoirs**

SeyedMahdi HashemiHeydari

SUPERVISORS:

Dr. Ahmad Ahmadi

Dr. MohammadReza JaliliGhazizadeh

February ۲۰۱۲