

رسالة محمد



دانشکده مهندسی کشاورزی

گروه آب و خاک

پایان نامه کارشناسی ارشد

## مدل سازی عددی رسوبشویی مخازن سدها

داود تن آسا

استاد راهنما:

دکتر صمد امامقلی زاده

اساتید مشاور:

دکتر خلیل اژدری

دکتر سید حسین حسینی

بهمن ماه ۱۳۹۴



مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه تعالی

شماره:  
تاریخ:  
ویرایش:

پیوست شماره ۲

دانشکده کشاورزی  
گروه: آب و خاک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / خانم داود تن آسا به شماره دانشجویی: ۹۲۰۴۰۴۴ تحت عنوان: مدل سازی عددی رسوبشویی مخازن سدها

در تاریخ ۱۳۹۷/۰۷/۰۹ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی: خلیل اژدری		نام و نام خانوادگی: صمد امامقلی زاده
	نام و نام خانوادگی: سید حسین حسینی		نام و نام خانوادگی:

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: محمد هادی موحد نژاد		نام و نام خانوادگی: روزبه موذن زاده
			نام و نام خانوادگی: زهرا گنجی نوروزی

## تشکر و قدردانی

اکنون که دیگر بار پروردگار منان مرا قرین لطف و مرحمت خویش قرار داده تا در سایه بندگی- اش، گامی دیگر را در عرصه‌ی کسب علم و دانش پشت سر نهم، با قلبی سرشار از یقین و ایمان به الطاف الهی، بر او که مسیر دانش را بر راه زندگیم گشود، خضوع و سجود می‌کنم. به دست‌های دو معلم بزرگوارم، پدر و مادر عزیزم که مهربانانه از روزهای بی‌بازگشت عمرشان برایم سایه‌بان عشق و آرامش و تکیه‌گاه امن و آسایش ساخته‌اند، بوسه می‌زنم. شایسته است از استاد راهنمای بزرگوارم جناب آقای دکتر صمد امامقلی‌زاده که در کمال سعه‌ی صدر، با حسن خلق و فروتنی از هیچ کمکی دریغ ننموده‌اند و با راهنمایی‌های سازنده و راه‌گشایشان در طی مراحل انجام و تدوین پایان‌نامه مرا یاری رسانده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم.

با تشکر فراوان از مساعدت‌های بی‌شائبه‌ی اساتید شایسته و گرانقدر، آقایان دکتر خلیل ازدری و دکتر سید حسین حسینی که همواره رهنمودهایشان روشن‌گر راه و گره‌گشای سختی‌ها بوده است. از اساتید و کارشناسان گروه آب و خاک کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در ادامه بر خود لازم می‌دانم از برادرم محسن و پسر دایی‌ام مهندس صالح جمعه‌زاده به پاس زحماتی که برای بنده متحمل شدند تشکر ویژه داشته باشم.

و با تشکر خالصانه خدمت همه‌ی کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده‌اند. باشد که شایسته‌ی زحمات بی‌دریغشان بوده باشم.

داود تن‌آسا

بهمن ماه ۱۳۹۴

## تعهد نامه

اینجانب داود تن‌آسا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی کشاورزی- سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل‌سازی عددی رسوبشویی مخزن سد‌ها تحت راهنمایی دکتر صمد امامعلی‌زاده متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده اکتفا شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجودیت رتبه (یا پانتهای آنها) استفاده شده است شواهد و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به جرمه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، حریمات و اصول اخلاقی رعایت شده است.

تاریخ ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده‌های اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

## چکیده

رسوبشویی مخازن سدها فرآیندی است که طی آن رسوبات ته‌نشین شده‌ی قبلی در مخازن سدها شسته شده و از طریق دریچه‌های تخلیه‌ی تحتانی خارج می‌شوند. برای جلوگیری از اتلاف آب مخازن سدها در اثر رسوبشویی لازم است قبل از انجام رسوبشویی آن پدیده از طریق مدل فیزیکی و یا ریاضی مطالعه گردد. در این مطالعه، برای بررسی و شبیه‌سازی رسوبشویی رسوب، مدل عددی یک بعدی توسعه داده شد. به منظور نیل به اهداف تحقیق، معادلات سنت‌ونانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی (روش بتا) به دو روش شامل مرحله‌ای و همزمان حل شدند. در ادامه نتایج مدل عددی توسعه داده شده با مدل آزمایشگاهی انجام شده توسط جعفری (۱۳۸۱) و مدل تجاری نرم افزار HEC-RAS مقایسه گردید. نتایج نشان می‌دهد با افزایش دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی، نرخ انتقال رسوبات شسته شده افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه بین نتایج بدست آمده از مدل ریاضی توسعه داده شده با دو روش حل مرحله‌ای و همزمان و همچنین مدل عددی HEC-RAS با نتایج مدل فیزیکی نشان داد مدل های مذکور به ترتیب با داشتن ضریب تبیین ۰/۹۷۱ ، ۰/۸۹ و ۰/۹۸ دارای دقت مناسبی برای پیش بینی رسوبشویی مخازن سدها می باشند.

**کلمات کلیدی:** معادلات سنت‌ونانت، روش عددی بتا، رسوبشویی مخزن سد، مدل HEC-RAS.

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱. تن آسا د، امامقلی زاده ص، (۱۳۹۴)، " توسعه مدل عددی رسوبشویی مخازن سدها " کنفرانس بین المللی معماری، شهرسازی، عمران، هنر، محیط زیست، جهاد دانشگاهی، تهران.
۲. تن آسا د، امامقلی زاده ص، (۱۳۹۴)، " بررسی تاثیر میزان بازشدگی دریچه در تخلیه‌ی رسوبات در رسوبشویی مخازن سدها با استفاده از مدل عددی " کنفرانس بین المللی معماری، شهرسازی، عمران، هنر، محیط زیست، جهاد دانشگاهی، تهران.
۳. تن آسا د، امامقلی زاده ص، (۱۳۹۴)، " بررسی تاثیر رقوم سطح آب مخزن در میزان تخلیه‌ی رسوبات در رسوبشویی مخازن سدها با استفاده از مدل عددی " چهاردهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان.

## فهرست مطالب

۱	فصل اول: کلیات.....
۲	۱-۱- مقدمه.....
۴	۲-۱- رسوبگذاری مخازن سدها.....
۵	۳-۱- روش‌های کنترل رسوبگذاری.....
۷	۴-۱- ضرورت انجام تحقیق.....
۸	۵-۱- اهداف تحقیق.....
۸	۶-۱- روش تحقیق.....
۹	فصل دوم: مروری بر مطالعات گذشته.....
۱۰	۱-۲- مقدمه:.....
۱۰	۲-۲- جریان‌های آزاد.....
۱۰	۳-۲- انواع جریان‌های آزاد.....
۱۱	۴-۲- رسوب.....
۱۲	۱-۴-۲- اندازه ذره.....
۱۳	۲-۴-۲- قطر کره معادل ذره.....
۱۳	۳-۴-۲- قطر سقوط.....
۱۳	۴-۴-۲- قطر رسوبی.....
۱۳	۵-۴-۲- ضریب یکنواختی.....
۱۳	۶-۴-۲- اندازه متوسط ذره.....
۱۳	۷-۴-۲- اندازه میانه ذرات.....
۱۳	۸-۴-۲- اندازه هندسی ذرات.....
۱۴	۹-۴-۲- انحراف معیار هندسی.....



۱۴	۱۰-۴-۲- شکل ذره
۱۵	۱۱-۴-۲- عامل شکل
۱۵	۵-۲- راندمان رسوبشویی
۱۵	۶-۲- راندمان رسوبشویی با پایین آوردن سطح آب مخزن
۱۶	۷-۲- مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی
۱۶	۸-۲- مدل‌های عددی
۱۷	۹-۲- معادلات حاکم
۱۷	۱۰-۲- تاریخچه
۲۰	۱۱-۲- انواع مدل‌های ریاضی موجود
۲۰	۱-۱۱-۲- مدل MIKE11
۲۰	۲-۱۱-۲- مدل BRI-STARS
۲۰	۳-۱۱-۲- مدل SED2WES
۲۱	۴-۱۱-۲- مدل CCHE1D
۲۱	۵-۱۱-۲- مدل FLOW-3D
۲۱	۶-۱۱-۲- مدل SSIM
۲۱	۷-۱۱-۲- مدل GSTARS3
۲۲	۸-۱۱-۲- مدل TABS
۲۲	۱۲-۲- مطالعات انجام شده جهت رسوبشویی مخازن سدها
۳۴	۱۳-۲- جمع بندی کلی مطالعات گذشته
۳۵	فصل سوم: مواد و روش‌ها
۳۶	۱-۳- مقدمه
۳۶	۱-۱-۳- روش‌های عددی

- ۳۷-۲-۱-۳..... روش تفاضل محدود.
- ۴۱-۳-۱-۳..... روش امان محدود.
- ۴۱-۴-۱-۳..... فرمولبندی تفاضل محدود.
- ۴۱-۱-۴-۱-۳..... تقریب سازی معادلات.
- ۴۲-۲-۴-۱-۳..... بسط سری تیلور.
- ۴۲-۳-۴-۱-۳..... تقریب تفاضل محدود پیشرو (FORWARD).
- ۴۳-۴-۴-۱-۳..... تقریب تفاضل محدود مرکزی (CENTER).
- ۴۳-۵-۴-۱-۳..... تقریب تفاضل محدود پسرو (BACKWARD).
- ۴۴-۶-۴-۱-۳..... خطاها در روش تفاضل محدود.
- ۴۴-۷-۴-۱-۳..... سازگاری، همگرایی و پایداری روش تفاضل محدود.
- ۴۵-۵-۱-۳..... معادلات حاکم بر رسوبشویی.
- ۴۶-۲-۳..... حل عددی معادلات سنت و نانت.
- ۴۶-۱-۲-۳..... روش پریسمن.
- ۴۷-۲-۲-۳..... روش حل.
- ۵۰-۱-۲-۲-۳..... اجزای ماتریس ضرایب.
- ۵۲-۲-۲-۲-۳..... شرایط اولیه و مرزی.
- ۵۲-۳-۳..... حل عددی معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی.
- ۵۳-۱-۳-۳..... فرمولبندی بتا.
- ۵۳-۲-۳-۳..... نحوه‌ی بدست آوردن فرمولبندی بتا.
- ۵۴-۳-۳-۳..... حل معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی به روش بتا.
- ۵۸-۴-۳..... حل عددی معادلات سنت و نانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی به صورت همزمان.
- ۶۳-۵-۳..... مدل آزمایشگاهی.

۶۳	۱-۵-۳- بازسازی مدل
۶۴	۲-۵-۳- اجزاء مدل
۶۴	۱-۲-۵-۳- اسکلت مدل
۶۵	۲-۲-۵-۳- کف مدل
۶۵	۳-۲-۵-۳- دیواره‌های جانبی مدل
۶۶	۴-۲-۵-۳- بدنه‌ی سد
۶۷	۳-۵-۳- اندازه‌گیری رقوم سطح رسوب
۶۸	۴-۵-۳- آماده‌سازی مدل
۶۸	۵-۵-۳- روش آزمایش
۶۸	۱-۵-۵-۳- آزمایشات مربوط به تأثیر رقوم کف دریاچه بر راندمان آبشویی
۷۱	۲-۵-۵-۳- آزمایشات مربوط به تأثیر میزان باز شدگی دریاچه بر راندمان آبشویی
۷۵	فصل چهارم: بحث و نتیجه‌گیری
۷۶	۱-۴- مقدمه
۷۶	۲-۴- بررسی نتایج حاصل از حل مرحله‌ای معادلات سنت‌ونانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی
۷۶	۱-۲-۴- نتایج حاصل از حل معادلات سنت‌ونانت
۸۰	۲-۲-۴- نتایج حاصل از حل معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی
۸۷	۳-۴- بررسی نتایج حاصل از حل همزمان معادلات سنت‌ونانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی
۹۳	۴-۴- نتایج بدست آمده از مدل تجاری نرم‌افزار هکرس
۱۰۳	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۰۴	۱-۵- نتیجه‌گیری
۱۰۵	۲-۵- پیشنهادها
۱۰۶	۳-۵- منابع مورد استفاده

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- ته‌نشینی رسوبات در مخزن سد..... ۴
- شکل ۱-۲- موقعیت کانال رسوبشویی، دید از جلو..... ۱۶
- شکل ۱-۳- انواع معادلات دیفرانسیل با شرایط اولیه و شرایط مرزی .. ۳۹
- شکل ۲-۳- شبکه بندی نقاط در روش ضمنی..... ۵۳
- شکل ۳-۳- شبکه نقاط برای حل مدل رسوبشویی..... ۵۵
- شکل ۴-۳- موقعیت شرایط اولیه و مرزی..... ۵۶
- شکل ۵-۳- (الف) پلان مدل ب) مقطع طولی مدل..... ۶۴
- شکل ۶-۳- مقاطع سدهای آزمایش گروه اول..... ۶۶
- شکل ۷-۳- مقاطع سدهای آزمایش‌های گروه دوم..... ۶۷
- شکل ۸-۳- خطوط تراز سطح رسوب قبل از رسوبشویی آزمایش A1 ..... ۶۹
- شکل ۹-۳- نمایی از رقوم سطح رسوب بعد از رسوبشویی آزمایش A1 ..... ۷۰
- شکل ۱۰-۳- خطوط تراز سطح رسوب بعد از رسوبشویی آزمایش A1 ..... ۷۰
- شکل ۱۱-۳- نمایی از رقوم سطح رسوب بعد از رسوبشویی آزمایش D ..... ۷۱
- شکل ۱۲-۳- خطوط تراز سطح رسوب بعد از رسوبشویی آزمایش D ..... ۷۲
- شکل ۱۳-۳- پلان کانال رسوبشویی پس از پایان آزمایش D ..... ۷۲
- شکل ۱-۴- هیدروگراف جریان خروجی در فاصله‌ی  $x=40$  سانتی متری از دریچه مخزن سد..... ۷۹
- شکل ۲-۴- نمودار تغییرات ارتفاع آب نسبت به زمان در فاصله‌ی  $x=40$  سانتی متری مخزن..... ۸۰
- شکل ۳-۴- رقوم سطح رسوب در مدل آزمایشگاهی در  $t=5$  دقیقه..... ۸۳
- شکل ۴-۴- رقوم سطح رسوب در مدل عددی در  $t=5$  دقیقه ..... ۸۴
- شکل ۵-۴- مقایسه‌ی رقوم بستر رسوب در مدل عددی و آزمایشگاهی در یک زمان..... ۸۴
- شکل ۶-۴- مقایسه‌ی رقوم بستر رسوب در مدل عددی در دبی‌های متفاوت..... ۸۵

- شکل ۴-۷- روند تغییر رقوم سطح رسوب در زمان‌های مختلف در مدل عددی..... ۸۶
- شکل ۴-۸- هیدروگراف جریان خروجی در فاصله‌ی ۲۰  $X$  سانتی متری از دریچه مخزن سد..... ۹۰
- شکل ۴-۹- نمودار تغییرات ارتفاع آب نسبت به زمان در  $X=20$  سانتی متری از دریچه مخزن سد..... ۹۰
- شکل ۴-۱۰- رقوم سطح رسوب در حل همزمان در  $t=10$  دقیقه..... ۹۲
- شکل ۴-۱۱- مقایسه‌ی رقوم بستر رسوب در مدل آزمایشگاهی و عددی در یک زمان..... ۹۳
- شکل ۴-۱۲- رقوم سطح رسوب در مدل هکرس در زمان‌های متفاوت..... ۹۵
- شکل ۴-۱۳- مقایسه‌ی مدل آزمایشگاهی و مدل هکرس در زمان ۲۰ دقیقه..... ۹۶
- شکل ۴-۱۴- مقایسه‌ی بین مدل کراندل و آزمایشگاهی در یک زمان..... ۹۸
- شکل ۴-۱۵- مقایسه‌ی مدل آزمایشگاهی با مدل عددی کرانک نیکلسون در یک زمان..... ۱۰۰
- شکل ۴-۱۶- مقایسه‌ی مدل‌های عددی انجام شده با مدل آزمایشگاهی در یک زمان..... ۱۰۰

## فهرست جداول

- جدول ۴-۱- دبی آب هر گره در شبکه‌بندی مخزن سد..... ۷۶
- جدول ۴-۲- ارتفاع آب هر گره در شبکه‌بندی مخزن سد ..... ۷۸
- جدول ۴-۳- رقوم سطح رسوب در مدل آزمایشگاهی آزمایش A1..... ۸۱
- جدول ۴-۴- رقوم سطح رسوب در مدل عددی حاکم بر رسوبشویی (بتا)..... ۸۲
- جدول ۴-۵- دبی آب هر گره در شبکه‌بندی مخزن سد در حل همزمان..... ۸۷
- جدول ۴-۶- ارتفاع آب هر گره در شبکه‌بندی مخزن سد در حل همزمان..... ۸۸
- جدول ۴-۷- رقوم سطح رسوب در مدل عددی حاکم بر رسوبشویی (بتا)..... ۹۱
- جدول ۴-۸- رقوم سطح رسوب در مدل عددی هکرس..... ۹۴
- جدول ۴-۹- رقوم سطح رسوب در مدل کراندل..... ۹۷
- جدول ۴-۱۰- رقوم سطح رسوب در مدل کرانک نیکلسون ..... ۹۸
- جدول ۴-۱۱- نتایج حاصل از مقایسه‌ی مدل‌های عددی با مدل آزمایشگاهی..... ۱۰۱

# فصل اول

## کلیات

بسیاری از مسائل هیدرولیک با فرض جریان‌های دائمی تحلیل می‌شوند. در جریان‌های دائمی، دبی جریان ثابت فرض می‌شود. ولی در عمل در بسیاری از موارد اینگونه نیست. بلکه جریان‌ها به صورت غیر دائمی هستند یعنی در آنها دبی و سطح مقطع جریان یا زوج عمق و سرعت در هر نقطه تغییر می‌کنند. پس برای تحلیل این نوع جریان‌ها می‌بایست در هر نقطه مشخصات جریان را بدست آورد. برای این کار از معادلات سنت‌ونانت<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. به دلیل اینکه این معادلات پیچیده هستند، لذا از روش‌های عددی برای حل آنها استفاده می‌شود. هر جریان غیردائمی در حقیقت عبارتست از حرکت یک موج که با تغییر مکان خود و برحسب شرایط، عمق جریان یا دبی و یا هر دو را از مقطعی به مقطع دیگر و از زمانی به زمان دیگر تغییر می‌دهد. امکان دارد این تغییرات براساس برنامه‌ی طراح و یا به دلیل حوادث اتفاقی و به صورت ناخواسته رخ دهد. طبق تعریف، یک موج عبارتست از تغییر موقعیت در سطح آب که توسط سیال انتشار می‌یابد و سرعت آن عبارتست از سرعت انتشار چنین آشفتگی نسبت به سیال. امواج در کانال‌های باز به چهار دسته تقسیم می‌شوند:

- ۱- موج‌های دینامیکی
- ۲- موج‌های ثقلی
- ۳- موج‌های دیفیوژن
- ۴- موج‌های سینماتیک.

نمونه‌هایی از جریان‌های غیردائمی را می‌توان در هیدرولیک دریاها و رودخانه‌ها به شکل امواج نوسانی یا جزر و مد اقیانوس‌ها مشاهده نمود. سیلاب ناشی از شکست سدها نیز یک نوع جریان غیردائمی بوده که می‌تواند خسارات فراوانی به تاسیسات مهم پایین‌دست خود مانند نیروگاهها و نواحی مسکونی وارد نماید. جریان‌های غیردائمی که در طبیعت اتفاق می‌افتد، باعث فرسایش خاک‌ها و در نتیجه تشکیل کانال‌ها و چالاب‌ها می‌شود و چنانچه این جریان‌ها نظیر سیل در بالادست سدها اتفاق بیفتد، رسوبات را با خود حمل کرده و وارد مخزن سدها می‌گردد (هوشمندزاده، ۱۳۸۷). در چند دهه اخیر، هرچند سدسازی از نظر کمی و تعدد روند افزایشی داشته است، ولی متأسفانه اکثر این

---

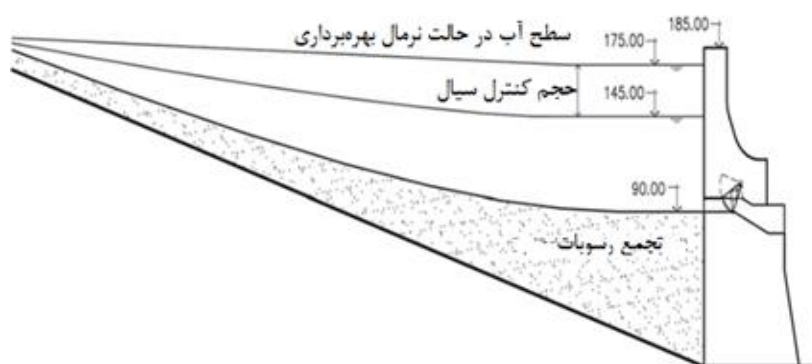
<sup>۱</sup> Saint Venant



سدها در دوره‌ی بهره برداری با مشکل رسوبگذاری روبرو شده‌اند. رسوبگذاری در مخازن سدها یکی از مشکلات بزرگی است که بسیاری از سدها با آن مواجه می‌باشند. امروزه جدیدترین خطر برای مرگ زود هنگام سدها، خطر رسوبگذاری مخازن آنهاست. از طرفی در اثر رسوبگذاری هر ساله به طور متوسط بین ۰/۵ تا ۱ درصد از حجم کل ذخیره این سدها از دست می‌رود (Brown, 1943). این مشکل به ویژه در مناطق استوایی و نیمه خشک به علت بالا بودن بده جریان رسوب مشهودتر به نظر می‌رسد. در ایران سالانه بین ۱۷۵ تا ۲۵۰ میلیون متر مکعب از مخازن سدها در اثر رسوبگذاری از دست می‌رود. رسوبگذاری به میزان ۲۰۰ میلیون متر مکعب در سال به معنی آن است که هر سال ۲ سد مخزنی در ایران هر یک با حجم ۲۰۰ میلیون متر مکعب به نیمه عمر خود برسند. از سوی دیگر، رسیدن یک سد به نیمه عمر خود یعنی از دست دادن نیمی از حجم مخزن و یا از دست دادن قابلیت تنظیم برای هدفهایی که برای آن طراحی و ساخته شده است. این موضوع بدین معنی است که ما هر ساله به لحاظ رسوبگذاری مخازن سدها، یک تا دو سد مخزنی به اندازه‌ی متوسط خود را از دست می‌دهیم. درحالی که اولاً شانس جایابی ساختگاه مناسب سد، سال به سال کاهش می‌یابد و ثانیاً سدی که مخزن آن از رسوب انباشته شده است به راحتی قابل متروکه کردن و جایگزین کردن نیست. چون چنین سدی یک تهدید جدی برای پایین دست خود خواهد بود. براساس گزارش کمیته‌ی بین المللی سدهای بزرگ، در حال حاضر در جهان بیش از ۴۰۰۰۰ سد بزرگ وجود دارد که برای تأمین آب، تولید انرژی و کنترل سیلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند. در زمینه‌ی روش‌های رسوبشویی از مخازن سدها می‌توان به روش‌هایی از قبیل عملیات فلاشینگ، عبوردهی رسوبات جریان غلیظ، شستشوی رسوبات، لایروبی و سیفون کردن اشاره نمود. گاهی اوقات ممکن است بکار بردن این روشها در برخی از مخازن سدها اقتصادی نباشد (Brown, 1943). در برخی موارد ساخت یک سد جدید ممکن است بسیار اقتصادی‌تر از کاهش رسوبگذاری یا برطرف نمودن مواد رسوبی باشد. امروزه برای پیش بینی مقدار رسوبگذاری و روشهای مناسب رسوبشویی در مخازن سدها و برآورد عمر مفید آنها یکی از ابزارهای مهم استفاده از مدل فیزیکی و ریاضی می‌باشد (امامقلی زاده و جهانی، ۱۳۸۷).

## ۱-۲- رسوبگذاری مخازن سدها

مخزن سد به صورت تله‌ای برای تجمع رسوبات عمل کرده و مواد معلق موجود در جریان ورودی را ته‌نشین نموده و انتقال آنها را متوقف می‌نماید. بدون در نظر گرفتن اقدامات لازم، جهت موازنه‌ی رسوبات خروجی و ورودی، رسوبات جایگزین ظرفیت ذخیره‌ی مخزن می‌گردند. لازم است که بیشترین تمرکز، روی حداقل کردن راندمان تله‌گذاری مخازن موجود و به حداکثر رساندن حجم ذخیره‌ی طولانی مدت آنها صورت پذیرد. هنگامی که یک رودخانه وارد یک مخزن می‌گردد، ذرات درشت دانه به تدریج رسوب کرده و یک دلتا را در ناحیه‌ی جلویی مخزن تشکیل می‌دهند. ذرات ریزدانه‌تر که معلق مانده‌اند، از روی ناحیه‌ی دلتا عبور کرده و وارد مخزن سد می‌گردند. در اثر رسوبگذاری ذخیره‌ی مخزن به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این رسوبگذاری علاوه بر از بین بردن فواید یک طراحی خوب نظیر کنترل سیلاب، تامین برق، برق آبی، آب آبیاری و کشتیرانی، تمامی سیستم رودخانه‌ای را تحت تاثیر قرار می‌دهد. شکل (۱-۱) نحوه‌ی انباشته شدن رسوبات را در مخزن سد نشان می‌دهد (امامقلی‌زاده و جهانی، ۱۳۸۷).



شکل (۱-۱) ته‌نشینی رسوبات در مخزن سد

### ۱-۳- روش‌های کنترل رسوبگذاری مخازن سدها

به طور کلی دو دسته روش برای کنترل رسوب مخازن سد وجود دارد. اولین دسته، شامل روش‌های بازدارنده می‌باشد که جریان رسوب را به سمت مخزن متوقف و یا میزان آن را کاهش می‌دهد. اصول کلی این روش‌ها عبارتند از: ۱- مدیریت آبخیزداری: شامل احیاء جنگل‌ها و مراتع، کنترل بهره‌برداری از پوشش گیاهی، تثبیت بستر انهار و آبراهه‌ها و غیره می‌باشد. به طور کلی این روش‌ها از شروع حرکت ذره جلوگیری می‌کنند. ۲- جلوگیری از ورود جریان‌های رسوب زیاد به مخازن سدها با انحراف جریان در مواقع سیلابی به وسیله‌ی ساختن کانال‌های فرعی و انحرافی. ۳- ساختن حوضچه‌های رسوبگیر در بالا دست سد به منظور ته‌نشین کردن رسوبات درشت دانه. دومین دسته از روش‌ها، شامل روش‌های اصلاحی می‌باشد که اساس کار آن بر مبنای خارج کردن رسوبات ته‌نشین شده در مخزن است. در این دسته از روش‌ها هزینه‌ها و توجیه اقتصادی تعیین کننده می‌باشد. این روش‌ها عبارتند از:

#### ۱- لایروبی

استفاده از روش لایروبی برای دفع مواد رسوبی نهشته شده یکی از گزینه‌های خیلی ساده می‌باشد. نقطه ضعف این روش هزینه بالای آن می‌باشد. در استفاده از روش رسوبشویی تحت فشار و شستشوی رسوبات ممکن است حالتی داشته باشیم که سطح آب مخزن پایین آورده شده باشد، اما این روش‌ها ممکن است نتوانند به طور کامل مشکلات رسوب را حل کنند (امام‌قلی زاده و همکاران، ۱۳۸۶).

#### ۲- رسوب زدایی با استفاده از روش شستشوی رسوبات

در این روش برای اینکه بتوان مقدار رسوبات ورودی به سد را با حداقل نشست و با حداکثر مقدار خارج کرد بایستی رقوم سطح آب مخزن را کاهش داد. در یک مخزن کاهش سیلاب، اگر روش

شستشوی رسوبات زمانی که سطح آب مخزن در خلال سیلاب افزایش می‌یابد صورت گیرد در آن صورت دبی رسوبات خروجی از سد همیشه کمتر از مقدار رسوبات ورودی به سد می‌باشد؛ ولی چنانچه رقوم سطح آب مخزن کاهش یابد، دبی رسوبات خروجی از سد بزرگتر از رسوبات ورودی به سد می‌باشد. چون کاهش رقوم سطح آب مخزن، موجب فرسایش رسوبات نهشته شده در مخزن می‌گردد. از آنجایی که زمان سیلابی شدن، غلظت رسوبات ورودی به سد در شاخه صعودی هیدروگراف، روند افزایشی داشته و به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد، اگر بتوان در این زمان آب را از مخزن خارج کرد در آن صورت مخزن با آب حداقل کدورت پر خواهد شد (Brown, 1943).

### ۳- رسوب زدایی با استفاده از روش عبوردهی جریان غلیظ

جریان‌های غلیظ<sup>۱</sup> (چگال) جریان‌هایی هستند که به علت ورود یک سیال عموماً سنگین‌تر به درون یک سیال سبک‌تر ایجاد می‌شوند. اختلاف دانسیته باعث بوجود آمدن جریان چگال می‌گردد، که این تفاوت دانسیته می‌تواند به علت وجود ذرات معلق ریزدانه، املاح محلول و یا دما باشد. به علت تفاوت دانسیته این جریان با سیال محیطی روی آن، در سطح مشترک این جریان با سیال محیطی، گردابه‌هایی تشکیل می‌شوند که خود باعث ورود سیال محیطی به درون جریان چگال می‌گردند. از این منظر می‌توان بیان نمود که خصوصیات جریان‌های چگال از خصوصیات جریان‌های معمولی کانال باز متفاوت می‌باشد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۲).

جریان غلیظ زمانی در سد تشکیل می‌شود که جریان ورودی به سد دارای بار رسوبی بالا باشد، به علت بالا بودن غلظت و چگالی جریان، این جریان از زیر آب ذخیره شده مخزن حرکت کرده و خود را به بدنه سد می‌رساند. عبور دهی جریان غلیظ بدان معنی است که جریان غلیظ تشکیل شده در سد را بتوان به وسیله تخلیه کننده‌های تحتانی از آن خارج کرد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۲).

---

<sup>۱</sup> Density Current

#### ۴- خارج کردن رسوبات با استفاده از رسوبشویی هیدرولیکی

رسوبشویی هیدرولیکی عبارت است از خارج کردن رسوبات ته‌نشین شده در مخزن سد، به وسیله‌ی بازکردن دریچه‌های تخلیه. برخلاف روندیابی رسوب، که در واقع برای جلوگیری از ته‌نشین رسوبات در خلال سیلاب به کار میرود، رسوبشویی هیدرولیکی، برای خارج کردن رسوبات به کار می‌رود. وقتی رسوبشویی در فصل غیرسیلابی انجام می‌شود، تغییرات در نمونه‌های رسوب خروجی از سد بیشتر است. همچنین اگر رسوبشویی در فصل سیلابی انجام شود، نمونه‌های رسوب خروجی با رسوب ورودی متفاوت‌اند. در روش رسوبشویی حجم عظیمی از رسوبات در مدت زمان کوتاهی خارج می‌شود، ولی روندیابی رسوب باعث حفظ روند طبیعی انتقال رسوب در طول رودخانه می‌گردد. کانالی که در طی رسوبشویی در اثر حرکت رسوبات تشکیل می‌شود، در اثر تکرار سالیانه رسوبشویی، به حالت خود باقی می‌ماند. در مخازن عریض، کانال رسوبشویی باریک و هندسه‌ای از نوع سیلابدشت دارد. فان در سال (۱۹۸۵) از رسوبشویی به دو عنوان اصلی یاد کرد: ۱- رسوبشویی با جریان آزاد: که شامل پایین آوردن سطح آب تا نزدیکی دریچه‌های سد می‌باشد، به گونه‌ای که جریان رودخانه‌ای در سد ایجاد شود. ۲- رسوبشویی تحت فشار: که لازم است سطح آب به طور جزئی پایین آورده شود. در روش رسوبشویی تحت فشار با استفاده از انرژی آب پشت سد رسوبشویی انجام می‌شود. این روش به طور معمول استفاده نمی‌شود، زیرا تاثیر آن کمتر است (امامقلی زاده و همکاران، ۱۳۸۸).

#### ۴-۱- ضرورت انجام تحقیق

با ورود جریان رودخانه به مخزن سد، شرایط هیدرولیکی به خصوص سرعت جریان به شدت کاهش و پتانسیل انتقال رسوب رودخانه کاهش می‌یابد. در نتیجه ذرات رسوبی به تدریج نهشته می‌شوند. بار بستر و بخش درشت‌دانه‌ی بار معلق بلافاصله در مناطق ابتدایی مخزن نهشته‌شده و دلتا را تشکیل می‌دهند. در حالی که بخش ریزدانه‌ی بار معلق تا بخش‌های عمیق مخزن وحتى تا نزدیک سد هم نفوذ کرده و سپس نهشته می‌شوند. به این ترتیب حجم مخزن را پر از رسوب می‌کنند. حال با

توجه به اهمیت آب و نیاز مبرم آن در مناطق خشک و نیمه خشک و با توجه به محدود بودن منابع آب و بالا بودن بار رسوب در این مناطق، مخازن موجود منطقه را تهدید کرده بطوریکه بیش از یک سوم عمر مفید آنها در سال‌های اولیه آبیگری از دست می رود. بنابراین باید سعی و تلاش گردد که از همین منابع اندک نیز به نحو احسن بهره برداری و استفاده شود که یکی از راه‌های آن، کاهش رسوب ورودی به مخازن و کاهش رسوب درون آنها می باشد. از این رو با توسعه‌ی مدل عددی به بررسی رفتار رسوبشویی و افزایش راندمان آن تحت تاثیر تغییر پارامترهای هیدرولیکی پرداخته شده است (شفاعی بجستان، ۱۳۹۰).

#### ۱-۵- اهداف تحقیق

- ۱- شبیه‌سازی عددی رسوبشویی با استفاده از مدل عددی توسعه داده شده
- ۲- کالیبره نمودن و صحت سنجی مدل با استفاده از نتایج آزمایشگاهی
- ۳- مقایسه نتایج مدل عددی توسعه داده شده با نتایج مدل عددی تجاری موجود
- ۴- تخمین رفتار رسوبشویی با استفاده از مدل عددی با تغییر شرایط هندسی و هیدرولیکی مخزن

#### ۱-۶- روش تحقیق

در این تحقیق به منظور دستیابی به اهداف مدل ابتدا به حل معادلات سنت‌ونانت پرداخته خواهد شد، و به وسیله‌ی برنامه‌ی کامپیوتری نرم‌افزار متلب روند تغییر سطح بستر رسوب در مدت‌زمان رسوبشویی با دبی‌های مختلف محاسبه می‌گردد. در مدل کامپیوتری معادلات دیفرانسیل جزئی جریان غیرماندگار غیریکنواخت پس از خطی‌شدن با روش تفاضل محدود و تکنیک‌های تناوبی حل می‌شوند.

# فصل دوم

مروری بر مطالعات گذشته

در این فصل ابتدا مختصری در مورد جریان‌های آزاد، رسوب، راندمان رسوبشویی، مدل، انواع مدل، تاریخچه‌ی مدل و رسوب، پرداخته و سپس به سوابق تحقیقاتی اشاره می‌شود.

## ۲-۲- جریان‌های آزاد

به طور کلی حرکت آب در مجاری باز به کمک نیروی ثقل صورت می‌گیرد و در نتیجه شکل سطح آب، مسیر جریان و توزیع فشار آب بستگی به نیروی ناشی از شیب کانال خواهد داشت. مجاری باز را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: دسته‌ی اول مجاری فرسایش ناپذیر که دارای مرزهای صلب می‌باشند؛ یعنی تغییر شکل بستر و بدنه‌ی کانال در اثر حرکت آب امکان‌پذیر نمی‌باشد و دسته‌ی دیگر مجاری فرسایش‌پذیر، که دارای مرزهای متحرک بوده و تحت شرایط خاصی می‌توانند تغییر شکل یابند (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲).

## ۲-۳- انواع جریان‌های آزاد

جریان یکنواخت<sup>۱</sup>: در جریان یکنواخت شتاب انتقالی<sup>۲</sup> صفر می‌باشد؛ یعنی خصوصیات جریان نسبت به مکان تغییر نمی‌کند یعنی:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = 0 \quad (1-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3-2)$$

جریان غیر یکنواخت<sup>۱</sup>: در جریان غیر یکنواخت خصوصیات جریان نسبت به مکان تغییر می‌کند یعنی:

<sup>۱</sup> Uniform

<sup>۲</sup> Convective acceleration



$$\frac{\partial y}{\partial x} \neq 0 \quad (4-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} \neq 0 \quad (5-2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \neq 0 \quad (6-2)$$

جریان ماندگار<sup>۲</sup>: خصوصیات جریان نسبت به زمان تغییر نمی کند یعنی:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (7-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (8-2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0 \quad (9-2)$$

جریان غیرماندگار<sup>۳</sup>: خصوصیات جریان نسبت به زمان تغییر می کند یعنی:

$$\frac{\partial y}{\partial t} \neq 0 \quad (10-2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0 \quad (11-2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0 \quad (12-2)$$

جریان متغیر تدریجی<sup>۴</sup>: یک نوع جریان غیریکنواخت است.

## ۲-۴- رسوب

تمام رسوباتی که به وسیلهی آب و باد حمل می گردند و نیز تمام رسوبات موجود در دشتها در اثر پدیده هوازگی سنگها و صخرهها به وجود آمدهاند. هوازگی عملی است که طی آن سنگهای

---

<sup>۱</sup>Non uniform

<sup>۲</sup>Steady

<sup>۳</sup>Un steady

<sup>۴</sup>Gradually Varied Flow

سخت شکسته و فرسوده می‌شوند. اندازه، ترکیب معدنی، چگالی و عوامل دیگری چون بافت رسوبات، به طبیعت سنگ اصلی بستگی دارد. فرآیند هوازدگی به سه بخش هوازدگی شیمیایی، مکانیکی و ارگانیکی تقسیم می‌گردد. عوامل موثر در هوازدگی شیمیایی اکسیژن، دی اکسید کربن و بخار آب موجود در هوا می‌باشد.

عوامل مکانیکی نیز سنگ‌های اصلی را به قطعات کوچک‌تر تبدیل می‌کنند که شامل یخ‌زدگی آب، انبساط ناشی از تغییرات شیمیایی و انبساط و انقباض حاصل از تغییرات ناگهانی درجه حرارت در طول شبانه‌روز می‌باشد. عوامل هوازدگی ارگانیکی شامل میکرو ارگانیزم‌های خاک و ریشه‌ها و تنه‌های درختان می‌باشد که سبب خرد کردن سنگ‌ها می‌شود.

جهت بررسی مسائل مربوط به حرکت رسوب علاوه بر بررسی خواص کلی رسوب، لازم است خصوصیات هر ذره به طور مجزا مورد بررسی قرارگیرد. لذا برخی از خواص ذره عبارتند از:

#### ۲-۴-۱- اندازه ذره

از میان تمام مشخصات اجزاء رسوب، اندازه رسوب بهترین و اصلی‌ترین خصوصیتی است که مورد توجه قرار می‌گیرد. چرا که میزان وقوع حرکت ذرات رسوبی مستقیماً به اندازه‌ی آن بستگی دارد، هرچه اندازه ذره بیشتر باشد، مقامت آن در مقابل حرکت بیشتر خواهد بود. با توجه به تنوع بسیار زیاد اندازه‌ی ذرات رسوبی در بستر رودخانه‌ها، بیان اندازه‌ای که معرف اندازه‌ی ذرات رسوبی و نشان‌دهنده‌ی رفتار هیدرولیکی آن در آب باشد بسیار مشکل است. به همین دلیل برای بیان اندازه‌ی ذرات از تعاریف گوناگونی استفاده شده است.

## ۲-۴-۲- قطر کره‌ی معادل ذره

عبارتست از قطر ذره‌ی کروی شکلی که حجم آن برابر با حجم ذره‌ی موردنظر می‌باشد. قطر کره‌ی معادل تصویر فیزیکی از اندازه‌ی ذره را منسجم می‌کند.

## ۲-۴-۳- قطر سقوط<sup>۱</sup>

عبارتست از قطر کره‌ی معادلی که دارای چگالی  $2.65 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$  بوده در آب استاندارد (۲۴ درجه)، سرعت سقوطی معادل سرعت سقوط ذره‌ی موردنظر دارد.

## ۲-۴-۴- قطر رسوبی<sup>۲</sup>

قطر کره‌ای است که دارای چگالی نسبی و سرعت ته‌نشین نهایی برابر با ذره‌ی مورد نظر در مایع رسوبی مشابه و تحت همان شرایط باشد.

۲-۴-۵- ضریب یکنواختی که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (13-2)$$

اگر  $cu > 4$  خاک یکنواخت و اگر  $cu < 4$  خاک غیریکنواخت است.

۲-۴-۶- اندازه‌ی متوسط ذرات: ( $D_{50}$ ) که عبارت است از اندازه‌ی ذره‌ای که ۵۰ درصد وزنی مصالح از آن کوچکتر هستند.

۲-۴-۷- اندازه‌ی میانه‌ی ذرات که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$D_m = \frac{\sum P_i D_i}{100} \quad (14-2)$$

۲-۴-۸- اندازه‌ی هندسی ذرات:

$$D_g = (D_{16} D_{84})^{1/5} \quad (15-2)$$

---

<sup>۱</sup> Fall Diameter

<sup>۲</sup> Sediment Diameter

۹-۴-۲- انحراف معیار هندسی ( $\sigma_g$ ) که از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_g = (D_{16} \setminus D_{84})^{1/5} \quad (۱۶-۲)$$

۱۰-۴-۲- شکل ذره<sup>۱</sup>

شکل ذرات بستگی به منبع سنگ مادر و نحوه‌ی هوازگی آن دارد. برای مشخص کردن شکل ذره و تبدیل آن به متغیرهایی که قابل استفاده در فرمول‌ها باشد از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود که عبارتند از:

کرویت<sup>۲</sup>: کرویت عبارت است از نسبت مساحت کره هم حجم ذره به سطح جانبی واقعی ذره‌ی موردنظر که مقدار آن برای ذرات کروی برابر واحد بوده و برای سایر ذرات کمتر از واحد می‌باشد، از نسبت زیر برای بیان کرویت استفاده می‌شود.

$$\text{کرویت} = \left( \frac{\text{حجم ذره}}{\text{حجم کره محاط در ذره}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۱۷-۲)$$

گردشده‌گی<sup>۳</sup>:

گردشده‌گی عبارت است از نسبت شعاع کوچکترین دایره‌ی گوشه‌ها به شعاع دایره‌ی محاط در کل تصویر ذره یا شعاع ظاهری ذره. برای بیان نسبت گردشده‌گی فرمول‌های زیادی وجود دارد که در زیر به یکی از آنها اشاره می‌شود.

$$\text{ضریب گردشده‌گی} = \frac{r^3}{abc} \quad (۱۸-۲)$$

که  $r$  شعاع کوچکترین دایره‌ی گوشه‌های ذره،  $a, b$  و  $c$  اندازه‌ی محورهای بزرگ، متوسط و کوچک ذره می‌باشد.

---

<sup>۱</sup> Particle shape

<sup>۲</sup> Sphericity

<sup>۳</sup> Roundness

## ۲-۴-۱۱- عامل شکل

عامل شکل عبارت است از نسبت اندازه‌ی کوچکترین محور ذره به جذر حاصل ضرب اندازه‌های محوره‌های متوسط و بزرگ ذره و یا به عبارتی برابر است با:

$$S_f = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (۱۹-۲)$$

مطالب ذکر شده در مورد خصوصیات ذره برگرفته از کتاب هیدرولیک رسوب (شفایی بجستان، ۱۳۹۲) می‌باشد. این خصوصیات رسوب در نرم افزار HEC-RAS 4 مورد استفاده واقع شده است.

## ۲-۵- راندمان رسوبشویی

راندمان رسوبشویی عبارتست از نسبت حجم رسوبات شسته شده به حجم آب مورد استفاده شده در خلال رسوبشویی در مدت زمان مشخص؛ که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید.

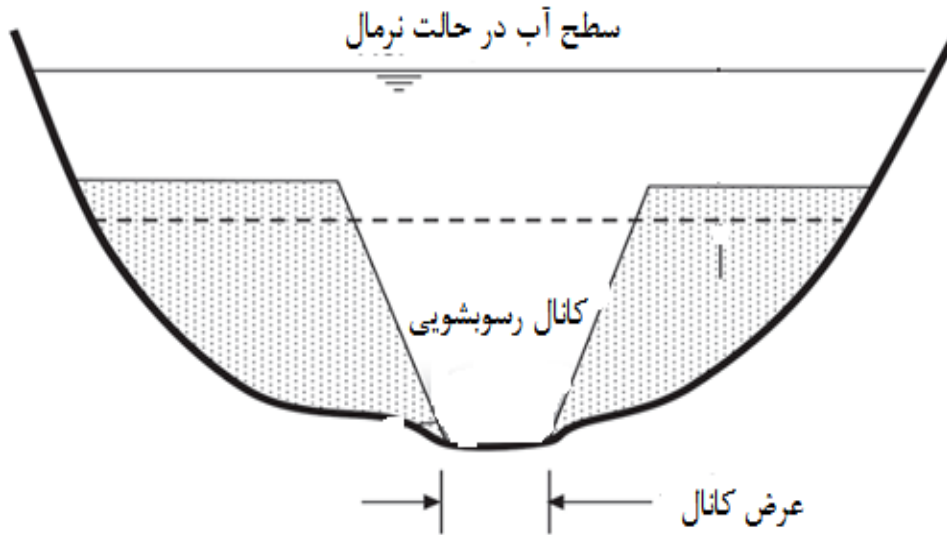
$$F_e = \frac{(V_0 C_0 - V_i C_i) / \rho}{V_0} \quad (۲۰-۲)$$

که  $V_i (m^3)$  برابر حجم آب جریان ورودی،  $V_0 (m^3)$  برابر حجم آب جریان خروجی،  $C_i (\frac{kg}{m^3})$  برابر غلظت رسوب کل ورودی،  $C_0 (\frac{kg}{m^3})$  برابر غلظت رسوب کل خروجی،  $\rho (\frac{kg}{m^3})$  برابر چگالی حجمی رسوبات ته‌نشین شده.

## ۲-۶- راندمان رسوبشویی با پایین آوردن سطح آب مخزن

پایین آوردن سطح آب مخزن ممکن است توسط نیازهای کاربردی یا رقوم خروجی‌های تخلیه محدود شود. وقتی جریان رسوبشویی، از طریق خروجی‌هایی که بالاتر از رقوم ته‌نشینی قرار دارند، تخلیه می‌شوند، رسوبات نمی‌توانند خارج شوند و در نتیجه راندمان رسوبشویی بسیار پایین می‌آید. رسوبشویی با پایین آوردن سطح آب ممکن است رسوبات بالا دست را فرسایش دهد ولی این رسوبات در انتها در محل سد مجدداً ته‌نشین می‌شوند. اگر یک خروجی تحتانی باز باشد، برخی از این رسوبات فرسایش شده ممکن است به صورت جریان غلیظ از سد خارج شوند، اما این یک مقدار متوسط کمی

برای رسوبات خروجی از مخزن می‌باشد. بنابراین این روش تاثیر زیادی در خارج کردن رسوبات از مخزن ندارد بلکه باعث توزیع مجدد رسوب درون مخزن می‌گردد. شکل (۱-۲) هندسه‌ی کانال رسوبشویی را نشان می‌دهد (Brown, 194).



شکل (۱-۲) موقعیت کانال رسوبشویی، دید از جلو

## ۷-۲- مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی

منظور از مدل فیزیکی و هیدرولیکی ساخت نمونه‌ای از طرح واقعی ولی با ابعاد کوچکتر است، به طوری که رفتارهای هیدرولیکی دینامیکی در نمونه کوچک شده منطبق با نمونه واقعی باشد (شفاعی بجزستان، ۱۳۹۰).

## ۸-۲- مدل‌های عددی

از آنجایی که مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی زمان‌بر، و در بعضی موارد هزینه‌های زیادی را تحمیل می‌کنند، لذا مدل‌های عددی در صورتی که نتایج قابل قبولی به دست دهد، می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی باشد (Kiusalaas, 2005).

## ۹-۲- معادلات حاکم

همانطور که در فصل یک ذکر شد، بسیاری از مسائل هیدرولیک با فرض جریان‌های دائمی تحلیل می‌شوند. ولی در عمل در بسیاری از موارد اینگونه نیست. بلکه جریان‌ها به صورت غیردائمی هستند. در جریان‌های غیردائمی، سرعت و عمق جریان در هر لحظه در طول مسیر تغییر می‌کند. برای بیان خصوصیات این جریان‌ها از معادلات سنت و نانت استفاده می‌شود.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \quad (21-2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (22-2)$$

که در معادلات ذکر شده  $A$  مساحت جریان،  $Q$  دبی جریان،  $t$  زمان،  $x$  مکان در جهت جریان اصلی،  $S_f$  برابر شیب اصطکاکی،  $g$  شتاب ثقل و  $h$  عمق جریان می‌باشد (امامقلی‌زاده، ۱۳۸۷).

## ۱۰-۲- تاریخچه

دوران جدید پیشرفت علم هیدرولیک و مهندسی رودخانه به اواسط قرن پانزدهم به لئوناردو داوینچی<sup>۱</sup> برمی‌گردد. او نتایج علمی خود را در کتابی تحت عنوان "به خاطر بسیار وقتی صحبت از آب است، ابتدا انجام آزمایش سپس بحث" منتشر کرد. داوینچی اولین کسی بود که اصول اولیه‌ی انجام مدل‌های فیزیکی را یادآور شد. او در خصوص انتقال رسوبات رودخانه‌ای چنین می‌نویسد: وقتی آب با سرعت خیلی کم حرکت می‌کند، رسوبات کف رودخانه از سیلت یا ماسه تشکیل شده است و وقتی جریان در رودخانه‌ای قوی است، مواد بستر درشت‌تر می‌باشند. گالیه (۱۵۶۴-۱۶۴۲) از ستاره‌شناسان بنام بوده است که در مورد حرکت آب نیز مطالعاتی داشته است. او معتقد بود که ممکن است روزی راز حرکت ستارگان کشف گردد ولی شناخت قوانین حاکم بر آب به صورت نسبتاً ساده ممکن است زمان بسیار زیادتری لازم داشته باشد. شاید اولین کسی که به خصوص در زمینه انتقال رسوبات

---

<sup>۱</sup> Leonardo da vinci

رودخانه‌ای و علم مهندسی رودخانه مطالعه و نتیجه‌ی بررسی‌های خود را در کتابی منتشر کرده است، دومینو کو گلیلمینی<sup>۱</sup> باشد که بعضی‌ها وی را به نام پدر علم مهندسی رودخانه می‌نامند. از ابتکارات او احداث دیوارهای ساحلی و اپی<sup>۲</sup> در بعضی از رودخانه‌های ایتالیا بوده است. در ذیل یکی از جملات کتاب او در زمینه‌ی فرسایش رودخانه نقل شده است: "مسلم است که عریض و عمیق شدن رودخانه متناسب است با میزان فرسایش مواد رسوبی که سواحل و بستر رودخانه از آن تشکیل شده است. برای گود شدن کف رودخانه لازم است نیروهایی که باعث فرسایش می‌شوند بیشتر از مقاومت زمین یا مصالح بستر رودخانه باشند، زیرا در غیر اینصورت، به گونه‌ای که این دو تا نیرو با هم برابر باشند، گود برداری وجود نخواهد داشت. بنابراین همیشه می‌توان گفت که در فرآیند گود شدن رودخانه، یا نیروی آب به تدریج کاهش می‌یابد و یا مقاومت خاک افزایش می‌یابد، تا اینکه نوعی حالت تعادل بوجود آید". در سال ۱۷۷۰، فریزی<sup>۳</sup> دو کتاب منتشر کرد که در آنها مسائل مختلفی از قبیل اصلاح رودخانه‌ها و انتقال مواد رسوبی توسط جریان آب را توضیح می‌دهد. او اولین کسی است که مطالعات آزمایشگاهی را در این زمینه نیز انجام داد (شفایی بجستان، ۱۳۹۲).

دوبوات<sup>۴</sup> دانشمند فرانسوی در سال ۱۷۸۶ دومین چاپ کتاب خود را تحت عنوان "اصول علم هیدرولیک" منتشر کرد. در این کتاب نتایج آزمایشگاهی را در خصوص حداقل سرعت جریان لازم برای انتقال ذرات سنگ با اندازه‌های مختلف به ثبت رسانده است در کتاب او، به وجود آمدن و مهاجرت امواج ماسه‌ای، پایداری مقطع کانال‌ها، پدیده‌ی بوجود آمدن لایه‌ی درشت دانه در بستر رودخانه‌ها، معادلات مختلفی برای حرکت جریان یکنواخت، مرفولوژی رودخانه‌های آبرفتی و مسائل دیگری در این زمینه مورد بحث قرار گرفته است. از کسان دیگری که در قرن هیجده و اوایل قرن

---

<sup>۱</sup> Domenico Guglielmini

<sup>۲</sup> Eppi

<sup>۳</sup> Frizi

<sup>۴</sup> Dubuat



نوزده به پیشرفت دانش هیدرولیک انتقال مواد رسوبی کمک کرده اند می‌توان ناویر<sup>۱</sup>، سنت - ونانت، فرود<sup>۲</sup>، مانینگ<sup>۳</sup>، استوکس<sup>۴</sup>، رینولدز<sup>۵</sup>، بوزینسک<sup>۶</sup> را نام برد. در زمینه‌ی خاص انتقال رسوبات، دوبوی دانشمندی است که نظریه‌ی "نیروی کششی" را که به صورت گسترده مورد قبول قرار گرفته و در مطالعه‌ی حرکت بار بستر، کاربرد زیادی دارد، بوجود آورده است. او اظهار می‌دارد که مقدار رسوب حمل شده توسط رودخانه در درجه‌ی اول به شیب کانال و سپس به عمق جریان بستگی دارد. وی اصول نیروی کششی بحرانی را معرفی کرد و اظهار داشت که میزان این نیرو به اندازه‌ی ذرات رسوبی بستگی دارد. هرچه اندازه‌ی ذرات بزرگتر شود، میزان نیروی کشش بحرانی بیشتر خواهد بود. کندی<sup>۷</sup> در سال ۱۸۹۵ نتایج مطالعات گسترده‌ی خود را در مورد کانال‌های آبیاری در مقاله‌ای تحت عنوان "جلوگیری از رسوب گذاری در کانال‌های آبیاری" منتشر کرد. او اولین کسی بود که اصول پایداری کانال‌ها را مطرح کرد و روابطی جهت طراحی کانالهایی که نه فرسایش داشته باشند و نه رسوبگذاری ارائه کرده است. درشش دهه‌ی قبل، علم هیدرولیک انتقال رسوب پیشرفت گسترده‌ای کرده است. شیلدز<sup>۸</sup> در سال ۱۹۳۶ نخستین فردی بود که به طور اصولی حرکت نخستین یا شروع حرکت ذرات رسوبی را مورد مطالعه قرار داد که هنوز در بحث بار بستر و کانال‌های پایدار کاربرد گسترده‌ای دارد. اینشتین<sup>۹</sup> در سال ۱۹۵۰ با تکمیل و ارایه رابطه‌ی خود برای محاسبه‌ی برآورد میزان بار رسوبی، گامی جدید در پیشبرد روش‌های انتقال مواد رسوبی برداشت. هر چند بعضی اصول علم هیدرولیک انتقال رسوب شناخته شده ولی بعضا به دلیل پیچیدگی خاصی که دارند هنوز ناشناخته مانده است. از این رو مطالعات در این زمینه ادامه دارد(شفاعی بجستان، ۱۳۹۲).

---

<sup>۱</sup> Navier

<sup>۲</sup> Froude

<sup>۳</sup> Manning

<sup>۴</sup> Stokes

<sup>۵</sup> Reynolds

<sup>۶</sup> Boussinesq

<sup>۷</sup> Kennedy

<sup>۸</sup> Shields

<sup>۹</sup> Einstein

## ۲-۱۱- انواع مدل‌های ریاضی موجود

مدل‌های مختلف ارائه شده بر پایه نظریه‌ی انتقال رسوب، از لحاظ قابلیت شبیه‌سازی جریان آب و رسوب بصورت تک‌بعدی یا چند بعدی و روش‌های حل در نظر گرفته شده در آنها و شرایط مرزی و همچنین در نظر گرفتن پدیده‌هایی همانند تشکیل لایه‌ی محافظ، جریانات غلیظ، و تغییرات هندسی مقطع و... دارای انواع مختلفی می‌باشند. در ادامه برخی از این مدل‌ها و روش‌های ریاضی مختصراً تشریح می‌گردند.

### ۲-۱۱-۱- مدل MIKE 3

نرم افزار MIKE 3 یک سیستم عددی سه بعدی است که توسط موسسه‌ی DHI دانمارک طراحی شد. این برنامه شامل یک سری مدل‌های مرتبط است که باعث عملکردهای دینامیکی مختلفی می‌شود. این عملکردها شامل عملیات هیدرودینامیک، پخش و انتشار و سایر فرایندهای کیفیت آب است و در رودخانه، کانال‌ها، آب راهها و خورها کاربرد دارد (شمسایی و عباس‌نیا، ۱۳۸۷).

### ۲-۱۱-۲- مدل BRI-STARS

این مدل توسط آلبرت مولیناس (۲۰۰۰) برای اداره‌ی حمل و نقل بزرگراه‌های فدرال آمریکا ارائه گردید. مدل BRI-STARS شرایط جریان و فرآیند رسوبگذاری در مخازن و تغییرات ژئومتری رودخانه را به صورت شبه‌دو بعدی شبیه‌سازی می‌نماید. (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲).

### ۲-۱۱-۳- مدل SED2WES

مدل SED2WES در سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۷۲ توسعه داده شده است. مدل SED2WES بازنوشتی مدل STUDH می‌باشد. SED2WES قابل استفاده برای رسوبات بستر رس یا ماسه می‌باشد (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲).

#### ۲-۱۱-۴- مدل CCHE1D

از سال ۱۹۹۸ یک مدل عددی یک بعدی جدید برای انتقال رسوب در شبکه‌های آبراهه در NCCHE توسعه داده شد که جایگزین دو مدل DWAVNET و BEAMS گردید. مدل جدید CCHE1D نامگذاری شد که مدل‌های موج دیفیوژن و دینامیک را در بر دارد و معادلات سنت و نانت را بصورت کامل با روش تفاضل محدود حل می‌کند (احدیان و همکاران، ۱۳۹۱).

#### ۲-۱۱-۵- مدل FLOW-3D

FLOW-3D یک مدل سه بعدی می‌باشد که در شرکت Flow Sience توسعه داده شده است. FLOW-3D یک مدل اختلاف محدود غیرهیدرواستاتیکی می‌باشد که معادلات ناویراستوکس سه بعدی و پیوستگی را بصورت همزمان حل می‌نماید (تراپی پوده و همکاران، ۱۳۸۷).

#### ۲-۱۱-۶- مدل SSIIM

برنامه SSIIM در سال‌های ۹۱-۱۹۹۰ نوشته شده است. SSIIM برای حل سه بعدی معادلات، به منظور روندیابی محاسبات رسوب نوشته شده است. این مدل رسوبات ریزدانه را که در مسائل مربوط توربینها دارای اهمیت می‌باشد به خوبی شبیه سازی می‌نماید (حیدری و یزداندوست، ۱۳۸۸).

#### ۲-۱۱-۷- مدل GSTARS3

(Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Gstars3 Simulating) مدل انتقال رسوب عمومی برای شبیه‌سازی رودخانه‌های رسوبی، آخرین نسخه سری مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان آب و انتقال رسوب در رودخانه‌های رسوبی می‌باشد که در هیدرولیک رودخانه و رسوب مرکز USBR (اداره احیاء ایالات متحده) ایجاد شده است (شمسایی و فراست کیش، ۱۳۸۷).

مدل TABS-2 یک مدل دو بعدی است که قادر است تا شرایط هیدرولیکی، رسوب و آلودگی را در رودخانه‌ها، مخازن و خورها شبیه‌سازی کند (شفاعی بجستان، ۱۳۹۲).

## ۲-۱۲- مطالعات انجام شده جهت رسوبشویی مخازن سدها

مطالعات زیادی جهت رسوبشویی مخازن سدها در ایران و سایر کشورها انجام گرفته است که در ادامه به بعضی از این تحقیقات اشاره می‌شود. ابتدا به بررسی تحقیقات انجام شده به صورت عددی و سپس به تحقیقات آزمایشگاهی پرداخته می‌شود.

### الف) مدل‌های عددی

۱. شمسایی و فراست کیش (۱۳۸۷) با استفاده از مدل عددی GSTARS3 بر روی سد سفیدرود تاثیر رسوبشویی تحت فشار و آزاد را به طور مجزا مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. با بررسی‌های انجام شده به این نتیجه رسیدند؛ از مجموع رسوبات خارج شده از مخزن، حداکثر ۸٪ رسوبات بر اثر رسوبشویی تحت فشار و حداقل ۹۲٪ رسوبات بر اثر رسوبشویی آزاد تخلیه می‌شوند، لذا رسوبشویی آزاد از اهمیت بیشتری برخوردار است و رسوبشویی تحت فشار با تخلیه مخزن می‌تواند شرایط را برای رسوبشویی آزاد فراهم سازد. به عبارت دیگر بالا بودن تراز آب مخزن در آغاز عملیات رسوبشویی تحت فشار، حجم رسوبات خروجی و حجم آب مصرف شده برای شست و شوی هر تن رسوب را افزایش می‌دهد. از طرف دیگر بررسی‌ها نشان داد که در این مخزن رسوبشویی بر رسوبات درشت دانه تاثیرگذار نیست و نمی‌توان از آن به عنوان تنها راه حل برای جلوگیری از کاهش ظرفیت مخزن استفاده نمود و انجام عملیات رسوبزدایی تکمیلی نظیر لایروبی، استفاده از سیفون و یا عبور جریانات غلیظ از مخزن، علاوه بر رسوبشویی سالانه در مخزن سد سفیدرود اجتناب‌ناپذیر است.

۲. خانجانی و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از مدل عددی *FLOW-3D* و مدل فیزیکی اثر عمق جریان، قطر متوسط ذرات و زمان را بر حفره‌ی آبشستگی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که با کاهش عمق پایاب طول حفره کاهش می‌یابد. با افزایش زمان برای دبی‌های مختلف، عمق حفره‌ی آبشستگی افزایش می‌یابد و با افزایش قطر متوسط ذرات، ابعاد حفره‌ی آبشستگی کاهش می‌یابد. همچنین بررسی‌های حاصل از مدل عددی و فیزیکی نشان داد که همبستگی و ارتباط زیادی بین نتایج هر دو مدل وجود دارد.

۳. خانجانی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از مدل ریاضی کراندل و حل آن به وسیله برنامه‌ی کامپیوتری نرم افزار MAPPLE روند تغییر بستر سطح رسوب را در مدت زمان رسوبشویی با دبی‌های مختلف محاسبه کردند، نتایج بدست آمده نشان داد زمانی که به ازای یک ارتفاع ثابت آب در مخزن سد، دبی خروجی از تخلیه کننده تحتانی افزایش یابد باعث افزایش حجم مخروط رسوبشویی می‌شود. به عبارت دیگر برای داشتن حداکثر راندمان رسوبشویی تحت فشار بهتر است تا جایی که شرایط بهره برداری مخزن اجازه می‌دهد دریچه‌های تخلیه کننده با حداکثر ظرفیت خود مورد بهره برداری قرار گیرند. همچنین مشاهده شد که به ازای یک دبی ثابت، کاهش ارتفاع آب مخزن منجر به افزایش حجم رسوبشویی می‌گردد. بنابراین در رسوبشویی تحت فشار برای داشتن حداکثر راندمان بهتر است تا جایی که شرایط بهره برداری مخزن اجازه می‌دهد، ارتفاع آب مخزن را کاهش داد. به عبارت دیگر توصیه می‌شود در مخازنی که امکان رسوبشویی آزاد وجود ندارد، رسوبشویی تحت فشار زمانی صورت گیرد که رقوم سطح آب مخزن در حالت مینیمم بهره برداری باشد.

۴. جین- لیو (Jian Liu) و کازیو آشیدا (Kazuo Ashida) (۲۰۰۴) با استفاده از یک مدل عددی یک بعدی میزان بار معلق و بار بستر رودخانه‌ی کوروبی<sup>۱</sup> در کشور ژاپن را برآورد کردند. آنها در تحقیقات

---

<sup>۱</sup> Korube

خود از فرمول‌های ارائه شده توسط لین<sup>۱</sup> و کالینسکی<sup>۲</sup> استفاده کردند. سپس نتایج مدل عددی با مدل فیزیکی مقایسه و دقت خوبی بین این دو برقرار بود.

۵. قدیمی و رئیسی نژاد (۱۳۸۹) یک مدل عددی یک بعدی برای حل معادلات سنت و نانت ارائه دادند. در این مدل از روش اجزاء محدود برای حل معادلات سنت و نانت استفاده کردند. برای تقریب نمایی متغیرها از المان‌های یک بعدی سه گره‌ای همراه با مدل درون یابی درجه دو استفاده شده است. روش باقیمانده وزنی گالرکین به منظور گسسته سازی ترم‌های مکانی و روش ترکیبی پیش رو تفاضل محدود و نیمه ضمنی ( $\theta$ -Method) برای گسسته سازی زمانی معادلات دیفرانسیلی استفاده شده است. در پایان به منظور معتبر سازی مدل عددی، دو تست متداول شکست سد و انتشار موج تنها ارائه شده است. نتایج عددی مدل پیشنهاد شده با پاسخ تحلیلی و نتایج مدل عددی TELEMAC مقایسه گردیده و تطابق حاصله نشانگر قابلیت مناسب این مدل عددی می‌باشد.

۶. حیدری و یزداندوست (۱۳۸۸) مدیریت رسوبشویی مخازن سدها را با استفاده از مدل سه بعدی SSIM و GIS مورد بررسی قرار دادند. مطالعات انجام شده روی سد سفید رود انجام شد. در شبیه‌سازی رسوبشویی مخزن، همخوانی خوبی با مشاهدات قبلی دیده شد و اثبات گردید که با کاهش تراز سطح آب مخزن، باعث افزایش مقدار رسوب خروجی می‌گردد. برای کارایی بیشتر رسوبشویی تحت فشار می‌بایست تراز سطح آب مخزن تا تراز جریان رودخانه‌ای کاهش یابد که موسوم به رسوبشویی جریان آزاد می‌باشد. در رسوبشویی تحت فشار پس از طی یک دوره‌ی زمانی معین که با تراز سطح آب در ارتباط است، نرخ حجم رسوبات خارج شده ثابت می‌ماند و رسوبشویی عملاً متوقف می‌گردد. اما با کاهش تراز سطح آب، مجدداً رسوبشویی از بستر آغاز خواهد شد. در ترازهای نزدیک به رسوبشویی جریان آزاد یک افزایش ناگهانی رسوب خروجی مشاهده می‌شود، که می‌توان آن را به ریزش دیواره‌های کانال در پی رسیدن به شیب زاویه‌ی آرامش نسبت داد. غیر از محوطه‌ی اطراف

---

<sup>۱</sup> Lane

<sup>۲</sup> Kalinske

دریچه‌ها که رسوب برداری قابل ملاحظه‌ای دارند، در دیگر بخش‌ها، برآمدگی‌های سطحی بستر شسته شده و در فرورفتگی‌های بستر، رسوبگذاری مختصری در اثر رسوبات ورودی به مخزن یا رسوبات حاصل از شستن نقاط برآمده انجام شده است.

۷. سی ونگ چانگ (Se Woong Chung) و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از شبیه‌سازی عددی و تجربی اثر رسوبشویی مخزن سد داجئونگ<sup>۱</sup> را بر روی کیفیت آب پایین دست رودخانه گئوم<sup>۲</sup> بررسی کردند. در طول آزمایشات، دبی مخزن از ۳۰ تا ۲۰۰ متر مکعب بر ثانیه در مدت ۶ ساعت متغیر بود. کاهش دبی تخلیه اثر قابل توجهی بر روی غلظت محلول نیتروژن و فسفر داشت، به گونه‌ای که در دبی‌های بالا غلظت این عناصر کمتر بود. مدل نتایج قابل قبولی را در پیش بینی زمان سپری شده‌ی رسوبشویی و تغییرات محلول اکسیژن و ترکیبات فسفر نشان داد. هرچند توانایی محدودی را در شبیه‌سازی مواد آلی و اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی<sup>۳</sup> (BOD)، به دلیل در نظر نگرفتن مکانیسم دقیق ترکیبات رسوب داشت (Brown, 1943).

۸. اعتدالی، (۱۳۹۲) با استفاده از مدل ریاضی SSIIM و اطلاعات مربوط به ژئومتری، هیدروگرافی و رسوب بستر به بررسی شبیه‌سازی رسوبشویی تحت فشار در مخزن سد کارون پرداخت. در این تحقیق از رابطه‌ی فان راین برای محاسبات انتقال رسوب استفاده شد. از بررسی نتایج اینگونه به دست آمد که مدل SSIIM، با وجود خطای حدود ۲۲ درصد قادر به شبیه‌سازی فرآیند رسوب شویی می‌باشد. و با مقایسه رسوب شویی در حالت ارتفاع آب و دبی‌های متناظر با آن‌ها به این نتیجه رسیدیم که حجم رسوبات تخلیه شده در رسوب شویی با ارتفاع آب رابطه عکس دارد و رسوب شویی با ارتفاع حداقل جهت تامین مصارف کشاورزی (۴۸۸ متر) بیشترین مقدار انتقال رسوب را در بین چند حالت مدل شده نشان داد.

---

<sup>۱</sup> Daecheong

<sup>۲</sup> Geum

<sup>۳</sup> Biological Oxygen Demand

۹. عبدالله پور و همکاران، (۱۳۹۱) عملکرد سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی و شبکه‌های عصبی در پیش بینی دبی رسوب تخلیه شده از تخلیه کننده تحتانی، با قرارگیری سازه نیم استوانه به ازای متغیرهای مختلف ارزیابی کردند. متغیرهای لحاظ شده شامل ارتفاع شکاف و ارتفاع سطح آب بودند. نتایج حاصله دارای عملکرد قابل قبولی از هر دو مدل بود، و بهترین عملکرد مدل دارای ریشه میانگین خطا برای مدل فازی - عصبی و شبکه‌های عصبی به ترتیب برابر  $3/95 \times 10^{-5}$  متر و  $4/34 \times 10^{-5}$  متر می‌باشد.

(ب) مدل‌های آزمایشگاهی

۱۰. امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۸۶) با استفاده از یک مدل فیزیکی به بررسی و ارزیابی رسوبشویی تحت فشار در سدهای مخزنی پرداختند. ایشان با آزمایشهای مختلف تاثیر دبی و ارتفاع آب مخزن را بر راندمان رسوبشویی بررسی کردند. بررسی‌های به عمل آمده نشان داد که برای دستیابی به حداکثر راندمان، تا آنجایی که بهره‌برداری مخزن اجازه می‌دهد ارتفاع آب مخزن کاهش یابد و دریچه‌ها با حداکثر ظرفیت‌شان بهره برداری شوند.

۱۱. جین-سونگ لی (Jihn-Sung Lai) و شن (Hsieh.W-Shen) (۱۹۹۶) شناخت پدیده‌ی رسوبشویی را بهبود دادند. ایشان آزمایشات خود را با استفاده از ذرات گرد ماسه ای با اندازه‌ی یکنواخت غیرچسبنده انجام دادند. آزمایشات نشان داده با جریان تحت فشار یک مخروط رسوبشویی، در یک دوره بسیار کوتاه زمانی، می‌تواند تشکیل شود و فقط مقدار نسبتاً کوچکی از رسوبات رسوبشویی خواهند شد. همچنین در سال ۱۹۹۵ نشان دادند که دبی خروجی رسوب، به طور قوی، با گرادیان سطح آب و عرض کانال رسوبشویی ارتباط دارد. تحقیقات آنها توسط داده‌های آزمایشگاهی تایید شدند (خانجانی و علیپور شهربابکی، ۱۳۹۰).

۱۲. گانگدو (Gungdou) (۱۹۹۵) نشان داده که ظرفیت رسوب خروجی از مخزن شامل دو بخش می‌باشد. ۱. ظرفیت خروج رسوب از بدنه‌ی سد که ظرفیت سد نامیده می‌شود. ۲. ظرفیت حمل رسوب جریان در ناحیه مخزن که ظرفیت جریان نامیده می‌شود. با پایین آوردن رقوم آب مخزن و کاهش



عمق آب، ظرفیت جریان افزایش می‌یابد زیرا سرعت جریان افزایش می‌یابد. ظرفیت سد در رقوم پایین آب مخزن و با کاهش ارتفاع آب بالای خروجی تحتانی کم می‌باشد. برای یک رسوبشویی موفق، ظرفیت سد نبایستی کوچکتر از ظرفیت جریان باشد به طوری که رسوبات حمل شده تا نزدیک سد، بتوانند بدون ته‌نشین شدن از طریق دریاچه‌های تحتانی خارج شوند. در این مطالعه، تنش برشی بستر به عنوان یک پارامتر مهم در رسوبشویی هیدرولیکی رسوب معرفی شده است. چون جریان در طی رسوبشویی، بسیار ناپایدار و غیریکنواخت است، بنابراین نیروی اینرسی و تغییرات آن بایستی در محاسبات در نظر گرفته شود  $\tau = -\gamma R S_b$  فقط برای جریان یکنواخت کاربرد دارد. برای جریان نسبتاً پایدار با نوسان زیاد، شیب سطح آب  $S_s$ ، بایستی جایگزین شیب بستر،  $S_b$  گردد. رابطه‌ی کلی زیر می‌تواند برای محاسبه‌ی تنش برشی بستر در خلال رسوبشویی به کار برده شود.

$$\frac{DU}{Dt} = -\frac{\tau}{\rho R} - g \frac{\partial Z_s}{\partial x} \quad (2-23)$$

که در آن داریم:

$$\frac{DU}{Dt} = \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} \quad (2-24)$$

که  $U$  برابر سرعت جریان،  $\frac{\partial U}{\partial t}$  شتاب موضعی،  $\frac{\partial U}{\partial x}$  شتاب محلی،  $Z_s$ ، برابر رقوم سطح رسوب،  $\tau$  برابر تنش برشی بستر،  $R$  برابر شعاع هیدرولیکی کانال رسوبشویی،  $\rho$  برابر چگالی ذرات رسوب و  $x$  فاصله به طرف بالادست می‌باشد (جعفری، ۱۳۸۱).

۱۳. جین-سونگ لی (Jihn-Sung Lai) و شن (Hsieh.W-Shen) (۱۹۹۵) طی آزمایشاتی نشان دادند که

دبی خروجی رسوب، به طور قوی با دبی گرادیان سطح آب و عرض کانال رسوبشویی ارتباط دارد. در این تحقیق رابطه‌های  $Q_{os} = E S_w^{1.2} Q_o^{1.6} / B^{0.6}$  و  $C_s = E q^{0.6} S_w^{1.2}$  شدند. در روابط بالا،  $Q_{os}$  دبی خروجی رسوب،  $Q_o$  دبی خروجی،  $S_w$  برابر شیب سطح آب،  $B$  برابر عرض کانال رسوبشویی،  $C_s$  برابر غلظت رسوب خروجی،  $q$  برابر دبی واحد عرض و  $E$  ضریب فرسایش پذیری است. از طرف دیگر، کاربرد روابط فوق محدود می‌باشند زیرا فقط برای تخمین رسوب خروجی

در جریان آزاد بکار برده می‌شود. در این مطالعه چندین معیار برای رسوبشویی موثر ارائه شده است که عبارتند از:

۱. به منظور پایین‌تر آوردن رقوم آب مخزن در خلال دوره‌ی رسوبشویی، بایستی ظرفیت طراحی درجه تخلیه‌ی تحتانی به اندازه‌ی کافی زیاد باشد.

۲. در رسوبشویی با پایین آوردن رقوم آب مخزن تا نزدیک خروجی تخلیه، نرخ پایین آمدن سریع و تنظیم کردن خروجی تخلیه در عمق بیشتر، برای عملکرد رسوبشویی مفید می‌باشند.

۳. رسوبشویی‌ها بایستی با وقفه انجام شوند؛ زیرا در خلال رسوبشویی دبی رسوب خروجی و همچنین گرادیان سطح آب کاهش می‌یابد لذا با ایجاد وقفه به جای رسوبشویی‌های طولانی مدت گرادیان سطح آب مجدداً بالاتر آمده؛ در نتیجه توانایی رسوبشویی بهبود می‌یابد (جعفری، ۱۳۸۱).

۱۴. عبدالله‌پور و حسین‌زاده دلیر (۱۳۹۲) با استفاده از یک مدل فیزیکی تاثیر قرارگیری سازه نیم استوانه بر راندمان رسوبشویی تحت فشار مخازن را مورد بررسی قرار دادند. در سازه مورد نظر شکاف‌هایی در ارتفاع و طول‌های مختلف ایجاد گردید، به طوری که بالای شکاف هم سطح رسوبات در مخزن که آن قسمت نیز همتراز پایین دریچه بود. نتایج نشان داد که تغییرات حجم رسوبشویی در یک سطح آب حساسیت کمتری نسبت به طول شکاف دارد. در حالتی که نسبت قطر سازه به طول شکاف برابر ۲ باشد رسوبشویی بیشتری اتفاق افتاد. تغییرات حجم رسوبشویی نسبت به ارتفاع شکاف زیاد بوده به طوری که در نسبت ارتفاع شکاف به قطر سازه نیم استوانه برابر ۶/، حجم رسوبشویی به میزان قابل توجهی افزایش یافت. همچنین با قطر سازه ۲/۵ برابر قطر تخلیه کننده، بیشترین حجم رسوبشویی حاصل شد و در این حالت حجم رسوبشویی نسبت به حالت بدون قرارگیری سازه ۳۰ برابر گردید.

۱۵. فانگ (Fang) (۱۹۹۶) تحقیقاتی درباره‌ی هندسه‌ی مخروط رسوبشویی جلوی خروجی تحتانی انجام داده که در سه عنوان گروه‌بندی می‌شود: مطالعه‌ی تئوری، تست‌های آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های صحرایی. در این مطالعه دو پارامتر مهم برای هندسه این مخروط معرفی شده که عبارتند از:

L طول دهانه بالایی مخروط،  $\alpha$  شیب طولی مخروط رسوبشویی. توزیع سرعت جلو خروجی‌های تحتانی، بر طبق تئوری جریان فرو رونده تخمین زده می‌شود. در این مطالعه، از مدل هیدرولیکی مخزن زیپینگ پو<sup>۱</sup> واقع در بالادست رودخانه مین جیانگ<sup>۲</sup> استفاده شده. برای تعیین قطر ماسه از تشابه سرعت اولیه در مدل و پروتوتایپ استفاده شده است. از آزمایشات مدلی نتایج زیر حاصل شده است:

۱. در حالتی که سطح آب مخزن دارای رقوم نرمال باشد، با استفاده از ماسه طبیعی و نرم، متوسط شیب طولی و زاویه‌ی کناری بین  $32/2$  و  $32/7$  درجه، محدود می‌شوند که این مقادیر خیلی نزدیک به زاویه‌ی قرارگیری ماسه نرم و طبیعی در زیر آب می‌باشند.

۲. زاویه‌ی شیب کناری معمولاً تندتر از شیب طولی است. این اختلاف با افزایش حجم دبی خروجی و قطر مواد ته‌نشین شده افزایش می‌یابد.

۳. در حالتی که رقوم آب پایین آورده شد، شیب‌های طولی و کناری، در اثر فرسایش پسر<sup>۳</sup> و پیشرو<sup>۴</sup> کاهش یافته بطوری که در نهایت، زاویه شیب طولی به  $9/5$  درجه و زاویه کناری به  $18$  درجه، کاهش یافت (جعفری، ۱۳۸۱).

۱۶. خیامی و همکاران (۱۳۸۷) با کاربرد مدل Dynamic Reservoir Simulation و آمار موجود، شرایط کیفی آب مخزن سد طرق از نقطه نظر تغییرات زمانی پارامترهای شوری، شوری و اکسیژن محلول مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که در سالهای پر آب مانند سال ۱۹۹۸ که در آن دبی رودخانه ورودی بیشتر از دبی میانگین دراز مدت آن است، به دلیل بالا بودن تراز سطح آب (بیش از ۵۰ متر)، لایه بندی حرارتی به صورت کامل از اواسط بهار تا اواخر تابستان در داخل مخزن اتفاق می‌افتد که این امر تغییرات خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب را در ترازهای مختلف به

---

<sup>۱</sup> Zipingpu

<sup>۲</sup> Min giang

<sup>۳</sup> Retrogressive

<sup>۴</sup> Progressive

دنبال دارد. ولی در سالهایی مانند سال ۲۰۰۲ به علت کم بودن حجم آب ورودی و بالا بودن نسبی میانگین درجه حرارت سالانه، تراز سطح آب در مخزن تقلیل می‌یابد و به حدود ۱۶ تا ۲۰ متر می‌رسد. در این شرایط لایه بندی حرارتی یا تشکیل نمی‌شود و یا اگر تشکیل گردد، از نظر زمانی زودتر شروع شده و طول دوره‌ی استقرار آن کوتاه می‌شود. بر اساس نتایج این مطالعات، در سال ۱۹۹۸ میانگین دمای لایه های سطحی و عمقی مخزن اختلافی معادل ۱۰ و ۱۱ درجه سانتیگراد را به ترتیب در فصول بهار و تابستان نشان دادند. این در حالیست که تفاوت مذکور برای بهار سال ۲۰۰۲، حدود ۱/۵ درجه سانتیگراد مشاهده گردید. در ارتباط با تغییرات شوری، نتایج حاصل از بررسی ها دلالت بر آن داشت که همزمان با لایه بندی حرارتی، لایه بندی شوری نیز در آب مخزن اتفاق می افتد و غلظت املاح از سطح به عمق افزایش می یابد. در سال ۱۹۹۸، تفاوت مشاهده شده در میانگین غلظت های املاح بین لایه های بالایی و پایینی مخزن به ترتیب معادل ۴۳ میلیگرم در لیتر برای فصل بهار ۱۰ میلیگرم در لیتر برای فصل تابستان بود. شبیه سازی میزان اکسیژن محلول در دوره های لایه بندی حرارتی، دامنه تغییراتی بین صفر تا ۹ میلیگرم در لیتر را بین ترازهای بالایی و پایینی مخزن نشان دادند. با شروع پدیده لایه بندی حرارتی از اردیبهشت ماه، به تدریج غلظت اکسیژن محلول در اعماق پایین تر از ۲۰ متر کاهش می یابد به طوریکه در اواسط تیر ماه یک لایه بی هوایی به ضخامت ۱۰ متر در کف مخزن توسعه می‌یابد که شرایط را برای تولید بو، رنگ و طعم نامطبوع مهیا می سازد. در کلیه سالهای مورد مطالعه (۲۰۰۴-۱۹۹۸)، در فصول پاییز و زمستان، به دلیل اختلاط آب مخزن و یکنواخت شدن شرایط، تفاوتی در میزان شوری و سایر خصوصیات کیفی آب در ترازهای مختلف مشاهده نگردید.

۱۷. امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از یک مدل فیزیکی به بررسی زمانی گسترش مخروط آبشستگی در رسوبشویی هیدرولیکی تحت فشار پرداختند. در این تحقیق مراحل شکل گیری حفره‌ی آبشستگی و تغییرات ابعاد حفره مورد بررسی قرار گرفت. بررسی زمانی توسعه‌ی مخروط آبشستگی برای شرایط هیدرولیکی مختلف نشان داد که الگوی کلی و مشترکی بر آن حاکم است. نتایج، همچنین

نشان می‌دهد که به ازای یک ارتفاع ثابت آب در مخزن و در یک زمان مشخص، میزان عمق آبشستگی برای دبی تخلیه بزرگتر، بیشتر است. در این حالت، در دبی‌های تخلیه بزرگتر مخروط آبشستگی زودتر به تعادل می‌رسد. همچنین در یک دبی ثابت و در یک زمان مشخص، میزان عمق آبشستگی در مقادیر کمتر از ارتفاع آب در مخزن (عمق پایاب)، بیشتر بوده و زمان تعادل حفره برای مقادیر کمتر ارتفاع آب در مخزن کمتر است.

۱۸. امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از یک مدل فیزیکی به بررسی تاثیر نسبت پوکی رسوبات چسبنده در حجم رسوبات تخلیه شونده در رسوبشویی تحت فشار پرداختند. در این تحقیق برای بررسی تاثیر این پارامتر، رسوبات چسبنده با سه نسبت پوکی  $۰/۸۵$ ،  $۲/۰۲$  و  $۳/۴۹$  با دبی و ارتفاع آب مختلف مورد استفاده قرار گرفت. آزمایشات مورد نظر در یک مدل فیزیکی به ابعاد  $۷ \times ۱/۵ \times ۱/۵$  متر انجام شد. نتایج و مشاهدات انجام گرفته با استفاده از رسوبات چسبنده نشان داد که رسوبات به صورت توده‌ای از سطح رسوب داخل مخزن جدا شده و همراه جریان آب از دریچه خارج می‌گردد. با توجه به چسبنده بودن رسوبات، شکل مخروط رسوبشویی از شکل منظمی برخوردار نمی‌باشد. همچنین بررسی تاثیر نسبت پوکی نشان داد؛ در مجموع کاهش نسبت پوکی موجب کاهش طول و حجم مخروط رسوبشویی می‌گردد.

۱۹. ایوب‌زاده و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از یک مدل فیزیکی به طول ۷ متر و عرض  $۱/۴$  متر و ارتفاع  $۱/۵$  متر اثر زمان را بر شکل و تعادل مخروط رسوبشویی در رسوبشویی تحت فشار بررسی کردند. آزمایش اول در مدت زمان کوتاه یک ساعت انجام شد و آزمایش دوم  $۱۰/۵$  ساعت به طول انجامید. خصوصیات رسوبات و شرایط هیدرولیکی مورد استفاده در آزمایش‌های انجام شده متفاوت بود. نتایج نشان داد که حفره رسوبشویی در زمان‌های آغازین به تعادل می‌رسد و تغییر شکل آن با زمان ناچیز است؛ به طوری که ابعاد مخروط رسوبشویی در آزمایش دوم بطور متوسط  $۲/۱۴$  درصد نسبت به آزمایش اول تغییر کرده است.

۲۰. ایوب زاده و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از مدل آزمایشگاهی اثر عدد فرود جریان خروجی از دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی در گسترش زمانی ابعاد حفره در رسوبشویی تحت فشار مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که به طور متوسط ۷۰ درصد رسوبات بعد از گذشت ۵۰ درصد از زمان تعادل عملیات رسوبشویی تحت فشار از مخزن تخلیه می‌شوند و در یک بازه‌ی زمانی مشخص با افزایش عدد فرود جریان نرخ افزایش ابعاد حفره‌ی رسوبشویی افزایش می‌یابد. علاوه بر آن با استفاده از آنالیز ابعادی و تجزیه و تحلیل آماری بر روی داده‌های آزمایشگاهی بدست آمده، رابطه‌ی بدون بعدی برای تخمین ابعاد حفره رسوبشویی به صورت زیر ارائه گردید.

$$A^* = 1.41(Fr_0)^{.43} \cdot (T^*)^{2.06} \quad (25-2)$$

در رابطه‌ی بالا  $A^* = \frac{A_t}{A_e}$  و  $T^* = \frac{t}{T_e}$  که  $t$  زمان بعد از شروع آزمایش،  $T_e$  زمان تعادل هر آزمایش،  $A_t$  مساحت حفره‌ی رسوبشویی در زمان مشخص،  $A_e$  مساحت حفره در زمان تعادل و  $Fr_0$  عدد فرود جریان است.

۲۱. امامقلی‌زاده و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی تاثیر ابعاد دریچه‌ی تحتانی بر حجم و ابعاد مخروط آبشستگی در رسوبشویی تحت فشار بررسی کردند. برای دستیابی به هدف مورد نظر، آزمایش‌ها با ۳ ارتفاع آب، ۶ دبی مختلف در هر ارتفاع آب و سه دریچه‌ی دایره‌ای با قطرهای ۱،۲ و ۳ اینچ طراحی گردید. نتایج این تحقیق نشان داد، در دبی‌های خروجی کم، تغییرات حجم رسوبات خروجی از سد، همچنین ابعاد حفره‌ی شسته شده در جلو دریچه‌ی تحتانی به افزایش یا کاهش ارتفاع آب در مخزن محسوس نمی‌باشد. همچنین به ازای یک دبی و ارتفاع آب معین، افزایش قطر دریچه، راندمان رسوبشویی را افزایش می‌دهد.

۲۲. ایوب‌زاده و همکاران، (۱۳۹۱) در یک مدل آزمایشگاهی اثر تراز سطح آب مخزن در گسترش زمانی ابعاد حفره در رسوبشویی تحت فشار را بررسی کردند. نتایج نشان داد که به طور متوسط ۵۶ درصد رسوبات بعد از گذشت ۷۰ درصد از زمان تعادل عملیات رسوبشویی تحت فشار، از مخزن تخلیه می‌شوند و در یک بازه‌ی زمانی مشخص با افزایش تراز سطح آب، نرخ افزایش ابعاد حفره رسوبشویی

افزایش می‌یابد. همچنین تحقیقات آنها نشان داد با کاهش ارتفاع آب مخزن، مساحت و زمان تعادل حفره‌ی رسوبشویی افزایش می‌گردد. در ادامه با استفاده از آنالیز ابعادی و تجزیه و تحلیل داده‌های بدست آمده از پردازش تصاویر، معادله‌ی بدون بعد زیر استخراج گردید.

$$A^* = .9187(H^*)^{.6778} \cdot (T^*)^{1.833} \quad (26-2)$$

در رابطه‌ی بالا  $A^* = \frac{A_t}{A_e}$  و  $T^* = \frac{t}{T_e}$  و  $H^* = \frac{H_w}{H_s}$  که  $t$  زمان بعد از شروع آزمایش،  $T_e$  زمان تعادل هر آزمایش،  $A_t$  مساحت حفره‌ی رسوبشویی در زمان مشخص،  $A_e$  مساحت حفره در زمان تعادل،  $H_w$  ارتفاع آب مخزن نسبت به مرکز دریچه،  $H_s$  ارتفاع رسوبات تجمع یافته در پشت مخزن نسبت به مرکز دریچه.

۲۳. رزاقی نائینی و نائینی، (۱۳۹۱) با روش‌های رسوبشویی بازده مخزن سد شراب گرو واقع در استان کهگیلویه و بویر احمد را ارزیابی کردند. در تحقیقات انجام شده، روش‌های هیدرولیکی با توجه داشتن توجیه اقتصادی اهمیت بیشتری داشت. برای طرح سازه‌ی مورد نیاز برای رسوبشویی، دو گزینه مطرح و بررسی شد. ۱. تعبیه یک لوله با قطر مناسب در سراسر عرض بدنه سد با رژیم جریان تحت فشار ۲. کاهش طول لوله و تبدیل جریان تحت فشار به جریان با سطح آزاد در داخل بدنه. همچنین اثر تراز آب، رقوم قرارگیری لوله و سطح بازشدگی بررسی گردید. نتایج نشان داد که تخلیه‌ی رسوبات مخزن با عملیات فلاشینگ امکان‌پذیر بوده و رسوبشویی تحت فشار در رقوم‌های پایین مخزن یا رسوبشویی جریان آزاد از بازده بالاتری برخوردار است.

## ۲-۱۳- جمع بندی کلی مطالعات گذشته

مطالعات انجام شده جهت شبیه‌سازی رسوب در مخازن سدها بیشتر به صورت آزمایشگاهی انجام شده و روابط زیادی ارائه شده است. هر کدام از این روابط تاثیر دو یا چند پارامتر را در رسوبشویی نشان می‌دهد. از آنجایی که هیچ مدل آزمایشگاهی دقیقا مشابه نمونه‌ی اصل نیست، بنابراین بیان یک رابطه که بتواند تمام هیدرولیک جریان و رسوب را در مخازن سدها بررسی کند وجود ندارد و یا پیدا کردن چنین رابطه‌ای به صورت آزمایشگاهی نیاز به صرف زمان زیادی است. در چند دهه‌ی اخیر با گسترش روش‌های عددی، جهت بررسی اثر چند متغیر مستقل در متغیر وابسته از مدل‌های ریاضی استفاده شده است. مزیت مدل ریاضی نسبت به مدل آزمایشگاهی هزینه‌ی کم و صرفه جویی در زمان می‌باشد. لذا در این تحقیق با استفاده از یک مدل ریاضی و معادلات سنت‌ونانت به بررسی رفتار رسوبشویی در مخازن سد پرداخته شده است.



# فصل سوم

## مواد و روش‌ها

در این فصل ابتدا به توضیح انواع روش‌های عددی به ویژه روش تفاضل محدود پرداخته، سپس حل معادلات سنت‌ونانت با تقریب سازی روش غیر صریح پریسمن<sup>۱</sup> و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی (روش بتا)، به صورت مرحله‌ای و همزمان و همچنین معرفی مدل تجاری استفاده شده و مدل آزمایشگاهی انجام شده توسط جعفری (۱۳۸۱) پرداخته شده است.

### ۳-۱-۱- روش‌های عددی

از زمانهای بسیار قدیم، دو روش علمی برای حل مسائل مورد استفاده قرار می‌گرفت: روش تئوری و روش آزمایشگاهی. اخیراً روش سومی نیز مورد توجه قرار گرفته است که بسیار مهم و کار آمد بوده و روش عددی نامیده می‌شود. روش‌های عددی همواره مورد توجه بسیاری از ریاضی‌دانان، دانشمندان و مهندسیین بوده است. قدمت آموزش روش‌های عددی نسبت به مباحثی مثل هندسه و جبر بسیار کم است. محققان دو دوره را برای محاسبات عددی تفکیک نموده‌اند. دوره‌ی اول مربوط به ابتدای دهه‌ی ۱۹۶۰ تا انتهای ۱۹۸۰ و دوره‌ی دوم از ابتدای دهه‌ی ۱۹۹۰ تاکنون می‌باشد (ظهیری و مفتاح هلقی، ۱۳۹۱).

عموماً، معادلات حاکم در مکانیک سیالات یک مجموعه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای غیرخطی و وابسته را ایجاد می‌کنند که باید در یک قلمرو ناهموار با شرایط اولیه و مرزی مختلف حل شوند. در بیشتر موارد، حل تحلیلی معادلات مکانیک سیالات بسیار محدود است. با اعمال شرایط مرزی، این محدودیت‌ها تنگتر می‌شوند. به عنوان مثال یک معادله‌ی دیفرانسیل پاره‌ای با شرایط مرزی دیریشله (شرایطی که در آن مقادیر متغیر وابسته در مرزها داده شده‌اند) ممکن است دارای حل تحلیلی باشد. در حالی که همان معادله‌ی دیفرانسیل پاره‌ای با شرایط مرزی نیومن (شرایطی که در آن مشتق متغیر وابسته در مرزها داده می‌شود) ممکن است حل تحلیلی نداشته باشد (عظیمیان، ۱۳۷۷).

<sup>۱</sup> preissman

در رودخانه‌ها جریان‌ها به صورت دائمی و غیردائمی اتفاق می‌افتد. تحلیل جریان‌های دائمی با فرض دبی ثابت انجام می‌شود، ولی جریان‌های غیردائمی از پیچیدگی خاصی برخوردار است. برای این کار از معادلات سنت‌ونانت استفاده می‌کنند. حل معادلات سنت‌ونانت با روش‌های تحلیلی امکان‌پذیر نمی‌باشد، لذا تلاش‌های زیادی برای حل معادلات فوق‌الذکر با روش‌های عددی انجام پذیرفته است. برای حل معادلات سنت‌ونانت برحسب ترم‌های دیفرانسیلی جزئی، از تقریب سازی سری تیلور استفاده می‌کنند. هرچند به خاطر اینکه سری‌های نامتناهی هنگام جایگزین کردن ترم‌های دیفرانسیلی جزئی با دیفرانسیل محدود، قطع می‌شوند، این تقریب سازی باعث خطای برشی خواهد شد. خطاهای برشی وابسته به اندازه افزایش گام زمانی و مکانی و نحوه تقریب سازی مورد استفاده برای تبدیل کردن معادلات پیوسته به معادلات منفصل شده است. به طور بالقوه، تجمع خطای برشی می‌تواند نتایج روش عددی را بی اعتبار کند (امام‌قلی‌زاده، ۱۳۹۳).

### ۳-۱-۲- روش تفاضل محدود

برای حل مدل‌های ریاضی روش‌های عددی مختلفی از جمله، تفاضلات محدود<sup>۱</sup>، المان‌های محدود<sup>۲</sup> و حجم‌های محدود<sup>۳</sup> وجود دارند. روش المان‌های محدود، بیشتر برای حل مسائل سازه‌ای به کار برده می‌شود، یا روش حجم‌های محدود بیشتر برای حل مسائل سیالاتی موثر می‌باشد. روش تفاضل محدود یکی از روش‌های موثر برای حل مسائل و معادلات دیفرانسیلی می‌باشد. برای حل یک معادله دیفرانسیل جزئی به وسیله‌ی تفاضلات محدود، باید مشتق‌های موجود در معادله دیفرانسیل را بوسیله‌ی یکسری تقریب‌های خطی جایگزین کرد. با توجه به اینکه تفاضل محدود یکی از روش‌های عددی کامل حل معادلات سنت‌ونانت می‌باشد، لذا در این بخش کوشش می‌شود تا مبانی این روش مورد بررسی قرار گیرند. در این روش‌ها رابطه‌ی پیوستگی همراه با کلیه‌ی عبارات معادله‌ی اندازه

---

<sup>۱</sup> Finite difference

<sup>۲</sup> Finite element

<sup>۳</sup> Finite volume

حرکت به کار می‌روند. لذا دقت این روش‌ها بیشتر از روش‌های تقریبی است. معادلات ناویر استوکس مثال بسیار پیچیده‌ای است که شامل دو معادله‌ی دیفرانسیل همزمان می‌باشد. برای مشخص کردن جواب معادله‌ی دیفرانسیل پاره‌ای، شرایط دیگری را بایستی برای تابع جواب تعریف نمود. عموماً این شرایط به صورت مقادیر مرزی روی تمام یا بخشی از محیط ناحیه‌ای که جواب معادله در آن ناحیه‌ی موردنظر است می‌باشند. طیف مرزها و شرایط مرزی از عوامل تعیین کننده چگونگی معادلات دیفرانسیل است (عظیمیان، ۱۳۷۷).

### الف- شرایط اولیه و شرایط مرزی

برای به دست آوردن جواب یگانه یک معادله دیفرانسیل پاره‌ای به مجموعه‌ای از شرایط مکمل نیاز است تا توابع اختیاری حاصل از انتگرالگیری معادله دیفرانسیل پاره‌ای را معین کنیم (مانند ثابت‌های اختیاری در معادلات دیفرانسیل معمولی). شرایط یاد شده به عنوان شرایط مرزی و شرایط اولیه تقسیم بندی می‌شوند.

شرایط اولیه به معنی معلوم بودن مقدار متغیر وابسته در یک حالت اولیه است. شرایط مرزی، به معنی معلوم بودن مقدار متغیر وابسته و یا مشتق‌های آن در مرزهای قلمرو حل معادله دیفرانسیل پاره‌ای است. شرایط مرزی مختلف عبارتند از:

۱- شرایط مرزی دیریشله<sup>۱</sup>: مقدار متغیر وابسته روی مرزها مشخص می‌شود. ۲- شرایط مرزی نیومن<sup>۲</sup>: مشتق عمومی متغیر وابسته در مرزها معلوم می‌شود. ۳- شرط مرزی رابین<sup>۳</sup>: ترکیب خطی از شرط مرزی دیریشله و نیومن می‌باشد. ۴- شرط مرزی مختلط<sup>۴</sup>: در برخی موارد، در بخشی از یک مرز شرط دیریشله و در قسمت دیگر آن شرط نیومن برقرار است. برای انجام عملیات حل عددی،

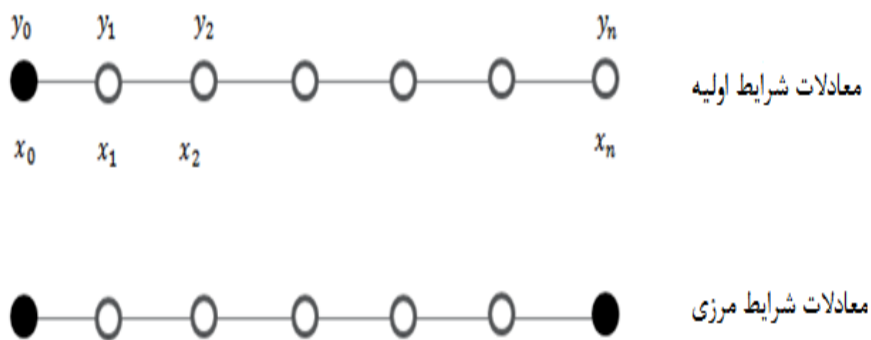
<sup>۱</sup> Dirichlet Boundary condition

<sup>۲</sup> Neumann Boundary condition

<sup>۳</sup> Robin Boundary condition

<sup>۴</sup> Mixed Boundary condition

صرفه نظر از روش حل، بایستی مراحل زیر صورت گیرد: ۱. تعریف حوزه عمل ۲. شبکه بندی حوزه حل مسئله ۳. بدست آوردن معادلات جبری (منقطع کردن معادله) ۴. حل دستگاه معادلات جبری حاصل به روش های معمول و یا تکرارکننده. تفاوت روش های حل عددی در بخش منقطع کردن و تا حدودی اندازهی شبکه بندی حوزه عمل می باشد. در غیر این صورت، تعریف حوزه عمل و حل دستگاه معادلات جبری در آنها یکسان می باشد. در شکل (۱-۳) موقعیت شرایط اولیه و مرزی نشان داده شده است (عظیمیان، ۱۳۷۷).



شکل (۱-۳) انواع معادلات دیفرانسیل با شرایط اولیه و شرایط مرزی

### ب- انواع معادلات دیفرانسیل پاره ای و مرتبه ی دوم

از انواع این معادلات می توان به معادلات بیضوی، سهموی و هذلولوی اشاره کرد. تمایز این معادلات به ضرایب عبارتهای مستقل درجه ۲ دارد. تقسیم بندی دیگر از معادلات دیفرانسیل پاره ای، آنها را به دو دسته ی خطی و غیرخطی تقسیم می کند. در معادلات خطی، متغیر وابسته و مشتقات آن به صورت خطی وارد می شوند. ولی در معادلات دیفرانسیل غیرخطی، حاصل ضریب متغیرهای وابسته و یا مشتقات آنها دیده می شود.

### ج- کاربرد تفاضل محدود در حل معادلات دیفرانسیل پاره ای

یکی از روشهای حل تمام انواع معادلات دیفرانسیل پاره‌ای، جایگزین نمودن مستقل‌ها یا تفاضل‌های محدود است. سپس، معادله‌ی تفاضل‌ها برای هر گره شبکه موردنظر نوشته می‌شود. حل همزمان این معادلات، مقادیر تابع را در هر گره تخمین می‌زند.

در روش تفاضل‌های محدود به جای مشتق‌های جزئی از تفاضل‌های محدود استفاده می‌شود. به این صورت مشتقات جزئی با تفاضل‌های محدود تقریب زده می‌شود. در ابتدا جهت این تقریب از بسط تیلور استفاده می‌شود که در آن از جملات مرتبه‌ی دوم به بالا صرفنظر شده بود ولی بعدها این روش کاملتر گردید. همانطور که قبلاً گفته شده برای تحلیل جریان‌ها در رودخانه‌ها و مخازن از معادلات سنت‌ونانت استفاده می‌شود. در صورت استفاده از روش تفاضل محدود برای بسط  $\frac{\partial h}{\partial x}$  و  $\frac{\partial Q}{\partial x}$  در معادلات (۲۱-۲) و (۲۲-۲)، (معادلات سنت‌ونانت) می‌توان از روش‌های زیر استفاده کرد. الف. روش صریح<sup>۱</sup>:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_{i+1}^n - h_i^n}{\Delta x} \quad (۱-۳)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i+1}^n - Q_i^n}{\Delta x} \quad (۲-۳)$$

ب. روش غیر صریح<sup>۲</sup> (ضمنی):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_i^{n+1} - Q_{i+1}^{n+1}}{\Delta x} \quad (۳-۳)$$

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_i^{n+1} - h_{i+1}^{n+1}}{\Delta x} \quad (۴-۳)$$

در معادلات فوق  $Q$  دبی جریان،  $x$  مکان در جهت جریان اصلی،  $h$  عمق جریان،  $n$  و  $i$  به ترتیب معرف گام مکانی و گام زمانی می‌باشد. در روش صریح جواب (به دلیل استفاده از تعداد نقاط کمتر) معادلات از دقت پایین تری نسبت به روش غیر صریح برخوردار است. نکته‌ی مهم این است که حجم

<sup>۱</sup> Explicit

<sup>۲</sup> Implicit

محاسبات در روش‌های تفاضل محدود نسبت به سایر روش‌های کامل به ویژه المان محدود کمتر است.

### ۳-۱-۳- روش المان محدود

این روش در دهه‌های اخیر ابداع شد و در حال گسترش می‌باشد. روش مذکور یک تکنیک برای حل معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی است. اساس روش المان محدود این است که محدوده مورد مطالعه را که محیطی پیوسته است به المان‌هایی با اشکال دلخواه از قبیل مثلث، مربع و یا هر شکل دیگر تقسیم می‌کنند. لذا جهت هر بازه‌ی دلخواه می‌توان آن را به المان‌هایی تازه تقسیم کرد و سپس با اعمال معادلات بر روی المان‌های موردنظر و انتگرال‌گیری از آن بر روی کل بازه می‌توان جواب معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی را محاسبه کرد. در مقابل، روش‌های تفاضل محدود در این زمینه نسبت به روش المان‌های محدود دارای کاربرد بیشتری است. در سال‌های اخیر بر روی این روش در زمینه‌ی مسایل مربوط به سیالات تحقیقات زیادی انجام شده و این رشته در حال تکامل و گسترش می‌باشد.

### ۴-۱-۳- فرمولبندی تفاضل محدود

#### ۳-۱-۴- تقریب سازی معادلات

مشتق‌های متغیرهای وابسته‌ای را که در معادلات دیفرانسیل پاره‌ای ظاهر می‌شوند، باید تقریب زد تا بتوان از کامپیوتر رقمی<sup>۱</sup>، (که تنها قادر به انجام محاسبات استاندارد و عملیات منطقی است) برای حل معادلات استفاده کرد. در این فصل برای تقریب زدن دیفرانسیل تابع  $f$  از روش بسط سری تیلور استفاده شده است (عظیمیان، ۱۳۷۷).

---

<sup>۱</sup> Digital Computer

اگر تابع تحلیلی  $f(x)$  موجود باشد، بسط سری تیلور تابع  $f(x+h)$  حول نقطه  $x$  برابر است با:

$$f(x+h) = f(x) + h \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \dots \quad (۵-۳)$$

از رابطه‌ی فوق خواهیم داشت:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} - \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \dots \quad (۶-۳)$$

با صرفه نظر کردن از توان‌های دوم به بعد رابطه به صورت زیر حاصل می‌شود.  $o(h)$  معرف

قسمت برشی سری تیلور می‌باشد.

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} + o(h) \quad (۷-۳)$$

۳-۱-۴-۳ تقریب تفاضل محدود پیشرو<sup>۱</sup>

الف) مشتق مرتبه اول

دو نقطه‌ای

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{i+1} - f_i}{h} + o(h) \quad (۸-۳)$$

سه نقطه‌ای

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{-f(x_{i+2}) + 4f(x_{i+1}) - 3f(x_i)}{2h} + o(h^2) \quad (۹-۳)$$

ب) مشتق مرتبه دو

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{f(x_{i+2}) - 2f(x_{i+1}) + f(x_i)}{h^2} + o(h) \quad (۱۰-۳)$$

---

<sup>۱</sup> Forward



$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{-f(x_{i+1})+4f(x_{i+2})-5f(x_{i+1})+2f(x_i)}{h^2} + o(h^2) \quad (11-3)$$

۳-۱-۴-۴ تقریب تفاضل محدود مرکزی<sup>۱</sup>

الف) مشتق مرتبه اول

دو نقطه‌ای

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{i+1}-f_{i-1}}{2h} + o(h^2) \quad (12-3)$$

چهار نقطه‌ای

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{-f(x_{i+2})+8f(x_{i+1})-8f(x_{i-1})+f(x_{i-2})}{12h} + o(h^4) \quad (13-3)$$

ب) مشتق مرتبه دوم

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{f(x_{i+1})-2f(x_i)+f(x_{i-1}))}{h^2} + o(h^2) \quad (14-3)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{-f(x_{i+2})+16f(x_{i+1})-30f(x_i)+16f(x_{i-1})-f(x_{i-2}))}{12h^2} + o(h^2) \quad (15-3)$$

۳-۱-۴-۵ تقریب تفاضل محدود پسرو<sup>۲</sup>

الف) مشتق مرتبه اول

دو نقطه‌ای

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_i-f_{i-1}}{h} + o(h) \quad (16-3)$$

سه نقطه‌ای

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x_i)-4f(x_{i-1})+f(x_{i-2}))}{2h} + o(h^2) \quad (17-3)$$

ب) مشتق مرتبه دوم

---

<sup>۱</sup> Center

<sup>۲</sup> Backward

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{f(x_i) - 2f(x_{i-1}) + f(x_{i-2}))}{h^2} + o(h) \quad (18-3)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{2f(x_i) - 5f(x_{i-1}) + 4f(x_{i-2}) - f(x_{i-3}))}{h^2} + o(h^2) \quad (19-3)$$

۳-۱-۴-۶ خطاها در روش تفاضل محدود

اگر از معادلات تفاضل محدود به صورت کامل و دقیق استفاده شود، مجموع ضرایب صفر خواهد شد. ولی به دلیل خطای شخص محاسب و خطاهای ناشی از گرد کردن<sup>۱</sup> و برشی<sup>۲</sup>، مجموع ضرایب صفر نخواهد شد. اثرات خطا می‌تواند نتایج بزرگی را در خروجی مدل ایجاد کند، تا جایی که مدل بی اعتبار شود. میزان خطا را می‌توان با افزایش دقت اندازه‌گیری و استفاده از فرمول‌هایی که دقت بالاتری دارند، کاهش داد. کاهش گام زمانی یا مکانی رابطه‌ی مستقیمی در کاهش خطای مدل دارد) (Kiusalaas, 2005).

۳-۱-۴-۷ سازگاری، همگرایی و پایداری روش تفاضل محدود

روش‌های عددی در صورتی همگرا هستند که اگر گام مکانی و گام زمانی کاهش یابند، نتایج حل عددی به نتایج حل صحیح معادلات دیفرانسیل نزدیک شوند. سازگاری، مربوط به معادلات می‌شود، بدین معنی که معادلات به کار رفته باید پارامترهای مشترک داشته باشند. همگرایی مربوط به حل این معادلات می‌شود. روش عددی از لحاظ محاسباتی زمانی پایدار است، که خطاهای برشی و گرد کردن موجب واگرا شدن حل مسأله نگردد. اگر روش عددی پایدار نباشد، تغییرات کوچکی در ورودی مدل (مانند مقدار ضریب زبری یا افزایش گام زمانی) موجب تغییرات بزرگ در نتایج مدل می‌شود (امامقلی‌زاده، ۱۳۹۳).

---

<sup>۱</sup> Roundoff error

<sup>۲</sup> Truncation error

### ۳-۱-۵- معادلات حاکم بر رسوبشویی

فرایندهای رسوبشویی در یک مخزن عریض، شامل جریان و حرکت رسوبات عرضی بین بخش‌های مختلف دشت سیلابی و کانال رسوبشویی می‌باشد. یک مدل پایدار دو بعدی، برای مدل کردن این رفتارها که شامل فرسایش عرضی از کانال رسوبشویی نیز می‌شود، مورد نیاز است. در این مطالعه یک مدل انتشار برای شبیه‌سازی رفتار عمومی رقوم پروفیل بستر و مقدار رسوب جابجا شده در خلال رسوبشویی رسوبات توسعه داده شده است. جریان پایدار یک بعدی در یک کانال مستطیلی عریض روی بستر متحرک بدون جریان ورودی عرضی توسط معادلات زیر بیان می‌شود.

(۱) معادلات مومنوم و پیوستگی

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (۲۰-۳)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (۲۱-۳)$$

(۲) معادله پیوستگی رسوب

$$(1 - p) \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (۲۲-۳)$$

(۳) معادله حاکم بر رسوبشویی

$$\frac{\partial z}{\partial t} - k \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = 0 \quad (۲۳-۳)$$

که در معادلات بالا  $A$  مساحت جریان،  $Q$  دبی جریان،  $t$  زمان،  $x$  مکان در جهت جریان اصلی،  $S_f$  برابر شیب اصطکاکی،  $g$  شتاب ثقل،  $h$  عمق جریان،  $Z$  برابر رقوم بستر،  $q_s$  برابر نرخ انتقال حجمی رسوبات در واحد عرض،  $p$  برابر تخلخل رسوبات ته نشین شده و  $k = k_0 Q^{1.6} S^{0.2}$  می‌باشد که در آن  $k_0$  برابر ضریب کالیبراسیون و مقدار آن  $۰/۰۰۰۴۷$  و  $S$  شیب سطح رسوب تعریف شده است (جعفری، ۱۳۸۱).

### ۳-۲- حل عددی معادلات سنت ونانت

برای معادلات سنت ونانت هیچ راه حل تحلیلی وجود ندارد، از این رو با داشتن شرایط اولیه و

مرزی این معادلات به صورت عددی قابل حل می‌باشند.

### ۳-۲-۱- روش پریسمن

برای تقریب سازی معادلات سنت ونانت از روش غیر صریح پریسمن به صورت زیر استفاده شده است:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{(A_{i+1}^{n+1} + A_i^{n+1}) - (A_{i+1}^n + A_i^n)}{2 * \Delta t} \quad (۲۴-۳)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{(Q_{i+1}^{n+1} + Q_i^{n+1}) - (Q_{i+1}^n + Q_i^n)}{2 * \Delta t} \quad (۲۵-۳)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\theta(Q_{i+1}^{n+1} - Q_i^{n+1}) + (1-\theta)(Q_{i+1}^n - Q_i^n)}{\Delta x} \quad (۲۶-۳)$$

$$\frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} = \frac{\theta \left[ \frac{(Q_{i+1}^{n+1})^2}{A_{i+1}^{n+1}} - \frac{(Q_i^{n+1})^2}{A_i^{n+1}} \right]}{\Delta x} + \frac{(1-\theta) \left[ \frac{(Q_{i+1}^n)^2}{A_{i+1}^n} - \frac{(Q_i^n)^2}{A_i^n} \right]}{\Delta x} \quad (۲۷-۳)$$

$$A \frac{\partial h}{\partial x} = \theta \left( \frac{A_{i+1}^{n+1} + A_i^{n+1}}{2} \right) \left( \frac{h_{i+1}^{n+1} - h_i^{n+1}}{\Delta x} \right) + (1-\theta) \left( \frac{A_{i+1}^n + A_i^n}{2} \right) \left( \frac{h_{i+1}^n - h_i^n}{\Delta x} \right) \quad (۲۸-۳)$$

$$A = \theta \left( \frac{A_{i+1}^{n+1} + A_i^{n+1}}{2} \right) + (1-\theta) \left( \frac{A_{i+1}^n + A_i^n}{2} \right) \quad (۲۹-۳)$$

$$AS_f = \theta \frac{(A_{i+1}^{n+1} + A_i^{n+1})}{2} \frac{(S_{f_{i+1}}^{n+1} + S_{f_i}^{n+1})}{2} + (1-\theta) \frac{(A_{i+1}^n + A_i^n)}{2} \frac{(S_{f_{i+1}}^n + S_{f_i}^n)}{2} \quad (۳۰-۳)$$

با جایگزینی روابط (۲۴-۳) تا (۳۰-۳) در معادلات (۲۰-۳) و (۲۱-۳) معادلات پیوستگی و

اندازه حرکت به صورت تفاضل محدود به صورت زیر حاصل می‌شود.

$$\frac{(A_{i+1}^{n+1} + A_i^{n+1}) - (A_{i+1}^n + A_i^n)}{2 * \Delta t} + \frac{(\theta(Q_{i+1}^{n+1} - Q_i^{n+1}) + (1-\theta)(Q_{i+1}^n - Q_i^n))}{\Delta x} = 0 \quad (۳۱-۳)$$

$$\frac{((Q_{i+1}^{n+1} + Q_i^{n+1}) - (Q_{i+1}^n + Q_i^n))}{2 * \Delta t} + \frac{\theta \left[ \frac{(Q_{i+1}^{n+1})^2}{A_{i+1}^{n+1}} - \frac{(Q_i^{n+1})^2}{A_i^{n+1}} \right]}{\Delta x} + \frac{(1-\theta) \left[ \frac{(Q_{i+1}^n)^2}{A_{i+1}^n} - \frac{(Q_i^n)^2}{A_i^n} \right]}{\Delta x} +$$

$$g \theta \left( \frac{A_{i+1}^{n+1} + A_i^{n+1}}{2} \right) \left( \frac{h_{i+1}^{n+1} - h_i^{n+1}}{\Delta x} \right) + g(1-\theta) \left( \frac{A_{i+1}^n + A_i^n}{2} \right) \left( \frac{h_{i+1}^n - h_i^n}{\Delta x} \right) +$$

$$g\theta \frac{(A_{i+1}^{n+1} + A_i^{n+1})}{2} \frac{(S_{f_{i+1}}^{n+1} + S_{f_i}^{n+1})}{2} + g(1 - \theta) \frac{(A_{i+1}^n + A_i^n)}{2} \frac{(S_{f_{i+1}}^n + S_{f_i}^n)}{2} = 0 \quad (32-3)$$

### ۳-۲-۲- روش حل

روش حل استفاده شده برگرفته از کتاب هیدرولیک جریان در کانال‌های روباز (امامقلی‌زاده،

۱۳۹۲) می‌باشد.

مقادیر مجهول در معادلات دیفرانسیل محدود غیرصریح برای  $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ،  $Q_i^{n+1}$ ،  $h_i^{n+1}$  هستند.

مساحت  $A_i^{n+1}$  و  $S_{f_i}^{n+1}$  می‌توانند بر حسب ترم‌های  $Q_i^{n+1}$ ،  $h_i^{n+1}$  بیان شوند، که  $S_{f_i}^{n+1}$  از معادله‌ی

مانینگ بدست می‌آید. همه ترم‌های دیگر یا از شرایط اولیه یا از محاسبات گام زمانی قبلی معلوم

هستند. از این رو، معادلات پیوستگی و مومنتوم را به صورت زیر می‌توان بیان کرد.

$$C_i [Q_i^{n+1}, h_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}, h_{i+1}^{n+1}] = 0 \quad (33-3)$$

$$M_i [Q_i^{n+1}, h_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}, h_{i+1}^{n+1}] = 0 \quad (34-3)$$

که در آن  $C_i$  و  $M_i$  به ترتیب بیانگر شکل دیفرانسیل محدود معادلات پیوستگی و مومنتوم برای

بازه‌های بین گره‌های  $i$  و  $i+1$  هستند. سپس معادله مرزی بالادست با  $B_1$ ، معادله مرزی پایین‌دست با

$B_N$  نشان داده می‌شود، به عبارت دیگر برای  $i=1$  تا  $(N-1)$ ، در کل  $2N$  معادله‌ی جبری غیرخطی با  $2N$

مجهول بدست می‌آید.

$$B_1 [Q_1^{n+1}, h_1^{n+1}] = 0$$

$$C_1 [Q_1^{n+1}, h_1^{n+1}, Q_2^{n+1}, h_2^{n+1}] = 0 \quad (35-3)$$

$$M_1 [Q_1^{n+1}, h_1^{n+1}, Q_2^{n+1}, h_2^{n+1}] = 0$$

$$C_2 [Q_2^{n+1}, h_2^{n+1}, Q_3^{n+1}, h_3^{n+1}] = 0$$

$$M_2 [Q_2^{n+1}, h_2^{n+1}, Q_3^{n+1}, h_3^{n+1}] = 0$$

$$C_i [Q_i^{n+1}, h_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}, h_{i+1}^{n+1}] = 0$$

$$M_i [Q_i^{n+1}, h_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}, h_{i+1}^{n+1}] = 0$$

$$C_{(N-1)} [Q_{N-1}^{n+1}, h_{N-1}^{n+1}, Q_N^{n+1}, h_N^{n+1}] = 0$$

$$M_{(N-1)} [Q_{N-1}^{n+1}, h_{N-1}^{n+1}, Q_N^{n+1}, h_N^{n+1}] = 0$$

$$B_N [Q_N^{n+1}, h_N^{n+1}] = 0$$

اگر دیفرانسیل کل معادلات فوق را حساب کنیم سبب به وجود آمدن مقادیر باقیمانده در سمت راست معادله‌ی (۳۶-۳) می‌گردد و معادلات به صورت زیر حاصل می‌شوند.

$$\frac{\partial B_1}{\partial Q_1^{n+1}} \Delta Q_1 + \frac{\partial B_1}{\partial h_1^{n+1}} \Delta h_1 = -rB_1 \quad (۳۶-۳)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial Q_1^{n+1}} \Delta Q_1 + \frac{\partial C_1}{\partial h_1^{n+1}} \Delta h_1 + \frac{\partial C_1}{\partial Q_2^{n+1}} \Delta Q_2 + \frac{\partial C_1}{\partial h_2^{n+1}} \Delta h_2 = -rC_1$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial Q_1^{n+1}} \Delta Q_1 + \frac{\partial M_1}{\partial h_1^{n+1}} \Delta h_1 + \frac{\partial M_1}{\partial Q_2^{n+1}} \Delta Q_2 + \frac{\partial M_1}{\partial h_2^{n+1}} \Delta h_2 = -rM_1$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial Q_2^{n+1}} \Delta Q_1 + \frac{\partial C_2}{\partial h_2^{n+1}} \Delta h_1 + \frac{\partial C_2}{\partial Q_3^{n+1}} \Delta Q_2 + \frac{\partial C_2}{\partial h_3^{n+1}} \Delta h_2 = -rC_2$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial Q_2^{n+1}} \Delta Q_1 + \frac{\partial M_2}{\partial h_2^{n+1}} \Delta h_1 + \frac{\partial M_2}{\partial Q_3^{n+1}} \Delta Q_2 + \frac{\partial M_2}{\partial h_3^{n+1}} \Delta h_2 = -rM_2$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial Q_i^{n+1}} \Delta Q_i + \frac{\partial C_i}{\partial h_i^{n+1}} \Delta h_i + \frac{\partial C_i}{\partial Q_{i+1}^{n+1}} \Delta Q_{i+1} + \frac{\partial C_i}{\partial h_{i+1}^{n+1}} \Delta h_{i+1} = -rC_i$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial Q_i^{n+1}} \Delta Q_1 + \frac{\partial M_i}{\partial h_i^{n+1}} \Delta h_1 + \frac{\partial M_{i+1}}{\partial Q_{i+1}^{n+1}} \Delta Q_2 + \frac{\partial M_{i+1}}{\partial h_{i+1}^{n+1}} \Delta h_2 = -rM_i$$



با حل ماتریس فوق مقادیر  $\Delta Q$  و  $\Delta h$  بدست می‌آید، سپس مقدار  $Q_i$  و  $h_i$  در هر مرحله از جمع

جبری با مرحله‌ی قبل بدست می‌آید. به عبارت دیگر:

$$(Q_i^{n+1}) = (Q_i^n) + (\Delta Q_i) \quad (38-3)$$

$$(h_i^{n+1}) = (h_i^n) + (\Delta h_i) \quad (39-3)$$

### ۳-۲-۱-۲-۱ اجزای ماتریس ضرایب

اجزای ماتریس ضرایب را که در معادله (۳۷-۳) نشان داده شده است، با به دست آوردن مشتقات

جزئی سمت چپ معادلات دیفرانسیل جزئی محدود ((۳۱-۳) و ((۳۲-۳) با در نظر گرفتن مجهول

موردنظر محاسبه می‌شود. برای مرز بالادست دبی ورودی به مخزن داریم، پس:

$$B_1 = Q_i \quad (40-3)$$

$$\frac{\partial B_1}{\partial Q_1} = 1 \quad (41-3)$$

$$\frac{\partial B_1}{\partial h_1} = 0 \quad (42-3)$$

برای مرز پایین دست معادله‌ی  $Q = C \times \sqrt{2 \times g \times h} \times A$  حاکم است، که که  $Q$  دبی خروجی از

دریچه سد،  $C$  ضریب دبی،  $h$  ارتفاع آب پشت سد،  $g$  شتاب ثقل و  $A$  مساحت دریچه‌ی سد می‌باشد. در

نتیجه:

$$B_N = Q_i - (C \times \sqrt{2 \times g \times h} \times A) \quad (43-3)$$

$$\frac{\partial B_N}{\partial Q_N} = 1 \quad (44-3)$$

$$\frac{\partial B_N}{\partial h_N} = C \times \left( \frac{\sqrt{2 \times g}}{2\sqrt{h}} \right) \times A \quad (45-3)$$



با استفاده از معادلات (۳۱-۳) و (۳۲-۳) مشتقات جزئی معادلات پیوستگی و مومنتوم به صورت

زیر است:

$$\frac{\partial C_i}{\partial Q_i} = -\frac{\theta}{\Delta x} \quad (۴۶-۳)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial h_i} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} * \frac{\partial A_i}{\partial h_i} \quad (۴۷-۳)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial Q_{i+1}} = \frac{\theta}{\Delta x} \quad (۴۸-۳)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial h_{i+1}} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} * \frac{\partial A_{i+1}}{\partial h_{i+1}} \quad (۴۹-۳)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial Q_i} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} - \frac{2\theta Q_i}{A_i \Delta x} + g\theta \frac{(A_{i+1} + A_i)}{4} * \frac{\partial (S_f)_i}{\partial Q_i} \quad (۵۰-۳)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial h_i} = \frac{\theta}{\Delta x} * \frac{(Q_i)^2}{(A_i)^2} * \frac{\partial A_i}{\partial h_i} - g\theta \frac{(A_{i+1} + A_i)}{2 \cdot \Delta x} + g\theta \frac{(h_{i+1} - h_i)}{2 \cdot \Delta x} * \frac{\partial A_i}{\partial h_i} +$$

$$g\theta \frac{(S_f)_{i+1} + (S_f)_i}{4} * \frac{\partial A_i}{\partial h_i} + g\theta \frac{(A_{i+1} + A_i)}{4} * \frac{\partial (S_f)_i}{\partial h_i} \quad (۵۱-۳)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial Q_{i+1}} = \frac{1}{2 \cdot \Delta t} + \frac{2\theta Q_{i+1}}{A_{i+1} \Delta x} + g\theta \frac{(A_{i+1} + A_i)}{4} * \frac{\partial (S_f)_{i+1}}{\partial Q_{i+1}} \quad (۵۲-۳)$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial h_{i+1}} = -\frac{\theta}{\Delta x} * \frac{(Q_{i+1})^2}{(A_{i+1})^2} * \frac{\partial A_{i+1}}{\partial h_{i+1}} + g\theta \frac{(A_{i+1} + A_i)}{2 \cdot \Delta x} + g\theta \frac{(h_{i+1} - h_i)}{2 \cdot \Delta x} * \frac{\partial A_{i+1}}{\partial h_{i+1}} +$$

$$g\theta \frac{(S_f)_{i+1} + (S_f)_i}{4} * \frac{\partial A_{i+1}}{\partial h_{i+1}} + g\theta \frac{(A_{i+1} + A_i)}{4} * \frac{\partial (S_f)_{i+1}}{\partial h_{i+1}} \quad (۵۳-۳)$$

با استفاده از معادله‌ی مانینگ مشتقات جزئی شیب اصطکاک به صورت زیر قابل استخراج است:

$$\frac{\partial (S_f)_i}{\partial Q_i} = \frac{2 \cdot n^2 \cdot P_i^{\frac{4}{3}}(Q_i)}{k_n^2 \cdot A_i^{\frac{10}{3}}} \quad (۵۴-۳)$$

$$\frac{\partial (S_f)_i}{\partial h_i} = \frac{n^2 \cdot Q_i \cdot \text{abs}(Q_i)}{k_n^2 \cdot A_i^{\frac{20}{3}}} \left( \frac{4}{3} P_i^{\frac{1}{3}} \frac{\partial P_i}{\partial h_i} A_i^{\frac{10}{3}} - \frac{10}{3} A_i^{\frac{7}{3}} \frac{\partial (A_i)}{\partial h_i} P_i^{\frac{4}{3}} \right) \quad (۵۵-۳)$$

در روابط (۳-۵۴) و (۳-۵۵)  $n$  زبری مانینگ،  $P$  محیط خیس شده،  $k_n$  عدد ثابت برابر با  $1/49$  فرض شده است (امامقلی زاده، ۱۳۹۲).

### ۳-۲-۲-۳ شرایط اولیه و مرزی

کل زمان رسوبشویی ۲۰ دقیقه، طول مخزن که رسوب روی آن انباشته شده ۸۰ سانتی متر و گام‌های زمانی و مکانی به ترتیب ۵ دقیقه و ۵ سانتی متر در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی ،  $Q_0^n = \text{معلوم}$

شرایط اولیه ،  $Q_i^0 = \text{معلوم}$

شرایط مرزی ،  $h_0^n = \text{معلوم}$

شرایط اولیه ،  $h_i^0 = \text{معلوم}$

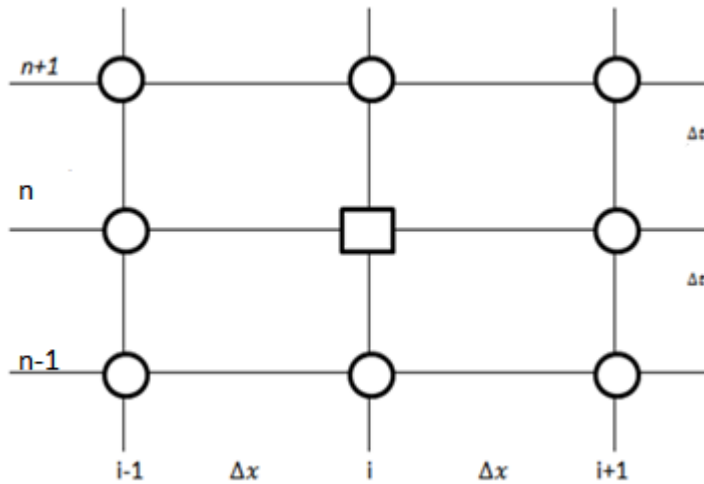
در فرمول‌های شرایط اولیه و مرزی  $n$  معرف زمان و  $i$  معرف مکان در محاسبات می‌باشد.

نتایج محاسبات حاصل از حل معادلات سنت‌ونانت در فصل چهارم ارائه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### ۳-۳- حل عددی معادله حاکم بر رسوبشویی

حل معادلات دیفرانسیل با استفاده از تفاضلات محدود، ممکن است به یکی از روش‌های صریح و ضمنی انجام شود. در این مطالعه از بین روش‌های عددی موجود، راه حل تفاضلات محدود ضمنی فرمولبندی بتا<sup>۱</sup> (میانگین وزنی) برای حل مدل ریاضی بکار برده شده است. شکل (۳-۲) شبکه‌ی نقاط در روش ضمنی را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> Beta Formulation



شکل (۲-۳) شبکه بندی نقاط در روش ضمنی

### ۳-۳-۱- فرمولبندی بتا

برای معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی شکل کلی معادله تفاضل محدود به صورت زیر است.

$$\frac{z_i^{n+1} - z_i^n}{(\Delta t)} = k \left[ \beta \frac{z_{i+1}^{n+1} - 2z_i^{n+1} + z_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{z_{i+1}^n - 2z_i^n + z_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} \right] \quad (۵۶-۳)$$

در این روش برای  $\frac{1}{2} \leq \beta < 1$  بی قید و شرط پایدار است. و برای  $0 < \beta < \frac{1}{2}$ ، این فرمولبندی به صورت مشروط پایدار است.

### ۳-۳-۲- نحوه بدست آوردن فرمولبندی بتا

اثبات فرمولبندی روش عددی بتا از کتاب دینامیک سیالات محاسباتی (عظیمیان، ۱۳۷۷) آورده شده است.

با توجه به شکل (۱-۳) معادله حاکم بر رسوبشویی با گام زمان  $\Delta t$  و استفاده از تفاضل‌های مرکزی و پیشرو برای دو روش صریح و غیر صریح داریم :

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{z_i^{n+1} - z_i^n}{\Delta t} \quad (۵۷-۳)$$

در روش صریح:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = k \frac{z_{i-1}^n - 2z_i^n + z_{i+1}^n}{(\Delta x)^2} \quad (58-3)$$

در حالیکه در روش غیر صریح داریم:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = k \frac{z_{i-1}^{n+1} - 2z_i^{n+1} + z_{i+1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} \quad (59-3)$$

از حاصل جمع طرف راست روابط (58-3) و (59-3) ترم کلی مرتبه دوم معادله‌ی حاکم بر

رسوبشویی به صورت زیر در می‌آید.

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = k \left[ \frac{z_{i+1}^{n+1} - 2z_i^{n+1} + z_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{z_{i+1}^n - 2z_i^n + z_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} \right] \quad (60-3)$$

با اعمال ضریب بتا معادله‌ی رسوبشویی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{z_i^{n+1} - z_i^n}{(\Delta t)} = k \left[ \beta \frac{z_{i+1}^{n+1} - 2z_i^{n+1} + z_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{z_{i+1}^n - 2z_i^n + z_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} \right] \quad (61-3)$$

۳-۳-۳- حل معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی به روش بتا (میانگین وزنی)

در رابطه (61-3) داریم:

$$k = k_0 S^{0.2} (q^{1.6})^{n+1} \quad (62-3)$$

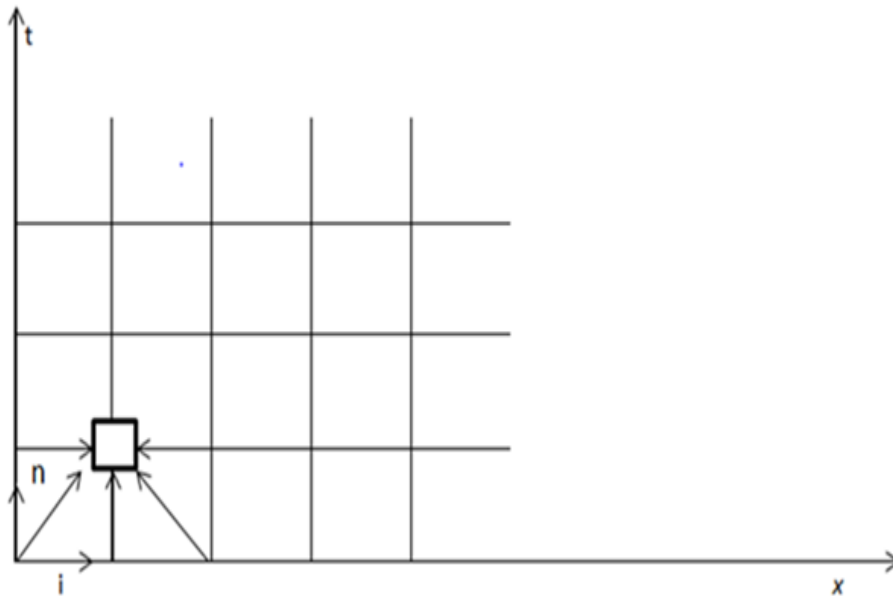
$$S = \frac{z_{i+1}^n - z_{i-1}^n}{2\Delta x} \quad (63-3)$$

حال با جایگذاری روابط (7-3) و (8-3) در رابطه (56-3)، مدل رسوبشویی به صورت زیر تبدیل

می‌شود:

$$\frac{z_i^{n+1} - z_i^n}{(\Delta t)} = k_0 \left( \frac{z_{i+1}^n - z_{i-1}^n}{2\Delta x} \right)^{0.2} (Q^{1.6})^{n+1} \left[ \beta \frac{z_{i+1}^{n+1} - 2z_i^{n+1} + z_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{z_{i+1}^n - 2z_i^n + z_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} \right] \quad (64-3)$$

در رابطه‌ی بالا  $Q$  دبی جریان خروجی،  $k_0$  برابر ضریب کالیبراسیون که مقدار آن  $0.00047$  فرض شده است (جعفری، ۱۳۸۱). در ادامه شکل (۳-۳) شبکه نقاط برای حل مدل رسوبشویی را نشان می‌دهد.  $n$  و  $i$  به ترتیب معرف  $x$  و  $t$  می‌باشند.



شکل (۳-۳) شبکه نقاط برای حل مدل رسوبشویی

برای نمونه، رابطه (۳-۶۴) را برای آزمایش  $A_1$  حل شده است. بازه طولی برای این آزمایش  $80$  سانتی متر بوده که باید به  $\Delta x$  های مساوی تقسیم شود. همچنین بازه زمانی  $20$  دقیقه بوده که باید به  $\Delta t$  های مساوی تقسیم شود. مقدار دبی جریان که خروجی حل معادلات سنتونانت می‌باشد، به عنوان ورودی معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی در نظر گرفته شده است. هدف از حل معادله (۳-۶۴)، بدست آوردن رقوم سطح رسوب تک تک نقاط شبکه، در زمان‌های مختلف می‌باشد. برای این منظور بایستی رابطه نهایی را برای تک تک نقاط شبکه شکل (۳-۳) بنویسیم. رقوم سطح رسوب در این نقطه، به وسیله رقوم سطح رسوب در نقاط اطراف بدست می‌آید. بنابراین برای بدست آوردن رقوم سطح رسوب در لحظه  $t_1$ ، باید معادله بدست آمده برای تک تک نقاط شبکه در این لحظه را بطور همزمان حل نماییم. شرایط اولیه و مرزی مورد نیاز به صورت زیر می‌باشند:

$$\Delta t = 5 \text{ min}$$

$$\Delta X = 5 \text{ cm}$$

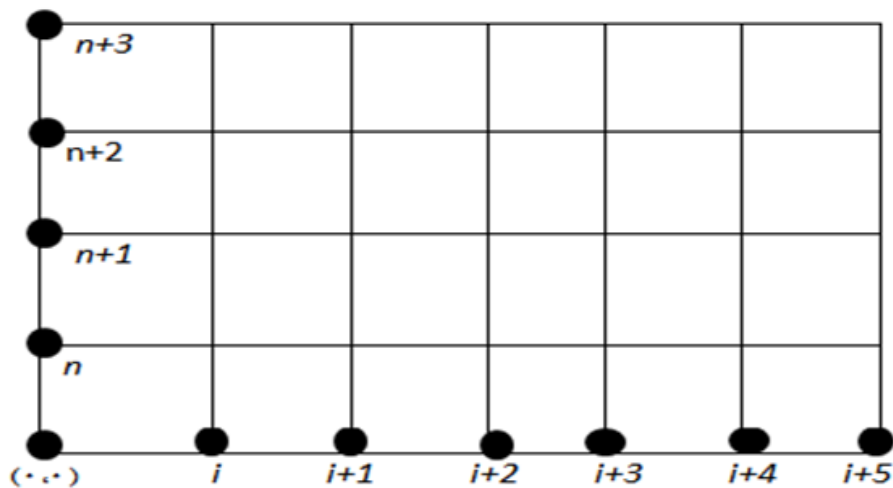
$$Z(0,t) = \text{معلوم} \quad , \quad \text{شرایط مرزی}$$

$$Z(L,t) = \text{معلوم} \quad , \quad \text{شرایط مرزی}$$

$$Z(i,0) = \text{معلوم} \quad , \quad \text{شرایط اولیه}$$

جهت انتخاب مقادیر شرایط اولیه و مرزی در این تحقیق، از داده‌های مدل آزمایشگاهی جعفری، ۱۳۸۱ استفاده شده است.

در روابط مذکور  $t$  زمان،  $L$  طول مخزن و  $i$  معرف مکان می‌باشد. شکل (۳-۴) موقعیت شرایط اولیه و مرزی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴) موقعیت شرایط اولیه و مرزی

با توجه به تعداد گره‌های محاسباتی و اعمال شرایط اولیه و مرزی، معادلات به فرم زیر استخراج می‌شود.

$$\begin{cases} n = 0 \\ i = 1 - 15 \end{cases}$$

$$\frac{z_1^1 - z_1^0}{\Delta t} = k_0 \left( \frac{z_2^0 - z_0^0}{2\Delta x} \right)^2 q^{1.6} \left[ \beta \frac{z_2^1 - 2z_1^1 + z_0^1}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{z_2^0 - 2z_1^0 + z_0^0}{(\Delta x)^2} \right]$$

$$\frac{z_2^1 - z_2^0}{\Delta t} = k_0 \left( \frac{z_3^0 - z_1^0}{2\Delta x} \right)^2 q^{1.6} \left[ \beta \frac{z_3^1 - 2z_2^1 + z_1^1}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{z_3^0 - 2z_2^0 + z_1^0}{(\Delta x)^2} \right]$$

$$\frac{z_3^1 - z_3^0}{\Delta t} = k_0 \left( \frac{z_4^0 - z_2^0}{2\Delta x} \right)^2 q^{1.6} \left[ \beta \frac{z_4^1 - 2z_3^1 + z_2^1}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{z_4^0 - 2z_3^0 + z_2^0}{(\Delta x)^2} \right]$$

$$\frac{z_4^1 - z_4^0}{\Delta t} = k_0 \left( \frac{z_5^0 - z_3^0}{2\Delta x} \right)^2 q^{1.6} \left[ \beta \frac{z_5^1 - 2z_4^1 + z_3^1}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{z_5^0 - 2z_4^0 + z_3^0}{(\Delta x)^2} \right]$$

$$\frac{z_5^1 - z_5^0}{\Delta t} = k_0 \left( \frac{z_6^0 - z_4^0}{2\Delta x} \right)^2 q^{1.6} \left[ \beta \frac{z_6^1 - 2z_5^1 + z_4^1}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{z_6^0 - 2z_5^0 + z_4^0}{(\Delta x)^2} \right]$$

$$\frac{z_i^1 - z_i^0}{\Delta t} = k_0 \left( \frac{z_{i+1}^0 - z_{i-1}^0}{2\Delta x} \right)^2 q^{1.6} \left[ \beta \frac{z_{i+1}^1 - 2z_i^1 + z_{i-1}^1}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{z_{i+1}^0 - 2z_i^0 + z_{i-1}^0}{(\Delta x)^2} \right]$$

$$\frac{z_{15}^1 - z_{15}^0}{\Delta t} = k_0 \left( \frac{z_{16}^0 - z_{14}^0}{2\Delta x} \right)^2 q^{1.6} \left[ \beta \frac{z_{16}^1 - 2z_{15}^1 + z_{14}^1}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{z_{16}^0 - 2z_{15}^0 + z_{14}^0}{(\Delta x)^2} \right]$$

اگر معادلات فوق را برحسب ضرایبی از متغیر مجهول به صورت خلاصه بنویسیم، داریم:

$$c_1 z_1^1 + c_2 z_2^1 = b_1$$

$$c_1 z_1^1 + c_2 z_2^1 + c_3 z_3^1 = b_2$$

$$c_2 z_2^1 + c_3 z_3^1 + c_4 z_4^1 = b_3$$

$$c_3 z_3^1 + c_4 z_4^1 + c_5 z_5^1 = b_4$$

$$c_4 z_4^1 + c_5 z_5^1 + c_6 z_6^1 = b_5$$

$$c_{14}z_{14}^1 + c_{15}z_{15}^1 + c_{16}z_{16}^1 = b_{15}$$

دستگاه معادلات خطی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_2 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ c_1 & c_2 & c_3 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_2 & c_3 & c_4 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & c_{14} & c_{15} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \vdots \\ z_{13} \\ z_{14} \\ z_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_{13} \\ b_{14} \\ b_{15} \end{bmatrix}$$

با حل ماتریس فوق رقوم سطح رسوب بدست می‌آید که نتایج حاصل از آن در فصل چهارم آورده شده است.

### ۳-۴- حل عددی معادلات سنت ونانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی به صورت همزمان

روش حل مشابه قسمت (۳-۲) می‌باشد، با این تفاوت که در حل همزمان معادلات سنت ونانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی، معادلات با هم ترکیب شده و به شکل زیر حاصل می‌شوند.

$$C_i [Q_i^{n+1}, h_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}, h_{i+1}^{n+1}] = 0$$

$$M_i [Q_i^{n+1}, h_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}, h_{i+1}^{n+1}] = 0$$

$$A_i [Q_i^{n+1}, z_i^{n+1}, z_{i+1}^{n+1}, z_{i-1}^{n+1}] = 0$$

که در آن  $C_i$ ،  $M_i$  و  $A_i$  به ترتیب بیانگر شکل دیفرانسیل محدود معادلات پیوستگی، مومنتوم و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی برای بازه‌های بین گره‌های  $i-1$ ،  $i$  و  $i+1$  هستند. سپس معادله مرزی بالادست با  $B_1$ ، معادله مرزی پایین دست با  $B_N$  نشان داده می‌شود، به عبارت دیگر برای  $i=1$  تا  $(N-1)$ ، در کل  $3N$  معادله‌ی جبری غیرخطی با  $3N$  مجهول بدست می‌آید.

$$B_1 [Q_1^{n+1}, h_1^{n+1}] = 0$$



$$C_1 [Q_1^{n+1}, h_1^{n+1}, Q_2^{n+1}, h_2^{n+1}] = 0$$

$$M_1 [Q_1^{n+1}, h_1^{n+1}, Q_2^{n+1}, h_2^{n+1}] = 0$$

$$A_1 [Q_1^{n+1}, z_1^{n+1}, z_2^{n+1}, z_0^{n+1}] = 0$$

$$C_2 [Q_2^{n+1}, h_2^{n+1}, Q_3^{n+1}, h_3^{n+1}] = 0$$

$$M_2 [Q_2^{n+1}, h_2^{n+1}, Q_3^{n+1}, h_3^{n+1}] = 0$$

$$A_2 [Q_2^{n+1}, z_2^{n+1}, z_3^{n+1}, z_1^{n+1}] = 0$$

.....

.....

$$C_i [Q_i^{n+1}, h_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}, h_{i+1}^{n+1}] = 0$$

$$M_i [Q_i^{n+1}, h_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}, h_{i+1}^{n+1}] = 0$$

$$A_i [Q_i^{n+1}, z_i^{n+1}, z_{i+1}^{n+1}, z_{i-1}^{n+1}] = 0$$

.....

.....

$$C_{(N-1)} [Q_{N-1}^{n+1}, h_{N-1}^{n+1}, Q_N^{n+1}, h_N^{n+1}] = 0$$

$$M_{(N-1)} [Q_{N-1}^{n+1}, h_{N-1}^{n+1}, Q_N^{n+1}, h_N^{n+1}] = 0$$

$$A_{(N-1)} [Q_{N-1}^{n+1}, z_{N-1}^{n+1}, z_N^{n+1}, z_{N-2}^{n+1}] = 0$$

$$B_N [Q_N^{n+1}, h_N^{n+1}] = 0$$

اگر دیفرانسیل کل معادلات فوق را حساب کنیم، معادلات به صورت زیر حاصل می‌شوند.

$$\frac{\partial B_1}{\partial Q_1^{n+1}} \Delta Q_1 + \frac{\partial B_1}{\partial h_1^{n+1}} \Delta h_1 = -rB_1$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial Q_1^{n+1}} \Delta Q_1 + \frac{\partial C_1}{\partial h_1^{n+1}} \Delta h_1 + \frac{\partial C_1}{\partial Q_2^{n+1}} \Delta Q_2 + \frac{\partial C_1}{\partial h_2^{n+1}} \Delta h_2 = -rC_1$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial Q_1^{n+1}} \Delta Q_1 + \frac{\partial M_1}{\partial h_1^{n+1}} \Delta h_1 + \frac{\partial M_1}{\partial Q_2^{n+1}} \Delta Q_2 + \frac{\partial M_1}{\partial h_2^{n+1}} \Delta h_2 = -rM_1$$

$$\frac{\partial A_1}{\partial Q_1^{n+1}} \Delta Q_1 + \frac{\partial A_1}{\partial Z_1^{n+1}} \Delta Z_1 + \frac{\partial A_1}{\partial Z_2^{n+1}} \Delta Z_2 + \frac{\partial A_1}{\partial Z_0^{n+1}} \Delta Z_0 = -rA_1$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial Q_2^{n+1}} \Delta Q_2 + \frac{\partial C_2}{\partial h_2^{n+1}} \Delta h_2 + \frac{\partial C_2}{\partial Q_3^{n+1}} \Delta Q_3 + \frac{\partial C_2}{\partial h_3^{n+1}} \Delta h_3 = -rC_2$$

$$\frac{\partial M_2}{\partial Q_2^{n+1}} \Delta Q_2 + \frac{\partial M_2}{\partial h_2^{n+1}} \Delta h_2 + \frac{\partial M_2}{\partial Q_3^{n+1}} \Delta Q_3 + \frac{\partial M_2}{\partial h_3^{n+1}} \Delta h_3 = -rM_2$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial Q_2^{n+1}} \Delta Q_2 + \frac{\partial A_2}{\partial Z_2^{n+1}} \Delta Z_2 + \frac{\partial A_2}{\partial Z_3^{n+1}} \Delta Z_2 + \frac{\partial A_2}{\partial Z_1^{n+1}} \Delta Z_1 = -rA_2$$

.....

.....

$$\frac{\partial C_i}{\partial Q_i^{n+1}} \Delta Q_i + \frac{\partial C_i}{\partial h_i^{n+1}} \Delta h_i + \frac{\partial C_i}{\partial Q_{i+1}^{n+1}} \Delta Q_{i+1} + \frac{\partial C_i}{\partial h_{i+1}^{n+1}} \Delta h_{i+1} = -rC_i$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial Q_i^{n+1}} \Delta Q_i + \frac{\partial M_i}{\partial h_i^{n+1}} \Delta h_i + \frac{\partial M_{i+1}}{\partial Q_{i+1}^{n+1}} \Delta Q_{i+1} + \frac{\partial M_{i+1}}{\partial h_{i+1}^{n+1}} \Delta h_{i+1} = -rM_i$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial Q_i^{n+1}} \Delta Q_i + \frac{\partial A_i}{\partial Z_i^{n+1}} \Delta Z_i + \frac{\partial A_i}{\partial Z_{i+1}^{n+1}} \Delta Z_{i+1} + \frac{\partial A_i}{\partial Z_{i-1}^{n+1}} \Delta Z_{i-1} = -rA_i$$

.....

.....

$$\frac{\partial C_{N-1}}{\partial Q_{N-1}^{n+1}} \Delta Q_{N-1} + \frac{\partial C_{N-1}}{\partial h_{N-1}^{n+1}} \Delta h_{N-1} + \frac{\partial C_{N-1}}{\partial Q_N^{n+1}} \Delta Q_N + \frac{\partial C_{N-1}}{\partial h_N^{n+1}} \Delta h_N = -rC_{N-1}$$

$$\frac{\partial M_{N-1}}{\partial Q_{N-1}^{n+1}} \Delta Q_{N-1} + \frac{\partial M_{N-1}}{\partial h_{N-1}^{n+1}} \Delta h_{N-1} + \frac{\partial M_{N-1}}{\partial Q_N^{n+1}} \Delta Q_N + \frac{\partial M_{N-1}}{\partial h_N^{n+1}} \Delta h_N = -rM_{N-1}$$

$$\frac{\partial A_{N-1}}{\partial Q_{N-1}^{n+1}} \Delta Q_{N-1} + \frac{\partial A_{N-1}}{\partial Z_{N-1}^{n+1}} \Delta Z_{N-1} + \frac{\partial A_{N-1}}{\partial Z_N^{n+1}} \Delta Z_N + \frac{\partial A_{N-1}}{\partial Z_{N-2}^{n+1}} \Delta Z_{N-2} = -rA_{N-1}$$

$$\frac{\partial B_N}{\partial Q_N^{n+1}} \Delta Q_N + \frac{\partial B_N}{\partial h_N^{n+1}} \Delta h_N = -rB_N$$

با این معادلات، 3N معادله خطی جبری با 3N مجهول  $\Delta Q_i$ ،  $\Delta h_i$  و  $\Delta Z_i$  برای  $i=1, 2, \dots, N$  تشکیل

می‌شود. در ادامه برای کوتاه شدن معادلات، اندیس  $n+1$  حذف می‌شود. شکل ماتریسی معادلات خطی

به صورت زیر است.



$$\frac{\partial A_i}{\partial Q_i} = 1.6 * Q_i^{.6} * k_0 \left( \frac{Z_{i+1} - Z_{i-1}}{2\Delta x} \right)^2 * \left[ \frac{\beta \frac{Z_{i+1} - 2Z_i + Z_{i-1}}{(\Delta x)^2} + (1 - \beta) \frac{Z_{i+1} - 2Z_i + Z_{i-1}}{(\Delta x)^2}}{\Delta x^2} \right] \quad (69-3)$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial z_i} = \frac{-1}{\Delta t} - k_0 \left( \frac{Z_{i+1} - Z_{i-1}}{2\Delta x} \right)^2 * Q_i^{1.6} * \frac{-2\beta}{\Delta x^2} \quad (70-3)$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial z_{i+1}} = k_0 \left( \frac{Z_{i+1} - Z_{i-1}}{2\Delta x} \right)^2 * Q_i^{1.6} * \frac{\beta}{\Delta x^2} \quad (71-3)$$

$$\frac{\partial A_i}{\partial z_{i-1}} = k_0 \left( \frac{Z_{i+1} - Z_{i-1}}{2\Delta x} \right)^2 * Q_i^{1.6} \quad (72-3)$$

نتایج حاصل از حل همزمان معادلات سنت ونانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی در فصل چهارم ارائه و مورد بررسی واقع شده است.

به منظور مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی عددی با مدل تجاری، از نرم‌افزار HEC RAS 4 استفاده

گردید. داده‌های مورد نیاز نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی رسوب عبارتند از:

۱- فایل داده‌های رسوب: شامل شرایط اولیه، شرایط مرزی و خصوصیات ذرات رسوب

۲- فایل داده‌های هندسی: شامل ابعاد کانال و تعداد مقاطع

۳- فایل داده‌های جریان شبه غیردائمی

سایر داده‌های مورد نیاز مدل به روش مورد استفاده از معادلات انتقال رسوب بستگی دارد. نتایج

حاصل از مدل تجاری با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه گردید که نتایج آن در فصل چهارم مورد بررسی واقع شده است.

### ۳-۵- مدل آزمایشگاهی

همان طور که در فصل قبل اشاره شد، منظور از مدل فیزیکی و هیدرولیکی ساخت نمونه‌ای از طرح واقعی ولی با ابعاد کوچکتر است. قوانین حاصل از مدل فیزیکی با استفاده از روش‌های آنالیز ابعادی می‌باشد. فواید آنالیز ابعادی و مدل کردن:

۱- تاثیر پارامترهای مختلف بر پدیده‌ی موردنظر به خوبی مشخص می‌گردد.

۲- با کمک آزمایش‌های مدلی، می‌توان ارزشها و توانایی‌های یک طرح را پیش بینی و در نهایت اقتصادی‌ترین و مطمئن‌ترین طرح را انتخاب کرد.

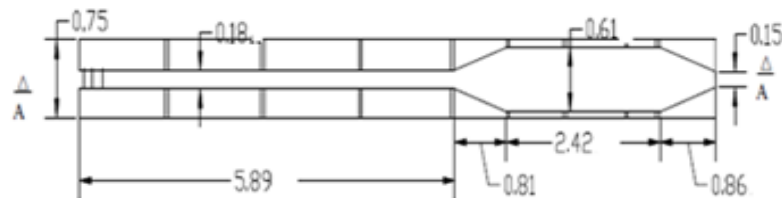
۳- آزمایش‌های اجرا شده بر روی مدل‌ها می‌توانند برای حصول اطلاعات مفید درباره‌ی اجرای پروتوتیپ‌ها به کار گرفته شود، فقط در صورتی که تشابه کامل بین مدل و پروتوتیپ وجود داشته باشد.

### ۳-۵-۱- بازسازی مدل

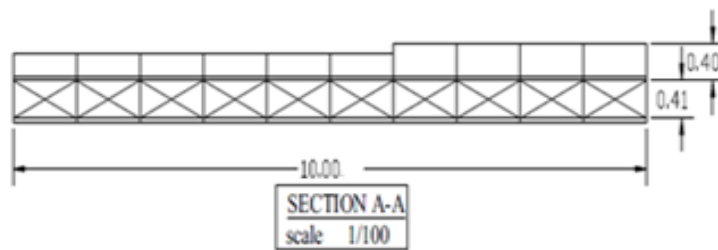
برای بررسی مشکل رسوب در سازه‌های هیدرولیکی اغلب ساخت یک مدل فیزیکی الزامی می‌باشد. بنابراین در اکثر مطالعات، در این زمینه، مدل‌های فیزیکی جهت حل اینگونه مشکلات ساخته شده و نتایج رضایت بخشی نیز ارائه شده است. در راستای این تحقیق از یک مدل هیدرولیکی با مقیاس کوچک، موجود در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه شهید باهنر کرمان (انجام شده توسط جعفری، ۱۳۸۱)، جهت مطالعه‌ی فرآیند رسوبشویی رسوبات مخزن سد، استفاده شده که مشخصات هندسی آن به شرح ذیل است:

طول کل مدل ۱۰ متر، که شامل دو بخش می‌باشد: ۱- فلوم مستطیل شکل بطول ۵/۹ متر، ۲- مخزن سد بطول ۴/۱ متر. عرض فلوم ۱۴/۵ و ارتفاع آن ۳۰ سانتی‌متر بوده که انتهای آن به دریاچه‌ی

سد متصل می‌گردد. مخزن سد به شکل پلیگون می‌باشد. عرض آن در یک طول ۸۴ سانتی متری واگرا (۱۴/۵ تا ۶۰ سانتی متر)، سپس بطول ۲/۴۲ متر ثابت و در نهایت به طول ۸۴ سانتی متر همگرا (۶۰ تا ۱۶/۵ سانتی متر) می‌باشد. ارتفاع دیواره‌های مخزن ۴۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. شکل (۳-۵) مقطع طولی و پلان مدل را نشان می‌دهد.



الف



ب

شکل (۳-۵) پلان (الف) و مقطع طولی مدل (ب)

### ۳-۵-۲- اجزاء مدل

مدل فیزیکی از چهار بخش اصلی تشکیل شده است که در ادامه بشرح مختصری از آنها پرداخته می‌شود.

### ۳-۵-۲-۱ اسکلت مدل

کلیه‌ی قسمت‌های اصلی مدل بر روی یک خرپای مکعب مستطیل سه بعدی قرار دارد. طول خرپا ۱۰ متر، عرض آن ۷۰ و ارتفاع آن ۴۵ سانتی متر می‌باشد. قسمت زیرین مدل از چهار نبشی

۵۰×۵۰×۵۰ به طول ۱۰ متر با وزن کل ۱۵۰/۸ کیلوگرم به وسیله‌ی قوطی‌های اتصال به فاصله یک متر به هم جوش داده شده است. قوطی‌های مورد استفاده به ابعاد ۴۰ میلی متر و به وزن واحد طول ۳/۳۲ کیلوگرم بر متر بوده که با توجه به ابعاد مدل، در اندازه‌های ۴۰، ۷۰ و ۱۰۸ سانتی متر بریده شدند و به وسیله‌ی نبشی‌های پایین و بالا بهم اتصال داده شده اند. با توجه به اهداف آزمایش‌ها، صلب بودن خرپا در برابر وزن کل مدل و آب و رسوب درون مخزن الزامی بود. برای تنظیم شیب مدل از یک جک هیدرولیکی ۵ تنی استفاده شده است. دیواره‌ها و کف مدل از شیشه ساخته شد. به منظور تراز نمودن کف مدل و تحمل مقدار فشار حاصل از آب و رسوب روی آن، در زیر کف مدل، در حد فاصل کف مدل و خرپا، بالشتک‌هایی از چسب آکواریوم قرار داده شد. برای جلوگیری از وارفتگی کانال و مخزن در هنگام آبیگری و انجام آزمایش‌ها، دیواره‌های دو طرف کانال و مخزن توسط طناب‌های نایلونی بهم متصل شدند.

### ۳-۲-۵-۲ کف مدل

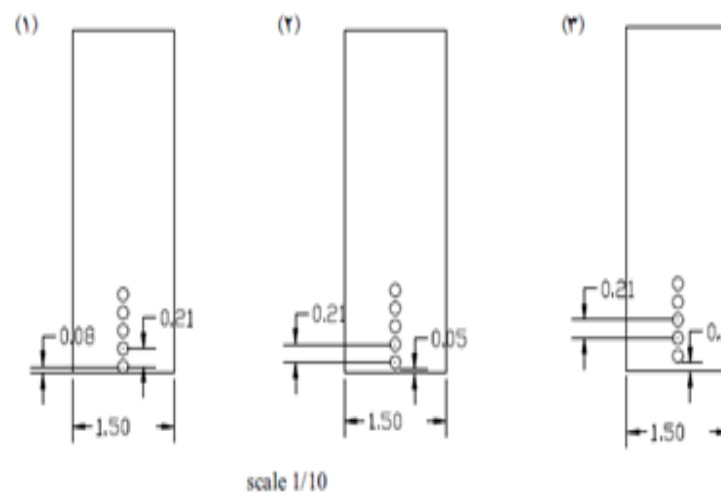
جهت مشاهده‌ی کامل پدیده‌هایی که در حین آزمایش اتفاق می‌افتد، کف مدل و مخزن از جنس شیشه با ضخامت ۱۰ میلی متر ساخته شد. چون امکان نصب شیشه یکپارچه در کل مخزن و کانال وجود نداشت بنابراین در کانال از سه قطعه شیشه با مجموع طول ۵/۹ متر و عرض ۱۴/۵ سانتی متر، و در قسمت مخزن از دو قطعه شیشه با مجموع طول ۴/۱ متر و عرض ۶۰ سانتی متر استفاده شد.

### ۳-۲-۵-۳ دیواره‌های جانبی مدل

جهت مشاهده‌ی فرآیندهایی که در آزمایش‌ها اتفاق می‌افتد، دیواره‌های جانبی مدل از شیشه شفاف انتخاب شده است. ارتفاع شیشه در قسمت مستطیل شکل کانال ۳۰ سانتی متر و در قسمت مخزن ۴۰ سانتی متر انتخاب شد. برای تامین مقاومت لازم دیواره‌های جانبی از شیشه ۶ میلی متری استفاده شده است.

### ۳-۵-۲-۴ بدنه سد

جنس سد از شیشه ۶ میلی متری و ابعاد آن ۱۶×۴۰ سانتی متر انتخاب شد. برای انجام آزمایش‌های مختلف از سدهای مختلفی استفاده شد. با توجه به تعداد و شرایط آزمایش‌ها، مجموعاً ۸ سد شیشه‌ای مورد استفاده قرار گرفت که ابعاد همگی ۱۶×۴۰ سانتی متر بود. کاربرد هر یک از سدها به گونه‌ای بود که، برای آزمایش‌های گروه اول مجموعاً سه سد ساخته شد که هر سد دارای ۵ دریچه‌ی دایره‌ای شکل با قطر ۱/۶ سانتی متر بود. نمایی از دریچه‌ها در این سدها در شکل (۳-۶) نشان داده شده است. این شکل رقوم‌های مختلف قرار گیری دریچه را در مخزن سد نشان می‌دهد.

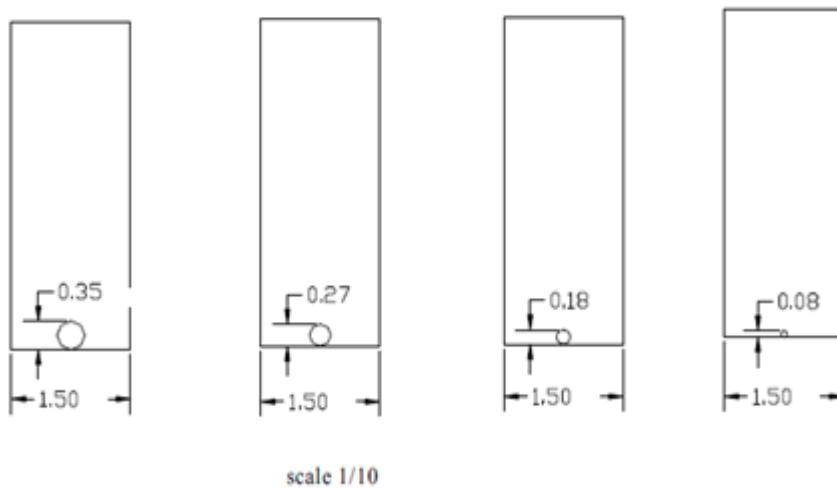


شکل (۳-۶) مقاطع سدهای آزمایش گروه اول

همانطوری که در شکل (۳-۶) نشان داده می‌شود، برای سد شماره‌ی (۱) اولین دریچه در پایین‌ترین رقوم قرار دارد و دریچه‌های بعدی به فاصله‌ی ۲/۱ سانتی متر، مرکز تا مرکز، بالاتر از دریچه‌ی قبلی قرار دارند. برای سد شماره‌ی (۲)، اولین دریچه به فاصله‌ی ۰/۵ سانتی متر بالاتر از پایین‌ترین رقوم و دریچه‌های بعدی هر کدام به فاصله‌ی ۲/۱ سانتی متر، مرکز تا مرکز، از دریچه‌ی قبلی قرار دارد. در سد شماره‌ی (۳)، اولین دریچه، به فاصله‌ی ۱ سانتی متر بالاتر از پایین‌ترین رقوم و دریچه‌های بعدی هر کدام به فاصله‌ی ۲/۱ سانتی متر، مرکز تا مرکز، از دریچه‌ی قبلی دارد. برای



آزمایش‌ها گروه دوم مجموعاً ۵ سد ساخته شد که هر سد دارای فقط یک دریچه دایره‌ای شکل با قطرهای ۳/۵، ۲/۷، ۱/۸، ۱/۶، ۰/۸، سانتی متر می‌باشند. تمامی دریچه‌ها در این سد در پایین‌ترین رقوم تعبیه شده‌اند. شمایی از این سدها در شکل (۷-۳) نشان داده می‌شود. برای نصب کردن و آب بندی سد در محل موردنظر از چسب آکواریوم استفاده شد. برای قرائت دقیق ارتفاع آب پشت سد، بدنه سد اشل گذاری شد. شکل (۷-۳) میزان بازشدگی‌های مختلف در دریچه مخزن سد را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۳) مقاطع سدهای آزمایش‌های گروه دوم

### ۳-۵-۳- اندازه‌گیری رقوم سطح رسوب

در تمامی آزمایش‌ها، رقوم سطح رسوب قبل و بعد از رسوبشویی، بطور دقیق اندازه‌گیری می‌شد. برای این منظور از یک سطح سنج دقیق با دقت ۰/۱ میلی متر استفاده شد. این سطح سنج بر روی یک قطعه چوب مدرج به ابعاد ۶۰×۴۰×۱ سانتی متر قرار می‌گرفت و برای اندازه‌گیری رقوم سطح رسوب در راستای عرضی براحتی جابجا می‌شد. دیواره‌های مخزن در راستای طولی نیز مدرج شدند تا توان مختصات طولی و عرضی نقاط را براحتی اندازه‌گیری نمود.

### ۳-۵-۴- آماده سازی مدل

رسوب مورد استفاده در آزمایش‌ها خاک اره نرم می‌باشد. حدود ۱۲ الی ۲۴ ساعت قبل از آزمایش، خاک اره کاملاً خیس می‌شود. برای تنظیم کردن مدل روی شیب ۰.۴٪، از جک هیدرولیکی استفاده شده است. دیواره‌ی سد مورد نظر برای هر آزمایش در محل آن نصب و توسط چسب آکواریوم آب بندی شد. مخزن سد تا ارتفاع ۲۳/۵ سانتی متر در محل سد، از آب پر و سپس خاک اره‌ی نرم خیس شده، به شکل گوه، تا ارتفاع ۹ سانتی متر در محل سد، انباشته شد. چون لازم بود رقوم دقیق سطح رسوب قبل و بعد از رسوبشویی اندازه گیری شود بنابراین قبل از هر آزمایش، سطح مخزن مش بندی شد. روند آماده سازی مدل برای تمامی آزمایش‌ها مشابه بود.

### ۳-۵-۵- روش آزمایش

روش استفاده شده برای تمامی آزمایش‌ها مشابه بود. بعد از آماده سازی مدل و قبل از باز کردن دریچه‌ها، رقوم سطح رسوب قبل از رسوبشویی توسط سطح سنج با دقت ۰/۱ میلی متر اندازه گیری شد. سپس دریچه مربوطه را باز کرده تا رسوبشویی آغاز گردد. در پایان هر آزمایش، رقوم سطح رسوب بعد از رسوبشویی بطور دقیق اندازه گیری شد. آزمایش‌ها در دو گروه انجام شد. گروه اول، جهت بررسی تاثیر رقوم دریچه بر راندمان رسوبشویی و گروه دوم جهت بررسی تاثیر میزان باز شدگی دریچه بر راندمان رسوبشویی انجام شد. روش آزمایش‌ها برای هر دو گروه یکسان می‌باشند.

### ۳-۵-۵-۱- آزمایش‌های مربوط به تأثیر رقوم کف دریچه بر راندمان رسوبشویی

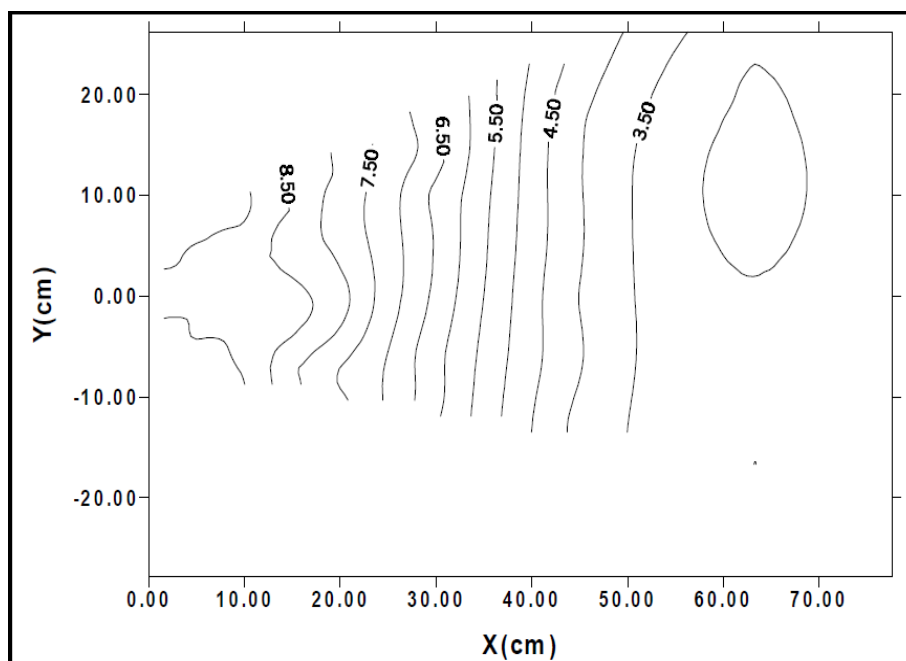
آزمایش‌های این گروه شامل سه سری آزمایش می‌باشند. آزمایش‌های سری A:

این سری شامل ۵ آزمایش (A1, A2, A3, A4, A5)، می‌باشند. ارقام ۱ تا ۵ نشان دهنده شماره

دریچه‌ها می‌باشند. شرح آزمایش‌ها به صورت زیر است:

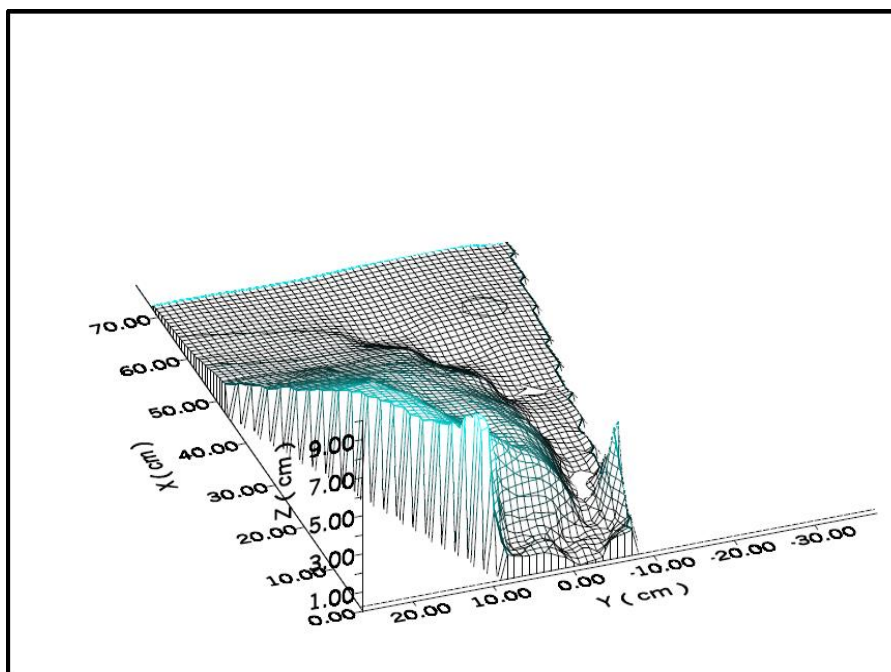
## آزمایش A1

این آزمایش با دریچه‌ای که در پایین‌ترین رقوم قرار داشت، انجام شد. دریچه‌ی مورد استفاده در این آزمایش دارای سطح مقطع  $2/011$  سانتی متر مربع می‌باشد. مدت زمان رسوبشویی حدود  $20$  دقیقه، عرض بالا و پایین مخروط رسوبشویی بعد از ثابت شدن به ترتیب  $10/5$  و  $4$  سانتی متر می‌باشند. شکل‌های  $8$  تا  $10$ ، رقوم سطح رسوب قبل و بعد از رسوبشویی آزمایش A1 را نشان می‌دهند. در این شکل‌ها،  $X$  برابر فاصله از سد می‌باشد که جهت مثبت آن به طرف بالادست است و  $Y$  برابر فاصله از مرکز دریچه در جهت عرضی می‌باشد. جهت مثبت محور  $Y$ ها، به طرف دیواره‌ی سمت راست مدل می‌باشد.

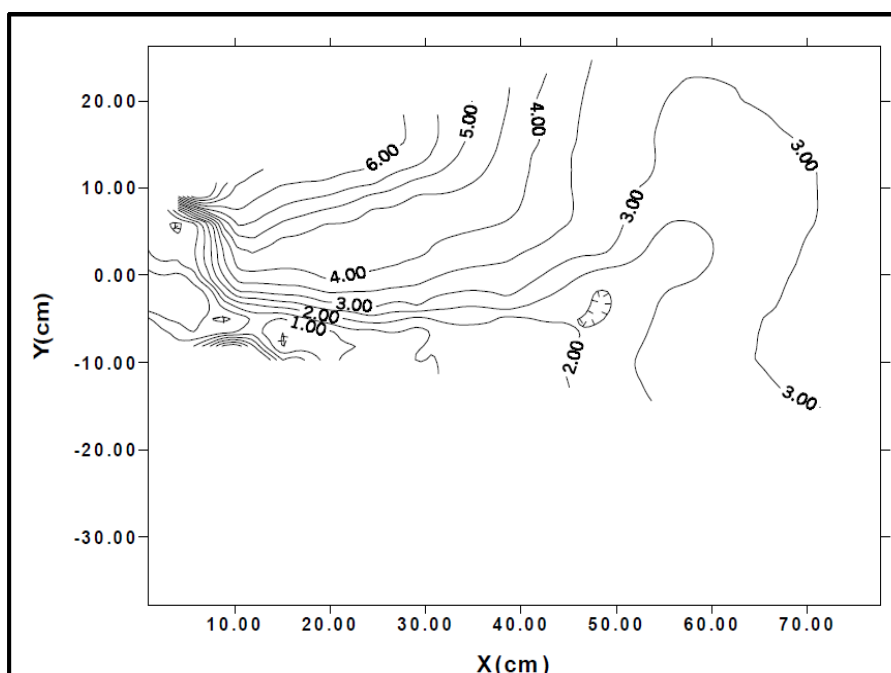


شکل (۳-۸)، خطوط تراز سطح رسوب قبل از رسوبشویی آزمایش A1 ( $X$ =طول مخزن،  $Y$ =عرض

مخزن)



شکل (۳-۹)، نمایی از رقوم سطح رسوب بعد از رسوبشویی آزمایش A1 ( $X$ =طول مخزن،  $Y$ =عرض مخزن)



شکل (۳-۱۰)، خطوط تراز سطح رسوب بعد از رسوبشویی آزمایش A1 ( $X$ =طول مخزن،  $Y$ =عرض مخزن)

سایر آزمایش‌های سری A و B و C، مربوط به تأثیر رقوم کف دریاچه بر راندمان رسوبشویی به طریق مشابه انجام شدند.

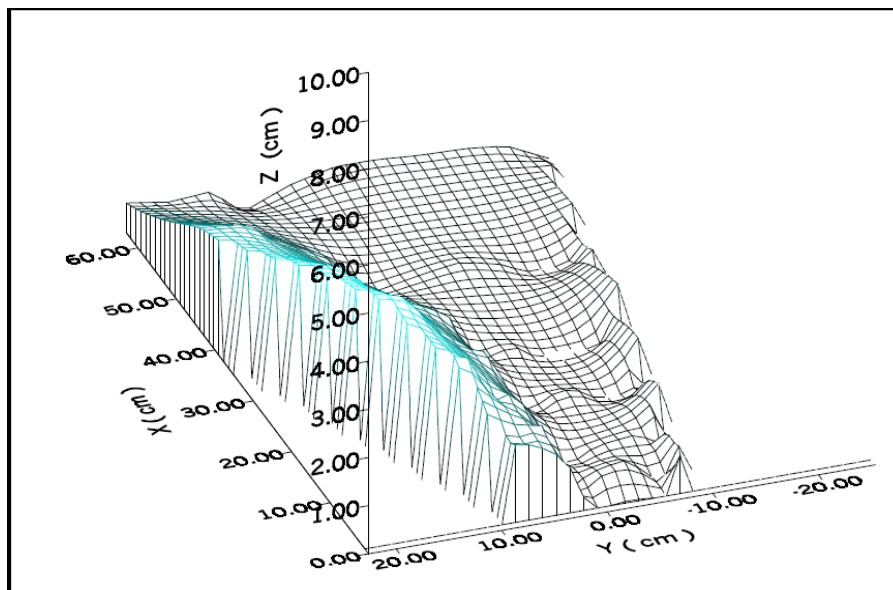
### ۳-۵-۲ آزمایش‌های مربوط به تأثیر میزان باز شدگی دریاچه بر راندمان رسوبشویی

در آزمایش‌های این گروه همه دریاچه‌ها در پایین‌ترین رقوم قرار داشته ولی میزان باز شدگی آنها تغییر می‌کند. شرایط اولیه، نحوه و روش آماده سازی مدل برای تمامی آزمایش‌ها یکسان می‌باشد.

#### آزمایش D

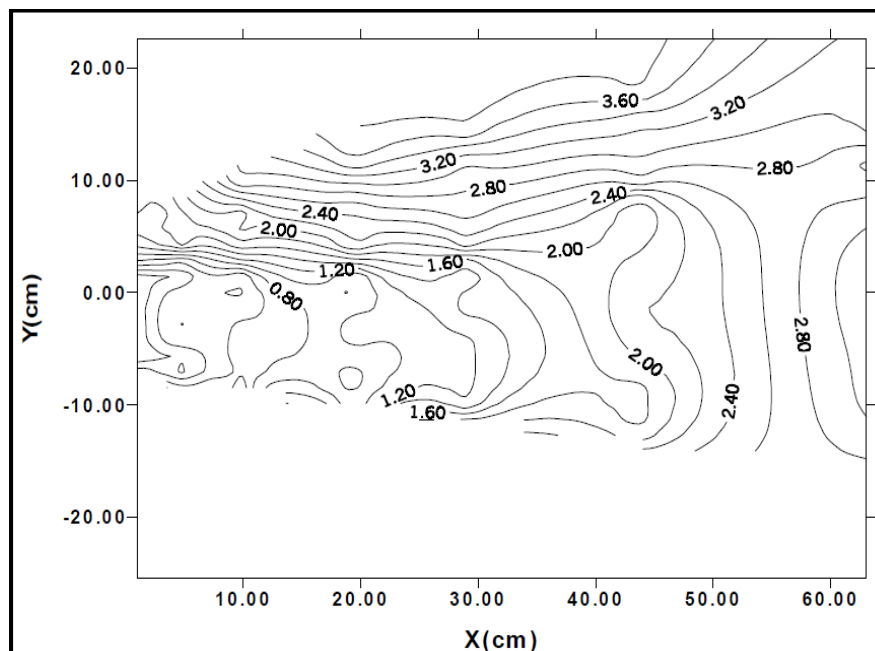
در این آزمایش، دریاچه موردنظر دارای سطح مقطع  $9/62$  سانتی متر مربع بود. مدت زمان رسوبشویی  $6/5$  دقیقه، عرض بالای مخروط  $16$  سانتی متر می‌باشد. در این آزمایش به محض باز شدن دریاچه، همواره رسوب از دریاچه خارج می‌شد. بنابراین مخروط رسوبشویی لحظه به لحظه گسترش پیدا می‌کرد.

شکل ۱۱ و ۱۲، رقوم سطح رسوب بعد از رسوبشویی آزمایش D را نشان می‌دهد.



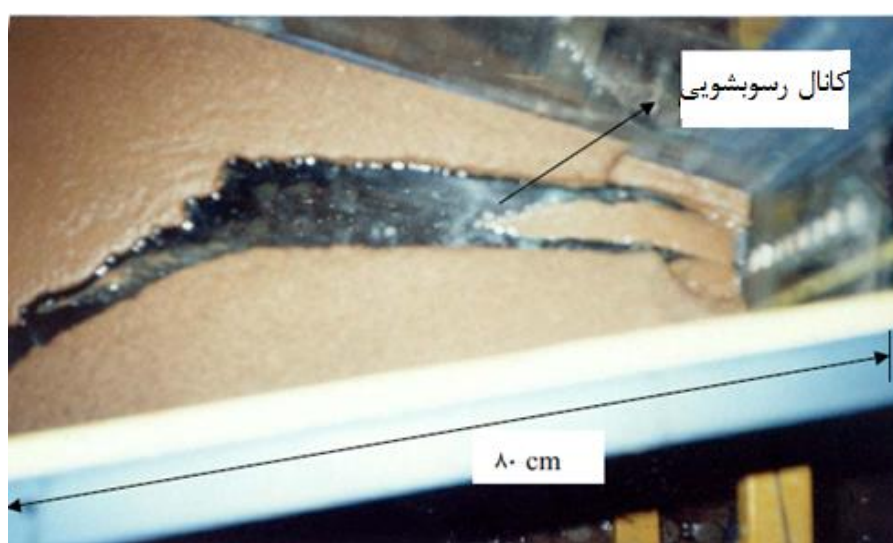
شکل (۱۱-۳)، نمایی از رقوم سطح رسوب بعد از رسوبشویی آزمایش D، (X=طول مخزن، Y=عرض

مخزن)



شکل (۳-۱۲)، خطوط تراز سطح رسوب بعد از رسوبشویی آزمایش D، (X=طول مخزن، Y=عرض مخزن)

سایر آزمایش‌های مربوط به تأثیر میزان بازشدگی دریچه بر راندمان رسوبشویی به طریق مشابه انجام شدند. در ادامه شکل (۳-۱۳) پلان کانال رسوبشویی را بعد از آزمایش D نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۳) پلان کانال رسوبشویی پس از پایان آزمایش D

در تمام آزمایش‌های انجام شده ۸۰ سانتی متر از طول مدل حاوی رسوب می‌باشد. به منظور ارزیابی نتایج، مقایسه و انتخاب مدل برتر از معیارهای ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده گردید که فرمول‌های (۷۳-۳)، (۷۴-۳)، (۷۵-۳) به ترتیب بیان کننده آنها می‌باشند.

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (73-3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (74-3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (75-3)$$

در روابط مذکور  $X_i$  و  $Y_i$  نشان‌دهنده‌ی  $i$  امین داده‌ی واقعی و برآورد شده،  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  میانگین داده‌های  $X_i$  و  $Y_i$  و  $n$  تعداد نمونه‌ها می‌باشد.

در توضیح روابط فوق باید گفت که هر چه  $R^2$  به یک نزدیک‌تر باشد، آن رابطه دقت بالاتری دارد. در هر روش که مقادیر به دست آمده برای RMSE و MAE به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت مدل مورد نظر بالاتر است.





# فصل چہارم

بحث ونتیجہ گیری

#### ۴-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی رسوبشویی مخازن سدها با حل معادلات سنت‌ونانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی به روش بتا با استفاده از نرم‌افزار MATLAB 10 پرداخته شده است. ابتدا نتایج حاصل از حل مرحله‌ای معادلات سنت‌ونانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی و سپس مدل فیزیکی انجام شده توسط جعفری (۱۳۸۱) بررسی می‌گردد. در ادامه نتایج حل همزمان معادلات فوق‌الذکر و مدل تجاری نرم‌افزار HEC-RAS آورده شده و به مقایسه مدل‌ها پرداخته می‌شود.

#### ۴-۲- بررسی نتایج حاصل از حل مرحله‌ای معادلات سنت‌ونانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی

در حل مرحله‌ای ابتدا معادلات سنت‌ونانت حل شده سپس خروجی حل این معادلات به عنوان ورودی حل معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴-۲-۱- نتایج حاصل از حل معادلات سنت‌ونانت

خروجی حل معادلات سنت‌ونانت مقادیر دبی و ارتفاع آب در هر گره از شبکه بندی مخزن سد می‌باشد که در جدول (۴-۱) آورده شده است.

جدول ۴-۱- دبی آب هر گره در شبکه‌بندی مخزن سد

$Q_n \frac{cm^3}{s}$ X cm	$Q_0$	$Q_5$	$Q_{10}$	$Q_{15}$	$Q_{20}$
X=۰	۳۴۵/۰۰	۳۰۸/۲۰	۲۷۰/۸۴	۲۳۳/۳۵	۲۱۵/۵۳
X=۵	۳۴۲/۴۹	۳۳۱/۰۳	۳۱۹/۹۸	۳۰۷/۹۸	۲۵۰/۹۲
X=۱۰	۳۴۱/۰۱	۳۳۰/۹۰	۳۲۲/۹۸	۳۱۲/۹۷	۲۶۰/۷۹
X=۱۵	۳۳۹/۵۲	۳۳۰/۱۲	۳۲۵/۷۲	۳۱۷/۴۴	۲۵۴/۵۸

X=۲۰	۳۳۸/۰۲	۳۲۹/۵۴	۳۲۸/۲۱	۳۲۱/۴۰	۲۷۰/۳۲
X=۲۵	۳۳۶/۵۱	۳۲۸/۱۵	۳۳۰/۴۴	۳۲۴/۸۴	۲۵۹/۰۳
X=۳۰	۳۳۵/۰۱	۳۲۸/۰۱	۳۳۲/۴۱	۳۲۷/۷۷	۲۶۶/۳۶
X=۳۵	۳۳۳/۴۸	۳۲۷/۹۴	۳۲۷/۵۵	۳۱۷/۰۳	۲۹۵/۰۱
X=۴۰	۳۳۱/۹۶	۳۲۶/۶۲	۳۲۱/۴۱	۳۰۳/۷۳	۲۶۵/۲۲
X=۴۵	۳۳۰/۴۲	۳۲۳/۴۲	۳۱۵/۴۵	۲۹۰/۷۸	۲۳۶/۱۲
X=۵۰	۳۲۸/۸۸	۳۲۰/۳۱	۳۰۹/۶۸	۲۷۸/۱۹	۲۰۷/۷۲
X=۵۵	۳۲۷/۳۴	۳۱۷/۳۱	۳۰۴/۰۷	۲۶۵/۹۵	۱۸۰/۰۴
X=۶۰	۳۲۵/۷۸	۳۱۴/۴۱	۲۹۸/۶۴	۲۵۴/۰۸	۱۷۱/۰۷
X=۶۵	۳۲۴/۲۲	۳۱۱/۶۲	۲۹۳/۴۱	۲۴۲/۵۸	۱۷۰/۱۲
X=۷۰	۳۲۲/۶۵	۳۰۸/۹۳	۲۸۸/۳۶	۲۳۱/۴۴	۱۵۰/۷۵
X=۷۵	۳۲۱/۰۷	۲۹۷/۰۱	۲۸۳/۳۰	۲۲۰/۶۸	۱۴۶/۲۹
X=۸۰	۳۱۸/۱۲	۲۹۶/۶۵	۲۷۸/۲۳	۲۱۰/۰۴	۱۴۱/۳۵

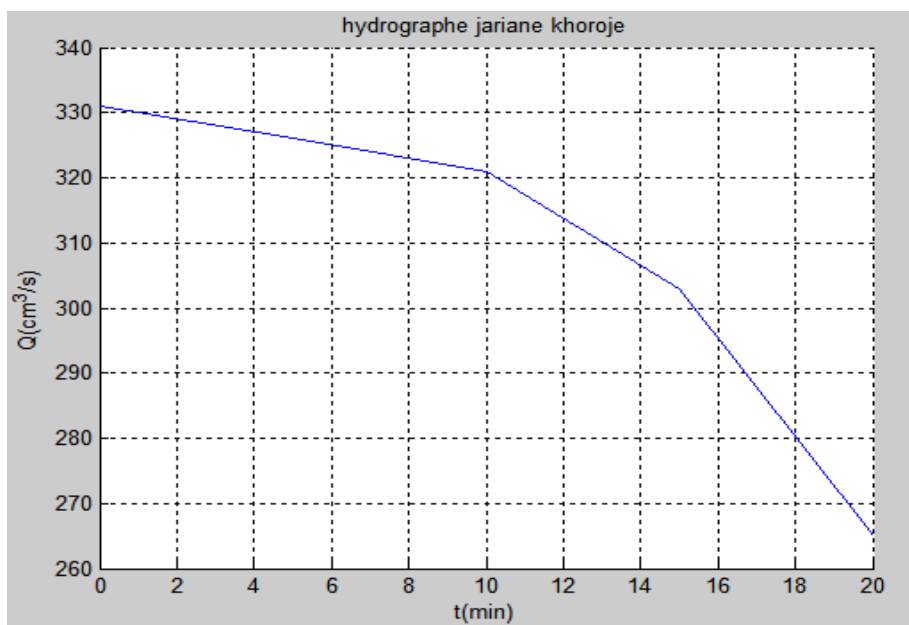
در جدول (۴-۱) مقادیر  $Q_n$  دبی (سانتی متر مکعب بر ثانیه) هرگره در زمان  $n$ ام (دقیقه) از شروع آزمایش و  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) در شبکه بندی مخزن سد می باشد. مقادیر دبی در زمان  $n=0$  همان شرایط اولیه مورد نیاز مدل می باشند که از معلومات مسئله هستند. دبی در گام های زمانی بعدی با حل معادلات سنت و نانت حاصل شدند. همچنین مقادیر ارتفاع آب در جدول (۴-۲) آورده شده است.

جدول ۴-۲- ارتفاع آب هرگره در شبکه‌بندی مخزن سد

$h_n$ cm X cm	$h_0$	$h_5$	$h_{10}$	$h_{15}$	$h_{20}$
X=۰	۲۳/۵۰	۱۸/۷۰	۱۴/۴۵	۱۰/۷۲	۷/۵۴
X=۵	۲۳/۳۰	۱۷/۲۰	۱۵/۸۶	۱۴/۳۴	۹/۶۱
X=۱۰	۲۳/۱۰	۱۷/۱۵	۱۵/۸۵	۱۴/۳۴	۹/۵۹
X=۱۵	۲۲/۹۰	۱۷/۱۰	۱۵/۸۵	۱۴/۳۳	۹/۵۷
X=۲۰	۲۲/۷۰	۱۷/۰۴	۱۵/۸۴	۱۴/۳۲	۹/۵۵
X=۲۵	۲۲/۵۰	۱۶/۹۹	۱۵/۸۴	۱۴/۳۱	۹/۵۴
X=۳۰	۲۲/۳۰	۱۶/۹۵	۱۵/۸۴	۱۴/۳۱	۹/۵۲
X=۳۵	۲۲/۱۰	۱۶/۹۰	۱۵/۸۳	۱۴/۲۹	۹/۵۰
X=۴۰	۲۱/۹۰	۱۶/۸۵	۱۵/۸۳	۱۴/۲۸	۹/۴۹
X=۴۵	۲۱/۷۰	۱۶/۸۰	۱۵/۸۲	۱۴/۲۸	۹/۴۷
X=۵۰	۲۱/۵۰	۱۶/۷۶	۱۵/۸۱	۱۴/۲۸	۹/۴۶
X=۵۵	۲۱/۳۰	۱۶/۷۲	۱۵/۸۲	۱۴/۲۷	۹/۴۵
X=۶۰	۲۱/۱۰	۱۶/۶۸	۱۵/۸۲	۱۴/۲۷	۹/۴۴
X=۶۵	۲۰/۹۰	۱۶/۶۳	۱۵/۸۱	۱۴/۲۶	۹/۴۳
X=۷۰	۲۰/۷۰	۱۶/۵۹	۱۵/۸۱	۱۴/۲۶	۹/۴۲
X=۷۵	۲۰/۵۰	۱۶/۵۵	۱۵/۸۱	۱۴/۲۴	۹/۴۱
X=۸۰	۲۰/۳۰	۱۶/۵۰	۱۵/۸۰	۱۴/۲۰	۹/۳۱

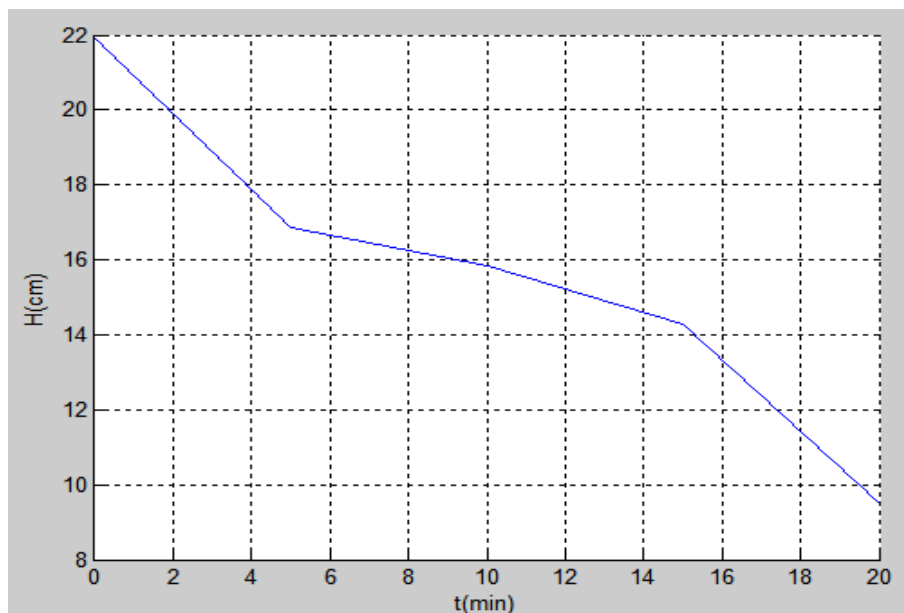
در جدول (۲-۴) مقادیر  $h_n$  ارتفاع آب (سانتی متر) در زمان  $n$ ام (دقیقه) و  $X$  فاصله از مرکز دریاچه (سانتی متر) در شبکه بندی مخزن سد می باشد. مقادیر ارتفاع آب در زمان  $n = 0$  همان شرایط اولیه می باشند که از معلومات مسئله هستند. ارتفاع آب در گام های زمانی بعدی با حل معادلات سنت و نانت حاصل شدند.

برای نمونه نمودارهای حاصل از جداول (۲-۴) و (۱-۴) جهت بررسی نتایج، در فاصله  $X = 40$  سانتی متری از دریاچه مخزن سد در شکل های زیر آورده شده است.



شکل (۱-۴) هیدروگراف جریان خروجی در فاصله  $X = 40$  سانتی متری از دریاچه مخزن سد

همانطور که شکل (۱-۴) نشان می دهد به دلیل کاهش دبی از خروجی مخزن سد نسبت به زمان، هیدروگراف از بازوی پایین رونده تشکیل شده است. همچنین وجود جریان پایه در سد باعث می شود انتهای نمودار محور زمان را قطع نکند.



شکل (۲-۴) نمودار تغییرات ارتفاع آب نسبت به زمان در فاصله  $X=40$  سانتی متری از دریچه‌ی

#### مخزن سد

در شکل (۲-۴) ابتدا نمودار با شیب نسبتاً زیادی کاهش می‌یابد که دلیل آن تغییرات ناگهانی در افت سطح آب به دلیل تشکیل مخروط افت می‌باشد. بعد از تشکیل و توسعه‌ی مخروط افت تغییرات سطح آب دارای شیب کمتری شده و در نهایت با میل کردن جریان به سمت جریان رودخانه‌ای تاثیر فرسایش‌های پسرو و پیشرو بیشتر شده و تغییرات سطح آب بیشتر می‌گردد.

#### ۲-۲-۴- نتایج حاصل از حل معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی

از حل معادلات سنت‌ونانت مقدار دبی به عنوان ورودی معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی در نظر گرفته شده است. خروجی حل معادله‌ی رسوبشویی رقوم سطح رسوب در شبکه بندی مخزن سد می‌باشد. در زیر به منظور مقایسه‌ی نتایج، ابتدا نتایج مدل آزمایشگاهی A1 و سپس مدل عددی توسعه داده شده آورده شده است.

جدول (۳-۴) رقوم سطح رسوب در مدل آزمایشگاهی آزمایش A1

t min X cm	t=۰	t=۵	t=۱۰	t=۱۵	t=۲۰
X=۰	۹/۰۰	۰	۰	۰	۰
X=۵	۸/۷۹	۵/۷۳	۲/۱۳	۱/۶۳	۱/۰۲
X=۱۰	۸/۷۵	۷/۴۴	۲/۳۳	۲/۲۳	۲/۲۱
X=۱۵	۸/۶۰	۷/۴۸	۴/۳۶	۳/۰۹	۳/۱۱
X=۲۰	۷/۸۰	۷/۱۰	۵/۱۶	۴/۱۸	۳/۸۸
X=۲۵	۶/۷۰	۶/۴۱	۵/۴۳	۴/۸۷	۴/۳۸
X=۳۰	۵/۲۰	۵/۸۹	۵/۱۴	۴/۹۹	۴/۷۰
X=۳۵	۴/۷۸	۴/۸۷	۵/۰۴	۴/۷۴	۴/۶۷
X=۴۰	۴/۰۱	۴/۲۹	۴/۵۸	۴/۵۳	۴/۴۶
X=۴۵	۳/۴۲	۳/۷۷	۴/۱۶	۴/۲۲	۴/۲۱
X=۵۰	۳/۰۶	۳/۳۷	۳/۸۱	۳/۹۱	۳/۹۵
X=۵۵	۲/۹۰	۳/۱۱	۳/۵۳	۳/۶۵	۳/۷۰
X=۶۰	۲/۸۷	۳/۰۰	۳/۳۱	۳/۴۴	۳/۵۰
X=۶۵	۲/۹۵	۳/۰۲	۳/۱۹	۳/۲۹	۳/۳۵
X=۷۰	۳/۰۹	۳/۰۷	۳/۱۶	۳/۲۱	۳/۳۵
X=۷۵	۳/۱۸	۳/۱۳	۳/۱۷	۳/۱۹	۳/۲۱
X=۸۰	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳

در جدول (۳-۴) زمان  $t$  (دقیقه) و  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) در شبکه بندی مخزن سد می باشد.

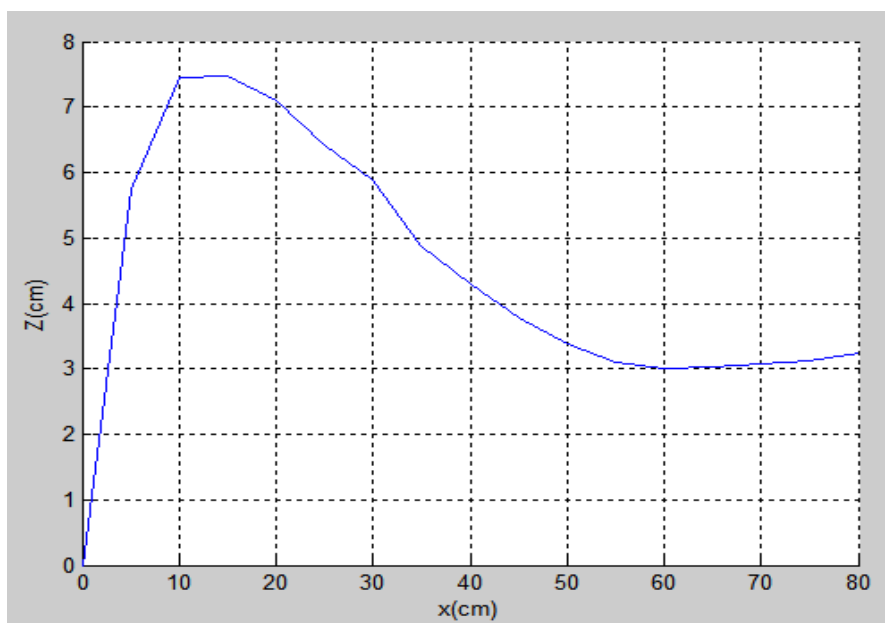
جدول ۴-۴- رقوم سطح رسوب در مدل عددی حاکم بر رسوبشویی (بتا)

$t$ min $X$ cm	$t=0$	$t=5$	$t=10$	$t=15$	$t=20$
$X=0$	۹/۰۰	۰	۰	۰	۰
$X=5$	۸/۷۹	۶/۶۶	۲/۴۰	۲/۱۹	۲/۰۱
$X=10$	۸/۷۵	۸/۲۴	۳/۵۳	۳/۲۳	۳/۰۰
$X=15$	۸/۶۰	۸/۲۲	۴/۷۹	۴/۰۵	۳/۸۱
$X=20$	۷/۸۰	۷/۵۷	۵/۷۵	۴/۴۰	۳/۹۶
$X=25$	۶/۷۰	۶/۵۹	۵/۷۰	۴/۶۱	۴/۲۱
$X=30$	۵/۲۰	۵/۵۸	۵/۳۷	۴/۷۰	۴/۴۰
$X=35$	۴/۷۸	۴/۷۶	۵/۲۶	۴/۵۵	۴/۴۸
$X=40$	۴/۰۱	۴/۰۹	۵/۱۶	۴/۱۰	۴/۳۰
$X=45$	۳/۴۲	۳/۵۴	۴/۹۱	۳/۸۵	۴/۰۹
$X=50$	۳/۰۶	۳/۱۶	۴/۶۰	۳/۶۰	۳/۷۹
$X=55$	۲/۹۰	۲/۹۶	۴/۱۳	۳/۵۲	۳/۶۰
$X=60$	۲/۸۷	۲/۹۰	۳/۷۵	۳/۳۹	۳/۳۱
$X=65$	۲/۹۵	۲/۹۳	۳/۲۹	۳/۲۸	۳/۰۲
$X=70$	۳/۰۹	۲/۸۹	۳/۱۸	۳/۱۴	۲/۸۵
$X=75$	۳/۱۸	۲/۴۱	۲/۹۵	۲/۹۴	۳/۱۱
$X=80$	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳



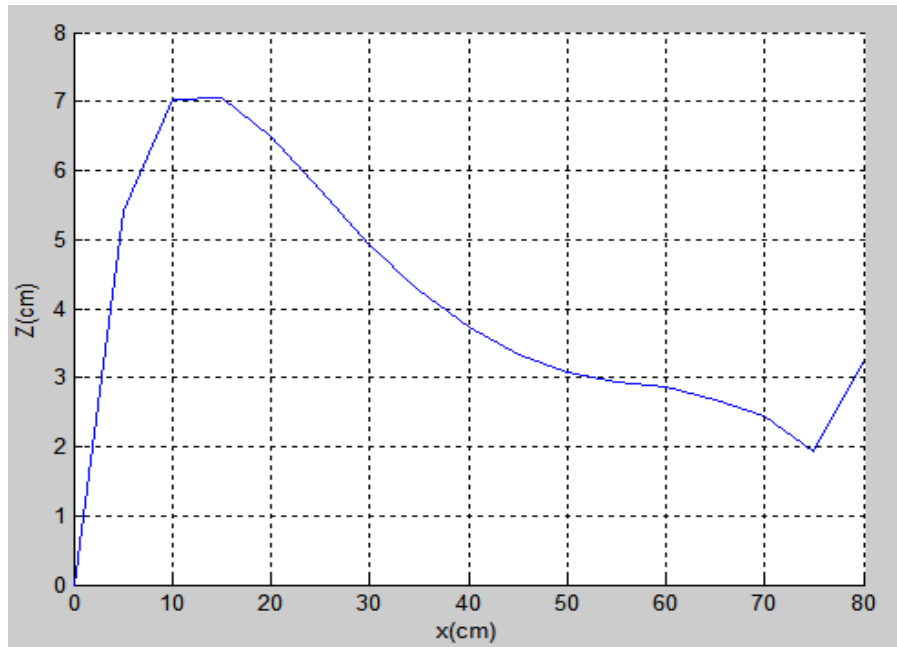
در جدول (۴-۴) زمان (دقیقه) و  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) در شبکه بندی مخزن سد می باشد. مقادیر ارتفاع رسوب در زمان  $t=0$  شرایط اولیه مورد نیاز مدل عددی می باشد که از معلومات مسئله هستند. ارتفاع رسوب در گام های زمانی بعدی با حل معادله ی رسوبشویی حاصل شده است.

نمودار جداول (۴-۴) و (۳-۴) در زمان  $t=5$  دقیقه برای نمونه آورده شده است.



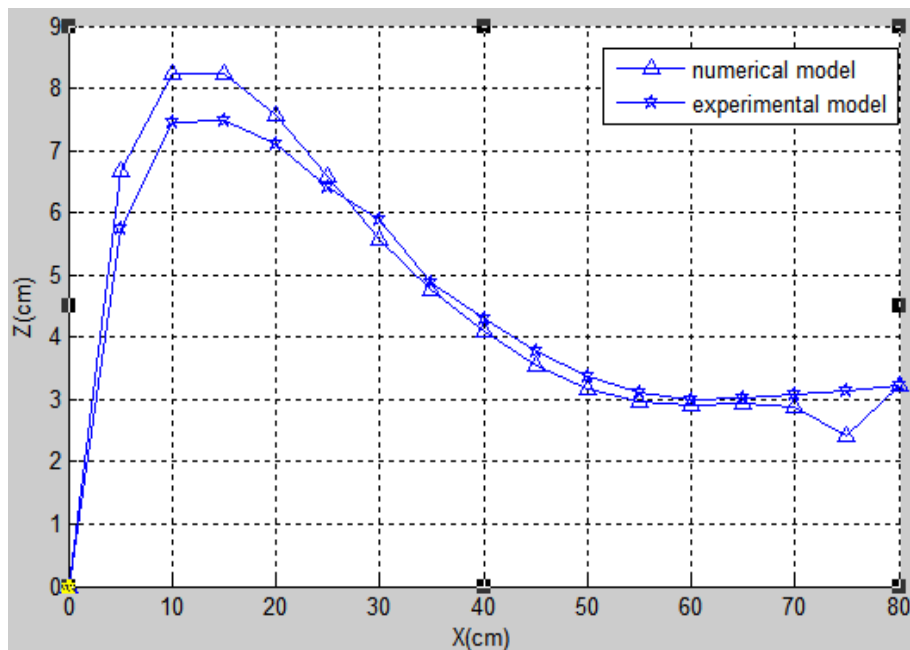
شکل (۳-۴) رقوم سطح رسوب در مدل آزمایشگاهی در  $t=5$  دقیقه

در شکل (۳-۴)  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) و  $Z$  رقوم سطح رسوب در مدل آزمایشگاهی (سانتی متر) می باشد.



شکل (۴-۴) رقوم سطح رسوب در مدل عددی در  $t = 5$  دقیقه

در شکل (۴-۴) X فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) و Z رقوم سطح رسوب (سانتی متر) در مدل عددی می باشد. شکل (۵-۴) مقایسه‌ی مدل آزمایشگاهی و عددی را در یک زمان نشان می دهد.

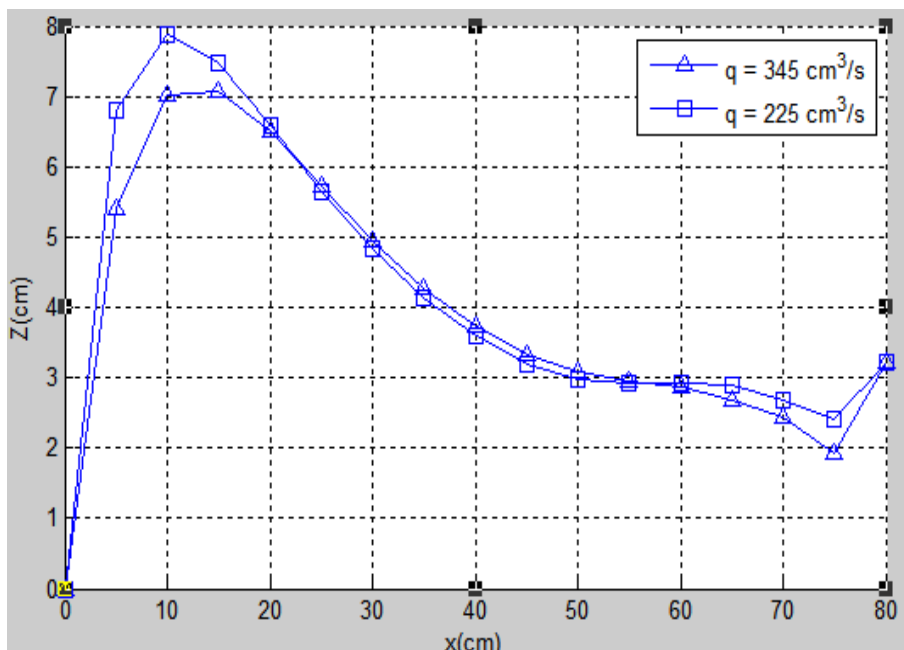


شکل (۵-۴) مقایسه‌ی رقوم بستر رسوب در مدل عددی و آزمایشگاهی در  $t = 5$  دقیقه

با توجه به شکل (۴-۵) درمی‌یابیم دقت مناسبی بین مدل آزمایشگاهی و مدل عددی وجود دارد و هر دو مدل از یک روند پیروی می‌کنند. اختلاف ناچیز بین دو مدل ناشی از تقریب سازی معادلات حاکم و خطای مدل عددی می‌باشد.

همچنین به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی از پارامترهای آماری  $R^2$ ، RMSE و MAE استفاده گردید که برای شکل (۴-۵) به ترتیب،  $0/971$ ،  $0/0048$  (m) و  $0/0034$  (m) می‌باشد.

جهت بررسی تاثیر پارامترهای هیدرولیکی مخزن در تخلیه‌ی رسوبات شکل (۴-۶) تغییرات رقوم سطح رسوب را در دبی‌های مختلف نشان می‌دهد.

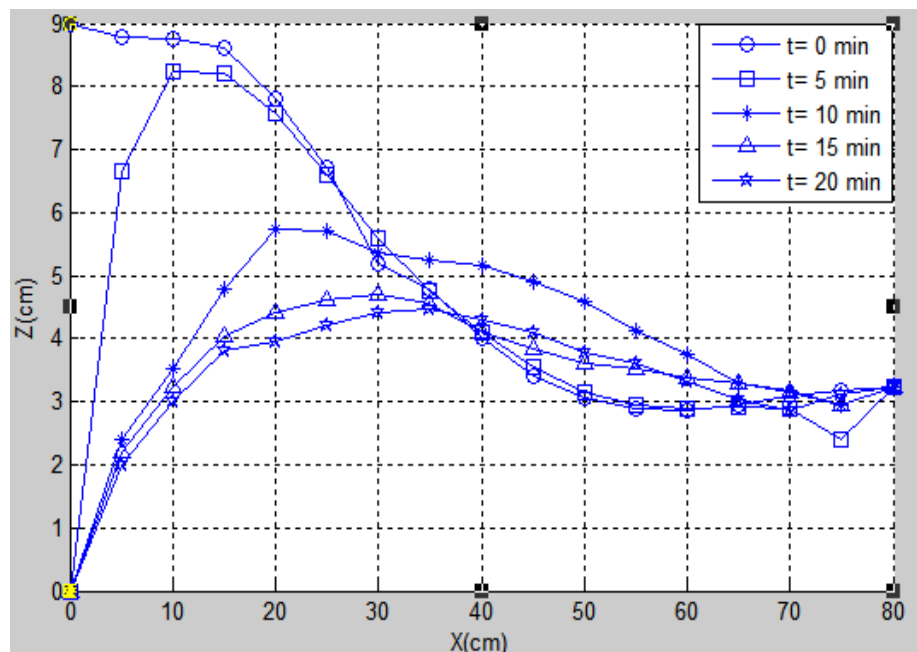


شکل (۴-۶) مقایسه‌ی رقوم بستر رسوب در مدل عددی در دبی‌های متفاوت

در شکل (۴-۶) X فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) و Z رقوم سطح رسوب (سانتی متر) در مدل عددی می‌باشد. همانطور که نمودارها نشان می‌دهد با افزایش دبی رسوبشویی نرخ انتقال رسوبات خروجی افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به معادله‌ی  $q_s = c_s \times q$  با افزایش دبی از ۲۲۵ به ۳۴۵ (سانتی متر مکعب بر ثانیه) نرخ انتقال رسوبات خروجی به میزان ۳۶ (سانتی متر مکعب بر ثانیه) افزایش می‌یابد.

در رابطه‌ی ذکر شده  $qs$  دبی رسوبات خروجی،  $q$  دبی جریان و  $cs$  ضریب ثابت برابر  $0.3$  فرض شده است.

در ادامه جهت بررسی بیشتر رفتار رسوبشویی در مخزن سد شکل (۴-۷) روند تغییر رقوم سطح رسوب را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل (۴-۷) روند تغییر رقوم سطح رسوب در زمان‌های مختلف در مدل عددی

همانطور که شکل (۴-۷) نشان می‌دهد در فاصله‌ی کمی از شروع رسوبشویی مخروط افت در نزدیکی دریچه‌ی تخلیه تشکیل شده و با افزایش زمان رسوبشویی ابعاد آن بزرگتر می‌شود. در نتیجه حجم عمده‌ای از رسوبات در خلال این فرآیند خارج می‌شوند. در بازه‌ی زمانی  $0 < t < 5$  مخروط افت شکل اولیه را به خود گرفته و در بازه‌ی  $5 < t < 10$  بیشترین تغییرات را داشته است. در این بازه جریان آب و رسوب به صورت گل و لای از دریچه‌ی مخزن سد خارج می‌شود. با میل کردن زمان رسوبشویی به بی‌نهایت تاثیر ناچیزی در ابعاد مخروط افت ایجاد می‌شود و بیشتر رسوبات از بخش سیلابدشت مخزن و کانال رسوبشویی به بیرون شسته می‌شوند. همچنین با فاصله گرفتن از دریچه‌ی مخزن سد رسوبات

کمتر تحت تاثیر جریان رسوبشویی قرار می‌گیرند، در نتیجه رقوم سطح رسوب در بالادست مدل نسبت به حالت اولیه‌ی آن تغییر زیادی نکرده است.

#### ۳-۴- بررسی نتایج حاصل از حل همزمان معادلات سنتونانت و معادله‌ی حاکم بر

##### رسوبشویی

همانطور که در فصل قبل بیان شد در حل همزمان، معادلات سنتونانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی (بتا) با هم حل می‌شوند. خروجی حل مقادیر دبی، ارتفاع آب و رقوم سطح رسوب در هر گره می‌باشد که نتایج آن به صورت جداول و نمودار به شرح زیر است.

جدول (۴-۵) دبی آب هر گره در شبکه‌بندی مخزن سد در حل همزمان

$Q_n \frac{cm^3}{s}$ X cm	$Q_0$	$Q_5$	$Q_{10}$	$Q_{15}$	$Q_{20}$
X=۰	۳۴۵/۰۰	۳۰۸/۲۰	۲۷۰/۸۴	۲۳۳/۳۵	۲۱۵/۵۳
X=۵	۳۴۲/۴۹	۳۵۰/۷۳	۳۴۱/۴۰	۳۱۳/۳۱	۳۰۳/۰۰
X=۱۰	۳۴۱/۰۱	۳۲۷/۰۷۳	۳۱۸/۰۰	۲۹۲/۲۱	۲۰۹/۴۰
X=۱۵	۳۳۹/۵۲	۳۲۹/۰۶	۳۲۵/۸۰	۳۱۲/۳۶	۲۴۶/۰۰
X=۲۰	۳۳۸/۰۲	۳۳۰/۵۰	۳۱۵/۶۰	۳۰۳/۶۱	۲۴۳/۶۰
X=۲۵	۳۳۶/۵۱	۳۲۶/۳۸	۳۱۴/۴۰	۳۰۲/۴۵	۲۴۱/۸۰
X=۳۰	۳۳۵/۰۱	۳۲۲/۱۰	۳۱۳/۲۰	۳۰۱/۸۰	۲۴۰/۰۰
X=۳۵	۳۳۳/۴۸	۳۲۳/۱۱	۳۱۱/۴۰	۳۰۰/۰۰	۲۴۰/۰۰
X=۴۰	۳۳۱/۹۶	۳۲۵/۱۲	۳۱۰/۲۱	۲۹۸/۸۱	۲۳۹/۱۰
X=۴۵	۳۳۰/۴۲	۳۲۰/۶۰	۳۰۹/۰۰	۲۹۷/۶۲	۲۳۹/۳۰

$X=50$	328/88	316/32	307/80	297/40	237/00
$X=55$	327/34	317/76	306/62	295/31	236/40
$X=60$	325/78	319/18	304/21	294/00	234/21
$X=65$	324/22	314/78	302/01	291/21	234/00
$X=70$	322/65	321/07	300/60	289/85	228/00
$X=75$	321/07	311/95	295/23	228/00	226/80
$X=80$	318/12	313/41	293/31	253/43	210/00

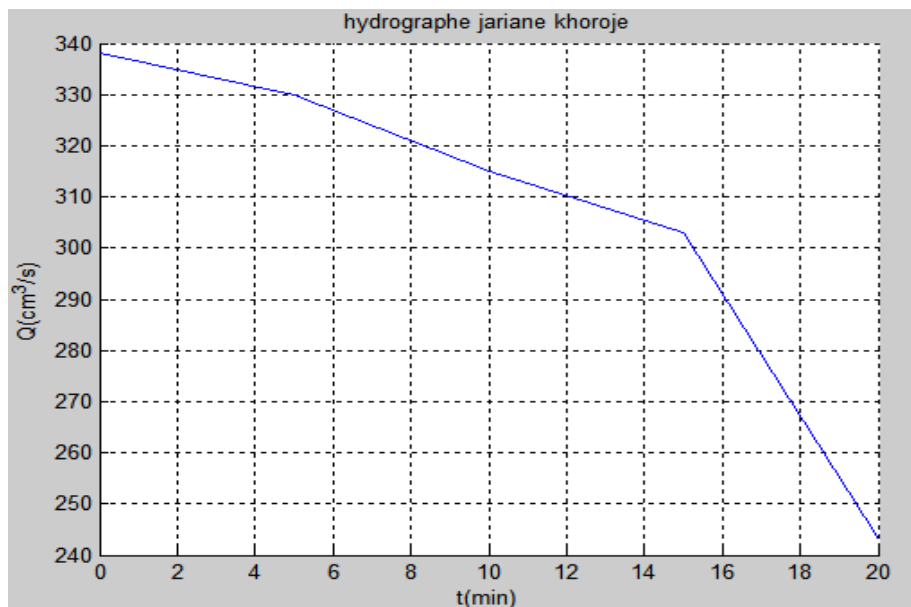
در جدول (4-5) مقادیر  $Q_n$  دبی (سانتی متر مکعب بر ثانیه) هرگره در زمان  $h_n$  (دقیقه) و  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) در شبکه بندی مخزن سد می باشد.

جدول (4-6) ارتفاع آب هرگره در شبکه بندی مخزن سد در حل همزمان

$h_n$ cm \ X cm	$h_0$	$h_5$	$h_{10}$	$h_{15}$	$h_{20}$
$X=0$	23/50	18/70	14/44	10/72	7/54
$X=5$	23/30	22/29	18/29	15/29	12/75
$X=10$	23/10	22/10	18/85	17/68	15/08
$X=15$	22/90	21/88	18/89	17/89	15/39
$X=20$	22/70	21/69	18/69	17/69	15/19
$X=25$	22/50	21/49	18/49	17/48	14/98
$X=30$	22/30	21/29	18/28	17/28	14/77
$X=35$	22/10	21/08	18/09	17/09	14/59

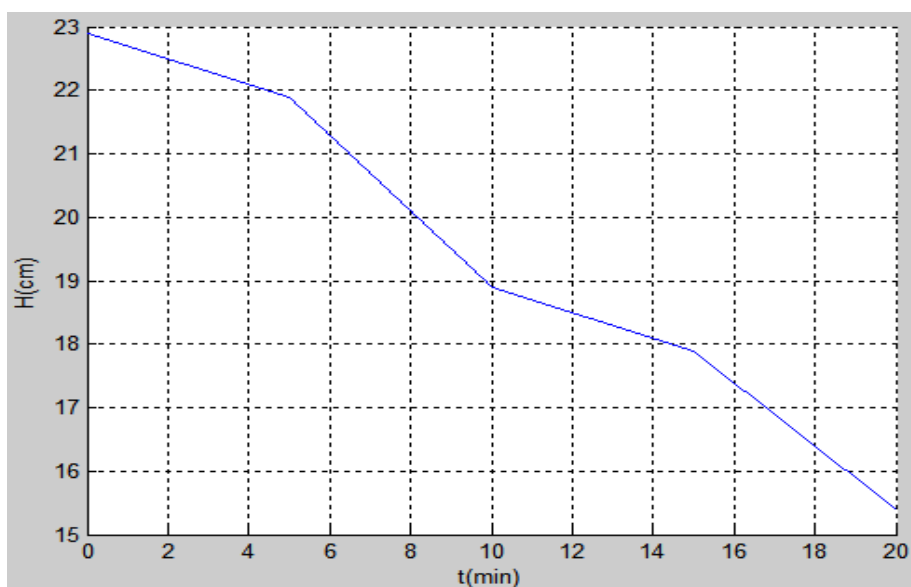
$X=40$	21/90	20/89	17/89	16/89	14/39
$X=45$	21/70	20/69	17/69	16/69	14/19
$X=50$	21/50	20/49	17/49	16/48	13/99
$X=55$	21/30	20/30	17/29	16/29	13/79
$X=60$	21/10	20/10	17/09	16/08	13/59
$X=65$	20/90	19/90	16/89	15/89	13/37
$X=70$	20/70	19/71	16/69	15/69	13/39
$X=75$	20/50	19/39	15/37	12/37	9/86
$X=80$	20/30	16/50	15/80	14/20	9/21

در جدول (۴-۶) مقادیر  $h_n$  ارتفاع آب (سانتی متر) در زمان  $t$  (دقیقه) و  $X$  فاصله از مرکز دریاچه (سانتی متر) در شبکه بندی مخزن سد می باشد. برای نمونه نمودارهای حاصل از جداول (۴-۵) و (۴-۶) در فاصله  $X=20$  سانتی متری از دریاچه مخزن سد در شکل های زیر آورده شده است.



شکل (۸-۴) هیدروگراف جریان خروجی در فاصله‌ی  $X=20$  سانتی متری از دریچه مخزن سد

در شکل (۸-۴)  $t$  زمان (دقیقه) و  $Q$  دبی (سانتی متر مکعب بر ثانیه) می باشد



شکل (۹-۴) نمودار تغییرات ارتفاع آب نسبت به زمان در فاصله‌ی  $X=20$  سانتی متری از دریچه مخزن

سد



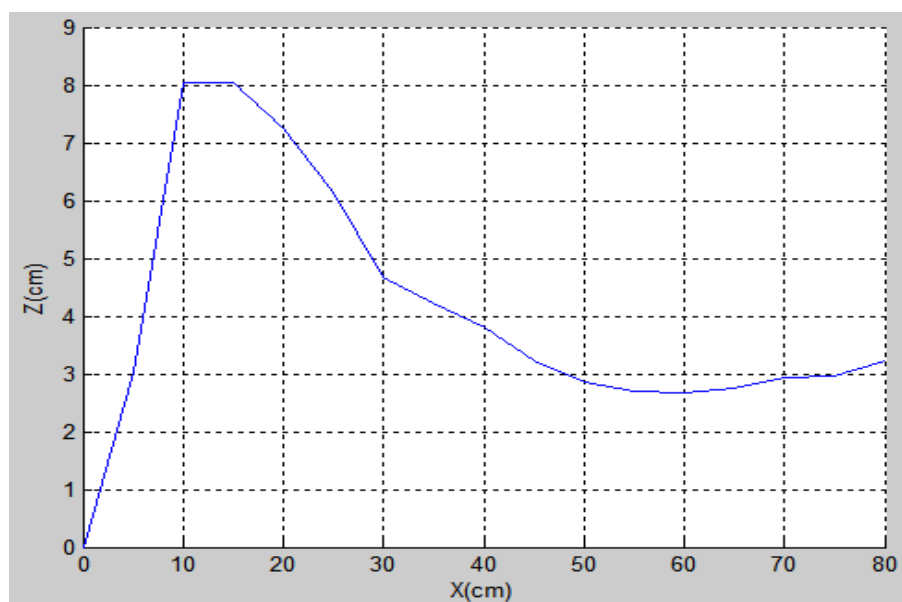
در شکل (۴-۹)  $t$  زمان (دقیقه) و  $h$  ارتفاع آب (سانتی متر) می‌باشد. در حل همزمان تغییرات دبی و ارتفاع آب در هر گره تقریباً مشابه حل مرحله‌ای است.

جدول (۴-۷) رقوم سطح رسوب در مدل عددی حاکم بر رسوبشویی (بتا)

$t \text{ min}$ $X \text{ cm}$	$t = 0$	$t = 5$	$t = 10$	$t = 15$	$t = 20$
$X = 0$	۹/۰۰	۰	۰	۰	۰
$X = 5$	۸/۷۹	۳/۰۵	۳/۰۳	۳/۰۱	۲/۹۹
$X = 10$	۸/۷۵	۷/۶۴	۷/۰۴	۷/۳۵	۶/۲۸
$X = 15$	۸/۶۰	۷/۴۹	۷/۰۳	۷/۵۷	۷/۰۴
$X = 20$	۷/۸۰	۷/۱۹	۷/۰۱	۷/۱۴	۷/۰۳
$X = 25$	۶/۷۰	۶/۵۹	۷/۱۵	۶/۰۳	۵/۹۰
$X = 30$	۵/۲۰	۵/۱۰	۴/۴۸	۴/۵۸	۴/۴۷
$X = 35$	۴/۷۸	۴/۶۷	۴/۲۳	۴/۱۲	۴/۰۱
$X = 40$	۴/۰۱	۳/۹۱	۳/۸۱	۳/۷۰	۳/۶۰
$X = 45$	۳/۴۲	۳/۳۲	۳/۲۲	۳/۱۱	۳/۰۰
$X = 50$	۳/۰۶	۲/۹۶	۲/۸۶	۲/۷۶	۲/۶۵
$X = 55$	۲/۹	۲/۸۰	۲/۷۰	۲/۶۰	۲/۵۰
$X = 60$	۲/۸۷	۲/۷۷	۲/۶۷	۲/۵۷	۲/۴۷
$X = 65$	۲/۹۵	۲/۸۵	۲/۷۶	۲/۶۷	۲/۵۶
$X = 70$	۳/۰۹	۲/۱۰	۲/۹۳	۲/۶۲	۲/۵۶
$X = 75$	۳/۱۸	۳/۰۶	۲/۹۶	۲/۹۵	۲/۹۴

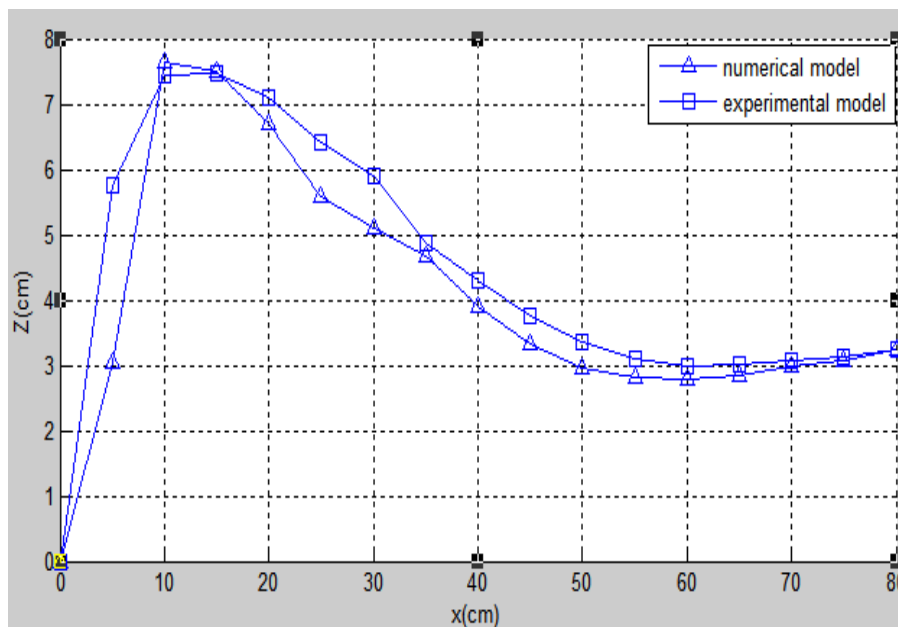
$X=80$	$3/23$	$3/23$	$3/23$	$3/23$	$3/23$
--------	--------	--------	--------	--------	--------

در جدول (۷-۴)  $t$  زمان (دقیقه) و  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) می باشد. برای نمونه نمودار جدول (۷-۴) در  $t = 10$  دقیقه آورده شده است.



شکل (۴-۱۰) رقوم سطح رسوب در حل همزمان در  $t = 10$  دقیقه

در شکل (۴-۱۰)  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) و  $Z$  رقوم سطح رسوب (سانتی متر) در حل همزمان می باشد. شکل (۴-۱۱) مقایسه‌ی مدل عددی و مدل آزمایشگاهی را در یک زمان نشان می دهد.



شکل (۴-۱۱) مقایسه‌ی رقوم بستر رسوب در مدل آزمایشگاهی و عددی در یک زمان

در شکل (۴-۱۱)  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) و  $Z$  رقوم سطح رسوب (سانتی متر) می‌باشد. جهت ارزیابی و مقایسه‌ی نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی از پارامترهای آماری  $R^2$ ،  $RMSE$  و  $MAE$  استفاده گردید که برای شکل (۴-۱۱) به ترتیب،  $0.89$ ،  $0.075$  (m) و  $0.042$  (m) حاصل شد. با توجه به پارامترهای آماری بدست آمده دقت قابل قبولی بین مدل عددی توسعه داده شده و مدل آزمایشگاهی وجود دارد. اختلاف ناچیز در دو نمودار ناشی از خطای محاسباتی به دلیل پیچیدگی معادلات در حل همزمان می‌باشد.

#### ۴-۴- نتایج بدست آمده از مدل تجاری نرم‌افزار هکرس

در این مرحله توانایی مدل تجاری نرم‌افزار هکرس در شبیه‌سازی رقوم سطح رسوب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این تحقیق، به منظور اجرای مدل تعداد مقاطع وارد شده به مدل برابر تعداد گره‌های محاسباتی می‌باشد. با توجه به طول مدل (۸۰ سانتی متر) و گام مکانی (۵ سانتی متر) ۱۶ مقطع به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شده است. شرایط اولیه و مرزی استفاده شده ارتفاع رسوب در گره‌های محاسباتی، دبی جریان در هر مقطع، تراز سطح آب و معادله‌ی انتقال رسوب یانگ می‌باشد. همچنین

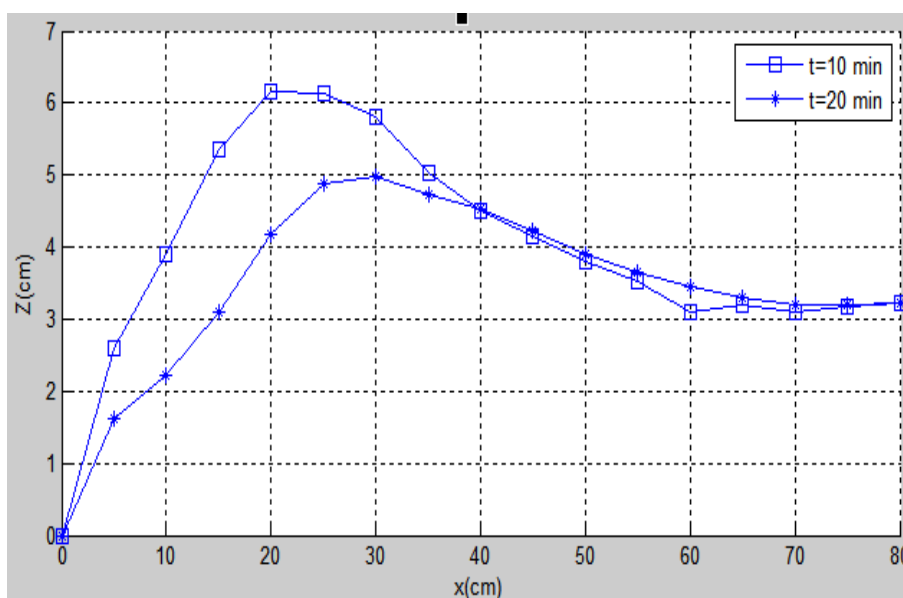
در نرم افزار هکرس از روش عددی نیوتون رافسون استفاده شده است. سایر اطلاعات مورد نیاز مدل نظیر فاکتور شکل ذره و... به خصوصیات رسوب استفاده شده بستگی دارد که فاکتور شکل در این تحقیق ۰/۷ فرض شده است. نتایج مدل در سه زمان رسوبشویی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه حاصل شد که خروجی آن به شرح زیر است:

جدول (۴-۸) رقوم سطح رسوب در مدل عددی هکرس

t min \ X cm	t=۵	t=۱۰	t=۱۵	t=۲۰
X=۰	۰	۰	۰	۰
X=۵	۶/۴۶	۲/۶۰	۲/۱۹	۱/۶۳
X=۱۰	۷/۸۴	۳/۹۱	۳/۲۳	۲/۲۳
X=۱۵	۷/۸۳	۵/۳۶	۴/۰۵	۳/۰۹
X=۲۰	۷/۳۷	۶/۱۶	۴/۴۰	۴/۱۸
X=۲۵	۶/۵۹	۶/۱۳	۴/۶۱	۴/۸۷
X=۳۰	۵/۵۸	۵/۸۰	۴/۷۰	۴/۹۹
X=۳۵	۴/۷۶	۵/۰۴	۴/۵۵	۴/۷۴
X=۴۰	۴/۰۹	۴/۵۰	۴/۱۰	۳/۵۳
X=۴۵	۳/۵۴	۴/۱۶	۳/۸۵	۴/۲۲
X=۵۰	۳/۱۶	۳/۸۰	۳/۶۰	۳/۹۱
X=۵۵	۲/۹۶	۳/۵۳	۳/۵۲	۳/۶۵
X=۶۰	۲/۹۰	۳/۱۱	۳/۳۹	۳/۴۴
X=۶۵	۲/۹۳	۳/۱۹	۳/۲۸	۳/۲۹
X=۷۰	۲/۸۹	۳/۱۰	۳/۱۴	۳/۲۱

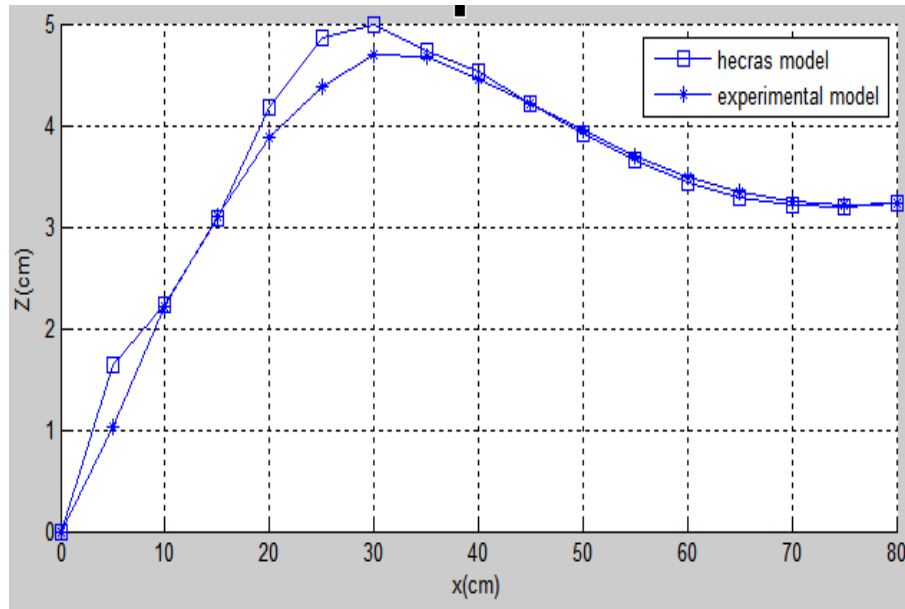
$X=75$	۳/۰۱	۳/۱۷	۲/۹۴	۳/۱۹
$X=80$	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳

در جدول (۸-۴) زمان (دقیقه) و  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) می باشد. به منظور ارزیابی و بررسی نتایج، نمودار داده های جدول (۸-۴) در زیر آورده شده است.



شکل (۴-۱۲) رقوم سطح رسوب در مدل هکرس در زمان های متفاوت

در شکل (۴-۱۲)  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) و  $Z$  رقوم سطح رسوب (سانتی متر) می باشد. در ادامه جهت بررسی نتایج، از نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط جعفری، (۱۳۸۱) استفاده شده است.



شکل (۴-۱۳) مقایسه‌ی مدل آزمایشگاهی و مدل هکرس در زمان ۲۰ دقیقه

در شکل (۴-۱۳)  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) و  $Z$  رقوم سطح رسوب (سانتی متر) می‌باشد. همانطور که شکل (۴-۱۳) نشان می‌دهد دقت مناسبی بین مدل هکرس و مدل آزمایشگاهی وجود دارد. پارامترهای آماری  $R^2$ ، RMSE و MAE به ترتیب برابر  $0/98$ ،  $0/0018$  (m) و  $0/0011$  (m) اندازه گیری شده است.

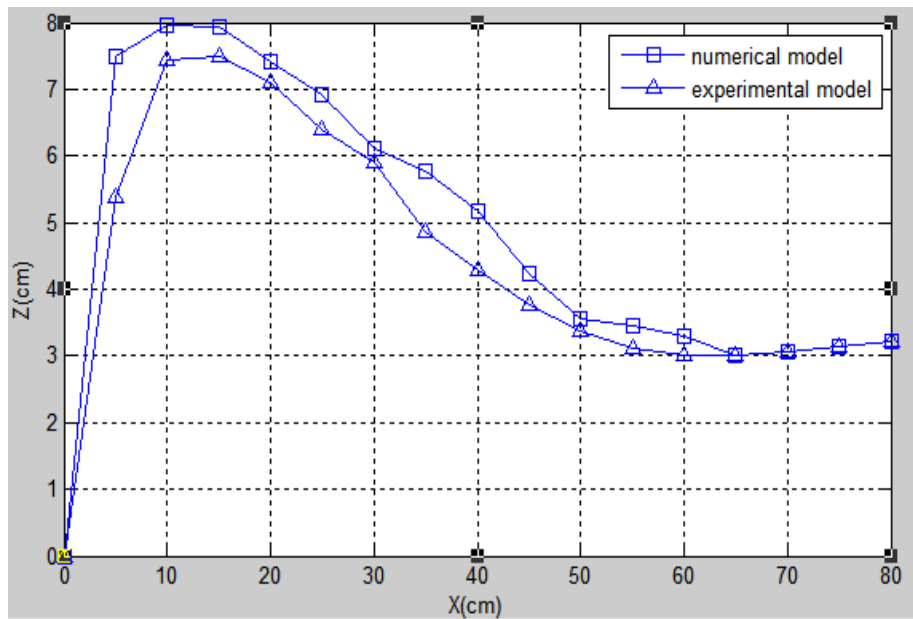
در ادامه جهت مقایسه‌ی نتایج مدل تجاری هکرس و مدل عددی توسعه داده شده از تحقیقات انجام شده توسط سایر محققین استفاده می‌شود.

خانجانی و همکاران، (۱۳۹۰) به بررسی مدل ریاضی کراندل در شبیه‌سازی رسوب با استفاده از نرم‌افزار MAPPLE پرداختند. تحقیقات عددی آنها بر روی مدل آزمایشگاهی جعفری (۱۳۸۱) انجام شد که در جدول (۴-۹) آمده است:

جدول (۹-۴) رقوم سطح رسوب در مدل کراندل

t min X cm	t = ۰	t = ۵	t = ۱۰	t = ۱۵	t = ۲۰
X = ۰	۹	.	.	.	.
X = ۵	۸/۷۹	۷/۴۸	۳/۱۳	۲/۶۴	۲/۰۶
X = ۱۰	۸/۷۵	۷/۹۶	۳/۰۶	۴/۵۵	۳/۸۸
X = ۱۵	۸/۶۰	۷/۹۴	۷/۰۸	۵/۹۲	۵/۰۶
X = ۲۰	۷/۸۰	۷/۴۲	۶/۹۷	۶/۳۸	۵/۶۸
X = ۲۵	۶/۷۰	۶/۹۲	۶/۴۷	۶/۱۵	۵/۷۹
X = ۳۰	۵/۲۰	۶/۱۰	۵/۶۷	۵/۶۸	۵/۴۹
X = ۳۵	۴/۷۸	۵/۷۶	۵/۰۱	۵/۰۲	۵/۰۵
X = ۴۰	۴/۰۱	۵/۱۶	۴/۳۱	۴/۴۶	۴/۵۳
X = ۴۵	۳/۴۲	۴/۲۴	۳/۸۰	۳/۹۶	۴/۰۸
X = ۵۰	۳/۰۶	۳/۵۷	۳/۴۴	۳/۵۸	۳/۷۱
X = ۵۵	۲/۹	۳/۴۵	۳/۲۰	۳/۳۳	۳/۴۵۰
X = ۶۰	۲/۸۷	۳/۲۹	۳/۰۹	۳/۱۹	۳/۲۸
X = ۶۵	۲/۹۵	۳/۰۱	۳/۰۶	۳/۱۳	۳/۲۰
X = ۷۰	۳/۰۹	۳/۰۷	۳/۱۰	۳/۱۴	۳/۱۸
X = ۷۵	۳/۱۸	۳/۱۵	۳/۱۶	۳/۱۷	۳/۱۹
X = ۸۰	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳

شکل (۴-۱۴) مقایسه‌ی بین مدل کراندل و مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۴) مقایسه‌ی بین مدل کراندل و آزمایشگاهی در یک زمان

در شکل (۴-۱۴)  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) و  $Z$  رقوم سطح رسوب (سانتی متر) می‌باشد. جهت مقایسه بهتر نتایج مدل ریاضی کراندل با مدل آزمایشگاهی به بررسی پارامترهای آماری  $R^2$ ، RMSE و MAE پرداخته شده است که به ترتیب  $0.95$ ،  $0.066$  (m) و  $0.042$  (m) می‌باشد که دقت بالایی را نشان می‌دهد.

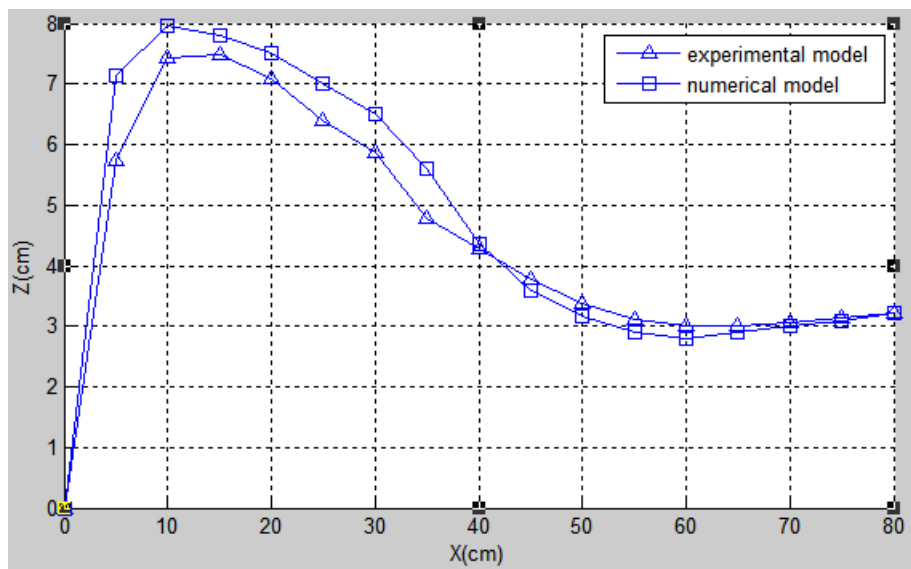
همچنین بارانی و جعفری (۱۳۸۱) با استفاده از مدل ریاضی کرانک نیکلسون به بررسی رفتار رسوبی پرداختند. سپس تحقیقات انجام شده با نتایج مدل آزمایشگاهی مقایسه شد که در زیر آمده است.



جدول (۴-۱۰) رقوم سطح رسوب در مدل کرانک نیکلسون

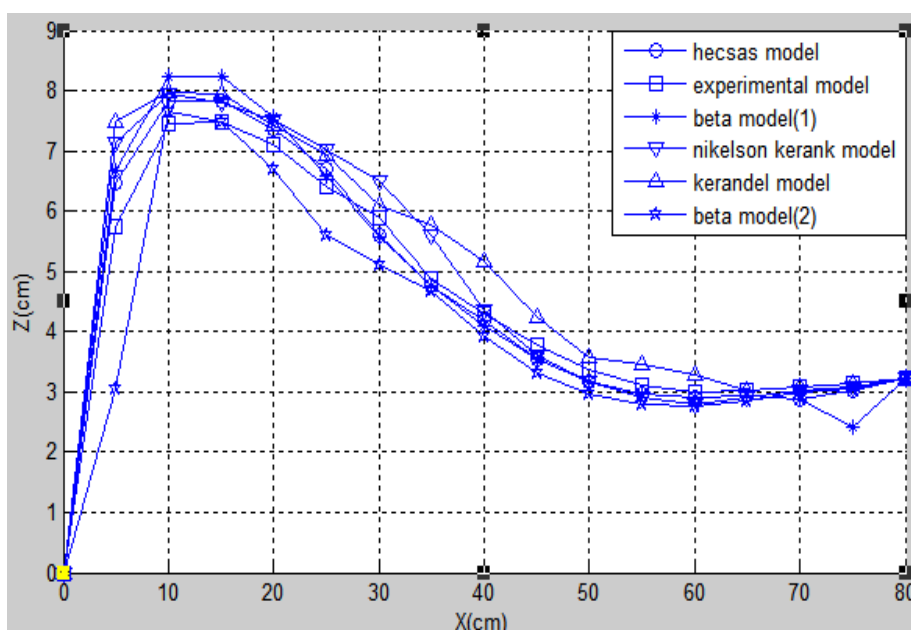
t min X cm	t=۰	t=۵	t=۱۰	t=۱۵	t=۲۰
X=۰	۹/۰۰	.	.	.	.
X=۵	۸/۷۹	۷/۱۳	۲	۱/۶۳	۲/۰۶
X=۱۰	۸/۷۵	۷/۹۵	۶/۳۲	۵/۲۳	۳/۸۸
X=۱۵	۸/۶۰	۷/۸۰	۷/۳۶	۶/۰۸	۵/۰۶
X=۲۰	۷/۸۰	۷/۵۰	۷/۱۶	۶/۱۸	۵/۶۸
X=۲۵	۶/۷۰	۷/۰۱	۶/۸۳	۴/۸۷	۴/۳۸
X=۳۰	۵/۲۰	۶/۵۰	۶/۴۳	۴/۹۹	۴/۶۹
X=۳۵	۴/۷۸	۵/۶۰	۶/۰۴	۴/۷۳	۴/۶۶
X=۴۰	۴/۰۱	۴/۳۵	۵/۵۷	۴/۵۳	۴/۴۵
X=۴۵	۳/۴۲	۳/۶۰	۴/۱۶	۴/۲۲	۴/۲۱
X=۵۰	۳/۰۶	۳/۱۶	۳/۸۱	۳/۹۱	۳/۹۴
X=۵۵	۲/۹	۲/۹۰	۳/۵۲	۳/۶۴	۳/۷۰
X=۶۰	۲/۸۷	۲/۸۰	۳/۳۱	۳/۴۴	۳/۴۹
X=۶۵	۲/۹۵	۲/۹۱	۳/۱۸	۳/۲۹	۳/۳۴
X=۷۰	۳/۰۹	۳/۰۳	۳/۱۵	۳/۲۰	۳/۲۵
X=۷۵	۳/۱۸	۳/۰۸	۳/۱۶	۳/۱۹	۳/۲۰
X=۸۰	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳	۳/۲۳

شکل (۴-۱۵) مقایسه‌ی مدل عددی کرانک نیکلسون و مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل (۴-۱۵) مقایسه‌ی مدل آزمایشگاهی با مدل عددی کرانک نیکلسون در یک زمان

در شکل (۴-۱۵)  $X$  فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) و  $Z$  رقوم سطح رسوب (سانتی متر) می‌باشد. پارامترهای آماری  $R^2$ ، RMSE و MAE به ترتیب  $0.96$ ،  $0.0054$  (m) و  $0.0035$  (m) می‌باشد. در ادامه جهت مقایسه و تفسیر بهتر نتایج مدل‌های عددی انجام شده با مدل آزمایشگاهی شکل (۴-۱۶) رسم شده و سپس مقادیر  $R^2$ ، RMSE و MAE به صورت خلاصه در جدول (۴-۱۱) آورده شده است.



شکل (۴-۱۶) مقایسه‌ی مدل‌های عددی انجام شده با مدل آزمایشگاهی در یک زمان

در شکل (۴-۱۶) X فاصله از مرکز دریچه (سانتی متر) و Z رقوم سطح رسوب (سانتی متر) می باشد. همچنین حل مرحله‌ای به صورت (1) beta model و حل همزمان معادلات، به صورت (2) beta model نشان داده شده است.

جدول (۴-۱۱) نتایج حاصل از مقایسه‌ی مدل‌های عددی با مدل آزمایشگاهی

مدل عددی انجام شده	R <sup>2</sup>	RMSE (m)	MAE (m)
حل مدل عددی مرحله‌ای	۰/۹۷۱	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۳۴
توسعه داده شده همزمان	۰/۸۹	۰/۰۰۷۵	۰/۰۰۴۲
مدل کراندل	۰/۹۵	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۴۲
مدل تجاری هکرس	۰/۹۸	۰/۰۰۱۸	۰/۰۰۱۱
مدل کرانک نیکلسون	۰/۹۶	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۳۵

همانطور که جدول (۴-۱۱) نشان می‌دهد تحقیقات انجام شده نتایج قابل قبولی را در شبیه‌سازی رسوب دارند که در این بین مدل هکرس توانسته با ضریب تبیین بالا و خطای ناچیز شبیه‌سازی رسوب را تخمین نماید. این نرم افزار در شبیه‌سازی مسائل هیدرولیک رسوب تمام خصوصیات مربوطه نظیر چگالی ذره، فاکتور شکل، قطر ذرات، دبی جریان، شرایط اولیه و مرزی رسوب، معادلات انتقال رسوب و... را بررسی می‌کند، درحالی که در مدل کرانک نیکلسون، کراندل و مدل عددی توسعه داده شده ارتفاع اولیه رسوب و خصوصیات هیدرولیکی جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد که این خود باعث افزایش خطا در مدل می‌شود. خانجانی و همکاران (۱۳۹۰) و بارانی و جعفری (۱۳۸۱) تحقیقات

خود را به ترتیب روی مدل کراندل و مدل کرانک نیکلسون بدون استفاده از معادلات سنت و نانت انجام دادند که باعث کاهش دقت مدل مورد نظر می‌گردد. مدل عددی توسعه داده شده در حل مرحله‌ای دقت بالاتری را نسبت به حل همزمان معادلات حاکم نشان می‌دهد که دلیل آن پیچیدگی معادلات در حل همزمان و افزایش خطای مدل می‌باشد. جهت بررسی بیشتر نتایج، فرمول‌های (۱-۴) و (۲-۴) به ترتیب مدل ریاضی معادلات کرانک نیکلسون و کراندل را نشان می‌دهد.

$$\frac{Z_i^{n+1} - Z_i^n}{(\Delta t)} = k \times \left(\frac{1}{2}\right) \left[ \frac{Z_{i+1}^{n+1} - 2Z_i^{n+1} + Z_{i-1}^{n+1}}{(\Delta x)^2} + \frac{Z_{i+1}^n - 2Z_i^n + Z_{i-1}^n}{(\Delta x)^2} \right] \quad (1-4)$$

$$(1 - 6S)Z_{i-1}^{n+1} + 2(5 + 6S)Z_i^{n+1} + (1 - 6S)Z_{i+1}^{n+1} =$$

$$(1 - 6S)Z_{i-1}^n + 2(5 + 6S)Z_i^n + (1 - 6S)Z_{i+1}^n \quad (2-4)$$

در روابط فوق  $k$  و  $S$  به ترتیب عبارتند از:

$$k = k_0 S_0^{0.2} (q^{1.6})^{n+1} \quad (3-4)$$

$$S = k \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (4-4)$$

خانجانی و همکاران و بارانی و جعفری به ترتیب در تحقیقات خود در مدل کراندل و کرانک نیکلسون در رابطه‌ی (۳-۴) شیب مخزن مدل را به عنوان پارامتر ورودی در نظر گرفتند. در حالی که در تحقیق انجام شده شیب سطح رسوب در مدل عددی مورد استفاده واقع شد. در مدل انجام شده  $\beta = 0.75$  فرض شده است، بنابراین خاصیت غیر صریح بودن نسبت به حالت صریح تشدید شده است و از آنجایی که روش‌های غیر صریح دقت بالاتر و همگرایی بیشتر دارند، لذا تحقیق انجام شده خطای کمتری دارد.

# فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور دستیابی به اهداف مدل ابتدا در محیط نرم افزار MATLAB به حل معادلات سنت ونانت و سپس معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی پرداخته شده است. جهت تقریب سازی معادلات سنت ونانت از روش غیرصریح پریسمن استفاده گردید. خروجی مدل عددی توسعه داده شده با نتایج مدل آزمایشگاهی انجام شده در دانشگاه کرمان کالیبره شدند. در ادامه نتایج مدل عددی و آزمایشگاهی با مدل تجاری نرم افزار HEC RAS، مدل عددی کراندل (انجام شده توسط خانجانی و همکاران) و مدل کرانک نیکلسون (انجام شده توسط بارانی و همکاران) مقایسه شدند.

۱- نتایج نشان می‌دهد که مدل سازی عددی چنانچه به درستی صورت گیرد و کمترین خطا را داشته باشد، می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل‌های آزمایشگاهی باشد. مزیت مهم مدل‌های عددی نسبت به سایر مدل‌های آزمایشگاهی داشتن توجیه اقتصادی و صرفه جویی در زمان است.

۲- نتایج بدست آمده نشان می‌دهد با افزایش رقوم سطح آب مخزن و یا افزایش دبی، رسوبات بیشتری تخلیه می‌شود. همچنین برای داشتن حداکثر راندمان در رسوبشویی تحت فشاربهرتر است تا جایی که شرایط بهره برداری مخزن اجازه می‌دهد دریچه‌های تخلیه کننده با حداکثر ظرفیت خود مورد بهره برداری قرار گیرند.

۳- همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد مدل عددی انجام شده در این تحقیق با داشتن  $R^2 = 0.971$  و  $RMSE$  برابر با  $0.048$  متر و  $MAE$  برابر با  $0.034$  متر در حل مرحله‌ای معادلات حاکم و  $0.89$  و  $R^2 = 0.975$  متر و  $MAE$  برابر با  $0.042$  متر در حل همزمان، توانایی خوبی در شبیه سازی رسوب دارند. پیچیدگی معادلات در حل همزمان باعث کاهش دقت مدل در برآورد پارامترهای آماری نسبت به حل مرحله‌ای شده است.

۴- در ادامه بررسی نتایج نشان می‌دهد مدل هکرس با داشتن  $R^2 = 0/98$  و RMSE برابر با  $0/0018$  متر و MAE برابر با  $0/0011$  متر بهترین برآورد را در شبیه‌سازی رسوب داشته است.

۵- نتایج همچنین نشان داد مدل عددی کراندل (انجام شده توسط خانجانی و همکاران) و کرانک نیکلسون (انجام شده توسط بارانی و همکاران) به ترتیب با داشتن ضریب تبیین  $R^2 = 0/95$ ، RMSE برابر با  $0/0066$  متر، MAE برابر با  $0/0042$  و  $R^2 = 0/96$ ، RMSE برابر با  $0/0054$  متر، MAE برابر با  $0/0035$  دقت قابل قبولی را دارد.

## ۲-۵ پیشنهادها

۱- استفاده از روش‌های صریح در معادلات تفاضل محدود و بررسی توانایی آنها در شبیه‌سازی جریان و رسوب.

۲- بررسی نتایج شبیه‌سازی جریان و رسوب با معادلات سنت و نانت و معادله‌ی حاکم بر رسوبشویی در مقاطع نامنظم نظیر مقطع ذوزنقه‌ای.

۳- استفاده از روش‌های حجم محدود و اجزاء محدود در شبیه‌سازی جریان و رسوب.

۴- استفاده از سایر روش‌های عددی موجود که دقت بالایی دارند.

۵- بررسی نتایج شبیه‌سازی هیدرولیک رسوب در مخازن سدها با استفاده از حل معادلات سنت و نانت و معادله‌ی پیوستگی رسوب.

## ۵-۳- منابع مورد استفاده

۱. ایوبزاده، س.، توفیقی، سهیلا، شهیرنیا، م.، و صمدی رحیم، ع.، ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی اثر تراز سطح آب مخزن در گسترش زمانی ابعاد حفره در رسوبشویی تحت فشار. نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران(اهواز).
۲. ایوبزاده، س.، توفیقی، سهیلا، شهیرنیا، م.، و صمدی رحیم، ع.، ۱۳۹۱. بررسی آزمایشگاهی اثر عدد فرود جریان خروجی از دریچه‌های تخلیه کننده تحتانی در گسترش زمانی ابعاد حفره در رسوبشویی تحت فشار. یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه ارومیه.
۳. ایوبزاده، ع.، توفیقی، س.، صمدی رحیم، ع.، و شهیرنیا، م. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی اثر زمان بر شکل و تعادل رسوبشویی در فلاشینگ تحت فشار. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
۴. آرین، الف.، عزیزیان، الف.، و نجاتی، الف. ۱۳۹۰. برآورد روند رسوب گذاری در مخزن سد با استفاده از مدل‌های دو بعدی و شبه دو بعدی. سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برق آبی، تهران.
۵. احدیان، ج.، حاجی علی گل، س.، فرشادی، م.، و نصر اصفهانی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی ذرات و بررسی رسوب ورودی به مخزن سد گتوند علیا با استفاده از نرم افزار CCHE2D. نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران(اهواز).
۶. اعتدالی، الف.، ۱۳۹۱. بررسی و ارزیابی فلاشینگ در سدها توسط نرم افزار SSIM2(مطالعه موردی سد شهید عباسپور). کنفرانس بین المللی توسعه پایدار مهندسی عمران، دانشگاه آزاد، تبریز.
۷. امامقلی زاده، ص و جهانی، ح.، ۱۳۸۷. بررسی هیدرولیک جریان در رسوبشویی تحت فشار با استفاده از نتایج آزمایشگاهی. چهارمین کنگره ی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، صفحات ۱-۸.
۸. امامقلی زاده، ص.، بینا، م.، جهانی، ح.، و قمشی، م. ۱۳۸۶. بررسی و ارزیابی رسوبشویی تحت فشار در سدهای مخزنی. مجله تحقیقات منابع آب ایران، جلد سوم، شماره ۱، صفحات ۶۸-۷۹.



۹. امامقلی‌زاده، ص.، تراپی پوده، ح.، و مسعودی، الف.، ۱۳۸۸. بررسی تاثیر نسبت پوکی رسوبات چسبنده در حجم رسوبات تخلیه شونده در رسوبشویی تحت فشار. اولین کنفرانس بین المللی مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۱۰. امامقلی‌زاده، ص.، دهقانی، الف.، مساعدی، الف.، و مشکاتی شه‌میرزادی، م. ۱۳۸۸. بررسی زمانی گسترش مخروط آبشستگی در رسوبشویی هیدرولیکی تحت فشار. اولین کنفرانس بین المللی مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۱۱. امامقلی‌زاده، ص.، ۱۳۹۳. هیدرولیک جریان در کانال‌های روباز، انتشارات دانشگاه شاهرود، ص ۴۲۱-۴۵۵
۱۲. امامقلی‌زاده، ص.، ابراهیمی، ف.، دهقانی، م.، شه‌میرزادی، م.، و ناصر، غ. ۱۳۸۸. تأثیر ابعاد دریچه تحتانی بر حجم و ابعاد مخروط آبشستگی در رسوبشویی تحت فشار. هشتمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران(اهواز).
۱۳. شفایی بجستان، م.، ۱۳۹۲. اصول نظری و عملی هیدرولیک انتقال رسوب، انتشارات دانشگاه شهید چمران(اهواز)، صفحات ۱-۴۶۶
۱۴. برهمند، ن.، حسینی، م.، و حسینی، ع. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی رفتار جریان چگال در کانال محدود با انحنای ۱۸۰ درجه با استفاده از نرم‌افزار Fluent. همایش ملی پژوهش‌های محیط زیست ایران. دانشکده‌ی شهید مفتح همدان. صفحات ۱-۱۱.
۱۵. بینا، م.، امامقلی‌زاده، ص.، قمشی، م. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر ارتفاع آب مخزن و دبی خروجی از تخلیه‌کننده تحتانی در میزان تخلیه رسوبات در رسوبشویی تحت فشار. مجله علمی کشاورزی. جلد ۳۰. شماره ۴-الف.

۱۶. ترابی پوده، ح.، امامقلی زاده، ص. ۱۳۸۸. ارزیابی پروفیل سرعت در بدنه جریان غلیظ با استفاده از مدل فیزیکی و ریاضی ICWR.
۱۷. جهانی، ح.، امامقلی زاده، ص.، و علاقه بند زاده، ر.، ۱۳۸۶. بررسی راندمان رسوبشویی تحت فشار در سدهای مخزنی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی. اولین همایش ملی سد و سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج.
۱۸. جعفری، م.، ۱۳۸۱. مدل‌بندی ریاضی و فیزیکی آبشویی رسوب کف دریاچه‌ی پشت سد، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید باهنر.
۱۹. حبیبی، م.، خانجانی، م.، و سید منیر، الف. ۱۳۸۸. تحلیل آبشستگی در پایاب دراپ قائم بلند با مدل فیزیکی و عددی. هشتمین کنفرانس هیدرولیک ایران، دانشگاه تهران.
۲۰. حسین‌زاده دلیر، ع.، عبدالله‌پور، م.، ۱۳۹۲. تأثیر قرارگیری سازه نیم استوانه بر راندمان رسوبشویی تحت فشار. نشریه دانش آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۲. صفحات ۲۶۹-۲۸۲.
۲۱. حیدری، م.، یزداندوست، ف.، ۱۳۸۸. مدیریت رسوبشویی مخازن سدها با استفاده از مدل سه بعدی SSIIM و GIS، هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، شیراز، دانشگاه شیراز.
۲۲. حسینی، م.، برهمند، ن.، حسینی، ع. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عددی رفتار جریان چگال در کانال محدود با انحنای ۱۸۰ درجه با در نظر گرفتن مدل‌های مختلف آشفتگی با استفاده از نرم‌افزار Fluent. همایش ملی پژوهش‌های محیط زیست ایران. دانشکده شهید مفتح همدان.
۲۳. خانجانی، م.، علیپور شهربابکی، ح.، ۱۳۹۰. مدل‌بندی ریاضی رسوبزدایی مخازن پشت سدها. اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار.
۲۴. داوری، ک.، دانش، ش.، خیامی، م.، و خدا شناس، س.، ۱۳۸۸. شبیه‌سازی شرایط کیفی مخازن سدها. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۳، شماره ۱، صفحات ۱۷-۲۹.

۲۵. رزاقی، م.، رزاقی نائینی، ع.، ۱۳۹۱. ارزیابی بازده رسوبشویی مخزن سد شراب گرو. نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه. دانشگاه شهید چمران(اهواز).
۲۶. رئیسی نژاد، الف.، قدیمی، پ.، ۱۳۸۹. مدل سازی عددی معادلات یک بعدی سنت ونانت بر اساس روش اجزاء محدود. فصلنامه علوم و فناوری دریا، شماره ۵۱.
۲۷. ستاری، م.، قهرمانیان، ب.، ۱۳۹۱. بررسی روند رسوبگذاری در مخزن سد علویان با استفاده از مدل MIKE3. کنفرانس بین المللی مهندسی عمران. دانشگاه آزاد تبریز.
۲۸. شفایی بجستان، م.، ۱۳۹۰. مدل های فیزیکی و هیدرولیکی، انتشارات دانشگاه شهید چمران (اهواز)، صفحات ۵-۷.
۲۹. شمسایی، الف و فراست کیش، م.، ۱۳۸۷. مدل سازی و آموزش پارامترهای هیدرولیکی موثر بر رسوبشویی. مجله فناوری و آموزش، سال دوم، جلد ۲، شماره ۳.
۳۰. شمسایی، الف.، عباس نیا، الف.، ۱۳۸۷. بررسی رسوبگذاری و رسوبزایی مخزن سد سفیدرود با استفاده از مدل های عددی. هفتمین کنفرانس هیدرولیک ایران. دانشگاه صنعت آب و برق(شهید عباسپور).
۳۱. ظهیری، ع.، مفتاح هلقی، م. ۱۳۹۱. محاسبات عددی(تئوری و کاربرد)، انتشارات دانشگاه گرگان.
۳۲. عبدالله پور، م.، فرسادی زاده، د.، ثانی خانی، ه.، حسین زاده دلیر، ع. ۱۳۹۱. ارزیابی عملکرد سامانه های هوشمند در تعیین میزان تخلیه رسوب در شرایط رسوب شویی تحت فشار. نهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، دانشگاه شهید چمران(اهواز).
۳۳. عظیمیان، ا.، ۱۳۷۷. دینامیک سیالات محاسباتی، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
۳۴. قوتمند، م.، ۱۳۸۶. روش های عددی برای علوم و مهندسی، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
۳۵. هوشمندزاده، م.، هوشمندزاده، ح. ۱۳۸۷. ارائه یک روش عددی جدید برای حل معادلات سنت ونانت. چهاردهمین کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسر کشور، دانشگاه سمنان.

- 36- Al-Khafaji, A. W., and J. R. Tooley, Numerical Methods in Engineering Practice, Holt, Rinehart and Winston, New York, 1986.
- 37- Ames, W. F., Numerical Methods for Partial Differential Equations, Academic Press, New York, 1977.
- 38- Atkinson, L.V., and P. J. Harley, An Introduction to Numerical Methods with Pascal, Addison-Wesley, Reading, MA, 1983
- 39- Baker, A. J., Finite Element Computational Fluid Mechanics, McGraw-Hill, New York, 1983.
- 40- Brown, C. B. (1943). The control of Reservoir Silting. United States Department of Agriculture. Miscellaneous Publication No.521
- 41- Hsu, S.M., Yu, W.S., and Liu, T.M. 1997. Modeling unsteady turbidity currents in a steep narrow reservoir. International Journal of Sediment Research, Vol. 12(3),pp.207-215.
- 42- Jaan-Kiusalas., Numerical Methods for Engineering With Matlab, New York, 2005.
- 43- Jain, L., and Ashida, K. 2004. Prediction of Concerted Sediment Flushing. Journal of Hydraulic Engineering ASCE.
- 44- Morris, G. L., and Fan, J. 1998. Reservoir sedimentation handbook. McGraw-Hill, New York, 805 pp
- 45- White, R. 2000. Flushing of Sediments from Reservoirs. ICOLD, World Register of Large Dams, HR Wallingford, UK, 166 p.
- 46- White R. (2001) "2. Review of sedimentation in reservoirs." Evacuation of sediments from reservoirs, Thomas Telford, London, 17–36.

## **Abstract**

The flushing of the reservoir is a process which scours the previously deposited sediments in the reservoir and transport them through low-level sluice gates. In order to reduce the wasting of the storage water of reservoirs during desiltation, this phenomenon should be studied by physical or mathematical model. In this study, a one dimensional numerical model was developed to study and simulate the flushing process. In order to achieve the objective of this study, The Saint Venant equations and the governing flushing equation (Beta method) were solved with two methods including one stage and coupling methods. More over, the results of developed numerical models were compared with experimental results of Jafari,(2003) and also with HEC-RAS model. The results show that by increasing the outflow discharge, the sediment transport rate increased. Also, the comparison results of the mathematical model with two methods of one stage and coupling methods and also HEC-RAS model with experimental data show that these models with coefficient of determination 971% , 89% and 98 % respectively have good accuracy to predict flushing of reservoirs.

**Keywords:** Saint Venant equation, Beta numerical method, Flushing Reservoir, HEC-RAS model.



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Agriculture**

**Soil and Water Department**

## **Numerical modeling of sediment flushing of reservoirs**

**Davood Tanasa**

**Supervisors:**

**Dr S. Emamgholizadeh**

**Advisors:**

**Dr Kh. Azhdari**

**Dr H. Hoseini**

**Date:**

**January 2016**