بنام خدا...

از خاک ما، در باد، بوی تو می آید

تنها تو می مانی، ما می رویم از یاد

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکدهٔ مهندسی عمران

مدل‌سازی هیدرودینامیکی پدیده‌ی شکست سد در پیچان‌رودها

(مطالعه‌ی موردی، سد و رودخانه‌ی زاینده‌رود)

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی عمران

گرایش آب

آناهیتا جوزدانی

استاد راهنما:

دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

۱۳۸۸

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

به پاس تمام شیرینی زندگی ام در کنار عزیزترین ها،

پدرم، مادرم و خواهرم

تشکر و قدردانی

در راه تدوین و گردآوری این پایان‌نامه عزیزان زیادی متحمل زحمت شده‌اند که وظیفهٔ خود می‌دانم در این فرصت از صمیم دل از همراهی و همکاری ایشان تشکر کنم

پدر و مادر عزیزم که پیش‌کشی این مجموعه به محضرشان در مقابل سالیان سال صبر و عطوفت بی‌کرانشان نسبت به من بهایی ناچیز دارد و امیدوارم از این پس نیز در کلیهٔ مراحل زندگی از گنج حضورشان بهره‌مند شوم،

جناب آقای دکتر کبیری، استاد راهنمای گرانقدرم که بی‌شک بدون روشنگری‌ها و راهنمایی‌های ارزشمند ایشان انجام این پروژه امکان‌پذیر نبود،

جناب آقای دکتر حاجیان که دانش ایشان در مقام استاد مشاور گره‌گشای کار من بود،

جناب آقای دکتر اصغری و جناب آقای دکتر هادیان که عهده‌دار مقام داوری این پایان‌نامه شدند و راهنمایی ایشان در تکمیل و تصحیح این پایان‌نامه کمک شایانی به بنده کرد،

کلیهٔ اساتید گرامی دانشکدهٔ مهندسی عمران که در طول دوران تحصیل از محضرشان آموخته‌ها برگرفته‌ام و در نهایت کلیهٔ دوستانی که در تمامی مراحل انجام این پروژه صمیمانه مرا یاری رسانده‌اند.

آناهیتا جوزدانی

زمستان ۸۸

چکیده:

رشد روزافزون نیاز جوامع بشری به آب سالم و بهداشتی، باعث افزایش شمار سدهای ساخته شده در گوشه و کنار جهان و پیشرفت‌های سریع در زمینه‌ی مهندسی سدسازی شده است. علی‌رغم محاسبات دقیق سازه‌ای و هزینه‌های گزاف در احداث این سازه‌ها، شکست سدها پدیده‌ای گریز ناپذیر می‌نماید. سیلاب‌های عظیم و مخربی که همه‌ساله در گوشه و کنار جهان به‌وقوع می‌پیوندند تهدید بزرگی برای پایداری و بقای سدها به‌شمار می‌روند. هم‌چنین با مطرح شدن مقوله‌ی پدافند غیر عامل و طراحی سیستم‌های هشدار سیلاب و مدیریت بحران، امروزه بررسی رفتار سیلاب ناشی از شکست این بنای عظیم، انجام اقدامات پیشگیرانه و پیش‌بینی تبعات شکست احتمالی سدها بیش از پیش مورد توجه محققین و مهندسین قرار گرفته است.

تاکنون مطالعات عددی و آزمایشگاهی زیادی در ارتباط با تحلیل رفتار موج ناشی از شکست سدها در کانال‌های مستقیم صورت گرفته است. به‌دلیل زمان‌بر بودن و هزینه‌ی بالای حل دوبعدی معادلات حاکم بر رفتار سیلاب، اکثر مدل‌های عددی پدیده‌ی شکست سد را به‌صورت یک‌بعدی مورد بررسی قرار می‌دهند و مدل‌های دوبعدی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند.

در تحقیق حاضر با استفاده از مدل دوبعدی حل معادلات سنت- ونانت (مجموعه‌ی نرم‌افزارهای MIKEFLOOD)، هیدرودینامیک سیلاب ناشی از شکست سد در عبور از خم‌های متوالی مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج آن با مدل‌های یک‌بعدی حل معادلات مقایسه شده است. به‌منظور بررسی و صحت‌سنجی نتایج مدل یک‌بعدی پدیده‌ی شکست سد به‌صورت آزمایشگاهی و با باز شدن ناگهانی دریچه در یک کانال مستطیلی افقی مدل شده است که نتایج آن در قالب نمودارهای پیشروی موج به سمت پایین‌دست ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که در نظر گرفتن اثر خم‌ها در مسیر سیلاب و نیز توالی خم‌ها، تأثیر چشم‌گیری در کاهش مقدار بیشینه‌ی سیلاب داشته، بر نحوه‌ی پخش سیل در سواحل مؤثر است و در زمان پخش و حرکت موج به سمت پایین‌دست نیز تأخیر ایجاد می‌کند.

به‌منظور درک عمیق پدیده‌ی شکست سد در پیچان‌رودها در شرایط واقعی، شکست احتمالی سد زاینده‌رود واقع بر رودخانه‌ی زاینده‌رود در استان اصفهان در مسیری به طول تقریبی ۱۱۰ کیلومتر از محل سد به صورت یک‌بعدی و در مسیر۱۶/۵ کیلومتر ابتدای مسیر به‌صورت دوبعدی به عنوان مطالعه‌ی موردی تحلیل و بررسی شده است. در نهایت نتایج مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی این پدیده مقایسه و تبعات آن در قالب نقشه‌های پخش سیل، نمودارها و جداول ارائه شده است.

کلمات کلیدی: شکست سد، مدل‌سازی هیدرودینامیکی، پیچان‌رود، رودخانه زاینده‌رود

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت
فهرست اشکال ..... یازده
فهرست تصاویر ..... چهارده
فهرست جداول ..... پانزده
چکیده ۱

فصل اول: مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه ۲
۱-۲ پدیده‌ی شکست سد ۴
۱-۳ علل شکست سد ۵
۱-۳-۱ علل شکست سدهای بتنی ۶
۱-۳-۲ علل شکست سدهای خاکی ۷
۱-۳-۳ علل شکست سازه‌های خروجی وابسته به سد ۸
۱-۴ نمونه‌هایی از حوادث به‌وقوع پیوسته در تاریخ ۹
۱-۴-۱ شکست سد ملپاست ۱۰
۱-۴-۲شکست سد تتون ۱۲
۱-۵ لزوم بررسی پدیده‌ی شکست سد ۱۲

فصل دوم: شرح موضوع، معادلات حاکم و پیشینه‌ی علمی

۲-۱ مقدمه ۱۶
۲-۲ طبقه‌بندی جریان‌های غیردائمی ۱۷
۲-۳ تشریح پدیده‌ی شکست سد ۱۸
۲-۴ معادلات حاکم بر پدیده‌ی شکست ۲۰
۲-۴-۱ معادلات سنت- ونانت(معادلات آب کم‌عمق) ۲۲
۲-۴-۱- الف)معادله‌ی پیوستگی ۲۲
۲-۴-۱- ب) معادله‌ی حرکت (دینامیکی) ۲۳
۲-۴-۲ روش‌های حل معادلات سنت- ونانت ۲۵
۲-۵ پیچان‌رود ۲۶
۲-۶ پیشینه‌ی علمی موضوع و مروری بر مطالعات انجام شده ۲۷
۲-۷ ضرورت انجام پایان‌نامه ۴۶

فصل سوم: مدل‌سازی پدیده‌ی شکست سد (عددی- آزمایشگاهی)

۳-۱ مقدمه ۴۷

عنوان **صفحه**

۳-۲ نرم‌افزار MIKE11 ..... ۴۷
۳-۲-۱ ویرایشگر ساخت مسیر جریان ۵۰
۳-۲-۲ ویرایشگر مقاطع عرضی ۵۱
۳-۲-۳ ویرایشگر شرایط مرزی ۵۲
۳-۲-۴ ویرایشگر شبیه‌سازی ۵۴
۳-۲-۵ پارامترهای هیدرودینامیکی ۵۵
۳-۲-٦ معادلات مورد استفاده در مدل MIKE11 ..... ۵۵
۳-۲-٦- الف) زبری بستر ۵۵
۳-۲-٦- ب) معادلات سنت- ونانت و روش حل آن‌ها ۵۸
۳-۲-٦- ج) شبکه‌بندی محاسباتی ۶۱
۳-۲-٦- د) شرایط پایداری ۶۲
۳-۲-۷ مدل شکست سد در MIKE11 ..... ۶۳
۳-۳ نرم‌افزار MIKE21 ..... ۶۶
۳-۳-۱ ویرایشگر عمق‌سنجی MIKE11 ..... ۶۶
۳-۳-۲ معادلات مورد استفاده در MIKE21 و روش حل آن‌ها ۶۷
۳-۴ نرم‌افزار MIKEFLOOD ۷۰
۳-۵ مدل‌سازی جریان ناشی از شکست سد در مسیرهای پر پیچ و خم ۷۱
۳-٦ مدل‌سازی آزمایشگاهی پدیده‌ی شکست سد ۷۵
۳-۷ جمع‌بندی مطالب فصل ۷۸

فصل چهارم: شرح محدوده‌ی مطالعاتی (مطالعه‌ی موردی)

۴-۱ مقدمه ۷۹
۴-۲ سد و رودخانه‌ی زاینده‌رود ۷۹
۴-۲-۱ حوضه‌ی آبریز زاینده‌رود ۷۹
۴-۲-۲ رودخانه‌ی زاینده‌رود ۸۰
۴-۲-۳ سد زاینده‌رود ۸۲
۴-۳ ساخت مدل عددی شکست سد زاینده رود ۸۵
۴-۳-۱ ساخت مدل یک‌بعدی شبکه‌ی رودخانه در محیط MIKE11 ..... ۸۵
۴-۳-۲ ساخت مدل شکست سد در محیط MIKE11 ..... ۸۷
۴-۳-۳ ساخت مدل دوبعدی دشت سیلابی در MIKE21 ..... ۸۸
۴-۳-۴ هم‌بسته کردن مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی در MIKEFLOOD ۸۹
۴-۴ جمع‌بندی مطالب فصل ۹۰

عنوان **صفحه**

فصل پنجم: ارائه‌ی نتایج

۵-۱ مقدمه ۹۱

۵-۲ بررسی صحت نتایج مدل عددی ۹۱

۵-۳ پدیده‌ی شکست سد ۹۴

۵-۳-۱ مدل‌سازی پدیده‌ی شکست سد در فلوم آزمایشگاهی ۹۴

۵-۳-۲ مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی ۱۰۳

۵-۴ مدل‌سازی شکست سد در خم‌های تک و متوالی در محیط MIKEFLOOD ۱۰۷

۵-۴-۱ تأثیر خم‌ها بر زمان پیشروی سیلاب ۱۰۷

۵-۴-۲ بررسی تغییرات سطح آب در عبور از خم‌ها ۱۱۴

۵-۴-۳ تغییرات سرعت در عبور از خم‌ها ۱۱۹

۵-۵ بررسی آثار هیدرودینامیکی شکست سد زاینده‌رود بر نواحی پایین‌دست ۱۲۱

۵-۵-۱ نتایج مدل یک‌بعدی شبکه‌ی رودخانه ۱۲۲

۵-۵-۲ نتایج مدل دوبعدی شبکه‌ی رودخانه ۱۲۹

۵-۵-۳ مقایسه‌ی نتایج مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی ۱۳۷

۵-۶ جمع‌بندی مطالب فصل ۱۴۰

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ مقدمه ۱۴۲

۶-۲ نتیجه‌گیری ۱۴۲

۶-۳ پیشنهادات ۱۴۴

مراجع ۱۴۶

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

فصل دوم: شرح موضوع، معادلات حاکم و پیشینه‌ی علمی

شکل(۲-۱) خطوط جریان در امواج نوسانی و انتقالی ۱۷
شکل(۲-۲) پروفیل سطح آب در اثر باز شدن ناگهانی دریچه در کانال ۱۸
شکل(۲-۳) پیشروی موج در کانال با بستر خشک ۱۹
شکل(۲-۴) پیشروی موج در کانال با بستر غیر خشک ۱۹
شکل(۲-۵) معادله‌ی پیوستگی در جریان غیر دائمی ۲۳
شکل(۲-۶) معادله‌ی حرکت در جریان غیر دائمی ۲۳
شکل(۲-۷) مسیر یک پیچان‌رود ۲۶
شکل(۲-۸) مقطع رودخانه در خم ۲۷
شکل(۲-۹) تغییر محل خم‌ها با گذشت زمان ۲۷
شکل(۲-۱۰) مقطع عرضی دلخواه ۳۰
شکل(۲-۱۱) کانال شیب‌دار مورد استفاده‌ی هانت ۳۰
شکل(۲-۱۲) کانال مستطیلی با عرض متغیر ۳۲
شکل(۲-۱۳) توصیف جریان در کانال با توجه به خطوط مشخصه ۳۳
شکل(۲-۱۴) نمودار بی‌بعد برای محاسبه‌ی عمق موج پیشرونده با توجه به عمق آب در سراب و پایاب ۳۴
شکل(۲-۱۵) نمودار بی‌بعد برای محاسبه‌ی محل موج پیشرونده ۳۴
شکل(۲-۱۶) مقایسه‌ی موج شکل گرفته در اثر شکست سد با افزایش عمق آب در پایاب ۳۵
شکل(۲-۱۷) شبکه‌بندی محیط مسئله در حل مسائل و نمایش نقاط مورد بررسی ۳۶
شکل(۲-۱۸) مقایسه‌ی پروفیل فشار در نتایج در دسته معادلات (پایاب خشک) ۳۷
شکل(۲-۱۹) مقایسه‌ی عمق موج پیشرونده در دو دسته معادلات (پایاب خشک) ۳۸
شکل(۲-۲۰) مقایسه‌ی پروفیل فشار در نتایج دو دسته معادلات (پایاب غیرخشک) ۳۹
شکل(۲-۲۱) مقایسه‌ی پروفیل سطح آب در دو دسته معادلات (پایاب غیر خشک) ۳۹
شکل(۲-۲۲) بررسی اثر پارامترهای بوسینسک در برآورد پروفیل سطح آب ۴۰
شکل(۲-۲۳) بررسی نقش واریزه‌ها در موج شکل گرفته در اثر شکست سد ۴۲

فصل سوم: مدل‌سازی پدیده‌ی شکست سد (عددی- آزمایشگاهی)

شکل(۳-۱) ویرایشگر شبکه‌ی رودخانه ۵۱
شکل(۳-۲) ویرایشگر مقاطع عرضی ۵۲
شکل(۳-۳) نمونه‌ای از فایل‌های سری زمانی ۵۲
شکل(۳-۴) ویرایشگر شرایط مرزی ۵۴
شکل(۳-۵) ویرایشگر شبیه‌سازی ۵۵
شکل(۳-۶) نحوه‌ی قرار گرفتن *h-points* و *Q-point* در مسیر رودخانه ۵۹

عنوان **صفحه**

شکل(۳-۷) شبکه‌ی نقاط برای بسط معادله‌ی پیوستگی ۵۹
شکل(۳-۸) شبکه‌ی نقاط برای بسط معادله‌ی حرکت ۶۰
شکل(۳-۹) نحوه‌ی قرار گرفتن سازه‌ی شکست سد در مدل ۶۳
شکل(۳-۱۰) صفحه‌ی خصوصیات شکست سد در ویرایشگر شبکه‌ی جریان ۶۴
شکل(۳-۱۱) مشخصات وابسته به زمان مقطع شکست ۶۴
شکل(۳-۱۲) مقطع کنترل‌کننده‌ی ناحیه‌ی شکستگی ۶۵
شکل(۳-۱۳) نمونه‌ای از نقشه‌های ساخته شده در ویرایشگر عمق‌سنجی ۶۷
شکل(۳-۱۴) چرخه‌ی حل مسئله در الگوریتم DS ۶۹
شکل(۳-۱۵) نحوه‌ی به‌تقریب رسیدن پارامترها حول گام زمانی $n + 1/2$ ۶۹
شکل(۳-۱۶) اتصال جانبی شاخه‌ی رودخانه به دشت سیلابی ۷۰
شکل(۳-۱۷) نمونه‌ای از مقاطع مورد استفاده در ساخت مسیر خم‌ها ۷۲
شکل(۳-۱۸) مسیر کانال با یک خم 180° ۷۳
شکل(۳-۱۹) مسیر کانال با دو خم 180° متوالی ۷۴
شکل(۳-۲۰) نمای جانبی کانال مورد استفاده در شبیه‌سازی پدیده‌ی شکست سد ۷۵
شکل(۳-۲۱) نمای فوقانی سیستم مورد استفاده در شبیه‌سازی پدیده‌ی شکست سد ۷۵
شکل(۳-۲۲) دریچه‌ی مورد استفاده در شبیه‌سازی پدیده‌ی شکست سد ۷۶

فصل چهارم: شرح محدوده‌ی مطالعاتی (مطالعه‌ی موردی)

شکل(۴-۱) تغییرات حجم آب دریاچه‌ی سد در برابر ارتفاع ۸۳
شکل(۴-۲) برش مقطع عرضی سد زاینده رود ۸۴
شکل(۴-۳) نمونه‌ای از مقاطع عرضی در ویرایشگر مقاطع عرضی ۸۶
شکل(۴-۴) دبی ورودی به مخزن سد با دوره‌ی بازگشت ۱۰۰ سال ۸۸
شکل(۴-۵) نقشه‌ی ارتفاعی مسیر رودخانه‌ی زاینده‌رود ۸۹
شکل(۴-۶) نقشه‌ی عمق‌سنجی مسیر مدل شده به صورت عددی ۸۹

فصل پنجم: ارائه‌ی نتایج

شکل(۵-۱) مدل شکست سد ماکهو در هندوستان ۹۳
شکل(۵-۲) حرکت موج مثبت به سمت پایین‌دست $(h_0 = 10\ cm, h_1 = 0)$ ۹۵
شکل(۵-۳) حرکت موج مثبت به سمت پایین‌دست $(h_0 = 20\ cm, h_1 = 0)$ ۹۷
شکل(۵-۴) حرکت موج مثبت به سمت پایین‌دست $(h_0 = 20\ cm, h_1 = 5cm)$ ۹۹
شکل(۵-۵) حرکت موج مثبت به سمت پایین‌دست $(h_0 = 25\ cm, h_1 = 5cm)$ ۱۰۱
شکل(۵-۶) تراز بیشینه‌ی سطح آب $(h_0 = 10\ cm, h_1 = 0)$ ۱۰۴
شکل(۵-۷) تراز بیشینه‌ی سطح آب، $(h_0 = 15\ cm, h_1 = 0)$ ۱۰۴
شکل(۵-۸) تراز بیشینه‌ی سطح آب، $(h_0 = 20\ cm, h_1 = 0)$ ۱۰۴

عنوان **صفحه**

شکل(۵-۹) تراز بیشینه‌ی سطح آب، $(h_0 = 25\ cm, h_1 = 0)$ ۱۰۵
شکل(۵-۱۰) تراز بیشینه‌ی سطح آب، $(h_0 = 20\ cm, h_1 = 5\ cm)$ ۱۰۵
شکل(۵-۱۱) تراز بیشینه‌ی سطح آب، $(h_0 = 20\ cm, h_1 = 7\ cm)$ ۱۰۵
شکل(۵-۱۲) تراز بیشینه‌ی سطح آب، $(h_0 = 25\ cm, h_1 = 5\ cm)$ ۱۰۶
شکل(۵-۱۳) تراز بیشینه‌ی سطح آب، $(h_0 = 25\ cm, h_1 = 7\ cm)$ ۱۰۶
شکل(۵-۱۴) پیشروی سیلاب در کانال مستقیم ۱۰۸
شکل(۵-۱۵) پیشروی سیلاب در کانال با یک خم $^{\circ}$۱۸۰ ..... ۱۱۰
شکل(۵-۱۶) پیشروی سیلاب در کانال با دو خم متوالی $^{\circ}$۱۸۰ ..... ۱۱۲
شکل(۵-۱۷) تراز آب، محاسبه شده توسط مدل یک‌بعدی ۱۱۴
شکل(۵-۱۸) تراز آب در دیواره‌های سمت چپ و راست کانال با یک خم، ۶۴ ثانیه پس از شکست ۱۱۵
شکل(۵-۱۹) تراز آب در دیواره‌های چپ و راست کانال با یک خم، ۱۱۶ ثانیه پس از شکست ۱۱۶
شکل(۵-۲۰) تراز آب در دیواره‌های چپ و راست کانال با دو خم، ۶۴ ثانیه پس از شکست ۱۱۷
شکل(۵-۲۱) تراز آب در دیواره‌های چپ و راست کانال با دو خم، ۱۱۶ پس از آغاز شکست ۱۱۸
شکل(۵-۲۲) مقایسه‌ی تراز بیشینه‌ی آب در کانال‌های مدل شده ۱۱۹
شکل(۵-۲۳) تغییرات سرعت در مسیر کانال با دو خم متوالی $^{\circ}$۱۸۰ ..... ۱۲۰
شکل(۵-۲۴) تغییرات پروفیل سرعت در عبور از خم ۱۲۱
شکل(۵-۲۵) تغییرات سطح آب در مخزن در طی زمان مدل‌سازی ۱۲۲
شکل(۵-۲۶) تغییرات دبی عبوری در محل شکستگی طی زمان مدل‌سازی ۱۲۳
شکل(۵-۲۷) هیدروگراف سیلاب عبوری از مقاطع مختلف مسیر رودخانه ۱۲۳
شکل(۵-۲۸) تغییرات سطح آب در مقطع، به فاصله‌ی ۲ کیلومتر از محل سد ۱۲۵
شکل(۵-۲۹) تغییرات سطح آب در مقطع به فاصله ی ۱۶٫۵ کیلومتر از محل سد ۱۲۶
شکل(۵-۳۰) تغییرات سطح آب در مقطع، به فاصله‌ی ۳۹ کیلومتر از محل سد ۱۲۷
شکل(۵-۳۱) تغییرات سطح آب در مقطع، در فاصله‌ی ۱۰۵٫۸ کیلومتر از محل سد ۱۲۸
شکل(۵-۳۲) پیشروی موج ۴۴ دقیقه پس از آغاز شکست ۱۳۰
شکل(۵-۳۳) پیشروی موج ۱۲۰ دقیقه پس از آغاز شکست ۱۳۱
شکل(۵-۳۴) پیشروی موج ۱۸۵ دقیقه پس از آغاز شکست ۱۳۲
شکل(۵-۳۵) پیشروی موج ۲۲۵ دقیقه پس از آغاز شکست ۱۳۳
شکل(۵-۳۶) پیشروی موج ۲۶۹ دقیقه پس از آغاز شکست ۱۳۴
شکل(۵-۳۷) پیشروی موج ۴۳۵ دقیقه پس از آغاز شکست ۱۳۵
شکل(۵-۳۸) پیشروی موج ۵۷۴ دقیقه پس از آغاز شکست ۱۳۶
شکل(۵-۳۹) مقایسه‌ی هیدروگراف سیلاب در ایستگاه ۱۶+۲۵۰ ..... ۱۳۸
شکل(۵-۴۰) مقایسه‌ی نحوه‌ی تغییرات سطح آب در ایستگاه ۱۶+۵۰۰ ..... ۱۳۹

فهرست تصاویر

عنوان **صفحه**

فصل سوم: مدل‌سازی پدیده‌ی شکست سد (عددی- آزمایشگاهی)

تصویر(۳-۱) کانال و دریچه‌ی مورد استفاده در آزمایشگاه..... ۷۶

تصویر(۳-۲) نمونه‌ای از عکس‌های برداشت شده در آزمایشگاه ۷۷

فصل چهارم: شرح محدوده‌ی مطالعاتی (مطالعه‌ی موردی)

تصویر(۴-۱) نمایی از سد زاینده‌رود ۸۳

تصویر(۴-۲) وضعیت سواحل رودخانه ۸۷

فصل پنجم: ارائه‌ی نتایج

تصویر(۵-۱) حرکت موج به سمت پائین‌دست پس از بازشدگی دریچه (عمق آب بالادست ۲۰ سانتی‌متر)..... ۹۴

تصویر(۵-۲) حرکت موج به سمت پائین‌دست (عمق آب پائین‌دست۷ سانتی‌متر، بالادست ۲۵ سانتی‌متر) ۹۸

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه و کلیات

جدول(۱-۱) توزیع منابع آب‌های سطحی و حوضه‌های آبریز در ایران ۳

جدول(۱-۲) مشخصات برخی از سدهای شکسته شده ۵

فصل دوم: شرح موضوع، معادلات حاکم و پیشینه‌ی علمی

جدول(۲-۱) اسامی بخشی از مدل‌های عددی گزارش شده توسط ICOLD ۴۴

فصل سوم: مدل‌سازی پدیده‌ی شکست سد (عددی- آزمایشگاهی)

جدول(۳-۱) ویرایشگرهای مورد استفاده در MIKE11 ..... ۵۰

جدول(۳-۲) فایل های مورد استفاده در MIKE11 ..... ۵۰

جدول(۳-۳) پارامترهای به‌کار رفته در فرم دوبعدی معادلات سنت- ونانت ۶۸

فصل پنجم: ارائه‌ی نتایج

جدول(۵-۱) مقایسه‌ی داده‌های دبی- اشل ایستگاه سد تنظیمی با نتایج مدل عددی ۹۲

جدول(۵-۲) مقایسه‌ی داده‌های دبی- اشل ایستگاه پل زمانخان با نتایج مدل عددی ۹۲

جدول(۵-۳) مشخصات کانال با یک خم در مسیر ۱۱۰

جدول(۵-۴) مشخصات کانال با دو خم متوالی در مسیر ۱۱۱

جدول(۵-۵) مقادیر بیشینه‌ی دبی در مقاطع مختلف مسیر رودخانه ۱۲۴

جدول(۵-۶) مقادیر بیشینه‌ی عمق آب در مقاطع مختلف مسیر رودخانه ۱۲۴

جدول(۵-۷) محدوده‌ی عمق متناظر با هر رنگ در اشکال مربوط به پیشروی سیلاب ۱۲۹

جدول(۵-۸) مقایسه‌ی نتایج مدل‌های یک‌بعدی و دوبعدی در مسیر ۱۴۰

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

یکی از مسائل مهم در عرصه‌ی زیست‌محیطی و بقای جوامع بشری، آب و به عبارت دیگر بحران کم‌آبی در جهان است. حدود ٪۷۵ از سطح کره‌ی زمین را آب فرا گرفته است که حجمی بالغ بر ۱٫۴ میلیارد مترمکعب را شامل می‌شود. تقریباً ۹۶٫۵ درصد از این آب‌ها در دریاها و اقیانوس‌ها قرار گرفته است، ۱٫۷ درصد نیز به‌صورت یخ و یخچال در مناطق قطبی تجمع یافته، حدود ۱٫۷ درصد نیز به‌صورت آب‌های زیرزمینی ذخیره شده و تنها ۰٫۱ درصد از کل منابع آب موجود به‌صورت آب‌های سطحی و یا در اتمسفر موجود است. در این میان سهم آب‌های شیرین، شامل آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی، تقریباً ۲٫۵ درصد کل آب‌های موجود را در برمی‌گیرد [۱]. شایان ذکر است که توزیع زمانی و مکانی آب در سطح زمین یکنواخت نیست. در مناطق مرطوب، ریزش‌های جوی چندین برابر میزان تبخیر در منطقه است. این در حالی‌است که در نواحی نیمه‌خشک و خشک بارش چندانی صورت نمی‌گیرد و به سبب گرمی هوا نیز میزان تبخیر در این مناطق به شدت بالاست.

ایران نیز به سبب دارا بودن اقلیم خشک و نیمه‌خشک، در زمره‌ی کشورهای با محدودیت منابع آب قرار می‌گیرد. میانگین بارش در ایران حدود ۲۴۰ میلی‌متر در سال است که این رقم حدود یک‌سوم میانگین ۸۶۰ میلی‌متری بارش در جهان است. حجم متوسط بارش در ایران حدود ۴۰۰ میلیارد مترمکعب در سال است که از این مقدار حدود ۲۷۰ میلیارد مترمکعب به‌صورت تبخیر و تعرق از دسترس خارج می‌شود، بنابراین سالانه ۱۳۰ میلیارد متر مکعب آن به‌عنوان آب‌های تجدیدپذیر مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. منابع آب ایران در شش حوضه‌ی آبریز، مطابق جدول (۱-۱)، به‌شرح زیر تقسیم می‌شود:

جدول (۱-۱) توزیع منابع آب‌های سطحی در حوضه‌های آبریز در ایران [۲]

نام حوضه‌ی آبریز	مساحت حوضه‌ی آبریز (کیلومتر مربع)	بارندگی متوسط سالیانه (میلی‌متر)	رواناب متوسط سالیانه (میلیون مترمکعب در سال)
دریای خزر	۱۷۷۰۰۰	۲۸۵٫۸	۱۴۸۶۵
خلیج فارس و دریای عمان	۴۳۰۰۰	۳۶۴٫۶	۴۵۵۹۱
دریاچه‌ی ارومیه	۵۲۷۰۰	۴۳۴٫۱	۵۴۱۳
حوضه‌ی مرکزی	۸۳۱۰۰۰	۱۶۳	۶۷۹۹
دریاچه‌ی هامون	۱۰۵۶۰۰	۱۰۸٫۱	۳۴۱۵
سرخس	۴۳۹۰۰	۲۳۸٫۳	۳۴۱۵٫۶
جمع	۱۶۵۰۰۰۰	۲۵۸	۷۹۴۹۸٫۶

همان‌طورکه در جدول(۱-۱) مشاهده می‌شود توزیع بارش‌ها در ایران کاملاً ناموزون است و حوضه‌های مرکزی و هامون که بخش اعظم مساحت ایران را در مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند، کمترین میزان بارش را دارا هستند.

با توجه به رشد فزاینده‌ی جمعیت، کمبود منابع آب شیرین و هم‌چنین توزیع ناموزون منابع آب در جهان و ایران و به‌سبب وابستگی حیات جوامع بشری به آب، انسان به فکر راه‌هایی برای ذخیره‌سازی و بهره‌برداری بهینه از منابع آب افتاد. ساده‌ترین راه برای مبارزه با بحران کم‌آبی، ساخت سدها و بندهایی در مسیر جریان آب رودخانه‌ها و مسیرهای سیل‌گیر و ذخیره کردن آن در حوضچه‌هایی در پشت سد بود. البته در ابتدای امر، این کار با خطاهای زیادی همراه بود، چراکه سدهای اولیه با استفاده از مصالح آبرفتی موجود در مسیر جریان ساخته می‌شدند که بعضاً با جاری شدن سیلاب‌های شدید شسته شده و از بین می‌رفتند، بنابراین طی سالیان متمادی اعتماد چندانی به سدهای ساخته شده از مصالح خاکی به‌وجود نیامد. با گذر زمان و آشنا شدن انسان با خواص مصالح سنگی و آمیخته شدن تجربیات بشر با دانش، ساخت سدها با اطمینان بیشتری همراه شد به‌طوری‌که درحال حاضر بقایای بسیاری از سدهای ساخته شده با مصالح سنگی در زمان‌های دور هنوز برجا مانده‌اند. از آن‌جمله می‌توان به سد الکافرا[1] اشاره کرد که بقایای آن در وادی الغراوی[2] در کشور مصر هنوز پا برجاست و زمان ساخت آن به ۲۷۰۰ تا ۲۹۰۰ سال پیش از میلاد مسیح باز می‌گردد. این سد سنگریزه‌ای با ارتفاع ۱۴ متر ساخته شده و به‌نظر می‌رسد در اثر جاری شدن سیل از بین رفته باشد. مهارت سازندگان سدها به‌تدریج در طی قرن‌های متمادی افزایش پیدا کرد و ابتکارات و نوآوری‌هایی در زمینه‌ی ساخت سدها بروز کرد که منجر به ساخت سازه‌هایی شد که بعضی از آن‌ها تا به امروز بر جا مانده‌اند. از جمله‌ی این دستاوردها می‌توان به سد کبار در نزدیکی شهرستان قم اشاره کرد که در زمان استیلای مغول‌ها بر ایران ساخته شد و به جرأت می‌توان گفت این سد، قدیمی‌ترین سد قوسی ساخته شده در جهان است که هنوز هم

[1] El Kafara
[2] Wadiel- Garawi

پابرجاست. نمونه‌ی قابل‌توجه دیگر، سازه‌ی بنّایی میرالوم[1] در حیدرآباد هند است که در سال ۱۸۰۰ میلادی با ارتفاعی در حدود ۱۲ متر و طول ۷۶۲ متر ساخته شده و اولین سد چند قوسی شناسایی شده در دنیاست [۳].

تقریباً تا سال ۱۸۵۰ میلادی معیارهای چندانی برای ساخت سدها وجود نداشت، بنابراین ساخت بسیاری از این بناها بر مبنای تجربه صورت می‌گرفت که به سرعت با شکست مواجه می‌شد و عدم کفایت روش‌های تجربی را به نمایش می‌گذاشت. با گذر زمان و شناخت هر چه بیشتر خواص سنگ‌ها، افق‌های تازه‌ای در زمینه‌ی ساخت سد با انواع مصالح گشوده شد. ساخت ابزارهای شناسایی مصالح پی و گسترش علم هیدرولیک و هیدرولوژی به‌منظور تخمین سیلاب‌های با دوره‌ی بازگشت بالا به سرعت مرزهای دانش سدسازی را وسعت بخشید و ساخت سدها با انواع مصالح موجود، با اطمینان و سرعت بالایی صورت گرفت.

با ساخت سد در هر منطقه، خصوصیات و شرایط ناحیه دست‌خوش تغییرات زیادی می‌شود و ثبات وضعیت زیست‌محیطی و تعادل موجود در منطقه بر هم می‌خورد. معمولاً هدف از ساخت این سازه‌های عظیم، ذخیره‌ی آب برای بقای جوامع بشری و تأمین انرژی برق‌آبی توسط نیروگاه‌های ساخته شده در کنار سدهاست. بنابراین پس از ساخت سد، تراکم جمعیت در نواحی پایین‌دست سد افزایش یافته و شهرها و شهرک‌های متعدد در این مناطق ساخته می‌شوند. هم‌چنین با ذخیره‌ی آب، امکان گسترش صنایع و کارخانه‌های تولیدکننده در منطقه زیاد می‌شود و شهرک‌های صنعتی به‌طور چشم‌گیری رشد می‌کنند و شکوفا می‌شوند. درعین‌حال وجود آب سبب بهبود شرایط کشاورزی و گسترش اراضی تحت پوشش باغات و مزارع می‌شود. اما در این بین پرسشی که مطرح می شود میزان اطمینان به کارکرد دائمی این سازه‌های عظیم است، آیا سدهای ساخته شده با خطر شکست روبرو خواهند شد؟!

علی‌رغم نقش تعیین‌کننده‌ی سد در پیشبرد تمدن بشری و نیاز مبرم به این سازه‌ی بزرگ در زندگی امروز، ناشناخته‌های طبیعت و اشتباهات انسان منجر به بروز فجایعی ناشی از فرو ریختن سدها شده است. از تجربه‌ی ناگوار خرابی سدها و تلفات جانی و اقتصادی جبران‌ناپذیر به‌بار آمده چنین نتیجه می‌شود که پیش‌بینی بسیاری از پدیده‌های مؤثر در ایمنی و پایداری سدها هنوز به طور کامل امکان‌پذیر نمی‌باشد. از سوی‌دیگر به خاطر نیاز روز افزون به آب، تولید انرژی و هم‌چنین کنترل سیل، سدها هرچه بیشتر و در مکان‌های مختلف با شرایط ژئولوژیک و هیدرولوژیکی نامساعدتری ساخته می‌شوند به‌نحوی‌که هر سد در نوع خود تجربه‌ی نوینی را عرضه می‌نماید. از آن‌جاکه بسیاری از سدها در بالادست آبادی‌ها و یا شهرهای پر جمعیت واقع‌اند، عدم ایمنی آن‌ها توأم با خطر تلفات و خسارات مالی و جانی خواهد بود. بنابراین لازم است مسئله‌ی ایمنی سد و امکان شکست این سازه و تبعات ناشی آن به‌طور دقیق بررسی شود. در ادامه‌ی این فصل مختصراً به شرح پدیده‌ی شکست سد و تبعات ناشی از آن پرداخته می‌شود.

۱-۲ پدیده‌ی شکست سد[2]

حجم عظیم آب انباشته‌شده در پشت دیواره‌ی سد، باعث اشباع شدن خاک منطقه از آب می‌شود و نیروهای شدیدی را به پی سد و دیواره‌های آن وارد می‌کند. در عین‌حال، جسم سازه‌ای سد در طی عمر بنا، در معرض نیروی ناشی از

[1] Meer- Allum
[2] Dam-Break Phenomena

فشار آب قرار می‌گیرد و شرایط مختلف آب و هوایی از جمله سرما، یخبندان در سطح دریاچه و هم‌چنین جاری شدن سیلاب‌های بزرگ را تجربه می‌کند. در شرایط خاص ممکن است بنا به اشکالاتی که در پی یا بدنه‌ی سد به‌وجود می‌آید، سد پایداری خود را از دست داده و این امر منجر به شکست سازه و تخریب آن خواهد شد.

شکست سد به رهاسازی حجم زیادی از آب و جاری شدن آن به سمت پایین‌دست سد می‌انجامد و اغلب تلفات مالی و جانی فراوانی به همراه دارد. تاریخ نشان می‌دهد که از هر یک‌هزار سد ساخته شده، در حدود ده عدد فروریخته است. بر اساس آمار کمسیون بین‌اللملی سدهای بزرگ[1]، ICOLD، طی یک‌صد سال گذشته فقط در اثر خرابی‌های بزرگ در حدود ۱۸۰۰۰۰ مورد تلفات جانی و خسارات سنگین اقتصادی به‌بار آمده است [۴]. سینگ[2] (۱۹۹۶) حدود ۱۰۰۰ مورد شکست سد را از قرن ۱۲ میلادی تاکنون گزارش کرده است که تعداد ۲۰۰ مورد آن در قرن بیستم روی داده است. در جدول (۱-۲) آمار مختصری از سدهای حادثه دیده ارائه شده است.

جدول (۱-۲) مشخصات برخی از سدهای شکسته شده[۲]

نام سد	نام کشور	نوع سد	ارتفاع سد (متر)	سال شکست	علل شکست
Torrejontaro	اسپانیا	وزنی	۶۲	۱۹۶۵	شکست یک دریچه
Wachi	ژاپن	بتنی وزنی	۲۴	۱۹۶۷	شکست یک دریچه
Walter Boulldin	آمریکا	خاکی	۳۷	۱۹۷۴	لغزش دیواره‌ی بالادست سد
Teton	آمریکا	خاکی	۹۳	۱۹۷۶	آب‌شستگی زیر پی
Del Monte	کلمبیا	خاکی	۳۳	۱۹۷۶	شکست یک دریچه
Euclides da Cunha	برزیل	خاکی	۶۳	۱۹۷۷	غرقاب شدن در سیلاب
Tous	اسپانیا	خاکی	۷۷	۱۹۸۲	غرقاب شدن در سیلاب

۱-۳ علل شکست سد

شکست سدهای خاکی و بتنی با احتمالات مختلف و نیز در اثر عوامل متفاوتی به‌وقوع می‌پیوندد. احتمال شکست سدهای خاکی در هر سال برابر $۱٫۵\times۱۰^{-۴}$ و احتمال شکست سدهای بتنی حدود $۰٫۴\times۱۰^{-۴}$ می‌باشد. ارقام مبین این واقعیت هستند که ایمنی سدهای بتنی بیشتر از سدهای خاکی است و خطر شکست سدهای خاکی تقریباً ۴ برابر سدهای بتنی است. تعداد سدهای خاکی ساخته شده به‌مراتب بیشتر از سدهای بتنی است و احتمال خرابی آن‌ها نیز در مقایسه با سدهای بتنی بیشتر است. بنابراین مشخص نیست احتمال بالای شکست این سازه‌ها ناشی از ضعف در ساختار سدهای خاکی است یا شمار بالای ساخت این بناها در مقایسه با سدهای بتنی باعث افزایش احتمال شکست این بناها می‌شود.

برخلاف سدهای خاکی، تا زمان حاضر هیچ‌یک از سدهای بتنی در حین عملیات ساخت سازه دچار حادثه‌ی شکست نشده‌اند، اما سدهای خاکی بارها در زمان عملیات ساخت دچار حادثه شده‌اند. تاکنون تعداد ۵ سد بتنی

[1] International Commission on Large Dams
[2] Singh

بزرگ شکسته شده‌اند که شکست این سدها در اثر به‌وقوع پیوستن سیلاب‌های بزرگ در زمان بهره‌برداری و یا به‌وجود آمدن اشکالات سازه‌ای و عدم باربری پی یا بدنه‌ی سد در طی زمان بهره‌برداری رخ داده است. وقوع سیلاب‌های بزرگ در محل ساخت سدهای خاکی معمولاً به آب‌شستگی درونی[1] و یا روگذری جریان و هم‌چنین فرسایش در پایاب سد منجر می‌شود. تغییرات ایجاد شده در میزان رطوبت خاک نیز بعضاً باعث تغییر باربری و یا فعال شدن درزه‌ها و گسل‌های غیرفعال ناحیه می‌شود که با وقوع زمین‌لرزه‌های مهیب، تخریب بنای سد را در پی خواهد داشت.

آمارها نشان می‌دهند که بیشترین شکست‌ها مربوط به سدهای کوچک بوده است. این مسئله می‌تواند به این خاطر باشد که سدهای کوچک مخازن کوچکی نیز دارند و معمولاً به منظور تأمین آب کشاورزی ساخته می‌شوند و تأسیسات وابسته ندارند، بنابراین در ساخت این دست از سازه‌ها، معیارهای ایمنی و پایداری کمتر در نظر گرفته می‌شوند و هزینه‌ی چندانی صرف انجام مطالعات هیدرولوژی و زمین‌شناسی در منطقه نمی‌شود. در این شرایط عدم کفایت این سازه‌ها در مقابل پدیده‌های پیش‌بینی نشده، طبیعی به‌نظر می‌رسد.

بیش‌تر شکست‌ها مربوط به سدهای ساخته شده‌ی جدید بوده‌اند. جالب توجه این‌که ۷۰ درصد از شکست‌ها در ۱۰ سال اول بهره‌برداری از سازه رخ داده است و از این تعداد، چندین سد دقیقاً در همان سال اول بهره‌برداری شکسته شده‌اند. البته بیشترین میزان شکست‌ها، در سدهایی رخ داده که در ۱۰ سال بین ۱۹۱۰ تا ۱۹۲۰ ساخته شده‌اند. با گذر زمان و گسترش دامنه‌ی دانش و تجربه‌ی بشر، پدیده‌ی شکست سد کمتر به‌وقوع پیوسته است. به‌طوری‌که ۲٫۲ درصد سدهای شکسته شده مربوط به سازه‌های ساخته شده قبل از سال‌های ۱۹۵۰میلادی (۱۳۲۹شمسی) بوده‌اند و درصد سدهای شکسته شده بعد از سال ۱۹۵۱ به کمتر از ۰٫۵ درصد کاهش یافته است.

با بررسی بقایای سدهای شکسته شده و تحلیل آثار و تبعات شکست آن‌ها در طبیعت، نتایج جالب توجهی در رابطه با عوامل مؤثر در به وقوع پیوستن پدیده‌ی شکست سد و خطراتی که پایداری و ایمنی سدها را تهدید می‌کند به‌دست آمده است که در یک جمع‌بندی کلی، به‌شرح زیر دسته‌بندی می‌شوند [۵]:

۱-۳-۱ علل شکست سدهای بتنی

عواملی که باعث بروز نارسایی و ضعف در عملکرد ایمن سدهای بتنی می‌شود و به احتمال قوی شکست و انهدام سازه را در پی دارد، به‌طور مختصر و فهرست‌وار عبارتند از:

۱) نقص در طراحی پی سد که موارد زیر را شامل می‌شود:
- عدم کفایت مطالعات اکتشافی در ساختگاه
- تغییرشکل و فرونشست زمین پی سد
- مقاومت برشی پایین پی
- نشست

[1] Piping

- فرسایش داخلی در پی و تکیه‌گاه‌ها
- ایجاد نیروهای کششی در پاشنه‌ی بالادست
- نقص سیستم آب‌بندی در پرده‌ی آب‌بند و سایر سیستم‌های آن
- نشت در سیستم زه‌کشی

۲) پایین بودن کیفیت بتن، نظیر:
- مقاومت پایین بتن در مقابل یخ‌زدگی
- نفوذپذیری بالا
- کهولت

۳) وقوع پدیده‌های پیش‌بینی نشده و یا وقوع پدیده‌هایی با مقادیر غیرمجاز مانند:
- زیرفشار
- لبریزی از بدنه‌ی سد و از تکیه‌گاه‌ها

۴) ناهنجاری در رفتار سازه‌ای قوس‌ها شامل پی و تکیه‌گاه‌های ساخته شده (بلوک‌های اطمینان)

۵) رفتار سازه‌ای سدهای پایه‌دار و وزنی شامل نیروهای تنشی فشاری[1]

۶) بروز جنگ، حملات زمینی و هوایی و هم‌چنین انفجارها

۱-۳-۲ علل شکست سدهای خاکی

احتمال بروز شکست سدهای خاکی بیشتر از سدهای بتنی است. این سدها نسبت به تغییر شرایط در منطقه و جاری شدن سیلاب‌ها یا حرکت زمین از خود حساسیت بیشتری نشان می‌دهند، بنابراین در معرض آسیب‌های مختلفی قرار می‌گیرند که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱) نقص در طراحی پی سد شامل:
- تغییرشکل و فرونشست زمین پی سد
- ناکافی بودن مقاومت برشی پی
- نشست در پی
- فرسایش درونی پی
- فعالیت لغزشی زمین‌های با پتانسیل لغزش قدیمی در محدوده‌ی سد

۲) نامناسب بودن مصالح خاکی بدنه‌ی سد و روش‌های طراحی و ساخت شامل:

[1] Compressive Stress