بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان‌نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران

گرایش سازه‌های هیدرولیکی

تحلیل و بررسی فشار آب منفذی در هسته سدهای خاکی (مطالعه موردی سد خاکی دوستی)

استاد راهنما :

دکتر غلامعباس بارانی

مولف :

علیرضا حبشی

شهریورماه ۱۳۸۸

تقدیم به :

پدر، مادر و خواهر عزیزم

که در تمام مراحل تحصیل مشوق و حامی من بودند.

تشکر و قدردانی :

خداوند را سپاس می‌گویم که راه علم را بر من گشود تا بدانم کـه هـیچ نـدانم. در مـدت تحـصیل اینجانب، استادان و دوستان گرامی، مرا همراهی و کمک بسیار نمودنـد. لـذا لازم مـی‌دانـم از ایـن عزیزان قدردانی نموده و زحمات ایشان را ارج نهم :

از ریاست محترم بخش مهندسی عمران و استاد راهنمای گرانقدر، جناب آقای پروفسور بارانی که افتخار شاگردی در محضر ایشان را در انجام این پایان‌نامه داشتم و بـا راهنمـایی‌هـای خردمندانـه و مستمر خویش مرا در این مرحله از تحصیل یاری نمودند، صمیمانه سپاسگذارم.

از اساتید خود در بخش عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان، جناب آقـای دکتـر خانجـانی و جنـاب آقای دکتر حسامی که با حضور در محضرشان، موجبات ارتقاء سطح علمی و فرهنگی اینجانب را فراهم نمودند، خالصانه قدردانی می‌نمایم.

از مهندسین مشاور طوس‌آب و به خصوص جناب آقایان مهندس همتی، دکتر مـسلمان‌زاده، دکتـر نیکخواه و مهندس احمدیان به واسطه مساعدت‌های بی‌دریغ‌شان،کمال تشکر را دارم.

همچنین از دوستان عزیزم جناب آقایان مهندس سعید علیـزاده، مهنـدس وحیـد خبیـری ، مهنـدس وحید وحدتی‌زاده، مهندس مجتبی معصومی و مهندس منصور شریف به خاطر کمک‌های ارزنـده در طول این تحقیق، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

کامیابی و بهروزی روزافزون را برای این عزیزان از خداوند متعال خواستارم.

چکیده:

با توجه به اینکه یکی از مشکلات مهم در سدسازی، احتمال تولید فشارهای حفره‌ای بالا در دوره ساخت می‌باشد، پژوهش حاضر به بررسی رفتار واقعی تغییرات فشارهای آب حفره‌ای در سدهای خاکی در دوره ساخت می‌پردازد. به عنوان مطالعه موردی، سد خاکی دوستی که به تازگی در مرز مشترک ایران و ترکمنستان احداث شده است، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

در این تحقیق در واقع سعی بر آن بوده است تا یک مدل رفتاری با پارامترهای واقع‌بینانه، سازگاری خوبی با رفتار اندازه‌گیری شده داشته باشد تا از این مدل برای حصول اطمینان بیشتر از رفتار فعلی سد استفاده نماییم، به این صورت که بعد از به دست آوردن مدل، صحت هر یک از اندازه‌گیری‌ها را از طریق مقایسه با الگوی به دست آمده توسط مدل کنترل می‌کنیم. به علاوه از این مدل جهت پیش‌بینی رفتار سد تحت بارگذاری و شرایطی که هنوز توسط سد تجربه نشده است مانند افزایش تراز آبگیری و همچنین افت سریع تراز مخزن در شرایط اضطراری بهره گیریم. بدین منظور ابتدا به کمک داده‌های ثبت شده توسط ابزاردقیق، نحوه تاثیرپذیری فشارهای آب حفره‌ای در هسته و پی سد در دوره ساخت و اولین آبگیری مخزن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند.در ادامه، بزرگترین و بحرانی‌ترین مقطع سد خاکی دوستی در دوره ساخت با استفاده از نرم‌افزار Plaxis و با معرفی داده‌های ورودی حاصل از نتایج آزمایشگاهی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و نتایج تحلیلی با داده‌های ابزار دقیق مقایسه گردیده‌اند. همچنین با کمک تحلیل‌های برگشتی پارامترهای واقع‌بینانه‌تری را بر اساس انطباق رفتار واقعی با نتایج آنالیز عددی برای مصالح هسته سد به دست آمده است.

کلید واژه: رفتارنگاری، آنالیز برگشتی، سد خاکی، فشار آب حفره‌ای، نرم‌افزار Plaxis

چکیده ..... و
فهرست اشکال ..... ک
فهرست جداول ..... ن
فصل اول: کلیات ۱
۱-۱ مقدمه ۲
۱-۲ خلاصه مطالب پایان‌نامه ۳
فصل دوم: ضرورت ابزاربندی سدها ٤
۲-۱ مقدمه ٥
۲-۲ نگاهی کوتاه به پتانسیل منابع آب ٦
۲-۲-۱ توزیع منابع آب جهان ٦
۲-۲-۲ توزیع منابع آب ایران ۷
۲-۲-۳ کمبود آب ۱۰
۲-۲-۴ استفاده بهینه از منابع آب ۱۱
۲-۳ تجزیه و تحلیل آمار شکستگی سدهای بزرگ جهان ۱۱
۲-۳-۱ تجزیه و تحیل حوادث شکستگی سدها ۱۲
۲-۳-۱-۱ تجزیه و تحیل کلی ۱۲
۲-۳-۱-۲ توزیع حوادث نسبت به مناطق جغرافیایی ۱٦
۲-۳-۱-۳ توزیع حوادث در حین ساختمان و آبگیری سدها ۱۷
۲-۳-۱-۴ توزیع حوادث نسبت به نوع سدها ۱۸
۲-۳-۱-۵ توزیع شکستگی نسبت به سن سدها ۱۹
۲-۳-۲ علل شکستگی سدهای خاکی ۲۰
۲-۳-۳ علل شکستگی سدهای بتنی و یا با مصالح بنایی ۲۱
۲-۳-۴ شکست دریچه‌ها ۲۲
۲-۳-۵ تعداد قربانیان ناشی از حوادث شکستگی سدها ۲۲
۲-۳-۶ تعداد قربانیان به ازاء هر شکست شد ۲۳
۲-۳-۷ تعداد قربانیان نسبت به نوع سدها ۲٦
۲-۳-۸ شکست سد زیزون ۲۷
فصل سوم: آشنائی با سیستم‌های ابزاربندی در سدهای خاکی- سنگریزه‌ای ۳۰
۳-۱ مقدمه ۳۱
۳-۲ تراوش ۳۱
۳-۲-۱ سرریزها ۳۲

۳-۲-۲ ظروف کالیبره شده ۳۳
۳-۲-۳ سرعت‌سنج‌ها ۳٤
۳-۲-۴ چاه‌های فشارشکن ۳٤
۳-۳ فشار آب حفره‌ای ۳۵
۳-۳-۱ چاه‌های مشاهده‌ای ۳٦
۳-۳-۲ پیزومترهای لوله قائم ۳۷
۳-۳-۳ پیزومترهای گازی ٤۰
۳-۳-۴ پیزومترهای دولوله‌ای هیدرولیکی ٤۱
۳-۳-۵ پیزومترهای الکتریکی ٤٤
۳-۴ فشارهای کل خاکریز ٤۷
۳-۴-۱ فشارسنج هیدرولیکی ٤۸
۳-۴-۲ فشارسنج الکتریکی ۵۰
۳-۵ اندازه‌گیری تغییرمکان‌های سطحی ۵۱
۳-۶ اندازه‌گیری تغییرمکان‌ها و تغییرشکل‌های داخلی سد ۵۳
۳-۶-۱ انحراف‌سنج ۵٤
۳-۶-۲ صفحات مغناطیسی اندازه‌گیری نشست ۵۷
۳-۶-۳ نشست‌سنج هیدرولیکی ۵۹
۳-۶-۴ نشست‌سنج دوسیاله ٦۱
۳-۶-۵ تغییرطول‌سنج‌های ثابت خاکریزها ٦۳
۳-۶-۶ تغییرطول‌سنجهای ثابت گمانه‌ای ٦٤
۳-۶-۷ نقاط نشست زیرسطحی ٦۵
۳-۷ اندازه‌گیری حرکات لرزه‌ای ٦۵
۳-۷-۱ شتاب نگار ٦۵
۳-۷-۲ ابزار هشداردهنده شتاب لرزه‌ای ٦۷
۳-۷-۳ شتاب‌نگار حداکثر (غیر الکترونیکی) ٦۷
فصل چهارم: معرفی سد خاکی دوستی و سیستم ابزار دقیق به کار رفته در آن ٦۸
۴-۱ مقدمه ٦۹
۴-۲ اهداف کلی طرح ٦۹
۴-۳ مشخصات کلی طرح ۷۰
۴-۳-۱ موقعیت و مشخصات رودخانه و حوضه آبریز ۷۰
۴-۳-۲ مشخصات سد ۷۰

۴-۳-۳ خصوصیات ساختگاه سد و مخزن ۷۶
۴-۳-۴ آببندی پی سد و تاسیسات ۷۶
۴-۴ خصوصیات مصالح ساختمانی ۷۷
۴-۴-۱ سنگ پی سد ۷۷
۴-۴-۲ بدنه سد ۷۸
۴-۴-۲-۱ مصالح هسته ۷۹
۴-۴-۲-۲ مصالح پوسته ۸۰
۴-۴-۲-۳ مصالح فیلتر ۸۱
۴-۴-۲-۴ مصالح زهکش ۸۴
۴-۴-۲-۵ مصالح سنگریز حفاظتی (ریپ رپ) ۸۵
۴-۵ تاریخچه ساخت و آبگیری سد ۸۶
۴-۶ مشخصات ابزارگذاری پی و بدنه سد ۸۷
۴-۶-۱ مقاطع ابزاربندی شده سد دوستی ۸۷
۴-۶-۲ سیستم اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای ۹۵
۴-۶-۲-۱ در حفاری‌ها (داخل پی) ۹۵
۴-۶-۲-۲ در بدنه سد ۹۷
فصل پنجم: بررسی فشارهای آب حفره‌ای در بدنه و پی سد با استفاده از اطلاعات ابزارهای به کار رفته ۹۹
۵-۱ مقدمه ۱۰۰
۵-۲ بررسی فشارهای آب حفره‌ای در مقاطع ابزاربندی شده سد ۱۰۱
۵-۲-۱ مقطع ۲-۲ ..... ۱۰۲
۵-۲-۲ مقطع ۳-۳ ..... ۱۰۵
۵-۲-۳ مقطع ۴-۴ ..... ۱۰۸
۵-۲-۴ مقطع ۹-۹ ..... ۱۱۲
۵-۲-۵ مقطع ۱۲-۱۲ ..... ۱۱۴
۵-۲-۶ مقطع ۱۶-۱۶ ..... ۱۱۶
فصل ششم: تحلیل استاتیکی سد دوستی با استفاده از نرم افزار Plaxis ۱۱۹
۶-۱ مقدمه ۱۲۰
۶-۲ ویژگی‌های برنامه Plaxis ۱۲۱
۶-۲-۱ رفتار زهکشی نشده فشار آب حفره‌ای اضافی ۱۲۲
۶-۲-۲ شرایط آب ۱۲۲

۶-۳ نحوه مدل‌سازی به کمک نرم‌افزار Plaxis ۱۲۳
۶-۳-۱ ساخت هندسه سد و تعریف مصالح و شبکه‌بندی آن ۱۲٤
۶-۳-۲ شبیه‌سازی مراحل ساخت ۱۲۷
۶-۳-۳ نتایج تحلیل عددی ۱۲۸
۶-۴ بررسی و مقایسه مقادیر فشارهای آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده و محاسباتی: ۱۳۵
۶-۴-۱ مقایسه نتایج در پیزومتر EPE 3-11 ..... ۱۳٦
۶-۴-۲ مقایسه نتایج در پیزومتر EPE 3-12 ..... ۱۳۷
۶-۴-۳ مقایسه نتایج در پیزومتر EPE 3-5 ..... ۱۳۸
۶-۴-۴ مقایسه نتایج در پیزومتر EPE 3-3 ..... ۱۳۸
فصل هفتم: نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات ۱٤۰
۷-۱ بحث و نتیجه‌گیری ۱٤۱
۷-۱ ارائه پیشنهادات ۱٤۳
مراجع ۱۴۵

شکل (۲-۱) : شکستگی سد موهن آلمان پس از بمباران در جنگ جهانی دوم [۵]..... ۱۲
شکل (۲-۲) : گسترش سیلاب ناشی از شکست سد زیزون در سوریه [۵ و ۱۰]..... ۲۷
شکل (۲-۳) : مقطع شکست‌خورده سد خاکی زیزون در سوریه [۵ و ۱۰] ۲۸
شکل (۳-۱) : نمونه‌ای از سرریز مثلثی شکل اندازه‌گیری دبی [۱۱] ۳۳
شکل (۳-۲) : چاه‌های فشارشکن و کلکتور اندازه‌گیری دبی تراوش [۱۱]..... ۳٤
شکل (۳-۳) : نمونه‌ای از چاه‌های مشاهده‌ای [۱۱]..... ۳۷
شکل (۳-۴) : جزئیات یک چاه مشاهده‌ای [۱۲] ۳۷
شکل (۳-۵) : جزئیات یک پیزومتر لوله قائم [۱۲]..... ۳۸
شکل (۳-۶) : نمونه‌ای از سوندهای اندازه‌گیری پیزومترهای قائم [۱۱] ۳۹
شکل (۳-۷) : مجموعه دستگاه و جعبه قرائت پیزومترهای گازی [۱۱]..... ٤۱
شکل (۳-۸) : جزئیات یک پیزومتر گازی [۱۲]..... ٤۱
شکل (۳-۹) : جزئیات پیزومتر هیدرولیکی [۱۲]..... ٤۳
شکل (۳-۱۰) : مجموعه دستگاه قرائت و گیج‌های پیزومترهای هیدرولیکی [۱۱] ٤٤
شکل (۳-۱۱) : جزئیات پیزومتر الکتریکی [۱۲] ٤۵
شکل (۳-۱۲) : نمایی از پیزومتر الکتریکی [۱۱]..... ٤٦
شکل (۳-۱۳) : نمای شماتیک دستگاه سنجش فشار کل خاک از نوع هیدرولیکی [۱۱]..... ٤۹
شکل (۳-۱۴) : مجموعه دستگاه قرائت فشار خاکریز [۱۱]..... ۵۰
شکل (۳-۱۵) : نمای شماتیک دستگاه سنجش فشار کل خاک از نوع تار مرتعش (الکتریکی) [۱۲]..... ۵۱
شکل (۳-۱۶) : نمونه‌ای از نقاط نشانه نصب شده روی تاج سد [۱۱] ۵۲
شکل (۳-۱۷) : نمونه‌ای از بنچ-مارکهای نصب شده روی تکیه‌گاه سد [۱۱] ۵۲
شکل (۳-۱۸) : نمای شماتیک سیستم انحراف‌سنج‌ها [۱۲]..... ۵٤
شکل (۳-۱۹) : نمونه‌ای از لوله‌های انحراف‌سنج نصب‌شده در پوسته سد سنگریزه‌ای [۱۱] ۵۵
شکل (۳-۲۰) : دستگاه قرائت دیجیتالی انحراف‌سنج‌ها [۱۱]..... ۵۵
شکل (۳-۲۱) : تصویر شماتیک نشست‌سنج مغناطیسی [۱۱] ۵۸
شکل (۳-۲۲) : ابزار قرائت (سوند) نشست‌سنج‌های مغناطیسی [۱۱]..... ۵۸
شکل (۳-۲۳) : تصویر شماتیک نشست‌سنج هیدرولیکی و نحوه عملکرد آن [۱۱]..... ۶۰
شکل (۳-۲۴) : تابلوی قرائت نشست‌سنج هیدرولیکی [۱۱]..... ۶۰
شکل (۳-۲۵) : تصویر شماتیک از بخش‌های مختلف دستگاه قرائت نشست‌سنج دوسیاله [۱۳]..... ۶۲
شکل (۳-۲۶) : مجموعه دستگاه قرائت نشست‌سنج دوسیاله [۱۱]..... ۶۲
شکل (۳-۲۷) : پمپ به حرکت درآورنده جیوه [۱۱] ۶۳

شکل (۳-۲۸) : دستگاه نشان‌دهنده دیجیتال [۱۱]..... ٦٣
شکل (۳-۲۹) : شتاب‌نگار دیجیتال [۱۱]..... ٦٦
شکل (۴-۱) : نمایی از بدنه سد دوستی [۴]..... ٧٣
شکل (۴-۲) : نمایی از سیستم تخلیه‌کننده تحتانی سد دوستی [۴]..... ٧٤
شکل (۴-۳) : نمایی از سیستم آبگیری سد دوستی [۴]..... ٧٤
شکل (۴-۴) : نمایی از سرریز سد دوستی [۴]..... ٧٥
شکل (۴-۵) : نمایی از دریاچه سد دوستی [۴]..... ٧٥
شکل (۴-۶) : پلان سد دوستی [۴]..... ٧٨
شکل (۴-۷) : مقطع عرضی تیپ بدنه سد دوستی [۴]..... ٧٩
شکل (۴-۸) : موقعیت ابزارهای واقع در مقطع ۲-۲ [۴]..... ٨٩
شکل (۴-۹) : موقعیت ابزارهای واقع در مقطع ۳-۳ [۴]..... ٩٠
شکل (۴-۱۰) : موقعیت ابزارهای واقع در مقطع ۴-۴ [۴]..... ٩١
شکل (۴-۱۱) : موقعیت ابزارهای واقع در مقطع ۹-۹ [۴]..... ٩٢
شکل (۴-۱۲) : موقعیت ابزارهای واقع در مقطع ۱۲-۱۲ [۴]..... ٩٣
شکل (۴-۱۳) : موقعیت ابزارهای واقع در مقطع ۱۶-۱۶ [۴]..... ٩٤
شکل (۵-۱) : موقعیت پیزومترهای واقع در مقطع ۲-۲ [۴]..... ١٠٣
شکل (۵-۲) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۰۴ در مقطع ۲-۲ [۴]..... ١٠٣
شکل (۵-۳) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۳۷ در مقطع ۲-۲ [۴]..... ١٠٤
شکل (۵-۴) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۵۹ در مقطع ۲-۲ [۴]..... ١٠٤
شکل (۵-۵) : موقعیت پیزومترهای واقع در مقطع ۳-۳ [۴]..... ١٠٥
شکل (۵-۶) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۰۰ در مقطع ۳-۳ [۴]..... ١٠٦
شکل (۵-۷) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۱۶ در مقطع ۳-۳ [۴]..... ١٠٧
شکل (۵-۸) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۳۷ در مقطع ۳-۳ [۴]..... ١٠٨
شکل (۵-۹) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۵۹ در مقطع ۳-۳ [۴]..... ١٠٨
شکل (۵-۱۰) : موقعیت پیزومترهای واقع در مقطع ۴-۴ [۴]..... ١٠٩
شکل (۵-۱۱) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۰۰ در مقطع ۴-۴ [۴]..... ١١٠
شکل (۵-۱۲) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۱۶ در مقطع ۴-۴ [۴]..... ١١٠
شکل (۵-۱۳) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۳۷ در مقطع ۴-۴ [۴]..... ١١١
شکل (۵-۱۴) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۵۹ در مقطع ۴-۴ [۴]..... ١١١
شکل (۵-۱۵) : موقعیت پیزومترهای واقع در مقطع ۹-۹ [۴]..... ١١٢

شکل (۵-۱۶) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۱۳ در مقطع ۹-۹ [۴]..... ۱۱۳
شکل (۵-۱۷) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۵۷ در مقطع ۹-۹ [۴]..... ۱۱۳
شکل (۵-۱۸) : موقعیت پیزومترهای واقع در مقطع ۱۲-۱۲ [۴]..... ۱۱٤
شکل (۵-۱۹) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۳۷ در مقطع ۱۲-۱۲ [۴] ۱۱۵
شکل (۵-۲۰) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۵۷ در مقطع ۱۲-۱۲ [۴] ۱۱٦
شکل (۵-۲۱) : موقعیت پیزومترهای واقع در مقطع ۱۶-۱۶ [۴]..... ۱۱۷
شکل (۵-۲۲) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۴۰ در مقطع ۱۶-۱۶ [۴] ۱۱۸
شکل (۵-۲۳) : نمودار تغییرات فشار آب حفره‌ای پیزومترهای تراز ۴۵۷ در مقطع ۱۶-۱۶ [۴] ۱۱۸
شکل (۶-۱) : نمای کلی هندسه سد و بدنه سد در مدل ۱۲۵
شکل (۶-۲) : نمایی از المان‌بندی پی و بدنه سد..... ۱۲۷
شکل (۶-۳) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از اتمام خاکریزی ۱۲۹
شکل (۶-۴) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از ۷۱ متر از خاکریزی..... ۱۲۹
شکل (۶-۵) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از ۶۵ متر از خاکریزی..... ۱۳۰
شکل (۶-۶) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از ۵۹ متر از خاکریزی..... ۱۳۰
شکل (۶-۷) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از ۵۱ متر از خاکریزی..... ۱۳۱
شکل (۶-۸) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از ۴۴ متر از خاکریزی..... ۱۳۱
شکل (۶-۹) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از ۳۷ متر از خاکریزی..... ۱۳۲
شکل (۶-۱۰) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از ۳۱ متر از خاکریزی..... ۱۳۲
شکل (۶-۱۱) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از ۲۳ متر از خاکریزی..... ۱۳۳
شکل (۶-۱۲) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از ۱۶ متر از خاکریزی..... ۱۳۳
شکل (۶-۱۳) : کانتورهای فشار آب حفره‌ای ایجاد شده در هسته پس از ۸ متر از خاکریزی..... ۱۳٤
شکل (۶-۱۴) : موقعیت پیزومترهای مقطع ۳-۳..... ۱۳۵
شکل (۶-۱۵) : مقایسه نتایج فشار آب حفره‌ای در پیزومتر EPE 3-11 با مقادیر آنالیز عددی..... ۱۳٦
شکل (۶-۱۶) : مقایسه ضریب فشار آب حفره‌ای در پیزومتر EPE 3-11 با مقادیر آنالیز عددی..... ۱۳٦
شکل (۶-۱۷) : مقایسه نتایج فشار آب حفره‌ای در پیزومتر EPE 3-12 با مقادیر آنالیز عددی..... ۱۳۷
شکل (۶-۱۸) : مقایسه ضریب فشار آب حفره‌ای در پیزومتر EPE 3-12 با مقادیر آنالیز عددی..... ۱۳۷
شکل (۶-۱۹) : مقایسه نتایج فشار آب حفره‌ای در پیزومتر EPE 3-5 با مقادیر آنالیز عددی ۱۳۸
شکل (۶-۲۰) : مقایسه ضریب فشار آب حفره‌ای در پیزومتر EPE 3-5 با مقادیر آنالیز عددی..... ۱۳۸
شکل (۶-۲۱) : مقایسه نتایج فشار آب حفره‌ای در پیزومتر EPE 3-3 با مقادیر آنالیز عددی ۱۳۹

جدول (۲-۱) : توزیع منابع آب جهان [۵] ۷
جدول (۲-۲) : توزیع منابع آبهای سطحی حوضه‌های آبریز ایران [۵ و ۶] ۸
جدول (۲-۳) : توزیع منابع آبهای زیرزمینی در حوضه‌های آبریز ایران [۵ و ۶] ۸
جدول (۲-۴) : بندهای قدیمی کشور [۵ و ۷] ۹
جدول (۲-۵) : مشخصات سدهای بزرگ ایران که در فاصله زمانی ۱۳۷۸-۱۳۲۸ بهره‌برداری گردیده‌اند [۵ و ۷] ۹
جدول (۲-۶) : توزیع زمانی شکست سدهای بزرگ در سطح جهان (غیر از چین) [۵] ۱۳
جدول (۲-۷) : توزیع شکست سدهای بزرگ و فرکانس شکستگی‌ها در کشورهای مختلف [۵] ۱٤
جدول (۲-۸) : توزیع شکستگی سدها نسبت به منطقه جغرافیایی در فاصله زمانی ۱۹۸۳– ۱۹۶۴ [۵] ۱۷
جدول (۲-۹) : شکستگی سدهای با حداقل ۱۵ متر (ارتفاع نهایی) در حین ساختمان و اولین بار آبگیری سدها در فاصله زمانی ۱۹۸۳ – ۱۹۶۴ [۵] ۱۸
جدول (۲-۱۰) : تعداد شکستگی سدها نسبت به نوع تاسیسات در فاصله زمانی ۱۹۸۳- ۱۹۶۴ [۵] ۱۹
جدول (۲-۱۱) : توزیع شکستگی‌های سدها نسبت به سن در فاصله زمانی ۱۹۸۳- ۱۹۶۴ [۵] ۲۰
جدول (۲-۱۲) : علل شکستگی سدها در فاصله زمانی ۱۹۸۳- ۱۹۶۴ [۵] ۲۱
جدول (۲-۱۳) : شکستگی سدهای دارای آمار قربانیان مشخص در فاصله زمانی ۱۹۸۳ – ۱۹۶۴ [۵] ۲۳
جدول (۲-۱۴) : تعداد شکستگی‌های دارای قربانیان مشخص نسبت به کشور و نوع سد بین سال‌های ۱۹۸۳– ۱۸۰۰ [۵] ۲۵
جدول (۲-۱۵) : تعداد قربانیان شکستگی سدها در سالیان گذشته (از سال ۱۸۵۵ تا ۱۹۸۴) [۵] ۲٦
جدول (۳-۱) : مقایسه ابزارهای اندازه‌گیری فشار پیزومتریک [۱۱] ٤۷
جدول (۴-۱) : فهرست ابزارهای سد دوستی [۴] ۸۸
جدول (۴-۲) : فهرست پیزومترهای نصب شده در پی سد دوستی [۴] ۹٦
جدول (۴-۳) : فهرست پیزومترهای نصب شده در هسته و بدنه سد دوستی [۴] ۹۷
جدول (۶-۱) : مقادیر ورودی اولیه پارامترهای مصالح پی و بدنه سد ۱۲٦

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

امروزه فراهم کردن آب مورد نیاز انسان یکی از مشکلات اساسی جوامع بشری می باشد. محدودیت منابع آب در جهان سبب اجرای روش‌های متعددی برای استفاده حداکثر از منابع موجود شده است. یکی از این روش‌ها احداث سد می باشد. سدها به دو نوع بتنی و خاکی تقسیم می شوند که سدهای خاکی به دلیل در دسترس بودن مصالح ساخت و همچنین رفتار مناسب در مقابل زلزله از عمومیت بیشتری برخوردار می‌باشند. به طور کلی سدها از نظر اقتصادی، اجتماعی و سیاسی دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشند. به علت بالا بودن هزینه ساخت سدها و نیز شدت وخامت ناشی از ناپایداری سدها، مسئله حفاظت و نگهداری و ارزیابی مستمر ایمنی و پایداری سدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد [۱].

در طراحی هر سازه‌ای نظیر یک سد خاکی، علاوه بر در نظر گرفتن یک سری مفروضات و معیارها برای بررسی و کنترل رفتار آن سد در دوره‌های ساخت، آبگیری و بهره‌برداری، اندازه‌گیری برخی پارامترهایی که بتوان به کمک آنها مفروضات طراحی و همچنین عملکرد رفتاری آن را از نظر پایداری کنترل نمود، توسط تجهیزاتی به نام ابزار دقیق[1] انجام می‌شود. به طور کلی بررسی عملکرد سد با استفاده از مشاهدات عینی و ابزارگذاری می‌تواند در ارزیابی پارامترها و فرضیات طراحی و کسب اطلاعات به منظور تعیین رفتار و همچنین کنترل سد کمک شایانی نموده و امکان دریافت هشدارهایی در مورد احتمال مشکل‌آفرینی در سد جهت انجام اقدامات ضروری را فراهم آورد [۲].

رفتارنگاری سدهای خاکی به دلیل رفتار پیچیده خاک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. رفتار نگاری به بررسی عملکرد سد در مراحل مختلف ساخت، اولین آبگیری و دوران بهره‌برداری اطلاق می‌شود که به منظور نیل به سه هدف اصلی صورت می‌پذیرد: بررسی رفتار سد به لحاظ ایمنی، مقایسه عملکرد واقعی سد با پیش‌بینی‌های طراحی و تجربه‌ای برای طرح‌های آینده [۳].

در سدهای بزرگ دنیا، ابزاربندی و رفتارسنجی به منظور کنترل ساخت، تضمین ایمنی و کاهش هزینه‌های اجرایی به عنوان بخش لاینفک از فرآیند طراحی سدها می‌باشد. امروزه در تمامی سدهای بزرگ و حتی بیشتر سدهای کوچک مقادیر فشار منفذی، فشارهای توده خاک و تغییر شکل‌ها در زمان ساخت، اولین آبگیری، دوران بهره‌برداری و هنگام تخلیه سریع مخزن

---

[1] Instrumentation

اندازه‌گیری شده و عملکرد سد مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. رفتارسنجی در حین ساخت به منظور تحلیل سریع ایمنی آن و در زمان بهره‌برداری جهت ارائه تصویری واقعی از تمامی تغییرات و ارزیابی ایمنی سد بر اساس مشاهدات درازمدت داده‌ها، از مهم‌ترین اهداف رفتارنگاری سدها می‌باشد.

۱-۲ خلاصه مطالب پایان‌نامه

در این تحقیق رفتار فشار آب حفره‌ای سد دوستی مورد ارزیابی قرار گرفته است. سد دوستی یک سد خاکی با هسته رسی- سیلتی قائم به ارتفاع ۷۸ متر از بستر رودخانه و طول تاج ٦٥٥ متر می‌باشد. این سد بزرگ‌ترین سد خاکی استان خراسان رضوی می‌باشد و در شمال شرقی استان و در فاصله ۲۵۰ کیلومتری شرق مشهد بر روی رودخانه مرزی مشترک ایران-ترکمنستان به نام هریرود واقع شده است. به منظور رفتارنگاری این سد حدود ٤٦٥ ابزار دقیق در ٦ مقطع مختلف جانمایی شده است. این سد قادر است حجمی معادل ۱/۲۵ میلیارد مترمکعب آب را در مخزن خود ذخیره نماید. از این رو می‌توان حدس زد که در صورت وقوع هرگونه مشکل در رفتار سد و احتمالا شکست آن و آزاد شدن این پتانسیل عظیم ذخیره شده در پشت سد، چه فاجعه عظیم انسانی به وقوع خواهد پیوست. بنابراین درمی‌یابیم که که ارزیابی و کنترل مداوم و دقیق رفتار این سد تا چه حد حائز اهمیت می‌باشد [٤].

این تحقیق مشتمل بر ۷ فصل می‌باشد. در فصل دوم، ضرورت ابزاربندی سدها بیان گردیده است. در فصل سوم، روش‌ها و ابزارهای اندازه‌گیری کمیت‌ها در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در فصل چهارم، مشخصات سد خاکی دوستی بیان گردیده و انواع ابزارهای به کار رفته در مقاطع مختلف سد معرفی شده‌اند. در فصل پنجم، به کمک داده‌های ابزاردقیق نحوه تاثیر پذیری فشارهای آب حفره‌ای در هسته و پی سد در دوره ساخت و اولین آبگیری مخزن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. در فصل ششم، نرم‌افزار به کار گرفته شده در این پایان‌نامه معرفی گردیده و با استفاده از مدل اجزای محدود ساخته شده به کمک این نرم‌افزار، به تحلیل استاتیکی سد و تعیین فشارهای آب حفره‌ای پرداخته شده است. در نهایت در فصل هفتم، با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج حاصل از مدل‌سازی ، جمع بندی نهایی انجام و تصویری مناسب از رفتار سد مذبور ارائه گردیده است و همچنین پیشنهادهایی برای تحقیقات و پژوهش‌های آینده داده شده است.

فصل دوم

ضرورت ابزاربندی سدها

۲-۱ مقدمه

سرزمین پهناور ایران در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته و توزیع ناموزون جریان‌های سطحی، محدویت‌های عمده‌ای را در امر استفاده بهینه از آب، این عنصر حیاتی به وجود آورده است. به علاوه قسمت اعظم این جریان‌ها قبل از این که مورد استفاده قرار گیرند، از دسترس خارج شده و به سوی دریا سرازیر می‌گردند. از آنجایی که تامین آب همواره نیاز اساسی بشر برای استفاده‌های کشاورزی، صنعتی و آب شرب شهرها بوده است، لذا مهار سیلاب‌ها و آب‌های جاری از طریق احداث سد، از کارهای اساسی و زیربنایی محسوب و برای نیل به خودکفایی اقتصادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این نیاز از دیرباز در کشورمان مورد توجه بوده و آثار بی‌شماری از سدهای قدیمی با قدمت چند هزارساله در گوشه و کنار این سرزمین گواه بارزی بر این مدعا است و آثاری که در این زمینه به دست آمده است، نشان می‌دهد که پیشینیان و نیاکان ما از قرن‌ها پیش با دانش و فن سدسازی آشنایی کامل داشته و با احداث تاسیسات آبی مختلف و انواع سدها که پس از گذشت صدها سال هنوز استوار و پایدار باقی مانده‌اند، تحسین و اعجاب متخصصان و صاحب نظران بین‌المللی را در عصر حاضر برانگیخته‌اند.

توزیع ناموزون زمانی و مکانی بارندگی‌ها به دلیل واقع شدن کشورایران در منطقه جغرافیایی خشک و نیمه‌خشک ایجاب می‌کند که جریان‌های سطحی از طریق احداث سدها مهار و کنترل شود که این امر در کشور ما با توجه به اهمیت مساله و لزوم دستیابی به توسعه پایدار، در سال‌های اخیر رشد چشمگیری به خود گرفته است. افزایش روزافزون تعداد سدهای بزرگ با ابعاد عظیم گرچه از نظر اقتصادی، اجتماعی و سیاسی برای جوامع بشری از منافع حیاتی برخوردار است ولیکن در صورت بروز حوادث ناگوار و از جمله شکستگی سدها و رها شدن ناگهانی توده عظیم آب انبار شده در پشت سدها که هرگز با دبی‌های سیلابی و پیش‌بینی شده معمولی قابل مقایسه نمی‌باشد، در پایین‌دست سد می‌تواند خطرات جانی و مالی فراوانی را ایجاد نماید. با نگرش کوتاه و اجمالی بر تعداد سدهای بزرگ ساخته شده در سطح جهانی و تعداد شکست‌های به وقوع پیوسته، احتمال خطر شکستگی هر سد در سال حدود $۱۰^{-۴}$ تخمین زده می‌شود. گرچه این احتمال ظاهرا ضعیف می‌باشد ولیکن نادیده گرفتن آن نیز با توجه به اهمیت مساله و تجارب تلخ عینی موجود، غیرمعقول و غیرمنطقی خواهد بود [۵].

علیرغم اعمال ضریب اطمینان بالای در طراحی و ساخت سدها، احتمال شکست آنها همانند سایر تاسیسات ساخت بشر منتفی نبوده بلکه تجارب عینی، از بروز اینگونه حوادث در طول تاریخ

هیدرولیک حکایت می‌کند. اغلب شکستگی‌های سدها را می‌توان ناشی از بروز حوادثی نظیر وقوع رگبارهای شدید و طغیان رودخانه‌ها، ناکافی بودن ظرفیت تخلیه‌کننده سدها، وقوع زلزله، نارسائیهای موجود در پی، وقوع پدیده رگاب و بالاخره بمباران دانست. پیشروی امواج ناشی از جریان‌های سیلابی سهمگین در دره پایین‌دست محل شکستگی سدها و گسترش آنها در دشت‌های مجاور، خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را به دنبال دارد. به منظور کاهش خسارت‌های ناشی از شکست سدها لازم است قبل از طرح و احداث این تاسیسات عظیم، تدابیر ایمنی کافی اتخاذ گردیده و ضمن نصب علائم هشداردهنده در محل سدها، نقشه مناطق سیل‌گیر پایین‌دست آنها تهیه گردیده و آموزش‌های لازم نیز به کاربران و ساکنین مجتمع‌های پایین‌دست داده شود.

در این فصل ضمن نگاهی کوتاه به پتانسیل منابع آب جهان و ایران، به تجزیه و تحلیل آمار شکستگی سدها در سطح جهانی و بیان علل و عواقب آنها پرداخته شده است.

۲-۲ نگاهی کوتاه به پتانسیل منابع آب

یکی از بحث‌های مهم و اساسی در عرصه زیست محیطی که به حیات و بقای بشریت ارتباط مستقیم پیدا می‌کند، مساله آب یا به بیانی دیگر معضل و کمبود آب در جهان است. کشور ما نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی‌اش از این بابت دچار مشکل بنیادی است. پرداختن به کمبود آب شیرین و ارائه راهکارهای کارشناسانه بی‌تردید می‌تواند راهگشا باشد. در این بخش با زبان آمار و ارقام، توزیع منابع آب ایران و جهان مورد مطالعه است.

۲-۲-۱ توزیع منابع آب جهان

گرچه آب به وفور در سطح کره زمین یافت می‌شود و ۷۱ ٪ سطح آن را با جمعی معادل ۱/۴ میلیارد کیلومتر مکعب (جدول ۲-۱) پوشش می‌دهد، ولیکن فقط بخش کوچکی از آن قابل استفاده است. آب شیرین تنها ۲/۵ ٪ منابع آب کل کره زمین را به صورت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی تشکیل می‌دهد که اگر آب‌های شیرین غیر قابل استحصال نظیر رطوبت خاک، آب باتلاق‌ها و یخ‌های درون خاک و اراضی دائما منجمد از آن کسر گردد، آب شرب قابل استحصال تجدیدشونده رودخانه‌ها، نهرها، دریاچه‌های کوچک و آب‌های زیرزمینی تنها به حدود ۰/۳ ٪ محدود می‌گردد که در درازمدت همین آب‌های تجدیدشونده کره زمین است که برای مصرف

در سالیان متمادی می‌توان به آنها اتکا نمود. مصارف عمده منابع آب جهان نیز حدود ۸۰ ٪ به بخش کشاورزی و ۱۴ ٪ به بخش صنعت تعلق دارد و در نتیجه تنها ۶ ٪ باقیمانده به مصارف خانگی و بهداشتی انسان‌ها اختصاص می‌یابد [۵].

جدول (۲-۱) : توزیع منابع آب جهان [۵]

نوع آب	حجم آب (هزار کیلومتر مکعب)	کل ذخیر آب (٪)	ذخایر آب شیرین (٪)
دریا	۱۳۳۸۰۰۰	۹۶/۵	–
کل آب‌های زیرزمینی	۲۳۴۰۰	۱/۷	–
سفره‌های آب شیرین	۱۰۵۳۰	۰/۷۶	۳۰/۱
یخچال‌ها و ذخایر دائمی برف	۲۴۰۶۴	۱/۷۴	۶۸/۷
یخ‌های زیرزمینی	۳۰۰	۰/۰۲۲	۰/۸۶
دریاچه ها	۱۷۶	۰/۰۱۳	–
آب شیرین	۹۱	۰/۰۰۷	۰/۲۶
آب شور	۸۵	۰/۰۰۶	–
باتلاق‌ها	۱۱/۵	۰/۰۰۰۸	۰/۰۳
آب‌های جاری	۲/۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۶
آب بیوسفر	۱/۱	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۳
آب اتمسفر	۱۲/۹	۰/۰۰۰۹	۰/۰۴
جمع	۱۳۸۵۹۸۴	۱۰۰	–
آب شیرین	۳۵۰۲۹	۲/۵۳	–

۲-۲-۲ توزیع منابع آب ایران

مجموع پتانسیل منابع آب کشورمان تقریبا ۱۲۸/۵ میلیارد متر مکعب در سال برآورده شده که به صورت منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی به شرح زیر توزیع می‌گردد :

الف- منابع آب‌های سطحی (جدول۲-۲) حدود ۷۹/۵ میلیارد مترمکعب در سال یعنی ۶۲ در صد کل منابع آب کشور.

ب- منابع آب‌های زیرزمینی (جدول۲-۳) حدود ۴۹ میلیارد مترمکعب در سال یعنی ۳۸ ٪ کل منابع آب کشور [۵].

به طوری که ملاحظه می‌شود منابع آب در شش حوضه آبریز کشور به طور ناموزون توزیع شده است. درگذشته، توزیع نامناسب و ناموزون زمانی و مکانی منابع آب مشکل عمده نیاکان ما در تهیه و بهره‌برداری از این منابع بوده است و آنها از طریق حفر قنوات نسبت به استخراج آب‌های زیرزمینی اقدام می‌کردند که این روش ابتکاری در تاریخ هیدرولیک به نام روش ویژه ایرانیان در