بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه ارومیه

دانشکده کشاورزی

گروه مهندسی آب

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته سازه‌های آبی

موضوع:

تاثیر خصوصیات هیدرولیکی مصالح سدهای غیرهمگن بر پایداری آن

اساتید راهنما:

دکتر حجت احمدی **دکتر نادر عباسی**

اساتید داور:

دکتر مهدی یاسی **دکتر کامران زینال‌زاده**

تنظیم و نگارش:

ثمر بهروزی‌نیا

بهمن ۱۳۹۲

حق نشر و چاپ برای دانشگاه ارومیه محفوظ است

به پاس قدردانی از

قلب هایی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برایم فراهم نمودند.
آنان که لحظات ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگیم، مدیون حضور سبز آنهاست.

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به

پدر و مادر فداکارم

که وجودم جز هدیه وجودشان نیست

و خواهر و برادر عزیزم

تقدیر و تشکر

سپاس بیکران پروردگار یکتا را که هستی‌ام بخشید و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرم نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیم ساخت و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، خویشتن را در طریق علم و معرفت بیازمایم.

بر خود لازم می‌دانم از استاد گرانقدرم جناب آقای دکتر احمدی که صادقانه و در کمال سعه صدر بنده را در این تحقیق راهنمایی نمودند صمیمانه قدردانی نمایم.
با تشکر بی‌دریغ خدمت استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر عباسی به سبب همراهی ایشان در تمام طول تحصیلم که وجودشان مایه دلگرمی و رهنمودهایشان راهگشای زندگیم بوده است.
با احترام فراوان، سپاسگزارم از استاد دانشمند و فرهیخته‌ام جناب آقای دکتر یاسی به سبب تمام آموخته‌هایم و و روزهای یادگیری زیبایی که در مقام یک دانشجو با ایشان سپری کردم.

و با تشکر خالصانه از دوستان گران‌مایه‌ام:
خانم سمانه نوری که در سایه همیاری و همدلی او به این هدف دست یافتم و خانم‌ها شکوفه سلیمانی‌نیا، بهاره عزیزپور، مریم سلطانپور، لعیا نصیری، ندا خانمحمدی و سمیه مصطفوی که مرا صمیمانه و مشفقانه یاری نمودند.

و در نهایت با تشکر از همه کسانی که به نوعی بنده را در به انجام رساندن این مهم همراهی کردند.

چکیده:

محاسبه دقیق تراوش از بدنه و پی سد از جهات فنی و اقتصادی حائز اهمیت است، زیرا جریان آب، باعث به وجود آمدن فشار آب حفره‌ای و نیروهای تراوشی می‌شود که در صورت تجاوز این نیروها از حد بحرانی، پایداری مصالح بدنه و پی سد را با چالش جدی مواجه می‌کند. به همین دلیل بحث کنترل پایداری سدها لازم و ضروری به نظر می‌رسد. هدف از انجام این تحقیق، بررسی تاثیر عواملی همچون خصوصیات هیدرولیکی مصالح، مقدار و شدت تخلیه و آبگیری در موقعیت و شکل منحنی فریاتیک، فشار آب حفره‌ای و متعاقب آن در پایداری شیب بالادست و پایین‌دست سد خاکی همگن و غیرهمگن با هسته قائم رسی و در نهایت بررسی اثر نوسانات تراز آب، در قالب اعمال وضعیت‌های متفاوت مخزن بر روند ضرایب اطمینان و تشخیص مراحل بحرانی (حداقل ضرایب اطمینان) می‌باشد. توابع نفوذپذیری مصالح بدنه به سه شکل کلی تخمین غیرخطی نفوذپذیری برحسب مکش، ضرایب نفوذپذیری ثابت و مستقل از مکش و تخمین خطی طبق توصیه نرم‌افزار در تحلیل‌های تراوش و پایداری اعمال شد. سپس با لحاظ چهار وضعیت متفاوت مخزن، تحلیل‌های تراوش و پایداری توسط نرم‌افزار*Geostudio* (زیر برنامه‌های *seep/w* و *slope/w*) در دو حالت پایدار و گذرا، با اعمال چهار شدت تخلیه و آبگیری متفاوت انجام گردید. جهت اعتبارسنجی برخی نتایج تحلیل، از داده‌های ابزار دقیق ثبت شده‌ی سد خاکی شهرچای استفاده شد. نتایج، ناکارآمد بودن تئوری اشباع کامل و لزوم بکارگیری تئوری اشباع/ غیراشباع جهت شبیه‌سازی شکل و تغییرات منحنی فریاتیک و فشار آب حفره‌ای خاکریز در معرض نوسانات تراز آب مخزن را نشان داد. مشخص گردید تابع هدایت هیدرولیکی و منحنی مشخصه رطوبتی باید برای تمام مواد و مصالح در مساله‌ای که ناحیه غیراشباع دارد، تعیین شود. حتی در صورتی که توابع یک تقریب باشند، نتایج نسبت به حالتی که خصوصیات هیدرولیکی به صورت یک خط افقی صاف وارد شود، واقعی‌تر است. اعمال خصوصیات هیدرولیکی ثابت (اشباع) در هر سه لایه و یا در پوسته پایین‌دست، ضرایب اطمینان شیب پایین دست را در حالت تراوش دائم و آبگیری به ترتیب ۱/۴۳ و ۱/۴۸ برابر بیشتر از وضعیت اعمال خصوصیات هیدرولیکی متغیر (غیراشباع) برآورد می‌کند. همچنین تاثیر منحنی مشخصه رطوبتی و تغییرات شیب (m_w) این تابع در شدت تخلیه و آبگیری و متعاقبا فشار آب حفره‌ای و مقاومت برشی ناشی از اعمال مکش توسط این منحنی بسیار قابل توجه است. بطوریکه با کاهش آن و نزدیک شدن به حالت ثابت، روند ضرایب اطمینان و موقعیت حالات بحرانی نیز تغییر می‌کند. همچنین پیچیدگی تفسیر مقادیر ضرایب اطمینان و روندهای حاصله با تغییرات تراز آب مخزن به علت تاثیر قابل توجه سه عامل فشار آب حفره‌ای، مکش ماتریک و فشار آب مخزن، ضرورت بکارگیری شرایط نزدیک به واقعیت در ناحیه غیراشباع را مشخص می‌کند.

کلمات کلیدی: تراوش، هدایت هیدرولیکی، منحنی مشخصه رطوبتی، سد همگن، پایداری شیب، سد غیرهمگن

فهرست مطالب

فصل اول/ کلیات

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ تشریح موضوع و بیان مسئله ۲

۱-۳ اهمیت و ضرورت انجام تحقیق ۳

۱-۴ فرضیه‌های تحقیق ۴

۱-۵ اهداف تحقیق ۴

۱-۶ ساختار تحقیق ۵

فصل دوم/ پیشینه تحقیق و بررسی ادبیات موضوع

۲-۱ مقدمه ۶

۲-۲ پیشینه تحقیق ۷

۲-۲-۱ بررسی تراوش در شرایط اشباع و غیراشباع ۷

۲-۲-۲ بررسی روش عددی در تحلیل استاتیکی پایداری سد خاکی ۱۲

۲-۲-۳ بررسی روش تعادل حدی در تحلیل استاتیکی پایداری سد خاکی ۱۳

۲-۳ بررسی ادبیات موضوع ۱۷

۲-۳-۱ مکانیک خاک‌های غیراشباع ۱۷

۲-۳-۲ طبقه‌بندی سدهای خاکی برحسب نوع مصالح ۲۳

۲-۳-۳ تراوش از درون بدنه سد خاکی ۲۴

۲-۳-۴ روش‌های محاسبه میزان تراوش ۲۵

۲-۳-۵ ضرایب نفوذپذیری در یک خاک غیراشباع ۲۷

۲-۳-۶ مراحل بحرانی در تحلیل سدهای خاکی ۲۸

۲-۳-۷ مطالعه تحلیل پایداری شیب ۳۰

فصل سوم/ روش تحقیق

۳-۱ مقدمه ۳۶

۳-۲ مشخصات نمونه خاک‌های انتخاب شده از پایگاه داده خاک‌های غیراشباع ۴۰

۳-۳ مدل‌های مصالح در نرم‌افزار *seep/w* ۴۵

۳-۴ خصوصیات هیدرولیکی مصالح در نرم‌افزار *seep/w* ۴۶

۳-۴-۱ قابلیت نگهداری آب در خاک- تابع درصد رطوبت ۴۶

۳-۴-۲ هدایت هیدرولیکی ۵۲

۳-۵ انتخاب مصالح سد خاکی همگن و غیرهمگن ۵۶

۳-۵-۱ توابع نفوذپذیری مصالح سد خاکی همگن جهت تحلیل تراوش و پایداری ۵۹

۳-۵-۲ توابع نفوذپذیری مصالح سد خاکی غیرهمگن جهت تحلیل تراوش و پایداری ۶۰

۳-۶ تعیین ابعاد هندسی سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی ۶۲

۳-۷ مطالعه موردی: سد شهرچای ۶۵

۳-۷-۱ معرفی سد شهرچای و بررسی داده‌های ابزار دقیق ۶۵

۳-۷-۲ مشخصات کلی پروژه ۶۵

۳-۷-۳ مصالح مورد استفاده در بدنه سد ۶۶

۳-۷-۴ پیزومترهای بدنه سد شهرچای ۶۷

۳-۸ انواح حالات تحلیل تراوش و پایداری ۶۸

۳-۹ مدل‌های عددی به کار رفته در تحقیق ۶۹

۳-۹-۱ معرفی نرم‌افزار *seep/w* جهت تحلیل تراوش ۶۹

۳-۹-۲ معرفی نرم‌افزار *slope/w* جهت تحلیل پایداری ۷۴

۳-۹-۳ معرفی نرم‌افزار *RETC* ۷۵

فصل چهارم/ تحلیل نتایج و بحث

۴-۱ مقدمه ۷۱

۴-۲ نتایج تحلیل‌های سد خاکی همگن ۷۸

۴-۲-۱ وضعیت مخزن پر یا زه ثابت ۷۹
۴-۲-۲ وضعیت تخلیه سریع مخزن ۸۴
۴-۲-۳ وضعیت آبگیری مخزن ۹۷
۴-۳ نتایج تحلیل‌های سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی ۱۱۷
۴-۳-۱ وضعیت مخزن پر یا زه ثابت ۱۱۸
۴-۳-۲ وضعیت تخلیه سریع مخزن ۱۲۵
۴-۳-۳ وضعیت آبگیری مخزن ۱۲۹
۴-۴ نتایج مطالعه موردی سد شهرچای ۱۳۹
۴-۴-۱ مدل‌سازی در *seep/w* ۱۳۹
۴-۴-۲ صحت‌سنجی داده‌های پیزومتریک ۱۴۱
فصل پنجم/ نتیجه‌گیری و توصیه‌ها
۵-۱ مقدمه ۱۳۳
۵-۲ سد خاکی همگن ۱۳۳
۵-۲-۱ وضعیت مخزن پر ۱۳۳
۵-۲-۲ وضعیت تخلیه سریع مخزن ۱۴۶
۵-۲-۳ وضعیت آبگیری ۱۴۶
۵-۳ سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی ۱۴۷
۵-۳-۱ وضعیت مخزن پر ۱۴۷
۵-۳-۲ وضعیت تخلیه سریع مخزن ۱۴۸
۵-۳-۳ وضعیت آبگیری مخزن ۱۴۸
۵-۴ جمع بندی ۱۴۹
۵-۵ توصیه‌ها ۱۴۹
فهرست منابع و ماخذ ..... *I*

فهرست اشکال

شکل ۲-۱ سه حالت کلی پدیده تخلیه آب: الف) تخلیه آرام، ب) تخلیه سریع، ج) تخلیه گذرا..... ۱۰
شکل ۲-۲ فشار آب حفره‌ای نقطه‌ای از خاکریز در سه حالت کلی تخلیه ۱۱
شکل ۲-۳ مسیرهای حرکت آب منفذی از حالت اشباع تا حالت آب ماندگار در خاک ۱۸
شکل ۲-۴ دوایر تنش موهر ۲۱
شکل ۲-۵ پوش گسیختگی موهر-کولمب در خاک‌های غیراشباع ۲۲
شکل ۲-۶ مقطع عرضی تیپ سد خاکی همگن ۲۳
شکل ۲-۷ مقطع عرضی تیپ سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم ۲۴
شکل ۲-۸ شبکه جریان در سد خاکی با فیلتر افقی ۲۶
شکل ۲-۹ تغییرات ضریب نفوذپذیری در یک خاک غیراشباع ۲۷
شکل ۲-۱۰ مقدار تخلیه ۳۰
شکل ۲-۱۱ شدت تخلیه..... ۳۰
شکل ۳-۱ منحنی دانه‌بندی نمونه‌های انتخابی ۴۱
شکل ۳-۲ تابع محتوای آب ۴۷
شکل ۳-۳ تابع محتوای آب برای سه نوع خاک مختلف ۴۸
شکل ۳-۴ منحنی دانه‌بندی خاک *Clay* و *Sand* ۵۷
شکل ۳-۵ مقایسه توابع نفوذپذیری تخمین زده شده توسط نرم افزار *seep/w* با داده های واقعی مصالح سد خاکی همگن ۶۰
شکل ۳-۶ مقایسه توابع نفوذپذیری تخمین زده شده توسط نرم‌افزار *seep/w* با داده‌های واقعی مصالح پوسته سد خاکی غیرهمگن ۶۱
شکل ۳-۷ روندنمای روش تحقیق ۵۹
شکل ۳-۸ مقطع بهینه سد خاکی غیرهمگن ۶۴
شکل ۳-۹ نمایی از مرتفع‌ترین مقطع سد شهرچای ۶۶
شکل ۳-۱۰ نمای شماتیک مقطع ۳۲۰+۰ ..... ۶۸
شکل ۳-۱۱ تعریف پارامترهای ماتریس هدایت هیدرولیکی ۷۱
شکل ۴-۱ تحلیل تراوش سد خاکی همگن در حالت بکارگیری ضریب نفوذپذیری ثابت ۷۹
شکل ۴-۲ تحلیل تراوش سد خاکی همگن در حالت بکارگیری تابع نفوذپذیری $f(WE)$ ۷۹
شکل ۴-۳ تحلیل تراوش سد خاکی همگن در حالت بکارگیری تابع نفوذپذیری $f(BE)$ ۸۰
شکل ۴-۴ تحلیل تراوش سد خاکی همگن در حالت بکارگیری تابع نفوذپذیری $f(LE)$ ۸۰

شکل ۴-۵ تحلیل تراوش سد خاکی همگن در حالت بکارگیری تابع نفوذپذیری $f(UNSODA)$ ۸۰
شکل ۴-۶ مقایسه منحنی‌های تراوش در دو حالت بکارگیری تابع متغیر و تابع ثابت ۸۲
شکل ۴-۷ تحلیل پایداری سد خاکی همگن در حالت بکارگیری تابع نفوذپذیری $f(BE)$ ۸۲
شکل ۴-۸ تحلیل تراوش سد خاکی همگن در صورت اعمال زهکش افقی ۸۳
شکل ۴-۹ مقایسه ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی در وضعیت تراوش پایدار در دو حالت اعمال و عدم اعمال زهکش افقی ۸۴
شکل ۴-۱۰ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با نفوذپذیری ثابت و در حالت تخلیه سریع مخزن ($R=0.5$ *m/day*) ۸۵
شکل ۴-۱۱ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با تابع نفوذپذیری $fLE(C)$ و در حالت تخلیه سریع مخزن (*R=0. 5 m/day*) ۸۵
شکل ۴-۱۲ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با تابع نفوذپذیری $fLE(fBE)$ و در حالت تخلیه سریع مخزن (*R=0. 5 m/day*) ۸۵
شکل ۴-۱۳ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با تابع نفوذپذیری $fLE(fLE)$ و در حالت تخلیه سریع مخزن (*R=0. 5 m/day*) ۸۶
شکل ۴-۱۴ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با تابع نفوذپذیری $fWE(fWE)$ و در حالت تخلیه سریع مخزن (*R=0. 5 m/day*) ۸۶
شکل ۴-۱۵ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با تابع نفوذپذیری $fWE(f\sim c)$ و در حالت تخلیه سریع مخزن (*R=0. 5 m/day*) ۸۶
شکل ۴-۱۶ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با تابع نفوذپذیری fBE و در حالت تخلیه سریع مخزن (*R=0. 5 m/day*) ۸۷
شکل ۴-۱۷ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با تابع نفوذپذیری $f(UNSODA)$ و در حالت تخلیه سریع مخزن (*R=0. 5 m/day*) ۸۷
شکل ۴-۱۸ فشار آب منفذی یک نقطه از شیب بالادست در شدت تخلیه *0.15 m/day* ۸۸
شکل ۴-۱۹ مقایسه توابع مشخصه رطوبتی تخمین زده شده توسط نرم‌افزار *seep/w* با داده‌های واقعی مصالح سد همگن ۸۹
شکل ۴-۲۰ پارامترهای به کار رفته در نمودارهای مورگان اشترن ۹۰
شکل ۴-۲۱ ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی در مقابل مقدار تخلیه با سرعت ثابت $R=0.15$ *m/day* و خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۹۰
شکل ۴-۲۲ ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی در مقابل مقدار تخلیه با سرعت ثابت $R=0.5$ *m/day* و

خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۹۱
شکل ۴-۲۳ ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی در مقابل مقدار تخلیه با سرعت ثابت $R=1\ m/day$ و خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۹۱
شکل ۴-۲۴ ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی در مقابل مقدار تخلیه با سرعت ثابت $R=2\ m/day$ و خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۹۲
شکل ۴-۲۵ ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی در مقابل مقدار تخلیه با خصوصیات هیدرولیکی ثابت $fLE(C)$ و سرعت متغیر ۹۴
شکل ۴-۲۶ ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی در مقابل مقدار تخلیه با خصوصیات هیدرولیکی ثابت fBE و سرعت متغیر ۹۴
شکل ۴-۲۷ ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی در مقابل مقدار تخلیه با خصوصیات هیدرولیکی ثابت C و سرعت متغیر ۹۵
شکل ۴-۲۸ مقایسه ضرایب اطمینان شیب بالادست در وضعیت تخلیه سریع در دو حالت اعمال و عدم اعمال زهکش افقی ۹۶
شکل ۴-۲۹ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با نفوذپذیری ثابت و در حالت آبگیری با پیش فرض خالی بودن مخزن ($0.15\ m/day$) ۹۷
شکل ۴-۳۰ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با نفوذپذیری $fLE(C)$ و در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن ($0.15m/day$) ۹۷
شکل ۴-۳۱ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با نفوذپذیری $fLE(fBE)$ و در حالت آبگیری با پیش فرض خالی بودن مخزن ($0.15m/day$) ۹۸
شکل ۴-۳۲ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با نفوذپذیری $fWE(f\sim c)$ و در حالت آبگیری با پیش فرض خالی بودن مخزن ($0.15m/day$) ۹۸
شکل ۴-۳۳ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با نفوذپذیری $f(BE)$ و در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن ($0.15m/day$) ۹۸
شکل ۴-۳۴ پارامترهای به کار رفته در تحلیل پایداری ۹۹
شکل ۴-۳۵ ضرایب اطمینان شیب پایین‌دست در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن با سرعت ثابت $0.15\ m/day$ و خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۱۰۰
شکل ۴-۳۶ ضرایب اطمینان شیب پایین‌دست در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن با سرعت ثابت $2\ m/day$ و خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۱۰۰
شکل ۴-۳۷ ضرایب اطمینان شیب پایین دست در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن در

خصوصیات هیدرولیکی ثابت $f(BE)$ و سرعت متغیر ۱۰۲
شکل ۴-۳۸ ضرایب اطمینان شیب پایین دست در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن با خصوصیات هیدرولیکی ثابت $fWE(f\sim c)$ و سرعت متغیر ۱۰۲
شکل ۴-۳۹ ضرایب اطمینان شیب بالادست در حالت آبگیری با پیش فرض خالی بودن مخزن با سرعت ثابت $0.5\ m/day$ و خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۱۰۴
شکل ۴-۴۰ ضرایب اطمینان شیب بالادست در حالت آبگیری با پیش فرض خالی بودن مخزن با سرعت ثابت $2\ m/day$ و خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۱۰۴
شکل ۴-۴۱ ضرایب اطمینان شیب بالادست در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن در خصوصیات هیدرولیکی ثابت $f(BE)$ و سرعت متغیر ۱۰۶
شکل ۴-۴۲ ضرایب اطمینان شیب بالادست در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن با خصوصیات هیدرولیکی ثابت $fWE(f\sim c)$ و سرعت متغیر ۱۰۶
شکل ۴-۴۳ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با نفوذپذیری $f(BE)$ و در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن ($0.15m/day$) ۱۰۷
شکل ۴-۴۴ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با تابع نفوذپذیری $f(BE)$ و در حالت تخلیه سریع مخزن ($R=0.5\ m/day$) ۱۰۷
شکل ۴-۴۵ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با نفوذپذیری C و در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن ($0.15m/day$) ۱۰۸
شکل ۴-۴۶ تحلیل تراوش سد خاکی همگن با تابع نفوذپذیری C و در حالت تخلیه سریع مخزن ($R=0.5\ m/day$) ۱۰۸
شکل ۴-۴۷ مقایسه نتایج در صورت بکارگیری رطوبت ثابت (اشباع) در دو وضعیت آبگیری با پیش فرض خالی بودن و بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن ۱۰۹
شکل ۴-۴۸ ضرایب اطمینان شیب پایین دست در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن با سرعت ثابت $0.5\ m/day$ و خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۱۱۰
شکل ۴-۴۹ ضرایب اطمینان شیب پایین دست در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن با سرعت ثابت $2\ m/day$ و خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۱۱۰
شکل ۴-۵۰ ضرایب اطمینان شیب پایین دست در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن با خصوصیات هیدرولیکی ثابت $fLE(C)$ و سرعت متغیر ۱۱۲
شکل ۴-۵۱ ضرایب اطمینان شیب پایین دست در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن با خصوصیات هیدرولیکی ثابت $f(BE)$ و سرعت متغیر ۱۱۲

شکل ۴-۵۲ ضرایب اطمینان شیب بالادست در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن با سرعت ثابت $2\ m/day$ و خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۱۱۳
شکل ۴-۵۳ ضرایب اطمینان شیب بالادست در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن با خصوصیات هیدرولیکی ثابت $f(BE)$ و سرعت متغیر ۱۱۴
شکل ۴-۵۴ روند تغییرات ضرایب اطمینان شیب پایین‌دست سد خاکی همگن در صورت انجام تحلیل استاتیکی ۱۱۵
شکل ۴-۵۵ روند تغییرات ضرایب اطمینان شیب بالادست سد خاکی همگن در صورت انجام تحلیل استاتیکی ۱۱۵
شکل ۴-۵۶ طبقه‌بندی مجموعه نتایج سد خاکی همگن ۷۴
شکل ۴-۵۷ شکل منحنی فریاتیک سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی در حالت بکارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت برای هسته و پوسته پایین‌دست ۱۱۹
شکل ۴-۵۸ شکل منحنی فریاتیک سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی در حالت بکارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر برای هسته و هدایت هیدرولیکی ثابت برای پوسته پایین‌دست ۱۱۹
شکل ۴-۵۹ شکل منحنی فریاتیک سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی در حالت بکارگیری هدایت هیدرولیکی ثابت برای هسته و هدایت هیدرولیکی متغیر برای پوسته پایین‌دست ۱۱۹
شکل ۴-۶۰ شکل منحنی فریاتیک سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی در حالت بکارگیری هدایت هیدرولیکی متغیر برای هسته و پوسته پایین‌دست ۱۲۰
شکل ۴-۶۱ مقایسه ارتفاع سطح تراوش در وضعیت‌های مختلف نفوذپذیری ۱۲۱
شکل ۴-۶۲ مقایسه مقادیر بیش برآورد ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی حالت غیرواقعی نسبت به حالت واقعی در وضعیت بکارگیری توابع نفوذپذیری متفاوت ۱۲۴
شکل ۴-۶۳ تحلیل تراوش سد خاکی غیرهمگن با ترکیب نفوذپذیری $fLE(fBE), fLE(fBE), fLE(fBE)$ و در حالت تخلیه سریع مخزن ($R=1m/day$) ۱۲۵
شکل ۴-۶۴ تحلیل تراوش سد خاکی غیرهمگن با ترکیب نفوذپذیری $fLE(fBE), C, fLE(fBE)$ و در حالت تخلیه سریع مخزن ($R=1m/day$) ۱۲۵
شکل ۴-۶۵ تحلیل تراوش سد خاکی غیرهمگن با ترکیب نفوذپذیری $\mathrm{C}, fLE(fBE), C$ و در حالت تخلیه سریع مخزن ($R=1m/day$) ۱۲۶
شکل ۴-۶۶ تحلیل تراوش سد خاکی غیرهمگن با ترکیب نفوذپذیری C, C, C و در حالت تخلیه سریع مخزن ($R=1m/day$) ۱۲۶
شکل ۴-۶۷ روند تغییرات ضرایب اطمینان شیب بالادست سد خاکی غیرهمگن در حالت تخلیه سریع

مخزن و سرعت ثابت $R=0.15\ m/day$ ۱۲۷
شکل ۴-۶۸ تحلیل تراوش سد خاکی غیرهمگن با ترکیب نفوذپذیری $f(BE), f(BE), C$ و در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن ($0.15\ m/day$) ۱۲۹
شکل ۴-۶۹ تحلیل تراوش سد خاکی غیرهمگن با ترکیب نفوذپذیری $C, f(BE), C$ و در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن ($0.15\ m/day$) ۱۲۹
شکل ۴-۷۰ روند تغییرات ضرایب اطمینان شیب پایین‌دست سد خاکی غیرهمگن در حالت آبگیری با پیش‌فرض خالی بودن مخزن و سرعت ثابت $0.15\ m/day$ ۱۳۰
شکل ۴-۷۱ روند تغییرات ضرایب اطمینان شیب بالادست سد خاکی غیرهمگن در حالت آبگیری با پیش فرض خالی بودن مخزن و سرعت ثابت $0.15\ m/day$ ۱۳۲
شکل ۴-۷۲ تحلیل تراوش سد خاکی غیرهمگن با ترکیب نفوذپذیری $f(BE), f(BE), f(BE)$ و در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن ($0.15\ m/day$) ۱۳۳
شکل ۴-۷۳ روند تغییرات ضرایب اطمینان شیب پایین دست سد خاکی غیرهمگن در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن و سرعت ثابت $0.15\ m/day$ ۱۳۴
شکل ۴-۷۴ روند تغییرات ضرایب اطمینان شیب بالادست سد خاکی غیرهمگن در حالت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن و سرعت ثابت $0.15\ m/day$ ۱۳۶
شکل ۴-۷۵ روند تغییرات ضرایب اطمینان شیب پایین دست سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی در صورت انجام تحلیل استاتیکی ۱۳۷
شکل ۴-۷۶ روند تغییرات ضرایب اطمینان شیب بالادست سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی در صورت انجام تحلیل استاتیکی ۱۳۷
شکل ۴-۷۷ طبقه‌بندی مجموعه نتایج سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی ۷۴
شکل ۴-۷۸ شمای مش‌بندی مقطع ۳۲۰+۰ ..... ۱۳۹
شکل ۴-۷۹ منحنی فریاتیک حاصل از تحلیل پایدار در مقطع ۳۲۰+۰ در صورت اعمال خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۱۴۰
شکل ۴-۸۰ منحنی فریاتیک حاصل از تحلیل گذرا در مقطع ۳۲۰+۰ در صورت اعمال خصوصیات هیدرولیکی متغیر ۱۴۰
شکل ۴-۸۱ منحنی فریاتیک حاصل از تحلیل پایدار در مقطع ۳۲۰+۰ در صورت اعمال خصوصیات هیدرولیکی ثابت ۱۴۱
شکل ۴-۸۲ منحنی فریاتیک حاصل از تحلیل گذرا در مقطع ۳۲۰+۰ در صورت اعمال خصوصیات هیدرولیکی ثابت ۱۴۱

شکل ۴-۸۳ نتایج مدل عددی در مقابل داده‌های مشاهده‌ای در پیزومتر *V20* ۱۴۲
شکل ۴-۸۴ نتایج مدل عددی در مقابل داده‌های مشاهده‌ای در پیزومتر *V16* ۱۴۲
شکل ۴-۸۵ نتایج مدل عددی در مقابل داده‌های مشاهده‌ای در پیزومتر *V13* ۱۴۳

فهرست جداول

جدول ۳-۱ مشخصات خاک‌های انتخاب شده از پایگاه داده *UNSODA* ۴۰
جدول ۳-۲ داده‌های آزمایش دانه‌بندی خاک ۴۰
جدول ۳-۳ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و رطوبت حجمی رس ۴۱
جدول ۳-۴ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و هدایت هیدرولیکی رس ۴۲
جدول ۳-۵ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و رطوبت حجمی سیلت ۴۲
جدول ۳-۶ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و هدایت هیدرولیکی سیلت ۴۲
جدول ۳-۷ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و رطوبت حجمی رس سیلتی ۴۳
جدول ۳-۸ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و هدایت هیدرولیکی رس سیلتی ۴۳
جدول ۳-۹ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و رطوبت حجمی ماسه (۱) ۴۳
جدول ۳-۱۰ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و هدایت هیدرولیکی ماسه (۱) ۴۳
جدول ۳-۱۱ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و رطوبت حجمی ماسه (۲) ۴۴
جدول ۳-۱۲ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و هدایت هیدرولیکی ماسه (۲) ۴۴
جدول ۳-۱۳ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و رطوبت حجمی لوم ماسه‌دار ۴۴
جدول ۳-۱۴ داده‌های اندازه‌گیری شده مکش ماتریک و هدایت هیدرولیکی لوم ماسه‌دار ۴۴
جدول ۳-۱۵ داده‌های مورد نیاز جهت برآورد تابع هدایت هیدرولیکی به روش اندازه دانه‌ها ۴۹
جدول ۳-۱۶ پارامترهای n,m,a محاسباتی روش فردلاند و زینگ برای هر نمونه خاک ۵۱
جدول ۳-۱۷ پارامترهای n,m,a محاسباتی روش ون‌گنوختن برای هر نمونه خاک ۵۲
جدول ۳-۱۸ محاسبه شاخص‌های آماری انواع روش‌های برآورد تابع هدایت هیدرولیکی سه نمونه خاک چسبنده ۵۴
جدول ۳-۱۹ محاسبه شاخص‌های آماری انواع روش‌های برآورد تابع هدایت هیدرولیکی سه نمونه خاک درشت‌دانه ۵۵
جدول ۳-۲۰ گزینش روش‌هایی که منحنی با بیشترین و کمترین تطبیق با داده‌های واقعی را حاصل کرده است ۵۶
جدول ۳-۲۱ مشخصات خاک چسبنده رس و غیرچسبنده ماسه ۵۷
جدول ۳-۲۲ پارامترهای به کار رفته در انجام محاسبات مربوط به پایداری شیب‌ها بر اساس طبقه‌بندی متحد ۵۸
جدول ۳-۲۳ مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مصالح سد ۵۸
جدول ۳-۲۴ انواع حالات تعریف نفوذپذیری مصالح در تحلیل‌ها ۶۱

جدول ۳-۲۵ جدول درونیابی جهت محاسبه متغیرها ۶۳
جدول ۳-۲۶ مشخصات مصالح سد ۶۷
جدول ۴-۱ توابع هدایت هیدرولیکی و رطوبتی خاک چسبنده جهت انجام تحلیل‌های گذرا و ناپایدار ۷۸
جدول ۴-۲ مقدار جریان عبوری از بدنه سد همگن در حالت تراوش دائم به همراه مقدار جریان عبوری از بخش غیراشباع و اشباع (بالا و زیر خط فریاتیک) ۸۱
جدول ۴-۳ ضرایب اطمینان شیب پایین دست سد خاکی همگن در تحلیل استاتیکی حالت تراوش پایدار ۸۳
جدول ۴-۴ توابع هدایت هیدرولیکی و رطوبتی خاک درشت‌دانه جهت انجام تحلیل‌های گذرا و پایدار ۱۱۷
جدول ۴-۵ انوع ترکیب های سه تایی جهت تعریف نفوذپذیری مصالح سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی ۱۱۷
جدول ۴-۶ حداقل و حداکثر بیش برآورد ضرایب اطمینان شیب پایین دست در وضعیت تراوش دائم در حالت غیرواقعی نسبت به حالت واقعی ۱۲۲
جدول ۴-۷ مقادیر ضریب اطمینان برای سطوح لغزش بحرانی در تحلیل استاتیکی شیب پایین دست در حالت مخزن پر ۱۲۳
جدول ۴-۸ بیش برآورد ضرایب اطمینان شیب پایین دست در وضعیت آبگیری با پیش فرض خالی بودن مخزن ۱۳۱
جدول ۴-۹ بیش برآورد ضرایب اطمینان شیب پایین دست در وضعیت آبگیری بلافاصله پس از تخلیه سریع مخزن ۱۳۵
جدول ۴-۱۰ برآورد میزان خطای محاسباتی ۱۴۳

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

کشور ایران بر روی کمربند خشک کره زمین قرار دارد. بنابراین اهمیت برنامه‌ریزی و مدیریت استفاده از منابع آب موجود، امری حیاتی محسوب می‌شود. از این‌رو، شرایط اقلیمی کشور و نیاز آن به ساخت سازه‌های ذخیره آب، احداث سدها را در دستور کار برنامه‌ریزان قرار داده است، که به عنوان سازه‌های مهارکننده آب‌های سطحی و کنترل سیلاب، امکان استفاده بیشتر از آب رودخانه‌ها را فراهم می‌نمایند. مهار سیلاب‌ها و آب‌های جاری به کمک احداث سد از امور زیربنایی در رشد و توسعه هر کشور از جمله ایران به شمار می‌آید.

ملاحظات فنی و اقتصادی در طراحی‌ها نشان داده است که در بسیاری از موارد، سدهای خاکی با هسته رسی بر گزینه‌های دیگر ارجح بوده است و به عنوان انتخاب مناسب در طرح نهایی سدها می باشد (صدرنژاد، ۱۳۸۰).

یکی از مهمترین مسائل در سدهای خاکی، حرکت بطئی آب در بدنه و پی سد می باشد. این حرکت بطئی که تراوش نامیده می شود، هم به لحاظ محاسبه مقدار اتلاف آب که ممکن است درصد مهمی را تشکیل دهد و هم به لحاظ پایداری سد، حائز اهمیت می باشد (رحمنی، ۱۳۹۰).

در سدهای خاکی، بدنه حساس‌تر بوده و احتمال آسیب رسیدن و یا شکست آن بیشتر است. در بدنه سدهای خاکی احتمال وقوع رگاب، ناپایداری شیب‌های بالادست و پایین‌دست، تراوش و ایجاد ترک در نواحی مختلف بدنه وجود دارد (*ICOLD, 1998*).

بنابراین لازم است به منظور جلوگیری از خرابی‌های حاصل از تراوش آب، مقدار آن در بدنه و پی سد خاکی به طور دقیق تعیین و پایداری این نوع سدها با روش های مختلف برآورد گردد.

۱-۲ تشریح موضوع و بیان مسئله

سدها همواره جزو سازه‌های زیربنایی محسوب می‌شوند و دارای ارزش حیاتی هستند. اگرچه در گذشته، پدیده روگذری، اولین دلیل تخریب سدها بوده است، اما امروزه با افزایش دوره طراحی سیلاب، عمده‌ترین مشکلی که توجه مهندسان را به خود جلب کرده است، مسئله تراوش است. وجود تراوش در سدهای خاکی غیرقابل اجتناب است، اما اگر شرایط مناسبی برای فرسایش خاک وجود داشته باشد، موجب شسته شدن نقاط مستعد گردیده و چنانچه در ابتدای بروز فرسایش اقدامات لازم صورت نگیرد، به تخریب سد منجر می‌شود.

عمده خرابی سدهای خاکی در اثر عامل تراوش در داخل سدهای خاکی به چهار گروه تقسیم می شود که عبارتند از (کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۹):

- به حرکت درآوردن ذرات خاک و تغییر آرایش آنها و رسوب‌گذاری در میان خلل و فرج ذرات بزرگتر.
- ایجاد فشار آب منفذی که موجب شناور شدن ذرات و سرانجام ایجاد پدیده جوشش[1] ذرات خاک و خروج آنها از محل خود می شود.
- ایجاد فرسایش داخلی خاک، ایجاد حفره پیش رونده به سمت عقب و در نهایت تخریب سد.
- ایجاد فشار منفذی که موجب کاهش فشار اعمال شده بین ذرات خاک شده و در نتیجه سبب از بین رفتن قسمتی از مقاومت خاک ناشی از اصطکاک داخلی بین ذرات می شود.

امروزه یکی از کاستی‌ها در طراحی سدهای خاکی، عدم انتخاب صحیح خصوصیات هیدرولیکی مصالح مورد استفاده در ساخت بدنه سدها می باشد. در صورتیکه انتخاب صحیح و متناسب با شرایط مسأله در آنالیز تراوش و پایداری بسیار ضرورت دارد و در نظر نگرفتن پارامترهای مناسب در مرحله طراحی باعث بروز مشکلات عدیده‌ای شده و سازه را در دوران بهره‌برداری آسیب پذیر خواهد کرد.

از جمله مهم‌ترین خصوصیات هیدرولیکی مصالح، هدایت هیدرولیکی آنها می‌باشد که عبارتست از توانایی خاک در انتقال و یا هدایت آب در شرایط اشباع و یا غیراشباع، که مقدار آبگذری از یک توده خاک به این فاکتور بستگی دارد (*Krahn, 2004*). با این حال مقدار هدایت هیدرولیکی مصالح به عوامل مختلفی از جمله: مشخصات سیال مانند لزوجت، مشخصات خاک مانند اندازه و توزیع اندازه‌ی حفره‌ها، منحنی دانه‌بندی، نسبت تخلخل، زبری سطح دانه‌ها و درجه اشباع و میزان درصد رطوبت خاک وابسته است (*Das, 2001*). که لحاظ همه این موارد در برآورد مقدار تراوش و یا مقدار هدایت هیدرولیکی به راحتی امکان‌پذیر نیست.

علاوه بر موارد فوق، نفوذپذیری خاک وابستگی شدیدی به فشار آب حفره‌ای دارد. بطوریکه در فشارهای منفی (مکش) مقدار آن به شدت کاهش می‌یابد و همچنین در حالت غیراشباع وجود حباب‌های هوا در مسیر جریان باعث انسداد مسیر یا کاهش سطح مسیر عبور جریان خواهد شد. بطوریکه با اعمال این

[1] *Boiling*

شرایط نواحی مختلفی در بدنه سد در حالت تراوش دائم و غیردائم ایجاد می‌گردد. این نواحی شامل ناحیه اشباع کامل و غیراشباع به ترتیب در زیر و بالای اولین خط تراوش[1] می‌گردد. از دیگر عوامل تاثیرگذار در خصوصیات هیدرولیکی مصالح، مقدار ذخیره آب در خاک[2] می‌باشد. در یک خاک غیراشباع، حجم آب ذخیره شده در منافذ به فشار آب حفره‌ای منفی (یا مکش) بستگی دارد و نسبت به زمان و مکان ثابت نیست و باید توسط تابعی برحسب فشارهای مختلف عنوان گردد و دانستن رابطه‌ی بین فشار آب حفره‌ای و مقدار آب از اهمیت خاصی در تحلیل تراوش برخوردار است (*Krahn, 2004*). منحنی نگهداشت رطوبتی، قابلیت خاک برای ذخیره آب را بر اساس تغییرات فشار آب حفره‌ای نشان می‌دهد.
سه خصوصیت اصلی که در این منحنی مشخص است (*Zhai & Rahardjo, 2012*):

- مقدار هوای ورودی(*AEV*)[3].
- شیب تابع برای هر دو فشار آب حفره‌ای منفی و مثبت.
- درجه اشباع.

همیشه همه این موارد موجب پیچیدگی بیشتر مسأله شده و حتی در بسیاری از مدل‌های تجاری و پیشرفته، اعمال همه این شرایط و یا حل مسأله با اعمال این ویژگی‌ها امکانپذیر نمی باشد. ولی سعی خواهد شد تابعی هرچند تخمینی و برآورد شده توسط نرم افزار *seep/w* جهت توصیف خصوصیات هیدرولیکی خاک‌های مورد نظر ارائه گردد. چرا که تحلیل پایداری با این نتایج بسیار دقیق‌تر و قابل قبول‌تر از زمانی خواهد شد که معادله‌ای در دست نباشد و یا اینکه ثابت در نظر گرفته شود. ثابت گرفتن هدایت هیدرولیکی در مناطق غیراشباع سبب جریان یافتن آبی به سهولت جریان در منطقه اشباع خواهد شد. در نتیجه سطح فریاتیک تغییر خواهد کرد و حجم قابل توجهی آب از منطقه غیراشباع عبور می‌کند که در نتیجه این عمل پایداری سازه از بین خواهد رفت.

۱-۳ اهمیت و ضرورت انجام تحقیق

تراوش یکی از دلایل عمده خرابی سدها می‌باشد. با تکیه بر مطالعاتی که معمولا قبل از ساخت سد صورت می‌گیرد، همیشه نمی‌توان رفتار هیدرولیکی بدنه سد و یا تشکیلات زمین‌شناسی مجاور آن را به دقت پیش‌بینی کرد. بنابراین احتمال وقوع تراوش پس از ساخت سد تقریبا قطعی به نظر می‌رسد. شدت تراوش در بسیاری از موارد تا زمانی که ایمنی سد به خطر نیفتد قابل‌قبول می‌باشد، در غیر این صورت باید ملاحظات کافی لحاظ شود. از نقطه‌نظر ایمنی، بررسی خطرات ناشی از تراوش و نفوذ به علت پیچیدگی ذاتی در خصوصیات آن‌ها حائز اهمیت می‌باشد. بسیاری از مخازن سدهای ساخته شده در جهان دارای تراوش می‌باشند. این تراوش ممکن است از تشکیلات زمین‌شناسی ساختگاه یا پی سد و یا از بدنه سد اتفاق بیفتد.

---
[1] *Seepage line*
[2] *Soil water storage*
[3] *Air Entry Value*