بسم ا... الرحمن الرحيم

رساله‌ی حاضر، حاصل پژوهش‌های نگارنده در دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی عمـران گرایش خاک و پی است که در بهمن مـاه سـال ۱۳۹۲ در دانشـکده‌ی فنـی مهندسـی دانشگاه یاسوج به راهنمایی جناب آقای دکتر پرویزی و جناب آقای دکتر صدقی اصل از آن دفاع شده است و کلیه‌ی حقوق مادی و معنوی آن متعلق به دانشگاه یاسوج است.

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی عمران

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی عمران گرایش خاک و پی:

مطالعه آزمایشگاهی پدیده جوشش ماسه‌ای در پی آبرفتی سازه‌های هیدرولیکی، تحت جریان ماندگار و غیرماندگار

اساتید راهنما :

دکتر منصور پرویزی- دکتر محمد صدقی اصل

پژوهشگر:

مهدی یوسفی

بهمن ماه ۱۳۹۲

مطالعه آزمایشگاهی پدیده جوشش ماسه‌ای در پی آبرفتی سازه‌های هیدرولیکی، تحت جریان ماندگار و غیرماندگار

به وسیله‌ی:

مهدی یوسفی

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

عمران گرایش خاک و پی

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۰ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه ..... به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنما اول:	دکتر منصور پرویزی	امضا
۲- استاد راهنما دوم:	دکتر محمد صدقی اصل	امضا
۳- استاد داورداخل گروه:	دکتر محمد حسین بازیار	امضا
۴- استاد داور خارج از گروه:	دکتر امین موسایی	امضا
۵- مدیر گروه عمران:	دکتر مهدی زمانی لنجانی	امضا

بهمن ماه ۱۳۹۲

تقدیم به:

تقدیم به ذات اقدس الهی که قدرت تامل و فکر را در وجود آدمی نهاد و تقدیم به پدر و مادر عزیزم که تا به این مرحله از زندگی در کنار من بودند و مرا راهنمایی نمودند و در تمامی مراحل سخت مرا یاری نمودند و شانه به شانه در کنارم ایستادند.

سپاسگزاری

تشکر و سپاس از اساتید فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر پرویزی و جناب آقای دکتر صدقی اصل بابت زحمات بی‌حد و حصر ایشان برای به ثمر نشستن این پایان‌نامه که در این مسیر با بنده‌ی حقیر همراه بودند و بنده را راهنمایی می‌نمودند.

نام: مهدی **نام خانوادگی: یوسفی**
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته و گرایش: مهندسی عمران- خاک و پی**
اساتید راهنما: دکتر منصور پرویزی و دکتر محمد صدقی اصل **تاریخ دفاع: ۱۳۹۲/۱۱/۲۰**

مطالعه آزمایشگاهی پدیده جوشش ماسه‌ای در پی آبرفتی سازه‌های هیدرولیکی، تحت جریان ماندگار و غیر ماندگار

چکیده:

دیوارهای سپری از جمله تمهیداتی هستند که به‌منظور کاهش نشت، نیروی زیر فشار و شیب خروجی در پی نفوذپذیر سازه‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در خصوص نشت از پی سازه-های آبی تاکنون تحقیقات زیادی، به‌ویژه در قالب مدل‌های عددی انجام شده است که برای ارزیابی صحت آنها به داده‌های صحرائی و آزمایشگاهی نیاز است، لیکن تاکنون یک مدل آزمایشگاهی یا فیزیکی که مسائل نشت و جوشش از پی سازه‌های ساحلی و آبرفتی را به طور دقیق مورد مطالعه قرار دهد، ارائه نشده است. در این تحقیق برای بررسی اثر عوامل مؤثر بر پدیده جوشش از پی سازه‌های هیدرولیکی مستقر بر پی‌های آبرفتی یک مدل آزمایشگاهی به طول ۲/۲، ارتفاع ۰/۸ و عرض ۰/۴ متر با استفاده از اسکلت فولادی و جداره‌های پلکسی گلاس (Plexiglas) ساخته و آماده گردید. در این مدل آزمایشگاهی پرده آب‌بند به‌عنوان متغیر عمقی، از ورقه پلکسی‌گلاس ساخته شده و ترازهای پیزومتریک در دو وجه پایین‌دست و بالادست فلوم با استفاده از پیزومترهای شفاف با قطر کم اندازه‌گیری شده‌اند. مصالح پی ماسه تمیز ساحلی است که با تراکم یکنواخت در عمق ۴۰ سانتیمتری پایینی فلوم مورد استفاده قرار گرفت.

آزمایش‌ها برای دو حالت جریان ماندگار و غیر ماندگار بر روی دو حالت قرارگیری پرده آب‌بند به‌صورت قائم و مورب با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق در عمق‌های مختلف پی صورت پذیرفت. تأثیر موقعیت و عمق دیواره‌های سپری بر مقدار دبی نشت، گرادیان خروجی و فشار بالابر در قالب نمودارهای بی بعد ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که نسبت‌های $d/D = 0.44$ و $d/D = 0.34$ با نسبت بیشترین تراز آب بالادست $h/h_m = 1.0$ به ترتیب برای دو حالت کارگذاری پرده آب‌بند به‌صورت قائم و مورب در عمق پی به‌عنوان نسبت بهینه عمق پرده آب‌بند می‌باشند. همچنین نتایج آزمایش‌ها در حالت جریان غیر ماندگار نشان می‌دهد که کارگذاری پرده آب‌بند مورب نسبت به پرده آب‌بند قائم در عمق و شرایط یکسان مدت زمان بیشتری سپری می‌شود تا آب مخزن بالادست از طریق پی متخلخل تخلیه گردد. به عبارت دیگر کارگذاری پرده آب‌بند مورب در کاهش و کنترل میزان دبی نشت، فشار بالابر و گرادیان هیدرولیکی بسیار مؤثرتر از پرده آب‌بند قائم می‌باشد.

کلمات کلیدی: پی آبرفتی، جوشش، پرده آب‌بند، زیر شویی، جریان ماندگار، جریان غیر ماندگار.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق ۲

۱-۳ اهداف پژوهش ۶

۱-۴ معرفی ساختار پایان‌نامه ۶

فصل دوم: پیش‌زمینه و سابقه پژوهش

۲-۱ کلیات ۷

۲-۲ پیش‌زمینه تحقیق ۸

۲-۲-۱ تراوش ۸

۲-۲-۱-۱ مدل‌های کنترل تراوش ۱۱

۲-۲-۱-۲ جزئیات نحوه کنترل تراوش پی ۱۲

۲-۲-۲ پدیده پایپینگ ۱۳

۲-۲-۲-۱ روش مبارزه با خطر پدیدهٔ پایپینگ ۱۵

۲-۲-۳ پدیده جوشش ۱۷

۲-۲-۳-۱ انواع جوشش ۲۰

۲-۲-۴ معرفی انواع سدها ۲۲

۲-۲-۴-۱ سدهای خاکی و سنگریزه‌ای ۲۳

۲-۲-۵ بررسی خرابی سدها ۲۶

۲-۲-۵-۱ اشکال مختلف خرابی در یک سد خاکریزه‌ای ۲۷

۲-۲-۵-۲ علل تخریب سدهای خاکی ۲۹

۲-۲-۵-۳ شکست ناشی از نشت سد ۲۹

۲-۲-۵-۴ چگونگی بروز مشکلات ناشی از جوشش و نشت در سد ۲۹

۲-۲-۵-۶ کنترل تراوش در فونداسیون و دیوارهای جانبی سد ۳۱

۲-۳ مرور منابع مربوط به پژوهش ۳۲

۲-۳-۱ مطالعات پژوهشگران در سال‌های ۱۹۱۰ تا ۲۰۰۰ میلادی ۳۲

۲-۳-۲ مطالعات پژوهشگران در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ میلادی ۳۵

۲-۳-۳ جمع‌بندی مطالعات ۳۸

فصل سوم: مواد و روش‌ها

۳-۱ مقدمه ۳۹

۳-۲ مبانی تئوریک ۳۹

۳-۳ آنالیز ابعادی ۴۰

۳-۴ تجهیزات آزمایشگاهی ۴۱

۳-۴-۱ تجهیزات آزمایشگاهی مطالعه نشت از پی ماسه‌ای ۴۱

۳-۴-۱-۱ سیستم تأمین آب ۴۲
۳-۴-۱-۲ تبدیل‌ها و اتصالات ۴۲
۳-۴-۱-۳ پرده آب بند ۴۲
۳-۴-۱-۴ پی ماسه‌ای ۴۲
۳-۴-۱-۵ مخازن کنترل‌کننده تراز آب بالادست و پائین‌دست ۴۳
۳-۴-۱-۶ توری شماره ۱۵۰ ۴۳
۳-۴-۱-۷ وسایل ثبت فشار پیزومتریک ۴۳
۳-۴-۱-۸ سیستم اندازه‌گیری دبی ۴۳
۳-۴-۲ برپایی مدل آزمایشگاهی ۴۴
۳-۵ نحوه انجام آزمایش‌ها ۴۵

فصل چهارم: بحث و نتایج

۴-۱ مقدمه ۵۰
۴-۲ بررسی پرده آب‌بند قائم در حالت جریان ماندگار ۵۱
۴-۲-۱ اثر عمق پرده آب بند بر میزان نشت ۵۱
۴-۲-۳ اثر تراز آب بالادست بر میزان نشت ۵۲
۴-۲-۴ تأثیر تراز آب بالادست و عمق پرده آب‌بند بر میزان فشار بالابر ۵۳
۴-۲-۵ تأثیر تراز آب بالادست و عمق پرده آب‌بند بر گرادیان خروجی ۵۷
۴-۲-۶ مشاهدات آزمایشگاهی پدیده جوشش ۶۲
۴-۲-۷ پرده آب بند قائم با وجود تراز آب در پایین‌دست ۶۳
۴-۲-۷-۱ اثر عمق پرده آب بند بر میزان نشت در صورت وجود آب در پایین‌دست ۶۳
۴-۲-۷-۲ اثر تراز آب بالادست بر میزان نشت در صورت وجود آب در پایین‌دست ۶۳
۴-۲-۷-۳ اثر عمق پرده آب بند بر فشار بالابر در صورت وجود آب در پایین‌دست ۶۴
۴-۲-۷-۴ اثر عمق پرده آب‌بند و تراز آب بالادست و پایین‌دست بر گرادیان هیدرولیکی در صورت وجود آب در پایین‌دست ۶۷
۴-۲-۸ مقایسه وجود و عدم وجود تراز آب در پایین‌دست پرده آب‌بند ۶۹
۴-۲-۸-۱ اثر عمق پرده آب بند بر میزان نشت ۶۹
۴-۲-۸-۲ اثر تراز آب بالادست بر میزان نشت ۶۹
۴-۲-۸-۳ اثر عمق پرده آب بند بر فشار بالابر در هر دو حالت وجود و عدم وجود آب در پایین‌دست ۷۰
۴-۲-۸-۴ بررسی تراز آب بالادست و عمق پرده آب‌بند بر گرادیان خروجی در هر دو حالت وجود و عدم وجود آب در پایین‌دست ۷۰
۴-۳ کارگذاری پرده آب بند مورب در حالت جریان ماندگار ۷۱
۴-۳-۱ اثر عمق پرده آب بند مورب بر میزان نشت ۷۱
۴-۳-۲ اثر تراز آب بالادست بر میزان نشت ۷۲
۴-۳-۳ اثر عمق پرده آب‌بند و تراز آب بالادست بر مقدار فشار بالابر ۷۳
۴-۳-۴ تأثیر تراز آب بالادست و عمق پرده آب‌بند بر گرادیان خروجی ۷۵
۴-۳-۵ مشاهدات آزمایشگاهی پدیده جوشش ۷۷
۴-۴ مقایسه بکار گیری پرده آب‌بند در دو حالت مورب و قائم در حالت جریان ماندگار ۷۷

۴-۴-۱ تأثیر عمق پرده آب بند بر میزان نشت ۷۷
۴-۴-۲ تأثیر تراز آب بالادست بر میزان دبی نشت ۷۸
۴-۴-۳ تأثیر عمق پرده آب بند و تراز آب بالادست بر میزان فشار بالابر ۷۹
۴-۴-۴ تأثیر عمق پرده آب بند و تراز آب بالادست بر میزان گرادیان هیدرولیکی ۷۹
۴-۵ کارگذاری پرده آب‌بند قائم در حالت جریان غیر ماندگار ۸۰
۴-۵-۱ تأثیر عمق پرده آب بند بر میزان نشت در زمان‌های مختلف ۸۰
۴-۵-۲ تأثیر عمق پرده آب بند بر میزان فشار بالابر در زمان‌های مختلف ۸۲
۴-۵-۳ تأثیر عمق پرده آب بند بر میزان فشار بالابر در زمان‌های مختلف، تراز آب بالادست متغیر و فاصله‌های مختلف از پرده آب بند ۸۳
۴-۵-۴ تأثیر عمق پرده آب بند بر میزان گرادیان هیدرولیکی در زمان‌های مختلف ۸۵
۴-۶ پرده آب بند مورب در حالت غیر ماندگار ۸۶
۴-۶-۱ تأثیر عمق پرده آب بند بر میزان نشت در زمان‌های مختلف ۸۶
۴-۶-۲ تأثیر عمق پرده آب بند بر میزان گرادیان هیدرولیکی در زمان‌های مختلف ۸۸
۴-۶-۳ تأثیر عمق پرده آب بند بر میزان فشار بالابر در زمان‌های مختلف ۸۹
۴-۷ مقایسه پرده آب بند قائم و مورب در حالت جریان غیر ماندگار ۹۱
۴-۷-۱ عمق پرده آب‌بند و میزان نشت در زمان‌های مختلف تغییر تراز آب مخزن بالادست ۹۱
۴-۷-۲ تأثیر عمق پرده آب بند و تراز آب بالادست در زمان‌های مختلف بر فشار بالابر ۹۲
۴-۷-۳ تأثیر عمق پرده آب بند و تراز آب بالادست در زمان‌های مختلف بر گرادیان هیدرولیکی ۹۳
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۵-۱ مقدمه ۹۴
۵-۲ نتایج ۹۴
۵-۳ پیشنهادها ۹۶
مراجع ۹۷

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ گودال به وجود آمده در اثر پدیده جوشش ۴
شکل ۱-۲ نمایی از پایین‌دست سد قیصرق بعد از اولین آبگیری ۴
شکل ۱-۳ نمایی از سد قیصرق بعد از اجرای طرح اصلاح ۴
شکل ۱-۴ پایین آمدن آب سد بناب ۵
شکل ۲-۱ شبکه جریان ۹
شکل ۲-۲ ابعاد شبکه جریان ۹
شکل ۲-۳ محدوده روان شدگی در پای سپری ۱۰
شکل ۲-۴ نمایش نیروهای مؤثر در بالا زدگی ۱۱
شکل ۲-۵ جهت بررسی نیروی تراوش آب ۱۳
شکل ۲-۶ بررسی پدیده پایپینگ ۱۵
شکل ۲-۷ نشان دهنده نشست سد ۱۵
شکل ۲-۸ طولانی کردن مسیر جریان آب نفوذی در پی ۱۶
شکل ۲-۹ مقطعی از سد و دیوارهای قائم ۱۷
شکل ۲-۱۰ انواع جوشش در سد ۲۱
شکل ۲-۱۱ انواع جوشش ۲۱
شکل ۲-۱۲ سد تاریخی بهمن در استان فارس با قدمت بیش از ۲۰۰۰ سال ۲۳
شکل ۲- ۱۳ مقطع یک سد همگن ۲۴
شکل ۲- ۱۴ سد غیر همگن سنگریزه‌ای با هسته رسی ۲۴
شکل ۲-۱۵ یک سد غیر همگن و اتصال هسته سد به پی آب بند ۲۵
شکل ۲-۱۶ چند نوع سد سنگریزه‌ای با سیستم آب‌بندی مختلف ۲۵
شکل ۲-۱۷ سازوکارهای مختلف خرابی سدهای خاکی ۲۷
شکل ۲-۱۸ نشت آب از محل اتصال ۳۰
شکل ۲-۱۹ نشت آب از پی ایجاد وضعیت جوشش در پای پی ۳۰
شکل ۲-۲۰ نشت آب از پی و ایجاد وضعیت اسفنجی در پای پی ۳۱
شکل ۲-۲۱ نشت آب از بدنه و خروج از دهانه خروجی ۳۱
شکل ۲-۲۲ کنترل نشت آب از پی ۳۲
شکل ۳-۱: طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی ۴۱
شکل ۳-۲: منحنی دانه‌بندی ماسه ریز ساحلی ۴۳
شکل ۳-۳ مخزن تنظیم‌کننده سطح آب الف: در بالادست و ب: در پایین‌دست ۴۶
شکل ۳-۴ ماسه ساحلی مورد استفاده برای پی فلوم ۴۷
شکل ۳-۵ نصب توری شماره ۱۵۰ برای جلوگیری از شسته شدن مصالح ۴۷
شکل ۳-۶ نمایی کلی از مدل آزمایشگاهی با کارگذاری پرده آب‌بند قائم و چینش پیزومترها ۴۸
شکل ۳-۷ نمایی کلی از مدل آزمایشگاهی با کارگذاری پرده آب‌بند مایل و چینش پیزومترها ۴۸
شکل ۳-۸ نمایی از پیزومتر و توری های محافظ (ممانعت از ورود ماسه به داخل پیزومترها) نصب‌شده در جداره ۴۹

شکل ۴-۱: نشان دهنده اثر عمق پرده آب بند بر کاهش نشت ۵۱
شکل ۴-۲: اثر تراز آب بالادست بر میزان نشت ۵۲
شکل ۴-۳: تغییرات فشار بالابر نسبت به عمق پرده آب‌بند با فاصله‌های مختلف از پرده آب‌بند ۵۴
شکل ۴-۴: تغییرات فشار بالابر نسبت به فاصله از پرده آب‌بند ۵۵
شکل ۴-۵: تغییرات فشار بالابر نسبت به فاصله از پرده آب‌بند با نسبت عمق‌های مختلف پرده آب‌بند ۵۶
شکل ۴-۶: محدوده روان شدگی و احتمال جوشش ماسه در پای سپری ۵۷
شکل ۴-۷: شیب هیدرولیکی ۵۸
شکل ۴- ۸: مقطعی از پیزومترهای پایین‌دست. ۵۸
شکل ۴-۹: تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به عمق پرده آب‌بند با ترازهای مختلف آب بالادست ۵۹
شکل ۴-۱۰: تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به ترازهای مختلف آب بالادست ۶۰
شکل ۴-۱۱: تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به فاصله از پرده آب‌بند ۶۱
شکل ۴-۱۲: تغییرات دبی نشت نسبت به عمق پرده آب‌بند با ترازهای متفاوت آب بالادست ۶۳
شکل ۴-۱۳: تغییرات دبی نشت نسبت به ترازهای متفاوت آب بالادست ۶۴
شکل ۴-۱۴: تغییرات فشار بالابر نسبت به d/D به ازای ترازهای مختلف آب بالادست ۶۵
شکل ۴-۱۵: تغییرات فشار بالابر نسبت به X/D به ازای ترازهای مختلف آب بالادست ۶۶
شکل ۴-۱۶: تغییرات شیب هیدرولیکی نسبت به h/h_m ۶۷
شکل ۴-۱۷: تغییرات شیب هیدرولیکی نسبت به d/D ۶۷
شکل ۴-۱۸: تغییرات شیب هیدرولیکی نسبت به X/D ۶۸
شکل ۴-۱۹: نشان دهنده اثر عمق پرده آب بند بر کاهش نشت ۶۹
شکل ۴-۲۰: نشان دهنده تغییرات میزان نشت نسبت به h/h_m با عمق بهینه پرده آب بند ۶۹
شکل ۴-۲۱: تغییرات فشار بالابر نسبت به d/D به ازای $h/h_m = 1.0$ در حالت‌های مختلف ۷۰
شکل ۴-۲۲: تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به d/D به ازای $h/h_m = 1.0$ مختلف ۷۱
شکل ۴-۲۳: تغییرات دبی نشت نسبت به عمق پرده آب‌بند با ترازهای متفاوت آب بالادست ۷۲
شکل ۴-۲۴: نشان دهنده تغییرات میزان نشت نسبت به h/h_m به ازای عمق‌های مختلف پرده آب بند ۷۲
شکل ۴-۲۵: تغییرات فشار بالابر نسبت به عمق‌های مختلف پرده آب‌بند ۷۳
شکل ۴-۲۶: تغییرات فشار بالابر نسبت به فاصله از پرده آب‌بند با نسبت عمق‌های مختلف سپری ۷۴
شکل ۴-۲۷: تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به عمق پرده آب‌بند با ترازهای مختلف آب بالادست ۷۵
شکل ۴-۲۸: تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به تراز آب بالادست به ازای عمق‌های مختلف پرده آب‌بند ۷۵
شکل ۴-۲۹: تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به فاصله از سپری به ازای عمق‌های متفاوت پرده آب‌بند ۷۶
شکل ۴-۳۰: تغییرات دبی نشت نسبت به عمق‌های متفاوت پرده آب‌بند ۷۸
شکل ۴-۳۱: تغییرات دبی نشت نسبت به تراز آب بالادست به ازای عمق‌های بهینه از پرده‌های آب بند ۷۸
شکل ۴-۳۲: تغییرات فشار بالابر نسبت به عمق‌های مختلف پرده آب‌بند با بالاترین تراز آب بالادست ۷۹
شکل ۴-۳۳: تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به عمق پرده آب‌بند به ازای تراز آب بالادست بیشینه ۸۰
شکل ۴-۳۴: تغییرات دبی نشت نسبت به زمان برای عمق‌های متفاوت پرده آب بند ۸۱
شکل ۴-۳۵: تغییرات Q/Q_m نسبت به زمان برای عمق‌های متفاوت پرده آب بند ۸۱
شکل ۴-۳۶: تغییرات Q/Q_0 نسبت به زمان برای عمق‌های متفاوت پرده آب بند ۸۱
شکل ۴-۳۷: تغییرات دبی نشت نسبت به عمق پرده آب‌بند برای زمان‌های متفاوت ۸۲
شکل ۴-۳۸: تغییرات فشار بالابر نسبت به زمان برای عمق‌های متفاوت پرده آب‌بند ۸۲

شکل ۴-۳۹: تغییرات فشار بالابر نسبت به عمق پرده آب‌بند به ازای زمان‌های مختلف ۸۳
شکل ۴-۴۰: تغییرات فشار بالابر نسبت به فاصله از پرده آب‌بند برای زمان‌ها و تراز مختلف آب بالادست ۸۴
شکل ۴-۴۱: تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به زمان به ازای عمق‌های مختلف پرده آب‌بند ۸۵
شکل ۴-۴۲: تغییرات میزان نشت در زمان‌های مختلف به ازای عمق‌های مختلف پرده آب‌بند ۸۶
شکل ۴-۴۳: تغییرات میزان نشت در زمان‌های مختلف به ازای عمق‌های مختلف پرده آب‌بند ۸۷
شکل ۴-۴۴: تغییرات میزان نشت در زمان‌های مختلف به ازای عمق‌های مختلف پرده آب‌بند ۸۷
شکل ۴-۴۵: تغییرات میزان نشت در زمان‌های مختلف به ازای عمق‌های مختلف پرده آب‌بند ۸۷
شکل ۴-۴۶: تغییرات میزان نشت در زمان‌های مختلف به ازای عمق‌های مختلف پرده آب‌بند ۸۸
شکل ۴-۴۷: تغییرات فشار بالابر نسبت به فاصله از سپر برای عمق‌های متفاوت سپر به ازای زمان‌های مختلف و تراز آب مخزن بالادست مختلف ۸۹
شکل ۴-۴۸: تغییرات فشار بالابر نسبت به عمق پرده آب‌بند ۹۰
شکل ۴-۴۹: تغییرات فشار بالابر نسبت به زمان به ازای عمق‌های مختلف پرده آب‌بند ۹۱
شکل ۴-۵۰: تغییرات دبی نشت نسبت به زمان ۹۱
شکل ۴-۵۱: تغییرات دبی نشت نسبت به زمان ۹۲
شکل ۴-۵۲: تغییرات فشار بالابر نسبت به زمان ۹۲
شکل ۴-۵۳: تغییرات گرادیان هیدرولیکی نسبت به زمان ۹۳

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱ ضریب لین (C') ۱۷
جدول ۲-۲ سوابق اطلاعات ثبت شده تراوش و پدیده زیر شویی یا جوشش ماسه ۱۹
جدول ۲-۳ مکانیسم‌های مختلف خرابی سدهای خاکی و روش‌های جلوگیری از آنها ۲۸
جدول ۴-۱ محدوده حساس به پدیده جوشش ۶۲
جدول ۴-۲ محدوده حساس به پدیده جوشش در پای پرده آب‌بند در پایین‌دست ۷۷

فصل اول: مقدمه و کلیات

۱-۱ مقدمه

آب حیاتی‌ترین عنصر زندگی و اصلی‌ترین دارایی یک کشور در روند توسعه می‌باشد. نقش آب در گذشته علیرغم فراوانی آن بسیار برجسته بوده است، لیکن در آینده، آب به‌صورت یک عامل جهانی، نقش عمده‌ای در تعیین سیاست‌های جهانی خواهد داشت و بنا به بعضی پیش‌بینی‌ها، جنگ بزرگ آینده جهان می‌تواند جنگ آب باشد. با چنین نقش حساس و استراتژیکی که آب در آینده جهان بازی می‌کند و با عنایت به مشکل کمبود و توزیع نامناسب آب در ایران، مدیریت صحیح منابع آب به ویژه در تأمین، ذخیره، توزیع و مصرف آن از اهم مسائل کشور برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی‌های آتی می‌باشد [۱].

در کشوری مانند ایران که از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌گردد، ذخیره آب از جمله اهداف مهم کاربردی و توسعه به شمار می‌رود. با توجه به فصلی بودن نزولات جوی و عدم توزیع مکانی مناسب آن، اهمیت آب مشخص می‌گردد [۲]. رشد و توسعه کشاورزی و صنعت که ناشی از توسعه اجتماعی، اقتصادی و جمعیتی جوامع بشری است، اهمیت سازه‌های آبی را به علت نیاز روزافزون به آب دائم و مطمئن دو چندان کرده است. سازه‌های آبی از نظر نوع کاربرد شامل سازه‌های ذخیره، سازه‌های انتقال و توزیع آب و سازه‌های مهار یا تنظیم آب می‌باشند که زیربنای بخش‌های مهم کشاورزی، صنعت و تأمین آب شرب محسوب می‌شوند [۱]. جهت استفاده بهینه از آب از سازه‌های هیدرولیکی مختلف استفاده می‌شود. سدها از جمله سازه‌هایی هستند که به‌منظور ذخیره آب ساخته می‌شوند. با توجه به نیاز کشور به مهار و ذخیره آب‌های سطحی جهت تولید برق، مصارف کشاورزی، جلوگیری از خسارت سیل و ...، قدم اول در توسعه و بهره بردرای از منابع آب کشور احداث سدهای بلند می‌باشد [۳]. با توجه به محدودیت منابع آب در مقایسه با جمعیت، نقش انکارناپذیر توسعه صنعت سد سازی در پیشرفت هرچه بیشتر کشور را نمی‌توان نادیده گرفت. شاید هیچ نوع سازه‌ای که توسط انسان ساخته شود به اندازهٔ سد بزرگی که دارای دریاچه وسیعی بوده و در پائین‌دست آن منطقه پر جمعیتی وجود دارد زمینه خطر برای جان و مال افراد نباشد. سدهای خاکی در مرحله حین ساخت و در طول زمان بهره‌برداری در معرض انواع تنش‌های متفاوت از جمله تنش‌های حاصل از نشست سد، تنش‌های حاصل از بدنه سد، فشار استاتیکی آب، نیروی دینامیکی امواج، زلزله و ... قرار دارد، که به‌منظور مقاومت در مقابل آنها باید تمامی ملاحظات لازم صورت پذیرفته و طرح ایمنی اجرا گردد [۴]. در نتیجه بررسی موشکافانه

این نوع از سازه‌های هیدرولیکی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از دیرباز ساخت سد به‌عنوان یکی از پروژه‌های عظیم عمرانی و منابع حیاتی کشورها ذهن مهندسین عمران از لحاظ ذخیره آب و اقتصادی را به خود مشغول کرده به گونه‌ای که طراحی و اجرای آنها برای مدت طولانی پایدار باقی بماند. به‌دلیل نقش مؤثر سدهای خاکی در تأمین نیازهای آبی و نیز ایجاد خطرات بالقوه برای جوامع پایین‌دست آنها، مسائل مربوط به ایمنی سدهای خاکی ضمن ساخت و نیز در دوران بهره‌برداری از اهمیت خاصی برخوردار است. به علت اختلاف بار آبی موجود در دو طرف سدهای خاکی همواره پتانسیل نشت آب از پی و بدنه این‌گونه سازه‌ها وجود دارد [۵].

۱-۲ بیان مسئله و ضرورت انجام تحقیق

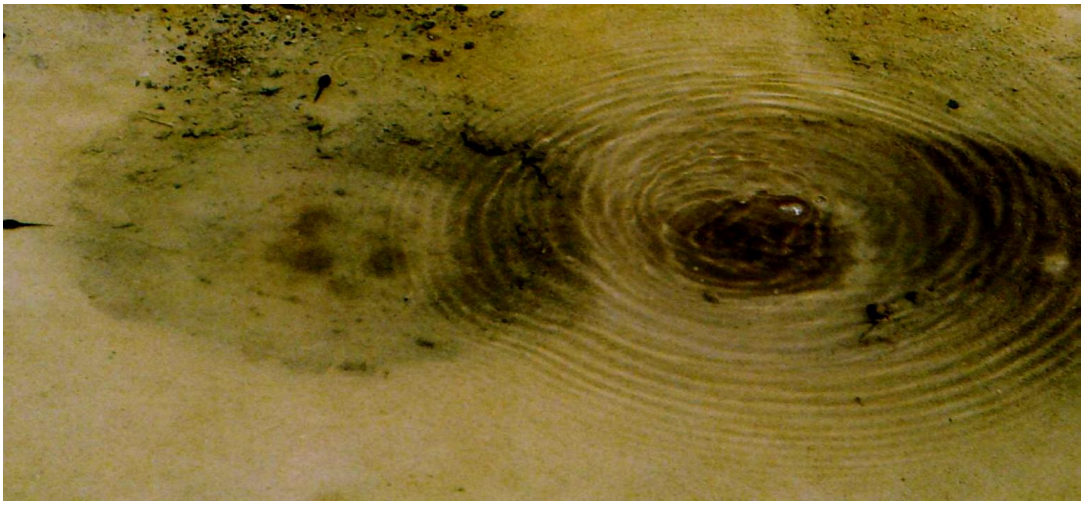
تاکنون محققان زیادی بر پدیده نشت، چه از درون بدنه و چه از پی سدها، مطالعاتی انجام دادند و به نتایج خوبی نیز دست یافته‌اند. مطالعات انجام شده عمدتاً بر اساس تحلیل ریاضی و آنالیز عددی مسائل نشت استوار بوده است. از آنجا که مقایسه بین نتایج مدل‌های عددی با داده‌های صحرائی بدست آمده از سدها، با عدم قطعیت و خطاهای زیادی همراه است، لذا تکیه صرف بر نتایج مدل‌های عددی و داده‌های پیزومتریک ثبت شده توسط سیستم ابزار دقیق سدها نمی‌تواند خیلی رضایت‌بخش باشد. پس تا اینجا بررسی دقیق مسئله نشت از پی و کنترل پیزومتریک فشار بالابر توسط یک مدل فیزیکی، ضروری به نظر می‌رسد. از آنجا که در مدل‌های آزمایشگاهی می‌توان حالات مختلفی از تراز آب بالادست و پائین‌دست سد و شرایط مرزی را مورد بررسی قرار داد، بنابراین بررسی مسئله نشت با استفاده از یک مدل فیزیکی با مقیاس مناسب می‌تواند ما را در رسیدن به اهدافمان یاری رساند. با توجه به اینکه بهترین راه کنترل نشت از پی سازه‌های هیدرولیکی (مانند دایک‌های ساحلی، آب بندهای انحرافی، سدهای خاکی و ...)، نصب پرده آب‌بند و در شرایط خاصی استفاده از بلانکت رسی می‌باشد، بنابراین این تحقیق با هدف ارائه روابطی برای تعیین بهینه عمق پرده آب‌بند و تراز آب بالادست، انجام می‌گردد. به دلیل اینکه کشورمان دارای سواحل طولانی می‌باشد و از دایک‌های ساحلی نیز استفاده می‌گردد و همچنین تشابه فراوان این سازه با سدهای خاکی، تصمیم به انجام این تحقیق گرفته شد. برای ارائه هرچه دقیق‌تر نتایج این تحقیق، از یک مدل آزمایشگاهی که بدین منظور طراحی و ساخته شد برای آنالیز جریان نشت از پی دایک‌های ساحلی و سایر سازه‌های مشابه، استفاده می‌گردد. البته در این تحقیق حالات مختلف تراز آب مورد آزمایش قرار می‌گرفت. خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها، ماسه ساحلی بود که بدترین نوع خاک برای پی سازه‌های آبی است. هدف کلی این تحقیق، بهینه‌سازی سیستم آب‌بندی پی‌های آبرفتی با وجود دو متغیر، عمق پرده آب‌بند و تراز آب می‌باشد. نتایج آزمایشگاهی به‌دست آمده در قالب نمودارهای بی بعد ارائه می‌گردند. متغیرهای مسئله با توجه به حداقل بودن دبی نشت، فشار بالابر و گرادیان هیدرولیکی با توجه به نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی بهینه می‌شوند.

هنگامی که قبل از ساخت سد مطالعات دقیقی صورت نگیرد، در هنگام ساخت سد و یا بعد از ساخت سد در هنگام آبگیری مشکلاتی به وجود می‌آید که مثال‌هایی از آنها آمده است البته لازم به ذکر است که مثال‌های نام‌برده شده در مجموع برگرفته از مثال‌های متعددی است که اتفاق می‌افتد زیرا نشت آب از

سدهای خاکی تقریباً یک اتفاق رایج است اما اگر از حد استاندارد خارج شود به آن فرار آب می‌گویند. محدود نمودن نشت آب از پایین‌دست سدها از الزامات طراحی و اجرای مناسب آنها می‌باشد. این مسئله از طریق شناسایی صحیح ساختارهای زمین‌شناسی و طراحی و اجرای درست پرده تزریق با توجه به این ساختارها قابل دست‌یابی است. بررسی میزان نشت آب و کنترل آن در سدهای خاکی یکی از دغدغه‌های مهم مهندسی به شمار می‌آید. افزایش میزان نشت آب بعد از بهره‌برداری در بسیاری از سدهای خاکی باعث خسارات جبران‌ناپذیری گردیده است. این موضوع در خصوص سد زاوین که در استان خراسان رضوی احداث شده است، مورد بررسی قرار گرفت. با آغاز بهره‌برداری از سد زاوین و بالا آمدن تراز آب دریاچه پشت سد، نشت آب در پایین‌دست سد و بخصوص در تکیه‌گاه چپ مشاهده شد. در این پژوهش، به‌منظور مشخص شدن علت نشت آب، برداشت صحرایی و بررسی ساختار زمین‌شناسی ساختگاه سد، مطالعات جامعی انجام شد. با روش تزریق موازنه فشار تزریق با توجه به تحلیل‌های انجام شده، پرده تزریق جدید و تزریق تحکیمی، طراحی و برای رفع مشکل نشتی‌های باقیمانده نیز اجرا شد. در حین انجام عملیات تزریق نیز آزمون‌های مورد نیاز جهت ایجاد دوغاب تزریق پایدار که دارای کمترین میزان جدایش باشد، فشار آب مخزن و بتواند ناپیوستگی‌های توده سنگ را به خوبی پر کند، صورت گرفت. این عملیات در نهایت باعث حذف نشتی آب در پایین‌دست سد گردید [۱۱]. همان طور که در بند قبلی نیز بیان شد، سد قیصرق سراب به‌عنوان نمونه‌ای از سدهای ساخته شده بر روی بسترهای آبرفتی می‌باشد. این سد از نوع خاکی با هسته رسی مرکزی با ارتفاع تقریبی ۱۵ متر و طول تاج ۹۵۰ متر، یکی از طرح‌های تأمین آب شرب می‌باشد که در استان آذربایجان شرقی و حوزه آبریز آجی چای واقع شده است. پس از آبگیری سد، در پایین‌دست، گودال‌هایی پر از آب مشاهده گردید که ناشی از بروز پدیده جوشش بود (شکل ۱-۱). جوشش آب از گودال‌ها با شسته شدن مصالح پی سد همراه بود. ساختگاه سد شامل لایه‌های مارنی، سیلت استون و ماسه سنگ می‌باشد و پدیده جوشش در پایین‌دست سد، در نتیجه حل شدن لایه‌های ژیپسی و آهکی، افزایش تخلخل و سرعت جریان آب رخ می‌داد (شکل ۱-۲).

در این تحقیق راهکارهای مختلف جهت اصلاح آبگذری سد بررسی گردیده و میزان نشت از بدنه و پی سد به‌وسیله نرم‌افزار SEEP-W برای گزینه‌های منتخب محاسبه شده است. نهایتاً پس از انتخاب گزینه اجرای دیوارهٔ آب‌بند به همراه رویه بتنی در بالادست سد به‌عنوان طرح اصلاح (شکل ۱-۳)، طول بهینه آن با استفاده از این نرم‌افزار تعیین گردید [۸]. همچنین سد بناب[1] مرند از نوع خاکی با هسته رسی مرکزی با ارتفاع ۳۲ متر و طول تاج ۳۱۵ متر، یکی از طرح‌های تأمین آب شرب می‌باشد، که در استان آذربایجان شرقی و حوزه آبریز آجی چای واقع شده است. پس از آبگیری سد، مشاهده گردید که تراز آب دریاچه، بعد از پر شدن مخزن در ماه‌های پر بارش، به‌سرعت کاهش می‌یابد (شکل ۱-۴). بعد از مطالعات انجام یافته مشخص گردید که آب مخزن از طریق تشکیلات با نفوذپذیری بالا که به ناودیس واقع در جناح راست متصل می‌شدند، تخلیه می‌گردید. همچنین با توجه به ساختار آبرفتی و عدم سیمانتاسیون کافی مصالح بستر، با افزایش تراز آب مخزن و افزایش گرادیان هیدرولیکی و در نتیجه شسته شدن مصالح، سرعت تخلیه آب زیاد بود [۱۳].

[1] *Dam Bonab*



شکل ۱-۱ گودال به وجود آمده در اثر پدیده جوشش

شکل ۱-۲ نمایی از پایین‌دست سد قیصرق بعد از اولین آبگیری

شکل ۱-۳ نمایی از سد قیصرق بعد از اجرای طرح اصلاح

شکل ۱-۴ پایین آمدن آب سد بناب

سدهای خاکی معمولاً تحت اثر زیر شویی[۱] و فرسایش داخلی هستند که در صورت عدم توجه می‌تواند به شکست سد منجر گردد.

سد Teton در آمریکا، سد Balderhead در شمال انگلیس، سد Sagar Nanak در هند و سد Tarbela در پاکستان از جمله سدهایی هستند که به دلیل عدم توانایی فیلتر[۲] در جلوگیری از شستشوی مصالح دچار خرابی شده است [۱۴]. نتایج این تحقیقات می‌تواند در آب‌بندی سدها با این خصوصیات مفید باشد.

فرار آب از مخازن امری رایج است. به طور کلی برقراری یکی از دو شرط زیر می‌تواند مخزنی مناسب را به وجود آورد.

الف) دیواره‌ها و کف مخزن از نفوذپذیری کمی برخوردار باشند.

ب) سطح ایستایی طبیعی زمین‌های اطراف دره بالاتر از سطح آب انتخاب‌شده برای مخزن باشد.

بررسی‌های ژئوتکنیکی و طراحی‌های متعاقب آن باید به گونه‌ای انجام شود که بتواند هم در خلال ساختمان و هم در طول عمر مفید سازه، آب زیرزمینی و نشست آن را کنترل نماید.

اهمیت مطالعهٔ آزمایشگاهی مسئله نشت رو به دو دلیل می‌توان توجیه نمود. اول اینکه شرایط پی و خصوصیات زمین‌شناسی ساختگاه[۳] مورد بررسی در صحرا و مدل تفاوت زیادی باهم دارند و دوم اینکه با تقریب معادلات ریاضی حاکم بر حرکت آب زیرزمینی در بیشتر حالات امکان خطا را وارد مسئله نموده و انتظار می‌رود، بین نتایج مدل‌های ریاضی و آزمایشگاهی تفاوت محسوسی وجود داشته باشد.

---

[1] *piping*
[2] *Ability to filter*
[3] Site

۱-۳ اهداف پژوهش

تحقیق انجام‌شده به‌منظور رسیدن به اهداف زیر انجام می‌شود:

۱. یافتن عمق بهینه پردهٔ آب‌بند به طریقه آزمایشگاهی در بکار گیری پرده آب‌بند قائم و مایل

۲. بکار گیری سپری مایل با زاویه ۶۰ درجه نسبت به افق

۳. بررسی تأثیر دیوارهای آب‌بند قائم و مایل بر مقدار نیروی زیر فشار، گرادیان خروجی جریان و پدیده جوشش در پی سازه‌های هیدرولیکی.

۴. واکاوی نظری روابط موجود بدست آمده از نتایج.

۵. مقایسه با روش‌های مرسوم در کتب مرجع مکانیک خاک.

۶. مقایسهٔ داده‌ها و نتایج مدل آزمایشگاهی موجود در دو حالت شرایط جریان ماندگار و غیر ماندگار.

۷. بررسی رفتار پدیدهٔ جوشش در هر دو حالت جریان ماندگار و غیر ماندگار.

۸. یافتن گرادیان هیدرولیکی مطمئن برای جلوگیری از پدیده جوشش ماسه‌ای در آزمایشگاه.

۹. مقایسه بین نتایج کارگذاری پرده آب‌بند قائم و مایل در دو حالت شرایط جریان ماندگار و غیر ماندگار.

۱-۴ معرفی ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه در پنج فصل به‌صورت زیر تنظیم شده است:

فصل اول: در این فصل مقدمه‌ای درباره موضوع مورد تحقیق و پارامترهای مورد مطالعه و ضرورت و اهداف تحقیق ارائه شده است.

فصل دوم: به بررسی پیش‌زمینه و سوابق تحقیق درباره‌ی مطالعه پدیده جوشش ماسه‌ای در پی‌های آبرفتی مربوط به سازه‌های هیدرولیکی پرداخته شده است.

فصل سوم: در این فصل توضیحی در مورد چگونگی ساخت فلوم، تجهیزات مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها و همچنین در مورد نحوه انجام هر کدام از آزمایش‌ها ارائه شده است.

فصل چهارم: در این فصل به ارائه نتایج حاصل از آزمایش‌ها در قالب نمودارهای بی بعد و توضیحات مربوطه به رفتار هر کدام از این گراف‌ها پرداخته شده است.

فصل پنجم: در این فصل به بحث‌ها و نتیجه‌گیری‌های حاصله از آزمایش‌ها و نتایج نمودارها و همچنین به ارائه پیشنهادهایی برای تحقیقات بیشتر در آینده پرداخته شده است.