

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ
هُوَ الْعَلِیْمُ



دانشگاه کشاورزی
گروه مهندسی آب

رساله

برای دریافت درجه دکتری در رشته سازه های آبی

عنوان

تأثیر ابعاد زهکش های افقی در کنترل نشت از بدنه سد خاکی همگن با کاربرد
مدل فیزیکی و روش عددی بدون شبکه (Meshfree)

Effect of Dimensions of Horizontal Blanket Drains on Controlling
Seepage Through Homogeneous Embankment Dam with Application of
Physical Model and Meshfree Numerical Method

استادان راهنما

دکتر داود فرسادی زاده

دکتر علی حسین زاده دلیر

استاد مشاور

دکتر جمشید صدر کریمی

پژوهشگر

امیر ملک پور

چکیده

سد خاکی همگن سازه ای است که با هدف استفاده بهینه از مصالح محلی برای کنترل و ذخیره رواناب سطحی احداث می شود. یکی از مهمترین عوامل تخریب این سازه، نشت از داخل بدنه و زیر پی می باشد. در این تحقیق، برای تعیین ابعاد مناسب زهکش افقی جهت کنترل نشت در شرایط ماندگار و غیرماندگار، آزمایش هایی بر روی مدل فیزیکی سد خاکی همگن انجام شد و نتایج با روابط تحلیلی موجود مقایسه گردید. سپس تحلیل عددی نشت با روش عددی بدون شبکه با استفاده از توابع شعاعی RBF انجام شد تا تأثیر تغییر طول و ضخامت زهکش بر کنترل نشت مورد بررسی و مقایسه با نتایج مدل فیزیکی قرار گیرد. نتایج این تحقیق نشان داد که در آزمایش های نشت ماندگار به ازای حداقل طول زهکش بدست آمده از رابطه چاهر (۲۰۰۴) و حداقل ضخامت، عملکرد زهکش قابل قبول نمی باشد. با افزایش ضخامت کارایی زهکش بهبود یافت اما مقدار پارامتر بدون بعد پوشش شیب پائین دست (d^*) کمتر از مقدار قابل قبول بدست آمد. به ازای بقیه طول ها و ضخامت ها زهکش ها در کاهش تراز سطح فریاتیکی نشت عملکرد مناسب نشان دادند. محدوده تغییرات d^* برای عمق آب ۳۰ سانتی متر در مخزن سد ۰/۶ - ۰/۱ بدست آمد در صورتی که به ازای گرادیان هیدرولیکی اول (عمق آب ۳۵ سانتی متر در مخزن) محدوده تغییرات این پارامتر ۰/۴ - ۰/۰۵ بدست آمد. در مجموع با بررسی سه گرادیان هیدرولیکی ناشی از عمق آب ۳۰، ۳۵ و ۲۵ سانتی متر در مخزن مشخص گردید که طول حداکثر زهکش به ازای همه ضخامت ها و گرادیان های هیدرولیکی مختلف قابلیت کنترل نشت و ظرفیت تخلیه جریان نشتی را داشته است و پوشش شیب پائین دست ایجاد شده بیش از مقدار حاصل از رابطه چاهر (۲۰۰۴) می باشد. با اعمال گرادیان های هیدرولیکی چهارم و پنجم برای طول حداقل زهکش پوشش شیب پائین دست با افزایش ضخامت بترتیب برابر با ۵/۰، ۶/۲ و ۶/۲ سانتی متر برای گرادیان هیدرولیکی چهارم به ازای هر سه ضخامت زهکش برای گرادیان هیدرولیکی پنجم برابر با ۶/۴ سانتی متر بدست آمد. میزان پوشش شیب پائین دست در نزدیکی زهکش به طول متوسط با افزایش ضخامت بترتیب ۱۱/۶، ۱۲ و ۱۲/۸ سانتی متر بدست آمد. این مقدار به ازای گرادیان هیدرولیکی پنجم به ازای ضخامت های زهکش مختلف بترتیب ۱۳/۹، ۱۳/۹ و ۱۴/۵ سانتی متر بدست آمد. به ازای طول حداکثر زهکش، حداکثر پوشش شیب پائین دست در این تحقیق برای گرادیان های هیدرولیکی چهارم و پنجم و برابر با ۲۰/۸ سانتی متر بدست آمد. در شرایط نشت غیرماندگار ناشی از تخلیه سریع با بررسی دو قطعه لغزشی AB و CD برای قطعه AB تغییرات ضریب اطمینان در محدوده ۲/۶-۱/۵ واقع شد که این محدوده برای قطعه CD، ۲/۲-۱/۳ بدست آمد. نتایج نشان داد که اگر $L/H < 0.3$ باشد، زهکش دارای حداقل نسبت طول موثر ($l/h = 0.43$) می تواند پایداری در مقابل لغزش سطحی و عمیق را تأمین نماید. به ازای $L/H > 0.3$ زهکش های با نسبت طول موثر متوسط ($l/h = 0.71$) به ازای ضخامت متوسط به خوبی پایداری در مقابل لغزش را تأمین نمودند. زهکش های با نسبت طول موثر حداکثر ($l/h = 1.1$) به ازای همه ضخامت ها و نسبت های افت سطح آب پایداری در مقابل لغزش سطحی و عمیق را میسر نمودند. همچنین به ازای حداقل ضخامت زهکش تغییرات زمانی ضرایب اطمینان در مقابل لغزش سطحی و عمیق بترتیب در محدوده ۲/۸-۱/۸ و ۲/۵-۱/۸۸ بدست آمد. برای حداکثر ضخامت موثر زهکش تغییرات زمانی ضرایب اطمینان در مقابل لغزش سطحی و عمیق بترتیب ۲-۳ و ۲/۲-۳ حاصل شد. بنابراین نتایج نشان داد که به ازای حداکثر ضخامت موثر، ضریب اطمینان نهایی در مقابل لغزش سطحی و عمیق تقریباً با یکدیگر برابر می باشند. در انتها در تحلیل نشت با استفاده از روش عددی بدون شبکه با استفاده از توابع پایه شعاعی (RBF) سه تابع RBF بی نهایت هموار (گوسی، کوادریک معکوس و مولتی کوادریک) مورد استفاده قرار گرفت و به ازای مقادیر مختلف

فاصله هالتون و پارامتر شکل سطح فریاتیکی حاصل از مدل عددی با نتایج مدل فیزیکی مقایسه گردید. نتایج نشان داد که برای تابع گوسی با کاربرد کوچکترین ابعاد زهکش موثر، با افزایش فاصله هالتون ارتفاع سطح فریاتیکی در نزدیک زهکش بیش از مقدار واقعی تخمین زده می شود و برخورد آن با شیب پائین دست احتمال فرسایش درونی را بیش از واقعیت نشان می دهد. با افزایش طول زهکش و قرارگیری فصل مشترک مرز دیریکله و نیومن در فضای میانی سد خاکی فواصل هالتون بزرگ نتایج دقیق تری نسبت به حالت کاربرد فاصله هالتون بزرگ و حداقل طول زهکش ارائه نمود. برای حداقل طول زهکش بکار رفته در تحقیق با حداقل فاصله هالتون ۴ سانتی متر نتایج قابل قبولی بدست آمد. همچنین برای تابع گوسی با مقدار حداقل خطا در ابعاد کوچک زهکش به ازای مقادیر بالاتر پارامتر شکل (ep>۴-۵) بدست آمد. در حالی که برای توابع مولتی کوادریک و کوادریک معکوس بهترین نتایج برای ابعاد کوچک زهکش در محدوده پارامتر شکل ۲ تا ۳ حاصل شد. با افزایش ابعاد زهکش و فواصل هالتون تقریباً بهترین جواب ها برای همه توابع RBF بکار رفته، در محدوده پارامتر شکل ۲ تا ۴ بدست آمد. تابع کوادریک معکوس برای مقادیر بالای پارامتر شکل (ep>۶) جواب های پایدار اما با دقت کم نسبت به توابع گوسی و مولتی کوادریک بدست آورد و در مقادیر کم پارامتر شکل (ep<۴) از دقت قابل قبولی برخوردار بود. اما تابع مولتی کوادریک در همه محدوده پارامتر شکل بکار رفته پایداری و دقت قابل قبول نشان داد و سطوح فریاتیکی و منحنی های هم پتانسیل را با دقت مناسب محاسبه نمود. همچنین نتایج تحلیل عددی برای زهکش با طول و ضخامت متوسط ناحیه $X < 20\text{cm}$ را ناحیه جریان مرده و ناحیه $X > 90\text{cm}$ را ناحیه دارای فشار منفی تحت تأثیر زهکش برآورد نمود. کاهش طول ناحیه جریان مرده و افزایش منطقه دارای فشار منفی تحت تأثیر زهکش متوسط نشان دهنده پایداری و کاهش احتمال جریان های موئینه در مجاورت و روی شیب پائین دست می باشد. در نتیجه با استفاده از نتایج تحلیل عددی وقوع فرسایش درونی به ازای کاربرد زهکش های با طول و ضخامت بزرگتر یا مساوی با طول و ضخامت زهکش متوسط غیرمحتمل می باشد.

کلمات کلیدی: سد خاکی، نشست ماندگار و غیرماندگار، زهکش افقی، روش بدون شبکه (Meshfree)

فهرست

۱	مقدمه و بررسی منابع
۲	۱-۱- بیان مسأله
۵	۲-۱- نشت در محیطهای متخلخل
۶	۳-۱- روشهای تحلیلی بررسی نشت ماندگار در سدهای خاکی
۱۳	۴-۱- جریان نشت در حالت غیرماندگار
۱۶	۱-۴-۱- نشت غیرماندگار ناشی از تخلیه سریع سد
۲۱	۵-۱- روشهای عددی بررسی نشت
۲۶	۱-۵-۱- روش های عددی بدون شبکه برای حل مسائل مهندسی
۳۶	۲-۵-۱- روش فرم قوی توابع پایه شعاعی (RBF)
۳۸	۱-۲-۵-۱- روش کانسا
۵۴	۲-۲-۵-۱- تقریب کمترین مربعات RBF
۵۶	۳-۲-۵-۱- تقریب کمترین مربعات منظم
۵۹	مواد و روشها
۶۰	۱-۲- مدل فیزیکی
۶۰	۲-۲- مصالح خاکی
۶۵	۳-۲- زهکش افقی
۶۶	۴-۲- آزمایش های نشت
۷۱	۵-۲- روش عددی بدون شبکه
۷۷	۶-۲- ساختار برنامه
۷۹	۱-۶-۲- شرایط مرزی
۸۴	نتایج و بحث
۸۵	۱-۳- آزمایش های نشت ماندگار
۸۵	۱-۳-۱- نشت ماندگار به ازای گرادیان هیدرولیکی حداکثر
۹۳	۲-۱-۳- نشت ماندگار به ازای گرادیان هیدرولیکی دوم
۹۹	۳-۱-۳- نشت ماندگار به ازای گرادیان هیدرولیکی سوم
۱۰۵	۴-۱-۳- نشت ماندگار به ازای گرادیان های هیدرولیکی چهارم و پنجم
۱۱۴	۵-۱-۳- نتیجه گیری تحلیل نشت ماندگار
۱۱۷	۲-۳- نشت غیر ماندگار ناشی از تخلیه سریع به ازای گرادیان هیدرولیکی حداکثر
۱۲۶	۱-۲-۳- نتیجه گیری تحلیل نشت غیرماندگار ناشی از تخلیه سریع
۱۲۸	۳-۳- تحلیل نشت با استفاده از روش عددی بدون شبکه RBF
۱۸۷	نتیجه گیری تحلیل عددی
۱۸۹	منابع مورد استفاده

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- تصحیح اعمال شده توسط کاساگرانده بر سهمی نشست ۷
- شکل ۲-۱- پارامترهای ارزیابی نشست به روش بررسی قطعه ای محدوده جریان ۱۱
- شکل ۳-۱- روش قطعه در سد خاکی همگن بر روی بستر نفوذناپذیر با زهکش پنجه ۱۲
- شکل ۴-۱- شبکه جریان در شیب بالادست پس از افت سطح آب در مخزن ۱۷
- شکل ۵-۱- ضریب اطمینان شیب بالادست به روشهای مختلف در شرایط پدیده RDD به ازای L/H های مختلف ۱۷
- شکل ۶-۱- پارامترهای تحلیل پایداری به روش قطعه بر مبنای روش تعادل حدی ۱۹
- شکل ۷-۱- مکانیزم لغزش شیب های خاکی در شرایط RDD به ازای خاکهای با چسبندگی کم ۲۰
- شکل ۸-۱- تابع RBF متمرکز در مبدأ مختصات با $\epsilon = 1$ سمت چپ و $\epsilon = 3$ سمت راست ۴۲
- شکل ۹-۱- تابع آزمایشی فرانک (Franke) ۴۴
- شکل ۱۰-۱- شمالی فاصله قرارگیری برای ۲۵ نقطه دنباله هالتون ۴۹
- شکل ۱۱-۱- رویه درونیابی شده با استفاده از RBF بر داده ها برای $\epsilon = 21.1$ برای $N=289$ نقطه هالتون (سمت چپ) و $N=1089$ نقطه هالتون (سمت راست) ۵۰
- شکل ۱۲-۱- خطای ماکزیمم (خط چین)، خطای RMS (خط سیاه) در مقابل ϵ برای ۸۱ نقطه هالتون (بالا-چپ)، ۲۸۹ نقطه هالتون (بالا-راست)، ۱۰۸۹ نقطه هالتون (پائین-چپ) و ۴۲۲۵ نقطه هالتون (پائین-راست) ۵۲
- شکل ۱-۲- الف) تصویر کلی مدل فیزیکی ب) آرایش هندسی پیژومترها در بدنه سد خاکی ۶۱
- شکل ۲-۲- دانه بندی مصالح بکار رفته در مدل آزمایشگاهی ۶۲
- شکل ۳-۲- مراحل آزمایش بار افتان جهت اندازه گیری نفوذپذیری مصالح ۶۴
- شکل ۴-۲- منحنی تراکم آزمایش پروکتور استاندارد بر روی مصالح بدنه ۶۵
- شکل ۵-۲- الف) جانمایی تابلوی پیژومترها و حسگرهای ترانسدیوسر در مدل فیزیکی ب) جانمایی مصالح فیلتر و زهکش ۶۶
- شکل ۶-۲- الف) ترانسدیوسر برای اندازه گیری فشار آب منفذی ب) مخزن تزریق ماده رنگی ردیاب و نازل برای مشاهده مسیر خطوط جریان ۶۷
- شکل ۷-۲- الف) ثبت فشار آب منفذی توسط کد TE70 ب) صفحه اصلی کد TE70 و نمودار حسگرهای مختلف ۶۹
- شکل ۸-۲- آرایش حسگرهای فشار آب منفذی در مدل فیزیکی ۷۰
- شکل ۹-۲- نقاط هالتون در مربع واحد در فضای R^2 ۷۳
- شکل ۱۰-۲- نقاط تولید شده توسط دنباله هالتون و تفکیک شده توسط کد Inpolycurve ۷۶
- شکل ۱۱-۲- نقاط مرکزی (Centerpoint) ایجاد شده توسط روش بدون شبکه برای انجام محاسبات ۷۹
- شکل ۱۲-۲- خطوط تراز حاصل در یکی از تکرارها به ازای حداکثر گرادیان هیدرولیکی ۷۹
- شکل ۱-۳- سطوح فریاتیك نشست برای حداقل طول زهکش و گرادیان هیدرولیکی حداکثر به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۸۸
- شکل ۲-۳- سطوح فریاتیك نشست برای طول متوسط زهکش و گرادیان هیدرولیکی حداکثر به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۸۸
- شکل ۳-۳- پوشش شیب پائین دست نسبت به خط آزاد نشست (چاهر ۲۰۰۴) ۸۸
- شکل ۴-۳- سطوح فریاتیك نشست برای حداکثر طول زهکش و گرادیان هیدرولیکی حداکثر به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۸۹
- شکل ۵-۳- مقایسه طول بدون بعد زهکش و پوشش شیب پائین دست حاصل از نتایج آزمایشگاهی و رابطه چاهر(۲۰۰۴) به ازای عمق آب ۳۵ سانتی متر در مخزن ۹۰
- شکل ۶-۳- پارامتر بدون بعد دبی نشست در برابر طول بدون بعد زهکش به ازای ضخامت های مختلف زهکش و گرادیان هیدرولیکی حداکثر ۹۲
- شکل ۷-۳- سطوح فریاتیك نشست برای طول حداقل زهکش و عمق آب ۳۰ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۹۴
- شکل ۸-۳- سطوح فریاتیك نشست برای طول متوسط زهکش و عمق آب ۳۰ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۹۶
- شکل ۹-۳- سطوح فریاتیك نشست برای طول حداکثر زهکش و عمق آب ۳۰ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۹۶
- شکل ۱۰-۳- مقایسه طول بدون بعد زهکش و پوشش شیب پائین دست حاصل شده از نتایج آزمایشگاهی و رابطه چاهر(۲۰۰۴) به ازای عمق آب ۳۰ سانتی متر در مخزن ۹۷
- شکل ۱۱-۳- پارامتر بدون بعد دبی نشست در برابر طول بدون بعد زهکش به ازای ضخامت های مختلف زهکش و عمق آب ۳۰ سانتی متر ۹۸
- شکل ۱۲-۳- سطوح فریاتیك نشست برای طول حداقل زهکش و عمق آب ۲۵ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۱۰۰
- شکل ۱۳-۳- سطوح فریاتیك نشست برای طول متوسط زهکش و عمق آب ۲۵ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۱۰۱
- شکل ۱۴-۳- سطوح فریاتیك نشست برای طول حداکثر زهکش و عمق آب ۲۵ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۱۰۳

- شکل ۳-۱۵- مقایسه طول بدون بعد زهکش و پوشش شیب پائین دست حاصل شده از نتایج آزمایشگاهی و رابطه چاهر(۲۰۰۴) به ازای عمق آب ۲۵ سانتی متر در مخزن ۱۰۳
- شکل ۳-۱۶- پارامتر بدون بعد دبی نشست در برابر طول بدون بعد زهکش به ازای ضخامت های مختلف زهکش و عمق آب مخزن ۲۵ سانتی متر ۱۰۴
- شکل ۳-۱۷- سطوح فریاتیگ نشست برای طول حداقل زهکش و عمق آب ۲۰ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۱۰۵
- شکل ۳-۱۸- سطوح فریاتیگ نشست برای طول حداقل زهکش و عمق آب ۱۵ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۱۰۶
- شکل ۳-۱۹- سطوح فریاتیگ نشست برای طول متوسط زهکش و عمق آب ۲۰ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۱۰۷
- شکل ۳-۲۰- سطوح فریاتیگ نشست برای طول متوسط زهکش و عمق آب ۱۵ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۱۰۸
- شکل ۳-۲۱- سطوح فریاتیگ نشست برای طول حداکثر زهکش و عمق آب ۲۰ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۱۰۹
- شکل ۳-۲۲- سطوح فریاتیگ نشست برای طول حداکثر زهکش و عمق آب ۱۵ سانتی متر در مخزن به ازای ضخامت های مختلف زهکش ۱۱۰
- شکل ۳-۲۳- مقایسه طول بدون بعد زهکش و پوشش شیب پائین دست حاصل شده از نتایج آزمایشگاهی و رابطه چاهر(۲۰۰۴) به ازای عمق آب ۲۰ سانتی متر در مخزن ۱۱۱
- شکل ۳-۲۴- مقایسه طول بدون بعد زهکش و پوشش شیب پائین دست حاصل شده از نتایج آزمایشگاهی و رابطه چاهر(۲۰۰۴) به ازای عمق آب ۱۵ سانتی متر در مخزن ۱۱۱
- شکل ۳-۲۵- پارامتر بدون بعد دبی نشست در برابر طول بدون بعد زهکش به ازای ضخامت های مختلف زهکش و عمق آب مخزن ۲۰ سانتی متر ۱۱۳
- شکل ۳-۲۶- پارامتر بدون بعد دبی نشست در برابر طول بدون بعد زهکش به ازای ضخامت های مختلف زهکش و عمق آب مخزن ۱۵ سانتی متر ۱۱۳
- شکل ۳-۲۷- تغییرات ضریب اطمینان در مقابل افت سطح آب مخزن برای سطح لغزش احتمالی AB ۱۱۹
- شکل ۳-۲۸- تغییرات ضریب اطمینان در مقابل افت سطح آب مخزن برای سطح لغزش احتمالی CD ۱۲۰
- شکل ۳-۲۹- تغییرات زمانی فشار آب منفذی در مدل فیزیکی در حالت وقوع پدیده RDD ۱۲۱
- شکل ۳-۳۰- تغییرات زمانی ضریب اطمینان، ثبت شده پس از حداکثر افت آب مخزن با استفاده از زهکش با طول حداکثر و ضخامت حداقل ۱۲۳
- شکل ۳-۳۱- تغییرات زمانی ضریب اطمینان، ثبت شده پس از حداکثر افت آب مخزن با استفاده از زهکش با طول حداکثر و ضخامت حداکثر ۱۲۴
- شکل ۳-۳۲- نتایج تحقیق حاضر در مقایسه با نتایج ویراتجاندر و میچالوسکی (۲۰۰۶) ۱۲۵
- شکل ۳-۳۳- سطح فریاتیگ برای عمق آب ماکزیمم و زهکش اول با طول ۱۵ و ضخامت ۲/۵ سانتی متر الف (ب) $h=8$ ۱۵۹
- شکل ۳-۳۴- سطح فریاتیگ برای عمق آب ماکزیمم و زهکش دوم با طول ۱۵ و ضخامت ۶ سانتی متر الف (ب) $h=8$ ۱۶۰
- شکل ۳-۳۵- سطح فریاتیگ برای عمق آب ماکزیمم و زهکش سوم با طول ۱۵ و ضخامت ۹/۵ سانتی متر الف (ب) $h=8$ ۱۶۲
- شکل ۳-۳۶- سطح فریاتیگ برای عمق آب ماکزیمم و زهکش چهارم با طول ۲۵ و ضخامت ۲/۵ سانتی متر الف (ب) $h=8$ ۱۶۳
- شکل ۳-۳۷- سطح فریاتیگ برای عمق آب ماکزیمم و زهکش پنجم با طول ۲۵ و ضخامت ۶ سانتی متر الف (ب) $h=8$ ۱۶۶
- شکل ۳-۳۸- سطح فریاتیگ برای عمق آب ماکزیمم و زهکش ششم با طول ۲۵ و ضخامت ۹/۵ سانتی متر الف (ب) $h=8$ ۱۶۷
- شکل ۳-۳۹- سطح فریاتیگ برای عمق آب ماکزیمم و زهکش هفتم با طول ۳۸ و ضخامت ۲/۵ سانتی متر الف (ب) $h=8$ ۱۶۸
- شکل ۳-۴۰- سطح فریاتیگ برای عمق آب ماکزیمم و زهکش هشتم با طول ۳۸ و ضخامت ۶ سانتی متر الف (ب) $h=8$ ۱۷۰
- شکل ۳-۴۱- سطح فریاتیگ برای عمق آب ماکزیمم و زهکش نهم با طول ۳۸ و ضخامت ۹/۵ سانتی متر الف (ب) $h=8$ ۱۷۱
- شکل ۳-۴۲- منحنی های هم پتانسیل تابع کوادریک معکوس به ازای مقادیر مختلف پارامتر شکل ۱۷۷
- شکل ۳-۴۳- منحنی های هم پتانسیل تابع گوسی به ازای مقادیر مختلف پارامتر شکل ۱۷۸
- شکل ۳-۴۴- منحنی های هم پتانسیل تابع مولتی کوادریک برای مقادیر مختلف پارامتر شکل ۱۷۹
- شکل ۳-۴۵- خطای ریشه میانگین مربعات برای $h=4$ الف) زهکش کوچک ب) زهکش متوسط ج) زهکش بزرگ ۱۸۳
- شکل ۳-۴۶- خطای ریشه میانگین مربعات برای $h=6$ الف) زهکش کوچک ب) زهکش متوسط ج) زهکش بزرگ ۱۸۴
- شکل ۳-۴۷- خطای ریشه میانگین مربعات برای $h=10$ الف) زهکش کوچک ب) زهکش متوسط ج) زهکش بزرگ ۱۸۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۱- برخی از مهمترین روشهای عددی بدون شبکه توسعه داده شده ۳۱
- جدول ۲-۱- درونیابی تابع فرانک با RBF غیرساکن با $\epsilon = 21.1$ و ماتریس فاصله اقلیدسی ۵۰
- جدول ۳-۱- درونیابی بهینه با استفاده از تابع RBF برای تابع آزمایشی فرانک ۵۲

فصل اول:

مقدمه و بررسی منابع

۱-۱- بیان مسأله

نشت از بدنه سد خاکی یکی از مهم‌ترین عوامل تخریب این سازه می‌باشد. تقریباً ۳۰ درصد از این سدها بدلیل نشت تخریب گردیده‌اند (میدلبروکز ۱۹۵۳). مطالعه جامعی که توسط فاستر و همکاران (۲۰۰۰) و فل و همکاران (۲۰۰۳) انجام گرفت نشان داد که فرسایش داخلی مهم‌ترین عامل موثر در تخریب سدهای خاکی بوده است. قبل از سال ۱۹۵۰ سهم پدیده فرسایش داخلی در تخریب سدهای خاکی ۴۳ درصد بوده که این نسبت بعد از سال ۱۹۵۰ به ۵۴ درصد افزایش یافته است (چاهر ۲۰۰۴). این مسأله ضرورت توجه به پدیده نشت در بدنه سد خاکی را یادآوری می‌نماید. برای محافظت سد خاکی در برابر خطر تخریب ناشی از نشت باید ترتیبی اتخاذ گردد تا از برخورد خطوط جریان نشتی با شیب پایین دست سد جلوگیری شود زیرا باعث شروع فرسایش به شکل پیش‌رونده گردیده و تخریب سازه را بدنبال خواهد داشت. برای کاهش انرژی جریان نشتی در بدنه سد خاکی تدابیر مختلفی اتخاذ می‌گردد که عبارتند از:

- استفاده از هسته رسی نفوذ ناپذیر در سدهای منطقه بندی شده^۱
 - استفاده از زهکش‌های افقی و پنجه در سدهای همگن^۲
- در مناطقی که تنوع مصالح وجود نداشته باشد معمولاً احداث سد خاکی همگن توصیه می‌شود. ساختار این سازه مشابه خاکریز^۳ محافظ سواحل رودخانه و کانال می‌باشد که در آن تعبیه زهکش افقی و پنجه و یا ترکیبی از آنها روشی رایج برای کاهش انرژی جریان نشتی است. بالقاسم و

1 - Zoned Embankment Dam

2 - Homogeneous Embankment Dam

3 - Levee

عبدالرحمن (۲۰۰۸) نقش لایه زهکش افقی در سد خاکی همگن در عملکرد سازه و پایداری مکانیکی و هیدرولیکی آن را بسیار با اهمیت برشمردند به این ترتیب که:

- با پائین آوردن خط نشت شیب پائین دست را محافظت می نماید.
- با تعبیه زهکش می توان حجم بیشتری از مصالح را استفاده نمود و سدی با ابعاد بزرگ احداث نمود زیرا کاربرد زهکش موجب پایداری مکانیکی سازه و جلوگیری از کاهش زاویه اصطکاک داخلی می گردد.

- باعث کاهش هدر روی آب مخزن سد از طریق بدنه می شود.

- آب نشت یافته در بدنه و پی سد را جمع آوری و تخلیه می نماید.

استفاده از لایه زهکش افقی عمدتاً در سدهای خاکی با ارتفاع متوسط رایج می باشد. تاکنون روشهای تحلیلی مختلفی توسط محققین برای طراحی ابعاد و موقعیت زهکش در بدنه سد خاکی ارائه گردیده است. نامروف (۱۹۴۲) راه حل تحلیلی برای جریان با سطح آزاد در بدنه سد خاکی همگن دارای زهکش پنجه بر روی سطح نفوذ ناپذیر ارائه نمود. راه حل تحلیلی او قابل کاربرد برای کسب نتایج عددی دقیق نبود. پیش از او کوزنی (۱۹۳۱) رابطه ای برای جریان دو بعدی در بدنه سد خاکی همگن ارائه نمود که از مقبولیت بیشتری برخوردار گردید و در آن فرض بر این بود که سطح شیب دار بالادست سد شکلی سهموی داشته و زهکش افقی در شیب پایین دست تعبیه می گردد. رابطه کوزنی در شرایطی که هندسه مسأله با آن مطابقت داشته باشد یکی از جواب های خاص معادله دیفرانسیل لاپلاس که معادله عمومی نشت در محیط متخلخل است می باشد. به طور کلی هر معادله تحلیلی که در معادله دیفرانسیل لاپلاس صدق کند یک جواب خاص می باشد و

نمی‌تواند برای تمامی هندسه‌ها و در شرایط مرزی مختلف از دقت کافی برخوردار باشد. بدین منظور گرایش به سمت حل عددی معادله لاپلاس رواج بیشتری یافت. در میان روش‌های عددی در چند دهه گذشته روش‌های تفاضل محدود، حجم محدود و اجزای محدود رواج یافته است. این روش‌ها علی‌رغم دقت قابل قبول نسبت به معادلات تحلیلی ارائه شده، دارای نواقصی نیز می‌باشند زیرا انتخاب موقعیت گره‌ها^۱ و ایجاد شبکه علاوه بر وقت‌گیر بودن بعضاً در محاسبات ۳ بعدی تبدیل به مسأله‌ای تعیین‌کننده می‌شود که بر روی همگرایی و دقت جوابها تاثیرگذار است. در این تحقیق از روش عددی بدون شبکه استفاده می‌شود که در آن نیازی به شبکه بندی فضای حل عددی نمی‌باشد و گره‌های موجود در فضای حل عددی مستقل از موقعیت سایر گره‌ها می‌باشند. با توجه به اینکه در میان معادلات تحلیلی و راه حل‌های عددی ارائه شده توسط محققین روش دقیقی برای تعیین طول مناسب زهکش افقی با در نظر گرفتن ضخامت‌های متغیر و به ازای گرادین‌های هیدرولیکی مختلف ارائه نشده است، لازم است مطالعه جامعی صورت گیرد و روش عددی مورد استفاده با نتایج مدل فیزیکی مقایسه گردیده و پس از صحت سنجی به صورت روابط مکمل بر روابط تحلیلی موجود برای استفاده طراحان در اختیار آنها قرار گیرد.

همچنین به عنوان بخش تکمیلی در این تحقیق به ازای شرایط جریان غیرماندگار^۲ در هنگام پائین افتادگی سریع سطح آب در مخزن^۳ عملکرد لایه‌های زهکش افقی با ابعاد مختلف مقایسه می‌شود تا نقش این زهکش‌ها در کاهش فشار منفذی و افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست پس از تخلیه سریع مخزن مشخص گردد. از آنجائی که پس از وقوع افت سریع آب در

1 - Node

2 - Unsteady Flow

3 - Rapid Drawdown

مخزن افزایش فشار منفذی در شیب بالادست بدنه سد بوجود می‌آید و خطر ناپایداری^۱ و لغزش^۲ شیب بالادست وجود خواهد داشت لازم است تأثیر ابعاد مختلف زهکش‌های افقی در پایداری شیب بالادست مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲-۱- نشت در محیط‌های متخلخل

حل مسائل مربوط به نشت همزمان با کارهای هنری داری در زمینه نشت آب‌های زیرزمینی در سال ۱۸۵۶ آغاز گردید. نتایج بررسی‌های او نشان داد که جریان نشت را می‌توان با ترکیب قانون داری و معادله پیوستگی بیان نمود. به همین دلیل تمامی فرضیات این معادلات در معادله نشت نیز غیرقابل اجتناب می‌نمود. قانون داری اساساً بیانگر وابستگی خطی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان می‌باشد (هارتونو ۲۰۰۲). نحوه استخراج معادله نشت در حالت دوبعدی به شکل زیر می‌باشد.

(۱-۱) معادله پیوستگی برای جریان غیرقابل تراکم

$$\bar{\nabla} \cdot \bar{v} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

(۲-۱) رابطه داری

$$u = k_x \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$v = k_y \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

که در آن پتانسیل سرعت و u و v بترتیب مؤلفه‌های سرعت و k_x و k_y هدایت هیدرولیکی در امتداد X و Y می‌باشند. با جایگزینی رابطه ۱-۲ در رابطه ۱-۱ معادله نشت (رابطه ۱-۳) که یک معادله دیفرانسیل بیضوی است حاصل خواهد شد که در صورت تساوی k_x و k_y به آن معادله لاپلاس در حالت دوبعدی گفته می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0 \quad (3-1)$$

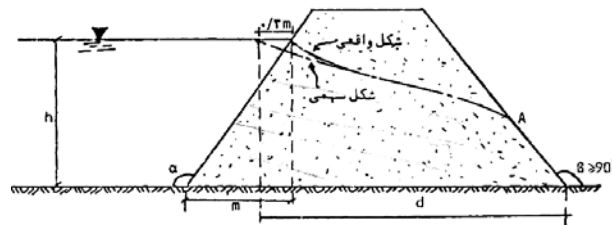
در نشت آبهای زیرزمینی وقتی جریان غیرقابل تراکم و در معرض تغییرات دمایی کم قرار داشته باشد تناسب بیشتری با معادله داری خواهد داشت. لازم به ذکر است که از لحاظ فیزیکی تمامی سیستم‌های جریان در ۳ بعد توسعه می‌یابند، اما تحقیقات نشان داده است که در بسیاری از مسائل جریان نشت و آب زیرزمینی خصوصیات جریان صفحه‌ای می‌باشد همچنین خصوصیات جریان در صفحات موازی مشابه یکدیگر خواهند بود و بررسی دو بعدی جریان نشتی تا حد زیادی می‌تواند تعیین‌کننده خصوصیات جریان در محیط متخلخل باشد (هارتونو ۲۰۰۲).

۱-۳- روش‌های تحلیلی بررسی نشت ماندگار در سدهای خاکی

دوپویی - فورشه‌ایمر در دهه ۱۹۳۰ روابط تقریبی برای محاسبه نشت ارائه نمودند که به فرمول دوپویی شهرت یافته است. تئوری دوپویی بر مبنای دو فرض اولیه شکل گرفته است. اولاً در مواردی که شیب خط نشت کم است می‌توان خطوط جریان را بصورت افقی در نظر گرفت، ثانیاً گرادیان هیدرولیکی در امتداد قائم ثابت می‌باشد. سپس محققین بر اساس فرضیه دوپویی رابطه‌ای برای تعیین a ، فاصله محل برخورد خط نشت با شیب پائین‌دست (در امتداد شیب پائین‌دست) نسبت به پنجه سد در حالتی که پایاب وجود نداشته باشد (رابطه ۱-۴) ارائه نمودند (گیلبوی ۱۹۳۳ ، سوورز و سالی ۱۹۶۲).

$$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}} \quad (۴-۱)$$

α زاویه شیب پائین دست سد، h ارتفاع آب در مخزن سد و d فاصله افقی پنجه سد از محل شروع سهمی نشت با اعمال تصحیح کاساگرانده می باشد. بررسی ها نشان داد دقت رابطه ۴-۱ برای $\alpha > 30$ تا حد زیادی کاهش می یابد. کاساگرانده (۱۹۳۷) برای رفع عیب رابطه دوپویی راه حلی ترسیمی برای رسم شبکه جریان^۱ بمنظور تعیین موقعیت برخورد سهمی نشت با شیب پائین دست ارائه نمود. او بر اساس مطالعات تجربی به این نتیجه رسید که اگر سهمی نشت به طور کامل ترسیم شود سطح آزاد را در نقطه ای به فاصله افقی $0.3m$ از شیب بالادست قطع می نماید که به آن تصحیح کاساگرانده گفته می شود. (شکل ۱-۱)



شکل ۱-۱- تصحیح اعمال شده توسط کاساگرانده بر سهمی نشت

در حالی که محققین مختلف روابط تقریبی زیادی ارائه نمودند که اساس همه آنها تئوری دوپویی بوده است، کوزنی (۱۹۳۱) و نامروف (۱۹۴۲) نخستین کسانی بودند که روش هایی برای ترسیم خط آزاد نشت در بدنه سدهای خاکی دارای زهکش ارائه نمودند. رابطه نامروف (۱۹۴۲) بدلیل عدم قابلیت کاربرد در کسب نتایج عددی دقیق از مقبولیت زیادی برخوردار نشد (میشرا و پاریدا،

۲۰۰۶). در این شرایط گرایش محققین عمدتاً به استفاده از روابط کوزنی معطوف گردید. کوزنی (۱۹۳۱) توابع تحلیلی برای برخی از جریان های دو بعدی ارائه نمود که از جمله آنها می توان به توابعی برای نشت از کانال و بدنه سد خاکی اشاره نمود. او با استفاده از مدل های فیزیکی و ریاضی و بر اساس تئوری نگاشت های مختلط روابط خود را برای سد خاکی با یک لایه زهکش افقی بر روی بستر نفوذناپذیر ارائه نمود. بر طبق تئوری کوزنی خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل در بدنه سد خاکی به صورت سهمی های هم کانون می باشند که محل تقریبی کانون، در نقطه شروع لایه زهکش افقی می باشد. او بر این عقیده بود که شکل کلی سهمی نشت از رابطه ۵-۱ تبعیت می نماید.

$$z = cw^2 \quad (5-1)$$

$$z = x + iy$$

$$w = \varphi + i\psi$$

که c یک مقدار ثابت، φ و ψ بترتیب پتانسیل سرعت و تابع جریان می باشند. کوزنی (۱۹۳۱) با اعمال شرایط مرزی $\varphi = -k.y$ و $\psi = q$ در روابط بالا، روابط سطح فریاتیگ نشت ودبی جریان نشتی (q) را ارائه نمود. (روابط ۶-۱ و ۷-۱)

$$x = \frac{1}{2} \left(\frac{q}{k} - \frac{k}{q} y^2 \right) \quad (6-1)$$

$$q = 2kx_0 \quad (7-1)$$

که در آن k هدایت هیدرولیکی، q دبی جریان نشتی و x_0 فاصله محل برخورد سطح نشت با زهکش نسبت به ابتدای زهکش می باشد. ایراد رابطه کوزنی این است که برای تعیین موقعیت

درست خط نشت باید وجه بالادست سد که اولین خط هم پتانسیل است دارای شکل سهموی باشد و با توجه به اینکه وجه بالادست بصورت خط مستقیم است جواب بدست آمده از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. با وجود این، تاکنون رابطه کوزنی یکی از معتبرترین روابط تحلیلی برای جریان نشت از بدنه سد خاکی دارای زهکش بوده است. با توجه به نیاز مهندسین طراح به داشتن روابطی کاربردی برای تعیین طول لایه زهکش افقی افراد مختلف در این زمینه راه‌حلهایی ارائه نمودند (معیری، ۱۹۷۲، USBR، ۲۰۰۳ و چاهر، ۲۰۰۴). در روابط تجربی USBR (۲۰۰۳) پوشش شیب پائین‌دست^۱ (حداقل فاصله عمودی بین خط نشت و شیب پائین دست) در نظر گرفته نشده است. چاهر (۲۰۰۴) روابطی بدون بعد و صریح برای تعیین حداقل طول زهکش افقی برای کنترل سطح فریاتیک نشت در بدنه سد خاکی همگن به همراه روابطی غیرخطی برای تعیین حداکثر پوشش شیب پائین‌دست و حداقل و حداکثر طول مؤثر سیستم زهکش افقی در شرایط ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ ارائه نمود. (روابط ۸-۱ تا ۱۰-۱)

$$d_{\max}^* = \frac{[F_{B^*}(m+n) + T_*]}{\sqrt{(1+n^2)}} \quad (۸-۱)$$

$$l_{\min}^* = \frac{1+n^2}{2n^2} \left\{ 0.3m + n + F_{B^*}(m+n) + T_* - \sqrt{[0.3m + n + F_{B^*}(m+n) + T_*]^2 - n^2} \right\} \quad (۹-۱)$$

$$l_{\max}^* = F_{B^*}(m+n) + T_* + \frac{1+n^2}{2n^2} \left[0.3m + n - \sqrt{(0.3m+n)^2 - n^2} \right] \quad (۱۰-۱)$$

که d_{max}^* ، l_{min}^* ، l_{max}^* به ترتیب حداکثر پوشش شیب پائین دست، حداقل طول زهکش افقی و حداکثر طول زهکش افقی برای حالت ایزوتروپ می‌باشند. علامت * در روابط بالا نشانه بدون بعد بودن متغیر مربوطه با تقسیم بر عمق آب در مخزن سد می‌باشد. همچنین m و n بترتیب شیب بالادست و پائین دست سد خاکی می‌باشند و T^* و F_B^* بترتیب عرض بدون بعد تاج سد و عمق آزاد بدون بعد می‌باشند.

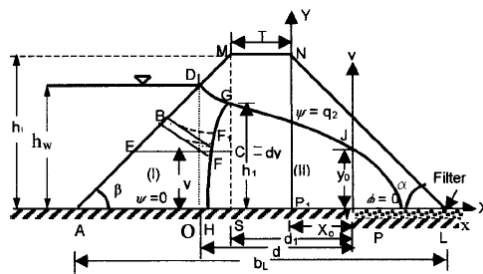
میشرا و سینگ (۲۰۰۵) روابطی را براساس تئوری کوزنی برای تعیین موقعیت مناسب و ارتفاع زهکش های افقی ارائه نمودند. روشی که آنها بکار بردند بررسی قطعه‌ای^۱ محدوده جریان در شرایط جریان دو بعدی ماندگار می‌باشد. آنها برخلاف کوزنی (۱۹۳۱) مقاومت ایجاد شده در فضای بین خط هم پتانسیل سهموی کوزنی در بالادست (که تطابق آن با شیب بالادست از فرضیات کوزنی بوده است) و شیب مستقیم بالادست را لحاظ نمودند. نتیجه تحقیقات آنها نشان داد در مواقعی که شیب وجه بالادست سد خاکی ملایم باشد تنها تصحیح کاساگرانده نمی‌تواند مکان هندسی سطح فریاتیک نشت در بدنه سد خاکی را بدرستی تشریح نماید زیرا شیب ملایم باعث می‌شود که در نزدیکی محل تلاقی شیب بالادست با افق منطقه‌ای بدون جریان^۲ ایجاد شود. نتیجه این خواهد بود که اگر افزایش طول زهکش به این ناحیه کشیده شود تأثیری در کاهش رقوم سطح نشت در بدنه سد نخواهد داشت. همچنین مقدار نشت محاسبه شده توسط روش بررسی قطعه‌ای محدوده جریان کمتر از نشت محاسبه شده از تئوری کوزنی بدست آمد که با توجه به در نظر گرفتن مقاومت در ناحیه بین سهمی اولیه کوزنی و شیب بالادست به واقعیت نزدیکتر می‌باشد. بنابراین طول لایه زهکش افقی محاسبه شده در روش کوزنی بیش از مقدار ضروری تخمین زده

1 - Fragment Method
2 - Dead Zone

می‌شود که افزایش هزینه تهیه و نصب مصالح فیلتر را به دنبال خواهد داشت. آنها همچنین با در نظر گرفتن مقدار حداقل پوشش شیب پائین‌دست (که مفهوم آن کمترین فاصله عمود سطح فریاتیکی نشت از شیب پائین دست می‌باشد بر طبق رابطه ۱-۱۱ با برابر قرار دادن آن با میزان صعود موئینگی مطلوب طول لایه زهکش افقی را تخمین زدند.

$$\Delta Y_{\min} = h_L - \frac{1}{m_2}(d_1 - T) - \left[\frac{1 + m_2^2}{2m_2} \right] (\sqrt{d_1^2 + h_1^2} - d_1) \quad (11-1)$$

پارامترهای این رابطه در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. در شکل ۲-۱ سطح مشترک قطعه اول و دوم که با منحنی GFH نشان داده شده است توسط رابطه کوزنی (رابطه ۵-۱) بدست می‌آید.



شکل ۲-۱- پارامترهای ارزیابی نشت به روش بررسی قطعه ای محدوده جریان (میشرا و سینگ ۲۰۰۵)

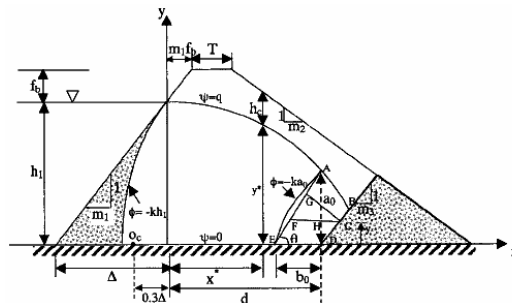
همچنین نتایج آن در مقایسه با روش نامروف از دقت بالایی برخوردار بوده است. علاوه بر این، مشخص گردید که صعود موئینگی در بالای خط فریاتیکی بر انتخاب موقعیت فیلتر و زهکش موثر می‌باشد و هرچه شیب بالادست ملایم‌تر باشد (مقدار m_1 بزرگتر باشد) می‌توان مکان لایه زهکش را نسبت به شیب بالادست به دلیل ایجاد منطقه بدون جریان و مقاومت بیشتر در برابر جریان نشت در شیب بالادست دورتر انتخاب نمود.

از سوی دیگر میشرا و پاریدا (۲۰۰۶) روش بررسی قطعه‌ای محدوده جریان را برای تعیین ارتفاع مناسب زهکش‌های پنجه (که کنترل نشت را با تکیه بر ضخامت (ارتفاع) خود انجام

می دهند) در سد خاکی همگن بر روی بستر نفوذناپذیر بکار بردند. پارامترهایی که آنها در روابط خود لحاظ نمودند شامل سطح آب مخزن، صعود موئینگی در بدنه سد، عمق آزاد، عرض تاج سد، شیب شیروانی‌ها و موقعیت پایاب بودند. آنها بیان نمودند که این مقادیر باید به شکلی در نظر گرفته شود که صعود موئینگی به خوبی در بدنه سد و بالای خط فریاتیک مهار شود. آنها برای تعیین ارتفاع زهکش رابطه خود را ارائه نمودند (رابطه ۱۲-۱).

$$h_t = \frac{0.5(m_2^2 + 1)(\sqrt{d^2 + h_1^2} - d) + m_2 h_c}{m_2 + m_3} \quad (12-1)$$

که در آن h_t ارتفاع زهکش پنجه، h_1 عمق آب در مخزن سد، m_2 و m_3 بترتیب شیب خاکریز پائین‌دست و شیب قسمت افقی بالادست زهکش پنجه، h_c صعود موئینگی و d فاصله پاشنه زهکش پنجه تا مبدا می‌باشند که این پارامترها در شکل ۳-۱ نشان داده شده‌اند. همانطور که در این رابطه مشاهده می‌شود همانند لایه زهکش افقی، در تعیین ابعاد زهکش پنجه نیز ارتفاع موئینگی نقش مهمی ایفا می‌نماید.



شکل ۳-۱- روش قطعه در سد خاکی همگن بر روی بستر نفوذناپذیر با زهکش پنجه
(میشرا و پاریدا ۲۰۰۶)