طرح زهکشی تکیه‌گاه نفوذپذیر سدهای خاکی

ابوالفضل شمسایی (استاد)
تورج سبزواری (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

در طرح سدهای خاکی، ممکن است تکیه‌گاه سد، تپه‌یی با نفوذپذیری بالا باشد. حرکت آب از میان تکیه‌گاه سد متأثر از سطح آب مخزن است و تراوش آب بیش از حد مجاز از تکیه‌گاه ممکن است پایداری تکیه‌گاه را با خطر جدی مواجه کند. محاسبه‌ی دبی عبوری از تکیه‌گاه سد، از مسائل مهم در طراحی خصوصیات زهکش تکیه‌گاه است.

برای زهکشی تکیه‌گاه نفوذپذیر سدهای خاکی، می‌توان از زهکش لوله‌یی یا کانال زهکش (پر شده از مصالح زهکشی) در محل مناسبی در شیب پایین‌دست تکیه‌گاه استفاده کرد. در این تحقیق برای زهکشی تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک، از کانال زهکش در شیب پایین‌دست تکیه‌گاه استفاده شده است. برای تحلیل مسئله‌ی تراوش از تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک از دو نرم‌افزار MSEEP و GMS(SEEP۲D) استفاده شده است. برای کاهش سطح تراوش در شیب پایین‌دست تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک و افزایش دبی عبوری از زهکش، باید از کانال زهکشی، به عرض ۲ متر و ارتفاع ۳ متر استفاده شود. بهترین محل برای اجرای کانال زهکش پایین‌ترین نقطه‌ی سطح تراوش است.

مقدمه

برای زهکشی تکیه‌گاه نفوذپذیر سدهای خاکی می‌توان از روش‌های مختلف زهکشی ــ نظیر تونل‌های زهکش، چاه‌های زهکش و زهکش‌های افقی ــ استفاده کرد. به‌طور کلی این روش‌ها به علت شرایط محدود اجرایی مقرون به صرفه نبوده و کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.[۱] یکی از روش‌های زهکشی تکیه‌گاه سدهای خاکی، استفاده از زهکش‌های موضعی در شیب پایین‌دست تکیه‌گاه است. این زهکش‌ها به دو صورت لوله‌یی و کانال زهکش (پر شده از مصالح زهکشی) قابل اجرا هستند.

برای اتصال زهکش‌ها به خاک تکیه‌گاه سد، از یک لایه‌ی فیلتر به‌ضخامت مناسب استفاده می‌شود. مهم‌ترین پدیده‌یی که فیلترها و زهکش‌ها را تهدید می‌کند، گرفتگی و مسدود شدگی[۱] آنها توسط ذرات ریز خاک است.[۲و۳]

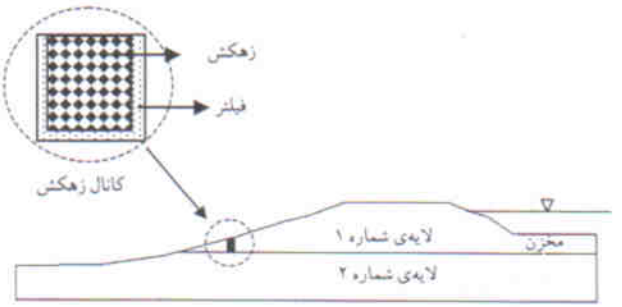
به‌طورکلی فعل و انفعالات فیزیکی و زیست‌شناختی که بین محیط فیلتر و خاک صورت می‌گیرد باعث گرفتگی فیلترها می‌شود. این فعل و انفعالات موجب انتقال ذرات ریز خاک به داخل فیلتر شده و با ته‌نشین شدن این ذرات در حفره‌های فیلتر، ظرفیت زهکشی فیلترها کاهش می‌یابد.[۴] زهکش‌های لوله‌یی نیز به‌دلیل انسداد توسط ذرات ریز خاک و ریشه‌ی گیاهان، برای این منظور مناسب نیستند.[۵]

در این تحقیق نحوه‌ی طراحیِ کانالِ زهکشِ تکیه‌گاهِ سدِ خاکیِ برنجستانک ــ از لحاظ دانه‌بندی فیلتر و زهکش، ابعاد مناسب، ظرفیت زهکشی، دبی عبوری از زهکش‌ها و مکان زهکش در شیب پایین‌دست تکیه‌گاه ــ مورد بررسی قرار گرفته است.

طرح زهکشی تکیه‌گاه نفوذپذیر سدهای خاکی

یکی از بهترین روش‌های زهکشی تکیه‌گاه نفوذپذیر سدهای خاکی، استفاده از کانال زهکش (پر شده از مصالح زهکشی) در شیب پایین‌دست تکیه‌گاه است. شکل کانال زهکش به شیب پایین‌دست تکیه‌گاه بستگی دارد و معمولاً به دو صورت ذوزنقه‌یی و مستطیلی اجرا می‌شود. شکل ۱ محل و شکل کانال زهکش شیب پایین‌دست تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک را نشان می‌دهد.

کانال زهکش نشان داده شده در شکل ۱، شیب پایین‌دست تکیه‌گاه سد را زهکشی کرده و آب خروجی از آن توسط زهکش دیگری در پایین‌دست تکیه‌گاه به رودخانه انتقال خواهد یافت.



شکل ۱. محل کانال زهکش در شیب پایین‌دست تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک.

معرفی نرم‌افزارهای MSEEP و GMS(SEEP۲D)

برای محاسبه‌ی میزان تراوش و تعیین خصوصیات زهکش تکیه‌گاه نفوذپذیر سدهای خاکی باید از مدل عددی مناسب استفاده شود. پارامترهای معرفی شده برای مدل عبارت‌اند از: شکل مقاطع تکیه‌گاه، تعداد لایه‌ها، ضریب هدایت هیدرولیکی هر لایه، نحوه‌ی المان‌بندی و شرایط مرزی حاکم بر تکیه‌گاه سد. برای تعیین دبی عبور از زهکش‌ها باید بدترین شرایط تکیه‌گاه را به‌عنوان شرایط مرزی برای مدل تعریف کرد. این شرایط در صورت پربودن مخزن سد و کمینه بودن سطح آب در پایین‌دست تکیه‌گاه در نظر گرفته می‌شود. برای بهینه‌بودن عملکرد زهکش‌ها، باید در محل مناسبی بر روی سطح تراوش اجرا شوند.

در این تحقیق برای محاسبه‌ی دبی عبوری از تکیه‌گاه، میزان سطح تراوش، تعیین سطح آزاد آب داخل تکیه‌گاه و ترسیم شبکه‌ی جریانِ داخل تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک از دو نرم‌افزار MSEEP و GMS(SEEP۲D) استفاده شده است. نرم‌افزارهای مزبور از جمله نرم‌افزارهای در دسترس‌اند که معادلات حاکم بر حرکت آب در محیط‌های متخلخل را به روش المان‌های محدود حل می‌کنند. برای تأیید جواب‌های به‌دست آمده از دو نرم‌افزار، از ارقام و اطلاعات درج شده در گزارشات مربوط به بازدیدهای صورت گرفته از تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک استفاده شده است. با توجه به در دسترس بودن نسخه‌ی آزمایشی[۲] نرم‌افزار GMS(SEEP۲D)، برای تعیین ابعاد کانال زهکش و محل زهکش در شیب پایین‌دست تکیه‌گاه سدخاکی برنجستانک، و تحلیل حساسیت از برنامه‌ی MSEEP استفاده شده‌است. در این برنامه، نحوه‌ی تعریف کانال زهکش و لایه‌های تکیه‌گاه، تغییر پارامترهای مدل (برای انجام تحلیل حساسیت) و سرعت محاسبات بالاست و به‌آسانی صورت می‌گیرد.

محاسبه‌ی تراوش از تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک

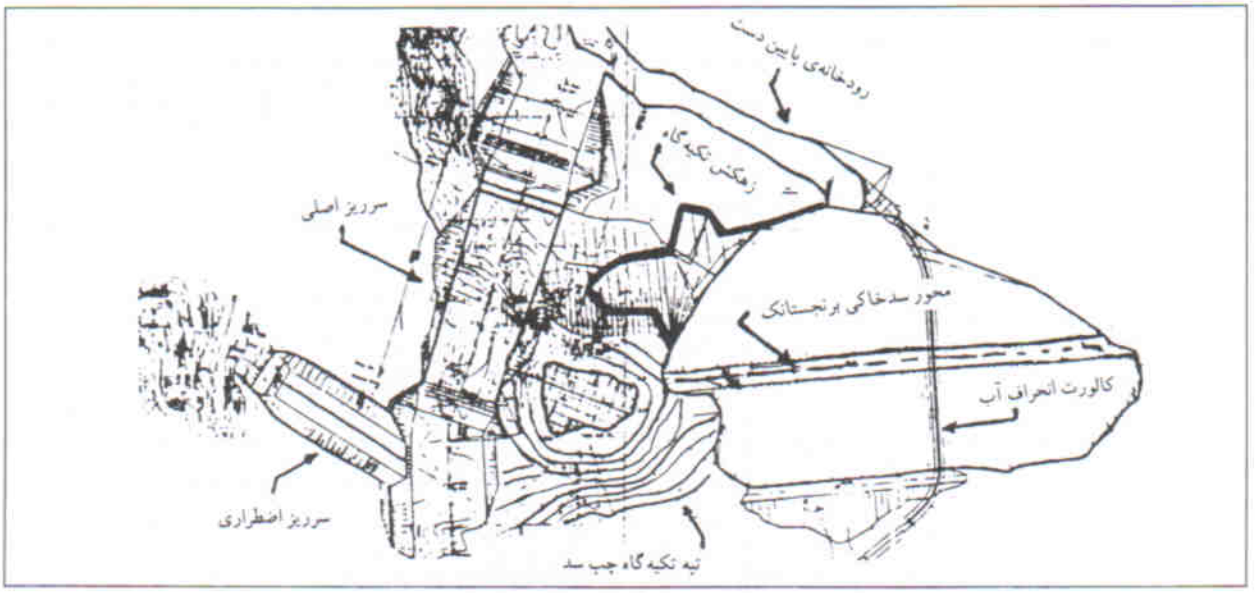
در این تحقیق طرح زهکشی تکیه‌گاه چپ سد خاکی برنجستانک مورد بررسی قرارگرفته است. سد برنجستانک از نوع سدهای خاکی و با هسته‌ی رسی است که در نزدیکی شهرستان قائم‌شهر در استان مازندران قرار دارد. تکیه‌گاه چپ سد خاکی برنجستانک بین سد و سریز سد قرار دارد (شکل ۲) با توجه به ابعاد و خصوصیات تکیه‌گاه سد برنجستانک، برای مطالعه‌ی خصوصیات جریان در تکیه‌گاه، دو مقطع برای آن در نظر گرفته شده است. شکل این مقاطع و نحوه‌ی لایه‌بندی آنها براساس مطالعات ژئوتکنیک و گمانه‌های حفر شده در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود.[۶]

ضرایب هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف تکیه‌گاه و عمق آنها برای هر مقطع در جدول شماره‌ی ۱ ارائه شده است.[۶]

مقدار دبی عبوری ۱ و ۲ تکیه‌گاه و سطح تراوش برای هر مقطع، توسط نرم‌افزارهای MSEEP و SEEP۲D محاسبه شده است که در جدول ۲ ارائه گردیده است.[۷]

شبکه‌ی جریان برای مقاطع ۱ و ۲ تکیه‌گاه سد برنجستانک با نرم‌افزار MSEEP ترسیم شده است که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود.

با استفاده از نرم‌افزار MSEEP و SEEP۲D دبی عبوری از تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک در حالتی که سطح آب در مخزن



شکل ۲. پلان سد و تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک.

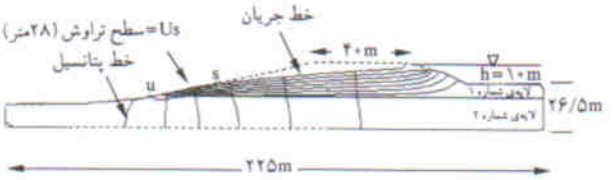
بیشینه باشد، حدود ۴/۵ لیتر بر ثانیه محاسبه شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، کل شبکه‌ی جریان در لایه‌ی فوقانی تکیه‌گاه قرار دارد و این عامل باعث ایجاد یک سطح تراوش بزرگ در شیب پایین تکیه‌گاه شده است.

با توجه به بازدیدهای صورت گرفته از تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک، موارد زیر گزارش شده است:

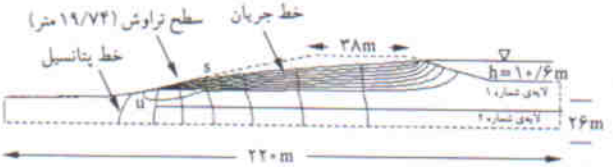
۱. زمین‌های پایین‌دست تکیه‌گاه نسبت به شیب پایین‌دست آن خشک‌اند.

۲. دبی خروجی از سطح تراوش ۴ تا ۶ لیتر بر ثانیه برآورد شده است.

از مطالب بالا می‌توان نتیجه گرفت که جواب‌های به دست آمده از برنامه‌ی MSEEP در تحلیل مسئله‌ی تراوش از تکیه‌گاه برنجستانک مناسب است. دراین تحقیق تأثیر ضریب هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف تکیه‌گاه، بر دبی عبوری از تکیه‌گاه و سطح تراوش مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج به دست آمده از آن در جدول ۳ ارائه شده است. از این جدول نتیجه می‌شود که ضریب هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف تکیه‌گاه بر دبی عبوری از سد و سطح تراوش تأثیر



شکل ۳. شبکه‌ی جریان در مقطع شماره‌ی ۱ تکیه‌گاه چپ سد خاکی برنجستانک.



شکل ۴. شبکه‌ی جریان در مقطع شماره‌ی ۲ تکیه‌گاه چپ سد خاکی برنجستانک.

جدول ۱. ضریب هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک.

شماره‌ی مقطع ـ شماره‌ی لایه	عمق لایه‌ها (m)	ضرایب هدایت هیدرولیکی لایه‌ها ($\frac{cm}{s}$)	نسبت ضرایب هدایت هیدرولیکی
۱ـ۱	۰ـ۲۰	$k_1=۴/۵\times۱۰^{-۳}$	$\frac{k_1}{k_2}=۲۲/۵$
۲ـ۱	۲۰ـ۳۸/۵	$k_2=۲\times۱۰^{-۴}$	
۱ـ۲	۰ـ۲۰	$k_1=۴/۵\times۱۰^{-۳}$	$\frac{k_1}{k_2}=۲۲/۵$
۲ـ۲	۲۰ـ۳۸/۶	$k_2=۲\times۱۰^{-۴}$	

جدول ۲. محاسبه‌ی سطح تراوش و دبی عبوری از تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک.

شماره‌ی مقطع	سطح تراوش (m)	طول مؤثر (m)	سطح آب در بالادست تکیه‌گاه (m)	سطح آب در پایین‌دست تکیه‌گاه (m)	نشت محاسبه شده توسط برنامه‌ی SEEP۲D $m^۳/sec.m$	نشت محاسبه شده توسط برنامه‌ی MSEEP $m^۳/sec.m$
۱	۲۸	۲۷	۱۰	۰	$۷/۳۳\times۱۰^{-۵}$	$۷/۰۸\times۱۰^{-۵}$
۲	۱۹/۷۴	۳۵/۵	۱۰/۶	۰	$۷/۷۹\times۱۰^{-۵}$	$۷/۲۹\times۱۰^{-۵}$
جمع	کل نشت محاسبه شده از تکیه‌گاه توسط نرم‌افزار MSEEP=$۴/۵۰\times۱۰^{-۳}$ $m^۳/sec$ کل نشت محاسبه شده از تکیه‌گاه توسط نرم‌افزار SEEP۲D=$۴/۷۴\times۱۰^{-۳}$ $m^۳/sec$					

جدول ۳. تأثیر ضریب هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف تکیه‌گاه بر روی دبی عبوری و سطح تراوش.

شماره‌ی مقطع	ضریب هدایت هیدرولیکی لایه‌ی زیرین تکیه‌گاه k_1 (m/s)	ضریب هدایت هیدرولیکی لایه زیرین تکیه‌گاه k_2 (m/s)	دبی عبوری از مقطع $m^۳/s.m$	سطح تراوش (m)
۱	$۴/۵\times۱۰^{-۵}$	۲×۱۰^{-۶}	$۷/۳۳\times۱۰^{-۵}$	۲۸
۲	$۴/۵\times۱۰^{-۵}$	۲×۱۰^{-۶}	$۷/۷۹\times۱۰^{-۵}$	۱۹/۷۴
۱	۲×۱۰^{-۶}	۲×۱۰^{-۶}	$۰/۸۱\times۱۰^{-۵}$	۶/۱
۱	$۴/۵\times۱۰^{-۵}$	$۴/۵\times۱۰^{-۵}$	۱۸×۱۰^{-۵}	۶/۱۹
۱	۲×۱۰^{-۶}	$۴/۵\times۱۰^{-۵}$	$۸/۲۹\times۱۰^{-۵}$	۰

زیادی دارند. مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی لایه‌ی زیرین تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک (لایه‌ی ۱) به لایه‌ی زیرین تکیه‌گاه (لایه‌ی ۲) حدود ۲۲/۵ برابر است. این پدیده باعث ایجاد یک سطح تراوش بسیار بزرگ بر روی شیب پایین‌دست تکیه‌گاه شده است.

اگر ضریب هدایت هیدرولیکی لایه‌های زیرین تکیه‌گاه نسبت به لایه‌های زیرین آن زیاد باشد، سطح تراوش در لایه‌ی زیرین بسیار کاهش می‌یابد. ضرایب هدایت هیدرولیکی لایه‌های تکیه‌گاه نوع سیستم زهکشی تکیه‌گاه را تحت تأثیر خود قرار می‌دهند.

طرح زهکشی تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک

قبلاً برای زهکشی تکیه‌گاه چپ سد خاکی برنجستانک از روش لوله‌های زهکش استفاده شده است که بر اثر پدیده‌ی گرفتگی توسط ذرات ریز خاک کارایی خود را به طور کامل از دست داده است. در این تحقیق، برای کنترل تراوش شیب پایین دست تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک از روش کانال‌های زهکش (پر شده از مصالح زهکشی) استفاده شده است. زهکش مربوطه باید در محل مناسبی بر روی سطح تراوش اجرا شود تا کل دبی عبوری از این سطح را زهکشی کند و این سطح را به‌طور مناسب کاهش دهد. برای اتصال زهکش فوق به خاک تکیه‌گاه باید از یک لایه فیلتر با ضخامت مناسب استفاده شود.

طرح دانه‌بندی فیلتر و زهکش تکیه‌گاه

خاک تکیه‌گاه سد برنجستانک از نوع رس لای‌دار همراه با ذرات ماسه‌یی با پلاستیسیته‌ی متوسط تا زیاد است و از لحاظ طبقه‌بندی از نوع CH یا (ML، CH) است. با توجه به منحنی دانه‌بندی خاک تکیه‌گاه (شکل ۵)، خاک مورد نظر از لحاظ طبقه‌بندی شرارد از نوع خاک شماره‌ی ۲ است (۴۰ تا ۸۵ درصد مصالح از الک ۲۰۰ عبور می‌کنند). [۸و۹]

شرارد برای طراحی فیلتر خاک‌های مزبور، معیار $D_{15Filter} \leq 0/7mm$ را پیشنهاد کرده است. با توجه به شرط نفوذپذیری فیلتر ($D_{15Filter} > 0/1mm$)، معیار طراحی فیلتر زهکش به‌صورت $0/1 < D_{15Filter} \leq 0/7mm$ در نظر گرفته شده است.

برای محاسبه‌ی دانه‌بندی زهکش می‌توان از معیارهای ترزاقی نیز استفاده کرد. این معیارها عبارت‌اند از:

$$\frac{D_{15\ Drain}}{d_{15Filter}} \geq 5 \Rightarrow D_{15Drain} \geq 3/5\ mm \qquad (1)$$

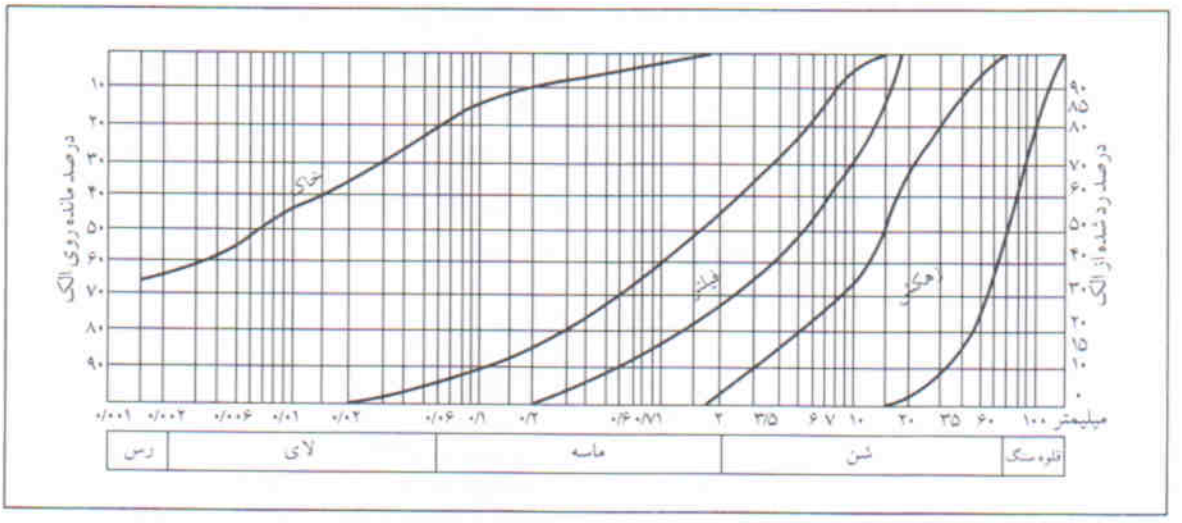
$$\frac{D_{15\ Drain}}{d_{85Filter}} < 5 \Rightarrow D_{15Drain} < 35\ mm \qquad (2)$$

با استفاده از معیارهای ترزاقی، دانه‌بندی مصالح زهکش در محدوده‌ی $3/5\ mm \leq D_{15Drain} < 35\ mm$ قرار می‌گیرد. با توجه به محدوده‌ی دانه‌بندی ارائه شده برای فیلتر و زهکش، مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی مجاز فیلتر و زهکش، با توجه به تحقیقات، بر روی فیلترها به صورت زیر محاسبه شده است:[۱۰]

$$0/0001 < K_{15Filter}\left(\frac{m}{s}\right) \leq 0/002 \qquad (3)$$

$$0/05 \leq K_{15Drain}\left(\frac{m}{s}\right) < 4 \qquad (4)$$

شکل ۵ منحنی دانه‌بندی خاک، فیلتر و زهکش تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک را نشان می‌دهد.



شکل ۵. منحنی دانه‌بندی خاک، فیلتر و زهکش تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک.

جدول ۴. نتایج به دست آمده از تأثیر ابعاد کانال زهکش و محل زهکش بر روی عملکرد زهکش.

عرض زهکش (m)	ارتفاع زهکش (m)	محل زهکش (نقطه d)	دبی عبوری از زهکش $m^3/sec.m$	مقدار سطح تراوش دربالای زهکش (m)	عملکرد زهکش
۱	۱/۵	پایین سطح تراوش	$۲/۶۴\times۱۰^{-۵}$	۲۲	بد
۲	۲	پایین سطح تراوش	$۵/۲۵\times۱۰^{-۵}$	۷/۱۹	متوسط
۲	۳	پایین سطح تراوش	$۶/۵\times۱۰^{-۵}$	۰/۵	خیلی خوب
۲	۳	وسط سطح تراوش	$۲/۳\times۱۰^{-۵}$	۰	بد
۲	۳	بالای سطح تروش	۰	۰	بد

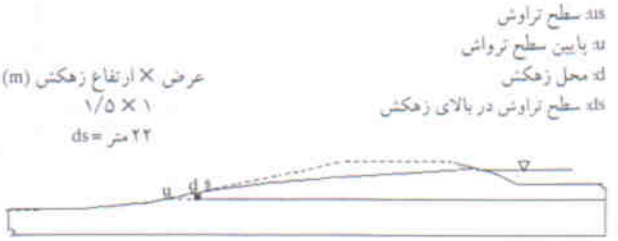
طرح کانال زهکش

برای طراحی کانال زهکش، ابتدا باید شکل، مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی و محل زهکش در شیب پایین‌دست تکیه گاه برای برنامه معرفی شود. محل زهکش باید در نقطه‌ی مناسبی از شیب پایین‌دست انتخاب شود تا بتواند سطح آزاد آب داخل تکیه گاه را به‌صورت مناسب پایین انداخته و سطح تراوش را در شیب پایین‌دست کاهش دهد.

هرچه زهکش را در ارتفاعات بالاتر شیب پایین‌دست تکیه گاه قرار دهیم، سطح تراوش افزایش یافته و دبی عبوری از زهکش کم‌تر خواهد شد. بهترین محل برای کانال زهکش پایین‌ترین نقطه سطح تراوش است. سطح تراوش برای هر مقطع، برای شرایطی که تکیه گاه فاقد زهکش است، قبلاً محاسبه شده که در جدول ۲ ارائه شده است. در این تحقیق تأثیر ابعاد کانال زهکش و محل زهکش بر روی کاهش سطح تراوش و افزایش دبی عبوری از زهکش تکیه گاه سد خاکی برنجستانک توسط نرم‌افزار MSEEP مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از این بررسی برای مقطع ۱ در جدول ۴ نشان داده شده است.

شکل‌های ۶، ۷ و ۸ تأثیر ابعاد زهکش بر روی کاهش سطح تراوش و دبی عبوری از زهکش تکیه گاه سد خاکی برنجستانک را نشان می‌دهد.

شکل ۶ یک کانال زهکش به‌عرض ۱ متر و ارتفاع ۱/۵ متر را در شیب پایین‌دست تکیه گاه نشان می‌دهد. زهکش مزبور در کاهش سطح تراوش ناموفق بوده و سطح تراوش ایجاد شده در بالای زهکش (ds) حدود ۲۲ متر است. دبی عبوری از زهکش در شرایطی که مخزن سد پر است، $۲/۶۴ \times ۱۰^{-۵}$ متر مکعب در واحد عرض محاسبه شده است که این مقدار نسبت به دبی عبوری از تکیه گاه ($۷/۰۸ \times ۱۰^{-۵}$) کم است.



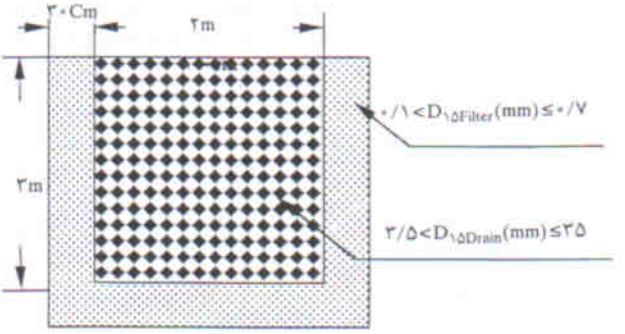
شکل ۶. تأثیر کانال زهکش (با عرض ۱ متر و ارتفاع ۱/۵ متر) بر روی کاهش سطح تراوش (مقطع ۱).

شکل ۷، عملکرد یک کانال زهکش به‌عرض و ارتفاع ۲ متر را بر روی کاهش سطح تراوش شیب پایین‌دست نشان می‌دهد. دبی عبوری از زهکش $۵/۲۵ \times ۱۰^{-۵}$ متر مکعب در واحد عرض بوده و سطح تراوش ایجاد شده در بالای زهکش، ۷/۵۱۹ متر است. عملکرد این زهکش نسبت به زهکش قبلی بسیار مناسب‌تر است زیرا سطح تراوش را بیشتر کاهش داده و دبی عبوری از زهکش بیشتر شده است.

شکل ۸، عملکرد کانال زهکش دیگری به‌عرض ۲ متر و ارتفاع ۳ متر را بر روی کاهش سطح تراوش نشان می‌دهد. دبی عبوری از زهکش $۶/۵ \times ۱۰^{-۵}$ متر مکعب در واحد عرض بوده و سطح تراوش ایجاد شده در بالای زهکش، ۰/۵ متر محاسبه شده است. زهکش مزبور در پایین انداختن سطح آب در تکیه گاه بسیار موفق بوده و سطح تراوش را به صورت چشم‌گیری کاهش داده است. دبی عبوری

شکل ۷. تأثیر کانال زهکش (با عرض ۲ متر و ارتفاع ۲ متر) بر روی کاهش سطح تراوش (مقطع ۱).

شکل ۸. تأثیر کانال زهکش (با عرض ۲ متر و ارتفاع ۳ متر) بر روی کاهش سطح تراوش (مقطع ۱).



شکل ۹. مشخصات کانال زهکش تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک.

از زهکش تقریباً برابر دبی عبوری از تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک است و این امر نشان می‌دهد که زهکش مزبور در کاهش سطح تراوش عملکرد مناسب داشته است.

مقدار دبی عبوری از زهکش مزبور در شرایطی که مخزن سد پر از آب است، برابر $۴/۱ \times ۱۰^{-۳} m^۳/s$ محاسبه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه‌گیری کرد هر چه ابعاد زهکش کوچک‌تر شود، دبی عبوری از زهکش کاهش یافته و سطح تراوش در شیب پایین‌دست افزایش می‌یابد. بهترین محل برای اجرای کانال زهکش پایین‌ترین نقطه‌ی سطح تراوش است. شکل ۹، ابعاد و نوع دانه‌بندی زهکش تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

۱. برای زهکشی تکیه‌گاه نفوذپذیر سدهای خاکی بهتر است از روش کانال زهکش (پر شده از مصالح زهکشی) در زهکشی شیب پایین‌دست تکیه‌گاه استفاده شود. زهکش‌های لوله‌یی به دلیل انسداد توسط ذرات ریز خاک و ریشه‌ی گیاهان، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲. مقدار کل دبی عبوری از تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک، در شرایطی که مخزن سد پر از آب است، به کمک نرم‌افزار MSEEP و SEEP۲D حدود ۴/۵ لیتر بر ثانیه محاسبه شده است.

۳. مقدار سطح تراوش در شیب پایین‌دست تکیه‌گاه سد برنجستانک برای مقاطع ۱ و ۲ تکیه‌گاه سد به‌ترتیب ۲۸ و ۱۹/۷۴ متر محاسبه شده است.

۴. بهترین محل برای اجرای کانال زهکش، پایین‌ترین نقطه‌ی سطح تراوش است. هر چه زهکش را بر روی سطح تراوش پایین‌تر قرار دهیم، دبی عبوری از زهکش بیشتر شده و سطح تراوش کاهش می‌یابد.

۵. هر چه ابعاد زهکش کوچک‌تر شود، دبی عبوری از زهکش کاهش یافته و سطح تراوش در شیب پایین‌دست افزایش می‌یابد.

۶. برای کاهش سطح تراوش در شیب پایین‌دست تکیه‌گاه سدخاکی برنجستانک باید از کانال زهکشی (پر شده از مصالح زهکشی) به‌عرض ۲ متر و ارتفاع ۳ متر استفاده شود. در این صورت مقدار دبی عبوری از زهکش در شرایطی که مخزن سد پر است $۴/۱ \times ۱۰^{-۳} m^۳/s$ است که این مقدار تقریباً برابر دبی عبوری از تکیه‌گاه است.

۷. خاک تکیه‌گاه سد برنجستانک از نوع رس لای‌دار همراه با ذرات ماسه‌یی با پلاستیسیته‌ی متوسط تا زیاد است و از لحاظ طبقه‌بندی از نوع CH یا (ML, CH) است. برای طراحی فیلتر زهکش از معیارهای شرارد استفاده شده است. با توجه به منحنی دانه‌بندی خاک تکیه‌گاه، معیار $۰/۱<D_{۱۵Filter}\leq ۰/۷mm$ برای دانه‌بندی فیلتر در نظر گرفته شده است.

۸. برای تعیین دانه‌بندی زهکش از معیارهای ترزاقی استفاده شده است. با توجه به دانه‌بندی فیلتر، معیار $۳/۵ mm\leq D_{۱۵Drain}<۳۵ mm$ برای دانه‌بندی زهکش در نظر گرفته شده است.

۹. مقدار ضریب هدایت هیدرولیکی زهکش با توجه به دانه‌بندی ارائه شده، در محدوده‌ی $۰/۰۵ \leq K_{۱۵Drain}(m/s)<۴$ قرار می‌گیرد.

۱۰. ضریب هدایت هیدرولیکی لایه‌های زیرین تکیه‌گاه سد خاکی برنجستانک نسبت به لایه‌های زیرین آن بسیار زیاد است. این امر باعث ایجاد سطح تراوش بزرگی بر روی شیب پایین‌دست تکیه‌گاه در لایه‌ی زیرین شده است. اگر ضریب هدایت هیدرولیکی لایه‌های زیرین تکیه‌گاه نسبت به لایه‌های زیرین زیادتر باشد، سطح تراوش در لایه‌ی زیرین کم می‌شود.

پانوشت

1. clogging
2. trial version

منابع

1. Cedergren, r.c. "Seepage, drainage, and flow nets", John Wiley & Sons.Inc. New York, p 175 (1967).
2. Reddi, L.N., Xiao Ming, Hajra, M.G. and Lee, I.M. "Permeability Reduction of soil Filters Due to Physical Clogging", Jour. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, **126** (3), pp 236-246 (2000).
3. Bonala, M.V.S. and Reddi, L.N. "Physicoshemical and Biological Mechanism of Soil Clogging-An overview",

۷. سبزواری، تورج. «زهکشی تکیه‌گاه سدها با استفاده از مدل عدد مناسب». پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده عمران. (۱۳۸۰).
8. Sherard, J.L. and Dunnigan, L.P. and Talbot, J.R. "filters for silts and clays", J. Geotech. Engrg. ASCE, 110(6), (1984b).
9. Sherard, J., and Dunnigan, L. and Talbot, J. "Basic properties of sand and gravel filters", J. Geotech. Engrg. Div., ASCE, **110** (GT6), pp 684-700 (1984).
10. Indraratna, B. & Vafai, F. and Haque, A. "Experimental and analytical modeling of filtration in granular media", Filtration and Drainage in Geotechnical/Geoenvironmental Engineering, GEO-institue of the american society of civil engineer, pp 89-106 (1998).
Filtration and Drainage in Geotechnical Geoenvironmental Engineering, Geo-Institue of the American Society of Civil Engineer, pp 43-67, (1998).
۴. شمسایی، ابوالفضل. و سبزواری، تورج. «بهینه‌سازی ضخامت فیلتر سدهای خاکی و ارائه‌ی روشی برای محاسبه‌ی درصد عبور خاک از فیلترها». کنفرانس بین‌المللی سازه‌های هیدرولیکی کرمان، (اردیبهشت ۱۳۸۰).
5. Swihart, J Jay., "Laboratory Pipe Box Testing To Simulate Toe Drain Performance", Filter and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering, A.A. BALKEMA / ROTTERDAM / BROOKFIELD, 137-150, (2000).
۶. گزارش مربوط به محاسبه‌ی تراوش از جسم سد و تپه‌ی سمت چپ سدبرنجستانک، شرکت مهندسان مشاور آبگیر.