نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۳، ص. ۴۶۱-۴۵۱

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 3, Jul.-Agu. 2014, p. 451-461

بررسی الگوی عبور خطوط نشت و طراحی زهکش پنجه در سدهای خاکی همگن روی پی نفوذ ناپذیر با استفاده از مدل فیزیکی و نرم افزار PLAXIS

نوید نجف‌پور[۱*]- محمد شایان نژاد[۲] - حسین صمدی[۳]

تاریخ دریافت:۱۳۹۱/۱۰/۱۶
تاریخ پذیرش:۱۳۹۲/۳/۱۸

چکیده

از مهمترین ویژگی‌ها یا کمیت‌های مورد نیاز در بررسی‌ها و تحلیل‌های یک سد خاکی، اندازه گیری فشار آب منفذی، میزان نشت و زه خروجی از بدنه و پی آن است که اندازه‌گیری این کمیت‌ها از همان شروع ساخت سدآغاز می‌گردد. به دلیل کمبود مطالعات قبلی برای سدهای خاکی همگن با زهکش پنجه و با استفاده از مدل فیزیکی، در این تحقیق مدلی فیزیکی از یک سد خاکی همگن در فلوم آزمایشگاهی با هدف بررسی و تعیین زاویه بهینه و شاخصی بی‌بعد در طراحی زهکش پنجه‌ای، اجرا گردید سپس میزان فشار منفذی با پیزومترهای نصب شده در بدنه‌ی فلوم و مقدار دبی نشت به صورت حجمی اندازه گیری شد. در آخر فشار و دبی‌های اندازه گیری شده در آزمایشگاه با نتایج نرم افزار PLAXIS با استفاده از نرم افزار آماری SAS در سطح اعتماد ۹۵ درصد برازش و زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه و شاخص بی‌بعد p/h =۰/۳۵ به عنوان معیارهای بهینه برای طراحی زهکش پنجه‌ای تعیین گردید.

واژه‌های کلیدی: شاخص بی بعد p/h ، پیزومتر، فلوم آزمایشگاهی، فشار منفذی، دبی نشت

مقدمه

سیستم‌های زهکشی در بدنه و پی سدهای خاکی، تمهیداتی هستند که برای جمع آوری و هدایت آب‌های نشت یافته به نواحی پایین دست سد طراحی و به اجرا در می‌آیند. این سیستم ها اصولا شامل قرار دادن یک لایه مصالح درشت دانه با نفوذپذیری خیلی زیاد و ابعاد معین در قسمت خاصی از بدنه و پی سد است (۳).

ابعاد و نفوذپذیری مصالح سیستم‌های زهکش باید به گونه ای انتخاب شوند که سیستم قادر به تخلیه‌ی مطمئن کلیه‌ی آبهای ورودی بر اثر پدیده‌ی نشت از بدنه و پی باشد. ارتفاع پنجه سنگی را می‌توان تا ارتفاع سد در نظر گرفت. خط الرأس پنجه سنگی باید به قدر کافی بالاتر از سطح آب جمع شده در پائین دست باشد تا از هر گونه اثرات موج روی جبهه پایین دست جلوگیری نماید. جبهه ورودی آب در پنجه سنگی با شیب یک به یک و جبهه خروجی آن ادامه شیب پائین دست ساخته می‌شود (۲).

منظور از مدل فیزیکی در این تحقیق مدلی کیفی از سدهای خاکی همگن روی پی نفوذ ناپذیر بوده که ارتفاع و عرض آن بر اساس تحقیقات انجام شده و شیب بدنه و مصالح ساخت آن (به دلیل همگن بودن، دارای دانه‌بندی و جنس یکنواخت است.) مشابه نمونه‌های اصلی انتخاب گردید. این مدل فیزیکی از نوع کیفی بوده که صرفا" به منظور تجزیه و تحلیل کیفی مسائل مربوط به نشت می‌باشد و نیازی به انجام آنالیز ابعادی برای تطابق با مدل‌های اصلی، ندارد.

برای حل جریان نشت از بدنه سدهای خاکی از معادله لاپلاس استفاده شد و از آن جا که حل معادله لاپلاس از طریق رسم شبکه جریان به روش ترسیمی و یا حل عددی دستی فرآیندی پیچیده و وقت‌گیر است، از نرم‌افزارهای رایانه‌ای استفاده می شود، در این طرح نیز به منظور حل معادله مذکور و تحلیل جریان نشت از بدنه، مدلی کامپیوتری در نرم‌افزار PLAXIS، که نرم افزاری با قابلیت بالا در زمینه مکانیک خاک است، ایجاد شد (۶).

در نهایت آنالیزهای مربوط به مدل آزمایشگاهی و نرم افزاری با یکدیگر مقایسه شد تا توانایی‌های مربوط به مدل آزمایشگاهی نسبت به PLAXIS در پیش‌بینی فشارهای آب منفذی در داخل بدنه سد و زوایه مناسب برای زهکش پنجه، تعیین گردد.

۱- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان
(*-نویسنده مسئول: Email: Navideh_najafpour@yahoo.com)
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳-دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

Archive of SID
www.SID.ir

بررسی منابع

قانون حرکت آب در محیط‌های متخلخل در حالت اشباع توسط دارسی بصورت رابطه ۱ بیان شد.

$$Q = k.i.A \quad (۱)$$

که در آن Q دبی آب عبوری، k هدایت هیدرولیکی خاک، A سطح مقطع جریان و i شیب هیدرولیکی است که از رابطه ۲ به دست می آید

$$i = \frac{\partial h}{\partial s} \quad (۲)$$

که در آن s طول مسیر حرکت آب درون محیط متخلخل است. بر همین اساس معادله حرکت آب در خاک بوسیله فرمول لاپلاس بصورت رابطه۳ ارائه شد.

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (۳)$$

که در آن h کل بار هیدرولیکی در نقطه مورد نظر است. این معادله برای شرایط خاک ناهمگن ارائه شده است. که در شرایط خاک همگن است. $K_x = K_y = K_z$

حل ترسیمی این معادله در حالت دو بعدی منتهی به رسم دو سری خطوط عمود بر هم می‌گردد که خطوط جریان و هم پتانسیل نام دارند. این خطوط شبکه جریان را تشکیل می‌دهند. روش دیگر حل معادله لاپلاس حل عددی آن است. امروزه بسته‌های نرم افزاری قدرتمندی برای تحلیل شرایط محیط متخلخل ارائه شده است که مبنای کار آنها استفاده از روش‌های عددی مختلف مانند تفاضل محدود و اجزاء محدود است (۱۲).

ویلیام و براون (۱۴) در سال ۱۹۹۳ روش‌های مختلف محاسبه دبی نشت و صورت خروجی نشت از پایین دست بدنه سدهای خاکی که توسط سایر محققین تعیین شده بود را ارائه دادند. با توجه به شکل ۱ و زاویه α، چهار روش تحلیلی توسط شافرناک[1] و ون آیترسون[2] برای $\alpha < 30^{\circ}$ ، روش ال کاساگرانده[3] برای $\alpha \leq 90^{\circ}$، روش کوزنی[4] برای $\alpha = 180$ و روش جامع آ. کاساگرانده[5] برای $30 \leq \alpha \leq 180$ ، برای محاسبه‌ی دبی نشت و تعیین مرز BC که همان صورت خروجی نشت در شیب پایین دست a بود، ارائه شد. جدول ۱ نتایج حل این چهار روش را نشان می‌دهد.

تحقیقات معدودی در گذشته برای تعیین هندسه‌ی زهکش ها انجام شده است. تساریک و کیلی (۱۳) در سال۱۹۸۴با مدل کردن چند سد خاکی، گرافهایی جهت تخمین عملکرد زهکش افقی در پایین انداختن خط زه آزاد تهیه کردند. این محققان بر اساس این گراف‌ها دو سد خاکی در حالت بدون وجود زهکش و با وجود زهکش افقی (زهکش با طول مشخص)، را بوسیله مدل کامپیوتری و مدل آزمایشگاهی مدل کردند.

چاهار (۸) در سال ۲۰۰۴ با ترسیم خط آزاد نشت به روش کاساگرانده، طول حداقل و حداکثر زهکش افقی را با توجه به هندسه سد و میزان پوشش مورد نیاز پایین دست روی خط فریاتیک برای جلوگیری از اشباع شدن محیط پایین دست، در سدهای خاکی همگن بدست آورد. وی با توجه به اینکه با ایجاد زهکش افقی و پنجه سنگی در پایین دست سدهای خاکی می‌توان از شکست سد در برابر نشت جلوگیری کرد و فقط راه حل‌های ترسیمی برای تعیین طول زهکش و پوشش پایین دست وجود داشت، معادلات برای تعیین طول حداقل، حداکثر و مناسب زهکش افقی و پوشش پایین دست در سدهای خاکی همگن ایزوتروپ و غیر ایزوتروپ را بدست آورد.

علی نژاد و زمردیان (۴) در سال ۱۳۸۹ با مدل کردن ۳۶۰ سد خاکی توسط نرم افزارهای SEEPW و SLOPEW و نهایتا با ایجاد شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از نرم افزار MATLAB طول و زوایای بهینه‌ای برای زهکش‌های افقی و مایل بدست آوردند. با مقایسه‌ی مدل‌های مختلف از نتایج آنالیز انجام شده، بهینه‌ترین طول زهکش افقی در سدهای خاکی همگن در تمامی ارتفاع‌ها، در محدوده‌ی طولی برابر با ارتفاع سد ۲۵ درصد بیش از آن و طول بهینه زهکش مایل در طولی برابر با ۵۰ درصد ارتفاع نرمال آب در مخزن سد خاکی، تعیین شد.

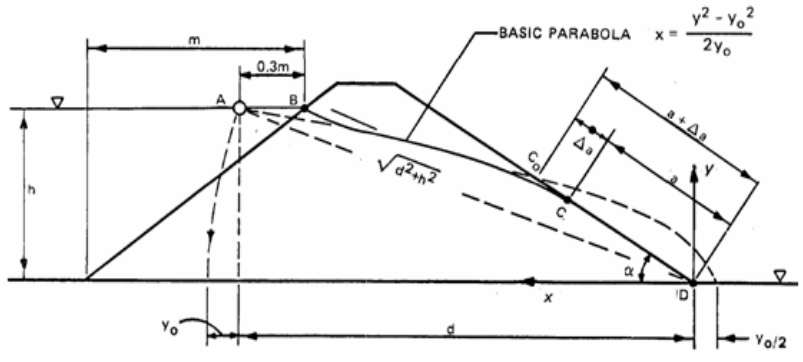
شمسایی و شاهنگیان (۶) در سال ۱۳۸۰ با استفاده از مدل شبیه سازی الکتریکی دبی تراوش از سدهای خاکی را محاسبه و سپس با استفاده از این روش مقدار دقیق سطح تراوش را برای چند سد خاکی همگن، همسان و فاقد فیلتر بدست آورده و روش کاساگرانده را اصلاح نمودند. در روش آنها فرض شد جریان آب در خاک مشابه جریان الکتریسیته در یک محیط هادی بوده که عامل اصلی این شباهت، تشابه دو قانون دارسی و اهم است. نتایج این تحقیق نشان داد که روش آزمایشگاهی شبیه سازی الکتریکی برای محیط‌های همگن و همسان از دقت خوبی برخوردار است.

میشرا و سینگ (۹) در سال ۲۰۰۸ ، روند نشت در یک سد خاکی همگن دارای فیلتر پاشنه‌ای افقی را با استفاده از روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار داد. برای آسان سازی مسئله او سد را ایزوتروپیک و واقع شده بر روی یک پی نفوذناپذیر و شرایط نشت را پایدار فرض نمود.

1- Schaffernak
2- Van Iterson
3- L. Casagrande
4- Kozeny
5- A. Casagrande

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱- مرزهای جریان در سد خاکی همگن روی پی نفوذ ناپذیر

جدول ۱- روش‌های محاسبه a و q بر اساس زاویه α

α	METHOD	EQUATION
<30°	SCHAFFERNAK	$a = \frac{d}{\cos\alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2\alpha} - \frac{h^2}{\sin^2\alpha}}$
	VAN ITERSON	$q = k\,a\sin\alpha\tan\alpha$
≤90°	L.CASAGRANDE	$a = s_0 - \sqrt{s_0^2 - \frac{h^2}{\sin^2\alpha}}$ $s_0 = \sqrt{d^2 + h^2}$ For $30° \le \alpha \le 90°$ Use Measured $s_0 = \overline{AC} + \overline{CD}$ $q = k\,a\sin^2\alpha$
180°	KOZENY	$a_0 = \frac{y_0}{2} = \frac{1}{2}\left[\sqrt{d^2 + h^2} - d\right]$ $q = 2ka_0 = ky_0$
30° TO 180°	A.CASAGRANDE	Determine (a+Δa) as the intersection of the basic parabola and dam slope, then determine Δa from C value on fig 1 Or $q = k\,a\sin^2\alpha$ $\left[\sqrt{d^2 + h^2} - d\right]$k $q = ky_0 =$

برای حل مسئله با روش عددی از برنامه‌های ANSYS، PLAXIS و SEEP-W استفاده شد. آنالیز عددی فشار پیزومتریک در درون فیلتر یک روند کاهشی را در آن نشان داد در حالیکه مدل تحلیلی یک خط هم پتانسیل صفر را در درون فیلتر نمایش می داد و نتیجه حاصله از آنالیز اجزاء محدود جواب صحیح تری را بدست داد.

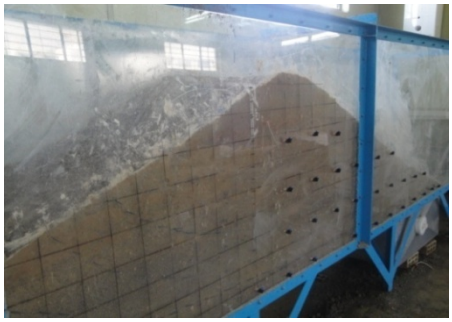
کاساگرانده با ارائه روش‌های گرافیکی و ترسیمی راه حلی برای تعیین ابعاد مناسب برای زهکش‌های مختلف از جمله پنجه ای ایجاد نمود، ولی معمولاً در بیشتر طرح‌های اجرایی جبهه ورودی آب در پنجه سنگی با شیب یک به یک و جبهه خروجی آن ادامه شیب پائین دست و ارتفاع آن بر اساس عبور ایمن آب است و تحقیقات موثری برای تعیین ابعاد و زوایای مناسب برای اینگونه زهکش‌ها که منجر به کاربرد حجم بهینه‌ی مصالح می‌گردد، نشده است، که در تحقیق حاضر از مدلی کیفی، به منظور بررسی و تعیین این ابعاد و زوایای بهینه در کاهش و کنترل نشت و کاهش حجم مصالح مصرفی، بهره گرفته شد (۶).

مواد و روش‌ها

در این تحقیق آزمایش‌ها در یک فلوم آزمایشگاهی به طول ۶ متر، عرض ۶۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۱/۲ متر واقع در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه شهرکرد، انجام گرفت. برای ساخت مدل سد خاکی از مصالح ماسه و رس استفاده گردید که مدل به طور یکنواخت خاکریزی و با شیب بالادست و پایین دست 2H:1V، ارتفاع ۱ متر، عرض ۶۰ سانتی متر و طول ۲۰ سانتی متر در تاج سد به صورت شکل ۲ ایجاد شد. برای اندازه گیری فشار آب منفذی در داخل بدنه‌ی سد از ۳۰ عدد پیزومتر به صورت شبکه بندی شده (به ابعاد ۲۰cm×۲۰cm)، روی دیواره‌ی پلکسی گلاس فلوم که از وسط به سمت انتهای فلوم تعبیه و آب بندی شده بود، استفاده شد.

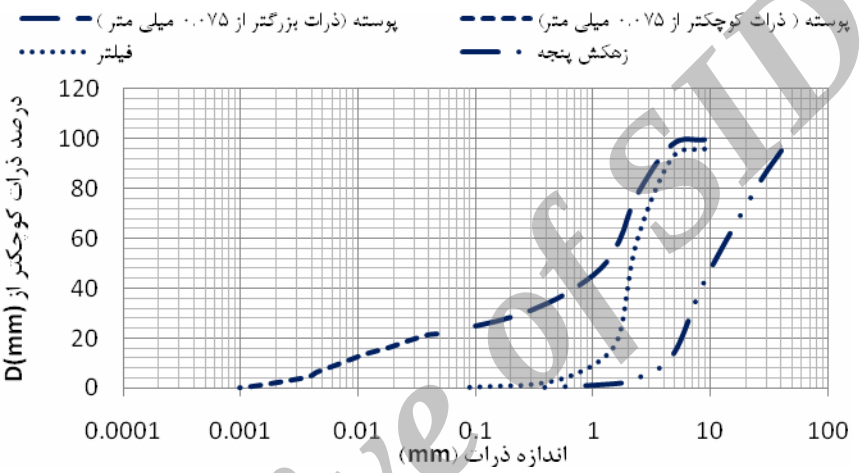
Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲- مدل آزمایشگاهی سد خاکی همگن در فلوم آزمایشگاهی

شکل ۳- پیزومترها نصب شده روی بدنه فلوم برای اندازه گیری فشار آب منفذی



شکل ٤- منحنی دانه بندی پوسته، فیلتر و زهکش در مدل آزمایشگاهی

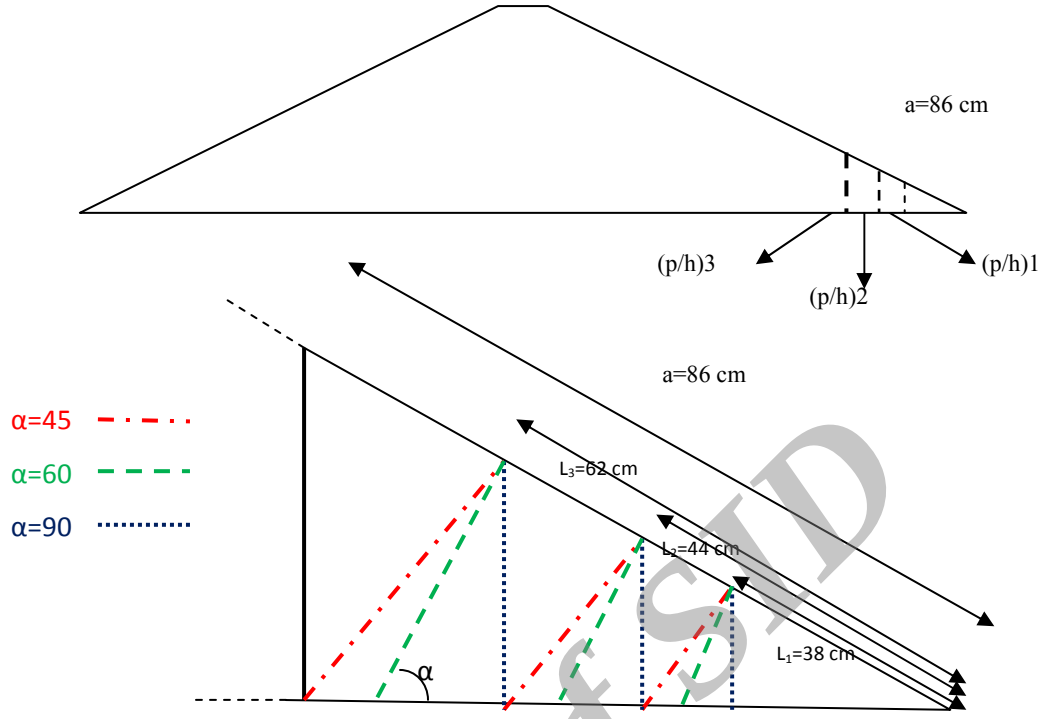
دانه‌بندی خاک مورد استفاده برای پوسته سد از نوع SC (ماسه و رس) بود و منحنی دانه‌بندی بدنه اصلی، فیلتر و زهکش با استفاده از الک‌های استاندارد و هیدرومتری انجام شد که در شکل ۴ نتایج آن آمده است. قابل ذکر است که این نوع دانه‌بندی بر اساس سدهای همگن اجرا شده برای ساخت سدهای خاکی همگن مناسب است (۷).

برای تراکم مدل آزمایش‌های تراکم آزمایشگاهی (پراکتور استاندارد) انجام شد و برای تراکم مدل به صورت درجا آزمایش تراکم صحرایی (مخروط ماسه) به منظور تعیین تعداد رفت و برگشت‌های غلتک ۳۰ کیلوگرمی برای رسیدن به رطوبت بهینه و تراکم بالای ۹۰ درصد انجام شد و بر اساس نتایج آن، لایه‌های ۵ سانتی‌متری خاک با ۲۰ دور رفت و برگشت غلتک دستی ۳۰ کیلوگرمی به طور درجا با میزان رطوبت بهینه‌ی ۱۱ درصد حجمی به تراکم بالای ۹۰ درصد رسید. برای اندازه گیری زه آب رد شده از زهکش پنجه‌ای از شیر کنترلی که در زیر فلوم نصب شده بود استفاده شد.

برای بررسی روند نشت و کنترل آن با حضور زهکش پنجه ای که هدف اصلی این تحقیق است و با توجه به اینکه با حداکثر ارتفاع آب در بالادست (۸۰ سانتی متر) خط فریاتیک شیب پایین دست را در ۸۶ سانتی متری پایین دست قطع نمود، سه نسبت p/h با سه زاویه مختلف برای اجرای زهکش پنجه که مقادیر آنها در جدول ۲ ذکر شده، انتخاب گردید، در این نسبت پارامتر p معرف ارتفاع زهکش پنجه و h ارتفاع آب در مخزن می باشد. علت انتخاب این نسبت بی بعد در این تحقیق به عنوان یک پارامتر در طراحی زهکش پنجه، رابطه‌ی مستقیم سطح آب درمخزن (h) با موقعیت خط فریاتیک و محل خروج آن از شیب پایین دست و هم چنین تغییر در ارتفاع زهکش پنجه، است. قابل توجه است که زاویه ۴۵ درجه برای زهکش پنجه زاویه ای مناسب بوده که در تحقیقات زیادی به آن اشاره شده است، دراین تحقیق ۳ زاویه ۴۵ ، ۶۰ و ۹۰ درجه، برای بررسی اثرات مختلف زاویه بر عملکرد زهکش پنجه و مقایسه این زوایا با هم و همچنین سه شاخص p/h مختلف به منظور تعیین و ارائه‌ی یک شاخص بهینه‌ی بی بعد p/h برای طراحی زهکش‌های پنجه‌ای در سدهای خاکی همگن، انتخاب گردید.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۵- شکل شماتیک اجرای زهکش پنجه ای در سه شاخص (p/h) و ۳ زاویه

انتخاب شاخص‌های بی بعد p/h بر اساس این بود که در یک طول بهینه از زهکش، خط فریاتیک با فاصله‌ای مناسب از داخل سیستم زهکش عبور کند. منظور از فاصله مناسب، فاصله ای است که خط نشت با فاصله ای ایمن از شیب پایین دست عبور کرده و کمترین عملیات خاکی را داشته باشد. زهکش‌های پنجه در این مدل آزمایشگاهی نهایتا به صورت شکل شماتیک ۵ اجرا گردید و مشخصات هر کدام در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- مشخصات زهکش پنجه در حالات مختلف

حالت ها	۱	۲	۳
ارتفاع آب در مخزن (cm)	۸۰	۸۰	۸۰
ارتفاع زهکش (cm)	۱۷	۲۰	۲۸
طول زهکش،L (cm)	۳۸	۴۴	۶۲
شاخص p/h	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۳۵

برای شروع آزمایش مخزن سد تا ارتفاع ۰/۸ متر به صورت تدریجی پر و در این ارتفاع ثابت شد. بعد از یک روز با اشباع شدن محیط متخلخل خاک، ارتفاع آب در ۳۰ پیزومتر و دبی زه آب خروجی از مدل سد خاکی به صورت حجمی اندازه گیری شد.

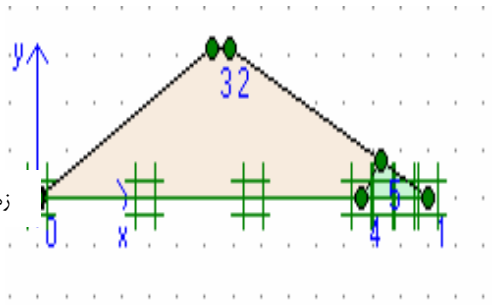
پس از برداشت و بررسی داده‌های حاصل از آزمایش‌ها، نوبت به مدل سازی مسئله در نرم‌افزار PLAXIS رسید. در ابتدا باید یک مدل هندسی از مقطع سد ایجاد می گردد. برای این کار بر اساس مقطع اجرایی مدل آزمایشگاهی در فلوم، مدل هندسی در برنامه PLAXIS ایجاد شد. در مرحله دوم نیاز به داده‌های مربوط به مصالح به کار رفته در بدنه سد بود. بدلیل عدم اندازه‌گیری چنین داده هایی از داده‌های موجود در مقالات معتبر که قبلا پژوهش‌هایی بر روی سدهای خاکی انجام داده بودند، استفاده شد (۱).

جدول ۳- پارامترهای اولیه برای مصالح سد در مدل موهر- کولمب

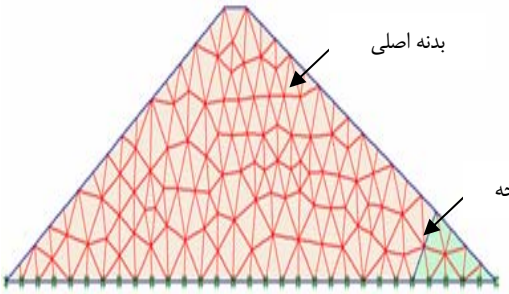
Parameter	Shell	Drain & Filter
$\gamma_{dry}(KN/m^3)$	۲۰	۱۸
$\gamma_{sat}(KN/m^3)$	۲۲	۲۰
$K_x(m/day)$	۶	۳۰
$K_y(m/day)$	۶	۳۰
$E_{ref}*10^3(KN/m^2)$	۱۱	۷
ν	۰/۳۵	۰/۳
$C_{ref}(KN/m^2)$	۱	۱
φ (phi)	۴۰	۴۵
ψ (psi)	۱۰	۱۰

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ٦ - مدل ایجاد شده در نرم افزار PLAXIS



شکل ۷- شبکه بندی ایجاد شده در نرم افزار PLAXIS

چون در طی آنالیز بازگشتی مقادیر این داده ها دچار تغییر می‌شوند، مقادیر بسیار دقیق برای داده‌ها مورد نیاز نیست و تنها این داده‌ها باید در محدوده قابل قبول برای شروع آنالیزها باشند. پارامترهای اولیه‌ی فرضی برای مصالح پوسته و زهکش به صورت جدول ۳ در نظر گرفته شد (۱۰ و۱).

لازم به ذکر است که تنها پارامترهای k_y ، k_x و γ_{sat} در محاسبات نشت از بدنه سد خاکی موثرند و باید به صورت دقیق وارد مدل شوند. میزان وزن واحد حجم خشک و اشباع در آزمایشگاه تعیین و میزان نفوذ پذیری با توجه به نتایج نرم‌افزار و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقادیر دبی نشت و سطح فریاتیک، مقدار آن با محاسبات دستی و ترسیم شبکه جریان در داخل بدنه سد تعیین و همچنین در PLAXIS برای یکی از سطوح آزمایش کالیبره و برای سطوح دیگر استفاده گردید. به دلیل شرایط مرزی بین مدل و بدنه و کف فلوم (افزایش نفوذپذیری افقی) و بر طبق مشاهده‌ی خطوط نشت با تزریق مواد رنگی میزان نفوذپذیری قائم و افقی مساوی در نظر گرفته شد. نمونه‌ی مدل ایجاد شده و شبکه بندی مدل در نرم‌افزار PLAXIS در شکل ۶ و ۷ آمده است.

نتایج و بحث

نتایج بدست آمده در این تحقیق شامل دو قسمت بوده که در قسمت اول به بررسی و برازش داده‌های آزمایشگاهی و PLAXIS پرداخته و در قسمت دوم انتخاب بهترین زاویه و شاخص بی بعد p/h برای زهکش پنجه بررسی شده است.

۱- مقایسه داده‌های فشار آب منفذی مدل آزمایشگاهی و مدل نرم افزاری PLAXIS

داده‌های فشار آب منفذی حاصل از پیزومترهای نصب شده در بدنه مدل آزمایشگاهی و داده‌های فشار آب منفذی حاصل از آنالیز نشت با نرم‌افزار PLAXIS با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS در سطح اعتماد ۹۵ درصد مقایسه گردید. در این نرم‌افزار بین داده‌های فشار آب منفذی حاصل از آزمایشگاه و نرم افزار PLAXIS آزمون T-test گرفته شد. از نتایج این آزمون مقادیر P-value برای هر سری از داده‌ها بود، که میزان اختلاف بین داده‌های آزمایشگاهی و PLAXIS را نشان می‌دهد. نمونه‌ای از نتایج آنالیز در SAS در ذیل آورده شده و همچنین مقدار P-value برای حالت بدون زهکش و سه زاویه مختلف زهکش در جدول۴ آمده است. نتایج آنالیز در نرم افزار SAS بین داده‌های آزمایشگاهی و PLAXIS با زهکش پنجه در زاویه ۴۵ درجه به صورت جدول۵ است.

همچنین مقادیر جذر میانگین مربع خطا RMSE، در حالت بدون زهکش و ۳ زاویه مختلف محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ٤- نتایج آزمون T-test و مقدار P-value برای حالات مختلف آزمایش با و بدون زهکش

حالات آزمایش*	بدون زهکش	پنجه (۹۰و۱)	پنجه (٦٠و۱)	پنجه (٤٥و۱)	پنجه (۹۰و۲)	پنجه (٦٠و۲)	پنجه (٤٥و۲)	پنجه (۹۰و۳)	پنجه (٦٠و۳)	پنجه (٤٥و۳)
T-value	۱/۶۶	-۱/۶۷	-۱/۸۸	-۱/۸۶	-۱/۷۹	-۱/۷۶	-۱/۹	-۱/۹۷	-۱/۹۱	۱/۹۵
P-value	۰/۱	۰/۱	۰/۰۷۲	۰/۰۷۳	۰/۰۸۴	۰/۰۸۸	۰/۰۶۸	۰/۰۶	۰/۰۶۶	۰/۰۶۱
RMSE	۰/۵۷	۰/۴۰۲	۰/۳۹۶	۰/۴۲۲	۰/۴۳۶	۰/۴۳۶	۰/۳۷۹	۰/۴۰۶	۰/۴۱۹	۰/۴۸۶

*- منظور از پنجه (۹۰و۱) : زهکش پنجه ای درشاخص ۱(p/h) با زاویه ۹۰ درجه

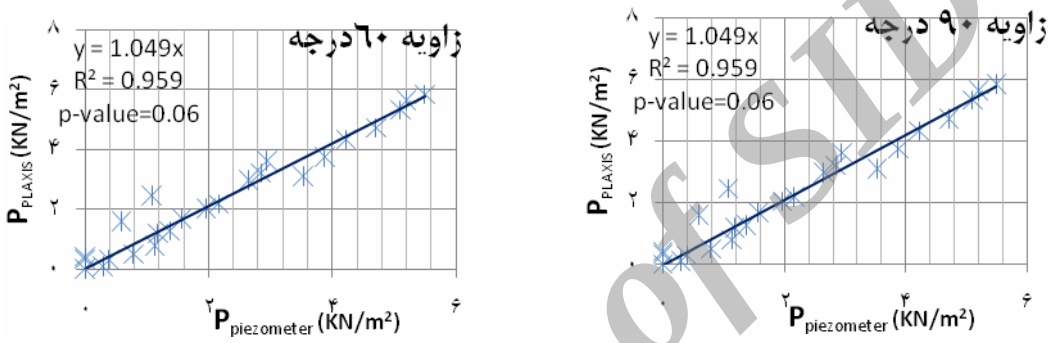
Archive of SID

www.SID.ir

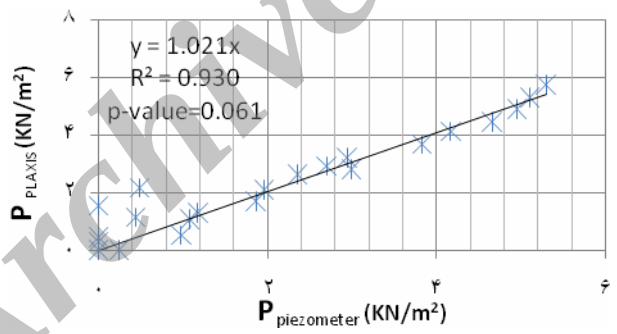
جدول ۵- نتایج آزمون T-test با نرم افزار SAS

رویه‌ی آزمون T-TEST							
شاخص‌های آماری							
خطای استاندارد	انحراف معیار در حد اعتماد بالاتر	انحراف معیار	انحراف معیار در حد اعتماد پایین‌تر	میانگین در حد اعتماد بالاتر	میانگین	میانگین در حد اعتماد پایین‌تر	تعداد داده‌ها	اختلاف داده‌ها
۰/۰۸۳۴	۰/۶۱۴۲	۰/۴۵۶۹	۰/۳۶۳۹	۰/۰۰۸۲	-۰/۱۶۲	-۰/۳۳۳	۳۰	داده‌های آزمایشگاهی-داده‌های نرم افزار PLAXIS

آزمون T-Test			
Pr(مقدار احتمال آزمون P-value)> |t|	مقدار آماره t	درجه آزادی	اختلاف داده‌ها
۰/۰۶۱۲	-۱/۹۵	۲۹	داده‌های آزمایشگاهی-داده‌های نرم افزار PLAXIS



شکل ۸ و ۹- مقایسه داده‌های فشار پیزومتری و PLAXIS ، در زوایای ۹۰ و ۶۰ درجه



شکل ۱۰- مقایسه داده‌های فشار پیزومتری و PLAXIS، زاویه زهکش پنجه ۴۵ درجه

با توجه به مقادیر P-value ، داده‌های آزمایشگاهی و نتایج حاصل از نرم افزار PLAXIS در همه‌ی موارد در سطح اعتماد ۹۵ درصد دارای اختلاف معنی دار نیستند، که این نتایج، صحت نزدیکی مقادیر این داده‌ها را به یکدیگر، اثبات کرده است. همچنین در شکل‌های ۸ ، ۹ و۱۰ نتایج این مقایسه برای سه زاویه زهکش پنجه در حالت شاخص بی بعد ۳(p/h) به صورت نموداری آمده است.

۲- نتایج نشان داد که با اجرای زهکش پنجه در هر شاخص به ترتیب سطح فریاتیک افت و همچنین فشار آب در پیزومترها کاهش و جریان نشت افزایش پیدا می‌کند. در شاخص‌های ۱(p/h) و ۲(p/h) با وجود زهکش پنجه باز هم سطح فریاتیک شیب پایین دست بدنه سد را قطع کرده که در جدول ۶ فواصل a (فاصله محل برخورد خط فریاتیک با شیب پایین دست از پنجه سد) برای نسبت‌های مختلف قابل مشاهده است. به همین منظور شاخص p/h بزرگتری نسبت به دو شاخص قبلی تحت ۳ زاویه اجرا شد که در زاویه ۹۰ درجه سطح فریاتیک به طور مماس با شیب پایین دست از داخل زهکش پنجه عبور و در زوایای ۶۰ و ۴۵ درجه سطح فریاتیک کاملا شکسته شده و از داخل زهکش پنجه‌ای عبور کرد که صفر شدن سطح آب در پیزومترهای نزدیک به زهکش و افت سطح آب در چاهک‌های

Archive of SID

www.SID.ir

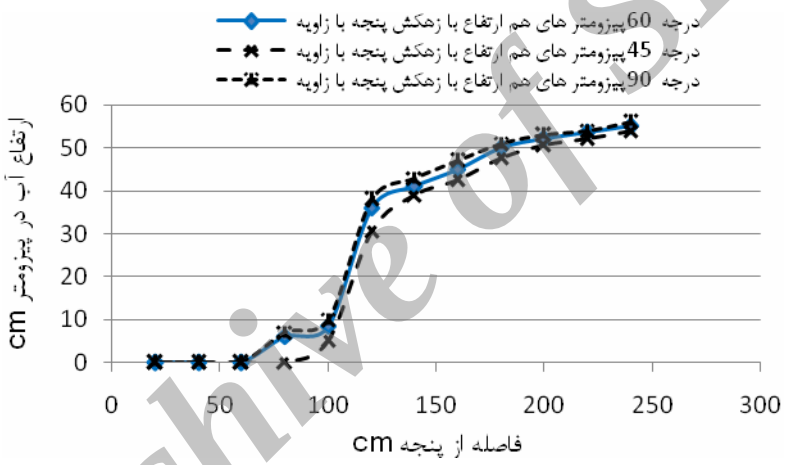
مشاهده‌ای، بیان‌گر این مطلب بود. در جدول۶ موقعیت عبور خط نشت آزاد از زهکش پنجه با شاخص (p/h)۳ آورده شده است. بر اساس ارزیابی این سه شاخص بی‌بعد در آزمایشگاه مقدار p/h=۰/۳۵ برای طراحی زهکش پنجه مناسب و این شاخص تحت زوایای ۶۰ و ۴۵ درجه بهینه است.

با توجه به شکل ۱۱ در حالت زهکش پنجه با زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه میزان فشار آب منفذی در داخل بدنه سد کاهش یافته و در این حالات بر طبق مشاهدات آزمایشگاهی (جدول۷ و شکل ۱۳) سطح آزاد نشت به طور ایمن از داخل زهکش پنجه عبور کرد. معیار ایمنی در این طرح به صورتی بود که فاصله b در شکل۱۲ حدود ۲۰ درصد از کل زهکش را پوشش دهد.

جدول ٦- فاصله a در حالت‌های مختلف عبور نشت از بدنه مدل سد خاکی همگن (ارتفاع آب در مخزن ۸۰ سانتی متر)

حالات آزمایش	بدون زهکش	پنجه (۱و۹۰)	پنجه (۱و۶۰)	پنجه (۱و۴۵)	پنجه (۲و۹۰)	پنجه (۲و۶۰)	پنجه (۲و۴۵)	پنجه (۳و۹۰)	پنجه (۳و۶۰)	پنجه (۳و۴۵)
طول زهکش(cm)*	۰	۳۸	۳۸	۳۸	۴۴	۴۴	۴۴	۲۶	۲۶	۲۶
نسب p/h	۰	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳۵	۰/۳۵	۰/۳۵
a(cm)	۸۶	۸۲	۷۹	۷۷	۷۳	۷۰	۶۸	۰	۰	۰

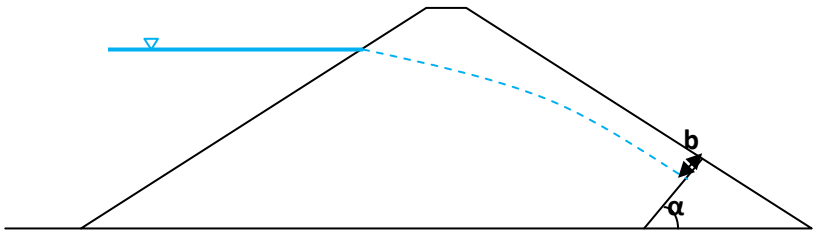
*- طول زهکش در راستای شیب پایین دست



شکل۱۱- ارتفاع آب در پیزومترهای نصب شده در ارتفاع ۱۰ سانتی متر از کف فلوم در شاخص (p/h)۳ با سه زاویه زهکش پنجه‌ای

جدول ۷- فاصله محل عبور خط فریاتیک از داخل زهکش پنجه در شاخص (P/h)۳، با شیب پایین دست

زوایه زهکش	۴۵	۶۰	۹۰
فاصله b(cm)	۱۰	۶	۲



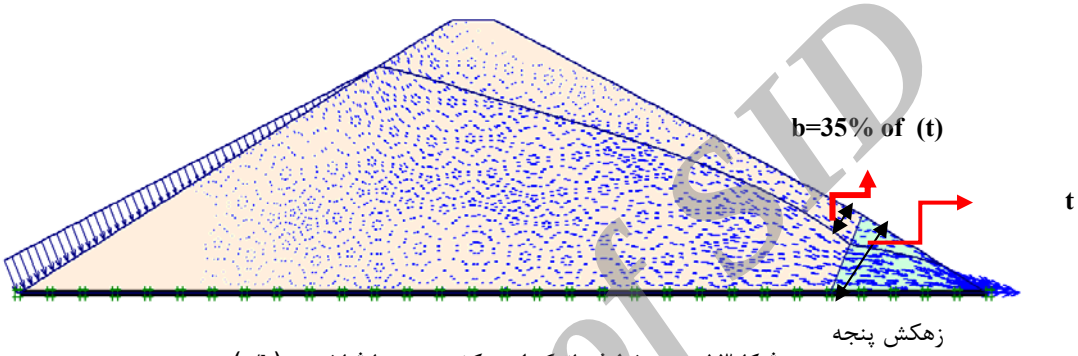
شکل ۱۲- نمای شماتیک از مدل و محل عبور خط فریاتیک از زهکش پنجه

Archive of SID

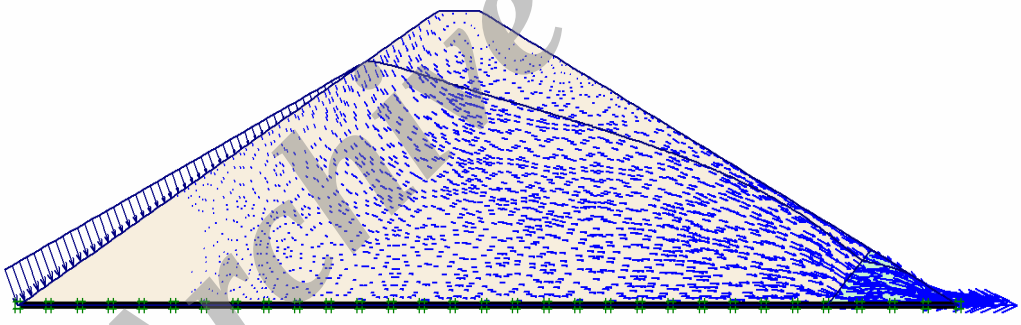
www.SID.ir

در PLAXIS نیز در شاخص (p/h)۲ با زاویه ۴۵ درجه (شکل ۱۳)، خط فریاتیک نزدیک به شیب پایین دست از داخل زهکش پنجه عبور کرد و در حالت (p/h)۳ این خط به طور کامل شکسته شد و با میانگین فاصله ۱۱/۵ سانتی متر (b) از شیب پایین دست که حدود ۳۵ درصد از زهکش را پوشش داده، از داخل زهکش عبور کرد که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. بنابراین، با آنالیز توسط نرم افزار PLAXIS شاخص p/h= ۰/۳ برای طراحی زهکش پنجه تحت هر سه زاویه بهینه است.

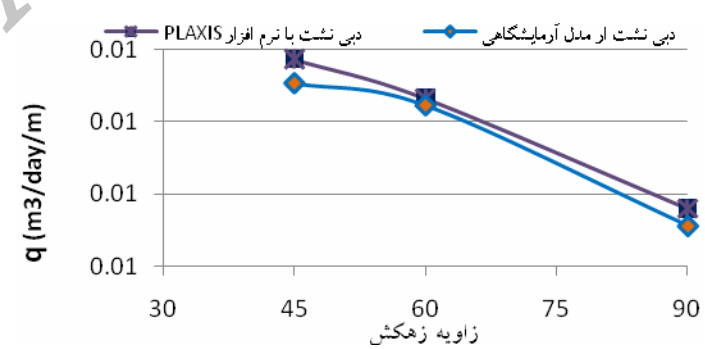
با توجه به شکل ۱۵ میزان دبی نشت در α=۶۰ کمتر از زاویه ۴۵ درجه است، همچنین حجم مصالح مصرفی در این زاویه کمتر بوده بنابراین با اجرای زهکش پنجه در زاویه ۶۰ درجه، زهکش پنجه کوچکتر بوده و میزان دبی نشت کمتر است. لازم به ذکر است، هدف از انتخاب و آنالیز این ۳ شاخص بی بعد و زوایا در آزمایشگاه و نرم افزار PLAXIS، انتخاب بهترین حالت برای طراحی زهکش پنجه بوده که ضمن عبور ایمن خط فریاتیک، کمترین میزان دبی نشت و هزینه اجرایی را در بر داشته باشد.



شکل۱۳-عبور خط فریاتیک از زهکش پنجه با شاخص (p/h)۳



شکل ۱٤- عبور جریان نشت در شاخص (p/h)۲ با زاویه ٤٥



شکل ۱۵- دبی نشت از مدل آزمایشگاهی و PLAXIS در شاخص (p/h)۳

Archive of SID

www.SID.ir

نتیجه گیری

با آنالیز داده‌های حاصل از آزمایشگاه و نرم‌افزار PLAXIS نتایج زیر حاصل شد:

۱- نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی نشان داد که هر دو زاویه‌ی ۴۵ و ۶۰ درجه برای اجرای زهکش پنجه مناسب است و در هر دو زاویه خط آزاد نشت با فاصله ای مناسب از شیب پایین دست از داخل زهکش پنجه عبور کرد. ولی زهکش با زاویه ۶۰ درجه حجم عملیات خاکی کمتر و نهایتا هزینه‌ی کمتری در اجرا دارد. همچنین با زاویه ۶۰ درجه، زهکش پنجه کوچکتر بوده و میزان دبی نشت کمتر است.

۲- بر طبق نتایج داده‌های آزمایشگاهی فشار با داده‌های بدست آمده از آنالیز توسط نرم‌افزار PLAXIS در این تحقیق به یکدیگر نزدیک بود. با توجه به این نتیجه و کارایی نرم افزار PLAXIS در نمونه‌های اصلی، می‌توان از مدل‌های آزمایشگاهی نیز برای بررسی کیفی و پیش بینی مسائل مربوط به سدهای خاکی استفاده کرد.

۳- نتایج آنالیز نشت توسط نرم افزار PLAXIS نشان داد که در شاخص بی بعد دوم ($(p/h)_2$ =۰/۲۵) خط فریاتیک نزدیک به شیب پایین دست از داخل زهکش پنجه عبور کرد ولی برای عبور ایمن این خط با فاصله‌ای مناسب از شیب پایین دست شاخص بی بعد سوم، $(p/h)_3$، مناسب‌تر بود و با توجه به نتایج این نرم افزار مقدار p/h را تا ۰/۳ نیز می‌توان در نظر گرفت.

۴- بهینه بودن شاخص بی بعد سوم، $(p/h)_3$، در نتایج آنالیز نشت با PLAXIS و آزمایشگاه نشانگر برازش تقریبی روش آزمایشگاهی و نرم افزاری در پیش بینی و طراحی زهکش پنجه است. با این تفاوت که روش آزمایشگاهی شاخص بی بعد سوم، $(p/h)_3$ با زوایای ۶۰ و ۴۵ را مناسب و PLAXIS ، شاخص بی بعد سوم، $(p/h)_3$ را با هر سه زوایه مناسب در نظر گرفته است.

منابع

۱- حق شناس ا. و منابادی ا. ۱۳۸۹. ارزیابی روند نشت و نشست در سد خاکی کرخه با استفاده از نرم افزارهای Mseep و PLAXIS. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- خرقانی س.۱۳۸۴. مهندسی سدهای خاکی. انتشارات دانشکده صنعت آب و برق .□□□صفحه.

۳- رحیمی ح .۱۳۸۲. سدهای خاکی. انتشارات دانشگاه تهران. ۶۷۱ صفحه.

۴- علی نژاد ح. و زمردیان م.ع. ۱۳۸۹. بهینه یابی زهکش مایل و افقی در سدهای خاکی همگن. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران ، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت ماه، دانشگاه فردوسی مشهد صفحات ۱ تا ۸.

۵- شاهنگیان ع. و شمسایی ا. ۱۳۸۰ . تحلیل تراوش در سدهای خاکی با مدل‌های الکتریکی. کنفرانس بین المللی سازه‌های هیدرولیکی، ۱۲ تا ۱۳ اردیبهشت ماه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، صفحات ۱ تا ۸.

۶- نجف‌پور ن.۱۳۹۰. بررسی الگوی نشت از بدنه سدهای خاکی همگن بر روی پی های نفوذ ناپذیر با و بدون زهکش پنجه با استفاده از مدل فیزیکی. پایان نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۷- وفاییان م. ۱۳۷۷. سدهای خاکی. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان. ۵۱۴ صفحه.

8- Chahar R. 2004. Determination of Length of a Horizontal Drainin Homogeneous Earth Dams. Journal of irrigation and drainage engineering © ASCE 130:530-536.

9- Mishra G. and Singh A. 2005. Seepage through a Levee. International journal of geo mechanics ASCE 5:74-79.

10- Plaxis Version8. 2006. General information. http://www.plaxis.nl.

11- Plaxis Version8. 2006. Tutorial manual. http://www.plaxis.nl.

12- Sherard J.L., Woodward R.J., Gizienski S.F. and Clevenger W.A. 1963. Earth and Earth-Rock Dams. John Wiley and Sons. New York.

13- Tesarik D.R and Kealy C.D. 1984. "Estimation horizontal drain design by the Finite-Difference method". International journal of mine water, vol.3 (3), 1-19.

14- Williams A. and Brown W. 1993. Engineering and Design Seepage Analysis and Control for Dams: a primer (1st ed.). Department of the Army us army corps of Engineers, Washington, D.C.

Archive of SID

www.SID.ir

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 3, Jul.-Agu. 2014, p. 451-461

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۳، مرداد – شهریور ۱۳۹۳، ص. ۴۶۱-۴۵۱

Investigation on Seepage Pattern and Design of Toe Drain in Homogenous Earth Dam on Impervious Foundation Using Physical Model and PLAXIS

N. Najafpour[1]*- M. Shayannejad[2]- H. Samadi[3]

Received:05-01-2013
Accepted:08-06-2013

Abstract

Pore pressure, seepage and drainage discharge through in earthen dams are the most important characteristics that have to be defined in order to analysis an earth dam. These parameters have been measured since beginning of building dam. In this investigation, a physical model of homogenous earth dam created in the flume with three different angles of toe drain, then pore pressure of earth dam was measured by piezometers that put on the wall of the flume. Discharge of drainage was measured too. The seepage analysis was conducted by PLAXIS software then Result of the PLAXIS compare with physical model by SAS (Statistic software) and finally the best angle and without dimension index ,p/h, propose for toe drain according to results & observations.

Keywords: Earthen dam, Seepage, Toe drain, Pore pressure, Physical Model

Archive of SID

1- PhD Student of Hydraulic Structure, Department of Water Engineering, Lorestan University
(*-Corresponding Author Email: Navideh_najafpour@yahoo.com)
2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology
3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University

www.SID.ir