

بررسی تأثیر پرده آب‌بند بر پایداری شیب جانبی کانال‌های خاکی

داود فرسادی‌زاده^۱، پیمان ورجاوند^{۲*}، علی حسین‌زاده دلیر^۳، ناصر شکری^۴، سید حسین حسینی^۵ و پیام خسروی‌نیا^۶

چکیده

پایین‌افتادگی سطح آب در کانال یا بالارفتن سطح ایستابی باعث تغییر در رژیم رطوبتی خاک اطراف کانال شده و شیب‌های بدنه کانال را تخریب می‌کند. در این پژوهش با استفاده از مدل عددی و فیزیکی پایداری شیب جانبی کانال خاکی با دو شیب بدنه مختلف با وجود سطح ایستابی بررسی شد. سپس نصب پرده آب‌بند به عنوان روش کنترل، تحلیل شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که سطح نشت و فشار پیزومتریک نزدیک سطح خاک دو عامل مهم در پایداری شیب جانبی کانال خاکی است. برای کنترل تخریب در شیب تندتر خاک پرده آب‌بند باید تا زیر تراز کف کانال پیش رود ولی در مورد شیب‌های ملایم‌تر دیوار جانبی کانال عمق نفوذ آن تا تراز کف کانال کافی است. همچنین مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی با دقت خوبی پارامترهای فشار کل، دبی و خط فریاتیک را شبیه‌سازی کرد، به طوری که متوسط خطا در برآورد دبی و فشار کل در مدل عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی به ترتیب ۵/۶۶٪ و ۲/۰۸٪ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: پرده آب‌بند، خط فریاتیک، سطح ایستابی، سطح نشت، فشار پیزومتریک.

ارجاع: فرسادی‌زاده د. ورجاوند پ. حسین‌زاده دلیر ع. شکری ن. حسینی س. ح. و خسروی‌نیا پ. ۱۳۹۳. بررسی تأثیر پرده آب‌بند بر پایداری شیب جانبی کانال‌های خاکی. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۱۹۵-۲۰۴.

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۲- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۴- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تهران.

۵- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه تبریز.

۶- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه کردستان.

* نویسنده مسئول: pvarjavand@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۲۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۰۳

مقدمه

پایداری شیب دیواره کانال خاکی به هندسه شیب، خصوصیات خاک و نیروهای داخلی و خارجی وارد شده به بدنه کانال بستگی دارد. نیروی ناشی از فشار منفذی و فشار هیدرواستاتیک نمونه نیروهای داخلی و خارجی هستند که در پایداری شیب تأثیرگذار هستند. چنانچه بخشی از دیواره جانبی کانال یا کل آن مستغرق باشد، با تغییرات سطح آب، نیروهای داخلی و خارجی تأثیرگذار بر پایداری شیب تغییر می‌کنند. در خاک‌های با نفوذپذیری زیاد، تنش ناشی از فشار منفذی بیشتر در طول پایین‌افتادگی سطح آب مستهلک می‌شوند. در خاک‌های با نفوذپذیری کم، با تغییرات سطح آب نشت و تنش ناشی از فشار منفذی با نرخ یکسان و شبیه هم مستهلک نمی‌شوند. در نتیجه رفتار خاک به‌صورت زهکش شده و بخشی زهکش نشده خواهد بود. اگر سطح آب تغییر یابد بدون اینکه زمان لازم برای زهکشی خاک وجود داشته باشد، این حالت را پایین‌افتادگی سریع^۱ می‌نامند. در نتیجه پایین‌افتادگی سریع، پایداری شیب کاهش پیدا کرده و حتی باعث تخریب شیب خواهد شد. در تحلیل پایداری شیب، برای تحلیل کوتاه‌مدت، پارامترهای زهکش نشده (تنش کل) و برای تحلیل بلندمدت، پارامترهای زهکش شده (تنش مؤثر) به کار گرفته می‌شود (بریلجن، ۲۰۰۶). برای پیشگیری از تخریب سطوح شیب‌دار در تماس با آب روش‌های مختلفی مانند: سنگ‌چین، پوشش گیاهی، ترانشه، ژئوبگ، توریسنگ، تشک بتنی، مخلوط سیمان-خاک و دیوار حایل را می‌توان استفاده کرد (گوپیناتان، ۱۹۹۶). نایت (۲۰۰۵) روش محاسباتی سطح آزاد با استفاده از معادله لاپلاس دوبعدی را با فرض این که تراز پیزومتریک نسبت به امتداد قائم روند غیرخطی داشته باشد، اصلاح کرد. نتیجه محاسبات نشان داد که شیب سطح فریاتیکی در نقطه نشت ثابت بوده و مقدار آن به طور تقریبی ۱- است. سونبرگ و همکاران (۲۰۱۰) برای بررسی تقویت شیب‌های خاکی به‌وسیله گیاهان آزمایش‌های سنترفیوژ ژئوتکنیکی انجام داد. وی در آزمایش‌های خود از درختان بید برای کنترل پایداری شیب استفاده کرد. در این پژوهش شرایط مختلف توزیع ریشه و تأثیر آن بر روی خصوصیات مکانیکی خاک با روش عکس‌برداری بررسی شد. اشنلنم و همکاران

(۲۰۱۰) یک مدل فیزیکی برای مطالعه اثرات تغییرات آب و هوایی در شیب‌های خاکی غیراشباع ارائه داده و اثر بالا آمدن سطح آب در شیب‌های غیراشباع را به‌صورت آزمایشگاهی در مدل فیزیکی و عددی بررسی کردند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و مدل عددی هماهنگی خوبی در خصوص خاک غیراشباع که رفتار پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهد، داشتند. بریلجن (۲۰۰۶) پایداری شیب در حین پایین‌افتادگی سطح آب را بررسی کرد که این موضوع به ضریب نفوذپذیری خاک، سرعت و نسبت پایین‌افتادگی سطح آب، رفتار مواد غیرخطی خاک و شرایط باربرداری بستگی دارد. در این پژوهش با تکنیک‌های تحلیل پیشرفته، پایین‌افتادگی آرام، سریع و انتقالی (گذرا) با نرخ‌های مختلف و مقادیر متفاوت هدایت هیدرولیکی خاک در شیب بررسی شد. وی عامل‌های زیادی که در ارتباط با شرایط باربرداری و مشابه با موارد طراحی است، بررسی کرد و نتایج آنالیز نشت با المان‌های محدود که به بررسی اثر بعضی از متغیرها در پیشرفت منطقه اشباع در شیب جانبی کانال می‌پردازد، ارائه شده است. داودی و فاطمی (۱۳۸۸) اثر توأم قطر و تراکم ریشه درخت بید بر مقاومت برشی خاک را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش پراکنش قطر و تراکم ریشه در خاک چسبندگی ظاهری خاک و در نتیجه مقاومت برشی خاک زیاد و برعکس زاویه داخلی خاک کاهش می‌یابد. کتیب (۲۰۰۴) نشت از کانال‌های پوشش‌دار همراه با زهکش‌های نامتقارن در حالت ماندگار را با روش المان‌های محدود بررسی کرد. همچنین اثر پوشش کانال بر دبی نشت بررسی شد. نتایج نشان داد زمانی که فاصله زهکش‌ها زیاد است، میزان تأثیر و کارایی پوشش کانال در کاهش نشت کم می‌شود. با کاهش نفوذپذیری پوشش کانال، نشت از کانال نیز کاهش می‌یابد. اما زمانی که نسبت نفوذپذیری پوشش کانال و خاک زیر آن در 2×10^{-2} تا 1×10^{-3} است، نشت کانال به نسبت زیاد می‌شود. زمانی که فاصله زهکش‌ها کم است پوشش کانال‌ها خیلی مؤثر است. عقیفی (۱۳۸۵) به بررسی عوامل مؤثر بر کارایی دیوار آب‌بند در کاهش نشت از زیر سدهای خاکی با نرم‌افزار Seep/W پرداخت. نتایج نشان داد که در ۱۰ درصد ابتدا و انتهای مقطع پی، با دور شدن از سراب و پایاب دبی نشت افزایش یافته و در قسمت میانی دبی نشت ثابت است. با افزایش عرض نیز تفاوت زیادی در دبی

است که مجموع تغییرات سرعت جریان در جهت x و y به اضافه‌ی دبی جریان اضافی با تغییر حجمی آب نسبت به زمان برابر است (اشنلن و همکاران، ۲۰۱۰).
برای مقایسه نتایج مدل عددی و فیزیکی از رابطه زیر استفاده شد:

$$E = \sum \left(\frac{|X_e - X_n|}{X_e} \right) \times 100 \quad (4)$$

که در آن E متوسط خطای پارامتر مورد مقایسه به درصد، X_e پارامتر نتیجه شده از مدل آزمایشگاهی و X_n پارامتر نتیجه شده از مدل عددی است.

مدل فیزیکی

آزمایش‌های این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه تبریز بر روی مدل فیزیکی دستگاه نشت انجام شد. این مدل شامل یک محفظه از جنس پلکسی‌گلاس به ارتفاع ۷۰، عرض ۲۰ و طول ۱۷۰ سانتی‌متر است که بخش مرکزی آن به طول ۱۴۰ سانتی‌متر محل اجرای مدل شیب خاکی است. آب مورد استفاده در این آزمایش‌ها به وسیله یک پمپ با قدرت ۱/۵ کیلووات از یک مخزن با حجم مفید ۱۵۰ لیتر که در زیر این دستگاه تعبیه شده است تأمین می‌شود. کنترل عمق آب در دو طرف مدل خاک به وسیله دو لوله قایم از جنس PVC که ارتفاع آن‌ها قابل تغییر است انجام می‌شود. و آب زهکشی شده دوباره به مخزن پایین باز می‌شود. شکل ۱ نمایی از مدل فیزیکی و خاک شیب‌دار را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از مدل فیزیکی و خاک شیب‌دار

آزمایش‌های مقدماتی

برای انجام آزمایش‌های اصلی نیاز به تعیین پارامترهای خاک مانند ضریب هدایت هیدرولیکی (k)، ضریب چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی، دانه‌بندی و تراکم است. بنابراین ابتدا این پارامترها در آزمایشگاه مکانیک

نشت مشاهده نشد. تأثیر افزایش ارتفاع دیوار آب‌بند بر کاهش دبی نشت نیز از روند مشخصی پیروی نکرد به طوری که گاهی با افزایش ۱ متر ارتفاع، دبی نشت ۵۰ درصد و با افزایش ۱۵ متر، ۴ درصد کاهش یافت. هدف از این پژوهش بررسی عملکرد پرده آب‌بند به عنوان یک روش برای پیش‌گیری از تخریب سطح‌های شیب‌دار خاکی به صورت آزمایشگاهی است. ابتدا بحرانی‌ترین حالت تخریب تعیین شده و سپس با اجرای پرده آب‌بند در عمق‌های مختلف، عمق بهینه آن برای پایداری بیشتر خاک تعیین می‌شود. در نهایت نتایج مدل فیزیکی با نتایج حاصل از مدل عددی برای تحلیل بهتر رفتار آب در خاک مقایسه شد.

مواد و روش‌ها

معادلات حاکم

جریان آب در خاک‌های اشباع و غیراشباع را می‌توان با معادله داریسی بررسی کرد (فردلاند و هارجو، ۱۹۹۳). طبق قانون داریسی سرعت جریان عبوری از یک توده خاک متناسب با گرادیان هیدرولیکی بوده که می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد:

$$v_w = -k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \quad (1)$$

که در آن v_w سرعت جریان آب، k_w ضریب نفوذپذیری و $\partial h_w / \partial y$ گرادیان هیدرولیکی در جهت y است. تراز هیدرولیکی کل به صورت زیر بیان می‌شود:

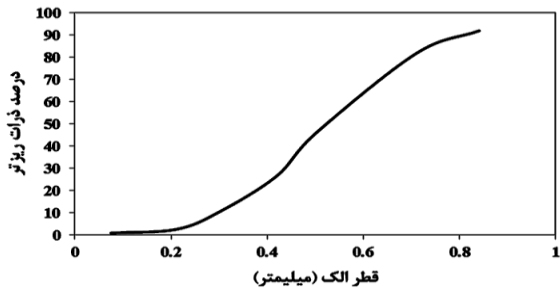
$$h_w = y + \frac{u_w}{\rho_w g} \quad (2)$$

که در آن فشار آب منفذی، ρ_w چگالی آب و g شتاب ثقل است. نشت آب در شیب خاکی را می‌توان با معادله دو بعدی جریان تحلیل کرد. تحت شرایط جریان غیرماندگار، معادله دیفرانسیل جزئی جریان آب در یک خاک غیراشباع و غیرهمگن را می‌توان به صورت زیر نوشت:

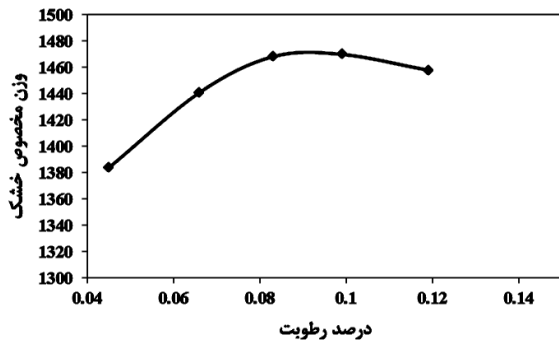
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{wx} \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{wy} \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$$+ q = m_2^w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t}$$

در این رابطه m_2^w ضریب تغییر حجم آب با توجه به تغییر در مکش ماتریک و t زمان است. این معادله بیانگر آن



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی خاک



شکل ۳- منحنی تراکم

خاک گروه مهندسی خاک و پی دانشگاه تبریز به دست آمدند آزمایش دانه‌بندی برای تعیین منحنی دانه‌بندی با روش الک انجام شد که این منحنی در شکل ۲ آورده شده است. برای تعیین رطوبت و انرژی بهینه تراکم از آزمایش پروکتور استاندارد استفاده شد که منحنی تراکم این آزمایش در شکل ۳ آورده شده است. ضریب آبدگزی با آزمایش بار افتان و با رساندن خاک به تراکم بهینه انجام شد. از آزمایش برش مستقیم برای تعیین زاویه اصطکاک داخلی و مقدار چسبندگی نمونه خاک استفاده شد. مقدار رس خاک مورد استفاده در این پژوهش کم بوده و خاک را می‌توان ماسه خالص در نظر گرفت. از آن جایی که تخریب در بخشی از خاک اتفاق می‌افتد که خاک اشباع است، آزمایش برش مستقیم به‌صورت زهکشی نشده انجام گرفت.

در جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده آورده شده است.

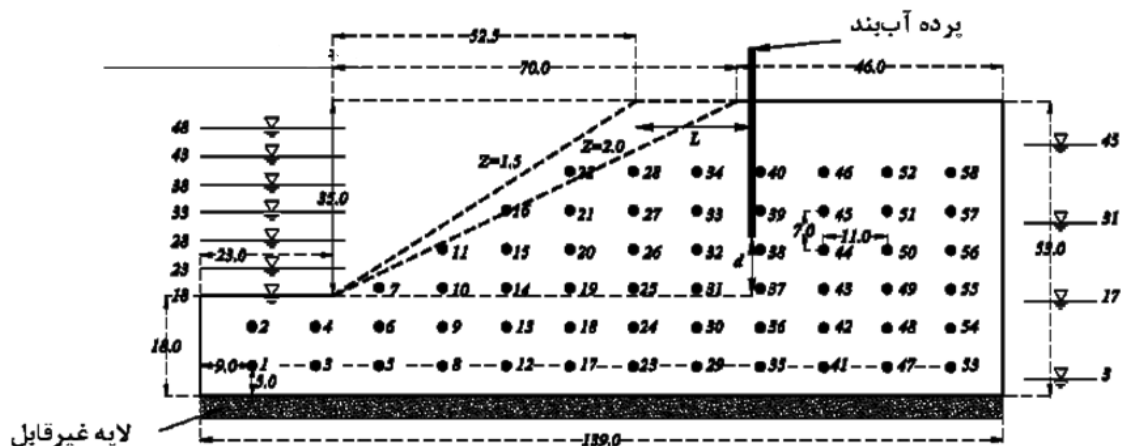
جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک

d_{50} (mm)	ضریب یکنواختی C_u	ضریب انحنای C_c	رطوبت بهینه θ_{opt}	چگالی خشک γ_d (kg/m^3)	چگالی مستغرق γ_{sat} (kg/m^3)	ضریب نفوذپذیری K (m/s)	چسبندگی C (kg/cm^2)	زاویه ایستایی Φ
۰/۵۲۵	۱/۹۷۴	۱/۰۹۳	۷/۹۲	۱۴۷۱/۶	۱۹۱۶/۳	۰/۰۰۰۲۰۶	۰/۰۱۵۶	۳۸/۸۸°

تراز سطح ایستایی در دو طرف کانال‌های انتقال آب یکسان است و نشت از کانال به‌صورت متقارن نسبت به محور مرکزی آن انجام می‌شود، در این پژوهش نصف مقطع عرضی کانال مدل شده است.

آزمایش‌های اصلی

شکل ۴ یک طرح کلی از مدل خاک با محل قرارگیری پیزومترها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، بخش سمت راست شکل نشان دهنده تراز سطح ایستابی در حین آزمایش‌ها و بخش سمت چپ نشان دهنده تراز آب در کانال است. با توجه به این که



شکل ۴- تصویر شماتیک مدل خاک و محل قرارگیری پیزومترها (تمامی ابعاد و اندازه‌ها به سانتی‌متر)

نسبت به زمان پرداخته تا به مقدار یکنواخت برسد. برای تعیین زمان تخریب، سطح خاک به طور مداوم با دقت بررسی شده و زمانی که اولین ترک‌ها و حرکات مشاهده شد به عنوان شروع تخریب در نظر گرفته شد. پس از هر بار تخریب دوباره به بازسازی مدل خاک پرداخته و مدل برای آزمایش بعدی آماده شد. شکل ۵ سطح خاک را قبل و بعد از گسیختگی نشان می‌دهد. برای اجرای پرده آب‌بند از یک صفحه از جنس PVC به ضخامت ۴ میلی‌متر استفاده شد. از آنجایی که نسبت ضخامت صفحه به طول مدل کوچک است، این صفحه پرده آب‌بند در نظر گرفته می‌شود. پس از هر آزمایش برای تغییر عمق نفوذ پرده آب‌بند خاک تا زیر مدل شیشه‌ای تخلیه شده و پس از جابجایی دوباره خاک متراکم شد. اطراف پرده آب‌بند با چسب آب‌بندی شدند و برای تعیین فاصله و عمق نفوذ پرده آب‌بند از میانگین گرادیان هیدرولیکی که حاصل نسبت اختلاف بار دو طرف مدل به فاصله بین آن‌ها است، استفاده شد. آزمایش‌های این پژوهش در دو مرحله انجام شد. آزمایش‌های مرحله اول مربوط به تعیین بحرانی‌ترین حالت و مرحله دوم مربوط به کنترل بدترین حالت تخریب است.

در ابتدا یک لایه از خاک به ضخامت ۴ سانتی‌متر با درصد رس بالا به عنوان لایه غیرقابل نفوذ برای شبیه‌سازی بستر غیرقابل نفوذ و همچنین جلوگیری از فرار آب در مرز بین خاک و کف مدل ایجاد شد. لایه‌های خاک را ابتدا به رطوبت بهینه رسانده و سپس با همان انرژی تراکم در آزمایش تراکم استاندارد و ضریب آب‌گذری در مدل با لایه‌هایی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر متراکم کرده تا به ارتفاع حداکثر یعنی همان ۵۳ سانتی‌متر نسبت به بستر غیرقابل نفوذ برسد. با برش زدن خاک اضافه، مقطع شیب‌دار و کف افقی مدل بر طبق شکل ۴ ایجاد شد. قبل از انجام هر آزمایش همه پیرومترها با دقت ۱ میلی‌متر هواگیری شده و از درست عمل کردن آن‌ها اطمینان به دست آمد. برای ایجاد اختلاف بار، ابتدا تراز آب در کانال را به مقدار مورد نظر رسانده سپس سطح ایستابی را با سرعت در حدود ۳ میلی‌متر در ثانیه و به آرامی بالا آورده تا خاک فرصت کافی برای اشباع شدن داشته باشد. در مواردی که تخریب اتفاق افتاد تراز سطح ایستابی در هنگام تخریب ثبت شد و پس از ماندگار شدن جریان، اطلاعات برداشت شدند. برای اطمینان از یکنواخت شدن جریان پس از ایجاد اختلاف بار مورد نظر، با استوانه مدرج با دقت ۲ سانتی‌متر مکعب به اندازه‌گیری دبی حجمی



(ب)



(الف)

شکل ۵- سطح خاک (الف) قبل و (ب) بعد از تخریب (آزمایش شماره ۱۳)

برای ۳ تا ۴ دقیقه و کدر کردن جریان آب درون کانال. IV- جابجایی بخش عظیمی از خاک شیب‌دار تا عمق ۳/۵ سانتی‌متر و ادامه این روند تا حدود ۱۰ دقیقه و ایجاد جریان گل‌آلود زیرین در آب درون کانال. با توجه به جدول ۲ بحرانی‌ترین حالت مربوط به آزمایش‌های شماره ۵ و ۱۱ است. در مرحله دوم، آزمایش‌ها بر روی کنترل تخریب در این حالت‌ها انجام شد که در ضمن آن

جدول ۲ مشخصات آزمایش‌های مرحله اول این پژوهش را نشان می‌دهد. شدت تخریب با توجه به شدت آن به چهار گروه تقسیم شدند. I- مشاهده ترک‌های سطحی بر روی خاک و جابجایی ناچیز خاک. II- در ابتدا مشاهده ترک و پس از آن جابجایی سطحی خاک با مقدار متوسط. III- کنده شدن و جابجایی قسمت رویی خاک شیب دار تا عمق ۲ سانتی‌متر به طرف پایین دست، ادامه حرکت خاک

بحرانی‌تر شدن این آزمایش‌ها شده است. برای کنترل تخریب، پرده آب‌بند با اعماق مختلف استفاده شد تا بهینه‌ترین حالت آن انتخاب شود. جدول ۳ مشخصات آزمایش‌ها را در مرحله دوم آزمایش‌های این پژوهش نشان می‌دهد. در این جدول L و d همان پارامترهای تعیین موقعیت پرده آب‌بند بر طبق شکل ۴ است. پارامتر z در این جدول معرف گرادیان هیدرولیکی متوسط در هر آزمایش است که حاصل تقسیم اختلاف تراز سطح آب کانال و آب زیرزمینی به فاصله افقی این دو تراز سطح آب است.

حالت‌های دیگر تخریب نیز کنترل شد. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود تراز سطح آب زیرزمینی در زمان تخریب برای آزمایش‌های شماره ۵ و ۱۱ بالاتر از آزمایش‌های شماره ۶ و ۱۲ است که نشان دهنده بحرانی‌تر بودن آن‌ها است. در این آزمایش‌ها تراز سطح آب کانال بالاتر از آزمایش‌های ۶ و ۱۲ است. دلیل این است که در آزمایش‌های ۵ و ۱۱ سطح آب کانال، سطح شیب‌دار بدنه کانال را قطع کرده و خط فریاتیکی سطح شیب‌دار کانال را قطع می‌کند. ولی در آزمایش‌های شماره ۶ و ۱۲ تراز سطح آب در کانال وجود ندارد. این امر باعث

جدول ۲- مشخصات آزمایش‌های مرحله اول

شماره آزمایش	Z	تراز آب کانال (cm)	تراز سطح ایستابی (cm)	تراز وقوع تخریب (cm)	درجه شدت تخریب	شماره آزمایش	Z	تراز آب کانال (cm)	تراز سطح ایستابی (cm)	تراز وقوع تخریب (cm)	درجه شدت تخریب
۱	۱/۵	۴۸	۴۵	-----	-----	۷	۲	۴۸	۴۵	-----	-----
۲	۱/۵	۳۸	۴۵	۴۵	I	۸	۲	۳۸	۴۵	۴۵	I
۳	۱/۵	۳۳	۴۵	۴۲/۵	II	۹	۲	۳۳	۴۵	۴۵	II
۴	۱/۵	۲۸	۴۵	۴۰/۲	III	۱۰	۲	۲۸	۴۵	۴۱/۸	II
۵	۱/۵	۲۳	۴۵	۳۶/۶	IV	۱۱	۲	۲۳	۴۵	۴۱/۵	IV
۶	۱/۵	۱۸	۴۵	۳۹/۸	IV	۱۲	۲	۱۸	۴۵	۳۹/۳	III

جدول ۳- مشخصات آزمایش‌های مرحله دوم

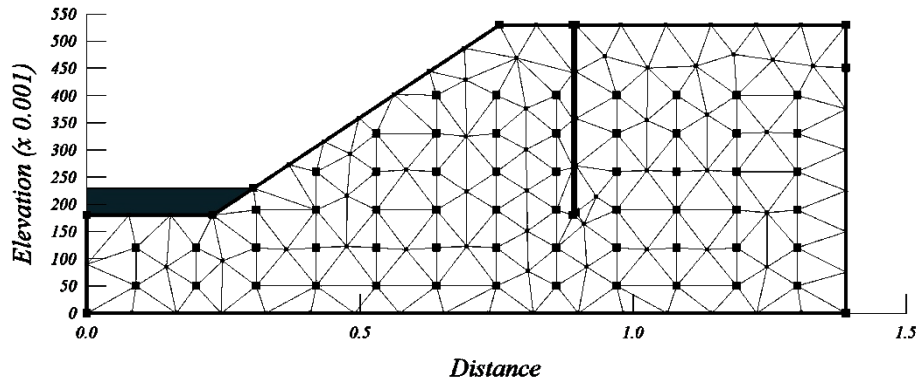
شماره آزمایش	Z	تراز آب کانال (cm)	تراز سطح ایستابی (cm)	تراز وقوع تخریب (cm)	درجه شدت تخریب	d (cm)	L (cm)
۱۳	۱/۵	۲۳	۴۵	۴۲/۵	III	0.2*i = 4.6	0.6*i = 13.8
۱۴	۱/۵	۲۳	۴۵	۴۴/۷	III	0*i = 0	0.6*i = 13.8
۱۵	۱/۵	۲۳	۴۵	-----	-----	- 0.2*i = - 4.6	0.6*i = 13.8
۱۶	۲	۲۳	۴۵	۴۵	I	0.2*i = 4.6	0.6*i = 13.8
۱۷	۲	۲۳	۴۵	-----	-----	0*i = 0	0.6*i = 13.8

عنوان شبکه بهینه برگزیده شد و همه مدل‌ها با این شبکه شبیه‌سازی شدند.

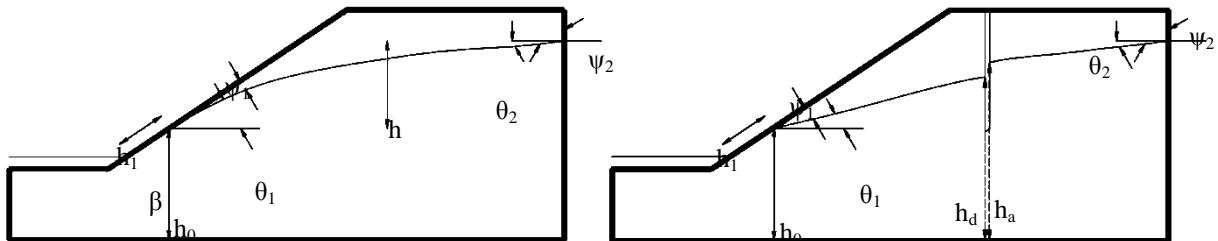
پارامترهای مورد استفاده در تحلیل نتایج در شکل ۷ نشان داده شده‌اند، این پارامترها شامل Ψ_1 و Ψ_2 به ترتیب زاویه بین سطح فریاتیکی با شیب بدنه کانال قبل از مماس شدن خط فریاتیکی با شیب بدنه کانال و امتداد قائم بر سطح ایستابی، θ_1 زاویه بین خط فریاتیکی و خط افق در شیب بدنه کانال و θ_2 زاویه بین خط فریاتیکی و بدنه قائم سطح ایستابی آب زیرزمینی، h ضخامت لایه آب بر روی نقطه نشست و h_1 سطح نشست در بدنه مورب کانال است.

مدل عددی

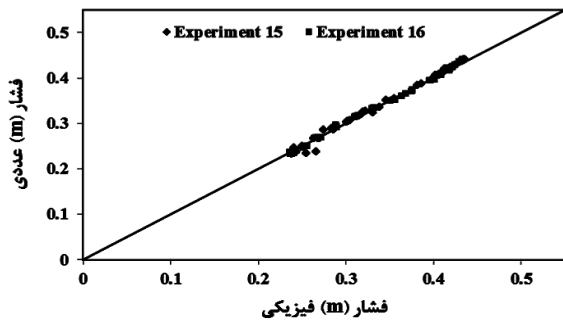
در این پژوهش از نرم‌افزار Seep/W از سری نرم‌افزارهای GeoStudio2007 برای شبیه‌سازی جریان استفاده شد. این نرم‌افزار قابلیت شبیه‌سازی جریان به صورت ماندگار و غیرماندگار را دارد. روش حل معادلات در این نرم‌افزار المان‌های محدود است (راهنمای Seep/W6.0، ۲۰۰۴). شرایط مرزی استفاده شده در مدل شامل شرط مرزی دیواره، شرط مرزی فشار کل و شرط مرزی سطح نشست است که در شکل ۶ آورده شده است. همچنین در این شکل شبکه‌بندی مدل مشاهده می‌شود. تعداد المان‌ها از ۲۳۴ طی ۶ مرحله به ۱۹۰۳ المان افزایش یافت که در نهایت با توجه به خطای مدل عددی تعداد ۱۳۵۵ المان به



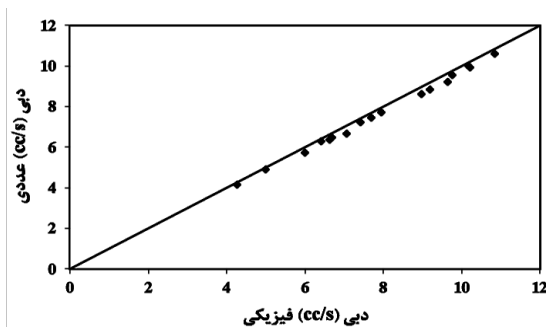
شکل ۶- شرایط مرزی به کار رفته و المان‌های مثلثی (ابعاد به متر)



شکل ۷- پارامترهای مورد استفاده در تحلیل نتایج



شکل ۹- مقایسه نتایج مدل عددی و فیزیکی برای فشار کل (Z=2)



شکل ۱۰- مقایسه نتایج مدل عددی و فیزیکی برای دبی جریان

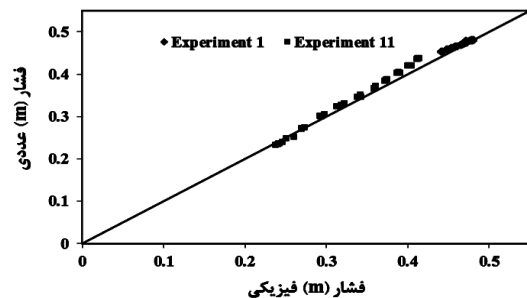
شکل‌های ۱۱ و ۱۲ خط فریاتیکی را برای هر دو شیب بدنه کانال نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود مدل عددی خط فریاتیکی را با دقت قابل قبولی در مقایسه با

نتایج و بحث

صحت‌سنجی مدل عددی

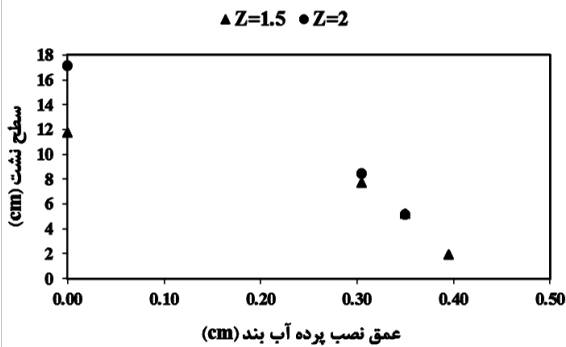
در ابتدا به بررسی نتایج مدل عددی و مقایسه آن‌ها با نتایج مدل فیزیکی می‌پردازیم. در شکل‌های ۸ و ۹ پارامتر فشار کل برای تمامی پیژومترها برای شیب‌های مختلف بدنه کانال برای صحت‌سنجی مدل عددی آورده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل عددی با دقت مناسب این پارامترها را برآورد کرده است. متوسط خطا در برآورد دبی ۵/۶۶٪ و فشار کل ۲/۰۸٪ است.

شکل ۱۰ بیانگر مقایسه نتایج مدل عددی و فیزیکی در مورد دبی حجمی جریان است.



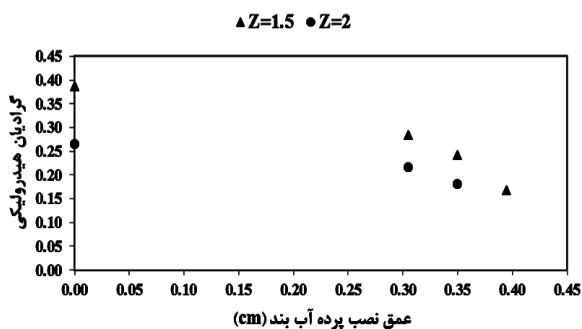
شکل ۸- مقایسه نتایج مدل عددی و فیزیکی برای فشار کل (Z=1.5)

نشت) است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که نصب پرده آب‌بند به خوبی توانسته این مشکل را برطرف نماید و هرچه به عمق نصب آن افزوده می‌شود سطح نشت بیشتر کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که در حالت بدون پرده آب‌بند، سطح نشت (h_1 در شکل ۷) برای شیب کندتر، بیشتر از شیب تندتر است این مسأله به خاطر پایین افتادن سطح خاک در شیب کندتر است. همان‌طور که شیب کندتر باعث پایداری بیشتر می‌شود، می‌تواند با افزایش سطح نشت خطر بروز تخریب را افزایش دهد. به همین دلیل در آزمایش‌های این پژوهش تخریب برای هر دو شیب اتفاق افتاده ولی در مورد شیب کمتر شدت آن اغلب کمتر است.



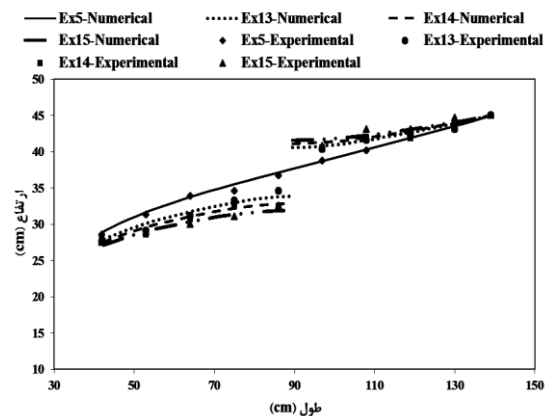
شکل ۱۳- تغییرات سطح نشت به واسطه تغییر در عمق نصب پرده آب‌بند

شکل ۱۴ تغییرات گرادیان خروجی خط فریاتیکی را در مقابل تغییرات عمق پرده آب‌بند نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که گرادیان خروجی برای شیب کمتر، کمتر از گرادیان شیب بیشتر بدنه است. همچنین نصب پرده آب‌بند باعث کنترل بهتر گرادیان خروجی شده که این مسأله باعث کنترل بهتر تخریب می‌شود.

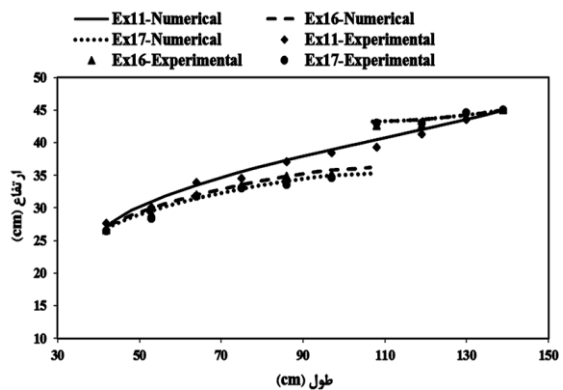


شکل ۱۴- تغییرات گرادیان خروجی خط فریاتیکی در مقابل تغییرات عمق پرده آب‌بند

مدل فیزیکی شبیه‌سازی کرده است. برای استخراج خط فریاتیکی از مدل فیزیکی، نقطه‌هایی در نظر گرفته شدند که در آن‌ها پتانسیل کل برابر پتانسیل ارتفاعی نقطه مورد نظر است. در هر دو شیب با توجه به نمودارها مشخص است که با نصب پرده آب‌بند خط فریاتیکی شکسته شده و به شدت پایین می‌افتد. این روند با افزایش عمق نصب پرده آب‌بند تشدید می‌شود. ارتفاع خط فریاتیکی در بالادست این پرده زیاد شده و پس از آن به شدت کاهش می‌یابد که بیانگر اتلاف زیاد انرژی است. با نصب پرده آب‌بند سطح آب در نزدیکی شیب پایین افتاده که خود باعث کاهش فشار منفذی در نزدیکی شیب و همچنین کاهش سطح نشت بر روی شیب می‌شود که این دو مورد از عوامل کنترل تخریب توسط پرده آب‌بند است.



شکل ۱۱- خط فریاتیکی برای مدل فیزیکی و عددی ($Z=1.5$)



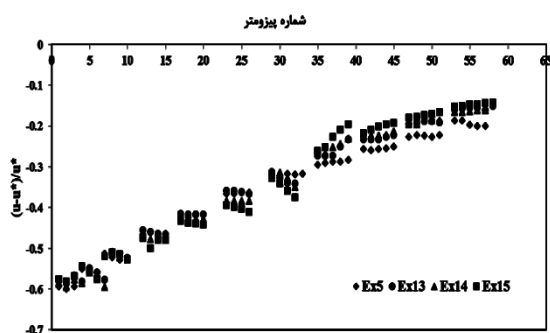
شکل ۱۲- خط فریاتیکی برای مدل فیزیکی و عددی ($Z=2$)

سطح نشت و گرادیان خروجی

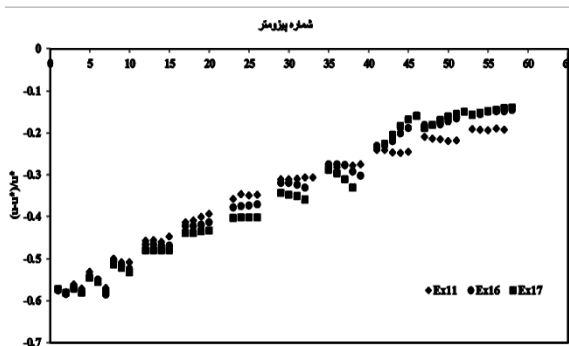
شکل ۱۳ بیانگر تغییرات سطح نشت (h_1 در شکل ۷) به واسطه تغییرات عمق نفوذ پرده آب‌بند است. یکی از عامل‌های گسیختگی به‌خصوص در شیب‌های تند، اشباع شدن بخش زیادی از خاک در بالای سطح آب (سطح

فشار

برای بررسی تأثیر پرده آببند بر روی فشار، پارامتر فشار با رابطه $(u-u^*)/u^*$ بدون بعد شد که در این رابطه u ارتفاع معادل فشار در پیزومتر مورد نظر و u^* عمق سطح ایستابی است. این پارامتر در شکل ۱۶ آورده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با نصب پرده آببند، فشار در بالادست آن افزایش یافته و فشار در پایین‌دست آن کاهش می‌یابد و همچنین برای جریان در فاصله بین پیزومتر ۲۹ تا ۳۹ برای شیب بیشتر (شکل ۱۶ الف)) و پیزومتر ۳۵ تا ۴۶ برای شیب کمتر (شکل ۱۶ ب)) تغییر می‌کند که در نتیجه نصب پرده آببند است.



Z=1.5 (الف)



Z=2 (ب)

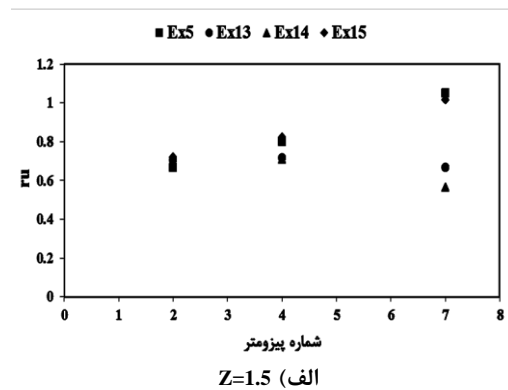
شکل ۱۶- تغییرات پارامتر بی‌بعد $(u-u^*)/u^*$ در مقابل شماره پیزومتر

نتیجه‌گیری

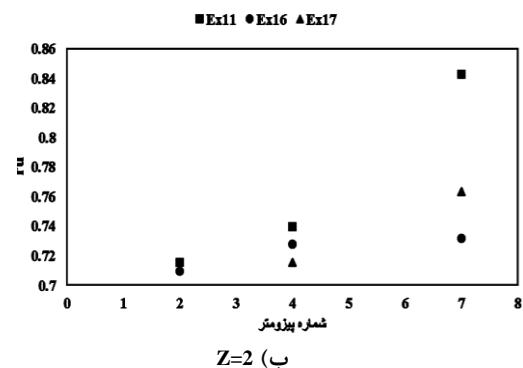
در این پژوهش پایداری سطوح شیب‌دار خاکی با وجود سطح ایستابی با مدل عددی و فیزیکی بررسی شد و نصب پرده آببند به عنوان روش کنترل تخریب تحلیل شد. در کل نتایج زیر مشاهده شد:

- مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی با دقت خوبی پارامترهای فشار کل، دبی و خط فریاتیك را شبیه‌سازی کرد. متوسط خطا در برآورد دبی $۵/۶۶\%$ و

با تغییر عمق نصب پرده آببند، پایداری خاک در مقابل گسیختگی نیز تغییر می‌کند، برای نشان دادن این تغییرات از پارامتر بدون بعد Γ_{II} که نسبت فشار منفذی به تنش مؤثر قایم در محل اندازه‌گیری فشار منفذی است، استفاده شد. شکل ۱۵ بیانگر تغییرات این پارامتر در پیزومترهای نزدیک سطح خاک است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با نصب پرده آببند این پارامتر به شدت کاهش می‌یابد که مؤید کارایی پرده آببند در کنترل تخریب است. در مورد خاک با شیب بیشتر $(Z=1.5)$ مشاهده می‌شود که پایین بردن پرده آببند به زیر کف کانال باعث بالا رفتن فشار پیزومتريک و در نتیجه آن بالا رفتن Γ_{II} است. به طوری که وجود و یا عدم وجود پرده آببند تأثیر چندانی بر روی کنترل فشار پیزومتريک ندارد دلیل آن را می‌توان کاهش بیش از حد مقطع عبوری جریان و در نتیجه آن افزایش فشار پیزومتريک در پیزومترهای نزدیک سطح خاک دانست. در مورد بدنه کانال با شیب کمتر مشاهده می‌شود که توضیحات داده شده تقریباً صادق بوده ولی شدت آن کمتر است.



Z=1.5 (الف)



Z=2 (ب)

شکل ۱۵- تغییرات نسبت فشار منفذی به تنش مؤثر قایم در پیزومترهای نزدیک سطح خاک

3. Berilgen M. M. 2006. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Journal of Computers and Geotechnics*. 34(2):81-91.
4. Fredlund D. G. and Rehardjo H. 1993. *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 45-46.
5. Geo-Slope International Ltd. 2004. *User's Guide for Seep/W, Version 6.0*. Geo-Slope International Ltd, Calgary, Alta. 12-13.
6. Gopinathan M. 1996. *An expert system for riverbank protection*. University of Louisville. 125-127.
7. Katibe H. 2004. Seepage from lined canal using finite- element method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. ASCE. 130(5):441-444.
8. Knight J. H. 2005. Improving the Dupuit-Forchheimer groundwater free surface approximation. *Advanced Water Resources*. 28(10):1048-1056.
9. Schnellmann R. M. Busslinger H. Schneider R. and Rahardjo H. 2010. Effect of rising water table in an unsaturated slope. *Engineering Geology*. 114(1-2):71-83.
10. Sonnenberg R. Bransby M. F. Hallett P. D. Bengough A. G. Mickovski S. B. and Davies M. C. R. 2010. Centrifuge modeling of soil slopes reinforced with vegetation. *Canadian Geotechnical Journal*. 47(9):1415-1430.

فشار کل ۲/۰۸٪ است.

- سطح نشست و فشار پیژومتریک نزدیک سطح خاک دو عامل مهم در وقوع تخریب است. با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان نتیجه گرفت که از دو عامل سطح نشست و فشار پیژومتریک ذکر شده در وقوع تخریب عامل سطح نشست تأثیر بیشتری در تخریب دارد. به طوری که با کنترل و کاهش سطح نشست می‌توان تخریب را کنترل کرد.

- برای کنترل تخریب در شیب تندتر، پرده آب‌بند باید تا زیر رقوم کف کانال پیش رود ولی در مورد شیب کمتر عمق نفوذ آن تا رقوم کف کانال کافی است.

- نفوذ بیش از حد پرده آب‌بند باعث بالا رفتن فشار پیژومتریک در نقطه‌های حساس شده که ممکن است باعث ناپایداری بیشتر خاک شود. در این پژوهش برای شیب بدنه $Z=1.5$ عمق بهینه آن تا زیر کف کانال (در شرایطی که لایه غیرقابل نفوذ در نزدیکی کف کانال باشد، مانند این پژوهش که این لایه وسط حد فاصل بین کف و لایه غیر قابل نفوذ) قرار دارد و برای $Z=2$ هم‌تراز کف کانال حاصل شد.

- پرده آب‌بند (در عمق بهینه) باعث کاهش فشار پیژومتریک سطح خاک، کاهش گرادیان خروجی خط فریاتیك و کاهش سطح نشست می‌شود.

سپاس‌گزاری

بدین وسیله از معاونت پژوهشی دانشگاه تبریز برای پشتیبانی مالی این پژوهش در قالب طرح پژوهشی، آقای دکتر حاج علیلو مسئول آزمایشگاه مکانیک خاک و خانم مهندس فتحی کارشناس گروه مهندسی خاک و پی دانشگاه تبریز به دلیل همکاری با ارزش آن‌ها صمیمانه تشکر می‌شود.

منابع

۱. داودی م. ه. و فاطمی عقدا م. ۱۳۸۸. نقش توأمان قطر و تراکم ریشه درخت بید بر مقاومت برشی خاک. فصلنامه علوم زمین. ۱۸(۷۱): ۱۴۳-۱۴۸.
۲. عقیفی س. ۱۳۸۵. اثر دیوار آب‌بند بر نشست از زیر سدهای خاکی در محیط ناهمگن. دومین همایش زمین‌شناسی کاربردی و محیط زیست. دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر. ۲۲۸-۲۳۸.