

تأثیر تسلیح خاک با ژئوگرید در کنترل پدیده جوشش شیروانی خاکی تحت نوسان‌های تراز آب

مژده محمدیون^۱، قربان مهتابی^{۲*}، محمد اسدی^۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۶/۱/۱۹

۱- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۳- کارشناس ارشد عمران- ژئوتکنیک، باشگاه پژوهشگران، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghmahtabi@znu.ac.ir

چکیده

نشست یکی از عوامل اصلی تخریب شیروانی‌های خاکی است. در شیروانی‌های خاکی، به دلیل نوسان عمق آب زیرزمینی و یا سطح آب در سد خاکی، کانال یا رودخانه، گرادیان نشست از مقدار بحرانی تجاوز کرده و پدیده جوشش اتفاق می‌افتد. در این تحقیق، کارآیی صفحه‌های ژئوگرید در کنترل جوشش شیروانی خاکی تحت صعود آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی شد. صفحه‌های ژئوگرید در سه طول ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی-متر و با فواصل ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متری در شیروانی خاکی قرار داده شدند. آزمایش‌ها در عمق‌های مختلف آب زیرزمینی و آب کانال انجام گرفت. نتایج نشان داد که در بهترین مدل ژئوگرید (صفحه‌ها با طول ۲۰ سانتی‌متر و فاصله ۱ سانتی-متر) نسبت به مدل شاهد (شیروانی خاکی بدون نصب صفحه‌ها)، گرادیان جوشش در شرایط صعود آب زیرزمینی و نزول آب کانال به ترتیب ۷۱/۵ و ۲۳۶ درصد افزایش داشت. با افزایش طول صفحه‌ها و یا کاهش فاصله میانی صفحه‌ها، گرادیان جوشش افزایش یافت. در تمامی صفحه‌ها با فواصل مختلف، تعداد عدم وقوع جوشش‌ها در شرایط نزول آب کانال نسبت به حالت صعود آب زیرزمینی کمتر بود. این وضعیت ناشی از تأثیر توأمان فشار آب منفذی و ایستابی خاک اشباع لایه‌های بالا است. در شرایط صعود آب زیرزمینی، جوشش عمدتاً در عمق‌های نسبی آب کانال برابر ۰/۱۶۷ و ۰/۳۳۳ اتفاق افتاد. در شرایط نزول آب کانال، حالت بحرانی زمانی اتفاق افتاد که سطح آب زیرزمینی بالا باشد.

واژه‌های کلیدی: ژئوگرید، فشار آب منفذی، گرادیان جریان، صعود آب زیرزمینی، نزول آب کانال

Effect of Soil Reinforcement with Geogrid in Controlling the Boiling Phenomenon of Slope under Fluctuations of Water Level

M Mohamdioun¹, G Mahtabi^{2*}, M Asadi³

Received: 2016.04.04

Accepted: 2017.04.08

1- M.Sc. Student, Dept., of Water Engineering, Faculty of Agric., Univ. of Zanjan, Zanjan, Iran

2- Assist. Prof., Dept., of Water Engineering, Faculty of Agric., Univ. of Zanjan, Zanjan, Iran

3- M.Sc. Geotechnical Civil Engineer, Researchers Club, Zanjan Branch, Islamic Azad Univ., Zanjan, Iran

* Corresponding Author, Email: ghmahtabi@znu.ac.ir

Abstract

Seepage is one of the main reasons of slopes destructions. In slopes, due to fluctuations of groundwater depth or water level in an earth dam, a channel or river, gradient of seepage exceeds its critical value and the boiling phenomenon happens. In this study, the performance of geogrid plates in controlling the boiling of slope due to rising of groundwater level or drawdown of channel water surface was investigated using an experimental model. Geogrid plates with three lengths of 10, 15 and 20 cm and spacings of 1, 2, 3 and 4 cm were placed in the slope. The experiments were carried out at different depths of groundwater and channel water. Results showed that in the best model of geogrid (plates with 20 cm length and spacing of 1 cm) gradient of boiling increased 71.5 and 236 percent due to ascending of groundwater and descending of channel water conditions, respectively as compared to the control model. By increasing the length of plates or reducing the spacing between the plates, gradient of boiling increased. In all plates with different spacings, the number of non-occurrence of boiling in the descending condition of the channel water was less than that in the ascending condition of the groundwater. This is due to the simultaneous effects of hydrostatic and pore water pressure of the saturated soil of upper layers. In the ascending condition of the groundwater, boiling occurred mostly in the relative water depths equal to 0.167 and 0.333. In the descending of channel water conditions, critical status happened when the groundwater level was high.

Keywords: Drawdown of channel water, Geogrid, Gradient flow, Pore water pressure, Rising of ground water

که توسط تنش مؤثر کنترل می‌شود. تنش مؤثر به صورت تفاضل تنش کل و فشار آب منفذی تعریف می‌شود. در شیروانی خاکی، بحرانی‌ترین حالت شیب بالا-دست موقعی است که سطح آب به‌طور ناگهانی پایین برود. در این شرایط، فشار ایستابی موجود در سطح خارجی شیب بالادست که در زمان پر بودن مخزن وجود داشت حذف می‌شود، در حالی‌که فشار ایستابی متعادل کننده آن در داخل بدنه شیب بالادست کماکان وجود دارد. در این حالت همراه با فشار آب منفذی،

مقدمه

شیروانی خاکی یکی از مهم‌ترین سازه‌ها در مهندسی آب و پایداری آن‌ها از مباحث کلیدی علم ژئوتکنیک می‌باشد. شیروانی‌ها معمولاً در سد، کانال خاکی، رودخانه و ساحل وجود دارند. در فصول مختلف سال، با توجه به میزان و شدت بارش و وقوع خشکسالی، نوسان‌های تراز آب در طول سال اتفاق می‌افتد که می‌تواند سبب ناپایداری شیروانی شود. یکی از عوامل مؤثر در ناپایداری شیروانی، نیروی برشی است

مسلم ناشی از اثرات متقابل دانه‌های خاک جهت تحمل تنش‌های فشاری و عناصر تسلیح جهت تحمل تنش‌های کششی می‌باشد (صدر ارحامی و مهدی‌زاده ۱۳۹۳). خاک مسلح را می‌توان در دیوار حایل، خاکریز جاده، کوله پل، سد خاکی و تقویت خاک زیر پی و کانال استفاده نمود. از مزایای اجرای این روش، پایدارسازی دیواره‌های خاکی بزرگ در زمان کوتاه و با مراحل اجرایی کمتر نسبت به سایر روش‌ها و هزینه کم می‌باشد. عناصر تسلیح می‌توانند از جنس فلزات، مواد پلیمری و حتی گیاهان باشند (اسدی و همکاران ۱۳۸۷). از انواع مسلح کننده‌ها می‌توان به تسمه‌های فولادی، ژئوتکستایل، ژئوگرید، ژئوممبرین، ژئوگرید، ژئونت و ... اشاره کرد. از بین مسلح کننده‌ها، ژئوگریدها صفحه‌های مشبک از جنس پلی‌اتیلن و یا پلی‌پروپیلن هستند که در مقایسه با سایر مسلح کننده‌ها، خاصیت قفل‌شدگی بیشتری دارند، یعنی با ذرات خاک درگیر شده و مقاومت طولی و عرضی بالایی به بستر می‌دهند.

مرور منابع علمی نشان می‌دهد که پژوهش‌های آزمایشگاهی در زمینه استفاده از مسلح کننده‌ها در پایداری سطوح شیروانی خصوصاً در سازه‌های هیدرولیکی محدود می‌باشد. سیواستوا و سیواکومار بابو (۲۰۱۱) کاربرد ژئوگرید در پایدارسازی شیب بالادست سد خاکی را با نرم‌افزار Plaxis بررسی کردند. نتایج بیان‌گر افزایش ضریب اطمینان از مقدار ۰/۸۵ به ۱/۸۳ بود. اولانیان و آکولادی (۲۰۱۲) با بررسی آزمایشگاهی تسلیح خاک‌های ضعیف با کمک ژئوگرید، گزارش کردند که ژئوگرید مقاومت خاک‌های ضعیف را ۲/۵ تا ۴ برابر افزایش می‌دهد. تاکاره و وات (۲۰۱۴) به صورت عددی عملکرد ژئوتکستایل با طول‌ها و فواصل مختلف را در افزایش پایداری سد خاکی بررسی کردند. مطابق نتایج، با کاهش فاصله و افزایش طول صفحه‌ها، ضریب پایداری سد افزایش یافت. آیین (۲۰۱۵) با کمک نرم‌افزار Plaxis، ضریب ایمنی سد خاکی مسلح شده با ژئوگرید را تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی بررسی کرد. براساس نتایج، نصب ژئوگرید ضریب ایمنی سد و زاویه پایداری شیروانی را افزایش داد. صلاح‌الدین و صادق (۲۰۱۶) شرایط تسلیح خاکریز با ژئوگرید را در

فشار ایستابی باعث وقوع جوشش در شیروانی می‌شود (چو-آگور و همکاران ۲۰۰۸). همچنین در شرایط تغذیه آب زیرزمینی و بالا آمدن سطح ایستابی، فشار آب منفذی افزایش می‌یابد. در این حالت با توجه به رابطه تنش کل، تنش مؤثر کاهش یافته و به تبع آن مقاومت برشی خاک نیز کاهش یافته و باعث وقوع جوشش در شیروانی می‌شود. بنابراین، فشار آب منفذی در وقوع جوشش در شیروانی‌ها نقشی مهم دارد (آنون ۱۹۷۳).

به‌طورکلی هرگاه گرادیان هیدرولیکی جریان نشت برابر یا بیشتر از اندازه بحرانی شود، نیروی تماسی بین ذرات خاک برابر صفر شده و در نتیجه در سطح شیب‌دار، ذرات ماسه با جریان آب به طرف بالا پرتاب می‌شوند. به عبارت دیگر سطح شیب‌دار به حالت جوشان در می‌آید که به این پدیده، جوشش گفته می‌شود. روش‌های مختلف پیشگیری از تخریب سطوح شیب‌دار شامل استفاده از سنگ‌چین، پوشش گیاهی، توری‌سنگ، تشک بتنی، مخلوط سیمان و خاک، دیوار آب‌بند و زهکش افقی یا قائم می‌باشد (گوپیناهان ۱۹۹۶). در زمینه نشت آب از خاکریز، بدنه کانال و سد خاکی و کنترل پایداری سطوح شیب‌دار، مطالعات متعددی انجام شده است که می‌توان به تران (۲۰۰۴)، بریلگن (۲۰۰۶)، پاکباز و همکاران (۲۰۰۹) و اشنلن و همکاران (۲۰۱۰) اشاره کرد. فرسادی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) با بررسی پایداری شیروانی خاکی در شرایط صعود آب زیرزمینی و نصب دیوار آب‌بند، نشان دادند که سطح نشت و فشار پیژومتریکی نزدیک سطح خاک، دو عامل مهم در وقوع تخریب است. بهروزی‌نیا و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از دو نرم‌افزار Seep/w و Slope/w تأثیر ویژگی‌های هیدرودینامیکی خاک را بر میزان تراوش و تخریب شیب بالادست سد در اثر تخلیه سریع بررسی کردند و اظهار داشتند ضریب اطمینان بحرانی زمانی است که $\frac{2}{3}$ تراز آب مخزن تخلیه گردد.

از اقدامات مهم در پایدارسازی شیب‌های خاکی، مسلح نمودن خاک می‌باشد. در این روش با قراردادن مسلح کننده در خاک، خصوصیات مهندسی آن بهبود می‌یابد (اولی پور و همکاران ۱۳۸۵). نحوه رفتار خاک

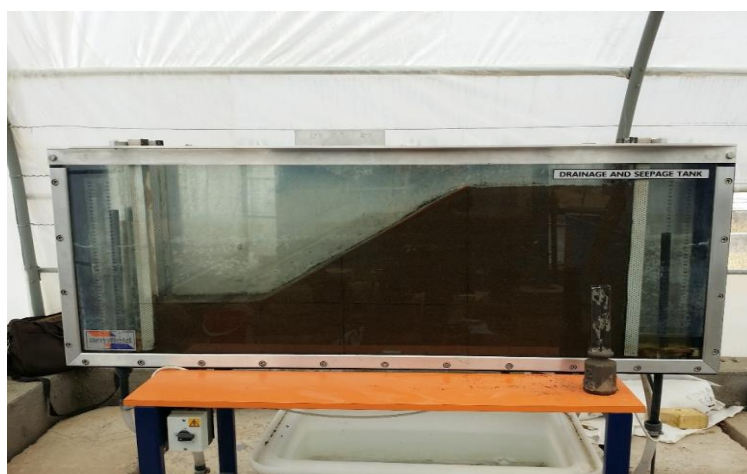
پلکسی‌گلاس به ارتفاع ۶۰، عرض ۱۰ و طول ۱۵۰ سانتی‌متر است که بخش مرکزی آن به طول ۱۰۵ سانتی‌متر محل اجرای شیروانی خاکی است (شکل ۱). آب مورد استفاده در آزمایش‌ها، به‌وسیله یک پمپ با قدرت ۴ کیلووات از یک مخزن با حجم ۱۰۰ لیتر واقع در زیر دستگاه، تأمین می‌شود. کنترل عمق آب در دو طرف مدل خاک به‌وسیله دو لوله قائم (از جنس PVC) با قابلیت تغییر ارتفاع، انجام می‌شود و آب زهکشی شده دوباره به مخزن پایین باز می‌گردد. آزمایش‌های این تحقیق در سه مرحله انجام گرفت. در ابتدا جهت تعیین خصوصیات خاک مورد استفاده، آزمایش‌های مکانیک خاک انجام گرفت. برای تعیین منحنی دانه‌بندی، آزمایش دانه‌بندی به روش الک انجام شد. برای تعیین رطوبت و انرژی بهینه تراکم از آزمایش پروکتور استاندارد استفاده شد. ضریب آب‌گذری با آزمایش بار افتان و با رساندن خاک به تراکم بهینه به‌دست آمد. از آزمایش برش مستقیم برای تعیین ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نمونه خاک استفاده شد. در جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده ارائه شده است. آزمایش‌های اصلی این پژوهش در دو مرحله اجرا شد. در مرحله اول، چهار آزمایش شاهد برای شرایط صعود آب زیرزمینی و چهار آزمایش برای شرایط نزول آب کانال اجرا شد. در مرحله اصلی، آزمایش‌ها با نصب صفحه‌های مشبک اجرا شد. برای کنترل پدیده جوشش، صفحه‌های مشبک با فواصل و طول‌های مختلف نصب شدند تا عملکرد آنها بررسی شود. در ابتدا لایه‌های خاک به رطوبت بهینه رسانده شد و پس از آن با همان انرژی تراکم در آزمایش تراکم

نرم‌افزار Plaxis شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد ژئوگرید باعث بهبود مقاومت برشی خاک و کاهش بالقوه خطر ریزش می‌شود. جامعی و همکاران (۱۳۸۹) وضعیت احداث یک سازه هیدرولیکی بتنی بر روی خاک سست رسی اشباع را با نرم‌افزار Plaxis بررسی کردند. آنها از خاک مسلح‌شده با تعدادی لایه‌های ژئوتکستایل استفاده کردند. نتایج نشان داد که فاصله میانی ژئوتکستایل‌ها و فاصله اولین لایه از پی، از پارامترهای تأثیرگذار می‌باشند. دشتی ناصرآبادی و همکاران (۱۳۹۲) با انجام آزمایشاتی در خصوص عمق بهینه لایه‌های ژئوسنتتیک، مشاهده کردند که با کمک یک لایه ژئوکامپوزیت، تنش کششی به میزان ۳۰ درصد و تنش برشی به میزان ۱۰ درصد کاهش می‌یابد.

امروزه پایدارسازی سازه‌های هیدرولیکی به دلیل تماس با آب و لزوم استفاده از مواد با وزن کمتر، اقتصادی‌تر و با عمر طولانی‌تر مورد توجه مهندسين هیدرولیک و ژئوتکنیک می‌باشد. هدف این تحقیق، بررسی عملکرد صفحه‌های مشبک ژئوگرید با طول و فواصل مختلف در کنترل پدیده جوشش در شیروانی‌های خاکی تحت نوسان‌های سطح آب زیرزمینی و سطح آب کانال است. برای این منظور با استفاده از مدل آزمایشگاهی، تغییرات گرادیان جریان خروجی از شیروانی خاکی در شرایط نوسان‌های تراز آب با حضور صفحه‌های ژئوگرید بررسی شد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه زنجان بر روی مدل فیزیکی تانک نشت انجام شد. این مدل شامل یک محفظه از جنس



شکل ۱- نمایی از مدل فیزیکی تانک نشست و شیروانی خاکی.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مورد استفاده.

چسبندگی (Kg cm^{-2})	رطوبت بهینه (درصد)	ضریب یکنواختی (بی‌بعد)	ضریب آبگذری (cm s^{-1})	بیشینه دانسیته (Kg cm^{-3})	زاویه اصطکاک داخلی (Degrees)	قطر متوسط (mm)
۰/۰۲	۱۳/۴۵	۱/۷۴	۰/۰۰۰۲	۱۶/۶۸	۲۶/۴۳	۰/۶۵

عمق آب زیرزمینی شامل ۱۰، ۱۵، ۲۰، و ۲۵ سانتی‌متر بررسی شد. به منظور کنترل سطح آب زیرزمینی و کانال از لوله‌های PVC کناری تانک نشست که قابلیت جابه‌جایی در جهت قائم داشتند، استفاده شد. شکل ۲ نمای شیروانی خاکی و ابعاد آن را به همراه مقادیر عمق آب کانال (y) و عمق آب زیرزمینی (h) به کار رفته در آزمایش‌ها، نشان می‌دهد. اندازه‌گیری عمق‌ها با کمک اشل‌های میلی‌متری که به صورت قائم (در امتداد لوله‌های PVC کناری) بر روی شیشه تانک نشست نصب شده بود، انجام می‌گرفت. در شکل ۲، سمت راست شکل، نشان دهنده عمق آب زیرزمینی و سمت چپ، نشان دهنده عمق آب کانال است.

در مدل اصلی برای اجرای ژئوگرید، از صفحه‌های مشبک فلزی با قطر سوراخ ۲/۷۵ میلی‌متر استفاده شد. صفحه‌های مشبک در طول‌های ۲۰، ۱۵ و ۱۰ سانتی‌متری (شکل ۳) و فواصل ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متری از هم، به صورت افقی در بدنه شیروانی نصب شدند. در تمامی آزمایش‌ها، اولین صفحه روی نقطه شروع شیروانی قرار داده شد (شکل ۲). پس از هر آزمایش، برای تغییر فاصله یا طول صفحه‌ها، خاک تا کف تانک نشست تخلیه و با تغییر آرایش صفحه‌ها، خاک دوباره

استاندارد، با لایه‌هایی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر متراکم گردید تا به ارتفاع بیشینه یعنی ۴۵ سانتی‌متر نسبت به تراز کف برسد. با برش زدن خاک اضافه، مقطع شیب-دار و کف افقی مدل ایجاد شد. در شرایط صعود سطح آب زیرزمینی، برای ایجاد اختلاف بار، ابتدا سطح آب کانال روی عمق مورد نظر تنظیم شد و پس از آن سطح آب زیرزمینی با سرعت حدود ۳ میلی‌متر بر ثانیه بالا برده شد. در مواردی که تخریب اتفاق می‌افتاد، عمق آب کانال (y) در لحظه‌ی تخریب و عمق وقوع جوشش (p) ثبت می‌شد. پس از هر بار تخریب، سطح شیب‌دار بازسازی می‌شد تا برای آزمایش بعدی آماده شود. شرایط صعود آب زیرزمینی در ۴ عمق آب کانال شامل ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر بررسی شد. در شرایط نزول سطح آب کانال، برای ایجاد اختلاف بار، ابتدا سطح آب زیرزمینی پشت خاکریز روی عمق مورد نظر تنظیم شد و پس از آن سطح آب کانال با سرعت حدود ۱ میلی‌متر بر ثانیه پایین آورده شد. در مواردی که تخریب اتفاق می‌افتاد، عمق آب زیرزمینی (h) در لحظه‌ی تخریب و عمق وقوع جوشش (p) ثبت می‌شد. پس از هر بار تخریب، سطح شیب‌دار بازسازی می‌شد تا برای آزمایش بعدی آماده شود. شرایط نزول آب کانال در ۴

$$h_w = z + \frac{u_w}{\rho_w g} \quad [2]$$

در این رابطه: u_w فشار آب منفذی ($N m^{-2}$)، ρ_w جرم مخصوص آب ($Kg m^{-3}$)، g شتاب ثقل ($m s^{-2}$) و z ارتفاع نسبت به سطح مبنا (m) است. رابطه فشار آب منفذی و تنش مؤثر نیز به صورت رابطه ۳ می‌باشد:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad [3]$$

در این رابطه: σ تنش کل ($N m^{-2}$) و σ' تنش مؤثر ($N m^{-2}$) است. در این تحقیق تأثیر گرادیان جریان نشت ($\partial h_w / \partial x$) بر پدیده جوشش در شیب‌های خاکی تحت نوسان‌های تراز آب با حضور صفحه‌های مشبک ژئوگرید بررسی گردید.

در یک محیط متخلخل، مقدار گرادیان جریان نشت ($\partial h_w / \partial x$) به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

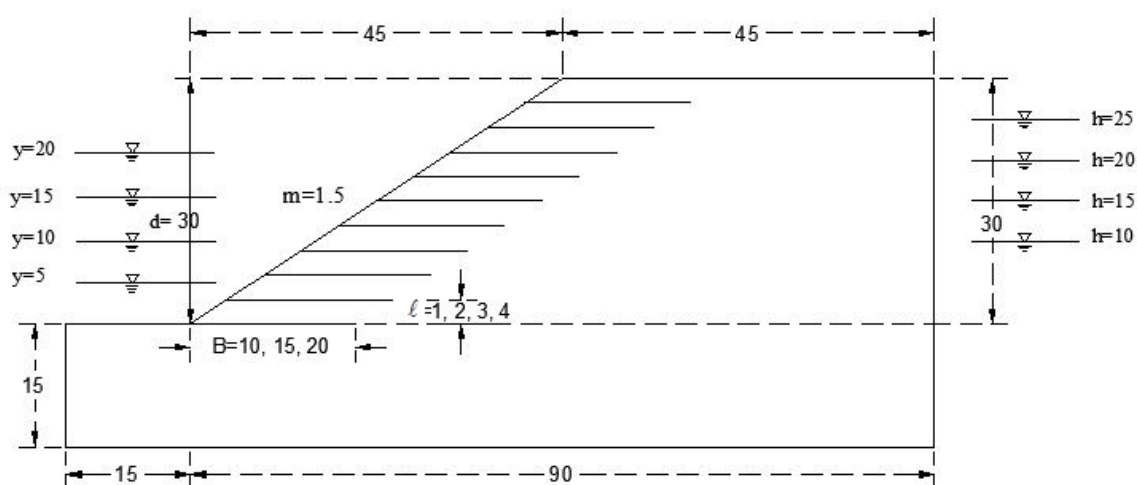
متراکم می‌شد. با در نظر گرفتن ۴ عمق برای شرایط صعود آب زیرزمینی و نزول آب کانال، تعداد ۱۰۴ حالت بررسی شد. شکل ۴ و ۵ نمونه‌هایی از سطح شیب‌دار قبل و پس از وقوع جوشش را نشان می‌دهد.

معادلات حاکم و تحلیل ابعادی

جریان آب در خاک‌های اشباع را می‌توان با رابطه دارسی بررسی کرد. طبق این رابطه، دبی جریان عبوری در واحد عرض (q) مقطعی از توده‌ای خاک متناسب با گرادیان جریان نشت است که می‌توان آن را به صورت زیر بیان کرد (فردلوند و رهاردجو ۱۹۹۳):

$$q = k_w A \frac{\partial h_w}{\partial x} \quad [1]$$

در این رابطه: k_w ضریب نفوذپذیری ($m s^{-1}$)، A سطح مقطع جریان (m^2) و $\partial h_w / \partial x$ گرادیان جریان نشت در جهت x است. مقدار بار هیدرولیکی (h_w) در هر نقطه نیز به صورت زیر بیان می‌شود:



شکل ۲- پارامترهای مورد آزمایش و نحوه قرارگیری صفحه‌های مشبک در شیروانی (ابعاد به سانتی‌متر).



شکل ۳- صفحه‌های مشبک مورد استفاده.



شکل ۵- شیروانی خاکی بعد از وقوع جوشش.



شکل ۴- شیروانی خاکی قبل از وقوع جوشش.

نتایج و بحث

تأثیر فاصله صفحه‌ها -الف- صفحه‌ها با طول ۱۰ سانتی‌متر به‌منظور مقایسه عملکرد صفحه‌های مشبک ۱۰ سانتی‌متری با فواصل نصب مختلف، تغییرات گرادیان جریان خروجی در شرایط صعود سطح آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال به‌ترتیب در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است. در این دو شکل، علامت γ نشان‌گر وقوع جوشش و علامت N بیان‌گر وقوع نیافتن جوشش است. در شرایط صعود آب زیرزمینی (شکل ۶) و در آزمایش شاهد، در همهٔ مقادیر عمق نسبی آب کانال، جوشش مشاهده شد که با بررسی‌های فرسادی‌زاده و همکاران (۱۳۹۳) در خصوص پدیدهٔ جوشش در سطح شیب‌دار مشابه است. در آزمایش‌های همراه با ژئوگرید، در تمامی عمق‌های آب کانال به‌جز عمق‌های نسبی (y/d) برابر ۰/۵ برای صفحه‌ها با فاصله نسبی (B/ℓ) برابر ۰/۱ و در عمق‌های نسبی برابر ۰/۶۶۷ برای صفحه‌ها با B/ℓ برابر ۰/۱ و ۰/۲ جوشش رخ داد. با کاهش فاصله صفحه‌ها، مقدار گرادیان جریان افزایش یافت و این شرایط در عمق‌های کم آب کانال (۰/۱۶۷ و ۰/۳۳۳ $y/d=$ به وضوح دیده شد (به‌ترتیب ۲۶/۵ و ۱۵ درصد). برای شرایط نزول آب کانال (شکل ۷)، مطابق نتایج آزمایش شاهد، در همهٔ مقادیر عمق نسبی آب کانال، جوشش مشاهده شد. در آزمایش‌های همراه با ژئوگرید، در تمامی عمق‌های آب زیرزمینی به‌جز عمق نسبی آب زیرزمینی (h/d) برابر ۰/۳۳۳ برای صفحه‌ها با فاصله نسبی برابر ۰/۱، جوشش رخ نداد. در صفحه‌ها

$$\frac{\partial h_w}{\partial x} = \frac{\Delta H}{L} = \frac{h-y}{L} \quad [4]$$

در این رابطه: ΔH اختلاف عمق آب زیرزمینی و کانال (m) ، L طول خط جریان (m) ، h عمق آب زیرزمینی (m) و y عمق آب کانال (m) است. در این تحقیق از رابطه ۴ برای محاسبه گرادیان جریان استفاده شد. در بررسی تأثیر گرادیان جریان خروجی بر وقوع پدیده جوشش در سطوح شیب‌دار تحت نوسان‌های سطح آب با حضور صفحه‌های ژئوگرید، پارامترهای مؤثر را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

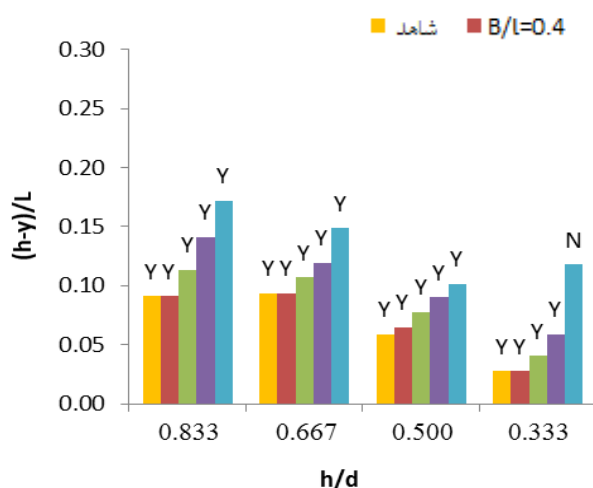
$$f(h, d, y, B, \ell, p, L) = 0 \quad [5]$$

در این رابطه: h عمق آب زیرزمینی (m) ، d عمق کانال (m) ، y عمق آب کانال (m) ، B فاصله صفحه‌ها نسبت به هم (m) ، ℓ طول صفحه مشبک، p فاصله عمودی محل جوشش روی سطح شیب‌دار تا کف کانال (m) و L طول خط جریان (m) است. در هر آزمایش، طول خط جریان (L) به‌صورت فاصله افقی بین تراز سطح آب زیرزمینی و کانال محاسبه می‌شد. با استفاده از تحلیل ابعادی به روش π -باکینگهام و لحاظ کردن رابطه ۴، می‌توان پارامترهای بی‌بعد را استخراج نمود:

$$\frac{\Delta H}{L} = \frac{h-y}{L} = f\left(\frac{h}{d}, \frac{y}{d}, \frac{B}{\ell}, \frac{p}{d}\right) \quad [6]$$

با در نظر گرفتن پارامترهای بی‌بعد، آزمایش‌های این تحقیق در دو حالت صعود سطح آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال اجرا شد. لازم به ذکر است که اگر در آزمایشی پدیدهٔ جوشش رخ ندهد، پارامتر $\frac{p}{d}$ در نتایج ارائه نمی‌شود.

نسبی مقدار گرادیان جریان خروجی، صفحه‌های مشبک نتوانسته‌اند مانع وقوع جوشش شوند و تعداد نمونه‌های بدون جوشش نسبت به شرایط صعود آب زیرزمینی کمتر شده است.



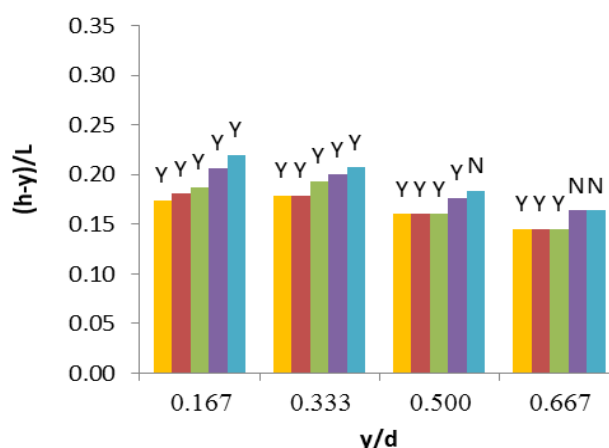
شکل ۷- تغییرات گرادیان جریان خروجی به ازای عمق نسبی آب زیرزمینی و فاصله نسبی صفحه‌های مشبک (B/l) در شرایط نزول سطح آب کانال.

نسبت به شرایط صعود آب زیرزمینی کمتر شده است. به طوری که در تمامی عمق‌های آب زیرزمینی به جز دو عمق نسبی آب زیرزمینی (h/d) برابر $0/333$ و $0/5$ برای صفحه‌ها با فواصل نسبی (B/l) برابر با $0/067$ و $0/13$ ، جوشش رخ داده است. در این حالت مشابه نتایج صفحه‌های 10 سانتی‌متر، در هر عمق آب زیرزمینی با کاهش فاصله‌ی نصب صفحه‌ها، گرادیان وقوع جوشش افزایش یافته است. در صفحه‌های 15 سانتی‌متری در حالت نزول آب کانال، در بهترین حالت صفحه‌ها (فاصله نسبی برابر $0/067$)، مقدار افزایش گرادیان وقوع جوشش نسبت به مدل شاهد، در حدود 194 درصد به دست آمد. این در حالی است که در شرایط صعود آب زیرزمینی، این مقدار به عدد 61 درصد رسید.

ج- صفحه‌ها با طول 20 سانتی‌متر

در شکل 10 و 11 ، تغییرات گرادیان جریان خروجی برای صفحه‌های مشبک 20 سانتی‌متری با فواصل نصب مختلف، به ترتیب در شرایط صعود سطح آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال ارائه شده است.

با فواصل نسبی برابر $0/1$ ، متوسط گرادیان نمونه‌های جوشش‌دار برابر $0/140$ بدست آمد. در هر عمق آب زیرزمینی نیز با کاهش فاصله نصب صفحه‌ها، مقدار گرادیان جریان خروجی افزایش یافت. در مجموع می‌توان گفت در شرایط نزول



شکل ۸- تغییرات گرادیان جریان خروجی به ازای عمق نسبی آب کانال و فاصله نسبی صفحه‌های مشبک (B/l) در شرایط صعود سطح ایستابی.

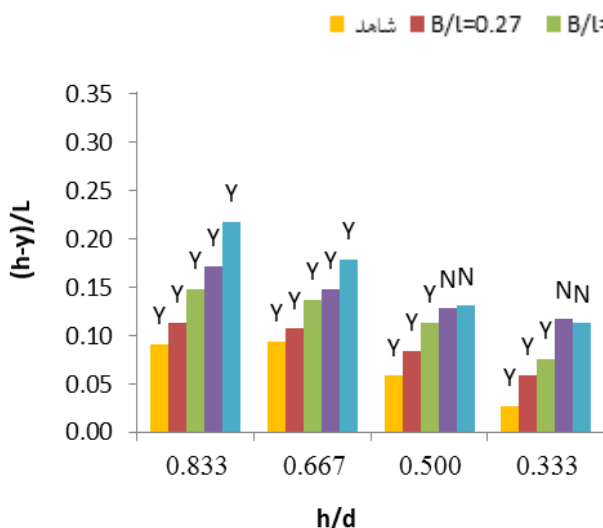
ب- صفحه‌ها با طول 15 سانتی‌متر

تغییرات گرادیان جریان خروجی برای صفحه‌های مشبک 15 سانتی‌متری با فواصل نصب مختلف در شرایط صعود آب زیرزمینی و نزول آب کانال به ترتیب در شکل 8 و 9 ارائه شده است. در شرایط صعود آب زیرزمینی (شکل 8)، نتایج نشان می‌دهد در این صفحه‌ها نسبت به صفحه‌ها با طول 10 سانتی‌متر، تعداد مواردی که در آنها جوشش رخ نداده، افزایش یافته است. به طوری که در عمق نسبی آب کانال (y/d) برابر $0/667$ در تمام نمونه‌های همراه با ژئوگرید، جوشش مشاهده نشد. در عمق نسبی برابر $0/5$ ، برای صفحه‌ها با فواصل نسبی (B/l) برابر $0/13$ و $0/067$ و عمق نسبی برابر $0/333$ ، برای صفحه‌ها با فاصله نسبی برابر $0/067$ ، جوشش رخ نداد. شایان ذکر است در هر عمق نسبی آب کانال، با کاهش فاصله صفحه‌های ژئوگرید، گرادیان وقوع جوشش افزایش یافته است که نشان‌دهنده تأثیر مثبت کاهش فاصله صفحه‌ها بر مقدار گرادیان است.

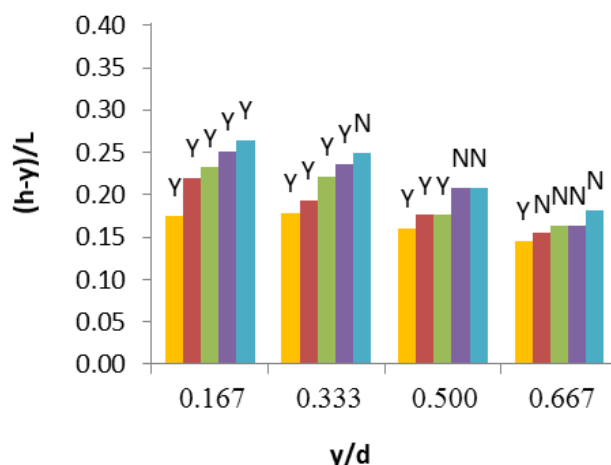
در شرایط نزول آب کانال (شکل 9)، نتایج نشان می‌دهد تعداد موارد عدم وقوع جوشش در این شرایط

مشابه این شرایط، در فاصله نسبی (B/l) برابر ۰/۱ مشاهده شد. در بهترین حالت عملکرد صفحه‌ها (فاصله

در شرایط صعود آب زیرزمینی (شکل ۱۰)، با کاهش فاصله نسبی صفحه‌ها، مقدار گرادیان وقوع جوشش افزایش یافته است و در حداقل فاصله صفحه‌ها یعنی B/l برابر ۰/۰۵، در هیچ عمقی جوشش مشاهده نشد.



شکل ۹- تغییرات گرادیان جریان خروجی به ازای عمق نسبی آب زیرزمینی و فاصله نسبی صفحه‌های مشبک (B/l) در شرایط نزول سطح آب کانال.



شکل ۸- تغییرات گرادیان جریان خروجی به ازای عمق نسبی آب کانال و فاصله نسبی صفحه‌های مشبک (B/l) در شرایط صعود سطح ایستابی.

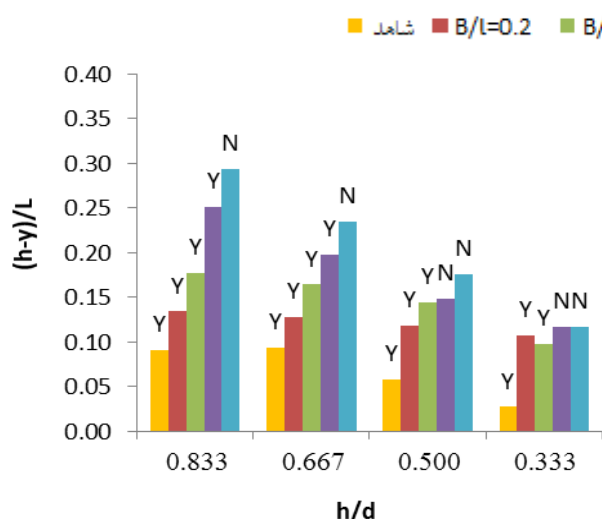
جوشش در سطح شیب‌دار می‌شود. به عبارت دیگر در این شرایط سرعت زهکشی آب در بدنه شیروانی کمتر از سرعت تخلیه آب کانال بوده و در اثر اختلاف فشار ایستابی به وجود آمده، جوشش تشدید می‌گردد (آنون ۱۹۷۳). با نصب صفحه‌های ژئوگرید در عمق خاک و متراکم شدن آن، ذرات خاک با این صفحه‌ها درگیر می‌شوند و این مسئله مقاومت برشی خاک را افزایش می‌دهد. با کاهش فاصله صفحه‌ها نیز (یعنی افزایش تعداد صفحه‌ها)، سطح تأثیر آنها افزایش یافته و در نتیجه با بیشتر شدن درگیری ذرات خاک، پایداری آن افزایش می‌یابد. تاکاره و وات (۲۰۱۴) با بررسی عملکرد ژئوتکستایل با فواصل نصب مختلف (B) در افزایش پایداری سد خاکی، گزارش کردند با کاهش فاصله صفحه‌ها، ضریب پایداری سد افزایش یافت.

به منظور بررسی اثر فاصله صفحه‌های ژئوگرید بر مقدار گرادیان وقوع جوشش، در شکل ۱۲ مقادیر متوسط گرادیان جریان خروجی در نمونه‌هایی که پدیده

نسبی برابر ۰/۰۵) نسبت به مدل شاهد، گرادیان وقوع جوشش افزایشی در حدود ۷۱/۵ درصد داشت. عمده‌ترین شرایط وقوع جوشش در عمق‌های نسبی کانال برابر ۰/۱۶۷ و ۰/۳۳۳ اتفاق افتاده است، یعنی در شرایط صعود آب زیرزمینی وضعیت بحرانی زمانی است که عمق آب کانال پایین‌تر از تراز نرمال باشد.

در شرایط نزول آب کانال (شکل ۱۱)، با کاهش عمق آب زیرزمینی، مقدار گرادیان وقوع جوشش کمتر شده است و در هر عمق آب زیرزمینی با کاهش فاصله نصب صفحه‌ها، مقدار گرادیان جریان خروجی افزایش یافته است. در بهترین حالت عملکرد صفحه‌ها (فاصله نسبی (B/l) برابر ۰/۰۵)، گرادیان وقوع جوشش نسبت به شاهد افزایش ۲۳۶ درصدی داشت. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد در شرایط نزول آب کانال، حالت بحرانی زمانی اتفاق می‌افتد که سطح آب زیرزمینی منطقه بالا باشد و به دلیل اشباع بودن بدنه‌ی کانال در تراز بالاتر، تأثیر توام فشار آب منفذی و ایستایی باعث وقوع

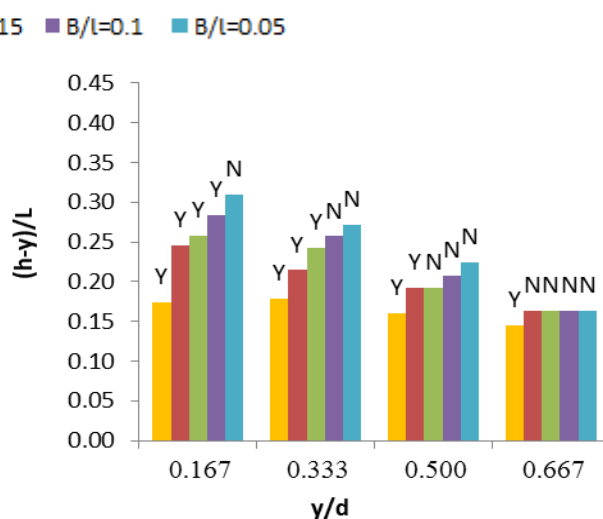
هر سه طول صفحه‌ها (شکل ۱۲- الف تا ج)، با کاهش فاصله صفحه‌ها و در هر دو حالت صعود آب زیرزمینی



شکل ۱۱- تغییرات گرادیان جریان خروجی به ازای عمق نسبی آب زیرزمینی و فاصله نسبی صفحه‌های مشبک (B/l) در شرایط نزول سطح آب کانال.

در حالت نزول آب کانال، این مقدار به عدد ۱۹۴ درصد رسید. با مقایسه این دو مقدار می‌توان گفت، مسلح کردن شیروانی خاکی با صفحه‌های مشبک در حالت نزول آب کانال تأثیر بیشتری در بالا بردن گرادیان جوشش داشته است. لازم به ذکر است در شرایط نزول آب کانال، مقدار گرادیان وقوع جوشش به‌طور متوسط ۷۰ درصد کمتر از مقدار گرادیان در حالت صعود آب زیرزمینی است. مطابق شکل ۱۲- ج (صفحه‌ها با طول ۲۰ سانتی‌متر)، مقدار گرادیان وقوع جوشش در شرایط نزول آب کانال، به‌طور متوسط ۶۰ درصد کمتر از مقدار گرادیان در حالت صعود آب زیرزمینی است. در بهترین عملکرد صفحه‌های مشبک نسبت به مدل شاهد در حالت صعود آب زیرزمینی، مقدار گرادیان وقوع جوشش افزایشی در حدود ۷۱/۵ درصد و در حالت نزول آب کانال، افزایش ۲۳۶ درصدی داشته است. در مجموع می‌توان گفت اثر مسلح کردن شیروانی خاکی در بالا بردن گرادیان خروجی در شرایط نزول آب کانال مشهودتر از شرایط صعود آب زیرزمینی می‌باشد.

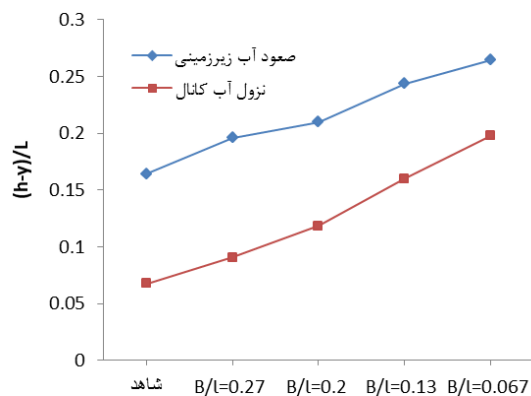
جوشش در آن‌ها در شرایط صعود سطح آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال اتفاق افتاده، ارائه شده است. در



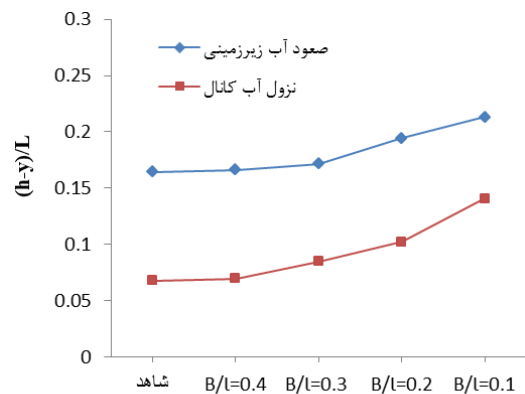
شکل ۱۰- تغییرات گرادیان جریان خروجی به ازای عمق نسبی آب کانال و فاصله نسبی صفحه‌های مشبک (B/l) در شرایط صعود سطح ایستابی.

و نزول آب کانال، مقدار گرادیان وقوع جوشش افزایش یافته است. مطابق شکل ۱۲- الف (صفحه‌ها با طول ۱۰ سانتی‌متر)، در حالت صعود آب زیرزمینی، مقدار گرادیان وقوع جوشش در بهترین عملکرد صفحه‌های مشبک (فاصله نسبی (B/l) برابر ۰/۱) نسبت به شاهد، در حدود ۲۹/۸ درصد افزایش یافته است. در شرایط نزول آب کانال نیز مقدار گرادیان وقوع جوشش در صفحه‌ها با فاصله نسبی برابر ۰/۱ نسبت به مدل شاهد، در حدود ۱۰۸/۹ برابر افزایش یافته است.

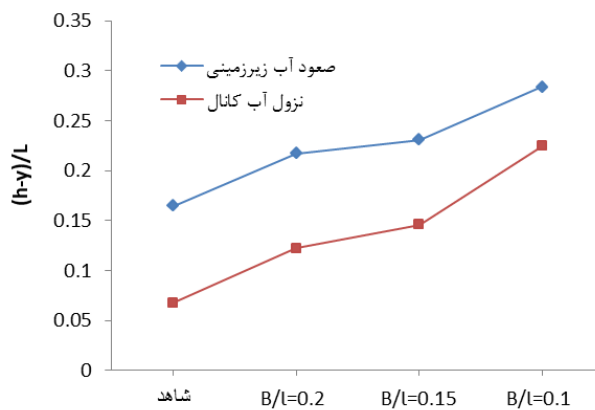
مقدار گرادیان وقوع جوشش در شرایط نزول آب کانال به‌طور متوسط ۹۵/۶ درصد کمتر از مقدار گرادیان در حالت صعود آب زیرزمینی است. کمتر بودن گرادیان وقوع جوشش در حالت نزول آب کانال ناشی از اشباع بودن ترازهای بالایی خاک و در نتیجه تأثیر توأمان فشار آب منفذی و ایستابی در وقوع پدیده جوشش است (چن و هانگ ۲۰۱۱). مطابق شکل ۱۲- ب (صفحه‌ها با طول ۱۵ سانتی‌متر)، در حالت صعود آب زیرزمینی، مقدار گرادیان وقوع جوشش در صفحه‌ها با فاصله نسبی برابر ۰/۰۶۷ نسبت به نمونه شاهد به‌طور متوسط ۶۱ درصد افزایش یافت. این در حالی است که



ب: صفحه‌ها با طول ۱۵ سانتی‌متر



الف: صفحه‌ها با طول ۱۰ سانتی‌متر



ج: صفحه‌ها با طول ۲۰ سانتی‌متر

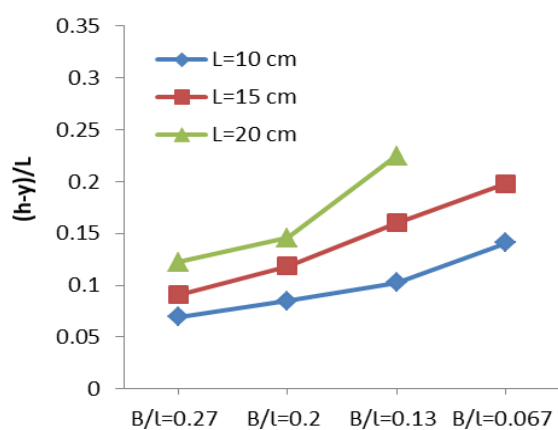
شکل ۱۲- تغییرات گرادیان وقوع جوشش در نمونه‌های آزمایش به ازای شرایط صعود آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال.

متری رسیده است. این مسئله، یعنی افزایش دو برابری شدت تغییرات گرادیان جریان خروجی، ناشی از تأثیر هم‌زمان افزایش طول و کاهش فاصله صفحه‌ها می‌باشد. در شرایط نزول آب کانال (شکل ۱۳- ب)، مقدار گرادیان جریان خروجی در صفحه‌ها با طول ۲۰ سانتی‌متر نسبت به صفحه‌های ۱۵ سانتی‌متری، در حدود ۳۲/۵ درصد افزایش یافته است. در صفحه‌ها با طول ۱۵ سانتی‌متر نیز نسبت به صفحه‌های ۱۰ سانتی-متری، در حدود ۴۲ درصد افزایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این شرایط، با افزایش طول صفحه‌ها، شدت تغییرات گرادیان جریان خروجی نیز افزایش یافته است و تقریباً از مقدار ۰/۰۲۳ در صفحه-های ۱۰ سانتی‌متری به مقدار ۰/۰۵۱ در صفحه‌های ۲۰ سانتی‌متری رسیده است. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره

تأثیر طول صفحه‌های مشبک

در شکل ۱۳ تغییرات گرادیان وقوع جوشش صفحه‌های مشبک با طول‌ها و فواصل مختلف به ازای شرایط صعود سطح آب زیرزمینی و نزول آب کانال ارائه شده است. در شرایط صعود آب زیرزمینی (شکل ۱۳- الف)، مقدار گرادیان وقوع جوشش در صفحه‌ها با طول ۲۰ سانتی‌متر نسبت به صفحه‌های ۱۵ سانتی‌متری در حدود ۱۲/۵ درصد افزایش یافته است. همچنین در صفحه‌ها با طول ۱۵ سانتی‌متر نسبت به صفحه‌های ۱۰ سانتی‌متری، در حدود ۲۲/۵ درصد افزایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش طول صفحه‌ها، شدت تغییرات گرادیان جریان خروجی نیز افزایش یافته است و از مقدار ۰/۰۱۶ در صفحه‌های ۱۰ سانتی‌متری به مقدار ۰/۰۳۳ در صفحه‌های ۲۰ سانتی-

می‌گردد. آیین (۲۰۱۵) با بررسی فواصل و طول‌های مختلف صفحه‌های ژئوگرید در بدنه سد خاکی نتیجه گرفت که با کاهش فاصله و افزایش طول صفحه‌ها، ضریب ایمنی سد و زاویه پایداری شیروانی افزایش می‌یابد.

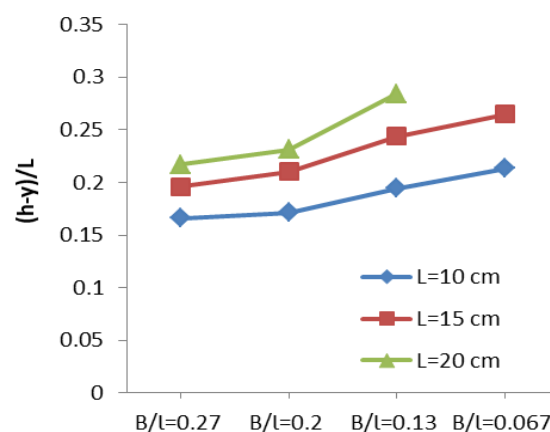


نمونه‌ها

ب- شرایط نزول سطح آب کانال

شکل ۱۳- تغییرات گرادیان وقوع جوشش صفحه‌های مشبک با طول‌ها و فواصل در شرایط مورد بررسی.

شد، مسطح کردن خاک با صفحه‌های ژئوگرید باعث درگیری ذرات خاک با این صفحه‌ها شده و در نتیجه مقاومت برشی خاک افزایش می‌یابد. افزایش طول صفحه‌های ژئوگرید نیز موجب بیشتر شدن سطح درگیری ذرات خاک و در نتیجه افزایش پایداری خاک



نمونه‌ها

الف- شرایط صعود سطح آب زیرزمینی

شکل ۱۳- تغییرات گرادیان وقوع جوشش صفحه‌های مشبک با طول‌ها و فواصل در شرایط مورد بررسی.

کانال، به دلیل اشباع بودن بدنه‌ی کانال در تراز بالاتر، تأثیر توام فشار آب منفذی و ایستایی باعث وقوع جوشش در سطح شیب‌دار ساحل یا رودخانه می‌شود. در شرایط صعود سطح آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال، با افزایش طول صفحه‌های مشبک، مقدار تغییرات گرادیان جریان خروجی افزایش یافت. همچنین با کاهش فاصله صفحه‌های مشبک، مقدار گرادیان وقوع جوشش افزایش یافت که نشان دهنده تأثیر مثبت صفحه‌های ژئوگرید بر مقدار گرادیان جریان بود. برابر نتایج این تحقیق می‌توان گفت، عملکرد صفحه‌های ژئوگرید در کنترل پدیده جوشش در شرایط نزول سطح آب کانال کمتر از عملکرد آن در حالت صعود سطح آب زیرزمینی است. البته در شرایط نزول سطح آب کانال، عملکرد صفحه‌های مشبک در کنترل پدیده جوشش در عمق‌های پایین آب زیرزمینی مناسب بود.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق تأثیر صفحه‌های ژئوگرید با طول‌ها و فواصل مختلف بر کنترل پدیده جوشش شیروانی خاکی در شرایط صعود آب زیرزمینی و نزول آب کانال به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان دادند که در تمامی صفحه‌ها با فواصل مختلف، تعداد عدم وقوع جوشش‌ها در شرایط نزول سطح آب کانال نسبت به حالت صعود سطح آب زیرزمینی کمتر شد که ناشی از تأثیر توامان فشار آب منفذی و فشار ایستایی لایه‌های اشباع بالای خاک بود. در شرایط صعود آب زیرزمینی، وضعیت بحرانی در عمق‌های پایین سطح آب کانال مشاهده شد؛ یعنی در شرایط تغذیه آب زیرزمینی، بدترین وضعیت به لحاظ وقوع جوشش زمانی اتفاق می‌افتد که سطح آب کانال پایین‌تر از حد نرمال باشد. در شرایط نزول آب کانال، حالت بحرانی زمانی اتفاق می‌افتد که سطح آب زیرزمینی منطقه بالا (در عمق‌های بالای آب زیرزمینی) باشد و با فروکش کردن سطح آب

منابع مورد استفاده

- Aein N, 2015. Evaluating the behavior of geogrid-reinforced earth dams under static and dynamic loads. *European Online Journal of Natural and Social Sciences* 3(3): 867-884.
- Anon M, 1973. *Design of Small Dams*. Oxford and IBH Publishing Co. PVT. LTD. India.
- Asadi M, Rasouli A and Garousi S, 2008. Investigating various methods of implementation of reinforced soil and introducing its applications. Pp.1-10. *Proceedings of the Iranian Rehabilitation National Conference*. August 26-27, Yazd, Iran.
- Behrouzinia S, Ahmadi H and Abbasi N, 2015. Dynamic properties of seepage and stability on upstream slope of an unsaturated homogeneous earth dam subjected to rapid drawdown. *Journal of Agricultural Engineering Research* 16(1): 19-36.
- Berilgen MM, 2006. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Computers and Geotechnics* 34(2): 81-91.
- Chen X and Huang J, 2011. Stability analysis of bank slope under conditions of reservoir impounding and rapid drawdown. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 3: 429-437.
- Chu-Agor M, Fox GA, Cancienne RM and Wilson GV, 2008. Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes. *Journal of Hydrology* 359: 247-259.
- Dashti Naserabadi h, Azami H and Rouhi J, 2013. Comparison of soil reinforcement methods and evaluation the optimum depth of reinforcement materials: case study, Mazandaran province. Pp.1-7. *Proceedings of the Seventh International Congress on Civil Engineering*. May 7-8, Zahedan, Iran.
- Fredlund DG and Rehardjo H, 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, Inc. New York. 45-46.
- Gopinathan M, 1996. An expert system for riverbank protection. M.S. Thesis, University of Louisville, Kentucky.
- Jamei, M, Alipour R, hajishah M and Bina M, 2010. Controlling asymmetric settlement in hydraulic structures using soil reinforcement with geosynthetic materials. Pp.1-11. *Proceedings of the Second Geotechnical Issues of Irrigation and Drainage Networks*. May 13, Karaj, Iran.
- Olaniyan OS and Akolade AS, 2012. Reinforcement of subgrade soils with the use of geogrids. *International Journal of Science and Research (IJSR)* 3(6): 2579-2584.
- Oulapour M, Nourzaii J and Paknejad K, 2008. Slope stability analysis by finite element method. Pp.1-8. *Proceedings of the Seventh International Congress on Civil Engineering*. May 7-9, Teharn, Iran.
- Pakbaz MS, Mehdizadeh M, Vafaiean M and Bagherinia K, 2009. Numerical prediction of subway induced vibrations: Case study in Iran - Ahwaz City. *Journal of Applied Sciences* 9(11): 2001-2015.
- Sadr Arhami H and Mahdizadeh R, 2014. Investigating the use of fibers in clay soils reinforcement. Pp.1-13. *Proceedings of the First National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development of Iran*. January 1, Tehran, Iran.
- Schnellmann RM, Busslinger H, Schneider R and Rahardjo H, 2010. Effect of rising water table in an unsaturated slope. *Engineering Geology* 114(1-2): 71-83.
- Salahudeen AB and Sadeeq JA, 2016. Numerical modeling of soil reinforcement using geogrids. Pp. 345-358. *Proceedings of the Fourth International Conference on Engineering and Technology Research* February 23 - 25, ISBN: 978-2902-58-6 Volume 4.
- Srivastava A and Sivakumar Babu GL, 2011. Remediation of upstream slope of an impounding reservoir using soil reinforcing technique. Pp.1-4. *Proceedings of Indian Geotechnical Conference*. December 15-17, Kochi, India.
- Thakare SW and Wath RB, 2014. Performance of geotextile reinforced slopes of earthen dam. *International Journal of Engineering Science Invention* 3(7): 18-22.
- Tran TX, 2004. Stability problems of an earth fill dam in rapid drawdown condition. Doctoral dissertation Slovak University of Technology, Bratislava, Slovak Republic.
- Varjavand P, Pour Eskandar S, Farsadizadeh D and Masoudi A, 2014. Physical and Numerical Simulation of Cut-off Effect on Seepage through Layering Foundation. *Iranian Water Researches Journal* 8(14): 65-75.