



کاربرد آهک و نانو آهک در کنترل گسیختگی شیب جانبی کانال های خاکی

سعید نجار زاده، روزبه موذن زاده^{*}، سید حسین حسینی، خلیل ازدری

دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۱۵
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۱/۱۰

کلمات کلیدی:

آهک و نانو آهک
تغذیه و تخلیه
دبی نشت
شیب جانبی کانال خاکی
گسیختگی

خلاصه: ناپایداری شیب های خاکی در کانال های رو باز همواره مورد توجه مهندسين هیدرولیک قرار داشته است. در این تحقیق کاربرد آهک و نانو آهک در کنترل گسیختگی شیب جانبی کانال خاکی به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد، پوشش ۲۰٪ آهک و ۵٪ نانو آهک زاویه اصطکاک داخلی را به ترتیب ۳۱/۸٪ و ۳۵/۵٪ افزایش داد و چسبندگی در حدود ۳/۳ کیلو پاسکال به دست آمد. در حالت تغذیه کانال، برای زاویای ۲۶/۵، ۳۳، ۴۵ و ۵۳ درجه به ازای حداقل تراز آب زیرزمینی به ترتیب گسیختگی در تراز آب ۴۶۰، ۵۶۰، ۴۶۰ و ۴۱۰ میلی متر در داخل کانال اتفاق افتاد. در حالت تخلیه، شیب ۲۶/۵ درجه پایدار بود و برای دو شیب ۳۳ درجه و ۴۵ درجه به ازای تراز ۵۱۰ میلی متر ناپایدار شدند. دو شیب ۴۵ درجه با پوشش ۱۰٪ آهک و شیب ۵۳ درجه با پوشش ۲۰٪ آهک، به ازای تراز حداکثر ۶۶۰ میلی متر پایدار بودند. تغییرات پتانسیل در قسمت پشت شیب در برابر درصد آهک، روندی منحنی شکل داشت. به ازای یک تراز سطح آب ثابت، پوشش شیب جانبی با آهک و نانو آهک، دبی نشت را کاهش داد. همچنین کاربرد آهک و نانو آهک شکل ناحیه گسیختگی شیب را تغییر و استفاده از نانو آهک نیز اندازه و تعداد ترک ها را کاهش داد. در حالت تغذیه و بدون پوشش آهک، سطح گسیختگی منحنی شکل و با پوشش آهک، ترک هایی در سطح شیب مشاهده شد.

۱-مقدمه

مبتنی بر کاهش فشار آب منفذی و افزایش مقاومت در سطح شیب- دار است، از آن جمله میتوان به احداث زهکش در قسمت خاکریز، احداث پرده آببند در داخل خاکریز و پوشش سطح شیبدار اشاره کرد. از جمله روشهای افزایش مقاومت سطح شیبدار می توان به پوشش آن با آهک هیدراته و یا نانو آهک اشاره کرد که با توجه به افزایش خاصیت چسبندگی در سطح شیبدار نقش مهمی در پایداری شیبهای خاکی دارد. اهمیت پایداری شیبهای خاکی سبب شده محققین توجه ویژه ای با آن داشته باشند. دریایی و کاشفیور [۱] تاثیر افزایش ماسه بادی و آهک را بر روی خصوصیات مقاومتی خاکهای رس مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که افزایش ماسه بادی به تنهایی تاثیر اندکی در خصوصیات مقاومتی خاک دارد. اما ماکزیمم

یکی از عوامل موثر در ناپایداری خاکریزهای شیبدار نیروی برشی بوده که توسط تنش موثر کنترل میشود. تنش موثر به صورت تفاضل تنش کل و فشار آب منفذی تعریف میشود. صعود سطح آب، افزایش فشار آب منفذی را به همراه دارد و موجب کاهش تنش موثر و متعاقب آن سبب کاهش پایداری شیب خاکریزها میگردد. بنابراین فشار آب منفذی نقش حیاتی در پایداری شیبهای خاکی دارد. بررسی واکنش فشار آب منفذی نسبت به تغییرات سطح ایستابی به منظور جلوگیری از تخریب شیب خاکریزها بسیار مهم است. روشهای مختلفی به منظور پایداری شیبهای خاکی وجود دارد که اساس آنها

^{*} نویسنده عهده دار مکاتبات: moazenzadeh.r@gmail.com

مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک در نسبت اختلاط ۷ درصد آهک و ۱۰ درصد ماسه بادی حاصل شد. اثر پوشش خاک آهکی در کاهش نشت از استخر کشاورزی در اکوسیستم اراضی خشک توسط جت و همکاران [۲] بررسی شد. نتایج آنها نشان داد که پوشش خاک آهکی تکنیکی اقتصادی برای کاهش نشت از استخرها میباشد. شِن و همکاران [۳] در پژوهشی از نانو آهک هیدراته با میانگین اندازه ذرات ۶۶۰ نانومتر استفاده کردند که باعث افزایش ۱۵ درصدی مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط آسفالتی و افزایش ۸ درصدی نسبت مقاومت کششی نمونهها شد. در مطالعه‌های تاثیر زهکشهای افقی بر پایداری شیروانی بالادست سدهای خاکی در حین تخلیه مخزن توسط زمردیان و عبدالله زاده [۴] بررسی شده است. نتایج آنها نشان داد، اگر چه وجود زهکش دبی خروجی را افزایش میدهد اما در شیروانی بالادست باعث استهلاک فشار آب حفرهای اضافی ناشی از تخلیه مخزن و بهبود پایداری میگردد. امام و همکاران [۵] ناپایداری شیبه‌های ماسه‌های غیرمتراکم را در اثر بالا آمدن سطح آب و افزایش فشار آب حفرهای با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که چگالی اولیه، نحوه ورود آب به خاکریز و توزیع فشار آب حفرهای بر نحوه گسیختگی موثرند. عباسی و همکاران [۶] ترکیب آهک و پوزولان را در برای تثبیت خاکهای ماسه‌های سیلتی در شبکه‌های آبیاری و زهکشی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که افزودن آهک و پوزولان سبب افزایش رطوبت بهینه و افزایش وزن مخصوص خشک میشود. همچنین مقاومت فشاری خاک افزایش نشان داد به طوری که کاربرد توام آهک و پوزولان سبب افزایش ۱۶ برابری مقاومت فشاری شد. نیتو و رمیا [۷] خواص ژئوتکنیکی دو نوع خاک لاتریت (خاکهایی که تحت هوازدگی شدید و در مناطق گرم و مرطوب به وجود می‌آیند) (CH) و رس کائولینیت (CL) در ترکیب با نسبت‌های مختلف نانو رس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد، افزودن نانو رس مقاومت فشاری دو نوع خاک را در حدود ۱۰۴٪ و ۸۷٪ افزایش می‌دهد. همچنین هدایت هیدرولیکی دو نوع خاک را به ترتیب در حدود ۹۹٪ و ۹۶٪ کاهش داد. قره تپه و همکاران [۸] بیان داشتند که تغییرات سطح آب داخل کانال باعث نوسان فشار آب حفرهای در خاکریز میشود که این امر خود موجب تغییرات مقادیر ضریب اطمینان شیروانی در طول سال میگردد. نتایج آنها نشان داد که نقش زهکش افقی در پایداری شیب شیروانی چشمگیر است.

ورجاوند و همکاران [۹] در پژوهشی با استفاده از مدل عددی و فیزیکی، پایداری شیب جانبی کانال خاکی با دو شیب بدنه مختلف را در حضور سطح ایستایی بررسی کردند. نزول سطح آب در کانال یا صعود سطح ایستایی باعث تغییر در رژیم رطوبتی خاک اطراف کانال شده و شیبه‌های بدنه کانال را تخریب میکند. ایشان نصب پرده آببند را به عنوان روشی کنترلی تحلیل کردند. نتایج نشان داد که سطح نشت و فشار پیرومتریک 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 شیبه‌های ملایم تر نفوذ آن تا تراز کف کانال کافی است. عابدیکویایی و همکاران [۱۰] دوام و پایداری خاکهای رسی تثبیت شده با آهک هیدراته در مجاورت سازه‌های آبی را با افزودن درصدهای مختلف آهک هیدراته در دو حالت رطوبت بهینه و اشباع مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که با افزودن ۵ درصد آهک هیدراته به خاک رسی بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده خاک در دو حالت رطوبت بهینه و رطوبت اشباع حاصل میشود. عبدی و همکاران [۱۱] در مطالعه ای تثبیت خاک با آهک و تسلیح با ژئوگرید را به صورت همزمان مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد افزودن حداقل ۳ درصد آهک مقاومت فشاری خاک را افزایش میدهد. همچنین اضافه نمودن یک یا دو لایه ژئوگرید تاثیر معنیداری روی مقاومت فشاری نداشته و نمونه‌های مسلح و غیرمسلح مقاومتهای یکسانی در زمان شکست از خود نشان دادند. بهاری و همکاران [۱۲] در پژوهشی درصدهای مختلف وزنی نانو رس، سیمان و آهک را در کاهش هدایت هیدرولیکی خاک آبنندان مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که بیشترین میزان کاهش نشت مربوط به خاک با ۵٪ نانو رس بود. همچنین اضافه کردن ۵٪ نانو رس هدایت هیدرولیکی خاک را به میزان قابل توجهی کاهش داد. محمدیون و همکاران [۱۳] کارایی صفحه‌های ژئوگرید را در کنترل پایداری شیروانی خاکی تحت شرایط صعود آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که این صفحات کارایی خوبی در هر دو شرایط ذکر شده در کنترل گرادیان جوشش دارند. رحیمی و بیات [۱۴] رفتار برشی خاک ماسه‌های تثبیت شده با آهک را در محیط‌های اسیدی بررسی کردند. طبق نتایج آنها، افزایش آهک سبب افزایش رطوبت بهینه و دانسیته خشک شد در نمونه‌های تثبیت شده با آهک، افزایش pH کمترین

به کمک رابطه ۲ محاسبه میشود:

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

که در آن u_w 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 مطابق رابطه ۳ است:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) + q = m_2^w \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (3)$$

در این رابطه m_2^w ضریب تغییر حجم آب با توجه به تغییر در مکش و t زمان است. این معادله بیانگر آن است که مجموع تغییرات سرعت جریان در جهت x و y به اضافی دبی جریان اضافی q با تغییر حجمی آب نسبت به زمان برابر است [۱۶]. در این تحقیق شرایط جریان ماندگار و بدون دبی جریان اضافی در نظر گرفته شد.

۲-۲- مدل فیزیکی

آزمایشهای این پژوهش در آزمایشگاه هیدرولیک گروه مهندسی آب دانشگاه صنعتی شاهرود بر روی تانک نشت و زهکش انجام شد. این مدل شامل یک محفظه از جنس پلکسی گلاس به طول ۱۸۵، عرض ۵۵ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر است. آب مورد استفاده در آزمایش-

تأثیر را بر روی مقاومت فشاری داشت. همچنین با افزایش مدت زمان عملآوری، مقاومت فشاری افزایش نشان داد. همانطور که مشخص است مطالعات موجود بیشتر در مورد خاک رسی و تثبیت آنها با آهک و یا استفاده از نانو رس بوده و مطالعاتی در مورد خاکهای ماسهای خالص و کاربرد آهک و نانو آهک برای بررسی پارامترهای مقاومت برشی و کنترل گسیختگی در آنها انجام نشده است. بنابراین در این تحقیق هدف بررسی نقش آهک هیدراته و نانو آهک در کنترل پایداری شیب جانبی کانال خاکی در دو حالت تغذیه کانال و تخلیه آن است. همچنین عملکرد آهک هیدراته و نانو آهک بر دبی نشت و پتانسیل ارزیابی گردید.

۲-مواد و روشها

۲-۱-معادلات حاکم

جریان آب در خاکهای اشباع و غیراشباع را میتوان با معادله دارسی بررسی کرد [۱۵]. طبق قانون دارسی سرعت جریان عبوری از یک توده خاک متناسب با گرادیان هیدرولیکی بوده که میتوان آن را به صورت رابطه ۱ بیان کرد:

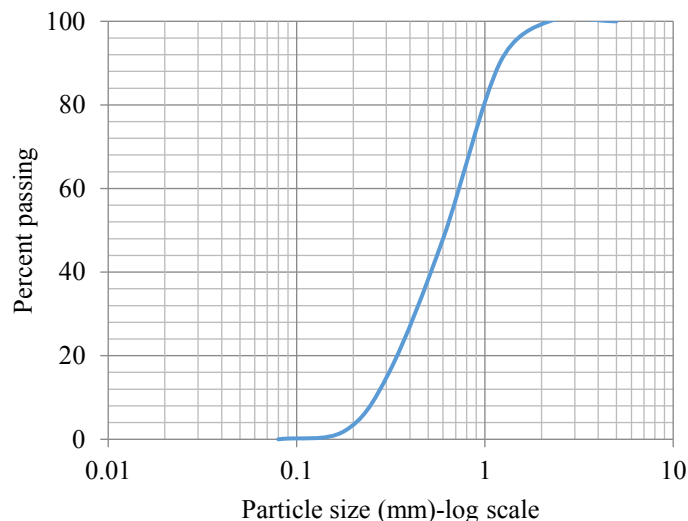
$$V_w = -k \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن V_w سرعت جریان آب، k ضریب نفوذپذیری و $\frac{\partial h_w}{\partial y}$ گرادیان هیدرولیکی در جهت y است. تراز هیدرولیکی کل h_w نیز



شکل ۱. مدل تانک نشت و زهکش

Fig. 1. Seepage and drainage tank model



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها

Fig. 2. Soil grading curve used in the experiments

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه

Table 1. Physical soil properties used in the present study

چسبندگی $C(kg/cm^2)$	ضریب نفوذ پذیری $K(m/s)$	ضریب یکنواختی C_u	ضریب دانه بندی C_c	قطر متوسط ذرات $D_{50}(mm)$
۰	۰/۰۰۰۵۵۱	۴/۶۶۷	۱	۰/۶۵

و برش مستقیم تعیین شدند. شکل ۲ منحنی دانه‌بندی خاک مورد استفاده را نشان می‌دهد.

با توجه به منحنی دانه‌بندی و اینکه مقدار رس خاک مورد استفاده در این پژوهش کم بود، خاک را میتوان ماسه خالص در نظر گرفت. انتخاب ماسه به این دلیل بود که بدترین شرایط به لحاظ پایداری مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به نوع خاک برای تراکم بهتر، ابتدا تمام مدل اشباع شده، سپس آب مدل تخلیه گردید و در نهایت عملیات تراکم با استفاده از چکش انجام شد. پارامترهای مقاومت برشی خاک نیز با استفاده از آزمایش برش مستقیم تعیین شده است. جدول ۱ مشخصات فیزیکی خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه بافت خاک ماسه‌ای و ضریب یکنواختی آن ($C_u=4.667$) کوچکتر از ۶ بود، بنابراین بر اساس سیستم طبقه‌بندی یونیفاید گروه خاک SP است.

در آزمایشها از آهک هیدراته شاهوار نوع ۱ استفاده شد (جدول

ها به وسیله یک پمپ با قدرت ۱/۵ کیلو وات از یک مخزن با حجم مفید ۱۵۰ لیتر که در زیر این دستگاه تعبیه شده بود تأمین گردید. کنترل عمق آب در دو طرف مدل خاک به وسیله دو لوله قائم از جنس PVC که ارتفاع آنها قابل تغییر است انجام شده و آب زهکشی شده دوباره به مخزن زیرین تخلیه میشود. در یک طرف مخزن پلکسی گلاس سوراخهای وجود داشت که پیزومترها به آنها متصل بود و لوله های پیزومتری از سمت دیگر به تابلوی قرائت متصل است. شکل ۱ نمایی از مدل تانک نشت و زهکش و تابلوی قرائت را نشان می‌دهد.

۳-۲-آزمایشهای مقدماتی

برای انجام آزمایشهای اصلی نیاز به تعیین پارامترهای خاک مانند جرم مخصوص، قطر متوسط ذرات، هدایت هیدرولیکی (K)، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک است که با انجام آزمایشهای جرم مخصوص (روش مستقیم)، دانه‌بندی (استاندارد US)، بار ثابت

جدول ۳. ویژگی‌های نانو آهک تهیه شده

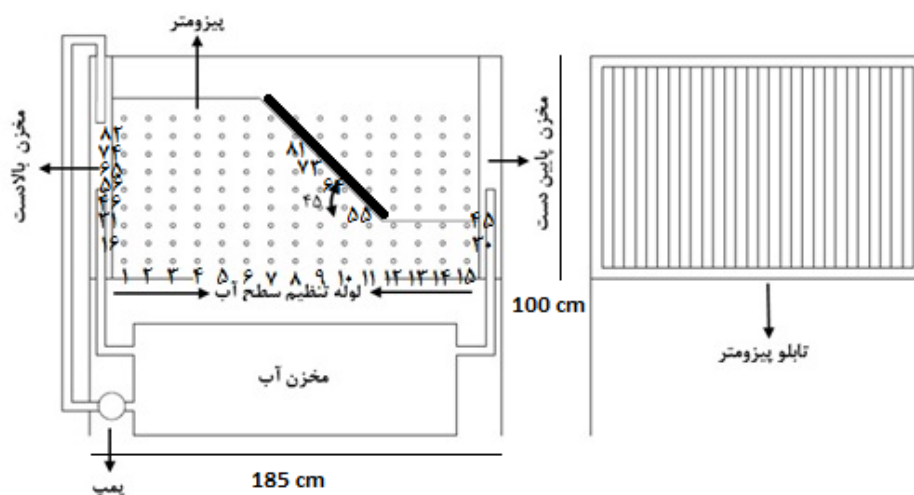
Table 3. Properties of prepared Nano-lime

مقادیر	مشخصات نانو آهک
۴۷۰	اندازه ذرات (nm)
۲/۹۳	چگالی (gr/cm^3)
۸۲۵	دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$)

جدول ۲. ویژگی‌های آهک هیدراته مورد استفاده

Table 2. Properties of hydrated lime used in the present study

مقادیر	مشخصات آهک هیدراته
۷۶۰	اندازه ذرات (nm)
۲/۲	چگالی (gr/cm^3)
۱۲/۵	pH
۵۸۰	دمای ذوب ($^{\circ}\text{C}$)



شکل ۳. طرح شماتیک مدل آزمایشگاهی

Fig. 3. Schematic design of experimental model

نشت از کانال به صورت متقارن نسبت به محور مرکزی آن انجام میشود. در نتیجه در این پژوهش نصف مقطع عرضی کانال مدل شده است. پیزومترها به ترتیب از سمت چپ و پایین نام گذاری شدند (شکل ۳).

در شروع آزمایشها ابتدا تراز آب در داخل کانال و قسمت خاکریز آن با استفاده از لوله‌های تنظیم سطح آب در تراز مورد نظر تنظیم شد. سپس عملیات هواگیری پیزومترها انجام گردید. در مرحله بعد دبی خروجی از مدل با استفاده از استوانه مدرج اندازه‌گیری شد تا از شرایط جریان ماندگار در مدل اطمینان حاصل شود. پس از برقراری شرایط ماندگار، قرائت پیزومترها انجام شد. در حین انجام آزمایشها نیز سطح شیبدار داخل کانال به لحاظ وقوع گسیختگی مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایشها با پوشش، به منظور پوشش دار کردن سطح شیب نیز بعد از مخلوط کردن آهک یا نانو آهک با خاک مطابق درصد مورد نظر، لایه‌های به ضخامت ۱ سانتی‌متر در روی سطح شیبدار اجرا

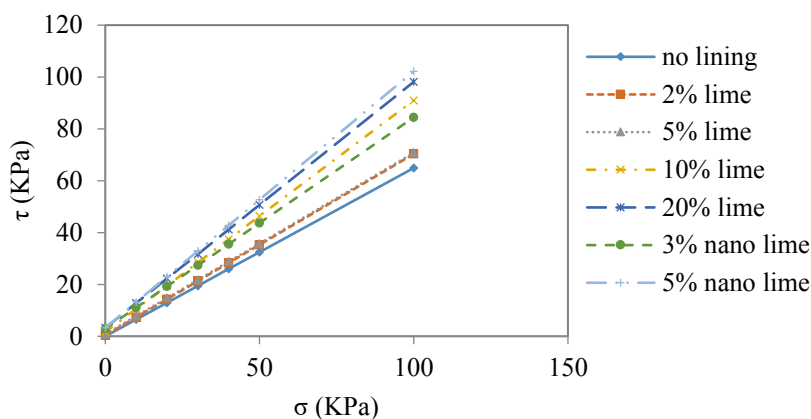
۲). برای ساخت نانو آهک نیز از آسیاب گلوله‌های سیاره‌ای استفاده شد. برای این منظور آهک با درصدهای مختلفی از الکل مخلوط و با نسبت گلوله به پودر ۱:۱۰ درون مخزن دستگاه ریخته شد. سرعت چرخش ۴۰۰ دور در دقیقه تنظیم گردید. پس از حدود یک ساعت نانو آهک هیدراته به دست آمد (جدول ۳). همچنین مدت زمان عمل-آوری برای تمام نمونهها یکسان و با توجه به نوع خاک (ماسه خالص) برابر ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد.

۲-۴-آزمایشهای اصلی

آزمایشات اصلی به سه دسته مدل‌های بدون پوشش، مدل‌های با پوشش آهک هیدراته و مدل‌های با پوشش نانو آهک تقسیم شد. در ابتدا یک لایه خاک رس به ضخامت ۵ سانتی‌متر به عنوان لایه غیرقابل نفوذ و جهت جلوگیری از فرار آب، در مرز بین خاک و کف مدل ایجاد شد. با توجه به ثابت در نظر گرفتن تراز سطح آب در دو طرف مدل،

جدول ۴. پارامترهای مورد بررسی در آزمایشها
Table 4. Parameters studied in experiments

توضیحات	پارامتر
ماسه ($D_{50} = 0.65mm$)	خاک
تغذیه (جریان از سمت خاکریز به کانال)، تخلیه (جریان از کانال به سمت خاکریز)	حالت جریان
۲۶/۵، ۳۳، ۴۵، ۵۳	زاویه شیب جانبی کانال خاکی (درجه)
۲۰، ۱۰، ۵	درصد آهک هیدراته
۳، ۵	درصد نانو آهک



شکل ۴. پوش گسیختگی ترسیم شده برای پوششهای مختلف
Fig. 4. Failure envelope drawn for different covers

۳/۳٪ درجه افزایش یافت. همچنین مقدار چسبندگی از صفر به ۳/۳ کیلو پاسکال رسید. برای نانو آهک نیز به ازای ۵٪ وزنی نانو آهک زاویه اصطکاک داخلی به ۴۴/۷ افزایش یافت که نسبت به حالت بدون پوشش در حدود ۳۵/۵٪ افزایش داشت. در این حالت مقدار چسبندگی نیز ۳/۳ کیلو پاسکال به دست آمد. در واقع با اضافه شدن کربنات کلسیم چه در ابعاد معمولی و چه در ابعاد نانو به خاک، یونهای Ca^{++} و OH^{-} تجزیه شده، ژل‌های سیمانی سیلیکات هیدراته شده را به وجود می‌آورند. این ژل‌های سیمان گونه به داخل منافذ خاک نفوذ کرده و چسبندگی بین ذرات را افزایش می‌دهند. همچنین وجود ذرات بسیار ریز نانو آهک سبب افزایش pH خاک

گردید (شکل ۳). جدول ۴ پارامترهای مورد بررسی در آزمایشها را نشان میدهد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- پارامترهای مقاومت برشی خاک

مقاومت برشی یکی از پارامترهای مهم در پایداری شیبهای خاکی است. به منظور ارزیابی خاک در این زمینه پارامترهای مقاومت برشی (c, ϕ) برای مدل‌های مختلف با انجام آزمایش برش مستقیم تعیین شده، در جدول ۵ ارائه شده است. همانطور که مشخص است با افزایش درصد آهک هیدراته مقدار زاویه اصطکاک داخلی در حدود

جدول ۵. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی پوششهای مختلف
Table 5. Values of internal friction angle and cohesion for different covers

چسبندگی $c(kPa)$	زاویه اصطکاک داخلی φ (درجه)	نوع پوشش
۰	۳۳	بدون پوشش
۰/۳۳	۳۵	پوشش ۲٪ آهک هیدراته
۰/۸۲۵	۳۵	پوشش ۵٪ آهک هیدراته
۱/۶۵	۴۱/۸	پوشش ۱۰٪ آهک هیدراته
۳/۳	۴۳/۵	پوشش ۲۰٪ آهک هیدراته
۲/۹	۳۹/۲	پوشش ۳٪ نانو آهک هیدراته
۳/۳	۴۴/۷	پوشش ۵٪ نانو آهک هیدراته

برشی مربوط به پوشش ۵٪ نانو آهک میباشد.

نتایج مربوط به حالت تغذیه کانال برای شیبهای مختلف نشان داد که با افزایش زاویه شیب با راستای افق، گسیختگی به ازای تراز آب کمتر در داخل کانال اتفاق افتاد. به طوری که برای زاویای ۲۶/۵، ۳۳، ۴۵ و ۵۳ درجه، به ازای حداقل تراز آب زیرزمینی به ترتیب گسیختگی در تراز آب ۴۶۰، ۴۶۰، ۵۶۰ و ۴۱۰ میلی‌متر در داخل کانال اتفاق افتاد. برای دو شیب تندتر (۴۵ و ۵۳ درجه)، درصدهای مختلف آهک در پوشش شیب، به منظور کنترل گسیختگی استفاده شد. در شیب ۴۵ درجه مقادیر ۲٪ و ۵٪ آهک تاثیری در کنترل گسیختگی نداشت اما برای ۱۰٪ آهک تراز آب تا ۵۶۰ میلی‌متر افزایش (در حدود ۲۲٪) یافت. برای شیب ۵۳ درجه نیز مقادیر ۵٪ و ۱۰٪ تاثیری در کنترل گسیختگی نداشت اما برای پوشش ۲۰٪ آهک تراز گسیختگی تا ۵۱۰ میلی‌متر (در حدود ۲۵٪) افزایش یافت. با توجه به بهبود پارامترهای مقاومت برشی خاک در اثر افزودن آهک به خاک، توان خاک در تحمل تنشهای مختلف افزایش یافته، نتیجه آن به تاخیر افتادن وقوع گسیختگی خواهد بود. همچنین مقادیر ۳٪ و ۵٪ نانو آهک مورد بررسی قرار گرفت که مقدار ۵٪ نانو آهک عملکردی مشابه ۲۰٪ آهک از خود نشان داد (جدول ۶). افزودن آهک و نانو آهک سبب افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک میشود. در واقع واکنشهای سیمانی شدن و پوزولانی، در اثر وجود کربنات

شده، سرعت واکنشهای پوزولانی را زیادتر می‌شود، به همین دلیل تاثیر نانو آهک در افزایش مقاومت برشی بیشتر از افزودن آهک است [۱۷]. مقایسه مقادیر پارامترهای مقاومت برشی نیز این نکته را نشان می‌دهد که در افزایش مقاومت برشی، تاثیر چسبندگی بیشتر از زاویه اصطکاک داخلی است، همچنین تاثیر نانو آهک در این نتیجه نسبت به آهک بیشتر است. عملکرد ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته و ۵٪ وزنی آهک مشابه هم میباشد. بنابراین با توجه به گرانتز بودن نانو آهک میتوان از آن در مناطق حساس (مناطق مجاور سازه‌های آبی نظیر سرریزها، تنظیم کننده ها و شیب شکن ها و . . . در مسیر کانال-های انتقال آب) استفاده کرد و در شرایط معمول آهک را جایگزینی مناسب دانست. مقایسه اقتصادی نانوآهک و آهک نیز نتیجه فوق را تأیید میکند، به طوری که در حال حاضر هزینه تهیه ۱۰۰ گرم نانوآهک ۶۰۰۰۰۰ تومان است در حالی که هزینه تهیه ۱۰۰ گرم آهک ۴۷۰۰۰ تومان است، همانطور که مشخص است هزینه تهیه نانوآهک تقریباً ۱۳ برابر آهک است. بررسی نتایج نشان میدهد که پوششدار کردن سطح با آهک هیدراته یا نانو آهک میتواند عملکرد خوبی در افزایش مقاومت برشی خاک داشته باشد.

شکل ۴ پوش گسیختگی ترسیم شده بر اساس معیار موهر-کلمب $(\tau = c + \sigma \tan \varphi)$ برای پوششهای مختلف را نشان میدهد. همان-طور که مشخص است به ازای یک تنش قائم مشخص، بیشترین تنش

جدول ۶. مشخصات آزمایشهای مربوط به حالت تغذیه کانال برای دو زاویه شیب ۴۵ درجه و ۵۳ درجه با راستای افق

Table 6. Specifications of experiments related to feeding channel for two inclination angles of 45 ° and 53 ° with the horizon

شماره آزمایش	زاویه شیب جداره (درجه)	درصد آهک هیدراته پوشش	درصد نانو آهک هیدراته	تراز آب زیرزمینی (mm)	تراز آب کانال (mm)	تراز گسیختگی (mm)	شماره آزمایش	زاویه شیب جداره (درجه)	درصد آهک هیدراته پوشش	درصد نانو آهک هیدراته	تراز آب زیرزمینی (mm)	تراز آب کانال (mm)	تراز گسیختگی (mm)
۱	۴۵	-*		۲۶۰	۲۶۰	-	۲۲	۴۵	۱۰٪		۵۶۰	۲۶۰	۵۶۰
۲	۴۵	-		۳۱۰	۲۶۰	-	۲۳	۵۳	-		۲۶۰	۲۶۰	-
۳	۴۵	-		۳۶۰	۲۶۰	-	۲۴	۵۳	-		۳۱۰	۲۶۰	-
۴	۴۵	-		۴۱۰	۲۶۰	-	۲۵	۵۳	-		۳۶۰	۲۶۰	-
۵	۴۵	-		۴۶۰	۲۶۰	۴۶۰	۲۶	۵۳	-		۴۱۰	۲۶۰	۴۱۰
۶	۴۵	۲٪		۲۶۰	۲۶۰	-	۲۷	۵۳	۵٪		۲۶۰	۲۶۰	-
۷	۴۵	۲٪		۳۱۰	۲۶۰	-	۲۸	۵۳	۵٪		۳۱۰	۲۶۰	-
۸	۴۵	۲٪		۳۶۰	۲۶۰	-	۲۹	۵۳	۵٪		۳۶۰	۲۶۰	-
۹	۴۵	۲٪		۴۱۰	۲۶۰	-	۳۰	۵۳	۵٪		۴۱۰	۲۶۰	۴۱۰
۱۰	۴۵	۲٪		۴۶۰	۲۶۰	۴۶۰	۳۱	۵۳	۱۰٪		۲۶۰	۲۶۰	-
۱۱	۴۵	۵٪		۲۶۰	۲۶۰	-	۳۲	۵۳	۱۰٪		۳۱۰	۲۶۰	-
۱۲	۴۵	۵٪		۳۱۰	۲۶۰	-	۳۳	۵۳	۱۰٪		۳۶۰	۲۶۰	-
۱۳	۴۵	۵٪		۳۶۰	۲۶۰	-	۳۴	۵۳	۱۰٪		۴۱۰	۲۶۰	۴۱۰
۱۴	۴۵	۵٪		۴۱۰	۲۶۰	-	۳۵	۵۳	۲۰٪		۲۶۰	۲۶۰	-
۱۵	۴۵	۵٪		۴۶۰	۲۶۰	۴۶۰	۳۶	۵۳	۲۰٪		۳۱۰	۲۶۰	-
۱۶	۴۵	۱۰٪		۲۶۰	۲۶۰	-	۳۷	۵۳	۲۰٪		۳۶۰	۲۶۰	-
۱۷	۴۵	۱۰٪		۳۱۰	۲۶۰	-	۳۸	۵۳	۲۰٪		۴۱۰	۲۶۰	-
۱۸	۴۵	۱۰٪		۳۶۰	۲۶۰	-	۳۹	۵۳	۲۰٪		۴۶۰	۲۶۰	-
۱۹	۴۵	۱۰٪		۴۱۰	۲۶۰	-	۴۰	۵۳	۲۰٪		۵۱۰	۲۶۰	۵۱۰
۲۰	۴۵	۱۰٪		۴۶۰	۲۶۰	-	۴۱	۵۳	-	۳٪	۴۶۰	۲۶۰	۴۶۰
۲۱	۴۵	۱۰٪		۵۱۰	۲۶۰	-	۴۲	۵۳	-	۵٪	۵۱۰	۲۶۰	۵۱۰

*خط تیره در جدول فوق در مورد آهک هیدراته، به معنای عدم استفاده از آهک هیدراته و برای تراز گسیختگی به معنای عدم گسیختگی است.

در مناطق حساس استفاده کرد. در حالت تخلیه، در شرایط بدون پوشش تراز گسیختگی ۴۱۰ میلی‌متر بود. به دلیل اینکه تراز آب کانال بالاتر از آب زیرزمینی است، در نتیجه درجه اشباع خاک در سطح شیب نسبت به حالت تغذیه بیشتر بوده، ذرات خاک توسط میزان آب بیشتری احاطه شده‌اند،

کلسیم، سبب چسبیدن دانه‌ها به یکدیگر و تشکیل دانه‌های بزرگتر و زیرتر می‌گردد. وجود ذرات نانو آهک در فضای بین دانه‌های خاک، باعث افزایش تراکم و انتقال بهتر تنش‌های وارده شده که سختی بهتر مخلوط را به دنبال دارد [۱۷]. البته با توجه به هزینه‌های تولید نانو آهک استفاده از آن در سطح وسیع توصیه نمی‌شود اما میتوان از آن

جدول ۷. مشخصات آزمایشهای مربوط به حالت تخلیه کانال برای دو زاویه شیب ۴۵ درجه و ۵۳ درجه با راستای افق

Table 7. Specifications of experiments related to discharge/drainage channel for two inclination angles of 45 ° and 53 ° with the horizon

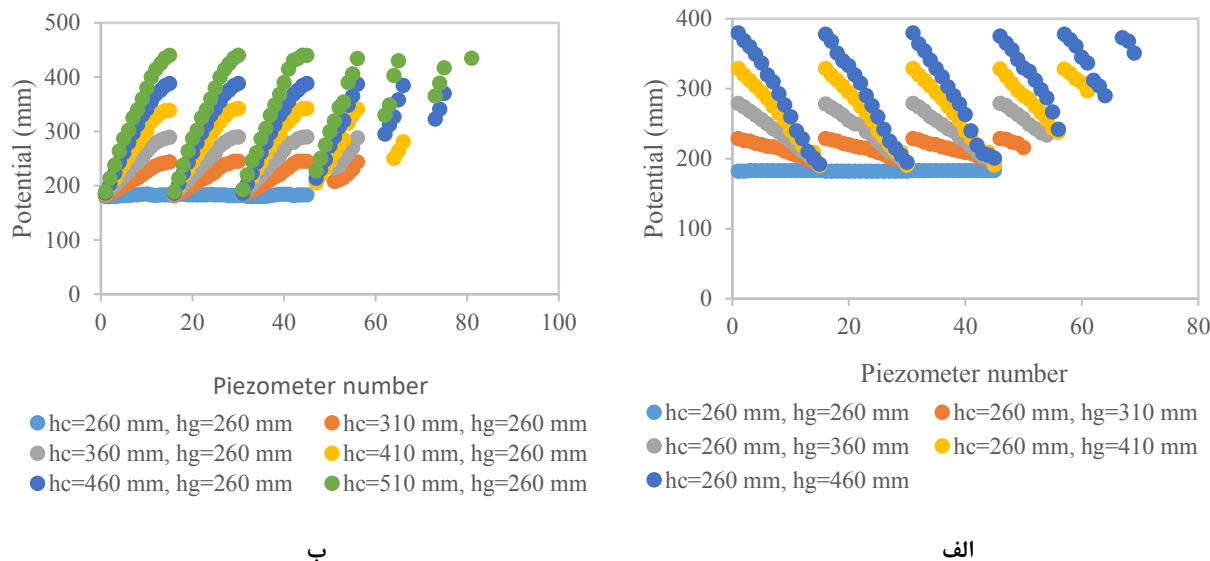
شماره آزمایش	زاویه شیب جداره (درجه)	درصد آهک هیدراته پوشش	تراز آب کانال (mm)	تراز آب زیرزمینی (mm)	تراز گسیختگی (mm)	شماره آزمایش	زاویه شیب جداره (درجه)	درصد آهک هیدراته پوشش	تراز آب کانال (mm)	تراز آب زیرزمینی (mm)	تراز گسیختگی (mm)
۱	۴۵	-*	۲۶۰	۲۶۰	-	۱۵	۴۵	۱۰٪	۶۶۰	۲۶۰	پایدار
۲	۴۵	-	۳۱۰	۲۶۰	-	۱۶	۵۳	-	۲۶۰	۲۶۰	-
۳	۴۵	-	۲۶۰	۲۶۰	-	۱۷	۵۳	-	۳۱۰	۲۶۰	-
۴	۴۵	-	۴۱۰	۲۶۰	-	۱۸	۵۳	-	۳۶۰	۲۶۰	۳۶۰
۵	۴۵	-	۴۶۰	۲۶۰	-	۱۹	۵۳	۲۰٪	۲۶۰	۲۶۰	-
۶	۴۵	-	۵۱۰	۲۶۰	۵۱۰	۲۰	۵۳	۲۰٪	۳۱۰	۲۶۰	-
۷	۴۵	۱۰٪	۲۶۰	۲۶۰	-	۲۱	۵۳	۲۰٪	۳۶۰	۲۶۰	-
۸	۴۵	۱۰٪	۳۱۰	۲۶۰	-	۲۲	۵۳	۲۰٪	۴۱۰	۲۶۰	-
۹	۴۵	۱۰٪	۳۶۰	۲۶۰	-	۲۳	۵۳	۲۰٪	۴۶۰	۲۶۰	-
۱۰	۴۵	۱۰٪	۴۱۰	۲۶۰	-	۲۴	۵۳	۲۰٪	۵۱۰	۲۶۰	-
۱۱	۴۵	۱۰٪	۴۶۰	۲۶۰	-	۲۵	۵۳	۲۰٪	۵۶۰	۲۶۰	-
۱۲	۴۵	۱۰٪	۵۱۰	۲۶۰	-	۲۶	۵۳	۲۰٪	۶۱۰	۲۶۰	-
۱۳	۴۵	۱۰٪	۵۶۰	۲۶۰	-	۲۷	۵۳	۲۰٪	۶۶۰	۲۶۰	پایدار
۱۴	۴۵	۱۰٪	۶۱۰	۳۶۰	-						

نیروی تراوش که در قسمت شیب مماس بر آن است عاملی تاثیرگذار است. برای شیب ۵۳ درجه اختلاف تراز کانال و آب زیرزمینی در حالت تخلیه کمتر بود، به عبارتی در این حالت شیب ناپایدارتر بود. در شرایط تخلیه با توجه به اینکه کانال دارای آب است میزان درجه اشباع خاک در قسمت شیب بیشتر بوده، با وجود اثر مقاومتی نیروی تراوش، درجه اشباع خاک غالب شده، شیب ناپایدار می‌گردد.

در رابطه با پایداری شیب، پارامتر زمان نیز در برخی آزمایشهای بحرانی مورد بررسی قرار گرفت. برای مثال برای شیب ۵۳ درجه در حالت تغذیه، در شرایطی که تراز آب کانال حداقل (۲۶۰ میلی‌متر) و تراز آب زیرزمینی ۳۶۰ میلی‌متر بود بعد از گذشت ۱۰ دقیقه پدیده گسیختگی در نزدیک پنجه شیب اتفاق افتاد (جدول ۵). این نکته نشان میدهد که در شرایط حساس زمان نیز فاکتوری تاثیرگذار است که باید مدنظر قرار گیرد.

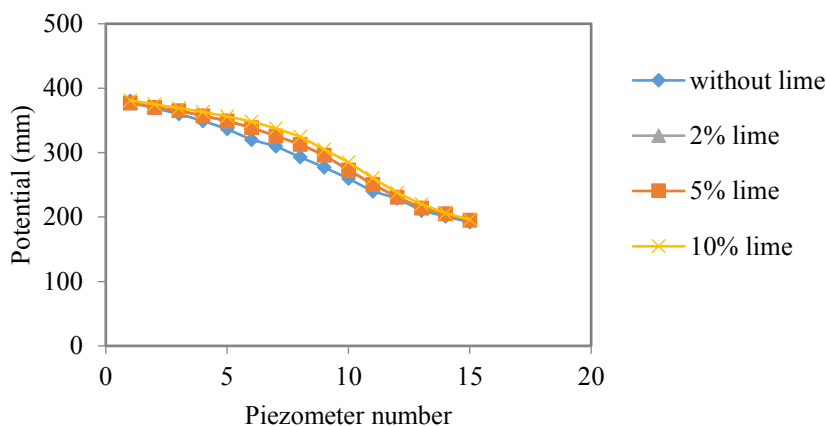
احتمال وقوع گسیختگی افزایش مییابد، اما با توجه به اینکه نیروی تراوش در جهت عمود بر شیب است سبب افزایش مقاومت شیب شد. در این حالت شیب ۲۶/۵ درجه پایدار بود و برای دو شیب ۳۳ درجه و ۴۵ درجه تراز گسیختگی به ۵۱۰ میلی‌متر افزایش یافت. برای شیب ۴۵ درجه با کاربرد پوشش ۱۰٪ آهک شیب تا تراز حداکثر ۶۶۰ میلی‌متر پایدار بود. شیب ۵۳ درجه نیز با کاربرد ۲۰٪ آهک، به ازای تراز حداکثر ۶۶۰ میلی‌متر پایدار بود (جدول ۷). در این حالت نیز کاربرد درصدهای مختلف آهک سبب افزایش مقاومت شد که کنترل گسیختگی را به دنبال داشت.

بررسی نتایج آزمایشها نشان داد که به ازای شیبهای کمتر و مساوی از ۴۵ درجه، در حالت تغذیه، گسیختگی نسبت به تخلیه به ازای اختلاف تراز کانال (hc) و آب زیرزمینی (hg) کمتر یا به عبارتی ناپایداری در تراز پایبندی اتفاق افتاد. در این حالت جهت



شکل ۵. تغییرات پتانسیل در خاکریز کانال، الف: حالت تغذیه، ب: حالت تخلیه

Fig. 5. Potential variations in channel embankment(levee?/ dike?): a) feeding status, b) drainage status



شکل ۶. تغییرات پتانسیل خاکریز برای درصدهای مختلف آهک

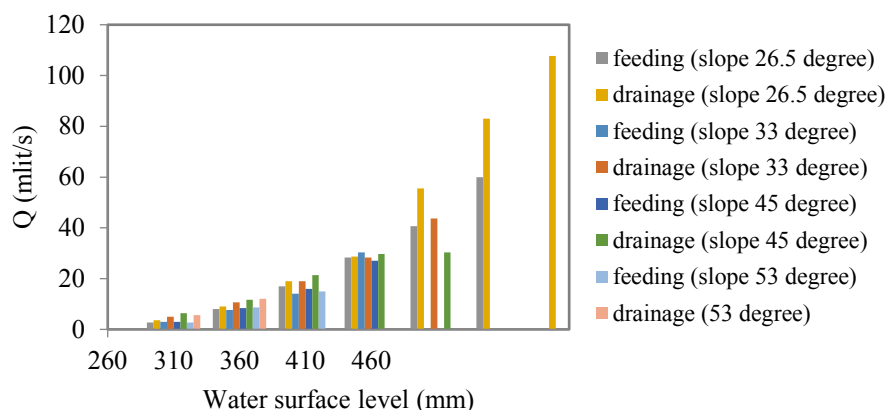
Fig. 6. Embankment potential variations for different percentage of lime

پتانسیل ترسیم شده برای ترازهای مختلف، موقعیت خط فریاتیکی را در داخل شیب نشان میدهد که با اختلاف ترازهای آب، خط فریاتیکی در موقعیت بالاتری قرار میگیرد.

شکل ۶ تغییرات پتانسیل را برای درصدهای مختلف آهک در حالت تغذیه برای شیب ۴۵ نشان میدهد. همانطور که مشخص است با افزایش درصد آهک، پتانسیل در قسمت شیب کانال افزایش یافت، زیرا در این حالت لایه آهکی پوشش، ژل‌های سیمانی تشکیل شده که به داخل منافذ خاک نفوذ کرده، سبب افزایش چسبندگی بین ذرات

۳-۲- تغییرات پتانسیل

بررسی مدل‌های مختلف بدون پوشش در دو حالت تغذیه و تخلیه نشان داد که تغییرات پتانسیل روندی خطی دارد که شیب این خط بستگی به اختلاف تراز آب زیرزمینی و کانال داشت. شکل ۵-الف تغییرات پتانسیل را در حالت تغذیه برای شیب ۴۵ درجه نشان میدهد. همانطور که مشخص است تغییرات پتانسیل در این حالت تقریباً روندی خطی دارد که نشان دهنده افت پتانسیل ثابت در یک طول مشخص، و یکنواختی دانه‌بندی است. همچنین خط تغییرات



شکل ۷. تغییرات دبی نشت در برابر تراز آب برای شیبهای مختلف

Fig. 7. Seepage discharge variations versus water surface level at different angles

مانع در مقابل جریان عمل کرده منجر به کاهش دبی عبوری خواهد شد. با افزایش درصد آهک عملکرد در کنترل دبی نشت افزایش یافت. استفاده از نانو آهک نیز تاثیر قابل توجهی در کاهش دبی داشت به طوری که هر دو مقدار ۳٪ و ۵٪ نانو آهک عملکردی مشابه داشته و دبی نشت را در حدود ۵۲٪ کاهش داد. ذرات نانو آهک نیز علاوه بر سیمانی شدن و با قرار گرفتن در منافذ سبب افزایش تراکم و کاهش نفوذ پذیری مواد شد که نتیجه آن بهبود عملکرد در کاهش دبی نشت است. در حالت تخلیه کاربرد آهک اثر بیشتری داشت به طوری که برای پوشش ۲۰٪ آهک و برای تراز کانال ۳۶۰ میلی‌متر میزان دبی نشت در حدود ۶۴/۱۷٪ کاهش یافت (شکل ۸).

مطابق نتایج این تحقیق کاربرد آهک و نانو آهک نقش موثری در کنترل گسیختگی شیب کانال خاکی دارد، از یک طرف با افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک (ϕ, c) ، مقاومت برشی خاک را افزایش دادند. همچنین با توجه به افزایش خاصیت چسبندگی لایه سطحی شیب و سیمانی شده آن شکل ناحیه گسیختگی شیب را تغییر دادند، به طوری که در حالت تغذیه و بدون پوشش آهک، شکل گسیختگی به صورت کاسه‌ای بود در حالی که با پوشش آهک، گسیختگی ابتدا به صورت ترک‌هایی در سطح بوده که با گذشت زمان ریزش شیب اتفاق افتاد. با افزایش درصد آهک عمق ترک‌ها، اندازه‌ها و تعداد آنها کاهش یافت، پوشش نانو آهک نیز ترک‌ها را حداقل کرد (شکل ۹).

۴- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر کاربرد آهک و نانو آهک در کنترل گسیختگی و

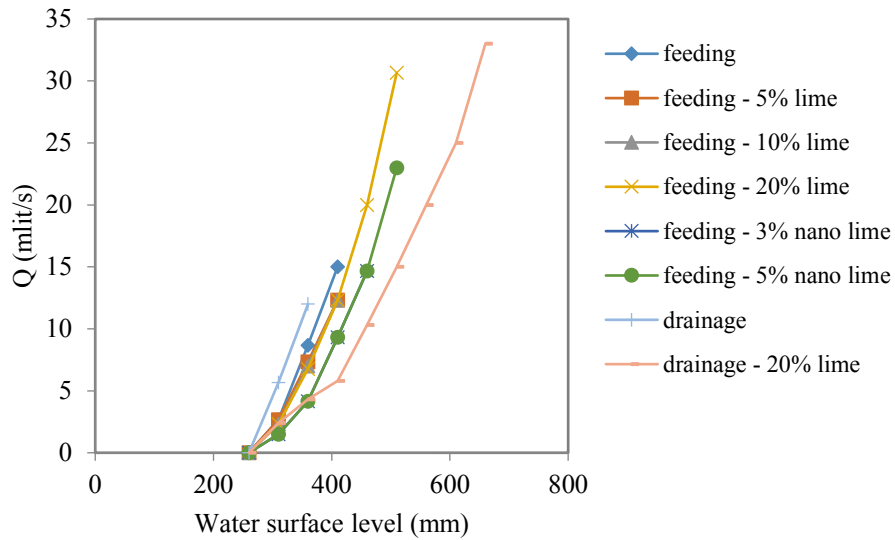
کاهش نفوذپذیری در سطح و افزایش پتانسیل در قسمت پشت آن را به دنبال دارد، در نتیجه در این حالت تغییرات روندی منحنی شکل داشت $(hc=260 \text{ mm}, hg=460 \text{ mm})$.

۳-۳- دبی نشت

مقایسه مقادیر دبی نشت در حالت تغذیه و تخلیه به ازای یک تراز سطح آب ثابت نشان داد، مقدار دبی نشت در حالت تخلیه بیشتر از حالت تغذیه است. زیرا در حالت تخلیه سطح نشت شیب جداره کانال میباشد که مساحت آن نسبت به حالت تغذیه که دیواره قائم خاکریز میباشد بیشتر است (شکل ۷). مطابق معادله دارسی با توجه به ثابت بودن، هدایت هیدرولیکی (k) ، اختلاف پتانسیل (Δh) و طول مسیر (L) ، با افزایش مساحت (A) ، دبی نشت (Q) افزایش مییابد (رابطه ۴).

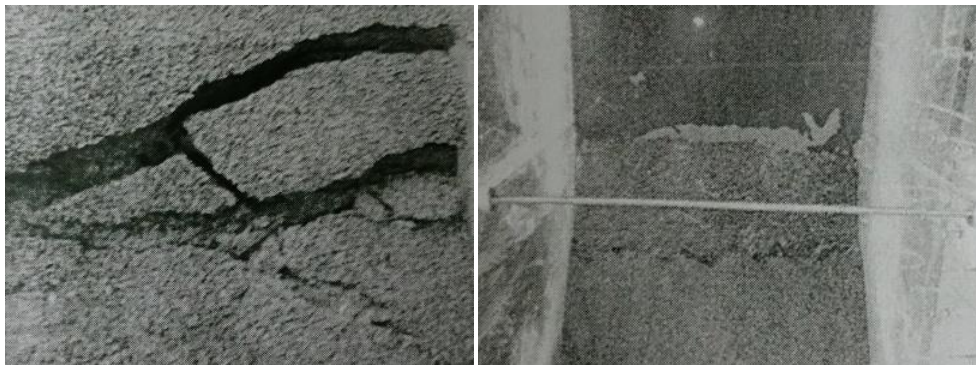
$$Q = k \frac{\Delta h}{L} A \quad (4)$$

بررسی درصدهای مختلف آهک در حالت تغذیه نشان داد که با افزایش درصد آهک روند تغییرات دبی نشت تقریباً تغییری نمی‌کند. به ازای یک تراز سطح آب ثابت، استفاده از آهک میزان دبی نشت را کاهش داد به طوری که برای شیب ۵۳ درجه به ازای تراز آب زیرزمینی ۳۶۰ میلی‌متر برای درصدهای ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ آهک در مقایسه با حالت بدون پوشش، دبی نشت به ترتیب ۱۵/۲۴٪، ۱۹/۱۷٪ و ۲۱/۸۲٪ کاهش نشان داد. افزودن درصدهای مختلف آهک به خاک، سبب افزایش خاصیت سیمانی در سطح شیب میشود که همانند یک



شکل ۸. تغییرات دبی نشت در برابر تراز سطح آب برای درصدهای پوشش مختلف

Fig. 8. Seepage discharge variations versus water surface level at different lining/coverage percentages



ب

الف



د

ج

شکل ۹. گسیختگی در حالت‌های مختلف، الف: بدون پوشش، ب: پوشش ۲٪ آهک، ج: پوشش ۱۰٪ آهک، د: پوشش ۵٪ نانو آهک

Fig. 9. The shape of failure at different conditions: a) without lining, b) 2% lime lining, c) 10% lime lining, d) 5% Nano-lime lining

خاک دانشگاه صنعتی شاهرود و دانشگاه تبریز به خاطر همکاری جهت انجام برخی آزمایشات این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را دارند.

مراجع

- [1] Daryaei. M, Kashefipour. S. M, Investigation of the Effect of Adding Soft Sand and Lime on Strength Properties of Clay Soils, *Journal of Water and Soil*, 25(2) (2011) 230-239 (in Persian).
- [2] Jat. M. L, Bairwa. P. C, Summuria. R, Balyan. J. K, Ladhha. K. C, Assessment of Calcareous Soil Lining for Seepage Reduction from Farm Pond under Dryland Ecosystem, *Indian Journal of Soil Conservation*, 39(3) (2011) 202-206.
- [3] Shen. J, Huang. B, Shu. X. S, Tang. B, Size Effect of Sub Nano-scaled Hydrated Lime on Selected Properties of HMA, *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(4) (2011) 252-257.
- [4] Zomorodian. S. M. A, Abdollahzadeh. S. M, Effect of Horizontal Drains on Upstream Slope Stability During Rapid Drawdown Condition, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 42(1) (2012) 29-35 (in Persian).
- [5] Masoumifard. V, Imam. S. M. R, Rasouli. R, Experiments on Instability Loose Sandy Slopes Due to Rise in Water Level, *Amirkabir Journal of Civil & Environmental Engineering*, 45(2) (2013) 65-72 (in Persian).
- [6] Abbasi. N, Mahdieh. M and Davoudi. M H, Application of Lime and Pozzolan for Stabilization of Silty Sand Soils in Irrigation and Drainage Networks, *Journal of Water and Soil Science.*, 16(62) (2013) 245-257 (in Persian).
- [7] Neethu. S. V, Remya. S, Engineering Behavior of Nanoclay Stabilized Soil, in: *In: Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Roorkee, 2013*, pp. 1-7.
- [8] Hamidi Qaretapeh. M, Golmaei. S. H, Zia Tabar Ahmadi. M. Kh, Effect of Placement of Horizontal Drain in Irrigation Channel on the Slope Stability in Neka Plain Channel, *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(5) (2015) 209-223 (in Persian).
- [9] Farsadzadeh. D, Varjavand. P, Hosseinzadeh Dalir. A, Shokri. N, Hosseini. S. H, Khosravi nia. P, Investigating

پارامترهای نشست در شیب جانبی کانال خاکی به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش درصد آهک هیدراته مقدار زاویه اصطکاک داخلی در حدود ۳۱/۸٪ درجه افزایش یافت و مقدار چسبندگی از صفر به ۳/۳ کیلو پاسکال رسید. به ازای ۵٪ وزنی نانو آهک زاویه اصطکاک داخلی در حدود ۴۴/۷ به دست آمد که نسبت به حالت بدون پوشش در حدود ۳۵/۵٪ افزایش یافت. در این حالت مقدار چسبندگی نیز ۳/۳ کیلو پاسکال به دست آمد. عملکرد ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته و ۵٪ وزنی آهک مشابه هم بود. در مناطقی با سطح محدود و حساسیت بالا (برای مثال مجاور سازه های آبی نظیر سرریزها، تنظیم کننده ها، شیب شکن ها و . . در کانال های انتقال آب) با توجه به عملکرد بهتر و هزینه بیشتر تهیه نانو آهک می توان از نانو آهک در کنترل گسیختگی استفاده کرد و در مناطقی با وسعت بیشتر و حساسیت کمتر با کاربرد درصد آهک بیشتر عملکرد قابل قبولی مشابه نانو آهک را به دست آورد. همچنین در هر دو حالت تغذیه و تخلیه کانال، با افزایش زاویه شیب با راستای افق، گسیختگی به ازای تراز آب کمتر در داخل کانال اتفاق افتاد. همچنین نتایج نشان داد با افزایش درصد آهک، پتانسیل در قسمت شیب کانال افزایش یافت، در این حالت تغییرات روندی منحنی شکل داشت. استفاده از آهک میزان دبی نشست را کاهش داد به طوری که برای شیب ۵۳ درجه به ازای تراز آب زیرزمینی ۳۶۰ میلی متر برای درصدهای ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ آهک در مقایسه با حالت بدون پوشش، دبی نشست به ترتیب ۱۵/۲۴٪، ۱۹/۱۷٪ و ۲۱/۸۲٪ کاهش نشان داد. استفاده از ۳٪ و ۵٪ نانو آهک عملکردی مشابه داشته و دبی نشست را در حدود ۵۲٪ کاهش داد. در حالت تخلیه، برای پوشش ۲۰٪ آهک و برای تراز کانال ۳۶۰ میلی متر میزان دبی نشست در حدود ۶۴/۱۷٪ کاهش یافت. کاربرد آهک و نانو آهک شکل ناحیه گسیختگی را تغییر داد. در حالت تغذیه و بدون پوشش آهک، شکل گسیختگی به صورت کاسه ای و با پوشش آهک، گسیختگی ابتدا به صورت ترکهایی در سطح بوده که در برخی موارد با گذشت زمان ریزش شیب اتفاق افتاد. بنابراین با توجه به وسعت و حساسیت مسئله، به منظور دستیابی به بهترین عملکرد استفاده از ۵٪ نانو آهک یا ۲۰٪ آهک توصیه میشود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از مسئولین محترم آزمایشگاههای مکانیک

- Phenomenon of Slope under Fluctuations of Water Level, *Journal of Water and Soil Science*, 28(1) (2018) 95-107 (in Persian).
- [14] Rahimi. A and Bayat. M, Shear Behavior of Sandy Soil Stabilized with Lime under Acidic Conditions, *Journal of Modares Civil Engineering*, 19(4) (2019) 59-69 (in Persian).
- [15] Fredlund. D. G, Rehatdjo. H, Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley& Sons, Inc, New York, 1993.
- [16] Schnellmann.R. M, Busslinger. H, Schneider. R, Rehardjo. H, Effect of Rising Water Table in an Unsaturated Slope, *Journal of Engineering Geology*, 114(1-2) (2010) 71-83.
- [17] Rezvani. R., Azizi. M., Nopars. P., Nabizadeh. A., Evaluating the Effects of Lime and Nano-Lime on Compaction and Strength Properties of Chaloos Coastal Sand, *Journal of Ferdowsi Civil Engineering*, 33(2) (2021) 55-70 (in Persian).
- the effect of Cutoff on the stability of earthen canal side slopes, *Iranian Water Research Journal*, 8(14) (2014) 195-204 (in Persian).
- [10] Abedi Koupai. J, Norouzi. K, Abbasi. N, Evaluation of Durability and Stability of Clay Soils Stabilized Using Hydrated Lime nearby Hydraulic Structures, *Journal of Water and Soil Science*, 19(3) (2015) 249-261 (in Persian).
- [11] Abdi. M. R, Mirzaeifar. B. H, Rafeinia. C. M, Malakzadeh. D. H, Lime Stabilized Clay Reinforced With Geogrids, *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, 3(1) (2016) 63-72 (in Persian).
- [12] Bahari. M, Shahnazari. E, Emadi. A. R, Reducing of Water Seepage from Ab-Bandan by using Nonoclay, Cement and Lime, *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 47(3) (2016) 625-635 (in Persian).
- [13] Mohamadioun. M, Mahtabi. G, Asadi. M, Effect of Soil Reinforcement with Geogrid in Controlling the Boiling

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Najarzadeh, R. Moazenzadeh, S. Hossein Hosseini, Kh. Azhdary, *Application of Lime and Nano Lime in Control of Failure in Side Slope of Earth Channel, Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(10) (2022) 4459-4472.

DOI: [10.22060/ceej.2021.18360.6848](https://doi.org/10.22060/ceej.2021.18360.6848)

