

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





دانشکده کشاورزی

پایان نامه کارشناسی ارشد سازه های آبی

# بررسی پایداری شیب های خاکی با استفاده از نانو آهک در کانال های روباز

نگارنده: سعید نجارزاده

استاد راهنما

دکتر روزبه موذن زاده

اساتید مشاور

دکتر خلیل اژدری

دکتر سیدحسین حسینی

شهریور ۹۸

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

# تقدیم اثر

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

ما حاصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آمان که مهر آسمانی‌شان آرام بخش آلام زمینی ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

## تشکر و قدردانی

به مصداق آیه شریف (من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق) سپاس میگردانم پروردگار یکتا را که، همتی ام بخشید به طریق علم و دانش و به همیشگی رهروان دانش متعظم نمود. بدین وسیله از مساعدت های استاد گرانقدر و فرهیخته، جناب آقای دکتر مؤذن زاده که در مراحل تهیه پایان نامه مرابار اهنایی های مجدانه و دلسوزانه یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم. از حضور اساتید گرانقدر مشاور جناب آقای دکتر اژدری و جناب آقای دکتر حسینی که با دقت نظر، راهنمایی های ارزنده ای در جهت بهبود کیفی این پایان نامه ارائه فرمودند، سپاسگزارم. از اساتید گرامی جناب آقای دکتر امام قلی زاده و سرکار خانم دکتر کنجی نوردی که زحمت داوری پایان نامه را بر عهده داشتند کمال تشکر را دارم.

از گل های بی دریغ جناب آقایان مهندس شوریه دل، مهندس محمدی نسب، مهندس معیری، مهندس استاری و دوستانی که در این مسیر همراه و همگام بنده بودند کمال سپاس و تشکر را دارم.

سعید نجارزاده

شهریور ۱۳۹۸

# تعمدنامه

اینجانب سعید نجارزاده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه‌های آبی دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه بررسی پایداری کانال‌های خاکی با استفاده از نانو آهک در کانال‌های روباز تحت راهنمایی دکتر روزبه موذن‌زاده متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

بررسی پایداری دیواره جانبی کانال‌های خاکی از نقطه نظر افزایش بهره‌وری مصرف آب و کاهش هزینه‌های اقتصادی ناشی از گسیختگی بسیار حائز اهمیت است. در این تحقیق پایداری شیب‌های خاکی در یک تانک نشت با استفاده از درصد‌های مختلف آهک هیدراته (۰.۲٪، ۰.۵٪، ۱.۰٪ و ۲.۰٪ درصد وزنی) و نانو آهک (نسبت وزنی ۰.۳٪ و ۰.۵٪) برای پوشش شیب جداره مختلف (۱:۱، ۱:۱/۵، ۱:۲ و ۳:۴) شبیه سازی شد. در حالت بدون پوشش، در شیب جداره ۵۳ درجه در تراز آبی ۴۶۰ mm و دبی نشت ۱۵ میلی‌لیتر بر ثانیه و شیب جداره ۲۷ درجه در تراز آبی ۵۶۰ mm و دبی نشت ۶۰ میلی‌لیتر بر ثانیه گسیختگی اتفاق افتاد. نمونه شیب جداره ۱:۱ با پوشش ۱۰٪ آهک هیدراته در قیاس با همین شیب و نمونه جداره ۱:۱ بدون پوشش در ترازهای ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ و ۴۶۰ میلی‌متر به ترتیب منجر به کاهش ۴۴/۶۶، ۴۲/۰۱۶، ۴۳/۷۵ و ۴۸/۱۴ درصدی دبی نشت شده است. نتایج نشان داد که پوشش شیب جداره ۳:۴ با پوشش ۰.۵٪ وزنی نانو آهک، در مقایسه با شیب جداره ۳:۴ بدون پوشش در ترازهای آب مشابه ۳۱۰، ۳۶۰ و ۴۱۰ میلی‌متر به ترتیب شاهد کاهش ۲۰/۹۶، ۵۲/۰۷ و ۴۰ درصدی دبی نشت شده است.

**کلمات کلیدی:** پتانسیل هیدرولیکی، پایداری، کانال خاکی، نانو آهک، نشت



# پیش‌گفتار

الگوی حاضر با هدف دستیابی به قالب و چهارچوبی استاندارد برای نگارش و تدوین پایان‌نامه‌های دانشگاه صنعتی شاهرود توسط کتابخانه مرکزی تهیه شده است. در این الگو با تعریف سبک‌های مختلف متناسب با نیازهای موجود در تایپ و تدوین پایان‌نامه تلاش شده است تا دانشجو بتواند با صرف کمترین وقت پایان‌نامه خود را تدوین نماید. ترتیب قسمت‌های مختلف این الگو مطابق با آیین‌نامه‌ی آموزشی دانشگاه است. لطفاً خود را مقید به استفاده از این الگو و ترتیب کنید و تمامی صفحات را به دقت مطالعه فرمایید.

# لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی در بدنه شیب کانال. کنفرانس بین المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران تهران- دانشگاه تهران ۱۵ آذر ۱۳۹۷.

۲- بررسی شیب جانبی کانال خاکی در اثر بالا آمدن سطح آب. اولین همایش ملی علوم کشاورزی و زیست محیطی ایران- خوزستان ۱۰ بهمن ۱۳۹۷.

# فهرست مطالب

م	فهرست جداول
ن	فهرست اشکال
ع	فهرست علائم
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۴	۱-۱-۱ تثبیت خاک
۵	۲-۱-۱ تأثیر آهک بر رطوبت بهینه تراکم
۵	۳-۱-۱ تأثیر آهک بر وزن مخصوص خشک
۵	۴-۱-۱ درصد بهینه آهک
۶	۲-۱ ضرورت انجام تحقیق
۷	۳-۱ اهداف پایان نامه
۷	۴-۱ ساختار پایان نامه
۹	فصل ۲: مروری بر منابع
۱۰	۱-۲ مقدمه
۱۰	۲-۲ فناوری نانو
۱۱	۳-۲ محاسن و معایب پوشش کانال ها
۱۲	۴-۲ پوشش کانال
۱۲	۵-۲ خسارت پوشش کانال های بتنی

۶-۲ پیشینه تحقیق ..... ۱۳

۱-۶-۲ مطالعات مرتبط با پایدارسازی شیب جانبی کانال ..... ۱۳

۲-۶-۲ مطالعات مرتبط با کاربرد نانو در پایداری شیب جانبی کانال ها ..... ۲۳

۳-۶-۲ مطالعات عددی ..... ۲۵

## فصل ۳: مواد و روش ..... ۲۹

۱-۳ مقدمه ..... ۳۰

۲-۳ مخزن نشت و نفوذ (Seepage and Drainage Tank) ..... ۳۰

۱-۲-۳ تابلو پیزومتری ..... ۳۱

۳-۳ مواد و مصالح ..... ۳۱

۱-۳-۳ مصالح کف مخزن نشت ..... ۳۲

۲-۳-۳ مصالح زهکش ..... ۳۲

۳-۳-۳ مصالح بدنه کانال ..... ۳۲

۴-۳-۳ مصالح پوشش کانال ..... ۳۲

۴-۳ آزمایش دانه بندی خاک ..... ۳۲

۵-۳ نفوذپذیری ..... ۳۳

۶-۳ جرم مخصوص حقیقی ..... ۳۴

۷-۳ جرم مخصوص ظاهری ..... ۳۴

۸-۳ ساخت نانو آهک هیدراته ..... ۳۵

۹-۳ تعیین اندازه و شکل ذرات نانوآهک هیدراته ..... ۳۶

۱۰-۳ ساخت مدل فیزیکی ..... ۳۷

۱۱-۳ تعیین پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ..... ۳۹

۱۲-۳ زمان و محل اجرای آزمایش ..... ۴۰

- ۳-۱۳ نحوه انجام آزمایش با مخزن نشت و نفوذ..... ۴۰
- ۳-۱۳-۱ بررسی پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت خاکریز کانال در حالت تخلیه کانال..... ۴۰
- ۳-۱۳-۲ بررسی پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت خاکریز کانال در حالت تغذیه کانال..... ۴۱
- ۳-۱۴ آزمایش‌های انجام شده با مخزن نشت و نفوذ..... ۴۱
- ۳-۱۵ انواع مدل‌های آزمایشگاهی..... ۴۳

## فصل ۴: نتایج و بحث ۴۷

- ۴-۱ بررسی پایداری شیب جداره ۱:۱..... ۴۸
- ۴-۱-۱ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش  
باشیب ۱:۱ در حالت تغذیه کانال (نمونه شاهد)..... ۴۸
- ۴-۱-۲ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش با  
شیب ۱:۱ در حالت تخلیه کانال (نمونه شاهد)..... ۵۰
- ۴-۱-۳ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۲٪ وزنی  
آهک هیدراته و شیب ۱:۱ در حالت تغذیه کانال..... ۵۲
- ۴-۱-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۵٪ وزنی  
آهک هیدراته و شیب ۱:۱ در حالت تغذیه کانال..... ۵۵
- ۴-۱-۵ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۱۰٪  
وزنی آهک هیدراته و شیب ۱:۱ در حالت تغذیه کانال..... ۵۷
- ۴-۱-۶ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۱۰٪  
وزنی آهک هیدراته و شیب ۱:۱ در حالت تخلیه کانال..... ۶۰
- ۴-۲ بررسی پایداری شیب جداره ۵۳ درجه..... ۶۲
- ۴-۲-۱ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش با  
شیب ۴:۳ در حالت تغذیه کانال (نمونه شاهد)..... ۶۲
- ۴-۲-۲ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش با  
شیب ۴:۳ در حالت تخلیه کانال (نمونه شاهد)..... ۶۴

۳-۲-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۵٪ وزنی آهک هیدراته و شیب ۴:۳ در حالت تغذیه کانال.....	۶۵
۴-۲-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته و شیب ۴:۳ در حالت تغذیه کانال.....	۶۷
۵-۲-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته با شیب ۴:۳ در حالت تغذیه کانال.....	۶۹
۶-۲-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته با شیب ۴:۳ در حالت تخلیه کانال.....	۷۲
۷-۲-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۳٪ وزنی نانو آهک هیدراته و شیب ۴:۳ در حالت تخلیه کانال.....	۷۴
۸-۲-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۵٪ نانو آهک هیدراته و شیب ۴:۳ در حالت تخلیه کانال.....	۷۷
۹-۲-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۵٪ نانو آهک هیدراته و شیب ۴:۳ در حالت تخلیه کانال.....	۷۹
۳-۴ نتیجه گیری.....	۸۲
	۸۵
	۹۱
	پیوست
	مراجع

# فهرست جداول

- جدول ۱-۳ مشخصات مکانیکی خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر..... ۳۳
- جدول ۲-۳ مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی خاک مورد استفاده در این تحقیق به روش بار ثابت ..... ۳۴
- جدول ۳-۳ مقادیر جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک مورد استفاده در این تحقیق ..... ۳۵
- جدول ۴-۳ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مصالح مورد استفاده در این تحقیق ..... ۳۹

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۳ تصویر مخزن نشت و تابلو پیزومتری مورد استفاده در تحقیق حاضر ..... ۳۱
- شکل ۲-۳ نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر ..... ۳۳
- شکل ۳-۳ نمایی از مدل آزمایشگاهی تعیین ضریب نفوذپذیری با بار ثابت ..... ۳۴
- شکل ۴-۳ نمای شماتیک دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای ..... ۳۵
- شکل ۵-۳ توزیع اندازه ذرات نانو آهک هیدراته بعد از آسیاب شدن ..... ۳۶
- شکل ۶-۳ تصویر SEM از نانو آهک هیدراته مورد استفاده در این تحقیق ..... ۳۷
- شکل ۷-۳ تصویر شماتیک مدل خاک و محل قرار گیری پیزومترها در این تحقیق ..... ۳۸
- شکل ۸-۳ نمای شماتیک دستگاه برش مستقیم ..... ۴۰
- شکل ۹-۳ نمای شماتیک شیب ۲۷ درجه ..... ۴۳
- شکل ۱۰-۳ نمای شماتیک شیب ۳۴ درجه ..... ۴۴
- شکل ۱۱-۳ نمای شماتیک شیب ۴۵ درجه ..... ۴۴
- شکل ۱۲-۳ نمای شیب ۵۳ درجه ..... ۴۵
- شکل ۱-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف (T460, T410, T360, T310, T260) به ترتیب بیانگر تراز آبی در ارتفاع ۲۶۰، ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ و ۴۶۰ میلی‌متر) ..... ۴۹
- شکل ۲-۴ نمایی از گسیختگی شیب جداره ..... ۵۰
- شکل ۳-۴ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف (T460, T410, T360, T310, T260) به ترتیب بیانگر تراز آبی در ارتفاع ۲۶۰، ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ و ۴۶۰ میلی‌متر) ..... ۵۰
- شکل ۴-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۵۱
- شکل ۵-۴ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۵۲
- شکل ۶-۴ نمایی از گسیختگی شیب معکوس جداره ۴۵ درجه بدون پوشش ..... ۵۲
- شکل ۷-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۵۳
- شکل ۸-۴ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۵۴
- شکل ۹-۴ نمایی از گسیختگی شیب ۴۵ درجه با پوشش ۲٪ وزنی آهک هیدراته ..... ۵۴
- شکل ۱۰-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۵۵
- شکل ۱۱-۴ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۵۶
- شکل ۱۲-۴ نمایی از گسیختگی شیب ۴۵ درجه با پوشش ۵٪ وزنی آهک هیدرات ..... ۵۶
- شکل ۱۳-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۵۸
- شکل ۱۴-۴ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۵۹
- شکل ۱۵-۴ نمایی از گسیختگی شیب ۴۵ درجه با پوشش ۱۰٪ آهک هیدراته ..... ۵۹



- شکل ۴-۱۶ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۷ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۸ عدم بروز نشانهای گسیختگی در شیب ۱:۱ با پوشش ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته ..... ۶۱
- شکل ۴-۱۹ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۰ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۱ گسیختگی شیب ۵۳ درجه فاقد پوشش ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۲ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۳ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۶۵
- شکل ۴-۲۴ نمایی از گسیختگی شیب معکوس جداره ۵۳ درجه بدون پوشش ..... ۶۵
- شکل ۴-۲۵ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۶۶
- شکل ۴-۲۶ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۶۷
- شکل ۴-۲۷ گسیختگی پوشش ۵٪ وزنی آهک هیدراته ..... ۶۷
- شکل ۴-۲۸ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۶۸
- شکل ۴-۲۹ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۶۹
- شکل ۴-۳۰ گسیختگی پوشش ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته ..... ۶۹
- شکل ۴-۳۱ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۷۰
- شکل ۴-۳۲ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۷۱
- شکل ۴-۳۳ گسیختگی پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته ..... ۷۱
- شکل ۴-۳۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۷۲
- شکل ۴-۳۵ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۷۳
- شکل ۴-۳۶ عدم بروز نشانهای گسیختگی در شیب ۳:۴ با پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته ..... ۷۳
- شکل ۴-۳۷ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۷۵
- شکل ۴-۳۸ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۷۶
- شکل ۴-۳۹ گسیختگی پوشش ۳٪ نانو آهک هیدراته ..... ۷۶
- شکل ۴-۴۰ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۷۸
- شکل ۴-۴۱ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۷۹
- شکل ۴-۴۲ گسیختگی پوشش ۵٪ نانو آهک هیدراته ..... ۷۹
- شکل ۴-۴۳ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف ..... ۸۰
- شکل ۴-۴۴ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف ..... ۸۱
- شکل ۴-۴۵ عدم بروز نشانهای گسیختگی در شیب ۳:۴ با پوشش ۵٪ وزنی نانو آهک هیدراته ..... ۸۱

# فهرست علائم

در صورت تمایل می‌توانید فهرست نمادها و علائم اختصاری پایان‌نامه را در این صفحه وارد کنید، در غیراینصورت این صفحه را حذف کنید.

## فصل ۱: مقدمه

## ۱-۱ مقدمه

یکی از مهمترین عوامل محدود کننده توسعه کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک نظیر کشورمان، عدم دسترسی به منابع آب کافی است. مقادیر بازده انتقال و توزیع آب در مناطق مختلف ایران بسیار متغییر است. طبق گزارش معاونت بهره برداری و مدیریت آب کشور، مقدار بازده انتقال در کل کشور حدود ۶۸ درصد می باشد که با بهبود این مقدار در سطوح وسیع می توان راندمان کل آبیاری در سطح مزرعه را افزایش قابل توجهی بخشید. مقادیر اندک راندمان انتقال آب در کانال های توزیع، عمدتاً ناشی از تلفات نشست و نفوذ در کانال های خاکی است. از این رو بررسی پایداری دیواره جانبی کانال های خاکی از نقطه نظر افزایش بهره وری مصرف آب و کاهش هزینه های اقتصادی ناشی از گسیختگی می تواند بسیار حائز اهمیت باشد (سالمی و سپاسخواه، ۲۰۰۴).

پایداری شیب دیواره کانال خاکی به هندسه شیب، خصوصیات خاک و نیروهای داخلی و خارجی (نیروی ناشی از فشار منفذی و فشار هیدرو استاتیک) وارد شده به بدنه کانال بستگی دارد. چنانچه بخشی از دیواره جانبی کانال یا کل آن مستغرق باشد، با تغییرات سطح آب، نیروهای داخلی و خارجی تاثیر گذار بر پایداری شیب تغییر می کنند. در خاک ها با نفوذپذیری زیاد، تنش ناشی از فشار منفذی بیشتر در طول پایین افتادگی سطح آب مستهلک می شود. در خاک های با نفوذپذیری کم، با تغییرات سطح آب، نشست و تنش ناشی از فشار منفذی با نرخ یکسان و شبیه هم مستهلک نمی شوند. بنابر این رفتار خاک در بخشی بصورت زهکش شده و در بخشی دیگر بصورت زهکش نشده خواهد بود. در نتیجه به واسطه پایین افتادگی سریع، پایداری شیب کاهش پیدا کرده و حتی باعث تخریب شیب خواهد شد. در تحلیل پایداری شیب، برای تحلیل کوتاه مدت پارامترهای زهکش نشده (تنش کل) و برای تحلیل بلند مدت پارامترهای زهکش شده (تنش موثر) به کار گرفته می شود (بریلجن، ۲۰۰۶).

پایداری شیب‌های خاکی به عوامل متعددی وابسته می‌باشد. از جمله عوامل مهم و مؤثر در زمینه می‌توان به دبی عبوری از کانال، زاویه شیب، جنس خاک، چسبندگی خاک، زاویه اصطکاک داخلی خاک و مقاومت برشی خاک اشاره کرد. خاک اکثر نقاط کشورمان را خاک‌های ریزبافت و رسی تشکیل می‌دهند که در اکثر مواقع کاربرد این خاک‌ها از نقطه نظر ظرفیت باربری، نشست و تورم با محدودیت همراه می‌باشد. این ویژگی خاک‌های ریزبافت و رسی سبب کاهش پایداری در شیب‌های خاکی می‌شوند که برای اصلاح آنها از روش‌های مکانیکی، تسلیح خاک و روش‌های شیمیایی کمک می‌گیرند. در اصلاح رفتار خاک به روش مکانیکی که بیشتر در احداث سدها کاربرد دارد، خاک را بوسیله غلطک‌های مناسب، متراکم می‌کنند. در این روش برای رسیدن به تراکم مورد نظر، غلطک‌ها به دفعات روی خاک محل مورد نظر حرکت می‌کنند. در اصلاح خاک به روش تسلیح، در خاک مورد نظر از تیرک‌هایی با جنس‌های مختلف (چوبی، فلزی، بتنی و...) استفاده می‌شود. در این روش اصطکاک بین خاک و تیرک، موجب افزایش پایداری می‌شود. در اصلاح رفتاری خاک‌های ناپایدار به روش شیمیایی، معمولاً به آن موادی که دارای کلسیم و سیلیسیم می‌باشند؛ مانند آهک، سیمان و کلسیم کلرید اضافه می‌کنند. حضور کلسیم در خاک باعث ساخته شدن و تشکیل خاک دانه‌ها شده و سیلیسیم موجب سخت شدن خاک دانه‌ها می‌شود. تشکیل خاک دانه‌ها در خاک و همچنین سخت شدن آنها باعث افزایش مقاومت برشی خاک شده که در جهت افزایش پایداری شیب‌های خاکی مؤثر می‌باشد. تکنیک اصلاح خاک‌های ناپایدار با آهک از زمان‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته است (شهسواری و عباسی، ۱۳۹۰).

یکی از مسائلی که در بهره برداری از کانال‌ها می‌تواند مشکلات اساسی به وجود آورد، افتادگی سطح آب است. بر حسب تعریف، نرخ کاهش عمق آب در هر نقطه از کانال را افتادگی سطح آب گویند، که اگر به طور ناگهانی حتی با تغییرات ناچیز رخ دهد، می‌تواند به کانال آسیب‌های جدی وارد کند. افزایش ناگهانی سطح آب به ندرت باعث بروز مشکل در کانال می‌شود، مگر آن که عمق آب از حد

مجاز بالاتر رود یا این که از کانال سرریز کند. ولی افتادگی ناگهانی سطح آب حتی اگر در مقیاس پایین باشد می‌تواند به شیروانی کانال آسیب جدی وارد کند (برینک گرو، ۲۰۰۳).

نشت آب از کف و دیواره‌های آب‌بندان علاوه بر کاهش حجم آب ذخیره شده باعث تشدید مسئله زهدار شدن اراضی مجاور آن نیز می‌شود. تلفات زیادی به صورت پدیده نشت از دیواره‌های آب‌بندان به وقوع می‌پیوندد که این امر موجب اشباع شدن خاک دیواره و لغزش آن خواهد شد. نتایج نشان می‌دهد که پایداری دیواره‌های خاکی آب‌بندان رابطه معکوس با مقدار نشت دارد (تیلانگ، ۲۰۱۲).

برای پیشگیری از تخریب سطوح شیب دار در تماس با آب می‌توان از روش‌های مختلفی نظیر سنگ چین، پوشش گیاهی، ترانشه، ژئوممبرین، توری سنگ، تشک بتنی، مخلوط سیمان-خاک، میخکوبی و پرده آب‌بند استفاده کرد (گوپیناتان، ۱۹۹۶).

#### ۱-۱-۱ تثبیت خاک

خاکی که به طور طبیعی در محل وجود دارد همیشه به طور کامل برای تحمل بار سازه مورد نظر مناسب نیست. اگر خاک نامناسب باشد ساخت و سازه بر آن ممکن است باعث بروز مشکلاتی برای سازه از جمله تورم و یا بروز نشست‌های قابل توجه شود. برای جلوگیری از بروز چنین مشکلاتی لازم است روش‌های خاصی برای بهبود وضعیت خاک به کار گرفته می‌شود. روش‌های مختلفی برای بهبود خاک‌های ناپایدار وجود دارد که مهمترین آن‌ها می‌توان به تراکم، بارگذاری، زهکشی به وسیله چاه‌های ماسه‌ای، تثبیت خاک با تزریق، استفاده از ستون‌های سنگی، استفاده از ژئوتکسسال‌ها، تثبیت به وسیله مواد شیمیایی، پیش مرطوب کردن و کنترل رطوبت اشاره نمود.

اجرای هر کدام از روش‌های فوق باعث ایجاد تغییر در خصوصیات خاک می‌شود که مهمترین تغییرها می‌توان به کاهش نشت از سازه، بهبود مقاومت برشی خاک و افزایش ظرفیت باربری خاک، افزایش

ضریب اطمینان در مقابل لغزش شیروانی، کانال‌های خاکی و سدهای خاکی و کاهش خصوصیات انقباض و تورم خاک اشاره نمود (داس، ۱۳۸۳).

#### ۱-۱-۲ تأثیر آهک بر رطوبت بهینه تراکم

اضافه کردن آهک باعث افزایش رطوبت بهینه تراکم خاک می‌شود. به علت تغییر ساختار خاک و فلوکوله شدن به آب بیشتری نیاز خواهد بود به همین علت رطوبت بهینه تراکم افزایش می‌یابد. دلیل دیگر آن است که طی واکنش پوزولانی  $\text{CaO}$  هیدراته شده و باعث مصرف مقدار مشخصی از آب می‌شود (کومار و همکاران، ۲۰۰۷).

#### ۱-۱-۳ تأثیر آهک بر وزن مخصوص خشک

ضافه کردن آهک به خاک رس باعث کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر خاک رس می‌شود. این کاهش وزن مخصوص خشک در درصدهای آهک کم نسبت به درصدهای آهک زیاد قابل توجه می‌باشد. زیرا در در صد آهک کم (مثلاً کمتر از چهار در صد) آهک و خاک رس به سرعت واکنش داده و باعث تغییر سریع ساختار خاک می‌شوند در نتیجه وزن مخصوص خشک کاهش می‌یابد؛ اما با افزایش در صد آهک واکنش پوزولانی شکل می‌گیرد و بر کاهش وزن مخصوص خشک خاک تأثیر می‌گذارد. همچنین آهک اساساً از خاک سبک‌تر است و وزن مخصوص خشک را کاهش می‌دهد در ضمن اضافه کردن آهک به خاک باعث افزایش خلل و فرج خاک می‌شود که خود عاملی برای کاهش وزن مخصوص است (جوادی، ۱۹۹۷).

#### ۱-۱-۴ درصد بهینه آهک

روش‌های مختلفی برای تعیین درصد بهینه آهک وجود دارد که از آن جمله می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود.

#### ۱-۴-۱-۱ روش PH

لازمه انجام واکنش پوزولانی خاک و آهک رسیدن PH محیط به حدود ۱۲/۶ است بنابراین درصد بهینه آهک مقداری است که PH را به حداقل مقدار ۱۲/۶ برساند (سیویاپولانیا، ۲۰۰۶).

#### ۱-۴-۱-۲ روش نشانه خمیری

در سدهای آهکی که مقدار نشانه خمیری خاک را به حد مطلوب برساند و افزودن بیشتر آهک باعث کاهش در نشانه خمیری خاک نشود به عنوان درصد بهینه آهک معرفی شده است (سیویاپولانیا، ۲۰۰۶).

#### ۱-۴-۱-۳ روش نسبت باربری کالیفرنیا

با آزمایش آهک تا یک حدی مقدار CBR افزایش و سپس کاهش می‌یابد. درصد آهکی که در آن مقدار CBR بیشترین است به عنوان درصد بهینه آهک انتخاب می‌شود (جوادی، ۱۹۹۷).

#### ۱-۴-۱-۴ روش مقاومت فشاری تک‌محوری

مقدار آهکی که باعث بیشترین مقاومت تک‌محوری شود به عنوان درصد بهینه آهک در نظر گرفته می‌شود (سیویاپولانیا، ۲۰۰۶).

#### ۱-۴-۱-۵ روش AASHTO

با تعیین درصد مصالح عبوری از الک شماره ۴۰ و نشانه خمیری مصالح براساس جدول AASHTO درصد بهینه آهک مشخص می‌شود (دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی، ۱۳۸۲).

#### ۱-۲ ضرورت انجام تحقیق

ابتدایی ترین شیوه انتقال آب در مزارع کشاورزی از محل استحصال تا ابتدای مزرعه، احداث کانال‌های خاکی است که اگرچه هزینه اولیه ناچیزی دارد ولی میزان تلفات آب در این کانال‌ها بسیار



بالا بوده که گاهی تا ۷۰ درصد هم می‌رسد. بیشترین تلفات آب در کانال‌های خاکی به صورت نشت آب از این کانال‌ها صورت می‌گیرد لذا باید مقدار نشت مورد تحلیل و محاسبه قرار گیرد (سالمی و سپاس خواه، ۱۳۸۵).

افزایش فشار آب حفره‌ای عامل بسیاری از گسیختگی‌های ناشی از روانگرایی استاتیکی در شیب‌ها شناخته شده است (اندرسون و ریمر، ۱۹۹۵).

### ۱-۳ اهداف پایان‌نامه

هدف اصلی در این تحقیق بررسی وضعیت پایداری شیب کانال‌های خاکی (از نقطه نظر گسیختگی) و میزان دبی نشت بواسطه پوشش‌دار کردن کانال (آهک هیدراته و نانو آهک هیدراته) بوده است.

### ۱-۴ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه شامل ۵ فصل می‌باشد که در پی آن منابع و مأخذ تحقیق ارائه شده است.

فصل اول- شامل تعریف مسئله، سابقه موضوع، ضرورت انجام تحقیق، اهداف پایان‌نامه و ساختار پایان‌نامه می‌باشد.

فصل دوم- شامل کلیات یا پیشینه تحقیق می‌باشد.

فصل سوم- به شرح تجهیزات آزمایشگاهی مورد استفاده، روش‌های انجام آزمایش و ساخت مدل فیزیکی با زاویه شیب مختلف می‌باشد.

فصل چهارم- پس از ارائه داده‌های بدست آمده از آزمایش‌ها و تعیین تأثیر پارامترهای مختلف در روند کار به تفسیر نمودارها و نتایج پرداخته شده است. تا درصد بهینه از آهک و نانو آهک برای شیب جداره کانال خاکی با زوایای مختلف تعیین گردد.

فصل پنجم- شامل خلاصه‌ای از نتایج بدست آمده و ارائه پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده می‌باشد.

## فصل ۲: مروری بر منابع

## ۱-۲ مقدمه

کانال‌های آبیاری که بستر آن‌ها خاک و بدون پوشش می‌باشند حدود ۲۰ الی ۵۰ درصد آب انتقالی خود را در اثر نفوذ، نشست و گسیختگی از دست می‌دهند. با ایجاد تمهیدات لازم جهت جلوگیری از گسیختگی و یا کاهش مقدار نفوذ آب در کانال‌های آبیاری با اجرای پوشش‌های خاص، ضمن جلوگیری از هدر رفت آب می‌توان سرعت جریان را با ایجاد سطوحی صاف حدود ۱/۵ تا ۲ برابر افزایش داد. در حالت کلی، معمول‌ترین هدف از پوشش کانال‌های آبیاری کاهش هدر رفت آب از طریق نفوذ است. ولی در کنار آن باید به اهداف دیگری مانند پایداری شیب کانال‌ها، افزایش سرعت جریان (که با ثابت فرض کردن سطح مقطع دبی افزایش می‌یابد)، جلوگیری از نفوذ آب به زمین‌ها و راه‌های ارتباطی مجاور، کاهش رسوب گذاری در مسیر، کاهش و بهینه سازی ابعاد کانال‌ها و کنترل رویش علف‌های هرز اشاره کرد (هیل، ۲۰۰۰).

با توجه به اهمیت بررسی پایداری دیواره جانبی کانال‌های خاکی از نقطه نظر افزایش بهره‌وری مصرف آب و همچنین کاهش هزینه‌های اقتصادی ناشی از گسیختگی شیب در نقاط حساس کانال، در این تحقیق تاثیر آهک و نانو آهک در قالب سناریوهای مختلف از نقطه نظر میزان این مواد و شرایط مختلف آزمایشگاهی بر روی پایداری شیب جانبی کانال خاکی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

## ۲-۲ فناوری نانو

واژه‌ی نانو برگرفته از کلمه‌ی یونانی Nanos، به معنای بسیار کوچک است (موتمبئی، ۲۰۰۶). نانو ذرات را از لحاظ شکل ظاهری می‌توان به نانو ذرات با شکل مسطح (تک بعدی)، نانو ذرات لوله‌ای شکل (دوبعدی) و نانو ذرات با شکل چند بعدی تقسیم‌بندی نمود (لیو و همکاران، ۲۰۰۹). نانو ذرات، ذرات کلوئیدی جامد در محدوده‌ای با قطر ۱۰۰۰-۱ نانومتر می‌باشند (پریجیک و سرسا، ۲۰۱۱). نانو تکنولوژی شاخه‌ی جدید و امید بخشی است که علوم مختلف را تحت تأثیر قرار داده است و کشاورزی نیز از این قاعده مستثنا نیست. علم و فناوری نانو یا نانو تکنولوژی، توانایی بدست گرفتن کنترل ماده

در ابعاد نانومتری (مولکولی) و بهره‌برداری از خواص و پدیده‌های این بعد در مواد، ابزارها و سیستم‌های نوین است. فناوری نانو عبارتست از دستکاری، خود مونتاژی اتم، مولکول و یا خوشه‌های مولکولی در ساختارها برای ایجاد نانو مواد یا نانو ابزارهایی که دارای صفات جدید یا کاملاً متفاوت با ساختارهای قبلی هستند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۱). ساخت نانو ذرات و نانو مواد به عنوان یکی از پیشرفت‌های سال‌های اخیر، موجب استفاده گسترده از این مواد شده است (سزالی، ۲۰۱۲). هر چه به مقیاس‌های نانو نزدیک شویم، از آنجا که نسبت سطح به حجم مواد افزایش می‌یابد، تعداد مولکول‌های موجود در سطح نسبت به درون ذره افزایش می‌یابند. این عامل سبب می‌شود تا الف) مولکول‌هایی که در سطح قرار دارند فعال‌تر شوند، ب) قدرت برقراری پیوند در این مولکول‌ها افزایش می‌یابد، ج) در صورت وجود خاصیت کاتالیزوری، این ویژگی افزایش می‌یابد (لیو و همکاران، ۲۰۰۹). نانو تکنولوژی به‌عنوان انقلابی آینده اقتصادی کشورها و جایگاه آن‌ها در جهان را تحت تأثیر قرار خواهد داد و همین عامل باعث شده است که کشورهای بزرگ، فناوری نانو را به عنوان مهمترین اولویت تحقیقاتی خویش طی دهه اول قرن بیست و یکم قرار دهند.

### ۳-۲ محاسن و معایب پوشش کانال‌ها

پوشش کانال مزیت‌هایی دارد که از جمله مهمترین این مزیت‌ها می‌توان به جلوگیری از تلفات آب (ذشت)، جلوگیری از باتلاقی شدن اراضی اطراف کانال، کاهش سطح مقطع کانال با افزایش سرعت جریان، جلوگیری از رسوب گذاری و رشد علف در کانال، جلوگیری از فرسایش بستر کانال، تسهیل عملیات نگهداری و بهره‌برداری و پایداری شیب جانبی کانال اشاره نمود (اکبریان، ۱۳۹۳). هم‌چنین از معایب پوشش دار کردن کانال‌ها می‌توان به هزینه‌های ساختمانی، مشکلات زیر پوشش و کاهش زیر فشار و ضرورت پیش‌بینی تاسیسات اضافی (پل، نردبان نجات) اشاره نمود (اکبریان، ۱۳۹۳).

## ۴-۲ پوشش کانال

انتخاب پوشش کانال به عوامل مختلفی چون مصالح محلی موجود و در دسترس، مسائل اقتصادی طرح، تجهیزات و امکانات اجرایی بستگی دارد و به طور کلی علل اصلی ایجاد پوشش بر روی کانال‌های آبیاری حفظ آب، کاهش ابعاد کانال، عدم نفوذ آب به زمین‌ها و راه‌های مجاور و کاهش هزینه نگهداری می‌باشد (تانداوار، ۲۰۰۸).

برای پوشش کانال می‌توان از روش‌های، الف) سخت و یک‌پارچه شامل بتن ریخته شده درجا، بتنی پیش ساخته، بتن پاشی، آسفالت، آجر فرش- بلوک‌های سفالی و سنگ فرش، ب) غشایی که شامل قیر و گونی، لاستیک و پلاستیک ورقه‌ای و دوغاب بنتونیت پاشیده شده در محل، پ) پوشش متخلخل که شامل خاک ریزدانه کوبیده شده در محل، خاک سیمان دار و پوشش سنگ ریزه‌ای، ت) پوشش با مصالح بنائی مانند بلوک‌های سیمانی، آجری، سنگی و آهک، ث) پوشش گیاهی استفاده نمود (طهماسبی، ۱۳۹۱).

## ۵-۲ خسارت پوشش کانال‌های بتنی

از آنجا که پوشش‌دار کردن کانال‌ها از طریق بتن در بسیاری از مناطق کشور رایج است، از مهم‌ترین خسارت وارد شده به این کانال‌ها می‌توان به (۱) انواع ترک‌های موئی، (۲) ترک‌های موزائیکی، (۳) بلند شدگی و تورم پوشش، (۴) تورق پوشش، (۵) پودر شدگی سطح بتن و (۶) کنده و جدا شدن دانه‌ها از بتن اشاره نمود (انجمن پرتلند، ۲۰۰۱).

## ۲-۶ پیشینه تحقیق

### ۲-۶-۱ مطالعات مرتبط با پایدارسازی شیب جانبی کانال

رضا امام و همکاران (۱۳۹۲) در پژوهشی بیان داشتند که مکانیزم‌های مختلفی می‌تواند در ایجاد ناپایداری و گسیختگی‌های ناشی از بالا آمدن سطح آب نقش داشته باشند. ایشان بیان داشتند که تاثیر گذارترین موارد در این زمینه به شرح ذیل می‌باشد:

۱. گسیختگی ناشی از کاهش حجم و افزایش فشار ناشی از آن که باعث کاهش تنش موثر و مقاومت برشی می‌شود.

۲. گسیختگی ناشی از کاهش مکش در ماسه غیر اشباع ناشی از اشباع شدن ماسه که در نهایت موجب کاهش مقاومت برشی می‌گردد.

۳. گسیختگی ناشی از اعمال نیروی زه آب در جهت ناپایداری بیشتر در شیب.

بطور کلی در خاکریزهای ساخته شده از ماسه‌های شل و غیر اشباع که تحت زاویه ای بیش از زاویه قرارگیری مصالح ساخته شده‌اند، در اثر بالا آمدن سطح آب، ناپایداری بوجود می‌آید.

عباسی (۱۳۹۴) در پژوهشی به بررسی امکان استفاده از قطعات پیش ساخته بتن گوگردی برای پوشش کانال‌های آبیاری پرداخت. نتایج نشان داد میزان نشت از کانال پوشش شده با قطعات گوگردی به مراتب کمتر از بتن معمولی و در حدود ۰/۱۴ متر مکعب بر متر مربع روز می‌باشد.

سوبرامانیا و همکاران (۱۹۷۳) اثرات شیب را بر میزان نشت آب از بدنه کانال مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که در زوایای تندتر شیب جانبی مقدار نشت کمتر از حالتی است که دیواره‌های جانبی تحت شیب ملایم ساخته می‌شود. در حالت نشت معکوس، با افزایش شیب مقدار نشت به داخل کانال افزایش یافته و ناپایداری دیواره‌های جانبی بیشتر می‌گردد.

فیس (۲۰۰۰) مقدار نشت در ۱۵ کانال را به روش حوضچه‌ای اندازه‌گیری و نتیجه‌گیری کرد که برای کانال‌های با عرض کمتر از ۳/۵ متر، مقدار تلفات نشت بالاتر بوده و برای عرض کانال از ۰/۹ تا ۱۱/۶ متر، مقدار تلفات نشت به طور متوسط در حدود ۰/۳۷ متر مکعب بر مترمربع در روز می‌باشد. ایشان نتیجه‌گیری نمود که با کنترل تلفات نشت، سالانه ۲۶۰ میلیون مترمکعب از منابع آب منطقه نگزاس ذخیره خواهد شد. علاوه بر آن عدم پایداری شیب جانبی کانال خاکی و پدیده گسیختگی علاوه بر هدر رفت آب، منجر به تحمیل هزینه‌های اقتصادی بالایی به پروژه‌های مرتبط می‌گردد. این موضوع در کشور ایران که هنوز در مناطق زیادی از کانال‌های خاکی برای انتقال آب استفاده شده و میزان راندمان انتقال نیز به دلایل مختلفی از قبیل نشت از دیواره‌ها مقادیر پایینی به خود اختصاص می‌دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است. بررسی مطالعات مختلف در این زمینه اهمیت بررسی پایداری شیب جانبی کانال‌های خاکی را نمایان می‌سازد.

محمدیون و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی کارآیی صفحه‌های ژئوگرید (در سه طول ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر و با فواصل ۱، ۲، ۳ و ۴ سانتی‌متر) در کنترل پایداری شیروانی خاکی تحت صعود آب زیرزمینی و نزول سطح آب کانال با استفاده از مدل آزمایشگاهی را بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که صفحه‌های ژئوگرید با طول ۲۰ سانتی‌متر و فاصله یک سانتی‌متر نسبت به مدل شاهد (شیروانی خاکی بدون نصب صفحه ژئوگرید) گرادیان جوشش در شرایط صعود آب زیرزمینی و نزول آب کانال به ترتیب ۷۱/۵ درصد و ۲۳۶ درصد افزایش داشت.

کتیب (۲۰۰۴) میزان نشت از کانال‌های پوشش دار همراه با زهکش‌های نامتقارن در حالت ماندگار را با روش المان‌های محدود بررسی کرد. همچنین اثر پوشش کانال بر دبی نشت نیز بررسی شد. نتایج نشان داد زمانی که فاصله زهکش‌ها زیاد است، میزان تأثیر و کارایی پوشش کانال در کاهش نشت کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش نفوذپذیری پوشش کانال، نشت از کانال نیز کاهش می‌یابد. بر این



اساس زمانی که نسبت نفوذپذیری پوشش کانال و خاک زیر آن در محدوده  $0/001 \text{ m/s}$  تا  $0/02 \text{ m/s}$  قرار دارد میزان نشت کانال تا حدودی افزایش می‌یابد.

امام و همکاران (۱۳۹۲) ناپایداری شیب‌های ماسه‌ای غیر متراکم را در اثر بالا آمدن سطح آب و افزایش فشارحفره‌ای با استفاده از مدل آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که دانسیته اولیه عامل اصلی کنترل کننده گسیختگی است. همچنین عوامل دیگری نظیر نحوه ورود آب به خاکریز و توزیع فشار آب حفره‌ای بر نحوه گسیختگی موثرند.

ورجاوند و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی با استفاده از مدل عددی و آزمایشگاهی، پایداری شیب جانبی کانال خاکی با دو شیب بدنه مختلف را در حضور سطح ایستابی بررسی کردند. پایین افتادگی سطح آب در کانال یا بالارفتن سطح ایستابی باعث تغییر در رژیم رطوبتی خاک اطراف کانال شده و شیب‌های بدنه کانال را تخریب می‌کند. ایشان نصب پرده آب‌بند را به عنوان روشی کنترلی تحلیل کردند. نتایج نشان داد که سطح نشت و فشار پیژومتریکی نزدیک سطح خاک دو عامل مهم در پایداری شیب جانبی کانال خاکی است. بر این اساس و به منظور کنترل تخریب در شیب تندتر خاک، پرده آب‌بند باید تا زیر تراز کف کانال پیش رود ولی در مورد شیب‌های ملایم‌تر نفوذ آن تا تراز کف کانال کافی است. همچنین مدل عددی در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی با دقت خوبی پارامترهای فشار کل و دبی را شبیه سازی کرد به طوری که متوسط خطا در برآورد دبی و فشار کل در مدل در حدود ۲ درصد بدست آمد.

قره‌تپه و همکاران (۱۳۹۳) بیان داشتند که تغییر سطح آب داخل کانال باعث نوسان فشار آب حفره‌ای در خاکریز می‌شود که این امر خود موجب تغییر مقادیر ضریب اطمینان شیروانی می‌گردد. ایشان نقش زهکش افقی در پایداری شیروانی برای سه حالت افت سریع، افت آرام و حداکثر سطح آب داخل کانال را به کمک مدل عددی (8.2) plaxis مورد بررسی قرار داده و مقادیر ضریب اطمینان را به ترتیب  $1/6$ ،  $1/73$  و  $2/8$  گزارش نمودند. با قرارگیری زهکش داخل خاکریز، بیشترین افزایش

ضریب اطمینان زمانی بود که زهکش در کف کانال قرار داشت که برای افت سریع، آرام و حداکثر سطح آب به ترتیب برابر ۱/۶۲، ۲/۰۳ و ۲/۸ به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که نقش زهکش افقی در پایداری شیب شیروانی چشم گیر است و فشار آب منفذی در این خصوص عامل تأثیرگذاری محسوب می‌شود.

دریائی و کاشفی‌پور (۱۳۹۰) تاثیر افزایش ماسه بادی بر روی خصوصیات مقاومتی مخلوط خاک آهک را مورد بررسی قرار دادند به این منظور خاک در نسبت‌های اختلاط مختلف به صورت همزمان با درصدهای آهک صفر، ۳، ۵، ۷ و ۹ در صد و ماسه بادی صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ در صد مخلوط و در هر نسبت اختلاط اقدام به تهیه نمونه با استفاده از روش تراکم استاتیکی گردید. نمونه‌ها بعد از قرار گرفتن در ۳ دوره نگهداری ۷، ۱۴ و ۲۸ در شرایط اشباع و دمای ۲۵ درجه سانتیگراد مورد آزمایش تک‌محوری قرار گرفتند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که افزایش ماسه بادی به تنهایی تاثیر اندکی در خصوصیات مقاومتی خاک دارد. ماکزیمم مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک در نسبت اختلاط ۷ درصد آهک و ۱۰ درصد ماسه بادی حاصل شد.

گالاقیر (۲۰۰۰) در مطالعه‌ای بیان داشت که تثبیت لایه‌های خاک‌های مستعد روانگرایی با استفاده از نانو ذرات روشی نوین و در حال توسعه است. در این روش که تثبیت تدریجی نام گرفته فرض بر این است که سیلیکای کلوئیدی در اثر جریان آب زیرزمینی و یا تنظیم مناسب الگوی آن، به صورت آرام و تدریجی در تمامی سایت مورد نظر که در معرض روانگرایی است پخش می‌گردد و پس از گیرش، منجر به اصلاح آن می‌شود. این روش به ویژه برای مکان‌های بسته و توسعه یافته که دارای سازه‌های حساس به تغییر شکل و ارتعاش می‌باشند، مناسب می‌باشد.

حیدری‌زاده (۱۳۶۹) تلفات نشت آب از کانال‌های آبیاری را به وسیله یک مدل عددی بررسی کرد. در این مدل ریاضی، پدیده نشت به صورت جریان دو بعدی اشباع و ماندگار در محیط‌های متخلخل اطراف کانال فرض شده و معادله جریان با روش عددی تفاضل‌های محدود حل شده است. نتایج به

دست آمده از مدل ریاضی برای دو کانال، با نتایج اندازه‌گیری نشت به روش حوضچه‌ای مقایسه گردید. مقدار نشت اندازه‌گیری شده برای دو کانال ۱/۱۷ و ۰/۴ مترمکعب در روز و نتیجه شبیه‌سازی مدل در حدود ۱/۲۱ و ۰/۴۹ مترمکعب در روز به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل ریاضی تهیه شده با تقریب نسبتاً خوبی، میزان نشت را از کانال پیش‌بینی می‌کند.

زمردیان و عبدالله‌زاده (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای تاثیر زهکش‌های افقی بر پایداری شیروانی بالادست سدهای خاکی در حین تخلیه سریع مخزن را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که در صورت وجود یک زهکش افقی دبی خروجی در حین تخلیه سریع مخزن ۲۹٪ بیشتر از حالت بدون زهکش و افزایش ضریب اطمینان حداکثر تا ۱۲٪ حالت بدون زهکش می‌باشد. با لحاظ نمودن دو و سه زهکش دبی تخلیه مخزن به ترتیب حداکثر ۸۱٪ و ۶۰٪ بیشتر از حالت بدون زهکش و افزایش ضریب اطمینان به ترتیب حداکثر ۳۱٪ تا ۴۸٪ حالت بدون زهکش خواهد بود. قرارگیری زهکش‌ها در شیروانی بالادست باعث استهلاک فشار آب حفره‌ای اضافی ناشی از تخلیه مخزن و بهبود پایداری می‌گردد.

بهراملو (۲۰۱۲) اقدام به بررسی ارزیابی تلفات نشت در کانال‌های آبیاری با پوشش سنگی در مناطق سرد سیر و تاثیر آن بر ذخایر منابع آب نموده است. برای این منظور ابتدا ۶ مورد از کانال‌های مذکور به طول ۱۵/۲۵ کیلومتر انتخاب، مشخصات فنی آنها تعیین و مقادیر نشت آب به روش حجم ورودی-خروجی اندازه‌گیری شده است. بر اساس نتایج بدست آمده مقدار نشت آب از کانال‌های انتخابی بین ۰/۲۴ مترمکعب بر مترمربع بر روز تا ۰/۶۵ مترمکعب بر مترمربع بر روز و بطور متوسط ۰/۳۴ مترمکعب در متر مربع در روز اندازه‌گیری شده که معادل ۲۰٪ تلفات از پوشش بتنی منطقه تعیین شده است. ایشان نتیجه گرفتند که با کاربرد پوشش سنگ و ملات به جای پوشش بتنی سالانه ۶/۴ میلیون مترمکعب در کل استان و معادل ۲۰٪ حجم سد اکباتان از تلفات آب منطقه کاسته شده و می‌توان برای استفاده بهینه برنامه ریزی کرد.

برونز و آکوستا (۲۰۱۱) فرسایش درونی و تخریب حاصل از نیروهای اشباع و نشت کنترل شده ناشی از تغییرات ناگهانی سطح آب مخزن را از دلایل اصلی تخریب کانال‌های خاکی معرفی نمودند.

سهرابی و همکاران (۱۳۸۴) به منظور بررسی کانال‌های انتقال و توزیع آب در شبکه آبیاری گیلان و فومنت طول‌های از کانال اصلی و کانال‌های درجه ۱، ۲ و ۳ هر منطقه بر مبنای کیفیت‌های مختلف و نوع پوشش انتخاب و دبی در مقاطع ورودی و خروجی این قطعات در زمان‌های مختلف و نوع پوشش انتخاب و دبی در مقاطع ورودی و خروجی این قطعات در زمان‌های مختلف روز و در طول فصل آبیاری به وسیله مولینه اندازه‌گیری شد. متوسط بازده انتقال در کانال‌های بتنی با طراحی و اجرای عالی، بتنی با طراحی و اجرای متوسط، خاکی در قطعاتی به طول ۱۱۰۰ متر به ترتیب برابر ۹۰/۹، ۸۲/۵، ۷۷/۲ و ۶۹/۹ درصد به دست آمد.

صدیقی اصل و همکاران (۱۳۸۷) به بررسی آزمایشگاهی کنترل نشت از پی‌های آبرفتی با استفاده از پرده آب‌بند و بلانکت (پتوی رسی) پرداخته‌اند. نتایج ایشان نشان داد که نسبت طول بهینه بلانکت و عمق پرده آب‌بند به عمق آب مخزن و ضخامت پی به منظور حداقل نمودن دبی نشت و کنترل فرسایش درونی به ترتیب برابر ۸ و ۰/۸ می باشد.

یاراحمدی (۱۳۹۰) در مطالعه‌ای تاثیر آهک بر نفوذپذیری خاک‌های رسی را مورد بررسی قرار داد. آزمایش نفوذپذیری به روش بار افتان روی نمونه‌ها انجام گرفت و از درصدهای مختلف آهک (۰، ۴، ۶، ۸ و ۱۲) استفاده شد. نتایج نشان داد که هدایت هیدرولیکی در حالت بدون آهک از  $10^{-5} \times 4/85$  سانتی‌متر بر ثانیه تا  $10^{-7} \times 3/65$  سانتی‌متر بر ثانیه به ازای افزایش ۱۲٪ آهک کاهش پیدا کرد و به عبارتی این ضریب ۹۹٪ کاهش از خود نشان داد.

عبدی و پارسا پژوه (۱۳۸۸) در مطالعه‌ای تأثیر آهک و بنتونیت را بر نفوذپذیری دو نوع خاک ماسه‌ای و رسی بررسی نمودند. مصالح افزودنی بین صفر تا حداکثر ۹ درصد وزن خشک خاک متغیر بوده است. نتایج ایشان نشان داد که به کارگیری بنتونیت باعث کاهش نفوذپذیری ماسه شده است، در

صورتی که آهک کارآیی در کاهش این خصوصیت نداشته است. در نمونه رسی، آهک مصالح مؤثرتری نسبت به بنتونیت در کاهش نفوذپذیری بوده و افزودن توأم بنتونیت و آهک، هر چند در کاهش نفوذپذیری مؤثر عمل کرده، اما در درصدهای مشخص کارآیی لازم را نسبت به آهک به تنهایی نشان نداده است. برای کاهش نفوذ پذیری ماسه به کمتر از  $10^{-7}$  m/s مقدار بهینه بنتونیت ۸/۵ درصد و برای خاک رس مقادیر بهینه آهک و بنتونیت به ترتیب ۱/۷ و ۲/۷ درصد تعیین شد.

نیلارخا و همکاران (۲۰۰۵) در پژوهشی برای کاهش نشت استخر پرورش ماهی روش‌های ۱- تراکم استخر با الف) فضولات دامی (کود حیوانی)، ب) برگ‌های نخل و ج) تفاله نیشکر، ۲- پوشش استخر با الف) سیمان و ماسه (نسبت اختلاط ۱:۸۹)، ب) آهک و ماسه (نسبت اختلاط ۱:۲) و ج) آهک، ماسه و صدف دریایی (نسبت اختلاط ۱:۳:۳) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که میزان نشت به ترتیب ۶/۹، ۷/۳، ۷/۱، ۲/۴، ۶/۳ و ۵/۱ مترمکعب بر مترمربع بر روز در مقایسه با مقدار ۱۴/۹ در استخر شاهد برآورد گردیده است که به‌طور متوسط می‌توان گفت افزودن این مواد باعث کاهش بیش از ۵۰ درصدی مقدار نشت گردیده است.

جت و همکاران (۲۰۱۱) به برآورد اثر پوشش خاک آهکی در کاهش نشت از استخر کشاورزی در اکوسیستم اراضی خشک پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که بین نشت از استخر با تراز آب موجود در آن رابطه رگرسیونی خطی وجود دارد و پوشش خاک آهکی تکنیک کاملاً اقتصادی برای کاهش نشت از استخرها می‌باشد. با کاربرد این خاک ۶۲ درصد از میزان نشت استخر کاسته شده و به مقدار  $1/05$  cm/day تنزل یافته است.

سوبوهی و سنایتی (۲۰۱۳) در پژوهشی تلفات آب از استخر و مسائل اقتصادی مربوط به آن در کشور هندوستان را بررسی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که نشت آب در استخر پوشش دار شده با خاک یکسان در طول یک سال ۳۲۶ لیتر بر روز و در استخر غیر پوشش دار ۲۴۰۰۰۰ لیتر بر روز بوده که به

عبارتی ۹۸٪ از میزان نشت کاشته شد. نسبت سود به هزینه در استخر پوشش ۳/۰۴ درصد و در غیر پوشش دار ۱/۶۴ درصد برآورد گردید.

کاهلون و کمپر (۲۰۰۴) در پژوهشی به بررسی تاثیر دیواره‌های کانال در میزان نشت از کانال پرداختند. نتایج ایشان نشان داد در صورت بهبود دیواره کانال (پوشش کانال با پرده آب‌بند) دبی نشت به اندازه ۲۵ درصد کاهش پیدا می‌کند و ۸۰ درصد مقدار نشت از ۸ سانتی‌متری بالای خاکریز کانال‌های قدیمی انفاق می‌افتد.

یوسفی و همکاران (۱۳۹۴) به مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی تأثیر سپری‌های قائم و مایل در کنترل نشت و پدیده‌ی جوشش در پی سازه‌های آبی پرداختند. نتایج نشان داد که به‌کارگیری پرده‌ی آب‌بند مورب با زاویه‌ی ۶۰ درجه نسبت به افق در کاهش میزان دبی نشت، فشار بالابر، گرادیان هیدرولیکی و جلوگیری از رخ دادن پدیده‌ی مخرب جوشش و فرسایش درونی در مقایسه با به‌کارگیری پرده‌ی آب‌بند قائم بسیار مؤثرتر است. همچنین شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W مبتنی بر روش اجزای محدود نشان داد که مدل با دقت مناسبی نتایج را نسبت به داده‌های آزمایشگاهی برآورد می‌کند

عبدی و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای تثبیت خاک با آهک و تسلیح با ژئوگرید را به صورت همزمان مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که افزودن حداقل ۳ درصد آهک به خاک با زمان عمل‌آوری ۲۸ روزه باعث افزایش مقاومت فشاری خاک از ۳/۷ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به ۶/۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌شود. بر این اساس بیشترین مقاومت فشاری با افزودن ۷٪ آهک به خاکشده است. ایشان همچنین گزارش کردند که اضافه نمودن یک یا دو لایه ژئوگرید تأثیر معنی داری روی مقاومت فشاری نداشته و نمونه‌های مسلح و غیر مسلح مقاومت‌های یکسانی در زمان شکست از خود نشان داده‌اند.

عراق علوی (۱۳۷۳) در پژوهشی روش‌های تجربی برآورد نشت از کانال‌های زیر دست سد زاینده‌رود را مورد بررسی قرار داد. نتایج ایشان نشان داد که سهم نشت از کل تلفات آب ۹۸/۵ درصد می‌باشد که متوسط تلفات آب در کانال‌های درجه یک ۰/۰۷۲ مترمکعب بر مترمربع در روز، کانال‌های درجه دو ۰/۱۵ مترمکعب بر مترمربع در روز، کانال‌های درجه سه ۰/۶۹۶ مترمکعب در متر مربع در روز و در کانال‌های درجه چهار ۰/۶۶۲ مترمکعب در متر مربع در روز می‌باشد.

نیوتن و پرلی (۲۰۰۶) مقدار تلفات آب را برای یک کانال خاکی به طول ۸/۲ کیلومتر را در میکلی فنلاند مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که میزان تلفات ۲۵٪ و حجم تلفات در مدت ۲۱۰ روز فصل آبیاری ۱۱/۹ میلیون مترمکعب می‌باشد. ایشان بیان کردند که با کنترل تلفات حدود ۴۵٪ از آب مصرفی صرفه‌جویی خواهد شد.

شیب پایدار مناسب نه تنها برای کانال‌های بلکه برای کانال‌های با پوشش بتنی هم یک پارامتر بسیار مهم می‌باشد. نتایج یک مطالعه موردی در مورد خرابی‌های کانال انتقال آب در ایالات متحده آمریکا به طول ۲۲ مایل نشان داده که بیشترین خسارت وارده به کانال به سبب عدم انتخاب صحیح شیب‌جانبی و لغزش‌های صورت گرفته در آن بوده و هزینه‌های وارده بر اثر تخریب این کانال در حدود ۳ میلیون دلار برآورد شده است (پروژه الدورادو، ۲۰۰۲).

شریفی و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی رفتار پوشش‌های بتنی کانال‌های آبیاری قرار گرفته روی سه نوع بستر متشکل از خاک بدون مواد افزودنی، خاک دارای ۲٪ آهک، خاک دارای مخلوط ۴٪ سیمان و ۴٪ آهک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد با افزودن آهک ۲٪ و مخلوط سیمان و آهک ۴٪ به خاک مدول الاستیسته خاک افزایش یافته و باعث کاهش لنگرهای خمشی وارد بر پوشش بتنی کانال شده است.

بهراملو (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای بیان داشت تلفات نشت از کانال‌های خاکی بدون پوشش بین ۰/۶۸ مترمکعب بر مترمربع بر روز تا ۳/۸۴ مترمکعب بر مترمربع بر روز و به طور متوسط ۲/۳۹ مترمکعب بر

مترمربع بر روز و در کانال های پوشش دار بتنی بین ۱/۱۲ مترمکعب بر مترمربع بر روز تا ۲/۹۵ مترمکعب بر مترمربع بر روز و به طور متوسط ۱/۷۴ متر مکعب بر متر مربع بر شبانه روز است. وی همچنین گزارش کرد پوشش بتنی کانال های آبیاری با تاثیر عوامل مختلف درونی، بیرونی، ذوب و یخبندان مکرر در اقلیم سرد به مرور دچار ترک خوردگی و تخریب شده و منجر به کاهش مقاومت فشاری در حد ۶۱ کیلوگرم بر سانتی مترمربع شده و در نهایت تلفات نسبتا زیاد آب و اقتصادی را ایجاد می کند.

بهراملو (۱۳۹۱) در بررسی تاثیر پوشش بتنی بر کنترل نشت از کانال های آبیاری در استان همدان بیان داشت که تحت شرایط اقلیم سرد منطقه، کانال های بدون پوشش دارای تلفات نشت آب ۲/۳۹ مترمکعب بر متر مربع بر روز (۱۶/۴ درصد در هر کیلومتر) می باشد. در حالی که میزان نشت پس از اجرای پوشش بتنی به ۱/۷۴ متر مکعب بر متر مربع بر روز (۸/۲ درصد در هر کیلومتر) می باشد. که نشان دهنده ای میزان نشت در کانال با پوشش بتنی معادل ۷۳ درصدی آن در کانال بدون پوشش است.

عابدی کویابی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی دوام و پایداری خاک های رسی تثبیت شده با آهک هیدراته در مجاورت سازه های آبی را با افزودن درصدهای مختلف آهک هیدراته شامل صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد با دو حالت رطوبت بهینه و رطوبت اشباع مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که با اضافه نمودن ۵ درصد آهک هیدراته به خاک رسی بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده خاک در دو حالت رطوبت بهینه و رطوبت اشباع حاصل می شود.

شاهرخ نیا و زارع (۲۰۱۴) به بررسی فنی و اقتصادی پوشش کانال های آبیاری شهرستان داراب پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که پوشش دار نمودن کانال های آبیاری سنتی در سه منطقه از شهرستان داراب بین ۸۵ تا ۹۷ درصد در کاهش نشت آب تاثیر داشته است. در کانال های خاکی سنتی حسن آباد، منصوریه و جنت شهر به ترتیب حدود ۴، ۷ و ۳ درصد از دبی کانال در هر کیلومتر



از طول کانال، در روز اول آبیاری در اثر نشت به هدر می‌رود که با پوشش نمودن این کانال‌ها تلفات نشت به کمتر از ۰/۶ درصد رسیده است. همچنین بررسی‌های اقتصادی نشان داده با نرخ تنزل ۸ درصد پوشش کانال‌های انتقال آب در هر سه منطقه اقتصادی می‌باشد.

## ۲-۶-۲ مطالعات مرتبط با کاربرد نانو در پایداری شیب جانبی کانال‌ها

لی (۲۰۰۴) در تحقیقی با افزودن فقط خاکستر بادی و همچنین نانو سیلیس و خاکستر بادی به صورت همزمان به بتن متعارف پرداخت. نتایج وی نشان داد که مقاومت فشاری نمونه حاوی ۰/۴٪ نانو سیلیس و ۵۰٪ خاکستر بادی، ۸۱٪ بیشتر از نمونه‌ی حاوی فقط ۵۰ درصد خاکستر بادی بوده است و همچنین نمونه‌ی حاوی نانو سیلیس در ۵۶ روز اول مقاومت بیشتری نسبت به بتن بدون نانو سیلیس کسب کرده است.

شوش پاشا و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی تاثیر سیمان و نانو سیلیس بر مقاومت برشی خاک بابلسر بر روی نمونه‌های حاوی ۴، ۶ و ۸ درصد وزن خشک ماسه، سیمان و ۱۰، ۳۰ و ۵۰ درصد وزنی سیمان، نانو سیلیس را بررسی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که در جایگزینی ۰/۴٪ سیمان با ۰/۳۰٪ نانو سیلیس در تنش نرمال ۴۰ کیلوپاسکال مقاومت برشی به ۱۰۵ کیلوپاسکال می‌رسد و در جایگزینی ۰/۳۰٪ نانو سیلیس با ۰/۸٪ سیمان چسبندگی به ۲۵ کیلوپاسکال می‌رسد که بیشترین مقدار در طرح اختلاط می‌باشد. همچنین در جایگزینی ۰/۳۰٪ نانو سیلیس با ۰/۸٪ سیمان زاویه اصطکاک داخلی ۷۵ درجه می‌باشد.

نیتو و رمیا (۲۰۱۳) در پژوهشی دو نوع خاک متفاوت به نام خاک لاتریتی (lateritic(CH)) و رس کائولینیت (CL) را با نسبت‌های متفاوتی از نانو رس (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۰/۲٪) ترکیب نمودند و خواص ژئوتکنیکی خاک را مورد بررسی قرار دادند. برای بررسی اثر نانو رس آزمایش‌های تراکم، تحکیم، نفوذپذیری و مقاومت فشاری تک محوری بر هر دو نوع خاک انجام شده و درصد بهینه‌ی نانو رس یک درصد انتخاب نمودند. نتایج ایشان نشان داد که مقاومت فشاری تک محوری افزایش ۰/۱۰۴٪ برای خاک

لاتریتی و ۰.۸۷٪ برای رس کائولینیت بود و هدایت هیدرولیکی نیز برای خاک لاتریتی ۰.۹۹٪ و رس کائولینیت ۰.۹۶٪ کاهش یافته و به میزان  $10^{-7} \times 1$  سانتی متر بر ثانیه رسید که در نتیجه می توان از این ماده به عنوان لایه ی محافظی برای محل دفن زباله و همچنین به عنوان سد هیدرولیکی استفاده نمود. والیان (۲۰۰۰) در مطالعه ای میزان کاهش نشست از کانال ها را با کاربرد نوعی پلیمر (polyacrylamides) در کلرادو به روش جریان ورودی-خروجی مود بررسی قرار داد. نتایج ایشان نشان داد که این روش منجر به ته نشینی ذرات معلق، ترسیب و کاهش نشست آب در کانال به میزان ۸۴/۱ درصد گردیده که در این حالت تلفات نشست از کانال ۰/۰۲ مترمکعب بر مترمربع بر روز برآورد شده است.

بهاری و شاه نظری (۱۳۹۴) به بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانو رس پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با اضافه کردن نانو کمپوزیت رس با نسبت وزنی ۱٪ به خاک و انجام آزمایش مقاومت فشاری تک محوری و تحکیم روی خاک، میزان مقاومت برشی، خاصیت چسبندگی و تراکم پذیری خاک به ترتیب برابر با ۱۴/۱۳، ۱۴/۱۳ و ۸۲/۷۶ درصد افزایش یافته و زاویه شکست و نسبت تخلخل نهایی نیز کاهش یافته است. در نتیجه با ترکیب ماده نانو رس به خاک پایداری و استحکام خاک بیشتر شده و مشکلات ناشی از فرسایش بستر و همچنین حمل مصالح قرضه برای زیرسازی کانال وجود نخواهد داشت.

خلیل زاده وحیدی و مرادی (۱۳۹۵) به بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانو رس و خاکستر بادی بر مقاومت فشاری ملات سیمان پرداختند. نتایج ایشان نشان داد با اضافه کردن ۳٪ و ۵٪ نانو رس در ملات به ترتیب باعث افزایش ۲۷/۲ و ۱۵/۱ درصدی مقاومت فشاری در دوره ۲۸ روزه و افزایش ۲۸/۴ و ۲۲/۴ درصدی آن در دوره ۹۰ روزه شده است. در حالی که نمونه های ملات ماسه سیمان دارای خاکستر بادی ۱۵٪ و نانو رس ۳ و ۵ درصد توام، بترتیب باعث افزایش ۱/۶ و ۴/۵ درصدی در دوره ۲۸ روزه و افزایش ۱۰ و ۱۶ درصدی در دوره ۹۰ روزه می شود.

بهراری و همکاران (۱۳۹۵) بیان داشتند کارایی آب‌بندان با نشت آب از آن‌ها کاهش می‌یابد لذا یک راهکار، افزودن مواد مختلف به خاک آب‌بندان است. ایشان در پژوهشی در صدهای مختلف نانو رس، ۱۱٪ سیمان و ۱٪ وزنی آهک برای کاهش هدایت هیدرولیکی خاک آب‌بندان را مورد استفاده قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که ترکیب خاک با نانو رس، سیمان و آهک به ترتیب باعث کاهش ۵۸٪، ۵۱٪ و ۲۸٪ تلفات نشت گردید که بیشترین میزان کاهش نشت مربوط به خاک حاوی ۵٪ نانو رس می‌باشد. ایشان همچنین بیان کردند با افزودن ۵٪ نانو رس هدایت هیدرولیکی خاک از  $10^{-4} \times 1/58$  متر بر ثانیه به  $10^{-5} \times 2/88$  متر بر ثانیه کاهش می‌یابد.

شن و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی از نانو آهک‌هیدراته 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 نسبت به نمونه شاهد بدون نانو آهک‌هیدراته شد.

## ۲-۶-۳ مطالعات عددی

نعیمی و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی میزان تاثیر دیوار و پرده آب‌بند بر کاهش نشت با افزایش عمق نفوذ در محور و تکیه‌گاه راست سد مخزنی میرزای شیرازی به روش عددی پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که مقدار نشت از محور و جناح راست سد در طول یک سال  $22548240$  مترمکعب برآورد شده که با افزایش عمق نفوذ دیوار و پرده آب‌بند از ۲۰ به ۳۰ متر در زیر تراز پی، نشت به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد که با استفاده از تمهیدات بکار رفته دیوار و پرده آب‌بند میزان نشت در طول یک سال حدود ۸۰ درصد کاهش می‌یابد.

پاکباز و همکاران (۲۰۰۹) در تحقیقی با مدل SEEP/3D به ارزیابی ساخت دیوار آب‌بند بتن پلاستیک در تکیه‌گاه راست و چپ سد خاکی کرخه در کاهش مقدار تراوش پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با ساخت دیوار آب‌بند چپ و راست مقدار تراوش به ترتیب ۶۰ و ۲۰ درصد کاهش می‌یابد.

سیدی و همکاران (۱۳۸۷) در تحقیقی نشت آب در حالت سه بعدی از پی و بدنه سد خاکی اعلی دوت استان فارس را به طور همزمان با نرم افزار SEEP/3D مورد بررسی قرار دادند. پس از محاسبه مقدار نشت برای ترازهای مختلف آب و برای ماه‌های مختلف، میزان نشت در حالت استفاده از آب‌بند نیز محاسبه شد. نتایج ایشان نشان داد که مقدار کل نشت در طول یک سال  $29/93 \times 10^6$  مترمکعب برآورد شده است. پس از کاربرد آب‌بند این مقدار نشت به  $640108$  مترمکعب کاهش یافته است که نشان از کاهش ۹۸ درصدی میزان نشت با استفاده از آب‌بندان می‌باشد.

گوهرنژاد و همکاران (۲۰۱۰) در مطالعه‌ای اثر ضخامت پتوی رسی در پیشگیری از نشت مخزن سد را با استفاده از نرم‌افزار SEEP/W بررسی نمودند. نتایج ایشان نشان داد که پتوی رسی با طول ۱۵۰ متر و ضخامت ۷۵ سانتی‌متر که کاملاً دیواره بالادست را پوشانده منجر به کاهش نشت به میزان ۷۳ درصد می‌شود.

رستمیان و کویایی (۲۰۱۲) به ارزیابی نرم‌افزار سپ در برآورد نشت از کانال‌های خاکی پرداختند. به همین منظور میزان نشت در هفت کانال خاکی درجه ۳ و ۴ از شبکه آبیاری زاینده‌رود توسط مدل SEEP/W شبیه‌سازی شد و با نتایج بیلان آبی مقایسه گردید. سپس میزان نشت با چهار روش تجربی دیویس و ویلسون، مولس ورث ینی دومیا، موریتز و اینگهام نیز محاسبه شدند. ضریب تبیین برای چهار روش تجربی و مدل SEEP/W به ترتیب  $9/3$ ،  $6/7$ ،  $37/3$ ،  $18/3$  و  $78/9$  درصد به دست آمد که مبین توانایی بالای مدل SEEP/W در تخمین میزان نشت آب از کانال درجه ۳ منطقه مطالعاتی و ضعف معادلات تجربی بود.

پایدار (۱۳۷۰) تلفات نشت از کانال‌های آبیاری را به وسیله یک مدل ریاضی بررسی کرد. مدل ریاضی تهیه شده پدیده نشت را به صورت یک جریان دو بعدی اشباع و ماندگار در محیط متخلخل اطراف کانال فرض کرده و معادله جریان را با روش عددی تفاضل محدود حل نموده است. نتایج به دست آمده از مدل ریاضی برای دو کانال، با نتایج اندازه‌گیری نشت به روش حوضچه‌ای مقایسه گردید. مقدار

نشت اندازه‌گیری شده برای دو کانال ۱/۱۷ و ۰/۴ و نتیجه مدل ۱/۲۱ و ۰/۴۹ مترمکعب بر متر مربع بر روز به دست آمد. ایشان چنین نتیجه گرفت که مدل ریاضی تهیه شده با تقریب نسبتاً خوبی میزان نشت را از کانال پیش بینی می‌کند.

سیواستاوا و سیواکومار بابو (۲۰۱۱) کاربرد ژئوگرید در پایدار سازی شیب بالادست سد خاکی را با نرم‌افزار Plaxis بررسی کردند. نتایج ایشان نشان داد که استفاده از ژئوگرید باعث افزایش ضریب اطمینان از ۰/۸۵ درصد به ۱/۸۳ درصد می‌شود.



## فصل ۳: مواد و روش

### ۳-۱ مقدمه

در این فصل به تشریح روش کار در خصوص آماده سازی شرایط آزمایشگاهی، ساخت نانو آهک هیدراته و تعیین پارامترهای مکانیکی و هیدرولیکی خاک مورد آزمایش پرداخته شده است. همچنین نحوه ساخت مدل فیزیکی بیان و آزمایش‌های انجام شده توضیح داده شده است.

### ۳-۲ مخزن نشت و نفوذ (Seepage and Drainage Tank)

مدل آزمایشگاهی مخزن نشت و نفوذ مستقر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود به شکل مکعب مستطیل با ابعادی به طول ۱۸۵ سانتی‌متر، عرض ۵۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر می‌باشد که به ترتیب بر روی ورق پلکسی گلاس، صفحه سنگی و میزی فلزی قرار گرفته است. در جداره‌های فلوم از ورق های پلکسی گلاس به ضخامت ۱ سانتی‌متر استفاده شده است. در نمای جلو و پشت فلوم ۱۶ نبشی از جنس پلکسی گلاس در فاصله مشخصی از یکدیگر قرار گرفته اند که از جداره‌های فلوم محافظت می‌کنند. سه میله فلزی بالای مدل وظیفه تنظیم فاصله جداره‌های فلوم را برعهده دارند. پیزومترهای فلوم در ۹ ردیف با پانزده مقطع افقی با گام مکانی ۱۱ سانتی‌متر و در مجموع ۱۳۵ پیزومتر روی جداره تعبیه شده است. درون هر پیزومتر توری نصب شده است که فقط اجازه ورود آب از داخل فلوم به لوله پیزومتر را می‌دهد. در دو طرف فلوم دو مخزن آب قرار دارد که مخزن بالادست و پایین دست نام‌گذاری شدند. شیرهایی در زیر فلوم جهت تخلیه آب به مخزن ذخیره قرار دارد. دو لوله تنظیم تراز آب در مخزن بالادست و پایین دست وجود دارد که به مخزن ذخیره آب متصل هستند. روی هر کدام از مخزن‌ها خط کش مدرجی جهت نشان دادن ارتفاع تراز آب برحسب میلی‌متر چسبانده شد. شبکه توری با شماره ۱۵۰ در حدفاصل مخازن فلوم با کانال خاکی قرار گرفته است که از شسته شدن مصالح به مخزن بالادست و پایین دست جلوگیری می‌کند. مخزن ذخیره آب در ابعادی به طول ۱۴۲، عرض ۷۱ و ارتفاع ۴۶ سانتی‌متر در زیر فلوم قرار دارد. سیستم جریان آب در فلوم چرخشی بوده و یک الکتروپمپ آب را از مخزن ذخیره توسط لوله به



مخزن بالادست هدایت می‌کند. شیرهایی جهت تنظیم جریان ورودی به مخزن بالادست بر روی لوله بالای پمپ نصب شدند. در شکل ۱-۳ تصویر کلی دستگاه تانک نشت و نفوذ نمایش داده شده است.

### ۱-۲-۳-۲ تابلو پیزومتری

تابلوی به طول ۳۶/۵، عرض ۳ و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر است که ۱۰۰ پیزومتر با لوله‌های شفاف به ارتفاع ۶۳ سانتی‌متر درون آن جای گرفته‌اند. کاغذهایی شطرنجی و مدرج بر روی تابلو پیزومتری جهت قرائت فشار پیزومتری چسبانده شدند.



شکل ۱-۳ تصویر مخزن نشت و تابلو پیزومتری مورد استفاده در تحقیق حاضر

### ۳-۳ مواد و مصالح

خاک مورد استفاده در این تحقیق ماسه بادی شسته شده می‌باشد که از منطقه مجن در شهرستان شاهرود تهیه شده است. برای تثبیت شیب جداره کانال خاکی از آهک هیدراته و نانو آهک هیدراته استفاده شده است. نانو آهک مورد استفاده در این تحقیق به صورت الیاف (پودر) در آزمایشگاه تجزیه مواد معدنی و کانه آرایی دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود تهیه شد.

### ۳-۳-۱ مصالح کف مخزن نشت

یک لایه خاک رس با ضریب آبگذری بسیار کم به ضخامت ۵ سانتی‌متر برای جلوگیری از فرار آب از سطح خاک بین خاک (کف مخزن و ایجاد بستر غیرقابل نفوذ) در کف فلوم قرار گرفت.

### ۳-۳-۲ مصالح زهکش

مخلوطی از شن و سنگریزه می‌باشند که درون مخزن نشت حدفاصل شبکه‌های توری و مصالح پی قرار گرفته‌اند و دلیل استفاده از این مصالح، عدم شسته شدن و حرکت مواد ریزدانه به درون مخزن‌های فلوم است.

### ۳-۳-۳ مصالح بدنه کانال

مصالحی با  $D_{50} = 0.65$  میلی‌متر هستند که بین مصالح زهکش درون مخزن نشت قرار دارند.

### ۳-۳-۴ مصالح پوشش کانال

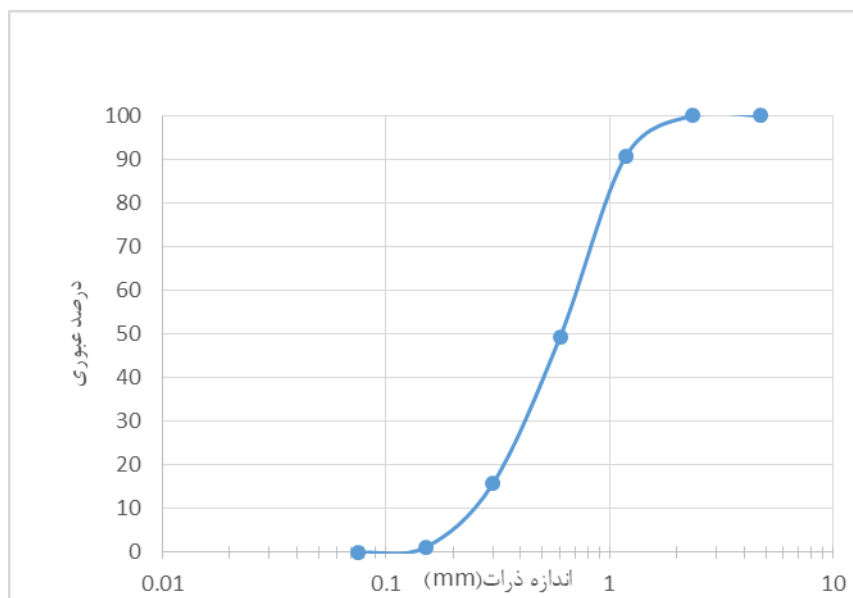
مصالح پوشش کانال مخلوطی از مصالح جنس بدنه با آهک هیدراته با ترکیب وزنی ۰.۲٪، ۰.۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ می‌باشد که از الک ۰/۲۵ میلی‌متر عبور داده شده است. همچنین نانو آهک هیدراته در نسبت وزنی ۰.۳٪ و ۰.۵٪ نیز استفاده شد. پوشش‌های مذکور به ضخامت یک سانتی‌متر روی شیب جداره کانال اجرا شد.

### ۳-۴ آزمایش دانه بندی خاک

آزمایش دانه‌بندی برای خاک مورد استفاده در این تحقیق در آزمایشگاه مکانیک خاک دانشگاه صنعتی شاهرود انجام شد. ابتدا نمونه خاک مورد نظر از الک عبور داده شد و آن‌ها را شسته و ذرات رس از آن جدا شدند. سپس نمونه خاک شسته شده خشک گردید و دو کیلوگرم از نمونه خاک جهت دانه‌بندی تهیه شد. مشخصات مصالح دانه‌بندی در جدول ۳-۱ و نمودار دانه‌بندی در شکل ۳-۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱-۳ مشخصات مکانیکی خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر

نوع مصالح	D <sub>50</sub> (mm)	ضریب یکنواختی C <sub>u</sub>
ماسه بادی شسته	۰/۶۵	۲/۷۷



شکل ۲-۳ نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده در تحقیق حاضر

### ۳-۵ نفوذپذیری

برای این منظور از آزمایش با بار ثابت که معمولاً برای تعیین ضریب نفوذپذیری ماسه‌ها و خاک‌های با نفوذپذیری بالا و مصالح زهکشی به کار می‌رود استفاده شد. شکل ۳-۳ نمایی از مدل آزمایشگاهی تعیین ضریب نفوذپذیری با بار ثابت را نشان می‌دهد. ضریب هدایت هیدرولیکی به روش بار ثابت برای خاک  $D_{50}=0.65$  میلی‌متر در جدول ۲-۳ ارائه شده است.



شکل ۳-۳ نمایی از مدل آزمایشگاهی تعیین ضریب نفوذپذیری با بار ثابت

جدول ۳-۲ مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی خاک مورد استفاده در این تحقیق به روش بار ثابت

۰/۶۵	اندازه متوسط ذرات خاک (mm)
۰/۰۰۰۵۵۱	ضریب هدایت هیدرولیکی (m/s)

### ۳-۶ جرم مخصوص حقیقی

با اندازه گیری وزن مخصوص حقیقی می توان میزان خلل و فرج خاک را مشخص نمود. البته حتما لازم است که وزن مخصوص ظاهری خاک نیز اندازه گیری گردد. نسبت وزن مخصوص ظاهری به وزن مخصوص حقیقی میزان خلل و فرج خاک را معلوم می کند. بدین منظور از روش پیکنومتر استفاده شد (جدول ۳-۳).

### ۳-۷ جرم مخصوص ظاهری

جرم مخصوص ظاهری یک پارامتر فیزیکی خاک می باشد که بیان کمی آن در بسیاری از مطالعات آب و خاک اهمیت بسیاری دارد. این پارامتر در محاسبه تخلخل و رطوبت حجمی خاک کاربرد دارد. جرم مخصوص ظاهری در این تحقیق به روش خشک و با استفاده از سیلندر اندازه گیری شد. مقادیر جرم مخصوص ظاهری و جرم مخصوص حقیقی خاک در جدول ۳-۳ نمایش داده شد.

جدول ۳-۳ مقادیر جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک مورد استفاده در این تحقیق

جرم مخصوص ظاهری	جرم مخصوص حقیقی
$\rho_s$	$\rho_p$
۱/۵۷۵	۲/۲۲

### ۳-۸ ساخت نانو آهک هیدراته

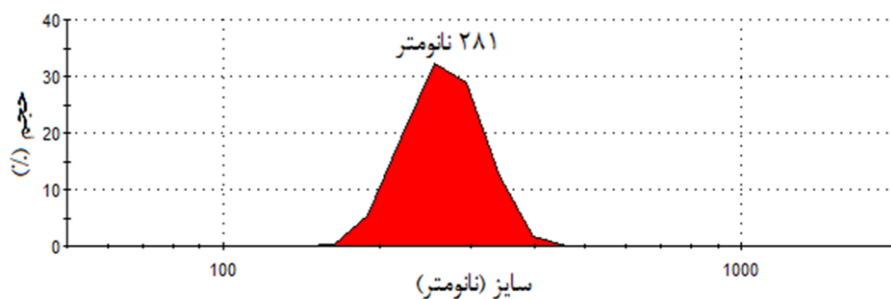
برای ساخت نانو آهک هیدراته از دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای مستقر در آزمایشگاه دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود استفاده شد. برای این منظور درصدهای مختلف الکل و آهک هیدراته، سرعت چرخش دستگاه و نسبت مواد به گلوله مورد آزمون و خطا واقع شد تا نانو آهک هیدراته در ابعاد مورد نیاز تولید گردد. پس از آن با ترکیب نسبت‌های فوق نانو آهک هیدراته به میزان مورد نیاز در آزمایش‌ها تولید گردید. در شکل ۳-۴ تصویری از دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای و اجزای آن نمایش داده شده است.



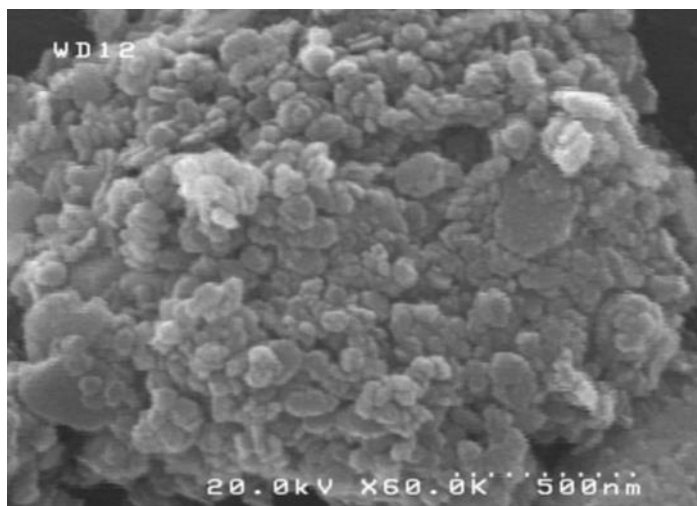
شکل ۳-۴ نمای شماتیک دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای

### ۳-۹ تعیین اندازه و شکل ذرات نانواهک هیدراته

برای شناسایی اندازه ذرات نانواهک هیدراته از آزمایش (X Ray Diffraction) XRD استفاده شد. شکل ۳-۵ توزیع اندازه ذرات نانواهک هیدراته بعد از آسیاب شدن، ارائه شده است. نانواهک هیدراته تولید شده با استفاده از دستگاه آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای، دارای میانگین اندازه ذرات ۲۸۱ نانومتر می‌باشد. علت کمتر شدن سایز نانواهک هیدراته تولید شده در این مطالعه به نسبت مطالعات محققین پیشین را می‌توان به دو عامل الف) استفاده از آسیاب گلوله‌ای سیاره‌ای که دارای سرعت و انرژی بیشتری نسبت به دستگاه‌های دیگر می‌باشد و ب) استفاده از عامل کنترل کننده فرآیند که باعث جلوگیری از لخته شدن ذرات نانواهک هیدراته می‌شود، مرتبط دانست. از میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM (Scanning Electron Microscope) برای تعیین شکل ذرات نانواهک هیدراته استفاده شده است. در شکل ۳-۶ تصویری از نانواهک هیدراته مورد استفاده در این پژوهش نمایش داده شده است.



شکل ۳-۵ توزیع اندازه ذرات نانواهک هیدراته بعد از آسیاب شدن



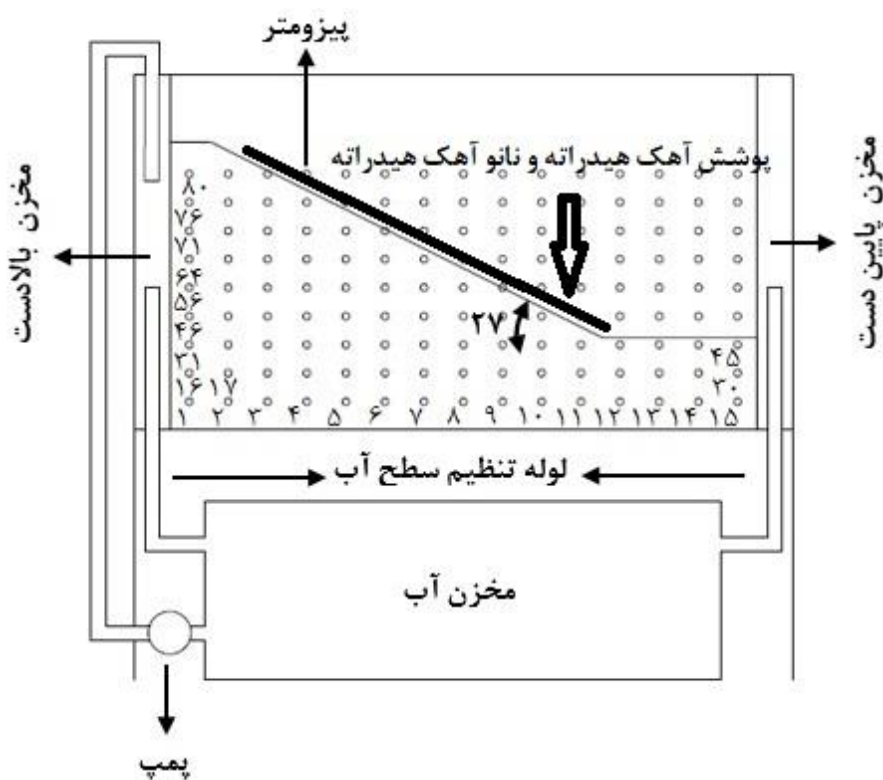
شکل ۳-۶ تصویر SEM از نانو آهک هیدراته مورد استفاده در این تحقیق

### ۳-۱۰ ساخت مدل فیزیکی

مدل فیزیکی این تحقیق در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود در دستگاه تانک نشت و نفوذ اجرا شد. برای ساخت مدل ابتدا خاک مورد استفاده در این پژوهش با دانه بندی مشخص ( $D_{50}=0.65$ ) الک و پس شسته تا هیچ‌گونه رسی نداشته باشد. سپس یک لایه از خاک رسی به ضخامت ۵ سانتی‌متر با درصد رس بالا به عنوان لایه غیرقابل نفوذ برای شبیه‌سازی بستر غیر قابل نفوذ و همچنین جلوگیری از فرار آب در مرز بین خاک و کف تانک نشت ایجاد شد. لایه‌های خاک را مرطوب کرده و سپس لایه‌هایی به ضخامت ۱۰ سانتی‌متر متراکم کرده تا به ارتفاع حداکثر ۵۵ سانتی‌متر نسبت به بستر غیرقابل نفوذ برسد. با برش زدن خاک اضافه، مقاطع شیب‌دار مورد نظر ( $۱:۱$ ،  $۱:۱/۵$ ،  $۱:۲$ ،  $۳:۴$ ) و کفی افقی مدل مطابق شکل ۳-۹ ایجاد شد. آب مورد استفاده در این آزمایش‌ها به وسیله الکترو پمپ جانبی به قدرت  $۱/۵$  کیلووات با دبی ۵ تا ۳۵ لیتر بر دقیقه و حداکثر ارتفاع پمپاژ ۴۰ متر، با یک مخزن دارای حجم مفید ۱۵۰ لیتر که در زیر این دستگاه تعبیه شده است تأمین شد. کنترل عمق آب در دو طرف مدل خاک به وسیله دو لوله قایم از جنس PVC که ارتفاع آن‌ها قابل تغییر است انجام شده و آب زهکشی شده دوباره به مخزن پایین باز می‌شود را تأمین

می‌کند. جهت قبل از انجام هر آزمایش همه پیزومترها با دقت هواگیری شده و از درست عمل کردن آنها اطمینان به دست آمد.

شکل ۷-۳ یک طرح کلی از مدل خاک با محل قرار گیری پیزومترها را نشان می‌دهد. همان طور که در 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 تراز سطح ایستابی در دو طرف کانال‌های انتقال آب یکسان است و نشت از کانال به صورت متقارن نسبت به محور مرکزی آن انجام می‌شود، در این پژوهش نصف مقطع عرضی کانال مدل شده است. شماره پیزومترها از سمت چپ و پایین برابر ۱ الی ۸۰ می‌باشد.



شکل ۷-۳ تصویر شماتیک مدل خاک و محل قرار گیری پیزومترها در این تحقیق



### ۱۱-۳ تعیین پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی

در تحلیل و طراحی‌های ژئوتکنیکی مانند تعیین ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی و عمیق، بررسی پایدار شیروانی‌ها و خاکریزها، تحلیل سازه‌های مدفون، طراحی دیواره‌های حائل نیاز به اطلاع از پارامترهای مکانیکی خاک می‌باشد. برای این منظور از دستگاه برش مستقیم مستقر در دانشکده عمران دانشگاه تبریز استفاده شد. در شکل ۳-۸ تصویری از دستگاه برش مستقیم و اجزای آن نمایش داده شده است. مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۳-۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳-۴ مقادیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی مصالح مورد استفاده در این تحقیق

نوع مصالح	درصد آهک هیدراته	درصد نانو آهک هیدراته	زاویه اصطکاک داخلی $\Phi$	چسبندگی C (KPa)
ماسه بادی شسته شده	۰	۰	۳۳	۰
ماسه بادی شسته شده	۲	-	۳۵	۰/۳۳
ماسه بادی شسته شده	۵	-	۳۵	۰/۸۲۵
ماسه بادی شسته شده	۱۰	-	۴۱/۸	۱/۶۵
ماسه بادی شسته شده	۲۰	-	۴۳/۵	۳/۳
ماسه بادی شسته شده	-	۳	۳۹/۲	۲/۹
ماسه بادی شسته شده	-	۵	۴۴/۷	۳/۳



شکل ۳-۸ نمای شماتیک دستگاه برش مستقیم

### ۳-۱۲ زمان و محل اجرای آزمایش

آزمایش‌های این تحقیق در مورخه ۱۳۹۶/۱۱/۱۵ در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی شاهرود شروع شده است و در مورخه ۱۳۹۷/۹/۲۰ آزمایش‌ها پایان یافت.

### ۳-۱۳ نحوه انجام آزمایش با مخزن نشت و نفوذ

#### ۳-۱۳-۱ بررسی پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت خاکریز کانال در حالت تخلیه کانال

هدف از این آزمایش بررسی پایداری کانال خاکی در شرایطی که آب در پشت کانال قرار دارد و در داخل کانال آب در جریان نیست. پس از ساخت و اجرای شیب خاکی مورد نظر با زوایای مورد نظر در دستگاه تانک نشت ابتدا لوله‌های مخازن بالادست و پایین دست دستگاه در تراز ۲۶۰ میلی‌متر تنظیم شد. برای ایجاد اختلاف بار، ابتدا تراز آب در کانال را به مقدار مورد نظر رسانده، زمانی که سطح آب به تراز مورد نظر رسید لوله‌های پیزومتری بالای تابلو از محل خود جدا شدند. آب درون لوله‌های پیزومتری جریان یافت و هواگیری پیزومترها انجام گرفت و لوله‌های پیزومتری مجدداً به تابلوی پیزومتریک متصل شد و پس از ماندگار شدن جریان اطلاعات برداشت شدند. سپس سطح ایستابی پایین دست را در تراز ۲۶۰ میلی‌متر ثابت نگه‌داشته شد و تراز سطح ایستابی بالادست را به آرامی ۵ سانتی‌متر 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. برای اطمینان از یکنواخت شدن جریان پس از ایجاد اختلاف بار مورد نظر، هرنیم ساعت و به صورت دو مرحله با استوانه مدرج و کرنومتر با دقت ۲ سی‌سی به اندازه‌گیری دبی حجمی نسبت به زمان پرداخته تا به یک 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 و با تخریب کامل کانال خاکی آزمایش پایان یافت. لازم به ذکر است در آزمایش‌های که پوشش کانال اجرا شد کلیه مراحل فوق تکرار گردید. برای سهولت در قرائت پیژومترها از ماده رنگی پرمنگنات پتاسیم استفاده شده است.

### ۲-۱۳-۳ بررسی پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت خاکریز کانال در حالت تغذیه کانال

در این آزمایش هدف بررسی پایداری کانال خاکی در شرایطی است که آب در داخل کانال جریان دارد. پس از ساخت و اجرای شیب خاکی مورد نظر با زوایای مورد نظر در دستگاه تانک نشت، ابتدا لوله‌های مخازن بالادست و پایین دست دستگاه در تراز ۲۶۰ میلی‌متر تنظیم شد. برای ایجاد اختلاف بار، ابتدا تراز آب در کانال را به مقدار مورد نظر رسانده، زمانی که سطح آب به تراز مورد نظر رسید لوله‌های پیژومتری بالای تابلو از محل خود جدا شدند. آب درون لوله‌های پیژومتری جریان یافت و هواگیری پیژومترها انجام گرفت و لوله‌های پیژومتری مجدداً به تابلوی پیژومتریک متصل شد و پس از ماندگار شدن جریان اطلاعات برداشت شدند.

### ۳-۱۴ آزمایش‌های انجام شده با مخزن نشت و نفوذ

در این تحقیق به ازای شیب‌های مختلف جداره کانال، درصد‌های مختلف پوشش آهک هیدراته و درصد‌های مختلف پوشش نانو آهک هیدراته آزمایش‌های مختلفی به منظور بررسی پایداری شیب جداره صورت پذیرفت که عناوین آن‌ها به صورت زیر ارائه گردیده است.

شیب کانال با زاویه ۲۷ درجه بدون پوشش.

شیب معکوس کانال با زاویه ۲۷ درجه بدون پوشش.

شیب کانال با زاویه ۳۴ درجه بدون پوشش.

شیب معکوس کانال با زاویه ۳۴ درجه بدون پوشش.

شیب کانال با زاویه ۴۵ درجه بدون پوشش.

شیب معکوس کانال با زاویه ۴۵ درجه بدون پوشش.

شیب کانال با زاویه ۴۵ درجه و پوشش کانال با ۲ درصد آهک هیدراته به ضخامت یک سانتی‌متر.

شیب کانال با زاویه ۴۵ درجه و پوشش کانال با ۵ درصد آهک هیدراته به ضخامت یک سانتی‌متر.

شیب کانال با زاویه ۴۵ درجه و پوشش کانال با ۱۰ درصد آهک هیدراته به ضخامت یک سانتی‌متر.

شیب معکوس کانال با زاویه ۴۵ درجه و پوشش کانال با ۱۰ درصد آهک هیدراته به ضخامت یک

سانتی‌متر.

شیب کانال با زاویه ۵۳ درجه بدون پوشش کانال.

شیب معکوس کانال با زاویه ۵۳ درجه بدون پوشش کانال.

شیب کانال با زاویه ۵۳ درجه و پوشش کانال با ۵ درصد آهک هیدراته به ضخامت یک سانتی‌متر.

شیب کانال با زاویه ۵۳ درجه و پوشش کانال با ۱۰ درصد آهک هیدراته به ضخامت یک سانتی‌متر.

شیب کانال با زاویه ۵۳ درجه و پوشش کانال با ۲۰ درصد آهک هیدراته به ضخامت یک سانتی‌متر.

شیب معکوس کانال با زاویه ۵۳ درجه و پوشش کانال با ۲۰ درصد آهک هیدراته به ضخامت یک

سانتی‌متر.

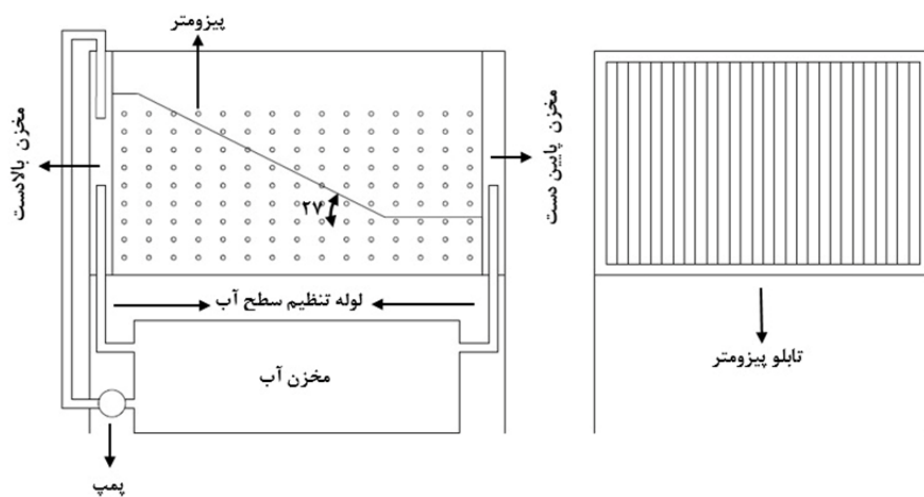
شیب کانال با زاویه ۵۳ درجه و پوشش کانال با ۳ درصد نانو آهک هیدراته به ضخامت یک سانتی متر.

شیب کانال با زاویه ۵۳ درجه و پوشش کانال با ۵ درصد نانو آهک هیدراته به ضخامت یک سانتی متر.

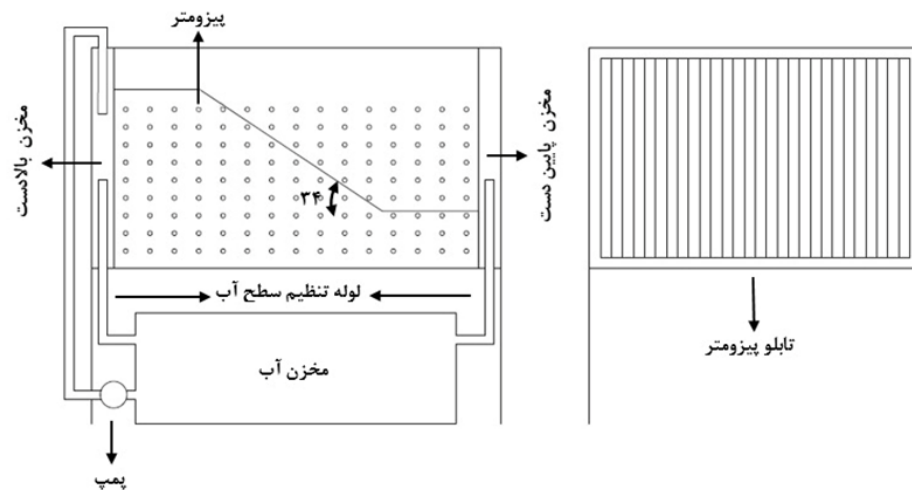
شیب معکوس کانال با زاویه ۵۳ درجه و پوشش کانال با ۵ درصد نانو آهک هیدراته به ضخامت یک سانتی متر.

### ۱۵-۳ انواع مدل‌های آزمایشگاهی

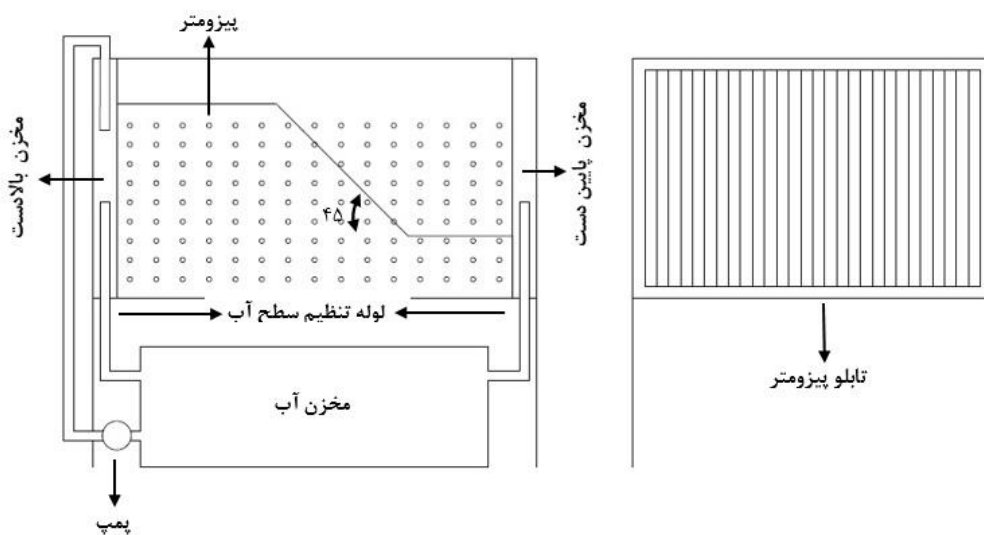
در اشکال ۹-۳، ۱۰-۳، ۱۱-۳ و ۱۲-۳ نمای شماتیک شیب‌های اجراء شده در این تحقیق نمایش داده شده است.



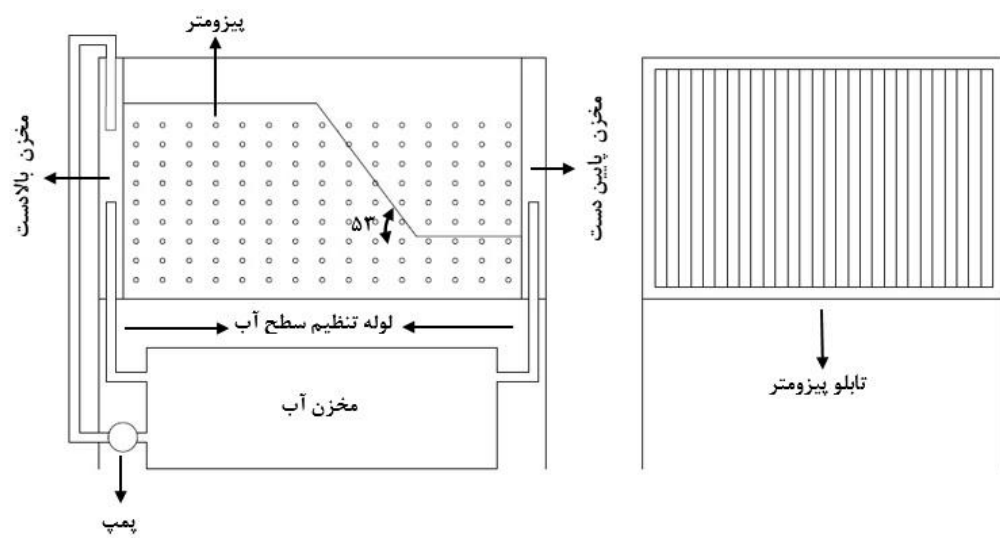
شکل ۹-۳ نمای شماتیک شیب ۲۷ درجه



شکل ۳-۱۰ نمای شماتیک شیب ۳۴ درجه



شکل ۳-۱۱ نمای شماتیک شیب ۴۵ درجه



شکل ۳-۱۲ نمای شیب ۵۳ درجه





## فصل ۴ : نتایج و بحث

#### ۱-۴ بررسی پایداری شیب جداره ۱:۱

۱-۴-۱ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش باشیب ۱:۱ در حالت تغذیه کانال (نمونه شاهد)

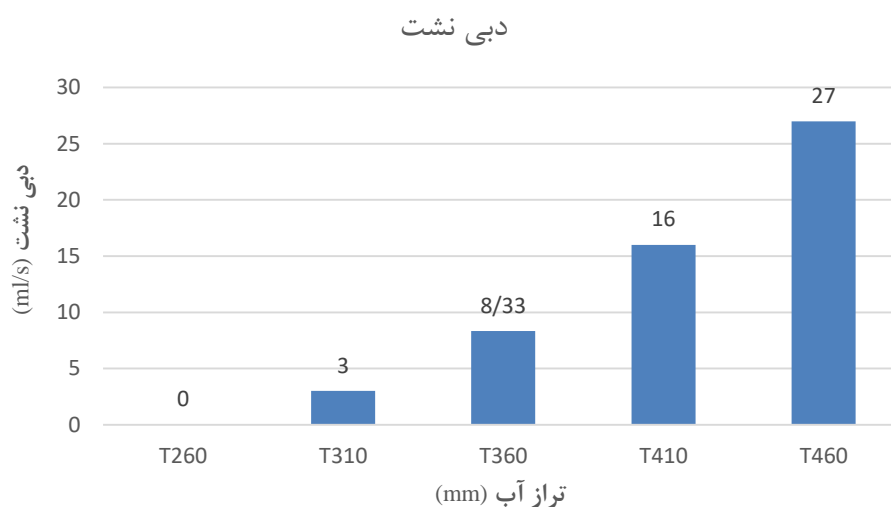
شکل ۱-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی نسبت به پنج تراز آبی بالادست را نشان می‌دهد. همان گونه که در نمودار مشخص است زمانی که تراز آب بالادست و پایین دست بر روی ۲۶۰ میلی‌متر ثابت نگه داشته شده است. پتانسیل هیدرولیکی تقریباً به صورت یک خط مستقیم است. با ثابت نگه داشتن تراز آب پایین دست در ۲۶۰ میلی‌متر و افزایش تدریجی آب بالادست، نمودار تغییرات پتانسیل هیدرولیکی از حالت خطی خارج شده و به صورت منحنی تغییر شکل می‌دهد. با رسیدن تراز آب بالادست به ۴۶۰ میلی‌متر شیب جداره ۱:۱ به صورت کاسه‌ای و مشابه آنچه در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است اتفاق افتاد. طول گسیختگی ۴۰ cm از پایین شیب، عرض آن ۵۰ cm و بیشترین عمق آن ۱۰ cm بوده است. از عوامل مهم در وقوع تخریب در شیب‌های تند اشباع شدن بخش زیادی از خاک، افزایش سطح نشت و فشار پیژومتریکی می‌باشد. سطح نشت و فشار پیژومتریکی دو عامل مهم در وقوع تخریب است. با توجه به بررسی‌های انجام شده به نظر می‌رسد مکانیزم‌های اصلی کنترل کننده گسیختگی، عامل سطح نشت، کاهش مقاومت خاک در اثر اشباع شدن و حذف مقاومت ناشی از مکش و کشش سطحی ذرات خاک غیر اشباع بوده است. با افزایش پتانسیل هیدرولیکی فشار آب حفره‌ای افزایش یافته این درحالی است که تنش ناشی از وزن خاک بالا ثابت می‌باشد که این امر موجب گسیختگی می‌شود. با توجه به مشاهدات صورت گرفته شده در این پژوهش می‌توان بیان داشت که در کانال‌های ساخته شده از ماسه، تحت زاویه‌ای بیش‌تر از زاویه قرار گیری مصالح ساخته شده‌اند در اثر بالا آمدن آب ناپایداری به وجود می‌آید. و این موضوع می‌تواند نشانه‌ای از کاهش مقاومت برشی خاک باشد. آزمایش برش مستقیم انجام شده روی ماسه مورد استفاده در این پژوهش نشان داد خاک دارای چسبندگی صفر و زاویه اصطکاک داخلی در ۳۳ درجه است. کاهش مقاومت خاک، اشباع شدن خاک و سازه ساخته شده از ماسه تحت زاویه‌ای بیش‌تر از زاویه قرار گیری مصالح از عوامل وقوع گسیختگی در بدنه شیب خاکی

محسوب می شوند در تحقیق امام و همکاران (۱۳۹۲) در مورد خاک‌های ماسه‌ای به‌عنوان عامل اصلی کنترل گسیختگی مطرح شده است.



شکل ۴-۱ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف (T460, T410, T360, T310, T260) به ترتیب بیانگر تراز آبی در ارتفاع ۲۶۰، ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ و ۴۶۰ میلی‌متر)

شکل ۴-۲ تاثیر تراز آب بالادست را بر میزان دبی نشت عبوری از پی ماسه‌ای نشان می‌دهد. بدیهی است که دبی نشت عبوری از پی با افزایش تراز آب مخزن افزایش می‌یابد، زیرا افزایش تراز آب افزایش شیب هیدرولیکی را به همراه دارد. واضح است که این خاک یکی از بدترین نوع مصالح برای پی سازه های آبی محسوب می شود. میزان تلفات ناشی از نشت با افزایش عمق آب در کانال، افزایش می‌یابد. نمودار ارائه شده نیز درستی این مطلب را تایید می‌کند. با توجه به شکل ۴-۲ در لحظه گسیختگی (تراز آبی ۴۶۰ میلی‌متر) مقدار دبی نشت (۲۷ میلی‌لیتر بر ثانیه) ماکزیمم می‌باشد.



شکل ۴-۲ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف (T260, T310, T360, T410, T460) به ترتیب بیانگر تراز آبی در ارتفاع ۲۶۰، ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ و ۴۶۰ میلی‌متر)

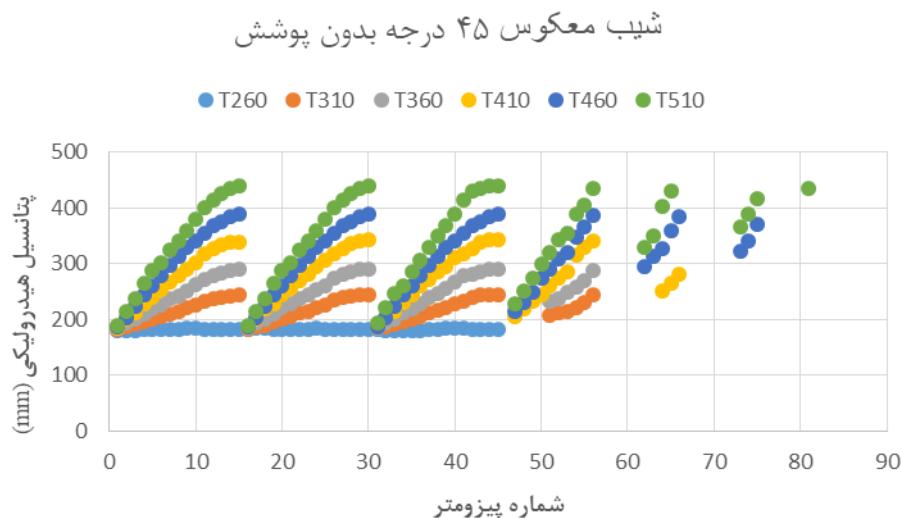


شکل ۴-۳ نمایی از گسیختگی شیب جداره ۴۵ درجه بدون پوشش

۴-۱-۲ برر سی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش با شیب ۱:۱ در حالت تخلیه کانال (نمونه شاهد)

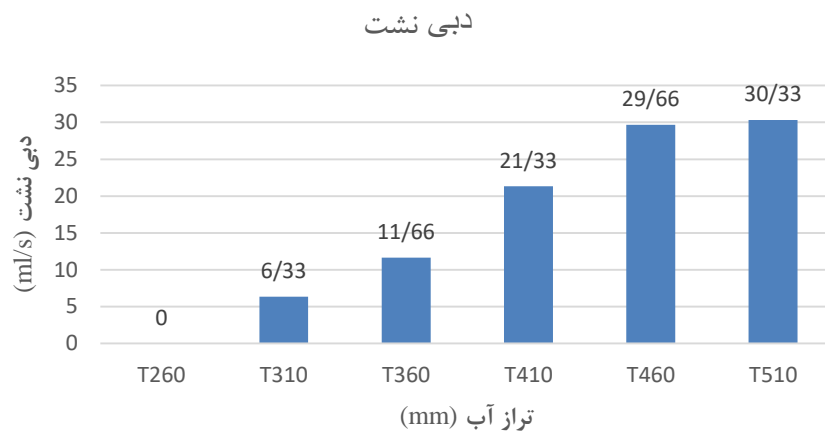
شکل ۴-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به شش تراز آبی بالادست نشان می‌دهد. با افزایش تراز آب بالادست در حالت نشت معکوس (حالت تخلیه کانال)، مقدار نشت به داخل کانال افزایش یافته و ناپایداری دیواره‌های جانبی بیشتر می‌گردد. به نظرمی‌رسد عامل اصلی گسیختگی کاهش مقاومت خاک در اثر اشباع شدن می‌باشد. همان گونه که در نمودار مشخص است در تراز آب بالادست و پایین

دست برابر ۲۶۰ میلی‌متر پتانسیل هیدرولیکی تقریباً به صورت یک خط مستقیم می‌باشد. با ثابت نگه داشتن تراز آب پایین دست در ۲۶۰ میلی‌متر و افزایش تدریجی آب بالادست تا تراز ۵۱۰ میلی‌متر نمودار تغییرات پتانسیل هیدرولیکی از حالت خطی خارج شده و به صورت منحنی تغییر شکل می‌دهد. در این حالت فشار آب‌منفذی در قسمت شیب خاکریز کانال کمتر بوده و مقاومت برشی بیشتر است، که سبب می‌شود گسیختگی به تأخیر بیفتد و نتیجه آن وقوع گسیختگی به ازای تراز آب بالاتر است. برونز و آکوستا (۲۰۱۱) فرسایش درونی و تخریب حاصل از نیروهای اشباع و نشت کنترل شده ناشی از تغییرات ناگهانی سطح آب مخزن را از دلایل اصلی تخریب کانال‌های خاکی معرفی نمودند. در شکل ۴-۶ تصویر گسیختگی نمایش داده شده است.



شکل ۴-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

با توجه به شکل ۴-۵ می‌توان بیان داشت که شیب در لحظه گسیختگی (تراز آبی ۵۱۰ میلی‌متر) دارای بیش‌ترین مقدار دبی نشت (۳۰/۳۳ میلی‌لیتر بر ثانیه) می‌باشد. علت نزدیک بودن دبی نشت در ترازهای آبی ۴۶۰ و ۵۱۰ میلی‌متر را می‌توان به دلیل گسیختگی شیب جداره ۱:۱ که بلافاصله بعد از تغییر تراز حادث شده است بیان کرد.



شکل ۴-۵ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف



شکل ۴-۶ نمایی از گسیختگی شیب معکوس جداره ۴۵ درجه بدون پوشش

۴-۱-۳ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۲٪ وزنی آهک هیدراته و شیب ۱:۱ در حالت تغذیه کانال

شکل ۴-۷ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به پنج تراز آبی در بالادست نشان می‌دهد. مطابق نتایج ارائه شده پوشش ۲٪ وزنی آهک هیدراته تأثیر چندانی در کنترل پدیده گسیختگی نسبت به حالت بدون پوشش نداشت به طوری که در این حالت نیز به ازای هد بالادست ۴۶۰ میلی‌متر گسیختگی اتفاق افتاد. در واقع با اضافه کردن آهک هیدراته به پوشش شیب جداره داخلی کانال، زاویه اصطکاک

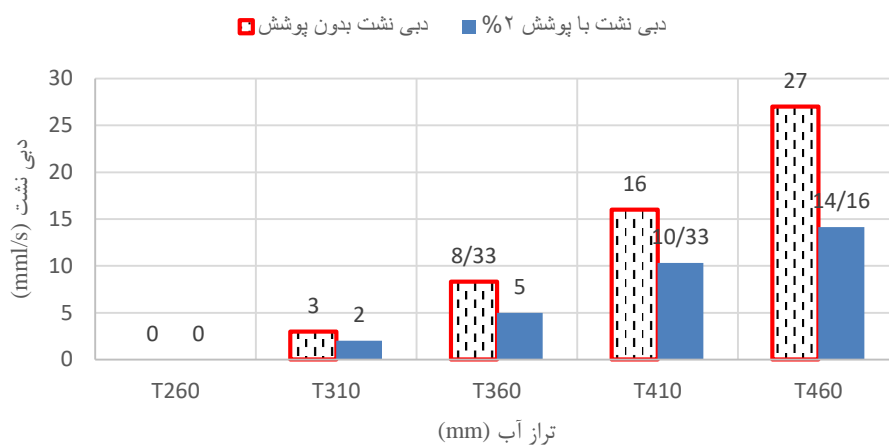
داخلی خاک به ۳۵ درجه افزایش یافت و چسبندگی آن ۰/۳۳ کیلوپاسکال رسید اما تأثیر زیادی بر افزایش مقاومت برشی خاک نداشت، اما در این حالت شکل گسیختگی تغییر کرد و به شکل ترک و جابجایی توده‌ای خاک اتفاق افتاد (شکل ۴-۹).



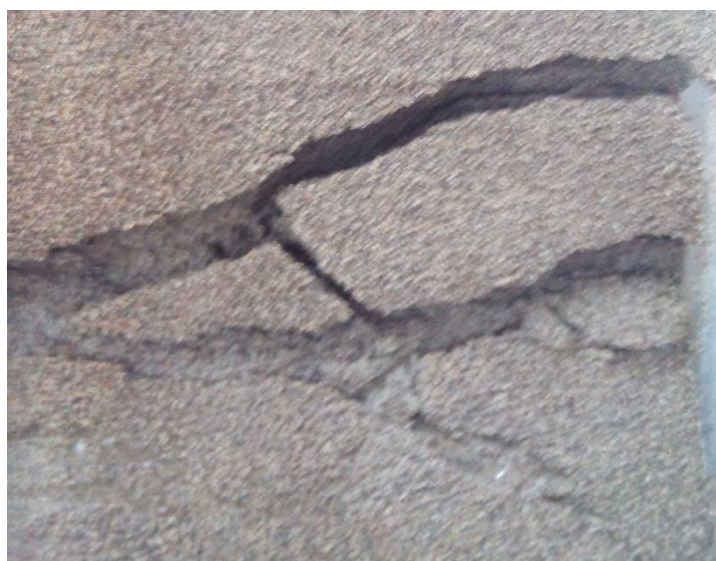
شکل ۴-۷ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۴-۸ تغییرات دبی نشت را در برابر تراز آبی بالادست را برای شیب ۴۵ درجه با پوشش ۲٪ وزنی آهک هیدراته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در پوشش کانال با ۲٪ وزنی آهک هیدراته، در مقایسه با کانال ۱:۱ بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالا دست مقدار دبی نشت خروجی کاهش می‌یابد بطوری که در ترازهای ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ و ۴۶۰ میلی‌متر به ترتیب باعث کاهش ۳۳/۳۳، ۳۹/۹۷، ۳۵/۴۳ و ۴۷/۵۵ درصدی دبی نشت در مقایسه با کانال ۱:۱ فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش نفوذ پذیری خاک در اختلاط با ۲٪ وزنی آهک هیدراته که میزان تراکم خاک را افزایش داده است مرتبط دانست. بیشترین مقدار دبی نشت در این تحقیق مربوط به تراز ۴۶۰ میلی‌متر است که در این تراز شیب گسیخته شده است.

### دبی نشت



شکل ۴-۸ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف

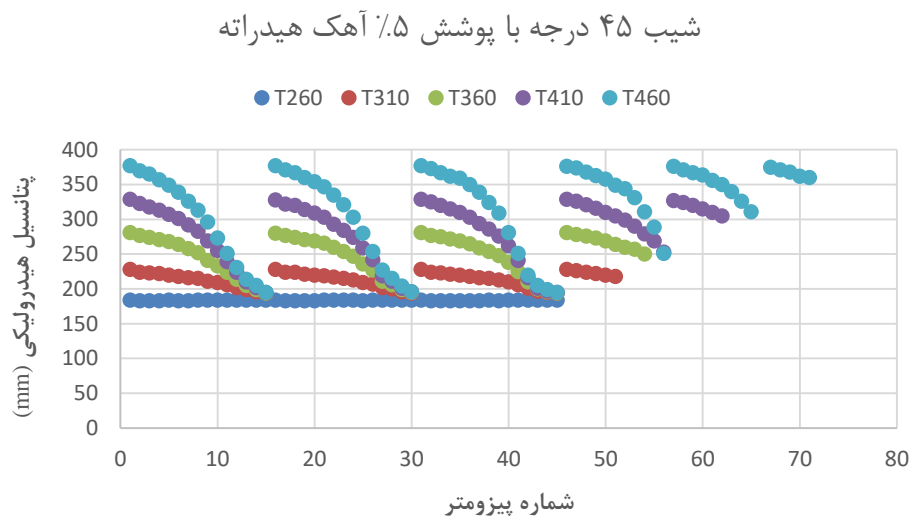


شکل ۴-۹ نمایی از گسیختگی شیب ۴۵ درجه با پوشش ۲٪ وزنی آهک هیدراته



۴-۱-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۰.۵٪ وزنی آهک هیدراته و شیب ۱:۱ در حالت تغذیه کانال

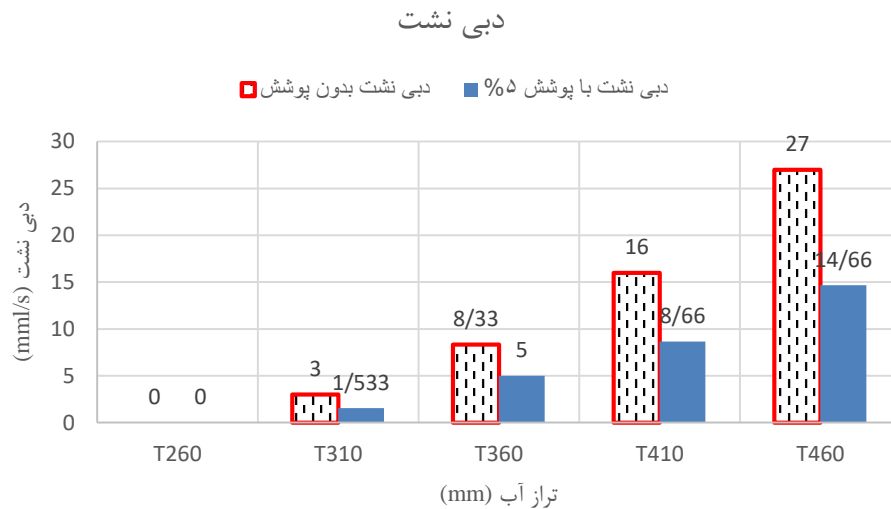
در این حالت نیز اگر چه پوشش ۰.۵٪ وزنی آهک هیدراته سبب افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک شده (زاویه اصطکاک داخلی ۳۵ درجه و چسبندگی ۰/۸۸ کیلو پاسکال)، اما این افزایش ناچیز بوده و در برابر فشار آب منفذی ایجاد شده تأثیر زیادی در کنترل گسیختگی ندارد. البته بی بیشتر بودن زاویه شیب جداره کانال نسبت به زاویه اصطکاک ایستایی ماسه را می توان در این امر مؤثر دانست ( شکل ۴-۱۰). در شکل ۴-۱۲ نمایی از گسیختگی شیب ۴۵ درجه با پوشش ۰.۵٪ وزنی آهک هیدراته نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱۰ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۴-۱۱ تغییرات دبی نشت را در برابر تراز آبی بالادست را برای شیب ۴۵ درجه با پوشش ۰.۵٪ وزنی آهک هیدراته نشان می دهد. نتایج نشان می دهد در پوشش کانال ۱:۱ با ۰.۵٪ وزنی آهک هیدراته، در مقایسه با کانال ۱:۱ بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالا دست مقدار دبی نشت خروجی کاهش می یابد بطوری که در ترازهای ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ و ۴۶۰ میلی متر به ترتیب شاهد کاهش ۴۹، ۳۹/۹۷، ۴۵/۸۷ و ۴۵/۷ درصدی دبی نشت در مقایسه با دبی نشت کانال ۱:۱ فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده است. دلیل این امر را می توان به کاهش نفوذ پذیری خاک در اختلاط با ۰.۵٪ وزنی آهک هیدراته

که میزان تراکم خاک را افزایش داده است مرتبط دانست. عباسی (۱۳۹۴) در پژوهشی به بررسی امکان استفاده از قطعات پیش ساخته بتن گوگردی برای پوشش کانال‌های آبیاری پرداخت. نتایج نشان داد میزان نشت از کانال پوشش شده با قطعات گوگردی به مراتب کمتر از بتن معمولی و در حدود ۰/۱۴ متر مکعب بر متر مربع روز می‌باشد.



شکل ۴-۱۱ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف



شکل ۴-۱۲ نمایی از گسیختگی شیب ۴۵ درجه با پوشش ۵٪ وزنی آهک هیدرات

۴-۱-۵ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته و شیب ۱:۱ در حالت تغذیه کانال

شکل ۴-۱۳ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به هفت تراز آبی بالادست نشان می‌دهد. با رسیدن تراز آب بالادست به مقدار ۵۶۰ میلی‌متر و پس از گذشت ۱۵ دقیقه از تغییر تراز آب بالادست گسیختگی شیب جداره ۱:۱ به شکل ترک و مشابه آنچه در شکل ۴-۱۵ نمایش داده شده است. در طول ۱۴ سانتی‌متر، حداکثر عمق دهنه شکاف ۴ سانتی‌متر و در فاصله ۵ سانتی‌متری از پایین شیب اتفاق افتاد. در این آزمایش از پوشش ۱۰٪ آهک هیدراته استفاده شد که نتایج نشان می‌دهد این پوشش توانایی تثبیت شیب جداره ۱:۱ نسبت به کانال بدون پوشش، شیب جداره ۱:۱ با ۲٪ وزنی آهک هیدراته و شیب جداره ۱:۱ با ۵٪ وزنی آهک هیدراته را از خود نشان می‌دهد. پوشش کانال ۱:۱ با ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته سبب افزایش مقاومت شیب جداره در برابر افزایش پتانسیل هیدرولیکی شده است ولی این افزایش مقاومت به حدی بوده که شیب جداره تا ترازهای بالاتر پایدار بماند، بیشترین پتانسیل فشاری هیدرولیکی ثبت شده ۴۸۱ میلی‌متر بوده است. به نظر می‌رسد عامل اصلی گسیختگی افزایش فشار آب حفره‌ای که نتیجه افزایش پتانسیل فشار هیدرولیکی و کاهش مقاومت برشی خاک در اثر اشباع شدن بوده است. با توجه به مشاهدات صورت گرفته شده در این پژوهش می‌توان بیان داشت پوشش کانال ۱:۱ با ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته نسبت به پوشش کانال ۱:۱ با ۲٪ و ۵٪ وزنی آهک هیدراته مقاومت بیشتری در مقابل گسیختگی دارد که عامل آن را می‌توان به افزایش زاویه اصطکاک داخلی (۴۱/۸ درجه) و چسبندگی (۱/۶۵ کیلو پاسکال) و از سویی افزایش تراکم خاک و کاهش نفوذپذیری خاک با توجه به میزان کاهش محسوس دبی نشت خروجی در پوشش ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته مرتبط دانست.

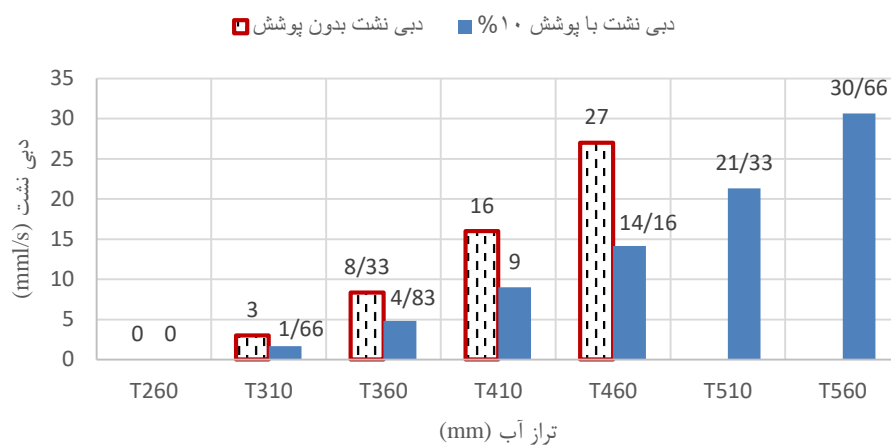
شیب ۴۵ درجه با پوشش ۱۰٪ آهک هیدراته



شکل ۴-۱۳ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۴-۱۴ تغییرات دبی نشت را در برابر تراز آبی بالادست مختلف برای شیب ۴۵ درجه با پوشش ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در پوشش کانال ۱:۱ با ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته، در مقایسه با کانال ۱:۱ بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالا دست مقدار دبی نشت خروجی کاهش می‌یابد بطوری که در ترازهای مشابه ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ و ۴۶۰ میلی‌متر به ترتیب شاهد کاهش ۴۴/۶۶، ۴۲/۰۱۶، ۴۳/۷۵ و ۴۸/۱۴ درصدی دبی نشت در مقایسه با دبی نشت کانال ۱:۱ فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش نفوذ پذیری خاک در اختلاط با ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته که میزان تراکم خاک را افزایش داده است مرتبط دانست. عابدی‌کوپایی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی دوام و پایداری خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک هیدراته در مجاورت سازه‌های آبی را با افزودن درصدهای مختلف آهک هیدراته شامل صفر، ۱، ۳ و ۵ درصد با دو حالت رطوبت بهینه و رطوبت اشباع مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که با اضافه نمودن ۵ درصد آهک هیدراته به خاک رسی بیشترین مقاومت فشاری محصور نشده خاک در دو حالت رطوبت بهینه و رطوبت اشباع حاصل می‌شود.

### دبی نشت



شکل ۴-۱۴ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف

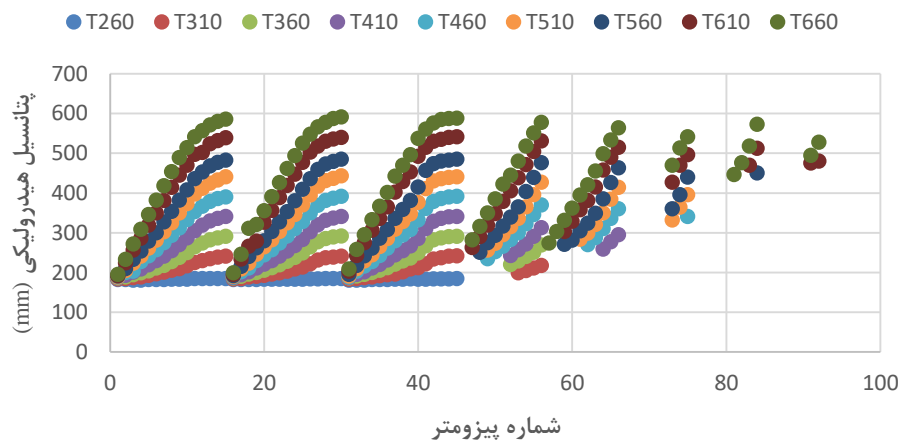


شکل ۴-۱۵ نمایی از گسیختگی شیب ۴۵ درجه با پوشش ۱۰٪ آهک هیدراته

۴-۱-۶ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته و شیب ۱:۱ در حالت تخلیه کانال

شکل ۴-۱۶ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به ۹ تراز آبی بالادست را نشان می‌دهد. مشاهدات در این آزمایش نشان می‌دهد با افزایش تراز سطح ایستابی بالادست تا تراز آبی ۶۶۰ میلی‌متر (بیش‌ترین حد قابل قرائت در روی تابلوی پیزومتری) شیب جداره ۱:۱ پوشش داده شده با ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته پایدار بوده است. بطوری که مشابه آنچه در شکل ۴-۱۸ نمایش داده شده است هیچ گونه درز و شکافی روی سطح شیب دیده نمی‌شود. پوشش ایجاد شده روی شیب جداره کانال ۱:۱ که باعث افزایش مقاومت برشی خاک شده است (چسبندگی خاک ۱/۶۵ کیلو پاسکال و زوایه اصطکاک داخلی ۴۱/۸). از طرفی اضافه نمودن ۱۰ درصد وزنی آهک هیدراته به عنوان پوشش سبب افزایش خاصیت سیمانی شدن و کاهش نفوذپذیری خاک شده است.

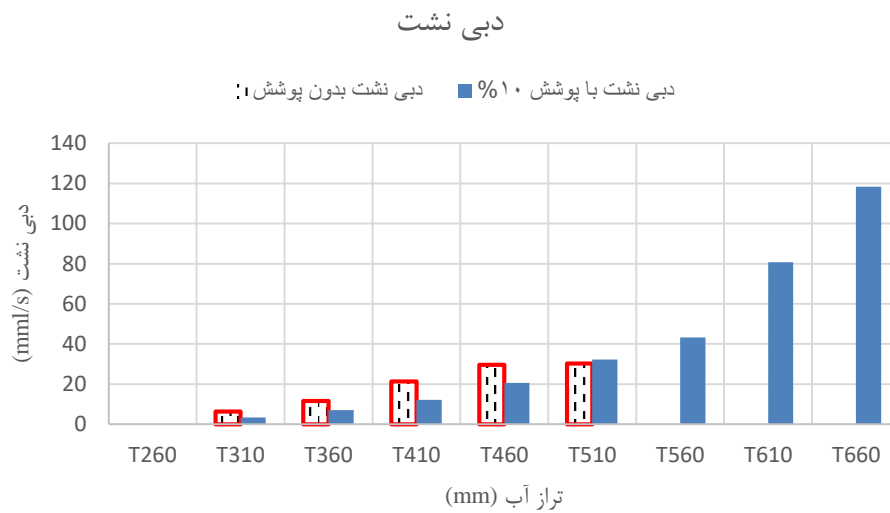
شیب معکوس ۴۵ درجه با ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته



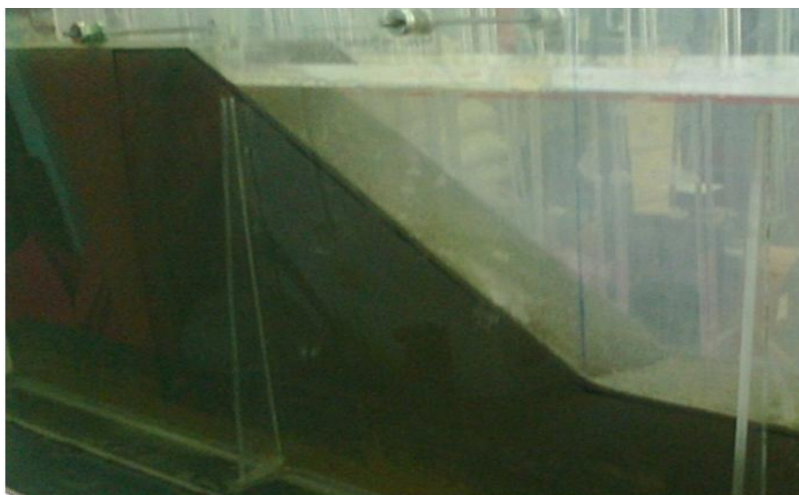
شکل ۴-۱۶ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۴-۱۷ تغییرات دبی نشت را در برابر تراز آبی بالادست برای شیب ۱:۱ معکوس با پوشش ۱۰٪ آهک هیدراته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در پوشش کانال ۱:۱ با ۱۰٪ آهک هیدراته، در مقایسه با کانال ۱:۱ بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالادست شیب مقدار دبی نشت خروجی کاهش می‌یابد بطوری که در ترازهای مشابه ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ و ۴۶۰ میلی‌متر به ترتیب

شاهد کاهش ۴۶/۲۸، ۳۹/۹۶، ۴۲/۹۹ و ۲۶/۹۷ درصدی دبی نشت در مقایسه با دبی نشت کانال ۱:۱ فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش نفوذ پذیری خاک در اختلاط با ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته که میزان تراکم خاک را افزایش داده است مرتبط دانست.



شکل ۴-۱۷ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف

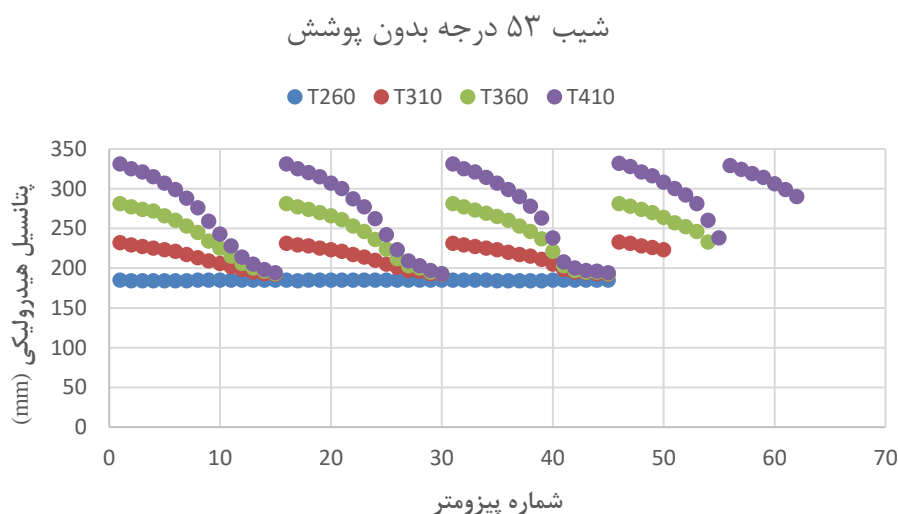


شکل ۴-۱۸ عدم بروز نشانه‌ای گسیختگی در شیب ۱:۱ با پوشش ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته

## ۲-۴ بررسی پایداری شیب جداره ۵۳ درجه

۱-۲-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش با شیب ۴:۳ در حالت تغذیه کانال (نمونه شاهد)

شکل ۱۹-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به ۴ تراز آبی بالادست نشان می‌دهد. در این حالت نیز با افزایش تراز سطح آب تغییرات منحنی شکل خواهد بود. با رسیدن تراز آب بالادست به ۴۱۰ میلی‌متر شیب کانال به صورت کاسه‌ای و مشابه آنچه در شکل ۴-۲۱ نمایش داده شده است گسیخته شد. شکل گسیختگی در شیب جداره ۴:۳ فاقد پوشش به صورت کاسه‌ای عمیق با ریزش سریع از انتهای شیب به طول ۳۰cm، عرض ۵۰cm و عمق ۱۲cm بوده است به نظر می‌رسد علت اصلی وقوع گسیختگی، کمتر بودن زاویه اصطکاک داخلی مصالح نسبت به زاویه شیب جداره ساخته شده و کاهش مقاومت خاک در اثر اشباع شدن بوده است. آزمایش انجام شده روی ماسه مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که چسبندگی صفر و زاویه اصطکاک داخلی ۳۳ درجه بوده است.

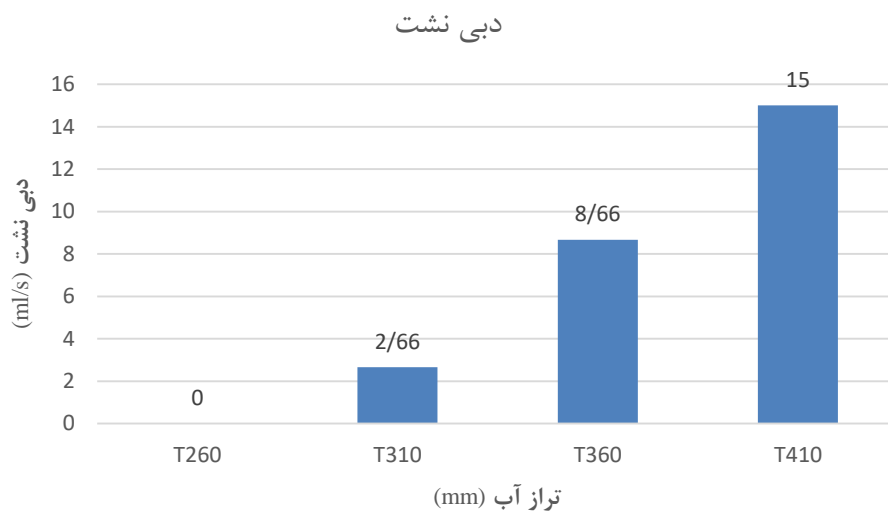


شکل ۱۹-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۲۰-۴ نمودار تغییرات دبی نشت را با افزایش تراز آب بالادست نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴-۲۰ در لحظه گسیختگی مقدار دبی نشت ماکزیمم می‌باشد. معمولاً انتظار می‌رود با زیاد شدن شیب، چون محیط خیس شده کانال افزایش پیدا می‌کند دبی نشت نیز به تدریج افزایش یابد. اما با توجه به



نتایج سوامی و نتایج حاصل از این تحقیق چنین برداشت می‌شود که در کانال‌های خاکی با در نظر گرفتن ابعاد، مساحت، عمق آب، محیط خیس شده، با افزایش تدریجی شیب جانبی کانال افزایش می‌یابد. میزان تلفات ناشی از نشت با افزایش عمق آب در کانال، افزایش می‌یابد. نمودار ارائه شده نیز درستی این مطلب را تایید کرده و در هر شیب با زیاد شدن عمق آب کانال، دبی نشت افزایش یافت.



شکل ۴-۲۰ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف



شکل ۴-۲۱ گسیختگی شیب جداره ۵۳ درجه فاقد پوشش

۲-۲-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش با شیب ۴:۳ در حالت تخلیه کانال (نمونه شاهد)

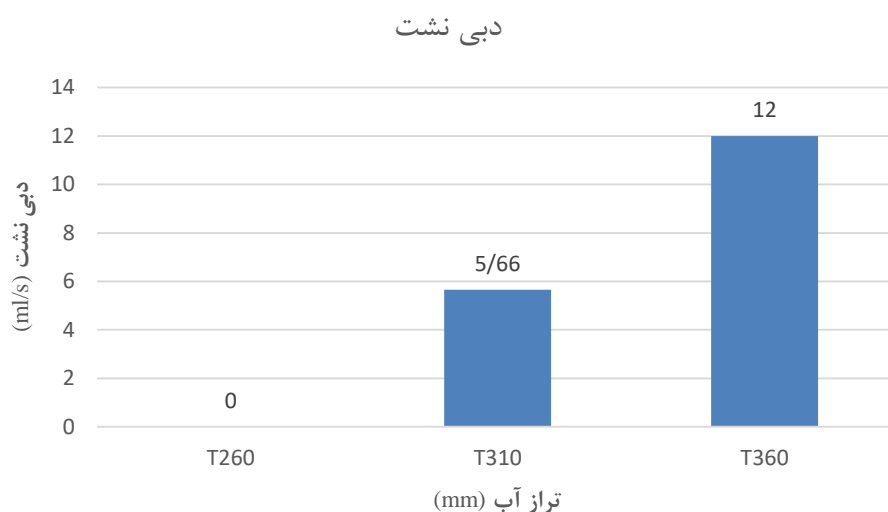
شکل ۲۲-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به سه تراز آبی بالادست را نشان می‌دهد. با رسیدن تراز آب بالادست به ۳۶۰ میلی‌متر شیب کانال به صورت چرخشی گسیخته شد. در شکل ۲۴-۴ تصویر گسیختگی نمایش داده شده است. در آزمایش صورت گرفته پتانسیل فشار هیدرولیکی در جلو شیب وجود داشت که با افزایش تراز آب بالادست در حالت تغذیه کانال (نشت معکوس)، با افزایش شیب مقدار نشت به داخل کانال افزایش یافته و ناپایداری دیواره‌های جانبی بیشتر می‌گردد. در این حالت عامل اصلی وقوع گسیختگی، کاهش مقاومت خاک در اثر اشباع شدن و افزایش پتانسیل فشاری می‌باشد.

شیب معکوس ۵۳ درجه بدون پوشش



شکل ۲۲-۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۲۳-۴ نمودار تغییرات دبی نشت را با افزایش تراز آب بالادست نشان می‌دهد. در لحظه گسیختگی دارای بیشترین مقدار دبی نشت می‌باشد. بدیهی است که دبی نشت عبوری از پی با افزایش تراز آب مخزن افزایش می‌یابد. افزایش ارتفاع آب مخزن منجر به افزایش سطح نشت و گرادیان هیدرولیکی شده و افزایش دبی نشت را به دنبال دارد.



شکل ۴-۲۳ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف



شکل ۴-۲۴ نمایی از گسیختگی شیب معکوس جداره ۵۳ درجه بدون پوشش

۴-۲-۳ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکیو دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۵٪ وزنی آهک هیدراته و شیب ۴:۳ در حالت تغذیه کانال

شکل ۴-۲۵ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به پنج تراز آبی بالادست را نشان می‌دهد. با رسیدن تراز آب بالادست به ۴۱۰ میلی‌متر شیب کانال به صورت چرخشی گسیخته و مشابه آنچه در شکل ۴-۲۷ نمایش داده شده است اتفاق افتاد. در آزمایش صورت گرفته از پوشش ۵٪ وزنی آهک هیدراته استفاده شد و سطح آب ایستابی در جلو شیب وجود داشت که با افزایش تراز آب بالادست، پتانسیل فشاری افزایش یافته در نتیجه فشار آب منفذی بیشتر شده و سبب ناپایداری می‌گردد. در این حالت به

ازای تراز آب بالادست ۴۱۰ میلی مترکانال به صورت چرخشی گسیخته شد (شکل ۴-۲۷). پوشش کانال ۴:۳ با ۵٪ وزنی آهک هیدراته سبب افزایش ناچیز مقاومت شیب جداره ۴:۳ در برابر افزایش پتانسیل هیدرولیکی شده است ولی این افزایش مقاومت سبب نشده تا شیب جداره ۴:۳ تا تراز های بالاتر پایدار بماند و فقط باعث افزایش پتانسیل هیدرولیکی در پیژومترهای مورد قرائت شده است به نظر می رسد عامل اصلی وقوع گسیختگی، کاهش مقاومت خاک در اثر اشباع شدن می باشد.

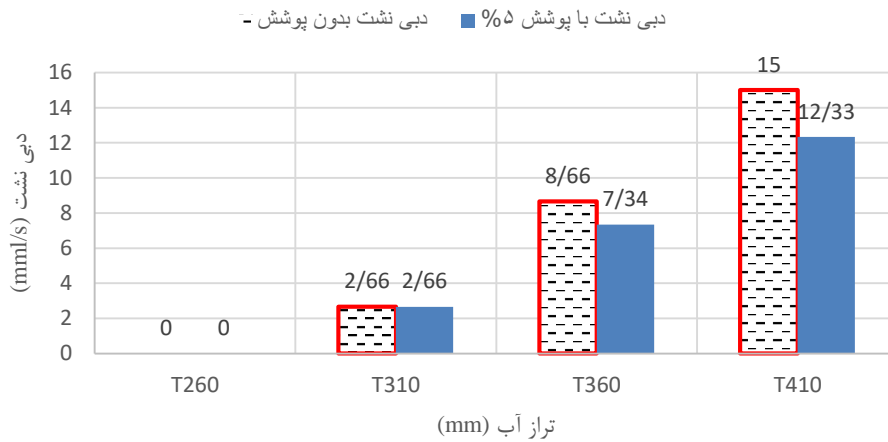
شیب ۵۳ درجه با پوشش ۵٪ وزنی آهک هیدراته



شکل ۴-۲۵ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۴-۲۶ تغییرات دبی نشت را در برابر تراز آبی بالادست برای شیب ۵۳ درجه با پوشش ۵٪ وزنی آهک هیدراته نشان می دهد. نتایج نشان می دهد در پوشش کانال ۴:۳ با ۵٪ وزنی آهک هیدراته، در مقایسه با کانال ۴:۳ بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالا دست مقدار دبی نشت خروجی کاهش می یابد بطوری که در ترازهای مشابه ۳۶۰ و ۴۱۰ میلی متر به ترتیب شاهد کاهش ۱۱/۳۴ و ۱۷/۸ درصدی نشت در مقایسه با دبی نشت کانال ۴:۳ فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده است. دلیل این امر را می توان به کاهش نفوذ پذیری خاک در اثر اختلاط با ۵٪ آهک هیدراته که میزان تراکم خاک را افزایش داده است مرتبط دانست.

### دبی نشت



شکل ۴-۲۶ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف

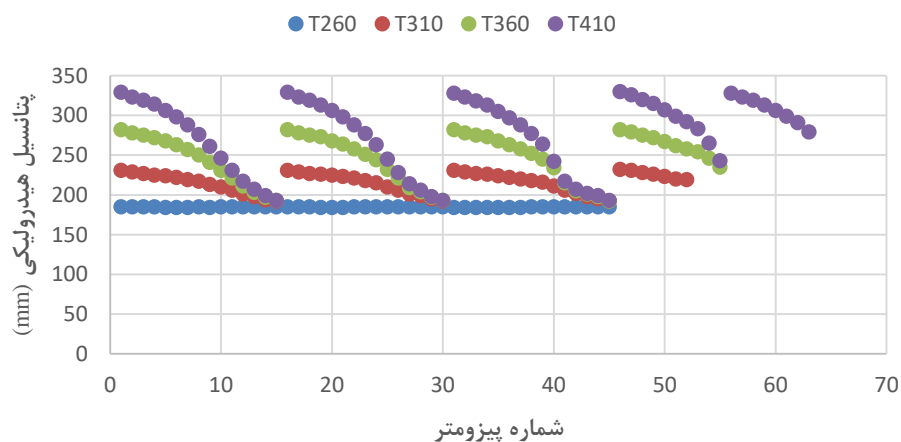


شکل ۴-۲۷ گسیختگی پوشش ۵٪ وزنی آهک هیدراته

۴-۲-۴ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته و شیب ۴:۳ در حالت تغذیه کانال  
 شکل ۴-۲۸ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به چهار تراز آبی بالادست نشان می‌دهد. پوشش کانال با ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته سبب افزایش مقاومت شیب جداره ۴:۳ در برابر پتانسیل فشاری شده است به صورت یک مانع در مقابل جریان عمل کرده سبب افزایش پتانسیل فشاری در پیژومترهای مورد

قرائت شده است. از طرفی افزایش مقاومت به حدی نبوده که شیب جداره تا تراز های بالاتر پایدار بماند. علت اصلی گسیختگی، افزایش فشار آب حفره‌ای و کاهش مقاومت برشی خاک در اثر اشباع شدن بوده است. آزمایش انجام شده روی ماسه مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که چسبندگی  $1/65$  کیلو پاسکال و زاویه اصطکاک داخلی در  $41/8$  درجه می‌باشد که توانایی تثبیت شیب جداره  $53$  درجه را نداشته است. تصویر گسیختگی در شکل ۴-۳۰ نمایش داده شده است. شریفی و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی رفتار پوشش‌های بتنی کانال‌های آبیاری قرار گرفته روی سه نوع بستر متشکل از خاک بدون مواد افزودنی، خاک دارای  $2\%$  آهک، خاک دارای مخلوط  $4\%$  سیمان و  $4\%$  آهک را مورد بررسی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد با افزودن آهک  $2\%$  و مخلوط سیمان و آهک  $4\%$  به خاک مدول الاستیته خاک افزایش یافته و باعث کاهش لنگرهای خمشی وارد بر پوشش بتنی کانال شده است.

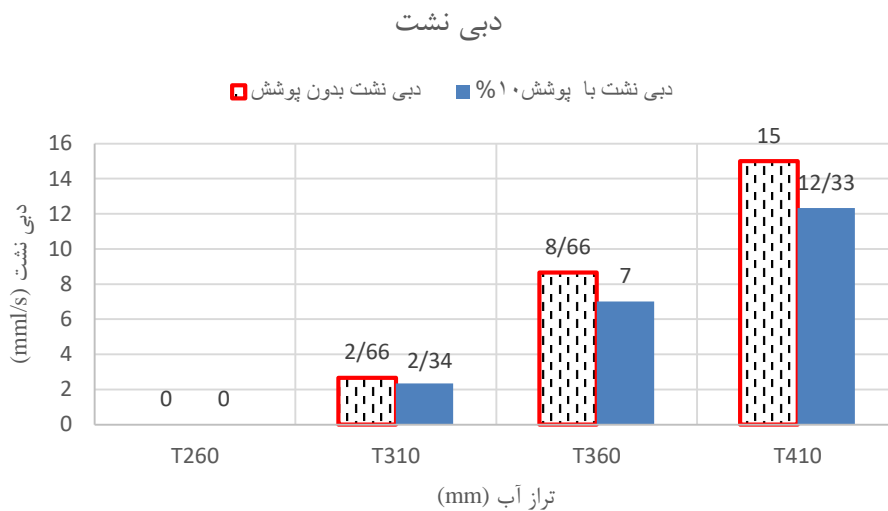
شیب  $53$  درجه با پوشش  $10\%$  آهک هیدراته



شکل ۴-۲۸ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۴-۲۹ تغییرات دبی نشت را در برابر تراز آبی بالادست برای شیب  $53$  درجه با پوشش  $10\%$  وزنی آهک هیدراته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در پوشش کانال  $4:3$  با  $10\%$  وزنی آهک هیدراته، در مقایسه با کانال  $4:3$  بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالا دست مقدار دبی نشت خروجی کاهش می‌یابد بطوری که در ترازهای مشابه  $310$ ،  $360$  و  $410$  میلی‌متره ترتیب شاهد کاهش  $12/03$ ،  $19/16$  و  $17/8$  درصدی دبی نشت در مقایسه با دبی نشت کانال  $4:3$  فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده

است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش نفوذ پذیری خاک در اثر اختلاط با ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته که میزان تراکم خاک را افزایش داده است و سبب کاهش نفوذپذیری شده است دانست.



شکل ۴-۲۹ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف



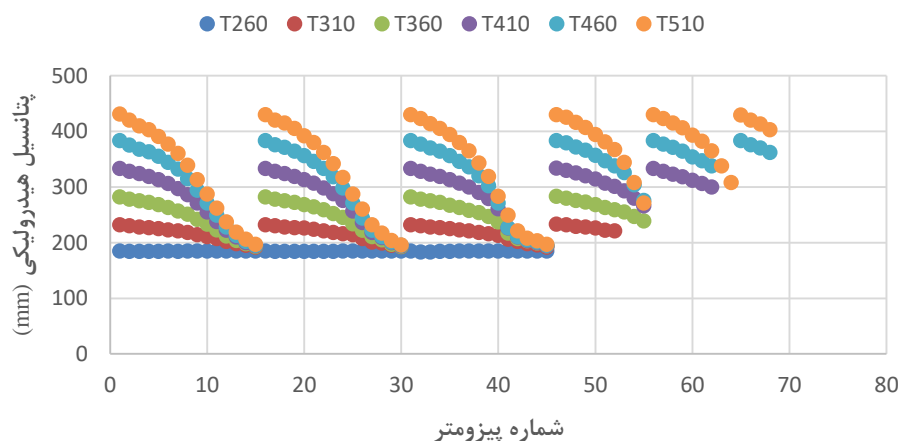
شکل ۴-۳۰ گسیختگی پوشش ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته

۴-۲-۵ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته با شیب ۴:۳ در حالت تغذیه کانال نمودار ۴-۳۱ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به شش تراز آبی بالادست را نشان می‌دهد. با رسیدن تراز آب بالادست به ۵۱۰ میلی‌متر و پس از گذشت ۲۰ دقیقه از تغییر تراز آب بالادست از ۴۶۰ میلی‌متر به ۵۱۰ میلی‌متر شیب کانال به صورت چرخشی که در شکل ۴-۳۳ نمایش داده شده است گسیخته



شد. در آزمایش صورت گرفته ماسه استفاده شده دارای تراکم مناسبی می‌باشد و عامل اصلی وقوع گسیختگی، افزایش فشار آب‌حفره‌ای و کاهش مقاومت برشی خاک در اثر اشباع شدن بوده است. در این تحقیق از پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته استفاده شد که نتایج نشان می‌دهد این پوشش توانایی تثبیت شیب جداره ۴:۳ نسبت به کانال بدون پوشش، پوشش با ۵٪ وزنی آهک هیدراته و پوشش با ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته را از خود نشان می‌دهد. پوشش کانال ۴:۳ با ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته سبب افزایش مقاومت شیب در برابر افزایش پتانسیل هیدرولیکی شده است که نتیجه آن افزایش مقاومت به حدی بوده که شیب جداره تا ترازهای بالاتر پایدار بماند، بیشترین پتانسیل فشاری هیدرولیکی ثبت شده ۴۳۱ میلی‌متر است. با توجه به مشاهدات صورت گرفته شده در این پژوهش می‌توان بیان داشت پوشش کانال ۴:۳ با ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته نسبت به کانال با ۵٪ و ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته مقاومت بیشتری در مقابل گسیختگی دارد که عامل آن را می‌توان به افزایش زاویه اصطکاک داخلی (۴۳/۵ درجه) و چسبندگی (۳/۳ کیلو پاسکال) و از سویی افزایش تراکم خاک و کاهش نفوذپذیری خاک باتوجه به میزان کاهش محسوس دبی نشت خروجی مرتبط دانست.

شیب ۵۳ درجه با ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته



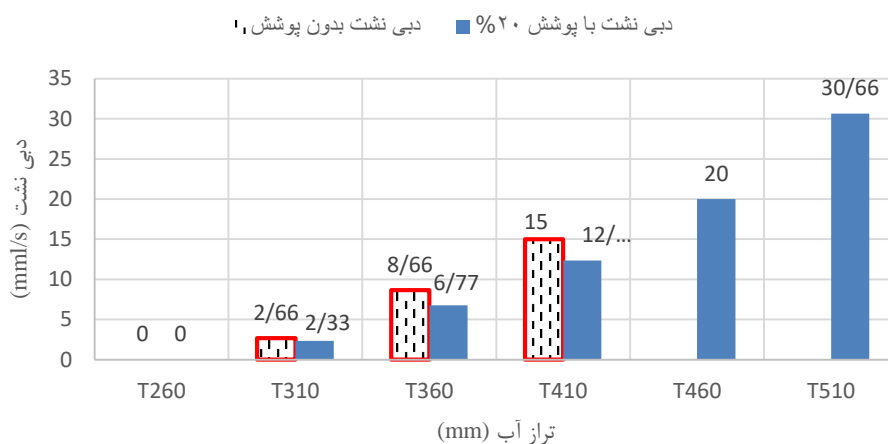
شکل ۴-۳۱ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۴-۳۲ تغییرات دبی نشت را در برابر تراز آبی بالادست برای شیب ۵۳ درجه با پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در پوشش کانال ۴:۳ با ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته، در



مقایسه با کانال بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالا دست مقدار دبی نشت خروجی کاهش می‌یابد بطوری که در ترازهای مشابه ۳۱۰، ۳۶۰ و ۴۱۰ میلی‌متر به ترتیب سبب کاهش ۱۲/۴، ۲۱/۸۲ و ۱۷/۸ درصدی دبی نشت در مقایسه با دبی نشت کانال فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش نفوذ پذیری خاک در اثر اختلاط با ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته که میزان تراکم خاک را افزایش داده است و سبب کاهش نفوذپذیری شده است مرتبط دانست.

#### دبی نشت



شکل ۴-۳۲ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف



شکل ۴-۳۳ گسیختگی پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته

۴-۲-۶ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته با شیب ۴:۳ در حالت تخلیه کانال

شکل ۴-۳۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به ۹ تراز آبی بالادست نشان می‌دهد. مشاهدات در این آزمایش نشان می‌دهد با افزایش تراز سطح ایستابی بالادست شیب تا ۶۶۰ میلی‌متر (بیشترین حد قابل قرائت در روی تابلوی پیزومتری) شیب جداره ۴:۳ پوشش داده شده با ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته پایدار بوده است. بطوری که مشابه آنچه در شکل ۴-۳۶ نمایش داده شده است. دلیل این امر را می‌توان پوشش ایجاد شده روی شیب جداره ۴:۳ که باعث افزایش مقاومت برشی خاک شده است (چسبندگی خاک ۳/۳ کیلو پاسکال و زوایه اصطکاک داخلی ۴۳/۵) دانست. از طرفی اضافه نمودن ۲۰ درصد وزنی آهک هیدراته به عنوان پوشش سبب افزایش خاصیت سیمانی شدن و کاهش نفوذپذیری خاک شده است.

شیب معکوس ۵۳ درجه با ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته

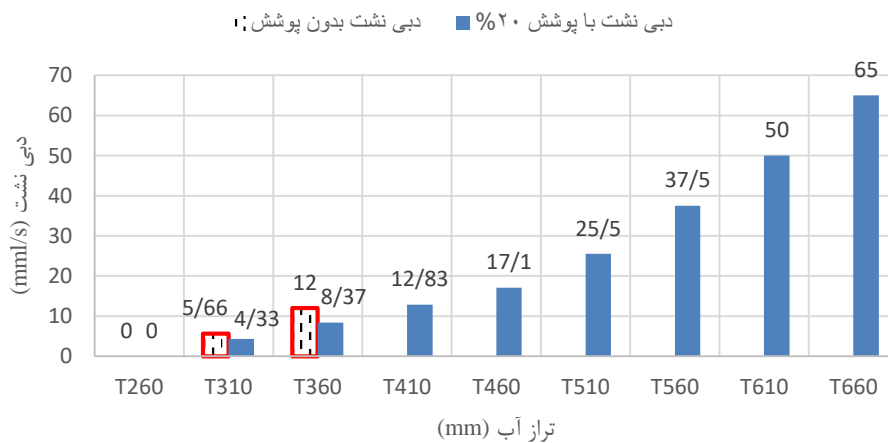


شکل ۴-۳۴ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

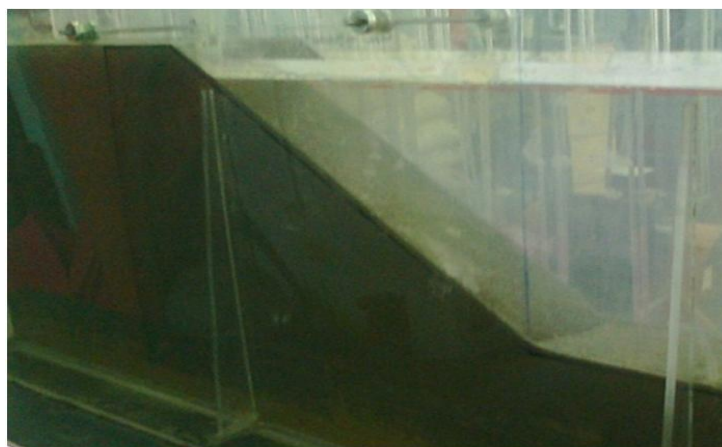
شکل ۴-۳۵ تغییرات دبی نشت را در برابر تراز آبی بالادست را برای شیب ۵۳ درجه با پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در پوشش کانال ۴:۳ با ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته، در مقایسه با کانال بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالادست مقدار دبی نشت خروجی کاهش می‌یابد بطوری که در ترازهای مشابه ۳۱۰ و ۳۶۰ میلی‌متر به ترتیب شاهد کاهش

۲۳/۴۹ و ۲۵/۳۰ درصدی دبی نشت در مقایسه با دبی نشت کانال ۴:۳ فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش هدایت هیدرولیکی و نفوذ پذیری پوشش با ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته که میزان تراکم خاک را افزایش داده است و سبب کاهش نفوذپذیری شده است مرتبط دانست. ورد نیکف (۱۹۳۹) در پژوهشی نشان داد، ارتباط مستقیم بین هدایت هیدرولیکی و دبی نشت وجود دارد که با افزایش و یا کاهش هدایت هیدرولیکی خاک، دبی نشت نیز افزایش و یا کاهش می‌یابد.

### دبی نشت



شکل ۴-۳۵ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف



شکل ۴-۳۶ عدم بروز نشانه‌ای گسیختگی در شیب ۴:۳ با پوشش ۲۰٪ وزنی آهک هیدراته

۴-۲-۷ برر سی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۳٪ وزنی نانو آهک هیدراته و شیب ۴:۳ در حالت تخلیه کانال

شکل ۴-۳۷ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به پنج تراز آبی بالادست برای شیب جداره ۵۳ درجه با پوشش ۳٪ وزنی نانو آهک نشان می‌دهد. با رسیدن تراز آب بالادست به ۴۶۰ میلی‌متر (پس از گذشت ۲۰ دقیقه از تغییر تراز آب بالادست از ۴۱۰ میلی‌متر به ۴۶۰ میلی‌متر) گسیختگی شیب کانال به صورت چرخشی و مشابه آنچه در شکل ۴-۳۹ نمایش داده شده است اتفاق افتاد. عامل اصلی گسیختگی، اشباع شدن بخش زیادی از خاک در بالای سطح آب (سطح نشت) و افزایش فشار آب حفره‌ای که نتیجه آن افزایش پتانسیل فشار هیدرولیکی است. نتایج نشان می‌دهد شیب جداره ۴:۳ با پوشش ۳٪ وزنی نانو آهک هیدراته در قیاس با شیب جداره ۴:۳ بدون پوشش، شیب جداره ۴:۳ با پوشش ۱۰٪ و ۵٪ وزنی آهک هیدراته مقاومت بیشتری در مقابل گسیختگی دارد که عامل آن را می‌توان افزایش زاویه اصطکاک داخلی (۳۹/۲ درجه) و چسبندگی (۲/۹ کیلو پاسکال) دانست. از سویی افزایش تراکم خاک و کاهش نفوذپذیری خاک نیز کاهش محسوس دبی نشت خروجی را به دنبال دارد. آهک هیدراته دارای ساختار صفحه‌ای و مسطح است. صفحات آهک هیدراته پس از آسیاب شدن به صورت ذرات کروی به هم پیوسته در می‌آیند. افزایش سطح ویژه‌ی نانو آهک هیدراته نیز در اثر به وجود آمدن این ساختار است. سطح مخصوص زیاد نانو آهک هیدراته باعث شده است این ماده در درصدهای پایین باعث بهینه شدن نسبت مقاومت برشی و سیمانی شدن شود. این عامل سبب شده تانانو آهک هیدراته‌هاز نقطه نظر مقاومت در برابر پتانسیل فشار هیدرولیکی و کاهش سطح نشت عملکرد و کارایی مطلوبی از خود نشان دهد.

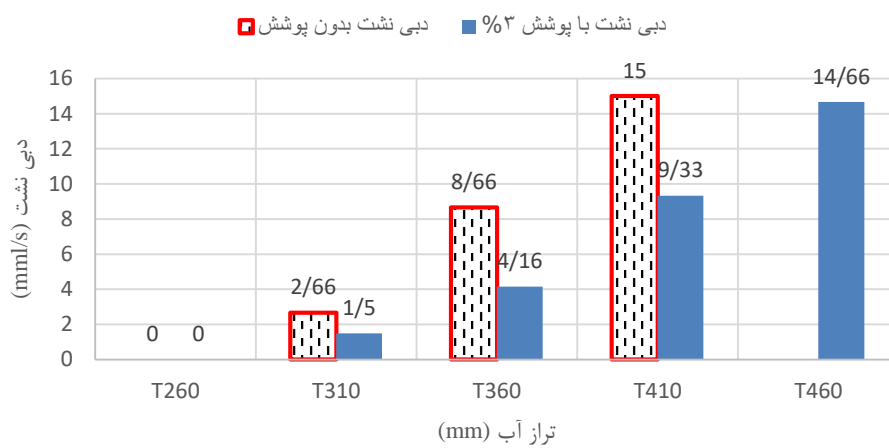
شیب ۵۳ درجه با پوشش ۳٪ وزنی نانو آهک هیدراته



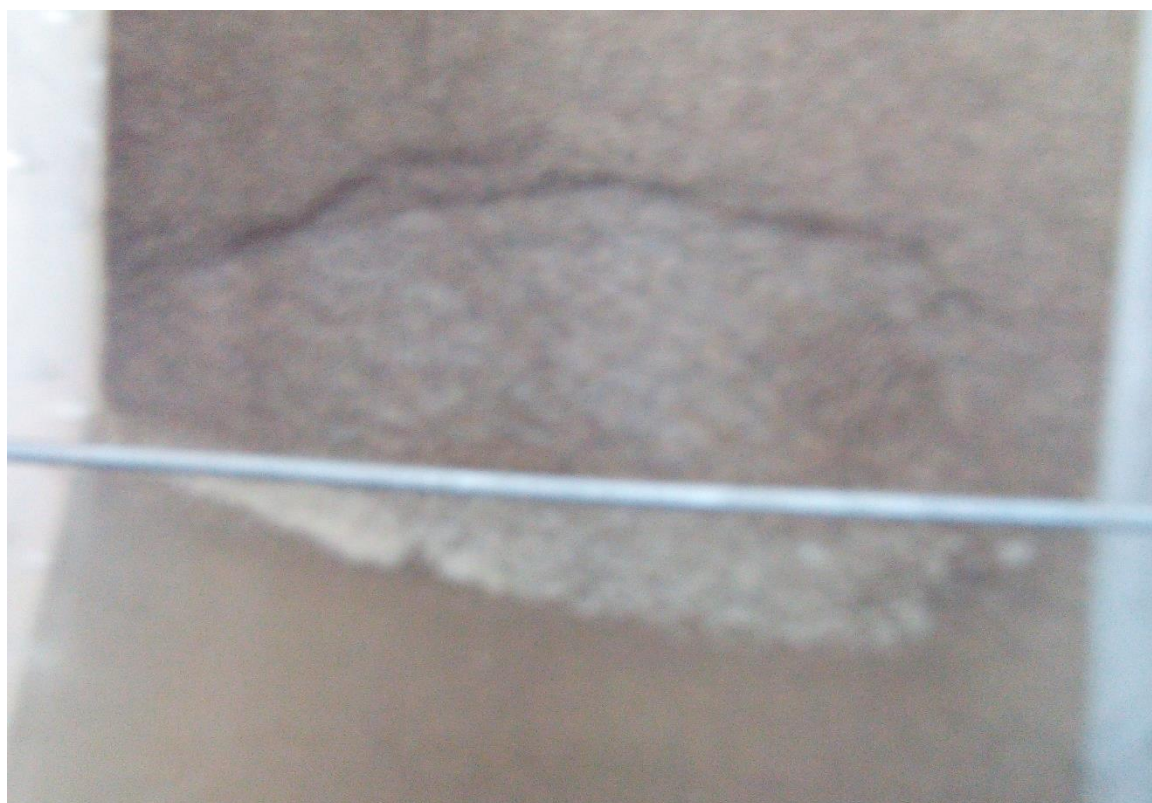
شکل ۴-۳۷ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۴-۳۸ تغییرات دبی نشت را در برابر تراز آبی مختلف بالادست برای شیب جداره ۴:۳ با پوشش ۳٪ وزنی نانو آهک هیدراته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در پوشش کانال ۴:۳ با ۳٪ وزنی نانو آهک هیدراته، در مقایسه با کانال ۴:۳ بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالا دست مقدار دبی نشت خروجی کاهش می‌یابد بطوری که در ترازهای مشابه ۳۱۰، ۳۶۰ و ۴۱۰ میلی‌متر به ترتیب شاهد کاهش ۲۰/۹۶، ۵۲/۰۷ و ۴۰ درصدی دبی نشت در مقایسه با دبی نشت کانال فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده است. دلیل این امر می‌توان به کاهش نفوذ پذیری پوشش ۳٪ نانو آهک هیدراته که میزان تراکم خاک را افزایش داده است و سبب کاهش نفوذپذیری شده است مرتبط دانست. بهاری و شاه‌نظری (۱۳۹۴) به بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانو رس پرداختند. نتایج ایشان نشان داد که با اضافه کردن نانو کمپوزیت رس با نسبت وزنی ۱٪ به خاک و انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری و تحکیم روی خاک، میزان مقاومت برشی، خاصیت چسبندگی و تراکم‌پذیری خاک به ترتیب برابر با ۱۴/۱۳، ۱۴/۱۳ و ۸۲/۷۶ درصد افزایش یافته و زاویه شکست و نسبت تخلخل نهایی نیز کاهش یافته است.

### دبی نشت



شکل ۴-۳۸ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف

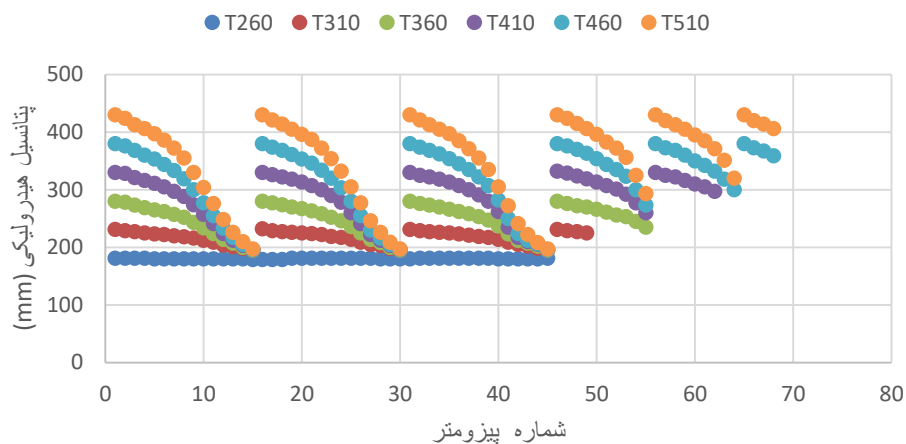


شکل ۴-۳۹ گسیختگی پوشش ۳٪ نانو آهک هیدراته

۴-۲-۸ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۵٪ نانو آهک هیدراته و شیب ۴:۳ در حالت تخلیه کانال

نمودار ۴-۴۰ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به شش تراز آبی بالادست را نشان می‌دهد. با رسیدن تراز آب بالادست به ۵۱۰ میلی‌متر و پس از گذشت ۲۰ دقیقه از تغییر تراز آب بالادست از ۴۶۰ میلی‌متر به ۵۱۰ میلی‌متر گسیختگی شیب کانال به صورت خطی اتفاق افتاد. تصویر گسیختگی در شکل ۴-۴۲ نمایش داده شده است. عامل اصلی گسیختگی، افزایش فشار آب حفره‌ای که نتیجه افزایش پتانسیل فشار هیدرولیکی و کاهش مقاومت برشی خاک در اثر اشباع شدن بوده است. نتایج نشان می‌دهد این پوشش توانایی تثبیت شیب جداره کانال ۵۳ درجه را نسبت به کانال بدون پوشش، کانال با ۵٪ آهک هیدراته، کانال با ۱۰٪ آهک هیدراته و با ۳٪ وزنی نانو آهک هیدراته را از خود نشان می‌دهد. پوشش کانال با ۵٪ نانو آهک هیدراته سبب افزایش مقاومت شیب جداره در برابر افزایش پتانسیل هیدرولیکی شده است و این افزایش مقاومت به حدی بوده که می‌تواند شیب جداره کانال را تا دو تراز بالاتر پایدار نگه دارد، بیشترین پتانسیل فشاری هیدرولیکی ثبت شده ۴۳۰ میلی‌متر است. با توجه به مشاهدات صورت گرفته شده در این پژوهش می‌توان بیان داشت پوشش کانال با ۵٪ نانو آهک هیدراته نسبت به پوشش کانال با ۵٪، ۱۰٪ آهک هیدراته و ۳٪ نانو آهک هیدراته مقاومت بیشتری در مقابل گسیختگی دارد. عامل آن را می‌توان به سطح مخصوص زیاد نانو آهک هیدراته، افزایش زاویه اصطکاک داخلی (۴۴/۷ درجه) و چسبندگی (۳/۳ کیلو پاسکال) دانست. افزایش تراکم خاک و کاهش نفوذپذیری خاک سبب کاهش محسوس دبی نشت خروجی شد.

شیب ۵۳ درجه با پوشش ۰.۵٪ نانو آهک هیدراته

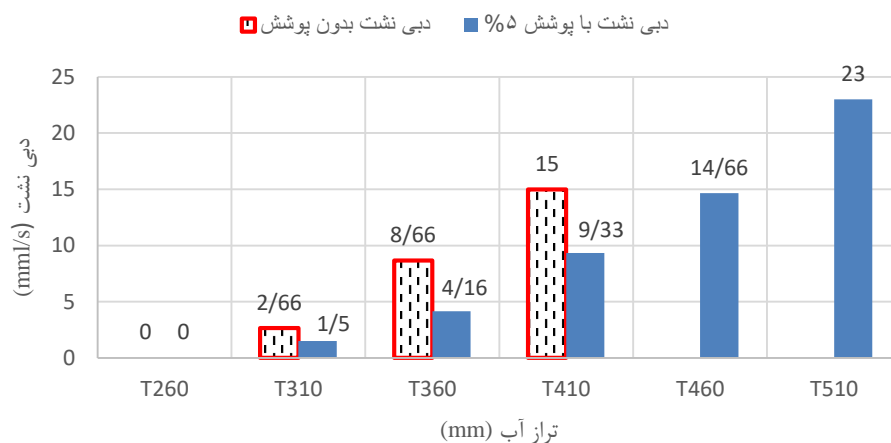


شکل ۴-۴۰ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۴-۴۱ تغییرات دبی نشت را در برابر تراز آبی بالادست برای شیب ۵۳ درجه با پوشش ۰.۵٪ نانو آهک هیدراته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در پوشش کانال با ۰.۵٪ نانو آهک هیدراته، در مقایسه با کانال بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالادست مقدار دبی نشت خروجی کاهش می‌یابد بطوری که در ترازهای مشابه ۳۱۰، ۳۶۰ و ۴۱۰ میلی‌متر به ترتیب شاهد کاهش ۲۰/۹۶، ۵۲/۰۷ و ۴۰ درصدی دبی نشت در مقایسه با دبی نشت کانال فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده است. دلیل این امر را می‌توان به کاهش نفوذپذیری پوشش با ۰.۵٪ نانو آهک هیدراته که میزان تراکم خاک را افزایش داده است دانست. بهاری و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی درصدهای مختلف نانو رس، ۰.۱۱٪ سیمان و ۰.۱٪ وزنی آهک برای کاهش هدایت هیدرولیکی خاک آب‌بندان را مورد استفاده قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که ترکیب خاک با نانو رس، سیمان و آهک به ترتیب باعث کاهش ۰.۵۸٪، ۰.۵۱٪ و ۰.۲۸٪ تلفات نشت گردید که بیشترین میزان کاهش نشت مربوط به خاک حاوی ۰.۵٪ نانو رس می‌باشد. ایشان همچنین بیان کردند با افزودن ۰.۵٪ نانو رس هدایت هیدرولیکی خاک از  $1/58 \times 10^{-4}$  متر بر ثانیه به  $2/88 \times 10^{-5}$  متر بر ثانیه کاهش می‌یابد.



### دبی نشت



شکل ۴-۴۱ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف به ازای تراز آبی مختلف



شکل ۴-۴۲ گسیختگی پوشش ۵٪ نانو آهک هیدراته

۴-۲-۹ بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال با پوشش ۵٪ نانو آهک هیدراته و شیب ۴:۳ در حالت تخلیه کانال

شکل ۴-۴۳ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی را نسبت به ۹ تراز آبی بالادست را نشان می‌دهد. مشاهدات در این آزمایش نشان می‌دهد با افزایش تراز سطح ایستابی بالادست شیب تا ۶۶۰ میلی‌متر (بیشترین حد قابل قرائت در روی تابلوی پیزومتری) شیب جداره پوشش داده شده با ۵٪ نانوآهک هیدراته

پایدار می‌باشد بطوری که هیچ گونه درز یا شکافی روی سطح شیب دیده نشد. دلیل این امر پوشش ایجاد شده روی شیب جداره کانال که باعث افزایش مقاومت برشی خاک شده است (چسبندگی خاک ۳/۳ کیلو پاسکال و زوایه اصطکاک داخلی ۴۴/۷). اضافه نمودن ۵ درصد نانو آهک هیدراته به عنوان پوشش سبب افزایش خاصیت سیمانی شدن و کاهش نفوذپذیری خاک شده است. نتایج به دست آمده در این آزمایش مشابه بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی در بدنه شیب معکوس کانال ۵۳ درجه با پوشش ۲۰٪ آهک هیدراته بوده است. در شکل ۴-۴۵ تصویر یب جداره تثبیت شده نمایش داده شده است.

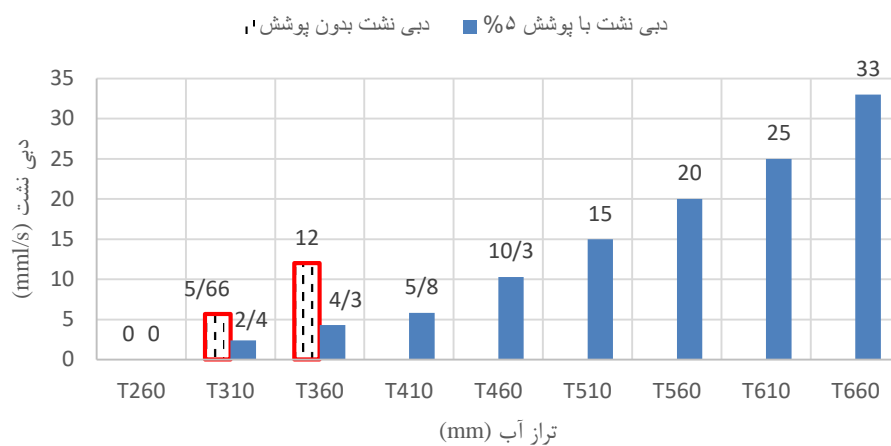
شیب معکوس ۵۳ درجه با ۵٪ نانو آهک هیدراته



شکل ۴-۴۳ تغییرات پتانسیل هیدرولیکی به ازای تراز آبی مختلف

شکل ۴-۴۴ تغییرات دبی نشت را در برابر ترازهای آبی بالادست برای شیب ۵۳ درجه با پوشش ۵٪ نانو آهک هیدراته نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در پوشش کانال با ۵٪ نانو آهک هیدراته، در مقایسه با کانال بدون پوشش (نمونه شاهد) با افزایش تراز آب بالا دست مقدار دبی نشت خروجی کاهش می‌یابد بطوری که در ترازهای مشابه ۳۱۰ و ۳۶۰ میلی‌متر به ترتیب شاهد کاهش ۵۷/۵۹۷ و ۶۴/۱۶ درصدی دبی نشت در مقایسه با دبی نشت کانال فاقد پوشش (نمونه شاهد) شده است. دلیل این امر را می‌توان کاهش نفوذپذیری پوشش با ۵٪ نانو آهک هیدراته که میزان تراکم خاک را افزایش داده است و سبب کاهش نفوذپذیری شده است دانست.

### دبی نشت



شکل ۴-۴۴ نمودار تغییرات دبی نشت به ازای تراز آبی مختلف



شکل ۴-۴۵ عدم بروز نشانه‌ای گسیختگی در شیب ۴:۳ با پوشش ۵٪ وزنی نانو آهک هیدراته

#### ۳-۴ نتیجه گیری

در این پژوهش بررسی آزمایشگاهی پایداری شیب های خاکی با استفاده از درصدهای مختلف آهک و نانو آهک در کانال های روباز انجام شد و نتایج ذیل حاصل گردید:

نتایج نشان می دهد در کانال خاکی بدون پوشش با افزایش عمق آب و شیب جداره کانال دبی نشت افزایش می یابد.

در صورت عدم پوشش جداره، گسیختگی برای شیب جداره ۲۷ درجه و ۵۳ درجه به ترتیب در تراز آبی ۵۶۰ و ۴۱۰ میلی متر و دبی نشت ۶۰ و ۱۵ میلی لیتر بر ثانیه اتفاق افتاده است.

استفاده از ۱۰٪ وزنی آهک هیدراته در قیاس با حالت بدون پوشش در شیب ۱:۱ به ازای ترازهای آب بالادست ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ و ۴۶۰ میلی متر به ترتیب منجر به کاهش ۴۴/۶۷، ۴۲، ۴۳/۷۵ و ۴۸/۱۴ درصدی دبی نشت و افزایش متوسط پتانسیل هیدرولیکی در حدود ۲۶/۵ درصد شد.

نتایج در این تحقیق نشان داد که کاربرد نانو آهک هیدراته بیشتر از آنکه در افزایش تراز آب بالادست به منظور تأخیر گسیختگی موثر باشد در کاهش دبی نشت موثر بوده است به نحوی که استفاده از پوشش ۵٪ وزنی نانو آهک هیدراته در قیاس با حالت بدون پوشش در شیب ۴:۳ در ترازهای آب بالادست ۳۱۰، ۳۶۰، ۴۱۰ میلی متر به ترتیب منجر به کاهش ۲۱، ۵۲ و ۴۰ درصدی دبی نشت و افزایش متوسط ۲۳/۲۵ درصدی پتانسیل هیدرولیکی شده است.

استفاده از پوشش ۱۰٪ آهک هیدراته در کنترل دبی نشت و پایداری شیب جداره کانال ۱:۱ بیشترین تاثیر را دارد.

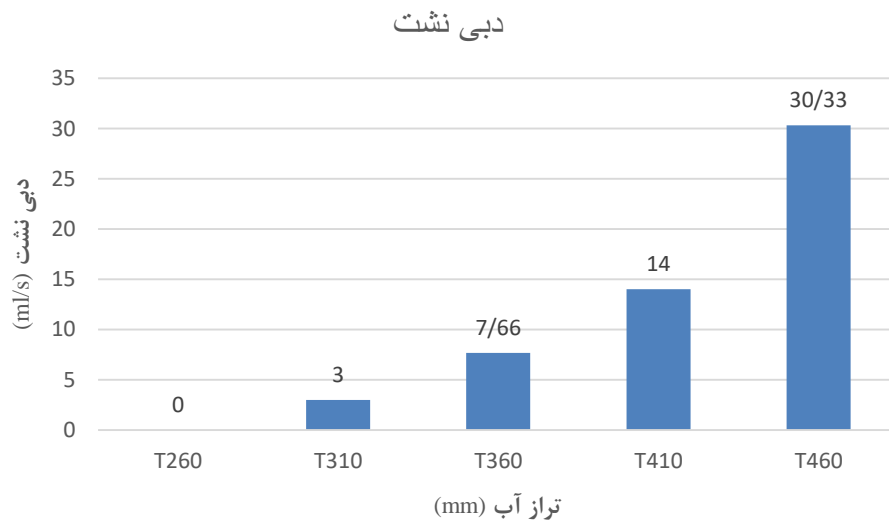
استفاده از پوشش ۳٪ نانو آهک هیدراته در پایداری شیب جداره کانال ۵۳ درجه سبب افزایش پایداری شیب می شود و در مقایسه با پوشش ۱۰٪ آهک هیدراته عملکرد چشمگیری از خود نشان می دهد.

یوشش ۵٪ نانو آهک هیدراته در مقایسه با یوشش ۲۰٪ آهک هیدراته در پایدار سازی شیب جداره  
کانال ۵۳ درجه و کنترل دبی نشت کارایی مطلوب تری دارد.



پوست

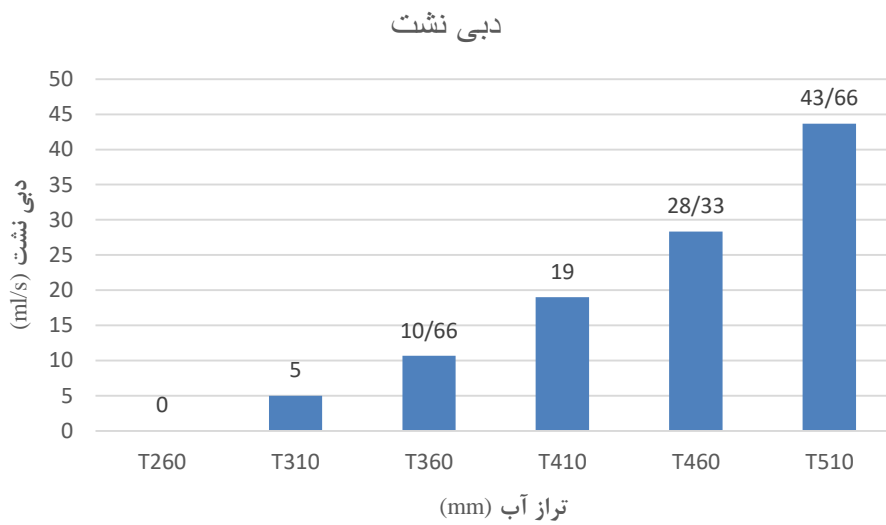
بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در بدنه شیب کانال ۳۴ درجه و  
 بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در بدنه شیب کانال بدون پوشش با شیب ۳۴ درجه و  
 در حالت تغذیه کانال





بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش با شیب ۳۴ درجه و در حالت

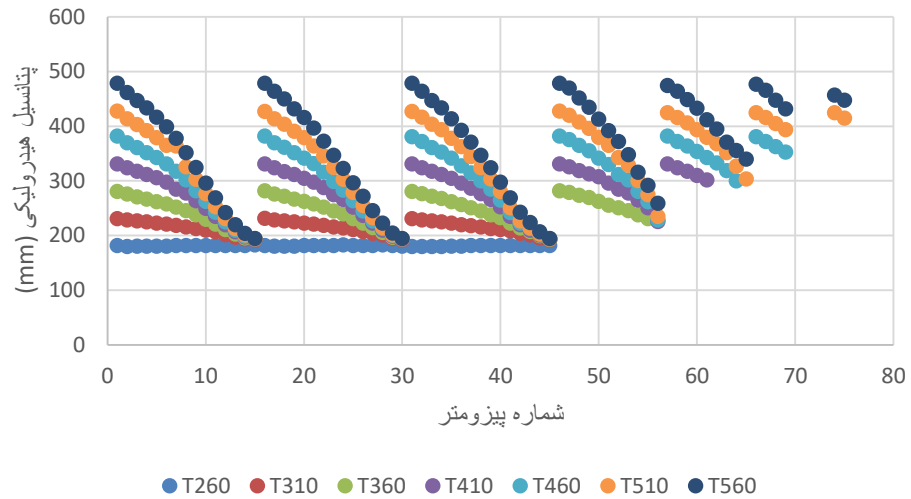
تخلیه کانال



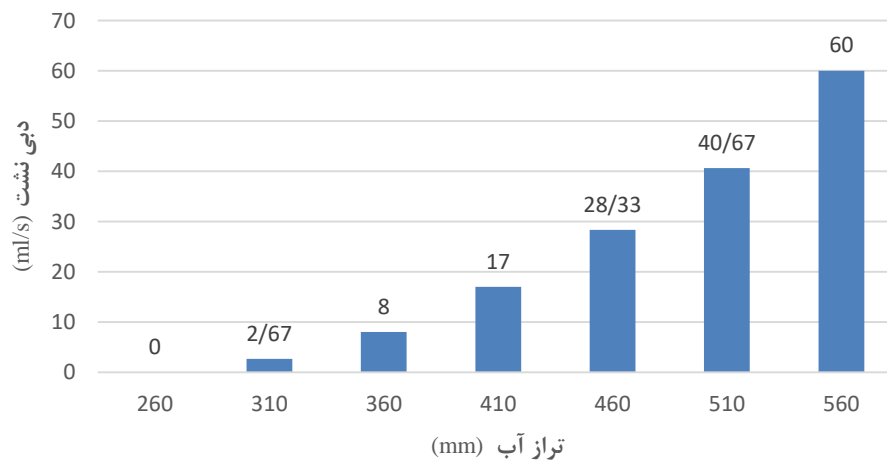
## بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در بدنه شیب کانال ۲۷ درجه

بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش با شیب ۲۷ درجه و در حالت تغذیه کانال

شیب ۲۷ درجه بدون پوشش

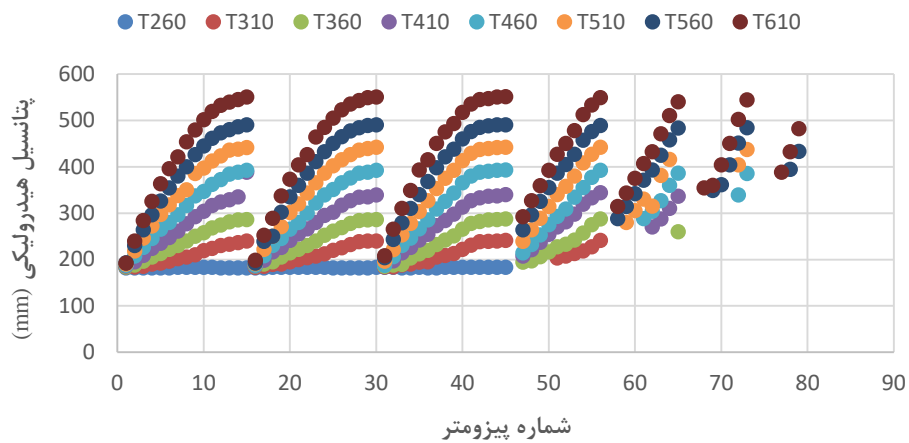


دبی نشت

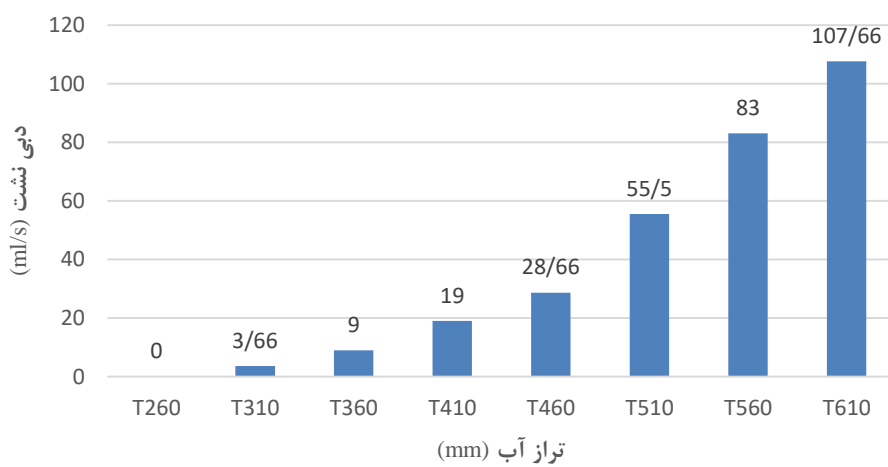


بررسی تغییرات پتانسیل هیدرولیکی و دبی نشت در خاکریز کانال بدون پوشش با شیب ۲۷ درجه و در حالت تخلیه کانال

شیب معکوس ۲۷ درجه بدون پوشش



دبی نشت





مراج

- اکبریان ع. ۱۳۹۳. طراحی سازه‌های هیدرولیکی. انتشارات عمیدی. ۲۴۰-۲۵۵
- بهاری م.، شاه‌نظری ع. و عمادی ع.ر. ۱۳۹۵. مهار نشت از آب‌بندان با استفاده از نانورس، سیمان و آهک. تحقیقات آب و خاک ایران. دوره ۴۷. شماره ۳. ۶۳۵-۶۲۵.
- بهاری م. و شاه‌نظری ع. ۱۳۹۳. بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک. سال نوزدهم. شماره ۷۲. ۱۰۷-۱۱۳.
- بهاری م. و شاه‌نظری ع. ۱۳۹۴. بررسی آزمایشگاهی تثبیت بستر خاکی ریزدانه با استفاده از نانورس. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. سال ۱۹. شماره ۷۲. ۱۱۴-۱۰۷.
- بهراملو ر. ۱۳۹۱. تاثیر پوشش بتنی بر کنترل نشت از کانال‌های آبیاری در استان همدان. مجله پژوهش آب ایران. سال ششم. شماره یازدهم. ۷۵-۸۳.
- پایدار ز. ۱۳۷۰. مدل ریاضی تلفات نشت از کانال‌های آبیاری. مجله آب. شماره ۱۰. ۲۲-۱۵.
- حمیدی قره‌تپه م. گلمایی س. ح. و تبار احمدی. م. خ. ض. ۱۳۹۳. تاثیر محل قرار گیری زهکش افقی کانال‌های آبیاری بر پایداری شیروانی در کانال دشت نکا. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. جلد بیست و یکم. شماره پنجم. ۲۰۹ - ۲۲۳.
- حیدری زاده م. ۱۳۶۹. بررسی تلفات نشت از کانال‌های آبیاری. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تهران.
- خلیل‌زاده وحیدی ا. و مرادی ن. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی تاثیر نانورس و خاکستر بادی بر مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان. نشریه علمی - پژوهشی (مهندسی سازه و ساخت). سال ۳، شماره ۳. ۴۸-۳۸.
- داس ب. م. ۱۳۸۳. اصول مهندسی ژئوتکنیک. جلد دوم-مهندسی پی. ترجمه طاحونی. چاپ هشتم. مؤسسه انتشاراتی پارس آئین. ۲۳۳-۲۴۵.
- دریائی م. و کاشفی پور س. م. ۱۳۹۰. بررسی تاثیر افزایش ماسه بادی و آهک بر روی خصوصیات مقاومتی خاک‌های رس. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). جلد ۲۵. شماره ۲. ۲۳۰ - ۲۳۹.

دفتر تدوین ضوابط و معیارهای فنی. ۱۳۸۲. مشخصات فنی و عمومی راه. نشریه ۱۰۱. تجدید نظر اول. ویرایش دوم. تهران: سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور. معاونت امور شتیبانی. مرکز مدارک علمی و انتشارات.

رضا امام س. م.، معصومی فرد. و رسولی ر ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی ناپایداری شیبهای ماسه‌ای غیر متراکم در اثر بالا آمدن سطح آب. نشریه علمی پژوهشی امیر کبیر (عمران محیط زیست). دوره ۴۵. شماره ۲. ۶۵ - ۷۲.

رضا امام. س م.، معصومی فرد. و رسولی ر. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی ناپایداری شیبهای ماسه ای غیر متراکم در اثر بالا آمدن سطح آب، نشریه علمی پژوهشی امیر کبیر (عمران محیط زیست). دوره ۴۵. شماره ۲. ۶۵-۷۲.

روحبخشان آ. کلانتری ب. ۱۳۹۵. تثبیت خاک رس با آهک و پودر ضایعات سنگی. نشریه علمی پژوهشی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران). دوره ۴۸. شماره ۴. ۴۲۹ - ۴۳۸.

زمردیان س. م. ع. و عبدالله‌زاده س. م. ۱۳۹۱. تاثیر زهکش‌های افقی بر پایداری شیروانی بالادست سدهای خاکی در حین تخلیه سریع مخزن. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست. جلد ۲. شماره ۱. ۲۹-۳۴.

سالمی ح. و سپاسخواه ع. ۱۳۸۵. اصلاح معادلات تجربی نشت آب از کانال در منطقه روددشت اصفهان. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. مجله علوم و فنون کشاورزی. جلد ۱۰. شماره اول. ۲۴۰ - ۲۵۰. سهرابی ت.، رحیمی ح. و سلامت ع. ۱۳۸۴. بررسی بازده کانال‌های انتقال و توزیع آب در شبکه آبیاری گیلان و فومنات. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. سال اول. شماره ۱. ۸۱-۷۴.

سیدی ح.، کرمی مقدم م. و آذری‌دهکردی م. ۱۳۸۷. کنترل سه بعدی نشت در سد اعلی دوست (استان فارس) با استفاده از روش عددی اجزاء محدود. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه تهران. ۱-۷.

شریفی ا. احمدی ح. و زینال زاده ک. ۱۳۹۶. بررسی رفتار پوشش های بتنی کانا لهای آبیاری واقع بر بستر اصلاح شده با آهک و سیمان. مجله پژوهش آب ایران. جلد ۱۱. شماره ۱. ۱-۱۱.

شوش پاشا ع.، عباسی م. و نجف‌نیا ه. ۱۳۹۷. بررسی اثر ترکیبی از سیمان و نانو سیلیس ب روی مقاومت برشی خاک ماسه‌ای بابلسر. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. دوره ۵. شماره ۱. ۱۷۹-۱۸۸.

شهسواری ا. و عباسی ن. ۱۳۹۰. ارزیابی تاثیر کلرید سدیم بر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک‌های رسی. همایش ملی سازه، راه، معماری. چالوس. ایران.

صدیقی اصل م.، رحیمی ح. و خالقی ح. ۱۳۸۹. مطالعه آزمایشگاهی کنترل نشت از پی‌های آبرفتی. نشریه عمران دانشگاه امیرکبیر. دوره ۴۲. شماره ۱. ۱۱-۲۱.

عابدی کویایی ج.، نوروزیان ک. و عباسی ن. ۱۳۹۴. ارزیابی دوام و پایداری خاک‌های رسی تثبیت شده با آهک هیدراته در مجاورت سازه‌های آبی. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). سال نوزدهم. شماره هفتاد و سوم. ۲۶۱-۲۴۹.

عباسی ن. ۱۳۹۴. بررسی امکان استفاده از قطعات پیش ساخته گوگردی برای پوشش کانال‌های آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۱. جلد ۹. ۱۱۹-۱۰۹.

عبدی م. ر. و پارسا پزوه ع. ۱۳۸۸. به کارگیری بنتونیت و آهک برای کاهش نفوذپذیری لایه آب‌بند مدفن زباله‌های شهری. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری- دانشکده فنی. دوره ۴۳. شماره ۱. ۷۰-۶۱.

عبدی م. ر.، میرزائی فر ح.، رفیعی‌نیا م. و ملک‌زاده ح. ۱۳۹۵. تسلیح خاک رس تثبیت شده با آهک با استفاده از ژئوگرید. نشریه علمی پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران. جلد ۳، شماره ۱. ۶۳-۷۲.

عراق علوی س. ۱۳۷۳. مدیریت توزیع آب زاینده رود بر اساس برآورد راندمان آب در کانال‌های زیر دست سد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی. دانشکده کشاورزی. دانشگاه صنعتی اصفهان.

محمدیون م.، مهتابی ق. و اسدی م. ۱۳۹۷. تاثیر تسلیح خاک با ژئوگرید در کنترل پدیده جوشش شیروانی خاکی تحت نوسان‌های تراز آب. نشریه دانش آب و خاک. جلد ۲۸. شماره ۱. ۹۵-۱۰۷.



معصومی فرد و، امام س. م. ر. و رسولی ر. ۱۳۹۲. بررسی آزمایشگاهی ناپایداری شیب‌های ماسه غیر متراکم در اثر بالا آمدن سطح آب، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر، دانشگاه صنعتی امیر کبیر (پلی تکنیک تهران). دوره چهل و پنج. شماره ۲. ۶۵ - ۷۲.

ورجوند پ. فرسادیزاده د. حسین‌زاده دلیر ع. شکری ن. حسینی س. ح. و خسروی‌نیا پ. ۱۳۹۳. بررسی تاثیر پرده آب‌بند بر پایداری شیب جانبی کانال خاکی. مجله پژوهشی آب ایران. سال هشتم. شماره چهاردهم. ۱۹۵ - ۲۰۴.

یاراحمدی ش. ا. ۱۳۹۰. تاثیر آهک بر روی نفوذپذیری خاک‌های رسی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد خاک و پی. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی. ۸۰.

یوسفی م.، صدقی‌اصل م. و پرویزی م. ۱۳۹۴. مطالعه آزمایشگاهی تاثیر سپری‌های قائم و مایل در کنترل نشت و پدیده‌ی جوشش در پی سازه‌های آبی. تحقیقات آب و خاک ایران. دوره ۴۶. شماره ۱. ۷۰-۵۹.

Anderson S. A. and Riemer M. F. 1995. Collapse of Saturated Soil Due to Reduction in Confinement. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. 121(2): 216-219.

Bahramlou R. 2012. Evaluation of seepage losses in irrigation stone-lined canals in cold regions and its effect on water resources (Case study in Hamedan Province), *Iranian water research journal*, vol. 5, no. 9, pp: 141-150.

Berilgen M. M. 2006. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions. *Journal of Computers and Geotechnics*. 34(2):81-91.

Berrones R. F. and Acosta N. P. 2011. Internal Erosion Due to Water Flow

Brinkgreve R. B. J. 2003. PLAXIS 2D-V8.2. Reference Manual, Delft University of Technology. The Netherlands. Chapter 22.

El Dorado Irrigation District. 2002. Project 184: Canal Failure Frequency and Analysis. El Dorado Irrigation District. pp: 1-9.

- Fipps G. 2000. Potential water savings in irrigated agriculture for the Rio Grande planing region. Final report. Department of agriculture engineering. Texas A&M university system.
- Gallagher P. M. 2000. Passive Site Remediation for Mitigation of Liquefaction Risk, PhD Thesis .Virginia Polytechnic Institute and State University .Blacksburg .US.
- Goharnejad H., Noury M., Noorzad A., Shamsaie A. and Goharnejad A. 2010. The effect of clay blanket thickness to prevent seepage in dam Reservoir. Research Journal Environmental Sciences 4(6): 558-565.
- Gopinathan M. 1996. An expert system for riverbank protection. University of Louisville. 125-127.
- Jat M. L., Bairwa P. C., Summuria R., Balyan J. K. and Laddha K. C. 2011. Assessment of calcareous soil lining for seepage reduction from farm pond under dryland ecosystem. Indian Journal of Soil Conservation 39 (3): 202-206
- Jawaid A. 1997. Stabilization of Organic Soil Using Un-Alaked Lime. Proceedings of 4TH International Conference on Civil Engineering. Sharif University of Technology .Tehran .Iran .Vol.2, pp.326-333.
- Kahlowm M .A. and Kember. W. D. 2004. Seepage losses as affected by condition and compositon of channel banks.Jornal of agriculture water management, 20-26.
- Katibe H. 2004. Seepage from lined canalusing finite- element method. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE. 130(5):441-444.
- Kumar .A., Walia B. S. and Bajaj .A .2007. influence of Fly Ash. Lime. and polyester fibers on compaction and strength properties of Expansive soil. Journal of materials in civil engineering. ASCE. Vol. 19. No. 3. pp. 242-248.
- Li G. 2004. Properties of high-volumey ash concrete incorporating nano-sio2, Cement and Concrete Research, 34(6), pp. 1043-1049.

lining Utah state University, Cooperative Extension.

Liu j., He. SH., Zh. Zhaoqi., J. Cao., P. LV. 2009. Nano-silver pulse treatments inhibit stem-end bacteria on cutgerbera cv. Ruikou flowers. *Postharvest Biology and Technology*: (54) 59–62.

Mutembei H. M. 2006. Expression of estrogen receptor alpha and beta, aromatase, steroid sulfates and estrogen sulfotransferase in testes of immature and mature boars. *Reproduction Domestic Animal*. 40: 228-236.

Naeimi M. Gh. and Bayati H. 2011. Investigation the Effect of Grout Wall and Curtain on Seepage Decrease with by Increase in Diffusion Depth in Right Side Axis of Mirzaye Shirazi Dam by Numerical Method, 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan, Iran.

Neethu S. V. and Remya S. 2013. Engineering behaviour of nanoclay stabilized soil *J Geotech Geol Eng* 31(1):337–349.

Newton D. and Perle M. 2006. Irrigation sistrict water efficiency cost analysis and prioritization. DWA final report. USBR

Nila Rekha P., Jayanthi M., Muralidhar M., Gupta B.P. and Puthiavan R. 2005. Cost effective seepage control measures for brackishwater aquaculture ponds, *Indian Journal of fish* 52 (1): 105-110.

Pakbaz M. S., Dardaei A. and Salahshoor J. 2009. Evaluation of Performance of Plastic Concrete Cutoff Wall in Karkheh Dam using 3D Seepage Analysis and Measurement, *Journal of Applied Sciences*, Vol. 9, No. 4, pp: 724–730.

PCA: Portland Cement Association, 2001, Concrete information, Concrete slab

Philip H. B., and Karaki S. 1971. Seepage Effect on Channel Bank Stability. *Journal of Irrigation and n97(1)*: 59-72

Prijic S. and Sersa, G. 2011. Magnetic nanoparticles as targeted delivery systems in oncology. *Radiology and Oncology*. 45: 1-16.

Robert Hill, 2000, How well does your irrigation canal hold water Does it need

Rostamian R. and Abedi Koupai J. 2012. Assessment of SEEP/W Model to Estimate Seepage from Earth Canals (Case Study: Irrigation Network of Downstream Zayandehrud), Water and Soil Science (Journal of Science and Technology of Agriculture and Natural Resources), vol. 15, no. 58, pp. 13-22.

Sepaskhah A. R. and Salemi H. R. 2004. An empirical model for prediction of conveyance efficiency for small earth canals. Iranian Journal of Science and Technology, 28: 623-628.

Shahrokhnia M. A., Zare E. 2014. Technical and Economical Evaluation of Seepage in Darab Irrigation Canals. Iranian Journal of Irrigation and Drainage No. 1, Vol. 8, p. 44-52.

Shen J., Huang B., Shu, X. S. and Tang B. 2011. Size effect of sub nano-scaled hydrated lime on selected properties of HMA”, International Journal of Pavement Research and Technology, Vol.4,No.4,pp.252-257.

sivapullaiah P. V., katageri b. and herkal R. N. 2006. behavior of California bearing ratio of soil /fly ash mixtures with and without additives. 2 nd international conference on problematic soil. pp. 325-329.

Srivastava A. and Sivakumar Babu G.L. 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.

Subramaniya K., Madhav R. M. and Govinda C. M. 1973. Studies on Seepage from Canals with Partial Lining. Journal of Hydraulic Division. 99 (12): 2333-2351.

Subudhi C.R. and Senapati S. C. 2013. Water harvesting through farm pond and surface defects: causes, prevention, repair.

Szalay B. 2012. Iron oxid nanoparticles and their toxicological effect: in vivo and in vitro studis. PhD Thesis

Telang Sh. 2012. How to calculate water losses through seepage?. from [http:// www. Greencleanguide.com](http://www.Greencleanguide.com).

Thandaveswara B. S. 2008. Hydraulics, Indian Institute of Technology Madras.

Tingle J. S. 2004. Emulsion polymers for soil stabilization. in Proceedings of the FAA Worldwide Airport Technology Transfer conference, Atlantic city, New jersey, USA.

Utilization of conserved water for vegetable crops. Elixir International Journal Advanced Engineering Informatics 57: 13901-13905.

Valiant J. 2000. Canal seepage reduction demonstration using polyacrylamides in the ditch and water Arkansas river vally of Colorado. USBR.

Wang J., Asbach C., Fissan H., Hülser T., Kuhlbusch T. A., Thompson D. and Pui D. Y. 2011. How nanobiotechnology oversight advance science and industry: examples from environmental, health, and safety studies of nanoparticles (nano-EHS). Journal of Nanoparticle Research. 13(4): 1373-1387.



## **Abstract**

Studying the stability of side wall of earthen channels in term of increment water use efficiency and decrement of economic costs due to failure is essential. In this study stability of various soli slope (1:1, 1:1.5, 1:2 and 3:4) in a seepage tank with different percentage of hydrated lime (2, 5, 10 and 20 weighing percentage) and nano lime (3 and 5 weighing percentage) was simulated. In the absence of coverage, in 53° side slope, failure was occurred in water head of 460mm with seepage rate of 15 mlit/s where as in 27° side slope these characteristic were obtained about 560 mm and 60 mlit/s, respectively. In 1:1 slope with 10% of hydrated lime in comparison with the same slope and non-coverage, seepage rate was decreased about 44.66, 42.016, 43.75 and 48.14% in water heads of 310, 360, 410 and 460 mm, respectively. The results showed that in side slope of 3:4 with assigning 5% of nano lime compared with the same slope without any coverage, the seepage rate was decreased about 29.96, 52.07 and 40% in water heads of 310, 360 and 410 mm, respectively.

**Keywords:** Hydraulic Potential, seepage, soil channel, stability, nano lime



**Shahrood University of  
Technology**

Faculty of Agriculture

M.Sc. Thesis in Water Structures Engineering

**Investigation of earthen slopes stability using nano-lime in open channels**

By:Saeid Najjarzadeh

Supervisor:  
Dr. Roozbeh Moazenzadeh

Advisor:  
Dr. Khalil Azhdari  
Dr. Seyed Hossein Hosseini

September, 2019