

بررسی تأثیر فرایند الکتروسینتیک بر کاهش نشت، افزایش زمان تخریب و افت سطح نشت در هسته رسی سدهای خاکی

سعید صالحی^۱ و امین محمودی مقدم^{۲*}

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۸)

چکیده

پژوهش حاضر با بکارگیری مدل‌های آزمایشگاهی سدهای خاکی همگن، به بررسی تأثیر روش الکتروسینتیک بر پارامترهای نشت از جمله افت خط نشت، زمان تخریب سد در هنگام رویارویی با پدیده پایینگ و همچنین کنترل دبی نشت در زمان استفاده از این روش می‌پردازد. برای این منظور، برای تعیین تأثیر این روش بر افت خط نشت، دو مدل سد خاکی غیر همگن با هسته رسی قائم در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد، در زمان استفاده از روش الکتروسینتیک و زهکش افقی به خاطر حرکت آب به سمت زهکش‌های تعبیه شده در کف، خط نشت به صورت معناداری در محوطه الکترودهای استفاده شده افت می‌کند. همچنین، برای تعیین تأثیر روش الکتروسینتیک بر زمان تخریب، از دو مکعب رسی استفاده شد. نتایج مقایسه‌ها بین مدل‌ها با و بدون روش الکتروسینتیک نشان داد، به‌ازای اعمال ولتاژ در محیط رسی، زمان تخریب به میزان ۱۸ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین، نتایج هیدروگراف نشت دبی از مدل آزمایشگاهی سد خاکی همگن با درصد رس مخلوط شده ۱۰ و ۲۰ درصد نشان داد، با اعمال روش الکتروسینتیک، دبی نشت به صورت معناداری تا ۳۲ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین، با افزایش میزان رس، میزان تأثیر روش الکتروسینتیک نسبت به مدل شاهد بیشتر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: الکتروسینتیک، زمان تخریب، دبی نشت، خط نشت، آند، کاتد

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

۲. گروه عمران، مؤسسه آموزش عالی شمس، گناباد، ایران.

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: amin.mahmudi@modares.ac.ir

مقدمه

کاهش یافته تا جایی که در نقطه‌ای مشخص این تفاوت از بین می‌رود. این شیوه قرارگیری یون‌ها در لایه انتشار به علت تعادل بین نیروهای معین الکترواستاتیکی و نیروهای احتمالاتی برونین (ناشی از گرادیان حرارت) صورت می‌گیرد. با جذب کاتیون‌های مثبت توسط آنند، اصطکاکی نسبی بین یون‌های مثبت مولکول‌های آب بوجود می‌آید که باعث کاهش سرعت و همچنین جذب مولکول آب (خاصیت قطبی مولکول آب) می‌شود. از این پدیده می‌توان برای کنترل حرکت آب در خاک و همچنین جهت‌دهی نشت استفاده کرد. در شکل (۱- الف و ب)، لایه‌های مختلف اطراف آنند نمایش داده شده است، شکل (۲- ب) (۲). پتانسیل الکتریکی در لایه استرن با افزایش فاصله از دیواره به صورت خطی، در صورتی که در لایه انتشار به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

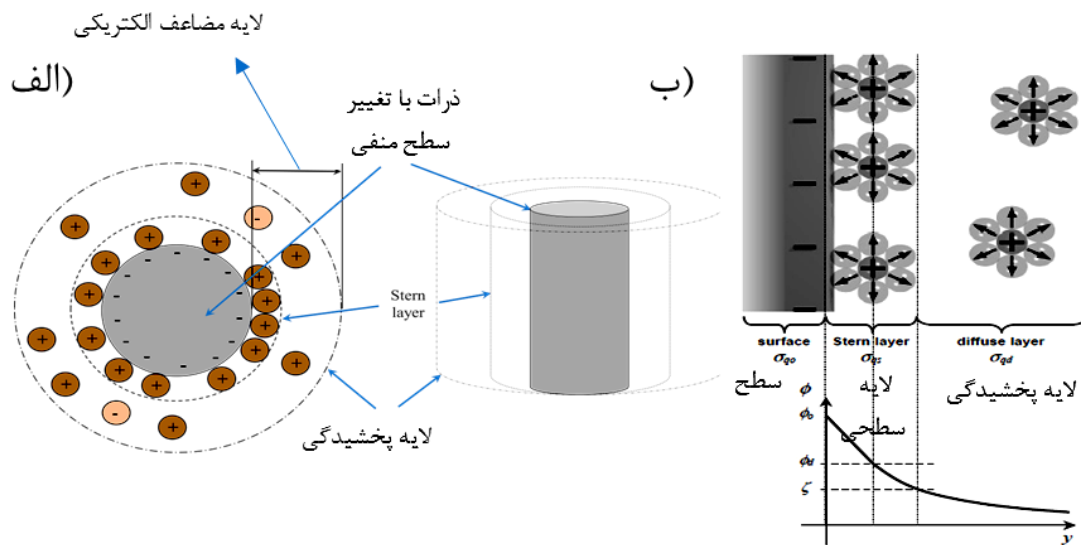
در این پژوهش تأثیر روش الکتروسیستیک بر روند نشت در سدهای خاکی غیرهمگن مورد بررسی قرار می‌گیرد. روش الکتروسیستیک روشی است که با استفاده از اعمال جریان الکتریکی در محیط متخلخل می‌توان تغییراتی برای افزایش و یا کاهش روند نشت را ایجاد کرد. همچنین، این روش در جمع‌آوری فلزات سنگین در محیط خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. از این رو، شناخت عوامل مؤثر بر کاهش و یا افزایش روند نشت در زمان استفاده از این روش در هسته سدهای رسی، نیازمند بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیل است.

در سال‌های اخیر توجه به فناوری اصلاح الکتروسیستیک به عنوان یک روش اصلاح درجا بیشتر شده و تلاش برای بکارگیری آن را با شیوه‌های جدید، ابتکاری و مقرون به صرفه افزایش داده است (۳). پژوهشگران محیط زیست این فناوری را تحت عناوینی مانند اصلاح الکتروسیستیک، اصلاح الکتریکی، احیاء الکتریکی، بازیافت الکتریکی، آلودگی‌زدایی الکتروشیمیایی یا مهاجرت الکتریکی بیان کرده‌اند. به طور کلی الکتروسیستیک مستلزم نصب الکترودهایی در زیر سطح ناحیه آلوده هست. بعد از قرارگیری الکترودها، یک پتانسیل الکتریکی

نشت از بدنه سدهای خاکی در طراحی‌های مهندسی همواره یکی از پارامترهای مهم در نظر گرفته می‌شود. از این رو، شناخت عوامل تأثیرگذار بر این پارامتر مهم، می‌تواند باعث بهبود طرح سد شود که به خودی خود باعث کاهش هزینه‌ها و بالابردن ضریب پایداری سد می‌شود. امروزه روش‌های مختلفی برای کاهش و کنترل نشت از بدنه سدهای خاکی معرفی شده‌اند. از جمله این روش‌ها می‌توان به استفاده از زهکش‌ها و فیلترها اشاره کرد. همچنین، با پیشرفت علوم دیگر از جمله علم شیمی روش‌های دیگری برای کنترل نشت معرفی شده‌اند برای نمونه می‌توان به روش الکتروسیستیک اشاره کرد. استفاده از این روش در سدهای خاکی همواره مورد بحث و پژوهش بوده است. در این پژوهش موارد زیر بررسی شده است: بررسی تأثیر روش الکتروسیستیک بر روند نشت در محیط متخلخل با درصدی از رس، بررسی تأثیر روش الکتروسیستیک بر حرکت آب در خاک رسی و تأثیرات آن بر خط نشت تشکیل شده در بدنه سدهای خاکی، بررسی تأثیر روش الکتروسیستیک بر نشت در سدهای خاکی غیر همگن، بررسی تأثیر روش الکتروسیستیک بر زمان تخریب سدهای خاکی همگن.

مطالعات انجام شده

به حرکت توده سیال نسبت به فاز جامد و ساکن بر اثر اعمال میدان الکتریکی الکترواسموز می‌گویند. زمانی که دیواره میکروکانال باردار بوده و در مجاورت یک الکترولیت قرار گیرد، بارهای مخالف با بار میکروکانال به صورت لایه‌ای در مجاورت آن قرار می‌گیرند. به این لایه، لایه مضاعف گفته می‌شود. با نگاه میکروسکوپی دیده می‌شود که این لایه خود از دو لایه تشکیل شده است؛ یک لایه بسیار نازک که به شدت به دیواره چسبیده و غیر قابل حرکت بوده که به آن لایه استرن گفته می‌شود و لایه دیگر که به آن لایه انتشار می‌گویند. در لایه انتشار بارهای مخالف و موافق با بار دیواره وجود دارد، ولی تراکم بارهای مخالف بسیار بیشتر از بارهای موافق بوده و با افزایش فاصله این تفاوت تراکم



شکل ۱. لایه‌های تشکیل شده در اطراف آند و کاتد الکتروسیتیک، (الف) لایه‌های تشکیل شده در اطراف الکتروود، (ب) کاهش پتانسیل اسموزی با فاصله گرفتن از آند

بررسی قرار گرفت. همچنین، از دیگر نتایج این پژوهش می‌توان اشاره کرد که مطالعات مومتم و انتقال حرارت معمولی که در کانال‌ها و لوله در جریان آرام به کار می‌روند در میکروکانال‌ها اعتبار خود را از دست می‌دهند. همچنین، شارژ الکتریکی درون دیواره بر خصوصیات هیدرودینامیکی سیال در میکروکانال‌ها تأثیر مهمی دارد. در رابطه با لایه دوگانه الکتروسیتیک نتایج نشان داد، یک جریان معکوس (در خلاف لایه دوگانه جهت جریان اصلی) به وجود می‌آورد، به طوری که اثر خالص آن باعث کاهش دبی جریان می‌شود. این کاهش دبی ناشی از افزایش ویسکوزیته سیال تعبیر می‌شود. از این‌رو، در میکروکانال‌ها ویسکوزیته ظاهری سیال اهمیت می‌یابد. همچنین، نتایج بررسی گرادیان فشاری در میکروکانال‌ها نشان داد، گرادیان فشار در اثر حضور لایه الکتروسیتیک در میکروکانال‌ها نسبت به جریان آرام توسعه یافته در کانال‌ها و لوله‌ها بیشتر است. باعث کاهش حضور لایه دوگانه الکتریکی انتقال حرارت می‌شود. با افزایش بیشتر پتانسیل الکتریکی در دیواره میکروکانال، عدد نوسلت کاهش بیشتری پیدا می‌کند.

نیک نژاد (۴)، به بررسی کاربرد تکنولوژی الکتروسیتیک در جابجایی رطوبت خاک پرداخت. برای انجام این پژوهش از

کوچک بین آند (الکتروود مثبت) و کاتد (الکتروود منفی) اعمال می‌شود. در نتیجه برقراری پتانسیل الکتریکی بین دو الکتروود در خاک، واکنش‌های مختلف فیزیکی- شیمیایی روی داده و انتقال آلاینده تحت سازوکارهای متفاوت درون خاک و آب‌های زیرزمینی انجام می‌گیرد (۵).

شکوهمند و بهرامی (۲۰)، به بررسی انتقال حرارت در (EDL) بررسی اثرات میدان الکتروسیتیک میکروکانال‌های مستطیلی پرداختند. آنها بیان داشتند که لایه الکتریکی دوگانه داخل کانال می‌گذارد. به طوری که معادلات معمول انتقال حرارت و جریان در کانال‌ها در مورد میکروکانال‌ها اعتبار خود را از دست می‌دهد. شارژ الکتریکی درون دیواره کانال عامل ایجاد یک میدان الکتروستاتیکی در کانال می‌شود که این میدان با تأثیرگذاری بر یون‌های داخل سیال، جریان داخل کانال را تغییر می‌دهد. از این‌رو، گرادیان فشار بیشتری در کانال برای به جریان انداختن سیال لازم است. انتقال حرارت در کانال با در نظر گرفتن لایه الکتریکی دوگانه مورد بررسی قرار گرفته است. حضور لایه الکتریکی دوگانه باعث کاهش عدد نوسانات و در نتیجه انتقال حرارت می‌شود. نتایج این پژوهش نشان داد، جریان آرام سیال حاوی یون در داخل میکروکانال‌ها مورد

درصد فلزات سنگین در نزدیکی آند خارج شد، درحالی که درصد خروج در ۲۴ سانتی متری کاتد در مورد برخی از فلزات (کادمیم و سرب) منفی بود. به علاوه، میزان کربن زیست توده میکروبی و ضریب میکروبی کاهش معنی داری را نشان داد. بیشترین کاهش در نزدیکی کاتد ($P < 0/01$) که فلزات سنگین تجمع یافته بود مشاهده شد. روند افزایشی آن از آند به کاتد، pH کنترل بیشترین تأثیر منفی را در این زمینه داشت. همچنین، نتایج بررسی دبی خروجی از زهکش های انتهایی نشان داد این پدیده تأثیر مستقیم بر کاهش دبی داشته است.

الکترواسمز به حرکت مولکول های آب تحت اثر میدان الکتریکی و الکترونی به حرکت ذرات باردار تحت اثر میدان الکتریکی و الکتروفورز به حرکت ذرات جامد تحت اثر میدان الکتریکی اطلاق می شود که از انواع پدیده های الکتروسیتیتیکی مورد استفاده در علم ژئوتکنیک به شمار می روند. درباره کاربرد الکتروسیتیتیکی در بهبود خواص مکانیکی خاک می توان به تثبیت خاک های ریزدانه، تزریق مواد شیمیایی به صورت دوغاب، افزایش پایداری دیواره حفاری ها، کاهش اصطکاک جداره منفی شمع و افزایش ظرفیت اصطکاکی شمع ها اشاره کرد. در پنجاه سال اخیر الکترواسمزی به عنوان یک تکنیک عملی تثبیت برای بهبود مقاومت و تغییر شکل ها در خاک های ریزدانه و سست به کار گرفته شده است. همچنین، با استفاده از روش الکتروسیتیتیکی می توان مقاومت جداره شمع های فولادی اصطکاکی قرار گرفته در لایه رس را به طور چشم گیری افزایش داد. افزایش ظرفیت باربری و مقاومت جداره شمع از آن نظر مورد اهمیت است که شمع ها از جمله سازه های نگهدارنده ای هستند که معمولاً در سازه های بزرگ برای ایمنی سازه در مقابل نشست، مورد استفاده قرار می گیرند. بنابراین طراحی و اجرای آنها حائز اهمیت بوده و هر چه شمع ها ظرفیت بالاتری داشته باشند می توانند از دیدگاه اقتصادی و کاربردی مقرون به صرفه باشند. رستمی پور (۶) در مطالعه ای به بررسی جامع تأثیر تزریق الکتروسیتیتیکی محلول های شیمیایی و نحوه کاربرد آن بر میزان افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده خاک و افزایش

استوانه هایی به قطر داخلی ۳۰ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر که جنس آن پلکسی گلس بود استفاده شد. همچنین، از شش نمونه بافت خاک با ترکیبی از بافت لومی رسی و ماسه ای تهیه و رطوبت آنها بطور یکنواخت به ۱۲ درصد وزنی افزایش داده شد. هر کدام از استوانه ها تا ارتفاع ۹۰ سانتی متری از خاک های با بافت جدید پر شده به طوری که ۱۰ سانتی متر از قسمت تحتانی خاک داخل استوانه ها توسط یک سرریز در حالت اشباع نگه داشته شده بود. یک الکتروود به عنوان آند (+) در قسمت اشباع و الکتروود دیگر به عنوان کاتد (-) در عمق ۱۰ سانتی متری از سطح خاک نصب شدند. خاک داخل استوانه ها به مدت ۴ روز تحت تأثیر جریان الکتریکی ۶۰ ولت مستقیم قرار گرفتند و رطوبت آنها بعد از مدت مذکور اندازه گیری شدند. هدف از این پژوهش، جابجایی رطوبت بر اثر فناوری الکتروسیتیتیکی بود. نتایج نشان داد که به ازای یک ولتاژ معین هر چه بافت خاک سنگین تر باشد مقدار رطوبت جابجا شده نسبت به شاهد که اختلاف پتانسیل الکتریکی به آن اعمال نشده است بیشتر است. این نتیجه نشان داد، با افزایش میزان رس در مدل های آزمایشگاهی مقدار تأثیر کاهش رطوبت و اعمال زهکش در منطقه آند به صورت معناداری افزایش پیدا خواهد کرد.

برای حذف فلزات سنگین مطالعات مختلفی در ایران نیز در شرایط آزمایشگاهی صورت گرفته است. بیرامی و همکاران (۱) کارایی روش الکتروسیتیتیکی را در یک خاک رسی که (Zn) در حذف فلز سنگین روی به صورت مصنوعی آلوده شده بود، بررسی کردند. آنها در شرایط آزمایشگاهی تأثیر استفاده از چهار الکتروولت مختلف (اسید استیک، اسید نیتریک، آب مقطر و EDTA) بر کارایی حذف فلز سنگین روی را بررسی کرده و مشاهده کردند که تیمار بیشترین کارایی EDTA (حدود ۵۵ درصد) را داشته است. همچنین، باهمت و همکاران (۷) اصلاح الکتروسیتیتیکی خاک آلوده به فلزات سنگین (سرب، روی، نیکل و کادمیم) و تأثیر آن بر کربن زیست توده و ضریب میکروبی را در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد بعد از ۲۰ روز اعمال اختلاف پتانسیل ۳۰ ولت، بیش از ۳۰

ظرفیت باربری شمع پرداخت. نتایج این مطالعه نشان داد با اعمال روش الکتروسیتیک با کاهش رطوبت در جدار شمع‌ها، ظرفیت باربری آنها به صورت زیادی افزایش پیدا کرد.

شاه محمدی و همکاران (۸) به بررسی پالایش خاک آلوده به روی با استفاده از فناوری الکتروسیتیک در شرایط مزرعه‌ای پرداختند. آنها بیان داشتند که حذف الکتروسیتیک فلزات سنگین از خاک‌های آلوده (به ویژه در خاک‌های با هدایت هیدرولیکی پایین) یک روش ابتکاری برای اصلاح آنها است. در این پژوهش اصلاح خاک لومرسی که با روی به صورت مصنوعی آلوده شده بود به روش الکتروسیتیک در سه عمق صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی متری در ۴ کرت در شرایط مزرعه‌ای بررسی و ارزیابی شده شد. آزمایش‌ها با اعمال شیب ولتاژ یک ولت بر سانتی متر در سه دوره زمانی دو، چهار و شش روز در مزرعه‌ای در اطراف شهرستان مرند در استان آذربایجان شرقی انجام شد. خاک مورد نظر پس از آلوده شدن، دارای غلظت بالای ۸۲۸ و ۹۶۵ میلی گرم بر کیلوگرم به ترتیب در سه عمق صفر، ۱۵ و ۳۰ سانتی متری) بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که کارایی حذف روی از خاک آلوده با افزایش مدت زمان اعمال جریان الکتریکی به طور چشم‌گیری افزایش یافت. همچنین، بررسی نشت در انتهای کرت‌های مورد مطالعه دلالت بر کاهش رطوبت در انتهای کرت‌های با اعمال الکتروسیتیک بود.

جریان الکتریکی (یا اختلاف پتانسیل الکتریکی) به کار رفته منتهی به واکنش‌های الکترولیز در مجاورت الکترودها، توزیع اسید- باز تحت تأثیر اختلاف پتانسیل‌های شیمیایی، الکتریکی، هیدرولیکی، جذب و و جذب، واکنش‌های رسوب و انحلال، انتقال سیال منفذی و یون‌ها و نیز ته‌نشینی الکتریکی می‌شود این امر در جهت پدید آوردن پرده‌ی آب‌بند تأثیر مستقیم گذاشته و باعث کاهش نشت در محیط متخلخل تحت تأثیر جریان الکتریکی می‌شود. (۹ و ۱۰). همچنین، با اعمال میدان‌های الکتریکی در خاک آلوده، جابجایی یون‌های باردار (مانند یون‌های فلزات سنگین) اتفاق می‌افتد. یون‌های با بار مثبت به سمت کاتد و یون‌های با بار منفی به سمت آن‌د مهاجرت

می‌کنند این امر باعث کاهش دبی نشت در زمان انتقال فلزات سنگین به سمت کاتد و آن‌د می‌شود. همچنین، جریان هم‌گرا شده به سمت کاتد باعث ایجاد تخلیه دبی نشت از آن نقطه را دارد (۱۱). با مهاجرت یون‌های فلزات سنگین به سمت الکترودها می‌توان آنها را به شیوه‌های مختلف از خاک خارج کرد. بر اساس مطالعات متعدد، افزایش شدید موجب کاهش کارایی این فرایند در حذف فلزات سنگین می‌شود، زیرا، وقتی فلزات سنگین وارد محیط قلیایی طی فرایند الکترولیز در اطراف OH- (ناشی از تولید کاتد) می‌شوند، جذب ذرات خاک شده یا به صورت هیدروکسید و غیره رسوب می‌کنند. شرایط اسیدی می‌تواند موجب وا جذب، انحلال، جابجایی یون‌های فلزات سنگین و افزایش کارایی اصلاح الکتروسیتیک در خشک کردن محیط متخلخل شود (۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵).

پدیده نشت در سدهای خاکی و محیط متخلخل، همواره بر اساس قوانین نشت آب در خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. همچنین، اعمال نیروهای الکتروسیتیک مستلزم اعمال این پدیده با استفاده از ابزاری است. لیو و همکاران (۲) با در نظر گرفتن یک محیط متخلخل در فضای دوبعدی، قوانین نشت را با قوانین الکتروسیتیک در قالب یک دیمانسیون، مورد حل عددی از طریق روش اجزا محدود قرار دادند. در نهایت نتایج این پژوهش نشان داد، اعمال نیروهای الکتروسیتیک در محیط متخلخل می‌تواند باعث کاهش مقادیر نشت آب در خاک در سدهای خاکی شود و این روش می‌تواند به عنوان راهکاری برای کنترل نشت آب در خاک در محیط متخلخل استفاده شود. نتایج این پژوهش یک مدل ریاضی در قالب تلفیق معادلات نشت و معادلات الکتروسیتیک را ارائه داد. نتایج این مدل نشان داد که در حالت جریان ماندگار، مدل ارائه شده، نتایج قابل قبولی برای تخمین مقدار نشت ارائه می‌دهد. همچنین، آنها بیان داشتند که استفاده از ابزار الکتروسیتیک می‌تواند تا حد زیادی پایداری شيروانی‌ها را افزایش دهد. این روش را می‌توان برای پایدار کردن این مکان‌ها استفاده کرد.

استفاده از روش الکتروسیتیک در پتوهای رسی برای

تجزیه و تحلیل قرار داده خواهد. باید در نظر داشت که در منابع به تأثیر پدیده الکتروسیستیک بر کنترل نشت در موارد اشاره شده است اما نحوه بکارگیری این روش در سدهای خاکی مستلزم تحقیق و پژوهش بیشتر است.

مواد و روش‌ها

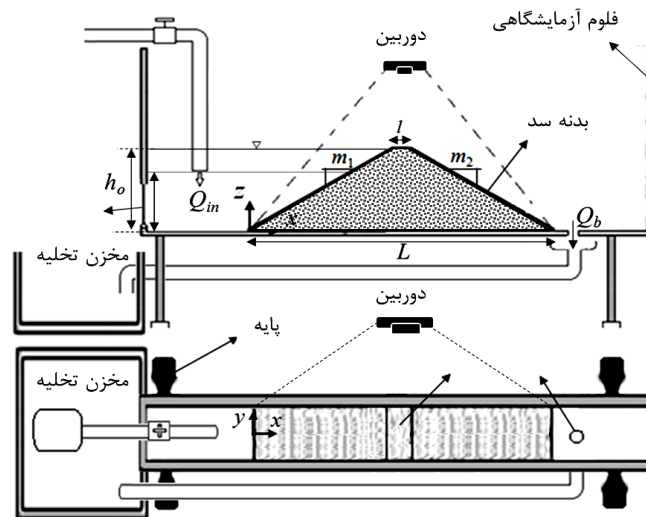
در این بخش به معرفی کلی آزمایش‌ها برای بررسی اثرات این پدیده بر فاکتورهای هیدرولیکی پرداخته شده است. ابتدا تجهیزات آزمایشگاهی برای بررسی تأثیر پدیده الکتروسیستیک بر هسته رسی سدهای غیر همگن بررسی شده است. همچنین در ادامه، با بکارگیری جعبه رسی ساخته شده در فلوم آزمایشگاهی، در حالت با و بدون روش الکتروسیستیک زمان خرابی محیط رسی بررسی شده است. در گام سوم، با بکارگیری نشت در بدنه سدهای خاکی همگن، در حالت با و بدون روش الکتروسیستیک، میزان نشت در بدنه سدهای خاکی همگن در دو حالت درصد رس مورد بررسی قرار گرفته است.

تجهیزات آزمایشگاهی مدل خط نشت: در شکل ۲ فلوم آزمایشگاهی از یک سمت به شیر ورودی متصل بوده که آب پشت سد را تأمین می‌کند و از سمت پایین دست یک خروجی وجود دارد که آب ناشی از نشت را تخلیه می‌کند. برای انجام آزمایش‌ها و برداشت داده‌ها نیز از دوربین‌هایی که در شکل نشان داده شده، استفاده شد.

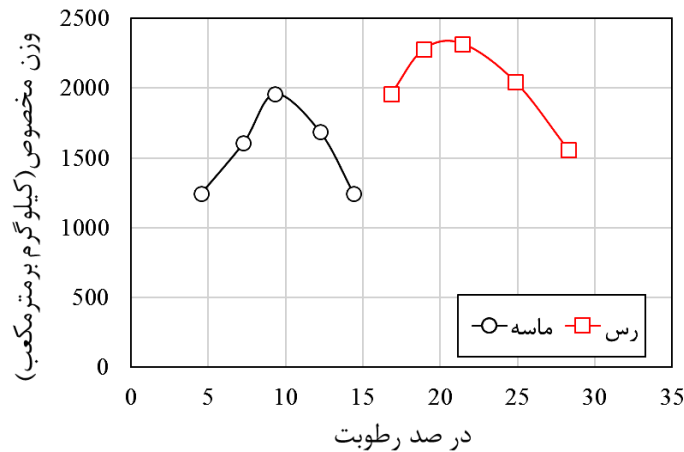
آزمایش تراکم خاک: برای آماده‌سازی خاکریز سدهای خاکی همگن و غیر همگن لازم است، رطوبت بهینه و همچنین تراکم نسبی حداکثری در مدل‌های آزمایشگاهی در حد مناسب باشد. از این رو، برای آماده‌سازی اولیه مدل‌های سدهای خاکی، آزمایش‌های پروکتور برای نمونه خاک‌ها انجام پذیرفت و برای کلیه مدل‌ها سعی بر این بود که مقدار تراکم نسبی به دست آمده از میزان حداقلی ۹۲ درصد بیشتر باشد. همچنین، از مدل بار ثابت برای برآورد میزان هدایت هیدرولیکی‌ها استفاده شد. در شکل ۳ نتایج آزمایش پروکتور نمایش داده شده است (۱۶ و ۱۷).

جلوگیری از نشت شیرابه فاضلاب محل دفن فضولات شهری در بسیاری از موارد مورد استفاده قرار داده شده است. میشل و ینگ (۱۴) بیان داشتند، مکانیسم‌های نگه‌داری آلاینده‌ها توسط کانی‌های رسی به‌طور کامل شناخته نشده است و ظرفیت تضعیف هر سیستم مهار محدود است. علاوه بر این، انتشار در لاینر رسی تحت یک گرادیان غلظت ممکن است نرخ انتقال آلاینده را به محیط بالاتر از آن به دلیل فرارفت به تنهایی افزایش دهد. جریان متقابل الکتروسیستیک ممکن است یک اقدام مؤثر برای جلوگیری از انتقال آلاینده‌ها تحت یک گرادیان هیدرولیکی باشد. یک مانع جریان سیال الکتروسیستیک می‌تواند با اعمال مداوم یا دوره‌ای یک گرادیان الکتریکی در یک لایه رسی فشرده ایجاد شود که این روش می‌تواند با بکارگیری روش الکتروسیستیک تأمین شود. همچنین، نتایج این پژوهش نشان داد که اثرپذیری یک گرادیان الکتریکی ممکن است با حضور برخی از مواد غیر آلی در خاک بسیار مؤثرتر شود و گرادیان ایجاد شده توسط خاصیت الکتریکی می‌تواند با گرادیان هیدرولیکی مقابله کند و در نهایت از نشت جلوگیری کند البته باید در نظر داشت که اعمال جریان از آنیون به کاتیون در جهت جریان می‌تواند باعث افزایش نشت شود درحالی که عکس این جریان می‌تواند نشت را کنترل کند.

در پژوهش حاضر، با استفاده از بکارگیری مدل‌های آزمایشگاهی، طرحی برای بررسی تأثیر روش الکتروسیستیک بر روند تغییر پارامترهای نشت مانند دبی، ارتفاع سطح خط نشت، تأثیر شیب بدنه سدخاکی در حضور پدیده الکتروسیستیک و اثرات درصد رس بر نشت مورد بررسی و پژوهش قرار داده شد. باید در نظر داشت که در بسیاری از پژوهش‌ها به اثر رس بر پدیده الکتروسیستیک اشاره شده بود که در بخش مرور منابع به بخشی از این پژوهش‌ها اشاره شد. از این رو، این پژوهش سعی در بررسی تأثیر درصد رس مخلوط در سدهای خاکی همگن و همچنین تأثیر شیب بدنه سدهای خاکی بر پدیده الکتروسیستیک پرداخته است که در ادامه با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف، اثر پدیده الکتروسیستیک بر روند نشت در سدهای خاکی، مورد



شکل ۲. فلوم آزمایشگاهی

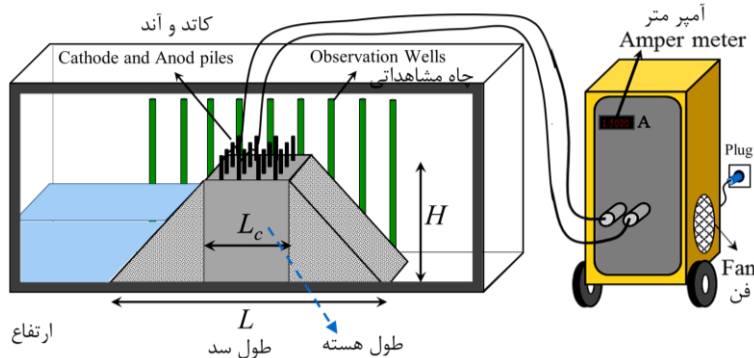


شکل ۳. وزن مخصوص بیشینه و بهینه به دست آمده برای نمونه خاک‌های مورد استفاده

شدند و شبکه‌های میله‌های نصب‌شده در هسته رسی به تعداد 4×4 بودند. که در نهایت و در طی آزمایش‌ها از دو ردیف بالادست به‌عنوان آند و از دو ردیف پایین‌دست به‌عنوان کاتد استفاده شد. در نهایت با اعمال آند در بالادست و کاتد در پایین‌دست، ابتدا آب در بالادست بدنه قرار داده می‌شد و پس از اشباع شدن و پایدار شدن خط نشت در بدنه سد خاکی با استفاده از چاهک‌های مشاهداتی استخراج می‌شد (شکل ۵). سطح آب درون چاهک‌های مشاهده‌ای با استفاده از مولتی‌متر اندازه‌گیری شد. نحوه کار با مولتی‌متر بدین صورت بود، که این دستگاه در حالت اندازه‌گیری جریان قرار داده می‌شد. پس

آزمایش هدایت هیدرولیکی: برای محاسبه هدایت هیدرولیکی از روش آزمایش با بار ثابت استفاده شد. در این آزمایش دبی آب ورودی به گونه‌ای تنظیم شد که اختلاف بار میان ورودی و خروجی در ضمن آزمایش ثابت بماند. پس از تثبیت میزان جریان ثابت، آب برای مدت زمان مشخصی در یک ظرف مدرج جمع‌آوری شد. در شکل ۴ اجزا آزمایش هدایت هیدرولیکی با بار ثابت نمایش داده شده است (۱۹ و ۲۰).

اجزا روش الکتروسیتیک: برای اعمال جریان الکتریکی از مولد جریان مستقیم با آمپر ۱۰ و ولتاژ ۱۲ استفاده شد. این جریان به‌وسیله میله‌های فلزی از آلومینیوم در بدنه سد تعبیه

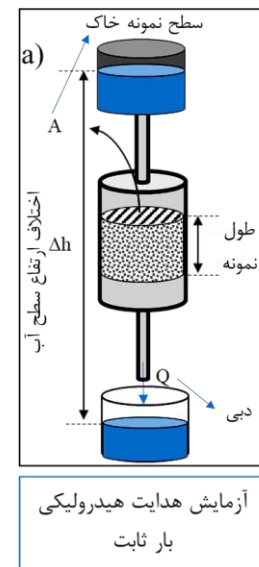


شکل ۵. اجزا روش الکتروسیستیک

به آب داخل بدنه و اندازه‌گیری خط نشست، چاهک‌های مشاهده‌ای به تعداد نه عدد و فواصل مشخص، در دیواره فلوم تعبیه شد. همچنین، برای تخلیه آب از زهکش‌های افقی استفاده شد. در شکل ۷ نحوه قرارگیری چاهک‌های مشاهده‌ای نمایش داده شده است.

زهکش‌های تعبیه شده: به منظور تخلیه آب در زمان اعمال روش الکتروسیستیک، از زهکش‌های افقی در کف هسته رسی استفاده شد. نقش این زهکش‌ها تخلیه جریان در زمان اعمال جریان الکتریکی هستند. شایان ذکر است، لوله افقی زهکش با سوراخ‌های ریزی به نحوی که جریان را از خود عبور دهد سوراخ‌کاری شد. در شکل ۸ جزئیات این زهکش‌ها نمایش داده شده است. همچنین، این زهکش‌ها به صورت افقی در زیر ردیف‌های آندها و کاتدهای تعبیه شده قرار داده شدند، به نحوی که بتواند جریان آب را در زمان اعمال پدیده الکتروسیستیک تخلیه کنند.

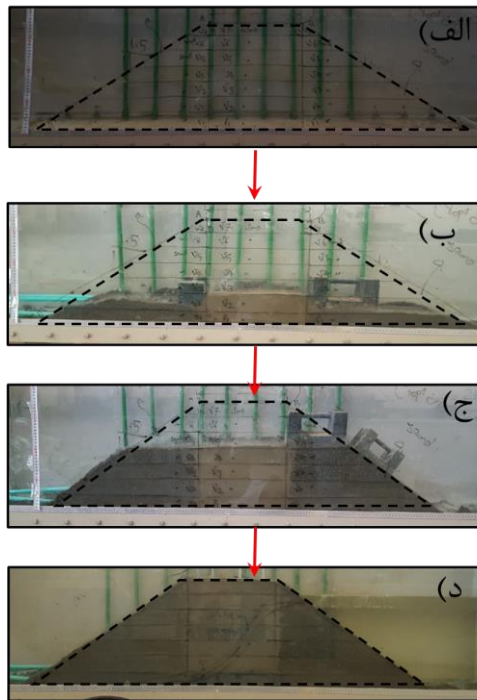
آزمایش‌های زمان تخریب: پیش‌بینی می‌شد، به خاطر کاهش نشست در محیط متخلخل در زمان اعمال روش الکتروسیستیک، زمان تخریب سد کاهش پیدا کند. به خاطر زمان‌بر بودن ساخت آزمایشگاهی سد خاکی و همچنین عدم امکان تخریب



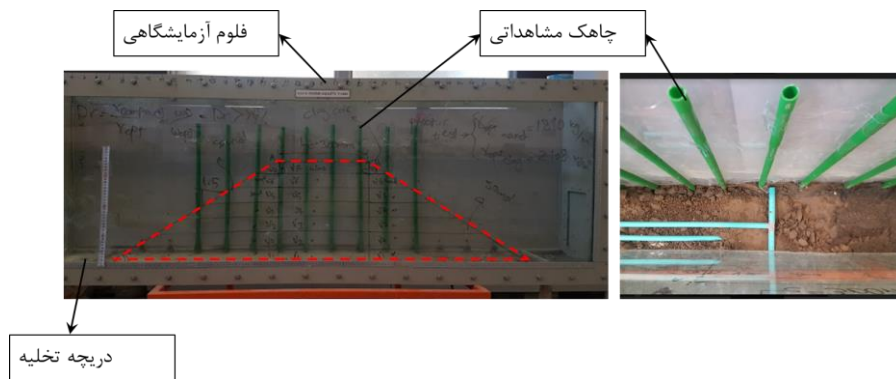
شکل ۴. آزمایش هدایت هیدرولیکی با بار ثابت

با برخورد آند و کاتد این مولتی متر با هم، در عمل عقربه دستگاه جریان را نمایش می‌دهد. با نصب رشته سیم‌هایی و قراردادن این رشته سیم‌ها در چاهک‌ها می‌توان محل دقیق آب را درون چاهک‌های مشاهده‌ای مشخص کرد. باید در نظر داشت که آب ماده نیمه‌هادی جریان الکتریکی است. از این رو، با قرار گرفتن این رشته سیم‌ها در چاهک‌ها و پایین بردن آنها و با برخوردشان با آب عقربه دستگاه مولتی متر تغییرات نشان می‌دهد و از این روش می‌توان با دقت قابل قبولی ارتفاع آب درون چاهک‌ها را مشخص کرد.

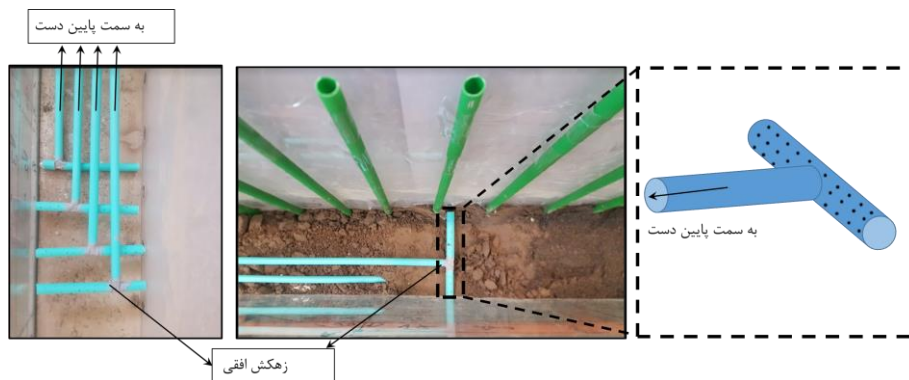
آزمایش‌های افت خط نشست: در شکل ۶، مراحل ساخت این سد نمایش داده شده است. شایان ذکر است، به‌ازای کلیه لایه‌های خاکریزی شده تراکم نسبی مورد ارزیابی قرار داده شد. نتایج این بررسی نشان داد که ساخت این سد با تراکم نسبی قابل قبولی انجام پذیرفت. برای ساخت این لایه‌ها ابتدا با توجه به وزن مخصوص ماکزیمم و رطوبت بهینه و همچنین حجم مورد نیاز (لایه خاک) میزان وزن خاک تعیین شد. با تراکم این خاک در حجم تعیین شده، تراکم نسبی، از وزن خاک باقی مانده و تراکم داده نشده، محاسبه و ارزیابی شد. چاهک‌های مشاهده‌ای: قبل از ساخت مدل برای دسترسی



شکل ۶. مراحل ساخت مدل سد خاکی غیر همگن با هسته رسی قائم



شکل ۷. نحوه قرار گیری چاهک‌های مشاهده‌ای در بدنه سد



شکل ۸. نحوه قرار گیری زهکش‌های افقی در مدل سد خاکی غیر همگن با هسته رسی

سد و همچنین عدد ترازو در بازه زمان تخریب سد اندازه‌گیری شد. با این روش دبی نشت و همچنین تأثیرات روش الکتروسیستیک بر نشت سد مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است، در جهت تأثیر درصد رس بر کاهش دبی از دو درصد ۱۰ و ۲۰ درصد استفاده شد.

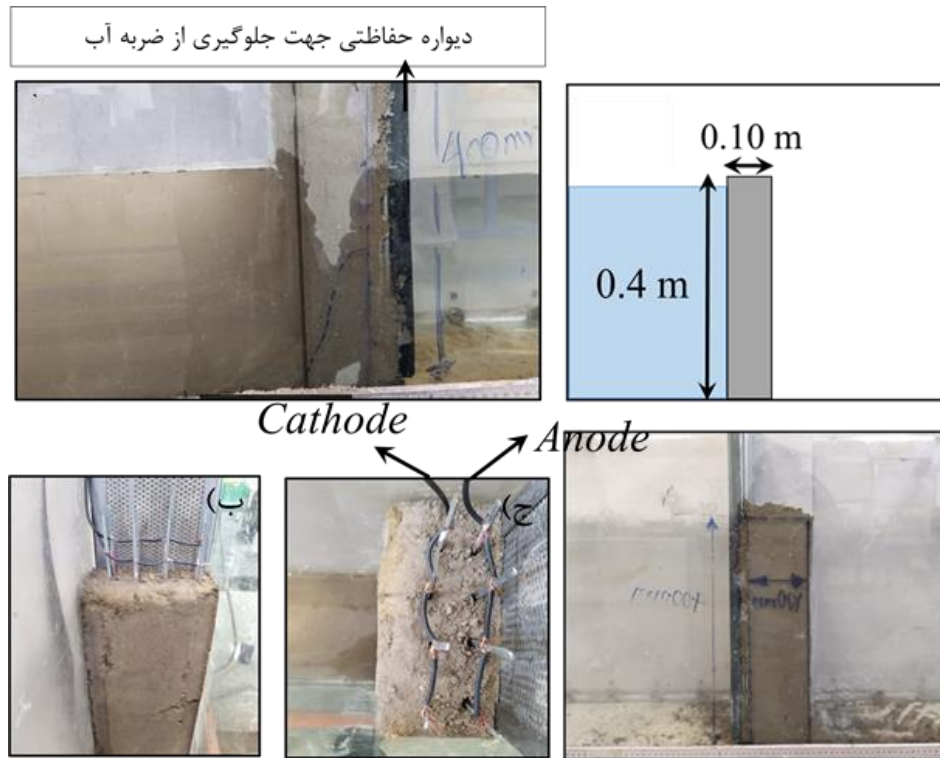
در جدول ۱، آزمایش‌ها انجام شده در این پژوهش نمایش داده شده است. از برچسب در نظر گرفته شده در این جدول، در بخش نتایج و بحث برای ارایه مقایسه‌ها و نتایج استفاده شد. در جدول LC طول هسته رسی، H ارتفاع مدل، h_0 ارتفاع آب در پشت مدل در مدل سدهای خاکی و جعبه رسی است. لازم به ذکر است، نمایه‌های مربوط به هر مدل مشخص شده است.

نتایج و بحث

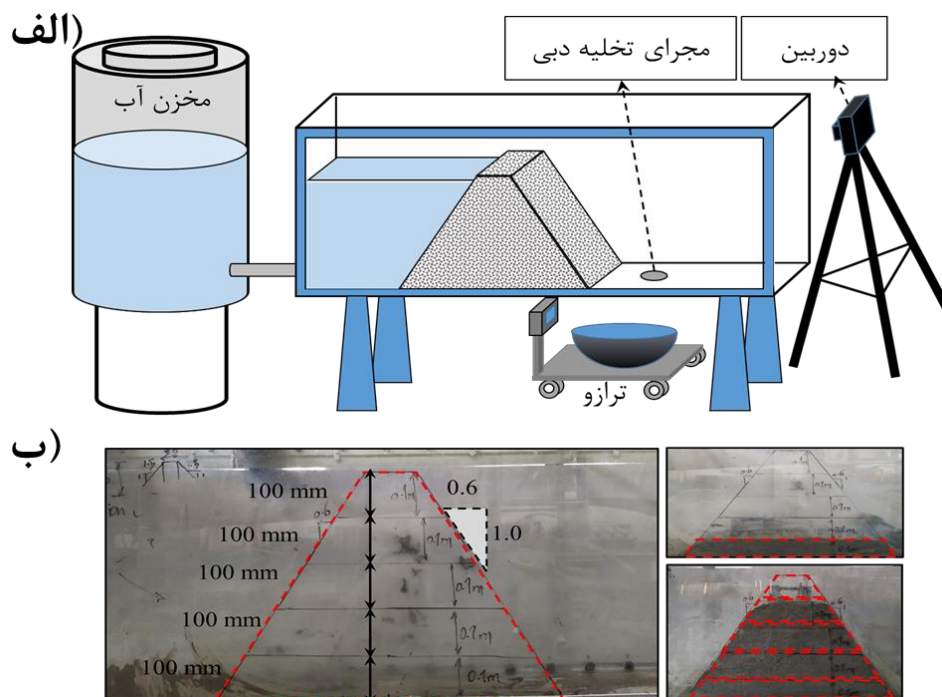
تأثیر الکتروسیستیک بر خط نشت: در شکل (۱۱-الف)، نتایج حاصل از برداشت سطح خط نشت در بدنه سد خاکی غیرهمگن با هسته رسی قائم به‌ازای ارتفاع آب در مخزن ۳۰ سانتی‌متری نمایش داده شده است. با مقایسه بین خط ممتد و خط تیره در شکل، می‌توان بیان کرد که اعمال جریان الکتریکی در آند و کاتد در سد خاکی غیر همگن باعث افت خط نشت می‌شود. لازم به ذکر است، اعمال جریان در زمان سه ساعت صورت پذیرفت و با ثابت شدن خط نشت، اعمال جریان الکتریکی متوقف شد. همچنین، لازم به ذکر است که زهکش‌های افقی تعبیه شده در زیر میله‌های آند و کاتد در زمان اعمال جریان، میزان آبی (در حدود ۲۳۸ میلی لیتر در ۲۴ ساعت) را زهکش می‌کردند، درحالی که در حالت بدون بکارگیری روش الکتروسیستیک این دبی بسیار ناچیز و غیر قابل اندازه‌گیری بود. در فهرست شکل (۱۱-ب)، کلیه مشخصات شکل نمایش داده شده است. همچنین، در شکل (۱۱-ب)، با استفاده از چاهک‌های مشاهداتی خط نشت در دو حالت استفاده و عدم استفاده از روش الکتروسیستیک به‌ازای ارتفاع آب در مخزن بالادست برابر با ۲۵ سانتی‌متر نشان داده شده است. همانند مدل HC-NA30 اعمال جریان الکتریکی در هسته رسی باعث

سد حاصل از پاپینگ، از هسته‌های رسی در هنگام حضور روش الکتروسیستیک و عدم حضور این روش استفاده شد. در این آزمایش یک باکس رسی به ابعاد ۰/۱m، ۰/۱۷۵، ۰/۴ ساخته شد. هدف از ساخت این باکس، بررسی روش الکتروسیستیک در محیط رسی بود و در این آزمایش به بررسی روش الکتروسیستیک بر روی زمان تخریب اشاره دارد. در شکل ۹، مدل‌های هسته رسی قائم مشخص شده است. همچنین ابعاد این مدل‌ها در شکل مشخص شده است. در هسته رسی قائم (مدل زمان تخریب)، در دو حالت با بدون روش الکتروسیستیک مورد آزمایش قرار داده شد. آزمایش‌های این مدل بدین صورت طرح‌ریزی شد که قسمت بالادست هسته رسی قائم که با صفحه فلزی (جهت جلوگیری از برخورد و حذف نیروی موج بالادست) حفاظت می‌شد، با استفاده از حجم آبی اشباع شد و زمان خرابی و همچنین سطح خیس شده در دامنه پایین دست سد با استفاده از دوربین نصب شده در پایین دست اندازه‌گیری شد.

مدل‌های بررسی تأثیر پدیده الکتروسیستیک بر میزان دبی نشت: بررسی میزان نشت در پایین دست سدهای خاکی در هنگام استفاده از روش الکتروسیستیک بسیار حائز اهمیت است. از این‌رو، برای اندازه‌گیری و مشخص کردن تأثیر روش الکتروسیستیک در سدهای خاکی از مدل سد خاکی همگنی با شیب بالادست و پایین دست ۰/۶ استفاده شد. هدف از کم‌بودن این شیب بدین دلیل بود که سد در زمان کوتاه‌تری به زمان بحران و تخریب حاصل از نشت نزدیک شود. شایان ذکر است، که مدل سد خاکی همگن با در نظر گرفتن استانداردهای تراکم خاکریزی شد، که در بخش‌های بعدی بدان اشاره می‌شود. در شکل ۱۰ طرح کلی برداشت دبی نشت در پایین دست سد خاکی همگن نمایش داده شده است. لازم به ذکر است، پس از اشباع شدن بدنه سد خاکی، میزان دبی نشت به‌صورت حجمی توسط ترازو در پایین دست اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است، کل این پروسه توسط دوربین نصب شده در پایین دست مدل و فلوم آزمایشگاهی ثبت و ضبط شد. در نهایت کل پروسه تخریب



شکل ۹. نحوه اعمال جریان الکتریکی به هسته رسی قائم در آزمایش‌های تعیین تأثیر الکتروسیتیک بر زمان تخریب

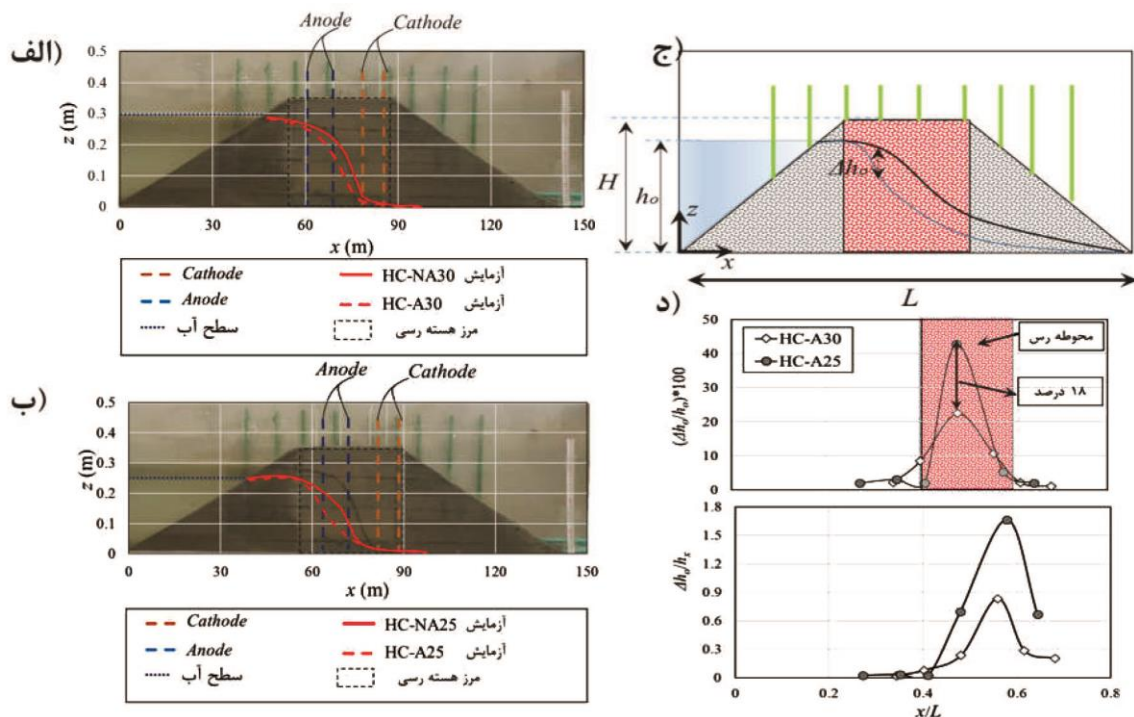


شکل ۱۰. طرح آزمایشگاهی مدل سد خاکی همگن در جهت بررسی تأثیر الکتروسیتیک بر کاهش دبی، (الف) طرح مدل‌سازی و (ب) نحوه تراکم مدل‌ها

جدول ۱. آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش

شماره	نماینه	نوع سازه	L_c (m)	H (m)	h_o (m)	وضعیت	آزمایش
۱	HC-NA30	سد غیر همگن با هسته رسی قائم	۰/۴	۰/۳۵	۰/۳		خط نشست
۲	HC-NA25	سد غیر همگن با هسته رسی قائم	۰/۴	۰/۳۵	۰/۲۵		خط نشست تیک
۳	HC-A30	سد غیر همگن با هسته رسی قائم	۰/۴	۰/۳۵	۰/۳	*	خط نشست
۴	HC-A25	سد غیر همگن با هسته رسی قائم	۰/۴	۰/۳۵	۰/۲۵	*	خط نشست
۵	BC-NA	جعبه رسی	۰/۱	۰/۴	۰/۳۵		زمان
۶	BC-A	جعبه رسی	۰/۱	۰/۴	۰/۳۵	*	زمان
۷	C10-NA1	سد همگن با درصد رس ۱۰ درصد	-	۰/۵	۰/۴۵		میزان نشست
۸	C10-NA2	سد همگن با درصد رس ۱۰ درصد	-	۰/۵	۰/۴۵		میزان نشست
۹	C10-NA3	سد همگن با درصد رس ۱۰ درصد	-	۰/۵	۰/۴۵		میزان نشست
۱۰	C10-A	سد همگن با درصد رس ۱۰ درصد	-	۰/۵	۰/۴۵	*	میزان نشست
۱۱	C20-NA	سد همگن با درصد رس ۲۰ درصد	-	۰/۵	۰/۴۵		میزان نشست
۱۲	C20-A	سد همگن با درصد رس ۲۰ درصد	-	۰/۵	۰/۴۵	*	میزان نشست

* آزمایش‌ها همراه با اتصال موتور الکتریکی AC

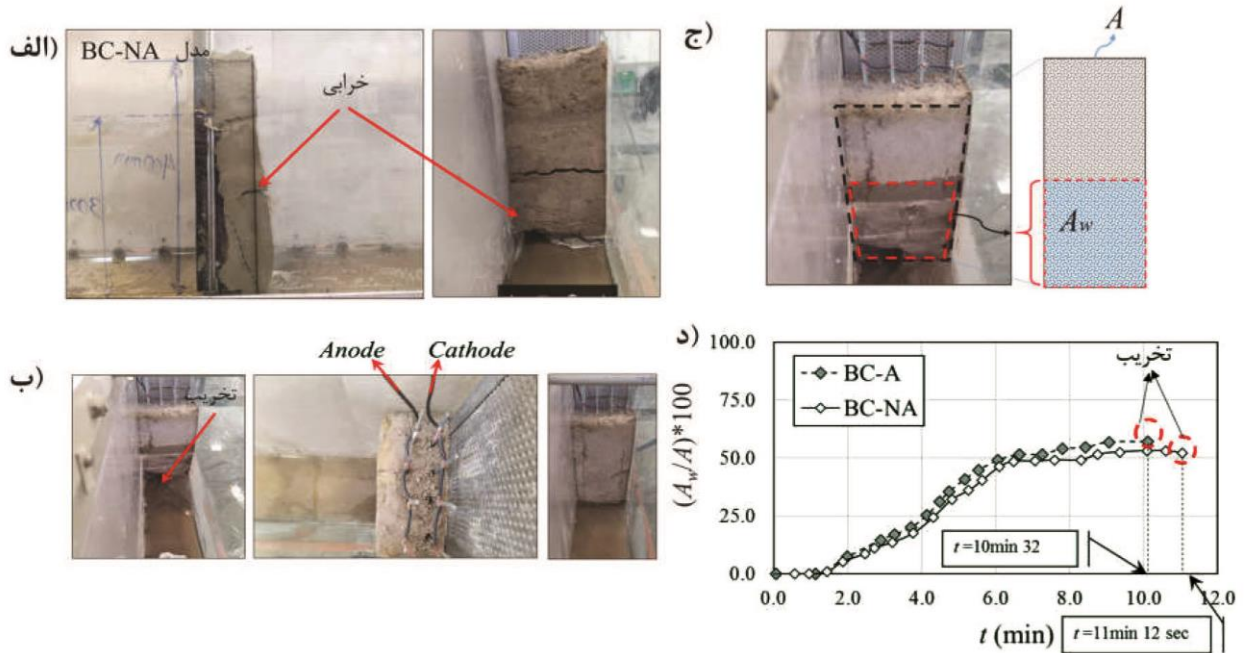


شکل ۱۱. نتایج آزمایش‌های بررسی تأثیر پدیده الکتروسیستیک بر خط نشست در بدنه سد خاکی همگن، الف) خط نشست قبل (HC-NA30) و بعد از اعمال ولتاژ با ارتفاع آب ۳۰ cm (HC-A30) و بعد از اعمال ولتاژ با ارتفاع آب ۲۵ cm (HC-A25) و بعد از اعمال ولتاژ با ارتفاع آب ۳۰ cm (HC-NA25) و بعد از اعمال ولتاژ با ارتفاع آب ۲۵ cm (HC-A25) ب) خط نشست قبل (HC-A25) و بعد از اعمال ولتاژ با ارتفاع آب ۳۰ cm (HC-A30) ج) پارامترهای استفاده شده جهت تعیین میزان افت، د) برآورد میزان افت خط نشست در زمان استفاده از روش الکتروسیستیک

افت سطح خط نشت در مدل HC-NA25 می‌شود. در هر نقطه طولی از پی سد، بین دو خط نشت به‌دست آمده از روش‌های اعمال روش الکتروسینتیک و عدم استفاده از این روش، یک Δh_0 ، که نشان دهنده میزان افت است، می‌توان محاسبه کرد. در شکل (۱۱-ج) میزان افت و دیگر پارامترهای نشان داده شده است. در ادامه، برای تعیین تأثیر ارتفاع آب و همچنین محیط رسی بر میزان افت آب از پارامترهای بی‌بعد شده افت خط نشت و طول سد استفاده شد. برای بی‌بعد کردن داده‌های آزمایشگاهی، در این قسمت Δh_0 را نسبت به h_0 و همچنین مقدار x متناظر با Δh_0 را نسبت به L طول بدنه سد در شکل (۱۳-ج) نمایش داده شده است. در نهایت با محاسبه میزان افت در دو ارتفاع آب در مخزن بالادست می‌توان بیان داشت که با افزایش ارتفاع آب تأثیر پدیده الکتروسینتیک بر میزان افت خط نشت در بدنه سد خاکی غیر همگن کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، با کاهش ارتفاع آب در مخزن بالادست به میزان ۱۶ درصد (تغییر ارتفاع آب از ۳۰ سانتی‌متر در مخزن بالادست به ۲۵ سانتی‌متر در مخزن بالادست) میزان نشت با روش الکتروسینتیک تا ۱۸ درصد افزایش پیدا خواهد کرد. این مطلب در شکل (۱۱-د) نمایش داده شده است. همچنین مقایسه‌ها نشان می‌دهد، میزان افت در هسته رسی به‌صورت معنی‌داری در محیط ماسه‌ای در شیب بالادست و پایین‌دست سد با هسته رسی تفاوت دارد. باید در نظر داشت، روش‌های یادشده نیز با خطر پاپینگ رو به رو هستند و با بالا رفتن عدد رینولدز در جریان نشت و حرکت ذرات خاک احتمال این پدیده بیشتر می‌شود. درحالی که روش الکتروسینتیک همانطور که در مراجع اشاره شده است، می‌تواند به‌عنوان یک روش مکمل استفاده شود. با استفاده از این روش می‌توان به نحوی از آشفتگی شدن جریان نشت جلوگیری کرد و از پدیده پاپینگ حتی در صورت استفاده از زهکش‌ها محتلف بهره برد. به بیان ساده‌تر، می‌توان از این روش به‌عنوان یک کنترل‌کننده (ترمز کردن جریان) در کنار دیگر موارد استفاده کرد و در شرایط اضطراری می‌توان با اعمال جریان از ایجاد صدمات غیر قابل جبران به سد جلوگیری کرد.

تأثیر الکتروسینتیک بر زمان خرابی: شکل (۱۲-الف) مدل خرابی هسته رسی قائم در حالت بدون اعمال ولتاژ به هسته رسی را نمایش می‌دهد. همچنین، به‌ازای شرایط یکسان هندسی، در شکل (۱۵-ب)، تصویر تخریب هسته رسی در شرایط اعمال روش الکتروسینتیک را نمایش می‌دهد. همچنین، در زمان اشباع کردن مدل توسط هد ارتفاعی آب در نظر گرفته شده در بالادست، سطح خیس شده در وجه پایین‌دست هسته رسی قائم اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است، از ویدیوهای ضبط شده و همچنین صفحات مشبک در نرم‌افزار Excel برای برآورد این سطح استفاده شد. نتایج این برآورد در شکل (۱۲-ج) و (۱۲-د) نمایش داده شده است. همانطور که در شکل (۱۲-د) قابل رؤیت است، زمان تخریب مدل هسته رسی قائم با اعمال همان‌گونه که در شکل (۱۲-ج) مشاهده می‌شود، اگر کل سطح وجه پایین‌دست هسته رسی که آب نفوذ می‌کند را A در نظر گرفت، در اینجا سناریوی جدیدی می‌توان تعریف کرد، به این صورت که A_w به‌عنوان سطح خاکی که آب به آن نفوذ می‌کند در زمان t در نظر گرفته شود و این روند تا جایی ادامه پیدا کند که $A_w = A$ شود. در شکل (۱۵-د) پارامتر بدون بعد $\frac{A_w}{A}$ ، نسبت به زمان t (زمانهای متناظر با A_w های مختلف) بر روی نمودار رسم شده است. به نظر می‌رسد که در زمان‌های یکسان، در حالت اعمال ولتاژ، آب به سطح خاک بیشتری نفوذ می‌کند و یا به عبارت دیگر آب بیشتری در داخل خاک قرار می‌گیرد و از نشت آب از خاک جلوگیری می‌شود. همچنین، زمان تخریب هسته رسی قائم با اعمال ولتاژ الکتریکی تقریباً به میزان هفت و نیم درصد در مقیاس زمانی پایداری بیشتری را دارد. ولتاژ BC-A توسط روش الکتروسینتیک پایداری بیشتری را نسبت به مدل شاهد BC-NA بدون ولتاژ از خود نشان داد.

تأثیر الکتروسینتیک بر دبی نشت: برای اطمینان صحت آزمایش‌ها، در مدل C10-NA که مدل سد خاکی همگن با درصد رس ۱۰ درصد و فاقد اعمال ولتاژ است، آزمایش‌ها با سه بار تکرار و با شرایط یکسان تکرار شد. در این بخش از برچسب‌های C10-NA1، C10-NA2، C10-NA3 برای معرفی



شکل ۱۲. مراحل تخریب باکس رسی و تعیین تأثیر الکتروسیستیک بر زمان تخریب مدل هسته رسی قائم (جعبه رسی) در حالت بدون اعمال ولتاژ، (ب) تخریب مدل هسته رسی قائم (جعبه رسی) در حالت با اعمال ولتاژ، (ج) برآورد سطح خیس شده در وجه پایین دست هسته رسی قائم، (د) زمان تخریب مدل‌های هسته رسی قائم در شرایط وجود (BC-A) و عدم وجود (BC-NA) روش الکتروسیستیک

این مدل‌ها استفاده شده است. در نهایت با استفاده از ترازوی تعبیه شده در پایین دست مدل سد خاکی همگن با درصد رس ده درصد، میزان دبی نشت در طول زمان محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل‌های یاد شد با هم همخوانی قابل قبولی داشته که در ادامه بدان اشاره می‌شود، (شکل ۱۳). برای بررسی تأثیر پدیده الکتروسیستیک بر دبی نشت از برآورد دبی وزنی در پایین دست سدهای خاکی همگن استفاده شد. نتایج این آزمایش در قالب مدل C10-A در شکل (۱۳-ب) و (۱۳-ج) نمایش داده شده است. همانطور که از شکل مشخص است به‌ازای استفاده از روش الکتروسیستیک در بدنه سدهای همگن، دبی نشت در پایین دست سد در حالت استفاده از روش الکتروسیستیک، به‌صورت محسوسی کاهش پیدا می‌کند، (اشاره به نمودار دایره قرمز رنگ). برای بررسی میزان تأثیر رس بر عملکرد روش الکتروسیستیک، در ادامه آزمایش‌ها از خاک ماسه‌ای با بیست درصد رس استفاده شد. مقایسه بین دبی نشت اندازه‌گیری شده در پایین دست سد خاکی همگن با ۲۰ درصد

رس در دو حالت با و بدون اعمال ولتاژ الکتریکی نشان می‌دهد، همچنین، اعمال روش الکتروسیستیک در جهت کاهش دبی نشت در پایین دست سد خاکی همگن عمل می‌کند. نتایج این مقایسه در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. تخریب بدنه پایین دست مدل سد خاکی همگن بدون اعمال ولتاژ، در شکل ۱۵-الف، رفتار خرابی شیب پایین دست سد خاکی همگن در حالت بدون استفاده از روش الکتروسیستیک نمایش داده شده است. این مدل پس از گذشت زمانی تقریبی ۳ ساعت و ۲۲ دقیقه به‌صورت ناگهانی تخریب می‌شد. در مدل C10-NA2، از دوربین تعبیه شد در پایین دست فلوم آزمایشگاهی برای ثبت و ضبط روند تخریب شیب پایین دست سد استفاده شد. همانطور که در شکل مشخص است، پس از اشباع شدن شیب پایین دست سد خاکی دیواره سد به‌صورت تدریجی و در زمان‌های مختلف فرو می‌ریزد. این خرابی‌ها در دو قالب خرابی به خاطر اشباع شدن شیروانی ناپایدار سد و دیگری خرابی حاصل از رگاب شدن (piping) طبقه‌بندی

معناداری در محیط ماسه‌ای در شیب بالادست و پایین‌دست سد با هسته رسی تفاوت دارد. این مورد نشان داد. که روش الکتروسیستیک در محیط‌های رسی کارآمدتر است. این مورد به خاطر وجود کاتیون‌های مثبت بیشتری در کانی‌های رسی است. ۳- آزمایش‌های مدل جعبه رسی نشان داد، زمان تخریب مدل هسته رسی قائم با اعمال ولتاژ BC-A پایداری بیشتری را نسبت به مدل شاهد BC-NA بدون ولتاژ دارد. این موضوع می‌تواند به علت افزایش پایداری هسته رسی در زمان نشت باشد. همچنین، زمان تخریب هسته رسی قائم با اعمال ولتاژ الکتریکی تقریباً به میزان هفت و نیم درصد در مقیاس زمانی پایداری بیشتری را دارد.

۴- نتایج به دست آمده از مدل سد خاکی همگن با درصد متفاوت رس نشان داد، به‌ازای استفاده از روش الکتروسیستیک در بدنه سدهای همگن، دبی نشت در پایین‌دست سد به‌صورت محسوسی کاهش پیدا می‌کند، همچنین برای بررسی میزان تأثیر رس بر عملکرد روش الکتروسیستیک، در ادامه آزمایش‌ها از خاک ماسه‌ای با بیست درصد رس استفاده شد. مقایسه بین دبی نشت اندازه‌گیری شده در پایین‌دست سد خاکی همگن با ۲۰ درصد رس در دو حالت با و بدون اعمال ولتاژ الکتریکی نشان داد، اعمال روش الکتروسیستیک برای کاهش دبی نشت در پایین دست سد خاکی همگن عمل می‌کند.

نتایج نشان داد به‌ازای اعمال ولتاژ در بدنه سد خاکی همگن، پس از اشباع شدن شیب پایین‌دست سد خاکی دیواره سد در ابتدا ریزش جزئی داشته و در طول زمان تا زمان تخریب ناگهانی به‌صورت پایدار باقی می‌ماند. پیش‌بینی می‌شود این پایداری به خاطر به‌وجود آوردن ماند آبی در بدنه سد خاکی همگن توسط ولتاژ اعمال شده در محیط متخلخل باشد.

پایین‌دست فلوم آزمایشگاهی که در فصل سوم بدان اشاره شد، برای ثبت و ضبط روند تخریب شیب پایین‌دست سد استفاده شد. همانطور که در شکل مشخص است پس از اشباع شدن شیب پایین دست سد خاکی دیواره سد در ابتدا ریزش جزئی داشته و در طول زمان تا زمان تخریب ناگهانی به‌صورت پایدار باقی خواهد ماند. پیش‌بینی می‌شود این پایداری به خاطر به‌وجود آوردن ماند آبی در بدنه سد خاکی همگن توسط ولتاژ اعمال شده در محیط متخلخل باشد. در طول آزمایش میزان دبی جمع‌ی (وزن شده توسط ترازو) با استفاده از آینه در کنار زمان سنج در کادر فیلمبرداری جانمایی شد. در بالای شکل‌ها محل عقربه ترازو در آینه و زمان سنج مشخص است.

نتیجه‌گیری

در زیر بخشی از نتایج حاصله از این پژوهش ارائه شده است. ۱- بررسی خط نشت در بدنه سد خاکی غیر همگن با هسته رسی قائم نشان داد، با بکارگیری روش الکتروسیستیک می‌توان باعث افت خط نشت در هسته رسی شد. این افت به خاطر اعمال جریان الکتریکی در هسته رسی است که با جذب کاتیون‌های مثبت در رس باعث بوجود آمدن لایه مضاعف در اطراف الکترودها شد که به خودی خود باعث جلوگیری از نشت و هدایت جریان به طرف زهکش‌های افقی می‌شود.

۲- نتایج محاسبه افت خط نشت در بدنه سد خاکی غیر همگن نشان داد که با افزایش ارتفاع آب تأثیر پدیده الکتروسیستیک بر میزان افت خط نشت در بدنه سد خاکی غیر همگن کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، با کاهش ارتفاع آب در مخزن بالادست به میزان ۱۶ درصد (تغییر ارتفاع آب از ۳۰ سانتی‌متر به ۲۵ سانتی‌متر در مخزن بالادست) میزان نشت با روش الکتروسیستیک تا ۱۸ درصد افزایش پیدا کرد. همچنین مقایسه‌ها نشان داد، میزان افت در هسته رسی به‌صورت

منابع مورد استفاده

1. Abd EL-Basset, N., A. M. Negm, K. A. Ali and S. Ghaly. 2021. Utilizing The HEC-RAS Sediment Model in Prediction of the Optimal Navigation Path for The Nile River Reach Downstream Esan Barrages. *Journal of Environmental Studies* 2(1): 26-41.
2. Azimi, A. H. and S. Salehi. 2022. Hydraulics of flow over full-cycle cosine and rectangular sharp-crested weirs. *Canadian Journal of Civil Engineering* 49(6): 954-968.
3. Brunner, G. W. and S. Gibson. 2005. Sediment transport modeling in HEC RAS. *Recent Advances in Civil Engineering* 233: 481-491.
4. Damte, F., G. B. Mariam, M. T. Ayana, T. K. Lohani, G. Dhiman and M. Shabaz. 2021. Computing the sediment and ensuing its erosive activities using HEC-RAS to surmise the flooding in Kulfo River in Southern Ethiopia. *World Journal of Engineering* 18: 948-955.
5. Joshi, N., G. R. Lamichhane, M. M. Rahaman, A. Kalra and S. Ahmad. 2019. Application of HEC-RAS to study the sediment transport characteristics of maumee River in Ohio. In: World Environmental and Water Resources Congress Hydraulics, Waterways, and Water Distribution Systems Analysis Reston. American Society of Civil Engineers, USA.
6. Mehta, D., S. M. Yadav, S. Waikhom, K. Prajapati and S. Eslamian. 2022. Analysis of Stable Channel Design Using HEC-RAS: A Case Study of Surat City. *Flood Handbook*, CRC Press.
7. Regmi, R. K. 2021. Sedimentation Modeling of Karnali Chisapani Multipurpose Project Reservoir, Nepal. *Journal of The Institution of Engineers: Series A* 102(3): 815-827.
8. Salehi, S. and A. H. Azimi. 2020. Effects of upstream and downstream slopes and clay content on levee's breaching by overtopping. *River Research and Applications* 36(7): 1242-1256.
9. Salehi-Hafshejani, S., M. Shayannejad, H. Samadi-Broujeni, A. R. Zarraty, B. Soltani, E. Mohri-Esfahani and K. Ostad-Ali-Askari. 2019. Determination of the height of the vertical filter for heterogeneous Earth dams with vertical clay core. *International Journal of Hydrology Science and Technology* 9(3): 221-235.
10. Salehi, S., G. Panahi and K. Esmaili. 2019. Optimization of the drain position to reduce the uplift force in the foundation of dams. *Journal of Water and Soil Science* 22(4): 143-154.
11. Salehi, S., A. R. Esmaili and K. Esmaili. 2022. Classification of Scouring Form of Homogeneous and Sticky Earth Dams in Overtopping. *Journal of Water and Soil Science* 25(4): 283-298.
12. Salehi, S. and A. H. Azimi. 2019. Discharge characteristics of weir-orifice and weir-gate structures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 145(11): 04019025.
13. Salehi, S., K. Esmaili, and A. H. Azimi. 2019. Mean velocity and turbulent characteristics of flow over half-cycle cosine sharp-crested weirs. *Flow Measurement and Instrumentation* 66: 99-110.
14. Salehi, S., K. Esmaili and A. H. Azimi. 2018. New sharp-crest weir with purpose of increasing flow rate accurate and decreasing sediment in irrigation channels. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 12(5): 1016-1028.
15. Salehi, S., A. M. Moghadam, and K. Esmaili. 2022. Flow regimes of submerged rectangular sharp-crested weirs in sand bed channel. *Sādhanā* 48(1): 6.
16. Salehi, S., A. Mostaani and A. H. Azimi, 2021. Experimental and numerical investigations of flow over and under weir-culverts with a downstream ramp. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 147(7): 04021029.
17. Salehi, S. and A. H. Azimi. 2022. Effects of spoiler and piggyback on local scour under single and twin submerged pipes. *Ocean Engineering* 261: 112137.
18. Salehi, S., A. H. Azimi and H. Bonakdari. 2021. Hydraulics of sharp-crested weir culverts with downstream ramps in free-flow, partially, and fully submerged-flow conditions. *Irrigation Science* 39: 191-207.
19. Salehi, S., A. Mahmoudi Moghadam and S. Soori. Effect of the Pipe Bend of the Morning Glory Spillway on the Cavitation Number. Available at SSRN 5.
20. Shabani, A., S. A. Woznicki, M. Mehaffey, J. Butcher, T. A. Wool and P. Y. Whung. 2021. A coupled hydrodynamic (HEC-RAS 2D) and water quality model (WASP) for simulating flood-induced soil, sediment, and contaminant transport. *Journal of Flood Risk Management* 14(4): 12747.

Investigation of the Effect of Electrokinetic Process on the Seepage Reduction, Increase of Failure Time, and Decrease of Seepage Level in the Clay Core of Earth Dams

S. Salehi¹ and A. Mahmoodi Moghadam^{2*}

(Received: December 25-2021 ; Accepted: February 7-2021)

Abstract

The present study investigated the related parameters to decrease the seepage through homogenous and heterogeneous earth dams by employing experimental models and solutions. Two heterogeneous earth dam models with vertical clay cores were considered to illustrate the effect of the electrokinetic application on the time failure factor. The seepage lines were measured along the longitudinal section from the heel to the toe using the observation wells by adjusting the electrodes of the electrokinetic application through the vertical clay core. The initial comparison expounds that adjusting the electrokinetic approach can decrease the level of the seepage line due to depleting water by considering horizontal drainage. Furthermore, the failure time was increased by 18 percent due to inputting the voltage in the clay content. The results indicated that the models with an electrokinetic approach were stabilized more than the ones. The hydrographs of the flow discharge were measured along the experimental tests to investigate the effect of electrokinetics with and without electrodes in 10 and 20 clay percent of the dam soil content. Results indicated that employing the electrokinetic application due to increasing clay content caused the effect of the electrokinetic was significantly increased and it caused the discharge flow reduced of 32 percent.

Keywords: Electrokinetic, Failure time, Flow discharge, Seepage line, Anode, Cathode

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Shams Institute of Higher Education, Gonbad, Iran.

*: Corresponding author, Email: amin.mahmudi@modares.ac.ir