

## طبقه‌بندی شکل آبشستگی سدهای خاکی همگن - چسبنده ناشی از روگذری جریان

سعید صالحی<sup>۱\*</sup>، سید علیرضا اسماعیلی<sup>۲</sup> و کاظم اسماعیلی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۲۵)

### چکیده

پژوهش حاضر برای بررسی آزمایشگاهی مکانیزم شکست سد خاکی ناشی از اثر میزان شیب بالادست و پایین دست بدنه سد، طرح ریزی شده است. با توجه به اینکه شیب وجه پایین دست این نوع سد تأثیر زیادی بر زمان و نحوه خرابی دارد، بدین منظور ۸ مدل از سد خاکی با شیب‌های متفاوت بالادست و پایین دست (۱:۱ و ۲:۱) برای دو نوع خاک (خاک Sc) ساخته شد. زمان تخریب سد و نحوه آن برای دبی‌های سیلابی مورد نظر بررسی شد. نتایج نشان داد که شیب بالادست سد خاکی به مراتب تأثیر کمتری نسبت به شیب پایین دست بر روند آبشستگی حاصل از پدیده روگذری دارد. همچنین، با افزایش شیب پایین دست بدنه سد خاکی، میزان آبشستگی در شکاف آبشستگی تا ماکزیمم ۲۸ درصد افزایش پیدا می‌کند. همچنین، با استفاده از تکنیک رگرسیون غیر خطی، روابطی برای تخمین میزان دبی خروجی و محل تشکیل آبشار ارائه شد. همچنین، با در نظر گرفتن نحوه شسته شدن و تشکیل آبشار درون بدنه سدهای خاکی چسبنده، دو طرح کلی آبشار بزرگ و سری آبشارها ارائه شد. در نهایت نحوه تشکیل این آبشارها با تنش موجود در زمان شسته شدن رسوبات نسبت به تنش برشی مواد سازنده سد مورد بررسی و ارزیابی قرار داده شد و با ارائه محدودیت‌هایی بر پایه تنش برشی، وضعیت تشکیل نوع و الگوی شسته شدن بدنه سدهای خاکی چسبنده در زمان روگذری تخمین زده شد. در نهایت طرح کلی برای تخمین رفتار آبشستگی در سدهای همگن با خاک چسبنده معرفی شد.

واژه‌های کلیدی: سد خاکی، شکاف، خاک چسبنده، طبقه‌بندی، شیب بالادست و پایین دست، تنش برشی

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا همدان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: saeedsalehi100@gmail.com

## مقدمه

در حالت کلی، شرایط مختلفی پایدار سدهای خاکی را به مخاطره می‌کشد. پدیده روگذری از سدهای خاکی را می‌توان به‌عنوان یکی از مواردی که در زمان بهره‌برداری و ساخت همواره پایدار سدها را به چالش می‌کشد برشمرد. کستر و همکاران (۴) در گزارشات آماری بیان داشتند، پدیده روگذری در سدهای خاکی همواره خطرات و خسارات جانی و مالی را ایجاد می‌کند. همچنین، جعفرزاده و همکاران (۱۰) بیان کردند که خرابی جاده‌ها و مناطق مسکونی پایین‌دست این سدها از جمله رایج‌ترین اثرات است. بر اساس گزارشات کستا (۵) ۳۴ درصد خرابی سدهای خاکی، بر اثر پدیده روگذری در سدهای خاکی اتفاق افتاده است.

## مطالعات انجام شده

عبور آب از روی سد خاکی می‌تواند به دلیل وقوع سیلابی بیش از سیل طراحی، ریزش سنگ، چوب و بسته‌شدن مسیر جریان، ذوب شدن ناگهانی برف‌ها و عوامل محیطی دیگری باشد.

مطالعات در مورد شکست خاکریزهای غیرچسبنده بر اثر عبور آب از روی آنها، بیان می‌کند که فرسایش در صفحه‌ی شیب شیروانی پایین‌دست و به موازات و شیب معکوس نسبت به این صفحه رخ می‌دهد. سپس شکست شیب معکوس به صورت عرضی از یک نقطه‌ی ثابت در کف خاکریز به صورت دورانی گسترش می‌یابد که موقعیت این نقطه تابعی از اندازه‌ی ذرات خاکریز است. در طی تحقیقات صورت گرفته روند شکست و رابطه آن با میزان رطوبت و تراکم بررسی شده است از جمله این مطالعات می‌توان به مطالعه هانسن و همکاران (۷) و هانسن و هانت (۶) اشاره کرد.

آزمایش‌هایی توسط هانت و همکاران (۸) به‌منظور بررسی عرض شکاف و رابطه آن با ویژگی‌های خاک، صورت گرفته که در مطالعات بعدی به‌عنوان پارامترهای فرسایش‌پذیری خاک بسط داده شده‌اند. این پژوهشگران بیان کردند که روند آبستگي حاصل از روگذری در ۶ حالت رخ می‌دهد. این مراحل در طول زمان

توسعه‌یافته، تا در نهایت حجم قابل توجهی از سد، شسته شود.

هانسن و همکاران (۹) شکست سدهای همگن با مصالح درشت را در بستر شیب‌دار به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. برای تعیین شرایط بحرانی شکست ناشی از لغزش با استفاده از سه نوع رسوب مختلف و با دانه‌بندی تقریباً یکنواخت در یک فلوم با شیب بستر صفر تا ۱۰ درصد، ۱۶۸ آزمایش انجام دادند. نتایج نشان داد که ارتفاع آب پشت سد، زاویه‌ی شیب بستر و قطر مصالح بر مکانیزم شکست اثر دارند. موریس و همکاران (۱۲) آبستگي و بروز شکاف در سدهای خاکی در شرایط آزمایشگاهی و میدانی بررسی کردند. آنها تأثیر نوع خاک در مدلسازی خود را مدنظر قرار دادند و نتیجه گرفتند که ارتباط مستقیمی بین نوع خاک و ایجاد آبستگي در سدهای خاکی وجود دارد بگونه‌ای که تغییرات در درجه‌بندی مواد، تراکم و رطوبت بهینه می‌تواند بر سرعت آبستگي و فرسایش و در نتیجه تأثیر ۱۰ برابری بر شکست سد می‌گذارد. ژانگ و همکاران (۱۶) مطالعاتی پیرامون فرسایش خاکریزهای چسبنده ناشی از عبور آب از روی سازه انجام دادند که نشان می‌دهد در شیب پایین‌دست و در تراز تاج خاکریز، ریزش‌های ناپیوسته و آبشاری شکل رخ می‌دهد. این ریزش‌ها به طور عام به عنوان پدیده‌ی ریزش و خرابی تاج سد شناخته می‌شوند.

در سال‌های گذشته سدهای ایران همواره با این مشکل روبه‌رو بوده‌اند. از جمله سدهای بزرگی که در زمان ساخت بر اثر این پدیده، در معرض خسارت و خرابی قرار گرفته‌اند را می‌توان به سدهای فرازبند و نشیب‌بند سد کارون سه در زمان ساخت اشاره کرد. این مورد نشان‌دهنده اهمیت مطالعه این پدیده را نشان می‌دهد. در سیلاب‌های فروردین ۹۸ نیز در بسیاری از مناطق به‌دلیل روگذری جریان از خاکریزها حائل در کنار رودخانه‌ها یا سیل‌بند خسارات زیادی به‌بار آمد. در بعضی از موارد در عملیات نگه‌داری سدهای بزرگ برای شستن مخزن سد که در اصلاح لاتین فلشینگ گفته می‌شود. نیاز به احداث سدهای خاکی بزرگی در مخزن بالادست سد می‌باشد. این امر موجب بوجود آوردن هیدروگراف بزرگ سیلاب برای

می‌دهد، پژوهش‌های انجام شده مکانیزم شکست را اغلب به صورت کیفی بررسی کرده‌اند و بررسی‌های دقیقی در زمینه‌ی استخراج پارامترهای ابعادی انجام نشده است.

صالحی و همکاران (۱۲) مطالعه آزمایشگاهی تأثیر پارامتر چسبندگی خاک بر زمان و نحوه شکست سدهای خاکی تحت روگذری پرداختند. در این مطالعه به منظور بررسی پدیده شکست سدهای خاکی تحت روگذری جریان، چندین آزمایش انجام شده است. در آزمایش‌های انجام شده، سد از نوع خاکی همگن بوده که از یک لایه ریپ ریپ برای محافظت شیب بالادست استفاده شده و شکست ناشی از روگذری، بدون ایجاد شکاف اولیه روی شیب پایین دست، مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌ها با درصد‌های مختلف رس، انجام شده و تأثیر پارامتر چسبندگی بر روند فرسایش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این مطالعه شامل بررسی نحوه‌ی تغییرات پروفیل سد در طول فرایند شکست و زمان شکست است. همچنین در سال‌های اخیر مطالعه بر تأثیر جنس خاک بر زمان تخریب توسط صالحی و عظیمی (۱۳) صورت پذیرفت که نتایج نشان داد، با افزایش میزان رس در محتوای خاک سدهای خاکی زمان تخریب افزایش پیدا می‌کند. اگرچه سبب این افزایش می‌شود ولی در نحوه شسته شدن تأثیر بسزایی گذاشته و روند آبشستگی سدهای خاکی در زمان روگذری را از حالت تدریجی در خاک‌های غیر چسبنده به حالت ناگهانی (ریزش سد در نقطه از زمان) در خاک‌های چسبنده با درصد رس بالا تبدیل می‌کند که این مورد خود جای بحث و گفتگوی زیادی را می‌طلبد.

مطالعاتی در زمینه تغییر فاز جریان نشت از بدنه سد خاکی به پدیده روگذری انجام شده است. در پدیده نشت، در استاندارد مکانیک خاک (۱) بیان شده است، به‌ازای تجاوز گرادیان هیدرولیکی موجود از گرادیان هیدرولیکی مجاز، سرعت جریان در حال نشت از بدنه سد افزایش پیدا کرده و باعث ایجاد پدیده رگاب می‌شود. این افزایش تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در نهایت جریان هیدرولیکی از جریان داری به جریان

شستن رسوبات در مخزن سد است که به خصوص در نزدیک ورودی نیروگاه و همچنین خروجی تحتانی سد صورت می‌پذیرد. از جمله سدهایی که در کشورمان، با این رویکرد و روش احیا شدند می‌توان به سد سپیدرود (منجیل) استان گیلان اشاره کرد. این موارد نشان می‌دهد همان‌گونه که افزایش زمان خرابی در مواردی برای کاهش دبی خروجی حائز اهمیت است، عکس این مورد نیز گاهی برای بهره‌برداری از شرایط به‌وجود آمده مورد اهمیت است، این نتیجه مطابق با نتیجه‌گیری وو و کنگ (۱۴) است.

ژانگ و همکاران (۱۶) بیان کردند که مطالعه روی شیب و جنس خاک سدهای خاکی همگن نشان می‌دهد که در سدهای خاکی غیر چسبنده، شرایط آبشستگی حاصل از روگذری بیشتر تابعی از شیب بالادست و پایین دست سد می‌باشد درحالی که در سدهای خاکی همگن - چسبنده، علاوه بر شیب بالادست و پایین دست، جنس و شرایط و پارامترهای فیزیکی خاک مانند دانه‌بندی، میزان چسبندگی نیز عوامل تأثیر گذار می‌باشد. نتایج بررسی اثر ویژگی‌های خاک بر عبور آب از روی خاکریز در مسیر جریان ورودی به این نتیجه منجر شد که وجود ذرات ریزدانه (سیلت و رس) در خاکریز، زمان شکست را افزایش می‌دهد و رابطه (۱) برای برآورد دبی عبوری از شکاف پیشنهاد شد.

$$Q_b = Q_{in} A_s \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)،  $Q_b$ : دبی شکاف،  $Q_{in}$ : دبی ورودی،  $A_s$ : مساحت سطح آب پشت خاکریز،  $\Delta H$ : تغییرات تراز سطح آب و  $\Delta t$ : بازه زمانی است.

یو و یانگ (۱۵) به بررسی شکست خاکریزهای محافظ رودخانه و ساخته‌شده با مصالح چسبنده ناشی از عبور آب پرداختند. نتایج نشان می‌دهد مکانیزم شکست خاکریز می‌تواند به صورت مرحله‌ای در شیب جانبی تقسیم شود، به گونه‌ای که ابتدا ریزش تاج سد (هدکات) رخ داده و به سمت عقب حرکت می‌کند و در مرحله‌ی بعد عرض شکاف ایجاد شده گسترش می‌یابد. بر اساس مطالب بیان شده، مرور مطالعات نشان

$$\frac{Q_b}{d_{50} h_t^{3/2} \sqrt{g}} = f_3 \left( \frac{x(t)}{L}, \frac{\rho_{dm} g d_{50}}{C}, \frac{t}{t_f}, D_r, \tan \phi, m_1, m_2 \right) \quad (4)$$

در جدول (۱) برخی ویژگی‌ها ژئوتکنیکی و مشخصات مدل سدهای ساخته شده درج شده است.

### مدل آزمایشگاهی

در مدل‌سازی سدهای خاکی معمولاً طول سازه نقشی در روند پژوهش نداشته و بنابراین آزمایشات در طول واحد یا در موارد زیادی در طول‌های کمتر صورت می‌گیرد. بنابراین، برای ساخت مدل سد خاکی در این تحقیق از مخزن استاندارد یک که بدین منظور ساخته شده و ابعادی برابر ۲ متر طول، یک متر ارتفاع و عرض ۰/۱۷۵ متر دارد، استفاده شده است. داده‌های آبهستگي در بدنه‌ی سد خاکی در هنگام روگذری آب توسط دو سیستم، پوینت گیج، و سیستم دیجیتالی (متر لیزری) که هر دو دقت  $\pm 1$  میلی‌متر دارند، برداشت شده است. برای ثبت پروفیل آبهستگي ابتدا در طول سد نقاطی مشخص شد و در فواصل زمانی صفر، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰، ۴۸۰ و ۷۲۰ ثانیه از ابتدای شروع آبهستگي عمق حفرة نسب به دامنه‌ی پایین دست با استفاده از پوینت گیج و متر لیزری و دوربین برداشت شد (شکل ۱ و ۲).

### دانه بندی خاک

به منظور تعیین منحنی دانه‌بندی و برآورد قطر متوسط ذرات تشکیل‌دهنده خاک مدل‌های آزمایشی برش استاندارد عمل شد که منحنی دانه‌بندی این دو نوع خاک در شکل (۳) ترسیم شده است. همچنین داده‌های مربوط به قطر متوسط ذرات در جدول (۱) آورده شده است.

### تعیین رطوبت بهینه خاک

برای محاسبه‌ی وزن مخصوص حداکثر در رطوبت بهینه خاک‌های مورد استفاده در مدل‌های دوگانه، از آزمایش تراکم استاندارد (پروکتور) استفاده شده است. با مشخص

آشفته تبدیل شود. این مورد در هنگامی رخ می‌دهد که عدد رینولدز جریان از مقدار یک تجاوز کند. تبدیل پدیده نشت به پدیده روگذری در شرایطی اتفاق می‌افتد که خط فریاتیکی جریان در رقم بالادست جریان با بدنه پایین دست برخورد کند.

مطالعه حاضر برای بررسی اثر شیب شیروانی پایین دست و بالادست سدهای خاکی با خاک چسبنده بر روگذری جریان طرح‌ریزی شده است. با توجه به نتایج، روابطی برای طبقه‌بندی کلی نحوه آبهستگي ارائه شده است. پارامترهای فیزیکی خاکریز سدهای خاکی یکی از پارامترهای مهم در زمان آبهستگي حاصل از روگذری است. این پژوهش با تغییر دادن این پارامتر در بالادست و پایین دست شیب سد خاکی تأثیر این دو شیب و اهمیت هر یک را مورد بررسی قرار داده است.

### مواد و روش‌ها

#### تحلیل ابعادی

عوامل مؤثر بر شکست سد خاکی به صورت رابطه ۲ ارائه می‌شود:

$$Q_b = f_1 \left( d_{50}, \rho_{dm}, D_r, C, \phi, g, h, L, l, m_1, m_2, Q_{in}, w, w(t), x(t), h_o, h_t, t_f, t \right) \quad (2)$$

در این رابطه،  $d_{50}$ : قطر متوسط ذرات،  $\rho_{dm}$ : چگالی ذرات،  $D_r$ : درصد تراکم،  $C$ : مقاومت چسبندگی خاک،  $\phi$ : زاویه اصطکاک داخلی خاک،  $g$ : شتاب ثقل،  $h$ : ارتفاع خاکریز،  $L$ : طول کف خاکریز،  $m_1$ : شیب پایین دست،  $m_2$ : شیب بالادست،  $Q_{in}$ : دبی جریان ورودی به پشت خاکریز،  $Q_b$ : دبی عبوری از شکاف،  $w(t)$ : عرض شکاف شده،  $x(t)$ : موقعیت زمانی محل تشکیل آبشار،  $h_o$ : عمق اولیه آب پشت خاکریز،  $h(t)$ : عمق آب در بالادست خاکریز در زمان  $t$ ،  $t_f$ : زمان شکست و  $t$ : زمان است. با تحلیل ابعادی به روش پای باکینگهام رابطه (۳) و (۴) استخراج شد:

(۳)

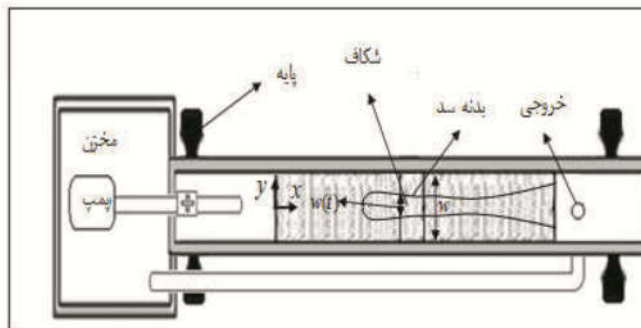
$$\frac{x_t}{L} = f_4 \left( \frac{t}{t_f}, \frac{Q_{in}}{d_{50} h_t^{3/2} \sqrt{g}}, m_1 m_2 \tan \phi, \frac{\rho_{dm} g d_{50}}{C}, D_r \right)$$

برای تعیین رطوبت بهینه نشان می‌دهد. براساس استاندارد آزمایش‌های مکانیک خاک، مقاومت برشی خاک‌های نمونه نیز توسط دستگاه برش مستقیم برای نمونه‌هایی با چسبندگی کم و در مورد خاک‌های چسبنده توسط دستگاه تک محوری مورد آزمایش قرار می‌گیرد (۲ و ۳).

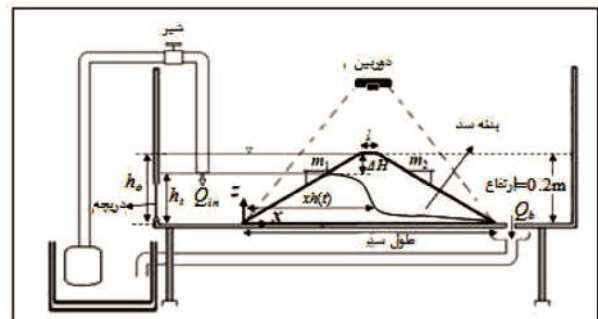
بودن ابعاد سد خاکی و نیز معلوم شدن وزن مخصوص حداکثر، وزن خاک لازم برای ساخت مدل سدخاکی با ابعاد مورد نظر تعیین می‌شود. چنانچه وزن خاک بدست آمده در همان ابعاد معلوم شده از قبل متراکم شود، می‌توان نتیجه گرفت تراکم خاک مدل ساخته شده با نمونه آزمایش پروکتور مشابه می‌باشد. شکل (۴) نمودار تراکم خاک‌ها را

جدول ۱. وضعیت خاک نمونه‌ها و مدل‌ها

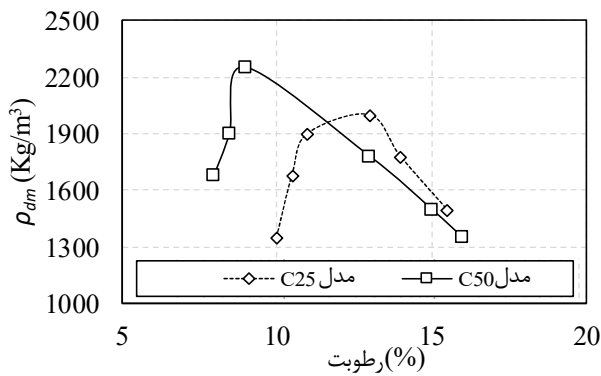
نمادها	شیب بالادست	شیب پایین‌دست	چسبندگی $C$ کیلو نیوتن بر متر مربع	وزن مخصوص	ارتفاع (cm)	درصد رس	تنش برش بحرانی $\tau_{cb}$ کیلو نیوتن بر متر مربع
C25-11	۱	۱	۸/۲	۲۰۱۰	۲۰	۲۵	۱۳/۲
C25-12	۱	۲	۸/۲	۲۰۱۰	۲۰	۲۵	۱۳/۲
C25-21	۲	۱	۸/۲	۲۰۱۰	۲۰	۲۵	۱۳/۲
C25-22	۲	۲	۸/۲	۲۰۱۰	۲۰	۲۵	۱۳/۲
C50-11	۱	۱	۵/۱	۲۰۵۰	۲۰	۵۰	۶/۷
C50-12	۱	۲	۵/۱	۲۰۵۰	۲۰	۵۰	۶/۷
C50-21	۲	۱	۵/۱	۲۰۵۰	۲۰	۵۰	۶/۷
C50-22	۲	۲	۵/۱	۲۰۵۰	۲۰	۵۰	۶/۷



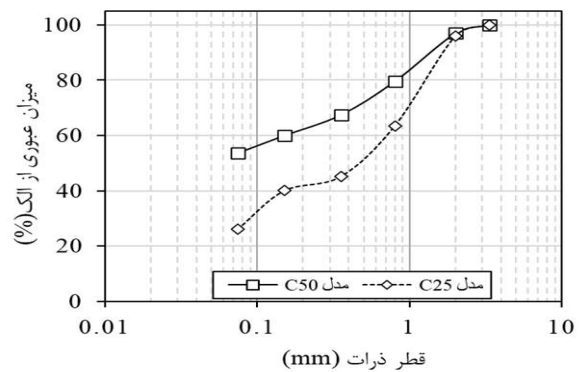
شکل ۲. نمای از بالا فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات



شکل ۱. نمای جانبی از فلوم آزمایشگاهی و تجهیزات



شکل ۴. تعیین رطوبت بهینه خاک مدل‌ها



شکل ۳. منحنی دانه بندی نمونه خاک‌های انتخابی



شکل ۵. دستگاه برش تک‌محوری

$$Dr(\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \times 100 = \frac{\frac{W_s}{V}}{\frac{W_t}{V}} \times 100 = \frac{W_s}{W_t} \times 100 \quad (5)$$

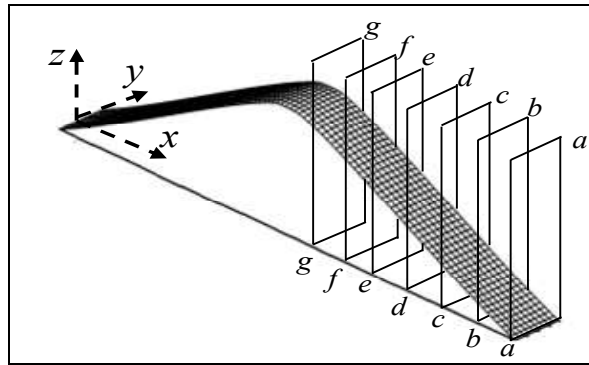
#### تعیین مقاومت برشی و چسبندگی نمونه‌ها

برای تعیین مقاومت برشی سه نمونه خاک از دستگاه‌های برش مستقیم و تک‌محوری استفاده شد. خاک مدل‌ها با استفاده از دستگاه تک‌محوری مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج در جدول ۱ درج شده است. شکل (۵) دستگاه تک‌محوری را نشان می‌دهد. اجزای دستگاه برش تک‌محوری با توجه به شکل (۵) به صورت زیر می‌باشد:

a: شمای کلی دستگاه برش تک‌محوری، b: استوانه آماده‌سازی نمونه‌های خاک، c: رینگ فلزی برای محاسبه تنش، d: جک بالابرنده نمونه، e: دستگیره تنظیم رینگ تنش، f: محل قرارگیری نمونه خاک در دستگاه

#### تراکم خاک

تراکم نسبی مدل سد ساخته شده براساس آزمایشات پروکتور بر روی نمونه‌ها خاک انتخابی تعیین شد. با توجه به وزن مخصوص خاک و رطوبت بهینه و حجم سد مدل ساخته شده با تراکم مورد نظر ساخته می‌شد. از رابطه (۵)، میزان تراکم نسبی خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت با در نظر گرفتن ماکزیمم وزن مخصوص بدست آمده از آزمایش پروکتور، میزان تراکم خاک در هنگام ساخت سد به صورت لایه به لایه (ضخامت هر لایه ۲ سانتی‌متر) مورد ارزیابی قرار داده شد. این میزان مقداری بالاتر از ۹۰ درصد در نظر گرفته شد. گفتنی است، در آزمایشات با مقدار تراکم نسبی کمتر از این میزان روند تراکم با غلطک دستی و چکش در فلوام آزمایشگاهی ادامه پیدا کرد.



شکل ۶. صفحات فرضی برداشت مختصات نقاط در بدنه مدل سد

برداشت می‌شود. پس از برداشت کامل نقاط دوباره مخزن بالادست مدل از آب پر شده و بعد از ۳۰ ثانیه روگذری دوباره جریان قطع و همین روال تا انتهای آزمایش هر ۳۰ ثانیه تکرار می‌شود (صفر، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۰۰، ۴۸۰، ۷۲۰). کلیه مراحل آزمایش با دوربین فیلمبرداری ۱۴ مگاپیکسل تصویربرداری شد و سپس فیلم ضبط شده به وسیله نرم افزار Free Video to JPG Convert به عکس تبدیل شده و مختصات مربوط به شکاف آبشستگی و تراز سطح آب در زمان‌های مختلف استخراج شد (۱۱). این آزمایشات در آزمایشگاه مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است.

### نتایج و بحث

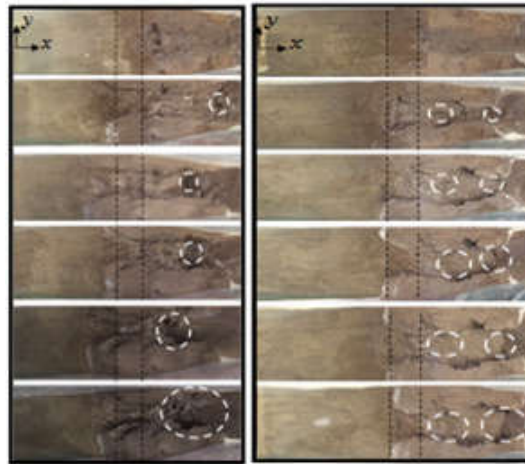
شکل‌های ۷ و ۸ پروفیل‌های آبشستگی حاصل از روگذری در مدل C25-11، C25-12 در بازه زمانی (صفر، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۳۰۰، ۴۸۰، ۷۲۰) ثانیه را نشان می‌دهند. در زمان‌های بعد از ۷۲۰ ثانیه دو حالت رخ می‌دهد. در مدل‌هایی که آبشار بزرگ تشکیل می‌شود، زمانی که تعادل استاتیکی آبشار از بین برود این رفتار ادامه پیدا می‌کند تا در این زمان، خرابی سد به صورت ناگهانی رخ دهد. در حالی که در مدل‌هایی که آبشارهای متعدد تشکیل می‌شود، خرابی تا ارتفاع بین ۲۰ تا ۳۰ درصد کل ارتفاع سد ادامه پیدا می‌کند. از این رو زمان ۷۲۰ به عنوان زمان نهایی انتخاب شد.

### برداشت پروفیل آبشستگی

برای ترسیم پروفیل آبشستگی از تعدادی نقطه در طول بدنه‌ی مدل‌های آزمایشگاهی از دامنه‌ی بالادست به سمت شیب‌پایین دست استفاده شده است. موقعیت این نقاط در جهت طول سد از پاشنه‌ی سد به سمت پنجه می‌باشد که فواصل آنها در مدل‌ها برابر با ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. با جانمایی متر لیزی در نقطه‌ی مورد نظر، ارتفاع پروفیل آبشستگی در نقاط مورد نظر برداشت شد و در ادامه پروفیل آبشستگی این نقاط ترسیم شده است.

برای اندازه‌گیری ابعاد شکاف آبشستگی، از متر لیزی با قابلیت حرکت بر روی ریل، نصب شده روی فلوم استفاده شد. گفتنی است، این روند برای کلیه مدل‌ها تکرار شد و بطور کل از پایین دست به سمت بالادست بدنه سد خاکی در صفحات موازی این اندازه‌گیری‌ها صورت پذیرفت. شکل (۶) موقعیت صفحات مذکور را نشان می‌دهند.

برای ثبت اطلاعات پروفیل آبشستگی در بدنه سد خاکی مراحل بدین صورت انجام گرفت که جریانی معادل ۰/۰۵ لیتر بر ثانیه وارد مخزن شده با شروع آبگذری (گذر آب از تاج و سرازیر شدن به شیب پایین دست سد) زمان سنج شروع به کار کرده و پس از گذشت ۳۰ ثانیه، جریان آب به مخزن بالادست قطع و آب مخزن از طریق خروجی تحتانی تخلیه می‌شود. سپس به کمک متر لیزی در نقاط مورد نظر، پروفیل آبشستگی



شکل ۷. وضعیت شکاف آبستگی برای مدل‌های با ۲۵ درصد رس و شیب بدنه بالادست و پایین دست ( $m_1=1, m_2=2$ ) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

وضعیت می‌دهد.

این توسعه یافتگی تا جایی ادامه پیدا می‌کند تا بدنه سد دچار ریزش ناگهانی شود.

در شکل (۱۰)، به ازای تغییر شیب پایین دست مدل، در ازای خاک یکسان، تغییر شکل محسوسی در روند آبسته شدن شکاف حاصل نشد. پروفیل آبستگی شکاف در طول سد به صورت آبشار بزرگی همانند مدل قبل C25-11، پدیدار شد. مقایسه اولیه حاکی از آن است که تغییر شیب پایین دست مدل-ها، باعث می‌شود شکل آبشار از حالت قائم به حالت ملایم و با شیب تند به سمت پایین دست تغییر وضعیت دهد.

در ادامه شیب بالادست سد تغییر داده شد و شیب پایین دست سد  $m_1=1$  در نظر گرفته شد. این تغییر با رویکرد ایجاد مدل‌های با خاک یکسان ولی شیب متغیر صورت پذیرفت. در شکل ۱۱ مدل با شیب پایین دست دو و شیب بالادست یک ترسیم شده است. همان‌طور که مشخص است همچنان یک آبشار بزرگ از پایین دست سد به سمت بالا دست در حال توسعه می‌باشد. در مقایسه با مدل C25-12 این نکته استنباط می‌شود که شیب پایین دست آبشار در حالتی که یک آبشار پدیدار شود، تابعی از شیب پایین دست بدنه سد می‌باشد،

همان‌طور که در شکل مشخص می‌باشد در بازه زمانی مختلف، قسمت‌هایی که بیشتر آبسته شدند در قالب آبشار، مشخص شدند. در حالت کلی در نقاطی که پرش وجود داشته باشد و جریان از حالت فوق بحرانی به حالت زیر بحرانی تبدیل شده توسط دایره‌های سفید رنگ مشخص شده است. این شرایط برای مدل‌های C25-21، C25-22 در شکل (۸) نشان داده شده است.

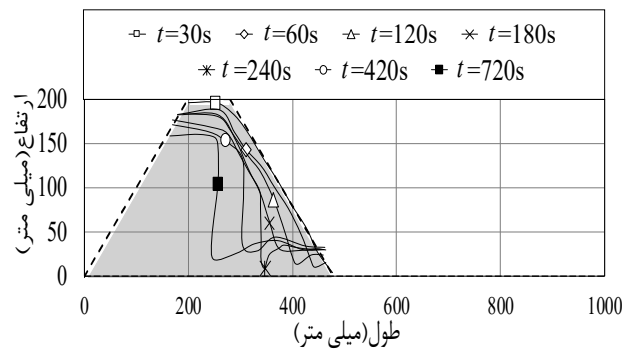
با گذشت زمان از شروع آزمایش آبشارهای کوچکی از پایین دست به سمت بالادست در حال توسعه و قابل مشاهده می‌باشند. برای بررسی رفتار این نوع آبشارها، لازم بود که پروفیل قائم در این آزمایشات ترسیم شود. بنابراین، به ازای تغییر شیب بدنه بالادست و پایین دست، در مدل‌های معرفی شده در جدول (۱)، پروفیل قائم به ازای ماکزیمم عمق آبستگی در مدل‌های مختلف در شکل‌های (۹) تا (۱۶) ترسیم شد که توضیحات و رفتار این آزمایشات به ترتیب بیان می‌شود.

در شکل (۹)، همان‌طور که قابل مشاهده می‌باشد یک آبشار بزرگ از پاشنه سد شروع به تشکیل شدن می‌کند. این آبشار در طول زمان از شیب مایل به شیب قائم تغییر

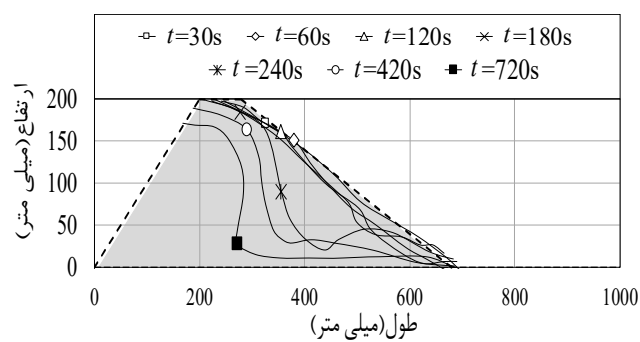




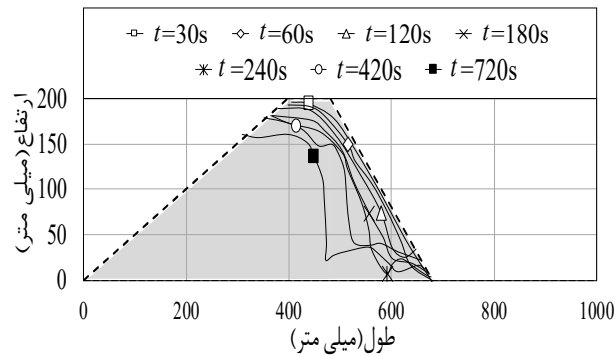
شکل ۸. وضعیت شکاف آبستگي برای مدل‌های با ۲۵ درصد رس و و شیب بدنه بالادست و پایین دست ( $m_1=2, m_2=1$ ) (رنگی در نسخه الکترونیکی)



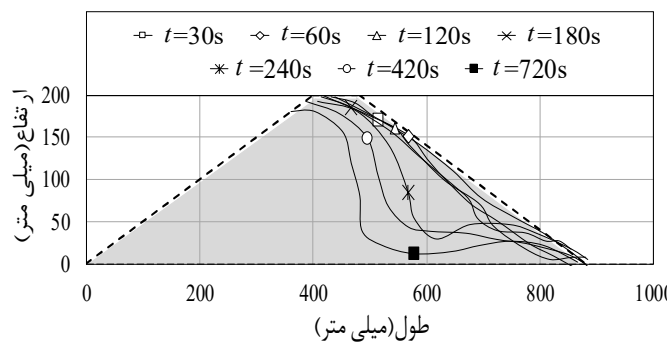
شکل ۹. الگوی زمانی آبستگي در مدل C25-11



شکل ۱۰. الگوی زمانی آبستگي در مدل C25-12



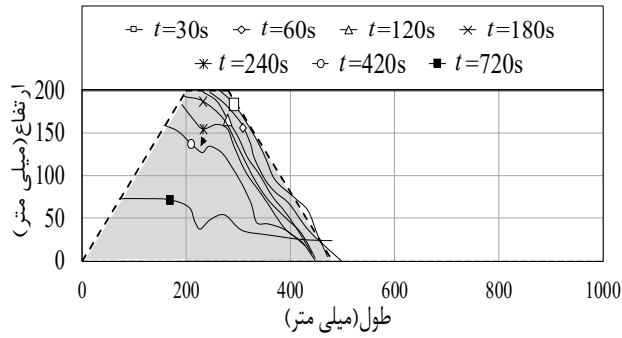
شکل ۱۱. الگوی زمانی آبشستگی در مدل C25-21



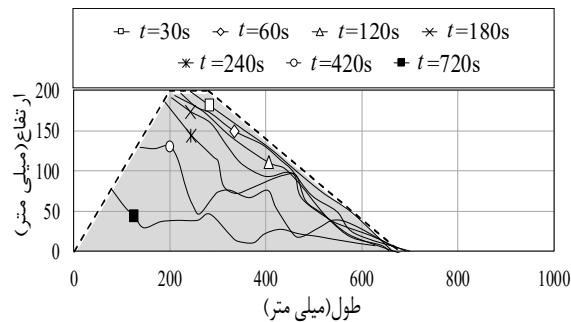
شکل ۱۲. الگوی زمانی آبشستگی در مدل C25-22

محتوی از ۲۵ به ۵۰ آزمایشات مجدداً تکرار شد. نتایج بدست آمده نشان داد که تغییر خاک، باعث تغییر معنی داری در روند و شکل آبشار و تعداد آن می شود. در شکل های (۱۳) تا (۱۶) که در ادامه آورده شده است، در طول زمان جریان، آبشارهای متعددی از پاشنه سد به سمت تاج سد توسعه پیدا می کنند. بررسی تنش برشی در طول سد نشان داد که تنش برشی موجود (ایجاد شده توسط جریان) و تنش برشی بحرانی خاک می تواند به عنوان شاخصی برای پیش بینی رفتار در هنگام روگذری در سدهای خاکی چسبنده مطرح شود. در مدل های شکل (۱۳) تا (۱۶) این طور به نظر می رسد که تنش موجود در زمان شروع روگذری بیشتر از تنش بحرانی بین ذرات خاک بوده و در نهایت در قسمت پایین دست بدنه، با فزونی تنش برشی از مقدار تنش بحرانی آبشستگی

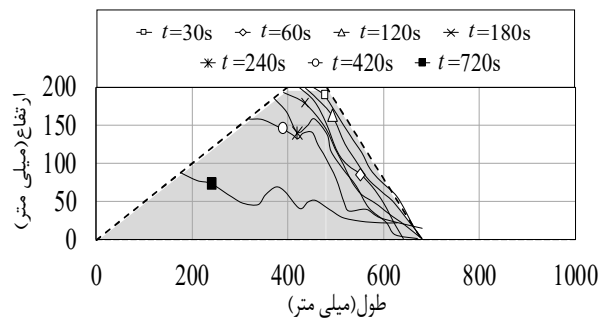
درحالی که شیب بالادست در شکل آبشار تشکیل شده بی تأثیر است. این مورد نشان می دهد که با افزایش شیب پایین دست سد، شکل آبشار تشکیل شده با شیب نزدیک به قائم بوجود خواهد آمد. در شکل (۱۲) پروفیل آبشستگی مدل C25-22 ترسیم شده است. با مقایسه بین مدل شکل ۱۱ و مدل شکل ۱۲ می توان مشاهده کرد که در حالتی که شیب شیروانی پایین دست بدنه سد تغییر کند (کاهش یابد) نتایج بدست آمده در مقایسه مدل شکل (۹) و (۱۰) قابل تعمیم به مقایسه شکل های (۱۱) و (۱۲) می باشد. بدین معنی که تأثیر شیب شیروانی پایین دست بر روند آبشستگی در شکل آبشارهای ایجاد شده نمایان است و تغییر شیب در مدل های با خاک مشابه باعث تغییر کلی در رفتار آبشستگی نمی شود. برای بررسی تأثیر نوع خاک بر رفتار آبشستگی در زمان روگذری جریان، در ۴ مدل قبل با افزایش درصد رس



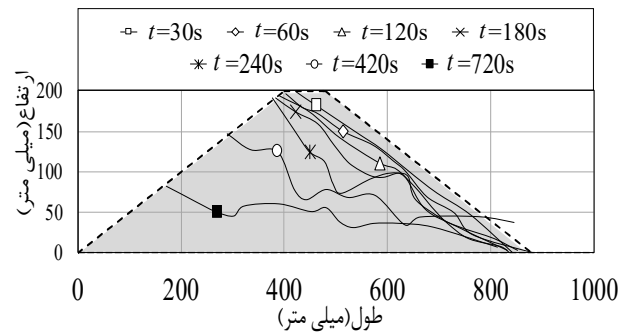
شکل ۱۳. الگوی زمانی آبستنگی در مدل C50-11



شکل ۱۴. الگوی زمانی آبستنگی در مدل C50-12



شکل ۱۵. الگوی زمانی آبستنگی در مدل C50-21



شکل ۱۶. الگوی زمانی آبستنگی در مدل C50-22

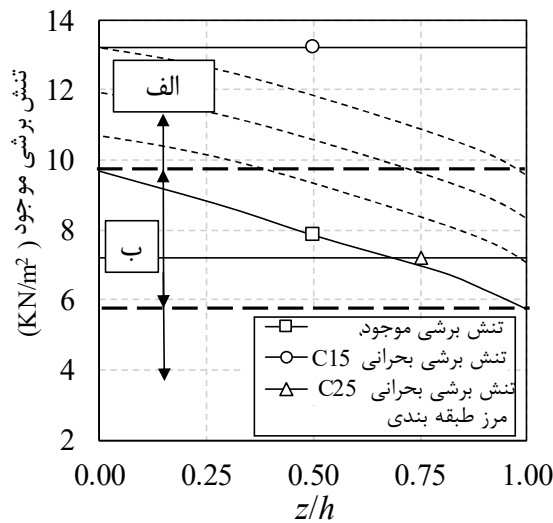
در نظر گرفتن دبی اولیه ثابت، (۰/۰۵ لیتر بر ثانیه) که در حالت کلی می‌تواند دبی سیلاب روی تاج سد در نظر گرفته شود. می‌توان تنش برشی موجود جریان را محاسبه کرد. در زیر برای یکی از مدل‌ها این مورد لازم به ذکر است سرعت با استفاده از محاسبه معادله انرژی در تاج سد و مقاطع پایین تر از تاج سد به صورت نقطه به نقطه در فاصله ۱۰ سانتی متری از هم محاسبه شد (به ازای دبی اولیه ورودی). در طول محاسبات افت اصطکاکی صفر در نظر گرفته شده است. به این ترتیب در ابتدای آزمایش نمودار تنش برشی به ازای ارتفاع سد ترسیم می‌شود. در مرحله بعد تنش برشی بحرانی در نمودار که عدد ثابتی است و بسته به جنس خاک متغیر است ترسیم می‌شود. در این حالت شرایطی بین نمودارها وجود می‌آید که می‌توان تفاسیری برای آنها ارائه کرد. با توجه به شکل ۱۷، در طبقه‌بندی حالت (الف) به ازای هر ارتفاعی، همواره تنش بحرانی (دایره) همواره از تنش موجود در ابتدای آزمایش بیشتر است. این به این معناست که هیچ‌یک از نقاط شیب پایین دست سد پتانسیل لازم برای شروع آبشستگی را ندارند. در ادامه با افزایش دبی در بالادست نمودار تنش موجود با افزایش سرعت و همچنین میزان دبی به سمت بالا تغییر موقعیت می‌دهد. این روند به صورت یک وضعیت رو به افزایش پایدار صورت می‌پذیرد تا در نقطه‌ای تنش برشی موجود با تنش برشی بحرانی یکسان شوند. که این نقطه در پنجه سد منطبق می‌شود. بدین ترتیب در آن نقطه جریان پتانسیل لازم برای آبشستگی را دارد، که در نهایت به ایجاد آبشار می‌شود. این روند با افزایش ارتفاع آبشار تا خرابی کامل سد صورت می‌پذیرد. چراکه دیگر نقاط با رقوم ارتفاعی بالاتر از رقوم پنجه پتانسیل لازم (تنش موجود بزرگتر از تنش بحرانی) را ندارند پس همواره پروفیل آبشستگی به صورت آبشار بزرگی پدیدار می‌شود. این مطلب در مواردی که تنش برشی موجود در هر نقطه برابر با تنش بحرانی خاک می‌شود. بدین معناست که خاک بدنه سد از همان نقطه شروع به فرسایش، و در نهایت ایجاد آبشار

و در نهایت توسعه آبشار صورت می‌پذیرد. این رخداد می‌تواند چندین بار در شیب پایین دست سد صورت پذیرد و نقاطی که این شرایط بوجود می‌آید (تنش موجود جریان آب بیشتر از تنش بحرانی ذرات خاک) همواره تشکیل آبشار قابل مشاهده است. بدین رو در مدل‌های C50 تعداد ۲ تا ۴ آبشار در طول زمان مشاهده شد. که در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند. در شکل (۱۳)، آبشارهای تشکیل شده در طول سد در نهایت به تعداد ۲ آبشار قابل تشخیص منتهی می‌شود.

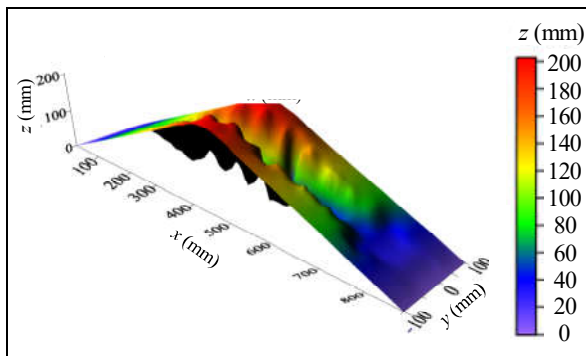
از مقایسه دو شکل (۱۴) و (۱۳) این طور استنباط می‌شود که کاهش شیب شیروانی پایین دست در سدهای خاکی چسبنده، باعث ملایم شدن آبشارهای تشکیل شده در پدیده روگذری جریان می‌باشد. اشکال ترسیم شده (۱۵) و (۱۶) حاصل نتایج آزمایشات روی مدل‌های C50-12 و C50-12 هستند که همانند مدل‌های قبلی چندین آبشار در طول بدنه سد تشکیل شده است.

#### طبقه‌بندی پروفیل‌های آبشستگی توسعه یافته

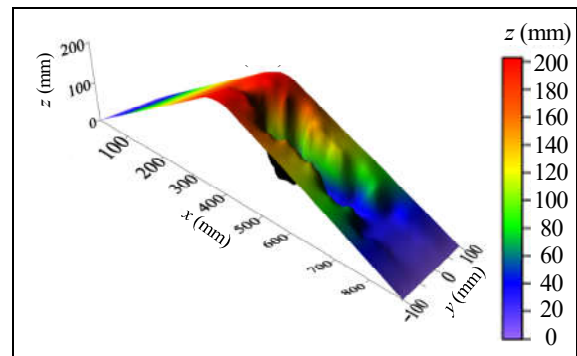
با توجه به ۸ مدل آزمایش شده در پژوهش حاضر، نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تغییرات تنش برشی موجود بین آب و خاک در مقابل تنش بحرانی خاک می‌تواند به عنوان پارامتری برای تعیین رفتار سدهای خاکی همگن با خاک چسبنده در نظر گرفته شوند. با در نظر گرفتن این رویکرد، در کلیه مدل‌ها به ازای تراکم نسبی ثابت، مقاومت برشی اندازه‌گیری شد که در جدول (۱) ارائه شده‌اند. همچنین برای محاسبه تنش برشی موجود از فرمول‌های تنش لین استفاده شد. این طور به نظر می‌رسد که زمان تعیین کننده شکل آبشار تشکیل شده، در گام‌های زمانی بعد تا خرابی کامل سد، پارامتری از دبی در زمان اولیه و شرایط جریان در ابتدای روگذری باشد. گفتنی است برای هدایت جریان در مدل آزمایشگاهی جریان روی شیب پایین دست ابتدا توسط کانال هدایت کننده‌ای با ابعاد ۱۰ میلی متر ارتفاع و ۱۰ میلی متر عرض به پنجه سد هدایت شد. با



شکل ۱۷. شرایط طبقه‌بندی فرم آبستنگی سدهای خاکی چسبنده



شکل ۱۹. فرم تشکیل شده آبشارهای متعدد، C50-22 (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۸. فرم تشکیل شده آبشار بزرگ، مدل C25-22 (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۲. شرایط طبقه‌بندی فرم آبستنگی سدهای خاکی چسبنده

شرایط تاج	شرایط پنجه	فرم آبستنگی	طبقه‌بندی
$\tau_{cr} > \tau_d$	$\tau_{cr} > \tau_u$	آبشار بزرگ	الف
$\tau_{cr} < \tau_d$	$\tau_{cr} > \tau_u$	آبشارهای متعدد	ب

شکل‌های (۱۸) و (۱۹) ترسیم شد که توسعه آبشارها در شکل کاملاً مشهود می‌باشد. در جدول (۲) طبقه‌بندی‌های در نظر گرفته شده با توجه به تنش برشی مشخص شده ارائه شده است.

روابط ارائه شده برای تخمین محل آبشار و دبی خروجی

در این قسمت و با استفاده از اعداد بی‌بعد روابط ۶ و ۷ برای

می‌کند. این مورد امکان دارد در چندین نقطه از شیب پایین دست سد اتفاق افتد که به طبع آن آبشارهای متعددی بوجود خواهد آمد. این منطقه به عنوان منطقه (ب) که نشانگر آبشارهای متعددی است معرفی می‌شود.

توجه به تحلیل بیان شده در مورد فرایند آبستنگی برای دو مدل از مدل‌های آزمایشگاهی تصویر سه بعدی آبشارها در

تحت تأثیر قرار دهد.

۳. در خاک‌هایی با تنش برشی بالا، آبستگی در زمان روگذری به صورت آبشار بزرگ تخمین زده می‌شود.

۴. در فرم آبستگی با شکل آبشار بزرگ، اگر چه سد مدت زمان بیشتری در مقابل خرابی پایدار می‌ماند، ولی نتایج نشان داد که خرابی آبشار بزرگ به صورت ناگهانی بوده و در نهایت دبی ماکزیمم در پایین‌دست سد، ایجاد می‌کند زیرا در قسمت تاج سد در طول زمان شسته نشده ولی به علت تشکیل آبشار بزرگ زیر تاج به مرور زمان شسته شده و تاج به وضعیت ناپایدار رسیده و به صورت ناگهانی فرو می‌ریزد. این مسئله در طراحی سدهایی با حساسیت جانی بالا، توصیه نمی‌گردد چرا که خرابی آن باعث ایجاد سیل بزرگی در پایین‌دست می‌شود. درحالی که این مورد می‌تواند، به عنوان راهکاری برای افزایش کارایی روند فلشینگ در مخزن سدهای بزرگ مورد استفاده قرار گیرد، چرا که هنگام شستن رسوبات، فلشینگ در مخازن سدها به عنوان پارامتر مستقیم دبی ماکزیمم و شدت سیل رها شده در مخزن است.

۵. در آبستگی با آبشار کوچک و متعدد، اگر چه سد مدت زمان کمتری نسبت به دیگر فرم (آبشار بزرگ) پایدار می‌ماند ولی سد دچار خرابی ناگهانی و فروریخت تاج نمی‌شود.

تخمین محل آبشار تشکیل شده در بدنه‌ی سدهای خاکی و همچنین دبی خروجی ارائه شده است. لازم به ذکر است روش ارائه‌ی این روابط با بکارگیری روش رگرسیون غیر خطی ارائه شده است (۱۲). در این روش، اعداد بی‌بعد در مقابل مقادیر برداشت‌شده در آزمایشگاهی (محل آبشار از پشته سد و همچنین میزان دبی در طول زمان) قرار داده شد و با استفاده از تکنیک برازش دادن رابطه در روش رگرسیون خطی روابطی جهت پیش بینی این مقادیر ارائه شد.

$$\frac{x_t}{L} = 5 \left( \frac{t}{t_f} \right)^{-1/5} \left( \frac{Q_{in}}{d_{50} h_t^{3/2} \sqrt{g}} \right)^{2/5} (m_1 m_2 \tan \phi)^{1/3} \left( \frac{\rho_{dm} g d_{50}}{C} \right)^{1/3} \quad (6)$$

$$\frac{h_t^{1.5} d_{50} \sqrt{g}}{Q_b} = 770 \left( \frac{t}{t_f} \right)^{-1} \left( \frac{x_t}{L} \right)^{-0.1} (m_1 m_2 \tan \phi)^{-0.1} \left( \frac{\rho_{dm} d_{50} g}{C} \right)^{0.4} - 728 \quad (7)$$

## نتیجه گیری

بر اساس آنچه مورد بررسی قرار گرفت، خلاصه‌ی نتایج را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

۱. در روند آبستگی حاصل از روگذری در سدهای خاکی همگن با خاک چسبنده، شیب بالادست تأثیر ناچیزی بر روند و شکل آبستگی دارد. درحالی که شیب‌پایین دست تاحدودی تأثیر بسزایی در شکل و شیب آبشارهای توسعه یافته حاصل از پدیده روگذری را شامل می‌شود.

۲. تنش برشی بحرانی خاک، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در روند و شرایط آبستگی می‌باشد. این پارامتر بسته به مقدار آن و مقدار تنش برشی موجود، می‌تواند رفتار آبستگی را

## منابع مورد استفاده

- 1- ASTM. 2007. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. Annual book of ASTM standards. West Conshohocken, United States.
- 2- ASTM. 2012. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf=ft3 (600 KN-m=m3)).” D698-e12, West Conshohocken, United States.

- 3- ASTM. 2010. Standard Test Methods for Laboratory Determination of water (moisture) content of soil and rock by mass. D2216-10, West Conshohocken, United States.
- 4- Cestero, F. A. J., J. Imran and H. M. Chaudhry. 2014. Experimental investigation of the effects of soil properties on levee breach by overtopping. *Journal of Hydraulic Engineering* 141(4): 1-14.
- 5- Costa, J. E. 1985. Floods from Dam Failures. Open-File Report. No. 85-560, USGS, Denver, 54.
- 6- Hanson, G. J and S. L. Hunt. 2015. Lessons learned using laboratory JET method to measure soil erodibility of compacted soils. *Applied Engineering in Agriculture* 23(3): 305-312.
- 7- Hanson, G. J., K. R. Cook and S. L. Hunt. 2005. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments. *American Society of Agricultural Engineers* 48(5): 1783-1794.
- 8- Hunt, S. L., G. J. Hanson. K. R. Cook and K. C. Kadavy. 2005. Breach widening observations from earthen embankment tests. *American Society of Agricultural Engineers* 48(5): 587-595.
- 9- Hanson, G. J., M. A. R. K. Morris. K. J. E. T. I. L. Vaskinn. D. M. Temple. S. Hunt and M. A. A. M. Hassan. 2005. Research activities on the erosion mechanics of overtopped embankment dams. *Journal of Dam Safety* 3(1):4-16.
- 10- Jafarzadeh, N., S. Rostami, K. Sepehrfar and A. Lahijanzadeh. 2004. Identification of the water pollutant industries in Khuzestan Province. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering* 1(2): 36-42.
- 11- Morris, M. W., M. A. A. M. Hassan and K. A. Vaskinn. 2007. Breach formation: Field test and laboratory experiments. *Journal of Hydraulic Research* 45(1): 9-17.
- 12- Salehi, S., E. Kahkesh, K. Esmaili and A. Arfa. 2019. Analysis of condition physical homogenous earth dam in overtopping. *Sharif Journal of Civil Engineering* 35(2.1): 93-104 (In Farsi).
- 13- 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.
- 14- Wu, W. and Y. Kang. A Simplified Breaching Model for Cohesive Embankments, United States. In: Proceeding of 2009 World Environmental and Water Resources Congress, University of California, California, U.S.A.
- 15- Yu, M. H., H.Y. Wei. Y.J. Liang and Z. H. A. O. Yong. 2013. Investigation of non-cohesive levee breach by overtopping flow. *Journal of Hydrodynamics* 25(4): 572-579.
- 16- Zhang, J., G. Xuan. X. Wang and J. Li. 2009. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength. *Sci. Science China Technological Sciences* 52(10): 3024-3029.

## Classification of Scouring Form of Homogeneous and Sticky Earth Dams in Overtopping

S. Salehi<sup>1\*</sup>, S. A. Esmaili<sup>2</sup> and K. Esmaili<sup>1</sup>

(Received: December 26-2020; Accepted: May 15-2021)

### Abstract

The objective of this study was to investigate how the earth dam is destroyed due to the effect of upstream and downstream slope of the body in overflow conditions. Therefore, eight models were provided that each model is constructed from the embankment dam with different upstream and downstream slopes (1:1, 2:1) and the soil properties ( $S_c$ ) on breach formation. The time and method of dam break for flood discharges were investigated. The results showed that the upstream side slope of the embankment dam has less effect than the downstream side slope on the scour process resulting from the phenomenon and by increasing the downstream side slope of the embankment dam, the amount of erosion in the scour hole increases 28 %. Then, using nonlinear regression, relationships were presented to estimate the output flow rate and the location of the waterfall. As to the erosion and formation of the waterfall inside the body of sticky earth dams, two main outlines of the great waterfall and a series of waterfalls were presented. Finally, the formation of these waterfalls due to the effect of shear stress created during sediment erosion relative to the critical shear stress of the dam constituents was investigated and evaluated. Considering the limitations based on shear stress, the formation status of the type and the leaching pattern of the body of the cohesive earth dams during the overpass were estimated. Then, a general plan was presented to predict the behavior of the overflow stream in homogeneous and sticky soil.

**Keywords:** Earth dam, Hole, Sticky soil, Classification, Downstream and upstream side slope, Shear stress

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

2. Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

\*: Corresponding author, Email: saeedsalehi100@gmail.com