

تحلیل رفتار مدل فیزیکی سد خاکی همگن در شرایط روگذری جریان

Original Article

سعید صالحی (دانشجوی دکتری)

اسماعیل کاهکش (دانشجوی دکتری)

کاظم اسماعیلی* (دانشیار)

عاطفه ارفع (دانشجوی کارشناسی ارشد)

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

پژوهش حاضر بر مبنای بررسی آزمایشگاهی مکانیزم شکست سد خاکی و عوامل مؤثر در آن پایه‌گذاری شده است. با توجه به اینکه شیب وجه پایین دست سد خاکی، تأثیر زیادی در زمان و نحوه‌ی خرابی دارد، بدین منظور ۲ مدل از سد خاکی با شیب یکسان بالادست و پایین دست (۱:۱ و ۲:۱) برای ۳ نوع خاک (۱ مدل از خاک S و ۲ نوع خاک Sc) ساخته شد. خاک مورد استفاده در ساخت مدل‌ها، از نوع چسبنده و غیرچسبنده با قطر متوسط 0.075 ، 0.105 و 0.175 میلی‌متر و زاویه‌ی اصطکاک داخلی به ترتیب ۱۴، ۱۸ و ۲۳ درجه هستند. زمان تخریب سد و نحوه‌ی آن برای دبی‌های سیلابی موردنظر بررسی شد و نتایج نشان داد که به‌طور کلی با افزایش قطر متوسط ذرات و زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌ها، زمان شکست کاهش و دبی بیشینه‌ی عبوری از شکاف فرسایشی افزایش می‌یابد. همچنین میزان سطح آب‌شستگی در شکاف فرسایشی در مدل‌ها برداشت شد که نتایج نشان داد.

واژگان کلیدی: شکست سد خاکی، آب‌شستگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی
خاک، شیب شیروانی.

۱. مقدمه

T شکل این قابلیت را دارند که تراز تاج خاکریز را بالا برند و خطر شکست خاکریز ناشی از عبور آب از روی آن را کاهش دهند.^[۱] در حالت کلی، شکست خاکریزها و سدها در ۴ حالت: عبور آب از روی سد ناشی از سیلاب (شکست هیدرولیکی)، شکست سازه‌ی ناشی از فرسایش درونی یا رگاب (شکست هیدرولیکی - ژئوتکنیکی)، شکست سازه‌ی ناشی از لغزش شیب‌ها یا مشکلات فونداسیون (شکست ژئوتکنیکی) و شکست ناشی از عوامل طبیعی یا لرزش رخ می‌دهد.^[۲] عبور آب از روی سد خاکی می‌تواند به دلیل وقوع سیلابی بیش از سیل طراحی، ریزش سنگ، چوب و بسته شدن مسیر جریان، ذوب شدن ناگهانی برف‌ها و عوامل محیطی دیگری باشد. مطالعات بر روی شکست خاکریزهای غیرچسبنده بر اثر عبور آب از روی سازه نشان می‌دهد که فرسایش در صفحه‌ی پایین دست و به‌صورت موازی و با شیب معکوس نسبت به صفحه‌ی ذکر شده رخ می‌دهد. سپس شکست شیب معکوس به‌صورت عرضی از یک نقطه‌ی ثابت در کف خاکریز به‌صورت دورانی گسترش می‌یابد، که موقعیت نقطه‌ی مذکور تابعی از اندازه‌ی ذرات خاکریز است. در طی مطالعات صورت گرفته، روند شکست و رابطه‌ی آن با میزان رطوبت و تراکم بررسی شده است.^[۳]

در سال ۲۰۰۵، آزمایش‌هایی به‌منظور بررسی عرض شکاف و رابطه‌ی آن با ویژگی‌های خاک صورت گرفته است که در مطالعات بعدی به‌عنوان پارامترهای

سدهای خاکی به‌دلیل نوع مصالح به‌کار رفته در احداث آن‌ها و روش‌های مختلف ساخت و نیز عوامل متعدد در جهت تخریب آن‌ها، حساسیت زیادی نسبت به شرایط پایداری دارند.

از مهم‌ترین علل خرابی می‌توان به خرابی هیدرولیکی اشاره کرد که در آن جریان آب از روی سد عبور می‌کند و احتمال تخریب سد را بسیار افزایش می‌دهد. به این دلیل، لزوم شناخت رفتار خاک‌های مختلف در هنگام وقوع پدیده‌ی روگذری امری اجتناب‌ناپذیر است.^[۱]

سدها براساس ترکیب مصالح به دو دسته‌ی اصلی سدهای همگن و غیرهمگن تقسیم می‌شوند. سدهای همگن فقط از یک نوع مصالح ریزدانه یا درشت‌دانه، و در مکان‌هایی که خاک با دانه‌بندی مناسب در اختیار باشد، ساخته می‌شوند. سدهای غیرهمگن در مکان‌هایی که خاک با دانه‌بندی مناسب در اختیار نباشد، احداث می‌شوند. علاوه بر موارد یاد شده، نوعی از سدهای مرکب هم وجود دارند که با جانمایی سازه‌هایی نظیر دیوارهای ساخته شده با مصالح بتابی، دیوارهای I شکل، دیوارهای T شکل و دیوار آب‌بند در خاکریز، ساخته می‌شوند. دیوارهای I شکل و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۷/۲/۱۳۹۶، اصلاحیه ۲۴/۵/۱۳۹۶، پذیرش ۲۴/۵/۱۳۹۶.

DOI:10.24200/J30.2018.1984.2051

از جمله پژوهش‌های انجام شده در کشور در سال‌های اخیر، می‌توان به پژوهشی پیرامون مطالعه آزمایشگاهی در مورد تأثیر پارامتر چسبندگی خاک در زمان و نحوه شکست سدهای خاکی تحت روگذری اشاره کرد. در مطالعه حاضر به منظور بررسی پدیده شکست سدهای خاکی تحت روگذری جریان، چند آزمایش انجام شده است که در آن‌ها سد از نوع خاکی همگن بوده و از یک لایه ریپ‌رپ برای محافظت شیب بالادست استفاده و شکست ناشی از روگذری، بدون ایجاد شکاف اولیه بر روی شیب پایین دست مطالعه شده است. آزمایش‌ها با درصد‌های مختلف رس، انجام و تأثیر پارامتر چسبندگی در روند فرسایش بررسی شده است. نتایج مطالعه حاضر، شامل بررسی نحوه تغییرات پروفیل سد در طول فرایند شکست و زمان شکست بوده است.^[۱۵] به همین منظور در مطالعه حاضر، به بررسی تأثیر پارامترهای مکانیکی خاک در زمان و محل شکست در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده پرداخته شده است.

۲. تحلیل ابعادی

با توجه به پژوهش‌ها و مطالعات انجام شده، عوامل مؤثر در شکست سد خاکی به صورت رابطه‌ی ۲ است:

$$f(d_{50}, \rho, D_r, q_u, \varphi, g, h, L, \theta, Q_{in}, Q_b, w(t), xh(t), H_0, H(t), t_b) = 0 \quad (2)$$

که در آن، d_{50} قطر متوسط ذرات، ρ چگالی ذرات، D_r درصد تراکم، q_u مقاومت فشاری خاک، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک، g شتاب ثقل، h ارتفاع خاکریز، L طول کف خاکریز، θ زاویه شیب شیروانی، Q_{in} دبی جریان ورودی به پشت خاکریز، Q_b دبی عبوری از شکاف، $w(t)$ عرض شکاف ایجاد شده، $xh(t)$ موقعیت زمانی محل تشکیل آبشار، H_0 عمق اولیه آب پشت خاکریز، $H(t)$ عمق آب در بالادست خاکریز در زمان t ، t_b زمان شکست و t زمان است. با تحلیل ابعادی به روش پای باکینگهام، رابطه‌ی ۳ استخراج شده است:

$$f\left(\frac{w(t)}{d_{50}}, \frac{h}{d_{50}}, \frac{w(t)}{h}, \frac{xh(t)}{L}, \frac{xh(t)}{H(t)}, \frac{\rho g d_{50}}{q_u}, \frac{Q_{in}}{Q_b}, \frac{t}{t_b}, \frac{Q_b}{\sqrt{gH(t)^{1.5}w(t)}}, \frac{h}{L}, \frac{H_0}{h}, D_r, \theta, \phi\right) = 0 \quad (3)$$

با توجه به اینکه سدها عملاً با شیب بدنه‌ی ۱:۱ تا ۱:۳ ساخته می‌شوند، در تمام آزمایش‌ها، شیب بدنه‌ی بالادست و پایین دست به صورت مشابه انتخاب شده است. بنابراین ۲ نوع سد یکی با شیب ۱:۱ و دیگری با شیب ۱:۲ و هر یک با ۳ نوع مصالح بدنه انتخاب شده است. لذا با توجه به ثابت بودن شیب از θ صرف نظر شده است. همچنین با توجه به ثابت بودن طول کف و ارتفاع خاکریز و تراز سطح اولیه آب از اعداد بی‌بعد h/L و H_0/h می‌توان صرف نظر کرد. از آنجا که در رابطه‌ی ۳، پارامترهای بی‌بعد $\frac{w(t)}{d_{50}}, \frac{h}{d_{50}}, \frac{xh(t)}{L}, \frac{xh(t)}{H(t)}, \frac{Q_{in}}{Q_b}, \frac{t}{t_b}, \frac{Q_b}{\sqrt{gH(t)^{1.5}D_{50}}}$ متغیرهای وابسته و پارامترهای $\frac{h}{d_{50}}, \frac{\rho g d_{50}}{q_u}, D_r, \varphi$ متغیرهای هندسی و مکانیکی هستند، لذا رابطه‌ی نهایی به رابطه‌ی ۴ تبدیل می‌شود:

$$\left(\frac{w(t)}{d_{50}}, \frac{w(t)}{h}, \frac{xh(t)}{L}, \frac{xh(t)}{H(t)}, \frac{t}{t_b}, \frac{Q_b}{\sqrt{gH(t)^{1.5}w(t)}}\right) = f(D_r, \frac{\rho g d_{50}}{q_u}, \phi, \frac{h}{d_{50}}) \quad (4)$$

فرسایش پذیری خاک بسط داده شده‌اند.^[۱۶] مطالعاتی پیرامون فرسایش خاکریزهای چسبنده ناشی از عبور آب از روی سازه صورت گرفته است که نشان می‌دهد در شیب پایین دست و در تراز تاج خاکریز، ریزش‌های ناپیوسته و آبشاری شکل رخ می‌دهد. ریزش‌های ذکر شده به طور عام به عنوان پدیده ریزش و خرابی تاج سد شناخته می‌شوند. همچنین در مطالعات اخیر، شکست سدهای همگن با مصالح درشت در بستر شیب‌دار به صورت آزمایشگاهی بررسی و برای تعیین شرایط بحرانی شکست ناشی از لغزش با استفاده از ۳ نوع رسوب مختلف و با دانه‌بندی تقریباً یکنواخت در یک فلوام با شیب بستر صفر تا ۱۰٪، ۱۶۸ آزمایش انجام شد و نتایج نشان داد که ارتفاع آب پشت سد، زاویه‌ی شیب بستر و قطر مصالح در مکانیزم شکست اثر دارند.^[۸]

مطالعه بر روی یک مدل ساده برای شکست خاکریزهای مرکب با هسته‌ی رسی نیز نشان داد که در مدل مذکور، شکست ناشی از عبور آب رابطه‌ی مستقیم با شیب پایین دست دارد و جریان عبوری از شکاف با استفاده از رابطه‌ی سرریز تخمین زده می‌شود. در حالت رگاب فرض شد که جریان آب در گام اول در یک لوله با مقطع مستطیلی حرکت می‌کند و سپس لوله‌ی مذکور به صورت یکنواخت در امتداد بستر بزرگ می‌شود و در گام‌های زمانی دیگر رسوبات فرسایش می‌یابند تا اینکه سد گسیخته شود.^[۹]

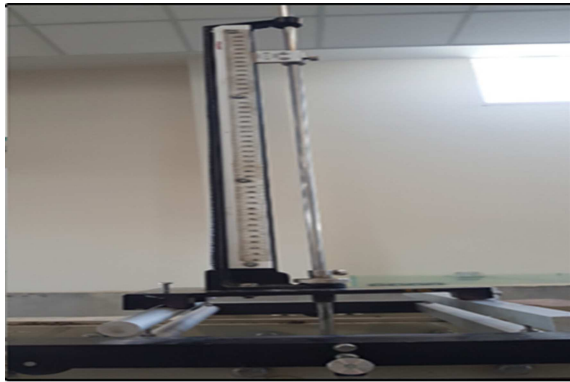
در مطالعات دیگری (۲۰۱۳) شکست خاکریزهای غیرچسبنده با قطر ذرات متوسط ۰٫۶۲، ۰٫۴ و ۰٫۳۳ میلی‌متر ناشی از عبور آب از روی سازه در قوس ۱۸۰ درجه بررسی شد و نتایج نشان داد که تراز آب در دو طرف خاکریز دبی جریان و ویژگی‌های مصالح خاکریز اهمیت بالایی در مکانیزم شکست دارند.^[۱۰] شکست سدهای سنگریزه‌ی ناشی از عبور آب از روی سازه، توسط مدل‌های آزمایشگاهی و عددی مطالعه شد و نتایج به دست آمده با استفاده از مدل دینامیک سیالات برای شبیه‌سازی سطح آزاد و با استفاده از روش عددی، مشکلات جریان و محاسبات مربوط به سد و تغییر شکل آن واکاوی شد.^[۱۱] نتایج بررسی اثر ویژگی‌های خاک در 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 رابطه‌ی ۱ برای برآورد دبی عبوری از شکاف پیشنهاد شد.^[۱۲]

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

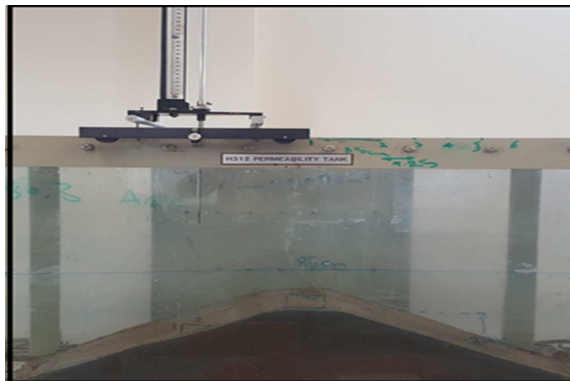
که در آن Q_b دبی شکاف، Q_{in} دبی ورودی، A_s مساحت سطح آب پشت خاکریز و ΔH تغییرات تراز سطح آب و Δt بازه‌ی زمانی است.

در مطالعه‌ی دیگری، خصوصیات شکست خاکریز برای ۴ نمونه خاک با قطر متوسط ذرات ۰٫۳۲۷، ۰٫۲۷۸، ۰٫۸۳ و ۰٫۴۹ میلی‌متر آزمایش شد و نتایج نشان داد که اندازه‌ی دانه‌ها، دبی شکست و زمان شکست از تأثیرگذارترین عوامل در تخریب سازه هستند.^[۱۳]

همچنین در سال ۲۰۱۰، شکست خاکریزهای محافظ رودخانه و ساخته شده با مصالح چسبنده ناشی از عبور آب سرریز شده بررسی شد و نتایج نشان داد که مکانیزم شکست خاکریز می‌تواند به صورت مرحله‌ی در شیب جانبی تقسیم شود، به گونه‌ی که ابتدا ریزش تاج سد (هدکات) رخ می‌دهد و به سمت عقب حرکت می‌کند و در مرحله‌ی بعد عرض شکاف ایجاد شده گسترش می‌یابد. براساس مرور مطالعات پیشین، عمدتاً مکانیزم شکست به صورت کیفی در پژوهش‌های انجام شده بررسی شده و بررسی‌های دقیقی در زمینه‌ی استخراج پارامترهای ابعادی انجام نشده است.^[۱۴]



شکل ۱. تجهیزات اندازه‌گیری پروفیل آب‌شستگی.



شکل ۲. فلوم آزمایشگاهی.

متر لیزری برداشت شد. در شکل ۱ و ۲ به ترتیب نمایی از تجهیزات اندازه‌گیری، مدل ساخته شده‌ی سد خاکی و تجهیزات اندازه‌گیری مشاهده می‌شود.

۱.۳. آزمایش‌های تراکم خاک

برای محاسبه‌ی وزن مخصوص بیشینه در رطوبت بهینه‌ی خاک‌های مورد استفاده در مدل‌های سه‌گانه، از آزمایش تراکم استاندارد (پروکتور) استفاده شده است. با مشخص بودن ابعاد سد خاکی و نیز معلوم بودن وزن مخصوص بیشینه، وزن خاک لازم برای تولید مدل سد خاکی با ابعاد موردنظر تعیین شد. چنانچه وزن خاک به‌دست آمده در همان ابعاد معلوم شده از قبل متراکم شود، می‌توان نتیجه گرفت تراکم خاک مدل ساخته شده با نمونه‌ی آزمایش پروکتور مشابه است. مقاومت برشی خاک‌های نمونه نیز توسط دستگاه برش مستقیم برای نمونه‌هایی با چسبندگی کم و در مورد خاک‌های چسبنده توسط دستگاه تک‌محوری آزمایش شد (شکل ۳). بخش‌های مختلف دستگاه برش مستقیم عبارت‌اند از: a: محل قرارگیری خاک در دستگاه برش مستقیم، b: رینگ اندازه‌گیری تنش برشی، c: اهرم فشار قائم، d: موتور اعمال تنش، e: اندازه‌گیری کرنش خطی.

• مدل اول: سد خاکی همگن ساخته شده از خاک غیرچسبنده با تراکم نسبی بالا که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۴ مشاهده می‌شود و مشخصات خاک مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. مدل اول، در دو شیب ۱:۱ و ۲:۱ ساخته شده است. در مدل اول، شیب ۱:۱، طول سد برابر با ۴۵ متر و ارتفاع آن ۲ متر است و همچنین عرضی برابر با فلوم آزمایشگاهی، ۱۷۵ متر دارد. همچنین مدل دوم، شیب ۱:۲ دارد، و با همان نوع خاک و با ارتفاع ۲ متر، طول در پی برابر

جدول ۱. وضعیت خاک و ابعاد مدل‌ها.

نمادها	قطر متوسط (میلی‌متر)	درصد تراکم	چسبندگی کیلونیوتن بر مترمربع	وزن مخصوص
۱M (۱.۱)	۱.۰۵	٪۹۵	۰	۱۹۱۰
۱M (۱.۲)	۱.۰۵	٪۹۵	۰	۱۹۱۰
۲M (۱.۱)	۰.۷	٪۹۲	۹۳.۶	۲۲۵۰
۲M (۱.۲)	۰.۷	٪۹۱	۹۳.۶	۲۲۵۰
۳M (۱.۱)	۰.۵۱	٪۹۳	۸۴.۴	۲۰۱۰
۳M (۱.۲)	۰.۵۱	٪۹۵	۸۴.۴	۲۰۱۰
ابعاد مدل‌ها ارتفاع (cm)	طول (cm)	شیب دامنه‌ی بالا	شیب دامنه‌ی پایین	
۱M (۱.۱)	۲۰	۴۵	(۱.۱)	(۱.۱)
۱M (۱.۲)	۲۰	۸۰	(۱.۲)	(۱.۲)
۲M (۱.۱)	۲۰	۴۵	(۱.۱)	(۱.۱)
۲M (۱.۲)	۲۰	۸۰	(۱.۲)	(۱.۲)
۳M (۱.۱)	۲۰	۴۵	(۱.۱)	(۱.۱)
۳M (۱.۲)	۲۰	۸۰	(۱.۲)	(۱.۲)

متغیرهای وابسته را می‌توان براساس شرایط هندسی و هیدرولیکی تعریف کرد. رابطه‌ی ۴، متغیرهای هندسی و رابطه‌ی ۵، متغیرهای هیدرولیکی را نشان می‌دهند. رابطه‌ی ۵ و ۶ به ترتیب، تراکم نسبی خاک و تنش برشی خاک را نشان می‌دهد که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

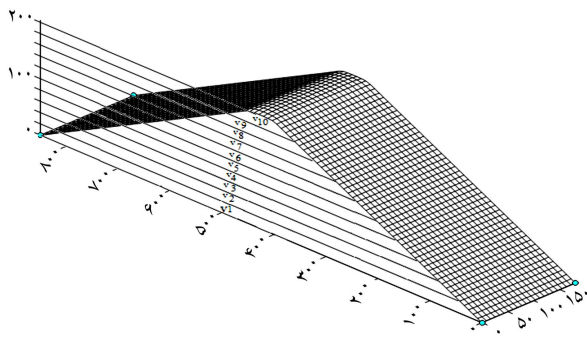
$$R(\%) = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d \max}} \times 100 = \frac{W_s}{\frac{V}{V}} = \frac{W_s}{W_t} \times 100 \quad (5)$$

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad \text{رابطه‌ی موهر - کلمب} \quad (6)$$

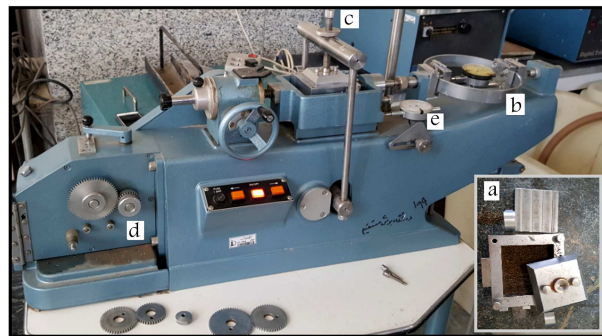
لازم به توضیح است که در روابط بی‌بعدی که در آن‌ها q_u وجود دارد، برای خاک‌های چسبنده از چسبندگی خاک C استفاده می‌شود. در خاک‌های غیرچسبنده نیز می‌توان از مدول کشسانی خاک (E) استفاده کرد. برای استخراج مدول کشسانی خاک با توجه به مقدار D_r و نوع دانه‌بندی خاک، می‌توان از جدول‌های استاندارد ژئوتکنیکی استفاده کرد. در جدول ۱، وضعیت خاک مورد استفاده در مدل‌ها و ابعاد آن‌ها معرفی شده است.

۳. مواد و روش‌ها

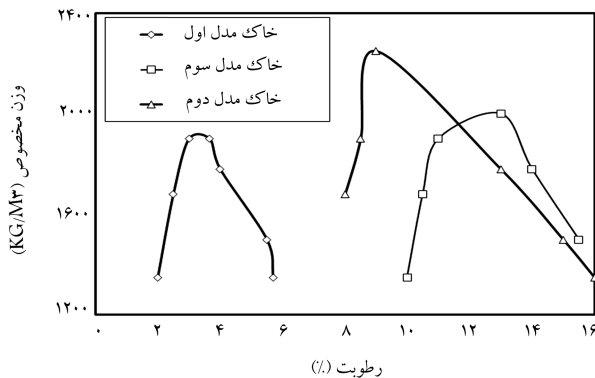
در مدل‌سازی سدهای خاکی، معمولاً طول سازه نقشی در روند پژوهش ندارد و لذا آزمایش‌ها در طول واحد یا در موارد زیادی در طول‌های کمتر صورت می‌گیرد. بر این اساس، برای ساخت مدل سد خاکی در پژوهش حاضر از مخزن استاندارد که بدین منظور ساخته شده و ابعادی برابر: ۲ متر طول، ۱ متر ارتفاع و عرض ۱۷۵ متر دارد، استفاده شده است (شکل ۱). برای ثبت داده‌های آب‌شستگی در بدنه‌ی سد خاکی در هنگام روگذری آب و برای افزایش دقت اندازه‌گیری از دو سیستم پوینت گیج و دیجیتال (متر لیزری) که هر دو دقت ± 1 میلی‌متر دارند، استفاده شده است. برای برداشت پروفیل آب‌شستگی، ابتدا در طول سد نقاطی مشخص شد و در فواصل زمانی صفر، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۲۴۰ و ۴۸۰ ثانیه از ابتدای شروع آب‌شستگی، عمق حفره نسبت به دامنه‌ی پایین‌دست با استفاده از پوینت گیج و



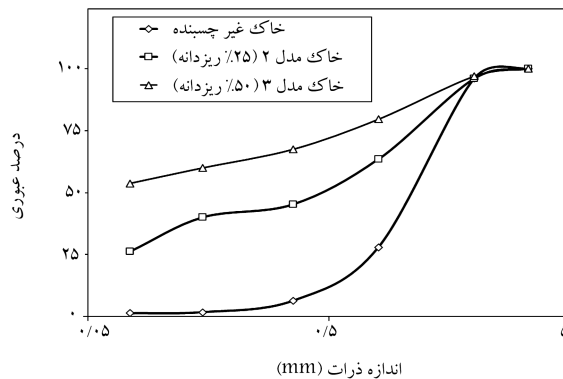
شکل ۵. لایه‌بندی سد برای عملیات تراکم.



شکل ۳. دستگاه برش مستقیم برای خاک غیرچسبیده با کنترل کرنش.



شکل ۶. تعیین رطوبت بهینه و جرم مخصوص بیشینه برای مدل‌های اول تا سوم.



شکل ۴. دانه‌بندی نمونه خاک‌های استفاده شده در مدل‌های اول تا سوم (قسمت درشت‌دانه).



شکل ۷. محاسبه زاویه ایستایی خاک.

۱.۴. تعیین زاویه ایستایی خاک

برای مدل‌های اول تا سوم، زاویه ایستایی خاک به روش نشان داده شده در شکل ۷ برآورد شده است. مقادیر مذکور برای خاک نمونه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۱۷، ۲۳ و ۱۴ درجه است.

۲.۴. تعیین مقاومت برشی و چسبندگی نمونه‌ها

برای تعیین مقاومت برشی ۳ نمونه خاک از دستگاه‌های برش مستقیم و تک‌محوری استفاده شد. خاک نمونه‌ی اول با دستگاه برش مستقیم و ۲ نمونه‌ی دیگر با دستگاه تک‌محوری آزمایش شدند. نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. شکل ۸، دستگاه تک‌محوری را نشان می‌دهد.

همچنین اجزاء دستگاه برش تک‌محوری با توجه به شکل ۸ به این صورت

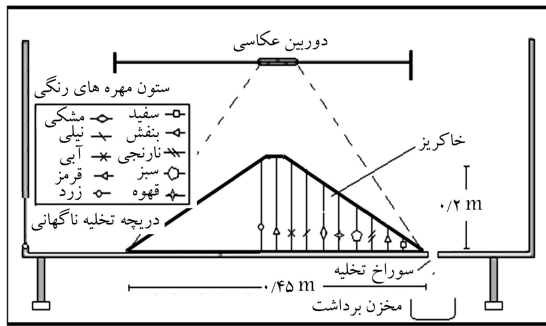
۰/۸۵ متر، طول در تاج ۰/۵ متر و عرضی برابر با عرض فلوم آزمایشگاهی، ۰/۱۷۵ متر ساخته شده است.

• مدل دوم: مدل دوم همانند مدل اول، در شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ ساخته شده است، با این تفاوت که خاک مورد استفاده تغییر پیدا کرده و از خاکی با درصد وزنی ۲۵٪ ریزدانه و ۷۵٪ خاک غیرچسبیده استفاده شده است که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۴ و مشخصات خاک مذکور در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

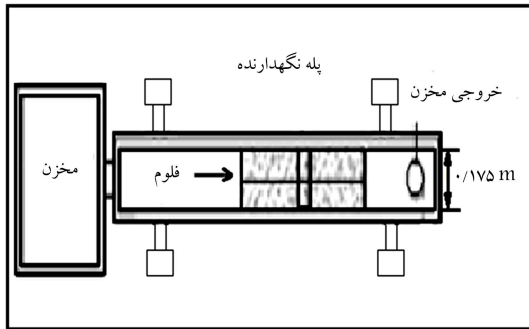
• مدل سوم: مدل سوم همانند مدل اول، در شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ ساخته شده است، با این تفاوت که خاک مورد استفاده تغییر پیدا کرده و از خاکی با درصد وزنی ۵۰٪ ریزدانه و ۵۰٪ خاک غیرچسبیده استفاده شده است که نمودار دانه‌بندی آن در شکل ۴ و مشخصات خاک ذکر شده در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

۴. مراحل انجام آزمایش‌ها

در شکل ۵، وضعیت تراکم نمونه‌ها مشاهده می‌شود که برای همه‌ی آن‌ها، این مقدار از ۹۲٪ بیشتر به دست آمده است (جدول ۱). با توجه به موارد ذکر شده، تمامی نمونه‌ها از لحاظ علم مکانیک خاک در بازه‌ی خاک‌های بسیار متراکم قرار دارند. آزمایش تراکم نسبی: تراکم نسبی مدل سد ساخته شده براساس آزمایش‌های پروکتور بر روی نمونه‌های خاک انتخابی تعیین و منحنی تراکم آن‌ها در شکل ۶ ترسیم شده است. با توجه به وزن مخصوص خاک و رطوبت بهینه و حجم سد، مدل مذکور با تراکم نسبی موردنظر (رابطه‌ی ۵) ساخته شد.

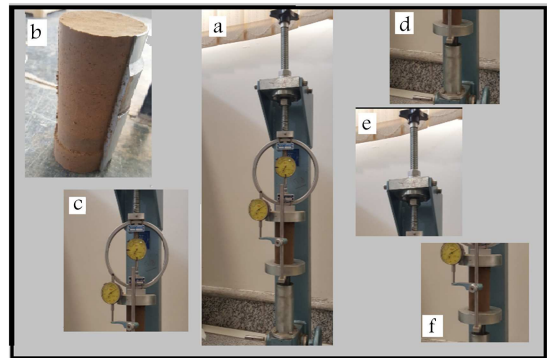


الف) وضعیت قرارگیری دوربین؛



ب) موقعیت خاکریز و فلوم.

شکل ۹. فلوم آزمایشگاهی.



شکل ۸. دستگاه برش تک محوری.

جدول ۲. فاصله‌ی نقاط برداشتی پروفیل آب‌شستگی از پاشنه‌ی سد.

نقاط	فاصله از پاشنه‌ی مدل‌های با شیب	
	(۱:۱)	(۱:۲)
۱	۳۰	۱۰۰
۲	۸۰	۱۵۰
۳	۱۳۰	۲۰۰
۴	۱۸۰	۲۵۰
۵	۲۳۰	۳۰۰
۶	۲۸۰	۳۵۰
۷	۳۳۰	۴۰۰
۸	۳۸۰	۴۵۰
۹	۴۳۰	۵۰۰
۱۰	۴۸۰	۵۵۰
۱۱		۶۰۰
۱۲		۶۵۰
۱۳		۷۰۰
۱۴		۷۵۰
۱۵		۸۰۰
۱۶		۸۵۰

برداشت داده‌های پروفیل آب‌شستگی در بدنه‌ی سد خاکی بدین صورت است که در هنگام شروع آب‌گذری (گذر آب از تاج و سرازیر شدن در شیب پایین دست سد) زمان‌سنج شروع به محاسبه‌ی زمان می‌کند و با رسیدن به زمان ۳۰ ثانیه، آب در مخزن بالادست که عامل روگذری است با باز کردن دریچه‌ی تخلیه‌ی ناگهانی (مشخص شده در شکل ۹ الف)، به صورت ناگهانی قطع می‌شود. با قرار دادن متر لیزری در نقاط مورد نظر، پروفیل آب‌شستگی برداشت می‌شود. در جدول ۲، این نقاط با توجه به فاصله از پاشنه‌ی سد (مبدأ مختصات) مشخص شده‌اند. با برداشت پروفیل نقاط در زمان ۳۰ ثانیه، دوباره دریچه‌ی تخلیه‌ی ناگهانی بسته می‌شود و دبی پایه، به مخزن وارد می‌شود. با پر شدن مخزن و به وجود آمدن جریان روگذری مجدد (رسیدن آب به پنجه‌ی سد) گام زمانی بعدی با استفاده از زمان‌سنج محاسبه می‌شود. در زمان قطع جریان با استفاده از حرکت دادن متر لیزری در ریل تعبیه شده در بالای فلوم، ارتفاع نقاط نسبت به کف کانال از روی صفحه‌ی نمایشگر متر لیزری به صورت چشمی قرائت می‌شود. این روند برای زمان‌های بعدی تا خرابی کامل سد در گام‌های زمانی (۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۴۰، ۳۰۰، ۴۸۰، ۷۲۰) صورت گرفته است.

همچنین برای مقایسه‌ی روش ذکر شده برای برداشت پروفیل آب‌شستگی با امکانات موجود، روش دیگری نیز استفاده شده که در اینجا به آن اشاره شده است: برای حصول اطمینان از صحت روند آزمایش‌ها، همان‌طور که در شکل ۹ الف مشخص شده است، تعدادی ستون با دانه‌های رنگی در پایین دست و بالای تاج در بدنه‌ی مدل اول شیب (۱:۱) کارگذاری شده است. همچنین تعداد ۱۰ ستون در مرکز قرار داده شده است. مقاطع با شماره‌های ۱ الی ۱۰ و هر مقطع با یک رنگ و با در نظر گرفتن فاصله از پنجه، جانمایی شده‌اند. هنگامی که پروفیل آب‌شستگی به ستون‌های رنگی می‌رسد، تعدادی از دانه‌های رنگی را با خود شسته و در نهایت با استفاده از مخازنی در بازه‌های زمانی مختلف در پایین دست بدنه‌ی مدل‌ها، نقاط رنگی مذکور

است: a: شمای کلی دستگاه برش تک محوری، b: استوانه‌ی آماده‌سازی نمونه‌های خاک، c: رینگ فلزی برای محاسبه‌ی تنش، d: جک بالابرنده‌ی نمونه، e: دستگیره‌ی تنظیم رینگ تنش، f: محل قرارگیری نمونه‌ی خاک در دستگاه.

۳.۴. برداشت پروفیل آب‌شستگی

برای برداشت پروفیل آب‌شستگی از تعدادی نقطه در طول بدنه‌ی مدل‌های آزمایشگاهی از دامنه‌ی بالادست به سمت شیب پایین دست استفاده شده است. موقعیت نقاط مذکور در جهت طول سد از پاشنه‌ی سد به سمت پنجه است که فواصل آن‌ها در مدل‌ها برابر با ۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. با جانمایی متر لیزری در نقطه‌ی مورد نظر، ارتفاع پروفیل آب‌شستگی در نقاط مورد نظر برداشت شد و در ادامه، پروفیل آب‌شستگی نقاط ذکر شده ترسیم شده است. برای اندازه‌گیری ارتفاع شکاف آب‌شستگی، از متر لیزری با قابلیت حرکت بر روی ریل نصب شده روی فلوم استفاده شد. در جدول ۲، فاصله‌ی نقاط برداشت شده از پاشنه‌ی سد (مبدأ مختصات) ارائه شده است.

جدول ۳. آزمایش‌ها و موارد برداشتی.

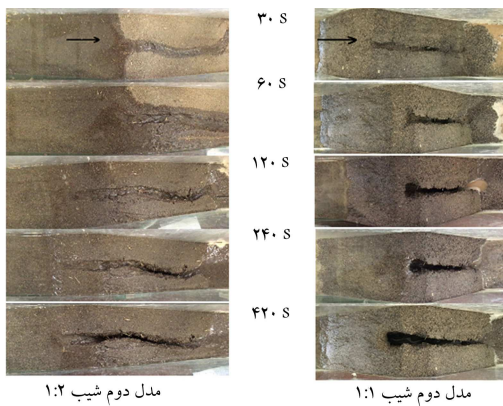
مدل‌ها	دبی (لیتر بر ثانیه)	برداشت		عکس برداری
		پروفیل آب‌شستگی	زاویه اصطکاک	
۱M (۱.۱)	۰/۰۵	✓	✓	
۱M (۱.۲)	۰/۰۵	✓	✓	
۲M (۱.۱)	۰/۰۵	✓	✓	✓
۲M (۱.۲)	۰/۰۵	✓	✓	✓
۳M (۱.۱)	۰/۰۵	✓	✓	✓
۳M (۱.۲)	۰/۰۵	✓	✓	✓

مگاپیکسل نسبت به وضعیت سد نشان داده شده است. بدنه‌ی مدل سد خاکی در لایه‌های ۲ سانتی‌متری متراکم و تا ارتفاع موردنظر ساخته شده است. سپس فیلم ضبط‌شده توسط نرم‌افزار Free Video to JPG Convert به عکس تبدیل و مختصات مربوط به شکاف آب‌شستگی و تراز سطح آب در زمان‌های مختلف استخراج شده است.

۵. نتایج و بحث

چنانکه اشاره شد، هدف پژوهش حاضر بررسی روند شکست سدهای خاکی به صورت آزمایشگاهی است. مجموعه تصاویر برداشت شده در فواصل زمانی مختلف در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲، روند تخریب در مدل‌های انتخابی ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. در مدل ۱، به دلیل غیرچسبندگی بودن خاک، عرض شکاف در شروع عبور جریان از روی خاکریز به صورت یکنواخت بوده است، اما به تدریج با شسته شدن دامنه‌ی بالادست سد، عرض شکاف در مدل‌هایی با شیب ۱:۱ و ۱:۲ افزایش می‌یابد. مدل با شیب ۱:۱، تمرکز جریان را در یک نقطه نشان می‌دهد، در صورتی که این حالت در مدل با شیب ۱:۲ مشاهده نمی‌شود. به عبارتی در شیب اول، توسعه‌ی عمقی آب‌شستگی و در مدل دوم، توسعه‌ی طولی مشاهده می‌شود.

در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، نیز توسعه‌ی زمانی آب‌شستگی برداشتی از مدل اول در شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ ترسیم شده است. از آنجا که در مدل دوم، ۲۵٪ وزن خاک تشکیل‌دهنده‌ی بدنه از نوع ریزدانه است، که موجب افزایش میزان چسبندگی خاک می‌شود، این امر تغییر رفتار سد در مقابل روگذری را در پی خواهد داشت.



شکل ۱۰. تصاویر مراحل زمانی تخریب مدل‌های اول.

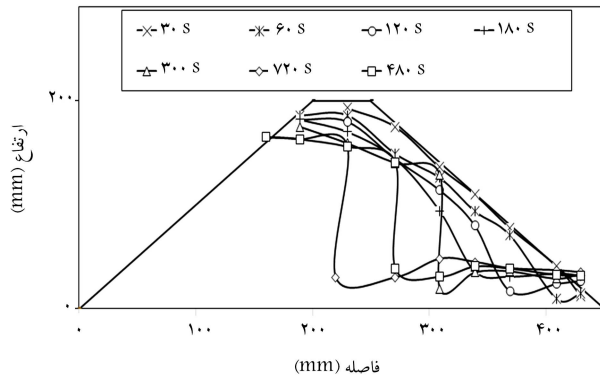
و رسوبات شسته شده جمع‌آوری می‌شوند. با مشخص بودن تعداد دانه‌های رنگی و همچنین مشخص بودن تعداد دانه‌های شسته شده، می‌توان پروفیل آب‌شستگی را در بازه‌های زمانی مختلف ترسیم کرد. برای مثال، اگر ستونی از مهره‌های قرمز رنگ در زیر تاج سد تا کف قرار داده شود، مخازنی کوچکی برای برداشت رسوبات شسته شده و مهره‌های رنگی، در پایین‌دست (سوراخ انتهایی در پایین‌دست پنجه) تعبیه شده است. در زمان ۳۰ ثانیه، مخزن برداشتی تغییر داده می‌شود و با مخزن جدید جایگزین می‌شود. این پروسه در طول زمان آزمایش در گام‌های مختلف زمانی مخزن‌ها تغییر داده می‌شود. بعد از آزمایش در هر مخزن، تعدادی دانه‌ی رنگی قرار می‌گیرد، که با شمارش آن‌ها (مثلاً ۱۵ زرد، ۸ قرمز و ... و قطر تقریبی ۲ میلی‌متری) در هر زمان می‌توان پروفیل را در طول زمان ترسیم کرد. باید به این نکته توجه داشت که زمان شسته شدن دانه‌ها تا رسیدن به مخزن به علت سیلابی بودن جریان ناچیز و قابل اغماض است. روش آزمایش ذکر شده با شکل استفاده از دریچه‌ی تخلیه‌ی ناگهانی در پروفیل‌های مختلف مقایسه شد که با هم پوشانی مناسب داده‌های مذکور، آزمایش‌ها با استفاده از دریچه‌ی تخلیه‌ی ناگهانی پیگیری شدند. در جدول ۳، سری آزمایش‌ها و موارد برداشتی مشخص شده است. همچنین ابعاد مدل‌ها، در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

۴.۴. آزمایش‌های مدل‌ها

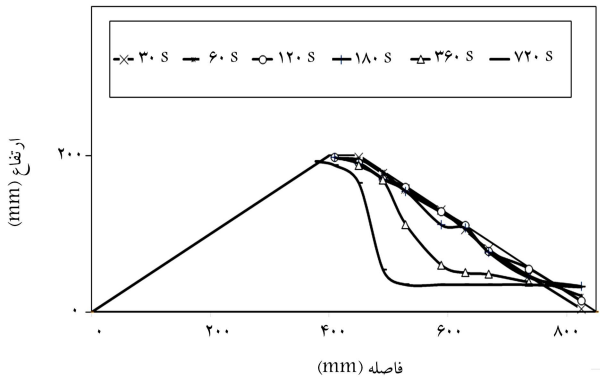
با توجه به اینکه سازه‌ی سد، عمود بر مسیر رودخانه ساخته می‌شود، جهت انجام آزمایش و ایجاد شرایط طبیعی در آزمایشگاه، مدل‌های فیزیکی و هیدرولیکی دانشگاه فردوسی مشهد، مدل‌ها در فلووم معرفی و ساخته شده‌اند. دبی ثابت ۰/۰۵ لیتر بر ثانیه در مخزن سد وارد و در بازه‌های زمانی مختلف، پروفیل آب‌شستگی برداشت شده است. در شکل ۹ الف، موقعیت قرارگیری دوربین در بین فیلم‌برداری با کیفیت ۱۴

جدول ۴. ابعاد مدل‌های آزمایشگاهی.

مدل‌ها	طول پی	ارتفاع سد	طول تاج عرض تاج شیب بدنه
۱M (۱.۱)	۴۵۰	۲۰۰	۱۷۵
۱M (۱.۲)	۸۵۰	۲۰۰	۱۷۵
۲M (۱.۱)	۴۵۰	۲۰۰	۱۷۵
۲M (۱.۲)	۸۵۰	۲۰۰	۱۷۵
۳M (۱.۱)	۴۵۰	۲۰۰	۱۷۵
۳M (۱.۲)	۸۵۰	۲۰۰	۱۷۵



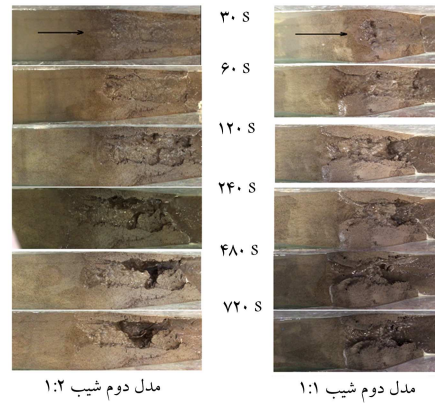
شکل ۱۵. مراحل توسعه‌ی زمانی پروفیل آب‌شستگی مدل دوم با شیب ۱:۱.



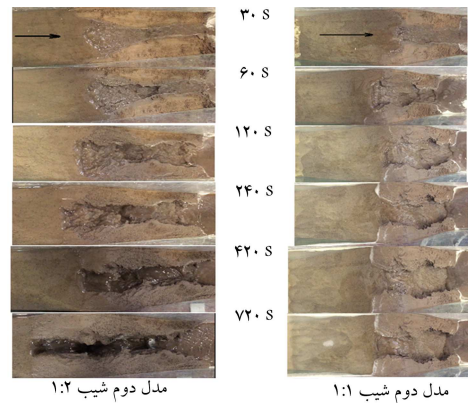
شکل ۱۶. مراحل توسعه‌ی زمانی پروفیل آب‌شستگی مدل دوم با شیب ۱:۲.

چنانچه مشاهده می‌شود، عرض شکاف در طول زمان تقریباً در دامنه‌ی پایین دست سد ثابت مانده است که به علت چسبندگی مناسب خاک و افزایش مقاومت برشی آن در مقابل شسته شدن است. به تدریج شکاف ابتدایی به صورت یک تنداب به سمت پنجه‌ی سد تشکیل می‌شود و پرش هیدرولیکی حاصل به علت فوق بحرانی شدن جریان در پنجه‌ی سد باعث به وجود آمدن گودال آب‌شستگی در پایین دست سد می‌شود که با گذشت زمان به سمت دیواره‌ی بالادست سد پیشروی می‌کند. در نهایت، آبشاری به ارتفاع تقریبی سد تشکیل می‌شود که این مورد در مدل دوم با شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ نیز مشاهده می‌شود. پروفیل آب‌شستگی حاصل از خرابی هیدرولیکی به سمت دیواره‌ی بالادست پیشروی می‌کند و در نهایت، با فرسایش زیر تاج سد، موجب خرابی ناگهانی ۴۰٪ از ارتفاع سد خواهد شد و در پی آن موج سیلابی به سمت پایین دست جاری می‌شود (شکل‌های ۱۵ و ۱۶).

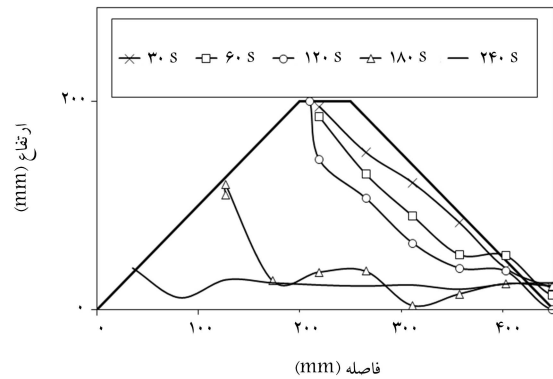
در مدل سوم با افزایش میزان خاک ریزدانه در سازند سد، به میزان ۵٪ چسبندگی خاک نسبت به مدل دوم کاهش پیدا کرده است (جدول ۱). ولی با کاهش زاویه‌ی ایستایی خاک تا ۱۴ درجه، موجب کاهش تنش نسبت به مدل دوم شده است. این امر سبب کاهش تنش بحرانی خاک می‌شود، و در نهایت در هنگام روگذری آب از تاج سد در شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ باعث جدا شدن موضعی خاک در دیواره‌ی پایین دست سد در طول زمان می‌شود. نهایتاً آب‌شستگی‌های موضعی مذکور به سمت پنجه و شیب بالادست پیدا می‌کند و به آبشارهای کوچکی تبدیل می‌شوند (شکل‌های ۱۷ و ۱۸) و به صورت پلکانی به سمت بالادست و مخزن ادامه پیدا خواهند کرد. این امر موجب شسته شدن شیب بالادست با عرض بیشتری می‌شود و با ورود آب در شکاف، با هد ارتفاعی و سرعت بیشتری باعث خرابی دیواره‌ها در شکاف شده است. این تذکر لازم است که در شیب ۱:۱، پیشروی



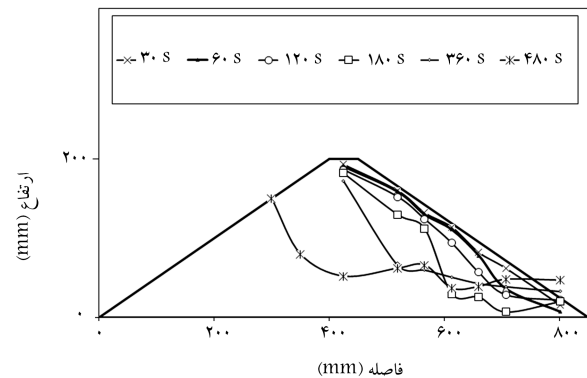
شکل ۱۱. تصاویر مراحل زمانی تخریب مدل‌های دوم.



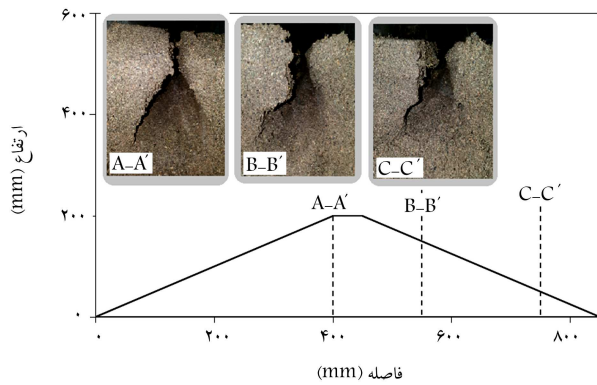
شکل ۱۲. تصاویر مراحل زمانی تخریب مدل‌های سوم.



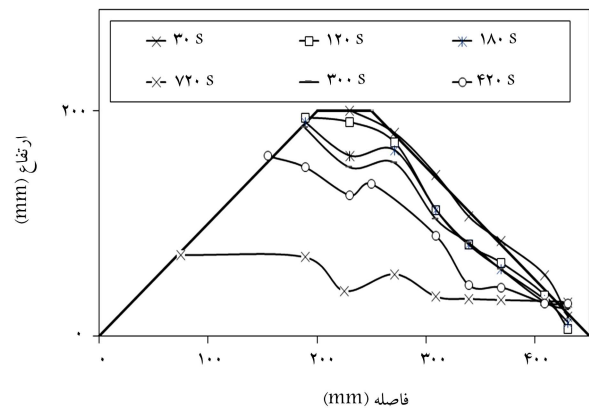
شکل ۱۳. مراحل توسعه‌ی زمانی پروفیل آب‌شستگی مدل اول با شیب ۱:۱.



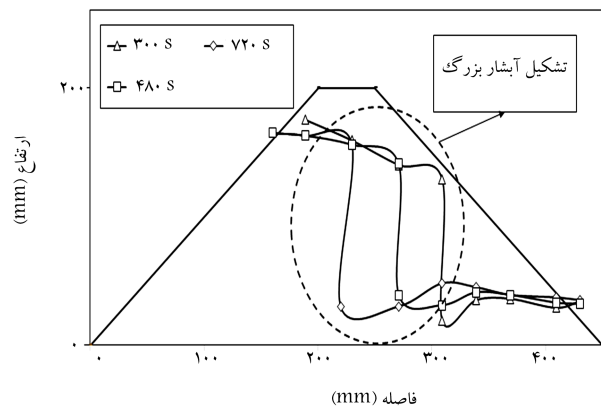
شکل ۱۴. مراحل توسعه‌ی زمانی پروفیل آب‌شستگی مدل اول با شیب ۱:۲.



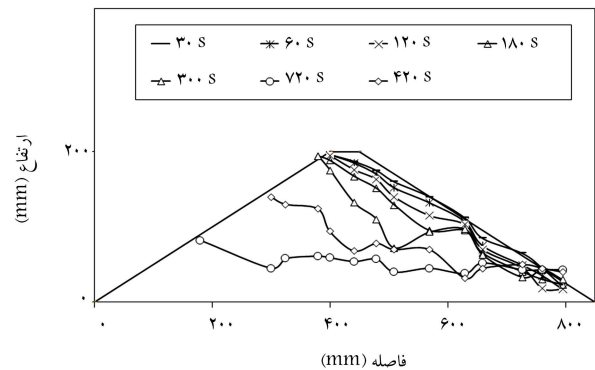
شکل ۱۹. مقطع عرض شکاف در مدل اول با شکاف ۱:۲ در شکاف حاصل از آبشستگی.



شکل ۱۷. مراحل توسعه‌ی زمانی پروفیل آبشستگی مدل سوم با شیب ۱:۱.



شکل ۲۰. تشکیل آبشارهای بزرگ در مدل دوم با شیب ۱:۱.



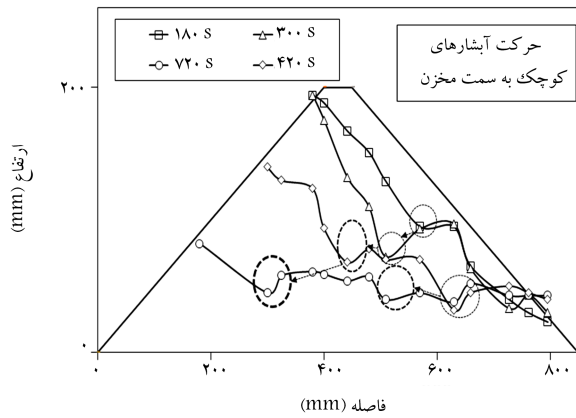
شکل ۱۸. مراحل توسعه‌ی زمانی پروفیل آبشستگی مدل سوم با شیب ۱:۲.

ادامه‌ی روگذری آب و با به هم پیوستن آبشستگی‌های موضعی مذکور، گودالی در شیب پایین دست در هر دو مدل تشکیل می‌شود. این تذکر لازم است که در مدل با شیب ۱:۱، این روند به علت تأثیر شیب با سرعت بیشتری صورت خواهد گرفت. بدین مفهوم که در شیب بیشتر، جریان آب روی دیواره‌ی پایین دست، قدرت بیشتری دارد. این قدرت در هنگام استهلاک در دیواره‌ی پایین دست، باعث شسته شدن دیواره می‌شود و می‌توان رابطه‌ی مستقیم بین میزان انرژی آب در دیواره‌ی پایین دست سد با آبشستگی ایجاد شده در خاک را مطالعه کرد. آبشستگی مذکور با مقاومت برشی نمونه‌ها، رابطه‌ی عکس خواهد داشت. نهایتاً گودال‌های کوچک ذکر شده در مدل دوم به آبشار بزرگی در دیواره‌ی پایین دست سد تبدیل می‌شوند. زیرا تنش برشی بحرانی در این نوع خاک بالاست. در روی تاج سد، سرعت پایین آب، امکان فرسایش را کاهش می‌دهد، اما افزایش سرعت در انتهای شیب پایین دست، روند آبشستگی را در نقطه‌ی آغاز می‌کند و با مستهلک شدن هر چه بیشتر انرژی آب در این عرض، باعث پیشروی عرض به سمت دیواره‌ی بالادست می‌شود و در آخر گودال ایجاد شده، به آبشار بزرگی تبدیل می‌شود. پروفیل آبشار ذکر شده در شکل‌های ۲۰ و ۲۱، کاملاً مشهود است. با پیشروی آبشار ایجاد شده در بدنه‌ی سد به سمت مخزن، کل سد به صورت ناگهانی و به دلیل فشار آب در مخزن فرو می‌ریزد که مرحله‌ی تخریب تکمیل خواهد شد.

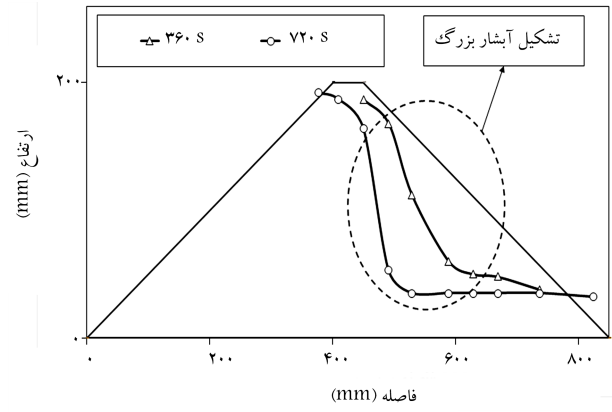
در مدل سوم، با مخلوط کردن خاک ریزدانه و درشت دانه، هرکدام به میزان ۵۰٪، روند آزمایش‌ها پیگیری شد. این امر موجب شد که در رابطه‌ی موهر-کلمب (رابطه‌ی ۸)، با افزایش میزان خاک ریزدانه، میزان چسبندگی خاک افزایش پیدا

آبشستگی با سرعت بیشتری صورت می‌گیرد و شیب آبشستگی نسبت به شیب ۱:۲ بیشتر می‌شود.

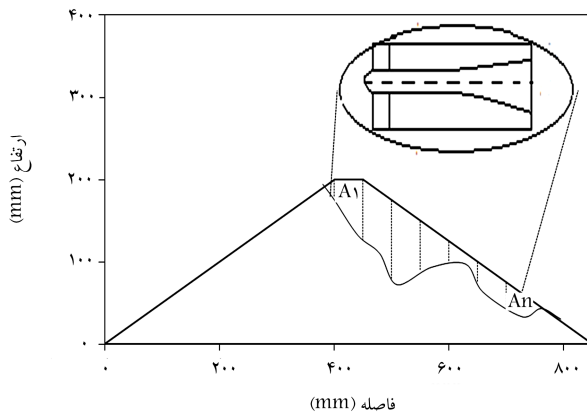
با توجه به شکل‌های ۱۳ الی ۱۸، پروفیل آبشستگی در بدنه‌ی سدهای خاکی برای مدل‌های اول تا سوم را می‌توان ارزیابی کرد. در مدل اول، به دلیل عدم وجود چسبندگی خاک، عامل مقاومت در برابر آبشستگی تنش قائم خاک است. پروفیل آبشستگی در مدل اول نشان می‌دهد که روگذری آب در ابتدا از شیب پایین دست سد خاکی شروع و با تشکیل تنداب در محل مذکور، جریان فوق بحرانی می‌شود و منجر به ایجاد پرش هیدرولیکی می‌شود. تولید پرش هیدرولیکی و همچنین استهلاک انرژی آب باعث به وجود آمدن گودالی با عرض کم می‌شود، که این گودال به سمت بالادست ادامه پیدا می‌کند. در ادامه، با تداوم عملکرد پرش، موقعیت آن در زمان خرابی به زیر تاج سد کشیده می‌شود و باعث عمیق‌تر شدن دهانه‌ی ورودی شکاف و خرابی آن می‌شود. در پی این وضعیت، ورود آب به داخل شکاف با سرعت و دبی انجام می‌گیرد و مقطع عرضی شکاف در زیر تاج را از حالت شکاف باریک به حالت دالانی شکل تبدیل می‌کند. فرایند مذکور، شسته شدن دیواره‌ها را به دنبال دارد و شرایط وارزیه‌ی مصالح بستر، ایجاد و به طور کلی سد تخریب می‌شود (شکل ۱۹). مدل دوم، ساخته شده از ۲۵٪ ریزدانه و ۷۵٪ خاک غیرچسبنده، در ابتدای آزمایش در شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ خاک سد در حالت اشباع مقاومت بیشتری در برابر آبشستگی نشان می‌دهد و روند خرابی دیواره‌ی پایین دست سد نسبت به مدل اول با عرض بیشتر صورت می‌گیرد. پس از روگذری آب از بدنه‌ی سد، آبشستگی در دیواره‌ی پایین دست به صورت موضعی انجام می‌پذیرد. این آبشستگی بیشتر به صورت عرضی عمل می‌کند و موجب شسته شدن دیواره‌ی پایین دست می‌شود. با



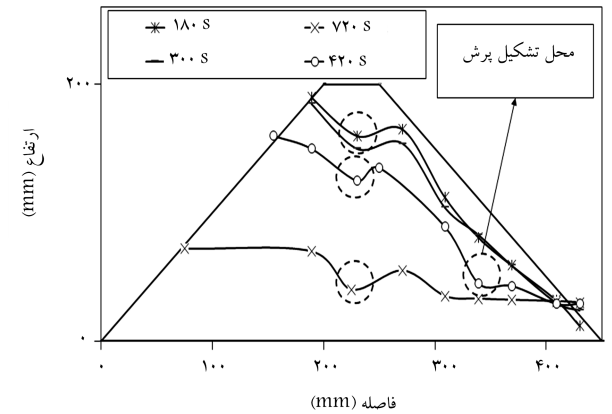
شکل ۲۳. تشکیل آبشارهای کوچک در امتداد شکاف مدل سوم با شیب ۱:۲ و ایجاد پرش‌های هیدرولیکی متداول.



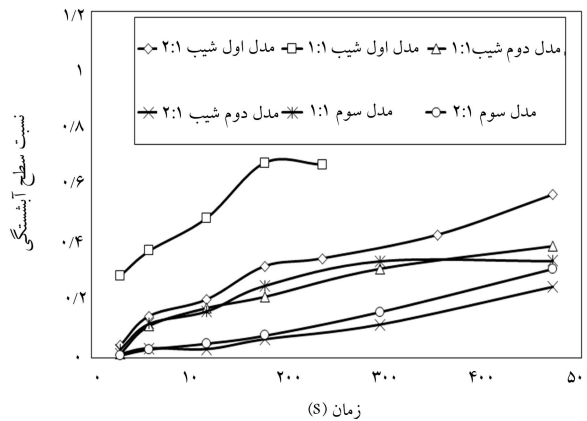
شکل ۲۱. تشکیل آبشارهای بزرگ در مدل دوم با شیب ۱:۲.



شکل ۲۴. تعیین نمایه‌ی نسبت آب‌شستگی (S).



شکل ۲۲. تشکیل آبشارهای کوچک در امتداد شکاف مدل سوم با شیب ۱:۱ و ایجاد پرش‌های هیدرولیکی متداول.



شکل ۲۵. نمایه‌ی S برای مدل‌های مختلف و شیب‌های متغیر.

هر زمان (A_i) به مساحت سطح نهایی آب‌شستگی $(A_{۱۳۳۴})$ با نمایه‌ی S معرفی و برای مقایسه بین نمونه‌ها و تأثیر شیب دامنه‌ی پایین دست در نظر گرفته شده است. با به دست آوردن نمایه‌ی آب‌شستگی در خط‌العقر شکاف، آب‌شستگی حاصل از روگذری را می‌توان مطابق شکل ۲۵ معرفی کرد. در شکل مذکور، تأثیر شیب در نمایه‌ی S برای مدل‌هایی با شیب‌های مختلف مشاهده می‌شود.

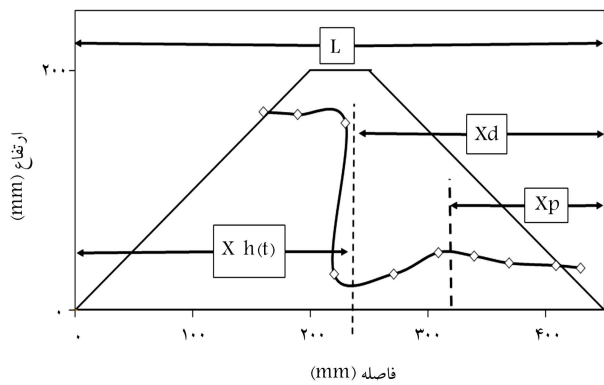
شکل ۲۵ نشان می‌دهد که در مدل‌های مختلف و با گذشت زمان، نسبت آب‌شستگی (S) افزایش می‌یابد و تداوم آن تا تخریب سد خواهد بود. در هنگام

کند، ولی باعث کاهش زاویه‌ی ایستایی خاک به میزان ۱۴ درجه شد. کاهش ایجاد شده در مقاومت برشی خاک تأثیر فراوانی دارد. این‌گونه برداشت می‌شود که با سرریز شدن آب در مدل سوم در شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ با کم بودن مقاومت برشی نسبت به مدل دوم، آب‌شستگی‌های موضعی در دیواره‌ی پایین دست تشکیل شده است. آب‌شستگی‌های ایجاد شده در شیب پایین دست از تاج تا پنجه‌ی سد ادامه پیدا می‌کند. در نهایت با پیگیری روند آب‌شستگی، آبشارهایی در شیب پایین دست تشکیل می‌شود. آب در ابتدای ورود به داخل شکاف، وارد تندیابی می‌شود و در آخر تنداب، پرش هیدرولیکی به وجود می‌آید، این روند در ۳ تا ۴ مورد در شیب ۱:۲ رؤیت شد. در شیب ۱:۱، تعداد ۲ آبشار تشکیل می‌شود. در نهایت روند آب‌شستگی در مدل ۱:۱ نسبت به مدل ۱:۲ بیشتر قرأت شد. علت این امر، کم بودن فاصله برای استهلاک انرژی آب در دامنه‌ی پایین دست است. در شکل‌های ۲۲ و ۲۳، روند آب‌شستگی در شکاف در زمان‌های مختلف مشخص شده است.

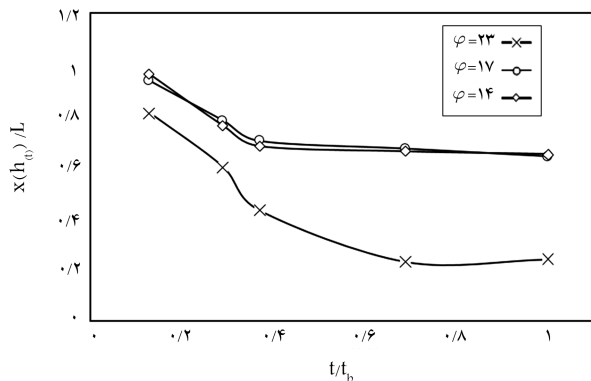
تعریف نمایه‌ی آب‌شستگی (S) : برای مقایسه بین سطوح آب‌شستگی در مدل‌ها، نمایه‌ی آب‌شستگی (S) در طول زمان تعریف شده است. نحوه‌ی محاسبه‌ی نمایه‌ی آب‌شستگی در شکل ۲۴ و رابطه‌ی ۷ ارائه شده است:

$$S = \frac{\sum A_i}{A_{۱۳۳۴}} \quad (۷)$$

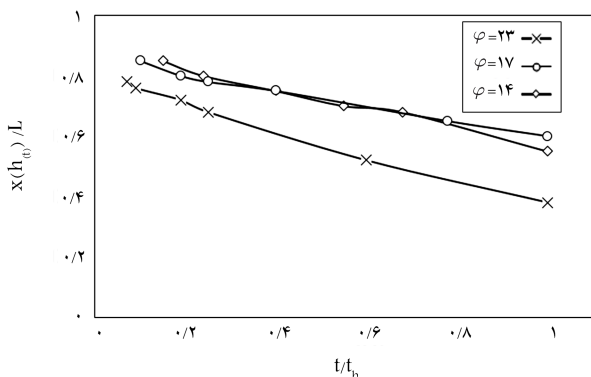
اگر $A - A$ مقطع برش در شکل ۲۴ باشد، نسبت مساحت آب‌شستگی در



شکل ۲۷. موقعیت آبشار.



شکل ۲۸. تأثیر زاویه ایستایی خاک در مدل های با شیب بدنه ی پایین دست ۱:۱.

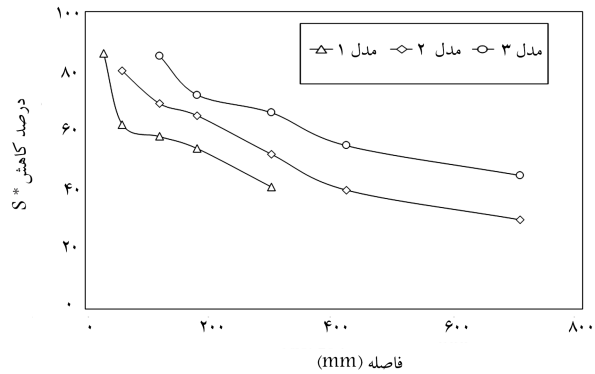


شکل ۲۹. تأثیر زاویه ایستایی خاک در مدل های با شیب بدنه ی پایین دست ۱:۲.

برای تخمین نسبت طول آبشار به روابط تجربی و رگرسیون بین داده های آزمایشگاهی برای سدهای خاکی با خاک قرصه ی غیرچسبنده ارائه شده است:

$$\frac{X_p}{X_d} = (65,4d_{50}) + 0,308 \quad (9)$$

که در آن، X_p فاصله ی نقطه ی تاج انباشت رسوبات شسته شده تا پنجه ی سد و X_d فاصله ی نقطه ی برخورد آبشار با بدنه ی سد تا پنجه ی سد است. با توجه به رابطه ی کولمن برای مدل های غیرچسبنده، این موارد از پروفیل های آبشستگی در زمان خرابی کامل برداشت شده و با مقادیر به دست آمده در جدول ۴ (جدول کولمن) بررسی شده است. این مقادیر در شکل ۳۰ مشاهده می شوند. [۱۶]



شکل ۲۶. نسبت نمایه ی آبشستگی در شیب های ۱:۱ و ۱:۲ در مدل های اول تا سوم.

خراب شدن سد، این نسبت به علت اینکه گودال آبشستگی آن قدر بزرگ شده است که دبی سیلاب حاصل از مخزن را تخلیه کند، تقریباً در مقدار بیشینه ی خود که برابر ۱ است ($S = 1$)، ثابت باقی خواهد ماند.

اگر نمایه ی آبشستگی (S) در خط العقر شکاف با در نظر گرفتن فرضیاتی همچون مساحت قسمت شسته شده، معرف وضعیت تخریب سد در نظر گرفته شود، آنگاه می توان بیان کرد که در مدل های اول تا سوم، تأثیر شیب بسیار اهمیت دارد. بدین صورت که تغییر شیب از ۱:۲ به ۱:۱ می تواند باعث افزایش نسبت آبشستگی شود (شکل ۲۶). مطابق شکل مذکور، در تمامی نمونه ها، ساختن سد با شیب ملایم تر باعث کاهش قابل قبولی در نسبت آبشستگی می شود. درصد کاهش میزان آبشستگی با کاهش شیب از رابطه ی ۸ محاسبه می شود. و در نهایت با ملایم کردن شیب از ۱:۱ به ۱:۲ در مدل اول، زمان خرابی مدل تا ۴۸٪، نسبت آبشستگی را کاهش می دهد. این مقدار برای مدل های دوم و سوم به ترتیب ۳۸٪ و ۲۲٪ خواهد بود و در مجموع می توان بیان کرد ساخت سدهایی با شیب ۱:۲ نسبت به شیب ۱:۱، در هنگام خرابی هیدرولیکی (روگذری آب از تاج سد) هم برای خاک های چسبنده و هم خاک های غیرچسبنده ارجحیت دارد.

$$S^* = \left(1 - \frac{S_{1:2}}{S_{1:1}}\right) \times 100 \quad (8)$$

رابطه ی ۵ نشان داد مکان ایجاد آبشار $\left(\frac{xh(t)}{L}\right)$ تابعی از ϕ و Dr است که مقدار آن در شکل ۲۷ مشاهده می شود. همچنین عامل $\frac{t}{t_b}$ عدد بی بعد تأثیرگذار در پدیده ی مذکور است. اما با ایجاد تراکم نسبی قابل قبول در مدل های اول تا سوم (وزن مخصوص از آزمایش پرکتور) می توان عامل مذکور را ثابت فرض کرد و از اثر آن صرف نظر کرد. این فرض با این استدلال قوت پیدا می کند که در سدهای خاکی تراکم نسبی باید تراکم قابل قبولی داشته باشد، به طوری که در طبقه بندی وضعیت خاک، نمونه ها در دسته بندی خاک های بسیار متراکم قرار گیرند. از آنجا که تراکم خاک مورد استفاده در تمامی مدل ها به روش آزمایشگاهی تعیین شده است، از این رو می توان تراکم نسبی آن ها را تقریباً برابر و از عامل $\frac{t}{t_b}$ در محاسبات چشم پوشی کرد و فقط تأثیر زاویه ی اصطکاک داخلی خاک را در مکان ایجاد پرش در مدل های مختلف بررسی کرد (شکل های ۲۷ الی ۲۹).

۱.۵. مقایسه ی محاسبات طول آبشار با پژوهش کولمن

با توجه به تحقیقات کولمن بر روی روگذری جریان از بدنه ی سدهای خاکی، رابطه ی ۹

بالادست پیشروی می‌کند. همچنین ملایم کردن شیب دیواره، روند شکست سد را در طول زمان افزایش می‌دهد، ولی از نظر عرض گودال آب‌شستگی، تقریباً رفتار دو نمونه یکسان و به صورت عرضی خواهد بود.

۵. در مدل سوم به خاطر چسبندگی کمتر، دیواره‌ی پایین دست در شیب ۱:۲ به صورت آبشارهایی کوچک و متوالی به سمت مخزن تشکیل می‌شود. به دلیل وجود درصد بیشتر خاک ریزدانه، عرض شکاف نسبت به مدل دوم کمتر بوده است، ولی نرخ پیشروی شکاف حاصل از روگذری آب به سمت مخزن با سرعت بیشتری ادامه پیدا خواهد کرد.

۶. با توجه به نمایه‌ی آب‌شستگی هیدرولیکی سدهای خاکی که به عنوان پارامتری برای تأثیر شیب‌دار کردن مدل‌ها معرفی شده است، در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده، ملایم کردن شیب باعث افزایش زمان شکست و همچنین کاهش نقطه‌ی اوج دبی در زمان خرابی سد است.

۷. در پدیده‌ی روگذری آب از بدنه‌ی سدهای خاکی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و همچنین چسبندگی خاک اهمیت فراوانی دارد. با اندازه‌گیری زاویه‌ی اصطکاک داخلی نمونه‌ها و میزان چسبندگی، تأثیر پارامترهای مذکور در ملایم کردن شیب در مدل‌های خاک چسبنده و غیرچسبنده بررسی شد. در خاک‌های چسبنده، عامل تأثیرگذار در موقعیت آبشار تشکیل شده، چسبندگی است ولی در خاک‌های غیرچسبنده، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، اهمیت بیشتری دارد.

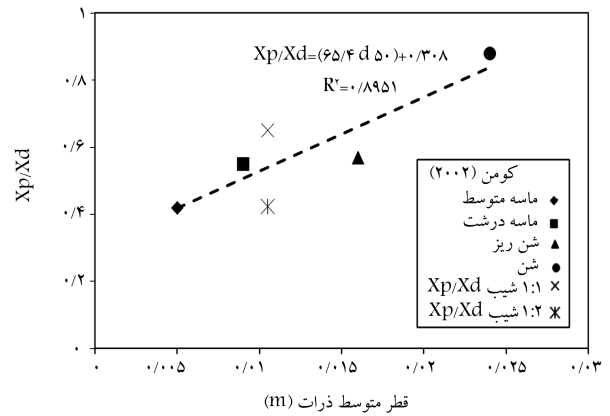
۸. موقعیت تشکیل آبشار در مدل‌هایی با خاک چسبنده نسبت به خاک‌های غیرچسبنده، در فاصله‌ی بیشتر از پاشنه‌ی سد صورت می‌گیرد. هم‌پوشانی دو نمودار با زاویه‌ی ایستایی ۱۷ و ۱۴ درجه در خاک‌های چسبنده نشان داد که موقعیت تشکیل آبشار تا حدودی تأثیرپذیر از تنش مقاوم خاک‌هاست، که رابطه‌ی موهر - کلمب این مهم را تأیید می‌کند. بدین صورت که در خاک‌های چسبنده، زاویه‌ی اصطکاک داخلی ذرات خاک نسبت به ضریب چسبندگی خاک، اهمیت کمتری دارد. ولی در خاک‌های غیرچسبنده، موقعیت تشکیل آبشار به زاویه‌ی اصطکاک داخلی، وابستگی بیشتری دارد. همچنین نمودارهای مذکور بیانگر این موضوع هستند که در زمان خرابی سد، موقعیت تشکیل آبشار در نمونه‌ی اول (غیرچسبنده) زودتر به دامنه‌ی بالادست می‌رسد. در مقایسه بین مدل‌ها، در شیب‌های ۱:۱ با شیب دامنه‌ی پایین دست ۱:۲، این نکته مشهود است که در مدل‌هایی با شیب بیشتر، آبشار تشکیل شده با سرعت بیشتری به سمت مخزن بالادست حرکت می‌کند.

تشکر و قدردانی

با سپاس و تشکر از اعضاء هسته‌ی پژوهشی سازه‌های آبی دانشگاه فردوسی مشهد، که در گردآوری پژوهش حاضر کوشش فراوان کردند.

منابع (References)

1. Bolz, j., *Analysis and Design of Foundations*, Joibar Publication, pp. 168-212-388 (2007).



شکل ۳۰. مقایسه‌ی طول آبشار با روابط تجربی کولمن (۲۰۰۲).

۶. نتیجه‌گیری

براساس آنچه بررسی شد، خلاصه‌ی نتایج را می‌توان به این صورت بیان کرد:

۱. در مدل آب‌شستگی خاک‌های غیرچسبنده، مدل اول آب‌شستگی ابتدا به صورت عمقی و با عرض کم شروع و آبشار کوچکی در پنجه‌ی سد تشکیل شده است که تلفیقی از تنداب و محوطه‌ی پرش هیدرولیکی است و در طی زمان و با عرض کم به دامنه‌ی بالادست نفوذ می‌کند. در این زمان، آب با هد ارتزاعی بیشتری وارد شکاف و در نهایت باعث شسته شدن قسمت پایینی شکاف با عرض بیشتر می‌شود. این مورد برای مدل اول (مدل غیرچسبنده) مشهود است. این روند تا خرابی دیواره‌ها ادامه پیدا می‌کند.
۲. در مدل‌های با خاک‌های غیرچسبنده، تأثیر شیب بدنه‌ی پایین دست سد به این صورت قابل توضیح است که با کاهش شیب، آبشار (تنداب با محوطه‌ی پرش هیدرولیک) با سرعت کمتری به دامنه‌ی بالادست سد می‌رسد؛ لذا در خاک‌های غیرچسبنده، عملاً با ملایم کردن شیب، زمان شکست سد و خرابی افزایش پیدا می‌کند.
۳. در خاک‌های چسبنده (مدل‌های دوم و سوم) در مدل دوم به دلیل بالا بودن چسبندگی، تنش مقاوم خاک طبق رابطه‌ی موهر - کلمب بیشتر خواهد شد. این عامل سبب می‌شود که آب‌شستگی‌های موضعی در نقطه‌ی در پایین دست مدل دوم با شیب‌های ۱:۱ و ۱:۲ به سمت ایجاد آبشار بزرگی (شیب شکن قائم) پیش بروند. این نوع آب‌شستگی ادامه پیدا می‌کند تا در نهایت پایین دست سد فرو بریزد و دبی با نقطه‌ی اوج بیشتری وارد کانال پایین دست شود.
۴. در مدل دوم نشان داده شد که اگر مقاومت فشاری خاک مقدار قابل توجهی باشد، این عامل در خرابی مدل‌هایی با شیب ۱:۱ و ۱:۲ رفتار یکسانی دارد و آبشار تشکیل شده به صورت ارتفاع تقریباً ۷۵٪ ارتفاع سد به سمت مخزن

2. Danka, J. and Zhang, M.L. "Dike failure mechanism and breaching parameters", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 141(9), pp.04015039 (2015).

3. Schmocker, L. and Hager, H.M. "Overtopping and breaching of dike breach profile and breach flow", *River*

- Flow*, **128**(9), pp. 515-522 (2010).
4. Hanson, G.J. and Hunt, S.L. "Lessons learned using laboratory JET method to measure soil erodibility of compacted soils", *Appl. Eng. Agric.*, **23**(3), pp. 305-312 (2015).
 5. Hanson, G.J., Cook, K.R. and Hunt, S.L. "Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments", *Trans. ASAE*, **48**(5), pp. 1783-1794 (2005).
 6. Hanson, G.J., Cook, K.R. and Hunt, S.L. "Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments." *Trans. ASAE*, **48**(5), pp. 1783-1794 (2005).
 7. Hunt, S.L., Hanson, G.J., Cook, K.R. and et al. "Breach widening observations from earthen embankment tests", *Trans. ASAE*, **48**(5), pp. 587-595 (2005).
 8. Zhang, J., Xuan, G., Wang, X. and et al. "Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength", *Sci. China Series E Technol. Sci.*, **52**(10), pp. 3024-3029 (2009).
 9. Wu.W. and Kang,Y. "A simplified breaching model for cohesive embankments", World Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability, ASCE, pp. 2207-2215 (2011).
 10. Hui, M.Y. and Yan, H.W. "Investigation of non-cohesive breach by overtopping flow", *Journal of Hydrodynamics*, **25**(4), pp. 572-579 (2013).
 11. Larese, A., Rossi, R., Onate, E. and et al. "Numerical and experimental study of overtopping and failure of rockfill dams", *International Journal of Geomechanics, ASCE*, **15**(4), pp.04014060(14) (2014).
 12. Cestero, F.A.J., Imran, j. and Chaudhry, H.M. "Experimental investigation of the effects of soil properties on levee breach by overtopping", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **141**(4) pp.04014085(14) (2014).
 13. Bhattarai, K.P., Nakagawa, N., Kawaike, K. and et al. "Experimental study on river dyke breach characteristics due to Overtopping", *J. JSNDS*, **33**, pp. 65-74 (2014).
 14. BGregoretti, C., Maltauro, A. and Lanzoni, S. "Laboratory experiments on the failure of coarse homogeneous sediment natural dams on a sloping bed", *Journal of Hydraulic Engineering*, **136**(11), pp. 868-879 (2010).
 15. Hamidian, M. "Investigation experimental physical cohesion earth dam in over tapping", *International Conference on Civil Engineering Architecture & Urban Sustainable Development: 18 & 19 December 2013*, Tabriz, Iran (2013).
 16. Coleman, E.S., Andrews, P.D. and Webby, G.M. "Overtopping breaching of noncohesive homogeneous embankments", *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**(9), pp. 829-838 (2002).