

## بررسی آزمایشگاهی تأثیر تلاش تراکمی و نوع کانی‌های رس بر فرسايش داخلی در هسته و پی سدهای خاکی

سید محمدعلی زمردیان<sup>۱\*</sup> و مهدی خوشخو<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۹/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۴/۳)

### چکیده

فرسايش داخلی دومین عامل اصلی تخریب سدهای خاکی پس از سرریز شدن آب از روی تاج سد است. از عوامل مؤثر بر فرسايش داخلی در سدهای خاکی، نوع کانی خاک رس مورد استفاده در ساخت سدها و همچنین تأثیر میزان تلاش تراکمی وارده بر خاک در مرحله ساخت می‌باشد. در تحقیق حاضر ضمن پدیده فرسايش داخلی، به تحقیق بر روی تأثیر تلاش تراکمی بر فرسايش پذیری مصالح و نیز تأثیر نوع کانی‌های خاک رس بر فرسايش داخلی پرداخته شده است. بدین منظور نخست از خاک رسی کائولینیتی و موتموریلونیت سدیمه (بتنوئیت) به صورت مجزا و سپس با درصدهای مختلف اختلاط، جهت بررسی تأثیر درصدهای مختلف بتنوئیت بر روند فرسايش پذیری خاک‌ها و دو چکش تراکم استاندارد و اصلاح شده به منظور تحقیق بر روی تأثیر تلاش تراکمی متفاوت بر فرسايش داخلی، استفاده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش تلاش تراکمی در درصد رطوبت ثابت، فرسايش پذیری مصالح نیز در حدود ۱۲٪ افزایش می‌یابد و فرسايش پذیری رس کائولینیتی بیش از رس بتنوئیت است که میزان آن به ۶۵٪ می‌رسد، همچنین با افزایش ۱۲٪ بتنوئیت در خاک رس کائولینیتی فرسايش پذیری مصالح به شدت کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سدهای خاکی، فرسايش داخلی، کانی‌شناسی رس، بتنوئیت، تلاش تراکم

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mzomorod@shiraz.ac.ir

## مقدمه

در طراحی سازه‌های خاکی نگهدارنده آب یا سازه‌هایی که در معرض گرادیان هیدرولیکی می‌باشند، باید مد نظر قرار گیرد. در سدهای خاکی معمولاً از هسته‌های رسی برای کنترل نشت از طریق خاکریز استفاده می‌شود. این هسته‌ها به‌طور معمول در سمت تر رطوبت بهینه کوییده می‌شوند تا نفوذپذیری و احتمال ترک خورده‌گی مصالح کمتر گردد، با این روش رس رفتار پلاستیک تری را از خود نشان می‌دهد. تاکنون مطالعات زیادی بر روی فرسایش داخلی در سدهای خاکی انجام شده از آن جمله می‌توان به مطالعات انجام شده توسط گیبس (۱۱) اشاره نمود، وی به بررسی فرسایش‌پذیری دو نوع خاک سیلتی (ML) و رسی (CL) پرداخت و عنوان کرد که فرسایش‌پذیری سیلت است بیش از رس‌ها می‌باشد، همچنین PI خاک نیز در فرسایش‌پذیری مصالح بسیار مهم بوده به گونه‌ای که هرچه PI خاک بیشتر باشد فرسایش‌پذیری نیز کمتر می‌باشد. کریستین سن و داس (۹) با انجام آزمایش روی کائولینیت، گرانیت و ماسه اوتاوا بیان کردند که نوع و ترکیب کانی‌ها در فرسایش‌پذیری آنها حائز اهمیت است، به گونه‌ای که مصالح با PI کمتر فرسایش بیشتری دارند.

چاپیوس و گیتن (۸) با تحقیق بر روی تأثیر نحوه ساخت نمونه بر فرسایش‌پذیری مصالح و با استفاده از آزمایش سیلندر چرخان که یکی از انواع تست‌های مورد استفاده جهت تحقیق بر روی فرسایش مصالح است، نتیجه گرفتند که نحوه ساخت نمونه می‌تواند بر فرسایش‌پذیری مصالح مؤثر باشد؛ به گونه‌ای که نمونه‌های ساخته شده به روش تحکیم، فرسایش‌پذیری کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها از خود نشان می‌دهد. این موضوع احتمالاً بیشتر به دلیل نوع آزمایش مورد استفاده توسط محققین بوده است که فرسایش‌پذیری نمونه را به صورت سطحی اندازه‌گیری می‌کند. همچنین محققان دیگری مانند گیبریسیس و همکاران (۱۰) روی تأثیر درجه تراکم و درصد رطوبت ساخت (نحوه ساخت نمونه)، تحقیقاتی انجام دادند؛ بر این اساس با افزایش دانسیته خشک نمونه‌ها و با افزایش درصد رطوبت ساخت به تدریج فرسایش داخلی کمتر می‌شود.

فرسایش داخلی به عنوان دومین عامل اصلی تخریب سدهای خاکی پس از سرریز شدن آب از روی تاج سدها محسوب می‌شود، و عبارت است از فرآیندی که سبب افزایش نشت متمرکر می‌گردد و می‌تواند با گسترش حفره‌های بزرگ، سبب خرابی سدهای خاکی همراه با تخلیه غیر قابل کنترل و فاجعه بار مخزن شود (۱۲). این موضوع از سال‌های دور مورد توجه محققین بوده است، برای مثال اولین بار شراره در سال ۱۹۷۲ پروسه فرسایش و رگاب را گسترش داده و تست پین هول را برای شناسایی خاک‌های مستعد فرسایش ابداع نمود. با توجه به حجم عظیم آب پشت سد، تخریب سدها سبب فجایع عظیم انسانی و مالی می‌شود. بر طبق آمارهای ارائه شده ۳۰٪ از خرابی سدهای خاکی به دلیل فرسایش داخلی و رگاب بوده است. در حدود ۵۰٪ از این گسیختگی‌ها در خاکریز و ۴۰٪ در پی‌ها رخ داده است، ۱۰٪ باقی‌مانده نیز ناشی از گسترش فرسایش از خاکریز به پی می‌باشد.

این امر نشان می‌دهد که مشکل اصلی در فرسایش داخلی، معمولاً در خاکریزها و پی‌ها رخ می‌دهد و از آنجا که فرآیند فرسایش داخلی بسیار پیچیده است و این پدیده درون خاکریز یا پی رخ می‌دهد، لذا فرسایش تا زمانی که به اندازه کافی پیشرفت نکند، قابل مشاهده و شناسایی نیست (۷). ون تون (۱۴)، بیان نمود که خرابی‌های ناشی از نشت و رگاب به عنوان عامل شماره یک خط‌ساز در غرب آمریکا به شمار می‌رود. براساس تحقیقات انجام شده توسط این محقق ۶۰٪ از تخریب سدهای خاکی با ارتفاع بیش از ۵ متر در غرب آمریکا، به دلیل فرسایش داخلی و رگاب بوده است. یک نمونه از مشکلات ناشی از فرسایش داخلی، تخریب سد تیتان می‌باشد. این سد در سال ۱۹۷۶ تخریب شد و سبب مرگ و میر تعدادی از اهالی شهر رکسبورگ آیداهو در پایین دست سد و بروز خسارات مالی در حدود ۱ میلیارد دلار شد. بنابراین، بررسی و شناخت فرسایش داخلی، و عوامل مؤثر بر آن از اهمیت فراوانی برخوردار است. فرسایش داخلی یکی از موارد مهمی است که

عملکرد کانی بتونیت که یکی از انواع مهم خاک‌های مسئله‌دار می‌باشد، بر فرسایش‌پذیری مصالح مورد بررسی قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

### مصالح مورد استفاده

خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق خاک رس کائولینیتی از منطقه مرند واقع در استان آذربایجان شرقی و خاک رس مونت-موریلونیت سدیمی (بتونیت تجاری) است. به منظور طبقه‌بندی خاک‌ها، آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتریگ به ترتیب براساس استانداردهای ASTM D422 و ASTM D4318 انجام شد. خواص خاک‌های مورد استفاده در جدول ۱ بیان شده است. شکل‌های ۱ و ۲، منحنی دانه‌بندی خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. علت استفاده از خاک رس کائولینیتی، علاوه بر بررسی تأثیر نوع کانی رس، به دلیل خواص پایدار این کانی در مقایسه با دیگر کانی‌ها و قابلیت تکرارپذیری بالا می‌باشد. هم‌چنین علت استفاده از بتونیت، به این دلیل می‌باشد که بتونیت یکی از انواع اصلی خاک‌های مسئله‌دار مشهور بوده و بررسی خواص تورمی این کانی و تأثیر آن بر فرسایش داخلی مواد هسته و پس سدهای خاکی یکی از اهداف این تحقیق می‌باشد. بتونیت به دلیل ساختار مونت موریلونیت‌ها که توانایی جذب آب در بین صفحات را دارا می‌باشند، خاصیت تورمی قابل توجهی دارد (پتانسیل تورمی آنها برابر ۵۱/۷٪ می‌باشد). در جدول ۲ نتایج آزمایش‌های تراکم مصالح مورد استفاده و ترکیب دو نوع رس کائولینیتی و بتونیتی به صورت ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲٪ بتونیت در رس کائولینیتی براساس استاندارد ASTM D698 بیان شده است.

### دستگاه مورد استفاده در تحقیق

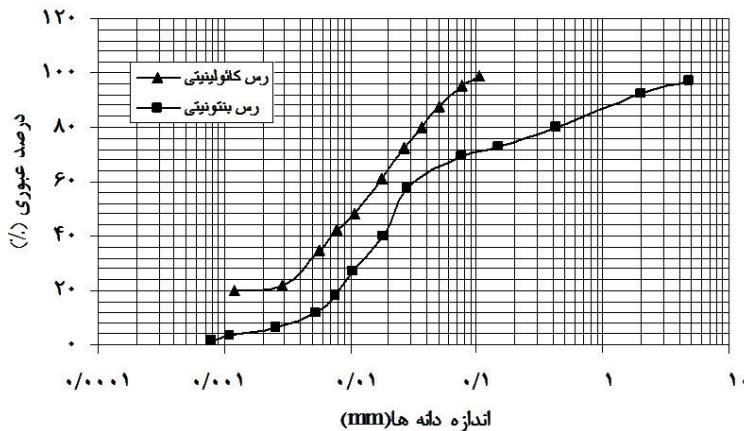
تست مورد استفاده، تست تخصصی فرسایش داخلی به نام تست فرسایش حفره و براساس طرح فل و همکاران (۶) بوده است که با اصلاحات انجام شده توانایی تست روی خاک‌ها

پژوهش‌هایی نیز در زمینه تأثیر نحوه ساخت نمونه بر روی فرسایش‌پذیری، توسط بارنز و گاتاها (۴) انجام شده است. نتایج این تحقیقات حاکی از آن است که فرسایش نمونه‌های خاک رس کائولینیتی در درصد رطوبت ثابت، با چکش سبک (تراکم سنگین) متفاوت بوده، نمونه‌های ساخته شده با چکش سنگین فرسایش داخلی بیشتری نسبت به نمونه‌های با چکش سبک از خود نشان می‌دهند.

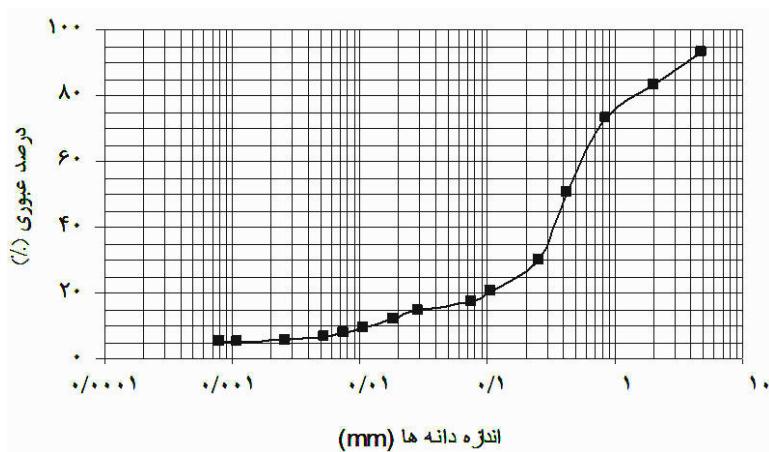
با توجه به استفاده از کانی‌های رسی در ساخت هسته سدهای خاکی، لزوم بررسی رفتار فرسایشی این نوع کانی‌ها محسوس است. فرسایش داخلی کانی‌های مونت موریلونیت سدیمی و کلسیمی توسط شیخ و همکاران (۱۳) بررسی شده است، کانی مونت موریلونیت سدیمی فرسایش‌پذیری کمتری نسبت به مونت موریلونیت کلسیمی دارد. هم‌چنین تحقیقات دیگری نیز توسط برخی محققین بر روی نوع کانی خاک‌های در معرض فرسایش انجام شده است، که از آن جمله می‌توان به تحقیقات آرالاندان و پری (۲) اشاره نمود، آنها عنوان کردند که فرسایش‌پذیری خاک‌ها تحت تأثیر درصد کاتیون‌های موجود در ساختار خاک و واکنش خاک به ترکیبات شیمیایی موجود در آب عبوری از بدنه سد می‌باشد، این امر نیز به طور مستقیم به نوع کانی رس مورد استفاده در سد بستگی دارد. تحقیقات ون و فل (۱۵)، نشان داد که برخی رس‌ها در شرایط یکسان نسبت به سایر رس‌ها در برابر فرسایش مقاوم‌ترند که این به دلیل درصد رس موجود در خاک یا پلاستیسیته آنها نبوده بلکه به علت نوع کانی رس موجود می‌باشد؛ نیز وجود کانی ورموکولیت و بیشتر انواع کانی‌های مونت موریلونیت در مصالح، سبب افزایش فرسایش‌پذیری می‌شود. در این تحقیق ابتدا میزان و نحوه تأثیر تلاش تراکمی بر روی فرسایش‌پذیری مصالح رسی بررسی می‌شود و سپس نرخ فرسایش دو نوع از کانی‌های رسی کائولینیتی و بتونیتی (رس متورم شونده) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور نمونه‌هایی با ترکیبات مختلف کائولینیت و بتونیت ساخته شده، تا میزان و نحوه

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک‌ها

طبقه‌بندی خاک	شاخص خمیری	حد خمیری	حد روانی	نوع خاک
CL	۱۲/۸	۱۴/۷	۲۷/۵	رس کاثولینیتی
CH	۱۰۹/۸	۴۹/۲	۱۵۹	رس بتونیتی
SC	۱۰/۳	۱۱/۱	۲۱/۴	ماسه رس دار



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک‌های رسی کاثولینیتی و بتونیتی



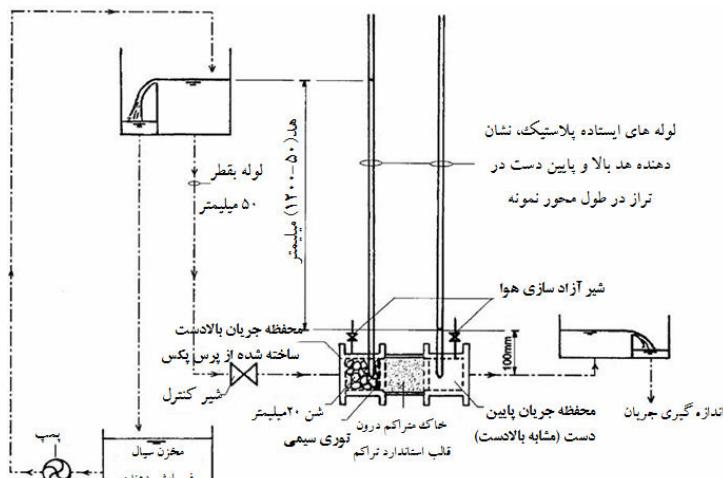
شکل ۲. نمودار دانه‌بندی ماسه رس دار

تست‌های فرسایش داخلی بزرگ می‌باشد (قطر = ۱۱ سانتی‌متر). شکل ۳ جزئیات دستگاه را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳ نمونه خاک در این تست درون قالب تراکم استاندارد کوییده شده و سپس سوراخ ۶ میلی‌متری در طول تمامی نمونه‌های ساخته شده، حفر می‌شود. هد آب بالادست

با فرسایش پذیری بسیار کم را نیز دارا می‌باشد. این تست که نوعی مدل کردن فرسایش در طول حفره است، جهت مطالعه نرخ فرسایش و تنفس برشی هیدرولیکی بحرانی برای شروع فرسایش و ارتباط این دو عامل با دیگر خواص خاک گسترش یافته است. قطر نمونه مورد استفاده در این تست نسبت به دیگر

جدول ۲. خلاصه وزن مخصوص حداکثر و درصد رطوبت بهینه

$\omega_{\text{optm}}$ (%)	$\rho_{\text{dmax}}$ (g/cm³)	نوع خاک	شماره تست
۱۱/۴	۱۸/۹۳	ماسه رس دار	۱
۱۲/۶	۱/۸۸۳	رس کائولینیتی	۲
۱۲/۵	۱/۸۸۵	رس کائولینیتی + ۱٪ بنتونیت	۳
۱۲/۹	۱/۸۷۰	رس کائولینیتی + ۳٪ بنتونیت	۴
۱۴/۴	۱/۸۱۳	رس کائولینیتی + ۶٪ بنتونیت	۵
۱۴	۱/۸۱۸	رس کائولینیتی + ۹٪ بنتونیت	۶
۱۴/۴	۱/۸۰۱	رس کائولینیتی + ۱۲٪ بنتونیت	۷
۳۱	۱/۲۴	رس بنتونیتی	۸



شکل ۳. دستگاه فرسایش حفره (HET)[فل و همکاران (۶)]

۱. حداکثر هد آب اعمالی در بالا دست از ۱۲۰۰ میلی‌متر به ۱۸۵۰ میلی‌متر افزایش یافت.

۲. جهت صرفه‌جویی در هزینه ساخت دستگاه به جای تأمین آب بالا دست توسط مخزن و الکتروپمپ، با تعییه یک سرریز اضطراری و یک شناور در داخل مخزن بالا دست، مستقیماً این مخزن به سیستم آب شهر متصل شد.

نکته مهم در کار با این تست، تعیین هد مناسب جهت هر نوع خاک و مصالح متفاوت می‌باشد، بر این اساس یک سری تست او لیه بر روی هر نمونه خاک با هدهای متفاوت انجام شد و بار

بسته به نوع خاک از ۵۰ تا ۱۲۰۰ میلی‌متر نسبت به سطح آب مخزن پایین دست متغیر بوده و هد آب مخزن پایین دست نیز همواره در ۱۰۰ میلی‌متر ثابت می‌باشد. نرخ جریان ثبت شده در طول تست به عنوان اندازه‌گیری غیرمستقیم قطر سوراخ مورد استفاده قرار می‌گیرد، برای این منظور از دو مخزن استوانه‌ای ۲۰ لیتری جهت اندازه‌گیری دبی با دقیق ۰/۵ لیتر استفاده می‌شود.

تفاوت‌های عمدی دستگاه ساخته شده در این پژوهش با طرح او لیه فل و همکاران (۶) عبارت‌اند از:

آماده شدن نمونه قالب را در قسمت مورد نظر در دستگاه فرسایش حفره قرار داده و پس از آب بندی، شیرهای تخلیه هوا را باز کرده و سپس شیر متصل به پایین دست نمونه را به آرامی باز کرده، در این مرحله دقیق در پر کردن محفظه های بالادست و پایین دست بسیار مهم می باشد، زیرا در صورت پر کردن محفظه ها با سرعت زیاد وجه پایین دست نمونه شروع به تخریب و ریزش می کند که در این صورت، امکان مسدود شدن سوراخ به شدت افزایش می یابد.

## نتایج و بحث

از مجموع ۳۶ آزمایش انجام شده تعدادی جهت تعیین هد مناسب هر نوع خاک و ماقبی جهت تکرار هر آزمایش و میانگین گیری بوده است. پس از انجام آزمایش فرسایش داخلی بر روی نمونه ها، داده های اندازه گیری شده در طول آزمایش آنالیز شده که عبارتند از: تراز آب بالا دست، هد آب بالادست و پایین دست در دو طرف نمونه، دبی، زمان و در نهایت قطر سوراخ پیش و پس از آزمایش. نمودارهای نرخ توده فرسایش یافته / زمان که به صورت غیر مستقیم از پارامترهای اندازه گیری شده به دست آمده است، تنش برشی هیدرولیکی در برابر زمان و در نهایت نمودار تنش برشی هیدرولیکی / نرخ توده فرسایش یافته براساس روابط ۱ و ۲ پیشنهاد شده توسط ون و فل (۱۵) تعیین و ترسیم شد.

$$\tau_t = \rho_w g s_t \frac{\varphi_t}{4} \quad [1]$$

که در آن،  $\tau_t$  تنش برشی هیدرولیکی روی سطح سوراخ ایجاد شده در زمان  $t$  ( $N/m^2$ )؛  $\rho_w$  دانسیته (چگالی) سیال فرسایش دهنده؛  $g$  شتاب جاذبه ( $m/s^2$ )؛  $S_t$  گرادیان هیدرولیکی در طول نمونه خاک در زمان  $t$ ؛  $\varphi_t$  قطر سوراخ در زمان  $t$  ( $m$ ) است.

$$\dot{\epsilon}_t = \frac{\rho_d}{2} \frac{d\varphi_t}{dt} \quad [2]$$

که در آن،  $\dot{\epsilon}_t$  نرخ توده فرسایش یافته؛  $\rho_d$  دانسیته خشک خاک ( $kg/m^3$ ) است. در محاسبه روابط ۱ و ۲، قطر در هر لحظه در

آبی با کمترین میزان فرسایش به عنوان هد مناسب برای آن خاک مورد استفاده قرار گرفت. مدت زمان هر تست بسته به شرایط موجود در هر آزمایش تا حداقل ۲ ساعت قابل افزایش می باشد. علت استفاده از این تست، سادگی، کم هزینه بودن و البته قابل اطمینان بودن نتایج آن در مقایسه با دیگر تست ها است، فارزار و همکاران (۵).

## نحوه آماده سازی نمونه

نمونه های مورد استفاده در آزمایش ها، شامل ماسه رسی، کائولینیت و بتونیت به طور مجزا و به صورت ترکیبی از کائولینیت و بتونیت و با درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکریم است. برای این منظور وزن مخصوص خشک ماکریم و درصد رطوبت بهینه هر دو خاک کائولینیت و ترکیبی با درصد های مختلف ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲٪ بتونیت درون کائولینیت براساس استاندارد D ۶۹۸ ASTM تعیین شد، که این افزایش درصد های مختلف بتونیت به کائولینیت به منظور بررسی رفتار خاک هایی با قابلیت تورم بر روند فرسایش داخلی است، همچنین برای بررسی تأثیر انرژی تراکم یا تأثیر نحوه ساخت نمونه بر فرسایش داخلی نیز آزمایش تراکم بر روی ماسه رس دار انجام گردید. جدول ۲ درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص ماکریم نمونه های مورد استفاده را نشان می دهد. نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت برای یکنواخت شدن رطوبت اضافه شده به خاک، درون محفظه پلاستیکی در بسته قرار داده شدند. سپس خاک مرطوب درون قالب دستگاه فرسایش با چکش تراکم استاندارد (۲/۵ kg) کوییده شد. شایان ذکر است که به منظور بررسی تلاش تراکمی علاوه بر چکش مذکور از چکش پراکتور اصلاح شده (۴/۵ kg) نیز استفاده شده است. سپس مجدداً دو طرف نمونه درون قالب با لایه های پلاستیکی مسدود شده و به مدت ۳ ساعت دیگر نمونه درون قالب تست نگهداری شد. علت این امر نیز رسیدن به تعادل درون خاک، پس از کوییده شدن است. گام بعدی در ساخت نمونه حفر سوراخ ۶ میلی متری درون نمونه می باشد. پس از

شاخص نرخ فرسایش بیشتر باشد، نشان‌دهنده فرسایش‌پذیری کمتر خاک است. نتایج یک نمونه از آزمایش‌های صورت گرفته در شکل ۴، براساس نرخ توده فرسایش یافته در برابر زمان ارائه شده است. در این شکل روند فرسایش نمونه خاک درون قالب قابل مشاهده است، که نشان‌دهنده تأثیر دست‌خوردگی در حین حفاری سوراخ دورن نمونه می‌باشد. در شکل ۴ از شروع آزمایش نرخ توده فرسایش کاهش یافته که در واقع نشان‌دهنده تمامی آزمایش‌های انجام شده با شرایط متفاوت قابل مشاهده بوده که پس از طی زمانی دوباره افزایش می‌یابد، کریستین سن و داس (۹) نیز نتایج مشابهی را ثبت نموده‌اند. نمودار نرخ توده فرسایش یافته در برابر تنش برشی هیدرولیکی نمونه‌ای از خاک‌ها در شکل ۵ ارائه شده است، بر این اساس شاخص نرخ فرسایش نمونه‌های مختلف متغیر بوده و قسمت تقریباً خطی نمودار نشان‌دهنده فرسایش در نمونه است. نکته جالب توجه در این نمودار نیز قسمت اولیه آن می‌باشد، بر طبق نظر ون و فل (۱۵) و در مقایسه با شکل ۴، این قسمت در واقع نشان‌دهنده شسته شدن و دفع خاک‌های دست خوردده درون سوراخ ناشی از حفاری مته می‌باشد و در نتیجه بیانگر فرسایش ذاتی خود نمونه نیست.

### تأثیر نوع کانی بر فرسایش و نحوه عملکرد رس متورم‌شونده در فرسایش‌پذیری مصالح

نتایج به‌دست آمده از آنالیز داده‌های ۲۸ آزمایش پس از میانگیری در شکل ۶ به صورت مقایسه‌ای آورده شده است در این شکل می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد بتونیت، فرسایش‌پذیری خاک رس کائولینیتی کاهش می‌یابد. هم‌چنین مشخص است که فرسایش‌پذیری خاک رس کائولینیتی به میزان قابل ملاحظه‌ای بیشتر از فرسایش‌پذیری خاک رس بتونیتی است. در واقع فرسایش‌پذیری آن در گروه دوم یعنی بسیار سریع قرار گرفته ولی فرسایش‌پذیری رس بتونیتی در گروه چهارم یعنی نسبتاً آهسته قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۶ شاخص

طول آزمایش مورد نیاز می‌باشد. به این منظور، بسته به شرایط جریان (لایه‌ای و یا آشفته) به ترتیب از روابط ۳ و ۴ پیشنهاد شده توسط ون و فل (۱۵) استفاده شده است.

$$\varphi_t = \left( \frac{16Q_t f_{Lt}}{\pi \rho_w g s_t} \right)^{1/3} \quad [3]$$

$$\varphi_t = \left( \frac{64Q_t^2 f_{Tt}}{\pi^2 \rho_w g s_t} \right)^{1/5} \quad [4]$$

که  $(\text{kg}/\text{s})$   $f_{Lt}$   $(\text{kg}/\text{m}^3)$   $f_{Tt}$   $(\text{kg}/\text{m}^3)$  فاکتورهای اصطکاک ارتباط‌دهنده تنش برشی به متوسط سرعت جریان است، و  $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$   $Q_t$  نرخ جریان در زمان  $t$  (دی) است. در یک تست،  $Q$  و  $S$  در فواصل زمانی معین اندازه‌گیری می‌شوند. قطر سوراخ  $\varphi$  در شروع آزمایش ۶ میلی‌متر ( $t=0$ ) است. هر دو ضرائب اصطکاک  $f_{Lt}$  و  $f_{Tt}$  براساس نظر ون و فل (۱۵) فرض شده که به طور خطی با زمان تغییر می‌کند، به همین منظور این دو پارامتر را می‌توان از روابط ۵ و ۶ به ترتیب برای جریان‌های لایه‌ای و آشفته و با اندازه‌گیری مستقیم قطر سوراخ در ابتداء و انتهای آزمایش به‌دست آورد.

$$f_L = \frac{\rho_w g \pi s \varphi^3}{16Q} \quad [5]$$

$$f_T = \frac{\rho_w g \pi^2 s \varphi^5}{64Q^2} \quad [6]$$

براساس نمودارهای فوق الذکر عددی به نام نرخ فرسایش (Ce) از شبی قسمت تقریباً خطی ثانویه نمودار تنش برشی هیدرولیکی / نرخ توده فرسایش یافته که در واقع بهترین خط برازش داده شده می‌باشد، تعیین می‌گردد.

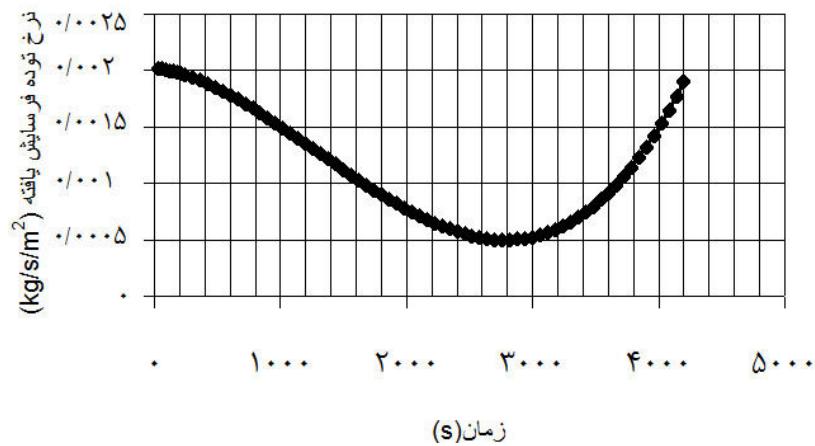
نحوه طبقه‌بندی فرسایش‌پذیری خاک‌ها براساس نظر ون و فل (۱۵) در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول عدد I عدد شاخص نرخ فرسایش بوده که براساس فرمول ۷ عبارت است از:

$$I = -\log C_e \quad [7]$$

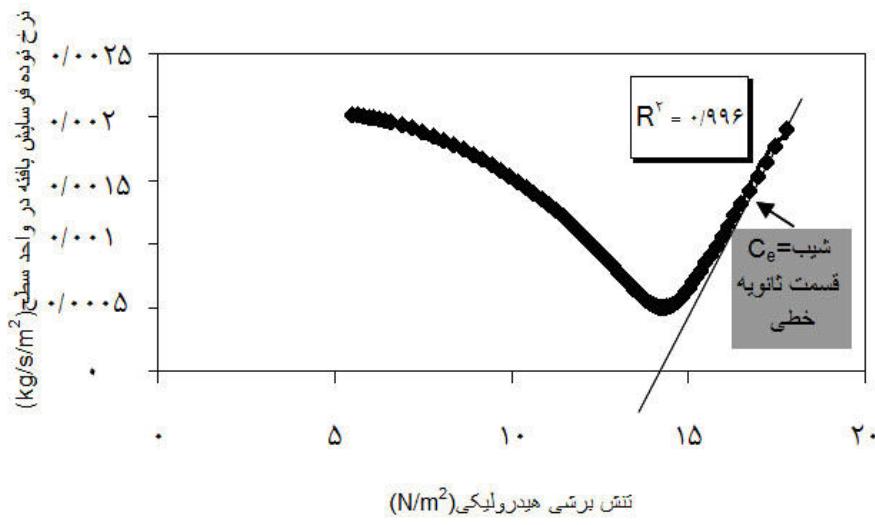
که در آن، Ce عدد نرخ فرسایش می‌باشد، که در شکل ۵ قابل مشاهده می‌باشد. مطابق جدول ۳ خاک‌ها براساس شاخص فرسایش به شش گروه یا دسته طبقه‌بندی می‌شوند که هر چه

جدول ۳. طبقه‌بندی خاک‌ها در برابر فرسایش [فل و همکاران (۶)]

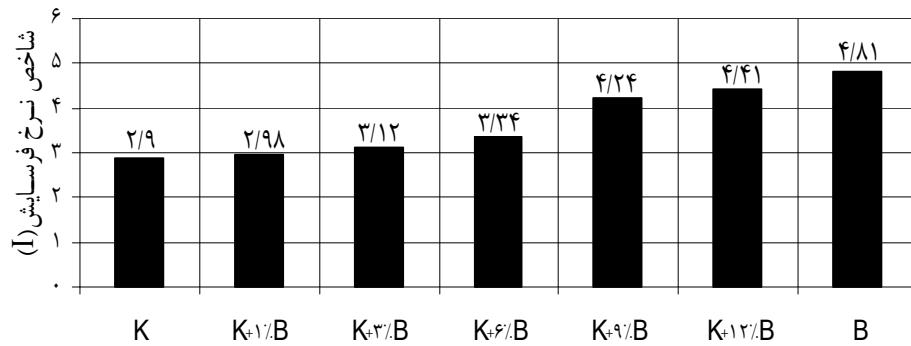
توصیف	شاخص نرخ فرسایش	شماره گروه
بشدت سریع	<۲	۱
بسیار سریع	۲-۳	۲
نسبتاً سریع	۳-۴	۳
نسبتاً آهسته	۴-۵	۴
بسیار آهسته	۵-۶	۵
بشدت اهسته	>۶	۶



شکل ۴. نمونه‌ای از نمودارهای نرخ فرسایش در برابر زمان



شکل ۵. نمودار تنش برشی هیدرولیکی در برابر نرخ توده فرسایش



ترکیب نمونه‌های مختلف

شکل ۶. نمودار مقایسه‌ای شاخص نرخ فرسایش برای نمونه‌های با درصدهای مختلف بتنویت

افزایش I مخلوط با ۱۲٪ نسبت به ترکیب ۹٪ و ۹٪ نسبت به ۶٪ چندان زیاد نبوده و می‌توان ۹٪ را درصد مناسب جهت بهبود خواص فرسایش‌پذیری خاک‌های مستعد در برابر فرسایش پیشنهاد کرد. افزایش درصدهای اندک بتنویت ۱٪ و ۳٪ ضمن این‌که وضعیت فرسایش‌پذیری مصالح را تا حدودی بهبود می‌بخشد اما در عین حال نمی‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر باشد. نکته حائز اهمیت این است که آیا پتانسیل تورم مخلوط‌ها به جهت کترل فرسایش، بیش از حد نبوده که مشکلات متعاقب خاک‌های متورم شونده را ایجاد کند. لذا با انجام یک سری تست پتانسیل تورم بر اساس استاندارد ASTM D ۴۵۴۶ بر روی هر نمونه از مصالح، پتانسیل تورم آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به جدول پتانسیل‌های تورم و براساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط برون(۳) (جدول ۵)، به دلیل مقادیر کم پتانسیل تورم تمامی نمونه‌ها، مشکلی از نظر پتانسیل تورم وجود ندارد. اما در عین حال به نظر می‌رسد که علیرغم این‌که مخلوط کائولینیت با ۱۲٪ بتنویت در محدوده مصالح با پتانسیل تورم متوسط قرار می‌گیرد، پتانسیل تورم می‌تواند تا حدودی قابل توجه باشد، که لزوم بررسی بیشتر در این زمینه را نشان می‌دهد.

#### تأثیر تلاش تراکمی بر فرسایش داخلی

نتایج به دست آمده از آزمایش روی نمونه‌های با تلاش

نرخ فرسایش (I) بتنویت در حدود ۶۵٪ بیش از شاخص نرخ فرسایش کائولینیت بوده، که این افزایش می‌تواند به دلیل چسبندگی بالای بتنویت در مقایسه با کائولینیت باشد، مطابق نظر گیبس (۱۱) با افزایش PI فرسایش‌پذیری کاهش می‌یابد. عامل مهم دیگر در بروز این پدیده، خاصیت تورمی بتنویت می‌باشد که با جذب آب توسط دانه‌های بتنویت، این دانه‌ها به شدت متورم شده و در مجاورت جریان نشت، دانه‌های رس کاملاً به هم می‌چسبند و در نتیجه از شسته شدن توسط جریان جلوگیری می‌شود. اما به نظر می‌رسد که نحوه عملکرد بتنویت در کترل فرسایش‌پذیری مصالح، علاوه بر افزایش پلاستیسیته مصالح با افزایش درصد بتنویت، می‌تواند به این صورت باشد که با توجه به ریز دانه‌تر بودن بتنویت در مقایسه با دیگر کانی‌های رسی از جمله کائولینیت، هم‌چنین چسبندگی بالای بتنویت و قابلیت بالای تورمی آن در حضور آب، سبب به هم چسبیدن مصالح شده و دانه‌های بتنویت، دانه‌های کائولینیت را احاطه کرده و از شسته شدن مخلوط در معرض جریان نشت جلوگیری می‌نماید.

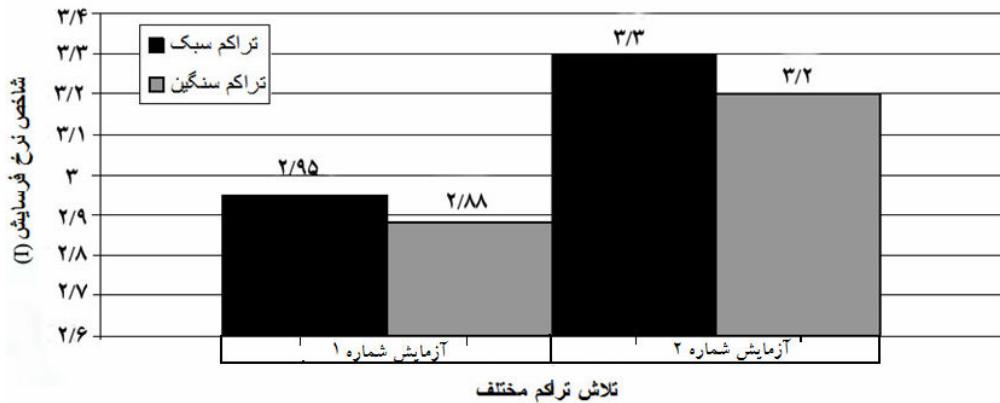
با توجه به نمودار ۶ درصد بهینه بتنویت، جهت کترول فرسایش داخلی مصالح در حدود ۹٪ می‌باشد، هرچند که با افزایش بیش از ۹ درصد بتنویت نیز، فرسایش‌پذیری باز هم کاهش یافته اما به طور نسبی بیشترین میزان کاهش فرسایش‌پذیری، با حضور ۹٪ بتنویت رخ می‌دهد و میزان

## جدول ۴. پتانسیل تورم مصالح با درصدهای مختلف بتونیت

پتانسیل تورم	نوع خاک
۲/۶	کائولینیت + ۱/ بتونیت
۳	کائولینیت + ۳/ بتونیت
۳/۸	کائولینیت + ۶/ بتونیت
۵/۶	کائولینیت + ۹/ بتونیت
۱۰/۲	کائولینیت + ۱۲/ بتونیت

## جدول ۵. طبقه‌بندی پتانسیل تورم مصالح [برون (۳)]

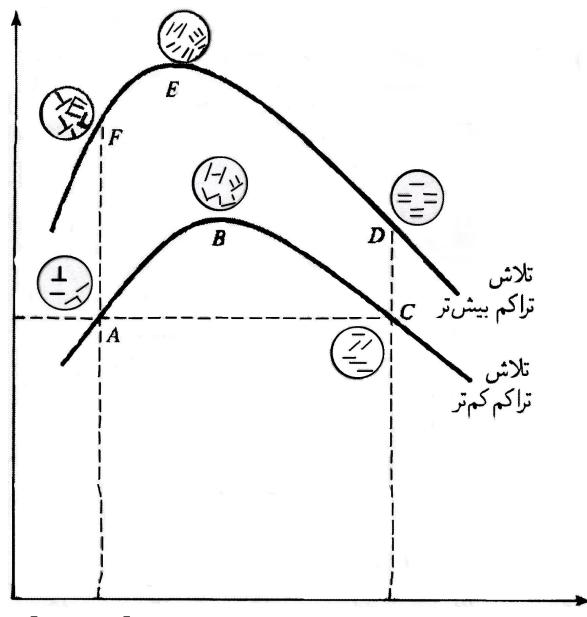
طبقه‌بندی	پتانسیل تورم
کم	< ۱۰
متوجه	۲۰ - ۱۰
زیاد	۳۰ - ۲۰
بسیار زیاد	> ۱۰



شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای شاخص نرخ فرسایش برای نمونه‌های با درصدهای مختلف بتونیت

خود نشان می‌دهند (در حدود ۰/۳%). که این مقدار تفاوت در تمامی آزمایش‌های انجام شده تقریباً قابل مشاهده بوده و با نتایج یافت شده توسط بارنر و گاتاهاورا (۴) روی خاک رس کائولینیتی و با دستگاهی متفاوت نیز تطابق دارد، البته میزان تفاوت فرسایش داخلی در تحقیقات بارنر و گاتاهاورا نیز چندان زیاد نبوده و بدلیل عدم استفاده از سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی توسط ون و فل (۱۵) به صورت کمی

تراکم متفاوت به صورت مقایسه‌ای در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۷ برای چهار آزمایش به عنوان نمونه از بین ۹ آزمایش انجام شده، نشان داده شده است، نمونه‌های ساخته شده با چکش سنگین ۴/۵ کیلوگرمی (تراکم سنگین) شاخص نرخ فرسایش (I) کمتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با چکش ۲/۵ کیلوگرمی (تراکم سبک) داشته یا به عبارت بهتر فرسایش‌پذیری بیشتری از



شکل ۸. تغییر ساختار خاک با افزایش انرژی تراکم [اطیابی (۱)]

### نتایج

خلاصه نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱. رس‌های کائولینیتی نسبت به رس‌های مونت موریلوبنیت در حقیقت جزء خاک‌های با فرسایش بسیار سریع محسوب می‌شوند به نحوی که فرسایش پذیری کانی کائولینیتی در حدود ۱۰۰ درصد بیشتر از کانی بتنوئیت می‌باشد.
۲. استفاده از خاک رس کائولینیتی با PI متوسط (۲۰ - ۱۰) به تنها در هسته و پی سدهای خاکی می‌تواند احتمال بروز فرسایش داخلی را افزایش دهد.
۳. کانی بتنوئیت تا حد بسیار مناسبی می‌تواند در کنترل فرسایش داخلی مواد به کار رفته در ساخت سدهای خاکی مؤثر باشد، به طوری که شاخص نرخ فرسایش با افزایش درصد بتنوئیت از گروه ۲ به ۴ انتقال یافت.
۴. استفاده از بتنوئیت در درصدهای بسیار اندک ۱ تا ۳٪ هم می‌تواند بر کنترل فرسایش داخلی خاک‌های مستعد فرسایش داخلی مؤثر باشد، هرچند که میزان تأثیر آنها بر نرخ فرسایش مصالح نسبت به نمونه‌های با درصد بالاتر بتنوئیت زیاد نیست.

بیان نشده است، این در حالی است که با افزایش تلاش تراکم در درصد رطوبت ثابت که در ساخت نمونه‌های با تراکم سنگین استفاده شده، وزن مخصوص مصالح بالاتر از نمونه‌های ساخته شده با تراکم سبک می‌باشد که بنابراین انتظار است که ساختار متراکم‌تر از حالت قبل، فرسایش‌پذیری کمتری از خود نشان دهد. این میزان افزایش فرسایش به دلیل افزایش تلاش تراکم، از دیدگاه مهندسی ناچیز بوده اما از نقطه نظر آکادمیک قابل بررسی می‌باشد. دلیل این گونه رفتار خلاف انتظار به دلیل ثابت بودن تمامی شرایط در حین ساخت نمونه‌ها و هم‌چنین هدیکسان اعمالی به نمونه، به جز استفاده از چکش‌های متفاوت برای متراکم کردن مصالح، تنها می‌تواند در وضعیت ریز ساختاری خاک رس نهفته باشد. مطابق شکل ۸ با افزایش تلاش تراکمی در درصد رطوبت ثابت و به ویژه در سمت تر رطوبت بهینه ساختار خاک از حالت انعقادی به حالت پراکنده تبدیل شده و دانه‌های رس به دلیل اعمال فشار بیشتر حالت موازی به خود گرفته و ساختار غیرمنسجم‌تری را ایجاد می‌کنند.

- ایجاد نمی‌کند به جز افزودن ۱۲٪ بتنوئیت که پتانسیل تورمی تقریباً بالای ایجاد می‌کند.
۷. با افزایش تلاش تراکم و با وجود افزایش وزن مخصوص خشک خاک فرسایش‌پذیری مصالح به میزان کمی در حدود ۳٪ افزایش می‌یابد.
۵. افزودن ۶ تا ۹٪ مونت موریلوئیت‌های سدیمی می‌تواند بیشترین میزان کاهش فرسایش داخلی مواد را به همراه داشته باشد، در واقع می‌توان استفاده از ۹٪ بتنوئیت را به جهت کنترل فرسایش داخلی در مصالح هسته و پی سدهای خاکی به عنوان درصد بهینه بتنوئیت بیان کرد.
۶. پتانسیل تورم نمونه‌های ساخته شده از ترکیب کائولینیت و بتنوئیت در حد قابل قبولی بوده و مشکلی از نظر تورم بالا در صد بنه بتنوئیت بیان کرد.

### منابع مورد استفاده

۱. اطیابی، الف. ۱۳۸۲. اصول مهندسی ژئوتکنیک مکانیک خاک. ویرایش پنجم، نشر کتاب دانشگاهی.
2. Arulanandan, K. and E.B. Perry. 1983. Erosion in relation to filter design criteria in earth dams. J. Geotech. Eng. Div. ASCE. 109(GT5): 682-698.
3. Brown, R. W. 2000. Practical Foundation Engineering Hand book. 2<sup>nd</sup> ed. McGraw-Hill Pub., UK.
4. Burnz, B. and G.S. Ghataora. 2007. Internal erosion of Kaolin. ASCE. Geo-Denver 2007. New Peaks in Geotechnics.
5. Farrar, J.A. and R. Torres and I. Erdogan. 2007. Bureau of Reclamation erosion Testing for evaluation of piping and internal erosion of dams. ASCE. Geo-Denver2007. New Peaks in Geotechnics.
6. Fell, R. and C. Wan. And J. Cyganiewicz. and M. Foster. 2003. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. J. Geotech. and Geoenviron. Eng. ASCE 29(4):
7. Foster, M. A. and R. Fell and M. Spannagle. 2000. The statistics of embankment dam failures an accident. Can. Geotech. J. 37(5): 1000-1024.
8. Chapius, R.P. and T. Gatien. 1986. An improved rotating cylinder technique for quantitative measurements of the scour resistance of clays. Can. Geotech. J. 23: 83-87.
9. Christensen, R.W. and B.M. Das. 1973. Hydraulic erosion of remolded cohesive soils. In Soil Erosion: Causes and Mechanisms; Prevention and Control. Special Report 135. Highway Research Board: 8-19.
10. Ghebrieiyessu, Y. T. and C. J.Gantzer. and E. E. Alberts. And R. W. Lentz. 1994. Soil erosion by concentrated flow: Shear stress and bulk density. Trans. ASAE. 37(6): 1791-1797.
11. Gibbs, H. J. 1962. A study of erosion and attractive force characteristics in relation to soil mechanics properties. Soils Engineering Rep. No. EM-643. United States Dept. of the Interior. Bureau of Reclamation.
12. Robert, L. and P. E. Torres. 2008. Geotechnical Engineering Group of Bureau of Reclamation. Considerations for detection of internal erosion in embankment dams. ASCE. Biennial Geotechnical Seminar Conference, Denver, Colorado.
13. Shaikh, A. J. and F. Ruff. and S. R. Abt. 1988. Erosion rate of compacted NA-Mon tmorillonite soils. J. Geotech. Eng. 114~3: 296-305.
14. Von Thun, J.W. 1996. Understanding Piping and Seepage Failures – The No. 1 Dam Safety Problem in the West. ASDSO Western. Regional Conference. Lake Tahoe. Nevada. April 1996.
15. Wan, C. and R. Fell. 2004. Investigation of Rate of erosion of soils in embankment dams. Journal of Geotec ring. 30(4):