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

سید محمدعلی زمردیان[۱*] و مهدی خوشخو[۲]

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

## چکیده

**فرسایش داخلی دومین عامل اصلی تخریب سدهای خاکی پس از سرریز شدن آب از روی تاج سد است. از عوامل مؤثر بر فرسایش 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 حاضرضمن بررسی پدیده فرسایش داخلی، به تحقیق بر روی تأثیر تلاش تراکمی بر فرسایش‌پذیری مصالح و نیز تأثیر نوع کانی‌های خاک رس بر فرسایش داخلی پرداخته شده است. بدین منظور نخست از خاک رسی کائولینیتی و مونتموریلونیت سدیمی (بنتونیت) به‌صورت مجزا و سپس با درصدهای مختلف اختلاط، جهت بررسی تأثیر درصدهای مختلف بنتونیت بر روند فرسایش پذیری خاک‌ها و دو چکش تراکم استاندارد و اصلاح شده به منظور تحقیق بر روی تأثیر تلاش تراکمی متفاوت بر فرسایش داخلی، استفاده شده است. نتایج نشان داد که با افزایش تلاش تراکمی در درصد رطوبت ثابت، فرسایش‌پذیری مصالح نیز در حدود ۳٪ افزایش می‌یابد و فرسایش‌پذیری رس کائولینیتی بیش از رس بنتونیتی است که میزان آن به ۶۵٪ می‌رسد، هم‌چنین با افزایش ۱۲٪ بنتونیت در خاک رس کائولینیتی فرسایش‌پذیری مصالح به شدت کاهش می‌یابد.**

**واژه‌های کلیدی: سدهای خاکی، فرسایش داخلی، کانی‌شناسی رس، بنتونیت، 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



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]

**مقدمه**

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 متمرکز 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 محقیق بوده است، برای مثال اولین‌بار شرارد 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 زمانی‌که 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 خطرساز 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 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 کوبیده می‌شوند تا نفوذپذیری و احتمال ترک خوردگی 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 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 به‌صورت 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 به‌تدریج فرسایش داخلی کمتر می‌شود.



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]

پژوهش‌هایی نیز در زمینه تأثیر نحوه ساخت نمونه بر روی فرسایش‌پذیری، توسط بارنز و گاتاهورا (۴) انجام شده است. نتایج این تحقیقات حاکی از آن است که فرسایش نمونه‌های خاک رس کائولینیتی در درصد رطوبت ثابت، با دو چکش سبک (تراکم سبک) و چکش سنگین (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 آرالاناندان 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 به‌طور 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 بنتونیتی (رس متورم شونده) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور نمونه‌هایی با ترکیبات مختلف کائولینیت و بنتونیت ساخته شده، تا میزان و نحوه عملکرد کانی بنتونیت 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 (بنتونیت تجاری) است. به منظور طبقه‌بندی خاک‌ها، آزمایش‌های دانه‌بندی و حدود اتربرگ به‌ترتیب براساس استانداردهای ASTM D۴۲۲ و ASTM D۴۳۱۸ 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 بنتونیت، به این دلیل می‌باشد که بنتونیت یکی از انواع اصلی خاک‌های مسئله‌دار مشهور بوده و بررسی خواص تورمی این کانی و تأثیر آن بر فرسایش داخلی مواد هسته و پی سدهای خاکی یکی از اهداف این تحقیق می‌باشد. بنتونیت 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 بنتونیتی به‌صورت ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ٪ بنتونیت در رس کائولینیتی براساس استاندارد ASTM D۶۹۸ 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

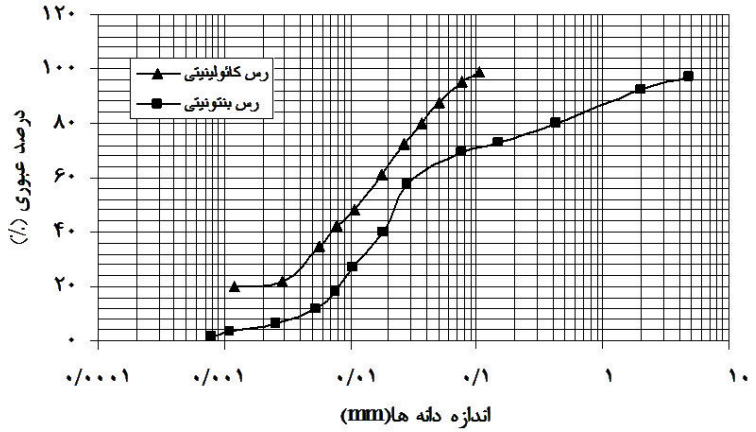


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

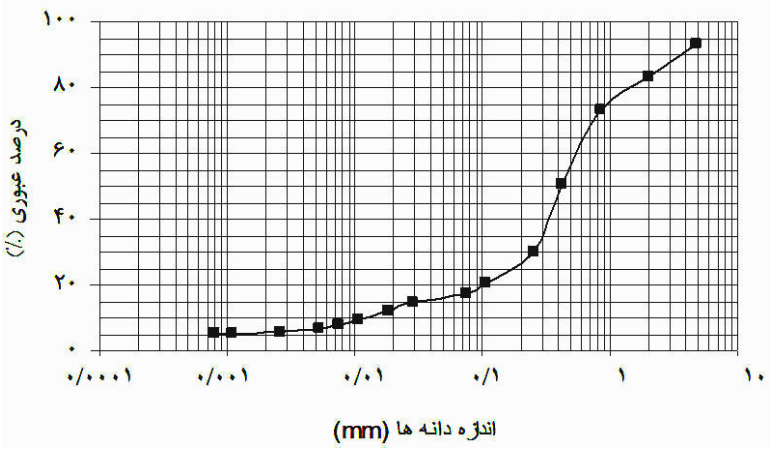
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]

**جدول ۱. طبقه‌بندی خاک‌ها**

| نوع خاک | حد روانی | حد خمیری | شاخص خمیری | طبقه‌بندی خاک |
|---|---|---|---|---|
| رس کائولینیتی | ۲۷/۵ | ۱۴/۷ | ۱۲/۸ | CL |
| رس بنتونیتی | ۱۵۹ | ۴۹/۲ | ۱۰۹/۸ | CH |
| ماسه رس‌دار | ۲۱/۴ | ۱۱/۱ | ۱۰/۳ | SC |




**شکل ۱. نمودار دانه‌بندی خاک‌های رسی کائولینیتی و بنتونیتی**




**شکل ۲. نمودار دانه‌بندی ماسه رس‌دار**

با فرسایش‌پذیری بسیار کم را نیز دارا می‌باشد. این تست که نوعی مدل کردن فرسایش در طول حفره است، جهت مطالعه نرخ فرسایش و تنش 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 تست‌های فرسایش داخلی بزرگ می‌باشد (قطر= ۱۱ سانتی‌متر). شکل ۳ جزئیات دستگاه را به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد. مطابق شکل۳ نمونه خاک در این تست درون قالب تراکم استاندارد کوبیده شده و سپس سوراخ ۶ میلی‌متری در طول تمامی نمونه‌های ساخته شده، حفر می‌شود. هد آب بالادست

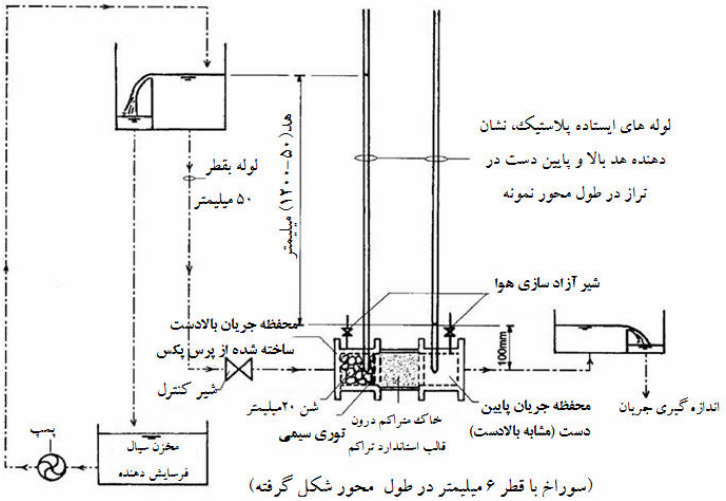


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]

**جدول ۲. خلاصه وزن مخصوص حداکثر و درصد رطوبت بهینه**

| شماره تست | نوع خاک | $\rho_{d\max}$ $(g/cm^3)$ | $\omega_{optm}$ (٪) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ماسه رس‌دار | ۱۸/۹۳ | ۱۱/۴ |
| ۲ | رس کائولینیتی | ۱/۸۸۳ | ۱۲/۶ |
| ۳ | رس کائولینیتی+۱٪بنتونیت | ۱/۸۸۵ | ۱۲/۵ |
| ۴ | رس کائولینیتی+۳٪بنتونیت | ۱/۸۷۰ | ۱۲/۹ |
| ۵ | رس کائولینیتی+۶٪بنتونیت | ۱/۸۱۳ | ۱۴/۴ |
| ۶ | رس کائولینیتی+۹٪بنتونیت | ۱/۸۱۸ | ۱۴ |
| ۷ | رس کائولینیتی+۱۲٪بنتونیت | ۱/۸۰۱ | ۱۴/۴ |
| ۸ | رس بنتونیتی | ۱/۲۴ | ۳۱ |




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

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 دقت ۰/۵ لیتر استفاده می‌شود.

تفاوت‌های عمده دستگاه ساخته شده دراین پژوهش با طرح اولیه فل و همکاران (۶) عبارت‌اند از:

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

۲. جهت صرفه‌جویی در هزینه ساخت دستگاه به جای تأمین آب بالادست توسط مخزن و الکتروپمپ، با تعبیه یک سرریز اضطراری و یک شناور در داخل مخزن بالادست، 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 اولیه بر روی هر نمونه خاک با هدهای متفاوت انجام شد و بار



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]

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 حداکثر ۲ ساعت قابل افزایش می‌باشد. علت استفاده از این تست، سادگی، کم هزینه بودن و البته قابل اطمینان بودن نتایج آن در مقایسه با دیگر تست‌ها است، فارار و همکاران(۵).

**نحوه آماده‌سازی نمونه**

نمونه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها، شامل ماسه رسی، کائولینیت و بنتونیت به‌طور مجزا و به‌صورت ترکیبی از کائولینیت و بنتونیت و با درصد رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک ماکزیمم است. برای این منظور وزن مخصوص خشک ماکزیمم و درصد رطوبت بهینه هر دو خاک کائولینیت و ترکیبی با درصدهای مختلف ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲٪ بنتونیت درون کائولینیت براساس استاندارد ASTM D ۶۹۸ تعیین شد، که این افزایش درصدهای مختلف بنتونیت به کائولینیت به منظور بررسی رفتار خاک‌هایی 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 ماکزیمم نمونه‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. نمونه‌ها 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 (۲/۵kg) کوبیده شد. شایان ذکر است که به منظور بررسی تلاش تراکمی علاوه بر چکش مذکور از چکش پراکتور اصلاح شده (۴/۵kg) نیز استفاده شده است. سپس مجدداً دو طرف نمونه درون قالب با لایه‌های 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 کوبیده شدن است. گام بعدی در ساخت نمونه حفر سوراخ ۶ میلی‌متری درون نمونه می‌باشد. پس از آماده شدن نمونه قالب را در قسمت مورد نظر در دستگاه فرسایش حفره قرار داده و پس از آب‌بندی، شیرهای تخلیه هوا را باز کرده و سپس شیر متصل به پایین دست نمونه را به آرامی باز کرده، در این مرحله دقت در پر کردن محفظه‌های بالادست و پایین دست بسیار مهم می‌باشد، زیرا در صورت پر کردن محفظه‌ها با سرعت زیاد وجه پایین دست نمونه شروع به تخریب و ریزش می‌کند که در این صورت، امکان مسدود شدن سوراخ به شدت افزایش می‌یابد.

## نتایج و بحث

از مجموع ۳۶ آزمایش انجام شده تعدادی جهت تعیین هد مناسب هر نوع خاک و مابقی جهت تکرار هر آزمایش و میانگین‌گیری بوده است. پس از انجام آزمایش فرسایش داخلی بر روی نمونه‌ها، داده‌های اندازه‌گیری 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 به‌صورت غیرمستقیم از پارامترهای اندازه‌گیری شده به‌دست 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.

$$\tau_t = \rho_W g s_t \frac{\varphi_t}{۴} \qquad [۱]$$

که در آن، $\tau_t$ تنش برشی هیدرولیکی روی سطح سوراخ ایجاد شده در زمان t ($N/m^۲$)؛ $\rho_w$ دانسیته (چگالی) سیال فرسایش دهنده؛ g شتاب جاذبه ($۹/۸ m/s^۲$)؛ $S_t$ گرادیان هیدرولیکی در طول نمونه خاک در زمان t؛ $\varphi_t$ قطر سوراخ در زمان t (m) است.

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{\rho_d}{۲}\frac{d\varphi_t}{dt} \qquad [۲]$$

که در آن، $\dot{\varepsilon}_t$ نرخ توده فرسایش یافته؛ $\rho_d$ دانسیتهٔ خشک خاک ($kg/m^۳$) است. در محاسبه روابط ۱و۲، قطر در هر لحظه در



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]

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

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

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

که $f_{Lt}(kg/m^2/s)$ و $f_{Tt}(kg/m^3)$ فاکتورهای اصطکاک ارتباط‌دهنده تنش برشی به متوسط سرعت جریان است، و $Q_t$ ($\frac{m^3}{s}$) نرخ جریان در زمان t (دبی) است. در یک تست، Q و S در فواصل زمانی معین اندازه‌گیری می‌شوند. قطر سوراخ $\varphi$ در شروع آزمایش ۶ میلی‌متر (t=۰) است. هر دو ضرائب اصطکاک $f_{Lt}$ و $f_{Tt}$ براساس نظر ون و فل (۱۵) فرض شده که به‌طور خطی با زمان تغییر می‌کند، به همین منظور این دو پارامتر را می‌توان از روابط ۵ و ۶ به‌ترتیب برای جریان‌های لایه‌ای و آشفته و با اندازه‌گیری مستقیم قطر سوراخ در ابتدا و انتهای آزمایش به‌دست آورد.

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

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

براساس نمودارهای فوق الذکرعددی به نام نرخ فرسایش (Ce) از شیب 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 فرمول۷ 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 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 کاهش فرسایش داخلی نمونه می‌باشد. این روند تقریباً در 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 متغییر 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 خورده 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 به‌صورت مقایسه‌ای آورده شده است در این شکل می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد بنتونیت، فرسایش‌پذیری خاک رس کائولینیتی کاهش می‌یابد. هم‌چنین مشخص است که فرسایش‌پذیری خاک رس کائولینیتی به میزان قابل ملاحظه‌ای بیشتر از فرسایش‌پذیری خاک رس بنتونیتی است. در واقع فرسایش‌پذیری آن در گروه دوم یعنی بسیار سریع قرار گرفته ولی فرسایش‌پذیری رس بنتونیتی در گروه چهارم یعنی نسبتاً آهسته قرار می‌گیرد. مطابق شکل ۶ شاخص

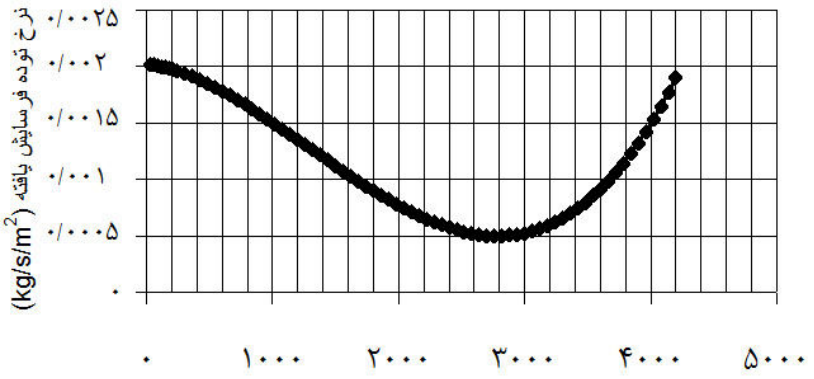


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

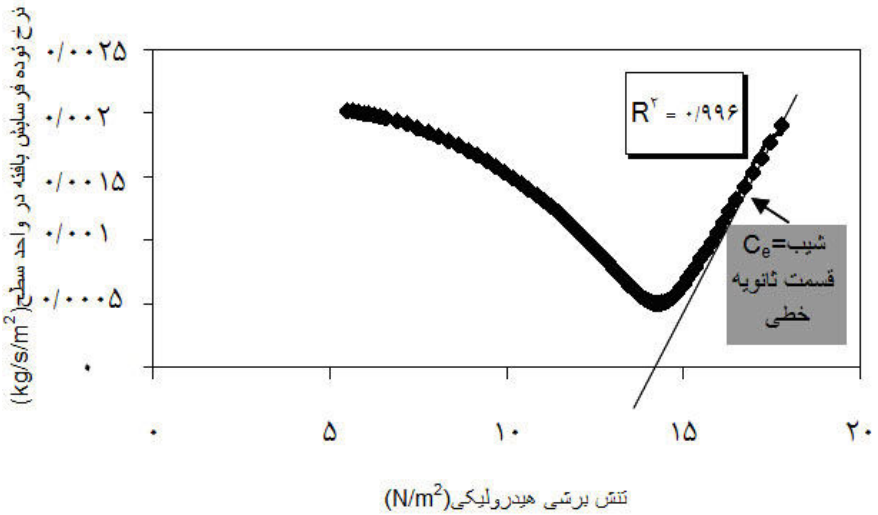
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]

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

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




شکل ۴. نمونه‌ای از نمودارهای نرخ فرسایش در برابر زمان

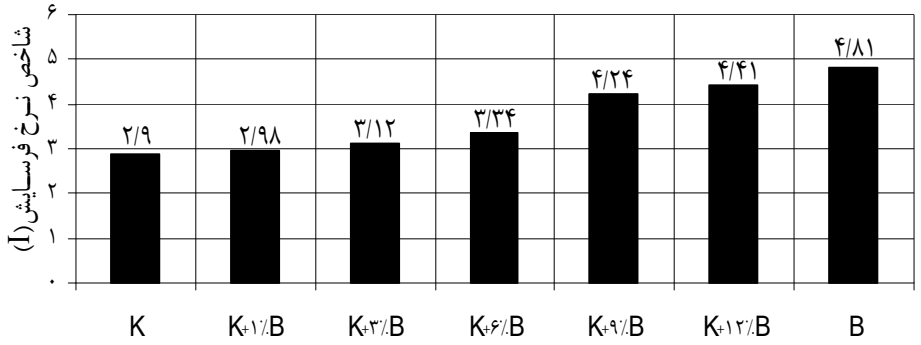



شکل ۵. نمودار تنش برشی هیدرولیکی در برابر نرخ توده فرسایش



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]




ترکیب نمونه های مختلف

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

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

با توجه به نمودار ۶ درصد بهینه بنتونیت، جهت کنترل فرسایش داخلی مصالح در حدود ۹٪ می‌باشد، هرچند که با افزایش بیش از ۹ درصد بنتونیت نیز، فرسایش‌پذیری باز هم کاهش یافته اما به‌طور نسبی بیشترین میزان کاهش فرسایش‌پذیری، با حضور ۹٪ بنتونیت رخ می‌دهد و میزان 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 بنتونیت ۱٪ و ۳٪ ضمن این‌که وضعیت فرسایش‌پذیری مصالح را تا حدودی بهبود می بخشد اما در عین حال نمی‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر باشد. نکته حائز اهمیت این است که آیا پتانسیل تورم مخلوط‌ها به جهت کنترل فرسایش، بیش از حد نبوده که مشکلات متعاقب خاک‌های متورم شونده را ایجاد کند. لذا با انجام یک سری تست پتاسیل 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) (جدول۵)، به دلیل مقادیرکمِ 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٪ بنتونیت 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 به‌دست آمده از آزمایش روی نمونه‌های با تلاش



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

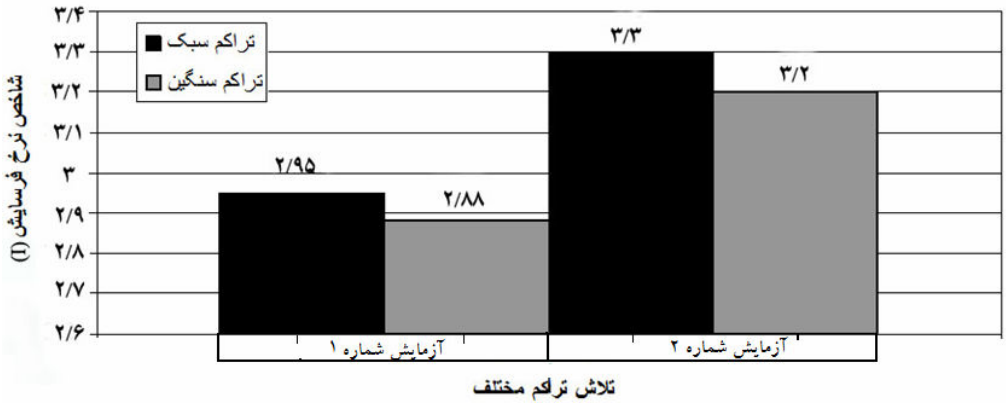
[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]

**جدول۴. پتانسیل تورم مصالح با درصدهای مختلف بنتونیت**

| نوع خاک | پتانسیل تورم |
|---|---|
| کائولینیت+۱٪بنتونیت | **۲/۶** |
| کائولینیت+۳٪بنتونیت | **۳** |
| کائولینیت+۶٪بنتونیت | **۳/۸** |
| کائولینیت+۹٪بنتونیت | **۵/۶** |
| کائولینیت+۱۲٪بنتونیت | **۱۰/۲** |

**جدول۵. طبقه‌بندی پتانسیل تورم مصالح [برون (۳)]**

| پتانسیل تورم | طبقه‌بندی |
|---|---|
| <۱۰ | کم |
| ۱۰ – ۲۰ | متوسط |
| ۲۰ – ۳۰ | زیاد |
| <۱۰ | بسیار زیاد |



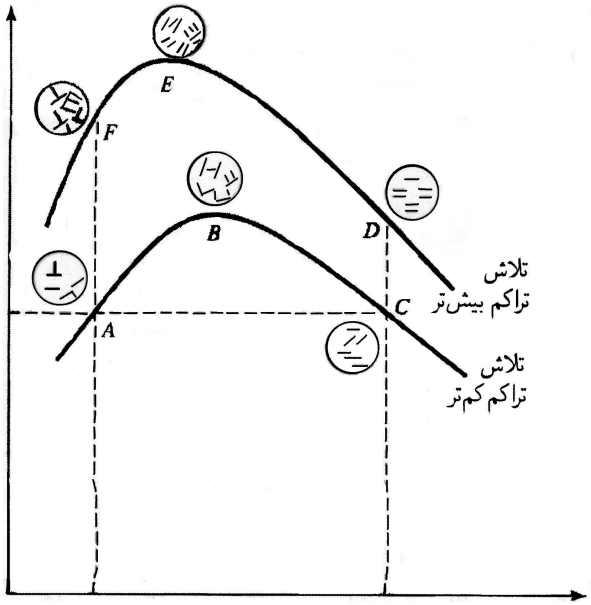

**شکل ۷. نمودار مقایسه‌ای شاخص نرخ فرسایش برای نمونه‌های با درصدهای مختلف بنتونیت**

تراکم متفاوت به‌صورت مقایسه‌ای در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طورکه 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 خود نشان می‌دهند (درحدود ۳٪). که این مقدار تفاوت در تمامی آزمایش‌های انجام شده تقریباً قابل مشاهده بوده و با نتایج یافت شده توسط بارنز و گاتاهورا (۴) روی خاک رس کائولینیتی و با دستگاهی متفاوت نیز تطابق دارد، البته میزان تفاوت فرسایش داخلی در تحقیقات بارنز و گاتاهورا نیز چندان زیاد نبوده و بدلیل عدم استفاده از سیستم طبقه‌بندی پیشنهادی توسط ون و فل (۱۵) به‌صورت کمی



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]




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

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 به‌دلیل 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 هد یکسان 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.

## نتایج

خلاصه نتایج این تحقیق عبارتند از:

۱. رس‌های کائولینیتی نسبت به رس‌های مونت موریلونیت سدیمی فرسایش داخلی شدیدتری را از خود نشان می‌دهند و در حقیقت جزء خاک‌های با فرسایش بسیار سریع محسوب می‌شوند به نحوی که فرسایش‌پذیری کانی کائولینیتی در حدود ۱۰۰ درصد بیشتر از کانی بنتونیت می‌باشد.

۲. استفاده از خاک رس کائولینیتی با PI متوسط (۱۰ – ۲۰) به تنهایی در هسته و پی سدهای خاکی می‌تواند احتمال بروز فرسایش داخلی را افزایش دهد.

۳. کانی بنتونیت تا حد بسیار مناسبی می‌تواند در کنترل فرسایش داخلی مواد به‌کار رفته در ساخت سدهای خاکی مؤثر باشد، به‌طوری‌که شاخص نرخ فرسایش با افزایش درصد بنتونیت از گروه ۲ به ۴ انتقال یافت.

۴. استفاده از بنتونیت 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 بنتونیت زیاد نیست.



[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]

۵. افزودن ۶ تا ۹ ٪ مونت موریلونیت‌های سدیمی می‌تواند بیشترین میزان کاهش فرسایش داخلی مواد را به همراه داشته باشد، در واقع می‌توان استفاده از ۹٪ بنتونیت را به جهت کنترل فرسایش داخلی در مصالح هسته و پی سدهای خاکی به عنوان درصد بهینه بنتونیت بیان کرد.

۶. پتانسیل تورم نمونه‌های ساخته شده از ترکیب کائولینیت و بنتونیت در حد قابل قبولی بوده و مشکلی از نظر تورم بالا ایجاد نمی‌کند به‌جز افزودن ۱۲٪ بنتونیت که پتانسیل تورمی تقریباً بالایی 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.

## 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. 2nd 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 Bareau 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):


[ Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.61.3.0 ]