مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)
دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۱۲۱-۱۲۹، (یادداشت فنی)

Research Note

بررسی تأثیر محصولی از فنّاوری نانو (+CBR) در میزان فرسایش پذیری خاک های رسی با استفاده از آزمایش فرسایش توسط جت آب

سید محمدعلی زمردیان* **(دانشیار)**
بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز
هادی هنرزاد (کارشناس ارشد)
هومن حیدریان (کارشناس ارشد)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان

رفتار فرسایشی خاک‌ها خصوصیتی حائز اهمیت در کلیه‌ی پروژه‌های مرتبط با جریان‌های آب اعم از کانال‌های انتقال آب، سدسازی و سایر سازه‌های هیدرولیکی است. در این مطالعه چگونگی تأثیرگذاری یک افزودنی نوین حاصل از فنّاوری نانو با نام +CBR، در میزان فرسایش‌پذیری خاک‌های رسی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف این ماده تهیه و رفتار فرسایشی آن‌ها با رفتار نمونه‌های تثبیت‌نشده، پس از گذشت بازه‌های زمانی ۷، ۱۴ و ۲۱ روز از تهیه‌ی آن‌ها مقایسه شده است. برای بررسی رفتار فرسایشی نمونه‌ها از آزمایش فرسایش توسط جت آب (JET)[1] استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از آن است که استفاده از +CBR به میزان‌های معادل ۰٫۰۰۵، ۰٫۰۰۷ و ۰٫۰۰۹ لیتر به ازاء ۰٫۱۵ مترمکعب خاک مورد آزمایش، باعث پیدایش رفتارهای فرسایشی متفاوتی با گذشت زمان می‌شود. تفاوت این رفتارها در چگونگی تغییرات منحنی‌های فرسایش نمونه‌ها و مقادیر متوسط ضریب فرسایش‌پذیری (k_d) و تنش برشی بحرانی (τ_c) آن‌ها مشهود است. برای مثال استفاده از این مقادیر از ماده به ترتیب ۱۱۸، ۱۴ و ۰٫۵ برابرشدن میزان تنش برشی بحرانی نمونه‌های تثبیت‌شده‌ی ۲۱ روزه در مقایسه با نمونه‌ی تثبیت‌نشده‌ی ۲۱ روزه را نتیجه داده است.

واژگان کلیدی: فرسایش، تثبیت، فنّاوری نانو، سی بی آر پلاس (+CBR)، فرسایش توسط جت آب (JET).

mzomorod@sshirazu.ac.ir
y.honarzad@gmail.com
hheidarianaa@yahoo.com

۱. مقدمه

احداث سازه‌های خاکی به‌منظور کنترل و انتقال آب مانند سدها و یا کانال‌ها، سابقه‌یی دیرینه دارد و شسته‌شدن خاک تشکیل‌دهنده‌ی قسمت‌های مختلف این سازه‌ها و انتقال آن بر اثر جریان‌های آب از جمله مسائل پیش رو در هنگام رویارویی با مشکلات این سازه‌ها و علل بسیاری از تخریب‌ها و پیامدهای حاصل از آن‌هاست.

به منظور تشریح مکانیزم از دست‌رفتن ذرات خاک بر اثر جریان آب، از تعاریف مختلفی استفاده می‌شود. از میان این تعاریف، «فرسایش خاک» بسته به منبع ذکرکننده‌ی آن ممکن است به‌صورت‌های مختلفی توصیف شود. در هر حال فرسایش خاک تشریح‌کننده‌ی یک مؤلفه از تمامی مکانیزم‌های منجر به حرکت و انتقال ذرات خاک و رسوبات بر اثر جریان متمرکز آب است.

میزان فرسایش‌پذیری یک خاک به پارامترها و عوامل مختلفی مانند: سرعت جریان، شعاع هیدرولیکی، عمق جریان، زبری، میزان تراکم و رطوبت خاک بستگی دارد. این تذکر لازم است که در اغلب مطالعات صورت‌گرفته در رفتار فرسایشی خاک‌ها بر اثر جریان متمرکز، دو پارامتر k_d و τ_c، که به ترتیب ضریب فرسایش‌پذیری خاک در برابر جریان متمرکز و تنش برشی بحرانی هستند، به‌عنوان پارامترهای اصلی تشریح‌کننده‌ی رفتار فرسایشی خاک در نظر گرفته می‌شوند.[۱و۲] بر این اساس دپارتمان کشاورزی ایالات متحده‌ی آمریکا[2] (۲۰۱۱)، خاک‌ها را براساس k_d آن‌ها به دسته‌های مختلفی به‌صورت ارائه‌شده در جدول ۱ تقسیم می‌کند.[۳]

به منظور بررسی رفتار فرسایشی خاک‌ها، تخمین و تعیین مقادیر پارامترهای مربوط، روش‌های مختلفی موجود است، که از میان آن‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد:

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۷/۱، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۰/۴، پذیرش ۱۳۹۲/۱۰/۱۴.

جدول ۱. دسته‌بندی کیفی میزان فرسایش‌پذیری بر اساس k_d (دپارتمان کشاورزی ایالات متحده‌ی آمریکا، ۲۰۱۱).

k_d	توصیف
> ۱۰	به شدت فرسایش‌پذیر
۱۰-۱	بسیار فرسایش‌پذیر
۱-۰/۱	نسبتاً فرسایش‌پذیر
۰/۱-۰/۰۱	نسبتاً مقاوم در برابر فرسایش
۰/۰۱-۰/۰۰۱	بسیار مقاوم در برابر فرسایش
$< ۰/۰۰۱$	به شدت مقاوم در برابر فرسایش

- استفاده از معادلات تجربی ارائه‌شده بر پایه‌ی مطالعات آماری.
- استفاده از مدل‌های فرسایشی مختلف موجود مانند: EUROSEM [۳]، WEPP [۴]، GWLF [۵]، SWAT [۶] و CONCEPTS [۷].[۲و۴]
- آزمایش فرسایش سوراخ،[۸] قابل انجام بر نمونه‌های بازسازی‌شده.
- آزمایش پین هول،[۹] قابل انجام بر نمونه‌های بازسازی‌شده.
- آزمایش فرسایش توسط جت آب، قابل انجام در محل و در محیط آزمایشگاه.
- آزمایش‌ها در مقیاس واقعی مانند روش‌های ارائه‌شده در استانداردهای ASTM شماره‌های: D۷۱۰۱-۰۸، D۷۲۰۷-۰۵، D۶۴۵۹، D۶۴۶۰ و D۷۲۰۸.[۵]

پیامدهای ناشی از فرسایش خاک در سازه‌های خاکی را می‌توان به‌طور کلی از دو بُعد فرسایشی و تولید رسوب مورد بررسی قرار داد. پاره‌یی از این پیامدها از این قرار هستند:[۱،۶-۹]

- رسوب‌گذاری در مخازن سدها و کاهش عمر مفید آنها.
- شسته‌شدن تاج سدهای خاکی در اثر سر ریزشدن آب و درنهایت، تخریب کلی سد.
- تخریب سدها در اثر فرسایش ناشی از نشت متمرکز در دیواره‌ها و هسته‌ی سد.
- تغییر پارامترهای آب جاری در کانال‌های خاکی مانند: میزان مواد معلق و محلول در آب و در پاره‌یی موارد نامناسب‌سازی آن جهت مصارف خاص.
- افزایش میزان نشت از کانال در اثر کاهش ضخامت دیواره‌ها و کف کانال.
- کاهش ظرفیت عبور سیلاب در کانال‌ها و در نتیجه افزایش احتمال بروز سیل.
- ایجاد خسارت در تجهیزات نیروگاهی، ایستگاه‌های پمپاژ و سازه‌های آبگیری.
- رسوب‌گذاری در کانال‌ها و افزایش هزینه‌های نگهداری آنها و افزایش توان تخریبی کانال‌ها در زمان وقوع سیل و درنتیجه افزایش میزان خسارات در تمامی ابعاد اقتصادی، مالی و جانی.

پژوهش‌ها حاکی از آن است که حدود ۳۴٪ خرابی‌های آب‌بندها و سدهای خاکی در ایالات متحده بر اثر فرسایش تاج سد هنگام سر ریزشدن[۱۰] آب صورت گرفته است. به‌عنوان مثال در طوفان کاترینا در ایالات متحده‌ی آمریکا که منجر به مرگ حدود ۱۳۰۰ نفر، بی‌خانمان‌شدن حدود ۵۰۰۰۰۰ نفر از اهالی منطقه و خسارت مالی در حدود ۱۰۰ بیلیون دلار شده است، حجم وسیعی از خرابی‌های به‌وجودآمده ناشی از فرسایش دیواره‌ی رودخانه‌ها و کانال‌های انتقال آب و همچنین شسته‌شدن آب‌بندهای احداث‌شده بر رودخانه‌ها و مسیرهای سیلاب در اثر سرریزشدن و فرسایش یافتن آن‌هاست.[۱۰]

لذا با توجه به اهمیت تشریح‌شده‌ی فرسایش خاک، پژوهشگران همواره در صدد دستیابی به روش‌های نوین کنترل و کاهش میزان فرسایش‌پذیری انواع مختلف خاک‌ها بوده‌اند. از میان روش‌های مختلف ارائه‌شده در جهت کنترل رفتار فرسایشی خاک، استفاده از افزودنی‌ها و تثبیت‌کننده‌های مختلف از جمله مرسوم‌ترین آن‌ها به شمار می‌رود.[۶،۱۱و۱۲]

با پیشرفت علم و دستیابی به فنّاوری نانو، استفاده از افزودنی‌های حاصل از این فنّاوری جهت تثبیت خاک‌ها و بهسازی رفتارهای مختلف آن‌ها و برخورداری از مزایای این محصولات جدید در مقایسه با روش‌های سنتی، توجه دانشمندان و پژوهشگران مختلف را به خود جلب کرده است. از میان فرآورده‌های نانوتکنولوژی مورد استفاده جهت بهسازی خصوصیات مختلف خاک‌ها می‌توان به Zycosoil، Terrasil، System Soil، EBS، Techni Soil و +CBR اشاره کرد. ایجاد لایه‌های نفوذناپذیر در خاک، به‌عنوان مثال در اساس و زیراساس جاده‌ها و در سطح جاده‌های خاکی، افزایش مقاومت CBR خاک‌های ضعیف و استفاده از خاک‌های محلی جهت احداث جاده‌های دسترسی، باند فرودگاه‌ها و پارکینگ‌های محلی، کاهش میزان گرد و غبار حاصل از تردد وسائط نقلیه در جاده‌های خاکی، کاهش میزان فرسایش دیواره‌ی کانال‌های خاکی انتقال آب، افزایش مقاومت کششی، تراکم‌پذیری و حالت خمیری خاک و کاهش و یا افزایش میزان نفوذپذیری آن بسته به نوع ماده‌ی مورد استفاده و خاک از جمله نتایج حاصل از استفاده از این محصولات با اهداف و تحت شرایط متفاوت هستند.

با توجه به مسائل ذکرشده، در این پژوهش چگونگی تأثیرگذاری +CBR به عنوان یکی از افزودنی‌های نوین حاصل از فنّاوری نانو در خصوصیات فرسایشی خاک رسی مورد بررسی قرارگرفته است، که در ادامه به شرح مواد، روش‌ها و نتایج حاصل از مطالعات پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. ماده‌ی مورد استفاده

+CBR که با نام کان اید[۱۱] نیز شناخته می‌شود، تثبیت‌کننده‌یی مناسب برای خاک‌های آنیونی است که باعث بهبود پارامترهای مقاومتی بسیاری از خاک‌های از جنس رس یا لای می‌شود. این محصول ترکیبی از مشتقات سنتزی و مایعی به رنگ قهوه‌یی تیره است و با کاهش حرکت یون‌ها در خاک و تبادل آن‌ها باعث حذف تمایل جذب سطحی آب توسط ذرات خاک و تغییر خواص آن‌ها از حالت آب‌دوست به آب گریز می‌شود، که نتیجه‌ی آن خاکی با حساسیت کمتر نسبت به آب و با شرایط بهتر قفل و بست‌شدن بین‌ذره‌یی است.[۱۳] این محصول در آمریکای شمالی و با هدف ارتقاء خصوصیات مکانیکی خاک‌ها و مناسب‌سازی و استفاده از خاک‌های محل پروژه در عملیات ساخت تولید شده و درکشورمان توسط شرکت ایرامونت در تهران وارد شده و در دسترس است.

پاره‌یی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی این ماده به شرح موجود در جدول ۲ است.[۱۴]

برای استفاده از این ماده ابتدا باید مقدار مورد نیاز از آن به‌منظور افزودن به خاک با توجه به نوع خاک تعیین شود، که برای این منظور از آزمایش واکنش‌پذیری استفاده می‌شود. در این آزمایش از اسید هیدروکلریک جهت تعیین میزان واکنش‌پذیری خاک و در نتیجه‌ی آن تعیین میزان +CBR مورد نیاز جهت تثبیت آن استفاده می‌شود. پس از تعیین میزان ماده‌ی مورد نیاز، این ماده به آب مورد استفاده جهت

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی +CBR.

۱. شناسایی و موارد استفاده	
شماره MSDS	Con-Aid*۹۲٫۰۵٫۱۸
گروه محصول	مواد فعال در سطح
مورد مصرف	تثبیت‌کننده‌ی خاک
۲. مشخصات فیزیکی	
ظاهر	مایع لزج به رنگ قهوه‌یی تیره
بو	بدون بو
دمای انجماد	کمتر از ۱۰ درجه سانتی‌گراد
دمای جوش	۱۰۰ درجه سانتی‌گراد
درصد مواد فرار	٪۸۳ حجمی
pH	۳٫۱
وزن مخصوص	۱٫۰۵
نسبت آب/روغن	٪۱۰۰ قابل حل در آب
درصد حلالیت (۲۰ درجه c)	٪۱۰۰
۳. مشخصات واکنش‌پذیری	
پایداری شیمیایی	بلی، پایدار
ناسازگاری با سایر مواد	بلی، سنگ‌های قلیایی و اکسیدکننده‌ها

افزایش میزان رطوبت خاک تا مقدار بهینه‌ی آن ۱ ± ٪ اضافه می‌شود و پس از افزودن محلول حاصل به خاک، کوبش آن به‌صورت معمول صورت می‌گیرد. پس از کوبش خاک، بسته به دما و شرایط آب و هوایی منطقه، تا مدت ۵ الی ۱۰ روز برای جلوگیری از خشک‌شدن سریع سطح خاک و عمل‌آوری خاک تثبیت‌شده، روی سطح آن آب پاشیده می‌شود.[۱۵]

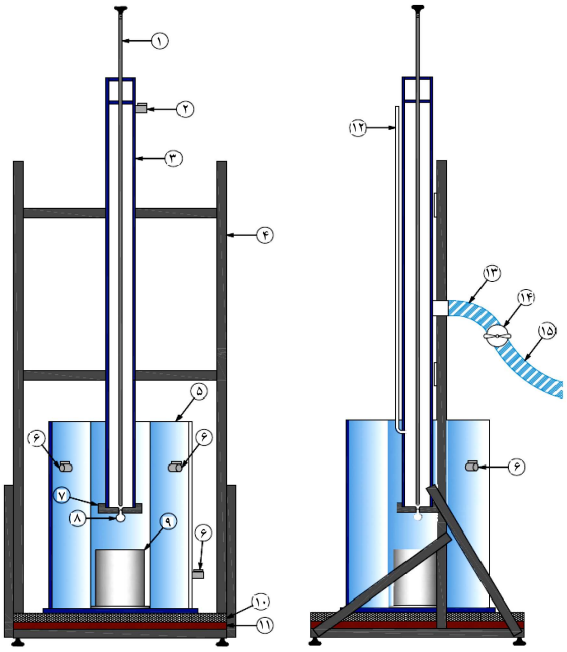
این تذکر لازم است که اطلاعات جامعی از چگونگی تأثیرگذاری این محصول در پارامترهای مختلف انواع خاک‌ها در ادبیات فنی موجود نیست و اندک مطالعات موجود محدود به پارامترها و انواع خاص خاک‌ها هستند. از این رو، با توجه به تأثیرگذاربودن این محصول در چگونگی قفل و بست شدن ذرات و تغییر خصوصیات تراکمی خاک و میزان حساسیت آن به آب و با توجه به این مسئله که درجه‌ی تراکم خاک، میزان نفوذپذیری و درجه‌ی حساسیت آن به آب از جمله مسائل حائز اهمیت در تعیین رفتار فرسایشی خاک‌ها در برابر آب هستند، در این مطالعه تأثیر این محصول در خصوصیات فرسایشی خاک حاوی رس مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲.۲. خاک مورد استفاده

در این پژوهش از مصالح عبوری از الک شماره‌ی ۴ نمونه‌یی از خاک مورد استفاده در پروژه‌ی احداث کانال خاکی بند امیر در منطقه‌ی درودزن واقع در استان فارس استفاده شده است، که مشخصات آن به شرح موجود در جدول ۳ است. علت استفاده از این خاک بررسی تأثیر محصول نامبرده در میزان فرسایش‌پذیری نمونه‌ی خاک مورد استفاده در کانال خاکی انتقال آب، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مشکلات این نوع کانال‌ها و استفاده از آن در قسمتی از کانال و بررسی تأثیرات آن در مقیاس واقعی است. برای استفاده از این خاک در دستگاه آزمایش فرسایش و کاهش عوامل خطای احتمالی ناشی از وجود مصالح با ابعاد بزرگ در نمونه‌ی تحت آزمایش و با توجه به تأثیرگذاربودن +CBR در بخش ریزدانه‌ی خاک، مصالح بزرگ‌تر از الک شماره‌ی ۴ در این خاک حذف شده‌اند.

جدول ۳. مشخصات نمونه‌ی خاک مورد استفاده در این پژوهش.

وزن مخصوص (Gs)	۲٫۶۹۲
درصد واگرایی	٪۶۵٫۱۲
D_{60} (mm)	۰٫۰۸
D_{10} (mm)	۰٫۰۰۱
حد روانی (LL)	٪۳۵
شاخص خمیری (PI)	٪۱۶٫۶
رطوبت بهینه (w_{opt})	٪۱۵٫۵
بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک ($\gamma_{d\,max}$) (gr/cm^3)	۱٫۸۲۷
تیپ خاک با توجه به سیستم طبقه‌بندی USCS	CL



۱ میله ی اندازه گیری عمق فرسایش
۲ شیر خروج هوا
۳ لوله ی جت
۴ فریم دستگاه
۵ مخزن آب غوطه وری نمونه
۶ خروجی آب
۷ صفحه نازل آب
۸ مسدود کننده نازل
۹ قالب حاوی نمونه ی خاک
۱۰ صفحه ی یونولیت
۱۱ صفحه از جنس تفلون
۱۲ پیزومتر قرائت ارتفاع اب در لوله ی جت
۱۳ ورودی آب به لوله ی جت
۱۴ شیر کنترل جریان ورودی
۱۵ به طرف مخزن آب

شکل ۱. شماتیک دستگاه آزمایش فرسایش توسط جت آب ساخته‌شده.

۳.۲. آزمایش فرسایش‌پذیری

برای اندازه‌گیری میزان فرسایش‌پذیری نمونه‌ها از آزمایش فرسایش توسط جت آب (JET) استفاده شده است، که مشخصات دستگاه مورد استفاده و روش انجام آن به‌صورت تشریح‌شده در استاندارد ASTM D ۵۸۵۲-۹۵ است.[۱۶] این تذکر لازم است که دستگاه مورد استفاده در استاندارد ASTM ابعاد نسبتاً بزرگی دارد. با توجه به این مسئله، هانسن و کوک (۲۰۰۴) در گزارشی جزئیات ساخت دستگاهی در ابعاد کوچک‌تر همراه با ضرایب و روابط قابل استفاده برای آن را ارائه کرده‌اند، که در این پژوهش، با توجه به در دسترس‌نبودن دستگاه مذکور، اقدام به ساخت آن براساس گزارش ارائه‌شده توسط این پژوهشگران شده است.[۱۷]

شماتیک و معرفی قسمت‌های مختلف دستگاه ساخته‌شده در شکل ۱ و تصاویری از آن در شکل ۲ ارائه شده‌اند.

روش کار دستگاه به این صورت است که ابتدا نمونه درون قالب کوبیده و سپس

الف) نمای کلی دستگاه از روبرو؛ ب) نمای کلی دستگاه از بالا؛ ج) نمای محفظه ی غوطه وری دستگاه.

شکل ۲. تصاویری از دستگاه آزمایش فرسایش توسط جت آب ساخته‌شده.

درون مخزن غوطه‌وری زیر نازل قرار داده می‌شود. پس از آن میله‌ی اندازه‌گیری عمق فرسایش تا لحظه‌ی برخورد با سطح نمونه پایین برده شده و سپس طول باقیمانده‌ی آن در بالای لوله‌ی جت اندازه‌گیری می‌شود. پس از پایان قرائت میله بالا برده و ثابت می‌شود. حال سطح نمونه توسط صفحه‌یی پوشانده و با بازکردن شیر ورودی به لوله‌ی جت و اجازه‌ی خروج آب از نازل، مخزن غوطه‌وری تا ارتفاع لازم، به گونه‌یی که نمونه و نازل آب در زیر آب قرار گیرند، پر می‌شود. سپس با استفاده از تنظیم شیرهای خروجی، ارتفاع آب در مخزن غوطه‌وری ثابت می‌شود. پس از آن توسط شیر کنترل جریان ورودی آب، ارتفاع آب در لوله‌ی جت به میزان موردنظر رسانیده و با ثابت‌کردن این ارتفاع، برداشتن صفحه‌ی محافظ از روی نمونه و ثبت زمان، آزمایش شروع می‌شود. سپس در زمان‌های موردنظر میله‌ی اندازه‌گیری عمق فرسایش تا برخورد به سطح نمونه پایین آورده شده و طول باقیمانده‌ی آن در بالای لوله‌ی جت اندازه‌گیری می‌شود، که در این صورت تفاوت قرائت اولیه‌ی میله‌ی اندازه‌گیری عمق فرسایش با قرائت بعدی، بیان‌کننده‌ی عمق فرسایش خواهد بود.

تحلیل داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش جت، براساس این فرضیه که مقادیر بیشینه‌ی تنش منجر به بیشترین میزان فرسایش در زیر جت وارده بر نمونه می‌شود، صورت می‌گیرد. از این رو باید همواره مقدار تنش بیشینه‌ی ایجادشده در ناحیه‌ی برخورد جت آب به نمونه، مقداری مشابه با میزان تنش مربوط به شرایط طراحی موردنظر باشد. با توجه به این موضوع و شکل ۳، به منظور انجام تنظیم‌های مربوط به دستگاه، تنش اولیه (τ_i) در ناحیه‌ی بر خورد جت را می‌توان با استفاده از روابط ۱ الی ۴ محاسبه کرد:[۱۷و۱۸]

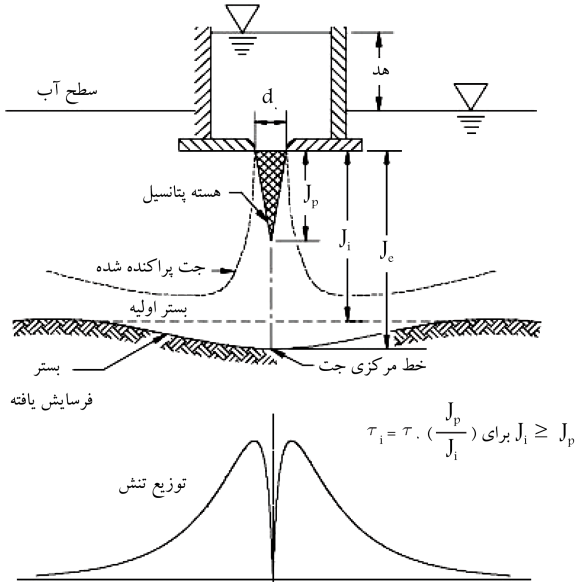
$$\tau_i = \tau_\circ \left(\frac{J_p}{J_i}\right)^2 \qquad (۱)$$

$$J_p = C_d d_\circ \qquad (۲)$$

$$\tau_\circ = C_f \rho U_\circ^2 \qquad (۳)$$

$$U_\circ = \sqrt{2gh} \qquad (۴)$$

که در آن‌ها، τ_i بیشینه‌ی تنش مرزی اولیه پیش از شروع فرسایش، $\tau_\circ$ تنش بیشینه بر اثر سرعت جت در نازل، J_p طول هسته‌ی پتانسیل، J_i ارتفاع اولیه‌ی صفحه‌ی نازل، C_d ضریب تخلیه، $d_\circ$ قطر نازل، C_f ضریب اصطکاک، ρ چگالی سیال، $U_\circ$ سرعت در نازل جت، g ضریب شتاب ثقل و h اندازه‌ی هد تفاضلی هستند. طول هسته‌ی پتانسیل (J_p) در واقع بیانگر فاصله‌یی از صفحه‌ی نازل است که



شکل ۳. پارامترها و چگونگی توزیع تنش جت دایره‌یی مستغرق در آب (هانسن و کوک، ۲۰۰۴).

سرعت جت در خط مرکزی آن کماکان برابر با سرعت آن در صفحه‌ی نازل است. این فاصله عموماً تا ۶ برابر قطر نازل ادامه پیدا می‌کند.

در آزمایش فرسایش جت، با پیش‌روی آزمایش، سطح نمونه در ناحیه‌ی برخورد جت آب تا زمان رسیدن به یک عمق حدی (J_e) فرسایش می‌یابد و شسته می‌شود. در تحلیل این آزمایش دو فرضیه در نظر گرفته می‌شود. نخست اینکه عمق حدی، عمق فرسایشی است که در آن تنش مرزی موجود قادر به فرسایش بیشتر رو به پایین نمونه نیست و دیگر اینکه، نرخ تغییرات عمق فرسایش ($\frac{dJ}{dt}$) قبل از رسیدن به عمق حدی، تابعی از تنش بیشینه‌ی مرزی و ضریب فرسایش‌پذیری است.

ازاین رو جهت تحلیل داده‌های حاصل از آزمایش جت و تعیین مقادیر پارامترهای تنش مازاد نمونه‌ها (k_d و τ_c)، از یک روند دو مرحله‌یی به این صورت استفاده می‌شود:

ـ تنش بحرانی (τ_c) از رابطه‌ی ۹ براساس عمق حدی (J_e) که براساس رابطه‌ی

۵ و ۸ محاسبه می‌شود. دشواری همراه با تخمین عمق حدی این است که مدت زمان موردنیاز برای رسیدن به شرایط حدی ممکن است بسیار طولانی باشد. از این رو جهت تخمین این عمق، از داده‌های به دست‌آمده‌ی عمق فرسایش در برابر زمان و یک تابع هذلولی ارائه‌شده توسط بلایسدل و همکاران (۱۹۸۱) استفاده می‌شود.[۱۹] فرم کلی این رابطه همراه با یک خط مجانب جهت اندازه‌گیری عمق نهایی فرسایش به‌صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$x = [(f - f_\circ)^2 - A^2]^{0.5} \qquad (۵)$$

که در آن، A مقدار محورهای نیمه اُریب و نیمه مزدوج هذلولی است f و $f_\circ$ و x از روابط ۶ و ۷ به دست می‌آیند:

$$f = \log\left(\frac{J}{d_\circ}\right) - \log\left(\frac{U_\circ t}{d_\circ}\right) \qquad (۶)$$

$$f_\circ = \log\left(\frac{J_e}{d_\circ}\right) \qquad (۷)$$

$$x = \log\left(\frac{U_\circ t}{d_\circ}\right) \qquad (۸)$$

که در آن، $d_\circ$ قطر نازل، $U_\circ$ سرعت در نازل جت، t زمان قرائت داده‌هاست. پس از محاسبه‌ی عمق حدی (J_e)، تنش بحرانی (τ_c) با استفاده از رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$\tau_c = \tau_\circ \left(\frac{J_p}{J_e}\right)^2 \qquad (۹)$$

در رابطه‌ی ۱۰ که T_r خود برحسب (k_d) می‌باشد براساس عمق فرسایش اندازه‌گیری‌شده، زمان، تنش بحرانی از پیش اندازه‌گیری‌شده و تابع زمان بدون بُعد (مطابق رابطه‌ی ۱۰) محاسبه می‌شود:

$$T^* = -J^* + 0.5 \ln\left(\frac{1 + J^*}{1 - J^*}\right)\Bigg|_{J_1^*}^{J^*} \qquad (۱۰)$$

T^* زمان بدون بُعد(t_m/T_r)، t_r یک زمان مرجع $[J_e/(k_d\ \tau_c)]$ ، J^* عبارت فرسایش بدون بُعد (J/J_e)، J_i^* عبارت فرسایش بدون بُعد در J_i/J_e، J فاصله‌ی بین نازل و عمق قسمت فرسایش‌یافته در خط مرکزی نازل و J_i فاصله‌ی اولیه‌ی نازل از سطح نمونه است.

۳. تهیه‌ی نمونه‌ها

انجام آزمایش واکنش‌پذیری روی نمونه‌ی خاک، عدد ۰٫۰۰۷ را به دست داده است. این عدد به این معنی است که برای تثبیت حجم خاکی معادل با ۰٫۱۵ مترمکعب (۱ × ۱ × ۰٫۱۵ متر) میزان ۷ میلی‌لیتر از +CBR نیاز است. با توجه به این مسئله، در این پژوهش تعداد کل ۲۴ نمونه به این شرح تهیه شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند:

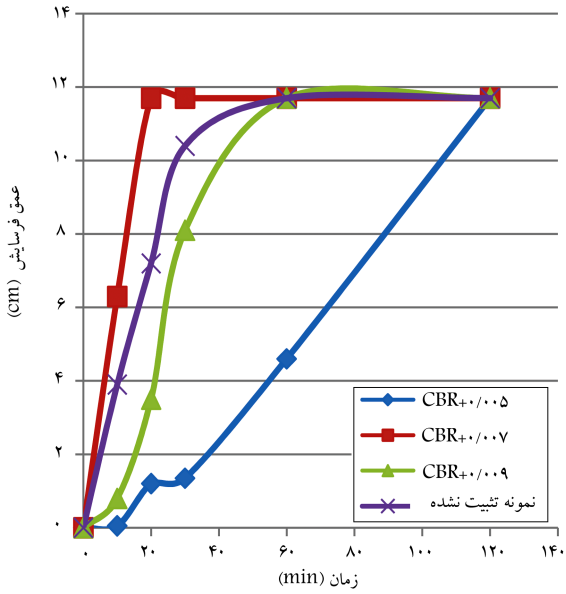
- ۳ جفت نمونه‌ی تثبیت‌شده با استفاده از +CBR به میزان معادل ۰٫۰۰۵ لیتر به ازاء ۰٫۱۵ مترمکعب خاک؛ که نمونه‌ی اول جهت بررسی تأثیر ۷، ۱۴ و ۲۱ روزه این میزان ماده در خصوصیات فرسایشی خاک تحت شرایط یکسان آزمایش جت؛ و نمونه‌ی دوم به‌عنوان نمونه‌ی شاهد، جهت تکرار آزمایش و صحت‌سنجی نتایج به دست‌آمده برای نمونه‌ی اول است.
- ۳ جفت نمونه‌ی تثبیت‌شده با استفاده از +CBR به میزان معادل ۰٫۰۰۷ لیتر به ازاء ۰٫۱۵ مترمکعب خاک جهت انجام آزمایش‌های فوق‌الذکر.
- ۳ جفت نمونه‌ی تثبیت‌شده با استفاده از +CBR به میزان معادل ۰٫۰۰۹ لیتر به ازاء ۰٫۱۵ مترمکعب خاک جهت انجام آزمایش‌های فوق‌الذکر.
- ۳ جفت نمونه‌ی متشکل از خاک تثبیت‌نشده جهت مقایسه‌ی میزان فرسایش‌پذیری نمونه‌های تثبیت‌شده ۷، ۱۴ و ۲۱ روزه با مقادیر مختلف +CBR.

به‌منظور تهیه‌ی کلیه‌ی نمونه‌ها به‌صورت تشریح‌شده به روش استاندارد، تهیه‌ی نمونه‌ی آزمایش تراکم به روش پروکتور استاندارد عمل شده است،[۲۰] با این تفاوت که به جای استفاده از آب برای افزایش میزان رطوبت خاک تا مقدار بهینه‌ی آن، از محلول حاصل از اضافه‌کردن مقدار موردنظر ماده در آب استفاده شده است. به منظور جلوگیری از خشک‌شدن سریع سطح نمونه‌های حاصل، نمونه‌ها پس از کوبیده‌شدن در قالب دستگاه آزمایش فرسایش جت، تا مدت ۵ روز با پاشیدن ۱۰۰ میلی‌لیتر آب بر سطح آن‌ها عمل‌آوری شده و سپس در زمان مقرر مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

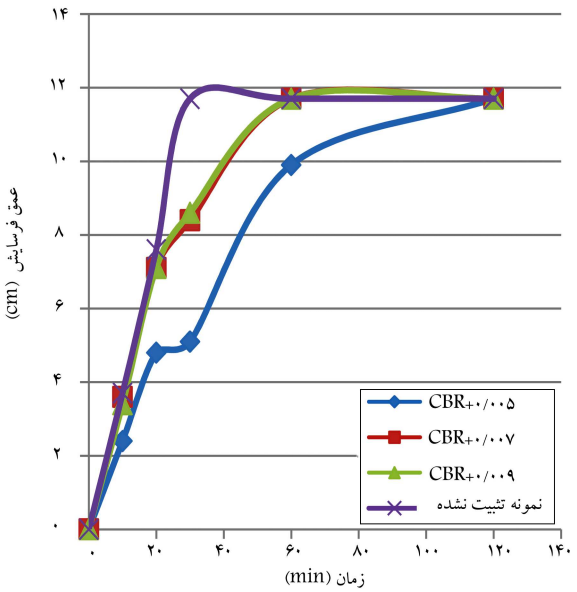
۴. نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش فرسایش توسط جت آب بر نمونه‌های معمولی و تثبیت‌شده با استفاده از مقادیر مختلف +CBR پس از گذشت ۷، ۱۴ و ۲۱ روز از زمان تهیه‌ی آن‌ها و صحت‌سنجی در شکل‌های ۴ الی ۶ و همچنین مقادیر τ_c و k_d برای نمونه‌های مذکور در جدول‌های ۴ الی ۶ ارائه شده‌اند.

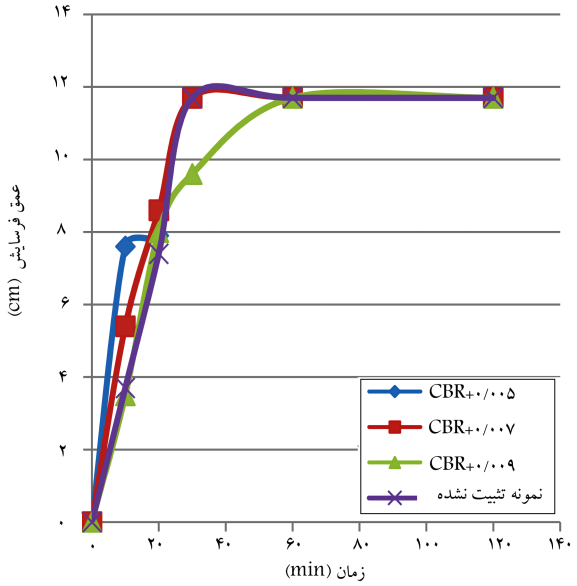
مقایسه‌ی مقادیر k_d به‌دست‌آمده برای نمونه‌های تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده با جدول ارائه‌شده توسط دپارتمان کشاورزی ایالات متحده‌ی آمریکا حاکی از آن است که تمامی این نمونه‌ها در دسته‌ی بسیار فرسایش‌پذیر قرار می‌گیرند. به‌عبارت



شکل ۴. روند فرسایشی یک نمونه‌ی تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت‌شده با استفاده از +CBR با مقادیر معادل ۰٫۰۰۵، ۰٫۰۰۷ و ۰٫۰۰۹ پس از گذشت ۷ روز از زمان تهیه‌ی آن‌ها.



شکل ۵. روند فرسایشی یک نمونه‌ی تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت‌شده با استفاده از CBR+ با مقادیر معادل ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۰۹ پس از گذشت ۱۴ روز از زمان تهیه‌ی آن‌ها.



شکل ۶. روند فرسایشی یک نمونه‌ی تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت‌شده با استفاده از CBR+ با مقادیر معادل ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۷ و ۰/۰۰۹ پس از گذشت ۲۱ روز از زمان تهیه‌ی آن‌ها.

جدول ۴. مقادیر τ_c و k_d برای یک نمونه‌ی تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف CBR+ پس از گذشت ۷ روز از زمان تهیه‌ی نمونه‌ها.

نوع نمونه	τ_c (N/m^2)	k_d (cm^3/(N-s))
CBR+ ۰/۰۰۵	$۲/۷۲ \times ۱۰^{-۱۰}$	۲/۸۶
CBR+ ۰/۰۰۷	$۷/۷۰ \times ۱۰^{-۲}$	۵/۰۲
CBR+ ۰/۰۰۹	$۲/۶۹ \times ۱۰^{-۹}$	۳/۲۲
تثبیت‌نشده	$۲/۸۲ \times ۱۰^{-۴}$	۳/۶۶

جدول ۵. مقادیر τ_c و k_d برای یک نمونه‌ی تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف CBR+ پس از گذشت ۱۴ روز از زمان تهیه‌ی نمونه‌ها.

نوع نمونه	τ_c (N/m^2)	k_d (cm^3/(N-s))
CBR+ ۰/۰۰۵	$۱/۳۱ \times ۱۰^{-۶}$	۲/۵۷
CBR+ ۰/۰۰۷	$۷/۸۶ \times ۱۰^{-۵}$	۳/۲۶
CBR+ ۰/۰۰۹	$۹/۰۷ \times ۱۰^{-۵}$	۳/۴۶
تثبیت‌نشده	$۱/۰۰ \times ۱۰^{-۳}$	۴/۱۰

جدول ۶. مقادیر τ_c و k_d برای یک نمونه‌ی تثبیت‌نشده و نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف CBR+ پس از گذشت ۲۱ روز از زمان تهیه‌ی نمونه‌ها.

نوع نمونه	τ_c (N/m^2)	k_d (cm^3/(N-s))
CBR+ ۰/۰۰۵	$۵/۹۰ \times ۱۰^{-۲}$	۴/۲۴
CBR+ ۰/۰۰۷	$۷/۰۰ \times ۱۰^{-۳}$	۴/۲۵
CBR+ ۰/۰۰۹	$۲/۱۳ \times ۱۰^{-۴}$	۳/۵۵
تثبیت‌نشده	$۴/۹۷ \times ۱۰^{-۴}$	۴/۰۹

دیگر، افزودن مقادیر مختلف CBR+ به نمونه‌ی خاک مورد آزمایش منجر به تغییر دسته‌بندی کیفی آن از نقطه‌نظر میزان فرسایش‌پذیری نشده است.

با توجه به نتایج آزمایش نمونه‌های ۷ روزه (شکل ۴ و جدول ۴) مشاهده می‌شود که افزایش میزان ماده در این نمونه‌ها منجر به پیدایش روند مشخصی در چگونگی تغییرات رفتار فرسایشی نمونه‌ها نشده است. برای مثال از نقطه‌نظر مقاومت در برابر فرسایش، نمونه‌ی تثبیت‌شده با CBR+ به میزان معادل ۰/۰۰۵ مقاوم‌ترین و در سوی دیگر، نمونه‌ی تثبیت‌شده با CBR+ معادل ۰/۰۰۷ ضعیف‌ترین نمونه است.

در جستجوی عوامل مؤثر در رفتار فرسایشی متغیر نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف CBR+ دو پیامد متفاوت ناشی از عملکرد CBR+ بر خاک در نظر گرفته‌شده و با بررسی هم‌زمان آن‌ها به تشریح چگونگی پیدایش این رفتارهای مغایر پرداخته شده است.

نخست اینکه استفاده از مقادیر مختلف CBR+ باعث تغییر میزان نفوذپذیری خاک و تمایل آن به جذب آب چه در مقیاس بین‌ذره‌یی و چه در مقیاس بین لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی کانی رس می‌شود. این تغییرات منجر به تفاوت در نرخ جذب آب توسط نمونه‌ها هنگام عمل‌آوری آن‌ها، میزان رطوبت خارج‌شده از نمونه در بازه‌ی زمانی ۷ روزه و همچنین نرخ جذب آب توسط آن هنگام انجام آزمایش می‌شود. مجموعه‌ی این عوامل در نهایت باعث متفاوت‌بودن میزان تغییرات رطوبت نمونه‌های مختلف از زمان آماده‌سازی آن‌ها تا زمان شروع آزمایش می‌شوند و این در حالی است که میزان رطوبت خاک تأثیر به‌سزایی در رفتار فرسایشی آن دارد.

از سوی دیگر افزودن مقادیر مختلف CBR+ به خاک باعث تغییر در میزان متراکم‌شدن آن‌ها تحت شرایط کوبش یکسان، که خود عامل حائز اهمیت دیگری در رفتار فرسایشی خاک است، می‌شود. از این رو توجیه رفتار این نمونه‌ها نیازمند درک کامل این دو پیامد حاصل از استفاده از CBR+ و تأثیرات ناشی از آن‌ها و همچنین میزان سهیم‌بودن هر یک در رفتار نمونه است.

با توجه به نتایج آزمایش نمونه‌های ۱۴ روزه (شکل ۵ و جدول ۵) مشاهده می‌شود که نمونه‌ی تثبیت‌نشده، مقاومت کمتری از خود در برابر فرسایش در مقایسه با نمونه‌های تثبیت‌شده نشان داده و از میان نمونه‌های تثبیت‌شده، همانند نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های ۷ روزه، نمونه با CBR+ معادل ۰/۰۰۵ مقاومت فرسایشی بهتری از خود در مقایسه با دو نمونه‌ی دیگر نشان داده است. مقایسه‌ی این داده‌ها

با داده‌های حاصل از نمونه‌های ۷ روزه این‌گونه به نظر می‌رسد که با گذر زمان رفتار فرسایشی تمامی نمونه‌ها اعم از تثبیت‌شده و نشده به یکدیگر نزدیک می‌شود.

نتایج آزمایش نمونه‌های ۲۱ روزه (شکل ۶ و جدول ۶) بیانگر این مسئله است که تمامی نمونه‌ها رفتار فرسایشی تقریباً مشابهی را از خود نشان می‌دهند و مقایسه‌ی آن‌ها نشان از نزدیک‌شدن رفتار نمونه‌های تثبیت‌شده به یکدیگر و به نمونه‌های تثبیت‌نشده با گذر زمان دارد، که این موضوع بیانگر جهت‌گیری دو پیامد ذکرشده ناشی از افزودن +CBR به خاک، در مسیر نزدیک‌سازی رفتار فرسایشی نهایی حاصل از تأثیر هم‌زمان آن‌ها، به رفتاری واحد و مشابه است.

با توجه به منحنی فرسایش نمونه‌های مختلف و مقایسه‌ی آن با پارامترهای فرسایش‌پذیری به دست‌آمده‌ی مربوطه مشاهده می‌شود که تغییرات دو پارامتر k_d و τ_c برای نمونه‌های مختلف، روند متفاوتی را از خود نشان می‌دهند و حتی در صورت پیروی تغییرات منحنی فرسایش نمونه‌ها از روندی خاص با گذشت زمان، مقادیر تغییرات این دو پارامتر ممکن است روند مشابه و یا ثابتی نداشته باشد. برای مثال با مقایسه‌ی منحنی‌های روند فرسایشی نمونه‌های ۲۱ روزه با مقادیر پارامترهای فرسایشی محاسبه‌شده برای آن‌ها مشاهده می‌شود که علی‌رغم نزدیکی منحنی‌های رفتار فرسایشی نمونه‌ها به یکدیگر، استفاده از مقادیر معادل ۰٫۰۰۵، ۰٫۰۰۷ و ۰٫۰۰۹ از این ماده به ترتیب ۱۱۸، ۱۴ و ۰٫۵ برابرشدن میزان تنش برشی بحرانی نمونه‌های تثبیت‌شده‌ی ۲۱ روزه را در مقایسه با نمونه‌ی تثبیت‌نشده نتیجه داده است.

با توجه به این مسئله و در تأیید سایر گزارش‌های ارائه‌شده مانند گزارش ارائه‌شده‌ی نپن و همکاران (۲۰۰۶)، می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که جهت بررسی و مقایسه‌ی رفتار فرسایشی خاک‌های مختلف نمی‌توان فقط به بررسی یکی از این پارامترها بسنده کرد و مقایسه‌ی قابل اطمینان باید بر پایه‌ی درنظرگرفتن تغییرات توأم هر دو پارامتر k_d و τ_c صورت گیرد.[۲]

همچنین باید به این نکته اشاره شود که تحلیل رفتار فرسایشی خاک‌ها با استفاده از دستگاه فرسایش توسط جت آب همواره با عوامل خطای متعددی همراه است. برای مثال مازورک (۲۰۱۰) نشان داده است که انجام این آزمایش تحت شرایط یکسان روی نمونه‌های مشابه، مقادیر k_d و τ_c متفاوتی به دست می‌دهد.[۲۱] گرچه میزان تفاوت موجود بین مقادیر به‌دست‌آمده از این آزمایش برای پارامترهای فرسایشی ناچیز است و برای مثال به اندازه‌ی تغییر رده‌بندی خاک از نقطه‌نظر میزان فرسایش‌پذیری نیست، لیکن در بررسی‌های حساس و نیازمند به مقادیر دقیق این پارامترها، فقط تکیه بر مقادیر به دست‌آمده از این آزمایش قابل اعتماد نیست و استفاده از سایر روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای فرسایشی خاک و مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر به دست‌آمده از آزمایش فرسایش توسط جت آب توصیه می‌شود. در این پژوهش به دلیل استفاده از پارامترهای حاصل از این آزمایش فقط جهت مقایسه‌ی رفتار فرسایشی نمونه‌های مختلف و با توجه به قابل صرف‌نظر بودن مقادیر اختلاف به دست‌آمده از تکرار آزمایش‌ها، از عوامل خطای ناشی از این آزمایش و دخیل‌کردن آن‌ها چشم‌پوشی شده است.

در این پژوهش به منظور درک بهتر تأثیرات ناشی از افزودن +CBR در رفتار فرسایشی خاک، ضریب نفوذپذیری (K) نمونه‌های تثبیت‌شده با مقادیر مختلف ماده پس از گذشت مدت زمان ۲۱ روز از تهیه‌ی نمونه‌ها اندازه‌گیری و با مقدار مربوط به نمونه‌ی تثبیت‌نشده مقایسه شده است. برای این منظور از آزمایش هد افتان استفاده شده است. این تذکر لازم است که در این پژوهش به منظور کوتاه‌ترشدن مدت زمان آزمایش‌ها، در تهیه‌ی تمامی نمونه‌ها مقداری از نمونه‌ی ترکه پس از کوبش در محفظه‌ی دستگاه نفوذپذیری در سه لایه‌ی مساوی و خشک‌شدن به وزن مخصوص خشکی معادل با ۸۵٪ بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک رسیده است، انتخاب و در محفظه کوبیده شده است. مقادیر K به دست‌آمده برای نمونه‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. مقادیر K به دست‌آمده برای نمونه‌های مختلف.

نوع نمونه	K (cm/s)
تثبیت‌نشده	$۵٫۸۸ \times ۱۰^{-۷}$
تثبیت‌شده با +CBR معادل ۰٫۰۰۵	$۲٫۰۶ \times ۱۰^{-۵}$
تثبیت‌شده با +CBR معادل ۰٫۰۰۷	$۶٫۵۰ \times ۱۰^{-۵}$
تثبیت‌شده با +CBR معادل ۰٫۰۰۹	$۹٫۶۴ \times ۱۰^{-۶}$

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که استفاده از +CBR به میزان‌های معادل ۰٫۰۰۵، ۰٫۰۰۷ و ۰٫۰۰۹ به ترتیب باعث ۳۵، ۱۱۰ و ۱۶ برابرشدن K در مقایسه با نمونه‌ی تثبیت‌نشده شده است. لذا می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که در صورت استفاده از این محصول، میزان نفوذپذیری خاک افزایش می‌یابد که این افزایش در صورت استفاده از این ماده تا مقداری خاص سیری صعودی دارد و در صورت استفاده‌ی مقادیر بیشتر از آن، میزان این افزایش شروع به کاهش می‌کند، که این مقدار خاص در واقع همان مقدار به دست‌آمده از آزمایش واکنش‌پذیری خاک است.

باید به این نکته توجه شود آبی که پس از تثبیت نمونه با استفاده از +CBR در نمونه نفوذ می‌کند، فقط صرف پُرکردن خلل و فرج موجود در خاک می‌شود. این مسئله با توجه به مکانیزم تشریح‌شده‌ی عملکرد +CBR صورت می‌پذیرد، که در آن مولکول +CBR با کنارزدن آب جذب‌شده توسط کانی‌های رسی و نشستن به جای آن، مولکول آب را آزاد می‌کند و اجازه‌ی جذب مجدد آن توسط کانی را نمی‌دهد. لذا نمونه‌های تثبیت‌شده با استفاده از این ماده سریع‌تر از نمونه‌ی تثبیت‌نشده آب را از خلل و فرج خود عبور می‌دهند و K بزرگ‌تری به دست می‌آورند. بدیهی است که استفاده از مقادیر بیش از حد موردنیاز از +CBR، منجر به عدم جذب مقداری از ماده توسط کانی‌های رسی و آزادانه حرکت‌کردن آن و در نهایت بسته‌شدن خلل و فرج خاک توسط ماده و کاهش ضریب نفوذپذیری خاک می‌شود.

با توجه به این مکانیزم و آزادشدن ذرات آب موجود در مجموعه‌یی متشکل از خاک رس و آب، به راحتی می‌توان آب آزادشده را با روش‌های مختلف مانند تراکم از مجموعه خارج کرد که نتیجه‌ی آن خاکی با نفوذپذیری و تراکم بسیار بیشتر و حساسیت بسیار کمتر در برابر آب در مقایسه با خاک تثبیت‌نشده است.

با درنظرگرفتن تمامی مسائل فوق‌الذکر در پایان می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که مکانیزم عملکرد +CBR به خودی خود و به‌صورت مستقیم قادر به تغییر خصوصیات فرسایشی خاک نخواهد بود. از سوی دیگر، پیامدهای مختلف استفاده از این ماده، رفتار فرسایشی خاک را بسیار تحت تأثیر قرار خواهد داد، که از این میان می‌توان به تغییر میزان نفوذپذیری و تراکم‌پذیری خاک و درجه‌ی حساسیت آن به آب اشاره کرد. بدیهی است هر چه میزان نفوذپذیری و تراکم خاک بیشتر و حساسیت آن نسبت به آب کمتر باشد، این خاک به مراتب مقاومت بالاتری از خود در برابر فرسایش نشان خواهد داد. برای مثال استفاده از +CBR در احداث کانال و سد خاکی می‌تواند منجر به تراکم بسیار بیشتر قسمت‌های مختلف سازه تحت انرژی کوبشی یکسان در مقایسه با خاک تثبیت‌نشده و بعضاً عدم نیاز به استفاده از منابع قرضه شود، که خود یکی از چالش‌های پیش رو هنگام طراحی این سازه‌هاست. در موارد دیگر این ماده می‌تواند به واسطه‌ی افزایش میزان نفوذپذیری خاک و اجازه‌ی حرکت راحت‌تر آن در میان خلل و فرج خاک از فرسایش خاک در برابر جریان‌های نشت متمرکز به مقدار قابل توجهی جلوگیری کند.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش میزان تأثیرگذاری محصولی از فنّاوری نانو با نام +CBR در رفتار فرسایشی خاک رس مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور تعیین پارامترهای فرسایشی نمونه‌های مورد بررسی از آزمایش فرسایش توسط جت آب استفاده شده است. با مروری بر نتایج به دست‌آمده از آزمایش نمونه‌های تثبیت‌شده و تثبیت‌نشده و مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر، این موارد استخراج شده است:

۱. استفاده از مقادیر مختلف +CBR جهت تهیه‌ی نمونه‌های مختلف و آزمایش آن‌ها پس از گذشت بازه‌های زمانی متفاوت، نتایج مختلفی داشته است. لیکن رفتار فرسایشی تمامی این نمونه‌ها با گذشت زمان به رفتار یکدیگر و همچنین به رفتار نمونه‌ی متشکل از خاک تثبیت‌نشده نزدیک شده است. بر همین اساس افزودن مقادیر مختلف +CBR به نمونه‌ی خاک مورد آزمایش منجر به تغییر دسته‌بندی کیفی آن از نقطه‌نظر میزان فرسایش‌پذیری نشده است.

۲. در جستجوی علل رفتار فرسایشی مغایر این نمونه‌ها باید دو پیامد متفاوت ناشی از عملکرد این ماده در خاک، یعنی تغییر میزان نفوذپذیری خاک و تمایل آن به جذب آب چه در مقیاس بین ذره‌یی و چه در مقیاس بین لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی کانی رس و تغییر در میزان متراکم‌شدن نمونه تحت شرایط کوبشی یکسان در نظر گرفته شده و با بررسی هم‌زمان آن‌ها به تشریح چگونگی پیدایش این رفتارهای مغایر پرداخته شده است.

۳. +CBR به خودی خود و به‌صورت مستقیم قادر به تغییر خصوصیات فرسایشی خاک نخواهد بود. از سوی دیگر، پیامدهای مختلف استفاده از این ماده، رفتار فرسایشی خاک را بسیار تحت تأثیر قرار خواهد داد که از این میان می‌توان به تغییر میزان نفوذپذیری و تراکم‌پذیری خاک و درجه‌ی حساسیت آن به آب اشاره کرد.

۴. با بررسی چگونگی تغییرات دو پارامتر فرسایشی تنش برشی بحرانی و ضریب فرسایش‌پذیری در نمونه‌های با رفتار فرسایشی متفاوت مشاهده شده است که تغییرات این دو پارامتر همواره روندی مشابه نداشته است. با توجه به این مسئله می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که برای بررسی و مقایسه‌ی رفتار فرسایشی خاک‌های مختلف نمی‌توان فقط به بررسی یکی از این پارامترها بسنده کرد و باید مقایسه‌یی قابل اطمینان بر پایه‌ی درنظرگرفتن تغییرات توأم این دو پارامتر صورت گیرد.

۵. در پایان باید به این نکته اشاره شود که تحلیل رفتار فرسایشی خاک‌ها با استفاده از دستگاه فرسایش توسط جت آب همواره با عوامل خطای متعددی همراه بوده و با انجام این آزمایش تحت شرایط یکسان روی نمونه‌های مشابه، مقادیر k_d و τ_c متفاوتی به دست آمده است. گرچه میزان تفاوت موجود بین مقادیر به دست‌آمده با استفاده از این آزمایش برای پارامترهای فرسایشی ناچیز بوده و برای مثال به اندازه‌ی تغییر رده‌بندی خاک از نقطه‌نظر میزان فرسایش‌پذیری نبوده است، لیکن در بررسی‌های حساس و نیازمند به مقادیر دقیق این پارامترها، فقط تکیه بر مقادیر به‌دست‌آمده از این آزمایش قابل اعتماد نیست و استفاده از سایر روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای فرسایشی خاک و مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر به دست‌آمده از آزمایش فرسایش توسط جت آب توصیه می‌شود.

فهرست علائم

k_d: ضریب فرسایش‌پذیری خاک در برابر جریان متمرکز؛
τ_c: تنش برشی بحرانی؛
τ_i: بیشینه‌ی تنش مرزی اولیه پیش از شروع فرسایش؛
$\tau_\circ$: تنش بیشینه بر اثر سرعت جت در نازل؛
J_p: طول هسته‌ی پتانسیل؛
J_i: ارتفاع اولیه‌ی صفحه‌ی نازل؛
C_d: ضریب تخلیه؛
$d_\circ$: قطر نازل؛
C_f: ضریب اصطکاک؛
ρ: چگالی سیال؛
$U_\circ$: سرعت در نازل جت؛
g: ضریب شتاب ثقل؛
h: اندازه‌ی هد تفاضلی؛
J_e: عمق حدی؛
t: زمان قرائت‌شده.

منابع (References)

1. Julian, J.P. and Torres, R. "Hydraulic erosion of cohesive riverbanks", *Journal of Geomorphology,* **76**(1-2), pp. 193-206 (2006).
2. Knapen, A., Poesen, J., Govers, G., Gyssels, G. and Nachtergaele, J. "Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review", *Journal of Earth-Science Reviews,* **80**(1-2), pp.75-109 (2007).
3. United States Department of Agriculture, *Erodibility Parameter Selection for Soil Material Horizons (Surface Detachment Coefficient and Headcut Erodibility Index)*, Appendix 52D (2011). Retrieved

پانوشت‌ها

1. jet erosion test
2. United States department of agriculture
3. European soil erosion model
4. water erosion prediction project
5. generalized watershed loading function
6. soil and water assessment tool
7. conservation channel evolution and pollutant transport system
8. hole erosion test
9. Pinhole test
10. overtopping
11. CON-AID

from:http://directives.sc.egov.usda.gov

4. Staley, N.A. "Modeling channel erosion at the watershed scale: A comparison of GWLF, SWAT, and CONCEPTS", Submitted in thesis, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University (2006).
5. TRI/Environmental, INC, A Texas Research International Company, Erosion and Sediment Control Testing of Erosion Control Products at TRI/Environmental, Inc (2007). Retrived from http://www.erosiontest.com.
6. Indraratna, B., Muttuvel, T. and Khabbaz, H. "Investigating erosional behaviour of chemically stabilised erodible soils", GeoCongress 2008, ASCE, pp. 670-677 (2008).
7. Burt, C.M., Orvis, S. and Alexander, N. "Canal seepage reduction by soil compaction", *ITRC, J. Irrig. Drain Eng.*, pp. 09-001 (2010).
8. Alabama Soil and Water Conservation Committee and Partners, Field Guide For Erosion and Sediment Control On Construction Sites In Alabama (2004). Retrieved from: http://swcc.alabama.gov.
9. Flanagan, D.C., Gilley, J.E. and Franti, T.G. "Water erosion prediction project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements", Soil & Water Division of ASABE, pp. 1603-1612 (2007).
10. Briaud, J.L., Chen, H.C., Govindasamy, A.V. and Storesund, R. "Levee erosion by overtopping in new orleans during theKatrina hurricane", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,* **134**(5), pp. 618-632 (2008).
11. Indraratna, B., Mahamud, M.A.A., Vinod, J.S. and Wijeyakulasuriya, V. "Stabilization of an erodible soil using chemical admixtures", International Conference on Geotechnical Engineering, pp. 45-54 (2010).
12. Yonts, C.D. "Using polyacrylamide to reduce soil erosion", Confrence Report, University of Nebraska, Lincoln (2008).
13. CON-AID ASIA CO., LTD, CON-AID Brochure. Retrieved from: http://www.conaidasia.com/productinfo.html.
14. CBR PLUS North America Inc, *Material Safety Data Sheet*, Retrieved from: http://www.cbrplus.com.
15. CBR PLUS North America Inc, *Application - Standard Application*, Retrieved from: http://www. cbrplus-northamerica.com/application_standard.asp.
16. ASTM, Standard D5852, *Standard Test Method for Erodibility Determination of Soil in the Field or in the Laboratory by the Jet Index Method*, Annual Book of ASTM Standards, Section 4: Construction, 04.08, Philadelphia, Penn, American Society for Testing and Materials (2007).
17. Hanson, G.J. and Cook, K.R. "Apparatus, test procedures, and analytical methods to measure soil erodibility In situ", *Journal of Applied Engineering in Agriculture*, **20**(4), pp. 455-462 (2004).
18. Hanson, G.J. and Hunt, S.L. "Lessons learned using laboratory jet method to measure soil erodibility of compacted soils", *Journal of Applied Engineering in Agriculture,* **23**(3), pp. 305-312 (2007).
19. Blaisdell, F.W., Clayton, L.A. and Hebaus, G.G. "Ultimate dimension of local scour", *Journal of Hydraulics Division, ASCE,* **107**(3), pp. 327-337 (1981).
20. ASTM, Standard D698-07, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft3 (600 kN-m/m3))*, Annual Book of ASTM Standards, Section 4: Construction, 04.08, Philadelphia, Penn, American Society for Testing and Materials (2007).
21. Mazurek, K.A. "Erodibility of a cohesive soil using a submerged circular turbulent impinging JET test", 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV (2010).