

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

سید محمدعلی زهردیان\* (دانشیار)

بخش مهندسی آب، دانشگاه شيراز

هادی هنرزاد (کارشناس ارشد)

هومن حیدریان (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۴)  
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۳/۲، ص. ۱۲۹-۱۲۱، (یادداشت نمی)

رفتار فرسایشی خاک ها خصوصیتی حائز اهمیت در کلیه پروژه های مرتبط با جریان های آب اعم از کانال های انتقال آب، سدسازی و سایر سازه های هیدرولیکی است. در این مطالعه چگونگی تأثیرگذاری یک افزودنی نوین حاصل از فناوری نانو با نام CBR+، در میزان فرسایش پذیری خاک های رسی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نمونه های تثبیت شده با مقادیر مختلف این ماده تهیه و رفتار فرسایشی آن ها با رفتار نمونه های تثبیت نشده، پس از گذشت بازه های زمانی ۱۴،۷ و ۲۱ روز از تهیه آن ها مقایسه شده است. برای بررسی رفتار فرسایشی نمونه ها از آزمایش فرسایش توسط جت آب (JET) استفاده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که استفاده از CBR+ به میزان های معادل ۰،۷، ۰،۷ و ۰،۹ لیتر به ازاء ۱۵ مترمکعب خاک مورد آزمایش، باعث پیدایش رفتارهای فرسایشی متفاوتی با گذشت زمان می شود. تفاوت این رفتارها در چگونگی تغییرات منحنی های فرسایش نمونه ها و مقادیر متوسط ضریب فرسایش پذیری ( $k_d$ ) و تنش برشی بحرانی ( $\tau_c$ ) آن ها مشهود است. برای مثال استفاده از این مقادیر از ماده به ترتیب ۱۱۸، ۱۴ و ۵ برابر شدن میزان تنش برشی بحرانی نمونه های تثبیت شده ی ۲۱ روزه در مقایسه با نمونه ی تثبیت نشده ی ۲۱ روزه را نتیجه داده است.

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

## ۱. مقدمه

احداث سازه های خاکی به منظور کنترل و انتقال آب مانند سدها و یا کانال ها، سابقه ی دیرینه دارد و شسته شدن خاک تشکیل دهنده ی قسمت های مختلف این سازه ها و انتقال آن بر اثر جریان های آب از جمله مسائل پیش رو در هنگام رویارویی با مشکلات این سازه ها و علل بسیاری از تخریب ها و پیامدهای حاصل از آن ها است.

به منظور تشریح مکانیزم از دست رفتن ذرات خاک بر اثر جریان آب، از تعاریف مختلفی استفاده می شود. از میان این تعاریف، «فرسایش خاک» بسته به منبع ذکر کننده ی آن ممکن است به صورت های مختلفی توصیف شود. در هر حال فرسایش خاک تشریح کننده ی یک مؤلفه از تمامی مکانیزم های منجر به حرکت و انتقال ذرات خاک و رسوبات بر اثر جریان متمرکز آب است.

\* نویسنده مسئول

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

میزان فرسایش پذیری 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 صورت گرفته در رفتار فرسایشی خاک ها بر اثر جریان متمرکز دو پارامتر  $k_d$  و  $\tau_c$  که به ترتیب ضریب فرسایش پذیری خاک در برابر جریان متمرکز و تنش برشی بحرانی هستند، به عنوان پارامترهای اصلی تشریح کننده ی رفتار فرسایشی خاک در نظر گرفته می شوند.<sup>[۱]</sup>

بر این اساس دپارتمان کشاورزی ایالات متحده ی آمریکا<sup>[۲]</sup> (۲۰۱۱)، خاک ها را براساس  $k_d$  آن ها به دسته های مختلفی به صورت ارائه شده در جدول ۱ تقسیم می کند.<sup>[۳]</sup>

به منظور بررسی رفتار فرسایشی خاک ها، تخمین و تعیین مقادیر پارامترهای مربوط، روش های مختلفی موجود است، که از میان آن ها می توان به این موارد اشاره کرد:

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

جدول ۱. دسته‌بندی کیفی میزان فرسایش‌پذیری بر اساس  $k_a$  (دپارتمان کشاورزی ایالات متحده آمریکا، ۲۰۱۱).

توصیف	$k_a$
به شدت فرسایش‌پذیر	$> 10$
بسیار فرسایش‌پذیر	$10-1$
نسبتاً فرسایش‌پذیر	$1-0.1$
نسبتاً مقاوم در برابر فرسایش	$0.1-0.01$
بسیار مقاوم در برابر فرسایش	$0.01-0.001$
به شدت مقاوم در برابر فرسایش	$< 0.001$

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.<sup>[۱۱،۱۲]</sup>

با پیشرفت علم و دستیابی به فناوری نانو، استفاده از افزودنی‌های حاصل از این فناوری 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 نانو تکنولوژی 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+ به‌عنوان یکی از افزودنی‌های نوین حاصل از فناوری نانو در خصوصیات فرسایشی خاک رسی مورد بررسی قرار گرفته است، که در ادامه به شرح مواد، روش‌ها و نتایج حاصل از مطالعات پرداخته شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. ماده‌ی مورد استفاده

CBR+ که با نام کان اید<sup>۱۱</sup> نیز شناخته می‌شود، تثبیت‌کننده‌ی مناسب برای خاک‌های آلیونی 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 قهوه‌ی 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 آب‌گریز می‌شود، که نتیجه‌ی آن خاکی با حساسیت کمتر نسبت به آب و با شرایط بهتر قفل و بست شدن بین‌ذره‌ی است.<sup>[۱۳]</sup> 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 در کشورمان توسط شرکت ایرامونت در تهران وارد شده و در دسترس است.

پاره‌ی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی این ماده به شرح موجود در جدول ۲ است.<sup>[۱۴]</sup>

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

- استفاده از معادلات تجربی ارائه‌شده بر پایه‌ی مطالعات آماری.
- استفاده از مدل‌های فرسایشی مختلف موجود مانند: EUROSEM<sup>۳</sup>، WEPP<sup>۴</sup>، GWLF<sup>۵</sup>، SWAT<sup>۶</sup> و CONCEPTS<sup>۷</sup>.<sup>[۲]</sup>
- آزمایش فرسایش سوراخ<sup>۸</sup> قابل انجام بر نمونه‌های بازسازی‌شده.
- آزمایش پین هول<sup>۹</sup> 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: ۱۰۰۸-۰۸، ۰۵-۰۷، ۰۵-۰۷، ۰۵-۰۷، ۰۵-۰۷، ۰۵-۰۷، ۰۵-۰۷.<sup>[۵]</sup>
- پیامدهای ناشی از فرسایش خاک در سازه‌های خاکی را می‌توان به‌طور کلی از دو بُعد فرسایشی و تولید رسوب مورد بررسی قرار داد. پاره‌ی از این پیامدها از این قرار هستند:<sup>[۹-۱۱]</sup>
- رسوب‌گذاری در مخازن سدها و کاهش عمر مفید آنها.
- شسته‌شدن تاج سدهای خاکی در اثر سر ریزش آب و در نهایت، تخریب کلی سد.
- تخریب سدها در اثر فرسایش ناشی از نشست متمرکز در دیواره‌ها و هسته‌ی سد.
- تغییر پارامترهای آب جاری در کانال‌های خاکی مانند: میزان مواد معلق و محلول در آب و در پاره‌ی موارد نامناسب‌سازی آن جهت مصارف خاص.
- افزایش میزان نشست 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 در نتیجه افزایش میزان خسارات در تمامی ابعاد اقتصادی، مالی و جانی.

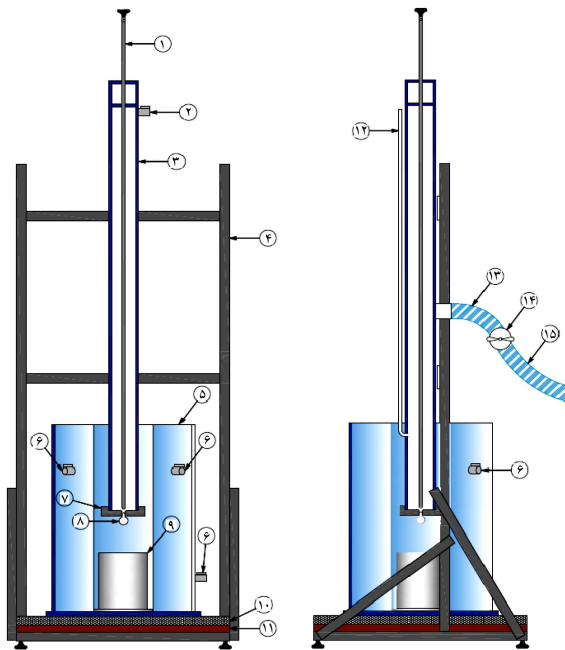
پژوهش‌ها حاکی از آن است که حدود ۳۴٪ خرابی‌های آب‌بندها و سدهای خاکی در ایالات متحده بر اثر فرسایش تاج سد هنگام سر ریزش<sup>۱۰</sup> آب صورت گرفته است. به‌عنوان مثال در طوفان کاترینا در ایالات متحده آمریکا که منجر به مرگ حدود ۱۳۰۰ نفر، بی‌خانمان شدن حدود ۵۰۰۰۰۰ نفر از اهالی منطقه و خسارت مالی در حدود ۱۰۰ میلیارد 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 سر ریزش و فرسایش یافتن آن‌هاست.<sup>[۱۰]</sup>

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و شیمیایی + CBR.

۱. شناسایی و موارد استفاده	
MSDS شماره	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 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 واکنش پذیری	
پایداری شیمیایی	بلی، پایدار
ناسازگاری با سایر مواد	بلی، سنگ‌های قلیایی و اکسیدکننده‌ها

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

وزن مخصوص (Gs)	۲٫۶۹۲
درصد واگرایی	٪۶۵٫۱۲
$D_{60}$ (mm)	۰٫۸
$D_{10}$ (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 میله‌ی اندازه‌گیری عمق فرسایش	۶ خروجی آب
۲ شیر خروج هوا	۷ صفحه نازل آب
۳ لوله‌ی جت	۸ مسدود کننده نازل
۴ فریم دستگاه	۹ قالب حاوی نمونه‌ی خاک
۵ مخزن آب غوطه‌وری نمونه	۱۰ صفحه‌ی یونولیت
۱۱ صفحه از جنس تفلون	
۱۲ بیژومتر قرائت ارتفاع آب در لوله‌ی جت	
۱۳ ورودی آب به لوله‌ی جت	
۱۴ شیر کنترل جریان ورودی	
۱۵ به طرف مخزن آب	

شکل ۱. شماتیک دستگاه آزمایش فرسایش توسط جت آب ساخته شده.

### ۳.۲. آزمایش فرسایش پذیری

برای اندازه‌گیری میزان فرسایش پذیری نمونه‌ها از آزمایش فرسایش توسط جت آب (JET) استفاده شده است، که مشخصات دستگاه مورد استفاده و روش انجام آن به صورت تشریح شده در استاندارد ASTM D ۵۸۵۲-۹۵ است.<sup>[۱۶]</sup> 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 دسترس نبودن دستگاه مذکور، اقدام به ساخت آن براساس گزارش ارائه شده توسط این پژوهشگران شده است.<sup>[۱۷]</sup>

شماتیک و معرفی قسمت‌های مختلف دستگاه ساخته شده 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

### 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 فرسایش پذیری 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 تأثیرگذار بودن CBR+ در بخش ریزدانه‌ی خاک، مصالح بزرگ‌تر از الک شماره‌ی ۴ در این خاک حذف شده‌اند.



ج) نمای محفظه ی غوطه وری دستگاه.

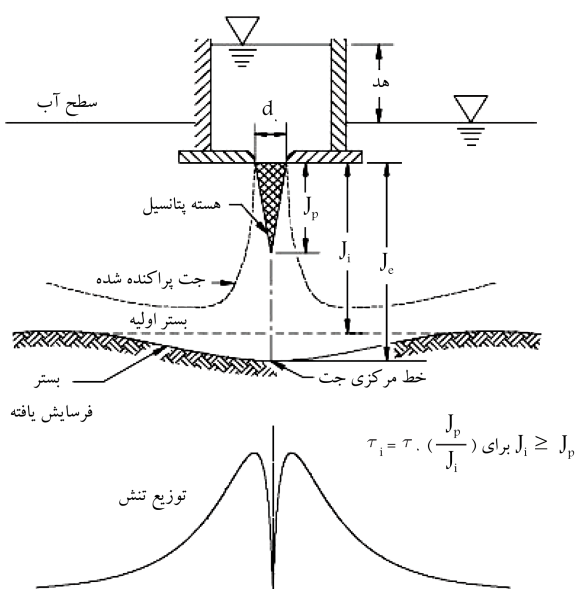


ب) نمای کلی دستگاه از بالا؛



الف) نمای کلی دستگاه از روبرو؛

شکل ۲. تصاویری از دستگاه آزمایش فرسایش توسط جت آب ساخته شده.



شکل ۳. پارامترها و چگونگی توزیع تنش جت دایره‌ای 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 ( $J_c$ ) 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.

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

-- تنش بحرانی ( $\tau_c$ ) از رابطه‌ی ۹ براساس عمق حدی ( $J_c$ ) که براساس رابطه‌ی

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 وارد 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 ( $\tau_i$ ) در ناحیه‌ی برخورد جت را می‌توان با استفاده از روابط ۱ الی ۴ محاسبه کرد: [۱۷، ۱۸]

$$\tau_i = \tau_0 \left( \frac{J_p}{J_i} \right)^2 \quad (1)$$

$$J_p = C_d d_0 \quad (2)$$

$$\tau_0 = C_f \rho U^2 \quad (3)$$

$$U_0 = \sqrt{2gh} \quad (4)$$

که در آن‌ها،  $\tau_i$  بیشینه‌ی تنش مرزی اولیه پیش از شروع فرسایش،  $\tau_0$  تنش بیشینه بر اثر سرعت جت در نازل،  $J_p$  طول هسته‌ی پتانسیل،  $J_i$  ارتفاع اولیه‌ی صفحه‌ی نازل،  $C_d$  ضریب تخلیه،  $d_0$  قطر نازل،  $C_f$  ضریب اصطکاک،  $\rho$  چگالی سیال،  $U_0$  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

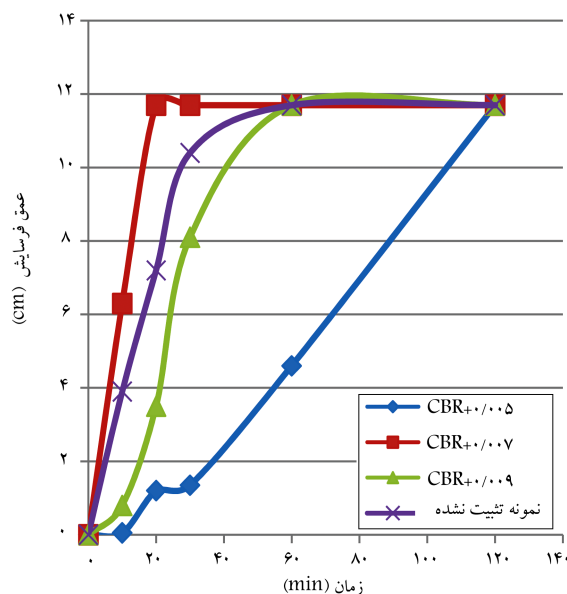
- ۳ جفت نمونه‌ی تثبیت‌شده با استفاده از CBR+ به میزان معادل ۰/۰۰۷ لیتر به ازاء ۰/۱۵ مترمکعب خاک جهت انجام آزمایش‌های فوق‌الذکر.
- ۳ جفت نمونه‌ی تثبیت‌شده با استفاده از CBR+ به میزان معادل ۰/۰۰۹ لیتر به ازاء ۰/۱۵ مترمکعب خاک جهت انجام آزمایش‌های فوق‌الذکر.
- ۳ جفت نمونه‌ی متشکل از خاک تثبیت‌نشده جهت مقایسه‌ی میزان فرسایش‌پذیری نمونه‌های تثبیت‌شده ۰/۰۰۷، ۱۴ و ۲۱ روزه با مقادیر مختلف CBR+.

به منظور تهیه‌ی کلیه‌ی نمونه‌ها به صورت 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 پوشیدن 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  $k_d$  و  $\tau_c$  برای نمونه‌های مذکور در جدول‌های ۴ الی ۶ ارائه شده‌اند.

مقایسه‌ی مقادیر  $k_d$  به دست‌آمده 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. به عبارت



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.

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 دست‌آمده عمق فرسایش در برابر زمان و یک تابع هذلولی ارائه‌شده توسط بلاسندل و همکاران (۱۹۸۱) استفاده می‌شود. [۱۹] فرم کلی این رابطه همراه با یک خط مجانب جهت اندازه‌گیری عمق نهایی فرسایش به صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$x = [(f - f_0)^2 - A^2]^{0.5} \quad (5)$$

که در آن،  $A$  مقدار محورهای نیمه‌آریب و نیمه‌مزدوج هذلولی است  $f$  و  $f_0$  و  $x$  از روابط ۶ و ۷ به دست می‌آیند:

$$f = \log \left( \frac{J}{d_0} \right) - \log \left( \frac{U_0 t}{d_0} \right) \quad (6)$$

$$f_0 = \log \left( \frac{J_e}{d_0} \right) \quad (7)$$

$$x = \log \left( \frac{U_0 t}{d_0} \right) \quad (8)$$

که در آن،  $d_0$  قطر نازل،  $U_0$  سرعت در نازل جت،  $t$  زمان قرائت داده‌هاست. پس از محاسبه‌ی عمق حدی ( $J_e$ )، تنش بحرانی ( $\tau_c$ ) با استفاده از رابطه‌ی ۹ محاسبه می‌شود:

$$\tau_c = \tau_0 \left( \frac{J_p}{J_e} \right)^2 \quad (9)$$

-- 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:

$$T^* = -J^* + 0.75 \ln \left( \frac{1 + J^*}{1 - J^*} \right) \Big|_{J_1}^{J^*} \quad (10)$$

$T^*$  زمان بدون بُعد ( $t_m/T_r$ )،  $t_r$  یک زمان مرجع  $[J_e/(k_d \tau_c)]$ ،  $J^*$  عبارت فرسایش بدون بُعد  $(J/J_e)$ ، عبارت فرسایش بدون بُعد در  $J_i/J_e$ ، 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 به عنوان نمونه‌ی شاهد، جهت تکرار آزمایش و صحت‌سنجی نتایج به دست‌آمده برای نمونه‌ی اول است.

جدول ۵. مقادیر  $k_d$  و  $\tau_c$  برای یک نمونه‌ی تثبیت نشده و نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف CBR+ پس از گذشت ۱۴ روز از زمان تهیه‌ی نمونه‌ها.

نوع نمونه	$\tau_c$ (N/m <sup>2</sup> )	$k_d$ (cm <sup>2</sup> /(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
تثبیت نشده	$۱٫۰۰ \times ۱۰^{-۲}$	۴٫۱۰

جدول ۶. مقادیر  $k_d$  و  $\tau_c$  برای یک نمونه‌ی تثبیت نشده و نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف CBR+ پس از گذشت ۲۱ روز از زمان تهیه‌ی نمونه‌ها.

نوع نمونه	$\tau_c$ (N/m <sup>2</sup> )	$k_d$ (cm <sup>2</sup> /(N-s))
CBR+ ۰٫۰۰۵	$۵٫۹۰ \times ۱۰^{-۲}$	۴٫۲۴
CBR+ ۰٫۰۰۷	$۷٫۰۰ \times ۱۰^{-۲}$	۴٫۲۵
CBR+ ۰٫۰۰۹	$۲٫۱۳ \times ۱۰^{-۲}$	۳٫۵۵
تثبیت نشده	$۴٫۹۷ \times ۱۰^{-۲}$	۴٫۰۹

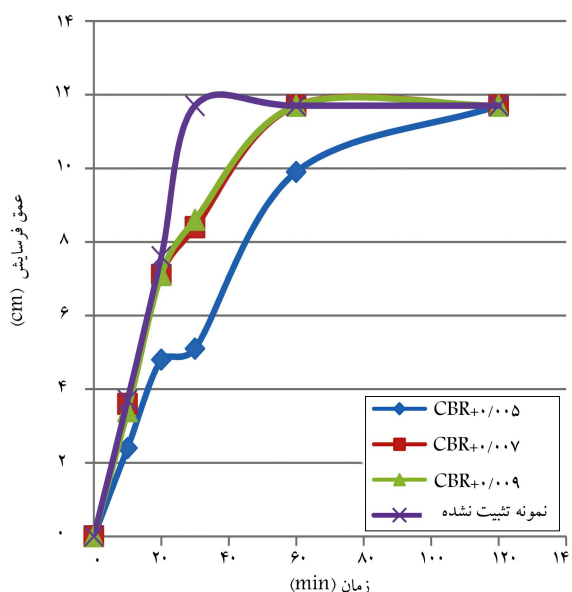
دیگر، افزودن مقادیر مختلف CBR+ به نمونه‌ی خاک مورد آزمایش منجر به تغییر دسته‌بندی کیفی آن از نقطه‌نظر میزان فرسایش‌پذیری نشده است.

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 تثبیت شده با CBR+ به میزان معادل ۰٫۰۰۵ مقاوم‌ترین و در سوی دیگر، نمونه‌ی تثبیت شده با CBR+ معادل ۰٫۰۰۷ ضعیف‌ترین نمونه است. در جستجوی عوامل مؤثر در رفتار فرسایشی متغیر نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف CBR+ دو پیامد متفاوت ناشی از عملکرد CBR+ بر خاک در نظر گرفته شده و با بررسی هم‌زمان آن‌ها به تشریح چگونگی پیدایش این رفتارهای مغایر پرداخته شده است.

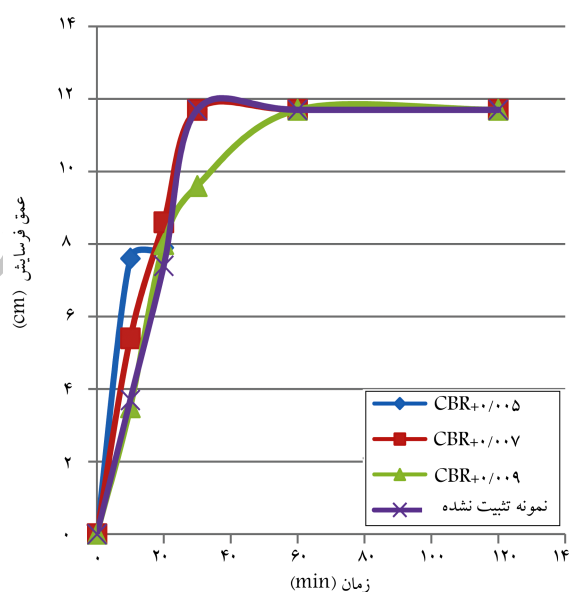
نخست اینکه استفاده از مقادیر مختلف CBR+ باعث تغییر میزان نفوذپذیری خاک و تمایل آن به جذب آب چه در مقیاس بین‌ذره‌یی و چه در مقیاس بین لایه‌های تشکیل‌دهنده‌ی کانی رس می‌شود. این تغییرات منجر به تفاوت در نرخ جذب آب توسط نمونه‌ها هنگام عمل‌آوری آن‌ها، میزان رطوبت خارج شده از نمونه در بازه‌ی زمانی ۷ روزه و همچنین نرخ جذب آب توسط آن هنگام انجام آزمایش می‌شود. مجموعه‌ی این عوامل در نهایت باعث متفاوت بودن 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 متراکم شدن 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 سهم‌بودن هر یک در رفتار نمونه است.

با توجه به نتایج آزمایش نمونه‌های ۱۴ روزه (شکل ۵ و جدول ۵) مشاهده می‌شود که نمونه‌ی تثبیت نشده، مقاومت کمتری از خود در برابر فرسایش در مقایسه با نمونه‌های تثبیت شده نشان داده و از میان نمونه‌های تثبیت شده، 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



شکل ۵. روند فرسایشی یک نمونه‌ی تثبیت نشده و نمونه‌های تثبیت شده 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 تثبیت نشده و نمونه‌های تثبیت شده 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  $k_d$  و  $\tau_c$  برای یک نمونه‌ی تثبیت نشده و نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف CBR+ پس از گذشت ۷ روز از زمان تهیه‌ی نمونه‌ها.

نوع نمونه	$\tau_c$ (N/m <sup>2</sup> )	$k_d$ (cm <sup>2</sup> /(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
تثبیت نشده	$۲٫۸۲ \times ۱۰^{-۲}$	۳٫۶۶

جدول ۷. مقادیر  $K$  به دست آمده برای نمونه‌های مختلف.

نوع نمونه	$K$ (cm/s)
تثبیت نشده	$5,88 \times 10^{-7}$
تثبیت شده با CBR+ معادل ۰٫۰۰۵	$2,06 \times 10^{-5}$
تثبیت شده با CBR+ معادل ۰٫۰۰۷	$6,50 \times 10^{-5}$
تثبیت شده با CBR+ معادل ۰٫۰۰۹	$9,64 \times 10^{-6}$

و در محفظه کوبیده شده است. مقادیر  $K$  به دست آمده برای نمونه‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است.

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 برابر شدن  $K$  در مقایسه با نمونه‌ی تثبیت نشده 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 دست آمده از آزمایش واکنش پذیری خاک است.

باید به این نکته توجه شود آبی که پس از تثبیت نمونه با استفاده از CBR+ در نمونه نفوذ می‌کند، فقط صرف پرکردن خلل و فرج موجود در خاک می‌شود. این مسئله با توجه به مکانیزم تشریح شده‌ی عملکرد CBR+ صورت می‌پذیرد، که در آن مولکول CBR+ با کنار زدن آب جذب شده توسط کانی‌های رسی و نشستن به جای آن، مولکول آب را آزاد می‌کند و اجازه‌ی جذب مجدد آن توسط کانی را نمی‌دهد. لذا نمونه‌های تثبیت شده با استفاده از این ماده سریع‌تر از نمونه‌ی تثبیت نشده آب را از خلل و فرج خود عبور می‌دهند و  $K$  بزرگ‌تری به دست می‌آورند. بدیهی است که استفاده از مقادیر بیش از حد مورد نیاز از CBR+، منجر به عدم جذب مقداری از ماده توسط کانی‌های رسی و آزادانه حرکت کردن آن و در نهایت بسته شدن خلل و فرج خاک توسط ماده و کاهش ضریب نفوذپذیری خاک می‌شود.

با توجه به این مکانیزم و آزاد شدن ذرات آب موجود در مجموعه‌ی متشکل از خاک رس و آب، به راحتی می‌توان آب آزاد شده 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 تثبیت نشده است.

با در نظر گرفتن تمامی مسائل فوق‌الذکر در پایان می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که مکانیزم عملکرد CBR+ به خودی خود و به صورت 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 تراکم پذیری 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 تثبیت نشده 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 نشن متمرکز به مقدار قابل توجهی جلوگیری کند.

با داده‌های حاصل از نمونه‌های ۷ روزه این‌گونه به نظر می‌رسد که با گذر زمان رفتار فرسایشی تمامی نمونه‌ها اعم از تثبیت شده 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 نزدیک شدن رفتار نمونه‌های تثبیت شده به یکدیگر و به نمونه‌های تثبیت نشده با گذر زمان دارد، که این موضوع بیانگر جهت‌گیری دو پیامد ذکر شده 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 دست آمده‌ی مربوطه مشاهده می‌شود که تغییرات دو پارامتر  $k_d$  و  $T_c$  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 محاسبه شده 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 برابر شدن میزان تنش برشی بحرانی نمونه‌های تثبیت شده‌ی ۲۱ روزه را در مقایسه با نمونه‌ی تثبیت نشده نتیجه داده است. با توجه به این مسئله و در تأیید سایر گزارش‌های ارائه شده مانند گزارش ارائه شده‌ی نین 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 در نظر گرفتن تغییرات توأم هر دو پارامتر  $k_d$  و  $T_c$  صورت گیرد.<sup>[۱۲]</sup>

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  $T_c$  متفاوتی به دست می‌دهد.<sup>[۱۳]</sup> گرچه میزان تفاوت موجود بین مقادیر به دست آمده از این آزمایش برای پارامترهای فرسایشی ناچیز است و برای مثال به اندازه‌ی تغییر رده بندی خاک از نقطه نظر میزان فرسایش پذیری نیست، لیکن در بررسی‌های حساس و نیازمند به مقادیر دقیق این پارامترها، فقط تکیه بر مقادیر به دست آمده از این آزمایش قابل اعتماد نیست و استفاده از سایر روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای فرسایشی خاک و مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر به دست آمده 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 صرف نظر بودن مقادیر اختلاف به دست آمده از تکرار آزمایش‌ها، از عوامل خطای ناشی از این آزمایش و دخیل کردن آن‌ها چشم‌پوشی شده است.

در این پژوهش به منظور درک بهتر تأثیرات ناشی از افزودن CBR+ در رفتار فرسایشی خاک، ضریب نفوذپذیری ( $K$ ) نمونه‌های تثبیت شده با مقادیر مختلف ماده پس از گذشت مدت زمان ۲۱ روز از تهیه‌ی نمونه‌ها اندازه‌گیری و با مقدار مربوط به نمونه‌ی تثبیت نشده مقایسه شده است. برای این منظور از آزمایش هدافتان استفاده شده است. این تذکر لازم است که در این پژوهش به منظور کوتاه تر شدن مدت زمان آزمایش‌ها، در تهیه‌ی تمامی نمونه‌ها مقداری از نمونه‌ی ترکه پس از کوبش در محفظه‌ی دستگاه نفوذپذیری در سه لایه‌ی مساوی و خشک شدن به وزن مخصوص خشکی معادل ۸۵٪ بیشینه‌ی وزن مخصوص خشک خاک رسیده است، انتخاب

## ۵. نتیجه‌گیری

مختلف نمی‌توان فقط به بررسی یکی از این پارامترها بسنده کرد و باید مقایسه‌ی قابل اطمینان بر پایه‌ی در نظر گرفتن 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  $T_c$  متفاوتی به دست آمده است. گرچه میزان تفاوت موجود بین مقادیر به دست آمده با استفاده از این آزمایش برای پارامترهای فرسایشی ناچیز بوده و برای مثال به اندازه‌ی تغییر رده‌بندی خاک از نقطه‌نظر میزان فرسایش پذیری نبوده است، لیکن در بررسی‌های حساس و نیازمند به مقادیر دقیق این پارامترها، فقط تکیه بر مقادیر به دست آمده از این آزمایش قابل اعتماد نیست و استفاده از سایر روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای فرسایشی خاک و مقایسه‌ی آن‌ها با مقادیر به دست آمده از آزمایش فرسایش توسط جت آب توصیه می‌شود.

### فهرست علائم

- $k_d$ : ضریب فرسایش پذیری خاک در برابر جریان متمرکز؛  
 $T_c$ : تنش برشی بحرانی؛  
 $T_i$ : بیشینه‌ی تنش مرزی اولیه پیش از شروع فرسایش؛  
 $T_0$ : تنش بیشینه بر اثر سرعت جت در نازل؛  
 $J_p$ : طول هسته‌ی پتانسیل؛  
 $J_i$ : ارتفاع اولیه‌ی صفحه‌ی نازل؛  
 $C_d$ : ضریب تخلیه؛  
 $d$ : قطر نازل؛  
 $C_f$ : ضریب اصطکاک؛  
 $p$ : چگالی سیال؛  
 $U$ : سرعت در نازل جت؛  
 $g$ : ضریب شتاب ثقل؛  
 $h$ : اندازه‌ی هد تقاضایی؛  
 $J_e$ : عمق حدی؛  
 $t$ : زمان قرانئت شده.

در این پژوهش میزان تأثیرگذاری محصولی از فناوری نانو با نام CBB+ 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 دست آمده از آزمایش نمونه‌های تثبیت شده و تثبیت نشده و مقایسه‌ی آن‌ها با یکدیگر، این موارد استخراج شده است:

۱. استفاده از مقادیر مختلف CBB+ 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 تثبیت نشده نزدیک شده است. بر همین اساس افزودن مقادیر مختلف CBB+ به نمونه‌ی خاک مورد آزمایش منجر به تغییر دسته‌بندی کیفی آن از نقطه‌نظر میزان فرسایش پذیری 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 ذره‌ی و چه در مقیاس بین لایه‌های تشکیل دهنده‌ی کانی رس و تغییر در میزان متراکم شدن 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. CBB+ به خودی خود و به صورت 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 تراکم پذیری خاک و درجه‌ی حساسیت آن به آب اشاره کرد.

۴. با بررسی چگونگی تغییرات دو پارامتر فرسایشی تنش برشی بحرانی و ضریب فرسایش پذیری 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

### پانویس‌ها

### منابع (References)

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

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



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). Retrieved 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 Store-sund, R. "Levee erosion by overtopping in new orleans during the Katrina 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", Conference 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](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/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))*, 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).