

## بررسی آزمایشگاهی فرسایش پذیری خاک‌های چسبنده متراکم شده در خاکریزها

مجتبی آب روشن<sup>۱</sup>، \* سید محمد علی زمردیان<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۵/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۱/۸/۲۳

مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد سازه‌های آبی

### چکیده

فرسایش خاکریزها به علت لبریز شدن آب یکی از علل اصلی خرابی آن‌ها محسوب می‌شود. مشخصات و درجه تراکم مورد استفاده در ساخت خاکریزها به طور قابل توجهی بر سرعت فرسایش آن‌ها در طی سرریز شدن آب تاثیر می‌گذارد. هدف این پژوهش بررسی تاثیر درصد رس، انرژی تراکم و میزان رطوبت بر روی فرسایش پذیری خاک‌های چسبنده می‌باشد. خاک‌های مورد آزمایش ترکیبی از ماسه با رس بنتونیت در درصدهای مختلف وزنی از ۱۰٪ تا ۲۰٪ می‌باشد. نمونه‌ها در انرژی تراکم‌های متفاوت و میزان رطوبت‌های مختلف در قالب تراکم استاندارد متراکم گردیده، سپس به وسیله یک فلوم بسته تحت دبی‌های متغیر مورد آزمایش فرسایش قرار گرفته و پارامترهای فرسایش برای هر یک به دست آمدند. نتایج نشان می‌دهد که تراکم نمونه در میزان رطوبت بهینه سبب می‌شود خاک بیشترین مقاومت در برابر فرسایش را از خود نشان دهد. همچنین نمونه‌های متراکم شده در قسمت تر منحنی تراکم نسبت به قسمت خشک آن، دارای مقاومت بیشتری در برابر فرسایش می‌باشند، که تنش برشی بحرانی مربوط به قسمت تر نسبت به قسمت خشک منحنی‌های تراکم، حداقل ۱/۲ و حداکثر ۱/۶ برابر می‌باشد. افزایش انرژی تراکم در قسمت خشک سبب افزایش مقدار تنش برشی بحرانی و کاهش سرعت فرسایش می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: خاکریزها، خاک‌های چسبنده، سرعت فرسایش، لبریز شدن، مشخصات تراکم.

mojtaba.abroshan@gmail.com

mzomorod@shirazu.ac.ir

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ۰۹۳۶۵۹۷۷۳۱۹

<sup>۲</sup>\* نویسنده مسئول استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ۰۹۱۷۱۳۲۳۰۷۶

## مقدمه

فرسایش خاکریزها در اثر لبریز شدن آب یکی از علل اصلی خرابی آن‌ها محسوب می‌شود. آمار خرابی سدهای خاکی بزرگ تا سال ۱۹۸۶ نیز نشان می‌دهد که سرریز کردن آب مخزن سد ۳۴/۲٪ از علل خرابی سدها را به خود اختصاص داده است و مهم‌ترین علت خرابی سدها به شمار می‌رود، سازه‌های خاکی اغلب از خاک‌های چسبنده متراکم شده ساخته می‌شوند. بنابراین کسب دانش درباره فرسایش‌پذیری آن‌ها جهت تخمین توسعه فرسایش و تهیه معیاری به منظور طرح ایمن این سازه‌های خاکی ضرورت پیدا می‌کند.

مطالعاتی با هدف بررسی تاثیر خصوصیات خاک و چگونگی تراکم آن بر فرسایش‌پذیری خاکریزهای چسبنده انجام شده است. بر طبق دستاوردهای پژوهشگران، چگونگی و درجه تراکم خاک‌های استفاده شده در خاکریزها، به طور قابل توجهی بر سرعت فرسایش آن‌ها در طی سرریز شدن تاثیر می‌گذارد. برای ساخت خاکریزها معمولا یک درجه تراکم حداقل و یک محدوده میزان رطوبت انتخاب می‌شود. خاکریزها در حدود ۹۵٪ وزن مخصوص خشک بیشینه و در محدوده میزان رطوبت ۲٪ کمتر از نقطه بهینه و ۳٪ بیشتر از آن ساخته می‌شوند. اگر نفوذ پذیری خاصیت مهم‌تری تلقی گردد میزان رطوبت بالاتر انتخاب می‌شود اما اگر مقاومت برشی دارای اهمیت بیشتری باشد، میزان رطوبت پایین‌تر برای ساخت در نظر گرفته می‌شود. حال اگر پارامتر فرسایش‌پذیری مهمترین مسئله طراح باشد هنوز جواب شفافی درباره انتخاب بهترین شرایط تراکم داده نشده است.

برای سنجش فرسایش‌پذیری خاک‌های چسبنده از تابع فرسایش استفاده می‌گردد. تابع فرسایش به صورت سرعت فرسایش خاک‌ها در مقابل تنش برشی اعمال شده بر روی سطح آن‌ها تعریف می‌گردد و نشان دهنده تنش برشی بحرانی به عنوان نقطه آغاز فرسایش و همچنین ضریب فرسایش‌پذیری به صورت شیب نمودار می‌باشد.

تحقیقات متعددی برای مرتبط ساختن پارامترهای فرسایشی خاک‌های چسبنده با خصوصیات آن‌ها انجام

گردیده است. نتایج تحقیقات تن و همکاران (۲۰۱۰) نشان می‌دهد که با گذشت زمان از شروع تحکیم، وزن مخصوص رسوبات چسبنده افزایش می‌یابد و به تبع آن سرعت فرسایش آن‌ها کاهش می‌یابد. کلی و گولارت (۱۹۸۱) نشان دادند که افزایش شوری سبب افزایش مقاومت خاک‌های چسبنده در برابر فرسایش می‌باشد. نتایج مشابهی نیز توسط پارکر و متا (۱۹۸۵) ارائه شده است. آزمایشات کوتیاری و جین (۲۰۰۸) بر روی رسوبات چسبنده متراکم شده با درصد‌های مختلف وزنی رس نشان می‌دهد که افزایش درصد رس، کاهش نسبت منافذ و افزایش مقاومت فشاری محدود نشده سبب می‌شود تنش برشی بحرانی رسوبات افزایش یابد. بریود و همکاران (۲۰۰۱) با هدف برقراری ارتباط بین پارامترهای مقاومت فرسایشی خاک و پارامترهای شاخص خاک نظیر شاخص خمیری و درصد رس آزمایشاتی را انجام داده و نتیجه گرفتند که فرآیند فرسایش خاک‌های چسبنده بسیار پیچیده بوده و به عوامل متعددی وابسته است.

اغلب مطالعات انجام شده فقط تاثیر یک یا تعداد کمی از عوامل موثر بر فرسایش‌پذیری را بررسی نموده‌اند. همچنین اثر نوع کانی مشخصی را مورد توجه قرار نداده‌اند. به منظور تعیین چگونگی ساخت خاکریزها با هدف بهینه نمودن مقاومت آن در برابر فرسایش لازم است آزمایشات فرسایش بر روی نمونه‌های خاک متراکم شده در شرایط متفاوت از جمله درجه تراکم و میزان رطوبت مختلف انجام گیرد و بهترین شرایط تراکم انتخاب گردد. هدف این پژوهش بررسی تاثیر درصد رس، انرژی تراکم و میزان رطوبت بر روی فرسایش‌پذیری خاک‌های چسبنده می‌باشد.

## فلوم آزمایشگاهی

در این پژوهش به منظور ایجاد سرعت جریان زیاد، از یک مجرای بسته با مقطع عرضی مستطیلی شکل با ابعاد ۶ و ۱۲ سانتیمتر استفاده شده است. طول فلوم ۲ متر بوده که یک حفره با قطر ۱۰۱/۶ میلی‌متر در کف آن تعبیه شده است و محل قرار گیری نمونه خاک متراکم شده می‌باشد (شکل ۱).



شکل (۱): فلوم آزمایشگاهی

$\tau$ : تنش برشی

$f$ : ضریب اصطکاک

$\rho$ : دانسیته آب

$V$ : سرعت متوسط جریان می باشد.

ضریب اصطکاک  $f$  با توجه به عدد رینولدز و زبری نسبی، از طریق دیاگرام مودی تعیین می گردد.

#### سرعت فرسایش

بعد از پایان هر آزمایش قالب تراکم از فلوم جدا گردیده و مقدار فرسایش اندازه گیری می گردد. با توجه به شکل نامنظم حفره های نمایان شده بر روی سطح خاک، با استفاده از یک سرنگ، آب به داخل حفره ها تزریق گردیده و حجم آب لازم برای پر نمودن حفره ها به عنوان حجم فرسایش یافته خاک تلقی می گردد. سپس از طریق رابطه (۲) سرعت فرسایش قابل تعیین می باشد:

$$E = \frac{V_e}{A_s \Delta t} \quad (2)$$

که در آن

$E$ : سرعت فرسایش

$V_e$ : حجم آب لازم برای پر نمودن حفره ها

$A_s$ : سطح نمونه خاک (سطح قالب تراکم)

$\Delta t$ : مدت زمان آزمایش می باشد.

#### تهیه نمونه خاکها

به منظور انجام آزمایشات از یک نمونه خاک ماسه ای به عنوان خاک پایه استفاده شده است. متوسط اندازه ذرات آن ۰/۶۶ میلی متر می باشد. رس بنتونیت در درصدهای مختلف وزنی ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ با نمونه خاک ماسه ای مخلوط گردیده و سپس میزان رطوبت از قبل تعیین شده به مخلوط اضافه می شود و به منظور توزیع یکنواخت آن، به مدت ۲۴ ساعت در یک کیسه پلاستیکی در بسته نگهداری می شود. میزان رطوبت انتخابی در محدوده ۲٪ کمتر از بهینه و ۳٪ بیشتر از آن می باشد. بعد از گذشت یک روز، مخلوط خاک در قالب تراکم استاندارد در انرژی تراکم های ۱۰۰٪، ۸۰٪ و ۶۰٪ انرژی تراکم استاندارد متراکم می شود. قالب تراکم حاوی نمونه خاک متراکم شده از طریق حفره بیان شده به کف فلوم متصل می گردد. سطح نمونه خاک هم تراز با کف فلوم قرار می گیرد.

#### تنش برشی

به منظور محاسبه تنش برشی اعمال شده بر روی سطح نمونه خاک توسط جریان آب برای هر دبی معینی، از رابطه (۱) استفاده شده است:

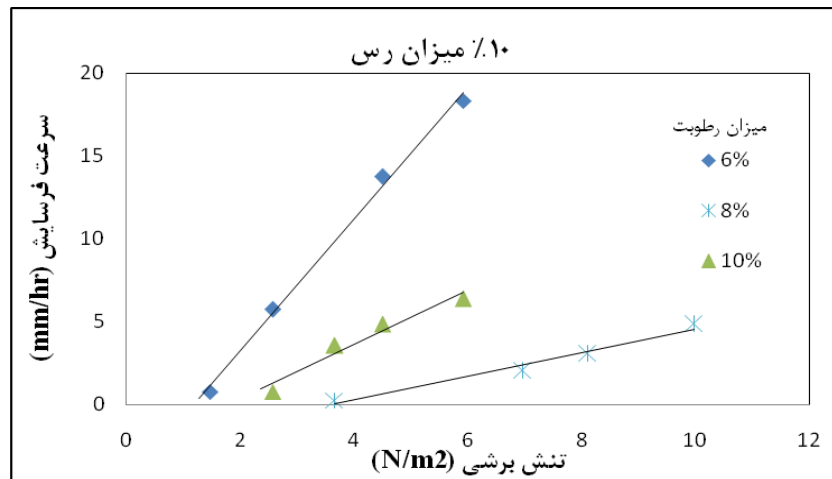
$$\tau = \frac{1}{8} f \rho v^2 \quad (1)$$

که در آن

و ۲٪ کمتر و بیشتر از آن، تحت دبی‌های متفاوتی مورد آزمایش فرسایش قرار گرفته و تابع فرسایش مربوط به آن رسم می‌گردد. در شکل (۲) نمونه‌ای از تابع فرسایش به دست آمده برای نمونه‌ی دارای ۱۰٪ رس و متراکم شده با انرژی تراکم استاندارد نشان داده شده است.

## نتایج و بحث

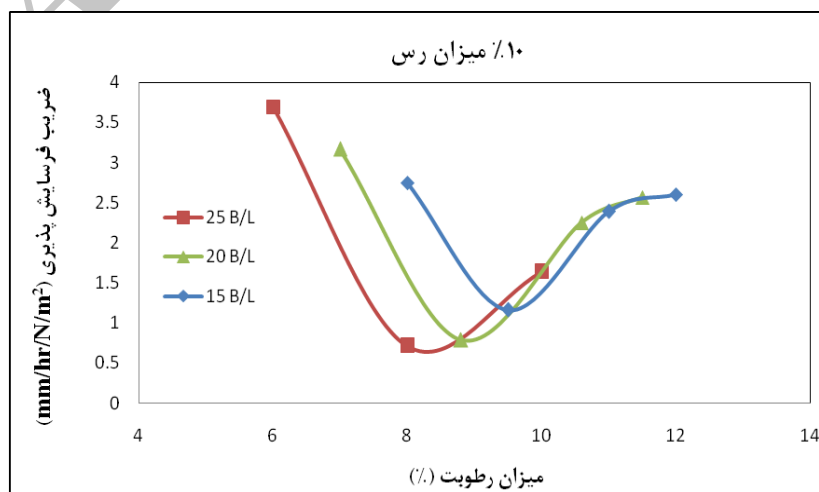
هر نمونه خاک دارای درصد رس معین و متراکم شده برای هر انرژی تراکم مشخصی در میزان رطوبت‌های بهینه



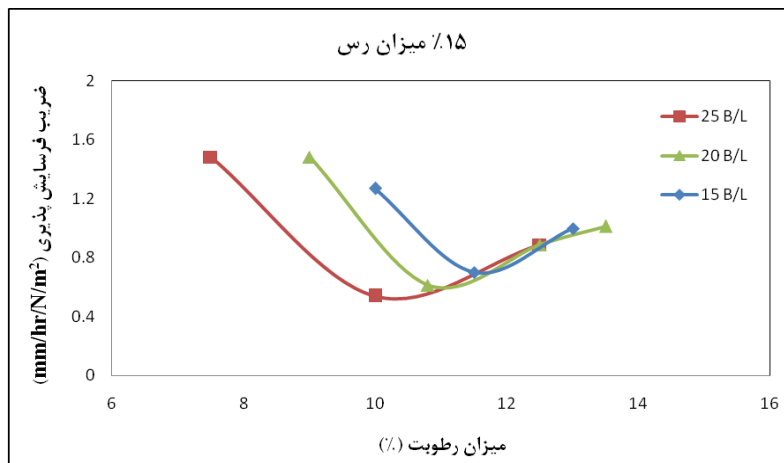
شکل (۲): تابع فرسایش برای نمونه‌ی دارای ۱۰٪ میزان رس و متراکم شده با انرژی تراکم استاندارد

پارامترهای فرسایشی آن‌ها را به دست آورد. در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ ضریب فرسایش‌پذیری به دست آمده از آزمایشات در مقابل میزان رطوبت تراکمی آن‌ها به ترتیب برای نمونه‌های دارای ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ میزان رس در انرژی تراکم‌های متفاوت رسم شده است.

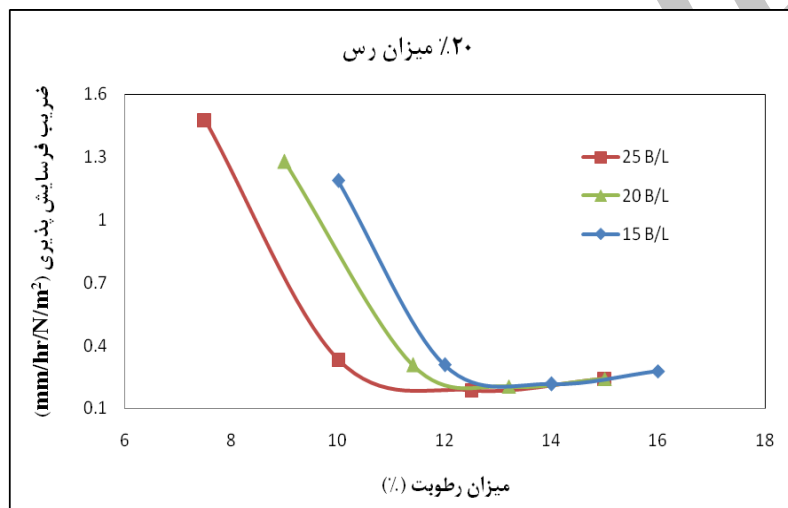
شکل (۲) نشان می‌دهد که سرعت فرسایش نمونه خاک یک رابطه‌ی خطی با تنش برشی اعمال شده بر روی آن دارد. محل تلاقی نمودار با محور افقی نشان دهنده تنش برشی بحرانی  $\tau_c$  می‌باشد، همچنین شیب نمودار به صورت ضریب فرسایش‌پذیری  $k$  تعریف می‌گردد. بدین ترتیب با رسم تابع فرسایش برای همه نمونه‌ها می‌توان



شکل (۳): ضریب فرسایش‌پذیری در انرژی تراکم‌های متفاوت برای نمونه‌های دارای ۱۰٪ میزان رس



شکل(۴): ضریب فرسایش پذیری در انرژی تراکم‌های متفاوت برای نمونه‌های دارای ۱۵٪ میزان رس



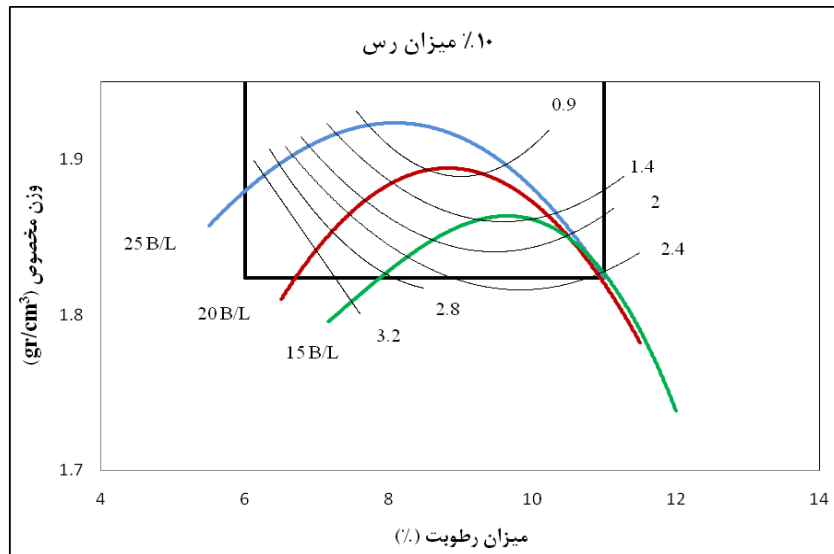
شکل(۵): ضریب فرسایش پذیری در انرژی تراکم‌های متفاوت برای نمونه‌های دارای ۲۰٪ میزان رس

شکل‌های ۳، ۴ و ۵ نشان می‌دهند که برای هر انرژی تراکم معینی، تراکم نمونه‌ها در میزان رطوبت بهینه آن باعث می‌شود خاک دارای کم‌ترین مقدار ضریب فرسایش‌پذیری باشد و بیشترین مقاومت در برابر فرسایش را داشته باشد. همچنین با مقایسه مقادیر ضریب فرسایش‌پذیری به دست آمده برای نمونه‌های متراکم شده در قسمت تر و خشک منحنی تراکم نتیجه می‌شود که نمونه‌های متراکم شده با میزان رطوبت بیشتر از بهینه نسبت به نمونه‌های متراکم شده با میزان رطوبتی کمتر از آن، دارای مقاومت بیشتری در برابر فرسایش می‌باشند. همچنین برای نمونه‌های دارای درصد رس مشخصی، افزایش انرژی تراکم در قسمت خشک منحنی تراکم سبب می‌شود که ضریب فرسایش‌پذیری افزایش یابد اما افزایش

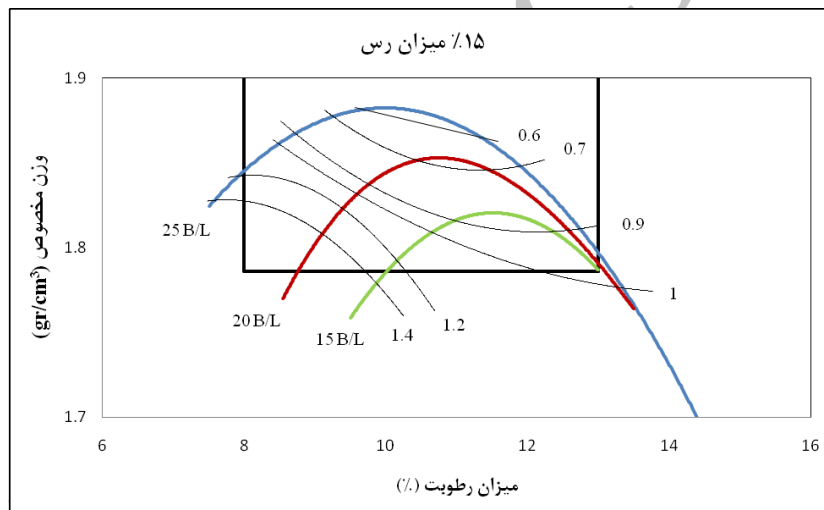
انرژی تراکم در قسمت تر منحنی تراکم تاثیر خاصی بر افزایش مقاومت فرسایشی ندارد. دلیل را می‌توان این‌گونه تفسیر نمود که افزایش انرژی تراکم در قسمت تر سبب افزایش فشار آب منفذی شده و مانع از وارد آمدن فشار به دانه‌های خاک شده است. در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ به ترتیب منحنی‌های تراکم مربوط به نمونه‌های دارای ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ میزان رس در انرژی تراکم‌های متفاوت رسم شده است. همچنین محدوده رایج در استفاده از ساخت خاکریزها نیز در شکل‌ها مشخص شده است که شامل ۹۵٪ وزن مخصوص خشک استاندارد بوده و میزان رطوبت ۲٪ کمتر از بهینه و ۳٪ بیشتر از آن را در بر دارد. در هر شکل نقاطی از منحنی‌های تراکم که دارای مقدار ضریب فرسایش‌پذیری یکسانی می‌باشند به وسیله خطوطی به

فرسایش پذیری در شرایط یکسانی به سر می‌برند.

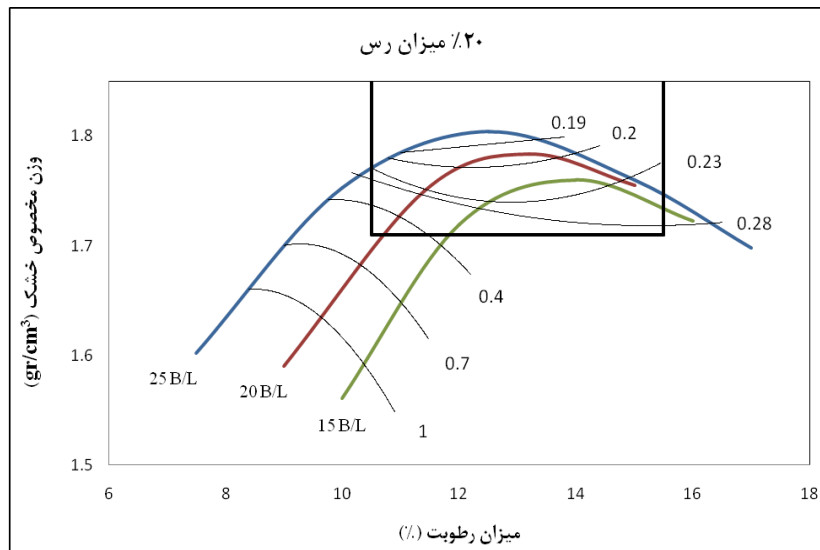
یکدیگر متصل گردیده‌اند. این نقاط دارای وزن مخصوص خشک و میزان رطوبت تراکمی متفاوت بوده ولی از لحاظ



شکل (۶): منحنی‌های هم مقدار برای نمونه‌های دارای ۱۰٪ میزان رس



شکل (۷): منحنی‌های هم مقدار برای نمونه‌های دارای ۱۵٪ میزان رس



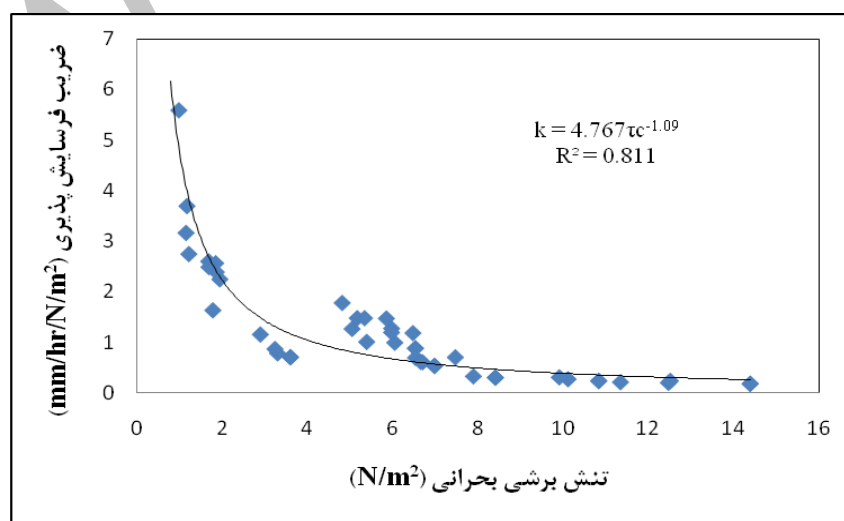
شکل (۸): منحنی‌های هم مقدار برای نمونه‌های دارای ۲۰٪ میزان رس

قبول فرسایش‌پذیری، درصد رس لازم را تعیین نمود و با مراجعه به خطوط هم مقدار مربوط به آن درصد رس، با همپوشانی خط مربوط به آن ضریب فرسایش‌پذیری حداقل و محدوده رایج، بهترین شرایط ساخت را انتخاب نمود.

در شکل (۹) مقادیر ضریب فرسایش‌پذیری در مقابل تنش برشی بحرانی مربوط به آن‌ها رسم شده‌اند. شکل (۹) نشان می‌دهد که پارامترهای فرسایش از یک رابطه نمایی تبعیت می‌کنند و با دانستن یکی می‌توان دیگری را به دست آورد.

شکل‌های ۶ تا ۸ نشان می‌دهند که خطوط هم مقدار ضریب فرسایش‌پذیری در سمت خشک منحنی تراکم نسبت به سمت تر آن، به یکدیگر نزدیک‌تر می‌باشند. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در سمت خشک، تغییرات کوچک در میزان رطوبت، میزان فرسایش‌پذیری را به شدت تغییر می‌دهد. اما در سمت تر، تغییرات مشابه در میزان رطوبت، تغییرات کوچکتری در میزان فرسایش‌پذیری را نتیجه می‌دهد. به عبارت دیگر سمت خشک در مقایسه با سمت تر دارای حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات میزان رطوبت می‌باشد.

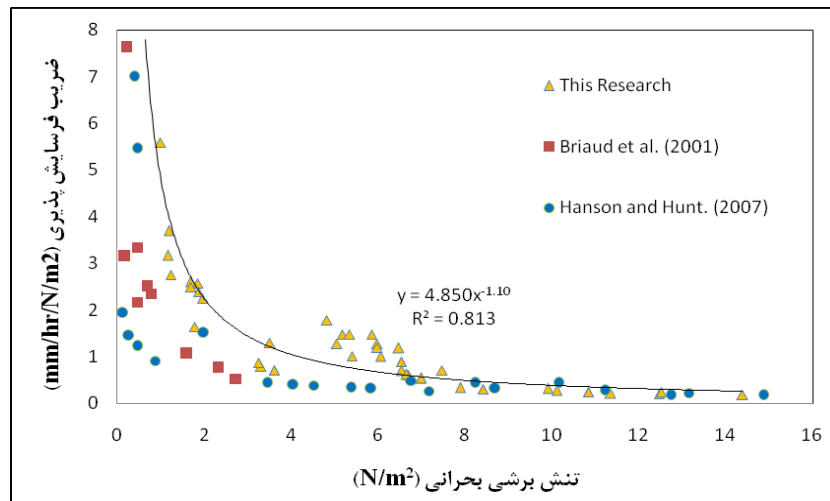
به منظور طراحی یک خاکریز بر اساس مقاومت آن در برابر فرسایش می‌توان ابتدا با انتخاب حداکثر میزان قابل



شکل (۹): ضریب فرسایش‌پذیری در مقابل تنش برشی بحرانی

در این پژوهش و اطلاعات دیگر محققان نشان می‌دهد. البته علت پراکندگی کم مشاهده شده را می‌توان در روش مورد استفاده و نوع خاک مورد بررسی در این آزمایشات دانست.

همچنین رابطه نتیجه شده در این پژوهش با مقادیر به دست آمده از طریق آزمایشات دیگر محققان نیز مقایسه شده است و در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. شکل (۱۰) تطابق خوبی بین بین داده‌های به دست آمده



شکل (۱۰): مقایسه بین نتایج این پژوهش و دیگر تحقیقات

متراکم شده در سمت مرطوب میزان رطوبت بهینه نسبت به سمت خشک آن، دارای مقاومت بیشتری در برابر فرسایش می‌باشند. همچنین برای هر میزان رطوبت مشخص کمتر از بهینه، افزایش انرژی تراکم سبب افزایش مقاومت در برابر فرسایش می‌شود، اما در میزان رطوبت‌های بیشتر از بهینه این گفته صادق نیست به طوری که انرژی تراکم تاثیر کمی بر روی فرسایش‌پذیری خواهد داشت.

## نتیجه گیری

به طور کلی می‌توان از آزمایشات انجام شده بر روی نمونه خاک ماسه مخلوط شده با رس بنتونیت نتیجه گرفت که: سرعت فرسایش نمونه‌ها یک رابطه خطی با تنش برشی اعمال شده بر روی آن‌ها دارد. برای هر انرژی تراکم مشخص، تراکم نزدیک میزان رطوبت بهینه سبب می‌شود خاک بیشترین مقاومت در برابر فرسایش از خود نشان دهد. برای هر انرژی تراکم معین، نمونه خاک‌های

## منابع

1. Briaud, J.L., F. Ting, H.C. Chen, Y. Cao, S.W. Han and K. Kwak. 2001. Erosion Function Apparatus for Scour Rate Predictions. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(2): 105-113.
2. Kelly, W.E. and R.C. Gularte. 1981. Erosion resistance of cohesive soils. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 107(10): 1211-1224.
3. Kothiyari, U.C. and R.K. Jain. 2008. Influence of cohesion on incipient motion condition of sediment mixtures. Water Resources Research, 44: 1-15.
4. Parchure, T.M. and J.A. Mehta. 1985. Erosion of soft cohesive sediment deposits. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 111(10): 1308-1326.
5. Tan, G.M., L. Jiang and C.W. Shu. 2010. Experimental study of scour rate in consolidated cohesive sediment. Journal of Hydrodynamics, 22(1): 51-57.



## Experimental Study of Erodibility in Compacted Cohesive Soils for Embankments

M. Abroshan<sup>1</sup>, S. M. A. Zomorodian<sup>2</sup>

### Abstract

The most common cause of embankments failures is erosion due to water flowing over tops of of them. Specifications and compaction effort used in construction of the embankments affect significantly in erosion rate during overtopping. The objective of this research is investigation the effect of clay percentage, compaction effort and water content on the erodibility of cohesive soils. The soils used consist of sand mixed with Bentonite in proportions varying from 10% to 20% by weight. Soil samples are compacted in the standard compaction mold at different water contents and compaction efforts, then they are tested by a closed conduit in varying discharges and obtain erosion parameters for each of them. The results indicate that the sample compacted at optimum water content creates a structure with the most resistant to erosion. The erodibility of samples compacted dry of optimum water content is less than samples compacted on the wet side of optimum, critical shear stress of wet side of compaction curves is minimum 1.2 and maximum 1.6 times dry side. The higher compaction effort at given water content in dry side increases critical shear stress and decreases erosion rate.

**Keywords:** embankments, overtopping, compaction specifications, cohesive soils, erosion rate.

---

<sup>1</sup> Abroshan, Shiraz/Water engineering; mojtaba.abroshan@gmail.com  
<sup>2</sup> Zomorodian, Shiraz/ Water engineering; mzorod@shirazu.ac.ir