

A Study on the Internal Erosion of Gap-Graded Soils

M. Nazari¹, A. Maroof², A. Akhtarpour^{3*}, J. Bolouri Bazaz³

1, 3- MSc in Geotechnics and Associate Professor, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. 2- Ph.D. in Geotechnics, Department of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*(Corresponding Author Email: Akhtarpour@um.ac.ir)

Received: 08-02-2024

Revised: 18-04-2024

Accepted: 20-04-2024

Available Online: 30-05-2024

بررسی فرسایش داخلی در رسوبات آبرفتی با دانه‌بندی گسسته

ملیحه نظری^۱، علی معروف^۲، علی اخترپور^{۳*}، جعفر بلوری بزاز^۳

۱ و ۳- به‌ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد ژئوتکنیک و دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. ۲- دانش‌آموخته دکتری ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*(نویسنده‌ی مسئول، E-Mail: Akhtarpour@um.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۰۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰

Abstract

Internal erosion is a common reason for dam failure, which is caused by soil subsidence and the formation of sinkholes. This phenomenon typically occurs in internally unstable soils. The dam is located in Neyshabour City and is built on a deep alluvial foundation with gap-graded and concave gradation soils. This study aims to investigate the potential for soil suffusion and the impact of compaction and surcharge on internal erosion. Initially, Data was collected after the dam impounding, index tests were conducted on soil samples. Subsequently, three methods were used to assess the probability of suffusion based on the particle size distribution and experimental criteria. Two methods indicated soil was internally unstable, while one method indicated stability. To study the influence of compaction. Soil samples were tested at different densities under four water head conditions. The results indicated that the soil has the potential for suffusion and is internally unstable. Furthermore, the study found that compaction reduced soil erosion, with the amount of washed fine particles decreasing from 4.5% at 70% relative density to 0.37% at 85% density. Moreover, increasing compaction from 70% to 85% resulted in a deformation decrease from 13.3% to 3.33%.

Keywords: Sinkhole, Internal Erosion, Microwashing, Internal Instability, Compaction.

چکیده

فرسایش داخلی از متداول‌ترین دلایل شکست سدها است و ریزشویی یکی از انواع فرسایش داخلی محسوب می‌شود که با نشست خاک و ایجاد فروچاله همراه است. ریزشویی به طور معمول در خاک‌های ناپایدار داخلی اتفاق می‌افتد. سد بار در شهر نیشابور که بر روی پی آبرفتی با دانه‌بندی گسسته و مقعر رو به بالا قرار گرفته است، بعد از آبیگری دچار نشست و فروچاله شده است. در این پژوهش پتانسیل ریزشویی در خاک منطقه و تأثیر عوامل تراکم و سربار بر فرسایش داخلی بررسی می‌شود. در ابتدا آزمایش‌های شاخص بر روی نمونه خاک انجام شد و سپس باتوجه‌به دانه‌بندی نمونه و کاربرد معیارهای تجربی موجود برای خاک، احتمال ریزشویی به سه روش بررسی شد که دو روش خاک را ناپایدار و یک روش پایدار نشان داد. در ادامه برای بررسی اثر تراکم، نمونه خاک در تراکم‌های مختلف و تحت چهار بار آبی، مورد آزمایش ریزشویی قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد خاک مورد نظر پتانسیل ریزشویی داشته و ناپایدار داخلی است. علاوه‌برآن اثر کاهش تراکم بر فرسایش در آزمایش‌ها مشاهده شد، میزان ذرات ریز شسته شده نمونه از ۴/۵ درصد در تراکم ۷۰ درصد به ۰/۳۷ درصد در تراکم ۸۵ درصد کاهش یافت. همچنین با افزایش تراکم از ۷۰ درصد به ۸۵ درصد میزان نشست از ۱۳/۳ درصد به ۳/۳۳ درصد کاهش یافت. واژه‌های کلیدی: فروچاله، فرسایش داخلی، ریزشویی، ناپایداری داخلی، تراکم.

پارامترهای مؤثر در ریزشویی به سه بخش تقسیم می‌شوند (Foster و همکاران، ۲۰۰۰؛ Li و همکاران، ۲۰۲۴):

الف- پارامترهایی که در هندسه محیط متخلخل مؤثر هستند؛ مانند دانه‌بندی، تنش مؤثر، تنش همه جانبه، مورفولوژی دانه‌ها و میزان منافذ باز موجود.

ب- پارامترهایی که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی محیط را تغییر می‌دهند؛ مانند دمای آب، میزان کلرات سدیم موجود در آب و ماهیت خاک رس موجود.

ج- شرایط هیدرولیکی مانند گرادیان هیدرولیکی.

انجام آزمون‌های آزمایشگاهی معتبرترین روش برای تشخیص خاک‌های ناپایدار داخلی است، اما ممکن است به دلایلی از جمله هزینه و زمان، انجام مطالعات آزمایشگاهی امکان پذیر نباشد. در چنین مواقعی پیشنهاد استانداردهای معتبری نظیر ICOLD^۵ و USBR^۶، استفاده از روش‌های تجربی است. روش‌های تجربی متعددی برای شناسایی ناپایداری داخلی خاک‌ها وجود دارد که در آن‌ها مبنای اصلی قضاوت، توزیع دانه‌بندی خاک است. روش‌های از جمله این روش‌ها است (معروف، ۱۳۹۹؛ Maroof و همکاران، ۲۰۲۱؛ Maroof و همکاران، ۲۰۲۴).

باتوجه به مشاهدات میدانی و فروچاله‌های ایجاد شده در سد بار و درشت دانه بودن خاک آبرفتی منطقه، احتمال وقوع پدیده ریزشویی در این محل زیاد است. بنابراین پتانسیل ریزشویی مصالح محل، در تراکم‌های مختلف در پژوهش حاضر بررسی شده است. برای بررسی پتانسیل ریزشویی در خاک از دو روش استفاده از معیارهای تجربی و انجام آزمایش می‌توان استفاده نمود.

۱- معیارهای تجربی

روش‌های تجربی زیادی برای شناسایی پتانسیل ریزشویی خاک‌ها وجود دارد، مبنای اصلی در این معیارها توزیع دانه‌بندی خاک است. در جدول (۱) برخی از این روابط ارائه شده است.

جدول ۱- معیارهای بررسی شده در این پژوهش

نام معیار	منبع	روش بررسی ناپایداری
کنی و لو	(Kenny و lau، ۱۹۸۵)	$(H/F)_{\min} \geq 1.3$: پایدار
شرارد	(Sherard، ۱۹۷۹)	$(H/F)_{\min} \geq 1$: پایدار
وان و فل	(Wan و Fell، ۲۰۰۸)	$30/\log(d_{90}/d_{60}) < 80$ و $15/(d_{20}/d_5) > 22$: پایدار

روش کنی و لو: Kenny و lau (۱۹۸۵) برای ارزیابی پایداری به لزوم وجود فیلتر برای هر دانه اشاره کردند. بر اساس پیشنهاد این دو پژوهشگر برای قطر متناظر با درصد‌های عبوری مختلف از الک‌ها، باید قطر فیلتر آن نیز موجود باشد. به این منظور در منحنی دانه‌بندی،

فرسایش داخلی به انواع مختلفی تقسیم می‌شود، و ریزشویی^۱ یکی از انواع آن است که در یک تعریف کلی شامل حرکت ذرات ریز در بین دانه‌های درشت تحت جریان تراوش است. علت شکست بیشتر از ۳۵٪ سدهای خاکی، فرسایش داخلی است (Li و همکاران، ۲۰۲۴). پدیده ریزشویی می‌تواند در محل سدها، سازه‌های هیدرولیکی و در مناطق شهری در محدوده سازه‌هایی مانند تونل‌ها، قنات‌های قدیمی و شبکه‌های آب و فاضلاب به وقوع بپیوندد. از اولین نشانه‌های پدیده ریزشویی شکل‌گیری ناگهانی فروچاله‌های بزرگ در محل سازه‌های ذکر شده است.

پی‌آبرفتی در سدهای خاکی نسبت به سایر پی‌ها بیشتر در معرض ریزشویی قرار دارد و علت اصلی آن ناهمگنی و ناهمسانی پی‌آبرفتی است. در این نوع از فرسایش، در زمان مجاورت آب با بستر آبرفتی، مصالح ریز به درون لایه درشت‌تر حرکت کرده و باعث افزایش هدایت هیدرولیکی در ناحیه فرسایش یافته و کاهش آن در ناحیه پایین دست می‌شود که این پدیده می‌تواند بانسخت همراه باشد (Fell و همکاران، ۲۰۰۳). خاک‌هایی که پتانسیل ریزشویی دارند، به‌عنوان خاک ناپایدار داخلی شناخته می‌شوند. در این پژوهش پتانسیل ریزشویی در خاک و میزان تأثیر تراکم بر آن بررسی شده است.

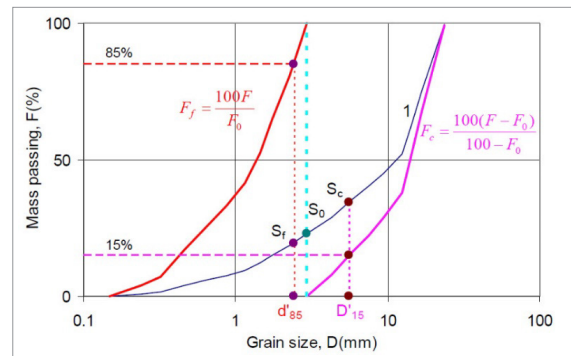
به‌طورکلی بافت خاک به دو گروه درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم می‌شود. اکثر خاک‌های ناپایدار داخلی بافت درشت‌دانه دارند. در این خاک‌ها، تنش‌های موجود از طریق تماس ذرات درشت با یکدیگر تحمل شده و ذرات ریز که پتانسیل حرکت دارند می‌توانند جابه‌جا شوند. پایداری داخلی خاک‌ها به شرایط هندسی (مانند دانه‌بندی و میزان فضای خالی)، شرایط هیدرولیکی (مانند گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان) و شرایط مکانیکی (مانند تراکم و چسبندگی) بستگی دارد (نوروزی، ۱۳۹۷).

اصطلاح‌های مختلفی برای توصیف روند جدا شدن و انتقال ذرات ریز درون شبکه متخلخل یک خاک تحت تأثیر جریان داخلی آب استفاده می‌شود، فرسایش متمرکز^۲، فرسایش عقب رونده^۳، فرسایش تماسی^۴ و ریزشویی از این قبیل هستند که زیرمجموعه فرسایش داخلی محسوب می‌شوند (Bendahmane و همکاران، ۲۰۰۸).

پاولوف برای اولین بار مفهوم علمی ریزشویی را در سال ۱۸۹۸ این گونه بیان کرد که ریزشویی به علت وجود جریان تراوش در منافذ خاک شکل می‌گیرد در نتیجه شروع و ادامه آن از یک طرف به هندسه و دانه‌بندی مصالح و از طرف دیگر به شرایط هیدرولیکی جریان آب مانند گرادیان بستگی دارد (Marot و Benamar، ۲۰۱۳). ریزشویی ممکن است باعث ایجاد تغییر در تخلخل شود و مشخصات هیدرولیکی و مکانیکی خاک را تغییر دهد. چنین تغییراتی در محیط با تخلخل بالا می‌تواند موجب تسریع در ناپایداری شود (Benamar و Marot، ۲۰۱۲).

قطر D انتخاب شده و از روی مقدار آن قطر d (فیلتر برای دانه‌های با قطر D) نیز تعیین شده است. درصد ذرات ریزتر از D با F و درصد ذرات بین D و d با H نمایش داده می‌شود. این فرآیند برای همه اندازه‌های D در محدوده عبوری ۰ تا ۴۰ درصد صورت می‌گیرد. بر اساس مبنای نظری این روش، ذره‌ای می‌تواند با اندازه D در اثر نیروی تراوش جابه‌جا شود که خاک حاوی آن، در مقدار ذرات با اندازه D تا d کمبود داشته باشد. در صورتی که در محدوده F ، $(H/F)_{\min} \geq 1.3$ باشد، خاک پایدار داخلی است. یک سال بعد Kenny و Lau (۱۹۸۶) در رابطه عدد ۱ را جایگزین $1/3$ کردند $((H/F)_{\min} \geq 1.0)$.

روش شرارد: شرارد از معیار $d'_{15}/d'_{85} = 4 \sim 5$ استفاده نمود، که در آن d'_{15} و d'_{85} استفاده شده در این معیار در شکل (۱) نشان داده شده است (منحنی ۱ منحنی اصلی است). در شکل (۱) افزایش نمودار دانه‌بندی به دو نمودار ریز و درشت دانه بر اساس نقطه f صورت گرفته است. منظور از F نیز درصد ذرات عبوری است و فرمول هر افزایش نیز در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نمودار افزایش ریز و درشت در روش شرارد (Kezdi, ۱۹۷۹)

روش وان و فل: Wan و Fell (۲۰۰۸) در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی خاک‌های ناپایدار پرداختند. در این آزمایش‌ها، از خاک‌های درشت‌دانه دارای سیلت و خاک‌های درشت‌دانه دارای سیلت و رس استفاده شد، از دستگاه آزمایشی بزرگ مقیاسی نیز برای انجام آزمایش‌ها استفاده شد و در انتها معیاری را ارائه دادند که با دو رابطه (۱) و (۲) کنترل می‌شود.

$$30/\log(d_{90}/d_{60}) < 80 \quad (1)$$

$$15/(d_{20}/d_5) > 22 \quad (2)$$

در این روابط d_{90} و d_{60} ، d_{20} ، d_5 قطر ذره‌ای از خاک است که به ترتیب ۵، ۲۰، ۶۰ و ۹۰ درصد ذرات خاک از آن کوچک‌تر باشد و با استفاده از منحنی دانه‌بندی قابل تعیین هستند.

۲- معیارهای آزمایشگاهی

در آزمایش ریزشویی یک نمونه با تراکم و رطوبت مورد نظر، در یک سلول بازسازی شده و بارآبی مورد نظر به صورت پله‌ای به نمونه اعمال شده و تغییرات نفوذپذیری ناشی از ذرات شسته شده، تغییر

شکل نمونه براساس روش الف تا ج بررسی می‌شود. معیار کلی که بر اساس آن، پایداری خاک بررسی شود وجود ندارد اما به طور معمول ریزشویی با سه روش کلی زیر بررسی می‌شود:

الف- میزان ذرات شسته شده: اگر ذرات به‌طور پیوسته فرسایش پیدا کنند، یا نشست زیاد و بیشتر از حد تعیین شده در نمونه ایجاد شود، خاک ناپایدار شناخته می‌شود. USACE (۱۹۵۳): Kenny و Lau (۱۹۸۵): Lafleur و همکاران (۱۹۸۹): Chapuis و همکاران (۱۹۹۶): Honjo و همکاران (۱۹۹۶): Moffat (۲۰۰۵): Fannin و (۲۰۰۶): Moffat و (۲۰۰۷): Nguyen و (۲۰۰۸): Li و (۲۰۰۸): Chang و (۲۰۱۳): Zhang و معروف (۱۳۹۹) از این روش برای بررسی پایداری خاک استفاده کرده‌اند.

Lau و Kenny (۱۹۸۵) در پژوهش خود بیان کردند اگر درصد ذرات ریز شسته شده حداقل ۷٪ باشد، خاک ناپایدار خواهد بود، Fell و Wan (۲۰۰۸) حداقل مقدار درصد ذرات ریز شسته شده برای قرارگیری خاک در دسته ناپایدار را ۴٪ عنوان کردند. Zhang (۲۰۱۳) بیان کردند اگر ذرات ریز شسته شده بیش از ۴٪ یا نشست بیش از ۱/۲٪ باشد، خاک ناپایدار است. معروف (۱۳۹۹) نمونه‌هایی با ذرات شسته شده بیش از ۳٪ کل وزن نمونه خشک را به‌عنوان خاک ناپایدار دسته‌بندی کرد. در این پژوهش نیز معیار ناپایداری به روش چانگ و ژانگ و معروف ارزیابی شد.

ب: تغییرات نفوذپذیری: در روش دوم در صورتی که یک تغییر ناگهانی در نفوذپذیری نمونه رخ دهد، نمونه به‌عنوان خاک ناپایدار در نظر گرفته می‌شود. در این روش برای بررسی تغییر نفوذپذیری از رابطه بین نفوذپذیری- زمان در حین آزمایش استفاده می‌شود. Sun (۱۹۸۹) و Kaoser و همکاران (۲۰۰۶) از این روش برای بررسی ناپایداری استفاده کردند.

ج- مشاهده گسیختگی در خاک: در روش سوم، در صورتی که گسیختگی، تحت گرادیان هیدرولیکی بسیار کمتر از گرادیان هیدرولیکی بحرانی به‌دست آمده از روش‌های تئوری ایجاد شود، خاک در دسته ناپایدار قرار می‌گیرد (Honjo و همکاران، ۱۹۹۶). Brogan و Skempton (۱۹۹۵) این گرادیان را برای خاک شن و ماسه‌ای حدود یک سوم گرادیان هیدرولیکی بحرانی نظری به‌دست آوردند. Adel و همکاران (۱۹۸۸) از این روش برای بررسی ناپایداری استفاده کردند.

مواد و روش‌ها

۱- منطقه مورد مطالعه

سد بار در استان خراسان رضوی و شهرستان نیشابور قرار دارد. در این سد، بعد از اولین آبگیری، فروچاله، ترک و نشست مشاهده شده است. این فروچاله‌ها در بالادست سد اصلی و در کل مخزن

را در منطقه به وجود آورده است. زمین ساخت فعال منطقه باعث شده، تشکیلات زمین شناسی با جنس و سن گوناگون در کنار یکدیگر قرار گیرند. این تنوع و گوناگونی بر خصوصیات کمی و کیفی آبرفت و منابع آب زیرزمینی موجود در سطح منطقه تأثیرگذار بوده است. نهشته‌های آبرفتی در این منطقه عمده‌ترین تشکیلات زمین شناسی است که ضخامت زیادی دارد و به شکل تراس‌های آبرفتی و مخروط افکنه در اکثر نقاط منطقه گسترش یافته است. منشأ آب زیرزمینی ذخیره شده در آبرفت‌های ضخیم دشت این منطقه، رودخانه‌های دامنه جنوبی کوهستان بینالود است (رنجبر، ۱۳۹۰).

بدنه سد اصلی بر روی این آبرفت احداث شده است. پس از ایجاد ریزشویی، نشست زیاد قابل تصور بوده و احتمال ایجاد آسیب در بدنه سد اصلی وجود دارد.

۳- آزمایش‌های شاخص روی نمونه خاک محل

آزمایش تعیین وزن مخصوص ویژه قسمت جامد خاک بر اساس استاندارد ASTM D 854-10 انجام شده است. برای آزمایش حدود انتربرگ از استاندارد ASTM D 4318، آزمایش دانه‌بندی بر اساس استاندارد ASTM D2487 و برای آزمایش هیدرومتری از استاندارد ASTM D422-63 استفاده شده است. نتیجه شناسایی خاک در جدول (۲) و نمودار دانه‌بندی در شکل (۳) ارائه شده است. نام خاک با توجه به نتایج شناسایی SP-SM است. برای نمونه خاک منطقه آزمایش تراکم اصلاح شده با استاندارد ASTM D 1557-02 انجام شد. با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود درصد رطوبت بهینه برای این نمونه خاک برابر ۷ درصد و وزن مخصوص حداکثر برابر $20/28 \text{ KN/m}^3$ است.

جدول ۲- مشخصات خاک مورد مطالعه

ω_{opt} (%)	$\gamma_{d,max}$ (kN/m^3)	PI (%)	LL (%)	C_u	G_s	D_{90} (mm)	D_{60} (mm)	D_{30} (mm)	D_{20} (mm)	D_{10} (mm)	نوع خاک
۷	۲۰/۲۸	۵/۲	۳۴	۶۲/۴	۲/۶۹	۱۹/۳	۶/۲۴	۱/۳۶	۰/۳۱	۰/۰۹۵	خاک منطقه بار

۴- مشخصات دستگاه آزمایش طراحی شده

برای بررسی پتانسیل ریزشویی خاک، نیاز به یک سلول با قابلیت اعمال بار آبی و همچنین توان تحمل سربار بود به این منظور، دستگاه مورد نظر با همکاری گروه عمران و مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد طراحی و ساخته شد. تصویر شماتیک دستگاه مورد نیاز در شکل (۴) نشان داده شده است. منبع آب نیز به طور جداگانه تهیه شده و در زمان انجام آزمایش در ارتفاع‌های مورد نیاز قرار گرفت. از هشت لوله پیرومتر ایستاده برای اندازه‌گیری تراز آب استفاده شد. این دستگاه برای انجام آزمایش در هر دو حالت جریان رو به بالا و جریان رو به پایین می‌تواند استفاده شود.

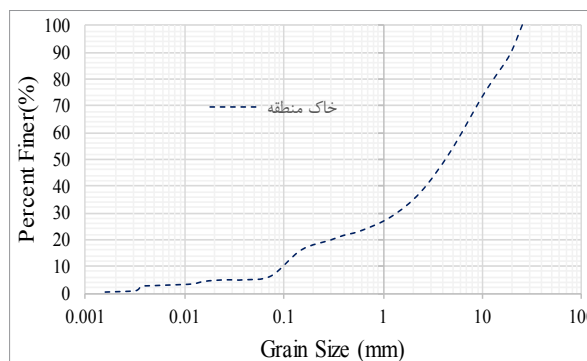
به صورت پراکنده مشاهده شده است. شکل (۲) یک قسمت از فروچاله‌های بالادست سد را نشان می‌دهد. چنانکه در بخش قبل نیز بیان شد، نشست و فروچاله می‌تواند نشانه‌ای از پتانسیل ریزشویی خاک‌ها باشد، بر همین مبنا در این پژوهش از نمونه خاک از نزدیکی محل فروچاله‌ها برداشته شده است. آزمایش ریزشویی بر روی نمونه میانگین دانه‌بندی این نمونه‌ها انجام شد.



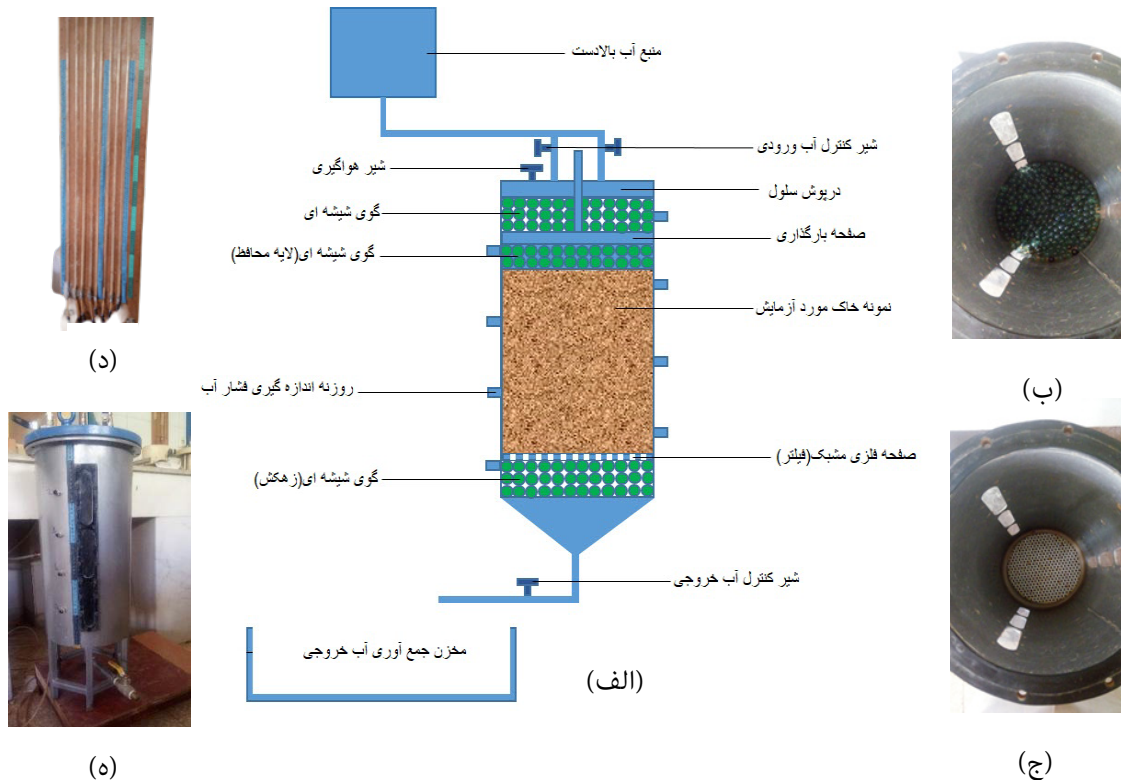
شکل ۲- نمونه‌ای از فروچاله‌های ایجاد شده بعد از آبیگری در بالادست سد بار

۲- زمین شناسی محدوده مورد مطالعه

خاک‌ها بر اساس منشأ زمین شناسی به شش گروه خاک بادی، یخچالی، واریزه‌ای، برج، آبرفتی و خاک‌های ثانوی تقسیم می‌شوند. طبقه‌بندی خاک بر اساس نقش زمین شناسی آن قادر است اطلاعات دقیقی در مورد ساخت، نحوه دانه‌بندی و تاریخچه تنش آن به دست دهد. محدوده مورد مطالعه به لحاظ قرارگیری نسبت به پهنه‌های ساختاری ایران در منطقه زمین شناسی بینالود واقع شده است. زون بینالود یکی از زون‌های زمین ساختی ایران به شمار می‌رود که در امتداد رشته کوه‌های البرز با روند شمال غربی- جنوب شرقی قرار گرفته است. فعالیت شدید گسل‌های تراسی نمای به هم ریخته‌ای



شکل ۳- نمودار دانه‌بندی نمونه خاک مورد استفاده در آزمایش



شکل ۴- (الف): تصویر شماتیک از دستگاه آزمایش ریزشویی، (ب): زهکش (گوی شیشه‌ای)، (ج): فیلتر و واشر لاستیکی، (د): صفحه اندازه‌گیری بار آبی (ه): نمای کلی دستگاه

الف- آماده‌سازی نمونه خاک: باتوجه به دانسیته مورد نظر برای آزمایش و حجم سلول، وزن مورد نیاز از خاک را تعیین کرده و سپس حدود ۷ درصد وزن نمونه، رطوبت به آن اضافه می‌شود. نمونه خاک حدود ۱۶ ساعت به منظور یکنواخت شدن رطوبت در یک ظرف در بسته نگهداری می‌شود.

ب- آماده‌سازی سلول آزمایش: به منظور زهکشی نمونه از یک صفحه فلزی مشبک و مقداری گوی شیشه‌ای استفاده می‌شود (شکل ۴- ب و ج). روی صفحه فلزی یک واشر لاستیکی قرار داده می‌شود تا احتمال خروج آب از کنار جداره به حداقل برسد.

ج- قرار دادن نمونه خاک درون سلول: لایه خاک مورد آزمایش در چند مرحله باتوجه به دانسیته مورد نظر درون سلول کوبیده می‌شود.

د- اشباع‌سازی نمونه: اشباع‌سازی به وسیله شیر پایین دستگاه و در جهت پایین به بالا صورت می‌گیرد. اشباع‌سازی به صورت خیلی آرام است. زمانی که مقداری آب از بالای نمونه خارج شود، مرحله اشباع‌سازی به پایان رسیده است.

ه- شروع آزمایش: در این مرحله منبع آب در ارتفاع مورد نظر قرار داده می‌شود و به شیر بالای دستگاه متصل می‌شود. بعد از باز کردن شیر آب ورودی شیر خروجی نیز باز شده و آب و خاک شسته شده در وان جمع‌آوری می‌شوند. این مرحله تا شفاف شدن آب خروجی

سلول آزمایش بزرگ مقیاس (شکل ۴- ه) دارای قطر داخلی ۲۴۴ میلی‌متر، قطر خارجی ۲۷۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۴۰ میلی‌متر است، همچنین ارتفاع مخروط ۶۰ میلی‌متر و ضخامت صفحه بارگذاری ۱۰ میلی‌متر است. باتوجه به اینکه Luo و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی قطر سلول آزمایش را حداقل ۶ برابر قطر بزرگترین سنگ‌دانه در نظر گرفتند، در این دستگاه نیز قطر سلول ۱۰ برابر قطر بزرگترین دانه در نظر گرفته شد. ارتفاع نمونه نیز بر همین اساس باید حداقل ۶ برابر قطر بزرگترین دانه باشد. جداره دستگاه برای تحمل فشار ۳ بار طراحی شده است و در ۸ نقطه از جداره سلول نیز روزنه‌هایی برای بررسی تراز آب تعبیه شده است که به وسیله لوله نایلونی به پیرومتر لوله ایستاده متصل می‌شود (شکل ۴- د). همچنین همانطور که در شکل (۴- ب، ج و ه) مشخص است، در سه قسمت از جداره سلول، صفحاتی از جنس پلکسی‌گلس برای مشاهده خاک درون سلول تعبیه شده است. به دلیل کاهش مقاومت جداره سلول امکان تعبیه تعداد بیشتر صفحه پلکسی‌گلس وجود ندارد.

۵- روش انجام آزمایش

در این پژوهش، آزمایش ریزشویی به صورت گام‌به‌گام مشابه مراحل زیر انجام شده است.

جدول ۳- نتایج بررسی پایداری نمونه بر اساس روش های تجربی

نام معیار	نتیجه بررسی پایداری
کنی و لو	ناپایدار
شرارد	ناپایدار
وان و فل	پایدار

باتوجه به اینکه روش های تجربی بر اساس یک نوع خاص خاک ارائه شده و ممکن است برای همه نوع دانه بندی نتایج دقیقی برآورد نکنند، در این پژوهش با استفاده روش آزمایشگاهی پتانسیل ریزشوی خاک منطقه بار بررسی شد.

۲- بررسی پایداری خاک بر اساس آزمایش ریزشویی

همانطور که در مقدمه نیز بیان شد، روش های مختلفی برای بررسی پایداری وجود دارد، آزمون های دانسیته در محل انجام شده در مخزن سد نشان می دهد تراکم مصالح مخزن بین حدود ۷۰ تا ۸۵ درصد متغیر است.

براین اساس ناپایداری داخلی مصالح مخزن در چهار تراکم ۷۰، ۷۵، ۸۰ و ۸۵ بررسی شد. پایداری/ ناپایداری داخلی خاک ها بر مبنای میزان ذرات شسته شده و مقدار نشست نمونه در انتهای آزمایش ارزیابی شد.

اثر تراکم بر ناپایداری داخلی

پایداری داخلی خاک با روش درصد وزنی ذرات شسته شده و نشست نمونه بررسی شد. در جدول (۴) این مقادیر برای چهار آزمایش (آزمایش برای چهار درصد تراکم مختلف) ارائه شده است. مبنای تئوری در این روش همان طور که در مقدمه این پژوهش نیز بیان شد، بر این اساس است که اگر ذره های با قطر D بخواند در اثر نیروی تراوش جابه جا شود، باید در مقدار دانه های با اندازه D تا $4D$ کمبود وجود داشته باشد. در این قسمت بیشترین کمبود برای یک دانه با قطر D بررسی می شود. باتوجه به جدول (۴) مشاهده می شود با هر دو معیار $Chang$ و $Zhang$ و معروف، سه نمونه با نسبت تراکم ۷۰٪، ۷۵٪ و ۸۰٪ ناپایدار و نمونه با تراکم ۸۵٪ پایدار است.

جدول ۴- بررسی ناپایداری داخلی خاک در برابر فرسایش بر اساس ذرات شسته شده

نمونه خاک	تراکم نمونه (%)	وزن مخصوص (KN/m^3)	ذرات ریز شسته شده (%)	وزن ذرات شسته شده (g)	ذرات شسته شده از کل نمونه (%)	پایداری/ ناپایداری خاک
خاک منطقه بار	۷۰	۱۵	۲۲/۷۴	۱۰۲۵/۵۰۳	۴/۵۸	ناپایدار
خاک منطقه بار	۷۵	۱۶	۲۰/۴	۱۰۱۳/۰۰۶	۴/۲۳	ناپایدار
خاک منطقه بار	۸۰	۱۷	۱۵/۳	۸۸۳/۴۶۵	۳/۴۸	ناپایدار
خاک منطقه بار	۸۵	۱۸	۲/۰۳	۱۰۰	۰/۳۷	پایدار

در دسته پایدار را برابر ۱/۲ درصد عنوان کردند. برای محاسبه درصد نشست، همان طور که در مقدمه بیان شد، در انتهای هر آزمایش میزان نشست به طور متوسط محاسبه می شود و

ادامه پیدا می کند. در زمان های مورد نیاز تراز آب از روی سطح آب در لوله های پیزومتر ثبت می شود. بعد از شفاف شدن آب خروجی، منبع آب به ارتفاع بالاتر منتقل شده و ظرف جمع آوری آب خروجی نیز تعویض می شود. این مراحل برای ۴ بار آبی (۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۲ متر) تکرار شده و آب و خاک خروجی برای هر مرحله به صورت جداگانه جمع آوری شده و تا زمان ته نشینی کامل نگهداری می شود. در انتهای آزمایش و بعد از باز کردن درپوش سلول، میزان نشست در چهار نقطه با استفاده از کولیس اندازه گیری و ثبت شد. ی- جمع آوری دانه های شسته شده: خاک ته نشین شده در هر کدام از مراحل، به صورت جداگانه روی الک ۲۰۰ جمع آوری و در گرم خانه خشک شد. سپس نمونه خاک، وزن شده و در مرحله بعد روی الک ۲۰۰ شسته شده تا دانه بندی برای هر کدام صورت گیرد. این تست برای چهار تراکم ۷۰، ۷۵، ۸۰ و ۸۵ درصد انجام و میزان فرسایش و پایداری یا عدم پایداری نمونه خاک با هم مقایسه شد، که در بخش نتایج و بحث ارائه شده است.

نتایج و بحث

هدف از این پژوهش بررسی پتانسیل ریزشویی خاک منطقه بار نیشابور به صورت آزمایشگاهی و همچنین تأثیر تراکم بر این پدیده است. نتایج بررسی پایداری خاک منطقه بر اساس معیارهای تجربی از قبیل $I_{stomina}$ ، $Chang$ & $Zhang$ ، Wan & $Fell$ ، $Bourenkova$ ، $Sherard$ و $Kenny$ & Lau در پژوهش نظری و همکاران (۱۴۰۱) ارائه شده است. در این پژوهش نتایج بررسی پایداری حاصل از آزمون های آزمایشگاهی ارائه شده است.

۱- بررسی پایداری خاک بر اساس معیارهای تجربی

معیارهای تجربی زیادی برای بررسی ناپایداری خاک در برابر ریزشویی ارائه شده است. در این پژوهش خاک مورد مطالعه بر اساس معیارهای Wan & $Fell$ ، $Sherard$ ، $Kenny$ & Lau و $Sherard$ بررسی شد که نتایج آن در جدول (۳) ارائه شده است.

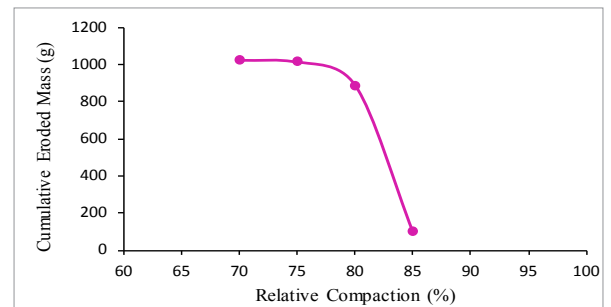
علاوه بر درصد دانه های فرسایش یافته، تغییر شکل قائم نمونه ها نیز اندازه گیری شد. $Chang$ و $Zhang$ (۲۰۱۳) در پژوهش خود حداکثر میزان نشست برای قرارگیری نمونه خاک

در ادامه درصد نشست نسبت به ضخامت اولیه نمونه تعیین می‌شود. در جدول (۵) نتایج آزمایش برای چهار تراکم مختلف از نمونه خاک منطقه بار آورده شده است. مشاهده می‌شود که در نمونه خاک برای تراکم‌های ۷۰٪، ۷۵٪ و ۸۰٪ نمونه ناپایدار است.

جدول ۵- نتایج پایداری خاک بر اساس میزان نشست

نمونه خاک	تراکم نمونه (%)	نشست (%)	پایداری / ناپایداری خاک
خاک منطقه بار	۷۰	۱۳/۳	ناپایدار
خاک منطقه بار	۷۵	۱۰	ناپایدار
خاک منطقه بار	۸۰	۳/۳۳	ناپایدار
خاک منطقه بار	۸۵	۰~	پایدار

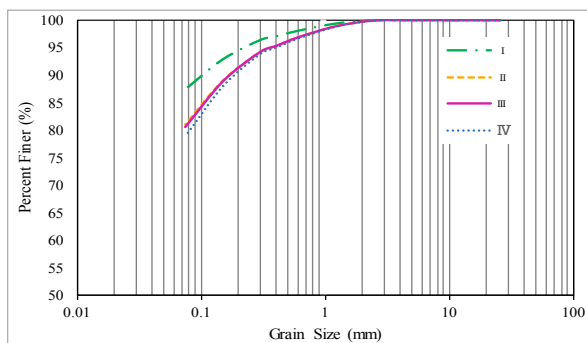
در جدول (۴) نتایج آزمایش‌ها در چهار تراکم برای نمونه خاک منطقه بار ارائه شده است. مشاهده می‌شود، هر چه تراکم افزایش پیدا کرده، درصد ذرات شسته شده کمتر از ۰/۲ میلی‌متر کاهش یافته است و در تراکم ۸۵٪ خاک پایدار است (شکل ۵).



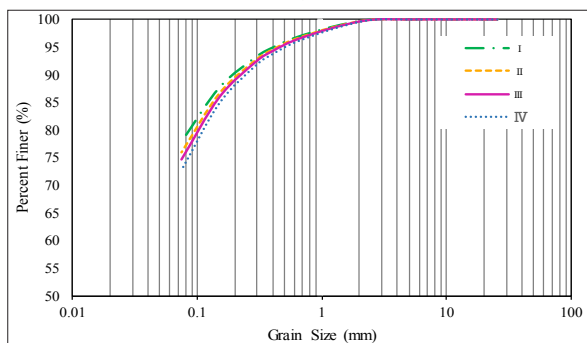
شکل ۵- نمودار تغییرات میزان ذرات شسته شده در برابر تراکم

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود با افزایش تراکم، ذرات شسته شده درشت‌تر شده‌اند. در آزمایش ریزشویی با چهار نسبت تراکم مختلف مشاهده شد با افزایش نسبت تراکم، گرادیان نقطه‌ای و متوسط افزایش می‌یابد، دلیل این پدیده می‌تواند ایجاد روزه‌های کوچکتر بین دانه‌های خاک باشد، روزه‌های کوچکتر باعث افزایش سرعت جریان در روزه‌ها شده و در نتیجه گرادیان نقطه‌ای در نمونه افزایش پیدا می‌کند. گرادیان بالاتر نیز می‌تواند ذرات درشت‌تری را جابه‌جا کند در نتیجه در تراکم ۸۰٪ دانه‌بندی ذرات شسته شده نسبت به تراکم ۷۰٪ درشت‌تر شده است، هرچند میزان کل ذرات شسته شده با افزایش تراکم کاهش یافته است.

همچنین آزمایش ریزشویی برای هر تراکم در چهار بار آبی مختلف انجام شد. ذرات شسته شده در هر چهار مرحله نیز به صورت جداگانه جمع‌آوری و دانه‌بندی شده است. در شکل‌های (۷) تا (۹) برای سه تراکم ۰/۷۰، ۰/۷۵ و ۰/۸۰ نمودار دانه‌بندی برای دانه‌های شسته شده در ۴ بار آبی (۱، ۱/۴، ۱/۸، ۲/۲ متر) رسم و مقایسه شد. در این شکل‌ها بار آبی ۱ متر با نام I، بار آبی ۱/۴ با II، بار آبی ۱/۸ متر با III و بار آبی ۲/۲ متر با IV نمایش داده شده است. با توجه به شکل‌های (۷) تا (۹) مشاهده می‌شود در بار آبی ۱ متر که گرادیان متوسط کمتر است، ذرات ریزتری شسته شده‌اند. با افزایش بار آبی گرادیان متوسط در سلول بالا رفته و دانه‌های درشت‌تری نسبت به بار آبی اول شسته شده‌اند.



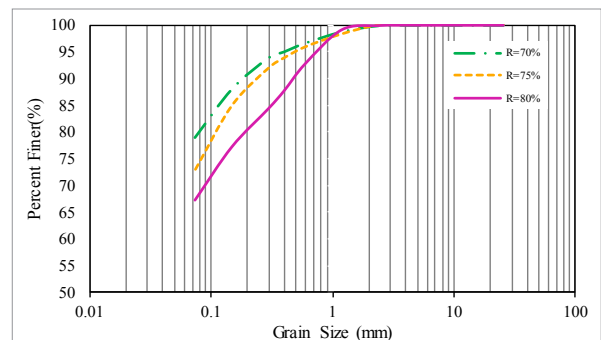
شکل ۷- دانه‌بندی ذرات شسته شده در چهار بار آبی مختلف برای تراکم ۷۰٪



شکل ۸- دانه‌بندی ذرات شسته شده در چهار بار آبی مختلف برای تراکم ۷۵٪

۳- بررسی ذرات شسته شده در تراکم‌های مختلف

در این بخش ذرات شسته شده در سه آزمایش (تراکم ۷۰، ۷۵ و ۸۰ درصد)، در طی آزمایش پس از جمع‌آوری، دانه‌بندی شده و نمودار آن‌ها در شکل (۶) مقایسه شده است. این نمودار برای آزمایش نمونه با بار آبی چهارم که بیشترین مقدار را دارد ارائه شده است.



شکل ۶- دانه‌بندی ذرات شسته شده در سه تراکم مختلف نمونه A

معروف، محمدعلی. (۱۳۹۹). بررسی اثر مورفولوژی دانه‌ها بر ناپایداری داخلی خاک‌های دانه‌ای. پایان‌نامه دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

نظری، ملیحه، معروف، محمدعلی، اخترپور، علی، و بلوری بزاز، جعفر. (۱۴۰۱). بررسی پتانسیل ریزشویی در پی آبرفتی سدها (مطالعه موردی: سد بار نیشابور). هفتمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، سازه و زلزله. دانشگاه فرهنگ و هنر، تهران، ایران.

نوروزی، بهنام. (۱۳۹۷). ابزار دقیق و رفتارنگاری در سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، انتشارات نوید شیراز. چاپ اول. شیراز، ایران.

Adel, H. D., Bakker, k., & Breteler, M.K. (1988). Internal stability of minestone. in Proceedings of the International Symposium on Modelling Soil-Water- Structure Interactions. International Association for Hydraulic Research (IAHR). Netherlands, Rotterdam, Balkema.

USACE (U.S. Army Corps of Engineers). (1953). Investigation of filter requirements for underdrains. Tech. Memo. No. 3-360. U.S. Waterways Experiment Station. Vicksburg, Mississippi.

Bendahmane, F., Marot, D., & Alexis, A. (2008). Experimental Parametric Study of Suffusion and Backward Erosion. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(1), 57–67. doi: [10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:1\(57\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:1(57))

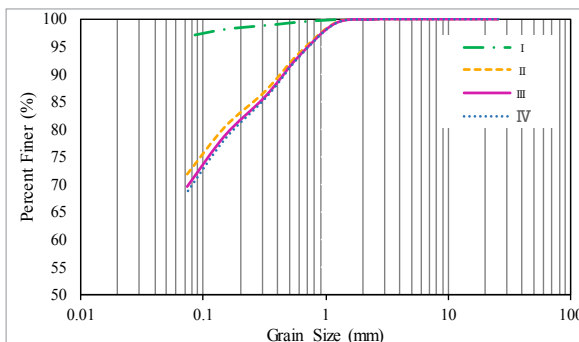
Chapuis, R., Contant, A., & Baass, K. A. (1996). Migration of fine in 0-20 mm crushed base during placement, compaction, and seepage under laboratory conditions. *can. geotech*, 33(1), 168–176. doi: [10.1139/t96-032](https://doi.org/10.1139/t96-032)

Chang, D. S., & Zhang, L. M. (2013). Extended internal stability criteria for soils under seepage. *Soils Found.*, 53(4), 569–583. doi: [10.1016/j.sandf.2013.06.008](https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.06.008)

Cividini, A., Bonomi, S., Vignati, G. C., & Gioda, G. (2009). Seepage-Induced Erosion in Granular Soil and Consequent Settlements. *International Journal of Geomechanics*, 9(4), 187–194. doi: [10.1061/\(asce\)1532-3641\(2009\)9:4\(187\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1532-3641(2009)9:4(187))

Fannin, R. J., & Moffat, R. (2006). Observations on internal stability of cohesionless soils. *Geotechnique*, 56(7), 497–500. doi: [10.1680/geot.2006.56.7.497](https://doi.org/10.1680/geot.2006.56.7.497)

Fell, R., Wan, C. F., Cyganiewicz, J., & Foster, M. (2003). Time for Development of Internal Erosion and Piping in Embankment Dams. *J. Geotech. Geoenviron-*



شکل ۹- دانه‌بندی ذرات شسته شده در چهار بار آبی مختلف برای تراکم ۸۰٪

نتیجه‌گیری

- باتوجه به نتایج ریزشویی که برای نمونه خاک منطقه انجام شد، نمونه خاک دارای پتانسیل ریزشویی است و فروچاله‌های ایجاد شده پس از آبیگری می‌تواند مربوط به این پدیده باشد.

- نتیجه انجام آزمایش ریزشویی با چهار درصد تراکم مختلف نشان داد تراکم می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش میزان ریزشویی داشته باشد، افزایش تراکم، میزان ذرات فرسایش یافته را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

- مقایسه نتایج آزمایش ریزشویی برای چند نوع تراکم، نشان می‌دهد هرچه تراکم کمتر باشد میزان ریزدانه بیشتری شسته می‌شود.

- با افزایش گرادیان درصد دانه‌های شسته شده افزایش می‌یابد همچنین افزایش گرادیان در نمونه با تراکم بیشتر باعث می‌شود ذرات شسته شده درشت‌تر شوند.

پی‌نوشت‌ها

- 1-Suffusion
- 2-Concentrated Leak
- 3-Backward Erosion
- 4-Contact Erosion
- 5-International Commission On Large Dams
- 6-United States Bureau of Reclamation

منابع

رنجبر ایوری، محسن. (۱۳۹۰). بررسی ویژگی‌های زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی ساختگاه سد بار نیشابور. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

- Moffat, R. (2005). Experiments on the Internal Stability of Widely Graded Cohesionless Soils. Doctor of Philosophy Thesis, Faculty of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Marot, D., & Benamar, A. (2012). Erosion Geomaterials, Suffusion, Transport and Filtration of Fine Particle in Granular Soil. Wiley-ISTE. New York, USA, doi: [10.1002/9781118561737](https://doi.org/10.1002/9781118561737)
- Maroof, A., Mahboubi, A., & Noorzad, A. (2021). Effects of grain morphology on suffusion susceptibility of cohesionless soils. *Granular Matter*, 23, 8. <https://doi.org/10.1007/s10035-020-01075-1>
- Maroof, A., Mahboubi, A., Vincens, E., & Hassani, M. (2024). A developed capillary tube model for suffusion susceptibility of non-cohesive soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83, 17. doi: [10.1007/s10064-023-03515-7](https://doi.org/10.1007/s10064-023-03515-7)
- Sherard, J.L. (1979). Sinkholes in Dams of Coarse, Broadly Graded Soils (Paper introduced by Jean Lafleur). Proceedings of the 13th ICOLD Congress. India, 2, 25-35.
- Skempton, A., & Brogan, J. (1995). Experiments on piping in sandy gravels. *Geotechnique*, 45(3), 449-460. <https://doi.org/10.1680/geot.1994.44.3.449>
- Sun, B. C. (1989). Internal Stability of Clayey to Silty Sands. Doctor of Philosophy Thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, USA.
- Wan, C. F., & Fell, R. (2008). Assessing the Potential of Internal Instability and Suffusion in Embankment Dams and Their Foundations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(3), 401-407, doi: [10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:3\(401\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:3(401))
- mental Engineering, 129(4), 307-314. doi: [10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2003\)129:4\(307\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:4(307))
- Foster, M., Fell, R., & Spannagle, M. (2000). The statistics of embankment dam failures and accidents. *Can. Geotech, J*, 37(5), 1000-1024. doi: [10.1139/t00-030](https://doi.org/10.1139/t00-030)
- Honjo, Y., Haque, M., & Tsai, K. (1996). Self-filtration behaviour of broadly and gap-graded cohesionless soils. in Proceedings of the 2nd International Conference on Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering. Montreal, Canada.
- Kaoser, S., Barrington, S., Elektorowicz, M., & Ayadat, T. (2006). The influence of hydraulic gradient and rate of erosion on hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures. *Soil Sediment Contam*, 15(5), 481-496. doi: [10.1080/15320380600847815](https://doi.org/10.1080/15320380600847815)
- Kezdi, A. (1979). soil physics. Elsevier. Scientific Publishing Company. Amsterdam, North-Holland.
- Kenny, T. C., & Lau, D. (1985). Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(2), 215-225. doi: [10.1139/t85-029](https://doi.org/10.1139/t85-029)
- Kenny, T. C., & Lau, D. (1986). Internal stability of granular filter: Reply. *can. geotech*, 23, 420-423. DOI: [10.1139/t86-068](https://doi.org/10.1139/t86-068)
- Lafleur, J., Mlynarek, J., & Rollin, A. L. (1989). Filtration of broadly graded cohesionless soils. *J. Geotech. Engineering*, 115(12), 1747-1768. doi: [10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1989\)115:12\(1747\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:12(1747))
- Lafleur, J., & Nguyen, P. (2007). Internal stability of particles in dam cores made of cohesionless broadly graded moraines. Teylor & Francis. CRC Press. 1st Edition. Balkema, South Africa.
- Li, M. (2008). Seepage Induced Instability in Widely Graded Soils. Doctor of philosophy Thesis, Faculty of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- Li, Sh., Russell, A. R., & Muir Wood, D. (2024). Internal erosion of a gap-graded soil and influences on the critical state. *Acta Geotechnica*, 1-19. doi: [10.1007/s11440-024-02249-4](https://doi.org/10.1007/s11440-024-02249-4)
- Luo, Y. (2020). Effect of deviator stress on the initiation of suffusion. *Acta Geotechnica*, 15: 1607-1617. doi: [10.1007/s11440-019-00859-x](https://doi.org/10.1007/s11440-019-00859-x)