

میزان رسوب در ستون‌های زهکش ماسه‌ای بعد از انجام زهکشی در خاک

امیرحسین پاشائی^۱، عادل عساکره*^۲، عبدالحسین حداد^۳

^۱ کارشناسی ارشد عمران- ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

^۲ استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

دریافت: ۱۴۰۱/۳/۲۵، بازنگری: ۱۴۰۱/۵/۲۴، پذیرش: ۱۴۰۱/۶/۷، نشر آنلاین: ۱۴۰۱/۶/۷

چکیده

یکی از مسائل مرتبط با ستون‌های زهکش بحث انسداد در آن‌ها می‌باشد. در ستون‌های زهکش به دلیل ورود ذرات ریزدانه از خاک اطراف به داخل ستون زهکش، منافذ به مرور مسدود می‌گردند. در این تحقیق چهار ستون زهکش به کمک سلول ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفت، که شامل ستون‌های تک‌مصالح و ستون‌های مخلوط می‌باشند. بر روی هر نمونه، ۸ آزمایش انجام شده. مصالح مورد استفاده در این ستون‌ها شامل ۳ اندازه ماسه به قطر میانگین ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ سانتی‌متر است. به منظور بررسی عملکرد میزان رسوب، خاک با آب مخلوط شده، که درصد اختلاط این ریزدانه با آب ۰، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد از وزن آب است. در تمام آزمایش‌ها جریان آب، با هد ۱ متر وارد ستون‌های زهکش شده و پس از عبور از ستون از آن خارج شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد میزان رسوب در ستون‌های زهکش، به نوع جنس مصالح، نسبت تخلخل مؤثر، نسبت تخلخل غیر مؤثر، نسبت تخلخل اولیه، اصطکاک بین مصالح داخل ستون با ریزدانه مخلوط در آب، حفرات در سطح مصالح، زبری و شکل هندسی مصالح می‌باشد. رسوب در ستون‌های زهکش باعث کاهش نسبت تخلخل، کاهش عبور جریان، افزایش اصطکاک داخلی و ایجاد پل‌های ارتباطی بین ریزدانه و در نتیجه انسداد و از بین رفتن عملکرد زهکشی ستون می‌شود. دانه‌بندی خاک قبل و بعد انجام آزمایش نشان‌دهنده این است که ذرات عبوری از الک ۲۰۰ به‌طور کلی از نمونه‌ها عبور کرده و بیشترین وزن ذرات رسوب کرده، ذرات بزرگتر از ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: ستون‌های زهکش، نسبت تخلخل، رسوب‌گذاری، نفوذپذیری، مخلوط آب و خاک.

۱- مقدمه

خاک‌های بسیار نرم نصب شده‌اند، منجر به ریختن بیش از حد رس به قسمت‌های داخلی ستون‌های سنگی شده و باعث کاهش ظرفیت باربری ستون سنگی و همچنین ظرفیت زهکشی آن می‌شود (Almeida, ۲۰۱۹). انسداد ستون سنگی به‌طور گسترده‌ای گزارش شده است و همچنین اثر انسداد آن بر میزان تحکیم خاک نرم بهبود یافته با ستون‌های سنگی قابل رویت است (Zhou و Tai, ۲۰۱۹). استفاده از ستون‌های سنگی یک تکنیک محبوب در بهبود زمین‌هایی با خاک ریزدانه است که می‌تواند به راحتی مسیر زهکشی و زمان تحکیم را کاهش دهد، همچنین باعث افزایش سختی و مقاومت برشی کلی فونداسیون شود (Indraratna, ۲۰۱۷).

زهکشی‌های عمودی، مانند زهکشی‌های پیش‌ساخته، زهکشی‌های ماسه‌ای، ستون‌های سنگی و شمع‌های سنگریزه‌ای که به‌طور معمول برای تسریع در تحکیم یا افزایش مقاومت خاک استفاده می‌شود. بسیاری از مطالعات قبلی گزارش داده‌اند که

از لحاظ تاریخی برای مهندسان ژئوتکنیک طراحی و ساخت سازه‌ها روی رسوبات خاک نرم یک چالش بوده است. به‌گونه‌ای که امکان سرویس‌دهی و محدودیت شرایط و همچنین هزینه و برنامه زمانی مورد توجه قرار گرفته است. به‌منظور رفع این الزامات، انواع زیادی از روش‌های ساخت و ساز در دسترس می‌باشد. به‌عنوان مثال، جایگزین کردن خاک نرم با مصالح دیگر، تقویت خاکریز، استفاده از مواد پرکننده سبک وزن، زهکش‌های عمودی پیش‌ساخته و سربر یا مکش برای تسریع در تحکیم، تراکم مرحله‌ای، استفاده از ستون‌های سنگی یا گزینده‌های مختلف از مخلوط سیمان و خاک مانند اختلاط عمیق یا شمع با آرماتور تقویت شده می‌باشد. در بین کلیه روش‌های ساخت و ساز موجود، استفاده از ستون‌های سنگی در خاک نرم یکی از متداول‌ترین موارد برای کاهش نشست و بهبود پایداری و ظرفیت باربری می‌باشد. با این حال، هنگامی که ستون‌های سنگی در

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲-۳۵۸۹۳۹۸

آدرس ایمیل: pashaie74@gmail.com (ا. ح. پاشایی)، asakereh@semnan.ac.ir (ع. عساکره)، Haddad@semnan.ac.ir (ع. حداد).

۲۰۰۹). شرایطی که تحت آن زهکش به صورت یک چاه خالی عمل می‌کند. به عنوان معیاری برای انتخاب زهکش استفاده می‌شود (Fausey, ۲۰۰۵).

از روش‌های بهسازی خاک برای رفع و حل بسیاری از مشکلات خاک و بهبود خصوصیات خاک‌های موجود استفاده شده است. گزینه‌های مناسب اقتصادی و محیط زیستی غالباً استفاده می‌شود (Nicholson, ۲۰۱۵). در محلی که جریان و ویژگی‌های زهکشی در زمین تغییر کرده است. این شامل پایین آمدن سطح آب توسط چاه‌های زهکشی یا آبیگری، افزایش یا کاهش نفوذپذیری خاک‌ها، سرعت تحکیم و پیش تحکیمی برای به حداقل رساندن نشست‌ها در آینده، کاهش تراکم‌پذیری و افزایش مقاومت، فیلتراسیون جریان آب زیرزمینی، کنترل گرادیان‌های هیدرولیکی و ایجاد موانع هیدرولیکی است. کنترل یا تغییر خصوصیات هیدرولیکی ممکن است از طریق تکنیک‌های متنوعی حاصل شود، که ممکن است روش‌های بهبود را در بر گیرد (Nicholson, ۲۰۱۵). بر اساس تئوری تحکیم که برای خاک نرم با زهکشی‌های عمودی گفته شده است، پی‌های بهبود یافته که در آن‌ها ستون‌های پر شده با مصالح دانه‌ای استفاده شده است، نه تنها سرعت تحکیم را تسریع می‌کنند بلکه نشست‌های کل و نسبی را کاهش می‌دهند (Doan, ۲۰۲۰). هدایت هیدرولیک برای محاسبه کاهش ارتفاع در سیستم‌ها استفاده می‌شود (Singh و Bhunia, ۲۰۱۸).

با توجه به تحقیقات پیشین، استفاده از ستون‌های زهکش، در پروژه‌های عمرانی امری ضروری می‌باشد. انسداد در ستون‌های زهکش اصلی‌ترین عامل از بین رفتن عملکرد ستون می‌باشد. در این تحقیق سعی بر افزایش عملکرد ستون‌های زهکش و کاهش انسداد در این ستون‌ها با روش افزایش نسبت تخلخل می‌باشد. عوامل تأثیرگذار بر روند زهکشی در این تحقیق مورد بحث قرار گرفته است، با توجه به ابعاد ماسه‌های استفاده شده در این ستون‌ها و میزان متفاوت نسبت تخلخل سعی نمایش میزان کاهش نسبت تخلخل می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

شن‌ها، براساس ASTM مجموعه‌ای از قطعات سنگی معدنی در اندازه ۷۵ میلی‌متر (۳ اینچ) تا اندازه ۴/۷۵ (الک ۴) می‌باشند (PCA, ۱۹۸۷)، که می‌توان در تهیه ملات سیمانی، تهیه آسفالت، تهیه فیلتر و زهکش، زیرسازی راه‌آهن، زیرسازی راه‌ها و مصالح پرکننده استفاده کرد (Adams, ۲۰۱۷). شن مورد استفاده برای زهکشی به‌طور معمول از ۱/۲ تا ۱ اینچ است و هرچه اندازه آن بزرگتر باشد، جریان آب بهتر و احتمال گرفتگی و انسداد کمتر خواهد بود (Han, ۲۰۱۵).

منطقه تأثیر و مقاومت چاه باعث از بین رفتن فشار اضافی آب حفره‌ای در خاک نرم بهبود یافته با زهکش می‌شوند (Nguyen, ۲۰۲۰). ستون سنگی حاوی فضای خالی یا فضای منافذ است. ریزدانه‌ها به سطح منافذ متصل می‌شوند، که از طریق آن آب نفوذی در حال جریان است. مطالعات نشان می‌دهد که نیروی هیدروپنماتیکی یا کلوتیدی به‌طور کلی مسئول جدا کردن ریزدانه‌ها از منافذ است (Kousik و Suravi, ۲۰۱۸). ستون‌های سنگی به دلیل نفوذپذیری زیاد مسیر زهکشی را ایجاد می‌کنند (Weber و همکاران, ۲۰۱۰).

مکانیسم گرفتگی در ستون‌های سنگی در مراحل مختلف متفاوت است. تراکم یا لرزش دلیل اصلی شروع انسداد در هنگام نصب است زیرا نیرویی که برای تراکم کردن ستون‌ها وارد می‌شود، مصالح ستون را به خاک رس اطراف فشار می‌دهد و در نتیجه دانه‌های ریز خاک را به داخل حفره‌های شن می‌ریزد (Han, ۲۰۱۵). انسداد ستون‌های سنگی از مخلوط شدن مصالح ستون و خاک رس اطراف حاصل می‌شود. این یک فرایند فیزیکی می‌باشد و علت بیولوژیکی یا شیمیایی در این امر دخیل نمی‌باشد. انسداد فیزیکی فرایندی است که به موجب آن ذرات ریز در منافذ ستون نفوذ و رسوب می‌کنند (Yong, ۲۰۱۳). برای خصوصیات خاک رسوب کرده در ستون، هیچ اندازه‌گیری مستقیمی در دسترس نیست، اما نفوذپذیری پایین تر و قابلیت فشرده‌سازی بالاتر را می‌توان حدس زد (Kousik و Suravi, ۲۰۱۸).

عملکرد ستون‌های سنگی در دفع اضافه فشار حفره‌ای می‌تواند تحت تأثیر انسداد قرار گیرد. به دلیل گرادیان هیدرولیکی بالا در اتصال خاک و ستون، انتقال ذرات رس به منافذ ستون ناگزیر رخ می‌دهد، در نتیجه باعث کاهش قابل توجهی در نفوذپذیری ستون می‌شود. این امر باعث کاهش شعاع مؤثر ستون از نظر زهکشی و همچنین کاهش نفوذپذیری در منطقه مسدود شده می‌شود (Indraratna, ۲۰۱۳).

نتایج به دست آمده از آزمایش ستون‌های سنگی با مصالح دانه‌ای و توزیع اندازه دانه‌های مختلف نشان می‌دهد که، هرچه اندازه ذرات داخل ستون بزرگ‌تر و خوب دانه‌بندی شده باشند، سرعت رسوب کندتر خواهد شد (Yu و Kerry, ۲۰۱۰). ستون‌هایی با سرعت جریان بالا میزان گرفتگی بیشتری نسبت به ستون‌هایی دارند که سرعت جریان کمی دارند و در طیف وسیعی از دماهای مورد بررسی، درجه حرارت هرچه بیشتر باشد میزان رسوب بیشتر است (Armstrong و Kerry, ۲۰۰۰). موارد عملکردی ستون‌های سنگی شامل، تخلیه اضافه فشار آب حفره‌ای، افزایش مقاومت برشی زهکشی نشده خاک، کاهش میزان نشست کل و تقاضای، کاهش پتانسیل روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای و افزایش اصطکاک بین دانه‌های خاک می‌شود (Bryan,

خاک اضافه شده به مخزن آب برای تعیین میزان رسوب، شامل بازه‌ای از ذرات خاک می‌باشد. آزمایش دانه‌بندی طبق استاندارد ASTM D422-63 انجام شده و در شکل (۲) ارائه شده است. تعیین بازه‌ای از خاک به دلیل مشخص شدن اندازه ذرات رسوب کرده در ستون‌های زهکش می‌باشد.

۱-۲- برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق با توجه به طراحی انجام شده، تعداد آزمایش‌ها ۳۲ مورد می‌باشد. آزمایش‌ها بر روی سه مدل ماسه با قطر ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. خاک بنتونیت که با آب مخلوط شده درصد وزنی نسبت وزن آب هر آزمایش تعیین شده است که با این وجود ۰، ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد وزن آب می‌باشد که با دو حجم ۵ و ۱۰ لیتر آب مخلوط شده و با هد یک متر وارد نمونه‌ها می‌شود. سلول به قطر ۹ و ارتفاع ۲۲/۵ سانتی‌متر با مصالح نام برده شده پر می‌شود. مواردی از نمونه‌های پر شده در شکل (۳) ارائه شده است. روند کلی انجام آزمایش به صورت جدول (۱) ارائه شده است.



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۳- نمونه‌های پر شده: (الف) S₁، (ب) S₃، (ج) S₁ * S₂ * S₃

ماسه استفاده شده در این تحقیق شامل سه اندازه می‌باشد، که نوع اول ماسه ریز با بعد میانگین ۰/۵ سانتی‌متر، نوع دوم ماسه متوسط با بعد میانگین ۰/۷۵ سانتی‌متر و نوع سوم ماسه بزرگ با بعد میانگین ۱ سانتی‌متر، در نظر گرفته شده است. برای استفاده از نام ماسه در نمودارها و نتایج و انجام پروسه آزمایش ماسه ۰/۵ سانتی‌متری را S₁، ماسه ۰/۷۵ سانتی‌متری را S₂ و ماسه ۱ سانتی‌متری S₃ نام‌گذاری شده است. ماسه‌ها به صورت شسته شده مورد استفاده قرار می‌گیرد تا ریزدانه‌های چسبیده به آن تأثیری در نفوذپذیری و اصطکاک ذرات مخلوط در آب با آن نگذارد. در شکل (۱) نمونه ماسه‌ها ارائه شده است.



(الف)

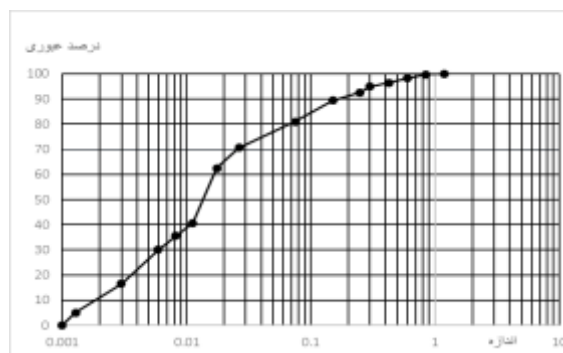


(ب)



(ج)

شکل ۱- مصالح استفاده شده در این تحقیق: (الف) S₁، (ب) S₂، (ج) S₃



شکل ۲- منحنی دانه بندی خاک

ظرف جمع‌آوری کرده. آب جمع‌آوری شده را وزن کرده و طبق معادله نسبت تخلخل حجم آب به‌دست آمده حجم حفرات محاسبه می‌شود، برای به‌دست آوردن حجم ذرات جامد یا حجم مصالح داخل سلول آزمایش، کافی است که حجم استوانه به قطر ۹ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲/۵ سانتی‌متر را محاسبه و حجم آب جمع‌آوری شده که حجم حفرات را از آن تفریق کرده تا حجم مصالح به‌دست آید.

آزمایش تعیین ضریب نفوذپذیری با هد ثابت طبق استاندارد ASTM D2434-68 می‌باشد. ضریب نفوذپذیری و میزان نسبت تخلخل در هر ستون در جدول (۲) ارائه شده است. برای به‌دست آوردن حجم ذرات به دام افتاده در ستون داشتن چگالی ویژه این ذرات الزامی می‌باشد، با استفاده از آزمایش چگالی ویژه (تعیین وزن مخصوص ذرات جامد خاک با پیکنومتر) بر اساس استاندارد آزمایش ASTM D854-10 این آزمایش انجام شده و چگالی ویژه در خاک محبوس در ستون ها به‌دست آمده است. چگالی به‌دست آمده در این آزمایش با معادله (۱) محاسبه می‌شود که از این فرمول وزن مخصوص خاک استخراج شده که با استفاده از این وزن مخصوص طبق معادله (۲) حجم ذرات محبوس شده به‌دست می‌آید (Balzer, ۲۰۱۵).

$$G_s = \gamma_s / \gamma_w \quad (1)$$

$$\gamma_s = W_s / V_s \quad (2)$$

جدول ۲- مقادیر ضریب نفوذپذیری و نسبت تخلخل ستون‌ها

شماره	نوع ستون پر شده	ضریب نفوذپذیری (متر بر ثانیه)	نسبت تخلخل
۱	G ₁	۰/۰۷۸۰	۰/۵۰۸
۲	G ₂	۰/۰۸۱۹	۰/۵۸۷
۳	G ₃	۰/۰۸۸۸	۰/۷۱۰
۴	1/3 G _{1,2,3}	۰/۰۸۵۸	۰/۶۳۳

۳-۱- تخلخل

تخلخل باز را می‌توان به‌عنوان وجود کانال‌های باز بین دانه‌ها تعریف کرد. مقدار تخلخل مؤثر^۱ یا تخلخل باز^۲ نسبتی از حجم مصالح است که سیال می‌تواند به‌طور مؤثر درون آن جریان داشته باشد. این نوع تخلخل، حفره‌های به‌هم پیوسته را در نظر می‌گیرد و حفره‌های بسته (غیرمتصل) را شامل نمی‌شود. تخلخل مؤثر اهمیت زیادی در جریان آب‌های زیرزمینی و همچنین انتقال مواد محلول دارد. تخلخل غیرمؤثر^۳ یا تخلخل بسته^۴ نسبتی از حجم کل که سیال در آن حضور دارد اما نمی‌تواند به‌طور مؤثر جریان

جدول ۱- روند کلی انجام آزمایش

شماره آزمایش	سری	ابعاد ماسه (cm)	حجم آب (litre)	میزان خاک مخلوط در آب (%)
۴-۱		۰/۵	۵	
۸-۵			۱۰	
۱۲-۹	تک		۵	
۱۶-۱۳	مصالح	۰/۷۵	۱۰	۷/۵، ۵، ۰
۲۰-۱۷			۵	۱۰ و
۲۴-۲۱		۱	۱۰	
۲۸-۲۵	مخلوط	۰/۷۵، ۰/۵	۵	
۳۲-۲۹		۱	۱۰	

۳-۲- مراحل انجام آزمایش

طریقه آزمایش به این صورت می‌باشد که درون سلول موردنظر مصالح را پر کرده که روی هر مصالح ۸ آزمایش انجام می‌شود. آزمایش را نسبت به آزمایش‌های طراحی شده که ممکن است شامل یک نوع یا مخلوط مصالح باشد در ارتفاع‌های معین که تعیین شده است پر کرده و شیرهای زهکشی را باز و در نهایت سلول را در جای خود محکم و صفحه بالایی سلول را جاگذاری کرده، نسبت به آزمایش مورد نظر که ممکن است حجم آب ۵ و ۱۰ لیتر باشد مخزن دستگاه را با آب پر کرده دینام را روشن و آب شروع به اختلاط می‌کند. طراحی آزمایش‌ها در خصوص بنتونیت درصد وزنی نسبت به وزن آب می‌باشد، بنتونیت‌ها را از قسمتی که برای ورودی خاک مد نظر قرار داده وارد کرده و کاملاً با آب مخلوط شده تا مخلوطی همگن به‌دست آید. حال که سلول و مصالح، آب و طرح اختلاط آن آماده شده است، شیر خروجی مخزن را باز و در همان لحظه کرنومتر (زمان‌سنج) را فعال کرده و زمان زهکشی را برای هرآزمایش یادداشت کرده. سلول را باز کرده و ذراتی که درون مصالح رسوب کرده است را داخل ظرفی شسته و آن مصالح را وارد اون کرده تا وزن رسوب هر آزمایش رویت شود. در این قسمت وزن رسوب مشخص می‌شود.

۳-۳- بحث و نتایج

با توجه به رابطه نسبت تخلخل حجم ذرات جامد یا حجم مصالح استفاده شده در ستون و حجم حفرات باید محاسبه شود. در این مرحله حجم ستون که قطر آن ۹ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۲/۵ سانتی‌متر است را بر اساس اندازه‌گیری به‌دست آورده، ستون‌ها را با هرکدام از مصالح پر کرده شیرها را بسته و داخل آن را با آب تا ارتفاع ۲۲/۵ سانتی‌متر پر کرده، بعد از پر کردن و رسیدن به ارتفاع معین و هواگیری کامل شیرها را باز کرده و آب خروجی را داخل

3. Ineffective Porosity

4. Closed Porosity

1. Effective Porosity

2. Open Porosity

هیدرولیکی به دست آمده توسط Das، ارائه شده است (Das، ۲۰۱۴):

$$k \propto \frac{e^3}{1+e^3} \quad (۳)$$

که در آن K هدایت هیدرولیکی، e نسبت تخلخل

جدول ۳- محدوده هدایت هیدرولیکی برای خاک‌های مختلف

نوع خاک	هدایت هیدرولیکی k (cm/sec)
شن بزرگ تا متوسط	بیشتر از 10^{-1}
ماسه بزرگ تا ماسه ریز	بین 10^{-3} - 10^{-1}
ماسه ریز، ماسه سیلتی	بین 10^{-5} - 10^{-3}
سیلت، رس سیلتی	بین 10^{-6} - 10^{-5}
رس	کمتر از 10^{-7}

Chapuis یک رابطه تجربی برای k در رابطه با معادله (۳) به صورت معادله (۴) پیشنهاد داده است:

$$k(cm/s) = 2.4622[D_{10}^2 \frac{e^3}{(1+e)}]^{0.7825} \quad (۴)$$

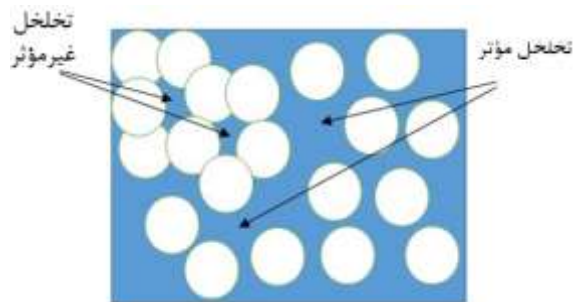
که در آن D سایز مؤثر (میلی‌متر) می‌باشد. معادله (۴) برای شن و ماسه طبیعی و یکنواخت برای پیش‌بینی k معتبر است، که در محدوده 10^{-1} تا 10^{-3} سانتی‌متر بر ثانیه باشد. این معادله را می‌توان برای ماسه‌های طبیعی و لجن‌دار و بدون خاصیت پلاستیکی گسترش داد. برای مواد خرد شده یا خاک‌های سیلتی با مقداری خاصیت پلاستیکی معتبر نیست. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، Amer و Awad در سال ۱۹۷۴ رابطه (۵) را برای k در خاک‌های دانه‌ای پیشنهاد کرده‌اند:

$$k = 3.5 \times 10^{-4} \left(\frac{e^3}{1+e} \right) C_u^{0.6} D_{10}^{2.32} \left(\frac{\rho_w}{\eta} \right) \quad (۵)$$

که در آن C_u ضریب یکنواختی، P_w چگالی آب (g/cm³)، η لزجت دینامیکی (g.s/cm²) با توجه به رابطه‌های تجربی ارائه شده و آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، می‌توان رابطه بین نسبت تخلخل، اندازه مؤثر دانه‌ها و هدایت هیدرولیکی را مطابق گراف رسم شده در شکل (۶) نمایش داد. با ترسیم معادله خط در این گراف، معادله (۶) استخراج شده است.

$$k = 1898.1 \left[\frac{D_{10}^{0.3}}{D_{10}} \times \frac{e^3}{1+e} \right]^2 - 302.08 \left[\frac{D_{10}^{0.3}}{D_{10}} \times \frac{e^3}{1+e} \right] + 12.137 \quad (۶)$$

داشته باشد را نمایش می‌دهد. در این نوع تخلخل، تنها حفره‌های بسته در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تعریف تخلخل مؤثر و غیرمؤثر، درک مناسب مورفولوژی یک محیط متخلخل از اهمیت بالایی برای مطالعه جریان آب برخوردار است (Creus، ۱۹۹۸، Vega، ۲۰۱۸، Brand، ۱۹۹۶، Liu، ۲۰۰۱، Konyashin و Chukalovskaya، ۱۹۹۷). در شکل (۴) مفهوم این تخلخل ارائه شده است. با توجه به مفهوم تخلخل بین دانه‌های جامد در ستون‌های زهکش، می‌توان در شکل (۵) تخلخل مؤثر و غیرمؤثر را در نمونه ماسه نمایش داد.



شکل ۴- تخلخل مؤثر و غیرمؤثر

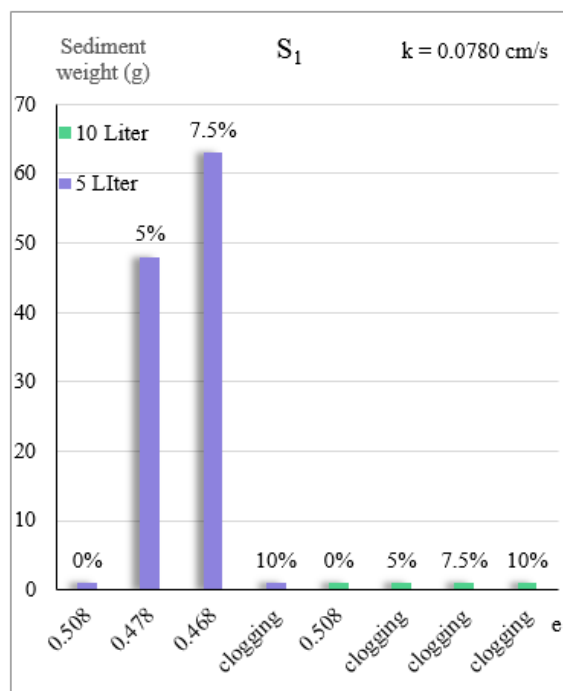


شکل ۵- تخلخل مؤثر و غیرمؤثر در ستون زهکش پر شده با ماسه

۳-۲- روابط هدایت هیدرولیکی - نسبت تخلخل

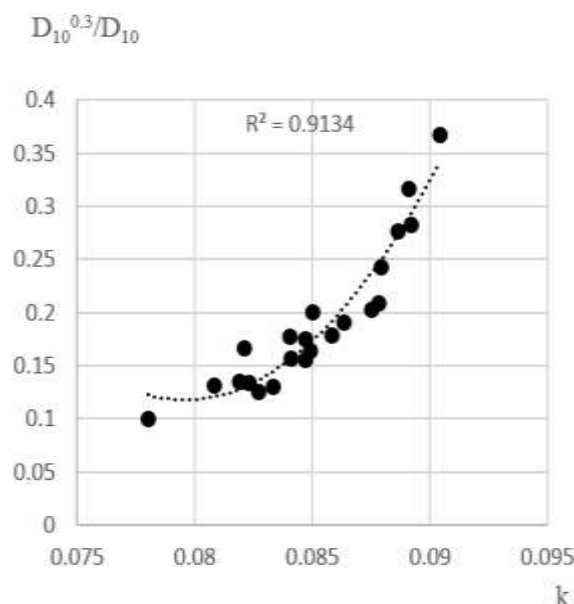
در خاک‌های دانه‌ای، میزان هدایت هیدرولیکی اساساً به نسبت تخلخل بستگی دارد. در گذشته معادلات متعددی برای ارتباط مقدار هدایت هیدرولیکی به نسبت تخلخل در خاک دانه‌ای ارائه شده است. با این حال کریر^۵ در سال ۲۰۰۳ معادله (۳) را برای استفاده توصیه کرده است، محدوده هدایت هیدرولیکی برای خاک‌های مختلف در جدول (۳) با هدف مقایسه بین هدایت هیدرولیکی انجام شده در این تحقیق با هدایت

به صورت پراکنش اول حجم آب و پراکنش دوم درصد ریزدانه نسبت به حجم آب نمایش داده شده است، که در این ستون‌ها محور عمودی میزان رسوب به گرم و محور افقی نسبت تخلخل بعد از انجام آزمایش می‌باشد. آزمایش‌هایی که در آن ستون زهکش مسدود شده‌اند، مشخص شده است. در ستون‌های زهکش که درصد ریزدانه اضافه شده به خاک برای تشکیل دوغاب صفر می‌باشد، فقط آب (بدون ریزدانه) از آن عبور کرده، که میزان عبوردهی حجم آب در قسمت نتایج ارائه شده است. ضریب نفوذپذیری هرستون با هد ثابت طبق استاندارد ASTM D2434 - 68 آزمایش و عدد ضریب نفوذپذیری در نمودارها ارائه شده است. مصالح با قطر ۰/۵ سانتی‌متر به دلایل ذکر شده و میزان رسوب‌گذاری رسم شده در هر نمودار مستعد انسداد می‌باشند. در شکل‌های (۷) تا (۱۰) منحنی ارائه شده است.



شکل ۷- وزن رسوب- نسبت تخلخل در سری ماسه ۰/۵ سانتی‌متری

$$k = 1898.1 \left[\frac{D_{10}^{0.3}}{D_{10}} \times \frac{e^3}{1+e} \right]^2 - 302.08 \left[\frac{D_{10}^{0.3}}{D_{10}} \times \frac{e^3}{1+e} \right] + 12.137 \quad (6)$$



شکل ۶- گراف نسبت تخلخل- هدایت هیدرولیکی

با ساده کردن معادله (۶) به صورت خطی و لگاریتمی، معادله‌های (۷) و (۸) به دست می‌آید:

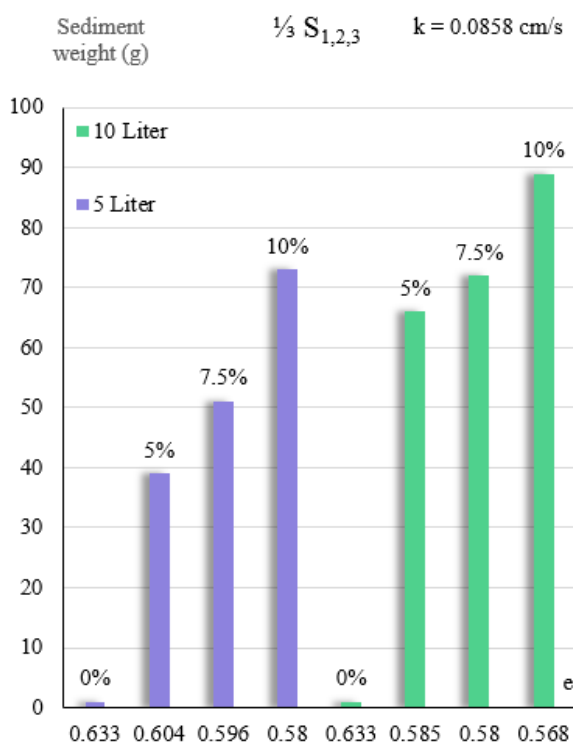
$$k = 19.58 \left[\frac{D_{10}^{0.3}}{D_{10}} \times \frac{e^3}{1+e} \right] - 1.4732 \quad (7)$$

$$k = 1.6433 \ln \left(\left[\frac{D_{10}^{0.3}}{D_{10}} \times \frac{e^3}{1+e} \right] \right) + 4.2731 \quad (8)$$

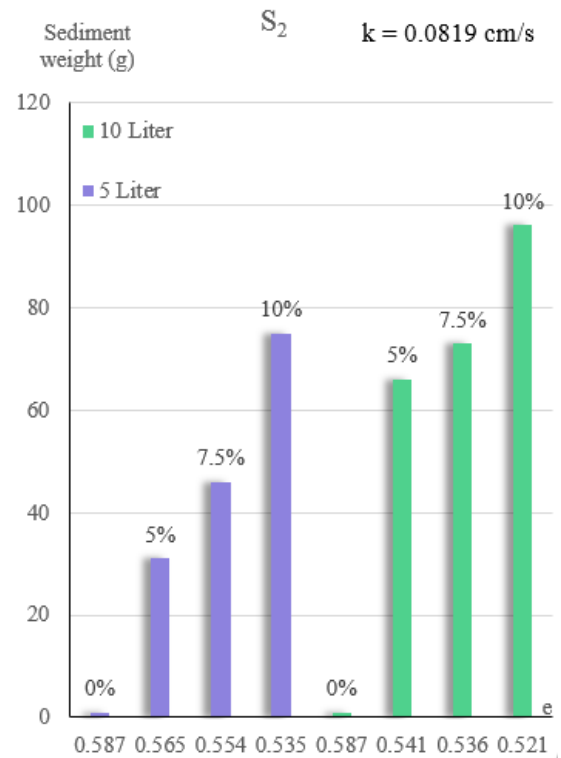
۳-۳- مقادیر رسوب در ستون‌های زهکش

میزان رسوب در ستون‌های زهکش، به دلایل نوع جنس مصالح، نسبت تخلخل مؤثر، نسبت تخلخل غیرمؤثر، نسبت تخلخل اولیه، اصطکاک بین مصالح داخل ستون با ریزدانه مخلوط در آب، حفرات در سطح مصالح، زبری و شکل هندسی مصالح می‌باشد. رسوب در ستون‌های زهکش باعث کاهش نسبت تخلخل، کاهش عبور جریان، افزایش اصطکاک داخلی و ایجاد پل‌های ارتباطی بین ریزدانه (به دلیل چسبندگی بین ریزدانه‌ها) و در نتیجه انسداد و از بین رفتن عملکرد زهکشی ستون می‌شود. در این تحقیق ۳۲ آزمایش انجام شده است، که می‌توان نمودار میزان رسوب‌گذاری در هر آزمایش را به تفکیک بیان کرد.

شکل‌ها حاوی ۸ ستون می‌باشند (تعداد ۸ آزمایش با حجم آب و درصد اختلاط ریزدانه با آب می‌باشد، که بر روی هر ستون



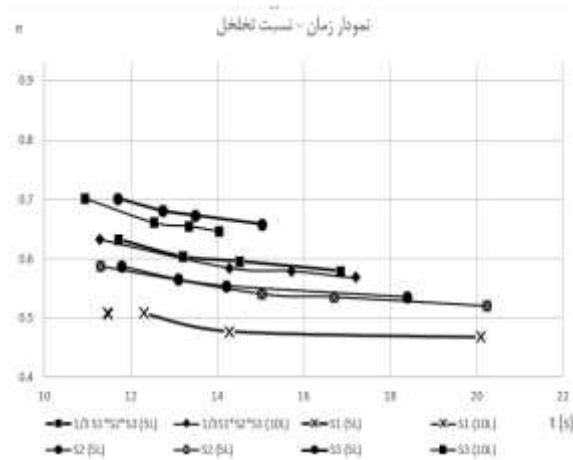
شکل ۱۰- وزن رسوب- نسبت تخلخل در سری ماسه مخلوط



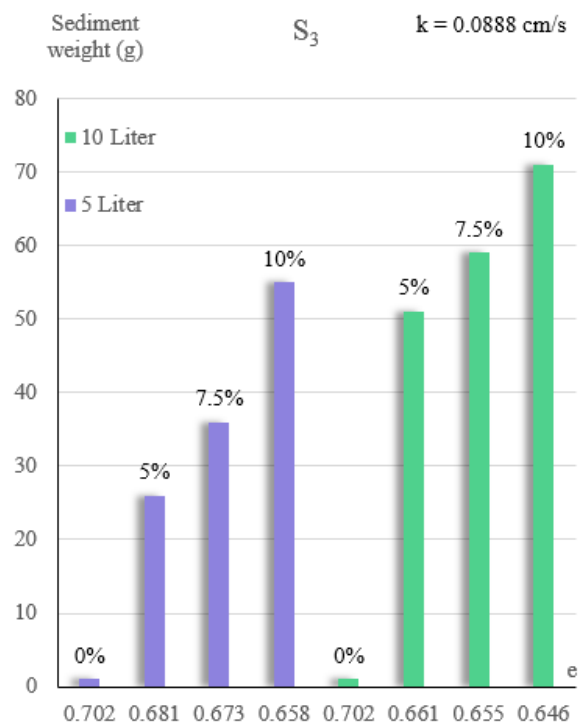
شکل ۸- وزن رسوب- نسبت تخلخل در سری ماسه ۰/۷۵ سانتی متری

۴-۳- مقادیر نسبت تخلخل به زمان

نمودارهای رسم شده در این سری از نتایج به صورت نسبت تخلخل- زمان عبور دوغاب ارائه شده است. با توجه به زمان عبور هر سری از آزمایش و کاهش نسبت تخلخل بعد از انجام آزمایش، می توان این نتایج را تفسیر کرد. نمودارها برای دو حجم ۵ و ۱۰ لیتر و به صورت گروهی ارائه شده است. در شکل (۱۱) این نمودار رسم شده است.



شکل ۱۱- زمان- نسبت تخلخل در ماسه ها



شکل ۹- وزن رسوب- نسبت تخلخل در سری ماسه یک سانتی متری

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نمودارها و ارائه نسبت تخلخل و نفوذپذیری هر ستون به صورت جداگانه تحلیل نتایج می‌توان نتایج و جمع‌بندی کلی را به صورت زیر ارائه کرد:

(۱) اصطکاک در مصالح استفاده شده در ستون‌های زهکشی باعث کاهش نفوذپذیری به دلیل رسوب کردن ذرات خاک مخلوط شده با آب خواهد شد، مصالحی مثل ماسه از اصطکاک و چسبندگی برخوردار هستند، که این امر میزان رسوب داخل ستون‌های زهکش را افزایش و سبب انسداد به مرور زمان خواهد شد.

(۲) با استفاده از دو حجم مختلف آب و نتایج به دست آمده، زمانی که فشار آب افزایش یابد وزن رسوب کاهش خواهد یافت به دلیل این‌که فشار آب ذرات محبوس در ستون را جابه‌جا کرده و عملکرد انسداد کاهنده خواهد شد. البته زمانی که نسبت تخلخل به میزان ماسه‌های ۰/۵ سانتی‌متری نباشد، چون سبب انسداد خواهد شد.

(۳) دانه‌بندی خاک قبل و بعد انجام آزمایش نشان‌دهنده این است که ذرات عبوری از الک ۲۰۰ به‌طور کلی از نمونه‌ها عبور کرده و بیشترین وزن ذرات رسوب کرده، ذرات بزرگتر از ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد.

(۴) درصد میزان رسوب نسبت به خاک اولیه که با آب مخلوط شده است، در نمونه‌ی ماسه یک سانتی‌متری کمترین و در نمونه ماسه ۰/۵ سانتی‌متری بیشترین میزان است. یعنی بیشترین میزان رسوب در ماسه ۰/۵ سانتی‌متری و کمترین کاهش رسوب در ماسه‌ی یک سانتی‌متری می‌باشد.

(۵) با توجه به نمودار نسبت تخلخل- زمان، هرچه نسبت تخلخل کاهش پیدا کرده است، میزان زمان لازم برای عبور حجم یکسان مخلوط آب و خاک افزایش پیدا کرده است، که این پدیده انسداد در زمان زهکشی را نمایش می‌دهد.

(۶) میزان رسوب در ستون‌های زهکش، به دلایل نوع جنس مصالح، نسبت تخلخل مؤثر، نسبت تخلخل غیرمؤثر، نسبت تخلخل اولیه، اصطکاک بین مصالح داخل ستون با ریزدانه مخلوط در آب، حفرات در سطح مصالح، زبری و شکل هندسی مصالح می‌باشد. رسوب در ستون‌های زهکش باعث کاهش نسبت تخلخل، کاهش عبور جریان، افزایش اصطکاک داخلی و ایجاد پل‌های ارتباطی بین ریزدانه و در نتیجه انسداد و از بین رفتن عملکرد زهکشی ستون می‌شود.

(۷) نسبت تخلخل مؤثر در ستون‌های زهکش ماسه‌ای، رابطه مستقیم با ابعاد ماسه‌ها دارد. با افزایش ابعاد ماسه‌ها به دلیل ایجاد نشدن پل‌های ارتباطی بین آب و خاک مخلوط عبوری از ستون‌های زهکش، شاهد افزایش نسبت تخلخل مؤثر در

ستون‌های زهکش ماسه‌ای شده، که این امر سبب کاهش میزان رسوب در این ستون‌ها می‌شود.

(۸) زبری و شکل هندسی در مصالح به دلیل حفرات و میزان نسبت تخلخل مؤثر، باعث تفاوت در میزان انسداد می‌شود. زمانی که مصالح زیر باشند و مصالح به صورت تیز گوشه میزان نسبت تخلخل کاهش و باعث ایجاد چسبندگی بین سطح زیر مصالح و ریزدانه‌های موجود در خاک می‌شود.

۵- مراجع

- Adams K, Networks, 2017, July 18, (2nd edstor.) [online]. Available: <https://www.hunker.com/13424513/size-type-of-gravel-for-a-french-drain>
- Almeida M, "Generalities" in Geosynthetic Encased Columns for Soft Soil Improvement, Ed. Netherlands: Taylor & Francis Group, 2019, 1-6, ISBN: 978-1-315-17714-4.
- Balzer M, "Identification of the growth defects responsible for pitting corrosion on sputter coated steel samples by Large Area High Resolution mapping", Thin Solid Films, 2015, 581 99-106. <https://doi:10.1016/j.tsf.2014.12.014>.
- Brand W, Gendig C, "Corrosion behaviour of hybrid coatings", 1996, 291, 343-347.
- Bryan A, "A review of field performance of stone columns in soft soils. Geotechnical Engineering, Issue", 2009, GE6, 323-334. <https://doi.org/10.1680/geng.2009.162.6.323>
- Creus J, Idrissi H, Mazille H, Sanchette F, Jacquot F, "Improvement of the corrosion resistance of CrN coated steel by an interlayer", Surf, Coatings Technol. 107 183-190. 1998. doi:10.1016/S0257-8972(98)00646-X.
- Das BM, "Geotechnical properties and exploration of soil in principles of foundation engineering", Eighth Edition, Das, B.M. United States of America, Cengage Learning, 2014, 5-75.
- Doan S, "Analytical solution for free strain consolidation of stone column-reinforced soft ground considering spatial variation of total stress and drain resistance", Computers and Geotechnics, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103291>
- Fausey N, "Drainage", In Drainage, Surface and Subsurface, Ed. USA: Elsevier, 2005, 409-413. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00352-0>
- Han J, Principles and practice of ground improvement. John Wiley & Sons, 2015.
- Indraratna B, "Experimental simulation and mathematical modelling of clogging in stone Column", Canadian Geotechnical Journal, 2017, 1-39.
- Indraratna B, "Numerical solution of stone column-improved soft soil considering arching, clogging, and smear effects", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000789.
- Kerry R, Armstrong D, "Particle size and clogging of granular media permed with leachate", Journal of

- Yong CF, McCarthy DT, Deletic A, "Predicting physical clogging of porous and permeable pavements", *Journal of hydrology*, 2013, 481, 48-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.009>
- Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126, 775-786.
- Kerry R, Yu Y, "Factors affecting the clogging of leachate collection systems in msw landfills, *International Congress on Environmental Geotechnics*, 2010, 6, 1-23.
- Konyashin IY, Chukalovskaya TV, "A technique for measurement of porosity in protective coatings, *Surf*", *Coatings Technol*, 1997, 5-11. doi:10.1016/S0257-8972(95)02758-0.
- Liu C, Leyland A, "EIS comparison on corrosion performance of PVD TiN and CrN coated mild steel in 0.5 N NaCl aqueous solution", *Corrosion Science*, 2001, 43, 1953-1961. doi:10.1016/S0010-938X(00)00188-8.
- Liu C, Leyland A, Matthews A, "Corrosion resistance of multi-layered plasma-assisted physical vapour deposition TiN and CrN coatings", *Surface and Coatings Technology*, 2001, 164-173. doi:10.1016/S0257-8972(01)01267-1.
- Nguyen P, "Large-strain analysis of vertical drain-improved soft deposit consolidation considering smear zone, well resistance, and creep effects. *Computers and Geotechnics*", 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103602>
- Nicholson P, "Ground improvement techniques and applications", In *Soil Improvement and Ground Modification Methods*, Ed. USA: Elsevier, 2015, 9-17. ISBN: 978-0-12-408076-8
- Nicholson P, "What is ground improvement?," In *Soil Improvement and Ground Modification Methods*, Ed. USA: Elsevier, 2015, 1-6, ISBN: 978-0-12-408076-8
- PCA, "Soil-Cement Handbook", Portland Cement Association, Skokie, USA, 1987.
- Singh R, Bhunia P, "Understanding intricacies of clogging and its alleviation by introducing earthworms in soil biofilters", *Science of the Total Environment*, 2018, 633, 145-156.
- Suravi P, Kousik D, "Effect of clogging of stone column on drainage capacity during soil liquefaction, *Soils and Foundations*", 2018, 1-12.
- Suravi P, Kousik, D, "Effect of clogging of stone column on drainage capacity during soil liquefaction", *Soils and Foundations*, 2018, 90-143.
- Tai P, Zhou C, "Effects of Clogging on Settlement Predictions of Ground Improved with Stone Columns", *Korean Society of Civil Engineers*, 2019. DOI 10.1007/s12205-019-2414-y
- Vega J, Scheerer H, Andersohn H, Oechsner M, "Experimental studies of the effect of Ti interlayers on the corrosion resistance of TiN PVD coatings by using electrochemical methods", *Corrosion Science*, 2018, 133, 240-250. doi:10.1016/j.corsci.2018.01.010.
- Weber TM, Plötze M, Laue J, Peschke G, Springman SM, "Smear zone identification and soil properties around stone columns constructed in-flight in centrifuge model tests", *Geotechnique*, 2010, 60 (3), 197-206.



EXTENDED ABSTRACT

The Amount of Sediment in Sand Drainage Columns after Drainage in the Soil

Amir Hossein Pashaie, Abdolhossein Haddad*, Adel Asakereh

Civil Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 15 June 2022; Review: 15 August 2022; Accepted: 29 August 2022

Keywords:

Drainage columns, Void ratio, Sedimentation, Permeability, Slurry.

1. Introduction

Historically for geotechnical engineers, the design and construction of structures on soft soil sediments has been a challenge. The ability to serve and limit the conditions as well as the cost and time program is considered. To meet these requirements, many types of construction methods are available. For example, replacing soft soil with other materials, reinforcing embankment, using lightweight filling materials, prefabricated vertical drainage and overhead or suction to accelerate consolidation, stage density, use of stone columns or different options from cement and cement mixture. The soil is like a deep mixing or candle with reinforced reinforcement. Among all existing construction methods, the use of stone columns in soft soil is one of the most common things to reduce session and improve stability and freight capacity. However, when the stone columns are installed in very soft soils, it results in excessive clay pouring into the inner parts of the stone columns and reduces its stone column bearing capacity as well as its drainage capacity (Almeida, 2019). The stone column obstruction has been widely reported and its obstruction on the amount of soft soil improved with the stone columns is visible (Tai and Zhou, 2019). The use of stone columns is a popular technique in improving land with fine soil that can easily Reduce drainage and time of consolidation, as well as increased hardness and shear resistance (Indraratna, 2017). Vertical drainage, such as prefabricated drainage, sand drainage, stone columns and pebbles that are commonly used to accelerate or increase soil resistance. Many previous studies have reported that the area of the impact and resistance of the well causes excess water pressure in the soft soil to be improved with drainage (Nguyen, 2020). The stone column contains empty space or pores. The microphones are attached to the surface of the pores, through which penetrating water flows. Studies show that hydrodynamic or colloidal force is generally responsible for separating the microphones from the pores (Survi and Kousik, 2018). Stone columns create drainage paths due to high permeability (Weber et al., 2010).

The mechanism of clogging in stone columns varies at different stages. Density or tremor is the main reason for the start of obstruction when installation is because the force entered to compress the columns presses the column material to the surrounding clay, thereby pouring small soil grains into the sand cavities (HAN, 2015). The obstruction of the stone columns is obtained by mixing the column materials and the surrounding clay. This is a physical process and the biological or chemical cause is not involved. Physical obstruction is a process whereby small particles penetrate and sediment (Yong, 2013).

2. Methodology

The sand used in this study consists of 3 sizes, the first type of fine sand with a mean dimension of 0.5 cm, the second type of medium sand with a mean dimension of 0.75 cm and the third type of large sand with an average dimension of 1 cm, intended intended ls. To use the name of sand in charts and results and perform

the process of the sand test is 0.5 cm, S₁, 0.75cm, S₂ and 1 cm S₃. The sand is used in a washed so that the micro-stylus does not affect the permeability and friction of the mixed particles in the water. Fig. 1 is a sample of sand.

The soil added to the water reservoir to determine the amount of sediment includes a range of soil particles. The grading test is performed according to the ASTM D422-63 standard and presented in Fig. 2. Determination of the soil interval is due to the size of the precipitated particles in the drainage columns.



Fig. 1. The materials used in this research

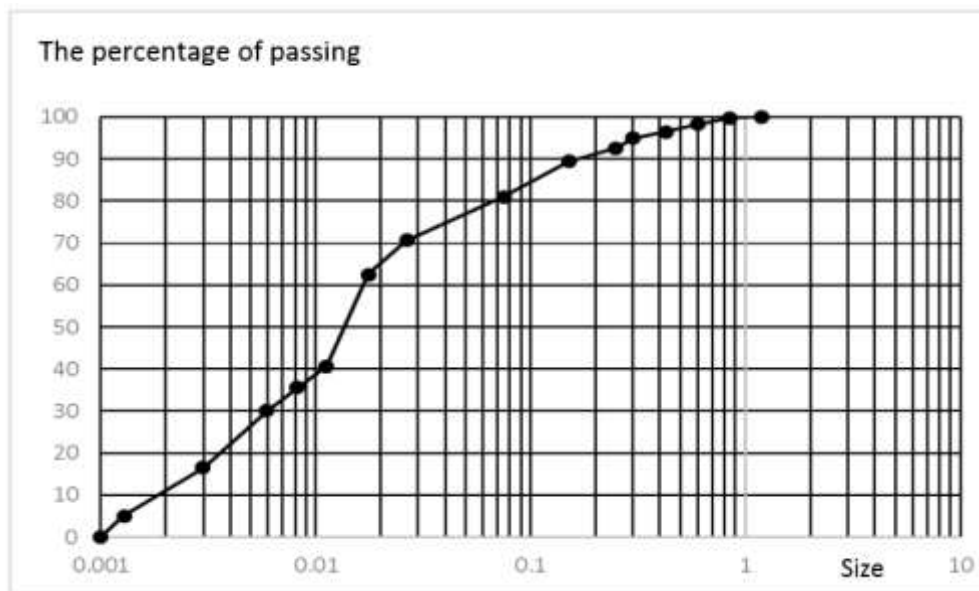


Fig. 2. Grain curve

3. Results and discussion

Depending on the relation of void ratio, the volume of solid particles or the volume of materials used in the column and the volume of the cavities should be calculated. At this stage, the column volume, which is 9 cm in diameter and 22.5 cm height, obtained the measurement based on the measurement, the columns closed with each of the materials filled with water and inside it with water up to 22.5 height. Fill the centimeter, after filling and reaching a certain height and full ventilation of the valves and collecting the outlet water in the container. Weighing the collected water and according to the equation of the porosity of the water volume of the cavities, the volume of the cavities is calculated, to obtain the volume of solid particles or the volume of materials inside the test cell, it is sufficient that the volume of the cylinder is 9 cm in diameter and height of 5/5 Calculate 22 cm and collect water volume to subtract the volume of cavities to obtain the volume of materials.

The testing coefficient of permeability coefficient with a fixed head according to the ASTM D2434-68-68. The permeability coefficient and the void ratio in each column are presented in Table 1. To obtain the volume of particles trapped in the column, the special density of these particles is required, using special density testing (specific gravity of soil solid particles with a picnic soil) based on the ATM D854-10 test standard and this special density is performed. Found in the soil trapped in the columns.

The density obtained in this experiment is calculated with Formula 1, which is extracted from this formula, which is obtained by this specific gravity according to Formula 2 of the detained particles (Balzer, 2015).

$$Gs = \gamma_s / \gamma_w \tag{1}$$

$$\gamma_s = W_s / V_s \tag{2}$$

Table 1. Coefficient of permeability and void ratio of columns

No	Type	Permeability coefficient (m/s)	Void ratio
1	G ₁	0.0780	0.508
2	G ₂	0.0819	0.578
3	G ₃	0.0888	0.710
4	1/3 G _{1,2,3}	0.858	0.633

3.1. Hydraulic guidance relationships

In grain soils, hydraulic conductivity is essentially dependent on porosity. In the past, numerous equations have been provided to connect the amount of hydraulic conductivity in void ratio in the grain soil. However, in 2003, Carrier has recommended the equation 3 for use.

$$k \propto \frac{e^3}{1+e^3} \tag{3}$$

Where in K Hydraulic conductivity, E void ratio, chapuis has an empirical relationship for K in relation to equation (3) as an equation (4):

$$k(cm/s) = 2.4622 \left[D_{10}^2 \frac{e^3}{(1+e)} \right]^{0.7825} \tag{4}$$

According to laboratory results, Amer and AWAD in 1974 suggested the relationship (5) for K in grain soils:

$$k = 3.5 \times 10^{-4} \left(\frac{e^3}{1+e} \right) C_u^{0.6} D_{10}^{2.32} \left(\frac{\rho_w}{\eta} \right) \tag{5}$$

Where in C_u Uniformity coefficient, ρ_w Water density (g/cm³), η Dynamic viscosity (g.S/cm²), given the empirical relationships presented and the experiments in this study, the relationship between void ratio, effective grain size, and hydraulic conductivity can be displayed according to the Fig. 3. By drawing the line equation in this graph, the equation 6 is extracted.

$$k = 1898.1 \left[\frac{D_{10}^{0.3}}{D_{10}} \times \frac{e^3}{1+e} \right]^2 - 302.08 \left[\frac{D_{10}^{0.3}}{D_{10}} \times \frac{e^3}{1+e} \right] + 12.137 \tag{6}$$

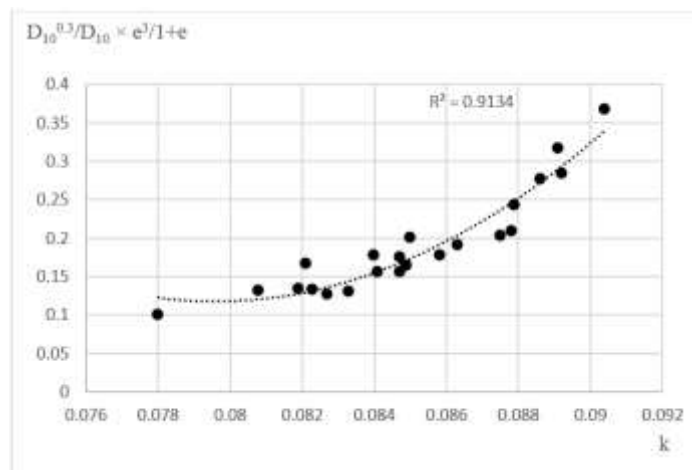


Fig. 3. Graph void ratio-hydraulic conductivity

4. Conclusions

Considering the charts and presenting the void ratio and permeability of each column separately, the results analysis can be presented as follows:

1) Farsi in the materials used in the drainage columns will reduce permeability due to the deposition of soil particles mixed with water, such as sand have friction and adhesion, which increases the amount of deposition inside the drainage columns and causes blockage to block. It will be time-run.

2) Using two different volumes of water and the results obtained, when the water pressure is increased, the weight of the sediment will decrease because the water pressure of the particle in the column will move and the obstruction function will decrease. However, when the ratio of porosity to the amount of sand is 0.5 cm, it will cause obstruction.

3) Soil aggregation before and after the test indicates that the particles passing through the sieve 200 are generally passed through the samples and the highest weight of the particles is precipitated, the particles greater than 0.5 mm.

4) The percentage of sediment compared to the primary soil mixed with water is the highest in the sand sample of 1 cm and the highest in the 0.5 cm sand sample. That is, the highest amount of sediment in the sand is 0.5 cm and the lowest deposition decrease in 1 cm.

5) According to the porosity -time ratio diagram, as the void ratio decreased, the amount of time required for the same volume of water and soil mixture has increased, which displays the obstruction phenomenon during drainage.

6) The amount of deposition in the drainage columns, due to the reasons for the type of material, the ratio of effective porosity, the ratio of ineffective porosity, the ratio of the primary porosity, the friction between the materials inside the column and the micro -mix in the water, the cavities at the surface of the material, roughness and geometrical shape of the materials. Deposition in drainage columns reduces void ratio, reduces current passing, increased internal friction, and creates communication bridges between the microphone, resulting in obstruction and elimination of column drainage function.

7) The ratio of porosity effective in sand drainage columns is directly related to the dimensions of the sand. With the increase in the dimensions of the sand due to the lack of communication bridges between the water and the mixture of a mixture passing through the drainage columns, there is an increase in the effective porosity in the sand drainage columns, which reduces the amount of sediment in these columns.

8) Roughness and geometric shape in materials due to cavities and effective void rates cause difference in obstruction. When the materials are below and the materials are sharply reduced the void ratio and causes adhesion between the rough surface of the materials and the micro-soil.

5. References

- Almeida M, "Generalities" in Geosynthetic Encased Columns for Soft Soil Improvement, Ed. Netherlands: Taylor & Francis Group, 2019, 1-6, ISBN: 978-1-315-17714-4.
- Balzer M, "Identification of the growth defects responsible for pitting corrosion on sputter coated steel samples by Large Area High Resolution mapping", Thin Solid Films, 2015, 581 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.12.014>.
- Han J, Principles and practice of ground improvement. John Wiley & Sons; 2015.
- Indraratna B, "Experimental simulation and mathematical modelling of clogging in stone Column", Canadian Geotechnical Journal, 2017, 1-39.
- Nguyen P, "Large-strain analysis of vertical drain-improved soft deposit consolidation considering smear zone, well resistance, and creep effects. Computers and Geotechnics", 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103602>
- Suravi P, Kousik D, "Effect of clogging of stone column on drainage capacity during soil liquefaction, Soils and Foundations", 2018, 1-12.
- Tai P, Zhou C, "Effects of Clogging on Settlement Predictions of Ground Improved with Stone Columns", Korean Society of Civil Engineers, 2019. DOI 10.1007/s12205-019-2414-y
- Weber TM, Plötze M, Laue J, Peschke G, Springman SM, "Smear zone identification and soil properties around stone columns constructed in-flight in centrifuge model tests", Geotechnique, 2010, 60 (3), 197-206.
- Yong CF, McCarthy DT, Deletic A, "Predicting physical clogging of porous and permeable pavements", Journal of hydrology, 2013, 481, 48-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.009>