

بر آورد نفوذپذیری خاک‌های چسبنده اشباع در سدهای زیرزمینی با استفاده از مؤلفه‌های فیزیکی

نادرقلی ابراهیمی*، محمد تاج‌بخش، منوچهر فتحی مقدم و سید حبیب موسوی جهرمی**

* نگارنده مسئول: پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. ص. پ: ۱۱۳۶-۱۳۴۴۵، تلفن: ۰۲۱)۴۴۹۰۱۲۱۴، پیام‌نگار: nebrahimi81@yahoo.com

** به ترتیب: عضو هیأت علمی پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی تهران؛ دانشجوی دکتری سازه‌های آبی و عضو هیأت علمی دانشگاه شهید چمران اهواز؛ و عضو هیأت علمی گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر قدس

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۳۱

چکیده

یکی از نیازهای اساسی در طراحی و اجرای سدهای زیرزمینی، تخمین و کنترل میزان آبگذری بدنه سد است. ارزیابی مصالح به کار رفته در بدنه سدهای زیرزمینی در بررسی‌های مربوط به معیارها و اصول طراحی این سدها عاملی مهم و تعیین کننده است. سؤال این است که با بررسی آزمایشگاهی مصالح مورد استفاده در هسته سدهای زیرزمینی و با در نظر گرفتن شاخص آبگذری و نفوذپذیری، آیا می‌توان الگوی مشخص و سریعی برای تخمین ضریب آبگذری اشباع ارائه کرد یا نه. برای این منظور، با یک روش جدید نه نمونه خاک چسبنده تهیه و از یک مدل فیزیکی با سطح مقطع مربع از جنس پلاکسی گلاس دارای سه جعبه مجزا به ابعاد $30 \times 20 \times 20$ سانتی‌متر و به درازای 90 سانتی‌متر استفاده شد. منبع تأمین ارتفاع آب، مخزنی است که قابلیت تغییر ارتفاع تا دو متر را روی محور مدل تأمین می‌کند. با اعمال فشار آب در ارتفاع $0/5$ ، 1 و $1/5$ متر بر نمونه متراکم شده در جعبه، داده‌ها به دست آمد. به کمک رگرسیون گیری خطی به روش گام به گام، اطلاعات به دست آمده برای دستیابی به معادله تخمین ضریب آبگذری اشباع مورد استفاده قرار گرفت. با تجزیه و تحلیل داده‌ها، دو رابطه برای تخمین ضریب آبگذری در خاک‌های متراکم چسبنده ارائه شد. در مرحله بعد، با محاسبه تخلخل ثانویه با استفاده از رگرسیون گیری غیرخطی ضریب آبگذری اشباع به صورت تابعی توانی از تخلخل ثانویه ارائه شد. به کمک این رابطه در نموداری با محور $x=w$ (رطوبت خاک) و $y=\rho_w/\rho_d$ ؛ منحنی‌های ضریب آبگذری اشباع و درجه اشباع خاک متراکم به صورت خطی رسم شد. به کمک این نمودارها می‌توان ضریب آبگذری اشباع و درجه اشباع خاک متراکم را در خاک چسبنده متراکم با تخمین مناسبی به دست آورد.

واژه‌های کلیدی

خاک اشباع، سدهای زیرزمینی، ضریب آبگذری

مقدمه

تابعی از سطح مقطع، ارتفاع و طول نمونه در نظر گرفت. نامبرده ضریب ثابتی به نام آبگذری هیدرولیکی (ضریب آبگذری^۱) ارائه داد که تابعی از آبگذری^۲ خاک است، ولی خود آبگذری نیست (AL-Doury, 2010). شله‌پایم

همواره اندازه‌گیری آبگذری فرایندی زمان‌بر و مشکل بوده است. در سال ۱۸۵۶ پژوهش‌های داریسی روی جریان آب در محیط شنی انجام شد. وی دبی عبوری را

همکاران (Benson *et al.*, 1994) با انجام دادن رگرسیون چندگانه روی ۶۷ داده جمع‌آوری شده، رابطه‌ای برای تخمین k_{sat} به صورت زیر ارائه دادند:

$$\ln k_{sat} = -18.35 + \frac{894}{w} - 0.08PI - 2.87S_i + 0.32\sqrt{G} + 0.02C \quad (1)$$

که در آن، k_{sat} = ضریب هدایت هیدرولیکی (سانتی‌متر بر ثانیه)؛ W = وزن چکش تراکم (کیلو نیوتن)؛ PI = شاخص پلاستیک (درصد)؛ G = درصد شن؛ و C = درصد رس خاک است.

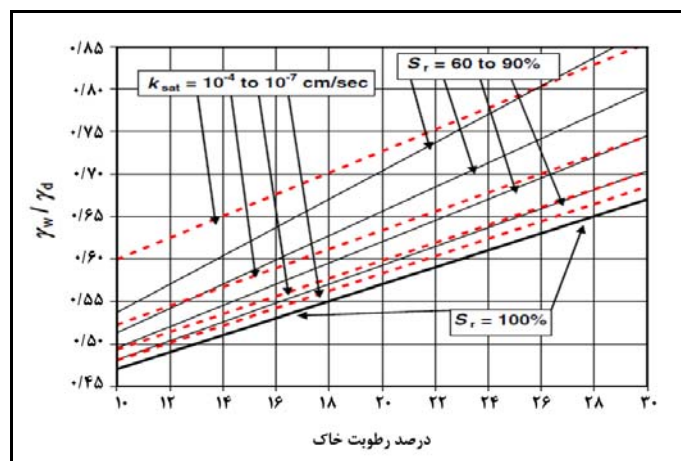
در خاک‌های متراکم رسی، چاپیوس و همکاران (Chapuis *et al.*, 2006) به کمک نتایج آزمایشگاهی k_{sat} را تابعی از تخلخل ثانویه در نظر گرفتند و رابطه ۲ را ارائه دادند. طبق نظریه این محققان فرض بر این است که در انتهای تراکم تمام آب در داخل کلوخه‌ها، و نه بین آنها نگه داشته می‌شود. در این حالت می‌توان مطرح کرد که تخلخل ثانویه فقط با هوا پر شده است.

$$k_{sat} = 0.01n_c^3(1 - S_{rc})^3 \quad (2)$$

در رابطه ۲، n_c و S_{rc} به ترتیب تخلخل و درجه اشباع نمونه پس از تراکم هستند. در معادله فوق ضریب هدایت هیدرولیکی برای نمونه‌های متراکم کاملاً اشباع صفر به دست می‌آید که واقعی نیست. به همین علت چاپیوس و همکاران (Chapuis *et al.*, 2006)، k_{sat} را برابر با 10^{-8} سانتی‌متر بر ثانیه به عنوان حد پایین برای استفاده از رابطه ۲ تعریف و شکل ۱ را برای تخمین ضریب آبگذری و درجه اشباع، با توجه به خصوصیات تراکم، ارائه کردند.

(Seelheim, 1880) آبگذری را تابعی از خصوصیات خاک ارائه و همچنین گزارش کرد که نفوذپذیری مستقل از نوع سیال و تنها تابع خواص خاک (مجذور شعاع خلل و فرج) است. شایدگر (Scheidegger, 1974) نیز نفوذپذیری را به صورت توانایی سنگ یا خاک در عبور سیال از خلال آن ارائه داد. وی آبگذری را به صورت خصوصیتی از سنگ یا خاک مستقل از خواص سیال و تأثیرپذیر از مؤلفه‌هایی مانند اندازه خلل و فرج، هندسه و نحوه توزیع آنها دانست (Chapuis, 2004). ضریب آبگذری خاک اشباع (k_{sat}) به وسیله روش‌های گوناگونی نظیر معادلات تجربی، مدل‌های کاپیلاری، مدل‌های آماری و تئوری‌های مرتبط به شعاع هیدرولیکی قابل تخمین است.

در برخی منابع، برای خاک رس غیر تورمی تأثیر تراکم بر k_{sat} بررسی شده است. ترزاقی (Terzaghi, 1922) دریافت که k_{sat} تابعی از تخلخل و روش تراکم است. میچل و همکاران (Mitchell *et al.*, 1965) دریافتند نمونه‌های متراکم بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ برابر نفوذناپذیرتر از نمونه‌های متراکم نشده هستند. این محققان دو نوع تخلخل را تعریف کردند، یکی تخلخل اولیه که در ارتباط با ساختار ریز مقیاس ذرات خاک است و دیگری تخلخل ثانویه که در ارتباط با ایجاد ساختارهای بزرگ‌تر ناشی از فرایندهایی مانند حفاری، حمل و نقل، دست‌خورده شدن خاک و یا فرایندهای هوازدگی مانند مرطوب شدن، خشک شدن، یخ زدن و ذوب شدن یخ در خاک است. این دو نوع تخلخل می‌تواند با استفاده از روش‌هایی مانند آزمایش نفوذ جیوه یا بررسی الکترون میکروسکوپی به صورت کمی ارائه شود (Delage *et al.*, 1982). روابط ارائه شده برای تخمین k_{sat} در خاک‌های رسی متراکم مؤلفه‌های متعددی دربر دارد. بنسون و



شکل ۱- خطوط با S_r و k_{sat} یکسان در چهارچوب خصوصیات تراکم (Chapuis, 2004)

مرادی باصری و همکاران (Moradi Baseri et al., 2012) پارامتر هدایت آبی اشباع را در خاک‌های ورتیسول و آنتیسول با سه روش بار افتان ساده سازی شده، بار ثابت چندگانه و نفوذسنج مکشی اندازه‌گیری کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که در رطوبت اولیه مرطوب، بین مقادیر هدایت آبی اشباع حاصل از سه روش مذکور، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. همچنین، کاربرد روش‌های بار افتان ساده سازی شده و نفوذسنج مکشی را در اندازه‌گیری هدایت آبی اشباع در خاک‌های سنگین توصیه کردند.

هدف اصلی از این تحقیق، ارائه روابطی با ضریب همبستگی مناسب برای تخمین k_{sat} در خاک‌های ریزدانه متراکم است. برای این منظور، اطلاعات موجود به منظور دستیابی به یک سری معادلات برای تخمین k_{sat} مورد استفاده قرار می‌گیرد.

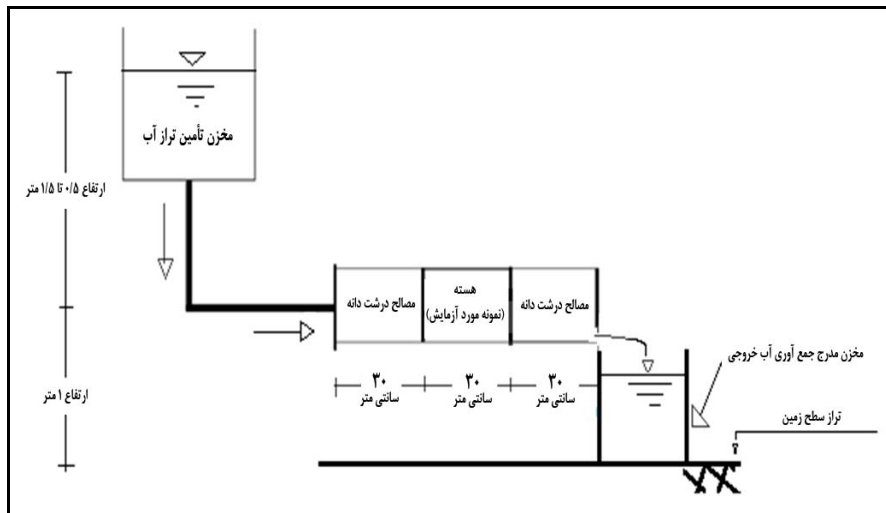
مواد و روش‌ها

برای اجرای آزمایش، نه نمونه خاک ریزدانه چسبنده از مناطق مختلف تهیه شد که تطابق لازم را با قرضه خاک استفاده شده در سدهای اجرا شده زیرزمینی استان‌های سمنان و کرمان داشتند. با استفاده از روش آزمایشگاهی،

قانی و همکاران (Ghani et al., 2012) چهار روش صحرائی اندازه‌گیری k_{sat} شامل روش‌های استوانه‌های دوگانه، تک استوانه، نفوذسنج گلف و نفوذسنج مکشی را در مزرعه‌ای با خاک لومی متوسط در دانشگاه شهرکرد مقایسه کردند و نشان دادند که میانگین ارتفاع آب در روش‌های استوانه‌های دوگانه و تک استوانه در طول آزمایش‌ها برابر با ۱۱ سانتی‌متر است در روش نفوذسنج گلف دو عمق ثابت ۱۱ و ۱۹ سانتی‌متر به ترتیب در هر چاهک اعمال شدند و آزمایش‌ها با روش نفوذسنج مکشی در پنج مکش ۱۵-، ۱۰-، ۶-، ۳- و ۱- سانتی‌متر به انجام رسیدند. میانگین k_{sat} اندازه‌گیری شده با روش‌های استوانه‌های دوگانه، تک استوانه، نفوذسنج گلف و نفوذسنج مکشی به ترتیب برابر ۰/۳، ۰/۲۴۶، ۰/۱۱ و ۰/۲۹۵ سانتی‌متر بر دقیقه بود. همچنین، تحلیل آماری نتایج با آزمون چند دامنه‌ای دانکن نشان داد که به جز روش نفوذسنج گلف، بین سه روش دیگر در سطح احتمال ۱ درصد اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. دلیل اصلی تفاوت بسیار زیاد حاصل شده k_{sat} در روش نفوذسنج گلف با سایر روش‌ها وجود یک لایه سخت با نفوذپذیری کم در عمق ۲۵ تا ۳۰ سانتی‌متر از سطح زمین بود.

شاسی طراحی شده و استفاده از گریس سیلیکونی کاملاً آب بند و محکم شد. در ابتدا و انتهای جعبه میانی که نمونه در آن قرار دارد لبه‌ای به اندازه ۳ میلی‌متر برای قرار گرفتن قاب توری برای جلوگیری از جابه‌جایی نمونه در نظر گرفته شد. منبع تأمین ارتفاع آب، مخزنی است که به واسطه نصب شناور سطح آب در آن ثابت است. این منبع قابلیت تغییر ارتفاع را دارد و تا دو متر ارتفاع را روی محور مدل تأمین می‌کند.

ضریب آبگذری نمونه‌های خاک اندازه‌گیری شد. مدل ساخته شده با سطح مقطع مربع از جنس پلاکسی گلاس دارای ۳ جعبه مجزا به ابعاد $30 \times 20 \times 20$ سانتی‌متر و مشتمل است بر جعبه ورودی که به مخزن تأمین تراز آب متصل می‌شود، جعبه مرکزی که مصالح در آن متراکم می‌شود و جعبه خروجی که دبی عبوری از آن اندازه‌گیری می‌شود (شکل‌های ۲ و ۳). این سه قسمت به صورت تو رفته و بیرون زده روی پایه‌ای قرار دارد که با توجه به



شکل ۲- شماتیک مدل آزمایشگاهی ساخته شده



شکل ۳- اجزای مدل آزمایشگاهی ساخته شده

فرج خاک پس از تراکم (n_c S_{rc}) تعریف کرد (Benson & Boutwell, 1992):

تخلخل ثانویه را می‌توان به صورت تفاضل تخلخل پس از تراکم (n_c) و حجم آب به دام افتاده در خلل و

گام به گام^۱ معادله تخمین ضریب آبگذری در خاک‌های متراکم چسبنده بر اساس درجه اشباع بعد از تراکم و درصد ذرات ریزدانه خاک (درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰) استخراج شد. برای صحت‌سنجی روابط استخراج شده از چهار داده متفاوت از داده‌های مورد استفاده برای برازش معادلات برگرفته از مطالعات بنسون و همکاران (Benson et al., 1994) استفاده شد و مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مقایسه شدند. از معیارهای آماری خطای نسبی^۲ (رابطه ۷)، ریشه میانگین مربعات خطا^۳ (رابطه ۸) و ضریب همبستگی^۴ برای بررسی دقت روش‌های مختلف اندازه‌گیری ضریب آبگذری استفاده شد.

$$RE = \frac{1}{100} \sum \frac{O_i - P_i}{O_i} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (O_i - P_i)^2} \quad (8)$$

که در آن،
 RE = خطای نسبی؛ $RMSE$ = ریشه میانگین مربعات خطا؛
 O_i و P_i = به ترتیب مقادیر ضریب آبگذری به دست آمده از اجرای مدل فیزیکی و روابط موجود و N = تعداد نمونه‌های مورد آزمایش است.

نتایج و بحث

با اجرای آزمایش‌ها مؤلفه‌های مورد نیاز شامل مؤلفه‌های حاصل از نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک و مؤلفه‌های حاصل از نتایج معادلات موجود به دست آمد (جدول‌های ۱ تا ۳).

$$n_s = n_c - n_c S_{rc} \quad (3)$$

که در آن،
 n_s = تخلخل ثانویه؛ n_c = تخلخل کل پس از تراکم؛ و
 S_{rc} = درجه اشباع پس از تراکم است. n_c و S_{rc} از روابط ۴ و ۵ به دست می‌آیند (Benson et al., 1994):

$$S_{rc} = \frac{w}{\frac{\rho_w}{\rho_d} - \frac{1}{G_s}} \quad (4)$$

$$n_c = 1 - \frac{\rho_w}{\rho_d} G_s \quad (5)$$

که در آنها،
 W = درصد رطوبت خاک پس از تراکم؛ ρ_d = جرم مخصوص خشک خاک متراکم؛ ρ_w = جرم مخصوص آب؛ و
 G_s = چگالی نسبی است (Chapuis et al., 2006).
 چاپیوس و همکاران (Chapuis et al., 2006)، k_{sat} را به صورت تابعی از تخلخل ثانویه به صورت رابطه ۶ در نظر گرفتند:

$$k_{sat} = \alpha (n_s)^\beta = \alpha n_c^b (1 - S_{rc})^b \quad (6)$$

که در آن،
 a و b ضرایبی هستند که توسط نتایج داده‌های آزمایشگاهی به دست می‌آیند.
 نفوذپذیری توسط مدل فیزیکی ساخته شده تخمین زده شد. با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹ همبستگی متغیرهای مستقل بررسی شد و به روش رگرسیون

1- Stepwise Regression

2- Relative Error (RE)

3- Root Mean Square Error (RMSE)

4- Coefficient of determination

جدول ۱- مؤلفه‌های به دست آمده از نتایج آزمایش‌های مکانیک خاک

شماره نمونه	چگالی (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	حداکثر جرم مخصوص خاک خشک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	درصد رطوبت بهینه	رس (درصد)	درصد ذرات ریزدانه	ماسه (درصد)	حد خمیری (درصد)	حد روانی (درصد)
۱	۲/۷۰	۱۲/۵	۳۸/۱	۷۰/۳	۱۰۰	۰	۵۷	۸۷
۲	۲/۶۸	۱۶	۲۰/۶	۴۵/۴	۸۳/۴	۱۷/۱	۳۱	۴۶
۳	۲/۷۱	۱۶/۲	۱۹/۴	۳۵/۱	۷۸/۲	۲۲/۲	۲۲	۳۸
۴	۲/۷۱	۱۶	۲۱/۲	۴۴/۸	۸۴/۳	۱۶/۲	۳۲	۴۷
۵	۲/۷۱	۱۶/۳	۲۰/۹	۵۸/۳	۹۵/۴	۵/۴	۴۴	۶۷
۶	۲/۶۸	۱۳/۵	۳۱/۸	۷۴/۴	۱۰۰	۰	۵۸	۸۴
۷	۲/۷۱	۱۴/۷	۲۷/۷	۷۴/۸	۹۸/۲	۱/۶	۶۰	۸۳
۸	۲/۸۱	۱۶/۷	۱۹/۴	۴۷/۳	۹۲/۵	۷/۵	۲۸	۴۶
۹	۲/۷۱	۱۳/۷	۳۰/۲	۶۰	۹۶/۲	۴/۲	۴۷	۶۹

جدول ۲- مؤلفه‌های به دست آمده از نتایج معادلات موجود

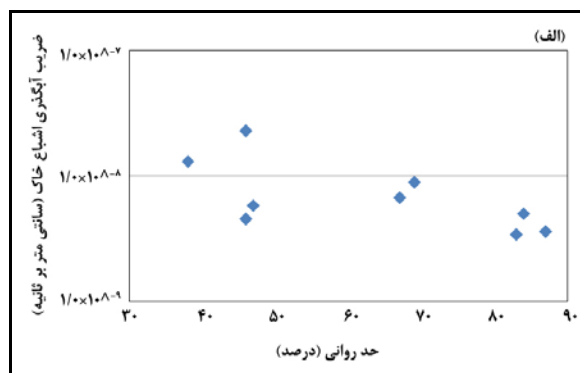
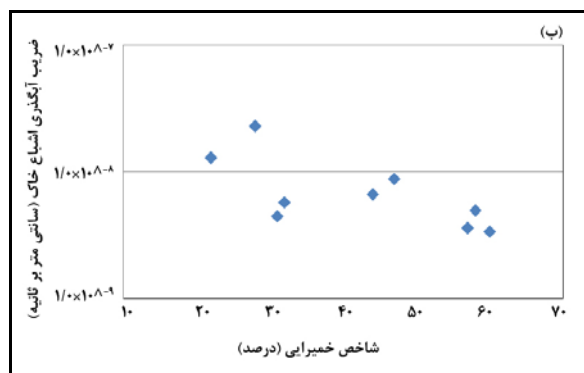
شماره نمونه	درجه اشباع پس از تراکم (درصد)	تخلخل پس از تراکم (درصد)	$n_s = n_c(I - S_{rc})$
۱	۹۲	۵۲/۷۹	۴/۲۲
۲	۸۶	۳۹/۰۸	۵/۴۷
۳	۸۲	۳۹/۰۹	۷/۰۴
۴	۸۷	۳۹/۷۶	۵/۱۷
۵	۹۰	۳۸/۶۰	۳/۸۶
۶	۹۰	۴۸/۶۴	۴/۸۶
۷	۹۳	۴۴/۶۵	۳/۱۳
۸	۸۴	۳۹/۳۳	۶/۲۹
۹	۸۷	۴۸/۵۰	۶/۳۰

جدول ۳- ضریب نفوذپذیری حاصل از اجرای مدل فیزیکی

شماره نمونه	ضریب آبگذری اشباع (سانتی‌متر بر ثانیه)
۱	$۳/۶ \times ۱۰^{-۹}$
۲	$۴/۵ \times ۱۰^{-۹}$
۳	$۱/۳ \times ۱۰^{-۸}$
۴	$۵/۸ \times ۱۰^{-۹}$
۵	$۶/۷ \times ۱۰^{-۹}$
۶	$۵/۰ \times ۱۰^{-۹}$
۷	$۳/۴ \times ۱۰^{-۹}$
۸	$۲/۳ \times ۱۰^{-۸}$
۹	$۸/۹ \times ۱۰^{-۹}$

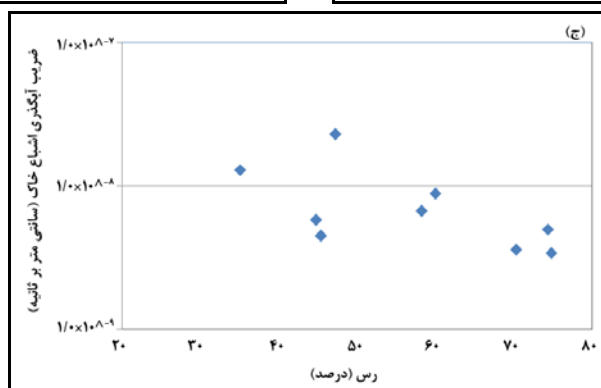
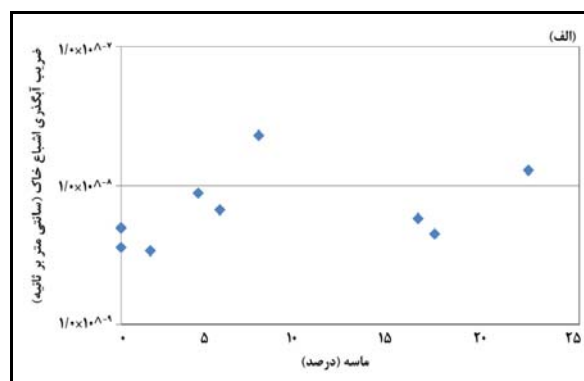
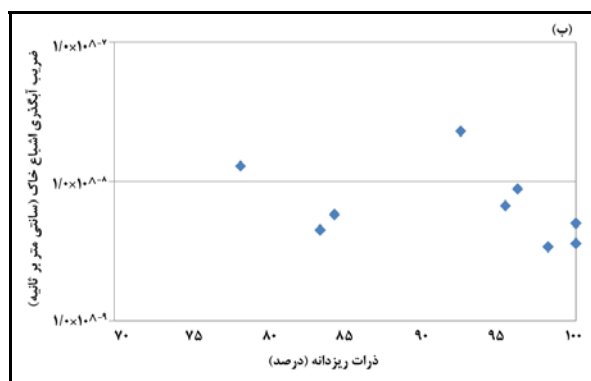
برآورد نفوذپذیری خاک‌های چسبنده اشباع در سدهای...

شکل ۴ (الف و ب) k_{sat} را به صورت تابعی از حد روانی^۱ (LL) و شاخص خمیرایی^۲ (PI) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است با افزایش این پارامترها، k_{sat} روند کاهشی دارد.



شکل ۴- k_{sat} تابعی از (الف) حد روانی و (ب) شاخص خمیرایی

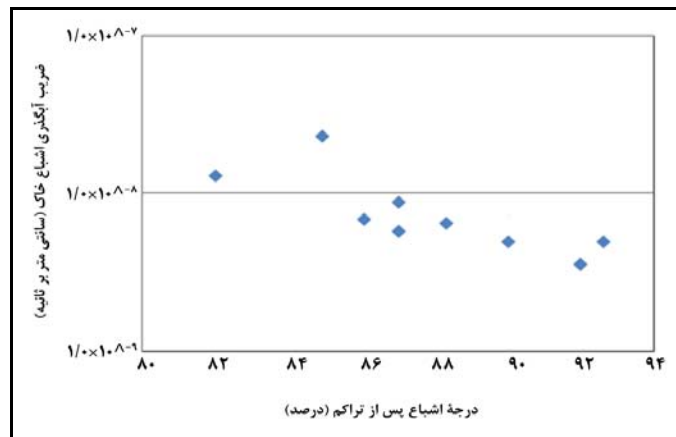
ضریب هدایت هیدرولیکی در مقابل درصد ماسه، درصد ذرات ریزدانه (درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰) و درصد رس در شکل ۵ ارائه شده است. شکل (الف - ۵) روند افزایشی را برای k_{sat} با افزایش درصد ماسه نشان می‌دهد، همچنین، با افزایش درصد ذرات زیر دانه و درصد رس در شکل‌های (ب - ۵) و (ج - ۵) می‌توان روند قوی‌تری از کاهش k_{sat} را مشاهده کرد.



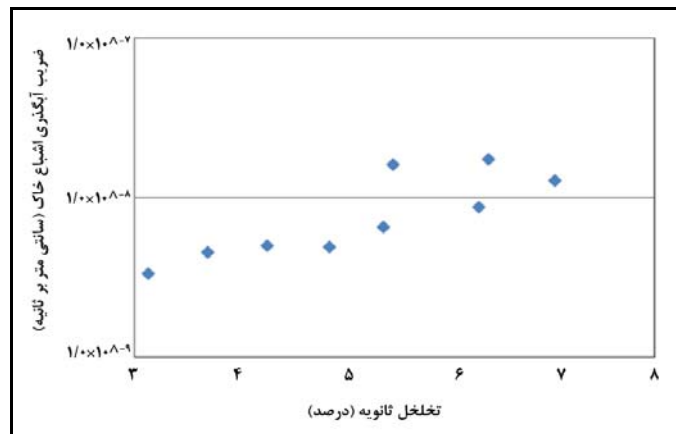
شکل ۵- k_{sat} تابعی از (الف) درصد ماسه، (ب) درصد ذرات ریزدانه و (ج) درصد رس

انرژی‌های مخالف قرار می‌گیرد، S_{rc} می‌تواند به عنوان نماینده رطوبت و وزن مخصوص خشک بدون در نظر گرفتن انرژی تراکم به کار رود (Benson *et al.*, 1994). مطالعات انجام شده حساسیت درجه اشباع را در مقایسه با رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک خاک کمتر نشان می‌دهد (Benson & Boutwell, 1992). در شکل‌های ۶ و ۷ روند تغییرات k_{sat} با S_{rc} و تخلخل ثانویه (n_s) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است روند تغییرات k_{sat} با S_{rc} نزولی و با n_s صعودی است.

با توجه به اینکه ترکیب خاک^۱ بر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشک تأثیر دارد، لازم است در مقایسه مؤلفه‌های تراکم برای نمونه‌های مختلف دو شرط نحوه تراکم یکسان و ترکیب مشابه خاک را مد نظر قرار داد. از آنجا که کمی سازی انرژی تراکم در مزرعه دشوار است و در مکان‌های مختلف ممکن است از غلتک با وزن‌های مختلف و یا تعداد دفعات عبور متفاوت استفاده شود، بنابراین یکی از راه‌حل‌ها بررسی تأثیر استفاده از درجه اشباع پس از تراکم (رابطه ۵) است. با توجه به اینکه خطوط با درجه اشباع مختلف موازی خط بهینه تراکم با



شکل ۶- k_{sat} تابعی از درجه اشباع پس از تراکم (S_{rc})



شکل ۷- k_{sat} تابعی از تخلخل ثانویه (n_s)

برآورد نفوذپذیری خاک‌های چسبنده اشباع در سدهای...

ثانویه در نظر گرفتند. با ورود مؤلفه‌های تخلخل ثانویه و k_{sat} به نرم‌افزار SPSS مدل رگرسیون غیرخطی اجرا شد و رابطه ۱۰ به دست آمد:

$$k_{sat} = 8.9 \times 10^{-6} (n_c (1 - S_{rc}))^{2.4} \quad (10)$$

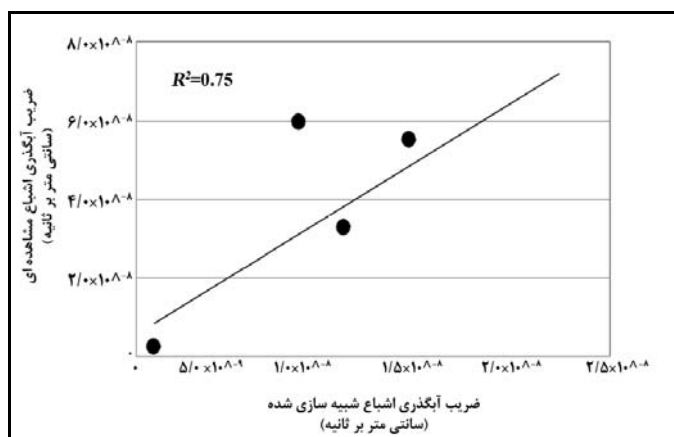
در شکل ۸ ضریب همبستگی مقادیر مشاهداتی k_{sat} استخراج شده از بنسون و همکاران (Benson *et al.*, 1994) و مقادیر محاسباتی k_{sat} استخراج شده از رابطه ۹، $R^2=0.75$ است. همچنین برای این رابطه مقادیر RE و $RMSE$ به ترتیب ۰/۲۸ و $3/09 \times 10^{-8}$ سانتی‌متر بر ثانیه است.

بررسی همبستگی و برازش مؤلفه‌های مناسب

با استفاده از نرم‌افزار SPSS نسخه ۱۹، همبستگی متغیرهای مستقل بررسی و به روش رگرسیون گام به گام رابطه ۹ استخراج شد.

$$\log k_{sat} = -1.305 - 10.536 S_{rc} + 2.602 f \quad (9)$$

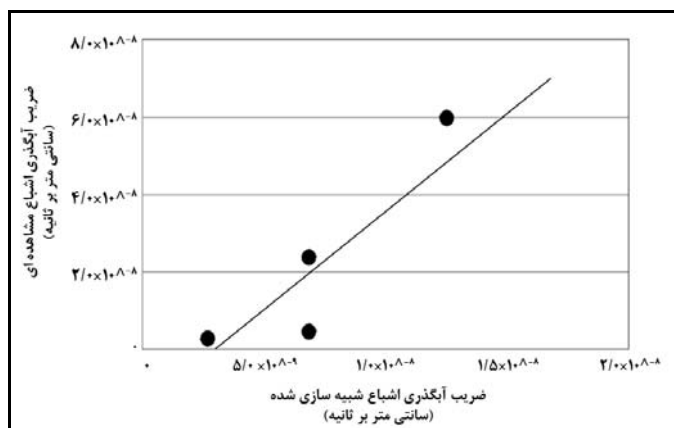
که در آن، S_{rc} = درجه اشباع پس از تراکم؛ و f = درصد ذرات ریزدانه خاک (درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰) است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد چاپیوس و همکاران (Chapuis *et al.*, 2006)، k_{sat} را تابعی از تخلخل



شکل ۸- مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده k_{sat} توسط رابطه ۹

با توجه به شکل ۹ ضریب همبستگی مقادیر مشاهداتی استخراج شده از بنسون و همکاران (Benson *et al.*, 1994) و محاسباتی k_{sat} استخراج شده از رابطه ۱۰، $R^2=0.80$ است. همچنین مقادیر RE و $RMSE$ به ترتیب ۰/۱۸ و $2/43 \times 10^{-8}$ سانتی‌متر بر ثانیه است. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت رابطه ۱۰، نسبت به رابطه ۹، همبستگی بیشتری با مقادیر مشاهداتی دارد.

با توجه به شکل ۹ ضریب همبستگی مقادیر مشاهداتی استخراج شده از بنسون و همکاران (Benson *et al.*, 1994) و محاسباتی k_{sat} استخراج شده از رابطه ۱۰، $R^2=0.80$ است. همچنین مقادیر RE و $RMSE$ به دست آمد.



شکل ۹- مقایسه مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده k_{sat} از رابطه ۱۰

ترسیم منحنی با k_{sat} یکسان

برای ارائه روابط k_{sat} و S_{rc} بر مبنای G_s ، ρ_w/ρ_d ، e و n

روابط ۱۱ و ۱۲ ارائه می شود:

$$\log k_{sat} = -1.305 - 10.536 S_{rc} + 2.602 f \quad (16)$$

$$\rho_d / \rho_w = G_s / (1 + e) \quad (11)$$

$$(k_{sat} / 8.9 \times 10^{-6})^{1/2.4} = (G_s - y - wyG_s) / G_s \quad (17)$$

$$e = n / (1 - n) \quad (12)$$

$$(k_{sat} / 8.9 \times 10^{-6})^{1/2.4} = \theta \quad (18)$$

که در آنها،

در نتیجه:

$e =$ نسبت پوکی؛ و $n =$ تخلخل است. با ترکیب روابط فوق

$$y = G_s(1 - \theta) / (1 + wG_s) \quad (19)$$

و قرار دادن $\rho_d/\rho_w = \gamma$ می توان درجه اشباع را به صورت

با فرض $Y = I/y = \rho_w/\rho_d$ رابطه ۲۰ حاصل می شود:

رابطه ۱۳ بازنویسی کرد. همچنین با استفاده رابطه ۵

می توان تخلخل را به صورت رابطه ۱۴ نوشت:

$$Y = w \frac{1}{1 - \theta} + \frac{1}{G_s(1 - \theta)} \quad (20)$$

$$S_{rc} = wyG_s / (G_s - y) \quad (13)$$

با توجه به رابطه فوق مشخص است که بین Y و W

$$n_c = (G_s - y) / G_s \quad (14)$$

رابطه ای خطی با شیب $\frac{1}{1 - \theta}$ و عرض از مبدأ $\frac{1}{G_s(1 - \theta)}$

با جایگذاری روابط ۱۳ و ۱۴ در رابطه ۱۰، رابطه ۱۵

ارائه می شود:

برقرار است. با در نظر گرفتن $G_s = 2/7$ می توان به کمک

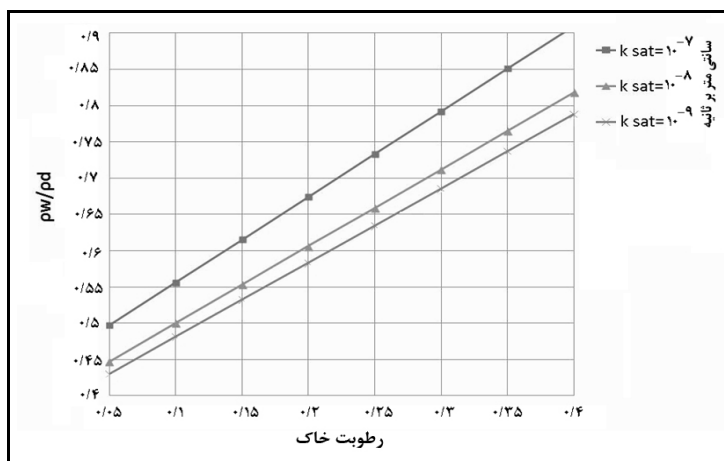
شکل ۱۰ و با توجه به رطوبت خاک و مؤلفه ρ_w/ρ_d ضریب

آبگذری را در محدوده 10^{-9} تا 10^{-7} سانتی متر بر ثانیه

تخمین زد.

$$k_{sat} (cm/s) = 8.9 \times 10^{-6} [(G_s - y - wyG_s) / G_s]^{2.4} \quad (15)$$

برآورد نفوذپذیری خاک‌های چسبنده اشباع در سدهای...



شکل ۱۰- نمودار مقادیر مختلف k_{sat} پس از تراکم

با توجه به رابطه ۲۲ مشخص است که بین w و Y رابطه‌ای خطی با شیب $\frac{1}{S_r}$ و عرض از مبدأ $\frac{1}{G_s}$ وجود دارد. مجدداً با در نظر گرفتن اینکه $G_s=2.7$ است می‌توان با کمک شکل ۱۱ با توجه به رطوبت و وزن مخصوص خاک خشک درجه اشباع پس از تراکم (S_{rc}) را تخمین زد. باید توجه داشت، وقتی نمونه متراکم رسی برای آزمون نفوذپذیری آماده شد درجه اشباع آن از S_{rc} به S_r (معمولاً نزدیک به ۱۰۰ تحت فشار معکوس) افزایش می‌یابد و این دو متفاوت هستند. به کمک شکل‌های ۱۰ و ۱۱ می‌توان S_{rc} و k_{sat} را در خاک چسبنده متراکم با تخمین مناسبی به دست آورد.

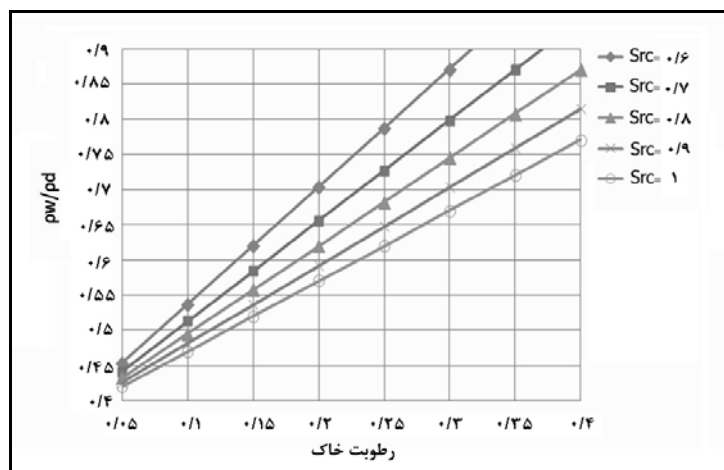
ترسیم منحنی با S_{rc} یکسان

با فرض اینکه $\rho_w/\rho_w=y$ باشد، شکل دیگر رابطه ۴ به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$y = \frac{S_r G_s}{w G_s + S_r} \quad (21)$$

اگر $Y=1$ و $y=\rho_w/\rho_w$ باشد، رابطه ۲۲ به دست می‌آید:

$$Y = \frac{w G_s + S_r}{S_r G_s} = \frac{w}{S_r} + \frac{1}{G_s} \quad (22)$$



شکل ۱۱- نمودار مقادیر مختلف S_{rc} پس از تراکم

نتیجه‌گیری

(n_s) صعودی است. در این تحقیق بر اساس مطالعات و نتایج آزمایشگاهی، روابطی برای تخمین ضریب هدایت هیدرولیکی (k_{sat}) در خاک‌های ریزدانه متراکم ارائه شده است. این روابط با ضریب همبستگی $R^2=0.93$ تخمین مناسبی را برای k_{sat} ارائه می‌کند. در مرحله بعد، با محاسبه تخلخل ثانویه طبق نظریه چاپیوس و همکاران (Chapuis *et al.*, 2006) با استفاده از رگرسیون‌گیری غیرخطی k_{sat} به صورت تابعی توانی از تخلخل ثانویه شده است. به کمک این رابطه در نموداری با محورهای (w) و (ρ_w/ρ_d) ، منحنی‌های k_{sat} و S_{rc} به صورت خطی رسم شده است. به کمک این نمودارها می‌توان k_{sat} و S_{rc} را در خاک چسبنده متراکم با تخمین مناسبی به دست آورد. پیشنهاد می‌شود مطالعه روی دامنه وسیع‌تری از خاک‌های چسبنده ادامه یابد و معادلات کلی‌تری ارائه شود. در این پژوهش تراکم در انرژی ثابت انجام گرفته است. پیشنهاد می‌شود آزمایش با ایجاد پایگاه داده‌ها با انرژی و نحوه تراکم مختلف و نیز داده‌های به دست‌آمده از شرایط واقعی در پروژه‌هایی مانند دیواره‌های آب‌بند، هسته سدهای خاکی، سدهای زیرزمینی در دست اجرا و نیز اجرا شده اجرا شود.

از آنجا که کمی‌سازی انرژی لازم برای تراکم خاک، در محل اجرای پروژه کاری است دشوار و در مکان‌های مختلف ممکن است از غلتک با وزن‌های مختلف و یا تعداد دفعات عبور متفاوت استفاده شود؛ یکی از راه‌حل‌ها، بررسی تأثیر استفاده از درجه اشباع پس از تراکم است. ضریب آب‌گذری خاک اشباع (k_{sat}) از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر حرکت آب در خاک است و در بسیاری از مدل‌های هیدرولوژی از آن استفاده می‌شود. چندین روش برای برآورد و اندازه‌گیری این ضریب وجود دارد که گروهی از آنها به صورت آزمایشگاهی و گروهی دیگر به صورت صحرایی قابل اجرا هستند. با توجه به اینکه خطوط با درجه اشباع مختلف موازی خط بهینه تراکم با انرژی‌های مخالف قرار می‌گیرد، S_{rc} می‌تواند به عنوان نماینده رطوبت و جرم مخصوص خشک بدون در نظر گرفتن انرژی تراکم به کار رود. از سویی، حساسیت درجه اشباع در مقایسه با رطوبت بهینه و جرم مخصوص خشک خاک کمتر است و روند تغییرات ضریب هدایت هیدرولیکی (k_{sat}) با درجه اشباع پس از تراکم (S_{rc}) نزولی و با تخلخل بعد از تراکم

قدردانی

از مدیریت و کارشناسان محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری، به ویژه کارکنان آزمایشگاه هیدرولیک، به دلیل همکاری ارزشمندی که در اجرای این پروژه پژوهشی داشتند، صمیمانه قدردانی می‌شود.

مراجع

- AL-Doury, M. 2010. A discussion about hydraulic permeability and permeability. *Petroleum Sci. Technol.* 28, 1740-1749.
- Benson, C. H., Zhai, H. and Wang, X. 1994. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *ASCE J. Geotech. Eng.* 120(2): 366-387.
- Benson, C. and Boutwell, G. 1992. Compaction control and scale-dependent hydraulic conductivity of clay liners. *Proc. 15th Annu. Madison Waste Conf. Madison. Wisc.* 62-83.
- Chapuis, R. P. 2004. Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian Geotech. J.* 41(5):787-795.

- Chapuis, R. P., Mbonimpa, M., Dagenais, A. and Aubertin, M. 2006. A linear graphical method to predict the effect of compaction on the hydraulic conductivity of clay liners and covers. *Bull. Eng. Geol. Env.* 65, 93-98.
- Delage, P., Tessier, D. and Marcel-Audiguier, M. 1982. Use of the cry Oscan apparatus for observation of freeze-fractured planes of a sensitive clay in scanning electron microscopy. *Canadian Geotech. J.* 19, 111-114.
- Ghani, F., Tabatabaei, H., Shayan nejad, M. and Dashtaki, M. 2012. Comparison of four methods of soil saturated water conductivity. *J. Water Res. Eng.* 57-67. (in Farsi)
- Mitchell, J. K., Hooper, D. R. and Campanella, R. G. 1965. Permeability of compacted clay. *ASCE J. Soil Mech. Found. Div.* 91(SM4):41-65.
- Moradi Basri, H., Ghorbani Dashtaki, Sh., Givi, J., Khodaverdiloo, H. and Khalilmoghaddam, B. 2012. Comparison of three field methods for measuring saturated hydraulic conductivity in some vertisols and entisols. *J. Water Soil.* 26(1): 173-182. (in Farsi)
- Seelheim, F. 1880. Method for the determination of permeability of the soil. *Zeitschrift Fur Analytische Chemie.* 19, 387-402.
- Scheidegger, A. E. 1974. *The Physics of Flow through Porous Media.* 3rd Ed. University Toronto Press. Toronto, Ont.
- Bear, J. 1972. *Dynamics of Fluids in Porous Media.* Elsevier, New York.
- Terzaghi, K. 1922. Der Grundbruch an-Stauwerken and seine Verhaltung. *Die Wasserkraft.* 17(24): 445-449.

Determination of Permeability Coefficient for Compacted Saturated Cohesive Soils in Underground Dams Using Physical Parameters

N. Gh. Ebrahimi*, M. Tajbakhsh, M. Fathi Moghadam and S. H. Mousavi Jahromi

* Corresponding Author: Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Institute (SCWMRI), AREEO, P. O. Box: 13445-1136, Tehran, Iran. Email: nebrahimi81@yahoo.com

Received: 3 May 2015, Accepted: 22 August 2015

Estimation of hydraulic conductivity is a basic requirement in the design and implementation of underground dams. Evaluation of the materials used in the body of the underground dam in accordance with the standards and principles of design is essential. The question is whether experimental study of the materials used in the core of underground dams considering hydraulic conductivity parameters can produce an appropriate and easy model for estimation of saturated hydraulic conductivity. A new method was developed to prepare nine cohesive soil samples from a physical model of square cross-sections of three Plexiglass boxes having dimensions of $20 \times 20 \times 30$ cm and a total height of 90 cm were used. The water level could increase to a head of 2 m on the model. The data was recorded at the 0.5, 1, and 1.5 m water heads. Stepwise regression was used to obtain data and present an equation for the saturated hydraulic conductivity coefficient. Two relationships for hydraulic conductivity of compacted soils were developed from the data. The secondary porosity was calculated according to Chapuis theory and nonlinear regression using k_{sat} as a function of the secondary porosity exponent was introduced. The k_{sat} curve and S_{rc} were drawn in linear form in a graph where axis $x = w$ (soil moisture) and axis $y = \rho_w/\rho_d$. The charts demonstrate that S_{rc} and k_{sat} are dense sticky with appropriate estimates to obtain lift.

Keywords: Coefficient of Permeability, Saturated Soil, Underground Dams