

بررسی اثرات دانسیته بر نفوذپذیری خاک رس سیلتی*

(یادداشت پژوهشی)

علی فرهادی^(۱)

عیسی شوش پاشا^(۲)

چکیده ضریب نفوذپذیری یکی از پارامترهای مهم خاکهای ریزدانه است. مطالعه این ضریب و عوامل موثر بر آن بویژه در بررسی نشست تحکیمی خاکهای ریزدانه، نشست زیر شالوده سدها، بدنه سدهای خاکی و غیره از اهمیت بیشتری برخوردار است. برخلاف خاکهای درشت‌دانه که در مورد آنها تعیین نفوذپذیری با استفاده از روابط تجربی از دقت نسبتاً بالایی برخوردار است، در خاکهای ریزدانه بعلاوه تأثیر عوامل مختلف از جمله ساختار، نوع کانیهای متشکله، ترکیب شیمیایی و غیره، ارائه رابطه‌ای فراگیر کاری دشوار است. از این رو برای اینگونه خاکها باید با توجه به خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی آنها رابطه تجربی خاصی تعیین گردد. در این مقاله ضمن بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر ضریب نفوذپذیری، آزمایشهای متعددی بر روی خاک ریزدانه فراگیر در استان مازندران برای تعیین این ضریب انجام گرفته است. در این راستا کوشش شده است عملکرد روابط تجربی موجود بر روی خاک یساده مورد سنجش قرار گیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که رابطه تجربی $e - \log k$ از تطابق بالایی با نتایج برگرفته از آزمایش برخوردار است.

واژه‌های کلیدی نفوذپذیری، تخلخل، رس سیلتی، مازندران.

An Investigation of the Effect of Density of Silty Clay Soil on Permeability

I. Shooshpasha

A. Farhadi

Abstract Studying coefficient of permeability and parameters effecting it, is an important issue in fine-grained soil. This coefficient is needed to determine the consolidation settlement of fine-grained soil subjected to load. In coarse soil, permeability can be determined by empirical equations with adequate accuracy. However, in fine grained soil, it is difficult to offer such an empirical equation due to different parameters (such as structure, mineral and chemical component) effecting permeability of the soil. So, empirical equations introducing permeability has to be based on physical and chemical characteristics of this type of soil. In this paper, with investigating the effect of different parameter on the permeability, several permeability tests were performed on fine-grained soil widely find in province of Mazandaran. Performance of existing empirical equations was evaluated using experimental results. Based on this study, the empirical equation $e - \log k$ showed a good correlation with experimental results.

Key Words Permeability, Void Ratio, Silty Clay, Mazandaran.

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۲/۱/۱۶ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۲/۷/۱۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) استادیار، دانشگاه مازندران، دانشکده فنی، گروه عمران

(۲) استادیار، دانشگاه مازندران، دانشکده فنی، گروه عمران

استفاده از روابط ارائه شده با شک و تردید همراه بوده و سعی می‌گردد تا با شناخت بهتر این عوامل، میزان تأثیر آنها بر نفوذپذیری با مدلها و روابط ریاضی بیان گردد.

عوامل مؤثر بر نفوذپذیری در خاکهای ریزدانه

فاکتورها و پارامترهای تعیین‌کننده نفوذپذیری خاک را می‌توان در سه گروه عمده جای داد: ۱- عوامل مؤثر در ارتباط با مایع نفوذکننده (ویسکوزیته، فشار، دانسیته). ۲- عوامل مؤثر در ارتباط با خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک (پیچ و خم مسیر جریان، نسبت تخلخل، پتانسیل آب - خاک، توزیع اندازه منافذ، ساختمان و بافت خاک). ۳- عوامل مؤثر در ارتباط با نیروهای لایه دوگانه در خاکها و اندرکنش رس با آب (اندرکنش آب-خاک، هد ترشدگی، غلظت یونی، ضخامت لایه دوگانه). در زیر هر یک را بطور اجمال مورد بررسی قرار خواهند گرفت. خواننده برای مطالعه بیشتر به مراجع [4,5,6] ارجاع داده می‌شود.

خاک مورد آزمایش و نحوه ساخت نمونه‌ها

خاک مورد آزمایش از یکی از مناطق شهرستان بابل در استان مازندران و از عمق یک متری تهیه شده است. سطح آب زیرزمینی در این منطقه در عمق ۷۰ سانتی متری قرار داشت. این مقدار نشان‌دهنده بالابودن سطح آب زیرزمینی در این منطقه می‌باشد. جدول (۱) و نیز شکل (۱) مشخصات عمومی خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

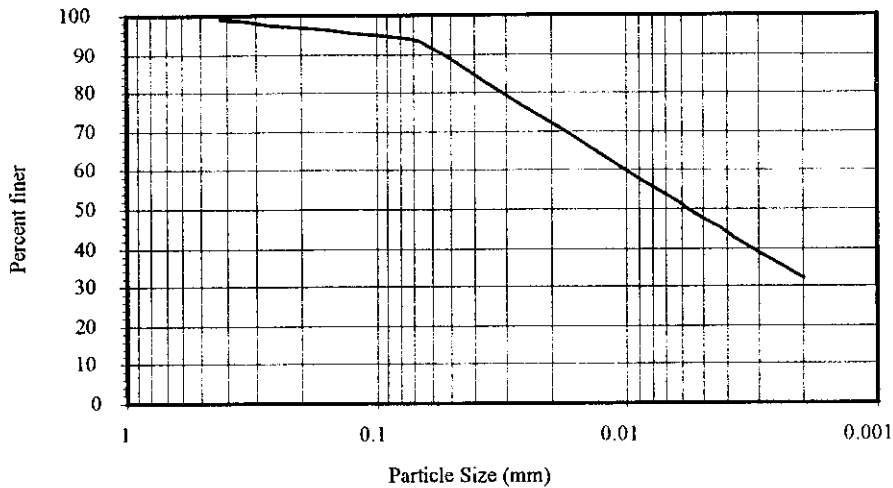
جدول ۱ مشخصات عمومی خاک مورد مطالعه

۲۵	رطوبت حد خمیری (%)	۳۸/۷۵	رطوبت حد روانی (%)
۰/۴۳	فعالیت خاک	۲/۶۰۳	چگالی دانه‌ها (G _s)
CL رس لای دار (به همراه مقدار کمی ماسه ریزدانه)		نوع خاک بر حسب سیستم طبقه‌بندی متحد	

مقدمه

هر توده خاک از دانه‌های جامد با اندازه‌های مختلف و فضاهای خالی بهم پیوسته تشکیل شده است. فضاهای خالی بهم پیوسته در خاک به آب این اجازه را می‌دهند که از یک نقطه با انرژی بالا بسمت نقطه‌ای دیگر با انرژی پایین حرکت کند. این خاصیت را نفوذپذیری گویند [۱].

توزیع و حرکت آب در خاک به عوامل متعددی از جمله انرژی پتانسیل آب، مکانیزمهای بیرونی و سطحی و نیروهای محرک حرارتی، یونی، اسمزی، گرادایان هیدرولیکی و دیگر گرادایان بستگی دارد. نفوذپذیری، تمام مسائل مربوط به جریان آب در خاک مانند نشست تحکیمی سدهای خاکی، خروج آب از خاک تحت بارگذاری، زهکشی بستر سدها و خاکریزها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۲]. در مسائل جریان هیدرولیکی از قبیل جریان از میان لوله‌ها یا کانالهای باز، جریان در داخل مرزهای نفوذناپذیر محدود شده است. ولی در مسائل آبهای زیرزمینی و زهکشی، اگرچه مجراهای جریان از منافذ فراوان مرتبط بهم و با شکلهای و اندازه‌های متفاوت تشکیل شده‌اند ولی این مجراهای جریان را نمی‌توانیم متناظر با لوله‌های تشکیل شده از یک مجموعه ساده از منافذ مرتبط بهم در نظر بگیریم زیرا در این منافذ مرتبط بهم خاک، مرزهای نفوذناپذیر محدودکننده وجود ندارد. بنابراین می‌توان مهمترین خصوصیت یک ماده متخلخل در میزان انتقال مایع را تخلخل آن ماده دانست [3]. تعیین نفوذپذیری خاکهای درشت‌دانه نسبت به خاکهای ریزدانه به لحاظ وابستگی تقریباً منحصر به فرد آن به نسبت تخلخل، غالباً راحتتر و سریعتر صورت می‌پذیرد. برای خاکهای درشت‌دانه روابط زیادی جهت تخمین این پارامتر ارائه شده است. از طرفی تلاش فراوانی نیز از سوی محققان برای ارائه روابط تجربی جهت تعیین ضریب نفوذپذیری برای خاکهای ریزدانه انجام گرفته است. از آنجا که در این خاکها ضریب یاد شده به عوامل مختلفی وابسته است،



شکل ۱ منحنی دانه بندی خاک مورد آزمایش

از آنجا که خاک مورد آزمایش از یک محل تهیه و باهم کاملاً مخلوط شده بودند، در نتیجه نوع و مقدار کانی‌های رسی برای هر یک از نمونه‌های ساخته شده تقریباً یکسان بوده است. با توجه به اینکه تغییرات ضریب نفوذپذیری در درصد رطوبت بیش از بهینه کم می‌باشد، کوشش شد همه نمونه‌ها در درصد رطوبتی بیش از حد بهینه تهیه شوند تا تأثیر ساختار خاک و ترتیب قرارگیری ذرات بر میزان نفوذپذیری بدست آمده به حداقل برسد. همچنین، برای بدست آوردن نسبت‌های تخلخل بالا، معمولاً تراکم بکار رفته در تهیه نمونه‌ها در حد متوسط و کم بوده است. جهت تعیین رطوبت بهینه برای خاک مورد نظر، آزمایش تراکم به روش پراکتور استاندارد صورت پذیرفت که نتیجه آن به شرح زیر است.

رطوبت بهینه $w_{opt}=19\%$ و وزن مخصوص خشک حداکثری $\gamma_{d(max)} = 1.69 \text{ gr/cm}^3$ است. همه نمونه‌ها

خاک در درصد رطوبت مورد نظر تهیه شد. برای رسیدن به نسبت تخلخل از قبل تعیین شده، نمونه در چند لایه در داخل ظرف استوانه‌ای آزمون نفوذپذیری تراکم گردید. برای کاهش اثر فاکتورهای گوناگون اشاره شده در بالا بر نتیجه آزمون، تمهیدات زیر در ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شده است.

تنها سیال مورد استفاده در این بررسی آب بوده است و از آنجا که متغیر مهم مؤثر بر خواص آب، لزجت آن می‌باشد که خود وابسته به دماست، لذا نتایج برای دمای ثابت ۲۰ درجه سانتیگراد ارائه شده است. در مدت زمان آزمایش که بین چند ساعت تا چند روز به طول می‌انجامد، معمولاً دمای آزمایشگاه و آب ثابت بود و حداکثر تغییرات آن به یک یا دو درجه سانتیگراد می‌رسید. در پایان هر آزمایش دمای آب بصورت میانگینی از دماهای اندازه‌گیری شده در حین آزمایش گزارش می‌گردید. نمونه‌های مورد آزمایش به مدت کافی در داخل آب قرار می‌گرفت تا بطور کامل اشباع گردند.

جدول ۲ نتایج آزمایشات نفوذپذیری برای نسبت‌های مختلف تخلخل خاک در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد

شماره آزمایش	وزن مخصوص خشک ($\frac{G_s}{cm^3}$)	رطوبت اولیه نمونه (%)	رطوبت اشباع در انتهای آزمایش (%)	نسبت تخلخل	ضریب نفوذپذیری ($\times 10^{-8}$ cm/sec)
۱	۱/۷۸	۱۸	۱۸/۰۵	۰/۴۷	۲/۷۱
۲	۱/۷۳	۱۹/۴	۱۹/۴	۰/۵۰	۱/۳۰
۳	۱/۶۲	۲۳/۱	۲۳/۳	۰/۶۰	۲/۶۴
۴	۱/۵۹	۲۴/۴	۲۴/۶	۰/۶۴	۳/۰۹
۵	۱/۵۱	۲۷/۰۵	۲۷/۳	۰/۷۱	۶/۲۴
۶	۱/۴۹	۲۷/۹	۲۸/۴	۰/۷۴	۵/۶۲
۷	۱/۴۵	۳۰/۴	۳۰/۷	۰/۸۰	۸/۲۵
۸	۱/۴۲	۳۱/۴	۳۱/۹	۰/۸۳	۷/۷۶
۹	۱/۳۸	۳۳/۳	۳۳/۹	۰/۸۸	۱۴/۱۰
۱۰	۱/۳۵	۳۳/۷	۳۵/۵	۰/۹۲	۱۶/۳۶
۱۱	۱/۳۵	۳۴/۶	۳۵/۷	۰/۹۳	۲/۶۳
۱۲	۱/۳۴	۳۵/۷۵	۳۶/۲	۰/۹۴	۱۹/۱

منحنی تغییرات ضریب نفوذپذیری و نسبت تخلخل یعنی (k-e) بدست آمده از آزمایشها در شکل (۲) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود می‌توان کلیه نقاط را بر روی یک منحنی قرار داد.

انحراف بعضی از نقاط از مسیر منحنی را می‌توان بخاطر خطای اندک قرائت و تهیه نمونه دانست. از این رو شاید لازم باشد در بررسی روابط حاکم بین نفوذپذیری و نسبت تخلخل از آنها چشم پوشی شود.

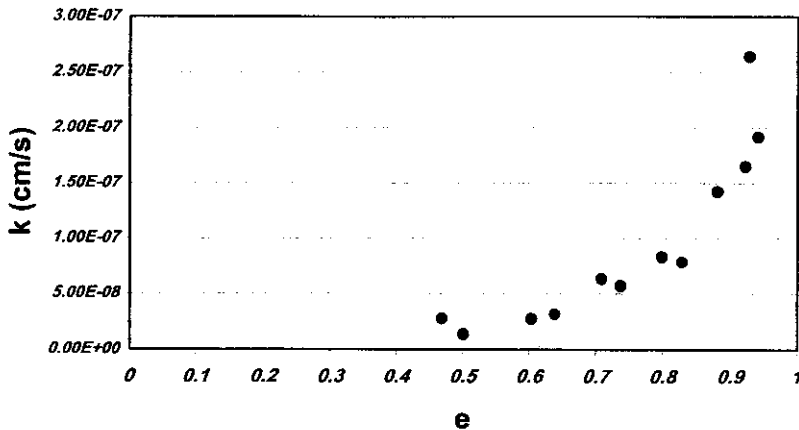
بررسی روابط حاکم بر نفوذپذیری و تخلخل

با توجه به رفتارهای متفاوت خاکها، چندان تعجب‌آور نخواهد بود که هر پژوهشگر رابطه k-e مشخص برای خاک مطرح سازد. در این زمینه روابط و روشهای تجربی بسیاری توسط پژوهشگران برای تعیین ضریب

پس از آماده‌شدن به مدت حداقل یک ماه در داخل ظرف محتوی آب نگهداری می‌گردید تا افزون بر اشباع‌شدن، تأثیرات ناشی از دست‌خوردگی بر بافت خاک نیز به حداقل برسد و خاک وضعیت طبیعی خود را بدست آورد. در انتهای آزمایش نیز درصد رطوبت خاک برای تعیین درجه اشباع اندازه‌گیری می‌شد.

نتایج آزمایشها

آزمون نفوذپذیری در آزمایشگاه بر روی نمونه‌های دستکار با وزن مخصوص مرطوب و رطوبت اولیه مختلف با استفاده از دستگاه نفوذپذیری با ارتفاع متغیر برای نمونه با نسبت تخلخل مختلف انجام پذیرفت. جدول (۲) نتایج آزمایشات و اطلاعات مربوط به مشخصات نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲ منحنی تغییرات نفوذپذیری k برحسب تخلخل e بدست آمده از آزمایش

تخلخل بر اساس این معادله خطی بوده و به صورت زیر بیان می‌گردد [4].

$$k = c_2 \cdot \frac{e^3}{1+e} \quad (3)$$

که در آن $C_2 = (C_s \gamma_w) / (S^2_s T^2 \mu)$ یک ضریب ثابت می‌باشد. شکل (۴) نشان می‌دهد که رابطه خطی مشخصی بین نتایج بدست آمده وجود ندارد و نقاط آزمایشگاهی تقریباً بر روی یک منحنی با درجه بالاتر از یک قرار می‌گیرند. در حالی که این رابطه برای خاکهای درشت‌دانه و حتی لای‌ها به صورت خطی بوده و ضریب ثابت C_2 نیز با توجه به نوع خاک، اندازه و شکل ذرات قابل تعیین می‌باشد، مشاهده می‌شود که برای خاک سیلتی رسی مورد مطالعه، این تغییرات خطی نیست. این وجه افتراق را می‌توان بدلیل وجود ذرات رس در خاک دانست. سامراسینگ - هانگ و درن‌ویش معادله کوزنی-کارمن را برای خاکهای رس‌دار اصلاح نمودند [۶]. بر اساس پیشنهاد آنها، توان ۳ در رابطه کوزنی - کارمن برای خاکهای رس‌دار چندان مناسب نبوده و این توان می‌باید برای هر خاک ریزدانه بصورت آزمایشگاهی تعیین گردد. با توجه به این نکته رابطه $k-e$ بصورت زیر مطرح گردید.

نفوذپذیری ارائه شده است که برخی نتایج خوب و برخی نتایج دور از انتظاری را برای خاکهای ریزدانه ارائه می‌نمایند. در این قسمت با توجه به نتایج آزمایشها، به بررسی و تعیین رابطه بین نفوذپذیری و تخلخل در خاک ریزدانه مورد آزمایش پرداخته و دقت این روابط را مورد ارزیابی قرار خواهیم داد.

رابطه خطی بین تخلخل و ضریب نفوذپذیری در آغاز توسط تیلور پیشنهاد شد. براساس پیشنهاد وی، بین تخلخل و لگاریتم نفوذپذیری رابطه‌ای خطی وجود دارد.

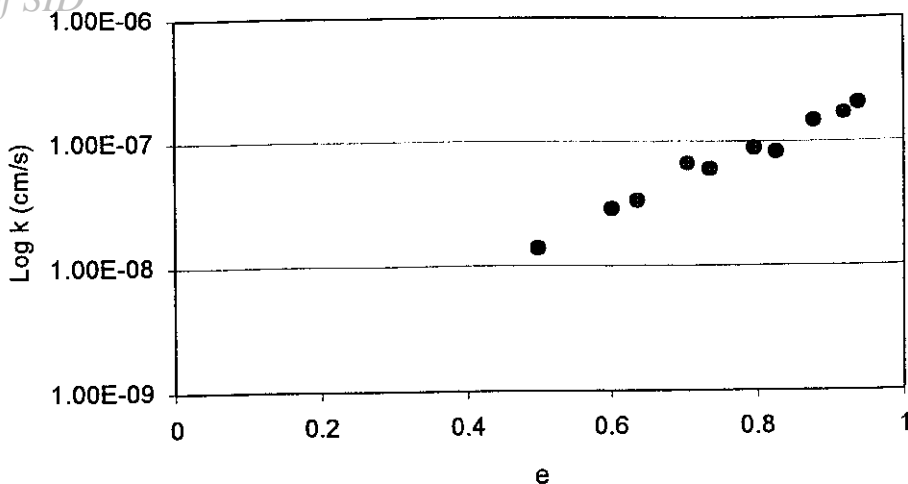
$$\log k = n_1 \cdot e + c_1 \quad (1)$$

در این رابطه n_1 شیب و c_1 عرض از مبدأ خط رسم‌شده بین نقاط آزمایشگاهی می‌باشد [7]. برای تعیین پارامترهای رابطه اخیر، تغییرات $e - \log k$ بدست آمده از این مطالعه در شکل (۳) ترسیم شده است.

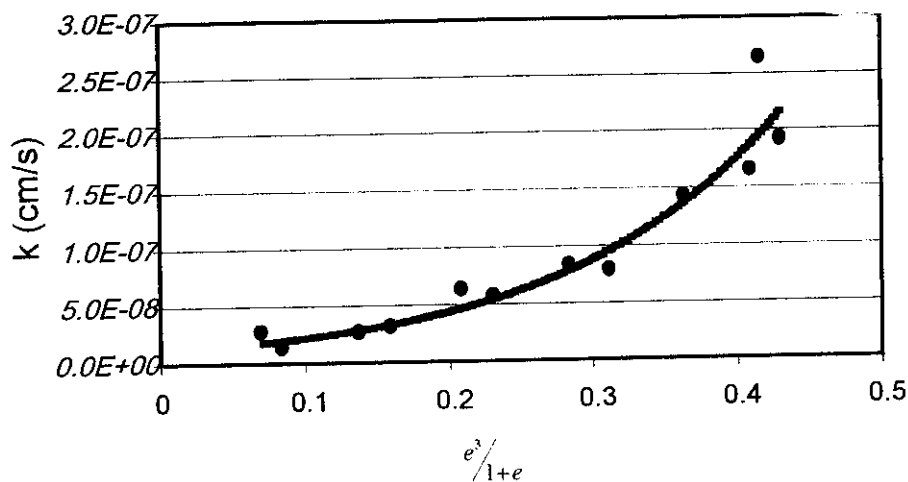
با عبور بهترین خط از مجموعه نقاط می‌توان رابطه مشابهی استخراج نمود.

$$\log k = (2.7152) \cdot e - 9.2373 \quad \text{cm/s} \quad (2)$$

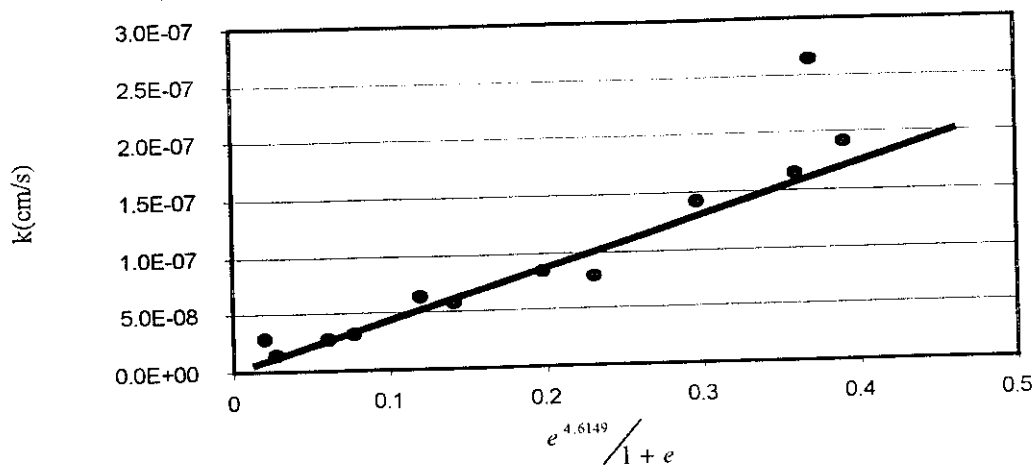
یکی از معادلات مطرح در زمینه نفوذ پذیری، معادله کوزنی - کارمن است. رابطه بین نفوذپذیری و نسبت



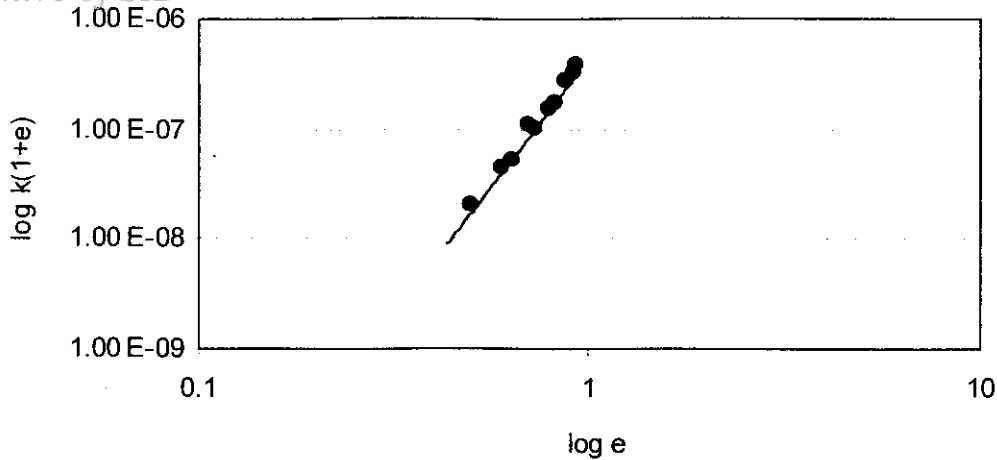
شکل ۳ منحنی تغییرات و لگاریتم نفوذپذیری بر حسب تخلخل جهت مقایسه با رابطه پیشنهادی تیلور



شکل ۴ منحنی تغییرات نفوذپذیری بر حسب $e^3/(1+e)$ و مقایسه آن با رابطه پیشنهادی کوزنی-کارمن



شکل ۵ منحنی تغییرات $e^{4.6149}/(1+e)$ و نفوذپذیری و مقایسه آن با رابطه پیشنهادی سامراسینگ - هانگ و درنویس



شکل ۶ منحنی تغییرات $\log e - k/(1+e)$ بدست آمده از آزمایش برای تعیین مقادیر n_3 و C_3

جارز- بادیلو نیز رابطه زیر را براساس نتایج

آزمایشگاهی ارائه نمودند [7]

$$k = c_4 \cdot (1+e)^{n_4} \quad (6)$$

همانند روش قبل، c_4 و n_4 مقادیر ثابتی هستند که با نوشتن معادله بالا به صورت زیر $\log k = \log c_4 + n_4 \cdot \log(1+e)$ و رسم نمودار لگاریتمی $k - (1+e)$ قابل تعیین می‌باشند. منحنی تغییرات $k - (1+e)^n$ در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود خط رسم شده بر اساس این رابطه نیز با نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها همخوانی خوبی دارد و می‌توان از این روش نیز در تعیین ضریب نفوذپذیری خاکهای رس‌دار استفاده نمود.

$$k = 0.0225 \times 10^{-8} \times (1+e)^{10.048} \quad \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad (7)$$

تلاش برای ایجاد رابطه‌ای جدید بین نفوذپذیری و تخلخل، با بهره‌گیری از ایده‌های ارائه شده در روابط بالا (مقدار n متغیر) صورت پذیرفت. بدین ترتیب روابط مختلفی مطرح گردید و مورد ارزیابی قرار گرفت. سرانجام رابطه $k - e^n$ بصورت زیر برای خاکهای ریزدانه پیشنهاد می‌گردد.

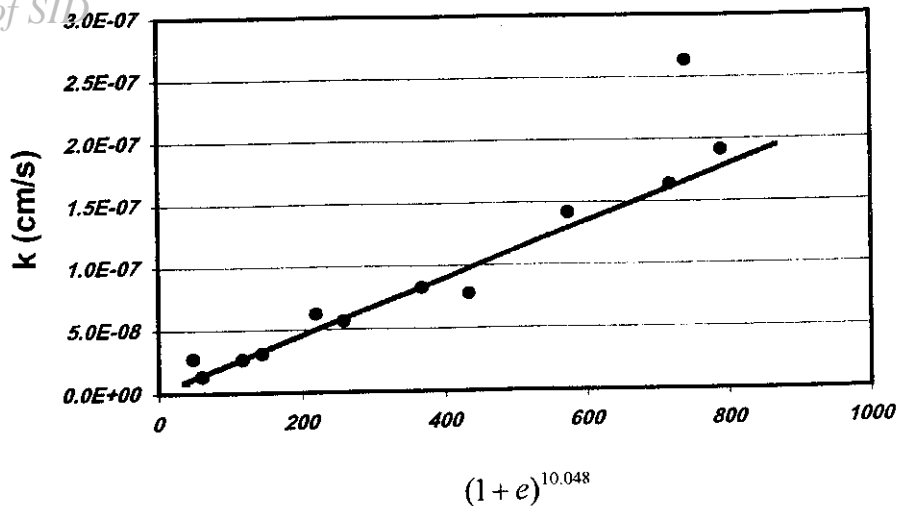
$$k = c_5 \cdot e^{n_5} \quad (8)$$

$$k = c_3 \frac{e^{n_3}}{1+e} \quad (4)$$

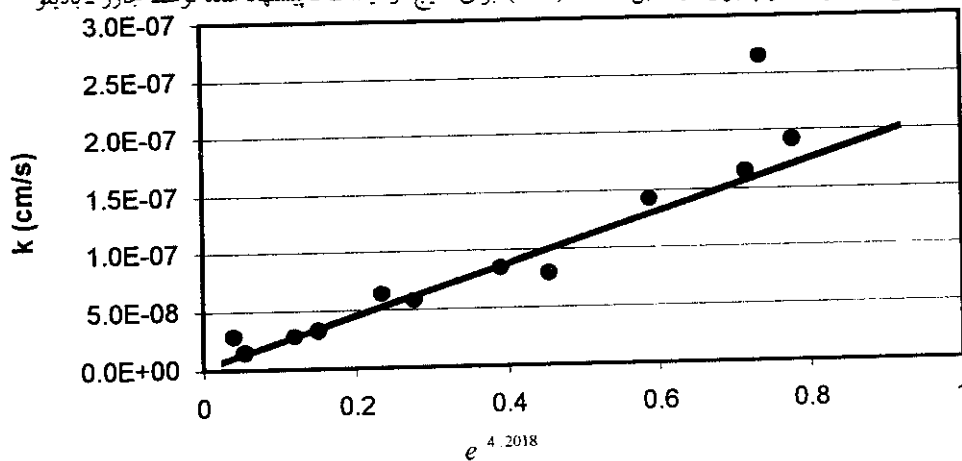
در این رابطه مقادیر C_3 و n_3 برای هر خاک ثابت بوده و با توجه به روش پیشنهادی سامراسینگ-هانگ و درن‌ویس قابل تعیین می‌باشند. براساس این روش، رابطه ابصورت $\log k(1+e) = \log c_3 + n_3 \cdot \log e$ نوشته می‌شود. مقادیر C_3 و n_3 با رسم نمودار لگاریتمی $k(1+e)$ در برابر e شکل (۵) بدست می‌آیند. مقادیر $\log c_3$ و n_3 ، بترتیب، عرض از مبدأ و شیب خط رسم شده در این نمودار می‌باشند که با تعیین آنها معادله (۴) را می‌توان بصورت زیر بیان نمود و نمودار $k - e^n / (1+e)$ مطابق شکل (۶) را برای نتایج آزمایشات رسم کرد.

$$k = 43.451 \times 10^{-8} \times \frac{e^{4.6149}}{1+e} \quad \frac{\text{cm}}{\text{s}} \quad (5)$$

خط رسم شده در این نمودار براساس معادله (۵) ترسیم شده است و همانطور که مشاهده می‌شود نقاط بدست آمده، تقریباً بر روی این خط واقع شده‌اند. برخلاف معادله کوزنی - کارمن، نتیجه خطی و نسبتاً خوبی برای خاک ریزدانه مورد مطالعه حاصل شده است که این امر بعلت تعیین مقدار توان n براساس نتایج آزمایشگاهی و بطور دقیق برای هر خاک می‌باشد.



شکل ۷ نمودار نفوذپذیری در مقابل $(1+e)^{10.048}$ برای نتایج آزمایشات - پیشنهاد شده توسط جازز - بادیلو



شکل ۸ نمودار نفوذپذیری در مقابل $e^{4.2018}$ برای نتایج آزمایشات - رابطه پیشنهادی

رابطه	$k - e^n$	$k - (1+e)^n$	$k - \frac{e^n}{1+e}$	$e - \log k$
انحراف معیار	۱/۱۱۰	۰/۹۴۶	۱/۱۳۶	۱/۳۳۷

نمودار شکل (۸) براساس رابطه $k - e^n$ رسم شده است. ملاحظه می‌گردد که نتایج آزمایشگاهی تقریباً بر روی خط مستقیم ارائه شده بر اساس معادله (۹) قرار می‌گیرند و این امر مناسب بودن رابطه یاد شده برای خاک ریزدانه مورد بررسی را نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود این رابطه ساده‌تر و خلاصه‌تر از روابطی می‌باشد که تاکنون در این زمینه مطرح شده است. مقادیر ثابت با نوشتن رابطه بالا به صورت $\log k = \log c_5 + n_5 \log e$ و رسم نمودار تغییرات $\log k - \log e$ تعیین می‌شوند.

$$k = 21.953 \times 10^{-8} \times e^{4.2018} \quad \text{cm/s} \quad (9)$$

نتیجه گیری

از آنجا که نتایج بدست آمده از رابطه‌های یاد شده برای خاکهای مختلف متفاوت می‌باشند، لازم است در استفاده از آنها برای خاکهایی با شرایط تقریباً مشابه دقت بیشتری بعمل آید. این امر بدلیل عدم شناخت کافی و نیز، تعیین مدل‌های ریاضی برای مقدار تأثیر فاکتورهایی غیر از تخلخل نظیر نوع کانی، ساختار و دانه‌بندی خاک بر میزان نفوذپذیری می‌باشد.

به دلیل تأثیر عوامل گوناگون بر مقدار نفوذپذیری، تعیین این ضریب در آزمایشگاه و یا درمحل مشکل است و نیازمند مطالعات بیشتری می‌باشد.

با رابطه حاکم بر تغییرات نفوذپذیری و تخلخل بدست آمده از نتایج آزمایشگاه، امکان تعیین ضریب نفوذپذیری خاک و با تعیین نسبت تخلخل خاک درمحل (با داشتن درصد رطوبت و وزن مخصوص خاک)، می‌توان بطور تقریبی مقدار نفوذپذیری را درمحل تعیین نمود. البته تعیین دقیق این مقدار بدلیل تأثیر عوامل متعدد بین مقدار نفوذپذیری تعیین شده در آزمایشگاه و مقدار نفوذپذیری درمحل مشکل بوده و نیازمند مطالعات بیشتری می‌باشد.

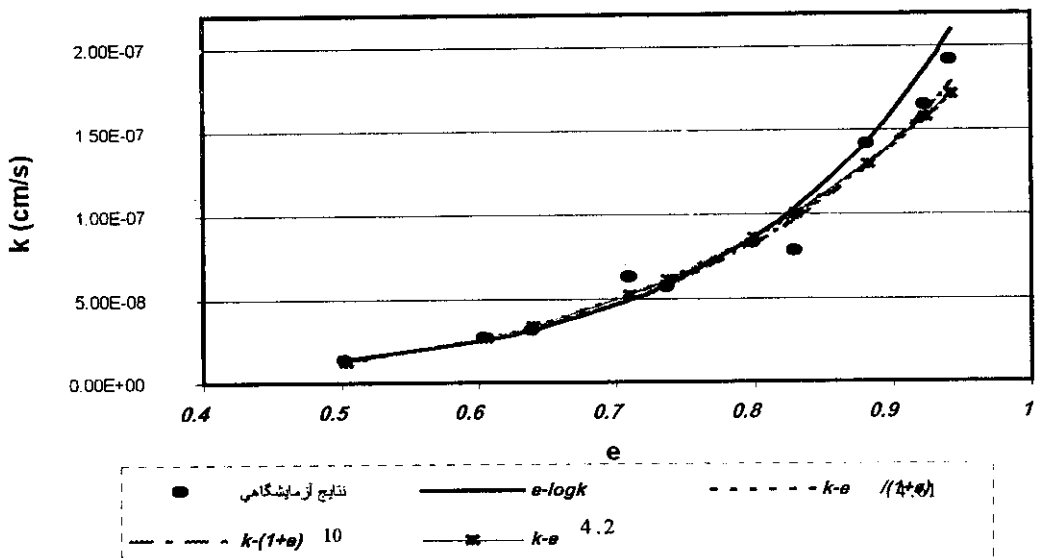
بدین ترتیب می‌توان تابع تغییرات نفوذپذیری بر حسب تخلخل را برای خاک ریزدانه معرفی نمود. برای تعیین مناسبترین رابطه برای این خاک، تغییرات مقادیر نفوذپذیری آزمایشگاهی و محاسباتی بدست آمده از روابط بالا را برای نسبت‌های تخلخل مختلف در نمودار شکل (۹) مقایسه می‌کنیم.

براساس این نمودار مناسبترین رابطه، رابطه‌ای است که نتایج آن دارای کمترین اختلاف نسبت به نتایج آزمایشگاهی باشد. بدین منظور می‌توان از انحراف معیار یعنی میانگین اختلاف بین مقادیر نفوذپذیری بدست آمده از رابطه‌ها و نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها استفاده نمود.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (k'_i - k_i)^2} \quad (10)$$

σ_j انحراف معیار رابطه j ، i شماره آزمایش، k'_i مقدار نفوذپذیری بدست آمده از رابطه j ام، k_i مقدار نفوذپذیری تعیین شده در آزمایشگاه است.

با بررسی مقادیر انحراف معیارهای تعیین شده مشاهده می‌شود که رابطه $k - (1+e)^n$ دارای کمترین مقدار انحراف معیار است و در نتیجه برای خاک مورد بررسی بهترین رابطه می‌باشد.



شکل ۹ منحنی تغییرات نفوذپذیری بر حسب تخلخل بدست آمده از آزمایش و روابط مختلف ارائه شده

Archive of SID

توسط برخی پژوهشگران مطرح شده‌اند، برای خاکهای ریزدانه مناسب بوده و نتایج خطی مناسبی بدست می‌دهند:

$$\log k = (2.7152) \cdot e - 9.2373 \quad \text{cm/s} \quad (۲)$$

$$k = 43.451 \times 10^{-8} \times \frac{e^{4.6149}}{1+e} \quad \text{cm/s} \quad (۵)$$

$$k = 0.0225 \times 10^{-8} \times (1+e)^{10.048} \quad \text{cm/s} \quad (۷)$$

از میان رابطه‌های یاد شده، رابطه $k - (1+e)^n$ به عنوان بهترین رابطه برای تعیین مقادیر نفوذپذیری (برحسب تخلخل)، برای خاک مورد بررسی انتخاب گردید.

این روابط، تنها رابطه بین نفوذپذیری و نسبت تخلخل در شرایطی که فاکتورهای تأثیرگذار دیگر ثابت باشند، را بیان می‌کنند. در مورد تأثیر دقیق دیگر فاکتورها بر مقدار نفوذپذیری و نیز، تعیین روابط ریاضی برای محاسبه این تأثیرات می‌باید مطالعات بیشتری صورت پذیرد.

در مجموع می‌توان گفت که اگرچه روابط تجربی بین نفوذپذیری و تخلخل برای یک خاک ریزدانه قابل تعمیم به همه خاکهای ریزدانه نمی‌باشد ولی با روشهای یاد شده می‌توان این رابطه را برای خاک هر منطقه بطور جداگانه تعیین نمود.

پاره‌ای از روابط تجربی بین نفوذپذیری و تخلخل مانند روابط $e - \log k$ ، $k - \frac{e^n}{1+e}$ و $k - (1+e)^n$ که

مراجع

۱. براجا ام. داس، "مکانیک خاک پیشرفته"، ترجمه مهدی یزدچی، انتشارات دانشگاه صنعتی سهند، (۱۳۷۳).
۲. افتخاریان، تی تی دژ، خاکبار، "آزمایشگاه مکانیک خاک"، انتشارات دانشگاه هرمزگان، (۱۳۷۷).
3. Raymond, N.Yong, and Benno. P. Warkentin, "Soil Properties and Behaviour", (1975).
4. Raymond, N.Yong, Abdel. M. O. Mohamed, and Benno. P. Warkentin, "Principles of Contaminant Transport in Soil", (1992).
5. Shooshpasha I., "Soil Water Potential Characteristics of Clay Based Barrier", *Journal of Technical Engineering of Mazandaran University*, Vol. 1, No. 1, (2002).
۶. براجا ام. داس، "اصول مهندسی ژئوتکنیک"، جلد اول مکانیک خاک، ترجمه شاپور طاحونی، انتشارات سالکان، (۱۳۷۵).
7. Juarez-Badillo, E., "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated Soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, (1983).