

بررسی آزمایشگاهی تعدادی از روابط تعیین ضریب آبگذری خاک‌های اشباع ماسه‌ای

• محمد تاج‌بخش

دانشگاه شهید چمران اهواز (نویسنده مسئول)

• منوچهر فتحی مقدم

دانشگاه شهید چمران اهواز

• نادر قلی ابراهیمی

پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: مهر ماه ۹۳ تاریخ پذیرش: دی ماه ۹۴

Email: tajbakhsh_md@yahoo.com

چکیده

هدایت هیدرولیکی اشباع یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مؤلفه‌های ژئوتکنیکی می‌باشد. این مؤلفه تحت تأثیر خصوصیات سیال، توزیع منافذ و خصوصیات سطح ذرات خاک قرار دارد که تغییر در این عوامل باعث ایجاد تغییرات گسترده‌ای در آبگذری نمونه‌های مختلف می‌شود. تاکنون روابط تجربی مختلفی جهت تخمین ضریب آبگذری اشباع خاک‌های غیر چسبیده با توجه به نوع مصالح ارائه شده است. در این تحقیق هفت روش پر کاربرد شامل روش‌های ترزاقی، کوزنی-کارمن، چاپیوس و آبرتین، اصلاحی Navfac، شهبابی و همکاران، بونیمپا و همکاران و چاپیوس مورد آزمون قرار گرفت. برای این منظور چهار نمونه خاک ماسه‌ای (R1 تا R4) با طیف نسبتاً وسیعی از اندازه ذرات تهیه و به صورت المانی با حجم مشخص درون یک جعبه از جنس پلاکسی گلاس متراکم شد و تحت تأثیر ارتفاع هیدرو استاتیک آب در نقاط ارتفاعی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر قرار گرفت و جریان عبوری، فشار استاتیک اندازه‌گیری و خطوط پتانسیل و فریاتیکی رسم گردید. در ادامه به کمک نتایج حاصل از اجرای مدل، دقت روابط نام‌برده بررسی شد. بطوریکه برای نمونه‌های مذکور به ترتیب ضریب آبگذری اشباع ۰/۰۰۵۱، ۰/۰۴۸، ۰/۰۷۶ و ۰/۱۹ سانتیمتر بر ثانیه به دست آمد. با توجه به دامنه محدود استفاده از مؤلفه‌های ورودی، روش ارائه شده توسط شهبابی و همکاران فقط برای نمونه R4 قابل استفاده بود، بنابراین این روش از تجزیه و تحلیل آماری حذف گردید. با مقایسه نتایج مدل آزمایشگاهی و معادلات پر کاربرد مشخص گردید بین روش‌های مختلف روابط کوزنی-کارمن و چاپیوس و آبرتین با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین RE و RMSE دارای بالاترین دقت در تخمین ضریب آبگذری اشباع هستند که علت آن را می‌توان به استفاده از مؤلفه‌های مؤثر در معادله، به کار بردن دامنه گسترده‌ای از داده‌ها و مطالعات آزمایشگاهی دقیق نسبت داد. از طرفی روش بونیمپا و همکاران بیشترین انحراف را از مقادیر مشاهداتی نشان داد که علت آن را می‌توان حساسیت این مدل به مؤلفه نسبت پوکی (e) دانست، نتایج حاصل از انجام آزمایش با نسبت‌های پوکی مختلف نشان داد با افزایش نسبت پوکی درصد خطای روش بونیمپا و همکاران به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: آبگذری هیدرولیکی، خاک ماسه‌ای، معادلات تجربی، مطالعه آزمایشگاهی.

Watershed Management Research (Pajouhesh & Sazandegi) No 109 pp: 1-14

Laboratory evaluation of permeability coefficient relationships for sandy soils

By: M. Tajbakhsh, Shahid Chamran University of Ahvaz. (Corresponding Author). M. Fathi Moghadam, Shahid Chamran University of Ahvaz. N. Ebrahimi, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.

The saturated hydraulic conductivity is one of the most important and widely used geotechnical parameters. This parameter depends on properties of the fluid, pore size distribution, and characteristics of the solid surfaces. Because the latter two are not necessarily constant, the hydraulic conductivity may vary significantly. So far several empirical relationships for estimation of the hydraulic permeability with respect to the type of materials have been presented. In this research seven applicable method including Terzaghi, Kozeny-Carman, Chapuis and Aubertin, modified Navfac, Shahabi et al., Mbonimpa et al. and Chapuis were evaluated. Four samples of sandy soils (R1 to R4) with a rather wide range of particle sizes were prepared and were compacted within the Plexiglas box. After providing the head of 0.5, 1 and 1.5 meters; flow discharge and static pressure were measured which result phreatic and iso-potential lines extraction. By applying the results of the model, the accuracy of some common methods used in the estimation of saturated hydraulic conductivity of sandy soils was evaluated. For the samples (R1 to R4), the coefficient of permeability was 0.0051, 0.048, 0.076, and 0.19 cm/s respectively. Due to the limited range of input parameters, the method of Shahabi et al. can be used only for the R4 sample; so this method was discarded from statistical analysis. Comparing the results of laboratory test with common methods shows the methods of Kozeny-Carman and Chapuis and Aubertin were more accurate according to the highest R2 and lowest RE and RMSE. These methods were based on effective parameters and the results of accurate laboratory studies. The method of Mbonimpa et al. (2002) indicates the maximum deviation from observed values which may be due to the sensitivity of this model to void ratio (e). Also the results shows by increasing of void ratio the error of Mbonimpa et al. method increases.

Keywords: Grasses, Rangeland production, Grazing reason, Enclosure and Utilization

(۲)

$$Q = AK\Delta p / (\mu L)$$

در این رابطه K آبگذری، Δp اختلاف فشار (atm) و μ لزجت دینامیکی سیال (cp) می باشد.

سلهیم در سال ۱۸۸۰ آبگذری را تابعی از خصوصیات خاک بیان نمود و همچنین بیان کرد که نفوذپذیری مستقل از نوع سیال بوده و تنها تابع خواص خاک (مجذور شعاع خلل و فرج) می باشد. اشنایدر (۱۹۹۶) نفوذپذیری را به صورت توانایی سنگ یا خاک در عبور سیال از خلال آن بیان نمود. 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 (۲۶).

ضریب آبگذری خاک اشباع ($ksat$) به وسیله روش‌های گوناگونی مانند معادلات تجربی، مدل‌های کاپیلاری، مدل‌های آماری و تئوری‌های مرتبط به شعاع هیدرولیکی قابل تخمین است (۲۷) و (۳). مدل‌های مناسب جهت تخمین ضریب آبگذری حداقل شامل سه عامل مؤثر از جمله خصوصیات سیال، عیار هوای خاک و سطح ذرات جامد برای برقراری رابطه‌ای مناسب بین میزان جریان و محیط متخلخل هستند (۱۰).

مقدمه

همواره اندازه‌گیری ضریب آبگذری ۱ فرایندی زمان‌بر و مشکل بوده است. با توجه به مطالعات هارر (۱۹۹۹) دور از ذهن نیست که ضریب آبگذری از جمله متغیرهایی است که با مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف انجام شده بر روی یک نمونه، با روش‌های یکسان یا متفاوت، مقادیر به دست آمده تا چندین برابر با هم اختلاف داشته باشد. در سال ۱۸۵۶ تحقیقات داری بر روی جریان آب در محیط سنی انجام شد. وی دبی عبوری را تابعی از A ، h و L در نظر گرفت و معادله (۱) را ارائه کرد:

$$Q = AK\Delta h / L \quad (1)$$

در رابطه فوق Q شدت جریان عبوری (A/L^3)، T مقطع عرضی عمود بر جریان (L^2)، Δh اختلاف ارتفاع آب (L)، L طول نمونه (L) و k ثابتی بنام آبگذری هیدرولیکی (ضریب آبگذری) بوده که تابعی از آبگذری ۲ خاک می باشد ولی خود آبگذری نیست (۲). از آنجا که داریسی از آب برای آزمایش خود استفاده نمود تأثیر لزجت را در نظر نگرفت. با در نظر گرفتن تأثیر لزجت و اختلاف فشار بجای اختلاف ارتفاع معادله کلی تر داریسی به صورت زیر استخراج می شود:

در این رابطه v سرعت داریسی (γ) m/s ، وزن مخصوص سیال (N/m^3) ، I گرادیان هیدرولیکی، μ لزجت سیال $(Pa \cdot s)$ ، ثابت هندسی، p تخلخل محیط و δ 1δ سطح ویژه ذرات است که به صورت مترمربع در هر واحد از حجم ماده متخلخل بیان می‌شود. کوزنی مقادیر ضریب C را برای لوله‌های جریان با سطح مقطع‌های مختلف به دست آورد. معادله (۴) متعاقباً در سال ۱۹۳۷ توسط کارمن اصلاح گردید. کارمن (۱۹۳۹) تلاش کرد با در نظر گرفتن انحرافی برابر با ۴۵ درجه از مسیر مستقیم جریان نامنظم آب در اطراف ذرات جامد با اشکال هندسی مختلف را شبیه‌سازی کند، وی در سال ۱۹۵۶ معادله کوزنی را بررسی و تأیید نمود و علاوه بر استفاده از مفهوم شعاع هیدرولیکی، سطح ویژه را در واحد جرم ماده جامد در نظر گرفت که در این حالت برخلاف معادله (۴)، سطح ویژه تابع تخلخل نخواهد بود. معادله کوزنی-کارمن باملاحظه ماده متخلخل به عنوان مجموعه‌ای از لوله‌های مویینه از رابطه ناپیر استوکس توسعه یافت. از سال ۱۹۳۷ که اولین معادله ارائه شد تاکنون معادله کوزنی-کارمن به شکل‌های مختلفی بیان شده است که معمول‌ترین آن به صورت زیر می‌باشد:

(۵)

در این رابطه $sat k$ ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع (C) m/s ، ضریب ثابت (نماینده شکل و انحنای کانال‌های جریان)، g ضریب ثقل (m/s^2) ، $w\mu$ لزجت دینامیکی آب (ρ) $Pa \cdot s$ ، چگالی ذرات جامد (kg/m^3) ، $w\rho$ چگالی آب (kg/m^3) ، $(DR = \rho_s/\rho_w)$ وزن مخصوص نسبی، SS سطح ویژه (kg/m^2) و e عیار هوا می‌باشد. این معادله وجود رابطه‌ای خطی بین $sat k$ و e را نشان می‌دهد. بر اساس تحقیقات کارمن (۱۹۳۹) مقدار $C = 0.7$ بهترین نتیجه را در مقایسه با داده‌های آزمایشگاهی دارد. در اکثر منابع (۳۲ و ۲۰) معادله کوزنی-کارمن فقط برای خاک‌های شنی معتبر شناخته شده و در خاک‌های رسی فاقد اعتبار اعلام گردیده است. چاپپوس و آبرتین توانایی معادله کوزنی-کارمن را در جزئیات آزمودند و شکل دیگری از معادله (رابطه ۶) را که قابل کاربرد برای انواع خاک چسبنده و غیر چسبنده می‌باشد ارائه گردید. در این معادله به ترتیب k_{sat} و SS دارای واحد (m/s) و (kg/m^2) بوده و G_s بدون بعد می‌باشد (۱۱).

$$K_{sat} = C \frac{g}{\mu_w \rho_w} \frac{e^3}{SS^2 D_R^2 (1+e)} \quad (6)$$

چاپپوس و همکاران (۱۹۸۹) جدول ارائه‌شده توسط سازمان مهندسی تأسیسات دریایی آمریکا (۱۹۷۴) را به صورت معادله (۷) ساده‌سازی کردند (۲۵).

$$\log(K_{sat}) = 0.5 + \log \left[\frac{e^3}{G_s^2 SS(1+e)} \right] \quad (7)$$

که در آن k_{sat} بر حسب (cm/s) و d_{10} بر حسب (mm) می‌باشد. این رابطه در خاک‌های ماسه‌ای یا مخلوطی از شن و ماسه با وجود شرایط زیر برقرار است:

$$K_{sat} = 10^{1.29e-0.6435} (d_{10})^{0.5504-0.2937e}$$

در منابع مختلف مؤلفه‌های تأثیرگذار در ضریب هدایت هیدرولیکی برای خاک‌های درشت دانه شامل قطر ذرات $(d_{10}, d_{50}, d_{100})$ ، d_{10} و d_{50} ، سطح ویژه ذرات (SS) ، ضریب یکنواختی (CU) ، استفاده از تخلخل یا عیار هوا، درجه اشباع و بررسی فرسایش داخلی بیان گردیده است. محدودیت برخی از روش‌هایی که قبل از سال ۲۰۰۰ جهت تخمین ضریب نفوذپذیری ارائه شده‌اند (مانند روش‌های کرومبیین و مونک (۱۹۴۲)، کریگر و همکاران (۱۹۴۷)، ماش و دنی (۱۹۶۶)، سامرز و ویر (۱۹۸۴)، شفرد (۱۹۸۹) و اسپری و پیرس (۱۹۹۵))، این است که در آن‌ها تخلخل و نسبت پوکی هیچ‌کدام در معادلات در نظر گرفته نشده است و این بدان معنی است که برای یک نوع خاک، روش‌های مذکور ضریب آبگذری را برای شرایط با تراکم بالا، متوسط و یا کم یکسان پیش‌بینی می‌کند. این موضوع می‌تواند در رابطه با این باور اشتباه که هر خاک دارای تخلخل منحصر به فردی است، توجیه شود و این در حالی است که هر خاک دارای طیف وسیعی از مقادیر تخلخل و نسبت پوکی می‌باشد. پس از سال ۲۰۰۰، در تمام روش‌های پیش‌بینی ضریب آبگذری اشباع یکی از مؤلفه‌های تخلخل (n) یا نسبت پوکی (e) در نظر گرفته شده است.

هدف این تحقیق بررسی دقت برخی از روش‌های متداول و پرکاربرد در تخمین ضریب آبگذری اشباع می‌باشد. برای این منظور با ساخت مدل آزمایشگاهی، ضریب آبگذری، وضعیت خطوط جریان و تغییر فشار استاتیک در طول چهار نمونه خاک ماسه‌ای با طیف نسبتاً وسیعی از اندازه ذرات $(0.47mm < d_{50} < 2/4mm)$ اندازه‌گیری شد. در ادامه ضریب آبگذری بدست آمده به عنوان شاخص با نتایج حاصل از روش‌های مطرح و پرکاربرد در تعیین ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع مقایسه و روش‌های مناسب معرفی می‌گردد.

مواد و روش‌ها

در این بخش ابتدا برخی از روش‌های پرکاربرد در زمینه تخمین هدایت هیدرولیکی اشباع خاک‌های غیر چسبنده که در منابع مختلف (چاپپوس ۲۰۱۲، اگویار ۳۰۱۳) نام برده شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در سال ۱۹۵۲ ترزاقی برای ماسه رابطه (۳) را ارائه نمود:

$$K_{sat} = C_0 \frac{\mu_{10}}{\mu_r} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2 \quad (3)$$

در این معادله ثابت C_0 برابر با ۸ برای دانه‌های گرد و صاف و $4/6$ برای دانه‌بندی با اشکال نامنظم تعریف شد، همچنین μ_{10} و μ_r به ترتیب ویسکوزیته آب در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد و T درجه سانتی‌گراد و d_{10} قطر موثر ذرات بر حسب (mm) ، n تخلخل و k_{sat} نیز بر حسب (cm/s) می‌باشد (۲۹).

در تحقیقات کوزنی (۱۸) و کارمن (۶ و ۷) آزمایش نفوذپذیری جهت تعیین سطح ویژه (SS) پودرهای صنعتی بکار رفت. در آن زمان تعیین مؤلفه سطح ویژه توسط روش‌های موجود زمان‌بر و غیر دقیق بود. کوزنی (۱۹۲۷) تئوری را برای یک سری لوله‌های مویینه ۳ با طول یکسان توسعه داد که منتج به رابطه زیر گردید:

(۴)

$$V = \gamma(I/\mu)c(p^3/\delta^2)$$

این ذرات در طول آزمایش اتفاق می افتد که در معادلات به راحتی قابل بیان نیست (۱۶).

در برخی روش‌ها مانند روش کوزنی-کارمن و چاپیوس و آبرتن نیاز به تخمین سطح ویژه (SS) می باشد. روش‌های موجود تخمین SS تقریبی و بر پایه آزمایش‌های محلی است. کراس و ایشای (۱۹۷۷) جهت تخمین سطح ویژه روش تحلیلی نسبتاً پیچیده‌ای را ارائه نمودند؛ پایه این روش عامل شکلی است که به صورت بصری توسط میکروسکوپ به دست می آید (۱۴). در سال ۱۹۹۲ چاپیوس و لیگر روشی جهت تخمین سطح ویژه برای خاک‌های غیر چسبیده به کمک منحنی دانه‌بندی ارائه کردند. در این روش اگر d قطر گره (وجه یک مکعب) باشد سطح ویژه مجموعه‌ای از گره‌ها (مکعب‌ها) برابر است با:

$$SS = (6/\rho_s) \sum (P_{NoD} - P_{No d}) / d \quad (11)$$

در رابطه فوق ρ_s چگالی ذرات کره (مکعب) (kg/m^3) و S سطح ویژه $(P_{NoD} - P_{No d}/m^2)$ ، (kg) درصد وزنی بین قطر D و d می باشد. اگر منحنی دانه‌بندی داری حداقل قطر قابل اندازه‌گیری برابر با D_{min} باشد، در روش چاپیوس و ایشای (۱۹۹۲) یک قطر معادل به عنوان نماینده قطر تمام ذرات کوچک‌تر از D_{min} به صورت رابطه (۱۲) بیان می شود (۱۳):

$$d_{eq}^2 = \frac{1}{D_{min}} \int_0^{D_{min}} y^2 dy = \frac{D_{min}^2}{3} \quad (12)$$

مراحل انجام آزمایش

در این تحقیق با استفاده از یک روش جدید آزمایشگاهی ضریب آبگذری اندازه‌گیری شد. مدل ساخته شده با سطح مقطع مربع از جنس پلاکسی گلاس، دارای سه جعبه مجزا به ابعاد $30 \times 20 \times 20$ سانتی‌متر (شامل جعبه ورودی که به مخزن تأمین تراز آب متصل می شود، جعبه مرکزی که مصالح در آن متراکم می گیرد و در نهایت جعبه خروجی که دبی عبوری از آن اندازه‌گیری می شود) می باشد. این سه قسمت به صورت تو رفته و بیرون زده روی پایه‌ای قرار دارد که با توجه به شاسی طراحی شده و استفاده از گریس سیلیکونی کاملاً آب‌بند و محکم می گردد. در ابتدا و انتهای جعبه میانی که نمونه در آن قرار دارد لبه‌ای به اندازه سه میلی‌متر برای قرار گرفتن قاب توری جهت جلوگیری از جابه‌جایی نمونه در نظر گرفته شده است. منبع تأمین ارتفاع آب، مخزنی است با قطر ۵۵ و ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر که به واسطه نصب شناور سطح آب در آن ثابت می باشد. این منبع قابلیت تغییر ارتفاع را داشته و تا ۱/۵ متر ارتفاع را بر روی محور مدل تأمین می کند. همچنین برای اندازه‌گیری فشار بر روی جعبه مرکزی ۱۸ عدد پیزومتر در کف و دیواره تعبیه و مورد قرائت قرار گرفت (شکل ۱). با توجه به اینکه دما بر روی خصوصیات فیزیکی آب و در نتیجه ضریب آبگذری تأثیرگذار است؛ لذا تمام آزمایش‌ها در دمای آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام می شود.

$$2 \leq Cu \leq 12 \& \frac{d_{10}}{d_5} \leq 1.4 \& 0.1mm \leq d_{10} \leq 2mm \& 0.3 \leq e \leq 0.7$$

در مقاله حاضر این رابطه با عنوان روش اصلاحی Navfac شناخته می شود.

شهبابی و همکاران (۱۹۸۴) یک نمونه خاک ماسه‌ای را انتخاب و آن را توسط الک به اندازه‌های مختلف تجزیه نمودند، سپس با اختلاط نسبت‌های مختلف به چهار گروه هر یک شامل پنج دانه‌بندی (هر گروه دارای یک مقدار d_{10} مشخص و مقادیر متفاوت Cu) دست یافتند. داده‌های به دست آمده توسط آزمایش نفوذپذیری با بار ثابت با دیوار صلب جهت استخراج رابطه زیر بکار رفت:

$$K_{sat} = 1.2 C_U^{0.735} d_{10}^{0.89} \frac{e^3}{1+e} \quad (8)$$

معادله (۸) برای خاک ماسه‌ای با $CU > 8$ و $d_{10} > 0.1mm$ معتبر می باشد (۲۸).
بونیمپا و همکاران (۲۰۰۲) رابطه (۹) را برای خاک‌های غیر چسبیده ارائه کردند:

$$K_{sat} = C_G \frac{\gamma_w}{\mu_w} C_U^{0/3} d_{10}^2 \frac{e^{3+x}}{1+e} \quad (9)$$

در این رابطه مؤلفه‌های مورد استفاده شامل:

$$CG = 0.1$$

$$\gamma_w = 9.8 (kn/m^3)$$

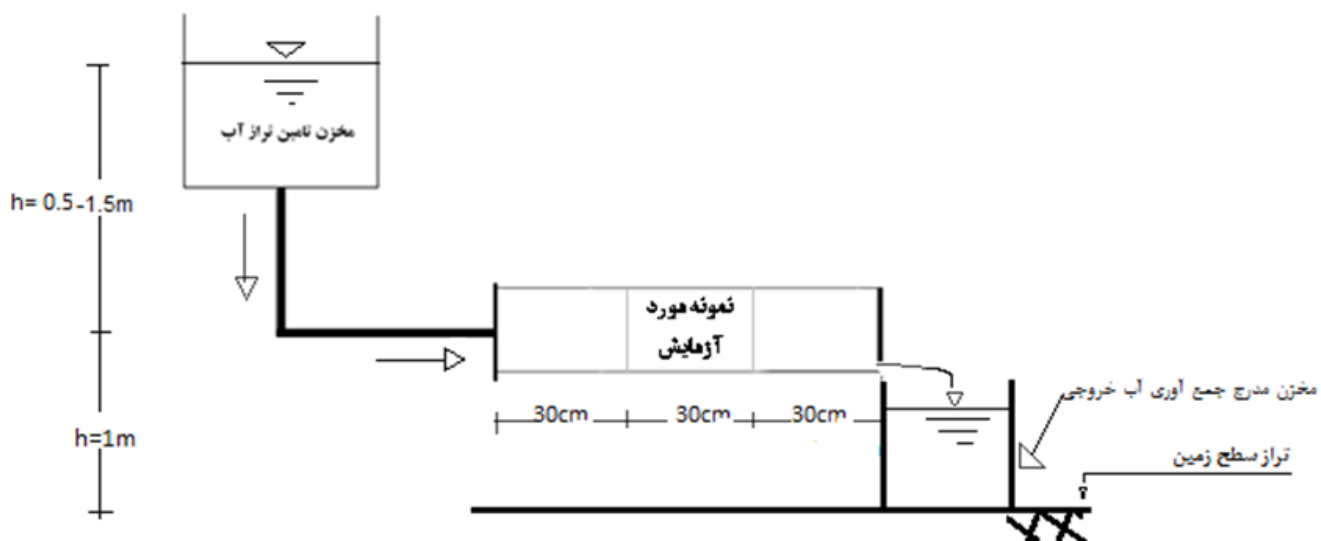
$$\mu_w = 10^{-3} (pa.s)$$

و $X = 2$ بوده و واحد k_{sat} و d_{10} به ترتیب (cm/s) و (cm) می باشد (۲۳).

در سال ۲۰۰۴ چاپیوس بهترین برازش بین مقادیر k_{sat} را به کمک نتایج آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های همگن کاملاً اشباع در انواع خاک غیر چسبیده طبیعی (شامل سیلت) به دست آورد. در این روش سه شرط شامل طبیعی بودن خاک، $0.3 mm < d_{10} < 3 mm$ و $0.3 < e < 1$ جهت تخمین مناسب ضریب آبگذری الزامی است (۹).

$$K_{sat} = 2.4622 \left(\frac{d_{10}^2 e^3}{1+e} \right)^{0.7925} \quad (10)$$

در این معادله واحد k_{sat} و d_{10} به ترتیب (cm/s) و (mm) می باشد. برای سنگ‌های خرد شده و بقایای معدنی دقت معادله چاپیوس کاهش می یابد که علت آن را می توان به وجود ذرات زاویه دار و گاهی اوقات سوزنی شکل که باعث افزایش اثر پیچ خوردگی جریان می شود، همچنین هندسه متفاوت خلل و فرج مواد خرد شده از خاک‌های طبیعی نسبت داد. در طول آزمایش نفوذپذیری بر روی مواد خرد شده پدیده‌هایی مانند به وجود آمدن ذرات جدید و حرکت



ب) مخزن تأمین ارتفاع مورد نیاز باقابلیت تنظیم



الف) نمای مدل فیزیکی در حال اجرا

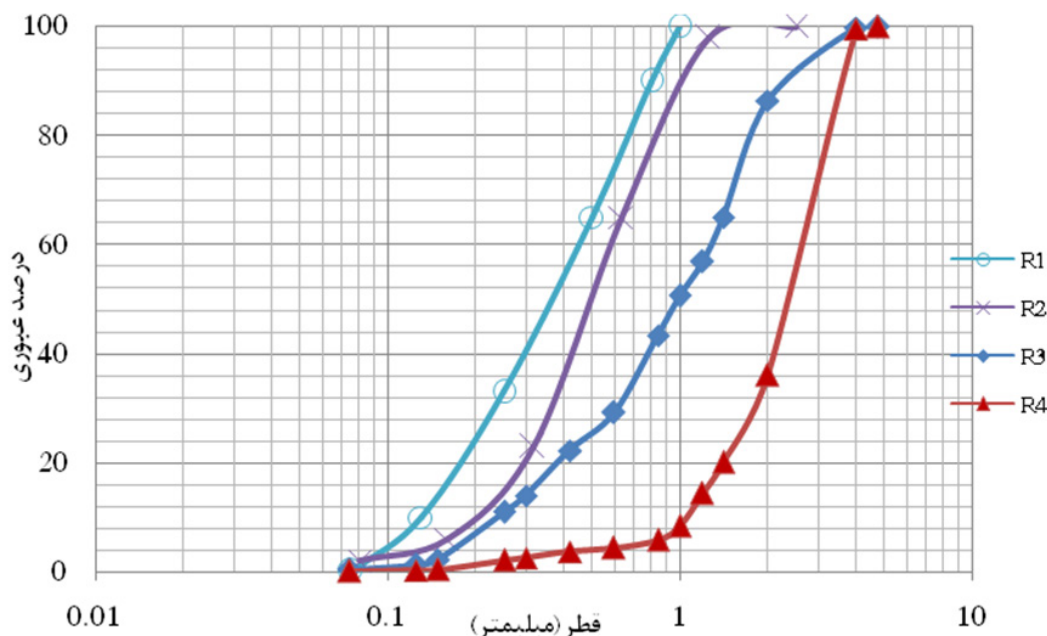


ج) نمونه‌ای از خاک متراکم شده در جعبه پلاستیکی
شکل ۱- شماتیک و اجزاء مدل آزمایشگاهی ساخته‌شده

مصالح مورد استفاده

جهت انجام تحقیق چهار نوع خاک ماسه‌ای ($d_{50} > 2/4 \text{ mm}$) (شکل ۲) جهت آزمایش انتخاب و خصوصیات مورد نیاز آن‌ها مطابق جدول (۱) به دست آمد. با توجه به اینکه هر یک از معادلات ذکر شده در محدوده خاصی از مؤلفه‌های ورودی از دقت کافی برخوردار است؛ در ابتدا برای هر یک

از چهار نمونه خاک، معادلات مناسب تعیین و مقادیر ضریب آبدگری به کمک روابط موجود به دست آمد. همچنین برای نمونه‌های مذکور پس از متراکم نمودن مصالح در مدل آزمایشگاهی (با توجه به نسبت پوکی ارائه شده در جدول (۱))، اشباع کردن نمونه و برپا سازی مدل، برای هدهای مختلف ($0/5$ ، 1 و $1/5$ متر) مدل اجراء فشار پیرومتریک قرائت و جریان عبوری اندازه‌گیری شد.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی چهار نمونه خاک مورد آزمایش

جدول ۱- مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده

Cu	D60 (mm)	D10 (mm)	سطح ویژه ذرات (/m2) (kg)	نسبت پوکی در حالت متراکم در مدل آزمایشگاهی (e_0)	چگالی	نام نمونه
۳/۲	۰/۲۸	۰/۰۹۰	۱۷/۳۷	۰/۴۰	۲/۷۴	R1
۲/۹	۰/۵۸	۰/۲	۸/۵۹	۰/۶۷	۲/۷۰	R2
۶/۵	۱/۳	۰/۲	۵/۶۶	۰/۴۴	۲/۴۸	R3
۴/۳	۱/۸	۰/۴۲	۳/۸۲	۰/۴۱	۲/۵۲	R4

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (O_i - P_i)^2} \quad (14)$$

در روابط فوق RE خطای نسبی، RMSE ریشه میانگین مربعات خطا، P_i و O_i به ترتیب مقادیر ضریب آبدگری به دست آمده از اجرای

در ادامه از معیارهای آماری خطای نسبی ۴، ریشه میانگین مربعات خطا ۵ و ضریب همبستگی ۶ برای بررسی دقت روش‌های مختلف اندازه‌گیری ضریب آبدگری استفاده شد.

$$RE = \frac{1}{100} \sum \frac{O_i - P_i}{O_i} \quad (13)$$

نتایج

جدول (۲) مقادیر ضریب آبخیزی اشباع را برای نمونه‌های مختلف به کمک روابط موجود نشان می‌دهد. همچنین در جدول (۳) نتایج حاصل از اجرای مدل آزمایشگاهی ارائه گردیده است. در این جدول ضریب هدایت هیدرولیکی ارائه شده برای هر نمونه میانگین ضریب آبخیزی برای سه ارتفاع ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر می‌باشد. همان‌طور که مشخص است نمونه R1 با ضریب آبخیزی ۰/۰۰۵۱ cm/s کمترین و نمونه R4 با ضریب آبخیزی ۰/۱۹ cm/s بیشترین نفوذپذیری را نشان می‌دهد.

مدل فیزیکی و روابط موجود و $N=4$ تعداد نمونه‌های مورد آزمایش برای هر رابطه می‌باشد.

جهت بررسی حساسیت ضریب آبخیزی به تغییرات نسبت پوکی، برای تمام نمونه‌ها نسبت پوکی به میزان ۳۰ درصد مقدار اولیه (نسبت پوکی در حالت متراکم (e_0) - در جدول شماره (۱)) کاهش و افزایش داده شد و توسط روابط مختلف، ضریب آبخیزی محاسبه و درصد تغییرات آن بدست آمد. از طرفی ضریب آبخیزی توسط مدل فیزیکی نیز تعیین گردید.

جدول ۲- مقادیر ضریب آبخیزی (cm/s) نمونه‌های R1 تا R4 با استفاده از روابط مختلف

رابطه / نمونه	ترزاقی	کوزنی-کارمن	چاپیوس و آبرتین	اصلاحی Navfac	شهابی و همکاران	بونیمیا و همکاران	چاپیوس
R1	۰/۰۰۹	۰/۰۰۴۰	۰/۰۰۶۴	۰/۰۰۱۱	*	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۵۱
R2	۰/۰۱۴	۰/۰۶۶	۰/۱۰	۰/۰۴۴	*	۰/۰۴۵	۰/۰۵۲
R3	۰/۰۰۶	۰/۰۶۱	۰/۰۹۸	۰/۰۱۲	*	۰/۰۰۹	۰/۰۲۲
R4	۰/۰۲۱	۰/۱۰۷	۰/۱۷۳	۰/۰۷۶	۰/۰۸۲	۰/۰۲۴	۰/۰۶۱

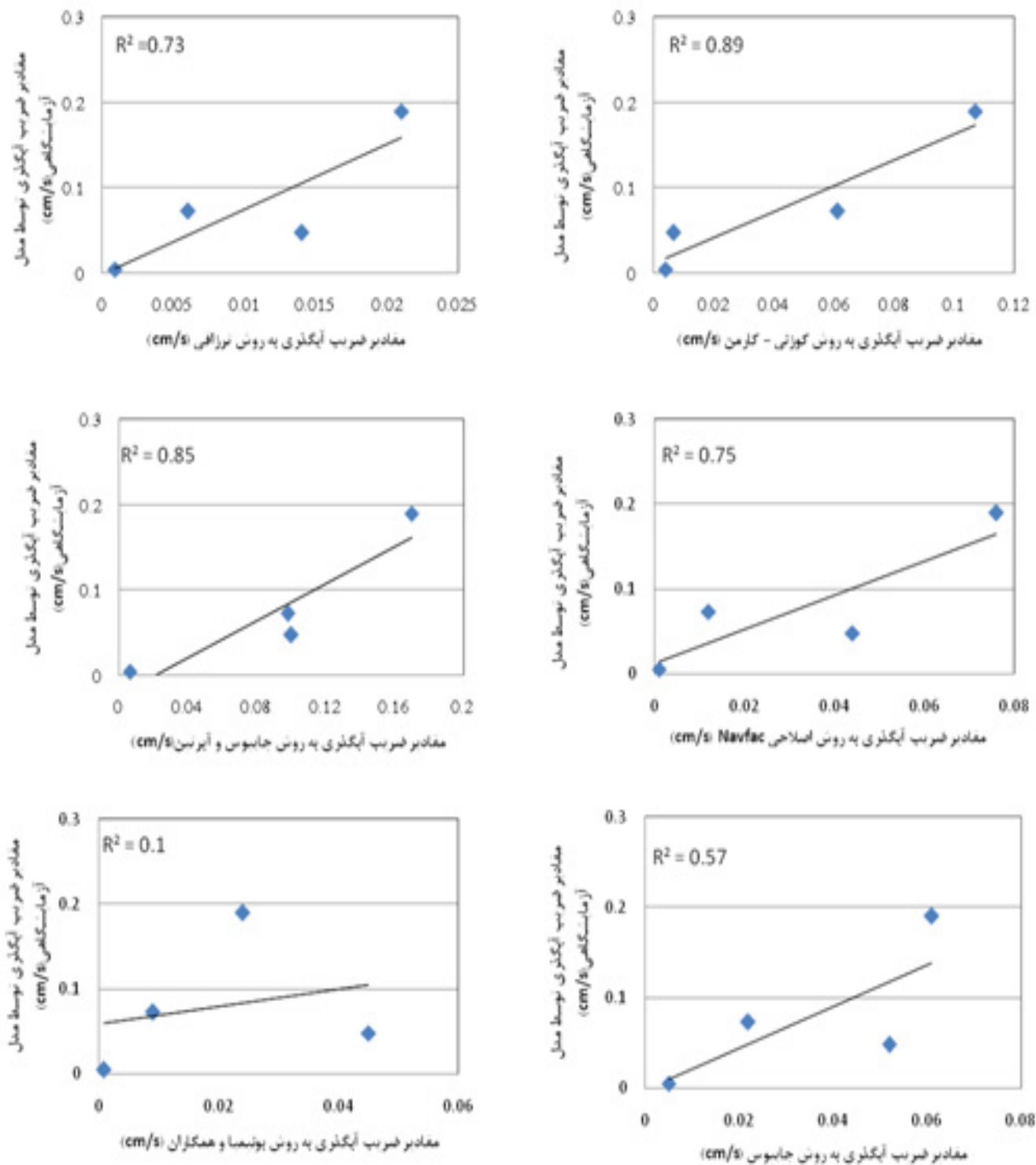
* خصوصیات نمونه با محدوده کاربرد رابطه شهابی و همکاران (۱۹۸۴) هم‌خوانی ندارد.

جدول ۳- نتایج حاصل از اجرای مدل آزمایشگاهی در تخمین ضریب آبخیزی

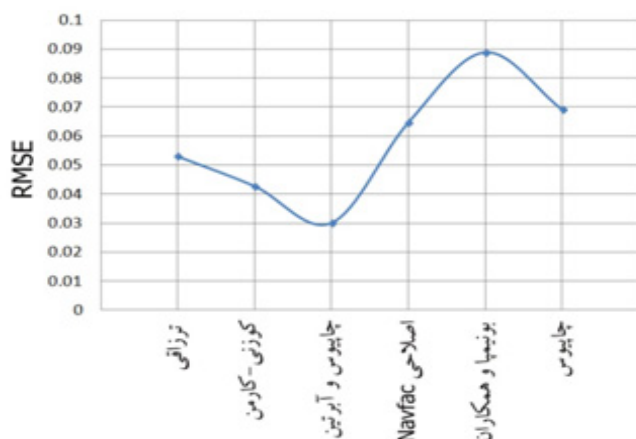
ارتفاع آب (m)			
نمونه R4	نمونه R3	نمونه R2	نمونه R1
ksat (cm/s)	ksat (cm/s)	ksat (cm/s)	ksat (cm/s)
۰/۲۳	۰/۰۸۳	۰/۰۴۳	۰/۰۰۳۹
۰/۱۷	۰/۰۷۰	۰/۰۴۸	۰/۰۰۴۹
۰/۱۶	۰/۰۷۶	۰/۰۵۳	۰/۰۰۶۴
۰/۱۹	۰/۰۷۶	۰/۰۴۸	۰/۰۰۵۱
متوسط			

جدول (۴) متوسط درصد افت فشار در طول مدل برای نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. برای از بین بردن تأثیر دراپ انتهایی مدل در افت فشار؛ در این جدول درصد افت فشار به صورت نسبی (نسبت به متوسط افت فشار برای نمونه ۴) بیان شده است، همچنین با توجه به محدودیت تعداد صفحات، خطوط هم فشار و فریاتیک فقط برای نمونه ۴ ارائه می‌شود (شکل ۷).

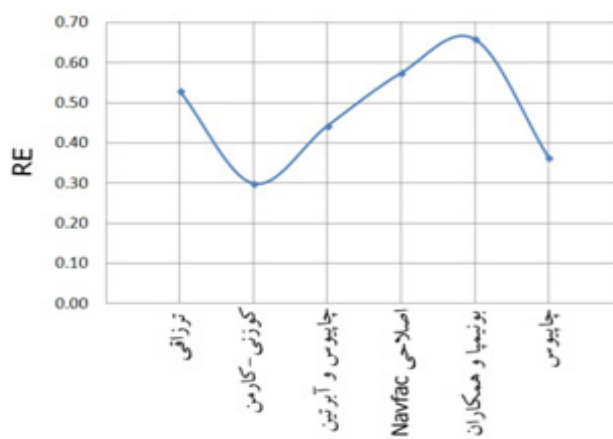
با استفاده از نرم افزار SPSS مشخص گردید مقادیر ضریب آبخیزی اشباع برای تمام روش‌های مورد بررسی دارای توزیع نرمال است، لذا در محاسبات آماری از مقادیر واقعی ضریب آبخیزی اشباع بجای لگاریتم آن استفاده شد. شکل (۳) ضریب همبستگی بین متوسط مقادیر مشاهداتی (حاصل از اجرای مدل فیزیکی) و روابط مختلف تعیین ضریب آبخیزی را نشان می‌دهد. همچنین در شکل‌های (۴) تا (۶) معیارهای آماری RE ، $RMSE$ و $R2$ برای روابط مختلف ارائه گردیده است.



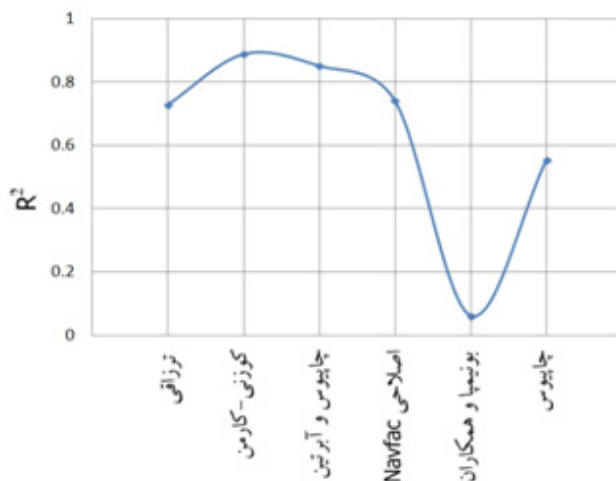
شکل ۳- همبستگی متوسط مقادیر مشاهداتی و روابط مختلف تعیین ضریب آنگوری خاک اشباع



شکل ۵- میانگین مجموع مربعات (RMSE) روش‌های مختلف تعیین ضریب آبگذاری خاک اشباع



شکل ۴- خطای نسبی (RE) روش‌های مختلف تعیین ضریب آبگذاری خاک اشباع



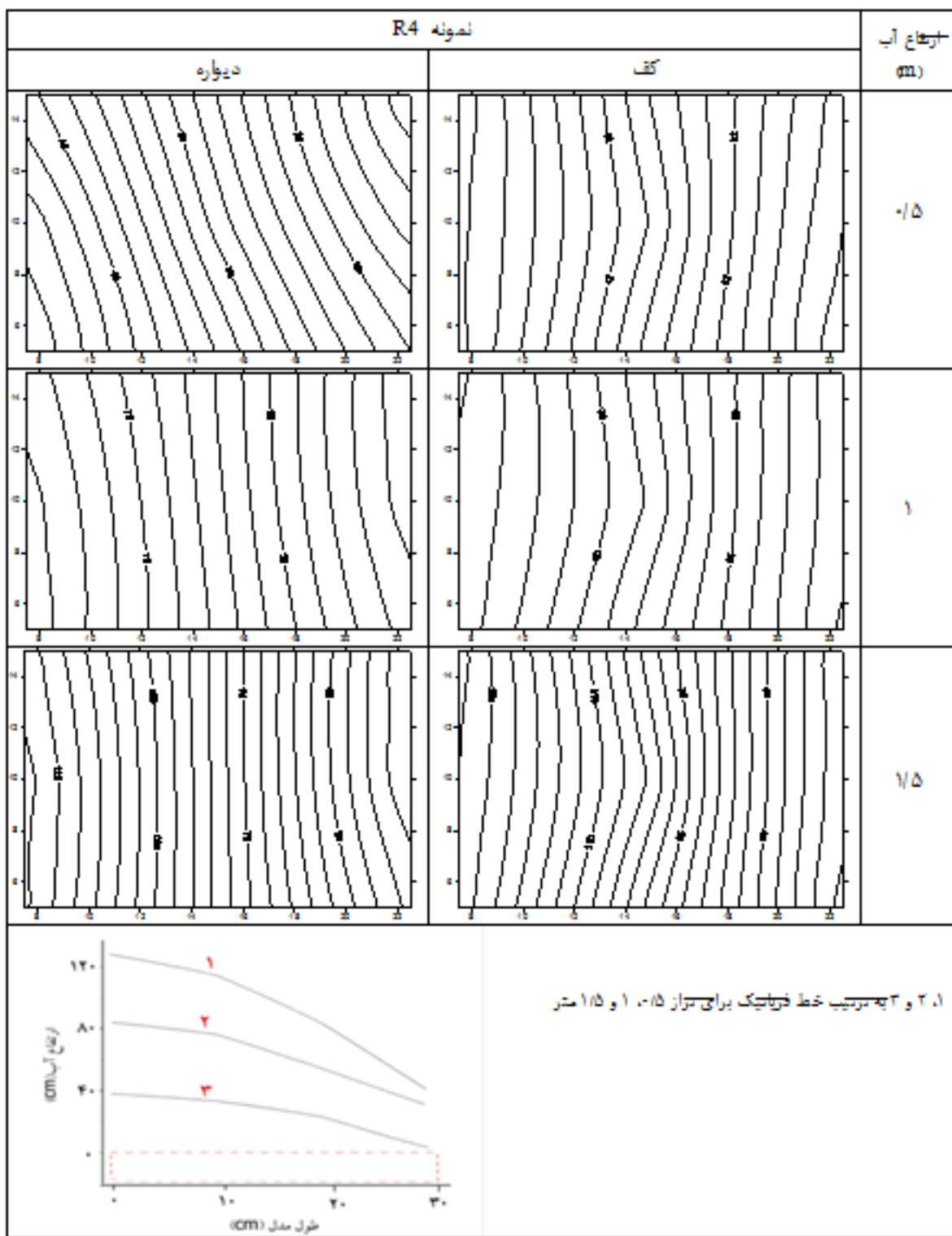
شکل ۶- ضریب همبستگی (R2) روش‌های مختلف تعیین ضریب آبگذاری خاک اشباع

به متوسط افت فشار برای نمونه R4 بیان شده است، همچنین با توجه به محدودیت تعداد صفحات، خطوط هم فشار و فریاتیگ فقط برای نمونه R4 ارائه می‌شود (شکل ۷). همان طور که از جدول (۴) مشخص است با توجه به ریزدانه‌تر بودن و نسبت پوکی کمتر، نمونه R1 بیشترین افت فشار را در طول مدل نشان می‌دهد.

همان طور که از شکل‌های ۴، ۵ و ۶ مشخص است روند تغییرات این سه معیار با هم هماهنگی دارد. جدول (۴) متوسط درصد افت فشار در طول مدل برای نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. برای از بین بردن تأثیر دراپ انتهای مدل در افت فشار؛ در این جدول درصد افت فشار به صورت نسبی (نسبت

جدول ۴- نسبت متوسط درصد افت فشار برای نمونه‌های مختلف نسبت به نمونه R4 در طول مدل

نمونه	ارتفاع آب (متر)		
	۱/۵	۱	۱/۵
R1	۱/۷۶	۱/۶۷	۱/۸۸
R2	۱/۵۵	۱/۴۹	۱/۶۶
R3	۱/۳۰	۱/۱۷	۱/۲۳
R4	۱	۱	۱



شکل ۷- وضعیت خطوط هم فشار و فریاتیك برای نمونه R4 تحت ارتفاعهای مختلف

بحث و نتیجه‌گیری

آزمایشگاهی دقیق جهت استخراج معادلات مذکور نسبت داد. با توجه به اینکه رابطه چاپیوس و آبرتین فرم لگاریتمی رابطه کوزنی-کارمن است هماهنگی بین نتایج دو روش منطقی به نظر می‌رسد. از طرفی روش بونیمپا و همکاران با کمترین ضریب همبستگی و بیشترین RE و RMSE بیشترین انحراف را از مقادیر مشاهده‌ای نشان می‌دهد که علت آن را می‌توان حساسیت این روش به مؤلفه نسبت پوکی (e) دانست. لازم به ذکر است فقط برای روابط کوزنی-کارمن و چاپیوس و آبرتین بین مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع و مقادیر مشاهده‌ای، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی داری وجود ندارد، اما برای سایر روابط مورد بررسی اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهده‌ای در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار است.

در شکل (۸) درصد تغییرات ضریب آبگذری اشباع به صورت تابعی از درصد تغییرات نسبت پوکی برای روش‌های مختلف ارائه شده است.

همان‌طور که مشخص است در روش بونیمپا و همکاران با افزایش ۳۰ درصدی نسبت پوکی، برای تمام نمونه‌ها ضریب آبگذری اشباع به طور متوسط ۲۳۸ درصد افزایش می‌یابد و این در حالی است که نتایج حاصل از اجرای مدل فیزیکی افزایش ضریب آبگذری را به طور متوسط ۹۳ درصد نشان می‌دهد (شکل ۸). همچنین با کاهش ۳۰ درصدی نسبت پوکی، ضریب آبگذری به دست آمده از اجرای مدل به طور متوسط ۵۹ درصد کاهش یافت در حالی که روش بونیمپا و همکاران با ۸۱ درصد، بیشترین کاهش را در ضریب آبگذری بین تمام روش‌ها نشان می‌دهد. این تغییرات نشان‌دهنده حساسیت روش بونیمپا و همکاران به مؤلفه نسبت پوکی است. نکته قابل توجه دیگری که از شکل (۸) می‌توان دریافت اینک با افزایش نسبت پوکی (کاهش تراکم و سست‌تر شدن نمونه) درصد خطای روش بونیمپا و همکاران افزایش می‌یابد و مقادیر به دست آمده از این روش فاصله بیشتری از مقادیر مشاهده‌ای نشان می‌دهد؛ بنابراین می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که این روش در خاک‌های متراکم نتایج دقیق‌تری ارائه می‌کند. از طرفی در تمام روش‌ها به جز روش بونیمپا و همکاران درصد تغییرات نسبت پوکی ناشی از تغییر در ضریب آبگذری هماهنگی مناسبی با مقادیر مشاهده‌ای دارد (شکل ۸).

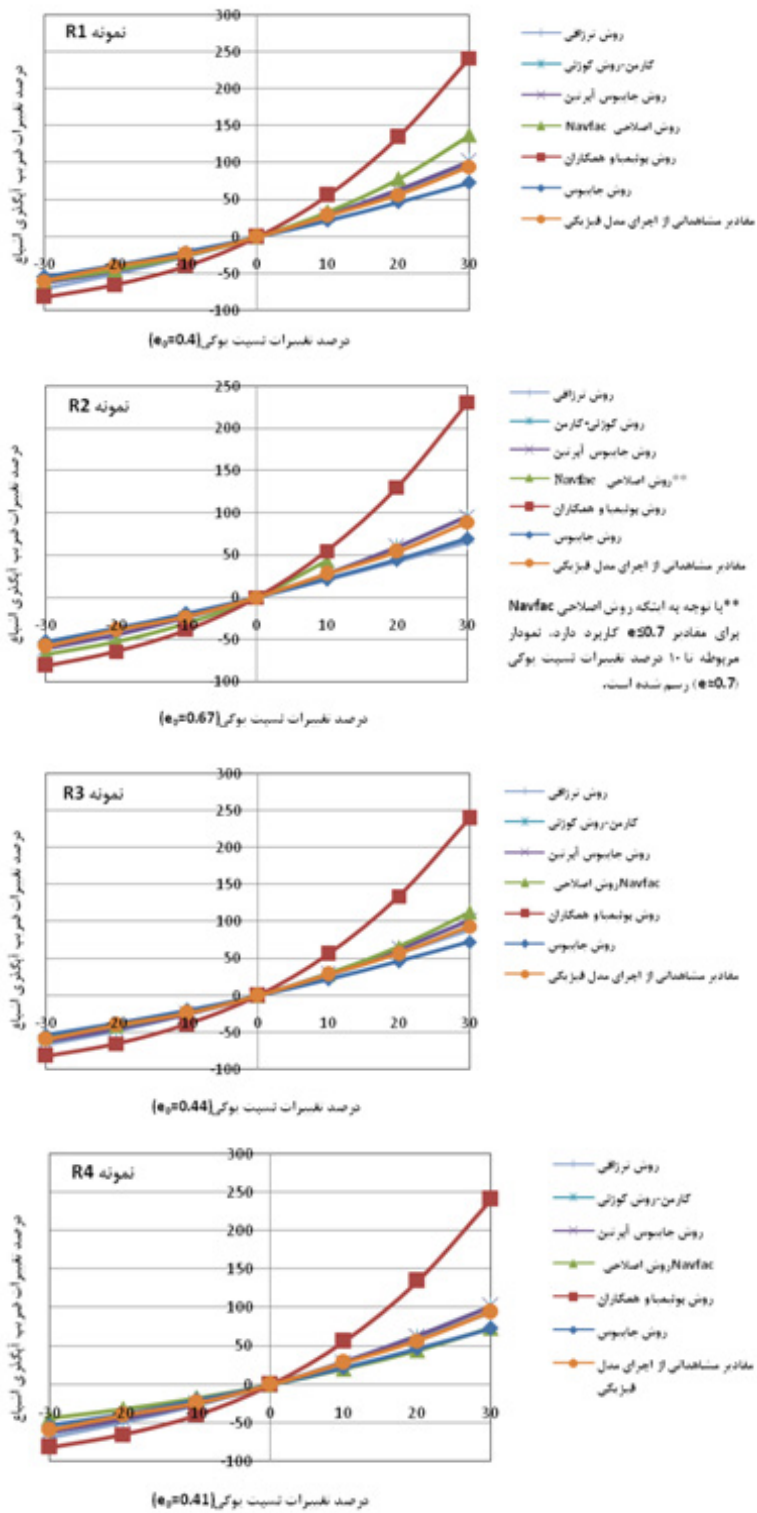
با توجه به گستردگی دامنه مؤلفه‌های مؤثر در ضریب آبگذری و اینکه هر یک از معادلات ارائه شده بر اساس دامنه محدودی از خصوصیات خاک به دست آمده است این روابط برای داده‌هایی که از آن برآزش یافته از دقت مناسبی برخوردار است، اما برای داده‌های جدید خطای آن‌ها افزایش می‌یابد. پیشنهاد می‌گردد با جمع آوری داده‌های به دست آمده از شرایط واقعی در پروژه‌هایی مانند دیواره‌های آب بند، هسته سدهای خاکی، سدهای زیرزمینی در دست اجرا و نیز اجرا شده و ... ضرایب موجود در روابط تجربی تخمین آبگذری اصلاح شده و در تحقیقات آینده مطالعه بر روی خاک‌های سیلتی و خاک‌های چسبنده متراکم صورت گیرد.

رابطه ترزاقی برای نمونه‌های R1 تا R4 به ترتیب مقادیر ضریب آبگذری را ۱۷/۶٪، ۲۹/۶٪، ۷/۹٪ و ۱۱/۵٪ مقدار مشاهده‌ای به دست می‌آورد که نشان‌دهنده دقت پایین و تخمین ضریب آبگذری کمتر از مقدار واقعی توسط این روش می‌باشد. با توجه به اینکه رابطه چاپیوس و آبرتین شکل دیگر معادله کوزنی-کارمن است، این دو روش برای نمونه‌های مختلف رفتار تقریباً مشابهی دارند. روش کوزنی-کارمن برای نمونه‌های R1 و R3 به ترتیب با $RE=۱۶/۹$ و $RE=۲۱/۶$ و روش چاپیوس و آبرتین نیز برای نمونه‌های R1 و R4 به ترتیب با $RE=۹$ و $RE=۲۵/۵$ بیشترین همبستگی را با مقادیر مشاهده‌ای دارد. از طرفی روش کوزنی-کارمن بیشترین خطا را در نمونه R4 و معادله چاپیوس و آبرتین در نمونه R2 (به ترتیب با برآورد ضریب آبگذری به میزان ۵۶٪ و دو برابر مقدار مشاهده‌ای) نشان می‌دهد.

روش اصلاحی Navfac برای نمونه R2 با $RE=۸/۳$ از دقت مناسبی برخوردار است. برای این نمونه ضریب آبگذری ۹۳٪ مقدار مشاهده‌ای به دست آمد، ولی در نمونه‌های R1، R3 و R4 ضریب آبگذری به ترتیب ۲۱/۶٪، ۱۵/۸٪ و ۴۰٪ مقادیر مشاهده‌ای به دست می‌آید که نشان‌دهنده خطای بیشتر این روش نسبت به روابط کوزنی-کارمن و چاپیوس و آبرتین می‌باشد. علت این امر را می‌توان به شکل توان به توان معادله ارائه شده و احتمال افزایش خطا در این شکل از معادلات نسبت داد.

با توجه به اینکه به علت دامنه محدود استفاده از مؤلفه‌های ورودی (d_{10} و e)، روش ارائه شده توسط شهابی و همکاران فقط برای نمونه R4 قابل استفاده است در ادامه این روش از تجزیه و تحلیل آماری حذف گردید. برای نمونه R4 روش شهابی و همکاران با $RE=۵۶/۹$ ضریب آبگذری را ۴۳/۲٪ مقدار مشاهده‌ای به دست آورد که نشان‌دهنده دقت کمتر این روش نسبت به روش‌های کوزنی-کارمن و چاپیوس و آبرتین می‌باشد. روش بونیمپا و همکاران رفتار مشابهی با روش اصلاحی Navfac نشان می‌دهد. این روش برای نمونه R2 با $RE=۶/۲$ همبستگی مناسبی با مقادیر مشاهده‌ای ارائه می‌کند ولی در نمونه‌های دیگر نسبت به روش اصلاحی Navfac از خطای بیشتری برخوردار است. روش چاپیوس برای نمونه‌های R1 و R2 به ترتیب با $RE=۰$ و $RE=۸/۳$ از دقت بسیار مناسبی برخوردار است اما برای هر دو نمونه R3 و R4 ضریب آبگذری تقریباً ۳۰٪ مقدار مشاهده‌ای تخمین زده می‌شود.

بین روش‌های مورد استفاده روابط کوزنی-کارمن و چاپیوس و آبرتین با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین RE و RMSE دارای بالاترین دقت در تخمین ضریب آبگذری اشباع هستند که علت آن را می‌توان به کاربرد مؤلفه‌های مؤثر در معادله، استفاده از داده‌های فراوان (علاوه بر داده‌های مؤلفین شامل اطلاعات برگرفته از مطالعات ماویس و ویلسی (۱۹۳۷)، موریس و جانسون (۱۹۶۷)، چاپیوس و همکاران (۱۹۸۹)، بوسیر (۱۹۹۳) و ...) و مطالعات



شکل ۸- درصد تغییرات ضریب آنگذری اشباع به صورت تابعی از درصد تغییرات نسبت بویکی برای نمونه‌های مختلف

795-787:(5)41.

10. Chapuis, R.P. 2012. Predicting the saturated hydraulic conductivity of soils: a review. Bull Eng Geol. Environ., 71

11. Chapuis, R.P. and Aubertin, M. 2003. On the use of the Kozeny-Carman's equation to predict the hydraulic conductivity of a soil. Can. Geotech. J., 628-616:(3)40.

12. Chapuis, R.P., Gill, D.E. and Baass, K. 1989b. Laboratory permeability test on sand: Influence of the compaction method on anisotropy. Can. Geotech. J., 622-26:614.

13. Chapuis, R.P. and Legare, P.P. 1992. A simple method for determining the surface area of fine aggregates and fillers in bituminous mixtures. In Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance. ASTM STP, 186-1147:177.

14. Craeger, W.P., Justin, J.D. and Hinds, J. 1947. Engineering for dams. Wiley & Sons, New York.

15. Crus, J. and Ishai, I. 1977. A method for the determination of the surface area of fine aggregate in bituminous mixtures. Journal of Testing and Evaluation, 291-284:(4)5

16. Dejong, J.T. and Christoph, G.G. 2009. Influence of particle properties and initial specimen state on one-dimensional compression and hydraulic conductivity. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 454-449:(3)135.

17. Harr, M.E. 1999. The Groundwater Engineering Handbook. CRC Press, Washington D.C.

18. Kozeny, J. 1927. Ueber kapillare Leitung des Wassers in Boden. Sitzungsber Akad, Wiss., Wien Math. Naturwiss. Kl. Abt. 2a 306-13:271 (in German).

19. Krumbein, W.C. and Monk, G.D. 1942. Permeability as a function of the size parameters of unconsolidated sands. Petrol. Trans. Am. Inst. Min. Eng., 163-151:153.

20. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. 1969. Soil mechanics. John Wiley & Sons, New York.

21. Masch, F.D. and Denny, K.J. 1966. Grain size distribution and its effect on the permeability of unconsolidated sands. Water Resour. Res., -665:(4)2 677.

22. Mavis, F.T. and Wilsey, E.F. 1937. A study of the permeability of sand. Engineering bulletin No. 7, Iowa State University: 29-1.

23. Mbonimpa, M., Aubertin, M., Chapuis R.P. and Bussiere, B. 2002. Practical pedotransfer functions

تشکر و قدردانی

این تحقیق در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری ایران صورت گرفته است. بدین وسیله لازم می‌دانم از مسئولین پژوهشکده، به ویژه مدیر بخش فنی جناب آقای دکتر رستمی تشکر و قدردانی نمایم.

پاورقی

1. Hydraulic permeability (Coefficient of permeability)
2. Permeability
3. Capillary tube model
4. Relative Error
5. Root Mean Square Error
6. Coefficient of determination

منابع مورد استفاده

1. Aguilar, J.R. 2013. Analysis of Grain Size Distribution and Hydraulic Conductivity for a Variety of Sediment Types with Application to Wadi Sediments. M.S Thesis, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal, Kingdom of Saudi Arabia.
2. AL-Doury, M. 2010. A discussion about hydraulic permeability and permeability. Petroleum Science and Technology, 1749-28:1740.
3. Bear, J. 1972. Dynamics of fluids in porous media. Elsevier, New York.
4. Bussiere, B. 1993. Evaluation des proprietes hydrogeologiques des residus miniers utilises comme barrieres de recouvrement. Master s thesis, Ecole Polytechnic Montreal, 171p (in French).
5. Capus, R.P., Griill D.E. and Baass K. 1989. Laboratory permeability test on sand: Influence of the compaction method on anisotropy. Can. Geotech. J., 622-614 :(4)26.
6. Carman, P.C. 1937. Fluid flow through granular beds. Trans. Inst. Chem. Eng. London, 166-15:150.
7. Carman, P.C. 1938b. Determination of the specific surface of powders. Trans. J. Soc. Chem. Ind, -57:225 234.
8. Carman, P.C. 1939. Permeability of saturated sands, soils and clays. J. Agric. Science, 273-29:263.
9. Chapuis, R.P. (2004b). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. Can. Geotech. J.,

sand. In: Nat Conf Pub, Inst of Engineers, Australia, 57-54:(2)84.

29. Shepherd, R.G. 1989. Correlations of permeability and grain size. *Ground Water*, 638-633:(5)27.

30. Sperry, M.S. and Pierce, J.J. 1995. A model for estimating the hydraulic conductivity of granular material based on grain size, and porosity. *Ground water*, 898-892:(6)33.

31. Summers, W.K. and Weber, P.A. 1984. The relationship of grain-size distribution and hydraulic conductivity: an alternate approach. *Ground Water*, 475-474:(4)22.

32. Taylor, D.W. 1948. *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley & Sons, New York.

33. Terzaghi, C. 1925. Principles of soil mechanics: III. Determination of permeability of clay. *Engineering News Records*, 836-832:(21)95.

for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotech. Geol. Eng.*, 259-235:(3)20.

24. Morris, D.A. and Jonson, A.I. 1967. Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil material, as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey 1960-1948. U.S. Geological Survey Water Supply Paper -1839D, 42P.

25. Navfac DM1974 7. Design Manual-Soil mechanics, foundations, and earth structures. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.

26. Seelheim, F. 1880. Method for the determination of permeability of the soil. *Zeitschrift Fur Analytische Chemie*, 402-19:387.

27. Scheidegger, AE. 1974. *The physics of flow through porous media*, 3rd edition. University Toronto Press, Toronto, Ont.

28. Shahabi, A.A., Das, BM. and Tarquin, A.J. 1984. Empirical relation for coefficient of permeability of

■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■