



بررسی آزمایشگاهی تعدادی از روابط تعیین ضریب آبگذری خاک‌های اشباع ماسه‌ای

• محمد تاج‌بخش

دانش آموخته دکتری مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، آدرس فعلی: وزارت نیرو، شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه (نویسنده مسئول)

• منوچهر فت‌حی مقدم

استاد دانشگاه شهید چمران اهواز

• نادر قلی ابراهیمی

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

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 چسبنده 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 108 pp: 62-75

Laboratory evaluation of permeability coefficient relationships for sandy soils

By: *M. Tajbakhsh*, Ph.D. Graduate, College of water Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Current address: Ministry of Energy, Kermanshah regional water authority, Kermanshah, Iran (*Corresponding Author*). *M. Fathi Moghadam*, Professor of hydraulic structures, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. *N. Gh. Ebrahimi*, Assistant Professor, Soil Conservation and Watershed Management Institute (SCWMRI), 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)

مقدمه

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

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

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) می‌باشد. 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).

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 شنی انجام شد. وی دبی عبوری را تابعی از $A \cdot h$ و $L/1$ 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 می‌باشد 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 کلی‌تر داریسی به صورت زیر استخراج می‌شود:

در این رابطه v سرعت دارسی (γ)، m/s وزن مخصوص سیال (N/m^3) ، I گرادیان هیدرولیکی، μ لزجت سیال (c) ، $Pa \cdot s$ ثابت هندسی، p تخلخل محیط و δ ۱۵ 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 ناوبر 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 انحسای کانال‌های جریان)، g ضریب ثقل (m/s^2) ، μ لزجت دینامیکی آب (ρ) ، $Pa \cdot s$ چگالی ذرات جامد (kg/m^3) ، $w\rho$ چگالی آب (kg/m^3) ، $(DR=ps/pw)$ 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. چاپیوس و آرتین 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).

$$K_{sat} = C \frac{g}{\mu_w \rho_w} \frac{e^3}{SS^2 D_R^2 (1+e)} \quad (۶)$$

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

$$\log(K_{sat}) = 0.5 + \log \left[\frac{e^3}{G_s^2 SS(1+e)} \right] \quad (۷)$$

که در آن $ksat$ 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_{15} ، d_{50} و d_{100})، 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 کرومبین و مونک (۱۹۴۲)، کریگر و همکاران (۱۹۴۷)، ماش و دنی (۱۹۶۶)، سامرز و وبر (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 $(2/4mm < d_{50} < 3/7mm)$ اندازه گیری 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 (چاپیوس ۲۰۱۲، اگویار ۳۰۱۳) نام برده شده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در سال ۱۹۵۲ ترزاقی برای ماسه رابطه (۳) را ارائه نمود:

$$K_{sat} = C_0 \frac{\mu_{10}}{\mu_t} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 d_{10}^2 \quad (۳)$$

در این معادله ثابت C_0 برابر با ۸ برای دانه‌های گرد و صاف و ۴/۶ برای دانه‌بندی با اشکال نامنظم تعریف شد، همچنین μ_{10} و μ_t 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 $ksat$ 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 می‌افتد 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) می‌باشد. 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 می‌آید (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 کره (وجه یک مکعب) باشد سطح ویژه مجموعه‌ای از کره‌ها (مکعب‌ها) برابر است با:

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

در رابطه فوق ρ 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 می‌باشد. 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 می‌شود (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 می‌شود، جعبه مرکزی که مصالح در آن متراکم می‌گیرد و در نهایت جعبه خروجی که دبی عبوری از آن اندازه‌گیری می‌شود) می‌باشد. 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 می‌گردد. 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 55 و ارتفاع 90 سانتیمتر که به واسطه نصب شناور سطح آب در آن ثابت می‌باشد. این منبع قابلیت تغییر ارتفاع را داشته و تا $1/5$ متر ارتفاع را بر روی محور مدل تأمین می‌کند. همچنین برای اندازه‌گیری فشار بر روی جعبه مرکزی 18 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 20 درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود.

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

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

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 به‌دست‌آمده 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 $d_{10} > 0.15mm$ و $e > 0.15$ معتبر می‌باشد (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:

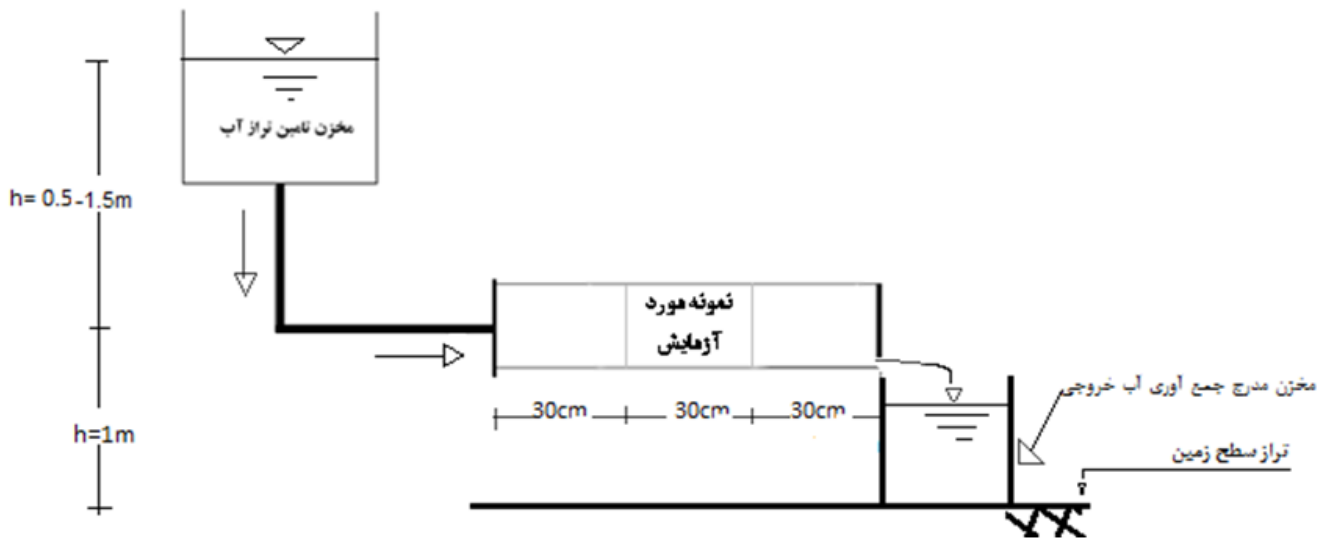
$$\begin{aligned} CG &= 0.1 \\ \gamma_w &= 9.8 (kn/m^3) \\ \mu_w &= 10^{-3} (pa.s) \end{aligned}$$

و $x=2$ بوده و واحد k_{sat} و d_{10} به ترتیب (cm/s) و (cm) می‌باشد (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، $0.3 < d_{10} < 3$ 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) می‌باشد. برای سنگ‌های خردشده و بقایای معدنی دقت معادله چاپیوس کاهش می‌یابد که علت آن را می‌توان به وجود ذرات زاویه‌دار و گاهی اوقات سوزنی شکل که باعث افزایش اثر پیچ‌خوردگی جریان می‌شود، همچنین هندسه متفاوت خلل و فرج مواد خردشده از خاک‌های طبیعی نسبت داد. در طول آزمایش نفوذپذیری بر روی مواد خردشده پدیده‌هایی مانند به وجود آمدن ذرات جدید و حرکت



ب) مخزن تأمین ارتفاع مورد نیاز باقابلیت تنظیم



الف) نمای مدل فیزیکی در حال اجرا

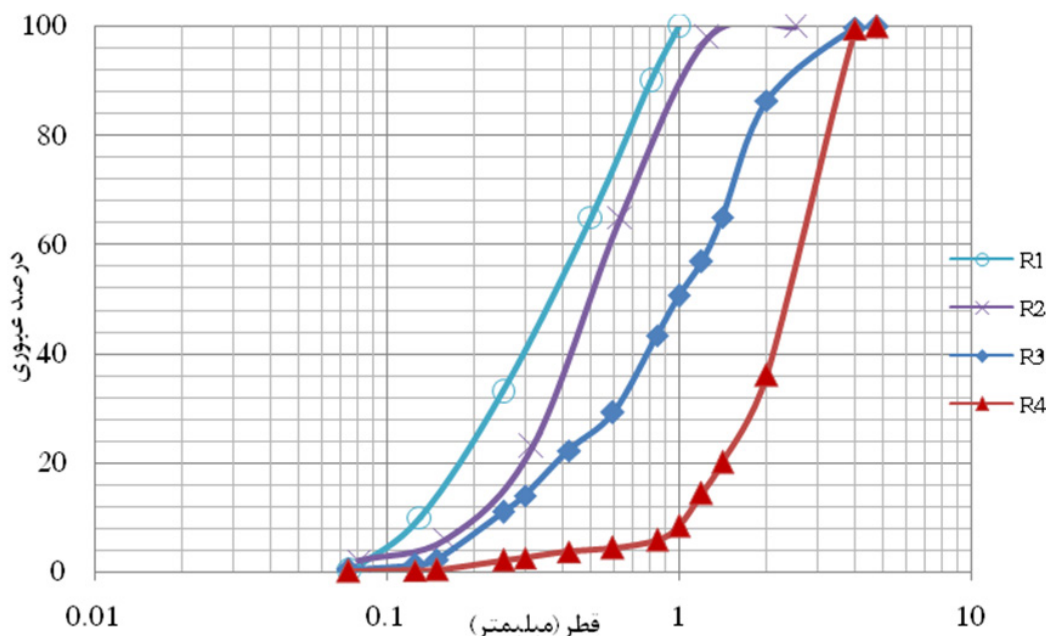


ج) نمونه‌ای از خاک متراکم شده در جعبه پلاستی
شکل ۱- شماتیک و اجزاء مدل آزمایشگاهی ساخته شده

از چهار نمونه خاک، معادلات مناسب تعیین و مقادیر ضریب آبخیزی 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 (۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر) مدل اجرا، فشار پیژومتریک قرائت و جریان عبوری اندازه‌گیری شد.

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



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی چهار نمونه خاک مورد آزمایش

جدول ۱- مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده

Cu	D60 (mm)	D10 (mm)	سطح ویژه ذرات (/m ²) (kg)	نسبت پوکی در حالت متراکم در مدل آزمایشگاهی (e0)	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	۳/۸۳	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، O_i و P_i به ترتیب مقادیر ضریب آبخیزی 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 آبخیزی استفاده شد.

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

نتایج

جدول (۲) مقادیر ضریب آبگذری 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 آبگذری برای سه ارتفاع ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر می‌باشد. همان‌طور که مشخص است نمونه R1 با ضریب آبگذری ۰/۰۰۵۱ cm/s کمترین و نمونه R4 با ضریب آبگذری 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 آبگذری 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 آبگذری محاسبه و درصد تغییرات آن بدست آمد. از طرفی ضریب آبگذری توسط مدل فیزیکی نیز تعیین گردید.

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

رابطه / نمونه	ترازقی	کوزنی - کارمن	چاپوس و آبرتین	اصلاحی Navfac	شهابی و همکاران	بونیمپا و همکاران	چاپوس
R1	۰/۰۰۹	۰/۰۴۰	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

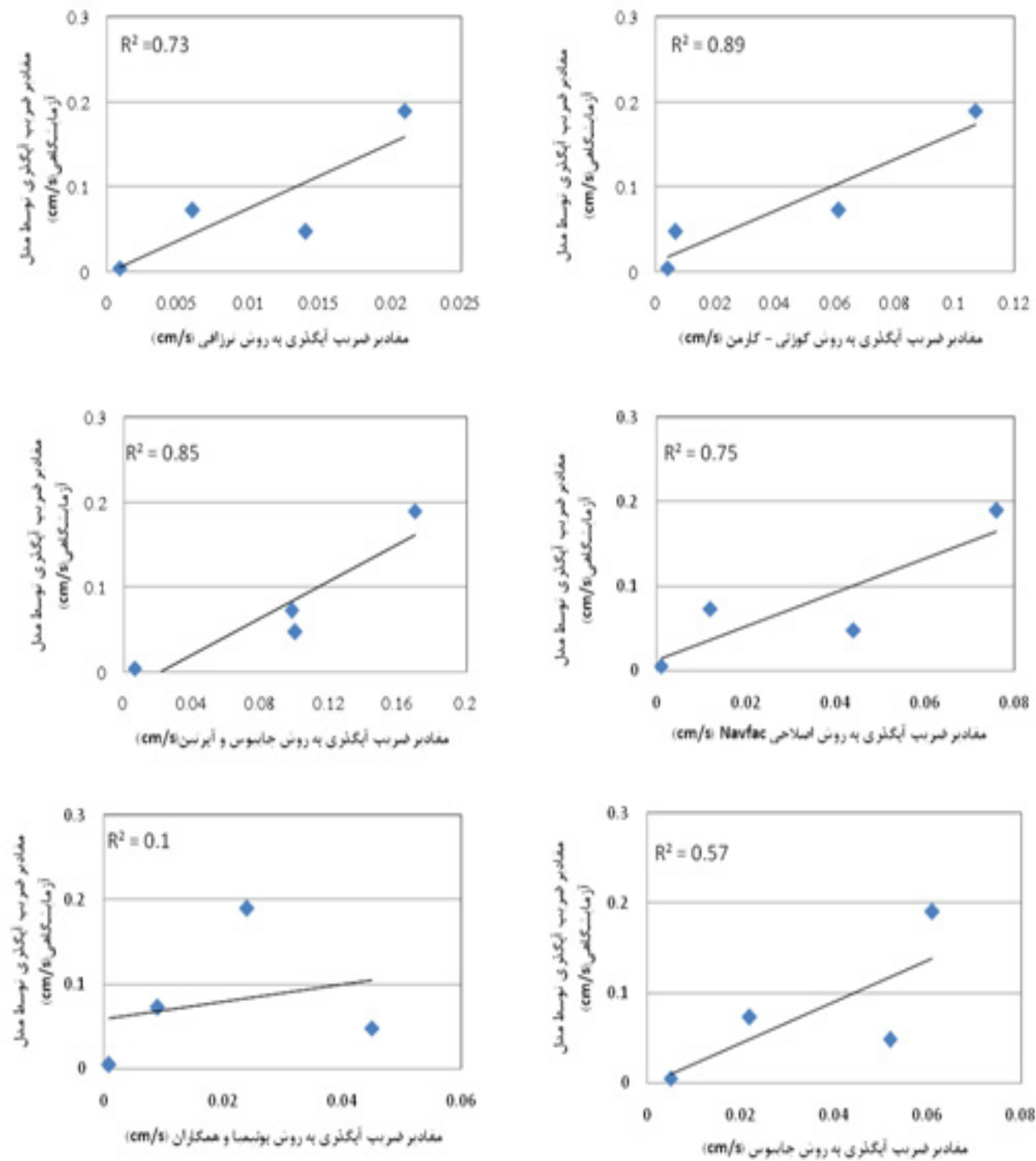
* خصوصیات نمونه با محدوده کاربرد رابطه شهابی و همکاران (۱۹۸۴) هم‌خوانی ندارد.

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

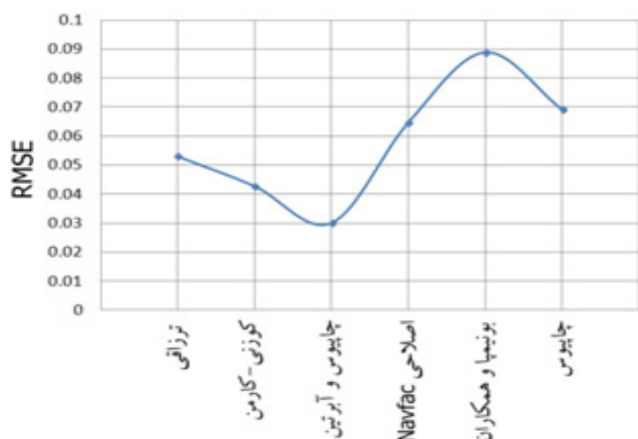
ارتفاع آب (m)			
نمونه R1	نمونه R2	نمونه R3	نمونه R4
ksat (cm/s)	ksat (cm/s)	ksat (cm/s)	ksat (cm/s)
۰/۰۰۳۹	۰/۰۴۳	۰/۰۸۳	۰/۲۳
۰/۰۰۴۹	۰/۰۴۸	۰/۰۷۰	۰/۱۷
۰/۰۰۶۴	۰/۰۵۳	۰/۰۷۶	۰/۱۶
۰/۰۰۵۱	۰/۰۴۸	۰/۰۷۶	۰/۱۹
متوسط			

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 فریاتیکی فقط برای نمونه ۴ ارائه می‌شود (شکل ۷).

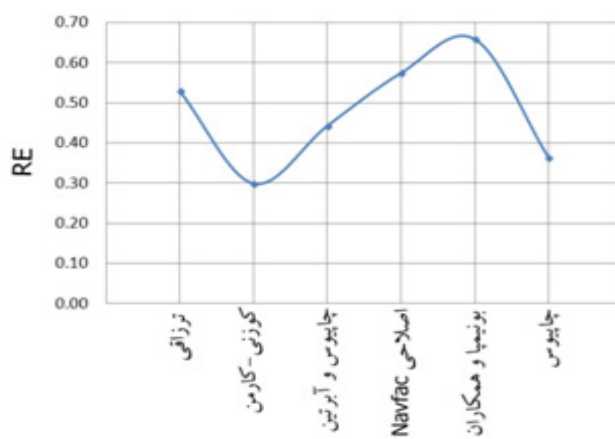
با استفاده از نرم افزار SPSS مشخص گردید مقادیر ضریب آبگذری اشباع برای تمام روش‌های مورد بررسی دارای توزیع نرمال است، لذا در محاسبات آماری از مقادیر واقعی ضریب آبگذری اشباع بجای لگاریتم آن استفاده شد. شکل (۳) ضریب همبستگی بین متوسط مقادیر مشاهداتی (حاصل از اجرای مدل فیزیکی) و روابط مختلف تعیین ضریب آبگذری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



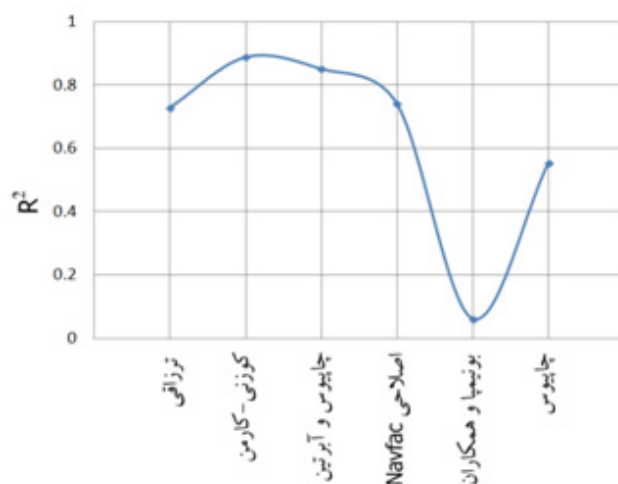
شکل ۳- همبستگی متوسط مقادیر مشاهداتی و روابط مختلف تعیین ضربه آبگدازی خاک اشاع



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



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



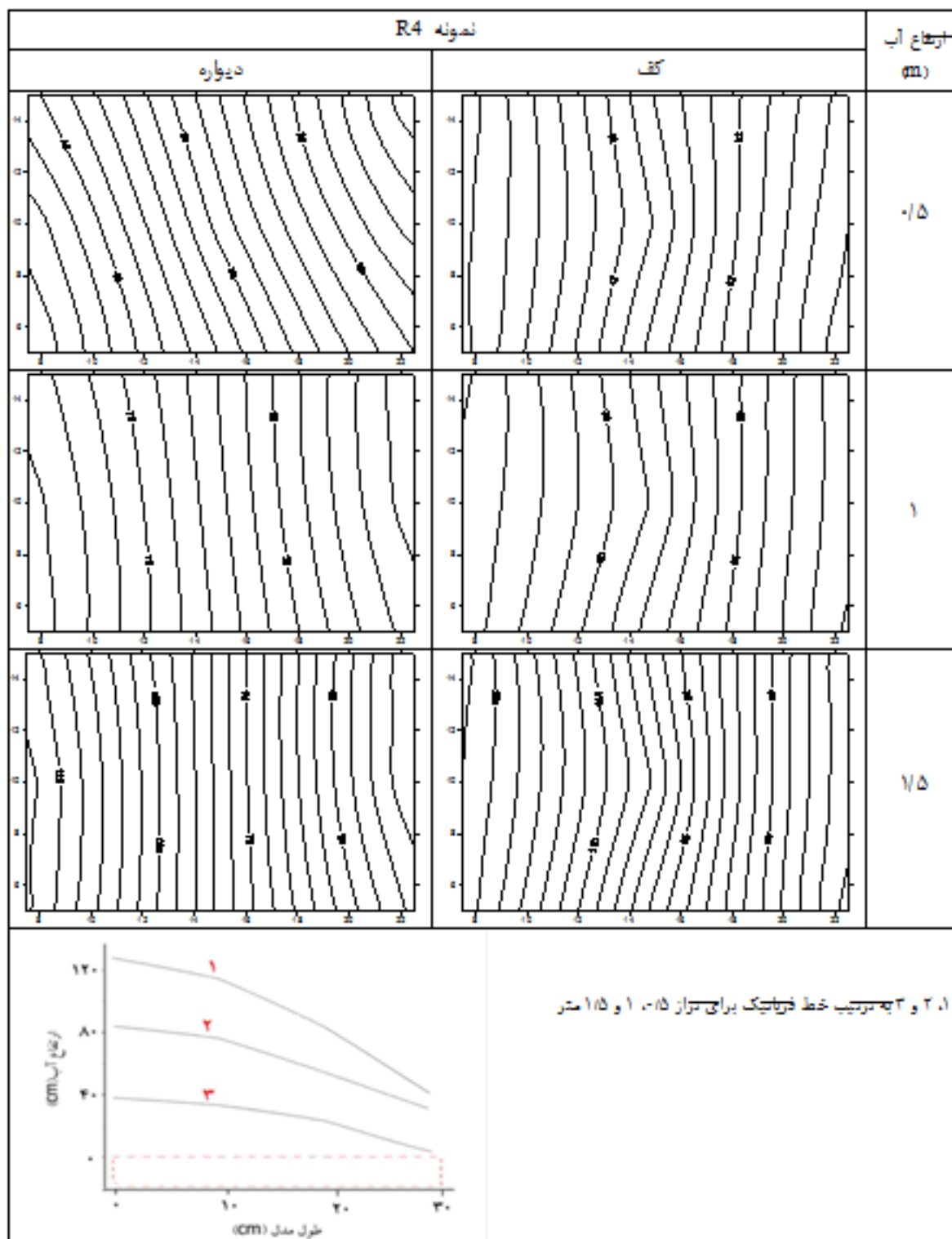
شکل ۶- ضریب همبستگی (R2) روش‌های مختلف تعیین ضریب آبگذری خاک اشباع

همان‌طور 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 R1 بیشترین افت فشار را در طول مدل نشان می‌دهد.

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). همان‌طور 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.

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

نمونه	ارتفاع آب (متر)		
	۱/۵	۱	۰/۵
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 فریاتیک برای نمونه R4 تحت ارتفاع‌های مختلف

بحث و نتیجه گیری

آزمایشگاهی دقیق جهت استخراج معادلات مذکور نسبت داد. با توجه به اینکه رابطه چایپوس 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 مشاهداتی 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 چایپوس و آبرتین بین مقادیر ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع و مقادیر مشاهداتی، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی داری وجود ندارد، اما برای سایر روابط مورد بررسی اختلاف بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در سطح احتمال ۵ درصد معنی دار است.

در شکل (۸) درصد تغییرات ضریب آگذری 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 آگذری اشباع به طور متوسط ۲۳۸ درصد افزایش می‌یابد و این در حالی است که نتایج حاصل از اجرای مدل فیزیکی افزایش ضریب آگذری را به طور متوسط ۹۳ درصد نشان می‌دهد (شکل ۸). همچنین با کاهش ۳۰ درصدی نسبت پوکی، ضریب آگذری به دست آمده از اجرای مدل به طور متوسط ۵۹ درصد کاهش یافت درحالی‌که روش بونیمپا و همکاران با ۸۱ درصد، بیشترین کاهش را در ضریب آگذری 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 مشاهداتی 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 آگذری هماهنگی مناسبی با مقادیر مشاهداتی دارد (شکل ۸).

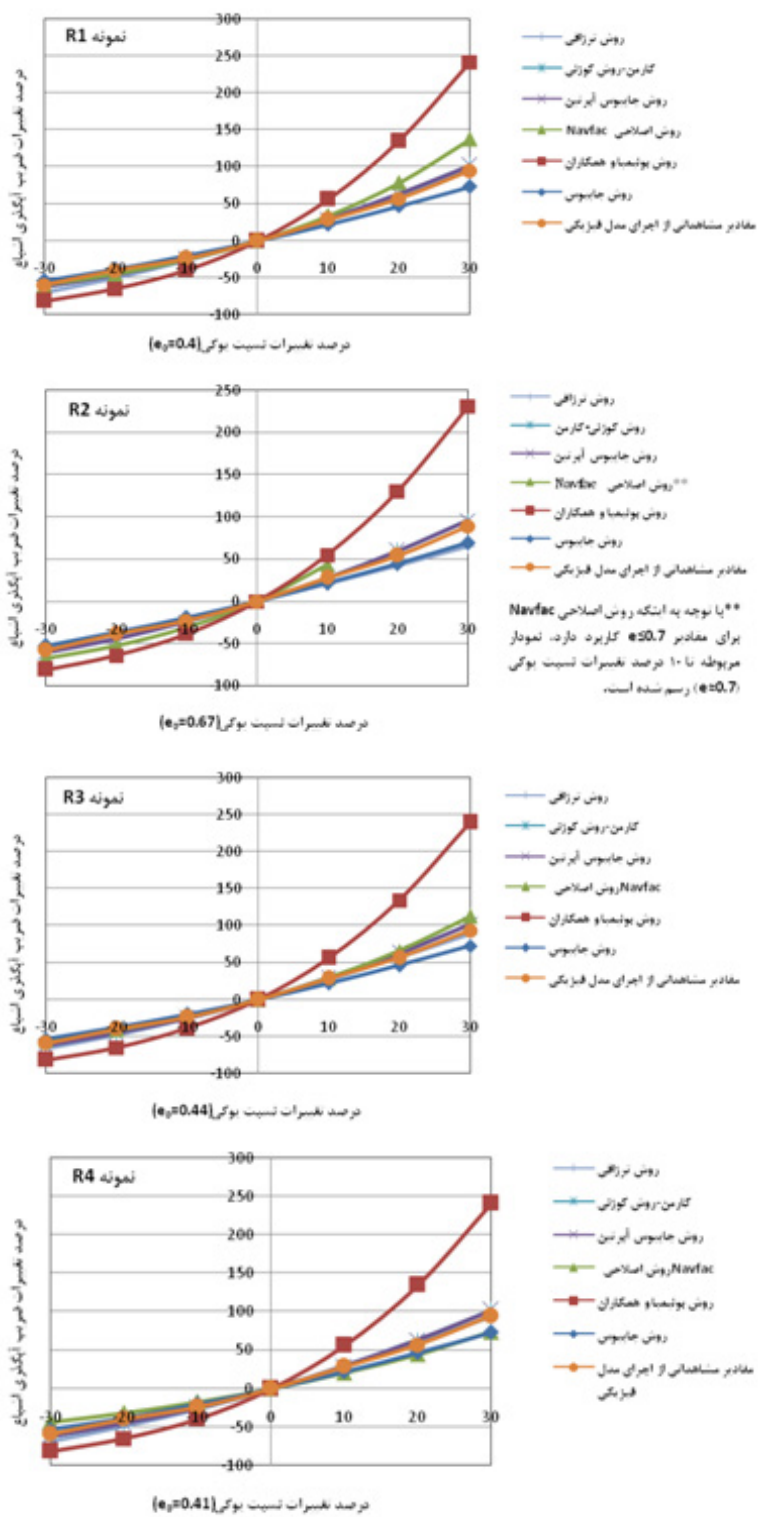
با توجه به گستردگی دامنه مؤلفه‌های مؤثر در ضریب آگذری و اینکه هر یک از معادلات ارائه شده بر اساس دامنه محدودی از خصوصیات خاک به دست آمده است این روابط برای داده‌هایی که از آن برآزش یافته از دقت مناسبی برخوردار است، اما برای داده‌های جدید خطای آن‌ها افزایش می‌یابد. پیشنهاد می‌گردد با جمع آوری داده‌های 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 آگذری 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 آگذری را ۱۷/۶٪، ۲۹/۶٪، ۷/۹٪ و ۱۱/۵٪ مقدار مشاهداتی به دست می‌آورد که نشان‌دهنده دقت پایین و تخمین ضریب آگذری کمتر از مقدار واقعی توسط این روش می‌باشد. با توجه به اینکه رابطه چایپوس 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 $RE=16/9$ و $RE=21/6$ و روش چایپوس و آبرتین نیز برای نمونه‌های R1 و R4 به ترتیب با $RE=9$ و $RE=25/5$ بیشترین همبستگی را با مقادیر مشاهداتی دارد. از طرفی روش کوزنی-کارمن بیشترین خطا را در نمونه R4 و معادله چایپوس و آبرتین در نمونه R2 (به ترتیب با برآورد ضریب آگذری به میزان ۵۶٪ و دو برابر مقدار مشاهداتی) نشان می‌دهد.

روش اصلاحی Navfac برای نمونه R2 با $RE=8/3$ از دقت مناسبی برخوردار است. برای این نمونه ضریب آگذری ۹۳٪ مقدار مشاهداتی به دست آمد، ولی در نمونه‌های R1، R3 و R4 ضریب آگذری به ترتیب ۲۱/۶٪، ۱۵/۸٪ و ۴۰٪ مقادیر مشاهداتی به دست می‌آید که نشان‌دهنده خطای بیشتر این روش نسبت به روابط کوزنی-کارمن و چایپوس 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 $RE=56/9$ ضریب آگذری را ۴۳/۲٪ مقدار مشاهداتی به دست آورد که نشان‌دهنده دقت کمتر این روش نسبت به روش‌های کوزنی-کارمن و چایپوس و آبرتین می‌باشد. روش بونیمپا و همکاران رفتار مشابهی با روش اصلاحی Navfac نشان می‌دهد. این روش برای نمونه R2 با $RE=6/2$ همبستگی مناسبی با مقادیر مشاهداتی ارائه می‌کند ولی در نمونه‌های دیگر نسبت به روش اصلاحی Navfac از خطای بیشتری برخوردار است. روش چایپوس برای نمونه‌های R1 و R2 به ترتیب با $RE=0$ و $RE=8/3$ از دقت بسیار مناسبی برخوردار است اما برای هر دو نمونه R3 و R4 ضریب آگذری تقریباً ۳۰٪ مقدار مشاهداتی تخمین زده می‌شود.

بین روش‌های مورد استفاده روابط کوزنی-کارمن و چایپوس و آبرتین با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین RE و RMSE دارای بالاترین دقت در تخمین ضریب آگذری 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)، چایپوس و همکاران (۱۹۸۹)، بوسیر (۱۹۹۳) و ... و مطالعات



شکل ۸- درصد تغییرات ضریب آبخیزداری اشباع به صورت تابعی از درصد تغییرات نسبت بوکی 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.2a306-13:271 (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.,

