یک روش جدید برای اندازه‌گیری ضریب هدایت هیدرولیکی غیراشباع با استفاده از رطوبت‌سنج چهارالکترودی

میکائیل یوسف‌زاده
استادیار دانشکده عمران ، دانشگاه تبریز

عیسی شوش‌پاشا
استادیاردانشکده عمران ،دانشگاه فنی ومهندسی نوشیروانی مازندران

علی ناصح‌زاده
کارشناسی ارشد خاک و پی ، دانشگاه فنی و مهندسی نوشیروانی مازندران

چکیده:

اساسی‌ترین پارامتر در مطالعه حرکت آب در خاک ضریب هدایت هیدرولیکی می‌باشد، که در دو حالت اشباع و غیراشباع بررسی می‌گردد. در تحقیق حاضر یک روش جدید برای اندازه‌گیری رطوبت معرفی شده و با تلفیق آن با مدل کمپل در تعیین تئوریک منحنی رطوبتی خاک، روشی جدید برای اندازه‌گیری ضریب هدایت هیدرولیکی خاکهای غیراشباع ارائه شده‌است. روش اندازه‌گیری رطوبت، استفاده از رطوبت‌سنجهای چهارالکترودی است که در لایه‌های خاک داخل محفظه آزمایش، جاگذاری می‌شوند. با استفاده از حل معادله دیفرانسیل ریچاردز به روش تفاضلات محدود ضریب هدایت هیدرولیکی خاک مورد آزمایش که رس لای‌دار مازندران می‌باشد؛ با رطوبتهای اولیه مختلف تعیین می‌گردد. معادله برازشی تطبیق مناسبی با نتایج آزمایشها برای بیان رابطه هدایت هیدرولیکی و رطوبت حجمی نشان می‌دهد و نتایج در محدوده قابل قبولی برای این نوع خاک قرار می‌گیرد.

کلید واژها :

خاک غیراشباع، هدایت هیدرولیکی، رطوبت‌سنجی چهار الکترودی، معادله ریچادرز، مدل کمپل

۱- مقدمه

یکی از مهمترین نشانه‌های خاک میزان رطوبت آن است که مشخصات و رفتار خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از اینرو دانستن چگونگی پیشروی جبهه آب داخل خاک در بسیاری موارد از لحاظ مهندسی عمران و ژئوتکنیک، کشاورزی، زیست محیطی، مطالعات آبهای زیرزمینی و حتی طراحی پروژه‌های برق قدرت نقش اساسی دارد. ضریب هدایت هیدرولیکی مهمترین پارامتر بیانگر چگونگی پیشروی رطوبت در خاک است. حرکت آب در خاک در بیشتر موارد در حالت غیراشباع صورت می‌گیرد که مقدار آب ورودی به نمونه خاک با مقدار آب خروجی برابر نبوده و قسمتی از آب ورودی جهت افزایش رطوبت خاک جذب می‌گردد. همین امر موجب می‌شود، چه از نظر روابط حاکم و چه از نظر روشهای اندازه‌گیری، بررسی آبگذری در خاک غیراشباع پیچیده‌تر بنماید.

معادله حاکم بر جریان غیراشباع در نفوذ قائم آب حالت خاصی از معادله ریچاردز خواهد بود:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(k\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)\right)=\frac{\partial \theta}{\partial t} \qquad (1)$$

که در آن z جهت قائم جریان، k هدایت هیدرولیکی، h پتانسیل ایستابی که در خاک غیراشباع از نوع ماتریک است، θ رطوبت حجمی و t زمان می‌باشد. با حل این معادله به روش تفاضلات محدود و برقراری رابطه دارسی برای هر المان ضریب هدایت هیدرولیکی محاسبه خواهد شد. رطوبت حجمی برای هر المان نمونه خاک به روش الکتریکی و پتانسیل ماتریک نظیر آن با استفاده از رابطه کمپل بدست خواهد آمد.

۲- تعریف مسأله و اهداف پژوهش

اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی غیراشباع غالباً به تجهیزات آزمایش گرانقیمت نیاز دارد که همه جا در دسترس نیست. در این پژوهش روشی تلفیقی برای تعیین هدایت هیدرولیکی غیراشباع، با استفاده از یک روش عملی رطوبت‌سنجی (روش چهار الکترودی) و یک روش تئوری تعیین پتانسیل نظیر رطوبت خاک (مدل کمپل) آزموده می‌شود که ساده و ارزان و سریع است. هدف پژوهش نیز بررسی کارآیی این روش با اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی یک نوع خاک (رس لای‌دار مازندران) می‌باشد.

از بین روشهای مختلف، روش چهار الکترودی به دلیل ساده و ارزان بودن و امکان تعیین رطوبت بدون برهم زدن نمونه پس از جاگذاری داخل آن، نیازهای این تحقیق را تأمین می‌کند. این روش توسط Andersen & Edlefsen (۱۹۴۲)، Kirkham & Taylor (۱۹۴۹)، Fuller & Ward (۱۹۷۰) و McInnes (۱۹۷۲) مورد مطالعه قرار گرفته وبه مرور کاملتر شده‌است.

برای بدست آوردن مکش ماتریک نظیر رطوبتهای قرائت شده از مدل تئوری کمپل بجای روشهای آزمایشگاهی، مانند استفاده از تانسیومتر یا صفحات فشاری استفاده می‌شود.زیرا تعیین منحنی رطوبتی خاک مخصوصا برای ریزدانه‌ها به روش آزمایشگاهی، زمان طولانی و تجهیزات خاص خود را می‌طلبد. مدل کمپل در بین مدلهای مختلف تئوریک، با توجه به اساس قرار دادن بافت خاک و ساختمان خاک و تطبیق قابل قبولی که برای خاکهای ریزدانه دارد، نیازهای این تحقیق را تأمین می‌کند. این روش توسط Campbell (۱۹۷۴) ابداع شده و توسط Hall et al (۱۹۷۷) و Gupta & Larsen (۱۹۷۹) و Hatsen & Cass (۱۹۸۰) بررسی شده و تصحیحاتی به آن افزوده شده‌است.

۳- مواد و روشها

با در نظر داشتن روش پیشنهادی دستگاهی برای انجام آزمایشها ساخته شد. سپس رطوبت‌سنجهای چهار الکترودی ساخته شده برای خاک مورد آزمایش (رس لای‌دار مازندران) در تراکم ۸۰٪ در رطوبتهای حجمی مختلف کالیبره‌شد. نمونه مطابق شکل (۱) با همان تراکم کالیبره شده با جاگذاری رطوبت‌سنجها، لایه لایه متراکم شده‌است. لازم به یادآوری است کلیه عملیات تراکم برای رسیدن به درصد تراکم معین با جک انجام گرفته‌است.

آب انباشته شده در بالای نمونه بطور قائم تا پایین‌ترین لایه نفوذ می‌کند. روش آزمایش در مراحل زیر قابل توضیح است :

۱- منحنی رطوبتی خاک را برای تراکم ۸۰٪ با استفاده از رابطه ۲ (رابطه کمپل) بدست می‌آوریم :

$$h = h_b\left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^{-b} \qquad (2)$$

که در آن h پتانسیل ماتریک در رطوبت θ، h_b پتانسیل ماتریک در رطوبت نقطه ورود هوا به خاک، θ_s درصد رطوبت اشباع، b ضریب ثابت کمپل که عبارتست از شیب منحنی رطوبتی خاک

$$h_b = -۰.۵ d_g^{-۰.۵} \qquad (3)$$

$$b = -۲h_b + ۰.۲\sigma_g \qquad (4)$$

d_g میانگین هندسی قطر ذرات برحسب میلیمتر و σ_g انحراف معیار هندسی قطر ذرات می‌باشد.

$$d_g = \exp(a)\ ,\ a = ۰.۰۱\sum_{۱}^{۳} F_i \ln M_i \qquad (5)$$

$$\sigma_g = \exp(b)\ ,\ b^۲ = ۰.۰۱\sum_{۱}^{۳} F_i \ln M_i - a^۲ \qquad (6)$$

F_i درصد نسبی ماسه و سیلت و رس است که برای خاک مورد مطالعه بترتیب برابر ۱۵/۷۰٪ و ۵۹/۶۱٪ و ۲۳/۵۴٪ می‌باشد که از نتایج آزمایش دانه‌بندی حاصل می‌شود. M_i میانگین حسابی اندازه ذرات برای ماسه و سیلت و رس است که بترتیب برابر ۱/۰۲۵ و ۰/۰۲۶ و ۰/۰۰۱ میلیمتر می‌باشد. با این داده‌ها، $d_g = ۰.۰۲۲۴$ و $\sigma_g = ۸.۸۴۰۸$ و به تبع آن $h_b = -۳.۳۳۹۲\ J/kg$ و ضریب کمپل $b = ۸.۴۴۶۶$ محاسبه می‌گردد.

از آزمایش تراکم $\gamma_{d_{MAX}} = ۱.۶۴۰\ g/cm^3$ و با درنظر داشتن درصد تراکم ۸۰ $\rho_b = \gamma_{d_{۸۰}} = ۱.۳۱۲\ g/cm^3$ بدست‌می‌آید و با استفاده از روابط وزنی – حجمی خاک رطوبت حجمی اشباع خاک $\theta_s = ۵۲.۸۱\%$ محاسبه می‌شود. برای منظور کردن اثر تراکم با استفاده از تصحیح رابطه کمپل داریم :

$$h_{b_e} = h_b \left(\frac{\rho_b}{۱.۳}\right)^{۰.۶۷b} \qquad (۷)$$

این رابطه تجربی توسط هال و همکاران و گوپتا و لارسن برای منظور کردن اثر تراکم یا همان وزن مخصوص ارائه شده که تطبیق بسیار خوبی با آزمایشاتشان داشته‌است.

h_{b_e} بدست آمده از رابطه ۷ در رابطه ۲ بجای h_b قرار گرفته و پتانسیل نظیر هر θ محاسبه می‌شود.

۲- رابطه دارسی $q = K\frac{\Delta H}{\Delta Z}$ می‌تواند برای هر کدام از المانهای فرضی ۱ تا ۵ نمونه که در شکل شماتیک فوق نشان داده شده، بکار برده شود. q حجم آب گذرنده از واحد سطح نمونه در واحد زمان و $\frac{\Delta H}{\Delta Z}$ گرادیان پتانسیل در جهت جریان که با اندازه‌گیری و با استفاده از تفاضلات محدود تعیین می‌شود یعنی $\frac{\Delta H}{\Delta Z} = \frac{H_{i+۱} - H_i}{Z_{i+۱} - Z_i}$ و K ضریب هدایت هیدرولیکی المان خواهد بود. مقدار K برای هر المان در هر زمان مشخص با استفاده از رابطه دارسی و با بدست آوردن q با محاسبات زیر تعیین می‌شود. قرائتها در زمانهای ۰، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰، ۲۷۰، ۳۶۰، ۴۸۰، ۶۰۰ دقیقه و پس از آن در بازه‌های ۱۸۰دقیقه‌ای تا اولین تغییر رطوبت در پایین‌ترین المان صورت گرفته است.

۳- با فرض h ارتفاع آب انباشته شده بالای نمونه، Q حجم جریان خروجی از پایین نمونه، θ_i رطوبت حجمی المان i، V_w : حجم آب المان، V_T حجم کل المان، A : سطح مقطع نمونه واینکه $'$ بیانگر همین تعاریف برای زمان $T + \Delta T$ باشد، خواهیم داشت :

$$\theta'_۱ - \theta_۱ = \Delta\theta = \frac{V_w' - V_w}{A.\Delta Z} \qquad (۸)$$

بنا به تعریف حجم آب جذب شده در واحد حجم المان در واحد زمان برابر خواهد بود با :

$$q = \frac{V_w' - V_w}{A.\Delta T} = \frac{\Delta\theta.\Delta Z}{\Delta T} = q_{held} \qquad (۹)$$

اگر جریان ورودی به المان با $q_{i_{in}}$ و جریان خروجی از المان با $q_{i_{out}}$ نشان داده شود.

(۱۰)

$$q_{۱_{held}} = (\theta'_۱ - \theta_۱)\frac{\Delta Z}{\Delta T} \qquad q_{۱_{in}} = \frac{h - h'}{\Delta T} = q_{۱_{in}}$$

$$q_{۲_{held}} = (\theta'_۲ - \theta_۲)\frac{\Delta Z}{\Delta T} \qquad q_{۱_{out}} = q_{۱_{in}} - q_{۱_{held}} = q_{۲_{in}}$$

$$q_{۳_{held}} = (\theta'_۳ - \theta_۳)\frac{\Delta Z}{\Delta T} \qquad q_{۲_{out}} = q_{۲_{in}} - q_{۲_{held}} = q_{۳_{in}}$$

... ...

$$q_{n_{held}} = (\theta'_n - \theta_n)\frac{\Delta Z}{\Delta T} \qquad q_{n-۱_{out}} = q_{n-۱_{in}} - q_{n-۱_{held}} = q_{n_{in}}$$

$$q_{n_{out}} = q_{n_{in}} - q_{n_{held}} = \frac{Q - Q'}{A.\Delta T}$$

با جمع طرفین تساوی در ستون سمت چپ و اعمال ستون سمت راست در آن خواهیم داشت :

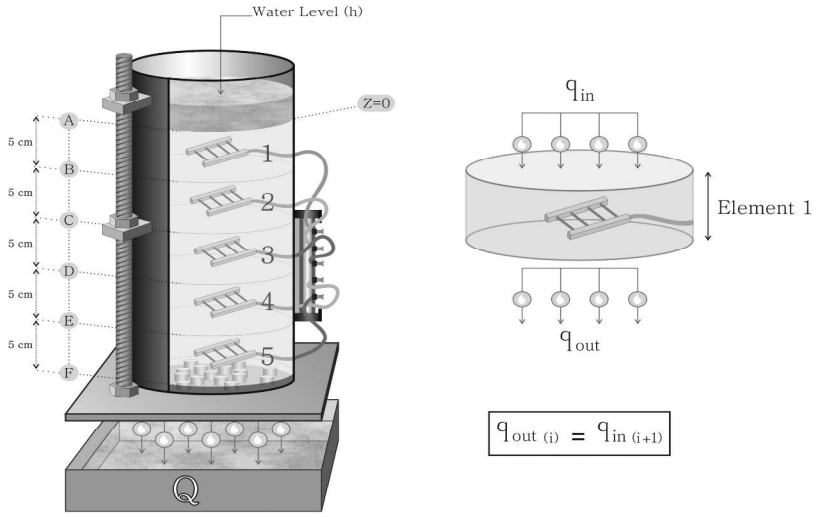
$$\frac{\Delta Z}{\Delta T}\sum_{i=۱}^{n}(\theta'_i - \theta_i) = \frac{h - h'}{\Delta T} - \frac{Q - Q'}{A.\Delta T} \qquad (۱۱)$$

رابطه (۱۰) در حالتی صحیح است که از تبخیر صرف‌نظر کنیم. و آزمایشات تا جایی ادامه داده شده که همواره $Q - Q'$ برابر صفر باشد. با در دست داشتن $q_{i_{in}}$ و $q_{i_{out}}$ و بدست آوردن $\frac{dH}{dZ}$ برای دو انتهای هر المان، هدایت هیدرولیکی آن K بدست خواهد آمد.

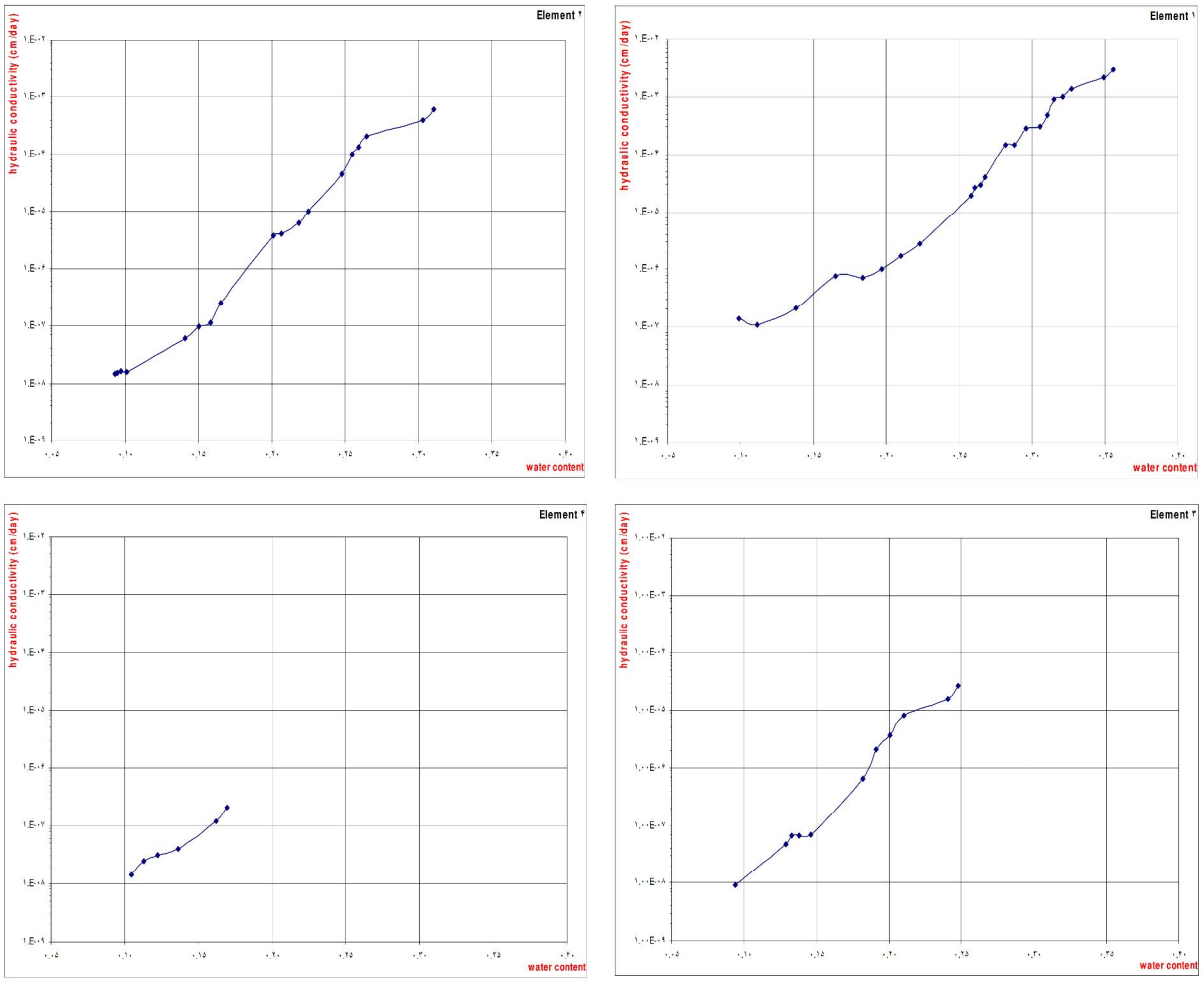
$$q_{i_{in}} = q_{(i-۱)_{out}} = q_{(i-۱)_{in}} - q_{(i-۱)_{held}} \qquad (۱۲)$$

$$q_{(i-۱)_{held}} = (\theta'_{i-۱} - \theta_{i-۱})\frac{\Delta Z}{\Delta T}$$

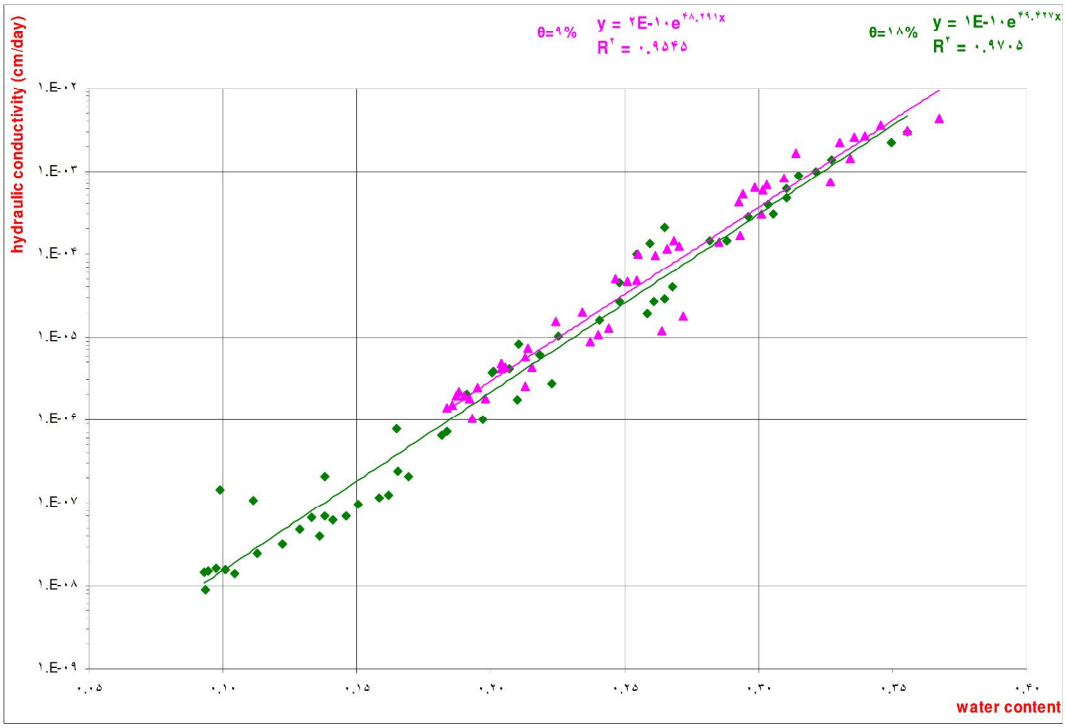
آزمایش با رطوبت حجمی آغازین ۹٪ و ۱۸٪ دو بار انجام شده‌است و با اولین تغییر رطوبت ثبت شده برای هر المان، هدایت هیدرولیکی آن محاسبه شده‌است. رطوبت سطح فوقانی برابر اشباع فرض شده و مکش ماتریک معادل آن در محاسبات صفر لحاظ شده‌است.



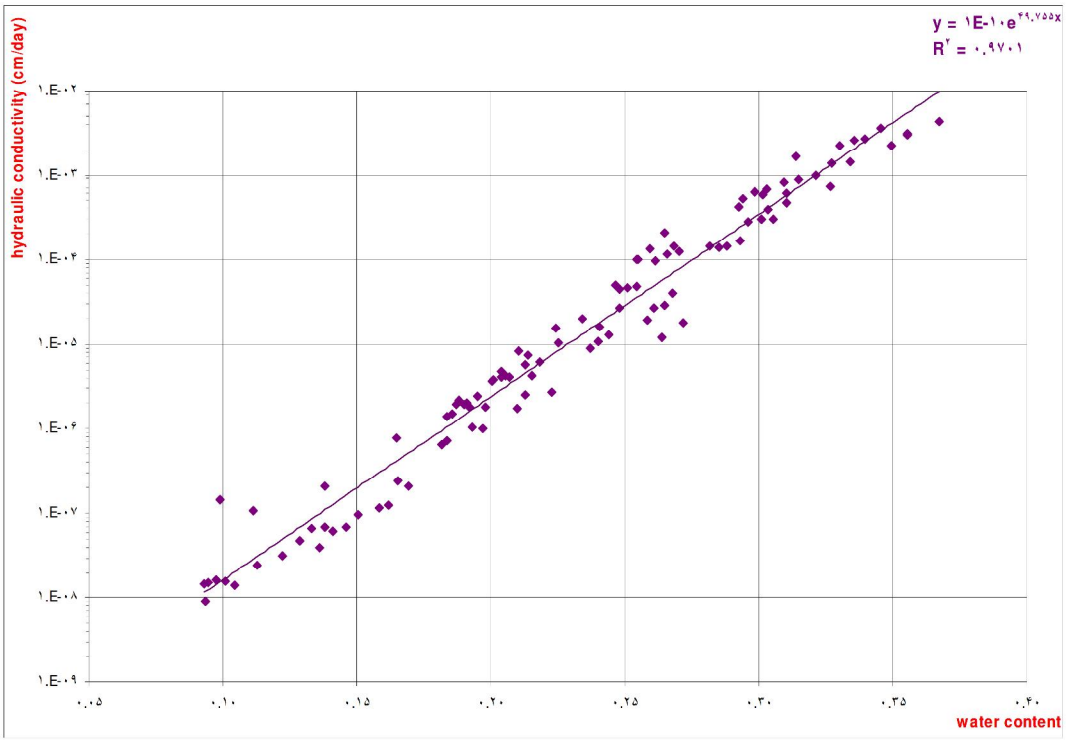
شکل(۱) شکل شماتیک دستگاه آزمایش ونحوه وانجام آزمایش



شکل (۲) نمودار تغییرهدایت هیدرولیکی در المان ۱ تا ٤ در آزمایش با رطوبت اولیه ۹٪



شکل (۳) مقایسه نمودار کلی و معادله برازشی آزمایشهای با رطوبت اولیه ۹٪ و ۱۸٪



شکل (٤) معادله برازشی هدایت هیدرولیکی نسبت به رطوبت حجمی برای کل نتایج

٤- نتیجه گیری

۱- هدایت هیدرولیکی غیراشباع بدست‌آمده برای رس لای‌دار مازندران در شرایط آزمایش درمقایسه با مطالعات انجام شده روی خاکهای مشابه در مراجع مختلف و با مد نظر قراردادن درصد تراکم و بازه رطوبتی آزمایش در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

۲- اندازه‌گیری ضریب هدایت هیدرولیکی غیراشباع خصوصاً در خاکهای ریزدانه رسی بدلیل آنکه مقدار آن فوق‌العاده کم است، زمان بسیار طولانی می‌طلبد و طبیعتاً ثابت نگه داشتن شرایط آزمایش دشوار خواهد بود.

۳- روند افزایش هدایت هیدرولیکی با افزایش رطوبت حجمی در تراکم ثابت برای خاک در نمودار شکلهای(۲) تا (۴)کاملاً مشهود است و با افزایش رطوبت نمونه خاک و نزدیکتر شدن به رطوبت اشباع، هدایت هیدرولیکی افزایش چشمگیری یافته و چند برابر می‌شود.

۴- در نمودارهای شکل (۲) افزایش هدایت هیدرولیکی با افزایش رطوبت حجمی در المانها نشان داده شده‌است که برخی بی‌نظمی‌ها در رونـد این افزایش به چشم می‌خورد. علت این بی‌نظمیها را می‌توان به موارد ذیل نسبت داد. عواملی نظیر تغییرات دما، تبخیر آب، خروج احتمالی آب از درزها، خطاهای ابزار و آزمایشگر، محبوس شدن هوا در داخل خاک و آب، تقابل نیروهای چسبندگی و وزن آب با نیروهای پیوستگی بین مولکولهای آب، نفوذ آب از مجاورت دیواره داخلی استوانه آزمایش، ناهمگنی خاک علیرغم اینکه همگن فرض می‌گردد و جاگذاری رطوبت‌سنجها و تراکم چند مرحله‌ای ناهمگنی خاک را دامن می‌زند. علاوه بر این خطاهای ناشی از واسنجی و استفاده از مدل تئوری برای تعیین پتانسیل ماتریک، مواردی هستند که نتایج نهایی را به یک میزان تحت تأثیر قرار می‌دهند.

۵- در نمودار شکل (۳) نتایج دو سری آزمایش یکجا نشان داده شده‌اند . برازش دو سری نزدیکی مطلوبی بهم دارند و نتایج با افزایش رطوبت همگرا میشوند. پس با افزایش رطوبت تأثیر عوامل مسبب خطا در نتایج آزمایش کمرنگتر می‌شود.

۶- در این پژوهش با استفاده از رابطه دارسی و حل معادله ریچاردز به روش تفاضلات محدود برای نفوذ قائم آب انباشته شده در بالای نمونه، ضریب هدایت هیدرولیکی غیراشباع (K) رس لای‌دار مازندران به روش چهار الکترودی در رطوبتهای حجمی متفاوت (θ) و تراکم ثابت ۸۰٪ بدست می‌آید. با برازش کل نتایج آزمایش در شکل (۴) معادله $K = ۱۰^{-۱۰}.e^{۴۹.۷۵۵\theta}$ برای بیان رابطه فیمابین در بازه رطوبتی ۸/۹۳٪ تا ۳۶/۷۳٪ ارائه شده‌است. معادله مزکور با $R^۲ = ۰.۹۷۰۱$ تطبیق بسیار مطلوبی با نتایج آزمایش نشان می‌دهد.

٥- مراجع

۱- بایبوردی، محمد. (۱۳۷۲). "اصول مهندس آبیاری - جلد اول:روابط آب و خاک". چاپ ششم، دانشگاه تهران.

۲- علیزاده، امین. (۱۳۸۰). "رابطه آب و خاک و گیاه". چاپ دوم، دانشگاه امام صادق (ع).

۳- افتخاریان، لیلا و تی تی دژ، امید و خاکباز، مهناز و سارنگ، امین و صادقیان، پدرام و مهین روستا، رضا و نواری، مهدی. (۱۳۷۷). "آزمایشگاه مکانیک خاک، چاپ اول". دانشگاه هرمزگان و خدمات فرهنگی سالکان.

۴- Campbell, G.S. (1985). "Soil Physics With Basics". Elsevier. Amesterdam.

۵-Mc Innes, D.B, (1972). "Moisture Measurements in Pavement Materials Using Electrical Resistivity Methods". Journal of Australian Road Research Board. vol. 4 - No. 10.

۶- Fard, M.Y. (2000). "A Method for Detemining Hydraulic Counductivity and Diffusivity of Unsaturated Soils". Proceeding of The Unsaturated Soils of Asia, Singapore: 375-378.

۷- Fard, M.Y. (1996). "Infiltration of Water in Road Shoulders". Ph.D Thesis. University of Birmangham.

۸- Hillel, D. (1980). "Fundamentals of Soil Physiscs". Academic Press.

۹- Koorevaar, P. & Menelik, G. & Dirksen, C. (1983). "Elements of Soil Physics".

A Measurement New Method Of coefficient In No Saturation Guiding Hydrolic By Four Electrod Hygrometer

mikail yeoosefzade
Assistant Professor,Tabriz University.

Isa Shooshpasha
Assistant Professor,Mazandaran University.

Ali Nasehzade
Assistant Professor,Mazandaran University.

Abstract

Considering soil properties, moisture is of central significance, affecting its physical characteristics and behavior. That is why, determining soil water volume and the way it moves through soil is of importance. The most basic parameter in water movement is hydraulic conductivity in saturated and unsaturated conditions.

The present study, incorporating Campbell method of soil characteristic curve, aims at developing a method for soil moisture measurement, suggesting a new method to measure unsaturated soil hydraulic conductivity.

In this research, soil moisture was obtained by using four electrode method through installation of moisturemeters in soil layers in test cylinder, and soil resistance is measured by measuring voltage between electrodes of moisturemeters, making use of Richard's partial differential eqution and finite difference method. The hydraulic conductivity of the soil under experiment (silty clay of Mazandaran) was determined with a variety of initial water contents.

Test results are in expected range and fitted equation $k = ۱۰^{-۱۰}.e^{۴۹.۷۵۵\theta}$ showes a very good agreement with them.

In spite of the fact that four electrode method may not be as accurate as some other methods, its simplicity and the lower expenses in addition to the possibility of installation in site to control soil water movement makes it advantageous among others.

Keywords:

No saturation soil, Electrod hygrometer, Guiding hydrolic by four electrod hygrometer