

برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک با اندازه گیری رطوبت حجمی خاک، بار فشار آب خاک و یا اندازه گیری توأم آنها به روش معکوس

مائه محمودیان شوشتری^{۱*}، شاهرخ زند پارسا^۲ و مهدی مهدی^۳

* نویسنده مسئول، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز m.mahmoodian@gmail.com

۲-دانشیار دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۳- دانشجوی سابق کارشناسی ارشد، بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

تاریخ پذیرش: ۹۲/۴/۱۷

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۱۲

چکیده

اکثر فرآیندهای مربوط به آب و خاک در مزرعه در وضعیت غیر اشباع صورت می‌گیرند. عوامل هیدرولیکی خاک را می‌توان با اندازه‌گیری رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک در زمان‌های مختلف با روش معکوس برآورد کرد. از طرفی، اندازه‌گیری توأم رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک در مزرعه مشکل، وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. در این مقاله، امکان برآورد عوامل هیدرولیکی خاک با اندازه‌گیری رطوبت حجمی و یا بار فشار آب خاک به تنهایی و یا اندازه‌گیری توأم آنها بررسی گردیده است. برای تعیین این امر، از مدل کامپیوتری ESHPI2 با روش معکوس استفاده شده است. در این مدل عوامل هیدرولیکی خاک با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با حداقل نمودن تابع هدف بهینه می‌شوند. در این راستا، عوامل هیدرولیکی چهار سری از خاک‌های اراضی دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در سه حالت ارزیابی گردیده است. در حالت اول از مدل ESHPI2 با تابع هدف بر اساس اندازه‌گیری بار فشار آب خاک و در حالت دوم از مدل ESHPI2 با تابع هدف بر اساس اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک استفاده شده است. همچنین در حالت سوم پارامترهای هیدرولیکی خاک با اندازه‌گیری توأم رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک برآورد گردیده‌اند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که برای خاک‌های مورد مطالعه، با اندازه‌گیری بار فشار آب خاک جهت تعیین عوامل هیدرولیکی خاک با روش معکوس برای مدل ESHPI2 نسبت به اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک به تنهایی و اندازه‌گیری توأم رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک، جواب‌های مناسب‌تری حاصل می‌گردد.

کلید واژه‌ها: برآورد عوامل هیدرولیکی خاک، روش معکوس، الگوریتم ژنتیک، نمودار مشخصه رطوبتی، مدل ESHPI2

Estimation of Soil Hydraulic Parameters with Measurement of Soil Water Content, Pressure Head or Measurement the Simultaneously by Inverse Method.

M. MahmoodianShooshtari¹, Sh. Zand-Parsa², M. mahbod³

1- Formerly, Graduate student, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

3- Formerly, Graduate student, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

Received: 2Jan2013

Accepted: 8July2013

Abstract

Most processes of soil and water in the field occur in unsaturated conditions. In the field, it's possible to estimate soil hydraulic properties by measurement of soil water content and soil water pressure head in different times, using inverse method. In the other hand, it's difficult, time consuming and costly to measuring soil water content and water pressure head simultaneously. So, in this paper, the possibility of predicting soil hydraulic properties by measurement of soil water content or water pressure head separately were studied. To do this job, ESHPI2, an inversion approach computer model, has been used. In this model, soil hydraulic parameters are optimized to reach the minimum value of objective function (Summation of squared differences between measured and predicted soil water content or water pressure head) using genetic algorithm. Soil hydraulic parameters of four soil series at Agricultural College of

Shiraz University were studied in three cases. In the first case, the ESHPIIM2 model with the objective function based on measuring the soil water pressure head and in the second case, the ESHPIIM2 model with the objective function based on measuring the soil water content are used. Moreover, in the third case, soil hydraulic parameters are estimated by measuring soil water content and soil water pressure simultaneously. The results show that soil hydraulic parameters are predicted more appropriately by measuring soil water pressure head than soil water content in studied soils by inverse method using ESHPIIM2 model.

Keywords: Estimating soil water properties, Inverse method, Genetic algorithm, Soil water retention curve, ESHPIIM2 model.

مقدمه

پارامترهای ثابت معادله مقدار رطوبت حجمی را در ازای مقدار مشخص بار فشار آب خاک محاسبه کرد. اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، مستلزم عملیات اجرایی طاقت‌فرسا، زمان و هزینه‌ی زیاد است (عباسی، ۱۳۸۶). همچنین روش‌های مستقیم برای تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک نیاز به آزمایش‌هایی دارند تا به شرایط مرزی دست یابند. بعلاوه، تعیین این ویژگی‌ها در زمین یا در آزمایشگاه خسته کننده و وقت‌گیر است. روش‌های غیر مستقیم به عنوان راهکاری برای حل نسبی مشکلات مذکور ارائه شده‌اند. اخیراً روش معکوس به عنوان یک روش غیر مستقیم برای برآورد پارامترهای مؤثر فیزیکی و شیمیایی مطرح شده است (هافمن و سیمونک^۸، ۱۹۹۹). روش مدل-سازی معکوس با کمینه کردن یک تابع هدف قادر است پارامترهای مورد نظر را برآورد کند. به طور کلی روش‌های معکوس بر پایه مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای یا آزمایشگاهی با نتایج برآورد شده توسط معادله حاکم بر یک پدیده استوار هستند. زاجمن^۹ و همکاران (۱۹۸۱)، کول و همکاران^{۱۰} (۱۹۸۸)، راسو و همکاران^{۱۱} (۱۹۹۱) و سیمونک و ون‌گنختون^{۱۲} (۱۹۹۶) نشان دادند که از روش معکوس می‌توان برای برآورد عوامل توابع هیدرولیکی خاک استفاده نمود.

زندپارسا (۲۰۰۱) مدل ESHPIIM (Estimation of Soil Hydraulic Parameters by Inverse Method)

را ارائه داد که قادر بود با استفاده از روش نیوتن-رافسون و معادله‌ی ون‌گنختون^{۱۳} (۱۹۸۰) عوامل هیدرولیکی خاک را به روش معکوس برآورد کند. تابع هدف مورد استفاده در این مدل به گونه‌ای طراحی شده بود که برای برآورد عوامل هیدرولیکی، نیاز به اندازه‌گیری توأم رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک در مزرعه داشت. علاوه بر آن با توجه به اینکه در روش نیوتن-رافسون روند بهینه‌یابی وابسته به مقدار و گرادیان تابع می‌باشد، نتایج حاصل وابسته به حدس‌های اولیه برای عوامل هیدرولیکی خاک بود. از آنجایی که این مدل عوامل هیدرولیکی را به صورت همزمان بهینه می‌کرد، اجرای مدل وقت‌گیر

اکثر فرآیندهای مربوط به آب و خاک در مزرعه در وضعیت غیر اشباع صورت می‌گیرد. پیچیدگی‌های روابط آب و خاک در وضعیت غیر اشباع به مراتب بیشتر از شرایط اشباع است. اندازه‌گیری خصوصیات هیدرولیکی خاک و کاربرد آن در مدل‌های مربوط به حرکت آب در خاک نقش بنیادین و اساسی برای حل تعداد زیادی از مشکلات مدیریتی آب نظیر آبیاری، زهکشی، روان‌آب ناشی از بارندگی، کنترل فرسایش و انتقال املاح و آلودگی دارد (اسمتم و کلوسیر^۱، ۱۹۸۹). خصوصیات هیدرولیکی مورد نیاز در ارتباط با این مدل‌ها عموماً منحنی رطوبتی خاک و عوامل هدایت هیدرولیکی خاک می‌باشند که در این میان هدایت هیدرولیکی مهم‌ترین خصوصیت هیدرولیکی به حساب می‌آید (ژانگ^۲، ۱۹۹۷). رابطه‌ی بین مقدار رطوبت خاک و بار فشار آب خاک (مکش ماتریک)، به نام منحنی مشخصه رطوبتی خاک، معروف است و از ویژگی‌های فیزیکی خاک محسوب می‌شود. تاکنون مدل‌های مختلفی برای بیان روابط آب در خاک ارائه شده است. در حالت غیراشباع شبیه‌سازی نوع رفتار آب در خاک به مراتب مشکل‌تر از حالت اشباع می‌باشد، بنابراین در این حالت روابط پیچیده‌تری بین آب و خاک نسبت به حالت اشباع وجود دارد. از میان توابع تحلیلی منحنی مشخصه خاک، توابعی که بیشتر از همه مورد استفاده واقع شده‌اند توابع بروکز و کوری^۳ (۱۹۶۴) و ون‌گنختون^۴ (۱۹۸۰) را می‌توان نام برد. این مدل‌ها در میان سایر مدل‌ها مشهورترند، چون برآزش ساده‌ای بر داده‌های نگاهداشت آب در ناحیه مرطوب (جاییکه بیشترین جریان صورت می‌گیرد) را دارند (سیمونز و فایر^۵، ۱۹۹۵). این توابع توانایی ترکیب با مدل‌های هدایت هیدرولیکی و تولید توابع تحلیلی مناسبی برای توصیف هدایت هیدرولیکی غیراشباع را دارند. همچنین ریچاردز^۶ (۱۹۳۱) معادله‌ای را ارائه نمود که در آن با استفاده از عوامل حاکم بر خاک می‌توان رطوبت را در زمان‌های مختلف محاسبه نمود. علاوه بر آن ون-گنختون^۷ (۱۹۸۰) معادله‌ای را ارائه نمود که در آن می‌توان بر اساس

8- Hapmans and simunk, 1999.

9- Zachman, 1981.

10- Kool et al, 1988.

11- Russo et al, 1991.

12- Simunk and van Genuchten, 1996.

13- van Genuchten, 1980.

1- Smettem and Clothier, 1989.

2- Zhang, 1997.

3- Brooks and Corey, 1964.

4- van Genuchten, 1980.

5- Simmons and Fayer, 1995.

6- Richards, 1931.

7- van Genuchten, 1980.

$$S_e = \frac{1}{(1 + (\alpha \times |h|)^n)^m} \quad (۱)$$

$$K_r(S_e) = S_e^{0.5} \times [1 - (1 - S_e^{\frac{1}{m_v}})^{m_v}]^2 \quad (۲)$$

که در آنها

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (۳)$$

$$m_v = 1 - \frac{1}{n_v} \quad (۴)$$

h بار فشار آب خاک (m) ، α (m^{-1})، m و n ضرایب ثابت معادله S_e ، درجه‌ی اشباع مؤثر، $K_r(S_e)$ هدایت هیدرولیکی نسبی (نسبت هدایت هیدرولیکی غیر اشباع به هدایت هیدرولیکی اشباع) به عنوان تابعی از درجه‌ی اشباع مؤثر هستند. به طور کلی جریان یک بعدی آب در خاک تحت شرایط هم دما با معادله‌ی ریچاردز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right) \quad (۵)$$

که در آن θ رطوبت حجمی خاک، t زمان، h بار فشار آب در خاک، $K(h)$ هدایت هیدرولیکی به صورت تابعی از h و z عمق خاک (مثبت به طرف بالا) می‌باشد. برای حل این معادله باید معادلات K - θ و h - θ معلوم باشند.

مدل ESHPM2 در محیط برنامه‌نویسی نرم‌افزار متلب^۲ ارائه شده است. در این مدل سعی شده تا عوامل هیدرولیکی خاک به روش معکوس و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، در شرایط مزرعه برآورد شود. الگوریتم ژنتیک یک روش برای حل مسائل بهینه‌یابی می‌باشد که اساس آن بر انتخاب، بقاء و تکامل در طبیعت می‌باشد. الگوریتم ژنتیک را می‌توان برای انواع مسائل بهینه‌یابی که برای روش‌های استاندارد بهینه‌سازی مناسب نیستند، به کار برد. در مدل ESHPM2، هر کروموزوم الگوریتم ژنتیک (جواب احتمالی مسأله) از پنج ژن تشکیل شده است. هر ژن مربوط به یک عامل هیدرولیکی خاک است. این مدل مقدار بهینه‌ی عوامل هیدرولیکی را به نحوی برآورد می‌نماید که اختلاف بین مقادیر برآورد شده و اندازه-گیری شده‌ی رطوبت و بار فشار آب خاک در زمان‌های مختلف در مزرعه حداقل گردد. برای بهینه‌یابی توسط الگوریتم ژنتیک از تابع هدف زیر استفاده می‌شود:

$$OF = \sum_{i=1}^{n_1} \left\{ \sum_{j=1}^{n_2} [W_1(\theta_{i,j}^o - \theta_{i,j}^c)]^2 + \sum_{u=1}^{n_3} [W_2(h_{i,u}^o - h_{i,u}^c)]^2 \right\} \quad (۶)$$

و در صورتیکه مقادیر اولیه ورودی مدل با مقدار واقعی تفاوت قابل ملاحظه‌ای داشت، امکان عدم یافتن جواب مناسب توسط مدل وجود دارد.

مهید و زندپارسا (۲۰۱۰) مدل ESHPM2 را ارائه نمودند که در آن از الگوریتم ژنتیک برای انجام روند بهینه‌یابی به روش معکوس استفاده شد. تابع هدف مورد استفاده در این مدل نیز همانند مدل ESHPM2 به گونه‌ای طراحی شده بود که برای برآورد عوامل هیدرولیکی نیاز به اندازه‌گیری توأم رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک در مزرعه داشت. این مدل مشکل مدل قبلی را نداشت و جهت برآورد عوامل هیدرولیکی نیازی به داده‌های ورودی نبود. البته حدود مورد نیاز برای جواب‌ها باید به عنوان ورودی به الگوریتم ژنتیک داده می‌شد.

کمالی (۱۳۹۰)، مدل ESHPM4 را بر طبق روش ارائه شده توسط زندپارسا (۲۰۰۱) در مدل ESHPM2 ارائه کرد. در مدل آن‌ها نیز از روش نیوتن-رافسون برای بهینه‌سازی استفاده شده است؛ با این تفاوت که عوامل هیدرولیکی بصورت همزمان بهینه‌سازی نمی‌شوند بلکه انجام بهینه‌سازی عوامل هیدرولیکی خاک بصورت مجزا و متناوب انجام می‌گیرد. این روش باعث افزایش سرعت بهینه‌یابی شده است. در این مدل نیز تابع هدف مورد استفاده نیاز به اندازه‌گیری توأم رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک در مزرعه دارد.

چون اندازه‌گیری توأم رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک در مزرعه مشکل، وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد، در این تحقیق، هدف بررسی امکان برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک با اندازه‌گیری رطوبت حجمی و یا بار فشار آب خاک به تنهایی و یا اندازه‌گیری توأم آن‌ها می‌باشد. در نهایت پاسخ این سؤال مشخص می‌شود که آیا تنها با اندازه‌گیری رطوبت حجمی و یا بار فشار آب خاک می‌توان پارامترهای هیدرولیکی خاک را به صورت بهینه و به روش معکوس برآورد نمود و یا به اندازه‌گیری هر دو عامل رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک در کنار هم نیاز است؟

مدل ESHPM2

در کلیه‌ی مدل‌هایی که هدایت هیدرولیکی خاک را بر اساس رطوبت و یا مکش برآورد می‌کنند، ضرایبی وجود دارد که وابسته به خواص هیدرولیکی خاک هستند. خواص هیدرولیکی خاک خصوصیات فیزیکی هستند که روابط آب خاک را تعریف می‌کنند. این خواص هیدرولیکی ورودی‌های اولیه برای اجرای مدل‌های آب خاک هستند که در شبیه‌سازی فرآیندهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی خاک و گیاه بکار می‌روند.

محققین معادلات مختلفی را برای تعیین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک ارائه نموده‌اند. ون‌گنختون^۱ (۱۹۸۰) معادله‌های زیر را به ترتیب برای تعیین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک و هدایت هیدرولیکی غیر اشباع ارائه نمود:

به ذکر است که اعمال این فاکتور وزنی در اینجا، صرفاً برای امکان مقایسه‌ی عدد بدست آمده از تابع هدف این روش با روش‌های قبل و حالت‌های دیگر است و تأثیری در روند اجرا و نتایج نهایی ندارد.

ب) تابع هدف که فقط رطوبت حجمی خاک در آن منظور می‌شود:

$$OF = \sum_{i=1}^{n_1} \left\{ \sum_{j=1}^{n_2} \left[(\theta_{i,j}^o - \theta_{i,j}^c)^2 \right] \right\} \quad (10)$$

که در آن i شماره‌ی اندازه‌گیری، j شماره لایه‌ای که رطوبت در آن اندازه‌گیری شده، بالانویس‌های O و C به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده، n_1 تعداد دفعات اندازه‌گیری و n_2 تعداد لایه‌هایی که رطوبت در آن‌ها اندازه‌گیری شده هستند.

از دو تابع هدف مذکور به صورت جداگانه برای برآورد عوامل هیدرولیکی خاک استفاده شده و نتایج حاصل، با حالت مربوط به تابع معادله‌ی (۶) مقایسه گردیده است.

مواد و روش‌ها

جهت برآورد توابع هیدرولیکی ($K-\theta$ و $h-\theta$) در خاک‌های سری کوی اساتید، سری دانشکده، سری پمپ نمازی و سری را مجردی دانشگاه شیراز استفاده گردید. بافت این چهار خاک به ترتیب لومی، لومی‌رسی، لومی‌رسی سیلتی و لومی‌رسی می‌باشد که نشان‌دهنده تفاوت در مقدار رس آنها است. حداقل مقدار رس در خاک سری کوی اساتید به ۱۱ درصد می‌رسد. برای آزمایش کرتی با ابعاد حدود ۲×۲ متر ایجاد شد. سپس در وسط هر کرت، گودالی به عمق یک متر حفر گردید و برای خاک سری کوی اساتید، با توجه به حجم زیاد سنگریزه در این خاک، اندازه‌گیری‌ها در اعماق ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ متری و برای خاک‌های سری دانشکده، سری پمپ نمازی و سری رامجردی در اعماق ۰/۳، ۰/۶ و ۰/۹ متری از سطح خاک، دو عدد تانسومتر (507-252, ELE, England) و یک عدد حسگر دستگاه (6050X1, ELE England) TDR به صورت افقی در هر عمق نصب شدند. برای تعیین منحنی مشخصه‌ی رطوبتی خاک، از هر عمق نمونه‌هایی توسط نمونه‌گیرهای استوانه‌ای برداشت شد. ابتدا با استفاده از تانکر حمل آب، کرت‌ها آبیاری شدند و تا عمق یک متری به حد رطوبت نزدیک به اشباع رسیدند. سپس اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک توسط دستگاه TDR و اندازه‌گیری مکش توسط تانسومترهای نصب شده در سه عمق ذکر شده در بالا، در زمان‌های مشخص به صورت روزانه انجام شد. اندازه‌گیری‌ها تا زمانی انجام گرفت که تغییرات روزانه رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک قابل صرف‌نظر کردن بود.

در کلیه‌ی موارد اجرای مدل پیشنهادی، پارامترهای الگوریتم ژنتیک به شکل تعداد جمعیت ۱۰۰۰، تلفیق از نوع دو نقطه‌ای با احتمال ۰/۵ و جهش از نوع یکنواخت با احتمال ۰/۰۵ و تعداد نخبه‌های انتخابی ۲ در نظر گرفته شده است.

که در آن n_1 تعداد دفعات اندازه‌گیری، n_2 تعداد لایه‌هایی که در آن‌ها رطوبت خاک اندازه‌گیری شده، n_3 تعداد لایه‌هایی که در آن‌ها بار فشار آب در خاک اندازه‌گیری شده، بالانویس‌های O و C به ترتیب نشان‌دهنده‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده می‌باشند، W_1 و W_2 فاکتورهای وزنی بین صفر و یک هستند که برای جمع دو پارامتر θ و h در تابع هدف، بکار برده می‌شوند. علت وارد کردن این فاکتورهای وزنی آن است که دو پارامتر θ و h دارای واحد مشترک نیستند. همچنین W_1 و W_2 به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$W_1 = 1 \quad (7)$$

$$W_2 = \frac{S_w}{S_h} \quad (8)$$

که در آن S_w مجموع اندازه‌گیری‌های رطوبت و S_h مجموع اندازه‌گیری‌های بار فشار آب خاک می‌باشند.

مدل پیشنهادی

همان‌طور که گفته شد هدف از این مقاله، بررسی امکان برآورد عوامل هیدرولیکی خاک با استفاده از اندازه‌گیرهای رطوبت حجمی خاک و یا بار فشار آب خاک، به صورت مجزا می‌باشد. از معادله‌ی (۶) مشخص است که تابع هدف مورد استفاده در مدل ESHPI2 به هردوی مقادیر رطوبت و بار فشار آب خاک وابستگی دارد. بنابراین در این مقاله از دو حالت بر اساس مدل ESHPI2 با توابع هدف مجزا استفاده شده است. حالت اول با تابع هدف بر اساس یک نوع اختلاف میان بار فشار آب خاک اندازه‌گیری شده در مزرعه و بار فشار آب خاک برآورد شده توسط مدل و حالت دوم با تابع هدف بر اساس یک نوع اختلاف میان رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در مزرعه و رطوبت حجمی برآورد شده توسط مدل طراحی شده است. مقادیر توابع هدف ($m^6 m^{-6}$) مورد استفاده در این مقاله به دو صورت زیر محاسبه می‌شوند:

الف) تابع هدف که فقط بار فشار آب خاک در آن منظور می‌شود:

$$OF = \sum_{i=1}^{n_1} \left\{ \sum_{j=1}^{n_2} \left[W (h_{i,j}^o - h_{i,j}^c)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

که در آن i شماره‌ی اندازه‌گیری، j شماره‌ی لایه‌ای که بار فشار آب خاک در آن اندازه‌گیری شده، بالانویس‌های O و C به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای، n_1 تعداد دفعات اندازه‌گیری شده، n_2 تعداد لایه‌هایی است که بار فشار آب خاک در آن‌ها اندازه‌گیری شده است. همچنین فاکتور وزنی W مطابق معادله‌ی (۸) محاسبه می‌شود. لازم

بهبوده‌یابی توسط مدل پیشنهادی برای هر یک از چهار خاک مورد آزمایش ۱۰ بار انجام شد که متوسط مقدار هر یک از عوامل به عنوان مقدار بهینه شده آن در نظر گرفته شد. انحراف معیار نتایج بدست آمده از اجرای مدل‌ها پایین بود که این نشان دهنده‌ی عملکرد صحیح مدل در برآورد عوامل هیدرولیکی است.

همان‌طور که از مقادیر توابع هدف درج شده در جدول (۲) مشخص است، این مقادیر برای مدل ESHPI2 با تابع هدف بر اساس بار فشار آب خاک مورد قبول است، اما برای این مدل با تابع هدف بر اساس رطوبت حجمی، برای خاک‌های سری دانشکده، سری پمپ نمازی و سری رامجردی، مقادیر بسیار بالاتر از سایر مدل‌ها بدست آورده است.

در شکل (۱) مقایسه‌ای میان مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک برای خاک سری رامجردی صورت گرفته است. برای هر یک از نمودارها خط یک به یک، معادله‌ی برازش و مقدار نسبی ریشه متوسط مجذور خطاها آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها در حالتی که تابع هدف بر اساس بار فشار آب خاک می‌باشد، خط برازش هم برای رطوبت حجمی و هم برای بار فشار آب به خط یک به یک نزدیک است. اما در حالتی که تابع هدف بر اساس رطوبت حجمی باشد چنین نیست. در بقیه‌ی خاک‌های مورد آزمایش نیز نتایج تقریباً مشابهی با آنچه برای خاک سری رامجردی آورده شده بدست آمده است.

برای هر یک از خاک‌ها، مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر برآورد شده‌ی بار فشار آب و رطوبت حجمی خاک در شرایط مزرعه با هم مقایسه شدند. این مقایسه توسط مقدار نسبی ریشه متوسط مجذور خطا طبق معادله‌ی (۱۱) انجام شد. از طریق این شاخص، عملکرد مدل‌ها از نظر نزدیکی مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده بررسی گردید. هرچه مقدار NRMSE محاسبه شده به عدد صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی مناسب‌تر بودن مدل در برآورد عوامل می‌باشد. شکل (۲) نشان‌دهنده‌ی مقادیر NRMSE مربوط به رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک برآورد شده توسط مدل‌های مختلف است.

لازم به ذکر است که نتایج تحقیقات انجام شده توسط مهبد و زندپارسا (۲۰۱۰) و کمالی (۱۳۹۰) بر روی مدل‌های ESHPI2 و ESHPI4 نشان داده که بهینه‌سازی رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع به صورت همزمان نتایج مطلوبی حاصل نمی‌کند، به همین خاطر مقدار رطوبت اشباع از اندازه‌گیری بدست آمده، در بهینه‌سازی شرکت داده نشد. همچنین از آنجایی که حساسیت تابع هدف نسبت به رطوبت باقیمانده ناچیز است، برآورد این عامل را نیز در بهینه‌سازی شرکت نداد و مقدار آن با استفاده از مدل RETC برآورد شده است.

برای مقایسه‌ی نتایج حاصل از برآورد مدل پیشنهادی با مقادیر اندازه‌گیری شده، مقدار نسبی ریشه متوسط مجموع خطا (NRMSE) به شرح زیر محاسبه شد.

$$NRMSE = \frac{100}{O} \sqrt{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (11)$$

که در آن، P_i و O_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده و برآورد شده، \bar{O} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و n_1 تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

جهت بهینه‌یابی، محدوده‌ای برای تغییرات هر یک از عوامل هیدرولیکی در نظر گرفته شد که در جدول (۱) درج شده‌اند. همان‌طور که در بخش مواد و روشها ذکر شد، مقادیر دو عامل هیدرولیکی رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع به صورت ثابت در مدل قرار داده شدند تا در نتایج حاصل از برآورد عوامل هیدرولیکی دیگر هم از لحاظ سرعت و هم از لحاظ دقت برآورد، خللی وارد نگردد. مقدار رطوبت اشباع برای خاک‌های سری کوی اساتید، سری دانشکده، سری پمپ نمازی و سری رامجردی به ترتیب ۰/۳۸، ۰/۴۳، ۰/۴۶ و ۰/۴۵ و مقدار رطوبت باقیمانده برای هر چهار خاک ۰/۱ در نظر گرفته شد. به دلیل اینکه الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌یابی تصادفی می‌باشد و جواب حاصل از هر بار بهینه‌یابی یکسان نیست،

جدول ۱- حدود بالا و پایین عوامل هیدرولیکی جهت برآورد مقادیر بهینه‌ی آن‌ها توسط الگوریتم ژنتیک در

مدل

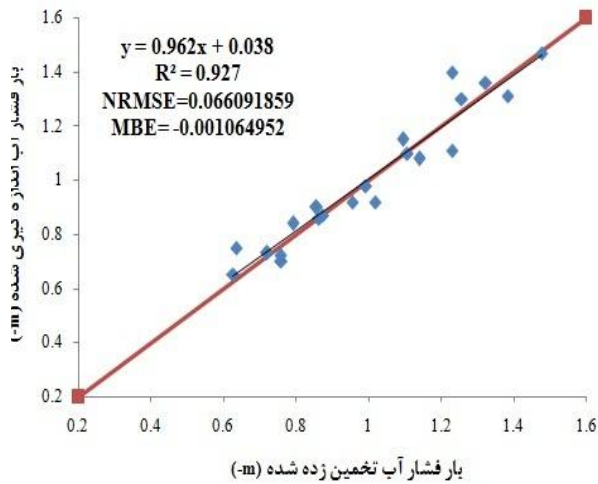
پیشنهادی برای چهار سری خاک مورد مطالعه

حدود مرزی	$\alpha(m^{-1})$	n	$K_s (m s^{-1})$
حد بالا	۲/۰۰	۲/۰۰	10^{-4}
حد پایین	۰/۵۰	۱/۰۵	10^{-7}

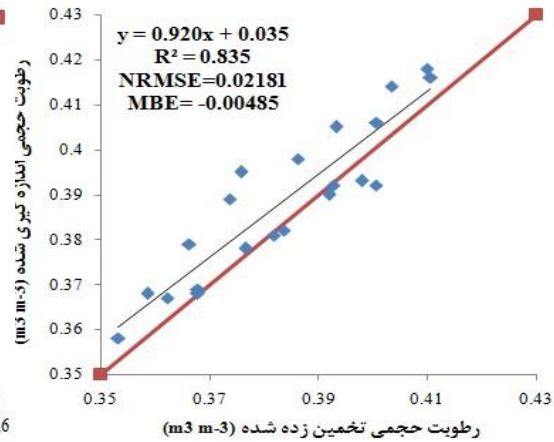
جدول ۲- مقایسه‌ی بین مقادیر بدست آمده از مدل ESHPI2 با تابع هدف بر اساس بار فشار آب خاک، رطوبت حجمی خاک و بار فشار آب و رطوبت حجمی خاک برای چهار سری خاک مورد مطالعه.

خاک	روش	تابع هدف ($m^6 m^{-6}$)	K_s ($m s^{-1}$)	α (m^{-1})	n	θ_s ($m^3 m^{-3}$)	θ_r ($m^3 m^{-3}$)
کوی سری اساتید	RETIC (با اطلاعات آزمایشگاه)	-	-	۱/۲۶۷	۱/۳۹۹	۰/۳۸	۰/۰۲۷
	RETIC (با اطلاعات مزرعه)	-	$8/81 \times 10^{-6}$	۲/۲۶۵	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۰۰۰
سری دانشکده	بر اساس بار فشار آب خاک	$1/105 \times 10^{-2}$	$3/26 \times 10^{-6}$	۱/۲۳۲	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۱۰۰
	بر اساس رطوبت خاک	$1/173 \times 10^{-2}$	$3/24 \times 10^{-6}$	۱/۲۰۱	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۱۰۰
	بر اساس رطوبت و فشار آب خاک	$1/172 \times 10^{-2}$	$4/05 \times 10^{-6}$	۱/۳۵۵	۰/۳۸	۰/۳۸	۰/۱۰۰
	RETIC (با اطلاعات آزمایشگاه)	-	-	۱/۳۱۳	۱/۳۸۶	۰/۴۳	۰/۰۶۸
	RETIC (با اطلاعات مزرعه)	-	$3/12 \times 10^{-6}$	۰/۷۱۰	۱/۵۶۸	۰/۴۳	۰/۰۰۰
	بر اساس بار فشار آب خاک	$3/77 \times 10^{-2}$	$3/18 \times 10^{-6}$	۱/۵۵۱	۱/۲۷۹	۰/۴۳	۰/۱۰۰
	بر اساس رطوبت خاک	$3/57 \times 10^{-1}$	$6/88 \times 10^{-7}$	۱/۳۳۳	۱/۵۶۶	۰/۴۳	۰/۱۰۰
	بر اساس رطوبت و فشار آب خاک	$3/22 \times 10^{-2}$	$2/39 \times 10^{-6}$	۱/۳۵۷	۱/۳۳۱	۰/۴۳	۰/۱۰۰
	RETIC (با اطلاعات آزمایشگاه)	-	-	۱/۲۹۴	۱/۲۰۶	۰/۴۶	۰/۰۰۰
	RETIC (با اطلاعات مزرعه)	-	$3/99 \times 10^{-6}$	۰/۵۷۶	۱/۵۳۳	۰/۴۶	۰/۰۰۰
پیمپ سری نمازی	بر اساس بار فشار آب خاک	$2/272 \times 10^{-2}$	$8/60 \times 10^{-7}$	۰/۸۰۳	۱/۴۵۳	۰/۴۶	۰/۱۰۰
	بر اساس رطوبت خاک	$3/376 \times 10^{-1}$	$2/71 \times 10^{-6}$	۱/۶۵۸	۱/۲۹۲	۰/۴۶	۰/۱۰۰
	بر اساس رطوبت و فشار آب خاک	$2/461 \times 10^{-2}$	$1/73 \times 10^{-6}$	۱/۰۲۴	۱/۳۱۶	۰/۴۶	۰/۱۰۰
	RETIC (با اطلاعات آزمایشگاه)	-	-	۱/۰۰۱	۱/۳۹۷	۰/۴۴۵	۰/۱۰۴
	RETIC (با اطلاعات مزرعه)	-	$5/60 \times 10^{-6}$	۱/۳۶۱	۱/۲۰۸	۰/۴۵۰	۰/۰۰۰
	بر اساس بار فشار آب خاک	$1/535 \times 10^{-2}$	$1/10 \times 10^{-6}$	۰/۸۸۷	۱/۵۳۹	۰/۴۵۰	۰/۱۰
سری رامجردی	بر اساس رطوبت خاک	$4/548 \times 10^{-1}$	$2/38 \times 10^{-6}$	۱/۷۷۹	۱/۳۴۵	۰/۴۵۰	۰/۱۰
	بر اساس رطوبت و فشار آب خاک	$1/425 \times 10^{-2}$	$1/72 \times 10^{-6}$	۱/۰۳۷	۱/۴۰۶	۰/۴۵۰	۰/۱۰

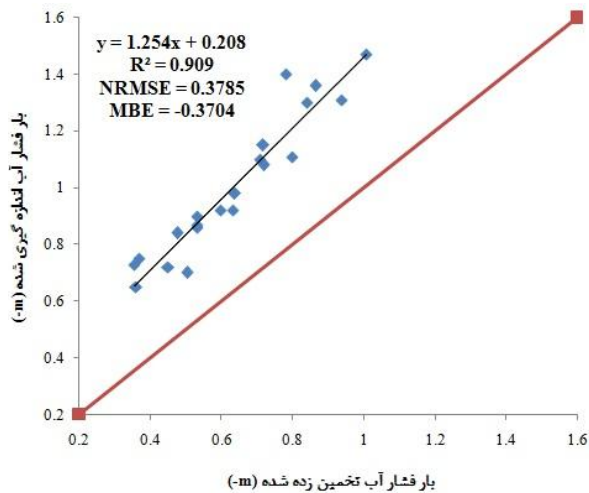
(*) اندازه‌گیری شده به روش نفوذسنج گلف (مهید و زندپارسا، ۲۰۱۰).



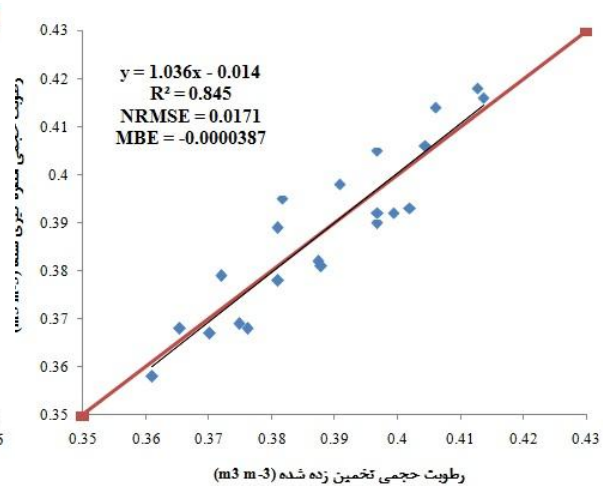
(ب)



(الف)



(د)

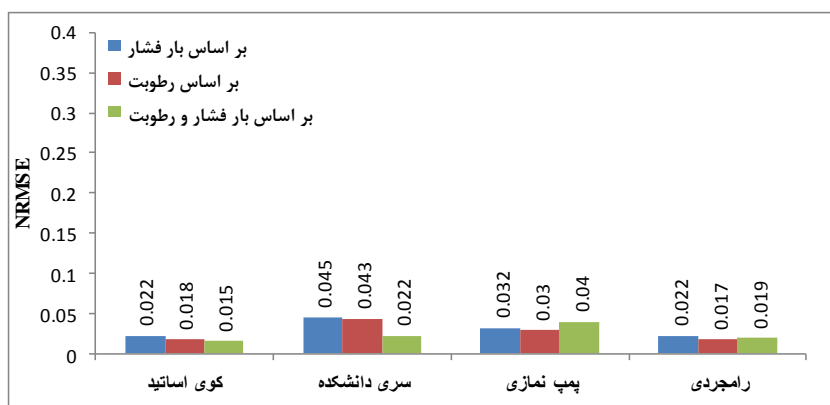


(ج)

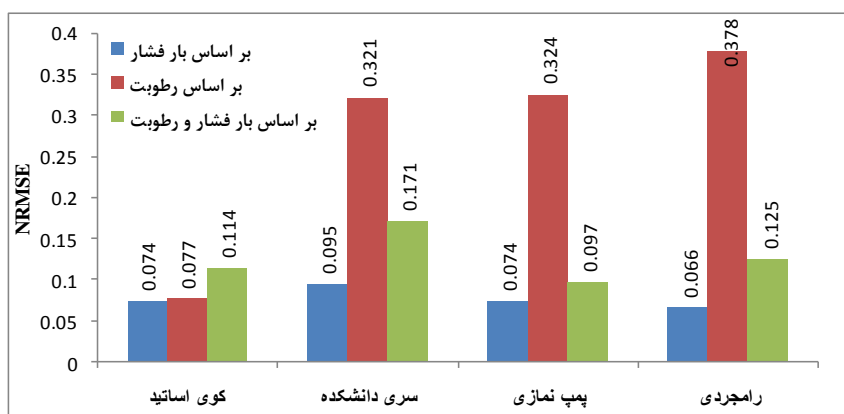
شکل ۱- مقایسه‌ی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر پیش‌بینی شده‌ی (الف) رطوبت حجمی خاک، (ب) بار فشار آب خاک، در شرایط مزرعه در مدل ESHPI2 با تابع هدف بر اساس بار فشار آب خاک و (ج) رطوبت حجمی خاک، (د) بار فشار آب خاک، در شرایط مزرعه در مدل ESHPI2 با تابع هدف بر اساس رطوبت حجمی برای خاک سری رامجردی.

همراه داشته است. اما این مدل با تابع هدف بر اساس فقط رطوبت حجمی، عوامل هیدرولیکی را به گونه‌ای برآورد کرده است که تنها در برآورد رطوبت حجمی، مقادیر NRMSE پایین است اما این مدل در برآورد بار فشار آب خاک بسیار ضعیف عمل کرده است به طوری که مقادیر NRMSE مربوط به فشار آب در خاک‌های سری دانشکده، سری پمپ نمازی و سری رامجردی بسیار بالاست.

همان‌طور که در شکل (۲) مشخص است، مدل ESHPI2 با تابع هدف بر اساس بار فشار آب تنها، در برآورد عوامل هیدرولیکی هر چهار خاک مورد آزمایش به گونه‌ای بسیار مناسب عمل کرده است به طوری که مقدار NRMSE رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک برآورد شده برای هر چهار خاک نه تنها از مقدار NRMSE بدست آمده توسط مدل‌های تابع هدف بر اساس اندازه‌گیری توأم رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک بدتر نیست، بلکه در بسیاری از حالت‌ها نتایج بهتری را به



(الف)



(ب)

شکل ۲- مقایسه‌ی مقادیر نرمال شده‌ی ریشه‌ی متوسط مجذور خطا (NRMSE) در برآورد (الف): رطوبت حجمی و (ب): بار فشار آب خاک با تابع هدف بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی رطوبت حجمی خاک، بار فشار آب خاک و یا اندازه‌گیری توأم آن‌ها برای چهار خاک سری کوی اساتید، سری دانشکده، سری پمپ نمازی و سری رامجردی.

آورد. بنابراین مدل ESHPI2 با تابع هدف بر اساس رطوبت حجمی، توانایی برآورد عوامل هیدرولیکی خاک را ندارد. به عبارتی دیگر، نمی‌توان تنها با اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک به گونه‌ای اقدام به بهینه‌یابی عوامل هیدرولیکی خاک کرد که هم رطوبت حجمی برآورد شده به رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در مزرعه و هم بار فشار آب خاک برآورد شده به بار فشار آب خاک اندازه‌گیری شده در مزرعه شبیه باشد. اما این مدل با تابع هدف بر اساس بار فشار آب خاک، در تمام موارد عملکرد بسیار مناسبی جهت بهینه‌یابی و برآورد عوامل هیدرولیکی خاک دارد. حتی در مواردی، عوامل هیدرولیکی بدست آمده در این حالت، بسیار مطلوب‌تر از زمانی است که هر دو پارامتر رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک اندازه‌گیری شده، در تابع هدف مد نظر قرار می‌گیرند. به عبارتی دیگر، می‌توان تنها با اندازه‌گیری بار فشار آب خاک به گونه‌ای اقدام به بهینه‌یابی عوامل هیدرولیکی خاک کرد که هم رطوبت حجمی برآورد شده به

نتیجه‌گیری

به علت رفتار شدید غیر خطی توابع هیدرولیکی خاک، استفاده از روشهای مناسب برآورد پارامترهای آنها اهمیت زیادی دارد. به همین علت از راههای مختلفی برای برآورد این پارامترها در روش معکوس استفاده شده است. در پاره‌ای از مطالعات از اندازه‌گیری توأم رطوبت و مکش آب در خاک زنده‌پارسا (۱۳۸۰) و مهید و زنده‌پارسا (۲۰۱۰) در برخی از تحقیقات فقط از رطوبت خاک فنگ و همکاران (۲۰۰۹) در برخی از مدل‌ها از مکش اندازه‌گیری شده آب خاک استفاده شده است.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که برای کاهش هزینه انجام آزمایشها، در روش معکوس، استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت خاک خصوصا " برای خاکهای ریز بافت خطای زیادی ببار می

رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده‌ی واقعی در مزرعه و هم بار فشار آب خاک برآورد شده به بار فشار آب خاک اندازه‌گیری شده‌ی واقعی در مزرعه شبیه باشد.

در حالتی که در تابع هدف تنها از بار فشار آب خاک استفاده شود، بار محاسباتی جهت برآورد عوامل هیدرولیکی بسیار کمتر از حالتی است که در تابع هدف از هر دو پارامتر رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک استفاده می‌شود. همچنین حجم داده‌های ورودی مدل جهت انجام عملیات بهینه‌یابی بسیار کاهش می‌یابد (تقریباً نصف می‌شود زیرا نیازی به ورود مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در مزرعه نیست). از طرفی، اندازه‌گیری توأم رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک در مزرعه مشکل، وقت‌گیر و پرهزینه است. تمام این موارد، دلایل بسیار مناسبی برای استفاده از توابع هدف بر اساس بار فشار آب خاک به تنهایی، در مدل ESHPI2 می‌باشند.

منابع

- ۱- عباسی، ف. ۱۳۸۶. فیزیک خاک پیشرفته. انتشارات دانشگاه تهران.
- ۲- مهید، م. ۱۳۸۶. تخمین توابع هیدرولیکی خاک به روش معکوس با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شرایط مزرعه و آزمایشگاه. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز، ۱۸۸ صفحه.
- ۳- کمالی، ح. ر. ۱۳۹۰. تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک به روش معکوس با استفاده از بهینه نمودن هر پارامتر در شرایط مزرعه. پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
- ۴- محمودیان شوشتری، م. ۱۳۹۱. برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک با اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک، بار فشار آب خاک و یا اندازه‌گیری توأم رطوبت حجمی و بار فشار آب خاک به روش معکوس و با استفاده از الگوریتم ژنتیک". پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته آبیاری و زهکشی، واحد بین الملل، دانشگاه شیراز.
- 5- Brooks, R. and A. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Hydrology paper , 3, Coloroda State University , Fort Collins. CO, USA.
- 6- Fayer, M.J., and C.S. Simmons. 1995. Modified soil water retention functions for all matric suctions, Water Resource Research, 31:1233-1238.
- 7- Fang, Q.X., T.R., Green, R.H. Erskine, R.W. Malone, and L.R. Ahuja. 210. Optimization soil hydraulic parameters in RZWQM2 under fallow conditions. Soil Science Society of America Journal 74: 1897-1913.
- 8- Hopmans, J.W., and J. Simunk. 1999. Review of inerse estimation of soil hydraulic properties." IN: van Gonuchten, M.Th., F.j., Leij.L., Wu, (Eds, prodeciding of the International Workshop, Characterization and Measurement of the hydraulic properties of Unsaturated Porous Media. University of California, Riverside), CA, pp. 713-724.
- 9- Kool, J.B., J.C. Parker and M.Th. Van Gonuchten 1987. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models. Journal of Hydrology, 91:255-293.
- 10- Mahbod, M., and Zand_Parsa, Sh. 2010 Prediction of soil hydraulic parameters by inerse method using genetic algorithm optimization under field conditions. Agronomy and Soil Science, 56:13-28.
- 11- Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous medium. Ph.D. Thesis, Cornell University.
- 12- Russo, D., Bresler, E., Shani., U., and Parker, J.C. 1991. Analyses of infiltration events in relation to determining soil hydraulic properties by inerse problem methodology. Water Resource Research, 27:1361-1373.

- 13- Simunek, J., and Van Genuchten, M.Th. 1996. Estimating Unsaturated soil hydraulic properties from tension disc infiltrometet by numerical inersion. *Water Resource Research*, 32:2683-2696.
- 14- Smettem, K.R.J, and Clothier, B.E. 1989. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disc permeameters. *Soil Science*, 40:563-568.
- 15- Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-898.
- 16- Zachman, D.W., Duchateau, P.C., and Klute, A. 1981. Simultaneous approximation of water capacity and soil hydraulic conductivity by parameters estimation. *Soil Science*, 134:157-167.
- 17- ZandParsa, Sh. 2001. A simulation model for prediction of water and nitrogen effects on corn yield. Ph.D. Thesis, Irrigation Department, Shiraz University.
- 18- Zhang, R. 1997. Infiltration models for the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61:1597-1603.