# برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیراشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی

**شجاع قربانی دشتکی و مهدی همایی**

به ترتیب: دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت‌خاک، دانشگاه تربیت مدرس و استادیار گروه خاکشناسی دانشگاه تربیت مدرس

**مقدمه**

بیان کمّی منحنی رطوبتی و هدایت آبی غیراشباع خاک برای مطالعه و مدل‌سازی حرکت آب و انتقال املاح در خاک، ضروری است. روش‌های مستقیم فراوانی برای اندازه‌گیری این ویژگی‌ها وجود دارد که بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشند[۸]. لذا در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های غیرمستقیم برای برآورد این ویژگی‌ها گسترش یافته است. یکی از این روش‌ها توابع انتقالی خاک(Pedotransfer Functions) می‌باشد[۱]. این توابع، ویژگی‌هایی از خاک که اندازه‌گیری آنها پرهزینه و زمان‌بر می‌باشند را با استفاده از اطلاعات پایه‌ای موجود خاک مانند فراوانی نسبی ذرات، چگالی ظاهری و ماده آلی که اندازه‌گیری آنها آسان است، برآورد می‌کنند. توابع انتقالی را می‌توان به سه گروه تقسیم کرد[۲ و۸] :

۱- توابع انتقالی که مبنای فیزیکی و پایه نظری دارند و معمولاً ویژگی‌های هیدرولیکی را با استفاده از هندسهٔ خط‌پاره‌ها و یا تشابه مقیاسبرآورد می‌کنند. ۲- توابع انتقالی نقطه‌ای که با استفاده از رگرسیون خطی چندگانه، مقدار رطوبت را در نقاطی خاص از منحنی رطوبتی برآورد می‌کنند. ۳- توابع انتقالی پارامتریک که هر یک از پارامترهای مربوط به توابع هیدرولیکی را برآورد می‌کنند. این توابع نسبت به دو گروه دیگر، در نمون‌های شبیه‌ساز جریان آب در خاک کاربرد بیشتری دارند.

از آنجاکه اندازهٔ تخلخل خاک نقشی بسیار مهم در نگهداشت آب در خاک دارد، در این پژوهش از میانگین هندسی قطر ذرات و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک[۵] به عنوان شاخص‌های کمّی بیان‌کنندهٔ اندازهٔ تخلخل در ایجاد توابع انتقالی استفاده شد. با توجه به اینکه اندازهٔ ذرات خاک تعیین کنندهٔ اندازهٔ منافذ خاک هستند و ذرات با قطر یکنواخت منافذی یکنواخت ایجاد می‌کنند، این دو پارامتر یعنی اندازه و درجهٔ یکنواختی ذرات تشکیل دهندهٔ خاک مشخص‌کنندهٔ توزیع تخلخل خاک نیز می‌باشند.

برای بیان رابطهٔ $\theta$ و $h$، معمولاً از معادلهٔ پیشنهادی وان‌گنختن (۱۹۸۰) استفاده می‌شود[۶]:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left(1+[\alpha h]^n\right)^m} \quad (۱)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

که در آن $\theta_s$ $(L^3L^{-3})$ رطوبت اشباع و $\theta_r$ $(L^3L^{-3})$ رطوبت باقیمانده می‌باشند. n(-)، m(-) و $\alpha$ $(L^{-1})$ نیز ضرایبی هستند که شکل منحنی رطوبتی را مشخص می‌کنند. این معادله، تابعی است پیوسته که در بسیاری از مدل‌های عددی که جریان آب و انتقال املاح را در خاک شبیه‌سازی می‌کنند مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از رایج‌ترین توابع برای بیان هدایت آبی غیراشباع، تابع وان‌گنختن ,معلم(۱۹۷۶) است:

$$K(h) = K_0 S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\left(\frac{n}{n-1}\right)}\right)^{1-\frac{1}{n}}\right]^2 \quad (۲)$$

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

که در آن $K_0$ $(LT^{-1})$ تقریباً برابر با هدایت آبی اشباع خاک و $l$(-) پارامتری است که شکل تابع از آن متاثر می‌شود[۳].

## مواد و روشها

منطقهٔ مورد مطالعه قسمتی از دشت کرج بود. تعداد ۳۴ نمونه خاک از عمق صفر تا ۲۵ سانتیمتری سطح خاک به صورت تصادفی انتخاب گردید. چگالی ظاهری نمونه‌ها به روش سیلندری تعیین شد. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، فراوانی نسبی ذرات به روش هیدرومتری و منحنی رطوبتی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه صفحات فشاری و اعمال مکش‌های ۰، ۱۰، ۳۳، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال در سه تکرار اندازه‌گیری شد. پارامترهای معادلهٔ وان‌گنختن با استفاده از برنامهٔ کامپیوتری RETC [۷] تعیین شدند. پارامترهای معادلهٔ وان‌گنختن معلم به کمک برنامهٔ کامپیوتری Rosetta [۴] بدست آمدند. میانگین هندسی قطر ذرات($d_g$) و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک($\sigma_g$) با استفاده از روابط پیشنهادی شیرازی و بورسما(Shirazi and Boersma, 1984) محاسبه شدند[۵].

## نتایج و بحث

توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون نرمال بودن و به کمک نرم افزار آماری Minitab مورد بررسی قرار گرفت. این آزمون توزیع پارامترهای $\alpha$، $K_0$، $l$ و $d_g$ را غیرنرمال نشان داد. تبدیلهای زیر برای نرمال شدن توزیع آنها صورت گرفت:

$$\alpha^* = \frac{1}{\alpha} \qquad K_0^* = log|log\, K_0| \qquad l^* = log|1+l| \;,\; d_g^* = d_g^{0.5} \qquad (۴)$$

در این روابط $\alpha^*$ ، $K_0^*$ ، $l^*$ و $d_g^*$ به ترتیب بیانگر پارامترهای تبدیل شدهٔ $\alpha$ ، $K_0$ ، $l$ و $d_g$ می‌باشند. برای جلوگیری از بروز همراستایی از نسبت رس به سیلت استفادهٔ شد.

*الف) توابع پارامتریک نوع اول*: این توابع با استفاده از متغیرهای مستقل فراوانی نسبی ذرات خاک و چگالی ظاهری خاک پارامترهای معادلهٔ وان‌گنختن و معادلهٔ وان‌گنختن-معلم را برآورد می‌کنند(جدول ۱). بررسی این توابع نشان می‌دهد که مهمترین متغیر در برآورد $\theta_s$، چگالی ظاهری بوده بطوریکه ۹۴/۶٪ از تغییرات $\theta_s$ به وسیلهٔ این متغیر بیان شده است. به دلیل وجود اختلاف بین مقدار برآورد شده $\theta_s$ با استفاده از RETC و مقدار اندازه‌گیری شده آن و همچنین خطای موجود در تعیین $\theta_s$ (اندازه‌گیری شده)، علی‌رغم وابستگی تئوریک $\theta_s$ به چگالی ظاهری، ضریب تبیین تابع برآوردکنندهٔ آن تمامی تغییرات را توجیه نمی‌کند. همچنین ۳۲/۱٪ از تغییرات پارامتر $\theta_r$ با مقدار رس بیان شده است. بدلیل اثر سطح ویژهٔ خاک بر مقدار رطوبت باقیمانده با افزایش مقدار رس، رطوبت باقیمانده نیز افزایش یافته است. ضرایب n و $\alpha^*$ نیز با استفاده از متغیرهای گروه اول به ترتیب با ضریب تبیین ۱۳/۲٪ و ۶۹٪ قابل برآورد می‌باشند. فراوانی نسبی شن و چگالی خاک بیشترین سهم را در برآورد $\alpha^*$ داشته است. تابع برآوردکنندهٔ پارامتر n نشان می دهد که شن اثری منفی بر مقدار n داشته و متغیر چگالی ظاهری اثری معنی‌دار بر برآورد n نداشته است. این توابع برآوردی مناسب از پارامترهای معادله وان‌گنختن معلم($K_0^*$ و $l^*$ ) ارایه نکرده است. زیرا $K_0$ و $l$ خود با استفاده از برنامهٔ Rosetta برآورد شدند که برپایهٔ ۲۳۵ داده ایجاد شده و خطای ناشی از برآورد برای خاک‌های مختلف افزایش می‌یابد.

*ب) توابع پارامتریک نوع دوم* : این توابع پارامترهای معادلات وان‌گنختن و وان‌گنختن- معلم را با استفاده از متغیرهای میانگین هندسی قطر ذرات($d_g$)، انحراف معیار هندسی قطر ذرات($\sigma_g$) و چگالی ظاهری خاک برآورد می‌کنند(جدول ۲). مقایسهٔ ضرایب تبیین این توابع و توابع پارامتریک نوع اول نشان می دهد که توابع نوع دوم در برآورد $\theta_s$ ، $\alpha^*$ و $\theta_r$ چندان تفاوتی با توابع نوع اول ندارند. این جدول نشان می دهد که ۹۴/۱٪ از تغییرات $\theta_s$، ۶۸/۲٪ از تغییرات $\alpha^*$ و ۳۰/۸٪ از تغییرات $\theta_r$ به وسیلهٔ متغیرهای نوع دوم بیان شده است. نکته جالب توجه در مقایسهٔ توابع برآوردکنندهٔ n و $l^*$، افزایش قابل توجه ضریب تبیین توابع پارامتریک نوع دوم نسبت به توابع پارامتریک نوع اول می‌باشد. با وجـــــود اینکهمتغیرهای نوع اول تنها ۱۳/۲٪

از تغییرات n و ۱۶/۱٪ از تغییرات $l^*$ را بیان می‌کنند اما، متغیرهای نوع دوم ۲۳/۲٪ از تغییرات n و ۲۷/۲٪ از تغییرات $l^*$ را بیان کرده‌اند.

مقایسهٔ توابع پارامتریک نوع اول و دوم بدست آمده در این پژوهش نشان می دهد که متغیرهای میانگین هندسی قطر ذرات و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک متغیرهایی مناسب‌تر برای پی‌ریزی توابع انتقالی جهت برآورد پارامترهای معادلات وان‌گنختن و وان‌گنختن معلم می‌باشند. زیرا $d_g$ و $\sigma_g$ اثر سه ذره شن، سیلت و رس را به طور همزمان وارد توابع یاد شده کرده است. از دیگرسو، اثر فراوانی و توزیع ذرات خاک و در نتیجه توزیع تخلخل را که در توابع پارامتریک نوع اول وجود نداشت، در این توابع وارد شده است. ضریب همبستگی بین FC اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده با استفاده از توابع نوع اول و دوم به ترتیب ۰/۴۸۷ و ۰/۷۲۳، و ضریب همبستگی بین PWP اندازه‌گیری‌شده و برآوردشده با استفاده از توابع نوع اول و دوم به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۵ بوده است. بنابراین توابع پارامتریک نوع دوم مقدار رطوبت در FC و PWP را با دقت بهتری برآورد کرده‌اند. افزایش ضریب همبستگی بین مقادیر FC اندازه‌گیری شده و برآورد شده به کمک توابع نوع دوم نسبت به توابع نوع اول بیشتر از همین افزایش در مورد PWP بود. مقایسهٔ اختلاف بین این ضریب همبستگی‌ها نشان می‌دهد که نقش توزیع تخلخل بر روی مقدار رطوبت در ظرفیت مزرعه بیشتر از نقطهٔ پژمردگی دایم است.

**جدول ۱- توابع پارامتریک نوع اول**

| شماره تابع | پارامتر | تابع | ضریب تبیین تعدیل شده |
|---|---|---|---|
| ۱ | $\theta_r$ | *0.0192+0.00375*C* | ۳۲/۱ |
| ۲ | $\theta_s$ | *0.933-0.000707*S-0.311*Bd* | ۹۴/۶ |
| ۳ | $\alpha^*$ | *-531-4.67*S+550*Bd* | ۶۹ |
| ۴ | n | *1.668-0.00522*S* | ۱۳/۲ |
| ۵ | $l^*$ | *0.291-1.174*C/Si* | ۱۶/۱ |
| ۶ | $K_0^*$ | *0.199-0.006*S* | ۱۲/۹ |

C: فراوانی نسبی رس، S: فراوانی نسبی شن(درصد) ، Bd: چگالی ظاهری($g.cm^{-3}$) و C/Si: نسبت فراوانی رس به سیلت.

**جدول ۲- توابع پارامتریک نوع دوم**

| شماره تابع | پارامتر | تابع | ضریب تبیین تعدیل شده |
|---|---|---|---|
| ۱ | $\theta_r$ | $0.197-0.392*d_g^*$ | ۳۰/۸ |
| ۲ | $\theta_s$ | $0.954-0.324*Bd-0.124*d_g^*$ | ۹۴/۱ |
| ۳ | $\alpha^*$ | $-448-684*d_g^*+568*Bd-9.18*\sigma_g$ | ۶۸/۲ |
| ۴ | n | $8.539-3.673*\sigma_g^*+0.474*\sigma_g$ | ۲۳/۳ |
| ۵ | $l^*$ | $-25.2-1.92*\sigma_g+13.7*\sigma_g^*+1.92*d_g^*$ | ۲۷/۲ |
| ۶ | $K_0^*$ | $-1.162+3*d_g^*$ | ۱۴/۵ |

Bd: چگالی ظاهری($g.cm^{-3}$).

## منابع مورد استفاده

1- Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. Adv. Soil Sci. 9: 177-213 .

2- Cornelis, Wim M., J. Ronsyn, M. van Meirvenne, and R. Hartman. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. Soil Sci. Soc. Am. J., 65: 638-648.

3- Schaap, M.G. and F.J. Leij. 2000. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. Soil Sci. Soc. Am. J., 64: 843-851.

4- Schaap, M.G., F.J. Leij. and M.Th. van Genuchten. 2001. ROSEETA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. J. Hydrol., 251: 163-176.

5- Shirazi, M.A. and L. Boersma. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. Soil Sci. Soc. Am. J., 48: 142-147.

6- Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the h?