

تأثیر میانگین و انحراف معیار هندسی بافت خاک در برآورد ضرائب رطوبتی خاک

رسول میرخانی و حبیب خداوردیلو*¹

چکیده

منحنی رطوبتی خاک یکی از مهم‌ترین توابعی است که ویژگی‌های بخش غیراشباع خاک را به صورت کمی بیان می‌کند. اندازه‌گیری مستقیم این منحنی وقت‌گیر، دشوار و پرهزینه است. بدین جهت تلاش‌های زیادی به منظور برآورد غیرمستقیم منحنی رطوبتی از سایر ویژگی‌های خاک انجام گرفته است. یکی از روش‌های غیرمستقیم برآورد منحنی رطوبتی استفاده از توابع انتقالی خاک است. هدف از این پژوهش مقایسه میزان تأثیر محاسبه میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک با سه جزء (شن، سیلت و رس) و نه جزء (شن خیلی درشت، شن درشت، شن متوسط، شن ریز، شن خیلی ریز، سیلت درشت، سیلت متوسط، سیلت ریز و رس) از ذرات خاک در برآورد نقطه‌ای و پارامتریک منحنی رطوبتی خاک است. برای انجام این پژوهش 40 نمونه خاک با بافت متوسط بصورت کاملاً تصادفی از منطقه کرج انتخاب شد. از کل نمونه‌های خاک، 35 نمونه برای ایجاد توابع و پنج نمونه برای ارزیابی اعتبار توابع استفاده شد. فراوانی نسبی ذرات به روش هیدرومتری، جرم مخصوص ظاهری به روش کلوخه، درصد کربنات کلسیم به روش خنثی سازی با اسید، درصد کربن آلی به روش والکلی و بلک و منحنی رطوبتی با دستگاه صفحات فشاری اندازه‌گیری شد. از بین متغیرهای مستقل مناسب‌ترین ترکیب برای برآورد منحنی رطوبتی و پارامترهای معادله وان گنوختن با استفاده از روش رگرسیون با بهترین زیر مجموعه انتخاب و معادلات رگرسیونی با استفاده از رگرسیون چندگانه خطی بدست آمد. منحنی رطوبتی خاک با استفاده از توابع انتقالی ایجاد شده برآورد شد. نتایج نشان داد که با استفاده از سه و یا نه جزء از ذرات برای محاسبه d_p و σ_p در برآورد نقطه‌ای منحنی رطوبتی خاک اختلاف معنی‌داری به وجود نمی‌آید. لیکن، در برآورد پارامتریک منحنی رطوبتی خاک استفاده از نه جزء از ذرات در ایجاد توابع نسبت به سه جزء برآورد بهتری از رطوبت در مکش‌های 10، 33 و 100 کیلوپاسکال داشت. با این حال، در مکش‌های 300، 500 و 1500 کیلوپاسکال استفاده از سه جزء از ذرات نسبت به نه جزء برآورد بهتری از رطوبت نشان داد. تجزیه‌های آماری بیانگر اعتبار برآوردهای حاصل از توابع ارائه شده بود.

واژه‌های کلیدی: انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک، توابع انتقالی خاک، منحنی رطوبتی خاک، میانگین هندسی قطر

ذرات خاک

۱- به ترتیب کارشناس ارشد مؤسسه تحقیقات خاک و آب و دانشجوی دکتری فیزیک خاک دانشگاه تربیت مدرس

* وصول: 84/5/24 و تصویب: 84/12/3

مقدمه

هیدرولیکی (رطوبت ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی دائم، ظرفیت آب قابل استفاده، درصد خاکدانه‌های پایدار در آب و لگاریتم هدایت هیدرولیکی اشباع) از پنج متغیر مستقل (درصد شن، سیلت، رس، مواد آلی و جرم ویژه ظاهری) ارائه کردند. آنها نشان دادند که ارتباط بین این متغیرها در کلاس‌های بافتی مختلف، متفاوت بوده و با تفکیک داده‌ها در قالب کلاس‌های بافتی همراستایی چندگانه در بین متغیرهای مستقل به گونه‌ای معنی‌دار کاهش و اعتبار معادلات رگرسیونی افزایش می‌یابد. همچنین، آنها گزارش کردند که برآورد حاصل از این توابع انتقالی خاک (PTFs)، انطباق قابل قبولی با داده‌های مشاهده شده داشته‌اند. خداوردیلو و همایی (1381) در پژوهشی روی 27 نمونه از سری خاک‌های منطقه کرج با بافت لوم نشان دادند که توابع انتقالی خاک در برآورد رطوبت‌های معادل در مکش صفر، 10، 33، 100، 300، 500 و 1500 کیلوپاسکال کارآمد بودند. مقایسه منحنی‌های رطوبتی اشتقاق یافته با داده‌های اندازه‌گیری شده همبستگی معنی‌داری ($P = /001$) نشان دادند و برآورد رطوبت معادل نقطه ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم همبستگی بالایی ($P = /001$) با مقادیر اندازه‌گیری شده نشان دادند. لیکن، این همبستگی برای همه دامنه‌های پیوسته رطوبت قابل استفاده (AW) مشاهده نشد. قربانی و همایی (1381) به منظور ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ای برای برآورد نقطه‌ای و پارامتریک منحنی رطوبتی متغیرهای مستقل را به دو گروه تقسیم کردند. گروه اول شامل فراوانی نسبی ذرات و جرم ویژه ظاهری و گروه دوم شامل جرم ویژه ظاهری، میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات بود. آنها نتیجه گرفتند که متغیرهای نوع دوم جهت برآورد پارامترهای معادلات وان‌گنوختن مناسب‌تر است. همچنین متغیرهای نوع دوم نسبت به متغیرهای نوع اول برآورد بهتری از نقاط منحنی رطوبتی نشان دادند. Vereecken و همکاران (1989) با استفاده از متغیرهای مقدار شن، رس، کربن آلی و جرم ویژه ظاهری توابعی برای برآورد پارامترهای معادله وان‌گنوختن (1980) ارائه کردند که برای برآورد منحنی رطوبتی، توابع نتیجه رضایت‌بخشی داشت و نیز نشان دادند که اگر فراوانی نسبی ذرات به 9 جزء تقسیم شود، توابع ارائه شده برای برآورد پارامترهای n و α برآورد بهتری خواهد داشت. فرخیان و همایی (b و 1381a) برای ایجاد توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک در خاک‌های گچی شرق اصفهان، متغیرهای مستقل را به دو گروه تقسیم کردند. گروه اول شامل فراوانی نسبی ذرات، جرم ویژه ظاهری و درصد گچ و گروه دوم شامل درصد گچ، جرم ویژه ظاهری و میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات بود. آنها نتیجه

منحنی رطوبتی خاک (1) - Soil moisture retention curve) که بیانگر رابطه بین میزان آب خاک (θ) و پتانسیل ماتریک (ψ_m) است. یکی از مهم‌ترین توابعی است که ویژگی‌های بخش غیراشباع خاک را به صورت کمی بیان می‌کند.

اندازه‌گیری مستقیم این ویژگی بدلیل غیرخطی بودن آن بسیار دشوار و پرهزینه است. از آنجا که نگهداشت آب توسط خاک از دیگر ویژگی‌های خاک مانند

بافت و ساختمان خاک تأثیر می‌پذیرد. لذا امکان ایجاد روابط تجربی به منظور برآورد منحنی رطوبتی خاک وجود دارد. تاکنون تلاشهایی پرشمار در راستای تعیین غیرمستقیم منحنی رطوبتی خاک از ویژگی‌های زود یافت و یا ویژگی‌های موجود در مطالعات خاکشناسی انجام گرفته است.

Bouma برای نخستین بار واژه توابع انتقالی خاک¹ را برای این روابط تجربی برگزید (1989, Bouma). نامبرده توابع انتقالی خاک را به عنوان توابعی برآورد کننده تعریف کرد که داده‌های موجود را به داده‌های مطلوب ترجمه می‌کنند (Minasny و همکاران، 1999).

پیشتر، تلاشهایی برای ایجاد روابطی بین ویژگی‌های زود یافت خاک مانند درصد شن، سیلت، رس و مواد آلی با مقدار رطوبت خاک در پتانسیلهای هیدرولیکی ویژه (معمولاً در 33 kPa - و 1500 kPa -) انجام گرفته است. (Salter و همکاران، 1966؛ Briggs و Shantz، 1912). با ورود رایانه‌ها به عرصه تحقیقات، سرعت محاسبات افزایش یافت و مدل‌های پیچیده‌تری ارائه گردید و از این رو پیشرفتهایی سریع در مدل‌سازی رایانه‌ای حرکت آب و انتقال املاح در خاک بوجود آمد. این مدل‌ها هم برای مدیریت برنامه‌های تولیدی و هم برای حل مسایل زیست بوم به کار می‌روند. با این پیشرفت، نیاز به داده‌های مناسبی از روابط $\theta(h)$ به عنوان یک ورودی به مدل‌ها، بیش از پیش احساس گردید. تاکنون، توابع انتقالی پرشماری از ویژگی‌های هیدرولیکی خاک برای برآورد این نیاز ایجاد شده است (Rawls و همکاران، 1982؛ Gupta و Larson، 1979).

برای نمونه، Salchow و همکاران (1996) طی پژوهشی در جنوب اوهایو با تفکیک خاک‌ها در چهار کلاس بافتی، توابعی را برای برآورد ویژگی‌های

انتخاب شد. نمونه‌ها از الک 2 میلی‌متری عبور داده شدند. سپس فراوانی نسبی ذرات خاک به روش هیدرومتری، کربنات کلسیم به روش خشتی‌سازی با اسید، درصد کربن آلی خاک به روش والکلی و بلک (علی‌احیایی و بهبهانی زاده، 1372)، جرم ویژه ظاهری به روش کلوخه و منحنی رطوبتی خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (آریا و میرخانی، 1384) اندازه‌گیری شد. میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات با استفاده از روابط ارائه شده توسط Shirazi و Borsma (1984) محاسبه شد. برای برآورد پارامترهای معادله منحنی رطوبتی از نرم افزار کامپیوتری RETC استفاده شد (Van Genuchten و همکاران، 1991). با استفاده از این نرم‌افزار ابتدا معادله چهار پارامتری وان‌گنوختن را انتخاب و مقادیر رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف، جرم ویژه ظاهری و فراوانی نسبی ذرات خاک برای هر نمونه به نرم‌افزار RETC وارد و با فرض $m=1-\frac{1}{n}$ پارامترهای α ، θ_r و n با استفاده از روش حداقل مربعات خطا برآورد شدند.

از بین داده‌های اندازه‌گیری شده، 35 نمونه برای ایجاد توابع و پنج نمونه برای ارزیابی اعتبار³ توابع به کار رفت. سپس، آزمون نرمال بودن داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab¹¹ انجام گرفت (Ryan و Joiner، 1994). غیرنرمال بودن توزیع داده‌ها، آزمون‌های فرض را غیر معتبر می‌سازد زیرا، این آزمون بر فرض نرمال بودن داده‌ها استوار است (رضایی و سلطانی، 1377) و به منظور نرمال نمودن برخی پارامترها تبدیلات لازم بصورت زیر انجام گرفت.

$$n^* = (\log n)^{0.5} \quad \alpha^* = \alpha^{0.5} \quad O.C^* = \%O.C^{0.5}$$

سپس همبستگی بین متغیرهای مستقل بررسی شد. زیرا در رگرسیون چندگانه خطی همبستگی بالا بین متغیرهای مستقل ($r > 0.7$) با ایجاد همراستایی چندگانه⁴ نتایج را غیرمعتبر می‌سازد.

در مرحله بعد، متغیرهای مستقل به دو گروه تقسیم شدند. گروه اول شامل میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات با سه جزء از ذرات، جرم ویژه ظاهری، درصد کربنات کلسیم و درصد کربن آلی خاک و در گروه دوم نیز متغیرها همانند گروه اول بود و تنها میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات با سه جزء از ذرات محاسبه شد.

گرفتند که در خاک‌های گچی استفاده از فراوانی نسبی ذرات به جای دو پارامتر d_g و σ_g می‌تواند برآورد بهتری از پارامترهای وان‌گنوختن داشته باشد. همچنین، متغیرهای نوع اول برآورد بهتری از مقدار رطوبت در پتانسیل‌های صفر، 10، 33، 100، 300، 500 و 1500 کیلوپاسکال نسبت به پارامترهای نوع دوم هستند.

تقریباً در تمامی این توابع نمودی از بافت خاک (درصد ذرات خاک و یا میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک) وجود دارد. اخیراً، استفاده از میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک ترجیح داده می‌شود. زیرا با وارد کردن این دو پارامتر در توابع، اثر کل دامنه قطر ذرات خاک در نظر گرفته می‌شود. میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک را می‌توان با وارد کردن فراوانی گروه‌های قطری مختلفی از بافت خاک (مثلاً سه ذره و یا نه ذره) به دست آورد. از آنجا که در بیشتر مطالعات خاکشناسی فراوانی سه جزء از ذرات خاک (شن، سیلت و رس) اندازه‌گیری می‌شود، لذا محاسبه این پارامترها با سه ذره ساده‌تر و کم هزینه‌تر است. هدف از این پژوهش، مقایسه میزان تأثیر محاسبه میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات خاک با سه و نه جزء از ذرات در برآورد نقطه‌ای و پارامتریک (پارامترهای معادله وان‌گنوختن) منحنی رطوبتی خاک است. در برآورد نقطه‌ای، مقدار رطوبت خاک در پتانسیل‌های ماتریک معین برآورد می‌شود و در برآورد پارامتریک، پارامترهای مربوط به معادله چهار پارامتری وان‌گنوختن (1380) با فرض $m=1-\left(\frac{1}{n}\right)$ برآورد می‌شود. رابطه زیر معادله وان‌گنوختن و جایگاه پارامترهای آن را نشان می‌دهد.

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

$$m = 1 - \left(\frac{1}{n}\right)$$

در این معادله θ رطوبت خاک در مکش h ، θ_s رطوبت اشباع¹، θ_r رطوبت باقیمانده² خاک و α ، n پارامترهایی تجربی هستند که شکل منحنی رطوبتی را مشخص می‌کنند که n بدون بعد و α برحسب cm^{-1} می‌باشد.

مواد و روش‌ها

40 نمونه خاک با بافت متوسط از منطقه کرج به روش نمونه‌برداری تصادفی از عمق 0-30 سانتی‌متری

3- Reliability
4 - Multicollinearity

1- Saturation water content
2- Residual water content

نتایج و بحث

توابع گروه اول

این توابع در برگزیده میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات محاسبه شده با سه جزء از ذرات (شن، سیلت و رس)، درصد کربنات کلسیم، جرم ویژه ظاهری و درصد کربن آلی خاک به عنوان متغیرهای مستقل و نقاط مختلف رطوبتی و پارامترهای معادله وان گنوختن به عنوان متغیرهای وابسته می‌باشند. جدول 1 توابع ارائه شده برای برآورد نقاط مختلف رطوبتی و پارامترهای معادله وان گنوختن و ضریب تبیین تصحیح شده (R^2_{adj}) آنها را نشان می‌دهد.

توابع نقطه‌ای ارائه شده برای مکش‌های 0/0، 10، 33، 100، 300، 500 و 1500 کیلوپاسکال در سطح 0/1 درصد معنی دارند. مقدار نگهداشت رطوبت خاک در این مکش‌ها همبستگی بالایی با درصد کربن آلی، میانگین هندسی قطر ذرات و جرم ویژه ظاهری خاک دارد. نتایج نشان می‌دهد که بدلیل تأثیر ساختمان خاک بر نگهداری رطوبت در مکش‌های پایین، در این مکش‌ها تأثیر جرم ویژه ظاهری و میانگین هندسی قطر ذرات بیشتر از مکش‌های بالاست که با نتایج پژوهش‌های انجام شده توسط دیگر پژوهشگران مطابقت دارد (خداوردیلو و همایی، 1381؛ فرخیان و همایی، 1381a و قربانی و همایی، 1381). این امر بیانگر تأثیر توزیع تخلخل و ساختمان خاک بر نگهداشت رطوبت خاک در مکش‌های پایین است.

شکل 1 و 2 به ترتیب همبستگی بین مقادیر برآورد شده و اندازه‌گیری شده توسط توابع نقطه‌ای و توابع پارامتریک گروه اول را نشان می‌دهد.

توابع گروه دوم

این توابع در برگزیده میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی قطر ذرات محاسبه شده با سه جزء از ذرات، درصد کربنات کلسیم، جرم ویژه ظاهری و درصد کربن آلی خاک به عنوان متغیرهای مستقل و نقاط منحنی رطوبتی و پارامترهای معادله وان گنوختن به عنوان متغیرهای وابسته می‌باشند. جدول 2 توابع ارائه شده برای برآورد نقاط مختلف رطوبتی و پارامترهای معادله وان گنوختن و ضریب تبیین تصحیح شده آنها را نشان می‌دهد.

توابع نقطه‌ای ارائه شده و تابع برآورد کننده α در سطح 0/1 درصد و توابع برآورد کننده n و θ_r به ترتیب در سطح 1 و 5 درصد معنی دارند.

شکل 3 و 4 به ترتیب همبستگی بین مقادیر رطوبتی برآورد شده و اندازه‌گیری شده توسط توابع نقطه‌ای و توابع پارامتریک گروه دوم را نشان می‌دهد.

از بین پارامترهای اندازه‌گیری شده، با استفاده از نرم‌افزار Minitab11 و روش رگرسیون با بهترین زیر مجموعه¹، مناسب‌ترین متغیرهای مستقل برای برآورد نقاط منحنی رطوبتی و پارامترهای معادله وان گنوختن انتخاب و دو گروه معادلات رگرسیونی چند متغیره خطی ارائه شد (Ryan و Joiner، 1994).

برای ارزیابی اعتبار توابع، از پنج نمونه خاک که در ایجاد توابع بکار نرفته بودند، استفاده شد. برای این منظور با استفاده از توابع ارائه شده، رطوبت در مکش‌های 0/0، 10، 33، 100، 300، 500 و 1500 کیلوپاسکال و پارامترهای معادله وان گنوختن (θ_r و n, α) برای پنج نمونه خاک برآورد شد. سپس، GMER (میانگین هندسی نسبت خطا) و GSDER (انحراف معیار هندسی نسبت خطا) برای توابع به صورت زیر محاسبه گردید (Wagner و همکاران، 2001).

$$\varepsilon = \frac{\theta_p}{\theta_m}$$

$$GMER = \exp \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(\varepsilon_i) \right)$$

$$GSDER = \exp \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [\ln(\varepsilon_i) - \ln(GMER)]^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

در روابط بالا ε ، نسبت خطا، n تعداد نمونه‌ها، θ_p مقادیر برآورد شده رطوبت حجمی خاک، θ_m مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی خاک، GMER، میانگین هندسی نسبت خطا و GSDER، انحراف معیار هندسی نسبت خطا است.

GMER مساوی یک نشان دهنده تطبیق کامل بین داده‌های برآورد شده و اندازه‌گیری شده، GMER کوچکتر از یک نشان دهنده برآوردهای کمتر² از مقادیر اندازه‌گیری شده و GMER بزرگتر از یک نشان‌دهنده برآوردهای بیشتر³ از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. GSDER برابر یک نیز نشان‌دهنده تطبیق کامل⁴ مقادیر برآورد شده با مقادیر اندازه‌گیری شده است. و با افزایش خطای برآورد، GSDER افزایش می‌یابد. بنابراین بهترین مدل، مدلی است که دارای GMER نزدیک به یک و GSDER کوچک باشد (Wagner و همکاران، 2001).

5 - Best subset regression

1- Underestimate

2- Overestimate

3- Perfect matching

سنجش اعتبار توابع

جدول 3 مقادیر GMER و GSDER مربوط به توابع نقطه‌ای و پارامتریک گروه اول و دوم را نشان می‌دهد.

بررسی مقادیر GMER و GSDER ارائه شده در این جدول، نشان می‌دهد که GMER بجز در تابع برآورد کننده α در تمام توابع ارائه شده نزدیک به یک و GSDER نیز در تمام توابع ارائه شده کوچک می‌باشد. این امر بیانگر اعتبار کاربردی توابع ارائه شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده این تحقیق محاسبه میانگین هندسی قطر ذرات و انحراف معیار هندسی قطر ذرات با سه و یا نه جزء از ذرات تفاوت معنی‌داری در برآورد منحنی رطوبتی خاک ندارد. از آنجا که در تحقیقات خاک‌شناسی اکثراً فراوانی نسبی سه جزء از ذرات اندازه‌گیری می‌شود، استفاده از d_g و σ_g محاسبه شده با سه جزء از ذرات ساده‌تر است. لذا، پیشنهاد می‌شود در برآورد منحنی رطوبتی خاک از d_g و σ_g محاسبه شده با سه جزء از ذرات استفاده شود.

مقایسه مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده و برآورد شده نشان داد که استفاده از سه و یا نه جزء از ذرات برای محاسبه d_g و σ_g در ایجاد توابع برآورد کننده رطوبت در مکش‌های 0/0، 10، 33، 100، 300، 500، 1500 کیلوپاسکال اختلاف معنی‌داری ایجاد نمی‌کند. ولی در برآورد پارامتریک منحنی رطوبتی خاک استفاده از نه جزء از ذرات در ایجاد توابع نسبت به سه جزء برآورد بهتری از رطوبت در مکش‌های 10، 33 و 100 کیلوپاسکال داشت و در مکش‌های 300، 500 و 1500 کیلوپاسکال استفاده از سه جزء نسبت به نه جزء برآورد بهتری از رطوبت را نشان داد. توابع پارامتریک گروه اول و دوم نشان می‌دهد که α و n در استفاده از 9 جزء برای محاسبه میانگین هندسی قطر ذرات و انحراف معیار هندسی قطر ذرات برآورد بهتری داشته ولی در کل استفاده از توابع گروه اول بدلیل راحتی اندازه‌گیری سه جزء نسبت به اندازه‌گیری 9 جزء بهتر از توابع گروه دوم می‌باشد.

شکل 5 مقدار ضریب تبیین توابع برآورد کننده منحنی رطوبتی خاک را در پتانسیل‌های ماتریک مختلف برای توابع گروه اول و دوم نشان می‌دهد.

جدول 1- توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک گروه اول

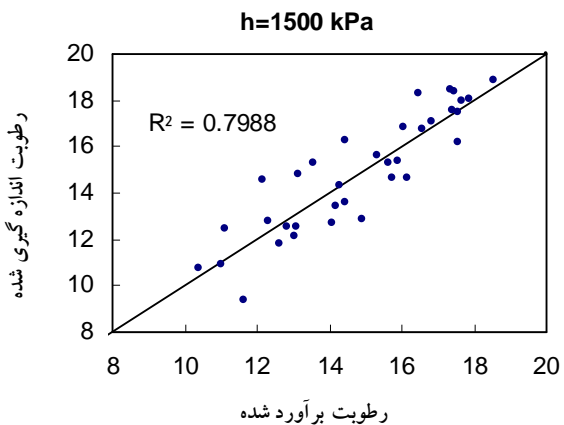
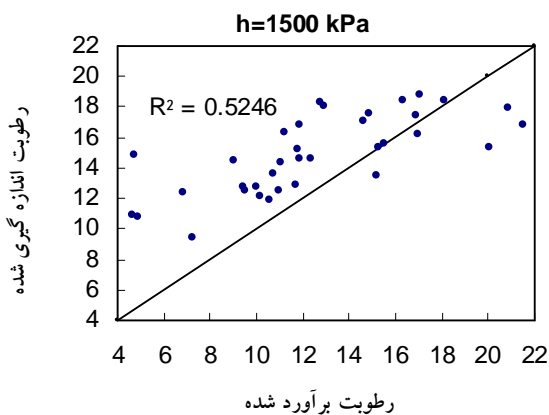
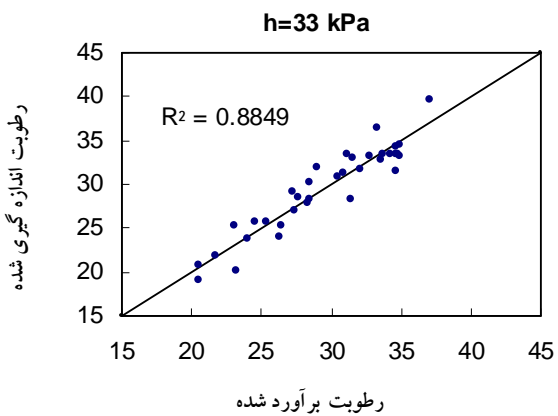
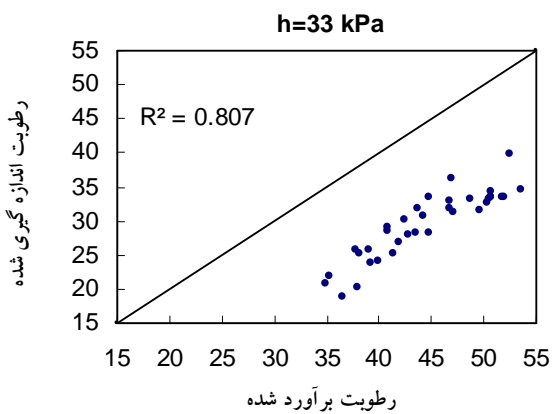
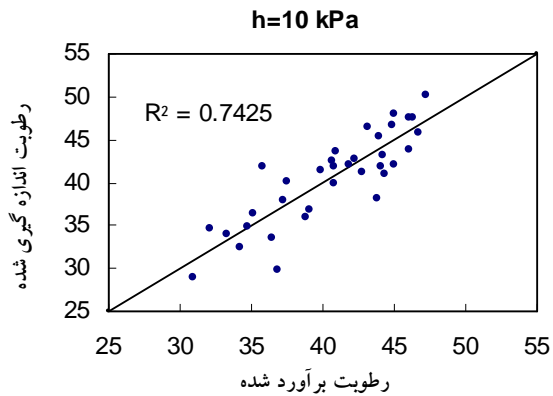
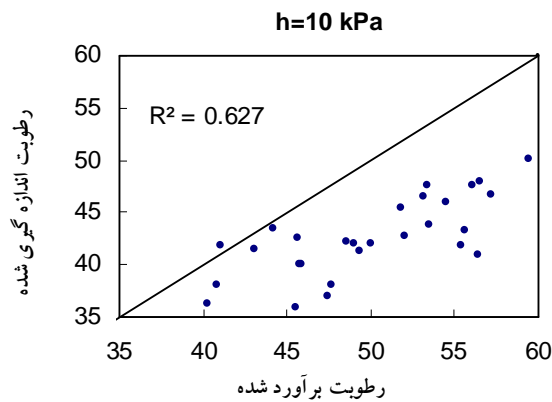
شماره تابع	متغیرهای وابسته	توابع	R^2_{adj}
1	θ_s	$-55/9 + 32/3 Bd + 36/6 O.C^* - 17/0 d_g^*$	0/785***
2	θ_{10kPa}	$-13/0 + 15/3 Bd + 11/0 O.C^* - 15/2 d_g^*$	0/718***
3	θ_{33kPa}	$-31/9 + 17/3 Bd + 18/2 O.C^* - 13/9 d_g^*$	0/874***
4	θ_{100kPa}	$-21/6 + 13/8 Bd + 10/9 O.C^* - 11/1 d_g^*$	0/794***
5	θ_{300kPa}	$-17/5 + 11/7 Bd + 7/4 O.C^* - 9/58 d_g^*$	0/785***
6	θ_{500kPa}	$-17/3 + 12/0 Bd + 7/39 O.C^* - 7/98 d_g^*$	0/73***
7	$\theta_{1500kPa}$	$-15/9 + 10/7 Bd + 4/6 O.C^* - 7/57 d_g^*$	0/779***
8	θ_r	$0/209 - 0/157 O.C^* - 0/0316 d_g^*$	0/128*
9	α^*	$-0/0099 + 0/115 O.C^* - 0/0273 d_g^* + 0/00351 \sigma_g - 0/0324 CaCO_3$	0/392**
10	n^*	$0/922 - 0/0134 \sigma_g + 0/0572 d_g^* - 0/291 O.C^*$	0/309**

$O.C^*$ ، d_g^* ، α^* و n^* به ترتیب، مقادیر نرمال شده $O.C$ ، d_g ، α و n هستند.

جدول 2- توابع انتقالی نقطه‌ای و پارامتریک گروه دوم

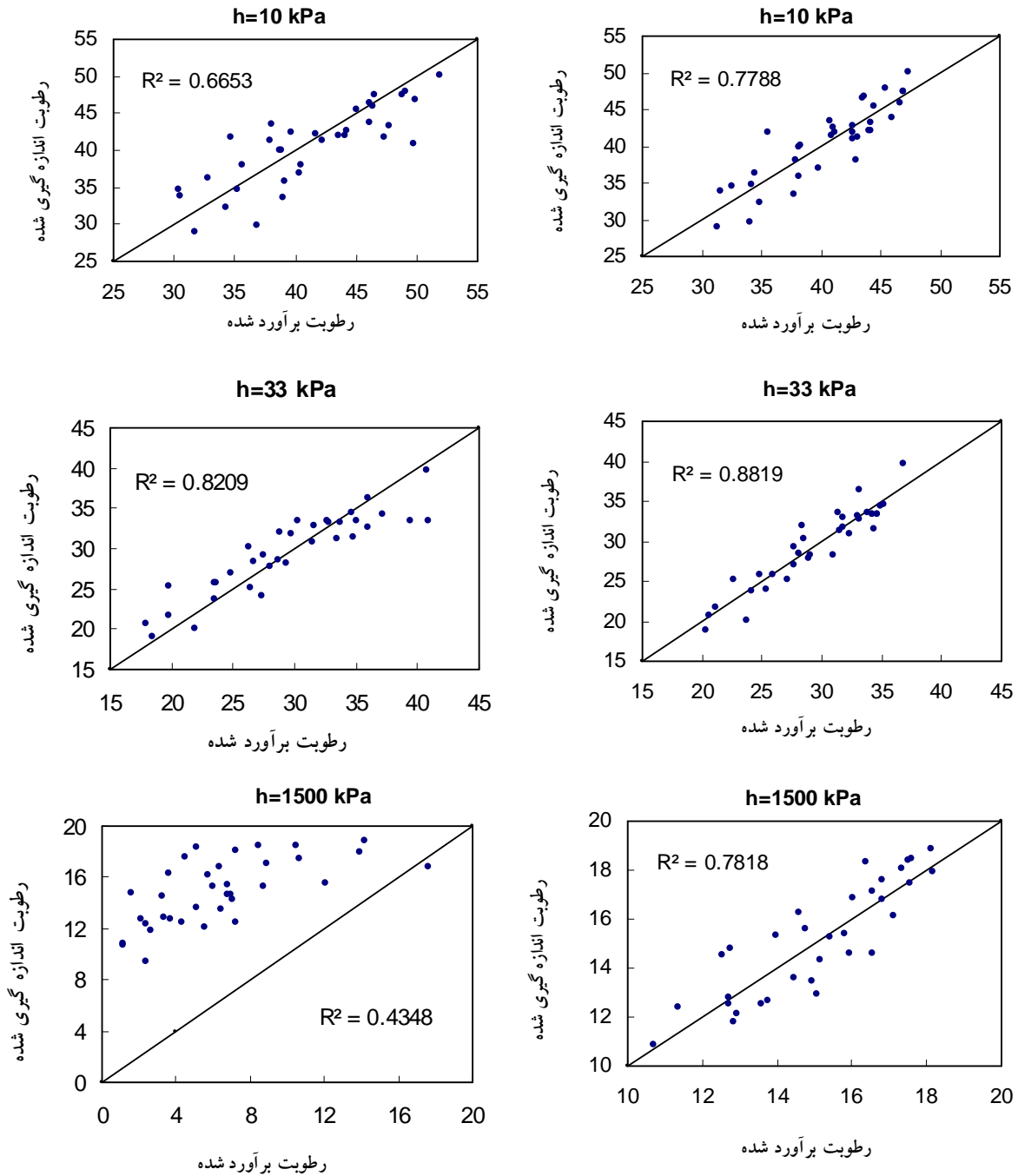
شماره تابع	متغیرهای وابسته	توابع	R^2_{adj}
1	θ_s	$-65/8 + 35/6 O.C^* + 31/8 Bd - 19/6 d_g^*$	0/785***
2	θ_{10kPa}	$-17/2 + 17/2 Bd + 9/67 O.C^* - 16/3 d_g^* - 0/722 \sigma_g$	0/749***
3	θ_{33kPa}	$-39/4 - 15/9 d_g^* + 17/5 O.C^* + 16/8 Bd$	0/87***
4	θ_{100kPa}	$-27/4 - 12/6 d_g^* + 10/4 O.C^* + 13/3 Bd$	0/781***
5	θ_{300kPa}	$-25/7 + 9/62 Bd + 7/25 O.C^* - 11/8 d_g^* + 0/508 \sigma_g$	0/772***
6	θ_{500kPa}	$-24/9 + 9/93 Bd + 7/33 O.C^* - 10/1 d_g^* + 0/542 \sigma_g$	0/728***
7	$\theta_{1500kPa}$	$-22/5 + 8/79 Bd + 4/57 O.C^* - 9/32 d_g^* + 0/458 \sigma_g$	0/753***

8	θ_r	$0/189 - 0/0361 d_g^* - 0/158 O.C^*$	$0/126^*$
9	α^*	$0/0817 + 0/123 O.C^* - 0/0486 d_g^* + 0/00865 \sigma_g - 0/00338 CaCO_3$	$0/418^{***}$
10	n^*	$0/989 - 0/262 O.C^* + 0/146 d_g^* - 0/0205 \sigma_g + 0/00376 CaCO_3$	$0/338^{**}$



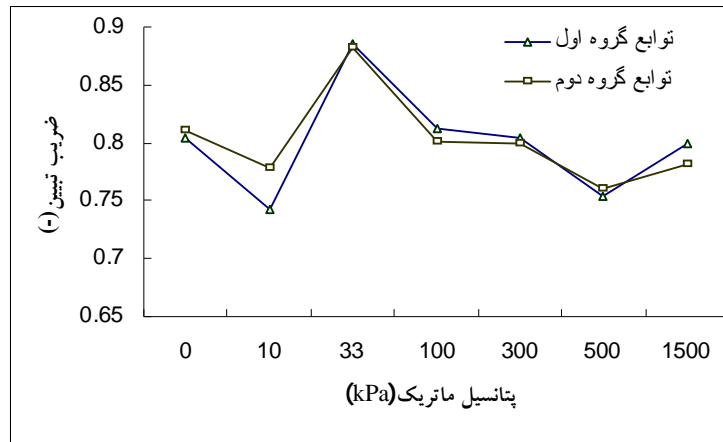
شکل 2- مقایسه همبستگی بین مقادیر رطوبتی اندازه گیری شده و برآورد شده توسط توابع پارامتریک گروه اول

شکل 1- مقایسه همبستگی بین مقادیر رطوبتی اندازه گیری شده و برآورد شده توسط توابع نقطه‌ای گروه اول



شکل 4- مقایسه همبستگی بین مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط توابع پارامتریک گروه دوم

شکل 3- مقایسه همبستگی بین مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط توابع نقطه‌ای گروه دوم



شکل 5- ضریب تبیین توابع گروه اول و دوم در پتانسیل‌های ماتریک مختلف

جدول 3- نتایج سنجش اعتبار توابع گروه اول و دوم با ملاکهای GMER و GSDER

شماره تابع	متغیر وابسته	توابع گروه اول		توابع گروه دوم	
		GMER	GSDER	GMER	GSDER
1	θ_s	1/061	1/068	0/967805	1/12375
2	θ_{10kPa}	1/009	1/034	0/973397	1/13805
3	θ_{33kPa}	0/989	1/024	0/945556	1/13467
4	θ_{100kPa}	0/989	1/010	0/932453	1/14716
5	θ_{300kPa}	0/996	1/010	0/968137	1/13072
6	θ_{500kPa}	0/994	1/038	0/975022	1/14577
7	$\theta_{1500kPa}$	0/992	1/054	0/949016	1/17389
8	θ_r	0/994	1/336	0/909580	1/35599
9	α^*	12/0799	1/77219	6/12948	1/91707
10	n^*	1/003	1/094	0/968893	1/08186

فهرست منابع:

1. آریا، پروین و میرخانی، رسول، 1384، روشهای اندازه‌گیری ویژگیهای فیزیکی خاک، نشریه فنی شماره 479، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
2. برزگر، عبدالرحمن، 1380، مبانی فیزیک خاک، چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
3. خداوردیلو، حبیب و همایی، مهدی، 1381، اشتقاق توابع انتقالی خاک به منظور برآورد منحنی مشخصه رطوبتی، مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، شماره 10، جلد 3، ص 35-46.
4. رضایی، عبدالمجید و سلطانی، افشین، 1377، مقدمه‌ای بر تحلیل رگرسیونی کاربردی، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
5. علی‌احیایی، مریم و بهبهانی‌زاده، علی اصغر، 1372، شرح روش‌های تجزیه شیمیایی خاک، جلد اول، نشریه شماره 893، مؤسسه تحقیقات خاک و آب.
6. فرخیان، احمد و همایی، مهدی 1381a، اشتقاق توابع انتقالی خاک‌های گچی به منظور برآورد نقطه‌ای منحنی رطوبتی، مجموعه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران.

7. فرخیان، احمد و همایی، مهدی 1381b. برآورد پارامتریک ویژگی‌های هیدرولیکی خاک‌های گچی با استفاده از توابع انتقالی خاک، مجموعه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران.
8. قربانی دشتکی، شجاع و همایی، مهدی، 1381. برآورد پارامتریک توابع هیدرولیکی بخش غیراشباع خاک با استفاده از توابع انتقالی، مجموعه مقالات هشتمین کنگره علوم خاک ایران.
9. Bouma, J. 1989. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Adv. Soil Sci. Soc. Am. J.* 9: 177-213.
10. Briggs, L. J., and Shantz, H. L. 1912. The wilting coefficient and its indirect measurement. *Botanical Gazette.* 53: 20-37.
11. Gupta, S. C. and W. E. Larson. 1979. Estimating soil water retention characteristic from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resources. Res.* 15: 1633-1635
12. Minasny, B., A. B. McBratney and K. L. Bristow. 1999. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water retention curves. *Geoderma.* 93: 225-253.
13. Rawls, W. J., Brakensiek, D.L. and Saxton, K. E. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE.* 25: 1316- 1320.
14. Ryan, B. F. and B. L. Joiner. 1994. *Minitab Handbook.* Durbuy press. 483 pp.
15. Salchow, E., R. Lal, N. R. Fausey and A. Ward. 1966. Pedotransfer functions for variable alluvial soil in southern Ohio. *Geoderma.* 73: 165-181.
16. Salter, P.J. Berry. G., and Williams, J. B. 1966. The influence of texture on the moisture characteristics of soils: III. Quantitative relationships between particle size, composition and available water capacity. *J. Soil Sci.* 17: 93-98.
17. Shirazi, M. A. and L. Borsma. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 142-147.
18. Van Genuchten, M. T., F. J. Leij and S. R. Yates, (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils". EPA/ 600/2-91/ 065, US Salinity Laboratory, USDA- ARS, Riverside, CD, pp: 85.
19. Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
20. Vereecken, H., J. Meas., J. Fegen and P. Davius. 1989. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 148 (6): 389-403.
21. Wagner, B., V. R. Tarnawski, V. Hennings, V. Muller, G. Wessolek and R. Plagge. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma.* 102: 275-297.