

## تخمین منحنی مشخصه‌ی آب خاک بر مبنای منحنی دانه‌بندی و نسبت پوکی متغیر برای خاکهای مورد مطالعه در منطقه‌ی مرودشت در استان فارس

حمیدرضا فولادمند<sup>۱\*</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۹/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۳/۲/۶

### چکیده

به رابطه‌ی بین رطوبت و مکش آب خاک، منحنی مشخصه‌ی آب خاک گفته می‌شود، که اندازه‌گیری آن وقت‌گیر و پرهزینه است. از روش‌های تخمین منحنی مشخصه، استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک است، که در آن از فراسنج مقیاس ( $\alpha$ ) استفاده می‌شود. در این پژوهش از ۹ نمونه خاک مختلف منطقه‌ی مرودشت در استان فارس با بافت‌های رس لایی و متوسط رسی لایی استفاده، و منحنی مشخصه‌ی هر خاک تعیین گردید. سپس منحنی دانه‌بندی هر خاک با کاربرد روش فولادمند و سپاسخواه (FS) و فولادمند و منصوری (FM) تخمین زده شد. هم‌چنین، در این پژوهش، از نسبت پوکی متغیر خاک در قسمت‌های مختلف منحنی دانه‌بندی بهره‌وری گردید و برای تعیین فراسنج مقیاس دو روش خطی با نسبت پوکی متغیر (LN) و لجستیک با نسبت پوکی متغیر (LG) در نظر گرفته شدند. بر این اساس، منحنی مشخصه‌ی هر خاک از چهار حالت مختلف تخمین زده شد و با منحنی مشخصه تعیین گردیده‌ی هر خاک مقایسه شد. نتایج نشان دادند که شبیه FM برای تخمین منحنی دانه‌بندی، و به دنبال آن برآورد منحنی مشخصه‌ی مناسبتر از شبیه FS می‌باشد. هم‌چنین، بطور کلی، نتایج نشان دادند که حالت FM-LN مناسبترین حالت برای تخمین منحنی مشخصه‌ی خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** منحنی مشخصه‌ی آب خاک، منحنی دانه‌بندی، روش خطی، روش لجستیک، نسبت پوکی متغیر

<sup>۱</sup> - دانشیار آبیاری و زهکشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت

\* - نویسنده مسئول مقاله: hrfoolad@yahoo.com

## مقدمه

همین راستا، رخشنده رو و اسلامی حقیقت (۱۳۸۷) روشی را برای تخمین منحنی مشخصه بر مبنای مقدار نسبت پوکی، و یا تخلخل متغیر خاک ارائه نموده، و در ادامه فولادمند و حبیبی (۲۰۱۲) روش فوق را توسعه دادند که منجر به بهبود تخمین منحنی مشخصه‌ی آب خاک بر مبنای شبیه آریا و همکاران (۱۹۹۹) گردید.

از طرف دیگر، شبیه آریا و همکاران (۱۹۹۹) برای تخمین منحنی مشخصه به داده‌های منحنی دانه‌بندی نیاز دارد، اما در بسیاری از خاکها تنها اطلاعات اندازه‌گیری شده درصد ذرات رس، لای و شن خاک در دسترس می‌باشد؛ لذا، لازم است که ابتدا منحنی دانه‌بندی خاک را تخمین زد، سپس به تخمین منحنی مشخصه‌ی آب خاک دست یافت. برای تخمین منحنی دانه‌بندی خاک نیز روشهای مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به شبیه‌های فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶) و فولادمند و منصوری (۲۰۱۳) اشاره نمود.

با توجه به موارد ذکر شده، هدف از این تحقیق تخمین منحنی مشخصه‌ی آب خاک با استفاده از تخمین منحنی دانه‌بندی، و در نظر گرفتن نسبت پوکی متغیر برای چند نمونه خاک در منطقه‌ی مرودشت در استان فارس می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق از اطراف شهرستان مرودشت در استان فارس ۹ نمونه خاک سطحی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری تهیه شد؛ و چگالی ظاهری و بافت هر خاک در آزمایشگاه تعیین گردید. مقدار درصد ذرات رس (ذرات صفر تا ۰/۰۰۲ میلی‌متر)، لای (۰/۰۰۲ تا ۰/۰۵ میلی‌متر) و شن (۰/۰۵ تا ۲ میلی‌متر) هر خاک نیز تعیین گردید تا با بهره‌وری از آنها امکان تخمین منحنی دانه‌بندی فراهم گردد. منحنی مشخصه‌ی هر نمونه خاک نیز با ترکیب روشهای ستون آویزان (برای مکشهای صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ سانتی‌متر) و دستگاه صفحات فشاری (برای مکشهای ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد. برخی ویژگیهای اندازه‌گیری شده‌ی نمونه‌های خاک به کار رفته در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده‌اند، و چنانچه در این جدول مشاهده

منحنی مشخصه‌ی آب خاک، یا منحنی رطوبتی از مهمترین ویژگیهای فیزیکی خاک است که بیانگر رابطه‌ی بین رطوبت و مکش ماتریک آب خاک می‌باشد. تعیین این منحنی در حل مسائل مربوط به هدایت آبی غیر اشباع خاک، حرکت املاح در خاک و تشخیص رفتار فیزیکی خاک در رطوبتهای مختلف کارگشا بوده، و می‌توان کاربردهای فراوان آن را در مسائل آب و خاک به وضوح مشاهده نمود. از آنجا که اندازه‌گیری این منحنی در آزمایشگاه وقت‌گیر و پرهزینه است، لذا محققین زیادی در پی ارائه‌ی روشهایی برای تخمین آن بوده‌اند. از جمله روشهای تخمین منحنی مشخصه، استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک است که اولین بار به وسیله‌ی آریا و پاریس (۱۹۸۱) پیشنهاد شد که اساس آن شباهت ظاهری میان منحنی دانه‌بندی و منحنی مشخصه می‌باشد. در این روش از یک فراسنج مقیاس‌بندی به نام  $\alpha$  استفاده شد که در تحقیق آریا و پاریس (۱۹۸۱) برای کلیه‌ی خاکها برابر با مقدار ثابت ۱/۳۸ منظور گردید. در ادامه، تحقیقات آریا و همکاران (۱۹۹۹) نشان دادند که مقدار  $\alpha$  برای بافتهای مختلف خاک یکسان نیست، و در بخشهای مختلف منحنی دانه‌بندی یک خاک معین هم ثابت نمی‌باشد؛ از این‌رو، این محققین روشهای خطی و لجستیک را برای تعیین مقدار  $\alpha$  در بعضی از بافتهای خاک ارائه نمودند. در این زمینه، تحقیقات پرشماری نیز در ایران انجام شده است (رضایی و نیشابوری، ۱۳۸۱؛ خوشنودیزدی و قهرمان، ۱۳۸۳؛ فولادمند و همکاران، ۱۳۸۳؛ رضایی و همکاران، ۱۳۸۴؛ فولادمند، ۱۳۸۶؛ قنبریان علویچه و همکاران، ۱۳۸۷؛ رضایی و همکاران، ۱۳۹۰؛ فولادمند، ۱۳۹۰؛ سپاسخواه و رفیعی، ۲۰۰۸). از طرفی، در شبیه آریا و همکاران (۱۹۹۹) و سایر تحقیقات ذکر شده نسبت پوکی و یا تخلخل یک توده خاک به صورت کلی و یا میانگین (برابر یک مقدار ثابت) در نظر گرفته شده است. این در حالی است که تخلخل در نقاط مختلف خاک به عوامل پرشماری نظیر اندازه دانه‌های خاک، تراکم و آرایش آنها بستگی داشته، و در نتیجه نسبت پوکی و یا تخلخل در قسمتهای مختلف توده‌ی خاک متغیر خواهد بود. در

می‌شود بافت خاک غالب منطقه رس لایی و متوسط رسی لایی می‌باشد.

جدول ۱- ویژگیهای ۹ نمونه خاک به کار رفته در این تحقیق

شماره خاک	بافت خاک	رس (%)	لای (%)	شن (%)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	تخلخل ثابت خاک (%)
۱	رس لایی	۴۲	۵۰	۸	۱/۱۸	۴۴/۴
۲	رس لایی	۴۶	۵۰	۴	۱/۴۳	۴۵/۶
۳	رس لایی	۴۹	۴۲	۹	۱/۴۲	۴۱/۱
۴	متوسط رسی لایی	۳۲	۵۶	۱۲	۱/۲۴	۴۹/۹
۵	متوسط رسی لایی	۳۹	۵۳	۸	۱/۳۴	۴۵/۳
۶	متوسط رسی لایی	۳۴	۶۰	۶	۱/۳۵	۴۴/۶
۷	متوسط رسی لایی	۳۰	۶۲	۸	۱/۳۹	۴۵/۸
۸	متوسط رسی لایی	۲۸	۶۲	۱۰	۱/۳۰	۵۲/۳
۹	متوسط رسی لایی	۳۷	۴۵	۱۸	۱/۳۳	۴۵/۵

(بر حسب اعشار)،  $Cl+Si$  : کسر مربوط به ذرات کوچکتر از لای خاک به صورت تجمعی،  $Cl+Si+S$  : کسر مربوط به ذرات کوچکتر از اندازه یا قطر در نظر گرفته شده از شن خاک،  $R$  : شعاع ذرات خاک بر حسب میکرومتر و  $W$  : کسر مربوط به ذرات کوچکتر از شعاع  $R$  می‌باشد. با استفاده از رابطه‌ی (۷) می‌توان از روی مقادیر رس، لای و شن خاک، مقدار  $W$  را برای هر اندازه شعاع  $R$  محاسبه و منحنی دانه‌بندی خاک را رسم کرد. مقادیر  $I_0$ ،  $I_1$  و  $I_2$  به‌وسیله‌ی اسکگر و همکاران (۲۰۰۱) به ترتیب برابر ۱، ۲۵ و ۱۲۵ میکرومتر، که حد نهایی شعاع ذرات رس، لای و شن ریز می‌باشند، در نظر گرفته شده‌اند. به عبارت دیگر، اسکگر و همکاران (۲۰۰۱) فقط قسمتهای شن خیلی ریز و شن ریز را در نظر گرفته‌اند، در صورتی که اطلاعات موجود معمولاً شامل کل قسمت شن خاک می‌باشد، اما در صورت در نظر گرفتن کل قسمت شن خاک، مقدار تجمعی  $Cl+Si+S$  برابر با یک می‌شود و لذا مقدار عددی  $Z$  نامعین شده و در این صورت امکان تخمین منحنی دانه‌بندی وجود ندارد. فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶) برای بهبود شبیه اسکگر و همکاران (۲۰۰۱) مقدار  $I_2$  را برابر با ۹۹۹ میکرومتر (نزدیک به شعاع ۱۰۰۰ میکرومتر که حد نهایی قسمت شن خاک است) در نظر گرفته و برای تعیین مقدار عددی  $Cl+Si+S$  در رابطه‌ی (۴) با در نظر گرفتن شعاع ۹۹۹ میکرومتر، از میان‌یابی بین درصد تجمعی ذرات لای (شعاع ۲۵ میکرومتر) و کل شن خاک (شعاع ۱۰۰۰ میکرومتر)

در این تحقیق ابتدا منحنی دانه‌بندی هر خاک با استفاده از درصد ذرات رس، لای و شن از دو روش زیر تخمین زده شد، و در ادامه با تقسیم منحنی دانه‌بندی به قطعات پرشمار، امکان تخمین منحنی مشخصه فراهم گردید.

**شبیه اسکگر و همکاران (۲۰۰۱) توسعه یافته به‌وسیله‌ی فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶):** این شبیه برای تخمین منحنی دانه‌بندی خاک با کاربرد درصد مقادیر رس، لای و شن خاک به صورت روابط زیر می‌باشد (اسکگر و همکاران، ۲۰۰۱):

$$\beta_1 = \frac{1}{\ln \frac{r_1 - r_0}{r_2 - r_0}} \quad (1)$$

$$\beta_2 = \beta_1 \ln \frac{r_1 - r_0}{r_0} \quad (2)$$

$$v = \ln \frac{(cl + si)^{-1} - 1}{cl^{-1} - 1} \quad (3)$$

$$z = \ln \frac{(cl + si + s)^{-1} - 1}{cl^{-1} - 1} \quad (4)$$

$$c = \beta_1 \ln \frac{v}{z} \quad (5)$$

$$u = \frac{(-v)^{1-\beta_2}}{(-z)^{-\beta_2}} \quad (6)$$

$$W = \frac{1}{1 + (cl^{-1} - 1) \exp \{-u(R - 1)^c\}} \quad (7)$$

که در آنها  $cl$ : کسر مربوط به ذرات کوچکتر از رس خاک

ب- شبیه فولادمند و منصوری (۲۰۱۳) جهت تخمین منحنی دانه‌بندی بر مبنای شبیه فردلاند و همکاران (۲۰۰۰): فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) شبیهی را برای برآزش بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی دانه‌بندی ارائه داده‌اند که به صورت رابطه‌ی زیر می‌باشد:

$$W = \frac{1}{\left\{ \text{Ln} \left[ \exp(1) + \left( \frac{a}{d} \right)^n \right] \right\}^m} \left\{ 1 - \left[ \frac{\text{Ln} \left( 1 + \frac{d_r}{d} \right)}{\text{Ln} \left( 1 + \frac{d_r}{d_m} \right)} \right]^7 \right\} \quad (8)$$

جدول ۲- ضرایب اصلاحی برای تعیین مقدار کسر مربوط به ذرات کوچکتر از شعاع‌های مختلف (فولادمند و سپاسخواه، ۲۰۰۶).

شعاع (میکرومتر)	ضریب اصلاحی برای خاک‌های با مقدار لای کمتر از ۶۰ درصد	ضریب اصلاحی برای خاک‌های با مقدار لای بیشتر از ۶۰ درصد
۱	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰
۱/۵	۰/۳۹۳	۰/۹۰۷
۲/۵	۰/۳۵۱	۰/۹۱۹
۵	۰/۳۷۷	۰/۹۴۲
۱۰	۰/۴۹۳	۰/۹۶۲
۱۵	۰/۶۸۱	۰/۹۸۳
۲۰	۰/۸۹۱	۰/۹۹۱

که در آن  $d$ : قطر ذرات خاک بر حسب میلی‌متر،  $W$ : کسر مربوط به ذرات کوچکتر از هر قطر،  $d_m$ : برابر مقدار ثابت  $0.0001$  میلی‌متر و  $a$ ،  $m$ ،  $n$  و  $d_r$  فراسنج‌های معادله هستند که باید معلوم باشند. شبیه فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) قادر به تخمین منحنی دانه‌بندی نیست، زیرا فراسنج‌های رابطه‌ی (۸) تنها با وجود داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی دانه‌بندی تعیین می‌گردند. از این‌رو فولادمند و منصوری (۲۰۱۳) با تعیین فراسنج‌های رابطه‌ی (۸) امکان تخمین منحنی دانه‌بندی را بر مبنای شبیه فردلاند و همکاران (۲۰۰۰) فراهم نمودند. برای این منظور، این دو محقق مقدار  $d_r$  را برابر با  $1000$  فرض کرده و برای سه فراسنج دیگر روابط زیر را به دست آوردند:

$$a = 0.18612 + 0.00088\text{Clay} - 0.00265\text{Silt} + 0.00393\delta_g \quad (9)$$

$$m = 0.52961 + 0.01728\text{Sand} - 1.63977d_g - 0.04897\delta_g \quad (10)$$

$$n = 3.72\exp(-0.03\text{Clay}) \quad (11)$$

که در آنها  $\text{Clay}$ ،  $\text{Silt}$  و  $\text{Sand}$ : به ترتیب درصد ذرات رس، لای و شن خاک می‌باشند. همچنین  $d_g$  و  $\delta_g$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار هندسی ذرات خاک می‌باشند که از روابط زیر تعیین می‌شوند (شیرازی و بورزما، ۱۹۸۴):

$$q = 0.01(\text{ClayLn}0.001 + \text{SiltLn}0.026 + \text{SandLn}1.025) \quad (12)$$

$$d_g = \exp(q) \quad (13)$$

$$t^2 = 0.01\{\text{Clay}(\text{Ln}0.001)^2 + \text{Silt}(\text{Ln}0.026)^2 + \text{Sand}(\text{Ln}1.025)^2\} - q^2 \quad (14)$$

$$\delta_g = \exp(t) \quad (15)$$

آریا و همکاران (۱۹۹۹) روش‌های خطی و لجستیک را بر مبنای نسبت پوکی ثابت برای تعیین مقدار فراسنج مقیاس  $\alpha$  پیشنهاد نموده‌اند که به ترتیب به صورت روابط زیر می‌باشند:

$$\alpha_i = \frac{a + b \text{Log} \frac{W_i}{R_i^3}}{\text{Log} n_i} \quad (18)$$

(۱۹)

$$Y + \Delta Y = \frac{Y_f Y_{in}}{Y_{in} + (Y_f - Y_{in}) \exp \{-\mu(x + \Delta x)\}}$$

که در آنها  $\alpha_i$ : مقدار فراسنج مقیاس در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی،  $W_i$ : جرم ذرات جامد خاک در واحد جرم در قسمت  $i$  ام منحنی دانه بندی بر حسب گرم بر گرم،  $R_i$  و  $n_i$  قبلاً تعریف شده‌اند،  $a$  و  $b$ : ضرایب معادله،  $Y$ : نشان‌دهنده‌ی متغیر وابسته  $\text{Log} Ni$  (تعداد ذرات کروی فرضی خاک در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی می‌باشد)،  $X$ : نشان‌دهنده‌ی متغیر مستقل  $\text{Log} n_i$ ،  $\mu$ : ضریب شدت،  $\Delta x = \Delta \text{Log} n_i$ ،  $\Delta Y = \Delta \text{Log} Ni$  شاخص  $i_n$ : نشان‌دهنده‌ی مقدار اولیه (حد پایین)  $\text{Log} Ni$  و شاخص  $f$ : نشان‌دهنده‌ی مقدار انتهایی (حد بالایی)  $\text{Log} Ni$  می‌باشد. جزئیات بیشتر موارد ذکر شده به‌وسیله‌ی فولادمند و همکاران (۱۳۸۳) شرح داده شده، و ضرایب دو روش فوق برای بافتهای رس لابی و متوسط رسی لابی نیز به‌وسیله‌ی آنها به دست آمده و در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

که در آنها Silt، Clay و Sand: به ترتیب درصد ذرات رس، لای و شن خاک می‌باشند.

از طرف دیگر، مقادیر رطوبت و مکش آب خاک جهت تخمین منحنی مشخصه‌ی آب خاک بر مبنای شبیه آریا و همکاران (۱۹۹۹) از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\theta_i = \rho_b \sum_{j=1}^i V_{Vj} \quad (16)$$

$$h_i = \frac{0.18}{R_i (en_i^{1-\alpha})^{0.5}} \quad (17)$$

که در آنها  $\theta_i$ : مقدار رطوبت حجمی آب خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب مترمکعب بر مترمکعب،  $\rho_b$ : چگالی ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب،  $V_{Vj}$ : حجم خلل و فرج خاک در واحد جرم در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب سانتی متر مکعب بر گرم،  $h_i$ : مکش آب خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب سانتی متر،  $R_i$ : میانگین اندازه‌ی شعاع ذرات خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب سانتی متر،  $n_i$ : تعداد کل ذرات کروی خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب یک بر گرم،  $\alpha$ : فراسنج مقیاس و  $e$ : نسبت پوکی ثابت خاک می‌باشد. لازم به ذکر است که مقدار  $W_i$  تخمین زده شده به‌ازاء شعاع‌های مختلف از دو روش ذکر شده تخمین منحنی دانه‌بندی در این تحقیق در تعیین مقدار  $V_{Vj}$  نقش دارد. جزئیات کامل شبیه ذکر شده به‌وسیله‌ی فولادمند و همکاران (۱۳۸۳) شرح داده شده، و به دلیل زیاد بودن روابط موجود از آوردن آنها خودداری شده است.

جدول ۳- ضرایب روش‌های خطی و لجستیک برای تعیین  $\alpha$

$\Delta \text{Log} n_i$	$\Delta \text{Log} N_i$	$\mu$	$(\text{Log} N_i)_f$	$(\text{Log} N_i)_{in}$	$b$	$a$	بافت خاک
۱/۹۹۳	۳/۸۱۱	۰/۳۴۵	۲۱/۰۱۹	۱/۵۶۸	۱/۳۲۱	-۲/۵۶۰	رس لابی
۱/۳۳۹	۲/۸۵۷	۰/۴۰۱	۲۰/۳۵۲	۱/۱۴۴	۱/۳۳۷	-۲/۵۲۰	متوسط رسی لابی

برای در نظر گرفتن نسبت پوکی متغیر از رابطه زیر استفاده کردند:

$$e_i = k R_i^m \quad (20)$$

که در آن  $e_i$ : نسبت پوکی متغیر متغیر خاک در هر قسمت از منحنی دانه بندی است که به جای مقدار ثابت  $e$  در رابطه (۱۷) وارد می‌شود.  $k$  و  $m$ : نیز ضرایب ثابت

از آن‌جا که تحقیقات فولادمند و حبیبی (۲۰۱۲) نشان دادند که استفاده از نسبت پوکی متغیر منجر به بهبود تخمین منحنی مشخصه از شبیه آریا و همکاران (۱۹۹۹) می‌شود، لذا در این تحقیق نیز از نسبت پوکی متغیر استفاده گردیده است. فولادمند و حبیبی (۲۰۱۲)

فراسنج مقیاس  $\alpha$ ، و در مجموع در چهار حالت تخمین زده شد، و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه‌ی هر خاک مقایسه گردید. برای مقایسه‌ی نتایج تخمین با مقادیر اندازه‌گیری از خطای معیار به صورت رابطه‌ی زیر استفاده شد:

(۲۴)

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (\theta_{mi} - \theta_{ei})^2}{N - 1}}$$

که در آن SE: خطای معیار،  $\theta_{mi}$  و  $\theta_{ei}$ : به ترتیب رطوبت حجمی خاک اندازه‌گیری و تخمین زده شده در هر مکش و N تعداد داده‌ها در هر خاک است. هر چه مقدار SE کمتر باشد، اختلاف بین مقادیر تخمین زده شده با مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر بوده و مناسبتر است.

در ادامه، روش‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه برمبنای تخمین منحنی دانه‌بندی برای سادگی کار به صورت علایم اختصاری معرفی شده در جدول ۴ بیان شده‌اند.

معادله می‌باشند. با تقسیم‌بندی منحنی دانه‌بندی به ۱۹ شعاع توصیه شده‌ی فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶) که قبلاً به آن اشاره شد، مقدار k با استفاده از مقدار نسبت پوکی ثابت خاک (e) از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید (فولادمند و حبیبی، ۲۰۱۲):

$$k = \frac{19e}{\sum_{i=1}^{19} R_i^m} \quad (21)$$

مقادیر ضریب m نیز برای روشهای خطی و لجستیک جهت برآورد فراسنج مقیاس  $\alpha$  از روابط زیر به دست می‌آیند (فولادمند و حبیبی، ۲۰۱۲):

(۲۲)

$$m_{Lin} = 8.27\delta_g^{0.03} - 8.82$$

$$m_{Log} = 7.73\delta_g^{0.01} - 7.96 \quad (23)$$

که در آنها  $m_{Log}$  و  $m_{Lin}$ : به ترتیب مربوط به روش‌های خطی و لجستیک می‌باشند و  $\delta_g$  انحراف معیار هندسی ذرات خاک است.

به این ترتیب، منحنی مشخصه‌ی آب خاک از ترکیب دو روش تخمین منحنی دانه‌بندی و دو روش تخمین

جدول ۴- علایم اختصاری به کار رفته برای معرفی حالت‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه.

روش تخمین منحنی دانه‌بندی	روش تخمین منحنی مشخصه	علامت اختصاری	روش تخمین منحنی دانه‌بندی	روش تخمین منحنی مشخصه	علامت اختصاری
فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶)	لجستیک با نسبت پوکی متغیر	FS-LG	فولادمند و منصوری (۲۰۱۳)	لجستیک با نسبت پوکی متغیر	FM-LG
فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶)	خطی با نسبت پوکی متغیر	FS-LN	فولادمند و منصوری (۲۰۱۳)	خطی با نسبت پوکی متغیر	FM-LN

## نتایج و بحث

مقادیر خطای معیار حالت‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه در کلیه‌ی خاک‌ها در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

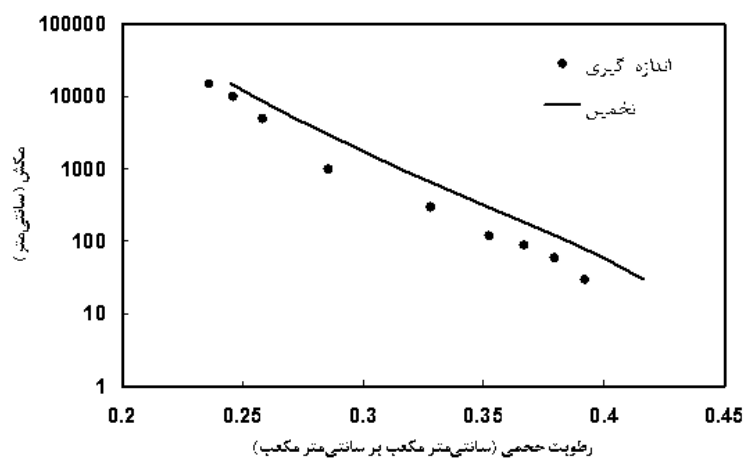
جدول ۵- مقادیر SE حالت‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه در کلیه خاک‌ها

حالت تخمین	خاک ۱	خاک ۲	خاک ۳	خاک ۴	خاک ۵	خاک ۶	خاک ۷	خاک ۸	خاک ۹	میانگین
FS-LG	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۱۱
FM-LG	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۳	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۱۰
FS-LN	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۰۹
FM-LN	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳

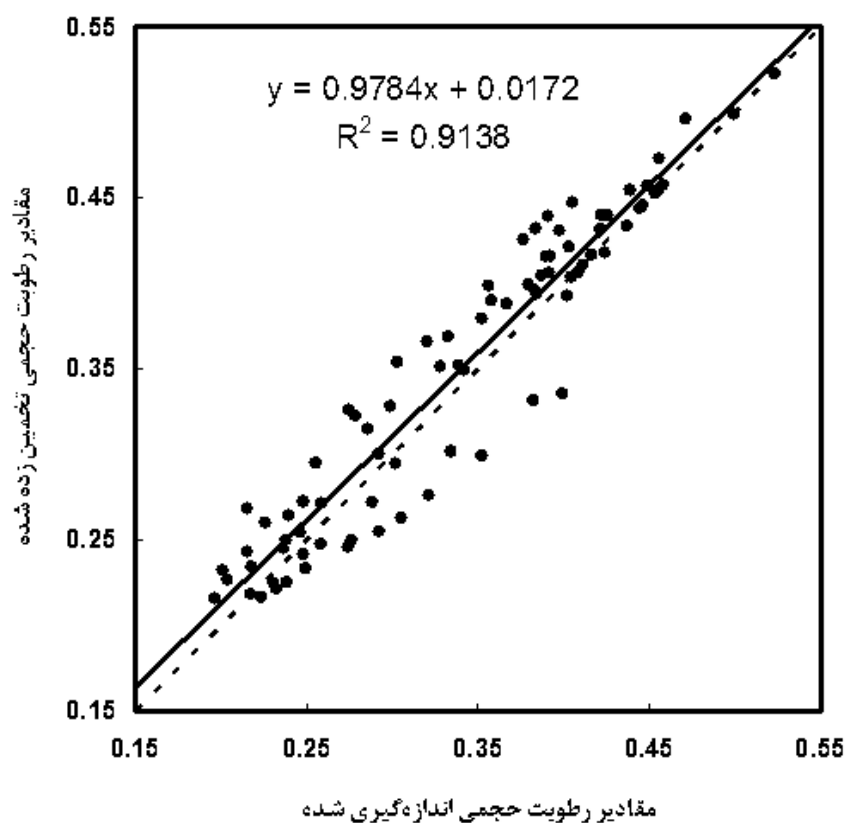
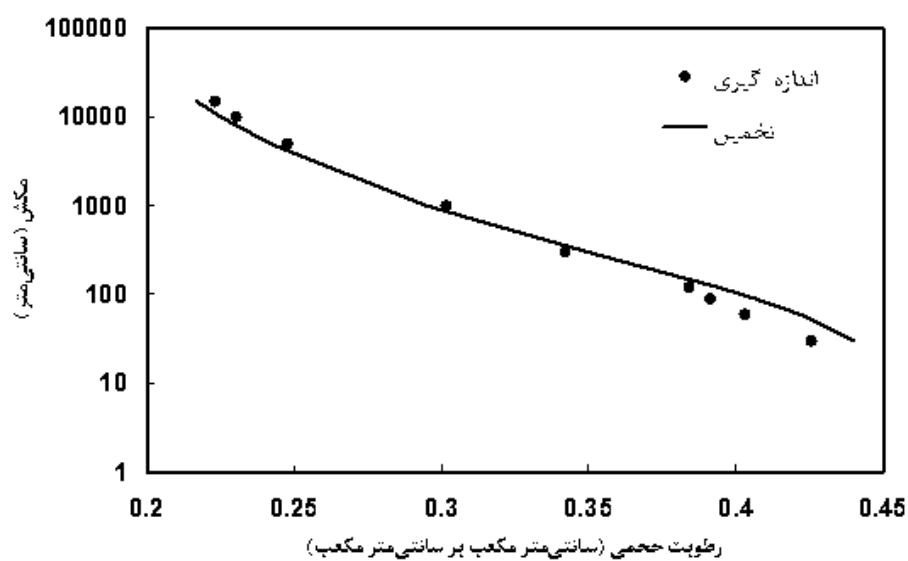
فولادمند و حبیبی (۲۰۱۲) اختلاف قابل توجهی را با یکدیگر ندارند. از طرف دیگر، نتایج قبلی نشان داده‌اند که شبیه اصلاح شده فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶) برای تخمین منحنی دانه‌بندی مناسبتر از شبیه فولادمند و منصورى (۲۰۱۳) است، در حالی که نتایج این تحقیق بیانگر آن است که شبیه فولادمند و منصورى (۲۰۱۳) در مورد تخمین منحنی مشخصه نتایج بهتری را نسبت به کاربرد شبیه اصلاح شده فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶) داشته است، بطوری که میانگین SE کلیه‌ی خاکها و حالت‌های تخمین منحنی مشخصه بر مبنای شبیه‌های فولادمند و منصورى (۲۰۱۳)، و فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶) به ترتیب برابر با ۰/۰۶ و ۰/۱۰ می‌باشد.

به عنوان نمونه، در شکل‌های ۱ و ۲ منحنی مشخصه‌ی آب خاک اندازه‌گیری و تخمین زده شده از حالت FM-LN برای خاکهای شماره ۱ و ۷ ارائه گردیده است که نشان‌دهنده‌ی تخمین مناسب از حالت فوق می‌باشد. در شکل ۳ نیز مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری و تخمین زده شده از حالت FM-LN در کلیه مکشها و برای تمام خاک‌های مورد مطالعه نسبت به خط یک به یک (نشان داده شده به صورت خط چین) ارائه شده‌اند. چنانچه در این شکل مشاهده می‌گردد، نقاط پراکنش بسیار مناسبی را در اطراف خط یک به یک دارند، که این موضوع نیز نشان‌دهنده‌ی تخمین مناسب منحنی مشخصه از حالت FM-LN برای خاکهای مورد مطالعه می‌باشد.

با توجه به میانگین مقادیر خطای معیار حالت‌های مختلف که در جدول ۵ آورده شده‌اند مشاهده می‌شود که حالت FM-LN دارای کمترین مقدار خطای معیار بوده و لذا مناسبترین حالت برای تخمین منحنی مشخصه می‌باشد. این حالت برای شش خاک با بافت متوسط رسی لایبی و دو خاک با بافت رس لایبی مناسبترین گزینه، و برای دیگر خاک با بافت رس لایبی (خاک شماره ۳) نیز منجر به نتیجه‌ی قابل قبولی شده است. همچنین، نتایج بیانگر آنند که روش خطی، بر مبنای نسبت پوکی متغیر، برای تخمین منحنی مشخصه مناسبتر از روش لجستیک بر مبنای نسبت پوکی متغیر می‌باشد. فولادمند و همکاران (۱۳۸۳) نیز برای تخمین منحنی دانه‌بندی از شبیه اسکگر و همکاران (۲۰۰۱) استفاده کرده و نشان دادند که در بافتهای رس لایبی و متوسط رسی لایبی روش خطی بهتر از روش لجستیک است، که با نتایج به دست آمده در این تحقیق مبنی بر مناسبتر بودن روش خطی نسبت به روش لجستیک مطابقت دارد. از طرف دیگر، در تحقیق فولادمند و حبیبی (۲۰۱۲) با تخمین منحنی دانه‌بندی از روش فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶) در دو خاک با بافت رس لایبی و متوسط رسی لایبی، میانگین خطای معیار دو خاک برای حالت‌های FS-LG و FS-LN به ترتیب برابر با ۰/۰۲ و ۰/۰۳ به دست آمد، در حالی که میانگین ۹ خاک به کار رفته در این تحقیق برای حالت‌های FS-LG و FS-LN به ترتیب برابر با ۰/۱۱ و ۰/۰۹ حاصل شده است؛ لذا، نتایج تحقیق فعلی با تحقیق



شکل ۱- منحنی مشخصه‌ی اندازه‌گیری و تخمین زده شده از حالت FM-LN در خاک شماره ۱.





## نتیجه‌گیری

چنانچه ذکر شد بعضی از نتایج به دست آمده در این تحقیق با دستاوردهای پژوهشهای پیشین یکسان نمی‌باشند. از جمله‌ی مهمترین دلایل این موضوع تفاوت در بافتهای خاک، نحوه‌ی استفاده از اطلاعات منحنی دانه‌بندی (اندازه‌گیری مستقیم و یا تخمین از روشهای مختلف) برای تخمین منحنی مشخصه، و عدم استفاده همزمان از کلیه‌ی حالت‌های به کار رفته در این تحقیق در پژوهشهای قبلی می‌باشد. با این حال، نتایج این تحقیق نتایج نشان دادند که در مرحله‌ی تخمین منحنی دانه‌بندی جهت استفاده برای تخمین منحنی مشخصه‌ی آب و خاک استفاده از شبیه فولادمند و منصوری (۲۰۱۳) مناسبتر از شبیه اصلاح شده‌ی فولادمند و سپاسخواه (۲۰۰۶) است. به علاوه، نتایج نشان دادند که که روش خطی برمبنای نسبت پوکی متغیر برای تخمین منحنی مشخصه مناسبتر از روش لجستیک برمبنای نسبت پوکی متغیر است. همچنین، پیشنهاد می‌شود که مشابه تحقیق انجام شده در سایر مناطق کشور با بافت‌های خاک همانند این پژوهش و دیگر بافت‌های خاک انجام شود تا نتایج به دست آمده در این تحقیق تکمیل گردد.

## سپاسگزاری

این مقاله استخراج شده از قسمتی از طرح تحقیقاتی "مقایسه‌ی روش‌های تخمین منحنی مشخصه‌ی آب خاک برای خاک‌های مورد مطالعه در منطقه‌ی مرودشت در استان فارس" می‌باشد که با حمایت دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت انجام شده است. بدین وسیله از زحمات مسؤولین و معاونت پژوهش و فن‌آوری این دانشگاه سپاسگزاری می‌گردد.

## منابع

۱. خوشنودبزدی، ع. ا. و ب. قهرمان. ۱۳۸۳. بررسی روابط بافت خاک و پارامتر مقیاس بندی برای برآورد رطوبت خاک. تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۵ (۲۰): ۳۴-۱۷.
۲. رخشنده رو، غ. ر. و ع. اسلامی حقیقت. ۱۳۸۷. ارزیابی منحنی مشخصه آب و خاک براساس تئوری تخلخل موضعی. آب و فاضلاب. ۶۶: ۶۶-۷۶.
۳. رضایی، ح. م. ر. نیشابوری، و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۸۴. ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس توزیع دانه‌بندی ذرات خاک. دانش کشاورزی. ۱۵(۲): ۱۱۹-۱۳۰.
۴. رضایی، ع. و م. ر. نیشابوری. ۱۳۸۱. تخمین منحنی خصوصیات آب خاک از منحنی توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک. دانش کشاورزی. ۱۲(۳): ۲۹-۳۷.
۵. رضایی، ل. م. شعبانپور، و ن. دواتگر. ۱۳۹۰. برآورد فراسنج مقیاس به روشهای مختلف در شبیه آریا و پاریس برای بهبود تخمین منحنی مشخصه آب خاک. دانش آب و خاک. ۲۱(۳): ۱۰۳-۱۱۴.
۶. فولادمند، ح. ر. ۱۳۸۶. بهبود تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۱۱(۴۱-الف): ۶۳-۷۳.
۷. فولادمند، ح. ر. ۱۳۹۰. تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از چند روش محاسبه عامل مقیاس‌بندی. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۱(۱): ۱۹۹-۲۱۳.
۸. فولادمند، ح. ر. و ع. ر. سپاسخواه، و ج. نیازی. ۱۳۸۳. تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۸(۳): ۱-۱۳.
۹. قنبریان علویجه، ب. ع. م. لیاقت، م. شرفا، و س. مقیمی عراقی. ۱۳۸۷. پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی دانه‌بندی خاک. تحقیقات مهندسی کشاورزی ۹(۱): ۶۳-۸۰.
10. Arya, L. M., and J. F. Paris. 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 1023-1030.
11. Arya, L. M., F. J. Leij, M. Th. van Genuchten, and P. J. Shouse. 1999. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 510-519.

- represent grain-size distribution. *Can. Geotech. J.* 37: 817-827.
16. Sepaskhah, A. R., and M. R. Rafiee. 2008. Evaluation of scaling parameter to predict soil water characteristic curve using improved particle-size distribution. *Iran. J. Sci. Techno.* 32(B5): 549-556.
  17. Shirazi, M. A., and L. Boersma. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 142-147.
  18. Skaggs, T. H., L. M. Arya, P. J. Shouse, and B. P. Mohanty. 2001. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1038-1044.
  12. Fooladmand, H. R., and A. R. Sepaskhah. 2006. Improved estimation of the soil particle-size distribution from textural data. *Biosys. Eng.* 94: 133-138.
  13. Fooladmand, H. R., and M. Habibi. 2012. Estimating soil water characteristic curve based on soil-particle-size distribution curve and local void ratio. *Afric. J. Agric. Res.* 7: 2197-2204.
  14. Fooladmand, H. R., and M. Mansuri. 2013. Comparison of two models for estimating soil particle-size distribution curve based on soil textural data. *Arch. Agron. Soil Sci.* 59: 83-92.
  15. Fredlund, M. D., D. G. Fredlund, and G. W. Wilson. 2000. An equation to