

## مقایسه هشت روش تخمین منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای دو روش تخمین منحنی دانه بندی خاک

حمیدرضا فولادمند<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۱۹

### چکیده

به رابطه بین رطوبت و مکش ماتریک آب خاک، منحنی مشخصه آب خاک گفته می‌شود که اندازه‌گیری آن وقت‌گیر و پرهزینه است. یک روش تخمین منحنی مشخصه آب خاک استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک می‌باشد که در آن از پارامتر مقیاس ( $\alpha$ ) استفاده می‌شود. در این تحقیق از ۱۰ نمونه خاک مختلف منطقه مرودشت در استان فارس استفاده شد و بافت خاک و منحنی مشخصه هر خاک اندازه‌گیری شد. سپس منحنی دانه‌بندی هر خاک از دو روش فولادمند و سپاسخواه (FS) و فولادمند و منصوری (FM) تخمین زده شد و برای تعیین پارامتر مقیاس نیز از هشت روش خطی با نسبت پوکی ثابت (N)، لجستیک با نسبت پوکی ثابت (G)، خطی با نسبت پوکی متغیر (LN)، لجستیک با نسبت پوکی متغیر (LG) و چهار روش بدون وابستگی به بافت خاک آلفا-۱ (A1)، آلفا-۲ (A2)، آلفا-۳ (A3) و آلفا-۴ (A4) استفاده شد. بر این اساس منحنی مشخصه هر خاک از ۱۶ حالت مختلف تخمین زده شد و با منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده هر خاک مقایسه گردید. برای این منظور از آماره‌های خطای استاندارد (SE)، میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) و انحراف معیار هندسی نسبت خطا (GSDER) استفاده شد. نتایج نشان داد مدل FM برای تخمین منحنی دانه‌بندی و به دنبال آن تخمین منحنی مشخصه مناسب‌تر از مدل FS بود. همچنین به طور کلی نتایج کلی نشان داد که حالت‌های FM-A1، FM-A2، FM-A3، FM-N و FM-LN برای تخمین منحنی مشخصه مناسب بود.

**واژه‌های کلیدی:** منحنی مشخصه آب خاک، منحنی دانه‌بندی، پارامتر مقیاس، روش خطی، روش لجستیک

### مقدمه

منحنی مشخصه آب خاک استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک می‌باشد. این موضوع توسط آریا و پاریس (۱۰) پیشنهاد شد و بعدها توسط پژوهشگران دیگری مورد استفاده قرار گرفت (مثلاً ۲۰ و ۲۲) و در ادامه توسط آریا و همکاران (۱۱) بهبود یافت. در ایران نیز تحقیقات متعددی در این زمینه انجام شده است (۱، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۶). در کلیه روش‌های ذکر شده برای تخمین منحنی مشخصه به یک پارامتر مقیاس ( $\alpha$ ) نیاز می‌باشد. آریا و پاریس (۱۰) مقدار ثابت  $1/38$  را برای  $\alpha$  پیشنهاد نمودند و در ادامه آریا و همکاران (۱۱) نشان دادند که مقدار  $\alpha$  برای بافت‌های مختلف خاک یکسان نیست و حتی در بخش‌های مختلف منحنی دانه‌بندی یک خاک معین هم ثابت نمی‌باشد. از این رو آریا و همکاران (۱۱) روش‌های خطی و لجستیک را برای تعیین مقدار  $\alpha$  در بعضی از بافت‌های خاک ارائه نمودند. در تحقیقات متعددی نیز روابطی برای تعیین پارامتر مقیاس ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به تحقیق فولادمند (۷) اشاره نمود که چهار روش مختلف برای تعیین مقدار  $\alpha$  بدون وابستگی به نوع بافت خاک ارائه نمود. از طرف دیگر در کلیه تحقیقات ذکر شده

منحنی مشخصه آب خاک که نشان‌دهنده رابطه بین رطوبت و مکش ماتریک آب خاک است در طرح‌های آبیاری و زهکشی و مسایل مربوط به حرکت غیر اشباع آب در خاک کاربرد فراوان دارد. این منحنی شناسایی رفتار فیزیکی خاک در رطوبت‌های مختلف را آسان‌تر می‌کند. برای به دست آوردن این منحنی روش‌های آزمایشگاهی متداول وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشند و به همین علت از سال‌ها پیش پژوهشگران در پی به دست آوردن روش‌های کم هزینه‌تر برای تخمین این منحنی به جای اندازه‌گیری آن بوده‌اند. اغلب این روش‌ها دارای مبنای ریاضی و فیزیکی هستند و هدف تمام آنها پیدا کردن یک رابطه ریاضی مناسب است که با انجام آزمایش‌های ساده‌تر و کم هزینه‌تر بتوان تا حد ممکن به نتایج آزمایشگاهی نزدیک شد. از جمله روش‌های موجود برای تخمین

<sup>۱</sup> - دانشیار گروه آبیاری، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، ایران

## مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق ۱۰ نمونه خاک سطحی شامل بافت‌های رس سیلتی، لوم رسی سیلتی و لوم سیلتی از مناطق اطراف شهرستان مرودشت در استان فارس در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ تهیه شد و چگالی ظاهری و بافت هر خاک در آزمایشگاه با نمونه‌های دست خورده اندازه‌گیری گردید. منحنی مشخصه هر نمونه خاک نیز با استفاده از نمونه‌های دست نخورده و با ترکیب روش‌های ستون آویزان و دستگاه صفحات فشاری برای مکش‌های مختلف (از صفر تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) اندازه‌گیری شد. برخی از ویژگی‌های اندازه‌گیری شده نمونه‌های خاک به کار رفته در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.

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

### مدل اسکگز و همکاران (۱۸) بهبود یافته توسط فولادمند و

#### سپاسخواه (۱۴)

رابطه کلی این روش به صورت زیر است (۱۴ و ۱۸):

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

که در آن R شعاع ذرات خاک بر حسب میکرومتر، W کسر مربوط به ذرات کوچک‌تر از هر شعاع، cl کسر مربوط به ذرات کوچک‌تر از رس خاک (بر حسب اعشار) و c و u پارامترهای معادله هستند که از معادله‌های موجود قابل محاسبه هستند.

مقدار تخلخل و یا نسبت پوکی خاک در کل منحنی دانه‌بندی خاک عددی ثابت فرض شده است، در حالی که رخشنده‌رو و اسلامی حقیقت (۲) امکان تخمین منحنی مشخصه را بر مبنای مقدار متغیر تخلخل و یا نسبت پوکی خاک فراهم نمودند و در ادامه فولادمند و حبیبی (۱۲) روش فوق را توسعه دادند.

چنانچه ذکر شد اساس مدل پیشنهادی آریا و پاریس (۱۰) و مدل بهبود یافته آریا و همکاران (۱۱) برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک استفاده از منحنی دانه‌بندی است، اما نکته قابل توجه آن است که در بسیاری از خاک‌ها اطلاعات اندازه‌گیری شده منحنی دانه‌بندی نیز موجود نیست و تنها درصد ذرات رس، سیلت و شن خاک در دسترس می‌باشد. از این رو می‌توان ابتدا منحنی دانه‌بندی خاک را تخمین زده و سپس به تخمین منحنی مشخصه آب خاک دست یافت. برای تخمین منحنی دانه‌بندی خاک نیز روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به مدل اسکگز و همکاران (۱۸) که توسط فولادمند و سپاسخواه (۱۴) بهبود یافته است، اشاره نمود. در تحقیقاتی نیز ابتدا منحنی دانه‌بندی از مدل‌های اسکگز و همکاران (۱۸) و فولادمند و سپاسخواه (۱۴) تخمین زده شده و سپس بر مبنای مدل آریا و همکاران (۱۱) منحنی مشخصه آب خاک تخمین زده شده است (۸، ۶، ۱۲). در تحقیق دیگری فولادمند و منصور (۱۳) امکان تخمین منحنی دانه‌بندی خاک از روش پیشنهادی فردلانند و همکاران (۱۵) را فراهم نموده‌اند. با توجه به موارد ذکر شده، هدف از این تحقیق تخمین منحنی مشخصه آب خاک از روش‌های مختلف برآورد پارامتر مقیاس  $\alpha$  بر مبنای دو روش مختلف تخمین منحنی دانه‌بندی (۱۳ و ۱۴) می‌باشد که برای این منظور از اطلاعات اندازه‌گیری شده ۱۰ نمونه خاک در منطقه مرودشت در استان فارس استفاده شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های ۱۰ نمونه خاک به کار رفته در این تحقیق

شماره خاک	بافت خاک	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	چگالی ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	رطوبت حجمی اشباع (%)
۱	رس سیلتی	۴۲	۵۰	۸	۱/۱۸	۰/۴۴۴
۲	رس سیلتی	۴۶	۵۰	۴	۱/۴۳	۰/۴۵۶
۳	رس سیلتی	۴۹	۴۲	۹	۱/۷۲	۰/۴۱۱
۴	لوم رسی سیلتی	۳۲	۵۶	۱۲	۱/۲۴	۰/۴۹۹
۵	لوم رسی سیلتی	۳۹	۵۳	۸	۱/۳۴	۰/۴۵۳
۶	لوم رسی سیلتی	۳۴	۶۰	۶	۱/۳۵	۰/۴۴۶
۷	لوم رسی سیلتی	۳۰	۶۲	۸	۱/۳۹	۰/۴۵۸
۸	لوم رسی سیلتی	۲۸	۶۲	۱۰	۱/۳۰	۰/۵۲۳
۹	لوم رسی سیلتی	۳۷	۴۵	۱۸	۱/۳۳	۰/۴۵۵
۱۰	لوم سیلتی	۲۶	۵۶	۱۸	۱/۱۷	۰/۵۴۷

سانتی‌متر،  $R_i$  میانگین اندازه شعاع ذرات خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب سانتی‌متر،  $n_i$  تعداد کل ذرات کروی خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب یک برگرم،  $\alpha$  پارامتر مقیاس و  $e$  نسبت پوکی ثابت خاک می‌باشد. لازم به ذکر است که مقدار  $W_i$  تخمین زده شده به ازاء شعاع‌های مختلف از دو روش ذکر شده تخمین منحنی دانه‌بندی در این تحقیق در تعیین مقدار  $V_{vj}$  نقش دارد. همچنین جزئیات کامل این روش در منابع شماره ۸ و ۱۱ ارائه شده است.

چنانچه ذکر شد روش‌های مختلفی برای تعیین مقدار پارامتر مقیاس  $\alpha$  وجود دارد. در این تحقیق از هشت روش مختلف برای تعیین  $\alpha$  استفاده شده است که پس از معلوم شدن آن‌ها با استفاده از رابطه ۷ مقدار مکش آب خاک در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی قابل تخمین می‌باشد. هشت روش فوق عبارتند از:

الف- روش‌های خطی و لجستیک بر مبنای نسبت پوکی ثابت: این دو روش به ترتیب از رابطه‌های زیر تعیین می‌گردند:

$$\alpha_i = \frac{a + b \log \frac{W_i}{R_i^3}}{\log n_i} \quad (۸)$$

$$Y + \Delta Y = \frac{Y_f Y_{in}}{Y_{in} + (Y_f - Y_{in}) \exp\{-\mu(x + \Delta x)\}} \quad (۹)$$

که در آن‌ها  $\alpha_i$  مقدار پارامتر مقیاس در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی،  $W_i$  جرم ذرات جامد خاک در واحد جرم در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب گرم بر گرم،  $R_i$  و  $n_i$  قبلاً تعریف شده‌اند،  $a$  و  $b$  ضرایب معادله،  $Y$  نشان دهنده متغیر وابسته  $(\log Ni)$  تعداد ذرات کروی فرضی خاک در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی می‌باشد،  $x$  نشان دهنده متغیر مستقل  $\log n_i$ ،  $\mu$  ضریب شدت،  $\Delta Y = \Delta \log Ni$ ،  $\Delta x = \Delta \log n_i$ ، شاخص  $in$  نشان دهنده مقدار اولیه (حد پایین)  $\log Ni$  و شاخص  $f$  نشان دهنده مقدار انتهایی (حد بالایی)  $\log Ni$  می‌باشد. ضرایب و پارامترهای روش‌های خطی و لجستیک برای بعضی از بافت‌های خاک ارائه شده‌اند (۸ و ۱۱).

ب- روش‌های خطی و لجستیک بر مبنای نسبت پوکی متغیر: برای در نظر گرفتن نسبت پوکی متغیر از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$e_i = k R_i^m \quad (۱۰)$$

که در آن  $e_i$  نسبت پوکی متغیر خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی است که به جای مقدار ثابت  $e$  در رابطه ۷ وارد می‌شود.  $k$  و  $m$  نیز ضرایب ثابت معادله هستند. با تقسیم‌بندی منحنی دانه‌بندی به ۱۹ شعاع مختلف (شعاع‌های ۱، ۱/۵، ۲/۵، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵، ۳۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میکرومتر) که

لازم به ذکر است که بر اساس نتایج گزارش شده قبلی در این مدل از حد کران انتهایی ۹۹۹ میکرومتر استفاده شده است (۶ و ۱۴). جزئیات کامل این روش در منابع شماره ۶ و ۱۴ ارائه شده است.

مدل فولادمنند و منصور (۱۳) جهت تخمین منحنی دانه‌بندی بر مبنای مدل فردلانند و همکاران (۱۵):

رابطه کلی مدل فردلانند و همکاران (۱۵) برای برآزش بر داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی دانه‌بندی به صورت زیر می‌باشد:

$$W = \frac{1}{\left\{ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{a}{d} \right)^n \right] \right\}^m} \left\{ 1 - \left[ \frac{\ln \left( 1 + \frac{d_r}{d} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{d_r}{d_m} \right)} \right]^7 \right\} \quad (۲)$$

که در آن  $d$  قطر ذرات خاک بر حسب میلی‌متر،  $W$  کسر مربوط به ذرات کوچک‌تر از هر قطر،  $d_m$  برابر مقدار ثابت ۰/۰۰۰۱ میلی‌متر و  $a$ ،  $n$  و  $m$  پارامترهای معادله هستند که باید معلوم باشند. فولادمنند و منصور (۱۳) مقدار  $d_r$  را برابر ۱۰۰۰ فرض نمودند و برای سه پارامتر دیگر روابط زیر را به دست آوردند تا امکان تخمین منحنی دانه‌بندی بر مبنای مدل فردلانند و همکاران (۱۵) فراهم گردد:

$$a = 0.18612 + 0.00088 \text{Clay} - 0.00265 \text{Silt} + 0.00393 \delta_g \quad (۳)$$

$$m = 0.52961 + 0.01728 \text{Sand} - 1.63977 \delta_g - 0.04897 \delta_g \quad (۴)$$

$$n = 3.72 \exp(-0.03 \text{Clay}) \quad (۵)$$

که در آن‌ها Clay، Silt و Sand به ترتیب درصد ذرات رس، سیلت و شن خاک می‌باشند. همچنین  $d_g$  و  $\delta_g$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار هندسی ذرات خاک هستند که با توجه به مقدار رس، سیلت و شن خاک از روابط ارائه شده توسط شیرازی و بورزما (۱۷) قابل محاسبه می‌باشند.

از طرف دیگر مقادیر رطوبت و مکش آب خاک جهت تخمین منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای مدل آریا و همکاران (۱۱) از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\theta_i = \rho_b \sum_{j=1}^i V_{vj} \quad (۶)$$

$$h_i = \frac{0.18}{R_i (en_i^{1-\alpha})^{0.5}} \quad (۷)$$

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 سانتی‌متر مکعب،  $V_{vj}$  حجم خلل و فرج خاک در واحد جرم در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب سانتی‌متر مکعب بر گرم،  $h_i$  مکش آب خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب

حالت تخمین برای هر خاک تعیین گردد. برای این منظور از آماره‌های خطای استاندارد (SE)، میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) و انحراف معیار هندسی نسبت خطا (GSDER) به صورت روابط زیر استفاده گردید (۱۹):

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (M_i - E_i)^2}{N-1}} \quad (18)$$

$$x_i = \frac{E_i}{M_i} \quad (19)$$

$$GMER = \exp\left(\frac{1}{N} \sum \ln(x_i)\right) \quad (20)$$

$$GSDER = \exp\left[\left(\frac{1}{N-1} \sum [\ln(x_i) - \ln(GMER)]^2\right)^{0.5}\right] \quad (21)$$

که در آن‌ها  $x_i$  نسبت خطا،  $E_i$  و  $M_i$  به ترتیب رطوبت حجمی خاک تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده در هر مکش و  $N$  تعداد داده‌ها در هر خاک می‌باشد. چنانچه مقدار GMER برابر یک شود مقادیر اندازه‌گیری و تخمین زده شده بر یکدیگر منطبق شده‌اند. در صورتی که مقدار GMER کمتر از یک شود مقادیر تخمین زده شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد و چنانچه مقدار GMER بیشتر از یک شود مقادیر تخمین زده شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند. همچنین چنانچه مقدار GSDER برابر یک شود مقادیر اندازه‌گیری و تخمین زده شده بر یکدیگر منطبق شده‌اند و افزایش GSDER نسبت به یک بیانگر افزایش فاصله بین مقادیر تخمین زده شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. بنابراین مناسب‌ترین شرایط آن است که مقادیر GMER و GSDER نزدیک به یک باشند (۲۳). به علاوه هر چه مقدار SE به صفر نزدیک‌تر باشد، اختلاف بین مقادیر تخمین زده شده با مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر بوده و مناسب‌تر است.

در ادامه مقاله روش‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه بر مبنای تخمین منحنی دانه‌بندی برای سادگی کار به صورت علایم اختصاری معرفی شده در جدول ۲ بیان شده‌اند.

## نتایج و بحث

مقادیر خطای استاندارد، میانگین هندسی و انحراف معیار هندسی نسبت خطا برای حالت‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه در کلیه خاک‌ها در جدول‌های ۳ تا ۵ ارائه شده‌اند.

توسط فولادمند و سپاسخواه (۱۴) توصیه شده است، مقدار  $k$  را می‌توان با استفاده از مقدار نسبت پوکی ثابت خاک ( $e$ ) از رابطه زیر به دست آورد (۱۲):

$$k = \frac{19e}{\sum_{i=1}^{i=19} R_i^m} \quad (11)$$

مقدار ضریب  $m$  نیز برای روش‌های خطی و لجستیک جهت برآورد پارامتر مقیاس  $\alpha$  از روابط زیر به دست می‌آیند (۱۲):

$$m_{Lin} = 8.27\delta_g^{0.03} - 8.82 \quad (12)$$

$$m_{Log} = 7.73\delta_g^{0.01} - 7.96 \quad (13)$$

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 (۱۷). ج- روش‌های آلفا-۱ تا آلفا-۴ بر مبنای نسبت پوکی ثابت: این روش‌ها به بافت خاک وابسته نبوده و به ترتیب از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند (۷):

$$\alpha_i = 1.1125 + 1.7434 \exp\left(\frac{-\theta_i}{0.0746}\right) \quad (14)$$

$$\alpha_i = -0.3421 \ln(\theta_i) + 0.7228 \quad (15)$$

$$\alpha_i = 0.8395 \theta_i^{-0.2512} \quad (16)$$

$$\text{Lon}N_i = -3.1421 + 1.5013 \text{Log}\left(\frac{W_i}{R_i}\right) \quad (17)$$

کلیه پارامترهای رابطه‌های فوق قبلاً تعریف شده‌اند و چنانچه مشاهده می‌شود روش‌های آلفا-۱ تا آلفا-۳ (رابطه‌های ۱۴ تا ۱۶) برای برآورد پارامتر مقیاس به رطوبت حجمی خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی وابسته هستند و روش آلفا-۴ (رابطه ۱۷) به شکل روش خطی می‌باشد.

به این ترتیب منحنی مشخصه آب خاک از ترکیب دو روش تخمین منحنی دانه‌بندی و هشت روش تخمین پارامتر مقیاس  $\alpha$  در مجموع در شانزده حالت تخمین زده شد و نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه هر خاک مقایسه گردید. از آنجا که مقادیر رطوبت و مکش تخمین زده شده هر حالت با مقادیر رطوبت و مکش اندازه‌گیری شده یکسان نیست، لذا برای هر حالت تخمین بر روی داده‌های تخمینی رطوبت و مکش رابطه منحنی مشخصه آب خاک و گنوختن (۲۱) برازش داده شد. برای این منظور از نرم‌افزار اکسل با تکنیک حداقل کردن اختلاف مقادیر استفاده شد و پارامترهای این معادله برآورد گردید. سپس با توجه به ضرایب به دست آمده معادله و گنوختن (۲۱)، در مقادیر مکش اندازه‌گیری شده هر خاک مقدار رطوبت معادل آن مکش تعیین گردید. به این ترتیب در هر مکش خاک مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت تخمین زده شده از شانزده حالت مختلف تخمین مورد مقایسه قرار گرفتند تا بهترین

جدول ۲- 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	لجستیک با نسبت پوکی ثابت	FS-G	فولادمند و منصوری	لجستیک با نسبت پوکی ثابت	FM-G
فولادمند و سپاسخواه	خطی با نسبت پوکی ثابت	FS-N	فولادمند و منصوری	خطی با نسبت پوکی ثابت	FM-N
فولادمند و سپاسخواه	لجستیک با نسبت پوکی متغیر	FS-LG	فولادمند و منصوری	لجستیک با نسبت پوکی متغیر	FM-LG
فولادمند و سپاسخواه	خطی با نسبت پوکی متغیر	FS-LN	فولادمند و منصوری	خطی با نسبت پوکی متغیر	FM-LN
فولادمند و سپاسخواه	آلفا-۱	FS-A1	فولادمند و منصوری	آلفا-۱	FM-A1
فولادمند و سپاسخواه	آلفا-۲	FS-A2	فولادمند و منصوری	آلفا-۲	FM-A2
فولادمند و سپاسخواه	آلفا-۳	FS-A3	فولادمند و منصوری	آلفا-۳	FM-A3
فولادمند و سپاسخواه	آلفا-۴	FS-A4	فولادمند و منصوری	آلفا-۴	FM-A4

جدول ۳- 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	خاک ۱۰
FS-G	۰/۰۸	۰/۱۰	۰/۰۱	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۰۹	۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۰۵	۰/۰۳
FM-G	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۴
FS-N	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۳
FM-N	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲
FS-LG	۰/۱۰	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۰۷	۰/۰۵
FM-LG	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۰۳	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۱۲	۰/۱۰	۰/۰۵
FS-LN	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۲۳	۰/۲۵	۰/۰۵	۰/۰۵
FM-LN	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۴
FS-A1	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۰۳	۰/۰۶
FM-A1	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۶
FS-A2	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۱۳	۰/۱۲	۰/۰۲	۰/۰۶
FM-A2	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۶
FS-A3	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۰۶
FM-A3	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۶
FS-A4	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۲	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۰۰
FM-A4	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۲

خاک‌های با بافت لوم رس سیلتی از روش‌های خطی و لجستیک به ترتیب برابر ۰/۰۷ و ۰/۰۹ می‌باشد. همچنین مقدار GSDER خاک‌های با بافت رس سیلتی از روش‌های خطی و لجستیک به ترتیب برابر ۱/۰۴ و ۱/۰۸ و برای خاک‌های با بافت لوم رس سیلتی از روش‌های خطی و لجستیک به ترتیب برابر ۱/۱۱ و ۱/۲۰ می‌باشد. البته قابل ذکر است که در تحقیق فولادمند و همکاران (۸) برای تخمین منحنی دانه بندی از مدل اسکگرز و همکاران (۱۸) استفاده شده است.

۲- نتایج تحقیقات فولادمند (۶) نشان داد که با تخمین منحنی دانه‌بندی از روش فولادمند و سپاسخواه (۱۴) در خاکی با بافت لوم سیلتی با مقدار سیلت کمتر از ۶۰ درصد روش لجستیک بهتر از خطی است.

نتایج کلی برای ۱۰ نمونه خاک به کار رفته در این تحقیق بیانگر آن است که حالت‌های FM-N, FM-A3, FM-A2, FM-A1 و FM-LN مناسب‌تر از سایر حالت‌ها می‌باشند. این موضوع به طور تفکیکی برای بافت‌های رس سیلتی و لوم رسی سیلتی نیز وجود دارد. این در حالی است که نتایج به دست آمده در بعضی موارد با تحقیقات انجام شده قبلی یکسان نمی‌باشد. از این رو توجه به نکات زیر ضروری است:

۱- نتایج تحقیقات فولادمند و همکاران (۸) نشان داد که در بافت‌های رس سیلتی و لوم رسی سیلتی روش خطی بهتر از لجستیک است. این موضوع با نتایج به دست آمده در این تحقیق یکسان است، به گونه‌ای که میانگین SE خاک‌های با بافت رس سیلتی از روش‌های خطی و لجستیک به ترتیب برابر ۰/۰۴ و ۰/۰۵ و برای

جدول ۴- مقادیر GMER 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	خاک ۱۰
FS-G	۱/۲۴	۱/۳۱	۱/۰۱	۱/۳۳	۱/۳۴	۱/۲۷	-/۵۶	۰/۶۰	۱/۱۷	۱/۰۳
FM-G	۱/۱۶	۱/۱۶	-/۹۶	۱/۲۸	۱/۲۴	۱/۱۴	۱/۱۴	۱/۲۴	۱/۲۶	۱/۰۲
FS-N	۱/۰۹	۱/۲۱	-/۸۸	۱/۱۴	۱/۱۹	۱/۱۴	-/۳۶	-/۳۷	۰/۹۱	۰/۹۱
FM-N	۱/۰۴	۱/۰۵	-/۸۶	۱/۱۳	۱/۱۲	۱/۰۱	۱/۰۰	۱/۰۷	۱/۰۹	۰/۹۵
FS-LG	۱/۳۰	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۴۵	۱/۴۴	۱/۳۲	-/۵۱	-/۵۵	۱/۲۵	۱/۱۳
FM-LG	۱/۲۷	۱/۲۹	۱/۰۷	۱/۴۰	۱/۳۷	۱/۲۸	۱/۲۵	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۱۲
FS-LN	۱/۱۱	۱/۰۶	-/۸۷	۱/۱۳	۱/۲۱	۱/۰۵	-/۳۹	-/۳۹	۰/۸۱	۰/۸۸
FM-LN	۱/۰۶	۱/۱۳	-/۸۶	۱/۱۲	۱/۱۵	۱/۰۴	۱/۰۱	۱/۰۸	۰/۹۶	۰/۹۱
FS-A1	۱/۰۷	۱/۱۶	-/۸۴	۱/۰۷	۱/۱۳	۱/۰۸	-/۴۹	-/۴۹	۰/۸۸	۰/۸۳
FM-A1	۱/۰۴	۱/۰۴	-/۸۵	۱/۰۶	۱/۰۹	-/۹۸	-/۹۴	۰/۹۸	۱/۰۴	۰/۸۵
FS-A2	۱/۰۶	۱/۱۳	-/۸۵	۱/۰۸	۱/۱۳	۱/۰۸	-/۶۱	-/۶۴	۰/۹۳	۰/۸۶
FM-A2	۱/۰۳	۱/۰۳	-/۸۶	۱/۰۷	۱/۰۸	-/۹۸	-/۹۶	۰/۹۹	۱/۰۵	۰/۸۷
FS-A3	۱/۰۷	۱/۱۴	-/۸۵	۱/۰۷	۱/۱۳	۱/۰۸	-/۵۸	-/۵۸	۰/۹۱	۰/۸۵
FM-A3	۱/۰۳	۱/۰۳	-/۸۵	۱/۰۶	۱/۰۸	-/۹۸	-/۹۵	۰/۹۸	۱/۰۵	۰/۸۶
FS-A4	۱/۱۹	۱/۲۸	-/۹۷	۱/۲۵	۱/۲۷	۱/۲۱	-/۴۰	-/۴۲	۱/۰۵	۱/۰۰
FM-A4	۱/۱۲	۱/۱۳	-/۹۳	۱/۲۲	۱/۱۹	۱/۰۹	۱/۰۸	۱/۱۷	۱/۱۹	۱/۰۲

جدول ۵- مقادیر GSDER 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	خاک ۱۰
FS-G	۱/۰۷	۱/۱۵	۱/۰۵	۱/۲۳	۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۴۲	۱/۳۹	۱/۰۷	۱/۱۰
FM-G	۱/۰۵	۱/۰۹	۱/۰۶	۱/۲۳	۱/۱۸	۱/۱۵	۱/۰۸	۱/۱۷	۱/۱۱	۱/۱۳
FS-N	۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۰۲	۱/۰۹	۱/۰۹	۱/۱۰	۱/۲۲	۱/۲۸	۱/۰۶	۱/۰۶
FM-N	۱/۰۲	۱/۰۴	۱/۰۳	۱/۱۳	۱/۱۰	۱/۰۶	۱/۰۲	۱/۰۵	۱/۰۶	۱/۰۲
FS-LG	۱/۱۰	۱/۱۴	۱/۰۵	۱/۲۷	۱/۲۵	۱/۲۲	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۰۷	۱/۱۰
FM-LG	۱/۰۸	۱/۱۲	۱/۰۶	۱/۲۶	۱/۲۱	۱/۱۹	۱/۱۱	۱/۱۹	۱/۱۲	۱/۱۴
FS-LN	۱/۰۵	۱/۱۸	۱/۰۱	۱/۱۰	۱/۰۸	۱/۲۱	۱/۲۷	۱/۳۵	۱/۰۵	۱/۰۴
FM-LN	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۳	۱/۱۳	۱/۱۰	۱/۰۴	۱/۰۳	۱/۰۴	۱/۰۷	۱/۰۲
FS-A1	۱/۰۷	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۵	۱/۱۷	۱/۲۱	۱/۰۶	۱/۱۰
FM-A1	۱/۰۳	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۱۰	۱/۰۷	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۵	۱/۰۵
FS-A2	۱/۰۳	۱/۰۵	۱/۰۱	۱/۱۱	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۲۴	۱/۱۷	۱/۰۵	۱/۰۳
FM-A2	۱/۰۲	۱/۰۴	۱/۰۳	۱/۱۵	۱/۱۰	۱/۰۷	۱/۰۲	۱/۰۹	۱/۰۷	۱/۰۵
FS-A3	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۲	۱/۰۹	۱/۰۷	۱/۰۷	۱/۲۴	۱/۱۶	۱/۰۵	۱/۰۴
FM-A3	۱/۰۲	۱/۰۳	۱/۰۲	۱/۱۴	۱/۰۹	۱/۰۶	۱/۰۲	۱/۰۸	۱/۰۶	۱/۰۵
FS-A4	۱/۰۴	۱/۱۳	۱/۰۳	۱/۱۶	۱/۱۵	۱/۱۶	۱/۲۰	۱/۲۴	۱/۰۴	۱/۰۲
FM-A4	۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۰۵	۱/۱۸	۱/۱۴	۱/۱۰	۱/۰۴	۱/۱۱	۱/۰۹	۱/۰۵

سیلتی با دقت یکسانی مقدار منحنی مشخصه را تخمین می‌زنند. این در حالی است که به طور کلی این دو روش در بین سایر حالت‌های به کار رفته در این تحقیق برای تخمین منحنی مشخصه چندان مناسب نیستند و حالت FS-A4 مناسب‌ترین حالت می‌باشد.

۳- نتایج تحقیقات فولادمند (۷) نشان داد که برای تخمین منحنی مشخصه روش‌های آلفا-۱ تا آلفا-۳ چندان مناسب نیستند و از

در حالی که نتایج این تحقیق نشان می‌دهد در خاک شماره ۱۰ (با بافت لوم سیلتی با مقدار سیلت کمتر از ۶۰ درصد) مقدار SE در دو حالت FS-G و FS-N یکسان و برابر ۰/۰۳ می‌باشد. مقدار GMER دو حالت ذکر شده به ترتیب برابر ۱/۰۳ و ۰/۹۱ و مقدار GSDER دو حالت ذکر شده به ترتیب برابر ۱/۱۰ و ۱/۰۶ می‌باشد. لذا نتایج بیانگر آن است که هر دو حالت FS-G و FS-N برای خاک با بافت لوم

۷- میانگین مقدار SE برای تمام حالت‌های تخمین در خاک‌های با بافت رس سیلتی، لوم رسی سیلتی و لوم سیلتی به ترتیب برابر  $0/04$ ،  $0/07$  و  $0/04$  و میانگین مقدار GSDER برای تمام حالت‌های تخمین در خاک‌های با بافت‌های ذکر شده به ترتیب برابر  $0/05$ ،  $0/13$  و  $0/06$  می‌باشد. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که حالت‌های ذکر شده تخمین منحنی مشخصه در دو بافت رس سیلتی و لوم سیلتی دقیق‌تر از خاک‌های با بافت لوم رسی سیلتی می‌باشد.

به عنوان نمونه در شکل‌های ۱ و ۲ منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده از یکی از حالت‌های مناسب برای خاک‌های شماره ۱ و ۷ ارائه شده است که نشان‌دهنده تخمین مناسب روش‌های به کار رفته می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

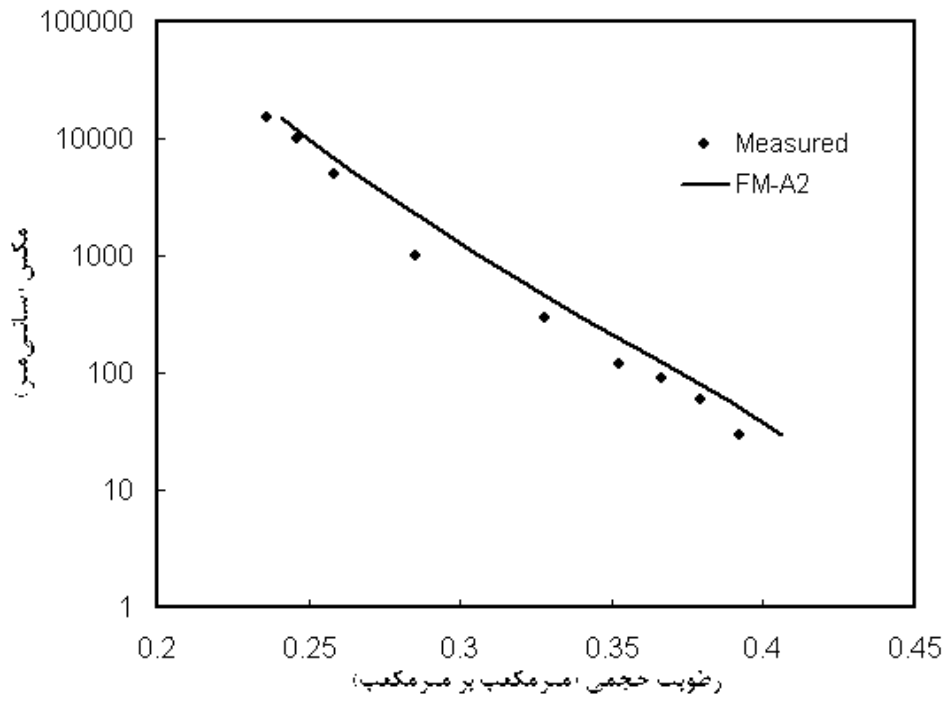
بعضی از نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج تحقیقات قبلی یکسان نمی‌باشد که از جمله مهم‌ترین دلایل آن تفاوت در بافت‌های خاک و نحوه استفاده از اطلاعات منحنی دانه‌بندی برای تخمین منحنی مشخصه (اندازه‌گیری مستقیم و یا تخمین از روش‌های مختلف) می‌باشد. نتایج نشان داد که برای خاک‌های به کار رفته در این تحقیق استفاده از مدل فولادمند و منصوروی (۱۳) برای تخمین منحنی مشخصه مناسب‌تر از مدل فولادمند و سپاسخواه (۱۴) است. میانگین آماره‌های حالت‌های مختلف تخمین در کلیه خاک‌ها بر مبنای مدل فولادمند و منصوروی (۱۳) محاسبه شد، به گونه‌ای که میانگین SE برای حالت‌های FM-A1، FM-A2، FM-A3، FM-A4 و FM-LN، FM-LG، FM-N، FM-G،  $0/05$ ،  $0/03$ ،  $0/08$ ،  $0/04$ ،  $0/04$ ،  $0/04$ ،  $0/04$ ،  $0/03$  و میانگین GSDER برای حالت‌های ذکر شده به ترتیب برابر  $0/04$ ،  $0/13$ ،  $0/04$ ،  $0/12$ ،  $0/04$ ،  $0/04$ ،  $0/06$ ،  $0/05$ ،  $0/07$  و  $0/07$  می‌باشد. بنابراین به طور کلی حالت‌های FM-A1، FM-A2، FM-A3، FM-N و FM-LN برای تخمین منحنی مشخصه مناسب‌تر از سایر حالت‌ها می‌باشند. از طرف دیگر در ۱۰ نمونه خاک و هشت حالت تخمین بر مبنای مدل فولادمند و منصوروی (۱۳)، مقدار GMER در ۵۸ مورد بزرگ‌تر از یک است، یعنی در  $72/5$  درصد از حالت‌های تخمین منحنی مشخصه بر مبنای مدل فولادمند و منصوروی (۱۳) مقادیر تخمین زده شده بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشند که البته با توجه به مقدار GMER در اکثر خاک‌ها و حالت‌های تخمین، مقدار فوق بسیار ناچیز است (همانند شکل‌های ۱ و ۲).

طرف دیگر در بافت لوم رسی سیلتی روش آلفا-۴ و در بافت رس سیلتی روش لجستیک مناسب‌تر می‌باشند. لازم به ذکر است که در تحقیق فولادمند (۷) برای تخمین منحنی مشخصه از داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی دانه‌بندی استفاده شده و از روش‌های تخمینی به کار رفته در این تحقیق استفاده نشده است. از این رو نتایج تحقیقات فولادمند (۷) در راستای نتایج به دست آمده در این تحقیق نیست و همانطور که ذکر شد به طور کلی حالت‌های FM-A1، FM-A2 و FM-A3 جزء مناسب‌ترین روش‌های تخمین منحنی مشخصه در خاک‌های به کار رفته در این تحقیق می‌باشند.

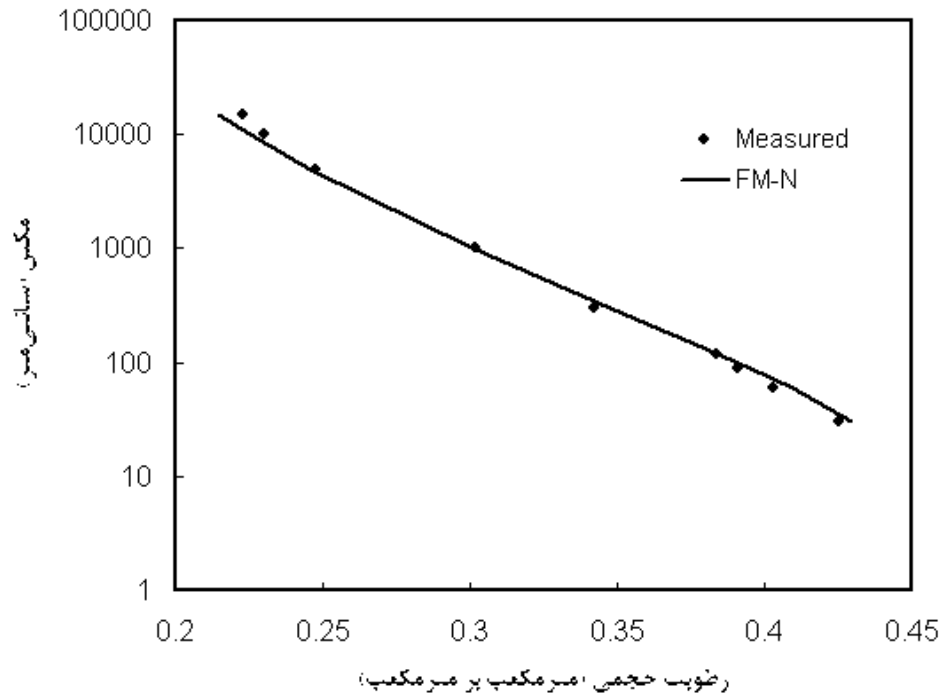
۴- نتایج تحقیقات فولادمند و حبیبی (۱۲) با تخمین منحنی دانه‌بندی از روش فولادمند و سپاسخواه (۱۴) در خاک‌هایی با بافت‌های سبک تا سنگین نشان داد که استفاده از نسبت پوکی متغیر با استفاده از روش لجستیک برای تعیین پارامتر مقیاس  $\alpha$  منجر به بهبود تخمین منحنی مشخصه می‌شود. در حالی که نتایج به دست آمده در این تحقیق برای بافت‌های نسبتاً سنگین نشان‌دهنده آن است که حالت FS-LG برای تخمین منحنی مشخصه در مقایسه با سایر حالت‌ها مناسب نیست.

۵- نتایج تحقیقات فولادمند و منصوروی (۱۳) نشان داد که مدل اصلاح شده فولادمند و سپاسخواه (۱۴) برای تخمین منحنی دانه‌بندی مناسب‌تر از مدل فولادمند و منصوروی (۱۳) است. در حالی که نتایج این تحقیق بیانگر آن است که مدل فولادمند و منصوروی (۱۳) بر روی تخمین منحنی مشخصه نتایج بهتری نسبت به کاربرد مدل اصلاح شده فولادمند و سپاسخواه (۱۴) دارد، به طوری که میانگین SE کلیه خاک‌ها و حالت‌های تخمین منحنی مشخصه بر مبنای مدل‌های فولادمند و منصوروی (۱۳) و فولادمند و سپاسخواه (۱۴) به ترتیب برابر  $0/04$  و  $0/06$  و مقدار GSDER برای شرایط ذکر شده به ترتیب برابر  $0/07$  و  $0/09$  می‌باشد.

۶- میانگین مقدار SE برای حالت‌های لجستیک با نسبت پوکی ثابت، خطی با نسبت پوکی ثابت، لجستیک با نسبت پوکی متغیر، خطی با نسبت پوکی متغیر و آلفا-۱ تا آلفا-۴ (با در نظر گرفتن هر دو حالت مختلف تخمین منحنی دانه‌بندی) به ترتیب برابر  $0/07$ ،  $0/06$ ،  $0/10$ ،  $0/06$ ،  $0/05$ ،  $0/04$ ،  $0/04$  و  $0/06$  و میانگین مقدار GSDER برای حالت‌های ذکر شده قبلی (با در نظر گرفتن هر دو حالت مختلف تخمین منحنی دانه‌بندی) به ترتیب برابر  $0/16$ ،  $0/08$ ،  $0/16$ ،  $0/09$ ،  $0/06$ ،  $0/07$ ،  $0/07$  و  $0/10$  می‌باشد. بنابراین بدون در نظر گرفتن مسیر تخمین منحنی دانه‌بندی مشاهده می‌شود که حالت‌های آلفا-۱ تا آلفا-۳ مناسب‌ترین گزینه‌های تخمین منحنی مشخصه می‌باشند.



شکل ۱- منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده از روش FM-A2 در خاک شماره ۱



شکل ۲- منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده از روش FM-N در خاک شماره ۷



## منابع

- ۱- خوشنودیزدی ع.ا. و قهرمان ب. ۱۳۸۳. بررسی روابط بافت خاک و پارامتر مقیاس بندی برای برآورد رطوبت خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۱۷-۳۴:(۲۰)۵.
- ۲- رخسندروغ.ر. و اسلامی حقیقت ع. ۱۳۸۷. ارزیابی منحنی مشخصه آب و خاک بر اساس تئوری تخلخل موضعی. آب و فاضلاب. ۶۶: ۶۶-۷۶.
- ۳- رضایی ح.، نیشابوری م.ر. و سپاسخواه ع.ر. ۱۳۸۴. ارزیابی مدل های شبیه سازی منحنی مشخصه آب خاک بر اساس توزیع دانه بندی ذرات خاک. دانش کشاورزی. ۱۱۵:(۲)۱۳۰-۱۱۹.
- ۴- رضایی ع. و نیشابوری م.ر. ۱۳۸۱. تخمین منحنی خصوصیات آب خاک از منحنی توزیع اندازه ذرات، جرم مخصوص ظاهری و حقیقی خاک. دانش کشاورزی. ۱۱۲:(۳)۳۷-۲۹.
- ۵- رضایی ل.، شعبانپور م. و دواتگر ن. ۱۳۹۰. برآورد پارامتر مقیاس به روش های مختلف در مدل آریا و پاریس برای بهبود تخمین منحنی مشخصه آب خاک. دانش آب و خاک. ۲۱:(۳)۱۱۴-۱۰۳.
- ۶- فولادمند ح.ر. ۱۳۸۶. بهبود تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از منحنی دانه بندی و چگالی ظاهری خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۱۱:(۴۱-الف)۷۳-۶۳.
- ۷- فولادمند ح.ر. ۱۳۹۰. تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از چند روش محاسبه عامل مقیاس بندی. پژوهش های حفاظت آب و خاک. ۱۱۸:(۱)۲۱۳-۱۹۹.
- ۸- فولادمند ح.ر.، سپاسخواه ع.ر. و نیازی ج. ۱۳۸۳. تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از منحنی دانه بندی و چگالی ظاهری خاک. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۸:(۳)۱۳-۱.
- ۹- قنبریان علویچه ب.، لیاقت ع.م.، شرفا م. و مقیمی عراقی س. ۱۳۸۷. پیش بینی منحنی مشخصه رطوبتی با استفاده از منحنی دانه بندی خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۹:(۱)۸۰-۶۳.
- 10- Arya L.M., and Paris J.F. 1981. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density. *Soil Science Society of America Journal*, 45:1023-1030.
- 11- Arya L.M., Leij F.J., Van Genuchten M.Th., and Shouse P.J. 1999. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Science Society of America Journal*, 63:510-519.
- 12- Fooladmand H.R., and Habibi M. 2012. Estimating soil water characteristic curve based on soil-particle-size distribution curve and local void ratio. *African Journal of Agricultural Research*, 7(14):2197-2204.
- 13- Fooladmand H.R., and Mansuri M. 2013. Comparison of two models for estimating soil particle-size distribution curve based on soil textural data. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59:83-92.
- 14- Fooladmand H.R., and Sepaskhah A.R. 2006. Improved estimation of the soil particle-size distribution from textural data. *Biosystems Engineering*, 94:133-138.
- 15- Fredlund M.D., Fredlund D.G., and Wilson G.W. 2000. An equation to represent grain-size distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 37:817-827.
- 16- Sepaskhah A.R., and Rafiee M.R. 2008. Evaluation of scaling parameter to predict soil water characteristic curve using improved particle-size distribution. *Iranian Journal of Science and Technology*, 32(B5):549-556.
- 17- Shirazi M.A., and Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 142-147.
- 18- Skaggs T.H., Arya L.M., Shouse P.J., and Mohanty B.P. 2001. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. *Soil Science Society of America Journal*, 65:1038-1044.
- 19- Tietje O., and Hennings V. 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma*, 69: 71-84.
- 20- Tyler S.W., and Wheatcraft S.W. 1989. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Science Society of America Journal*, 53:987-996.
- 21- 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.
- 22- Vaz C.M.P., Iossi M.F., Naime J.M., Macedo A., Reichert J.M., Reinert D.J., and Cooper M. 2005. Validation of the Arya and Paris water retention model for Brazilian soils. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 577-583.
- 23- Wagner B., Tarnawski V.R., Hennings V., Muller U., Wessoleu G., and Plagge R. 2001. Evaluation of pedotransfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. *Geoderma*, 102: 275- 297.



## Comparison Eight Methods for Estimating Soil Moisture Characteristic Curve Based on Two Methods for Estimating Soil Particle Size Distribution Curve

H.R. Fooladmand<sup>1</sup>

Received: 15-03-2013

Accepted: 10-11-2014

### Abstract

The relationship between soil moisture and soil matric suction is called soil moisture characteristic curve, which its measurement is time-consuming and expensive. One of the estimation methods of soil moisture characteristic curve is using the soil particle size distribution curve and bulk density which contains a scaling parameter ( $\alpha$ ). In this study, 10 soil samples were selected from Marvdasht region in Fars province, and soil texture and soil moisture characteristic curve of each soil were measured. Then, the soil particle size distribution curve of each soil was estimated based on Fooladmand and Sepaskhah model (FS) and Fooladmand and Mansuri model (FM), and also eight methods were used for determining the scaling parameter including linear procedure with constant void ratio (N), logistic procedure with constant void ratio (G), linear procedure with local void ratio (LN), logistic procedure with local void ratio (LG), Alfa-1 (A1), Alfa-2 (A2), Alfa-3 (A3) and Alfa-4 (A4). Therefore, the soil moisture characteristic curve of each soil was estimated with 16 different methods, and all of them were compared with measured soil moisture characteristic curve data. For this purpose, Standard error (SE), geometric mean error ratio (GMER) and geometric standard deviation of the error ratio (GSDER) were used. The results showed that the FM model for estimating the soil particle size distribution curve and then estimation the soil moisture characteristic curve was better than the FS model. In general, the results indicated that the procedures of FM-A1, FM-A2, FM-A3, FM-N and FM-LN were appropriate for estimating the soil moisture characteristic curve.

**Keywords:** Soil moisture characteristic curve, Soil particle size distribution curve, Scaling factor, Linear procedure, Logistic procedure

---

1- Associated Professor, Department of Irrigation, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran  
Email: hrfoolad@yahoo.com