

## تخمین منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک

حمیدرضا فولادمند<sup>۱</sup>، علیرضا سپاسخواه<sup>۱</sup> و جانب‌اله نیازی<sup>۲</sup>

## چکیده

به‌دست آوردن منحنی مشخصه آب خاک در آزمایشگاه وقت‌گیر بوده و همراه با خطاست. به این دلیل پژوهندگان زیادی در دنیا سعی کرده‌اند روش‌هایی ارائه دهند که به کمک آنها بتوان منحنی مشخصه را به نحو آسان‌تری به دست آورد. یکی از این روش‌ها استفاده از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری خاک می‌باشد. در این روش، منحنی دانه‌بندی را به چند قطعه بر مبنای اندازه ذرات تقسیم کرده و با توجه به میانگین شعاع ذرات و درصد ذرات بزرگ‌تر از هر اندازه و روابط موجود می‌توان منحنی مشخصه آب خاک را به دست آورد. در این روش از پارامتری به نام  $\alpha$  (عامل مقیاس) استفاده می‌شود که مقداری است ثابت و یا از روش‌های خطی و لجستیک به دست می‌آید. مقدار میانگین  $\alpha$  برای خاک‌های با بافت رس، رس سیلتی و لوم شنی به ترتیب برابر ۱/۱۵۹، ۱/۲۲۹ و ۱/۴۹۴، برای دو بافت لوم ۱/۳۹۱ و ۱/۳۹۳ و برای دو بافت لوم رسی سیلتی برابر ۱/۲۵۳ و ۱/۲۵۴ به دست آمد. در بسیاری از مواقع منحنی دانه‌بندی خاک مورد نظر به طور کامل وجود ندارد و تنها درصد ذرات رس، سیلت و شن خاک در اختیار می‌باشد. در این صورت، نخست منحنی دانه‌بندی خاک تخمین زده شده و سپس با استفاده از آن منحنی مشخصه آب خاک به دست می‌آید. در این پژوهش از اطلاعات درصد ذرات مختلف خاک و چگالی ظاهری هفت خاک مختلف استفاده و منحنی مشخصه خاک‌های فوق به روش‌های لجستیک و خطی تخمین زده شد و با نتایج اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. برای تخمین منحنی دانه‌بندی خاک‌های فوق نیز از دو مقدار حد انتهایی شعاع ذرات خاک برابر ۱۲۵ و ۹۹۹ میکرومتر استفاده شد.

نتایج نشان داد که استفاده از شعاع ۹۹۹ میکرومتر برای تخمین منحنی مشخصه مناسب‌تر می‌باشد. علاوه بر آن، در بافت‌های رس، رس سیلتی و لوم رسی سیلتی معادله خطی و در بافت‌های لوم و لوم شنی معادله لجستیک برای تعیین  $\alpha$  مناسب‌تر است.

واژه‌های کلیدی: منحنی مشخصه آب خاک، منحنی دانه‌بندی خاک، چگالی ظاهری، روش لجستیک، روش خطی

## مقدمه

حرکت غیر اشباع آب در خاک کاربرد فراوان دارد و شناسایی رفتار فیزیکی خاک در رطوبت‌های مختلف را آسان‌تر می‌کند. برای به دست آوردن منحنی مشخصه آب خاک روش‌های رطوبت در طرح‌های آبیاری و زه‌کشی و مسایل مربوط به

۱. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استاد آبیاری و زه‌کشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. کارشناس بخش خاک و آب مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس

آزمایشگاهی معمول، بسیار وقت گیر و پر هزینه می باشد و به همین علت از سال‌ها پیش پژوهندگان در پی به دست آوردن روش‌های کم هزینه تر بوده اند. اغلب این روش‌ها دارای مبنای ریاضی و فیزیکی هستند و هدف تمام آنها پیدا کردن یک رابطه ریاضی مناسب است که با انجام آزمایش‌های ساده تر و کم هزینه تر بتوان تا حد ممکن به نتایج آزمایشگاهی نزدیک شد.

از جمله روش‌های فوق می توان به روش‌های ارائه شده توسط بروکس و کوری (۴)، کمپل (۵)، هاتسون و کس (۷)، ساکستون و همکاران (۸)، شانی و همکاران (۱۰) و ونگونختن (۱۳) اشاره نمود. منحنی مشخصه آب خاک توزیع اندازه منافذ خاک را نشان می دهد و درجه تراکم و تخلخل خاک (چگالی ظاهری و میزان آب خاک اشباع) نیز در شکل این منحنی مؤثر است. آریا و پاریس (۲) با معرفی یک مدل، امکان پیش بینی منحنی مشخصه آب خاک را از منحنی دانه بندی و چگالی ظاهری آن فراهم ساختند. اساس مدل فوق، شباهت ظاهری بین منحنی دانه بندی و منحنی مشخصه آب خاک بود. در این مدل منحنی مشخصه آب خاک با دقت خوب تخمین زده نمی شد ولی حداقل، شکل واقعی آن تقلید و تأیید می گردید. در مدل فوق منحنی دانه بندی خاک به قسمت‌های مختلف تقسیم شده و سپس با استفاده از چگالی ظاهری و روابط جرمی و حجمی خاک و صعود موئینگی، مقادیر رطوبت و مکش در قسمت‌های مختلف منحنی دانه بندی به دست می آمد و بنابراین منحنی مشخصه آب خاک قابل رسم بود. در این مدل از یک پارامتر مقیاس به نام  $\alpha$  استفاده شد و این مقدار بین  $1/35$  تا  $1/4$  به دست آمد که در نهایت برای کلیه خاک‌ها برابر  $1/38$  در نظر گرفته شد. مدل ساده دیگری نیز توسط هاورکمپ و پارلانگ (۶) ارائه و برای بافت شنی درشت آزمایش شد. هم چنین تایلر و ویت کرافت (۱۲) تجزیه و تحلیل‌هایی روی مقدار پارامتر  $\alpha$  مدل آریا و پاریس انجام دادند. ولی پژوهش‌های بعدی توسط آریا و همکاران (۳) نشان داد که  $\alpha$  بین  $1/1$  برای بافت‌های ریز تا  $2/5$  برای بافت‌های درشت تغییر می کند. بنابراین  $\alpha$  نمی تواند

برای بافت‌های مختلف خاک یکسان باشد و حتی در قسمت‌های مختلف منحنی دانه بندی یک خاک معین هم ثابت نیست. به همین دلیل، آریا و همکاران (۳) سه روش برای تعیین مقدار  $\alpha$  در بعضی از بافت‌های خاک ارائه نمودند که در یکی از آنها برای هر بافت خاک  $\alpha$  ثابت در نظر گرفته شد و در دو روش دیگر مقدار  $\alpha$  از معادله‌های خطی و لجستیک (غیر خطی S شکل) به دست آمد. در روش  $\alpha$  ثابت، مقدار  $\alpha$  برای بافت‌های شن، لوم شنی، لوم، سیلتی لوم و رس به ترتیب برابر  $1/285$ ،  $1/459$ ،  $1/375$ ،  $1/150$  و  $1/160$  به دست آمد (۳).

همان گونه که مطرح شد برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک، منحنی دانه بندی خاک باید موجود باشد. ولی ممکن است فقط درصد ذرات رس، سیلت و شن خاک وجود داشته باشد. در این صورت می توان منحنی دانه بندی خاک را با استفاده از روش ارائه شده توسط اسکگر و همکاران (۱۱) به دست آورد. این محققان، سیستم آمریکایی طبقه بندی ذرات خاک را بر اساس شعاع ذرات خاک (بر حسب میکرومتر) در نظر گرفتند. بر این اساس، شعاع‌های ۱، ۲۵، ۵۰، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ میکرومتر به ترتیب محدوده ذرات رس، سیلت، شن خیلی ریز، شن ریز، شن متوسط، شن درشت و شن خیلی درشت می باشد. با استفاده از روابط ارائه شده توسط این محققین و در نظر گرفتن حدی انتهایی برای شعاع ذرات خاک، منحنی دانه بندی خاک در محدوده شعاع ۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر را می توان تخمین زد و از آن برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک استفاده نمود.

هدف از این پژوهش تخمین منحنی مشخصه آب خاک با مقادیر  $\alpha$  به دست آمده از معادله‌های خطی و لجستیک با اطلاع از درصد ذرات رس، سیلت و شن و چگالی ظاهری هفت نوع خاک مختلف و مقایسه نتایج تخمین زده شده با نتایج اندازه گیری شده منحنی مشخصه آنها می باشد. هم چنین در این پژوهش روش ارائه شده توسط اسکگر و همکاران (۱۱) برای تخمین منحنی دانه بندی خاک از روی درصد ذرات رس، سیلت و شن به کار خواهد رفت.

## مواد و روش‌ها

در این پژوهش از داده‌های اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه آب خاک هفت نوع خاک مختلف استفاده گردید. خاک‌های به کار رفته عبارت‌اند از: دو خاک مختلف آونجان رامجرد از منطقه زیر سد درودزن در استان فارس با بافت‌های رس و رس سیلتی، خاک منطقه کربال مرودشت در استان فارس با بافت لوم رسی سیلتی، خاک حومه سروستان در استان فارس با بافت لوم و خاک منطقه برازجان در استان بوشهر با بافت لوم شنی (۱) و خاک‌های دزفول با بافت لوم رسی سیلتی و ملا ثانی با بافت لوم (سپاسخواه و کاشفی‌پور، اطلاعات منتشر نشده) می‌باشد. اطلاعات مربوط به این خاک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

برای انجام محاسبات لازم، منحنی دانه‌بندی خاک به قسمت‌های مختلفی تقسیم شد که در هر قسمت میانگین شعاع ذرات و درصد ذرات کوچک‌تر از آن شعاع معلوم است. از طرف دیگر، رطوبت حجمی خاک در حالت اشباع برابر خلل و فرج خاک می‌باشد. بنابراین با داشتن رطوبت حجمی اشباع خاک می‌توان نسبت پوکی خاک را به دست آورد. علاوه بر آن برای سادگی می‌توان چگالی واقعی کلیه خاک‌ها را برابر ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب منظور نمود. با داشتن مقادیر چگالی واقعی و نسبت پوکی خاک خواهیم داشت (۳):

$$V_{Vi} = \frac{W_i}{\rho_s} e \quad [1]$$

که در آن  $V_{Vi}$ : حجم خلل و فرج خاک در واحد جرم در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب سانتی‌متر مکعب بر گرم،  $W_i$ : جرم ذرات جامد خاک در واحد جرم در قسمت  $i$  ام منحنی دانه بندی بر حسب گرم بر گرم،  $\rho_s$ : چگالی واقعی خاک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و  $e$ : نسبت پوکی خاک می‌باشد. بنابراین حجم خلل و فرج خاک در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی از معادله ۱ به دست می‌آید و چنانچه مقادیر فوق به صورت تجمعی با هم جمع شده و هر عدد به دست آمده در چگالی ظاهری خاک ضرب شود، مقدار رطوبت حجمی آب خاک در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی تعیین

می‌شود (۳). بنابراین داریم:

$$\theta_i = \rho_b \sum_{j=1}^i V_{Vj} \quad [2]$$

که در آن  $\theta_i$ : مقدار رطوبت حجمی آب خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب متر مکعب بر متر مکعب و  $\rho_b$ : چگالی ظاهری خاک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. چنانچه در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی خاک تعداد ذرات کروی برابر  $n_i$  باشد و خلل و فرج‌های خاک به صورت منافذی در امتداد یک استوانه قرار گرفته باشد، خواهیم داشت (۳):

$$V_{Pi} = n_i \frac{4\pi}{3} R_i^3 = \frac{W_i}{\rho_s} \quad [3]$$

$$V_{Vi} = \pi r_i^2 L_i = \frac{W_i}{\rho_s} e \quad [4]$$

که در آنها  $V_{Pi}$ : حجم کل ذرات جامد در واحد جرم نمونه در قسمت  $i$  ام منحنی دانه بندی بر حسب سانتی‌متر مکعب بر گرم،  $R_i$ : میانگین اندازه شعاع ذرات خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه بندی بر حسب سانتی‌متر،  $r_i$ : میانگین اندازه شعاع خلل و فرج‌ها در قسمت  $i$  ام منحنی دانه بندی بر حسب سانتی‌متر،  $n_i$ : تعداد کل ذرات کروی خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب یک برگرم و  $L_i$ : طول کل خلل و فرج‌ها در قسمت  $i$  ام منحنی دانه بندی بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. با تقسیم کردن معادله ۴ بر معادله ۳ و با توجه به آن که نسبت  $V_{Vi}$  به  $V_{Pi}$  برابر نسبت پوکی می‌باشد خواهیم داشت (۳):

$$\frac{r_i^2}{R_i^3} = \frac{4n_i e}{3L_i} \quad [5]$$

در حالت ساده، فرض بر آن است که کلیه ذرات کروی خاک به طور دقیق روی یکدیگر قرار گرفته‌اند (آرایش مکعبی). بنابراین می‌توان نوشت (۳):

$$L_i = 2n_i R_i \quad [6]$$

از تلفیق معادله‌های ۵ و ۶ خواهیم داشت (۳):

$$r_i = 0.1816 R_i e^{0.5} \quad [7]$$

ولی در حقیقت ذرات خاک به طور مرتب و منظم روی یکدیگر قرار نمی‌گیرند، یعنی دارای آرایش غیرکروی هستند و کاملاً

جدول ۱. بعضی از خواص فیزیکی خاک‌های این پژوهش

خاک	بافت	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	چگالی ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	رطوبت حجمی اشباع خاک (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
آونجان رامجرد	رس	۵۳/۲	۳۸/۲	۸/۶	۱/۶۵	۰/۴۲۵
آونجان رامجرد	رس سیلتی	۴۹/۲	۴۲/۲	۸/۶	۱/۷۲	۰/۴۱۱
کربال	لوم رسی سیلتی	۳۶/۶	۴۵/۴	۱۸/۰	۱/۳۳	۰/۴۵۵
دزفول	لوم رسی سیلتی	۳۱/۰	۴۹/۰	۲۰/۰	۱/۴۷	۰/۴۴۷
سروستان	لوم	۲۰/۶	۴۳/۴	۳۶/۰	۱/۶۰	۰/۳۶۵
ملائانی	لوم	۲۶/۴	۴۳/۰	۳۰/۶	۱/۴۴	۰/۴۹۹
برازجان	لوم شنی	۱۶/۷	۱۵/۷	۶۷/۶	۱/۴۱	۰/۳۳۲

آن با معادله ۹ خواهیم داشت (۳):

$$h_i = \frac{0.18}{R_i (en_i^{\alpha})^{0.5}} \quad [12]$$

بنابراین، مقادیر رطوبت و مکش در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی از معادله‌های ۲ و ۱۲ تعیین شده و بنابراین منحنی مشخصه آب خاک به دست می‌آید. ولی نکته قابل توجه آن است که محاسبات فوق در صورتی انجام می‌شود که مقدار عددی  $\alpha$  در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی معلوم باشد.

برای تعیین  $\alpha$  باید تعداد واقعی ذرات کروی خاک را در هر قسمت از منحنی دانه بندی خاک به دست آورد. از آنجا که ذرات خاک کاملاً کروی نیستند، فرض می‌شود که تعداد ذرات کروی خاک در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی ( $N_i$ ) از معادله زیر به دست می‌آید (۳):

$$n_i^{\alpha} = N_i \quad \text{یا} \quad \alpha = \frac{\text{Log} N_i}{\text{Log} n_i} \quad [13]$$

هم چنین آریا و همکاران (۳) با استفاده از منحنی‌های مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده، از رابطه زیر مقدار  $N_i$  را در قسمت‌های مختلف منحنی دانه‌بندی تعیین کردند:

$$N_i = 7 \times 371 W_i e^{\frac{h_{mi}^2}{\rho_s R_i}} \quad [14]$$

که در آن  $h_{mi}$ : مکش آب خاک اندازه‌گیری شده از منحنی مشخصه موجود بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. در این پژوهش برای تعیین مقدار  $\alpha$  از معادله‌های خطی و لجستیک بین مقادیر  $\text{Log} N_i$  و  $\text{Log} n_i$  استفاده شده است.

کروی نیستند. بنابراین به علت سراسر نبودن مجاری و وجود کج و معوجی در آن، طول واقعی مجاری بزرگ‌تر از  $L_i$  به دست آمده از معادله ۶ می‌باشد. از این رو برای تصحیح آن به جای  $n_i$  از  $n_i^{\alpha}$  استفاده می‌شود که  $\alpha$  را پارامتر مقیاس نامیده و بزرگ‌تر از یک است (۳). بنابراین معادله ۶ به صورت زیر تصحیح می‌شود (۳):

$$L_i = 2 n_i^{\alpha} R_i \quad [8]$$

حال از تلفیق معادله‌های ۵ و ۸ خواهیم داشت (۳):

$$r_i = 0.1816 R_i (en_i^{\alpha})^{0.5} \quad [9]$$

مقدار  $n_i$  نیز با استفاده از معادله ۳ به صورت زیر به دست می‌آید (۳):

$$n_i = \frac{3}{4\pi} \times \frac{W_i}{\rho_s R_i^3} \quad [10]$$

از طرف دیگر با معلوم شدن  $r_i$  از معادله ۹ خواهیم داشت (۳):

$$h_i = \frac{2\delta \text{Cos}\beta}{\rho_w g r_i} \quad [11]$$

که در آن  $h_i$ : مکش آب خاک در قسمت  $i$  ام منحنی دانه‌بندی بر حسب سانتی‌متر،  $\delta$ : تنش سطحی بین آب و هوا بر حسب گرم بر مجذور ثانیه،  $g$ : شتاب ثقل حسب سانتی‌متر بر مجذور ثانیه،  $\rho_w$ : چگالی آب حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و  $\beta$ : زاویه تماس می‌باشد. با در نظر گرفتن زاویه تماس برابر صفر درجه و جایگزینی مقادیر عددی  $\delta$  و  $\rho_w$  از معادله ۱۱ و تلفیق

X و Y را به سمت چپ و پایین محورهای اصلی منتقل کردند. بنابراین خواهیم داشت (۳):

$$Y + \Delta Y = \frac{Y_f Y_{in}}{Y_{in} + (Y_f - Y_{in}) \exp \{-\mu(x + \Delta x)\}} \quad [18]$$

که در آن  $\Delta Y = \Delta \text{Log} N_i$  و  $\Delta x = \Delta \text{Log} n_i$  می‌باشد. عوامل معادله ۱۸ توسط آریا و همکاران (۳) برای بافت‌های شن، لوم، شنی، لوم، سیلت لوم و رس به دست آمده است و برای دو بافت رس سیلتی و لوم رسی سیلتی نیز با میان‌یابی بین بافت‌های با عوامل معلوم تعیین گردید. این عوامل در جدول ۲ ارائه و از آنها در این پژوهش استفاده شده است. بنابراین، با توجه به معادله‌های ۱۳ و ۱۸ می‌توان مقدار  $\alpha$  را در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی به دست آورد.

#### تخمین منحنی دانه‌بندی خاک

برای تعیین منحنی دانه‌بندی خاک در محدوده شعاع ذرات ۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر از روی درصد مقادیر رس، سیلت و شن خاک، از روش ارائه شده توسط اسکگز و همکاران (۱۱) با به‌کارگیری روابط زیر استفاده گردید:

$$\beta_1 = \frac{1}{\text{Ln} \frac{r_1 - r_c}{r_2 - r_c}} \quad [19]$$

$$\beta_2 = \beta_1 \text{Ln} \frac{r_1 - r_c}{r_c} \quad [20]$$

$$v = \text{Ln} \frac{(cl + si)^{-1} - 1}{cl^{-1} - 1} \quad v < 0 \quad [21]$$

$$z = \text{Ln} \frac{(cl + si + s)^{-1} - 1}{cl^{-1} - 1} \quad z < 0 \quad [22]$$

$$c = \beta_1 \text{Ln} \frac{v}{z} \quad [23]$$

$$u = \frac{(-v)^{1-\beta_2}}{(-z)^{-\beta_2}} \quad [24]$$

$$W = \frac{1}{1 + (cl^{-1} - 1) \exp \{-u(R - 1)^c\}} \quad [25]$$

که در آنها  $cl$ : کسر مربوط به ذرات کوچکتر از رس خاک (بر حسب اعشار)،  $cl + si$ : کسر مربوط به ذرات کوچکتر از سیلت خاک به صورت تجمعی،  $cl + si + s$ : کسر مربوط به ذرات

#### معادله خطی برای تعیین $\alpha$

با توجه به معادله ۱۰ دیده می‌شود که  $\text{Log} n_i$  با  $\text{Log}(W_i/R_i^3)$  رابطه خطی دارد و چون  $N_i$  مقیاس بزرگ‌تری از  $n_i$  می‌باشد بنابراین  $\text{Log} N_i$  هم با  $\text{Log}(W_i/R_i^3)$  رابطه خطی دارد. بنابراین خواهیم داشت (۳):

$$\text{Log} N_i = a + b \text{Log} \frac{W_i}{R_i^3} \quad [15]$$

از تلفیق معادله‌های ۱۳ و ۱۵ خواهیم داشت (۳):

$$\alpha_i = \frac{a + b \text{Log} \frac{W_i}{R_i^3}}{\text{Log} n_i} \quad [16]$$

ضرایب  $a$  و  $b$  توسط آریا و همکاران (۳) برای بافت‌های شن، لوم شنی، لوم، سیلت لوم و رس به دست آمده است و برای دو بافت رس سیلتی و لوم رسی سیلتی نیز با میان‌یابی بین بافت‌های با ضرایب معلوم تعیین گردید. این ضرایب در جدول ۲ ارائه شده است و از آنها در این پژوهش استفاده گردید. مقدار  $\text{Log} n_i$  نیز از معادله ۱۰ به دست آمده است.

#### معادله لجستیک برای تعیین $\alpha$

آریا و همکاران (۳) با تعیین مقادیر  $N_i$  از معادله ۱۴ و محاسبه مقادیر  $n_i$  از معادله ۱۰ رابطه بین  $\text{Log} n_i$  و  $\text{Log} N_i$  را به صورت زیر در نظر گرفتند:

$$Y = \frac{Y_f Y_{in}}{Y_{in} + (Y_f - Y_{in}) \exp(-\mu x)} \quad [17]$$

که در آن  $Y$ : نشان دهنده متغیر وابسته  $\text{Log} N_i$ ،  $x$ : نشان دهنده متغیر مستقل  $\text{Log} n_i$ ،  $\mu$ : ضریب شدت، شاخص  $in$  نشان دهنده مقدار اولیه (حد پایین)  $\text{Log} N_i$  و شاخص  $f$  نشان دهنده مقدار انتهایی (حد بالایی)  $\text{Log} N_i$  می‌باشد. به عبارت دیگر، مقادیر  $Y_{in}$  و  $Y_f$  بیشترین و کمترین تعداد اندازه ذرات را به ترتیب در کوچک‌ترین و بزرگ‌ترین بخش اندازه ذرات بر روی منحنی دانه بندی خاک نشان می‌دهد. ولی نتایج آریا و همکاران (۳) نشان داد که در بسیاری از خاک‌ها مقدار اولیه  $\text{Log} N_i$  و  $\text{Log} n_i$  منفی می‌شود، بنابراین این محققین محورهای

جدول ۲. ضرایب معادله خطی و عوامل معادله لجستیک (معادله‌های ۱۶ و ۱۸) برای تعیین در بافت‌های مختلف (۳)

روش لجستیک		روش خطی			بافت خاک		
$\Delta \text{Log } n_i$	$\Delta \text{Log } N_i$	$\mu$	$(\text{Log } N_i)_f$	$(\text{Log } N_i)_m$		a	b
۰/۰۰۰۳۲	۱/۷۳۴	۰/۶۰۹	۱۶/۶۰۲	۰/۹۹۶	-۲/۷۴۸	۱/۴۹۰	شن
۱/۸۴۹	۲/۴۹۲	۰/۵۵۳	۱۶/۹۸۳	۰/۵۵۹	-۳/۳۹۸	۱/۷۷۳	لوم شنی
۱/۹۷۷	۲/۲۴۲	۰/۵۱۰	۱۶/۶۱۴	۰/۶۲۸	-۱/۶۸۱	۱/۳۹۵	لوم
۰/۶۸۴	۱/۹۰۲	۰/۴۵۷	۱۹/۶۸۶	۰/۷۱۹	-۲/۴۸۰	۱/۳۵۳	سیلت لوم
۲/۶۴۸	۴/۷۶۶	۰/۲۸۹	۲۱/۶۸۵	۱/۹۹۳	-۲/۶۰۰	۱/۳۰۵	رس
۱/۹۹۳	۳/۸۱۱	۰/۳۴۵	۲۱/۰۱۹	۱/۵۶۸	-۲/۵۶۰	۱/۳۲۱	رس سیلتی*
۱/۳۳۹	۲/۸۵۷	۰/۴۰۱	۲۰/۳۵۲	۱/۱۴۴	-۲/۵۲۰	۱/۳۳۷	لوم رسی سیلتی*

\*: اعداد جدول با میان‌یابی به دست آمده است.

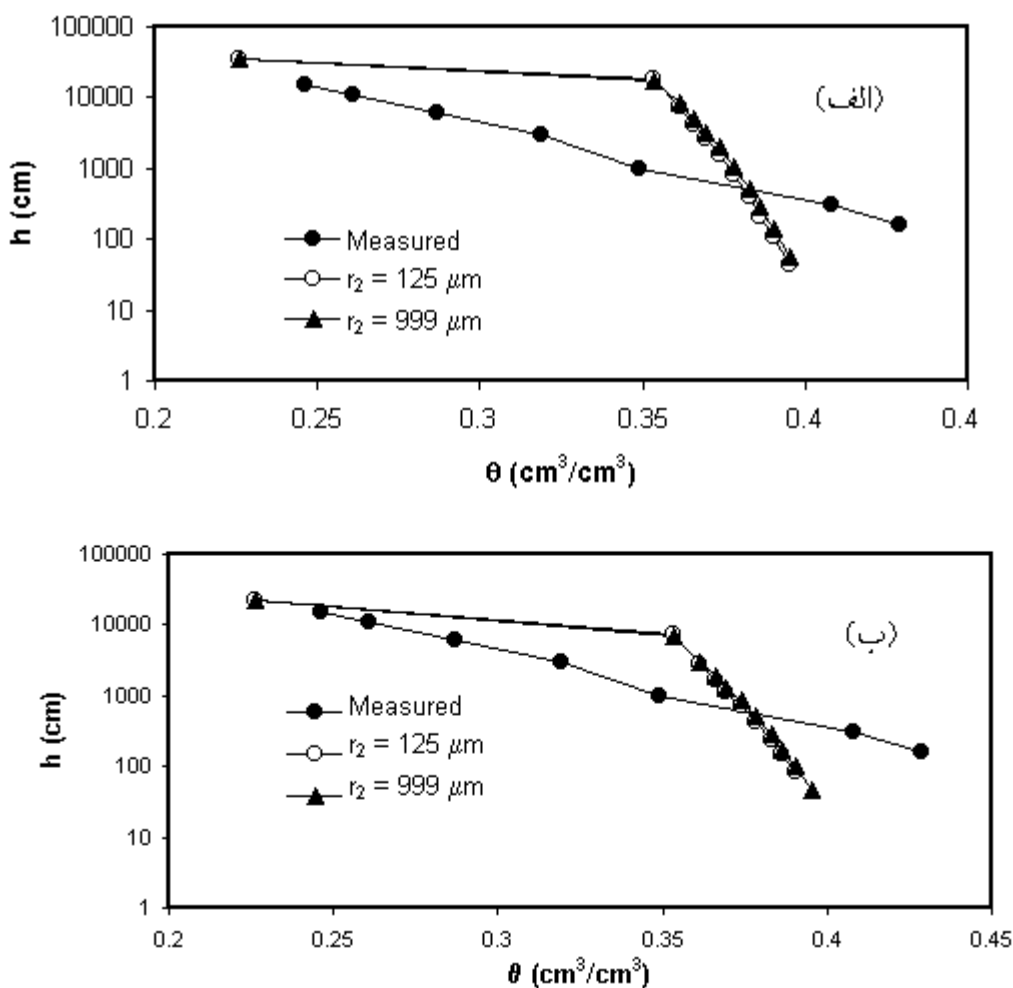
قسمت مساوی است و دو پنجم آن مربوط به شن خیلی ریز و شن ریز می‌باشد. هم‌چنین برای تعیین این مقدار با در نظر گرفتن شعاع ۹۹۹ میکرومتر، از میان‌یابی بین درصد تجمعی ذرات سیلت (شعاع ۲۵ میکرومتر) و کل شن خاک (شعاع ۱۰۰۰ میکرومتر) استفاده شد. بنابراین با توجه به معادله‌های ۱۹ تا ۲۵ منحنی دانه‌بندی هر خاک با در نظر گرفتن دو شعاع ۱۲۵ و ۹۹۹ میکرومتر، به طور جداگانه به دست آمد.

### نتایج

منحنی مشخصه آب خاک هفت خاک مختلف با استفاده از مقادیر  $\alpha$  به دست آمده از معادله‌های خطی و لجستیک و بر اساس شعاع‌های ۱۲۵ و ۹۹۹ میکرومتر (برای تخمین منحنی دانه‌بندی) تخمین زده شده و نتایج به دست آمده با نتایج داده‌های اندازه‌گیری منحنی مشخصه این خاک‌ها مقایسه و در شکل‌های ۱ تا ۷ ارائه شده است. برای مقایسه نتایج به دست آمده از روش‌های مختلف تخمین با داده‌های اندازه‌گیری شده در هر خاک، در مکش‌های اندازه‌گیری شده در خاک‌های مختلف، رطوبت حجمی آب خاک محاسبه و سپس از روش خطای استاندارد به صورت معادله زیر استفاده شد (۹):

$$SE = \sqrt{\frac{1}{N_p - 1} \times \sum (\theta_m - \theta_p)^2} \quad [26]$$

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 معادله ۲۵ می‌توان از روی مقادیر رس، سیلت و شن خاک، مقدار W را برای هر اندازه شعاع R محاسبه و منحنی توزیع اندازه ذرات خاک (منحنی دانه‌بندی خاک) را رسم کرد. مقادیر  $T_0$ ،  $T_1$  و  $T_2$  توسط اسکگر و همکاران (۱۱) به ترتیب برابر ۱، ۲۵ و ۱۲۵ میکرومتر که حد نهایی شعاع ذرات رس، سیلت و شن ریز می‌باشد، در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر این محققین فقط قسمت‌های شن خیلی ریز و شن ریز را در نظر گرفتند، در صورتی که اطلاعات موجود معمولاً شامل کل قسمت شن خاک می‌باشد. ولی در صورت در نظر گرفتن کل قسمت شن خاک، مقدار تجمعی  $cl+si+s$  برابر یک می‌شود و بنابراین مقدار عددی Z نامعین شده و در این صورت نمی‌توان منحنی دانه‌بندی خاک را به دست آورد. بنابراین، در این پژوهش علاوه بر شعاع ۱۲۵ میکرومتر، از شعاع ۹۹۹ میکرومتر (نزدیک به شعاع ۱۰۰۰ میکرومتر که حد نهایی قسمت شن خاک می‌باشد) نیز استفاده شد. از آنجا که کل شن خاک به پنج قسمت (شن خیلی ریز، ریز، متوسط، درشت و خیلی درشت) تقسیم می‌گردد، برای تعیین مقدار عددی  $cl+si+s$  در معادله ۲۲ با در نظر گرفتن شعاع ۱۲۵ میکرومتر، فرض گردید که مقدار کل شن خاک شامل پنج



شکل ۱. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای  $\alpha$  محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک آونجان رامجرد (رس)

مقادیر میانگین  $\alpha$  در قسمت‌های مختلف منحنی دانه‌بندی هر خاک، در خاک‌ها و حالت‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه در جدول ۴ ارائه شده است. در این جدول میانگین  $\alpha$  به دست آمده از چهار حالت مختلف نیز مشاهده می‌شود. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در تمام خاک‌ها مقدار میانگین  $\alpha$  به دست آمده از روش لجستیک بیشتر از مقدار میانگین  $\alpha$  به دست آمده از روش خطی بوده و نیز در تمام خاک‌ها مقدار میانگین  $\alpha$  به دست آمده با در نظر گرفتن حد انتهایی شعاع ۹۹۹ میکرومتر بیشتر از مقدار میانگین  $\alpha$  به دست آمده با در نظر گرفتن حد انتهایی شعاع ۱۲۵ میکرومتر می‌باشد.

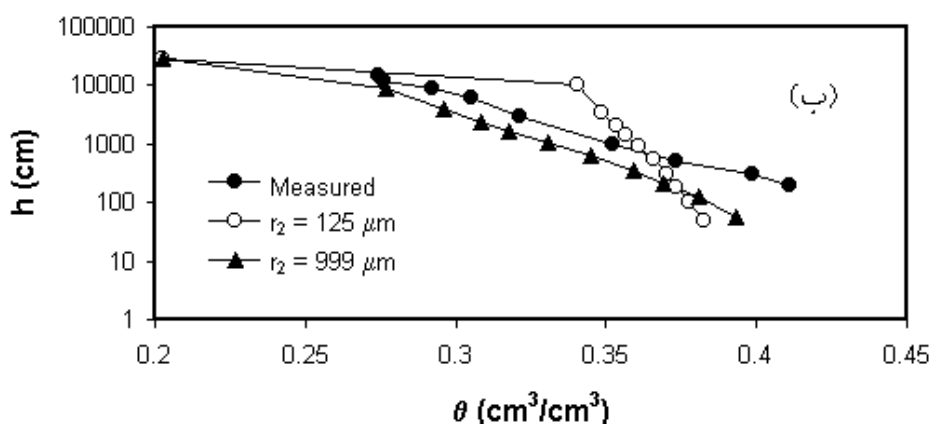
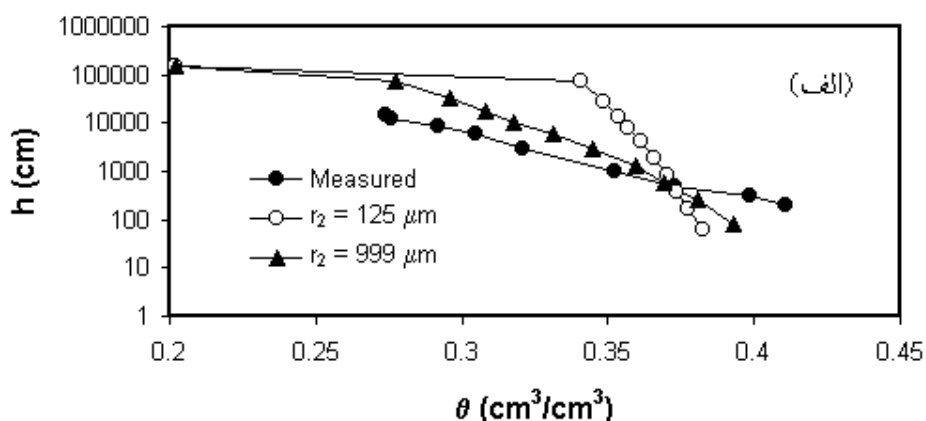
که در آن  $N_p$ : تعداد جفت‌های اندازه‌گیری شده مقدار حجمی آب خاک و مکش آب خاک و  $\theta_m$  و  $\theta_p$ : به ترتیب مقادیر حجمی آب خاک اندازه‌گیری شده در آزمایش و تخمین زده شده بر حسب متر مکعب بر متر مکعب می‌باشد. مقادیر خطای استاندارد برای رطوبت حجمی آب خاک در خاک‌ها و حالت‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه در جدول ۳ ارائه شده است. مقادیر کمتر خطای استاندارد نسبت به مقادیر زیادتر خطای استاندارد نشان دهنده دقت بیشتر نتایج به دست آمده از تخمین می‌باشد. به طوری که در خاک کربال با روش خطی برای تعیین  $\alpha$  و حد نهایی شعاع ۹۹۹ میکرومتر کمترین خطای استاندارد برابر ۰/۰۱۳ به دست آمده است.

جدول ۳. مقادیر خطای استاندارد برای رطوبت حجمی در خاک‌ها و حالت‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه آب خاک

روش لجستیک برای تعیین $\alpha$		روش خطی برای تعیین $\alpha$		بافت	سری خاک
$r_T = 999 \mu m$	$r_T = 125 \mu m$	$r_T = 999 \mu m$	$r_T = 125 \mu m$		
۰/۰۳۷	۰/۰۷۴	۰/۰۲۶	۰/۰۵۰	رس	اونجان رامجرد
۰/۰۲۸	۰/۰۵۴	۰/۰۲۵	۰/۰۳۷	رس سیلتی	اونجان رامجرد
۰/۰۶۵	۰/۰۹۵	۰/۰۱۳	۰/۰۶۴	لوم رسی سیلتی	کربال
۰/۰۸۹	۰/۱۰۶	۰/۰۴۷	۰/۰۸۲	لوم رسی سیلتی	دزفول
۰/۰۲۶	۰/۰۴۹	۰/۰۵۵	۰/۰۵۱	لوم	سروستان
۰/۱۳۱	۰/۱۲۲	۰/۰۸۸	۰/۰۹۹	لوم	ملاثانی
۰/۰۲۴	۰/۰۴۱	۰/۰۳۱	۰/۰۴۸	لوم شنی	برازجان

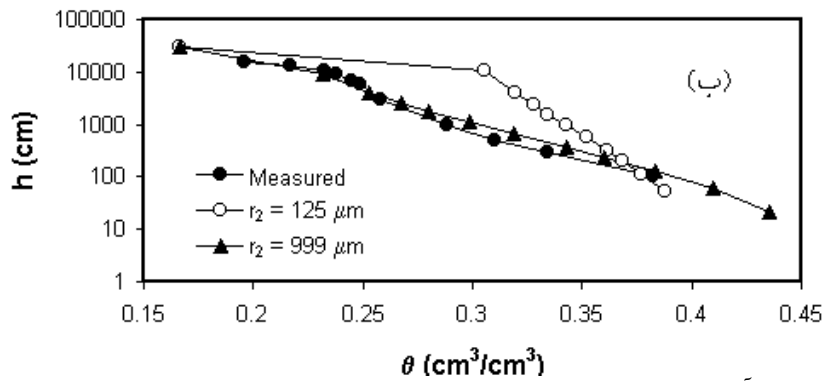
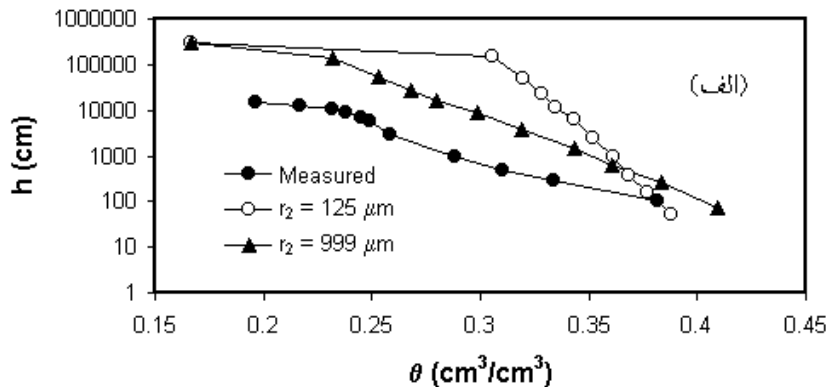
جدول ۴. مقادیر میانگین  $\alpha$  به دست آمده در خاک‌ها و حالت‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه آب خاک

میانگین	$r_T = 999 \mu m$		$r_T = 125 \mu m$		بافت	سری خاک
	روش لجستیک	روش خطی	روش لجستیک	روش خطی		
۱/۱۵۹	۱/۲۰۷	۱/۱۲۲	۱/۱۸۵	۱/۱۲۰	رس	اونجان رامجرد
۱/۲۲۹	۱/۳۳۰	۱/۱۴۹	۱/۳۰۱	۱/۱۳۶	رس سیلتی	اونجان رامجرد
۱/۲۵۴	۱/۳۶۶	۱/۱۵۸	۱/۳۳۵	۱/۱۵۵	لوم رسی سیلتی	کربال
۱/۲۵۳	۱/۳۶۷	۱/۱۶۰	۱/۳۳۶	۱/۱۵۰	لوم رسی سیلتی	دزفول
۱/۳۹۱	۱/۴۵۹	۱/۳۴۵	۱/۴۴۳	۱/۳۱۷	لوم	سروستان
۱/۳۹۳	۱/۴۵۳	۱/۳۴۷	۱/۴۳۶	۱/۳۳۶	لوم	ملاثانی
۱/۴۹۴	۱/۵۳۹	۱/۴۵۵	۱/۵۲۹	۱/۴۵۳	لوم شنی	برازجان

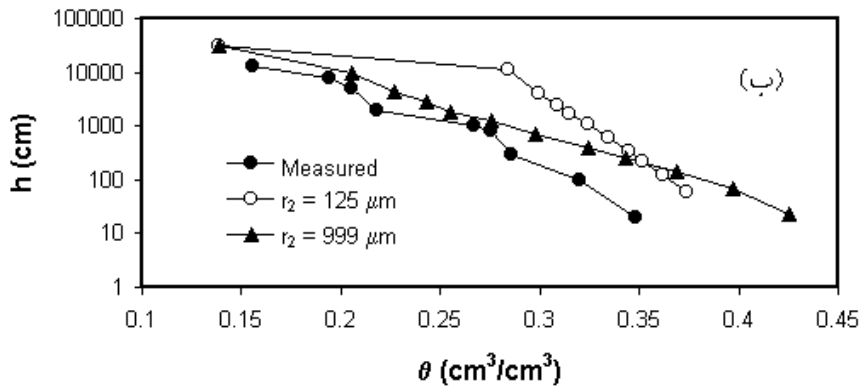
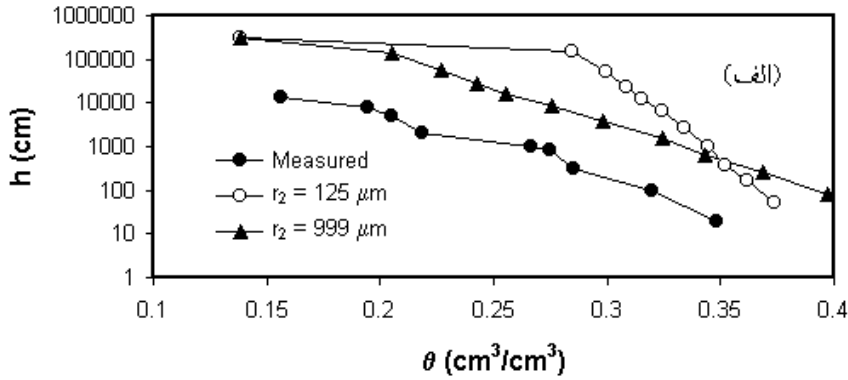


شکل ۲. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای  $\alpha$  محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک اونجان رامجرد (رس سیلتی)

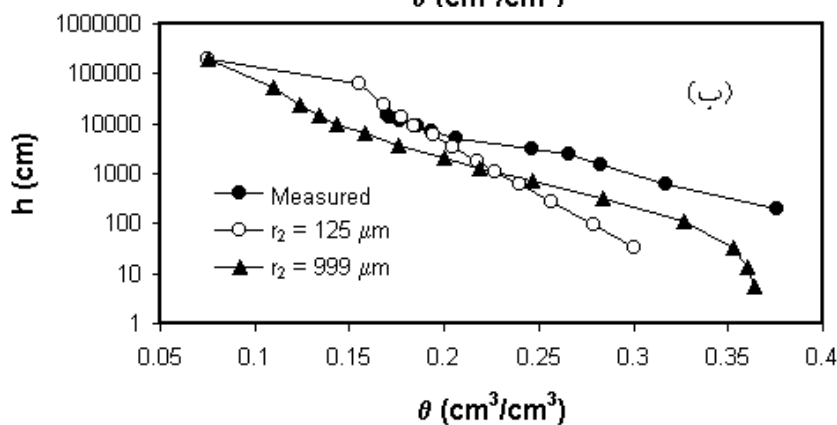
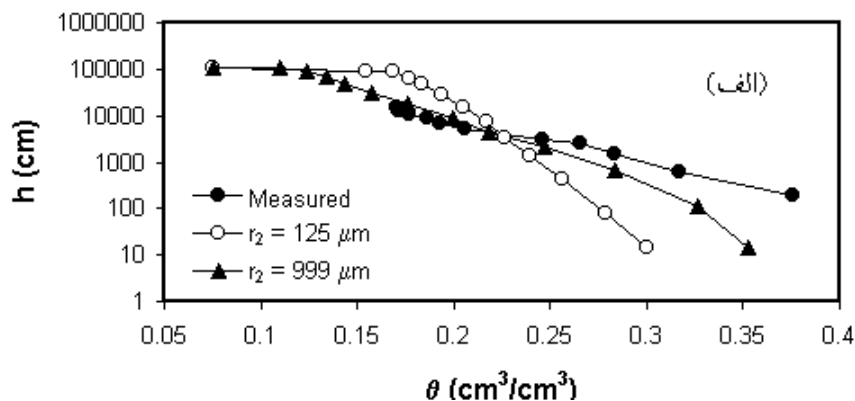




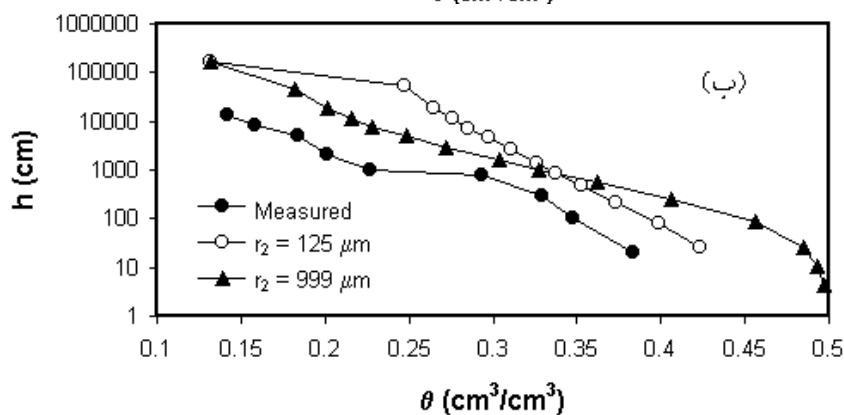
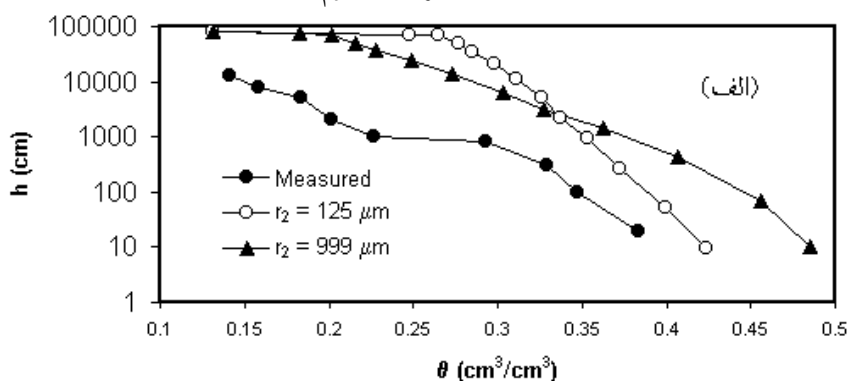
شکل ۳. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای  $\alpha$  محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک کربال (لوم رسی سیلتی)



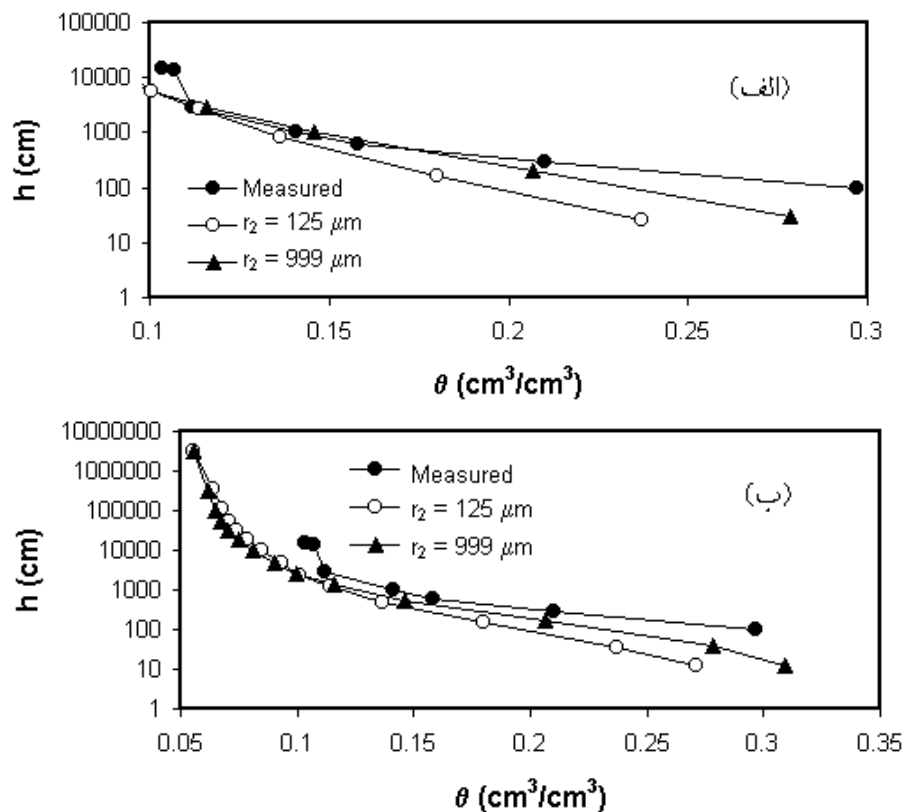
شکل ۴. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای  $\alpha$  محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک دزفول (لوم رسی سیلتی)



شکل ۵. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای  $\alpha$  محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک سروستان (لوم)



شکل ۶. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای  $\alpha$  محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک ملاتانی (لوم)



شکل ۷. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای  $\alpha$  محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک برازجان (لوم شنی)

## بحث

نتایج این پژوهش با توجه به مقادیر خطای استاندارد ارائه شده برای مقادیر رطوبت حجمی خاک در جدول ۳ نشان داد که استفاده از شعاع ذرات ۹۹۹ میکرومتر برای تخمین منحنی دانه‌بندی و استفاده از آن برای تخمین منحنی مشخصه مناسب‌تر از انتخاب شعاع ۱۲۵ میکرومتر است. بنابراین، با یک میان‌یابی ساده می‌توان مقدار ذرات کوچک‌تر از شعاع ۹۹۹ میکرومتر را با داشتن درصد ذرات رس، سیلت و شن به دست آورد تا بتوان منحنی دانه‌بندی خاک را در صورت موجود نبودن، تخمین زد. علاوه بر آن با توجه به مقادیر خطای استاندارد محاسبه شده در خاک‌های مختلف، نتایج نشان داد که در بافت‌های رس، رس سیلتی و لوم رسی سیلتی تعیین  $\alpha$  با معادله خطی برای تخمین منحنی مشخصه مناسب‌تر می‌باشد، ولی در

بافت لوم شنی تعیین  $\alpha$  با معادله لجستیک بهتر است. در یکی از دو خاک با بافت لوم تعیین  $\alpha$  با معادله خطی مناسب‌تر است و در دیگری تعیین  $\alpha$  با معادله لجستیک بهتر می‌باشد. ولی با توجه به نزدیکی نسبی بافت‌های لوم و لوم شنی می‌توان نتیجه گرفت که برای بافت لوم تعیین  $\alpha$  با معادله لجستیک مناسب‌تر از معادله خطی می‌باشد. نکته مهم دیگری که در روش آریا و همکاران (۳) وجود دارد آن است که این مدل در مکش‌های کم آب خاک قابل به کارگیری نیست، چون مقدار  $\alpha$  کمتر از یک می‌شود و این موضوع از نظر تئوری درست نیست. مقدار مکش‌های کم در واقع در محدوده حاشیه مؤینه‌ای است که هر چه بافت خاک سنگین‌تر باشد مقدار آن بیشتر است و به طور میانگین می‌توان گفت که در مکش‌های کمتر از ۱۰ سانتی‌متر به کارگیری این مدل درست نیست. در رسم کلیه منحنی‌ها نیز

بافت‌های رس، لوم شنی و لوم با مقادیر ارائه شده توسط آریا و همکاران (۳) هم‌خوانی مناسبی دارد.

### سپاسگزاری

بدین وسیله از مرحوم شادروان مهندس کشمیری‌پور عضو هیئت علمی بخش فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی استان فارس که اندازه‌گیری‌های منحنی مشخصه پنج خاک به کار رفته در این پژوهش را انجام داده است، تشکر و قدردانی می‌شود.

فقط مقادیر مکش و رطوبتی در نظر گرفته شده‌اند که  $\alpha$  متناظر با آنها بیشتر از یک بوده است. نتایج جدول ۴ نیز نشان داد که میانگین  $\alpha$  به دست آمده برای خاک‌های با بافت رس، رس سیلتی و لوم شنی به ترتیب برابر ۱/۱۵۹، ۱/۲۲۹ و ۱/۴۹۴، برای دو بافت لوم ۱/۳۹۱ و ۱/۳۹۳ و برای دو بافت لوم رسی سیلتی برابر ۱/۲۵۳ و ۱/۲۵۴ می‌باشد. آریا و همکاران (۳) نیز مقدار  $\alpha$  ثابت برای بافت‌های رس، لوم شنی و لوم را به ترتیب برابر ۱/۱۶۰، ۱/۴۵۹ و ۱/۳۷۵ به دست آوردند. بنابراین نتایج این پژوهش نشان داد که مقادیر میانگین  $\alpha$  به دست آمده برای

### منابع مورد استفاده

۱. کشمیری‌پور، ب. و ج. ا. نیازی. ۱۳۷۹. ارزیابی و مقایسه سه روش تعیین منحنی مکش رطوبتی و رابطه آبگذری-رطوبت در پنج بافت خاک استان‌های فارس و بوشهر. مرکز تحقیقات کشاورزی فارس، بخش‌های تحقیقات خاک و آب و فنی و مهندسی.
2. 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.
3. 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.
4. Brooks, R. H. and A. T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. Colorado State University, Hydrology Paper No. 3., Fort Collins, USA.
5. Campbell, G. S. 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.* 117: 311-314.
6. Haverkamp, R. and J. Y. Parlange. 1986. Predicting the water retention curve from particle-size distribution: I. Sandy soils without organic matter. *Soil Sci.* 142: 325-339.
7. Hutson, J. L. and A. Cass. 1987. A retentivity function for use in soil water simulation models. *J. Soil Sci.* 38: 105-113.
8. Saxton, K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger and R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1031-1036.
9. Schuh, W. M., R. L. Cline and M. D. Sweeney. 1988. Comparison of a laboratory procedure and a textural model for predicting in situ soil water retention. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 1218-1227.
10. Shani, U., R. J. Hanks, E. Bresler and C. A. S. Oliveira. 1987. Field method for estimating hydraulic conductivity and matric potential-water content relations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 51: 298-302.
11. 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. Tyler, S. W. and S. W. Wheatcraft. 1989. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 987-996.
13. Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.