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

حمیدرضا فولادمند[۱]، علیرضا سپاسخواه[۱] و جانب‌اله نیازی[۲]

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 α (عامل مقیاس) استفاده می‌شود که مقداری است ثابت و یا از روش‌های خطی و لجستیک به دست می‌آید. مقدار میانگین α 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 α مناسب‌تر است.

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

مقدمه

منحنی مشخصه آب خاک و رابطه بین هدایت هیدرولیکی و رطوبت در طرح‌های آبیاری و زه‌کشی و مسایل مربوط به 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

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]
PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

آزمایشگاهی معمول، بسیار وقت‌گیر و پر هزینه می‌باشد و به همین علت از سال‌ها پیش پژوهندگان در پی به دست آوردن روش‌های کم هزینه‌تر 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 فوق می‌توان به روش‌های ارائه شده توسط بروکس و کوری (۴)، کمپل (۵)، هاتسون و کس (۷)، ساکستون و همکاران (۸)، شانی و همکاران (۱۰) و ونگنوختن (۱۳) اشاره نمود. منحنی مشخصه آب خاک توزیع اندازه منافذ خاک را نشان می‌دهد 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 پیش‌بینی منحنی مشخصه آب خاک را از منحنی دانه‌بندی و چگالی ظاهری آن فراهم ساختند. اساس مدل فوق، شباهت ظاهری بین منحنی دانه‌بندی و منحنی مشخصه آب خاک بود. در این مدل منحنی مشخصه آب خاک با دقت خوب تخمین زده نمی‌شد ولی حداقل، شکل واقعی آن تقلید و تأیید می‌گردید. 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 می‌آمد و بنابراین منحنی مشخصه آب خاک قابل رسم بود. در این مدل از یک پارامتر مقیاس به نام α استفاده شد و این مقدار بین ۱/۳۵ تا ۱/۴ به دست آمد که در نهایت برای کلیه خاک‌ها برابر ۱/۳۸ درنظر گرفته شد. مدل ساده دیگری نیز توسط هاورکمپ و پارلانگ (۶) ارائه و برای بافت شنی درشت آزمایش شد. هم‌چنین تایلر و ویت‌کرافت (۱۲) تجزیه و تحلیل‌هایی روی مقدار پارامتر α مدل آریا و پاریس انجام دادند. ولی پژوهش‌های بعدی توسط آریا و همکاران (۳) نشان داد که α بین ۱/۱ برای بافت‌های ریز تا ۲/۵ برای بافت‌های درشت تغییر می‌کند. بنابراین α نمی‌تواند 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 α در بعضی از بافت‌های خاک ارائه نمودند که در یکی از آنها برای هر بافت خاک α ثابت درنظر گرفته شد و در دو روش دیگر مقدار α از معادله‌های خطی و لجستیک (غیر خطی S شکل) به دست آمد. در روش α ثابت، مقدار α برای بافت‌های شن، لوم شنی، لوم، سیلتی لوم و رس به ترتیب برابر ۱/۲۸۵، ۱/۴۵۹، ۱/۳۷۵، ۱/۱۵۰ و ۱/۱۶۰ به دست آمد (۳).

همان‌گونه که مطرح شد برای تعیین منحنی مشخصه آب خاک، منحنی دانه‌بندی خاک باید موجود باشد. ولی ممکن است فقط درصد ذرات رس، سیلت و شن خاک وجود داشته باشد. در این‌صورت می‌توان منحنی دانه‌بندی خاک را با استفاده از روش ارائه شده توسط اسکگز و همکاران (۱۱) به دست آورد. این محققان، سیستم آمریکایی طبقه‌بندی 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 می‌باشد. با استفاده از روابط ارائه شده توسط این محققین و در نظر گرفتن حدی انتهایی برای شعاع ذرات خاک، منحنی دانه‌بندی خاک در محدوده شعاع ۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر را می‌توان تخمین زد و از آن برای تخمین منحنی مشخصه آب خاک استفاده نمود.

هدف از این پژوهش تخمین منحنی مشخصه آب خاک با مقادیر α به‌دست آمده از معادله‌های خطی و لجستیک با اطلاع از درصد ذرات رس، سیلت و شن و چگالی ظاهری هفت نوع خاک مختلف و مقایسهٔ نتایج تخمین زده شده با نتایج اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه آنها می‌باشد. هم‌چنین در این پژوهش روش ارائه شده توسط اسکگز و همکاران (۱۱) برای تخمین منحنی دانه‌بندی خاک از روی درصد ذرات رس، سیلت و شن به کار خواهد رفت.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

مواد و روش‌ها

در ایـن پـژوهش از داده‌هـای اندازه‌گیری شده منحنی مشخصه آب خـاک هفت نوع خاک مختلف استفاده گردید. خاک‌های به کـار رفـته عـبارت‌انـد از: دو خـاک 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 خـاک منطقه برازجان در استان بوشهر با بافت لوم شنی(۱) و خـاک‌هـای دزفـول با بافت لوم رسی سیلتی و ملا ثانی با بافت لـوم (سپاسـخواه و کاشفی‌پور، اطلاعات منتشر نشده) می‌باشد. اطلاعات مربوط به این خاک‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

بـرای انجـام محاسـبات لازم، منحنـی دانـه‌بـندی خـاک به قسمت‌های مختلفی تقسیم شد که در هر قسمت میانگین شعاع ذرات و درصـد ذرات کـوچک‌تـر از آن شـعاع معلوم است. از طرف دیگر، رطوبت حجمی خاک در حالت اشباع برابر خلل و فـرج خـاک مـی‌باشـد. بنابراین با داشتن رطوبت حجمی اشباع خـاک می‌توان نسبت پوکی خاک را به دست آورد. علاوه بر آن بـرای سادگی می‌توان چگالی واقعی کلیه خاک‌ها را برابر ۲/۶۵ گـرم بـر سانتی‌متر مکعب منظور نمود. با داشتن مقادیر چگالی واقعی و نسبت پوکی خاک خواهیم داشت (۳):

$$V_{Vi} = \frac{W_i}{\rho_S} e \qquad [۱]$$

کـه در آن V_{Vi}: حجـم خلـل و فـرج خـاک در واحـد جرم در قسمت i ام منحنی دانه‌بندی بر حسب سانتی‌متر مکعب بر گرم، W_i: جـرم ذرات جامـد خـاک در واحـد جـرم در قسـمت i ام منحنـی دانـه بـندی بـر حسب گرم بر گرم، ρ_S: چگالی واقعی خـاک بـر حسـب گـرم بر سانتی‌متر مکعب و e : نسبت پوکی خـاک می‌باشد. بنابراین حجم خلل و فرج خاک در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی از معادله ۱ به دست می‌آید و چنانچه مقادیر فـوق بـه صـورت تجمعی با هم جمع شده و هر عدد به دست آمـده در چگالـی ظاهـری خـاک ضـرب شـود، مقدار رطوبت حجمـی آب خـاک در هـر قسـمت از منحنـی دانه‌بندی تعیین می‌شود(۳). بنابراین داریم:

$$\theta_i = \rho_b \sum_{j=1}^{i} V_{Vj} \qquad [۲]$$

کـه در آن θ_i: مقـدار رطوبت حجمی آب خاک در قسمت i ام منحنـی دانـه‌بـندی بـر حسـب متـر مکعـب بـر متـر مکعب و ρ_b: چگالـی ظاهـری خـاک بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب مـی‌باشد. چنانچه در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی خاک تعداد ذرات کـروی برابـر n_i باشـد و خلـل و فرج‌های خاک به صورت منافذی در امتداد یک استوانه قرار گرفته باشد، خواهیم داشت (۳):

$$V_{Pi} = n_i \frac{4\pi}{3} R_i^3 = \frac{W_i}{\rho_S} \qquad [۳]$$

$$V_{Vi} = \pi r_i^2 L_i = \frac{W_i}{\rho_S} e \qquad [۴]$$

کـه 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: میانگـین انـدازه شـعاع ذرات خـاک در قسمت i ام منحنی دانـه بندی بر حسب سانتی‌متر، r_i: میانگین اندازهٔ شعاع خلل و فـرج‌هـا در قسـمت i ام منحنـی دانه بندی بر حسب سانتی‌متر، n_i: تعـداد کـل ذرات کـروی خـاک در قسـمت i ام منحنـی دانه‌بندی بر حسب یک برگرم و L_i: طول کل خلل و فرج‌ها در قسـمت i ام منحنـی دانـه بندی بر حسب سانتی‌متر می‌باشد. با تقسیم کردن معـادله۴ بر معادله ۳ و با توجه به آن‌که نسبت V_{Vi} به V_{Pi} برابر نسبت پوکی می‌باشد خواهیم داشت (۳):

$$\frac{r_i^2}{R_i^3} = \frac{4 n_i e}{3 L_i} \qquad [۵]$$

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):

$$L_i = 2 n_i R_i \qquad [۶]$$

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

$$r_i = 0/816 R_i e^{0/5} \qquad [۷]$$

ولی در حقیقت ذرات خاک به طور مرتب و منظم روی یکدیگر قـرار نمـی‌گـیرنـد، یعـنی دارای آرایـش غیـرکروی هستند و کاملاً

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

جدول ۱. بعضی از خواص فیزیکی خاک‌های این پژوهش

خاک	بافت	رس (٪)	سیلت (٪)	شن (٪)	چگالی ظاهری (g/cm^3)	رطوبت حجمی اشباع خاک (m^3/m^3)
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
ملاثانی	لوم	۲۶/۴	۴۳/۰	۳۰/۶	۱/۴۴	۰/۴۹۹
برازجان	لوم شنی	۱۶/۷	۱۵/۷	۶۷/۶	۱/۴۱	۰/۳۳۲

کروی نیستند. بنابراین به علت سرراست 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^{α} استفاده می‌شود که α را پارامتر مقیاس نامیده و بزرگ‌تر از یک است (۳). بنابراین معادله ۶ به صورت زیر تصحیح می‌شود (۳):

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

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

$$r_i = 0/816 R_i (en_i^{1-\alpha})^{0/5} \qquad [9]$$

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

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

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

$$h_i = \frac{2\delta \cos\beta}{\rho_w g r_i} \qquad [11]$$

که در آن h_i : مکش آب خاک در قسمت i ام منحنی دانه‌بندی بر حسب سانتی‌متر، δ : تنش سطحی بین آب و هوا برحسب گرم بر مجذور ثانیه، g : شتاب ثقل حسب سانتی‌متر بر مجذور ثانیه، ρ_w : چگالی آب حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب و β : زاویه تماس می‌باشد. با در نظر گرفتن زاویه تماس برابر صفر درجه و جایگزینی مقادیر عددی δ و ρ_w در معادله ۱۱ و تلفیق آن با معادله ۹ خواهیم داشت (۳):

$$h_i = \frac{0/18}{R_i (en_i^{1-\alpha})^{0/5}} \qquad [12]$$

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 α در هر قسمت از منحنی دانه‌بندی معلوم باشد.

برای تعیین α 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):

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

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:

$$N_i = 7 \times 3/71 W_i e \frac{h_{mi}^2}{\rho_s R_i} \qquad [14]$$

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

معادلهٔ خطی برای تعیین α

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

$$LogN_i = a + b\,Log\frac{W_i}{R_i^3} \qquad [۱۵]$$

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

$$\alpha_i = \frac{a + b\,Log\frac{W_i}{R_i^3}}{Logn_i} \qquad [۱۶]$$

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 جدول۲ ارائه شده است و از آنها در این پژوهش استفاده گردید. مقدار $Logn_i$ نیز از معادله ۱۰ به دست آمده است.

معادلهٔ لجستیک برای تعیین α

آریا و همکاران (۳) با تعیین مقادیر N_i از معادله ۱۴ و محاسبه مقادیر n_i از معادله ۱۰ رابطهٔ بین $Logn_i$ و $LogN_i$ را به صورت زیر در نظر گرفتند:

$$Y = \frac{Y_f Y_{in}}{Y_{in} + (Y_f - Y_{in})\exp(-\mu x)} \qquad [۱۷]$$

که در آن Y : نشان دهنده متغیر وابسته $LogN_i$ ، x : نشان دهنده متغیر مستقل $Logn_i$ ، μ : ضریب شدت، شاخص in نشان دهنده مقدار اولیه (حد پایین) $LogN_i$ و شاخص f نشان دهنده مقدار انتهایی (حد بالایی) $LogN_i$ می‌باشد. به عبارت دیگر، مقادیر Y_f و Y_{in} 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 $LogN_i$ و $Logn_i$ منفی می‌شود، بنابراین این محققین محورهای X و Y را به سمت چپ و پایین محورهای اصلی منتقل کردند. بنابراین خواهیم داشت (۳):

$$Y + \Delta Y = \frac{Y_f Y_{in}}{Y_{in} + (Y_f - Y_{in})\exp\{-\mu(x + \Delta x)\}} \qquad [۱۸]$$

که در آن $\Delta Y = \Delta LogN_i$ و $\Delta x = \Delta Logn_i$ 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 α 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:

$$\beta_1 = \frac{1}{Ln\frac{r_1 - r_0}{r_2 - r_0}} \qquad [۱۹]$$

$$\beta_2 = \beta_1 Ln\frac{r_1 - r_0}{r_0} \qquad [۲۰]$$

$$v = Ln\frac{(cl + si)^{-1} - 1}{cl^{-1} - 1} \quad v < 0 \qquad [۲۱]$$

$$z = Ln\frac{(cl + si + s)^{-1} - 1}{cl^{-1} - 1} \quad z < 0 \qquad [۲۲]$$

$$c = \beta_1 Ln\frac{v}{z} \qquad [۲۳]$$

$$u = \frac{(-v)^{1-\beta_2}}{(-z)^{-\beta_2}} \qquad [۲۴]$$

$$W = \frac{1}{1 + (cl^{-1} - 1)\exp\{-u(R-1)^c\}} \qquad [۲۵]$$

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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

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

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

* : اعداد جدول با میان‌یابی به‌دست آمده است.

کوچک‌تر از اندازه یا قطر درنظر 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 r۰ ، r۱ و r۲ توسط اسکگز 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 درصورت درنظر گرفتن کل قسمت شن خاک، مقدار تجمعی cl+si+s برابر یک می‌شود و بنابراین مقدار عددی z نامعین شده و در این‌صورت 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 درنظر گرفتن شعاع ۱۲۵ میکرومتر، فرض گردید که مقدار کل شن خاک شامل پنج قسمت مساوی است و دو پنجم آن مربوط به شن خیلی ریز و شن ریز می‌باشد. هم‌چنین برای تعیین این مقدار با درنظر 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 درنظر گرفتن دو شعاع ۱۲۵ و ۹۹۹ میکرومتر، به طور جداگانه به دست آمد.

نتایج

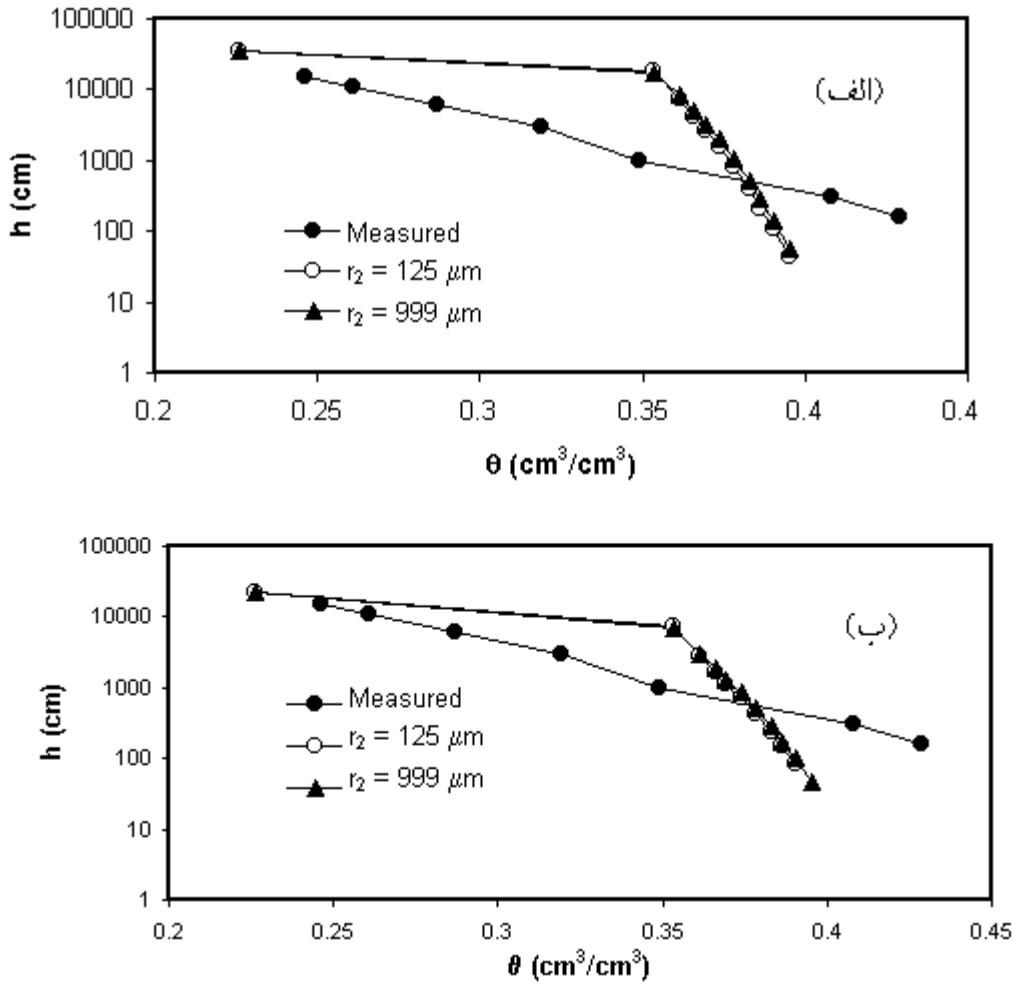
منحنی مشخصه آب خاک هفت خاک مختلف با استفاده از مقادیر α به دست آمده از معادله‌های خطی و لجستیک و بر اساس شعاع‌های ۱۲۵ و ۹۹۹ میکرومتر (برای تخمین منحنی دانه‌بندی) تخمین زده شده و نتایج به دست آمده با نتایج داده‌های اندازه‌گیری منحنی مشخصه این خاک‌ها مقایسه و در شکل‌های ۱ تا ۷ ارائه شده است. برای مقایسه نتایج به‌دست 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):

$$SE = \sqrt{\frac{1}{N_p - 1} \times \Sigma(\theta_m - \theta_p)^2} \qquad [۲۶]$$

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com



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

که در آن N_p : تعداد جفت‌های اندازه‌گیری شده مقدار حجمی آب خاک و مکش آب خاک و θ_m و θ_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 به‌دست آمده از تخمین می‌باشد. به طوری که در خاک کربال با روش خطی برای تعیین α و حد نهایی شعاع ۹۹۹ میکرومتر کمترین خطای استاندارد برابر ۰/۰۱۳ به دست آمده است.

مقادیر میانگین α 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 α به دست آمده از چهار حالت مختلف نیز مشاهده می‌شود. نتایج این جدول نشان می‌دهد که در تمام خاک‌ها مقدار میانگین α به دست آمده از روش لجستیک بیشتر از مقدار میانگین α به دست آمده از روش خطی بوده و نیز در تمام خاک‌ها مقدار میانگین α به دست آمده با درنظر گرفتن حد انتهایی شعاع ۹۹۹ میکرومتر بیشتر از مقدار میانگین α به دست آمده با در نظر گرفتن حد انتهایی شعاع ۱۲۵ میکرومتر می‌باشد.

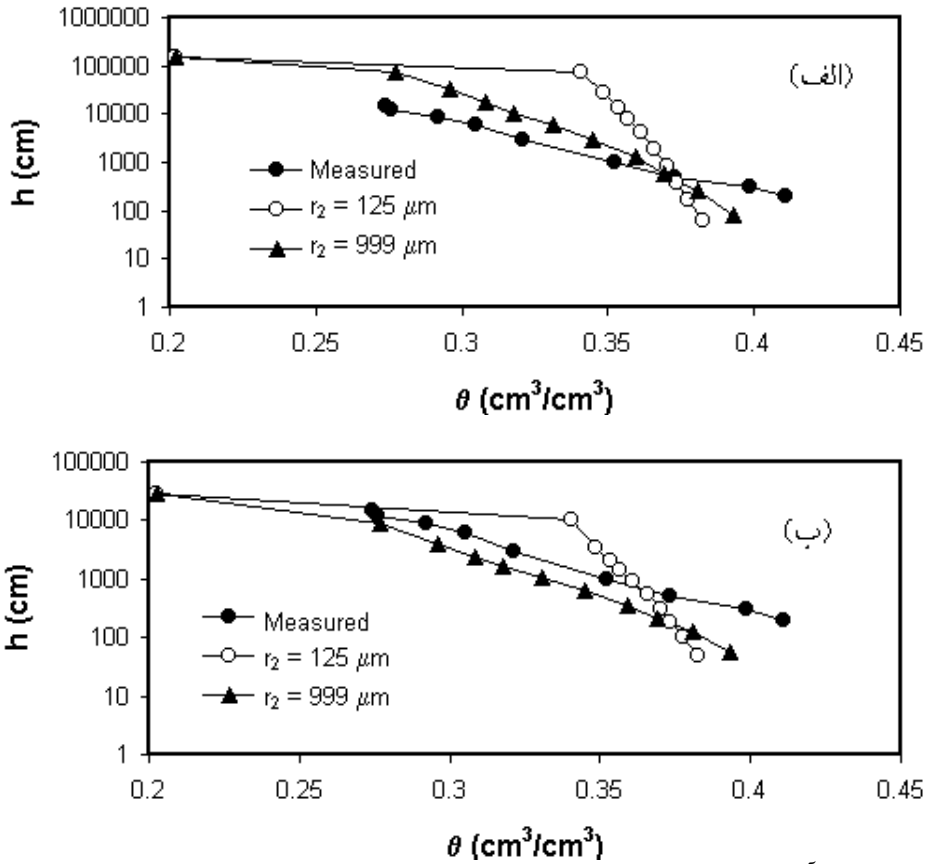
[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]
PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

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

		روش خطی برای تعیین α		روش لجستیک برای تعیین α	
سری خاک	بافت	r_2 =۱۲۵μm	r_2 =۹۹۹μm	r_2 =۱۲۵μm	r_2 =۹۹۹μm
آونجان رامجرد	رس	۰/۰۵۰	۰/۰۲۶	۰/۰۷۴	۰/۰۳۷
آونجان رامجرد	رس سیلتی	۰/۰۳۷	۰/۰۲۵	۰/۰۵۴	۰/۰۲۸
کربال	لوم رسی سیلتی	۰/۰۶۴	۰/۰۱۳	۰/۰۹۵	۰/۰۶۵
دزفول	لوم رسی سیلتی	۰/۰۸۲	۰/۰۴۷	۰/۱۰۶	۰/۰۸۹
سروستان	لوم	۰/۰۵۱	۰/۰۵۵	۰/۰۴۹	۰/۰۲۶
ملاثانی	لوم	۰/۰۹۹	۰/۰۸۸	۰/۱۲۲	۰/۱۳۱
برازجان	لوم شنی	۰/۰۴۸	۰/۰۳۱	۰/۰۴۱	۰/۰۲۴

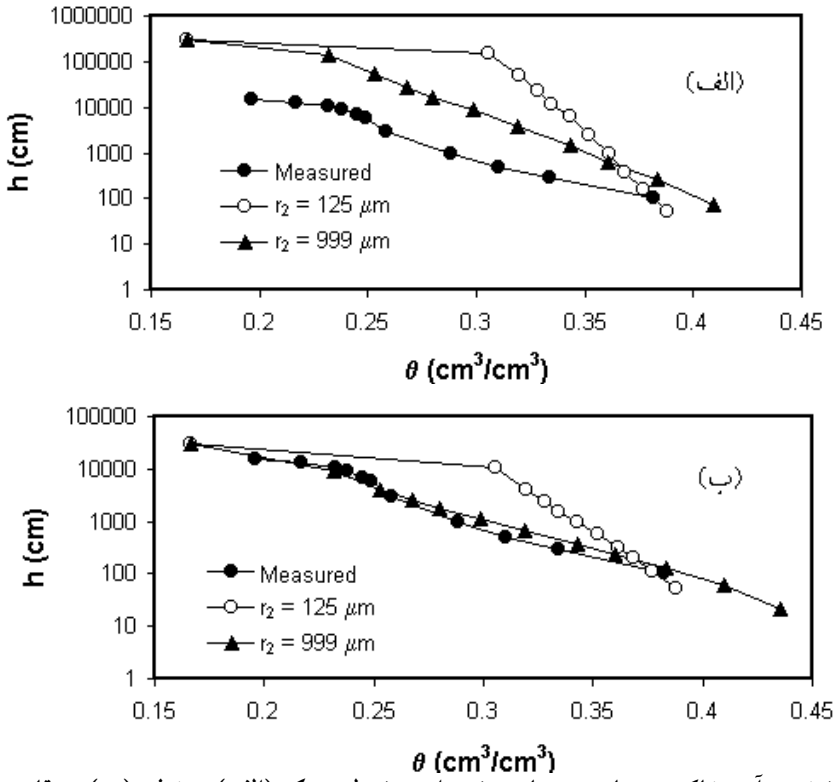
جدول ۴. مقادیر میانگین α به دست آمده در خاک‌ها و حالت‌های مختلف تخمین منحنی مشخصه آب خاک

		r_2 =۱۲۵μm		r_2 =۹۹۹μm		
سری خاک	بافت	روش لجستیک	روش خطی	روش لجستیک	روش خطی	میانگین
اونجان رامجرد	رس	۱/۱۸۵	۱/۱۲۰	۱/۲۰۷	۱/۱۲۲	۱/۱۵۹
آونجان رامجرد	رس سیلتی	۱/۳۰۱	۱/۱۳۶	۱/۳۳۰	۱/۱۴۹	۱/۲۲۹
کربال	لوم رسی سیلتی	۱/۳۳۵	۱/۱۵۵	۱/۳۶۶	۱/۱۵۸	۱/۲۵۴
دزفول	لوم رسی سیلتی	۱/۳۳۶	۱/۱۵۰	۱/۳۶۷	۱/۱۶۰	۱/۲۵۳
سروستان	لوم	۱/۴۴۳	۱/۳۱۷	۱/۴۵۹	۱/۳۴۵	۱/۳۹۱
ملاثانی	لوم	۱/۴۳۶	۱/۳۳۶	۱/۴۵۳	۱/۳۴۷	۱/۳۹۳
برازجان	لوم شنی	۱/۵۲۹	۱/۴۵۳	۱/۵۳۹	۱/۴۵۵	۱/۴۹۴

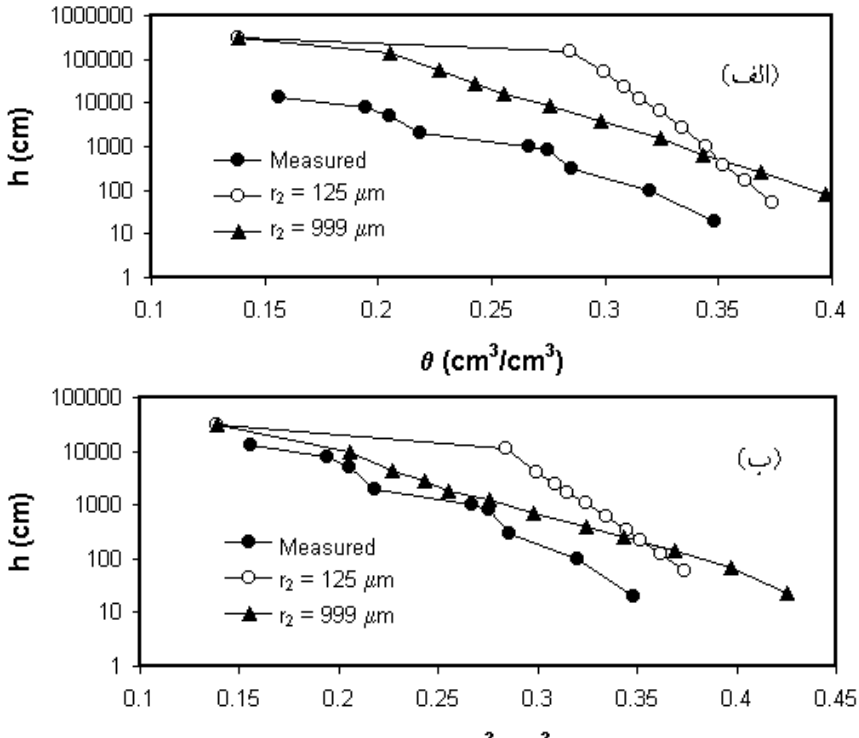


شکل۲. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای α محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک آونجان رامجرد (رس سیلتی)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]
PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

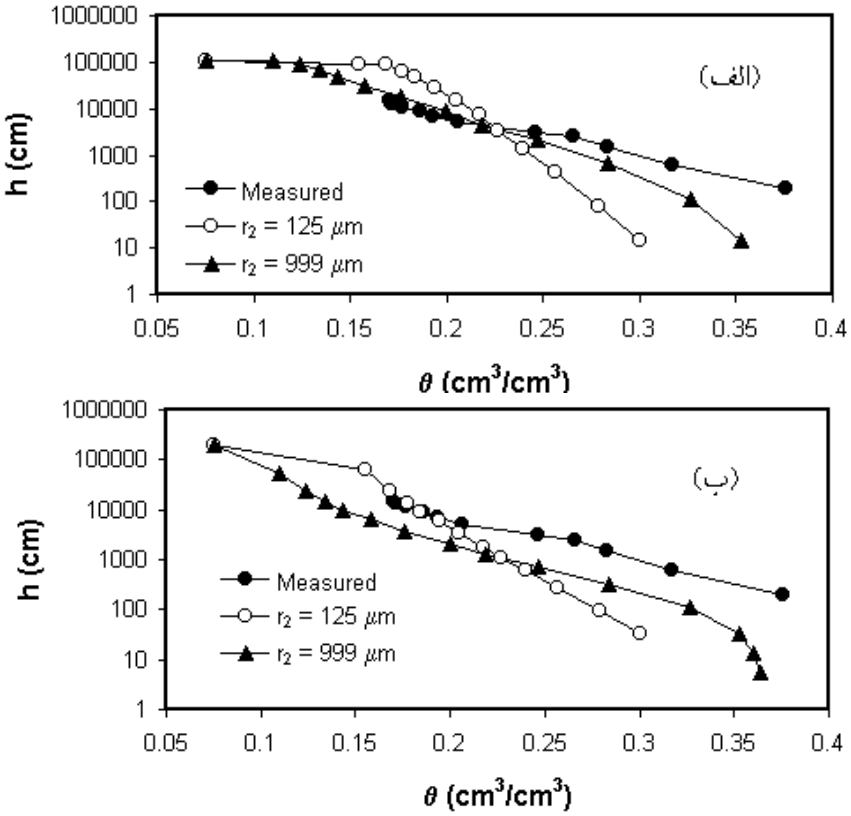


شکل۳. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای α محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک کربال (لوم رسی سیلتی)

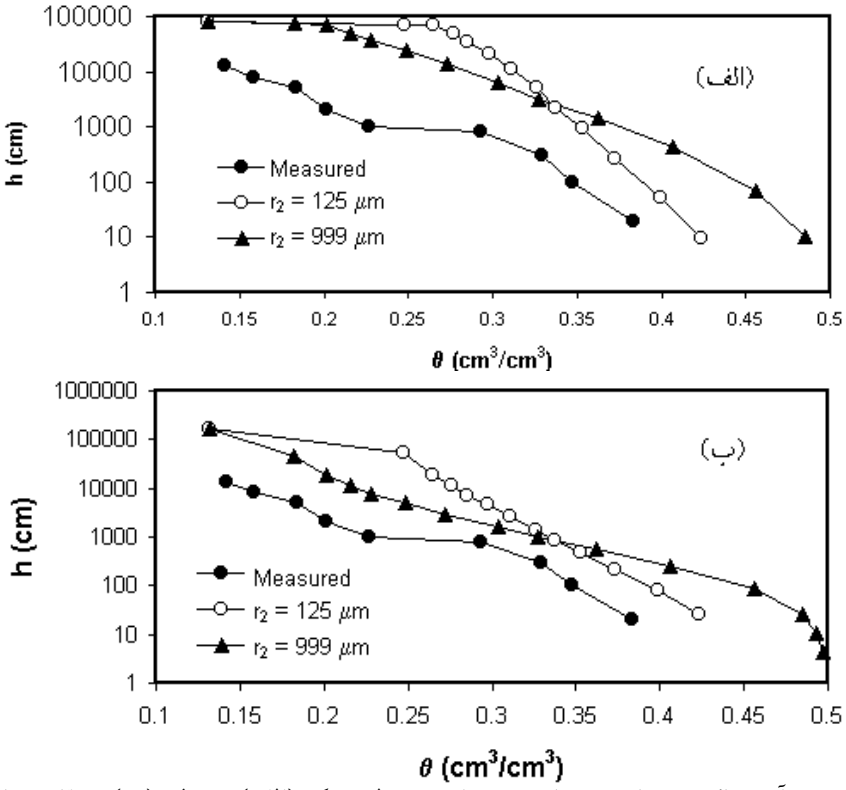


شکل۴. منحنی مشخصه اب خاک بر مبنای α محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک دزفول (لوم رسی سیلتی)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]
PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

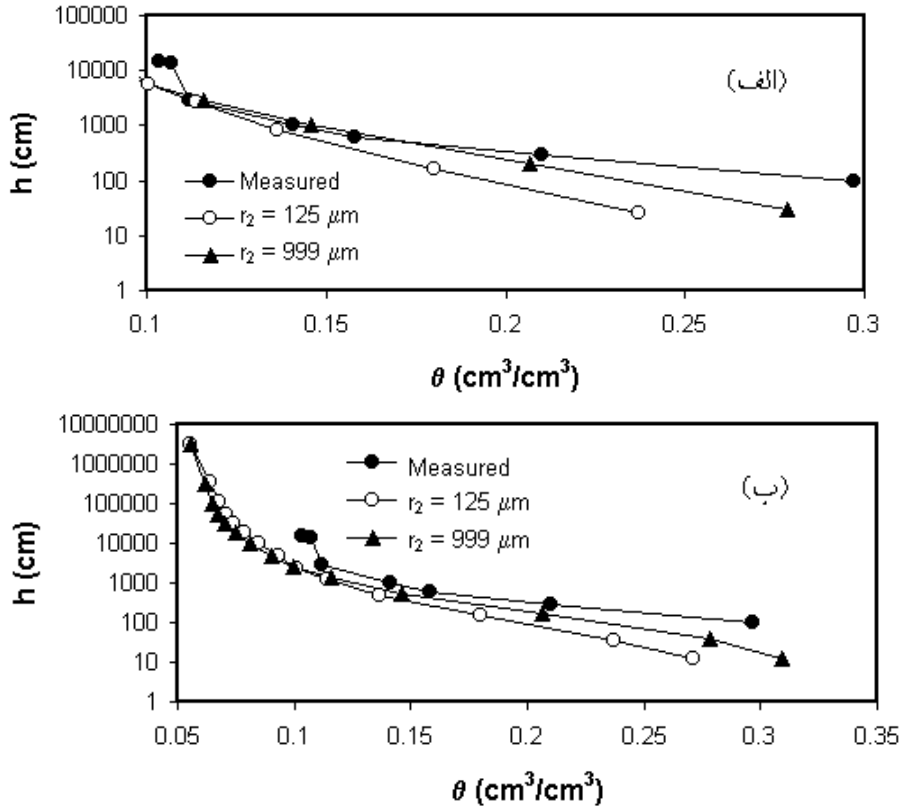


شکل۵ . منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای α محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک سروستان (لوم)



شکل۶. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای α محاسبه شده از روش لجستیک (الف) و خطی (ب) و مقایسه با منحنی مشاهده‌ای در خاک ملاثانی (لوم)

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]
PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com



شکل۷. منحنی مشخصه آب خاک بر مبنای α 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 درصورت 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 α با معادله خطی برای تخمین منحنی مشخصه مناسب‌تر می‌باشد، ولی در بافت لوم شنی تعیین α با معادله لجستیک بهتر است. در یکی از دو خاک با بافت لوم تعیین α با معادله خطی مناسب‌تر است و در دیگری تعیین α با معادله لجستیک بهتر می‌باشد. ولی با توجه به نزدیکی نسبی بافت‌های لوم و لوم شنی می‌توان نتیجه گرفت که برای بافت لوم تعیین α 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 α کمتر از یک می‌شود و این موضوع از نظر تئوری درست نیست. مقدار مکش‌های کم در واقع در محدوده حاشیه مؤیینه‌ای 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

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]

PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com

فقط مقادیر مکش و رطوبتی در نظرگرفته شده‌اند که α متناظر با آنها بیشتر از یک بوده است. نتایج جدول ۴ نیز نشان داد که میانگین α 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 α 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 α به دست آمده برای 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 مشخصهٔ پنج خاک به کار رفته در این پژوهش را انجام داده است، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. کشمیری‌پور، ب. و ج. ا. نیازی. ۱۳۷۹. ارزیابی و مقایسهٔ سه روش تعیین منحنی مکش رطوبتی و رابطهٔ 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.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1383.8.3.1.6]
PDF created with pdfFactory trial version www.pdffactory.com