

## Role of Bimodal Particle-Size Distribution to Predict the Soil Water Retention Curve

ASLAN EGDERNEZHAD<sup>1</sup>, ALI ATAEE<sup>2</sup>, MOHAMMAD REZA NEYSHABOURI<sup>2</sup>, SAFOORA ASADI KAPOURCHAL<sup>3</sup>

1. Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

2. Department of soil science and Engineering, College of agriculture, Tabriz University, Tabriz, Iran.

3. Department of Soil Science, College of Agricultural Sciences, University Of Guilan, Rasht, Iran.

(Received: Nov. 30, 2019- Revised: Jan. 21, 2020- Accepted: Jan. 25, 2020)

### ABSTRACT

The particle sizes distribution (PSD) has a major impact on the pore arrangement in the soil, which is the basis for many soil water retention curve (SWRC) models. Lack of some particles in PSD lead to bimodal distribution of soils. In this situation, the performance of developed SWRC models for normal soils were decreased. In this study, the accuracy of three models that estimate SWRC from PSD including Aria et al. (1999), Mohammadi and Vanclooster (MV) (2011), and modified MV, that combined with VanGenuchten (1980) model, (MV-VG) (2013) were investigated in unimodal and bimodal zone of soil textural triangle. For this purpose, 94 soil samples, with a wide range of physical properties including PSD and SWRC data, were selected from the UNSODA hydraulic properties database and their SWRC were estimated by the proposed models. Estimation accuracy was evaluated using RMSE, NSE and R2 statistics. Results showed that in unimodal soil textures including loam, silt loam and silty clay, the models have good accuracy. As well as in sand, sandy loam and loamy sand soils, because of high sand content, models accuracy not affected by bimodality. In soils associated with bimodal zone of soil textural triangle including sandy clay loam, clay loam, sandy clay and clay, SWRC prediction depended on bimodality index that proposed in this paper. The mean RMSE, NSE and R2 statistics for the three models in unimodal zone of soil textural triangle were obtained 0.044, 0.378 and 0.921 and in bimodal zone they were 0.062, -2.501 and 0.859 respectively. Also, it was found that the accuracy of the three models was different and the MV-VG model had insignificant correlation with the bimodality index and could estimate more accurately SWRC from PSD.

**Keywords:** Grain Size Distribution, Modeling, Pore Size Distribution, Soil Texture.

## نقش توزیع دو الگویی اندازه ذرات خاک در برآورد منحنی رطوبتی

اصلان اگدرنژاد<sup>۱\*</sup>، علی عطائی<sup>۲</sup>، محمد رضا نیشابوری<sup>۲</sup>، صفورا اسدی کیورچال<sup>۳</sup>

۱. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳. گروه علوم خاک، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۱/۵)

### چکیده

توزیع جرم ذرات در اندازه‌های مختلف تاثیر اساسی در آرایش منافذ دارد؛ به طوری که پایه شکل‌گیری بسیاری از مدل‌های منحنی رطوبتی می‌باشد. نبود بخشی از اندازه ذرات می‌تواند منجر به توزیع دو الگویی اندازه ذرات شود که در این حالت مدل‌های توسعه‌یافته منحنی رطوبتی برای خاک‌های تک الگویی کارایی خود را از دست می‌دهند. در این پژوهش سعی شد میزان صحت برآورد منحنی رطوبتی توسط سه مدل (Arya *et al.* (1999), Mohammadi and Vanclouster (2011), (MV) و اصلاح‌شده آن با ادغام با مدل منحنی رطوبتی ونگنوختن (MV-VG) در کلاس‌های مختلف بافتی و به ویژه در نواحی دو الگویی مورد بحث قرار گیرد. بدین منظور ۹۴ نمونه خاک از داده‌های پایگاه داده‌ای UNSODA که دارای اطلاعات مربوط به منحنی رطوبتی و توزیع اندازه ذرات بودند، انتخاب و منحنی رطوبتی آن‌ها بر اساس سه مدل مذکور برآورد شد. دقت برآورد با استفاده از سه آماره صحت‌سنجی RMSE, NSE و  $R^2$  ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل‌ها در کلاس‌های بافت لوم، لوم سیلتی و رس سیلتی که تک الگویی هستند و نیز کلاس‌های بافت شنی، شن لومی و لوم شنی که درصد شن در آن‌ها زیاد است (حذف بخش سیلت اثر چندانی بر توزیع اندازه ذرات ندارد)، از دقت مناسبی برخوردار هستند. لیکن در کلاس‌های بافتی قرارگرفته در نواحی دو الگویی مثلث بافت خاک همانند لوم رس شنی، لوم رسی، رس شنی و رسی، صحت برآورد به شاخص دو الگویی نمونه خاک بستگی دارد. میانگین آماره‌های صحت‌سنجی RMSE, NSE و  $R^2$  برای سه مدل مورد بررسی، در دامنه توزیع تک الگویی به ترتیب ۰/۰۴۴، ۰/۳۷۸ و ۰/۹۲۱ و در دامنه دو الگویی ۰/۰۶۲، ۰/۵۰۱ - ۲/۸۵۹ به دست آمد. همچنین مشخص شد دقت سه مدل فوق با یکدیگر متفاوت بوده و مدل MV-VG ضمن اینکه مستقل از خاصیت دو الگویی توزیع اندازه ذرات بوده و همبستگی غیر معنی‌داری با شاخص دو الگویی داشت، با صحت بیشتری توانست منحنی رطوبتی را از توزیع اندازه ذرات برآورد نماید.

**واژه‌های کلیدی:** بافت خاک، توزیع اندازه منافذ، دانه‌بندی، مدل‌سازی.

### مقدمه

بخش از ذرات وجود ندارد. خاک با دانه‌بندی کامل و خاک با دانه‌بندی گسسته می‌توانند توزیع اندازه منافذ و ساختمان متفاوتی داشته باشند. شکل (۱) چگونگی ساختمان، منحنی توزیع و توزیع تجمعی اندازه منافذ را برای هر دو نوع خاک نشان می‌دهد.

در خاک با دانه‌بندی غنی (شکل ۱-الف)، منحنی توزیع تجمعی اندازه منافذ و منحنی توزیع اندازه منافذ هر دو تک الگویی بوده و سری پیوسته از منافذ (از منافذ درشت تا ریز) در خاک حضور دارند. در مورد خاک با دانه‌بندی گسسته منحنی توزیع تجمعی اندازه منافذ و منحنی توزیع اندازه منافذ هر دو، دو الگویی هستند (Zhang and Chen, 2005). اگر ذرات با اندازه درشت

توزیع اندازه ذرات<sup>۱</sup> (PSD) یکی از ویژگی‌های مهم و پایدار خاک است که بسیاری از رفتارها و پاسخ‌های خاک چه از جنبه زراعی و چه از جنبه مکانیکی با آن ارزیابی و توصیف می‌شوند. این صفت برای رده‌بندی (Gee and Bauder, 1986) و تخمین ویژگی‌هایی همانند منحنی رطوبتی خاک<sup>۲</sup> (SWRC) و هدایت حرارتی خاک (Haverkamp and Parlance 1986; Fredlund *et al.*, 2002; ) (Hwang and Choi, 2006; Meskini-Vishkaee *et al.*, 2014) به کرات مورد استفاده قرار گرفته است. اگر خاکی دارای گستره‌ای از ذرات در تمام بخش‌های اندازه‌ای باشد، از نظر دانه‌بندی مطلوب (غنی) می‌باشد. در مقابل در خاک‌هایی با دانه‌بندی گسسته، یک

\* نویسنده مسئول: a\_eigder@gmail.com

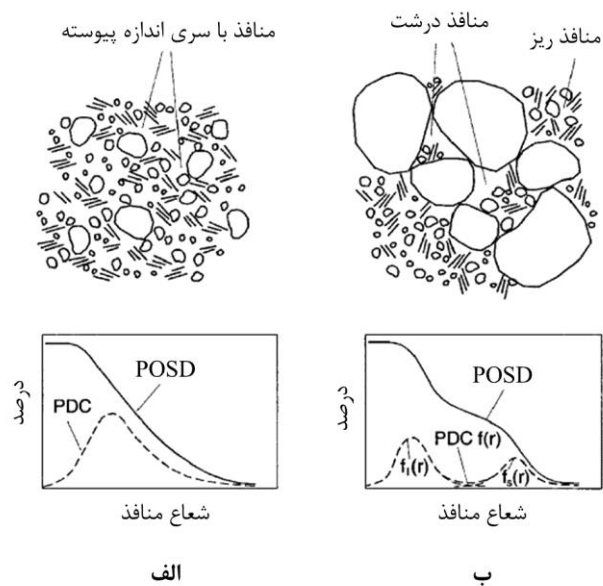
1. Particle Size Distribution  
2. Soil Water Retention Curve

مدل‌های منحنی رطوبتی توسعه‌یافته برای خاک‌های با شرایط تک الگویی در خاک‌های با شرایط دو الگویی، کارایی خود را از دست می‌دهند (Zhang and Chen, 2005; Fredlund *et al.*, 2002). چرا که فرضیات و تعاریف در نظر گرفته‌شده برای چگونگی توزیع اندازه منافذ در خاک‌های تک الگویی، کارایی لازم را برای شرایط دو الگویی نخواهند داشت. در همین راستا می‌توان گفت که مدل‌های برآوردکننده منحنی رطوبتی نیز در خاک‌های دو الگویی کارایی ضعیفی خواهند داشت. مدل Arya and Paris (1981) و اصلاح‌شده آن (Arya *et al.*, 1999) از جمله اولین مدل‌های برآورد منحنی رطوبتی از توزیع اندازه ذرات خاک هستند. بعد از آن مدل‌های متنوع دیگری در این زمینه ارائه شده که از آن جمله می‌توان به مدل‌های Haverkamp and Parlance (1986)، (Zhuang *et al.*, 2001)، (Fredlund *et al.*, 2002)، مدل لوگ‌نرمال Hwang and Choi (2006)، Mohammadi and Vanclouster (2011) و نسخه اصلاح‌شده آن Mohammadi and Meskini-Vishkaee (2013) و روش‌های مختلف فراکتالی که عمده آن‌ها توسط Ghanbarian-Alavijeh and Hunt (2012) جمع‌بندی شده است، اشاره کرد. اساس تمام این مدل‌ها شباهت بسیار نزدیک بین شکل دو منحنی توزیع اندازه ذرات و منحنی رطوبتی خاک می‌باشد. بنابراین حذف یک بخش اندازه‌ای از منحنی توزیع اندازه ذرات، می‌تواند فرضیات موجود در این زمینه را مختل کرده و سبب کاهش صحت تخمین مدل شود. لذا در پژوهش حاضر ضمن تعریف یک شاخص برای شناسایی خاکی با شرایط دو الگویی، به بررسی کارایی سه مدل Arya *et al.* (1999)، Mohammadi and Vanclouster (2011) و اصلاح‌شده مدل Mohammadi and Vanclouster با ادغام با مدل منحنی رطوبتی VanGenuchten (1980) توسط Mohammadi and Meskini-Vishkaee (2013) در خاک‌هایی با شرایط دو الگویی و تک الگویی توزیع اندازه ذرات پرداخته می‌شود.

### مواد و روش‌ها

به منظور بررسی دقت مدل‌های مختلف برآوردکننده منحنی رطوبتی از توزیع اندازه ذرات اولیه خاک، از پایگاه داده‌ای UNSODA<sup>۲</sup> تعداد ۹۴ نمونه خاک که دارای اطلاعات مربوط به توزیع اندازه ذرات و منحنی رطوبتی بودند، انتخاب شد. انتخاب نمونه‌ها به نحوی بود که از تمامی کلاس‌ها باشد و افزون بر این دو مشخصه، اطلاعاتی راجع به جرم ویژه ظاهری یا درصد رطوبت حجمی اشباع داشته باشند تا بتوان از آن‌ها در مدل‌سازی استفاده

بسیار بیشتر از ذرات با اندازه ریز باشند و ذرات ریز به طور کامل نتوانند منافذ بین آن‌ها را پر نمایند، می‌توان اینگونه در نظر گرفت که خاک به طور کامل مخلوط نشده است و تنها دو سری از منافذ در خاک حضور خواهند داشت. Zhang and Chen (2005) مشاهده کردند که در خاک‌های با تخلخل دوگانه، دو سری از منافذ توسط دو گروه مختلف ذرات کنترل می‌شوند (ذرات درشت منافذ درشت را تعیین می‌کنند و ذرات ریز تعیین‌کننده منافذ ریز هستند).



شکل ۱- ساختار خاک، منحنی توزیع اندازه منافذ (POSD) و منحنی توزیع چگالی اندازه منافذ (PDC) برای خاک تک الگویی (الف) و دو الگویی (ب) (Zhang and Chen, 2005)

حذف گروه میانی ذرات خاک در منحنی توزیع اندازه ذرات (همانند سیلت) سبب برهم خوردن پیوستگی توزیع اندازه منافذ می‌شود. به عنوان مثال توزیع اندازه ذرات خاک رس شنی، داری دو نقطه<sup>۱</sup> بیشینه یا اوج برای دو بخش مختلف اندازه‌ای ذرات است. یکی برای بخش رس و دیگری برای بخش شن؛ لذا این خاک جز خاک‌های دو الگویی دسته‌بندی می‌شود. در مقابل اگر حذف بخش اندازه‌ای از ابتدا یا انتهای منحنی توزیع اندازه انجام شود (همانند نبود بخش شن در یک خاک رس سیلتی)، پیوستگی توزیع حفظ شده و منحنی توزیع فقط دارای یک نقطه اوج است که مربوط به رس یا سیلت می‌شود. بر این اساس طبق نظر De Condappa *et al.* (2008) اگر خاکی دارای شرایط زیر باشد، جز خاک‌های دو الگویی قرار می‌گیرد:

$$\begin{cases} \text{Sand} \geq \text{Silt} \\ \text{and} \\ \text{Clay} \geq \text{Silt} \end{cases} \quad (\text{رابطه ۱})$$

کرد. شماره خاک‌های مورد استفاده به همراه کلاس بافتی آن‌ها در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- شماره خاک‌های انتخاب شده از بانک داده UNSODA در کلاس‌های بافت خاک

شماره نمونه خاک از بانک داده UNSODA											کلاس بافتی
۴۶۵۰	۴۵۲۰	۴۱۳۱	۳۳۴۰	۳۳۳۲	۳۱۴۱	۳۱۳۲	۱۴۶۶	۱۴۶۰	۱۱۴۰	۱۰۷۳	Sand
۴۱۷۲	۴۱۷۱	۳۲۰۰	۲۵۳۲	۲۱۱۱	۱۲۱۰	۱۲۰۰	۱۱۶۱	۱۱۲۰	۱۱۰۱	۱۰۹۱	Sandy loam
۴۱۳۰	۳۱۷۱	۳۱۶۰	۳۱۵۲	۳۱۵۰	۲۱۰۱	۱۱۶۰	۱۱۴۳	۱۰۶۲	۱۰۱۵	۱۰۱۰	Loamy sand
۲۳۴۰	۴۶۸۱	۴۶۸۰	۴۱۲۱	۴۱۲۰	۲۶۸۱	۲۶۶۰	۲۶۲۰	۱۴۰۰	۱۳۶۰	۱۱۸۲	Clay
۴۵۳۰	۴۵۱۰	۴۱۲۱	۴۰۴۰	۴۰۳۲	۲۴۶۴	۲۰۰۰	۱۳۴۱	۱۳۴۰	۱۲۸۱	۱۲۸۰	Silt loam
	۳۲۱۱	۳۱۹۵	۳۱۹۴	۳۱۹۰	۳۱۹۰	۲۵۳۰	۲۳۲۰	۱۳۷۰	۱۲۶۰	۱۱۹۰	Loam
	۳۲۹۲	۳۱۸۰	۱۱۶۴	۱۱۲۲	۱۱۱۵	۱۱۱۳	۱۱۰۴	۱۱۰۳	۱۱۰۲	۱۰۹۲	Sandy clay loam
		۳۰۳۲	۳۰۳۱	۲۶۸۳	۲۶۶۱	۲۶۱۰	۱۳۶۲	۱۲۱۳	۱۱۷۲	۱۱۲۳	Clay loam
							۳۲۱۲	۲۵۹۳	۲۴۶۳	۲۴۶۰	Silty clay loam
								۲۳۵۰	۱۳۸۳	۱۳۶۱	Silty clay
								۱۱۷۴	۱۱۳۵	۱۱۳۴	Sandy clay

توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Li et al., 2016; Chang and (Cheng, 2018; Shang and Li, 2019). ایده اصلی این سه مدل از تشابه بین شکل منحنی‌های SWRC و PSD برآمده است. در هر سه مدل، ابتدا توزیع تجمعی اندازه ذرات با توجه به جرم و میانگین اندازه ذرات به  $m$  بخش ( $m \geq 20$ ) تفکیک می‌شود. همچنین برای ذرات جامد هر بخش این فرض وجود دارد که تمامی ذرات خاک کروی و تقریباً هم اندازه بوده و آرایش مکعبی بسته دارند و جرم ویژه ظاهری ( $\rho_b$ ) و جرم ویژه حقیقی ( $\rho_s$ ) آن‌ها برابر با مقدار اندازه‌گیری شده برای نمونه طبیعی است. نسبت پوکی ( $e$ ) با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$e = (\rho_s - \rho_b) / \rho_b \quad \text{(رابطه ۳)}$$

با این فرض که درصد حجم منافذ موجود در هر بخش اندازه‌ای با درصد وزن ذرات متناظر آن بخش برابر است، حجم منافذ برای هر بخش محاسبه شده و با تجمیع پیوسته آن‌ها، منافذ پر شده با آب به دست می‌آید (Li et al., 2016; Chang and (Cheng, 2018). با تقسیم جمع منافذ پر شده بر حجم کل توده خاک، مقدار رطوبت حجمی در هر بخش به دست می‌آید که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\theta_i = \theta_s \sum_{j=1}^{j=i} W_j \quad i = 1, 2, \dots, m \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که در آن،  $\theta_s$  رطوبت اشباع اندازه‌گیری شده،  $\theta_i$  رطوبت حجمی خاک در یک بخش اندازه ذرات و  $W_j$  درصد وزنی ذرات در هر بخش می‌باشد.

مکش ماتریک متناظر با شعاع در هر یک از مدل‌های فوق بر اساس فرض‌ها و تعاریف در نظر گرفته شده برای ساختار خاک در آن مدل، از روش‌های متفاوتی به دست می‌آید. در مدل Arya

#### دامنه دو الگویی توزیع اندازه ذرات خاک

De Condappa et al. (2008) یک تعریف تئوری از دامنه کلاس بافتی که توزیع اندازه ذرات در آن‌ها دو الگویی است، ارائه کردند (رابطه ۱). اگر نسبت درصد شن به سیلت برابر با  $A$  و نسبت درصد رس به سیلت برابر با  $B$  در نظر گرفته شود، زمانی خاک خاصیت دو الگویی دارد که حاصل ضرب  $A$  و  $B$  بیشتر از بزرگترین نسبت باشد. به عبارت دیگر دامنه دو الگویی مثلث بافت خاک در قالب رابطه (۲) قابل تعریف می‌باشد:

(رابطه ۲)

$$BMI = \frac{A \times B}{\max(A, B)}$$

که در آن  $A$  نسبت درصد شن به سیلت،  $B$  نسبت درصد رس به سیلت و  $BMI$  شاخص توزیع دو الگویی ذرات خاک می‌باشد. مقادیر شاخص  $BMI$  بزرگتر از یک نشان‌دهنده توزیع دو الگویی اندازه ذرات خاک می‌باشد.

#### محاسبه منحنی رطوبتی از توزیع اندازه ذرات

یکی از مهم‌ترین مدل‌های ارائه شده در زمینه برآورد SWRC از PSD مدل Arya et al. (1999) می‌باشد. روش کار و چگونگی محاسبات انجام شده در این مدل به تفصیل در مقالات مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته است (Rezaee et al., 2011; Vaz (et al., 2005; Li et al., 2016). Mohammadi and Vanclouster (2011) (MV) و اصلاح شده آن توسط Mohammadi and Meskini-Vishkaee (2013) که این مدل را با مدل منحنی رطوبتی ونگنوختن ادغام کردند، (مدل MV-VG) از دیگر مدل‌های توسعه یافته در این زمینه می‌باشند که مورد

ذرات خاک برحسب متر هستند.

Mohammadi and Meskini-Vishkaee (2013) و Meskini-Vishkaee *et al.* (2014) بیان کردند که با توجه به تشابه ساختاری منحنی توزیع اندازه ذرات و منحنی رطوبتی خاک، از مدل‌های توسعه یافته برای منحنی رطوبتی می‌توان برای بیان توزیع اندازه ذرات نیز استفاده کرد. مدل SWRC توسعه یافته توسط ونگنوختن (۱۹۸۰) بسیار انعطاف پذیر بوده و به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. Mohammadi and Meskini-Vishkaee (2013) با ادغام مدل MV با مدل ونگنوختن، رابطه نهایی زیر را برای برآورد ضرایب مدل ونگنوختن ارائه کردند: (رابطه ۸)

$$\frac{P_i - w_r}{1 - w_r} = \left[ \frac{1}{1 + \left( a \frac{0.543 \cdot 10^{-4} \xi}{R_i} \right)^n} \right]^m$$

که در آن،  $P_i$  درصد تجمعی وزن ذرات،  $w_r$  رطوبت باقیمانده خاک ( $cm^3/cm^3$ )،  $\alpha$  پارامتر عکس مکش در نقطه ورود هوا به خاک ( $1/cm$ )،  $n$  و  $m$  پارامترهای (بدون بعد) شکل منحنی نگهداشت که در ارتباط با توزیع اندازه منافذ خاک می‌باشند. با توجه به اینکه در نتایج توزیع اندازه ذرات  $P_i$  و  $R_i$  گزارش می‌شود، با برآورد پارامترهای  $\alpha$ ،  $n$ ،  $m$  و  $w_r$  و قرار دادن آن‌ها در معادله ونگنوختن می‌توان برای هر مکش، درصد رطوبت را محاسبه کرد. لازم به ذکر است که برای برآورد پارامترهای مذکور از ابزار برازش منحنی<sup>۱</sup> در نرم افزار MATLAB استفاده شد. پس از برآورد منحنی رطوبتی، برای ارزیابی میزان صحت مدل از سه آماره صحت سنجی ضریب تعیین<sup>۲</sup> ( $R^2$ )، کارایی نش-ساتکلیف<sup>۳</sup> ( $NSE$ ) و جذر میانگین مربعات خطا<sup>۴</sup> ( $RMSE$ ) مطابق با روابط زیر استفاده شد:

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

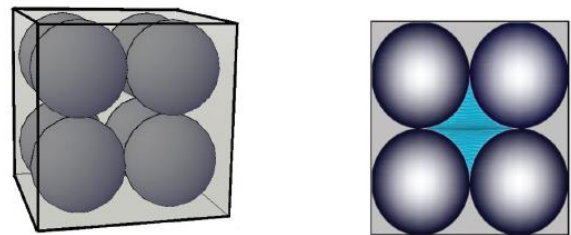
که در آن‌ها،  $P_i$  مقدار شبیه‌سازی شده،  $O_i$  مقدار اندازه‌گیری شده،  $\bar{P}$  میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد داده‌ها (تعداد نقاط اندازه‌گیری شده از منحنی رطوبتی) است. آماره‌های گوناگون بر

*et al.* (1999) منافذ تشکیل شده توسط ذرات کروی در هر بخش، به صورت سیلندرهای هم اندازه موئین در نظر گرفته می‌شوند. شعاع منافذ ( $r$ ) به اندازه ذرات ( $R_i$ ) مرتبط بوده و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$r_i = 0.816 R_i \sqrt{e n_i^{(1-a_i)}} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن،  $n_i$  تعداد ذرات کروی موجود در هر بخش اندازه-ای و متغیر  $\alpha$  پارامتر مقیاس‌گذاری نام دارد. طبق نظر Arya *et al.* (1999) مقدار این پارامتر در کلاس‌های بافتی مختلف متفاوت بوده و در هر کلاس بافتی یک مقدار ثابت پیشنهاد شده در نظر گرفته شد. مقدار  $\alpha$  در کلاس‌های بافتی شنی، لوم شنی، لوم، لوم سیلتی و رس به ترتیب برابر  $1/285$ ،  $1/459$ ،  $1/375$ ،  $1/15$  و  $1/16$  و در سایر کلاس‌های بافتی برابر  $1/38$  می‌باشد.

در مدل Mohammadi and Vanclooster (2011) ذرات به صورت کروی فرض شده‌اند که طبق شکل (۲) آرایش یافته‌اند. برای محاسبه مکش ماتریک در هر مجموع ذرات، لازم است که حجم متوسط منافذ به دست آید. حجم یک مجموع ذرات برابر با  $64R_i^3$  و حجم بخش جامد  $8$  کره برابر با  $8(4\pi R_i^3)/3$  می‌باشد.



شکل ۲- نحوه آرایش ذرات کروی در مدل Mohammadi and Vanclooster (2011)

از آنجایی که در حالت طبیعی تعداد ذرات کروی سهیم در هر مجموعه آرایشی می‌تواند بیشتر یا کمتر از  $8$  باشد، تعداد ذرات در هر مجموعه آرایشی را  $8\xi$  در نظر گرفتند که  $\xi$  ضریب مربوط به شرایط آرایش ذرات می‌باشد. آن‌ها اثبات کردند که می‌توان  $\xi$  را از رابطه زیر و با استفاده از نسبت پوکی ( $e$ ) به دست آورد (Mohammadi and Vanclooster, 2011):

$$\xi = \frac{6}{\pi(1+e)} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در نهایت اثبات شد که می‌توان برای هر اندازه از ذرات خاک، مکش معادل را با استفاده از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$h_i = \frac{0.543 \cdot 10^{-4}}{R_i} \xi \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن،  $h_i$  مکش ماتریک خاک برحسب متر و  $R_i$  شعاع

۳. Nash-Sutcliffe Efficiency  
۴. Root Mean Square Error

۱. Curve Fitting tool  
۲. Coefficients of Determination

اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. واحد این آماره مشابه با واحد پارامترهای مورد ارزیابی بوده و نشان می‌دهد که پارامتر مدل‌سازی شده چند واحد از مقدار واقعی متفاوت است.

### نتایج و بحث

میانگین آماره‌های صحت‌سنجی منحنی‌های رطوبتی برآورد شده از طریق سه مدل *Arya et al.* (1999) MV، (2011) MV و MV-VG (2013) در کلاس‌های بافتی مختلف در جدول (۲) ارائه شده است.

خطاهای رفتاری متفاوت تأکید دارند.  $R^2$  پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری شده را در برابر مقادیر پیش‌بینی شده نشان می‌دهد؛ به این معنی که چه مقدار از پراکندگی مشاهدات توسط تخمین، قابل توضیح است. هنگامی که مدل‌سازی از صحت بالایی برخوردار باشد، این آماره به یک نزدیک خواهد بود. مقادیر NSE خطا را در بازه بین یک و منفی بینهایت  $(-\infty)$ ، کمی‌سازی می‌کند و مقادیر کمتر از صفر نشان می‌دهد که میانگین سری مشاهده شده می‌تواند پیش‌بینی‌کننده بهتری نسبت به مدل باشد (*Krause et al.*, 2005). RMSE تفاوت پارامتر برآورد شده با مقدار واقعی

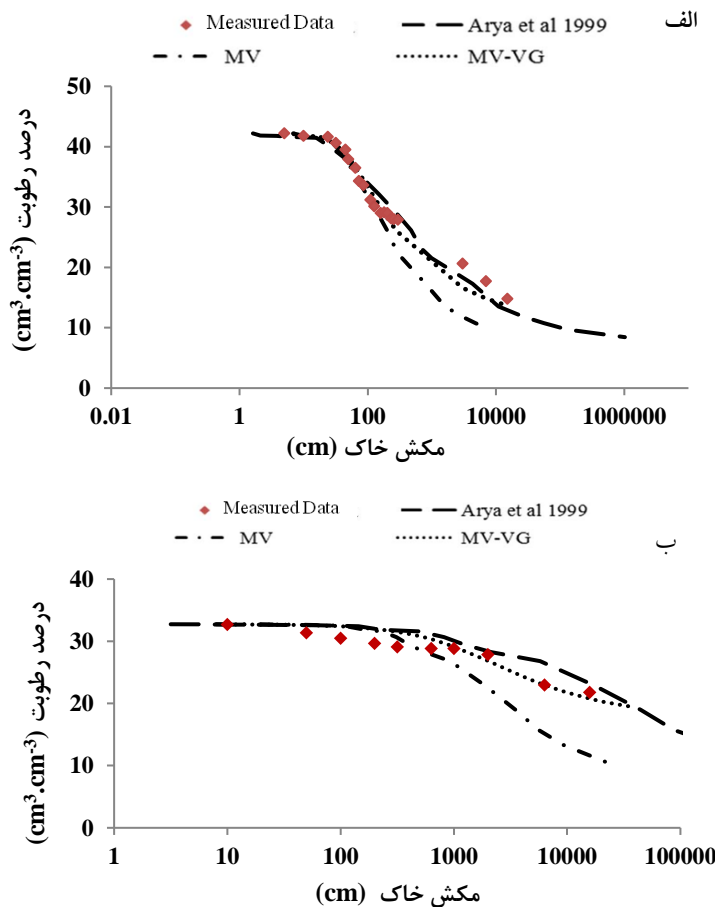
جدول ۲- میانگین آماره‌های صحت‌سنجی برآورد رطوبتی با استفاده از مدل‌های مختلف در کلاس‌های بافت خاک

مدل MV (2011)			مدل MV-VG (2013)			مدل <i>Arya et al.</i> (1999)			تعداد	کلاس بافتی
$R^2$	NSE	RMSE	$R^2$	NSE	RMSE	$R^2$	NSE	RMSE		
۰/۹۰	۰/۷۷۴	۰/۰۵	۰/۹۰۲	۰/۸۱۱	۰/۰۴۵	۰/۸۷۵	۰/۷۶۱	۰/۰۵	۱۱	شنی
۰/۹۳۸	۰/۵۳۶	۰/۰۵	۰/۹۳۷	۰/۸۱۷	۰/۰۳۹	۰/۸۷۸	۰/۶۴۶	۰/۰۵۱	۱۱	شن لومی
۰/۹۲۳	۰/۴۱۹	۰/۰۵۲	۰/۹۲۶	۰/۵۴۵	۰/۰۳۸	۰/۹۱۳	۰/۶۴۱	۰/۰۳۸	۱۱	لوم شنی
۰/۹۶۶	۰/۴۱۸	۰/۰۴۸	۰/۹۴۹	۰/۴۰۶	۰/۰۴۴	۰/۹۴۳	۰/۷۲۴	۰/۰۳۳	۱۰	لوم
۰/۹۳۸	۰/۵۴۶	۰/۰۴۶	۰/۹۳۹	۰/۸	۰/۰۳۶	۰/۹۴۵	۰/۵۴۶	۰/۰۴	۱۱	لوم سیلتی
۰/۸۶۱	-۵/۳۲۶	۰/۰۸۱	۰/۸۴	-۰/۰۶۱	۰/۰۴	۰/۸۸۹	-۳/۵۸۸	۰/۰۶۹	۱۰	لوم رس شنی
۰/۹۳۱	-۲/۲۳۶	۰/۰۶۱	۰/۹۳۸	-۱/۱۱۰	۰/۰۴۵	۰/۸۹۸	-۰/۳۸۰	۰/۰۵	۹	لوم رسی
۰/۵۰۴	-۱۸/۵۶	۰/۱۵	۰/۵۰۸	-۱/۹۱۶	۰/۰۵۸	۰/۴۹	-۱۴/۸۳۵	۰/۱۳۶	۳	رس شنی
۰/۹۵۱	-۰/۴۷۱	۰/۰۵۱	۰/۹۵۳	-۰/۲۳۵	۰/۰۴۹	۰/۹۵	-۰/۴۴۸	۰/۰۴۶	۱۱	رسی
۰/۸۶۷	-۰/۴۲۶	۰/۰۴۵	۰/۸۵۶	۰/۵۳۸	۰/۰۲۴	۰/۸۶۳	۰/۴۹۹	۰/۰۲۱	۳	سیلت رسی
۰/۸۷۷	۰/۲۳۹	۰/۰۴۷	۰/۸۸۴	۰/۴۵۱	۰/۰۳۸	۰/۸۵۶	۰/۰۸۱	۰/۰۶۲	۴	لوم رس سیلتی
۰/۹۰۹	-۱/۱۲۱	۰/۰۵۷	۰/۹۰۶	۰/۲۲۶	۰/۰۴۱۸	۰/۸۹۴	-۰/۵۴۴	۰/۰۴۹۶	۹۴	جمع تعداد/ میانگین آماره

$R^2$  ضریب تعیین، NSE ضریب کارایی نش-ساتکلیف و RMSE جذر میانگین مربعات خطا است.

کمترین مقدار را دارد اما آماره‌های NSE و  $R^2$  نسبت به بافت‌های سبک‌تر صحت پیش‌بینی کمتری را نشان می‌دهند. این نتیجه بیان‌کننده آن است که برآوردهای مقدار رطوبت در هر مکش، به مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده نزدیک می‌باشد. لیکن روند تغییرات متفاوت است. در شکل (۳-ب) برای یکی دیگر از نمونه‌های کلاس بافتی (نمونه ۱۳۸۳)، نتایج حاصل از مدل به همراه داده‌های اندازه‌گیری شده ارائه شده است. بر این اساس، منحنی رطوبتی برآوردی در مکش‌های کم از مقادیر اندازه‌گیری شده فاصله داشته و بیشتر است، در مکش‌های متوسط به مقادیر اندازه‌گیری شده نزدیک می‌شود و در انتهای منحنی این اختلاف بسیار کمتر شده و حتی مقادیر برآوردی مدل *Arya et al.* (1999) از مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر می‌شود.

بر اساس جدول (۲)، میزان صحت مدل‌های مذکور در کلاس‌های بافتی مختلف متفاوت است. در حالت کلی در خاک‌های با بافت متوسط مدل‌ها برآورد بهتری از SWRC داشته‌اند. به عنوان نمونه مدل *Arya et al.* (1999) در بافت لومی کمترین میزان RMSE و بیشترین مقادیر NSE و  $R^2$  را دارد. این نتایج برای مدل MV (2011) و MV-VG (2013) در بافت لوم سیلتی رخ داده است. نمونه‌ای از نتایج مدل‌سازی برای بافت لومی (خاک ۲۵۳۰) در شکل (۳-الف) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دو مدل *Arya et al.* (1999) و MV-VG (2013) مقادیر برآورد شده نزدیک به مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد اما مدل MV (2011) با دقت کمتری توانسته است مقدار رطوبت خاک را پیش‌بینی کند. در بافت سیلت رسی نیز RMSE در همه مدل‌ها



شکل ۳- نتایج حاصل از مدل سازی به همراه داده های اندازه گیری شده برای خاک های بافت لومی (الف) و بافت سیلت رسی (ب)

برآورد نمایند. لیکن دقت برآورد در سایر خاک های این کلاس بافتی خوب بود.

آنالیز همبستگی انجام شده بین آماره های صحت سنجی (RMSE و NSE) و ویژگی های فیزیکی خاک از جمله درصد شن، سیلت، رس، جرم ویژه ظاهری نتایج معنی داری را نشان نداد (به دلیل معنی دار نبودن، نتایج گزارش نشده است). این بدان معنی است که هیچ یک از این ویژگی ها به تنهایی کنترل کننده عوامل ایجاد خطا در مدل سازی نمی باشند اما شاخص دو الگویی پیشنهاد شده (BMI) همبستگی معنی داری را با آماره های صحت سنجی نشان داد (شکل ۴). در شکل (۴)، همبستگی بین درصد رس (به عنوان یکی از ویژگی های فیزیکی خاک) و شاخص BMI با آماره RMSE برای سه مدل مورد بررسی آمده است.

با مشاهده همبستگی معنی دار بین BMI و صحت مدل های برآوردکننده SWRC از PSD، ابتدا توزیع نمونه ها در محدوده دو الگویی از مثلث بافت خاک مشخص شد (شکل ۵) و در ادامه بر اساس دو الگویی بودن توزیع اندازه ذرات، خاک های مورد مطالعه در دو گروه قرار گرفتند و میانگین آماره های صحت سنجی برای هر کلاس بافتی در هر گروه مشخص شد.

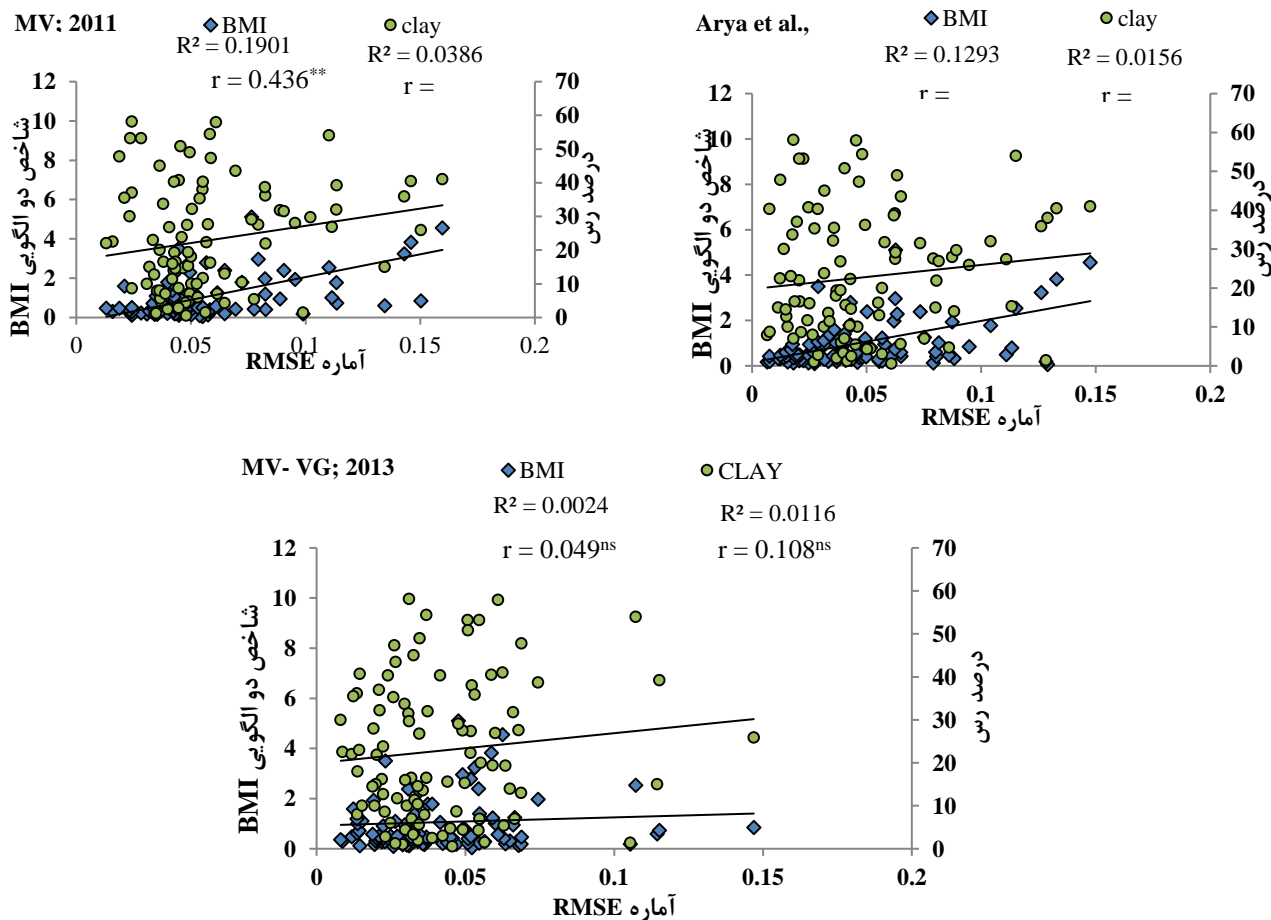
نادیده گرفتن نقش ساختمان خاک، عدم توجه به درصد رس و شکل متفاوت آن نسبت به ذرات درشت تر (صفحه ای بودن)، میزان دقت ضریب مقیاس گذاری و خطاهای موجود در اندازه گیری منحنی رطوبتی از عوامل موثر برای کم بودن صحت تخمین در مدل های برآوردکننده منحنی رطوبتی هستند (Arya et al., 1999; Arya, L. M. and Paris, 1981; Mishra et al., 1989; Basile and D'Urso, 1997; Mohammadi and Vanclouster, 2011). با این حال نتایج مدل سازی در کلاس های بافتی شن لومی، لوم، لوم شنی و سیلت رسی از دقت کافی برخوردار است.

در ادامه با دقت در نتایج به دست آمده برای خاک های انتخاب شده در یک کلاس بافتی نیز مشاهده شد که صحت تخمین در بین نمونه های مختلف، متفاوت است. به عنوان نمونه آماره های صحت سنجی برای خاک های با بافت رسی در جدول (۳) ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود، مدل های Arya et al. (1999) و MV (2011) در خاک های ۱۱۸۲، ۱۳۶۰، ۲۳۴۰ و ۲۶۶۰ و مدل MV-VG (2013) در خاک های ۱۱۸۲، ۲۶۲۰ و ۲۶۶۰ نتوانسته اند منحنی رطوبتی را با دقت قابل قبولی

جدول ۳- مقدار آماره‌های صحت سنجی برای مدل‌های مختلف در خاک‌های رسی

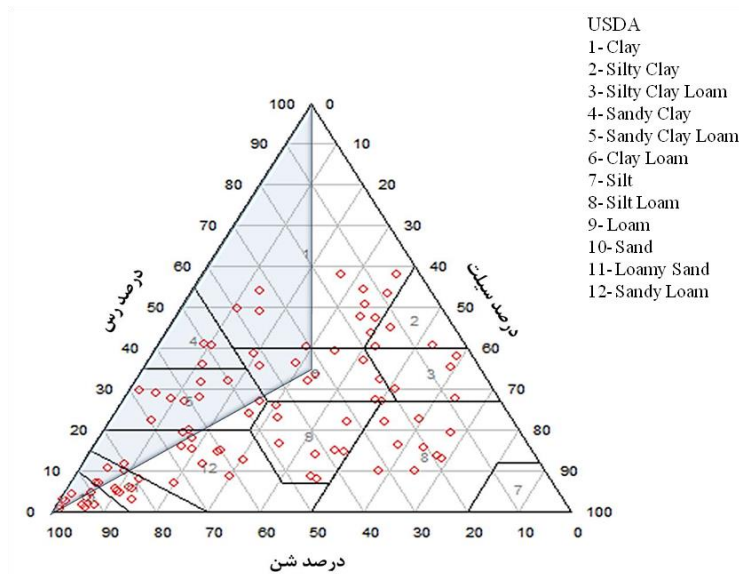
شماره خاک	مدل MV (2011)			مدل MV-VG (2013)			مدل Arya et al. (1999)		
	R <sup>2</sup>	NSE	RMSE	R <sup>2</sup>	NSE	RMSE	R <sup>2</sup>	NSE	RMSE
۱۱۸۲	۰/۸۳۷	-۸/۱۸۲	۰/۱۱	۰/۹۴۲	-۷/۶۹۱	۰/۱۰۷	۰/۸۴۸	-۹/۰۳۱	۰/۱۱۵
۱۳۶۰	۰/۹۴۷	-۰/۶۶۸	۰/۰۶۹	۰/۹۴۳	۰/۷۵۵	۰/۰۲۷	۰/۹۵۲	-۰/۴۵۸	۰/۰۶۵
۱۴۰۰	۰/۹۷۳	۰/۵۴۴	۰/۰۲۴	۰/۹۷۱	۰/۲۵۲	۰/۰۳۱	۰/۹۹۵	۰/۸۴۸	۰/۰۱۸
۲۳۴۰	۰/۹۶۱	-۰/۳۹۳	۰/۰۵	۰/۹۸۳	۰/۳۱۸	۰/۰۳۵	۰/۸۸۷	-۱/۲۷۷	۰/۰۶۳
۲۶۲۰	۰/۹۹۴	۰/۹۶۶	۰/۰۱۹	۰/۹۸۸	۰/۵۳۹	۰/۰۶۹	۰/۹۹۲	۰/۹۸۵	۰/۰۱۲
۲۶۶۰	۰/۹۶۱	-۰/۲۹۵	۰/۰۶۱	۰/۹۳۷	-۰/۲۹۶	۰/۰۶۱	۰/۹۶۶	۰/۲۸	۰/۰۴۵
۲۶۸۱	۰/۹۴۱	۰/۷۳۹	۰/۰۴۳	۰/۸۸۷	۰/۷۵۳	۰/۰۴۲	۰/۹۶۳	۰/۸۸۳	۰/۰۲۹
۴۱۲۰	۰/۹۲۴	۰/۶۵۴	۰/۰۴۵	۰/۹۳۴	۰/۵۶۷	۰/۰۵۱	۰/۹۳۶	۰/۷۲۶	۰/۰۴
۴۱۲۱	۰/۹۸۶	۰/۹۲۷	۰/۰۲۴	۰/۹۷۳	۰/۶۰۷	۰/۰۵۵	۰/۹۷۵	۰/۹۳۳	۰/۰۲۲
۴۶۸۰	۰/۹۸۵	۰/۴۵	۰/۰۵۹	۰/۹۸۵	۰/۸۹۱	۰/۰۲۶	۰/۹۸۵	۰/۶۵۱	۰/۰۴۷
۴۶۸۱	۰/۹۴۷	۰/۰۷۵	۰/۰۵۸	۰/۹۴۲	۰/۷۲۳	۰/۰۳۷	۰/۹۴۶	۰/۵۲۷	۰/۰۴۸
میانگین	۰/۹۵۱	-۰/۴۷۱	۰/۰۵۱	۰/۹۵۳	-۰/۲۳۵	۰/۰۴۹	۰/۹۵	-۰/۴۴۸	۰/۰۴۶

R<sup>2</sup> ضریب تعیین، NSE ضریب کارایی نش-ساتکلیف و RMSE جذر میانگین مربعات خطا است



شکل ۴- همبستگی بین آماره صحت‌سنجی RMSE و درصد رس و شاخص دو الگوی در سه مدل مختلف





شکل ۵- توزیع نمونه‌ها در مثلث بافت خاک و ناحیه با ویژگی دو الگویی

مختلف بر اساس فرضیات و شرایط در نظر گرفته شده از روش‌های محاسباتی متفاوتی برای برآورد منحنی رطوبتی خاک از توزیع اندازه ذرات استفاده می‌کنند. از این رو نتایج به دست آمده نیز کاملاً متفاوت می‌باشد. مدل Arya *et al.* (1999) توزیع منافذ خاک را به صورت لوله‌های مؤین متمرکز<sup>۱</sup> در نظر گرفته است و از پارامتر مقیاس گذاری  $\alpha$  برای اصلاح طول مجاری به دست آمده بر مبنای ذرات کروی به طول منافذ واقعی استفاده می‌کند. در مدل MV ذرات به صورت کروی در نظر گرفته شده و فضای بین منافذ حاصل از آرایش هشت وجهی ذرات کروی محاسبه می‌شوند و برای تصحیح شرایط نسبت به حالت واقعی از ضریب تصحیح  $\xi$  استفاده کردند. با توجه به اینکه شکل و اندازه ذرات در چگونگی آرایش آن‌ها تاثیر دارد، برآورد ضریب  $\xi$  تنها با استفاده از پوکی خاک نمی‌تواند دقت لازم را داشته باشد. نتایج مدل سازی نیز نشان می‌دهد که مدل MV نسبت به دو مدل دیگر (به ویژه در بافت‌های سنگین تر) کارایی کمتری داشته است. در نسخه اصلاح شده مدل MV پس از محاسبه توزیع اندازه منافذ، ضرایب مدل منحنی رطوبتی ونگنوختن داده‌های درصد فراوانی ذرات و اندازه منافذ برآورد شده برازش داده می‌شود. سپس با داشتن ضرایب مدل منحنی رطوبتی، مقدار رطوبت برای هر مکش خاک برآورد می‌شود. نتایج نیز نشان داد که صحت مدل MV- VG بیشتر از دو مدل دیگر می‌باشد که دلیل آن ادغام مدل به دست آمده برای توزیع اندازه منافذ با مدل منحنی رطوبتی می‌باشد. از دیگر مزایای این مدل، برآورد منحنی رطوبتی به صورت پیوسته می‌باشد که در معادلات هدایت هیدرولیکی و انتقال آب در خاک می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

بر اساس شکل (۵)، برخی از کلاس‌های بافت خاک شامل لوم، رس سیلتی، لوم رس سیلتی، سیلت لومی به صورت کامل دارای توزیع نرمال می‌باشند. در مقابل، بافت رس شنی به صورت کامل در دامنه توزیع دو الگویی قرار گرفته است. در سایر کلاس‌های بافت خاک، قسمتی دارای توزیع نرمال و قسمتی دارای توزیع دو الگویی می‌باشند. میانگین آماره‌های صحت سنجی نشان داد که صحت مدل‌های برآورد کننده SWRC در دامنه توزیع دو الگویی به شدت کاهش می‌یابد (جدول ۴). به عنوان مثال در کلاس بافت رس با قرار گرفتن نمونه‌ها در دامنه دو الگویی مقدار RMSE از حدود ۰/۰۴ به ۰/۰۷ افزایش یافته است. این حالت برای خاک‌های لوم رسی و لوم رس شنی نیز مشابه می‌باشد. لیکن در کلاس‌های بافت شنی، شن لومی و لوم شنی حضور در دامنه دو الگویی تاثیر چندانی بر کارایی مدل‌ها نداشته است. در کلاس‌های بافت شنی و شن لومی تقریباً ۵۰ درصد داده‌ها در محدوده دو الگویی قرار دارند، اما در این دو کلاس بافتی تنها کمتر از ۱۵ درصد ذرات در محدوده سیلت و رس قرار دارند و تغییر درصد رس نسبت به سیلت تفاوت چندانی ایجاد نمی‌کند که سبب نمایش واضح حالت دو الگویی شود. به عبارت بهتر در این کلاس‌های بافتی چون فراوانی ذرات ریز بسیار کم می‌باشد، لذا تعداد منافذ مرتبط با ذرات ریز کم بوده و حالت گسستگی در توزیع منافذ رخ نمی‌دهد. در کلاس بافت لوم شنی نیز به دلیل اینکه نمونه‌ها در مرز توزیع دو الگویی قرار دارند، صحت برآورد به مقدار کمی کاهش یافته است. همان‌گونه که پیش از این نیز به آن اشاره شد، مدل‌های

جدول ۴- آماره های صحت سنجی برای خاک های با الگوی توزیع نرمال و دو الگویی اندازه ذرات در سه مدل برآوردکننده منحنی رطوبتی

مدل MV-VG (2013)			مدل Arya et al. (1999)			مدل MV (2011)			حالت دو الگویی	کلاس بافت خاک
R <sup>2</sup>	NSE	RMSE	R <sup>2</sup>	NSE	RMSE	R <sup>2</sup>	NSE	RMSE		
۰/۹۵۹	۰/۵۰۵	۰/۰۴۵	۰/۹۶۸	۰/۵۶۲	۰/۰۳۷	۰/۹۶۵	۰/۳۳۲	۰/۰۴۵	Normal	Clay
۰/۹۳۷	-۲/۲۰۶	۰/۰۶۱	۰/۹	-۳/۱۴۲	۰/۰۶۹	۰/۹۱۳	-۲/۶۱۲	۰/۰۶۷	Bimodal	
۰/۹۲۶	-۰/۳۸۲	۰/۰۵۲	۰/۹۰۶	۰/۴۳۳	۰/۰۵۷	۰/۹۳۱	-۰/۴۶۱	۰/۰۵۹	Normal	Clay loam
۰/۹۴۸	-۱/۶۹۲	۰/۰۳۹	۰/۸۹۲	-۱/۰۳۱	۰/۰۴۵	۰/۹۳۱	-۳/۶۵۷	۰/۰۶۳	Bimodal	
۰/۹۴۹	۰/۰۴۰۶	۰/۰۴۴	۰/۹۴۳	۰/۷۲۴	۰/۰۳۳	۰/۹۶۶	۰/۴۱۸	۰/۰۴۸	Normal	Loam
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bimodal	
۰/۹۳۱	۰/۸۳۵	۰/۰۳۶	۰/۸۵۶	۰/۶۲۳	۰/۰۵۳	۰/۹۳۱	۰/۶۲۷	۰/۰۴۷	Normal	Loamy sand
۰/۹۴۷	۰/۷۸۶	۰/۰۴۳	۰/۹۱۶	۰/۶۸۸	۰/۰۴۷	۰/۹۵	۰/۳۷۷	۰/۰۵۶	Bimodal	
۰/۸۸۴	۰/۷۶۶	۰/۰۵	۰/۸۴۸	۰/۷۱۹	۰/۰۵۵	۰/۸۸۳	۰/۷۵۴	۰/۰۵۲	Normal	Sand
۰/۹۳۵	۰/۸۸۸	۰/۰۳۶	۰/۹۲۱	۰/۸۳۳	۰/۰۴۱	۰/۹۳۱	۰/۸۱	۰/۰۴۶	Bimodal	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Normal	Sandy clay
۰/۵۰۸	-۱/۹۱۶	۰/۰۵۸	۰/۴۹	-۱۴/۸۳۵	۰/۱۳۶	۰/۵۰۴	-۱۸/۵۶۴	۰/۱۵	Bimodal	
۰/۸۸۷	۰/۸۲۶	۰/۰۲۲	۰/۹۳۵	۰/۶۵۵	۰/۰۳۲	۰/۸۹۱	۰/۲۶۴	۰/۰۴۶	Normal	Sandy clay loam
۰/۸۳۴	-۰/۱۶	۰/۰۴۲	۰/۸۸۴	-۴/۰۶	۰/۰۷۳	۰/۸۵۷	-۵/۹۴۷	۰/۰۸۵	Bimodal	
۰/۹۳۴	۰/۵۶۲	۰/۰۴	۰/۹۱۵	۰/۶۹۸	۰/۰۳۹	۰/۹۳۱	۰/۵۳	۰/۰۵۴	Normal	Sandy loam
۰/۹۰۴	۰/۵۰۱	۰/۰۳۵	۰/۹۰۷	۰/۴۸۷	۰/۰۳۶	۰/۹۰۴	۰/۱۲۲	۰/۰۴۷	Bimodal	
۰/۹۳۹	۰/۸	۰/۰۳۶	۰/۹۴۵	۰/۵۴۶	۰/۰۴	۰/۹۳۸	۰/۵۴۶	۰/۰۴۶	Normal	Silt loam
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bimodal	
۰/۸۵۶	۰/۵۳۸	۰/۰۲۴	۰/۸۶۳	۰/۴۹۹	۰/۰۲۱	۰/۸۶۷	-۰/۴۲۶	۰/۰۴۵	Normal	Silty clay
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bimodal	
۰/۸۸۴	۰/۴۵۱	۰/۰۳۸	۰/۸۵۶	۰/۰۸۱	۰/۰۶۲	۰/۸۷۷	۰/۲۳۹	۰/۰۴۷	Normal	Silty clay loam
-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bimodal	
۰/۹۲۶	۰/۴۵۳	۰/۰۴۱	۰/۹۱	۰/۵۰۶	۰/۰۴۳	۰/۹۲۹	۰/۱۷۵	۰/۰۴۹	Normal	Average
۰/۸۵۹	-۰/۳۰۹	۰/۰۴۵	۰/۸۵۶	-۳/۰۱۹	۰/۰۶۶	۰/۸۶۱	-۴/۱۷۵	۰/۰۷۵	Bimodal	

R<sup>2</sup> ضریب تعیین، NSE ضریب کارایی نش-ساتکلیف و RMSE جذر میانگین مربعات خطا است

### نتیجه گیری

ندارند؛ لیکن شاخص توزیع دو الگویی پیشنهادی که از ترکیب درصد اجزای بافت خاک حاصل می شود، به طور معنی داری با آماره RMSE همبستگی دارد. البته در مدل MV-VG این شاخص نیز با آماره صحت سنجی همبستگی نداشت که نشان دهنده تاثیرپذیری کمتر این مدل از توزیع دو الگویی ذرات خاک است. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص شد که حالت دو نمایی توزیع اندازه ذرات دلیل اصلی کاهش صحت برآورد مدل های مذکور به غیر از اثر ساختمان یا نحوه تعیین پارامتر مقیاس در برخی کلاس های بافتی است. بنابراین در صورت نیاز به برآورد منحنی رطوبتی از توزیع اندازه ذرات اولیه، لازم است که به دو الگویی بودن توزیع توجه و شاخص BMI محاسبه شود.

گسستگی در توزیع اندازه ذرات خاک که به توزیع دو الگویی تعبیر می شود، می تواند سبب تغییر توزیع اندازه منافذ شده و کارایی مدل های منحنی رطوبتی توسعه یافته را کاهش دهد. در این پژوهش مشاهده شد که توزیع دو الگویی اندازه ذرات سبب می شود که دقت برآورد منحنی رطوبتی خاک از توزیع اندازه ذرات توسط مدل های (Arya et al, 1999)، Mohammadi and Vanclouster (2011) و اصلاح شده آن توسط Mohammadi and Meskini-Vishkaee (2013) کاهش یابد. بررسی ها نشان داد که ویژگی های فیزیکی خاک از جمله درصد شن، سیلت، رس و جرم ویژه ظاهری به تنهایی همبستگی معنی داری با دقت مدل برازشی

### REFERENCES

Arya, L. M. and Paris, J. F. (1981). A physicoempirical

model to predict the soil moisture characteristics. [www.sid.ir](http://www.sid.ir)

- from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Science Society of America Journal*, 45(6), 1023-1030.
- Arya, L. M., Leij, F. J., van Genuchten, M. T. 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(3), 510-519.
- Basile, A. and D'Urso, G. (1997). Experimental corrections of simplified methods for predicting water retention curves in clayloamy soils from particle-size determination. *Soil Technology*, 10(3), 261-272.
- Chang, C. C. and Cheng, D. H. (2018). Predicting the soil water retention curve from the particle size distribution based on a pore space geometry containing slit-shaped spaces. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4621-4632.
- De Condappa, D., Galle, S., Dewandel, B. and Haverkamp, R. (2008). Bimodal zone of the soil textural triangle: common in tropical and subtropical regions. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1), 33-40.
- Fredlund, M. D., Wilson, G. W. and Fredlund, D. G. (2002). Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1103-1117.
- Gee, G. W. and Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis, In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd edn. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, (pp. 383-411).
- Ghanbarian-Alavijeh, B. and Hunt, A. (2012). Estimation of soil-water retention from particle-size distribution: fractal approaches. *Soil Science*, 177(5), 321-326.
- Haverkamp R. and Parlance J. Y. (1986). Prediction the water retention curve from particle size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. *Soil Science*, 142, 325-339.
- Hwang, S. I. and Choi, S. I. (2006). Use of a lognormal distribution model for estimating soil water retention curves from particle-size distribution data. *Journal of Hydrology*, 323(1-4), 325-334.
- Krause, P., Boyle, D.P. and Båse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5, 89-97.
- Li, D., Gao, G., Shao, M. A. and Fu, B. (2016). Predicting available water of soil from particle-size distribution and bulk density in an oasis-desert transect in northwestern China. *Journal of Hydrology*, 538, 539-550.
- Meskini-Vishkaee, F., Mohammadi, M. H. and Vanclooster, M. (2014). Predicting the soil moisture retention curve, from soil particle size distribution and bulk density data using a packing density scaling factor. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 4053-4063.
- Mishra, S., Parker, J. C. and Singhal, N. (1989). Estimation of soil hydraulic properties and their uncertainty from particle size distribution data. *Journal of Hydrology*, 108, 1-18.
- Mohammadi, M. H. and Meskini-Vishkaee, F. (2013). Predicting soil moisture characteristic curves from continuous particle-size distribution data. *Pedosphere*, 23(1), 70-80.
- Mohammadi, M. H., & Vanclooster, M. (2011). Predicting the soil moisture characteristic curve from particle size distribution with a simple conceptual model. *Vadose Zone Journal*, 10(2), 594-602.
- Rezaee, L., Shabanpour, M. Davatgar, N. (2011). Estimating the scaling parameter of Arya-Paris model by various methods to improve estimation of soil moisture characteristic curve. *Water and Soil Science*, 21(3), 103-114. (In Farsi).
- Shang, L. and Li, D. (2019). Comparison of different approaches for estimating soil water characteristic curves from saturation to oven dryness. *Journal of Hydrology*, 577, 123971.
- van Genuchten, MT. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- Vaz, C. M. P., de Freitas Iossi, M., de Mendonça Naime, J., 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(3) 577-583.
- Zhang, L. and Q. Chen. (2005). Predicting bimodal soil-water characteristic curves. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(5), 666-670.
- Zhuang, J., Jin, Y. and Miyazaki T. (2001). Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept. *Soil Science*, 166(5), 308-321.