

## ارزیابی ساختار خطا در برخی مدل‌های توزیع اندازه ذرات خاک

فاطمه افراسیابی<sup>۱</sup> - حبیب خداوردیلو<sup>۲\*</sup> - فرخ اسدزاده<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۵

### چکیده

توزیع اندازه ذرات (PSD) خاک یکی از اساسی‌ترین مشخصه‌های فیزیکی خاک است که به طور گسترده در برآورد بسیاری از ویژگی‌های کلیدی خاک کاربرد دارد. بنابراین توصیف صحیح و پیوسته منحنی PSD خاک‌ها با استفاده از توابع ریاضی ضروری است. هدف از این مطالعه بررسی ساختار خطای تعدادی از مدل‌های برتر PSD در ۲۴ نمونه خاک با کلاس‌های بافتی لوم شنی تا رس سیلتی از اراضی حاشیه غربی دریاچه ارومیه با سطوح مختلف شوری (از ۰/۸-۸۵/۴ دسی‌زیمنس بر متر) متأثر از شوری و سدیم بود. برای این منظور ۶ مدل برتر PSD شامل لوجستیک (MLG)، فردلاندر چهار و سه پارامتری (Fred-3p و Fred-4p)، اندرسون (AD)، (ONL) Offset-Nonrenormalized Lognormal و ویبول (Wei) انتخاب شده و جنبه‌های گوناگون کارایی آن‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد که براساس ضرایب کارایی شامل  $R^2$  (ضریب تبیین)، RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) و Er (خطای نسبی) همه‌ی مدل‌های مورد بررسی دارای کارایی بالایی بوده و کمترین مقدار میانگین  $R^2$  در مدل‌ها برابر با ۰/۹۹۲ و بیشترین مقدار RMSE و Er نیز به ترتیب برابر با ۰/۰۲۸ و ۰/۰۴۵ بود. با این حال، بین کارایی مدل‌ها با درصد شن نمونه‌ها ارتباط معنی‌داری از نوع چندجمله‌ای درجه دو مشاهده شد که براساس آن مدل‌های مورد بررسی در خاک‌های حاوی ۳۰ تا ۴۵ درصد شن کمترین کارایی را داشتند. ساختار خطای نقطه به نقطه مدل‌ها بیانگر کاهش خطای سیستماتیک در برآورد ذرات درشت خاک توسط مدل‌ها بود در حالی که اغلب مدل‌ها فراوانی ذرات ریز خاک را (کوچکتر از ۱۰۰ میکرومتر) بیشتر از واقعیت برآورد کردند. افزون بر این، مقدار خطای نسبی نیز برای ذرات درشت خاک کم‌تر بود به گونه‌ای که مدل ویبول (برای نمونه) برای ذرات با قطر ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر حداقل درصد خطای نسبی را داشت. همبستگی نسبتاً بالا بین پارامترهای مدل MLG، Fred-3p و ONL بیانگر امکان کاهش تعداد پارامترهای این مدل‌ها است. با توجه به نتایج بدست آمده، علی‌رغم کارایی عمومی بالای مدل‌های مورد بررسی در برآورد کل منحنی PSD، کارایی هر مدل وابسته به اندازه ذرات بود. بنابراین، یک مدل ممکن است برای برآورد کل PSD خاک دقت کافی داشته باشد ولی برای برآورد گستره‌ای خاص از PSD خاک مناسب نباشد. استفاده از چنین مدلی می‌تواند خطایی چشمگیر در برآورد گستره اندازه‌ای موردنظر ایجاد کند.

واژه‌های کلیدی: بافت خاک، خاک شور و سدیمی، خطای برآورد، دریاچه ارومیه

### مقدمه

تبادل کاتیونی خاک (۱۸)، جذب و واجذب عناصر شیمیایی توسط خاک‌ها (۱۶)، ارزیابی تلفات کربن خاک از راه فرسایش (۱۹)، توزیع و سینتیک کربن آلی خاک (۶ و ۳۷) و غیره دارد. همچنین پژوهش‌هایی چند نشان داده‌اند که تغییرات PSD خاک، شاخصی سودمند در ارزیابی تاثیر کاربری‌های گوناگون در فرسایش خاک و بیابان‌زایی است (۳۴ و ۳۵). در بین کاربردهای پرشمار PSD خاک، بهره‌گیری از آن در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک مانند منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک اهمیت فراوانی دارد (۱۳ و ۲۶).

در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی از روی PSD خاک، ایجاد یک منحنی پیوسته و صحیح از PSD ضروری است چرا که دقت برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی به داشتن اطلاعات تفصیلی از PSD وابسته است. با این حال بسیاری از بانک‌های اطلاعاتی مربوط به دانه‌بندی

توزیع اندازه ذرات اولیه (PSD) از جمله ویژگی‌های بنیادین خاک است که کاربردی گسترده در برآورد و ارزیابی طیفی وسیع از مشخصه‌های کلیدی و دیرپافت خاک از جمله نگهداشت آب (۱۴)، (۱۱، ۱۷)، حرکت آب در خاک (۲۹)، مدل‌سازی جریان آب و انتقال املاح (۲۵)، فرسایش‌پذیری و ترسیب‌پذیری ذرات خاک (۳۶)، ظرفیت

۱، ۲ و ۳- به ترتیب دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشیار و استادیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه

(\* - نویسنده مسئول: (Email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir

DOI: 10.22067/jsw.v31i3.57181

1- Particle Size Distribution

خاک‌ها، بخش جرمی شن، سیلت و رس را ارائه می‌دهند در حالی که نمونه خاک‌هایی که در یک کلاس بافتی معین قرار می‌گیرند، ممکن است PSD بسیار متفاوتی داشته باشند. برای مثال، کلاس بافتی رس در سیستم طبقه‌بندی USDA در برگیرنده‌ی همه‌ی نمونه خاک‌هایی با فراوانی رس ۴۰ تا ۱۰۰ درصد است. از این رو اطلاع دقیق از چگونگی PSD خاک اهمیت بسزایی دارد. برای حل این مشکل، مدل‌های تجربی و آماری پرشماری برای بیان کمی PSD خاک‌ها پیشنهاد شده است. با کاربرد این مدل‌ها، امکان پیوسته نمودن نقاط مربوط به منحنی PSD خاک و استخراج اطلاعات تفصیلی از این تابع به منظور کاربرد در برآورد سایر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک فراهم می‌گردد.

بر این اساس تاکنون پژوهش‌هایی پرشمار در زمینه ارزیابی مدل‌های برتر مربوط به PSD خاک صورت گرفته است. برای نمونه، Liu و همکاران (۲۲)، Hwang و همکاران (۱۴)، Nabizadeh و BeigiHarchegani (۲۷)، گزارش کردند که در اغلب نمونه‌های مورد بررسی، مدل فردلاند چهار پارامتری (Fred-4p) بیشترین کارایی را در بیان PSD خاک دارد. Rastgo و همکاران (۳۱) نیز مدل Fred-4p و مدل ویبول (Wei) را به عنوان مدل‌هایی با بهترین قابلیت برازش در بیشتر خاک‌ها گزارش کردند. Botula و همکاران (۵) دریافتند که در بیشتر کلاس‌های بافتی مربوط به مجموعه داده‌های آن‌ها، مدل اندرسون (AD)، Fred-4p و پس از آنها مدل Wei و فردلاند سه پارامتری (Fred-3p) بهترین برازش را نشان دادند. Shanggua و همکاران (۳۲) نیز با مقایسه کارایی ۱۱ مدل مختلف PSD با استفاده از ضرایب کارایی متفاوت مانند  $AIC$ ،  $R^2_{adj}$  و GMER، گزارش نمودند که مدل‌های AD و Wei و همچنین مدل‌های فردلاند سه و چهار پارامتری کارایی مطلوبی در بیان PSD طیف وسیعی از خاک‌ها با ویژگی‌های بافتی مختلف داشتند. Zhao و همکاران (۳۸)، در بررسی کارایی ۱۴ مدل PSD در خاک‌های رسوبی پیرامون سدها، گزارش کردند که مدل Fred-4p بهترین برازش را به داده‌های PSD داشته است. در پژوهش‌های انجام شده توسط Hwang (۱۴) و Hwang و همکاران (۱۵) براساس مقایسه مقادیر متوسط ضریب آکائیک و ضریب تبیین، مدل Fred-4p در بین مدل‌های مورد بررسی بهترین عملکرد را نشان داد. Rastgo و همکاران (۳۱) در ارزیابی کارایی ۱۵ مدل مورد بررسی بر اساس آماره AIC دریافتند که مدل Wei با کمترین مقدار AIC مطلوب‌ترین کارایی را بین مدل‌های مورد بررسی داشت. Afrasiabi (۱) در ارزیابی کارایی ۱۹ مدل PSD در خاک‌های متاثر از نمک پیرامون دریاچه ارومیه، مدل‌های AD، فردلاند چهار و سه پارامتری، Wei، MLG و ONL را به عنوان مدل‌های با بالاترین کارایی برازش معرفی کردند.

نتایج پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه کارایی مدل‌های PSD

که به شماری از آن‌ها اشاره شد، نشان می‌دهد که مدل‌هایی نظیر فردلاند چهار پارامتری (Fred-4p)، فردلاند سه پارامتری (Fred-3p)، اندرسون (AD)، ویبول (Wei)، لوجستیک (MLG) و ONL در اغلب پژوهش‌ها به عنوان مدل‌های برتر معرفی شده‌اند. با این حال در بیشتر مطالعات پیشین کارایی کلی مدل‌ها براساس ضرایب نظیر  $R^2$ ، AIC، RMSE و GMER مدنظر بوده است، در حالی که مدل‌های مطلوب معرفی شده به رغم تشابه عملکرد کلی با یکدیگر ممکن است در برآورد بخش‌های مختلف مربوط به منحنی تجربی PSD عملکرد متفاوتی داشته باشند. بنابراین توجه به کارایی یک مدل در توصیف توزیع بخش‌های مختلف اندازه‌ای ذرات خاک می‌تواند اهمیت ویژه‌ای داشته باشد. بر این اساس، هدف از این پژوهش بررسی خطای مدل‌های برتر PSD در برآورد کمیت کلاس‌های مختلف اندازه‌ای ذرات خاک‌های متاثر از نمک پیرامون دریاچه ارومیه بود. در این مطالعه، ساختار خطای مدل‌های برتر و وابستگی خطای برآورد فراوانی نسبی ذرات به اندازه آنها ارزیابی گردید.

## مواد و روش‌ها

### تهیه‌ی نمونه‌های خاک و تعیین توزیع اندازه ذرات اولیه

تعداد ۲۴ نمونه خاک از اراضی پیرامون ساحل غربی دریاچه ارومیه انتخاب شد. توزیع اندازه ذرات اولیه خاک‌ها از روش هیدرومتری (۱۰) تعیین شد. به این ترتیب که در جرم معینی از هر نمونه خاک پس از پراکنش فیزیکی و شیمیایی، توزیع اندازه ذرات کوچکتر از ۵۰ میکرومتر با استفاده از قرائت هیدرومتر ASTM 152H در زمان‌های مختلف (از ۳۰ ثانیه تا ۲۴ ساعت) و فراوانی نسبی ذرات با قطر بیش از ۵۰ میکرومتر به صورت مکانیکی توسط سری الک‌هاتعین گردید. پس از جدا کردن ذرات بزرگتر از ۵۰ میکرومتر، در نهایت با ترکیب نتایج هیدرومتری و سری الک‌ها، منحنی کامل توزیع اندازه ذرات برای هر نمونه خاک به دست آمد. با توجه به تعدد قرائت در زمان‌های مختلف برای هر خاک و با توجه به تفاوت توزیع اندازه ذرات قطر معادل هر زمان برای خاک‌های مختلف، داده‌های اندازه قطر ذرات معادل با هر زمان قرائت ارایه نگردید. در این پژوهش از قانون استوکس و روابط مربوط به هیدرومتر ASTM 152H برای محاسبه قطر معادل استفاده شد. هدایت الکتریکی (EC) (۲۴)، درصد سدیم قابل تبادل (ESP) (۲۱) و نسبت سدیم جذب سطحی شده (SAR) (۳۳) در آزمایشگاه اندازه‌گیری شدند. برای دوری از خطای اندازه‌گیری ESP و CEC در خاک‌های شور و نه آهکی از روش‌های استاندارد همراه با تکرار استفاده شد که همبستگی بین مقدار SAR عصاره اشباع با ESP در نمونه‌های مورد بررسی تا حدودی بیانگر درستی مقادیر ESP اندازه‌گیری شده است.

در جدول ۱ برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی ۲۴ نمونه مورد

در دامنه‌ی کلاس‌های بافتی رسی تا لوم شنی قرار دارند. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، تعداد ۴ نمونه در کلاس بافتی رس سیلتی، ۳ نمونه لوم رس سیلی، ۲ نمونه لوم رسی، ۱ نمونه رسی، ۳ نمونه لوم شنی، ۸ نمونه لومی و ۳ نمونه در کلاس بافتی لوم سیلتی جای دارند.

مطالعه آورده شده است. خاک‌های مورد مطالعه اغلب جزء خاک‌های شور و سدیمی متاثر از دریاچه ارومیه هستند. به طوری که میانگین قابلیت هدایت الکتریکی و نسبت جذب سدیم در عصاره اشباع نمونه‌های مورد مطالعه به ترتیب برابر با  $14/4 \text{ dSm}^{-1}$  و  $1 \text{ meq.l}^{-1}$  است. از نظر توزیع اندازه ذرات اولیه نیز خاک‌های مورد مطالعه با ضریب تغییرات ۵۵ درصد برای شن و ۴۸ درصد برای رس

جدول ۱- برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه (n=۲۴)  
Table 1- Selected physico-chemical properties of the studied soils (n=24)

بافت خاک Soil texture	هدایت الکتریکی EC ( $\text{dSm}^{-1}$ )	درصد سدیم تبدلی ESP (%)	نسبت جذب سدیم SAR ( $\text{meq/l}$ ) <sup>0.5</sup>	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	شماره نمونه Sample No.
silty clay	31.4	38.6	31.8	10.1	46.3	43.7	1
sandy loam	72.4	70.3	48.3	55.3	30.2	14.6	2
Loam	48.3	39.5	21.8	41.6	43.2	15.2	3
Loam	2.3	18.5	16.4	46.6	36.4	17.0	4
silt loam	9.2	32.6	25.3	18.5	58.6	22.9	5
loam	85.4	71.0	47.0	43.8	43.5	12.8	6
loam	8.2	35.1	25.7	46.3	35.8	17.9	7
loam	1.5	9.6	10.7	36.6	45.7	17.8	8
sandyloam	7.2	31.0	22.8	53.2	32.9	13.9	9
sandyloam	9.4	34.2	28.8	59.4	33.0	7.6	10
silty clay loam	1.3	7.0	3.5	16.0	44.6	39.5	11
silt loam	0.8	13.7	0.7	19.4	55.8	24.8	12
silty clay	5.2	29.1	26.9	16.7	41.4	41.9	13
silty clay loam	21.6	30.5	30.9	13.6	49.0	37.4	14
silt loam	1.2	4.0	17.1	21.6	60.4	18.0	15
silty clay loam	2.1	19.5	9.2	15.5	45.6	38.9	16
clay loam	1.2	12.8	7.3	29.5	38.5	32.1	17
loam	2.2	14.4	18.8	25.9	47.3	26.8	18
loam	10.5	36.2	34.6	33.8	48.4	17.8	19
clay loam	15.6	23.1	26.4	27.3	44.2	28.5	20
clay	2.2	8.1	2.0	11.1	36.6	52.3	21
silty clay	1.5	10.3	5.3	9.0	41.6	49.4	22
silty clay	1.1	5.0	10.3	8.2	45.2	46.5	23
loam	3.5	17.6	14.7	37.7	40.2	22.1	24
Mean	14.39	25.49	20.26	29.03	43.52	27.48	
SD	22.91	17.98	13.07	15.98	7.68	13.14	

آن مقادیر و وارد کردن کمیت‌های نزدیک مختلف از آن محدوده به عنوان مقادیر اولیه، فرایند بهینه‌سازی با صحیح‌ترین برآزش صورت گرفته انجام شد و مقادیر بهینه‌سازی شده پارامترها که منجر به کمترین مقدار خطا شده بود، انتخاب گردیدند.

اعتبارسنجی کلی مدل‌های PSD و بررسی ساختار خطای آن‌ها با استفاده از سه ضریب کارایی شامل ضریب تبیین ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای نسبی (Er) ارزیابی گردید. این ضرایب هر یک جنبه‌های مختلفی از کارایی مدل‌ها را نشان می‌دهند.

ضریب تبیین ( $R^2$ ): نشان دهنده‌ی نسبت کوواریانس داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده بر حاصلضرب واریانس داده‌های مشاهده‌ای و برآورد شده می‌باشد.

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})(P_i - P_{mean})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})^2] \sqrt{[\sum_{i=1}^n (P_i - P_{mean})^2]}} \right\}^2 \quad (1)$$

### برآزش مدل‌های توزیع اندازه ذرات خاک

مدل‌سازی کمی PSD خاک‌ها تنها با استفاده از ۶ مدل که در بیشتر پژوهش‌های پیشین به عنوان مدل‌های برتر شناخته شده‌اند؛ صورت گرفت. مدل‌های مورد نظر به همراه روابط آن‌ها در جدول ۲ معرفی شده‌اند.

مدل‌های بالا از راه بهینه‌سازی مجموع مربعات در محیط نرم‌افزار MATLAB R2012b بر داده‌های اندازه‌گیری شده‌ی PSD برآزش یافتند. در فرآیند برآزش مدل‌ها در هر نمونه، برای اطمینان از مقادیر بهینه‌سازی شده پارامترها برای هر مدل؛ عمل برآزش با کاربرد کمیت‌های مختلفی از مقادیر اولیه پارامترها صورت گرفت. در نهایت، با ثابت شدن مقدار پارامترهای مدل در طی فرآیند برآزش، مقادیر بهینه پارامترها به دست آمد. در فرآیند بهینه‌سازی، ابتدا مقادیر اولیه‌ای برای پارامترهای هر مدل ارائه گردید. سپس با در نظر گرفتن

جدول ۲- معادلات ریاضی مدل‌های توزیع اندازه ذرات

Table 2-The mathematical representation of the particle-size distribution models

پارامترهای مدل Model parameters	معادله Equation	علامت اختصاری Abbreviation	مدل Model
$n, m, d_f, a$ $d_m = 0.001$	$F(d) = \frac{1}{\{\ln[\exp(1) + (\frac{\alpha}{d})^n]\}^m} \{1 - [\frac{\ln(1 + \frac{d_f}{d})}{\ln(1 + \frac{d_f}{d_m})}]^7\}$	Fred-4p	فردلاند ۴ پارامتری (۹)
$c$ و $\sigma$ $\mu$	$F(d) = F(X) + c$ $F(X) = (1 - \text{erf}[(X - \mu)/\sigma\sqrt{2}])/2$ $X = \ln(d)$	ONL	Offset-Nonrenormalized Lognormal (ONL) (۷)
$a, n, m$ $d_m = 0.001$	$F(d) = \frac{1}{\{\ln[\exp(1) + (\frac{\alpha}{d})^n]\}^m} \{1 - [\frac{\ln(1 + \frac{.0001}{d})}{\ln(1 + \frac{.0001}{d_m})}]^7\}$	Fred-3p	فردلاند ۳ پارامتری (۹)
$f_0, b, c, d_0$	$F(d) = f_0 + b \arctan(c \text{ Log } \frac{d}{d_0})$	AD	اندرسون (۲)
$a, b, c$	$F(d) = \frac{1}{[1 + a \exp(-bd^c)]}$	MLG	لوجستیک (۲۳)
$c, a, b$	$F(d) = c + (1 - c)\{1 - \exp(-a D^b)\}$ $d = \frac{(d - d_{min})}{(d_{max} - d_{min})}; d_{max} = 2mm, d_{min} = 0.001mm$	Wei	ویبول (۳)

نقطه هر مدل در هر نمونه خاک از رابطه‌ی زیر استفاده شد:

$$RE = \left[ \frac{(P_i - O_i)}{O_i} \right] \times 100 \quad (۴)$$

که در آن، RE درصد خطای نسبی بوده و  $P_i$  و  $O_i$  نیز به ترتیب فراوانی نسبی پیش‌بینی شده توسط مدل و فراوانی اندازه‌گیری شده‌ی ذرات با اندازه  $i$  است. درصد خطای نسبی بسته به بیش‌برآوردی و یا کم‌برآوردی مدل در یک نقطه‌ی خاص منحنی توزیع اندازه ذرات می‌تواند مثبت و یا منفی باشد.

رابطه بین پارامترهای مدل‌های مورد بررسی در نرم‌افزار Sigma Plot 11.0 بررسی شد.

### نتایج و بحث

#### کارایی کلی مدل‌های PSD

نمودار جعبه‌ای مقادیر شاخص‌های ارزیابی کارایی مدل‌های PSD برای ۲۴ نمونه خاک در شکل ۱ ارائه شده است. براساس ضرایب کارایی، مدل‌های مورد بررسی از نظر کلی کارایی مناسبی در بیان توزیع اندازه ذرات خاک‌های مورد مطالعه دارند؛ به طوری که بیشترین مقدار میانگین ضریب تبیین در مدل‌ها برابر با ۰/۹۹۴ برای دو مدل AD و Wei بود. بیشترین مقدار میانگین RMSE نیز مربوط به مدل Fred-3p، و برابر با ۰/۰۲۸ است. از نظر میانگین خطای

ریشه میانگین مربع خطا (RMSE): میانگین خطای برآورد را در کل منحنی توزیع اندازه ذرات بیان می‌کند. مقدار RMSE همواره مثبت بوده و با نزدیک شدن آن به صفر، کارایی مدل افزایش می‌یابد. در این مطالعه، فراوانی قطرهای مختلف نه برحسب درصد بلکه برحسب نسبت (درصد فراوانی تقسیم بر ۱۰۰ معادل با ۱-۰) بود و لذا RMSE بدون بعد است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (۲)$$

خطای نسبی (Er): نیز نشان دهنده مقدار خطای برآزش مدل است. Lassabatere و همکاران (۲۰) بیان نمودند که مقادیر Er کوچکتر از ۰/۰۵ نشان دهنده‌ی کارایی مطلوب مدل است.

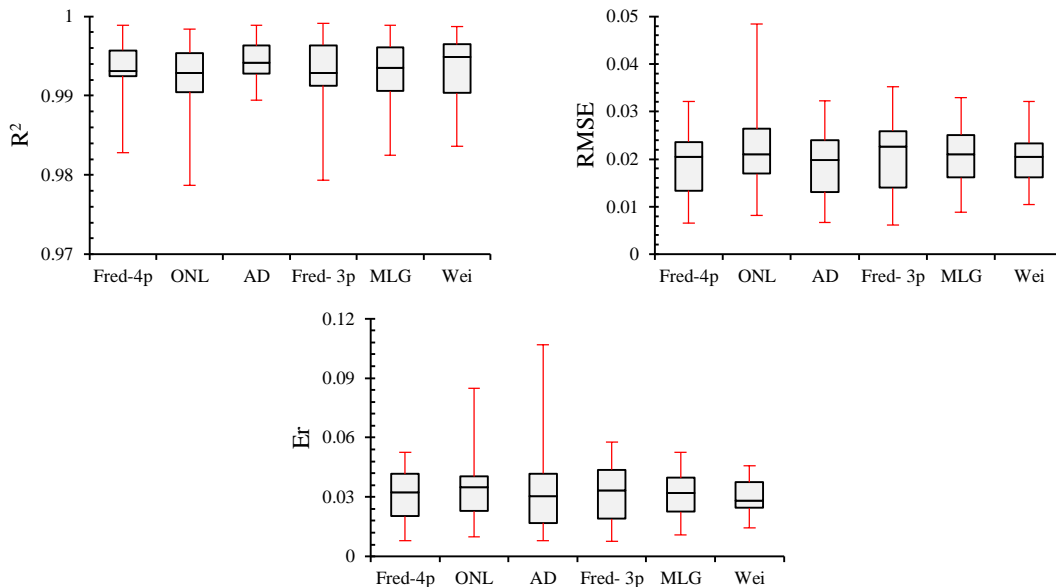
$$Er = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i)^2}} \quad (۳)$$

$O_i$  و  $P_i$  به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل در یک نقطه،  $O_{mean}$  و  $P_{mean}$  به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل،  $n$  تعداد نقاط می‌باشد.

به منظور تحلیل جامع‌تر مدل‌های مورد بررسی، درصد خطای برآورد فراوانی نسبی در هر اندازه از ذرات محاسبه و مقایسه گردید. لازم به توضیح است که برای محاسبه‌ی درصد خطای نسبی نقطه به

عمومی مدل‌های مورد مطالعه در برآورد کل منحنی توزیع اندازه ذرات بالاست، بررسی دقت برآورد آن‌ها در دامنه‌های متفاوت اندازه ذرات خاک برای برآورد صحیح‌تر بخش‌های مختلف منحنی توزیع اندازه ذرات خاک ضروری است. بنابراین، ارزیابی رفتار این مدل‌ها در دامنه‌های متفاوت اندازه‌های ذرات خاک و تاثیر فراوانی ذرات شن و سیلت و رس در افزایش کارایی و چگونگی رفتار این مدل‌ها ضروری است.

نسبی نیز تمامی مدل‌ها دارای خطای نسبی کم‌تر از ۰/۰۵ بودند که این امر نشان دهنده‌ی کارایی عمومی بالای این مدل‌ها است (۲۰). دامنه‌ی تغییرات ضرایب کارایی در خاک‌های مورد مطالعه نسبتاً کم بود (شکل ۱) که بیانگر این نکته است که نه تنها میانگین ضرایب کارایی در خاک‌های مورد مطالعه مطلوب است، بلکه تغییرات آن‌ها در خاک‌های مختلف نیز کم بوده و در اغلب خاک‌ها این کارایی بالا مشاهده می‌شود. کارایی مناسب این مدل‌ها در یافته‌های پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (۱، ۵، ۳۱ و ۳۲). هرچند که کارایی

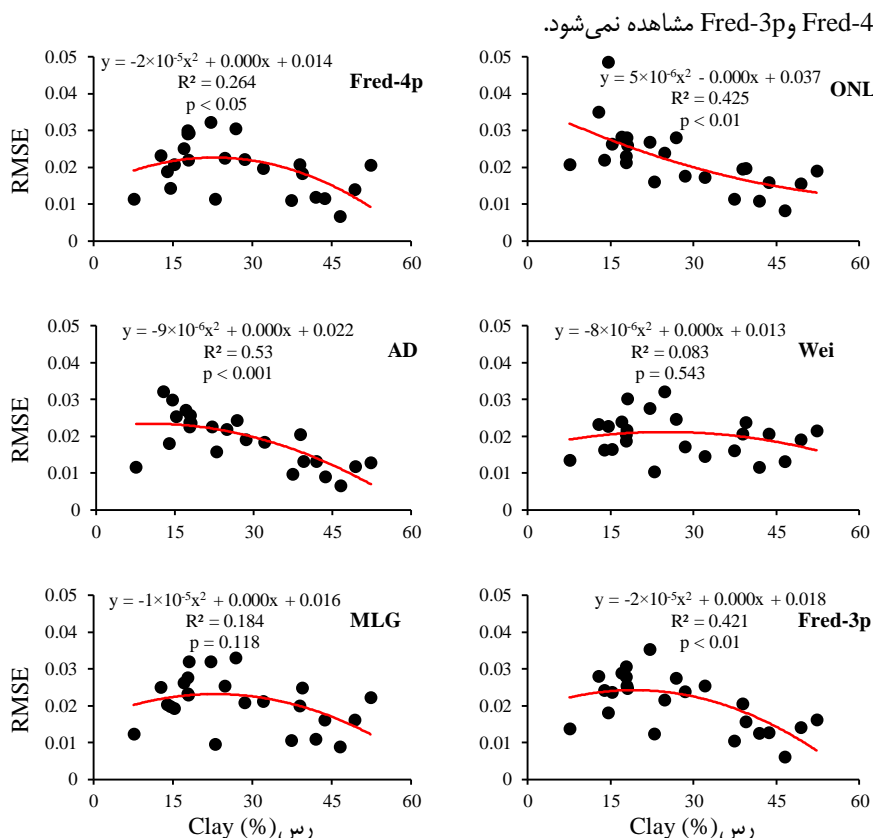


شکل ۱- تغییرات ضرایب کارایی مدل‌های مورد آزمون در بین نمونه‌های خاک مورد مطالعه.  $R^2$ : ضریب تبیین، RMSE: ریشه میانگین مربع خطا، Er: خطای نسبی.

Figure 1- Variations in the efficiency criteria of the applied models among the studied soil samples.  $R^2$ : coefficient of determination, RMSE: root mean square error, Er: relative error.

فراوانی رس بر کارایی مدل‌های توزیع اندازه ذرات خاک است. برای نمونه Shangguan و همکاران (۳۲) بیان نموده‌اند که در محدوده‌ی رس ۳۰ تا ۴۰ درصد مدل‌هایی نظیر Fred-4p، Fred-3p، Wei، AD و MLG دارای بیشترین کارایی بر مبنای ضریب تبیین هستند. این پژوهشگران در رابطه با مدل AD مشاهده نمودند که کمترین مقادیر ضریب تبیین مربوط به خاک‌هایی است که فراوانی رس در آن‌ها در محدوده‌ی ۱۰ تا ۲۰ درصد قرار دارد. برخی دیگر از پژوهشگران نیز به افزایش کارایی مدل‌های توزیع اندازه ذرات با افزایش فراوانی رس در نمونه‌های خاک اشاره نموده‌اند (۱۴، ۲۷ و ۳۱). با این حال نتایج برخی از پژوهش‌های دیگر مبین عدم وجود ارتباط مشخص بین فراوانی رس و کارایی مدل‌های توزیع اندازه ذرات خاک است. برای نمونه Botula و همکاران (۵) با مطالعه بر روی یک پایگاه وسیع از داده‌های توزیع اندازه ذرات بیان داشتند که روند روشنی از تاثیر مقادیر رس بر کارایی مدل‌های توزیع اندازه ذرات

ارتباط بین اجزای بافت خاک با کارایی مدل‌های برگزیده کارایی برآزش مدل‌های PSD خاک نه تنها از کلاس‌های بافتی بلکه تا اندازه‌ای از درصد اجزای بافت خاک شامل شن، سیلت و رس نیز تاثیر می‌پذیرد (۱۴ و ۱۵). از این رو برای بررسی دقیق‌تر این رابطه، تغییرات مقدار RMSE هر یک از مدل‌های برگزیده در مقابل فراوانی ذرات رس، شن و سیلت به ترتیب در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان داده شده است. در تمامی مدل‌ها به غیر از مدل‌های Wei و MLG، ارتباط بین فراوانی رس و RMSE مدل‌ها از یک رابطه‌ی چندجمله‌ای درجه دو پیروی می‌کند (شکل ۲). هر چند بیشتر روابط رگرسیونی مشاهده شده برای درصد رس و RMSE مدل‌ها از نظر آماری ضعیف هستند، به طور کلی نشان می‌دهند که بیشینه مقدار RMSE برای اغلب مدل‌ها در محدوده‌ی رس ۱۵ تا ۳۰ درصد مشاهده می‌شود و با افزایش فراوانی رس به بیش از ۳۰ درصد خطای مدل‌ها نیز کاهش می‌یابد. برخی از پژوهش‌های دیگر نیز بیانگر تاثیر



شکل ۲- ارتباط بین درصد رس در نمونه‌های خاک و مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای مدل‌ها. RMSE: ریشه میانگین مربع خطا  
 Figure 2- The relationship between clay content of the soil samples and the values of root mean square error (RMSE) of models

معنی‌دار نبود (شکل ۴) و روند روشنی بین فراوانی سیلت با کارایی مدل‌ها مشاهده نشد.

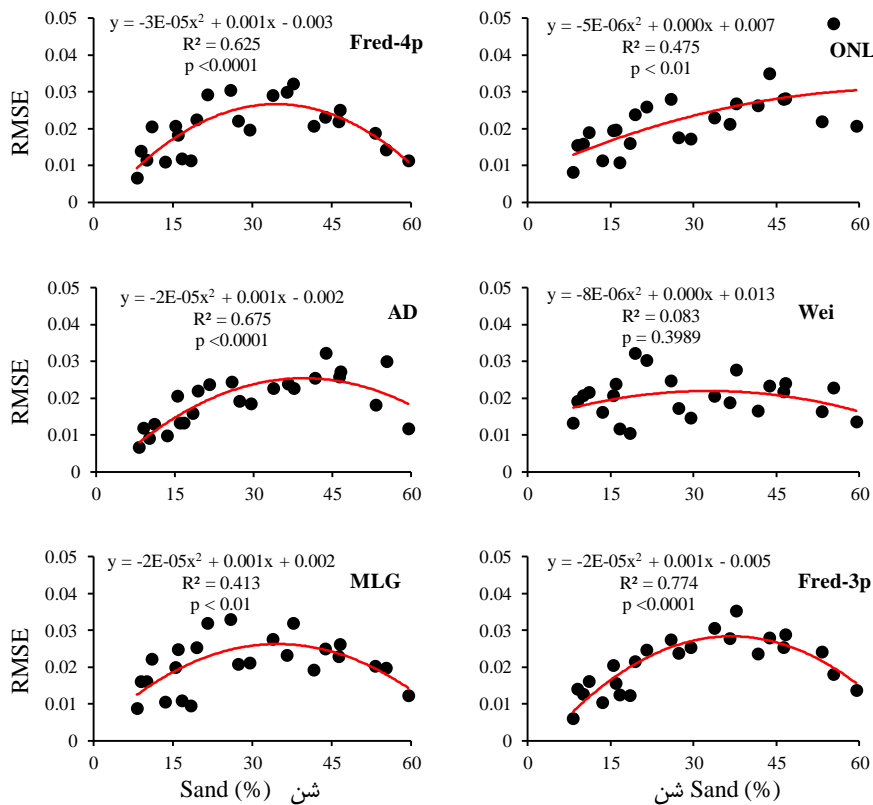
#### ساختار خطای نقطه به نقطه در مدل‌ها

درصد خطای نسبی برای اندازه‌های مختلف ذرات در مدل‌های مختلف متفاوت بود (شکل ۵). همچنین، در تمامی مدل‌های برگزیده درصد خطای نسبی برای ذرات ریزتر، بیش از ذرات درشت‌تر بود.

نتایج شکل (۵) نشان می‌دهد که مقدار خطای نسبی برای ذرات با دامنه ۲۰۰۰-۱۰ میکرومتر کم بوده و مدل‌های مورد نظر ذرات با قطر مابین این دامنه را به خوبی برآورد نموده‌اند. نکته مهم در این شکل چگونگی پراکنش ابر نقاط حول محور افقی است چرا که بیش‌برآوردی مدل سبب مثبت شدن خطای نسبی و کم‌برآوردی آن سبب منفی شدن خطای نسبی می‌شود.

در محدوده‌ی ذرات با قطر بزرگتر از ۵ میکرومتر، پراکنش نقاط حول محور افقی برای تمامی مدل‌ها کمابیش متقارن است که این امر نشان دهنده‌ی عدم وجود خطای سیستماتیک (بیش‌برآوردی یا کم‌برآوردی دائمی) در این دامنه از اندازه ذرات خاک است.

رابطه بین درصد فراوانی شن در نمونه‌های خاک با ضرایب کارایی مدل‌ها، برخلاف ارتباط با فراوانی رس (شکل ۲)، برای اغلب مدل‌های مورد بررسی از نظر آماری معنی‌دار است (شکل ۳). شکل (۳) بیانگر وجود یک رابطه‌ی چند جمله‌ای درجه دو بین RMSE مدل‌ها و درصد شن در آن‌ها است هر چند این رابطه برای مدل Wei معنی‌دار نیست. برای اغلب مدل‌های مورد بررسی نظیر Fred-3p، Fred-4p، AD و MLG در محدوده‌ی فراوانی شن ۳۰ تا ۴۵ درصد بیشترین مقادیر RMSE مدل‌ها مشاهده شد. به عبارت دیگر برای خاک‌های با فراوانی شن کمتر از ۳۰ و بیش از ۴۵ درصد قابلیت مدل‌ها بهتر بود. وجود چنین روابطی بین درصد فراوانی شن و کارایی مدل‌ها می‌تواند در انتخاب مدل‌های برتر برای خاک‌هایی با اجزای بافت (شن، سیلت و رس) سودمند باشد و بر مبنای این روابط و با توجه به فراوانی شن در نمونه‌های خاک می‌توان خطای مورد انتظار برای یک مدل خاص را پیش‌بینی نمود. Nabizadeh و BeigiHarchegani (۲۷) گزارش کردند که با افزایش درصد شن خاک از ۴۰ درصد برآزش مدل فردلاند چهار پارمتری کاهش یافته است. ارتباط بین فراوانی سیلت با کارایی مدل‌های مورد بررسی



شکل ۳- ارتباط بین درصد شن در نمونه‌های خاک و مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای مدل‌ها. ریشه میانگین مربع خطا. Figure 3- The relationship between sand content of the soil samples and the values of root mean square error (RMSE) of models.

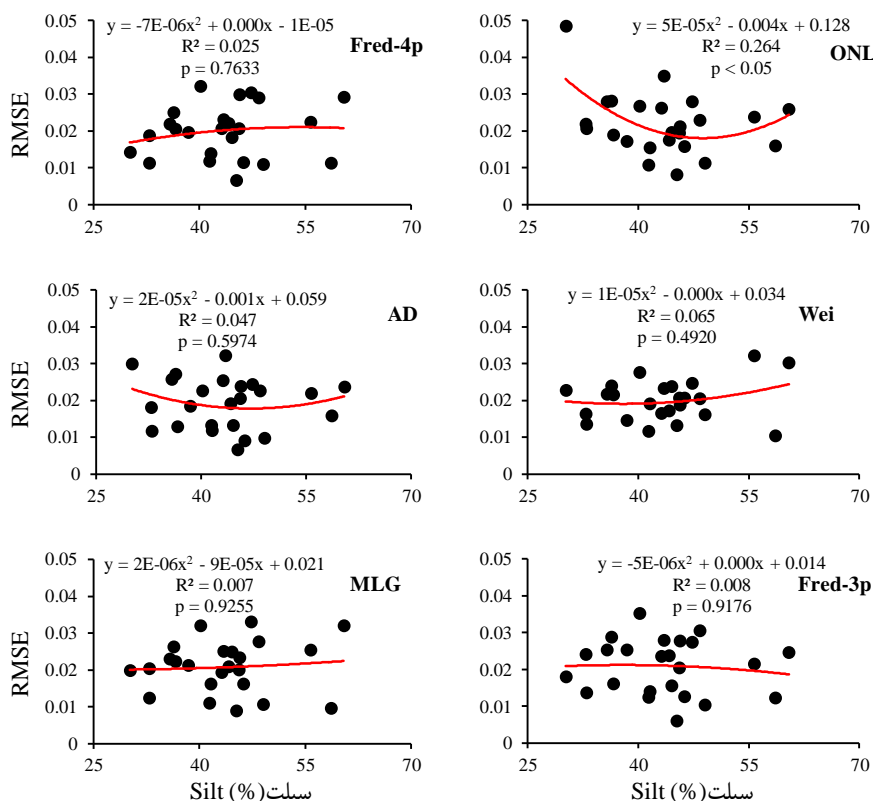
که این ذرات نقش بسیار مهمی در کنترل ویژگی‌های مربوط به تخلخل، ضریب آب‌گذری و فرسایش‌پذیری خاک‌ها دارند (۴ و ۸). برای نمونه در پژوهش‌های مربوط به ویژگی‌های نگهداشت آب توسط فضاهای درون خاک، Handreck (۱۲) مشاهده کرد که ذرات خاک ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرومتر (از شن خیلی ریز تا شن متوسط)، ویژگی‌های انتشار آب در محیط‌های رشد گیاه را کنترل می‌کنند. افزون بر این، در ایجاد توابع انتقالی برای برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی درصد شن خاک به عنوان ورودی موثر در شبیه‌سازی هدایت آب در خاک بکار برده شده است. به عنوان نمونه، Puckett و همکاران (۳۰) از درصد شن ریز خاک به عنوان ورودی جداگانه در ایجاد توابع انتقالی برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی استفاده کردند. همچنین در تابع ذکر شده توسط Rawls و Nemes (۲۸) برای برآورد ویژگی‌های رطوبتی خاک، شن کل بکار برده شده است. بنابراین با توجه به اینکه مقدار شن یک نمونه به عنوان یک ورودی بسیار مهم در بسیاری از توابع انتقالی<sup>۱</sup> مربوط به برآورد ویژگی‌های دیرپافت خاک‌ها محسوب می‌شود نتایج این بخش در رابطه با تخمین

در حالی که برای ذرات با قطر کوچکتر از ۵ میکرومتر، ابر نقاط بیشتر به سمت خطای نسبی مثبت متمایل می‌شود که این امر نشان دهنده‌ی بیش‌برآوردی سیستماتیک اغلب مدل‌ها در محدوده‌ی ذرات کوچکتر از ۵ میکرومتر است. این نکته از جنبه‌ی کاربردی و برای پیش‌بینی ذرات رس که در محدوده‌ی کوچکتر از ۲ میکرومتر قرار دارند می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. با توجه به اینکه تعیین فراوانی ذرات آهک با استفاده از تئوری هیدرومتر، حتی در صورتی که در اندازه‌های ریز کوچکتر از ۲ میکرون نیز باشند، امکان‌پذیر است، به نظر می‌رسد که افزایش خطای نسبی در محدوده‌ی ذرات ریز علاوه بر ماهیت مدل‌ها به مقادیر قطرها نیز بستگی داشته باشد. به طوری که در قطرهای ریز، اختلاف بسیار اندک بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی (که شاید به لحاظ کاربردی نیز چندان مهم نباشد) می‌تواند منجر به افزایش چشمگیر خطای نسبی گردد در حالی که این امر برای قطرهای بزرگتر رخ نمی‌دهد. برخی پژوهشگران نیز بر توانایی بیشتر مدلی مانند Wei در برآورد مقادیر شن متوسط (۲۵۰-۵۰۰ میکرومتر) و درشت (۱۰۰۰-۵۰۰ میکرومتر) تاکید نموده‌اند (۵). پیش‌بینی دقیق درصد ذرات شن و بویژه شن خیلی ریز (۰/۱-۰/۵ میلی‌متر) توسط مدل‌های یاد شده اهمیت کاربردی فراوانی دارد چرا

1- Pedotransfer function

نظر کاربردی سبب افزایش قابلیت توابع انتقالی شود.

دقیق بخش شن خاک با استفاده از مدل‌های معرفی شده می‌تواند از



شکل ۴- ارتباط بین درصد سیلت در نمونه‌های خاک و مقادیر ریشه میانگین مربعات خطای مدل‌ها.

RMSE: ریشه میانگین مربع خطا

Figure 4- The relationship between silt content of the soil samples and the values of root mean square error (RMSE) of models

وجود روابط ارائه شده در شکل ۶ بین پارامترهای مدل‌های PSD می‌تواند سبب کاهش تعداد پارامترهای آن‌ها گردد. چرا که این روابط بیانگر این واقعیت هستند که در هنگام فرآیند برازش می‌توان با استفاده از این روابط این پارامترها را با یکدیگر جایگزین نمود. نکته دیگر است که همبستگی بالای پارامترهای همبسته می‌تواند موید این باشد که پارامترهای مذکور دارای کارایی مشابهی در برآورد ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی و کیفی مورد نظر باشند. لذا می‌توان با بررسی ارتباط بین یکی از دو پارامتر دارای همبستگی بالا با شاخص مورد نظر، به نتایج مشابهی دست یافت.

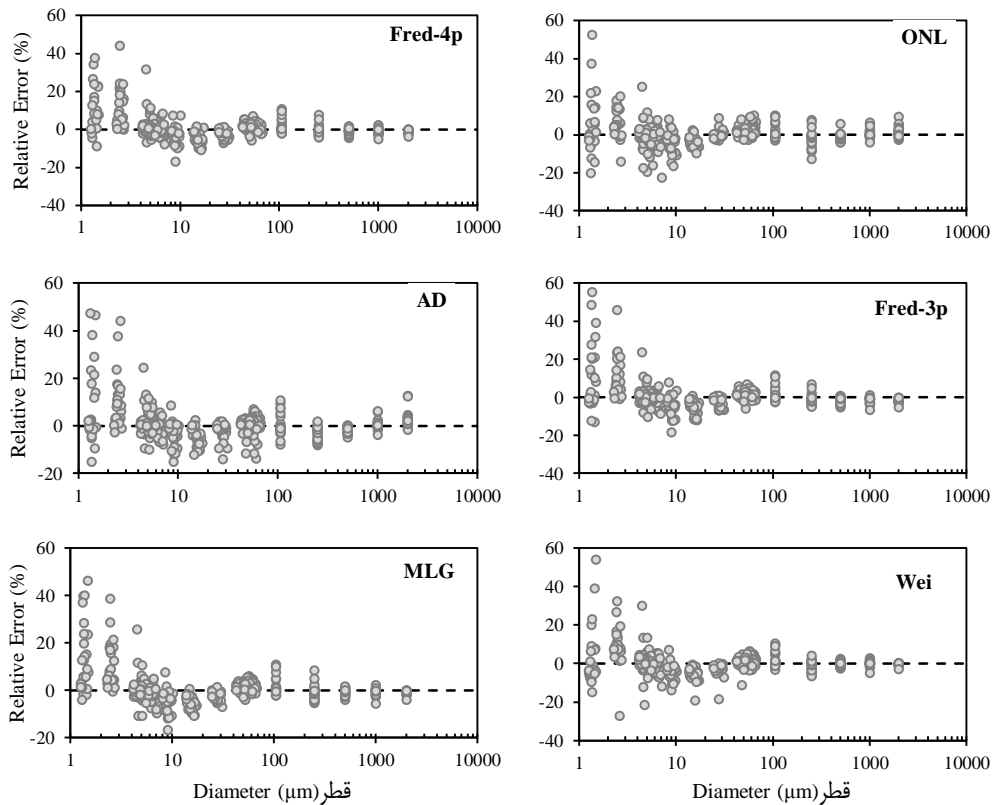
### نتیجه‌گیری کلی

بکارگیری مدل‌های ریاضی توزیع اندازه ذرات برای بیان پیوسته و صحیح PSD خاک، ضروری است.

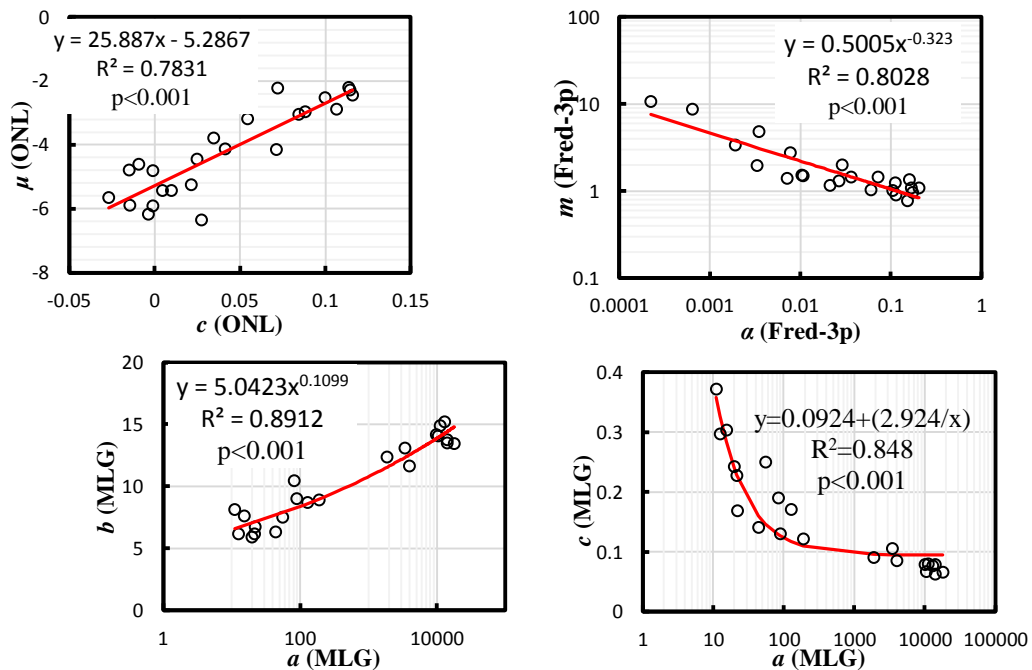
### بررسی ارتباط بین پارامترهای مدل‌های برتر

یکی از نکات مهم در رابطه با مدل‌های توزیع اندازه ذرات، تعداد پارامترهای این مدل‌ها است که از طریق برازش مدل بر داده‌های مشاهده‌ای به دست می‌آید. بدیهی است که کاهش تعداد پارامترهای مدل، یک برتری به شمار می‌آید که افزون بر آسان‌تر نمودن فرآیند برازش مدل، سبب افزایش کارآمدی آن شده و قابلیت استفاده آن به عنوان یک تابع ریاضی را افزایش می‌دهد. از این رو وجود رابطه‌ی احتمالی بین پارامترهای یک مدل، در نمونه‌های خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در برخی از موارد بین پارامترهای هر یک از مدل‌ها با یکدیگر ارتباط بسیار خوبی وجود دارد. برای نمونه این ارتباط برای برخی از پارامترهای مدل‌های ONL، Fred-3p و MLG در شکل ۶ نشان داده شده است. پارامترهای  $a$  و  $c$  همچنین  $a$  و  $b$  در مدل MLG، پارامترهای  $\mu$  و  $\alpha$  در مدل ONL و پارامترهای  $a$  و  $m$  در مدل Fred-3p دارای همبستگی آماری بسیار بالایی می‌باشند (شکل ۶).





شکل ۵- ارتباط بین اندازه ذرات با مقادیر خطای نسبی برآورد برای مدل‌های برگزیده. Relative Error: خطای نسبی.  
 Figure 5- The relationship between particle sizes with the relative error of predictions for selected models.



شکل ۶- ارتباط بین برخی پارامترهای مدل‌های برتر  
 Figure 6- The relationship between some parameters of the top models

ایجاد کند.

همچنین، همبستگی درونی نسبتاً بالایی بین پارامترهای مدل Fred-3p یا ONL یا MLG مشاهده شد که می‌تواند نویدی بر امکان کاهش تعداد پارامترهای این مدل‌ها باشد. با این حال، این ادعا می‌بایست با بانک داده‌ای بزرگتری آزموده شود.

### قدردانی

این پژوهش با حمایت مشترک صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (طرح شماره ۹۱۰۰۲۲۱۶) و دانشگاه ارومیه انجام شده است که بدینوسیله از حمایت آنها قدردانی می‌گردد.

در این پژوهش با توجه به بررسی منابع انجام شده، کارآیی شش مدل ریاضی کارآمد شامل Fred-3p، Fred-4p، AD، MLG، Wei و ONL در بیان توزیع اندازه ذرات برخی خاک‌های شور و سدیمی ارزیابی گردید. هرچند کارآیی عمومی این مدل‌ها در توصیف توزیع اندازه ذرات خاک‌های مورد مطالعه بالا بود، این کارآیی به اندازه ذرات بستگی داشت. بطوریکه این مدل‌ها فراوانی نسبی ذرات درشت خاک را به گونه‌ای مناسب برآورد کردند، در حالی که اغلب مدل‌ها بیش‌برآوردی چشمگیری در برآورد فراوانی ذرات ریز خاک داشتند. بنابراین، در ارزیابی کارآیی مدل‌های PSD افزون بر ارزیابی کارآیی کلی مدل، توجه به دقت مدل در برآورد گستره خاص مورد نظر از PSD خاک نیز ضروری است. استفاده از مدل‌هایی با کارآیی عمومی بالا ممکن است خطایی چشمگیر در برآورد گستره اندازه‌ای موردنظر

### منابع

- 1- Afrasiabi F. 2015. Relationship between quantitative parameters of particle size distribution of salt-affected soils around Lake Urmia with selected soil quality indices. MSc Thesis, Urmia University, Urmia, Iran. (in Persian with English abstract)
- 2- Andersson S. 1990. "Markfysikaliska undersökningar I odlad jord, XXVI. Om mineraljordens och mullens rumsutfyllande egenskaper," in En Teoretisk Studie, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, (Swedish).
- 3- Assouline S., Tessier D. and Bruand, A. 1998. A conceptual model of the soil water retention curve. Water Resources Research, 34: 223-231.
- 4- Boadu F. 2000. Hydraulic conductivity of soils from grain-size distribution: new models. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126:739-746
- 5- Botula Y.D., Cornelis W.M., Baert G., Mafuka, P. and Van Ranst E. 2013. Particle size distribution models for soils of the humid tropics. Journal of Soils and Sediments, 13: 686- 698.
- 6- Broersma K. and Lavkulich L. 1980. Organic matter distribution with particle- size in surface horizons of some sombric soils in Vancouver Island. Canadian Journal of Soil Science, 60: 583- 586.
- 7- Buchan G.D., Grewal K.S. and Robson A.B. 1993. Improved models of particle- size distribution: An illustration of model comparison techniques. Soil Science Society of America Journal, 57: 901- 908.
- 8- Flemming B.W. 2007. The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: implications for sediment trend analysis. Sediment Geology, 202:425-435
- 9- Fredlund M.D., Fredlund D.G. and Wilson G.W. 2000. An equation to represent grain-size distribution. Canadian Geotechnical Journal, 37: 817- 827
- 10- Gee G.W. and Or D. 2002. Particle-size analysis. p. 255-293. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 4. Soil Science Society of America Book Series No. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI.
- 11- Ghorbani Dashtaki S., Homaei M. and Khodaverdiloo H. 2010. Derivation and validation of pedotransfer functions for estimating soil water retention curve using a variety of soil data. Soil Use and Management, 26: 68-74.
- 12- Handreck KA. 1983. Particle-size and the physical-properties of growing media for containers. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 14:209-222.
- 13- Haverkamp R. and Parlange J.Y. 1986. Predicting the water retention curve from a particle size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. Soil Science, 142: 325- 339.
- 14- Hwang S.I., Lee K.P., Lee D.S. and Powers S.E. 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. Soil Science Society of America Journal, 66: 1143-1150.
- 15- Hwang S.I. 2004. Effect of texture on the performance of soil particle size distribution models. Geoderma, 123: 363- 371.
- 16- Khodaverdiloo H. and Samadi A. 2011. Batch equilibrium study on sorption, desorption, and immobilization of cadmium in some semiarid-zone soils as affected by soil properties. Soil Research, 49(5): 444-454.

- 17- Khodaverdiloo H., Homae M., van Genuchten M. Th. and Ghorbani Dashtaki Sh. 2011. Deriving and Validating Pedotransfer Functions for some Calcareous Soils. *Journal of Hydrology*, 399: 93-99.
- 18- Khodaverdiloo H. and Hosseini Arablu N. 2014. Derivation, Validation and Comparison of Class and Continuous Pedotransfer Functions for Predicting Soil Cation Exchange Capacity in Several Textural Classes. *Journal of Water and Soil Science*, 18: 311-320. (in Persian with English abstract).
- 19- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304: 1623-1626.
- 20- Lassabatère L., Angulo-Jaramillo R., SoriaUgalde J. M., Cuenca R., Braud I. and Haverkamp R. 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 521–532.
- 21- Lavkulich L.M. 1981. *Methods Manual, Pedology Laboratory*. Department of Soil Science, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada.
- 22- Liu J., Xu S. and Liu H. 2003. Investigation of different models to describe soil particle- size distribution data, *Advances in Water Science*, 14: 588– 592.
- 23- Liu J., Xu S., Liu H. and Guo F. 2004. Application of parametric models to description of particle-size distribution in loamy soils. *Acta Pedologica Sinica*, 41: 375–379.
- 24- McLean E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. P. 199- 224. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of Soil Analysis*. Part 2. 2<sup>nd</sup> ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- 25- Minasny B. and Hartemink A.E. 2011. Predicting soil properties in the tropics. *Earth Science Review*, 106:52–62.
- 26- Minasny B. and McBratney A.B. 2007. Estimating the water retention shape parameter from sand and clay content. *Soil Science Society of America Journal*, 71 (4): 1105– 1110.
- 27- Nabizadeh, E. and BeigiHarchegani H. 2011. Performance of Eight Mathematical Models in Describing Particle Size Distribution of Some Soils from Charmahal-va-Bakhtiari Province. *Water and Soil Science*, 15: 63-75. (in Persian with English abstract).
- 28- Nemes A. and Rawls W.J. 2004. Soil texture and particle-size distribution as input to estimate soil hydraulic properties. p. 36-50. In Y.A. Pachepsky and W. J. Rawls (eds.) *Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology*, *Developments in Soil Science*, 30. Elsevier, Amsterdam.
- 29- Nemes A., Schaap M.G. and Wösten J.H.M. 2003. Functional Evaluation of Pedotransfer Functions Derived from Different Scales of Data Collection. *Soil Science Society of America Journal*, 67: 1093-1102.
- 30- Puckett W.E., Dane J.H. and Hajek B.F. 1985. Physical and mineralogical data to determine soil hydraulic-properties. *Soil Science Society of America Journal*, 49:831–836.
- 31- Rastgo M., Bayat H., Rastgo A. and Ebrahimi E. 2014. The Effect of Textural Groups on the Fitting Capability of Soil Particle Size Distribution Curve Models. *Water and Soil*, 28: 111-126. (in Persian with English abstract).
- 32- Shangguan W., Yongjiu D., Gutierrez C.G. and Yuan H. 2014. Particle- Size Distribution Models for the conversion of Chinese data to FAO/ USDA system. *The Scientific World Journal*, 1- 11.
- 33- Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Leoppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston G.T. and Sumner M.E. 1986. *Methods of soil Analysis*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA.
- 34- Su Y.Z., Zhao H.L., Zhao W.Z. and Zhang T.H. 2004. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification. *Geoderma*, 122: 43– 49.
- 35- Wang D., Fu B.J., Zhao W.W., Hu H.F. and Wang Y.F. 2008. Multifractal characteristics of soil particle size distribution under different land- use types on the Loess Plateau, China. *Catena*, 72: 29– 36.
- 36- Xu G., Li Z. and Li P. 2013. Fractal features of soil particle-size distribution and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China. *Catena*, 101: 17–23.
- 37- Zhang Z., Yang X., Drury C., Reynolds W. and Zhao L. 2010. Mineralization of active soil organic carbon in particle size fractions of a Brookstonclay soil under no- tillage and mouldboard plough tillage. *Canadian Journal of Soil Science*, 90: 551-557.
- 38- Zhao P., Shao M. and Horton R. 2011. Performance of soil particle-size distribution models for describing deposited soils adjacent to constructed dams in the China loess plateau. *Acta Geophysica*, 59: 124-138.

## Characterizing the Error Structure of Selected Soil Particle Size Distribution Models

F. Afrasiabi<sup>1</sup> – H. Khodaverdiloo<sup>2\*</sup> - F. Asadzadeh<sup>3</sup>

Received: 03-09-2016

Accepted: 25-12-2016

**Introduction:** Particle size distribution (PSD) is one of the most fundamental features of soil physics that is widely used as the most common input to predict several key soil attributes. The mathematically representing the PSD provides several benefits to soil mechanics, physics, and hydrodynamics as well as helps to convert PSD data of various particle size classification systems to the desired one. Consequently, the correct and consistent descriptions of soil PSD using mathematical functions is necessary.

The PSD models have often been evaluated in terms of their general performances to predict the entire PSD curve. Although given model may be feasible and globally perform well to generate the whole PSD curve, locally may fail to predict some specific points on the curve. To our knowledge, as well as, PSD models have not been widely tested for salt-affected soils with different levels of salinity and sodicity.

The aim of this study was to determine the error structure of several more accurate PSD models in selected soil samples with different levels of salinity and sodicity.

**Materials and Methods:** 24 locations neighboring the western edge of threatened hypersaline Lake Urmia were sampled in this study. The locations were selected based on the available soil maps and soils with wide range of salinity/sodicity were sampled. Selected physical and chemical properties of the soil samples were determined by standard methods. The performance of six PSD models including Modified Logistic Growth (MLG), Fredlund type models with three (Fred-4p) and four (Fred-3p) parameters, Anderson (AD), ONL, and Weibull (Wei), which have been reported as the most accurate PSD models by previous studies, was evaluated using different efficiency criteria that offer various performances depending on the range of particle sizes.

An iterative nonlinear optimization procedure was used to fit the observed cumulative PSD data of the soils to the PSD models. Since every statistical criterion evaluates a part and some (and not all) aspects of the correspondence between measured and predicted values, we suggest that an effective assessment of model performance should include a suitable combination of criteria. Furthermore, dependency of the models performance was examined to the range of soil particle sizes.

**Results and Discussion:** The soils differed widely in their EC (range = 85dS/m and CV = 159%), ESP (range = 67 % and CV = 71 %), and PSD (CV of clay and silt particles, 48 and 55 %, respectively). Soil textural class of the soils was differed widely from sandy loam to clay. All the soils were calcareous and alkaline.

The results showed that according to the efficiency criteria, including  $R^2$  (coefficient of determination), RMSE (Root Mean Square Error) and Er (Relative Error), all of the models have high efficiency, so that, the lowest average value of  $R^2$  in models was 0.992 and the maximum value of RMSE and Er was 0.028 and 0.045, respectively.

Prediction error of the models was dependent on the diameter for which we predict the cumulative fraction and decreases with increasing of the soil particles diameter. The performance of the models showed a significant quadratic polynomial relationship with sand content of the samples, so that, the studied models had the lowest performance in soils containing 30 to 45 percent sand.

The point-to-point error structure of the model represents a decrease in systematic error in estimating coarse soil particles, while the models over-estimated the relative frequency of the fine soil particles. In addition, the values of relative error were also lower for coarse particles of the soil, so that, the Wei model (for example) had the lowest Er value for 100 to 500  $\mu\text{m}$  diameter soil particles. The relatively high correlations between parameters of Fred-3p, MLG and ONL models show insights to reduce the number of their parameters.

Furthermore, parameters  $a$  and  $c$  of MLG model, parameters  $\mu$  and  $\alpha$  of ONL model and parameter  $a$  and  $m$  of Fred-3p model had a statistically significant correlations. The relatively high correlations between parameters

1, 2, and 3 – Graduated MSc Student, Assistant Professor, and Associate Professor, Department of Soil Science, Urmia University, Urmia, Iran.

(\* - Corresponding Author Email: h.khodaverdiloo@urmia.ac.ir)

of the PSD models show insights to reduce the number of their parameters which increases their applicability.

**Conclusion:** The studied models generally performed well to predict the whole PSD curve, but their performances were particle size dependent. This implies that, one should consider the range of sizes of soil particles for different models. A model might be accurate enough to predict some ranges of particle diameter or the whole PSD, but not for particular range of particle sizes. Using such models might lead to large errors in predicting the specific PSD range of interest.

**Keywords:** Lake Urmia, Prediction error, Saline-sodic soil, Soil texture