نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۳، ص. ۱۲۶-۱۱۱

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 1, Mar.-Apr. 2014, p. 111-126

تأثیر گروه‌های بافتی مختلف بر قابلیت برازش مدل‌های متفاوت منحنی توزیع اندازه ذرات خاک

مصطفی راستگو[۱]- حسین بیات[۲*]- عبداله راستگو[۳]- عیسی ابراهیمی[۴]

تاریخ دریافت:۱۳۹۲/۲/۸
تاریخ پذیرش:۱۳۹۲/۱۰/۱۶

چکیده

گام مهم در استفاده از توزیع اندازه ذرات (PSD)[۶] خاک برای پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک تعیین یک منحنی پیوسته صحیح برای آن است. مدل‌های بسیاری برای توصیف منحنی PSD و برازش بر داده‌های تجربی آن ارائه شده است، اما به ندرت توانایی برازش تعداد زیادی از آن‌ها در خاک‌های مختلف و گروه‌های بافتی متفاوت مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش، بررسی قابلیت برازش ۱۵ مدل PSD بر داده‌های تجربی و انتخاب بهترین مدل از بین آن‌ها برای کل نمونه‌های خاک و برای هر کدام از گروه‌های بافتی می‌باشد. در این پژوهش ۱۶۰ نمونه خاک رویین و زیرین از استان‌های گیلان، همدان و کرمانشاه برداشت و بعد از تعیین PSD و بافت خاک، به گروه‌های بافتی خاک‌های شنی، لومی و رسی تفکیک شدند. پانزده مدل PSD بر داده‌های تجربی همه نمونه‌ها برازش شد. دقیق‌ترین مدل یک بار برای کل داده‌ها و یک بار برای هر گروه به تفکیک بر اساس معیارهای ارزیابی خطا انتخاب شدند. نتایج نشان داد که مدل ویبول در کل نمونه خاک‌های بررسی شده و همچنین در گروه‌های بافتی لومی و رسی، بالاترین دقت برازش را داشت. بعد از مدل ویبول، مدل‌های روسین راملر، ون گنوختن و فردلاند قرار گرفتند، اما تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد با هم نداشتند. در گروه درشت بافت مدل S شکل[۷]، برازش بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشت. با توجه به نتایج به‌دست آمده، مشخص می‌گردد که در گروه‌های بافتی مختلف، دقت برازش مدل‌های متفاوت با هم فرق داشتند.

واژه‌های کلیدی: قابلیت برازش، گروه‌های بافتی خاک، مدل‌های توزیع اندازه ذرات خاک، مدل ویبول

مقدمه

توزیع اندازه ذرات (PSD) خاک یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های فیزیکی خاک‌های معدنی است (۵ و ۳۲). توزیع اندازه ذرات خاک حاصل چندین فرایند پیچیده از جمله فرایندهای زمین شناسی، فیزیکی، شیمیایی و زیستی می‌باشد (۱۱ و ۲۰). از این ویژگی می‌توان برای پیش بینی و تخمین خواص هیدرولیکی خاک‌ها مانند منحنی مشخصه رطوبتی خاک و توابع هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع استفاده نمود (۴، ۱۲، ۱۳، ۱۷ و ۱۹). گام اساسی در استفاده از PSD برای پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک تعیین یک منحنی پیوسته صحیح برای آن است. با وجود اهمیت زیاد PSD در خاک‌ها، به مدل‌سازی آن برای پیش‌بینی کل منحنی PSD در خاک توجه کمتری شده است.

مدل‌سازی و بیان ریاضی توزیع اندازه ذرات علاوه بر استفاده برای پیش‌بینی منحنی مشخصه رطوبتی خاک، دارای چندین مزیت دیگر نیز می‌باشد، از جمله: (الف) امکان طبقه بندی خاک‌ها با استفاده از بهترین پارامترهای برازشی، (ب) تسهیل در جستجوی خاک‌هایی با ویژگی مشابه در بانک‌های اطلاعاتی (۱۲)، (ج) استفاده برای طراحی فیلترهای زهکشی و (د) به‌دست آوردن پارامترهای مفید خاک از جمله اندازه‌ی مؤثر (d_{10}) و ضریب یکنواختی (۳۷). همچنین PSD دارای همبستگی با بعضی از ویژگی‌های خاک مانند مقاومت و نفوذپذیری می‌باشد (۳۷).

معمولاً، تجزیه‌ی مکانیکی اندازه ذرات خاک شامل اندازه‌گیری جرم سه بخش رس، سیلت و شن و تعیین کلاس بافت با استفاده از مثلث بافت خاک است (۲۲، ۲۵ و ۲۹). ولی نمونه‌هایی که در یک کلاس معین بافت قرار می‌گیرند، ممکن است توزیع اندازه ذرات متفاوتی داشته باشند. برای مثال، کلاس بافتی رس در سیستم طبقه-بندی USDA در برگیرنده‌ی همه‌ی نمونه‌های خاک با میزان رس

۱، ۲ و۴- به ترتیب دانشجوی کارشناسی‌ارشد، استادیار و دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه خاکشناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
(*- نویسنده مسئول: (Email: h.bayat@basu.ac.ir
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه برق، دانشگاه کردستان

5- Particle size distribution
6- S-Curve

Archive of SID
www.SID.ir

بین ۴۰ تا ۱۰۰ درصد خواهد بود. حال آن‌که حتی تعیین درصد یا نسبت سه جزء اصلی خاک (شن، سیلت و رس) اطلاعات کاملی در مورد توزیع اندازه ذرات خاک در اختیار قرار نمی‌دهد. به همین دلیل از مدل‌های ریاضی PSD استفاده می‌شود (۵، ۱۴ و ۲۹).

یک مدل ریاضی مناسب باید PSD را آن قدر دقیق توصیف کند که تفاوت بین داده‌های مشاهده‌ای و تخمینی را به حداقل برساند (۳۷). لازم به ذکر است که در حالت کلی هر چه تعداد پارامترهای مدل بیشتر باشد، مدل دقت بالاتری خواهد داشت. با وجود این که مدل‌های زیادی برای توزیع اندازه ذرات به کار رفته است، اما کاربرد عملی بسیاری از این معادلات به دلیل پیچیدگی آن‌ها، محدود شده‌اند (۳۷).

توزیع اندازه ذرات خاک، اغلب لوگ نرمال فرض می‌شود (۹ و ۳۴)، اما بوچان (۷) نشان داد که در نیمی از مثلث بافت خاک فرضیه‌ی لوگ نرمال بودن توزیع اندازه ذرات خاک معتبر نیست. زیرا کلاس‌های بافتی دامنه اندازه ذرات وسیعی، از کمتر از ۰/۰۲ میکرومتر تا نزدیک به ۲ میلی‌متر را شامل می‌شوند. صادقی و همکاران (۲) نیز در تحقیقات خود نشان دادند که مدل توزیع لوگ نرمال نمی‌تواند نمایش دقیقی برای PSD همه کلاس‌های بافتی خاک داشته باشد. فردلاند و همکاران (۱۲) گزارش کردند که محدودیت عمده مدل توزیع لوگ نرمال در استفاده برای نمایش PSD، تقارن آن (در مقیاس لگاریتمی) می‌باشد، در حالی که PSD بسیاری از خاک‌ها این تقارن را نشان نمی‌دهند. بوچان و همکاران (۶) با مقایسه برازش پنج مدل بر ۷۱ نمونه خاک نشان دادند که مدل‌های شیوزوا و کمپل (۳۳) و لوگ نرمال ORL[1] در تعداد عمده‌ای از خاک‌های مورد بررسی بهترین کارایی را داشتند. همچنین مدل تک پارامتری جکی در اکثر خاک‌ها، برازش بهتری نسبت به مدل لوگ‌نرمال ساده (SLM)[2] داشت. فردلاند و همکاران (۱۲) دو مدل پارامتریک برای خاک‌های با توزیع اندازه ذرات یک نمایی[3] و دو نمایی[4] معرفی و نشان دادند که مدل پیشنهادی آن‌ها برای خاک‌های با دانه‌بندی خوب (خاکی با دانه‌بندی غیر یکنواخت) و خاک‌های با دانه‌بندی ضعیف (خاکی با دانه‌بندی یکنواخت)، اما با مقدار رس بیشتر، مناسب است. هوانگ و همکاران (۲۱) توانایی برازش هفت مدل را در ۱۳۸۷ نمونه خاک برگرفته از بانک اطلاعاتی کشور کره ارزیابی نمودند و گزارش کردند که مدل فردلاند و همکاران (۱۲) با چهار پارامتر از بیشترین کارایی در بخش عمده‌ای از خاک‌های مورد بررسی برخوردار بود و مدل جکی بدترین برازش را داشت. همچنین آن‌ها گزارش کردند که مدل ONL[5] در بین مدل‌های لوگ نرمال (ORL, ONL و SLM)، برازش بهتری در بیشتر کلاس‌های بافتی به جز کلاس شنی داشت. در بررسی هوانگ و همکاران (۲۱)، مدل چهار پارامتری گمپرتز در مقایسه با مدل تک پارامتری جکی در کلاس‌های بافت لوم، لومی رسی و رسی برازش ضعیف‌تری را داشت. این یافته، نشان داد که همیشه افزایش تعداد پارامتر یک مدل نمی‌تواند باعث برازش بهتر آن شود. همچنین آن‌ها گزارش کردند که در بین همه‌ی کلاس‌ها، مدل‌های لوگ نرمال (ORL, ONL و SLM) برای کلاس‌های بافتی رس سیلتی، لوم رسی سیلتی و لوم سیلتی بهترین برازش و برای لوم رسی شنی بدترین برازش را داشتند. نتایج آن‌ها مشابه نتایج بوچان (۷) بود.

هوانگ (۲۲) برازش نه مدل توزیع اندازه ذرات را روی خاک‌های کشور کره مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان داد که مدل چهار پارامتری فردلاند و همکاران (۱۲) بهترین برازش را بر داده‌های تجربی PSD داشت. مدل‌های لگاریتمی، نمایی و لگاریتمی- نمایی برازش‌های مشابه ولی ضعیفی داشتند. مدل ون‌گنوختن (۱۹) نیز در خاک‌های دارای رس زیاد برازش ضعیفی داشت. بنابراین نباید از آن برای توصیف PSD خاک‌های دارای رس بیشتر از ۵۰ درصد استفاده کرد.

ویپولانان‌دن و همکاران (۳۷) با بررسی دو مدل تانژانت هایپربولیک و S شکل و مقایسه ضریب تعیین (R^2) این دو مدل با مدل چهار پارامتری فردلاند و همکاران (۱۲) مشاهده کردند که متوسط ضریب تعیین برای مدل تانژانت هایپربولیک و S شکل، ۰/۹۹۶ بود، در حالی که برای مدل فردلاند ۰/۹۹۸ به‌دست آمد.

تا به حال پژوهش‌های محدودی از مقایسه قابلیت برازش مدل‌های PSD به‌ویژه در گروه‌های بافتی صورت گرفته است. به طوری که قابلیت برازش و مقایسه پانزده مدل به صورت همزمان و منسجم برای گروه‌های بافتی گزارش نشده است. بنابراین هدف این پژوهش بررسی قابلیت برازش ۱۵ مدل PSD بر داده‌های تجربی توزیع اندازه ذرات و انتخاب بهترین مدل برای کل نمونه‌های خاک و برای هر کدام از گروه‌های بافتی خاک‌های شنی، لومی و رسی بود.

مواد و روش‌ها

نمونه‌برداری و تجزیه خاک‌ها

برای انجام این پژوهش تعداد ۱۶۰ نمونه که شامل ۲۹ نمونه از استان کرمانشاه (E ۳۵°۱۷′-۴۵°۲۴-۴۸°۰۶″N, ۳۳°۴۱′)، ۶۹ نمونه از استان همدان (E ۴۹° ۳۶′ - ۴۷° ۳۴′ N, ۳۵° ۴۸′ - ۵۹′ ۳۳°) و ۶۲ نمونه از استان گیلان (E ۵۰° ۳۴′ - ۴۸° ۵۳′ N, ۳۷′

1- Offset-Renormalized Lognormal
2- Simple lognormal
3- Unimodal
4- Bimodal
5- Offset-Nonrenormalized Lognormal

Archive of SID

www.SID.ir

°۳۸ – °۳۴ °۳۶) جمع‌آوری گردید. نمونه‌برداری در لایه سطحی از عمق ۳۵–۱۰ سانتی‌متری و در لایه زیر سطحی از عمق ۴۵–۲۰ سانتی‌متری از سری‌های مشخص خاک‌ها انجام گرفت. چون عمق لایه سطحی و زیر سطحی در نقاط مختلف متفاوت بود و با توجه به این که نمونه‌برداری در هر محل از مرکز هر لایه انجام شد، بنابراین عمق نمونه‌برداری نیز در نقاط مختلف متفاوت بود. سپس نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شدند. برای به‌دست آوردن منحنی توزیع اندازه ذرات (PSD)، خاک را هوا خشک کرده و پس از کوبیدن، از الک ۲ mm گذرانده شد. برای به‌دست آوردن اجزای ذرات شن از الک خشک و برای به‌دست آوردن اجزای دانه‌های سیلت و رس از روش هیدرومتری بهره‌گیری شد (۱۴). برای به‌دست آوردن ۱۲ نقطه از منحنی PSD در دامنه قطری کوچک‌تر از ۰/۰۵ mm قرائت هیدرومتر در زمان‌های ۳۰ ثانیه، ۱، ۳، ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۳۰۰، ۶۰۰، ۱۴۴۰ و ۲۸۸۰ دقیقه انجام گرفت. پس از انجام قرائت‌های هیدرومتر برای جداسازی دانه‌های شن از رس و سیلت آنچه درون سیلندر بود روی الک ۵۳ µm ریخته شد. سپس دانه‌های شن باقی مانده در دامنه‌های قطری شن خیلی ریز (۰/۰۵ تا ۰/۱mm)، شن ریز (۰/۱ تا ۰/۲۵mm)، شن میانه (۰/۲۵ تا ۰/۵ mm)، شن درشت (۰/۵ تا ۱mm) و شن خیلی درشت (۱ تا ۲mm) از طریق الک خشک به مدت ۳ دقیقه جداسازی شدند (۱۴).

پانزده مدل PSD بر داده‌های تجربی توزیع اندازه ذرات برازش داده شدند. کل نمونه‌ها به سه گروه بافتی خاک‌های رسی (رسی و رس سیلتی)، خاک‌های لومی (لوم سیلتی، لوم رسی، لوم شنی، لوم رسی سیلتی و لوم) و خاک‌های شنی (شن لومی) بر اساس سیستم طبقه‌بندی وزارت کشاورزی آمریکا (USDA) تقسیم شدند. ارزیابی دقت مدل‌ها یک بار برای کل نمونه‌ها و یک بار هم برای هر کدام از گروه‌های بافتی انجام شد.

مدل‌های توزیع اندازه ذرات

۱- مدل روسین و رامل[1]

این مدل توسط روسین و رامل (۳۰) به صورت زیر بیان شد:

$$F(d) = 1 - \exp(-k_1 \times d_p^{\,k_2}) \qquad (۱)$$

در این معادله F(d)، جرم تجمعی ذرات با قطر کوچکتر از d_p و k_1 و k_2 پارامترهای معادله می‌باشند. همچنین d_p قطر ذرات بر حسب میلی‌متر است.

۲- مدل جکی[2]

جکی (۲۳) یک مدل ساده لگاریتمی برای توزیع اندازه ذرات رسوبات ارائه نمود:

$$S = \exp\left\{-\frac{1}{p^2}\left[\ln\left(\frac{D}{d_0}\right)\right]^2\right\} \qquad (۲)$$

در این معادله S جرم تجمعی ذرات با قطر کوچکتر از D و P شاخص توزیع اندازه ذرات که مشخصه آن کشیده نمودن منحنی است. همچنین d_0، بزرگ‌ترین قطر ذرات که برابر ۲۰۰۰ میکرومتر می‌باشد.

۳- مدل ون گنوختن[3]

هاورکمپ و پارلانگ (۱۹) مدل ون گنوختن را برای پیش‌بینی PSD استفاده نمودند.

$$F(d_p) = [1 + (\frac{k_1}{d_p})^{k_2}]^{-k_3} \qquad k_3 = 1 - \frac{1}{k_2} \qquad (۳)$$

در این معادله $F(d_p)$ جرم تجمعی ذرات با قطر کوچکتر از d_p (mm) و k_1, k_2 و k_3 پارامترهای معادله می‌باشند.

۴- مدل لوگ نرمال ساده (SLM)

بوچان و همکاران (۶) از شکل تجمعی تابع گوسی برای پیش‌بینی PSD بر پایه روابط زیر استفاده نمودند:

$$F(x) = \frac{1}{2}\{1 + \mathrm{erf}(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}})\} \qquad x > \mu$$

$$F(x) = \frac{1}{2}\{1 - \mathrm{erf}(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}})\} \qquad x \le \mu \qquad (۴)$$

$$x = \ln(d)$$

F(x) جرم تجمعی، µ میانگین x ، σ انحراف استاندارد x، x برابر با lnd است که d قطر ذرات و [ ] erf تابع خطا می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2} dt \qquad (۵)$$

۵- مدل لوگ نرمال ORL

شیوزاوا و کمپل (۳۳) شکل تغییر یافته‌ای از مدل لوگ نرمال را با معرفی یک اریب یا پارامتر جابجایی پیشنهاد نمودند:

$$G(x) = (1-\varepsilon) \times F(x) + \varepsilon \qquad (۶)$$

G (x) جرم تجمعی اصلاح شده و F(x) جرم تجمعی معادله SLM است. همچنین ε پارامتر معادله می‌باشد.

۶- مدل لوگ نرمال ONL

بوچان و همکاران (۶) شکل تغییریافته‌ای از مدل لوگ نرمال را با معرفی یک پارامتر تنظیم شده پیشنهاد نمودند:

$$G(x) = F(x) + c \qquad (۷)$$

G (x) جرم تجمعی اصلاح شده و F(x) جرم تجمعی در مدل SLM و c پارامتر این معادله می‌باشد که هدف از اضافه شدن این پارامتر،

1- Rosin and Rammler
2- Jaky
3- Van Genuchten

Archive of SID

www.SID.ir

برازش بهتر بر روی داده‌ها است.

بوچان و همکاران (۶) دلایل زیر را برای معرفی این مدل ارائه کردند: الف) این مدل توانایی برازش در کل اندازه ذرات را دارد، و ب) با تنظیم پارامتر c در حد بالایی ذرات رس (۲ میکرومتر) توزیع اندازه ذرات رس که ممکن است در خاک‌های با مقدار زیاد رس مهم باشند؛ در شبیه‌سازی درنظر گرفته می‌شوند.

۷- مدل گمپرتز[1]

نمس و همکاران (۲۷) از این مدل برای پیش‌بینی PSD در مطالعه خود استفاده نمودند:

$$p = a + b \times \exp\{-\exp[-c(D-d)]\} \qquad (۸)$$

در این معادله P جرم تجمعی اندازه ذرات با قطر کوچکتر از D (mm) و a, b, c و d پارامترهای معادله می‌باشند.

۸- مدل توانی- نمایی[2]

پاسیکاتان و همکاران (۲۸) در پژوهش خود از این مدل برای پیش‌بینی PSD استفاده نمودند:

$$F(d_p) = \exp(-\beta_1 \times d_p^{\beta_2}) \qquad (۹)$$

در این معادله $F(d_p)$ جرم تجمعی ذرات با قطر کوچکتر از d_p (mm) و β_1 , β_2 پارامترهای معادله هستند.

۹- مدل شامن[3]

پاسیکاتان و همکاران (۲۸) از مدل دیگری نیز برای پیش‌بینی PSD در مطالعات خود استفاده نمودند:

$$F(d) = \left(\frac{d_p}{d_{pMax}}\right)^{\beta} \qquad (۱۰)$$

که در این معادله F(d) جرم تجمعی ذرات با قطر کوچکتر از (mm) d_p و β پارامتر معادله می‌باشد.

۱۰- مدل چهار پارامتری فردلاند[4]

فردلاند و همکاران (۱۲) از یک تابع ریاضی چهار پارامتری تک نمایی[5] برای پیش‌بینی PSD خاک‌هایی با دانه بندی خوب (خاک‌هایی با دانه‌بندی غیر یکنواخت که دامنه وسیعی از اندازه ذرات در آن وجود دارد) استفاده کردند:

$$P = \left\{\frac{1}{\left[\ln\left[\exp(1)+\left(\frac{a_{gr}}{d}\right)^{n_{gr}}\right]\right]^{m_{gr}}}\right\} \times \left\{1-\left(\frac{\ln\left(1+\frac{d}{d_{rgr}}\right)}{\ln\left(1+\frac{d_m}{d_{rgr}}\right)}\right)^7\right\} \qquad (۱۱)$$

در معادله فوق P جرم تجمعی ذرات خاک با قطر کوچکتر از d، a_{gr}، پارامتر مشخص‌کننده نقطه عطف منحنی و مرتبط با اولین نقطه شکست منحنی است، n_{gr}، پارامتر مرتبط با تندترین شیب منحنی است (به عبارت دیگر نشان‌دهنده یکنواختی توزیع اندازه ذرات است)، m_{gr}، مرتبط با شکل منحنی در دامنه ذرات ریز منحنی، d_{rgr}، پارامتر مرتبط با مقدار ذرات ریز خاک، d، قطر ذرات خاک و d_m قطر حداقل اندازه مجاز ذره در مدل است.

۱۱- مدل نمایی[6]

گیمنز و همکاران (۱۵) در پژوهش خود از این مدل برای پیش‌بینی PSD استفاده نمودند.

$$F(d) = c \times d^{-\beta} \qquad (۱۲)$$

در این معادله نیز F(d) جرم تجمعی ذرات با قطر کوچکتر از (mm) d، و c و β پارامترهای معادله می‌باشند.

۱۲- مدل لگاریتمی[7]

ژانگ و همکاران (۳۹) در پژوهش خود از این مدل برای پیش‌بینی PSD استفاده نمودند:

$$F(d) = a \times (\ln d) + b \qquad (۱۳)$$

در این معادله F(d)، جرم تجمعی ذرات با قطر کوچکتر از d (mm) و a, b پارامترهای معادله می‌باشند.

۱۳- مدل سه پارامتری ویبول[8]

بر پایه تابع توزیع احتمالات ویبول، احتمال وجود ذره‌ای با اندازه d_i در جامعه ذرات خاک با رابطه زیر مشخص می‌شود (۲۴ و ۲۶):

$$M(d \le d_i) = A - \exp\left[-\left(\frac{d_i}{\beta}\right)^{\alpha}\right] \qquad (۱۴)$$

که در آن $M(d \le d_i)$ جرم تجمعی ذرات خاک با قطر کوچک‌تر یا مساوی d_i؛ A پارامتر برازش، α و β به ترتیب پارامترهای شکل و مقیاس بوده و منطبق با گشتاورهای توزیع ویبول هستند.

۱۴- مدل تانژانت هایپربولیک[9]

ویپولاناندن و همکاران (۳۷) مدل زیر را برای پیش‌بینی PSD معرفی نمودند:

$$\frac{P}{100} = (0.5) \times \left[1 + \tan h\left(\frac{d-A}{C}\right)\right] \qquad (۱۵)$$

در این معادله P درصد وزنی ذرات، d (mm) اندازه ذرات و A و C پارامترهای معادله هستند. tan h (x) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tan h(x) = \frac{\sin h(x)}{\cos h(x)} = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \qquad (۱۶)$$

1- Gompertz
2- Exponential power
3- Schumann
4- Fredlund
5- Unimodal

6- Exponential
7- Logarithm
8- Weibull
9- Hyperbolic

Archive of SID

www.SID.ir

۱۵- مدل S شکل

ویپولانادن و همکاران، (۳۷) مدل دیگری نیز معرفی نمودند:

$$\frac{p}{100} = e^{-nx}$$

$$x = \left[k \times \ln(\frac{d}{d_{min}}) \right]^{\frac{d}{d_\alpha}} \quad (۱۷)$$

در این معادله P درصد وزنی ذرات و d (mm) اندازه ذرات و n، k و d_α پارامترهای معادله هستند و d_{min}=0.001mm می‌باشد.

چگونگی بهینه‌سازی پارامترها برای برازش مدل‌ها

از روش رگرسیون غیر خطی تکرارپذیر[1] برای یافتن مقدار پارامترها به گونه‌ای که بهترین برازش بین مدل‌های PSD و داده‌های تجربی به‌دست آید، استفاده شد (۲۱). برای این روش از عملگر SOLVER در نرم‌افزار اکسل که چگونگی استفاده از آن در مدل‌سازی توسط رایت و اُر (۳۸) شرح داده شده است، استفاده گردید. بر اساس روش میلان و همکاران (۲۴) مقایسه مدل‌ها از طریق مقایسه میانگین بین آماره‌های ارزیابی دقت مدل‌ها انجام شد که بدین منظور از نرم افزار SAS 9.1 با آزمون دانکن استفاده شد. در واقع برای این مقایسه میانگین هر کدام از آماره‌ها به‌عنوان یک متغیر در نظر گرفته شد که برای هر خاک و هر مدل مقدار مشخصی به‌دست آمده بود. به عنوان مثال آماره ضریب تعیین نمونه‌های مختلف به عنوان یک متغیر برای مدل‌های متفاوت مقایسه شد.

مقایسه دقت مدل‌ها

پانزده مدل مختلف PSD، بر داده‌های توزیع اندازه ذرات خاک برازش داده شدند. در این پژوهش دقت برازش مدل‌ها به داده‌ها، با سه معیار ضریب تعیین تصحیح شده[2] (Ra^2) (۳۱)، ریشه میانگین مربعات خطا[3] (RMSE) (۳۱) و معیار اطلاعات آکایک اصلاح شده[4] (AIC_c) (۸) مورد ارزیابی قرار گرفت.

معیار آکایک از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$AIC_c = N \times Ln(MSE) + 2 \times K + \frac{2K(K+1)}{N-K-1} \quad (۱۸)$$

که در آن AIC_c معیار اطلاعات آکایک اصلاح شده، MSE میانگین مربعات خطا، N، تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده برای هر خاک و K، تعداد ضرایب مدل PSD است، که به دلیل برآورد کردن واریانس، به‌جای آن K+1 مورد استفاده قرار گرفت. میانگین مربعات خطا به صورت زیر تعیین شد:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{N} (Y_i - Y_p)^2}{N} \quad (۱۹)$$

که در آن Y_i و Y_p به ترتیب جرم تجمعی ذرات اندازه‌گیری شده و برآورد شده می‌باشند.

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (Y_i - Y_p)^2}{N}} \quad (۲۰)$$

ضریب تعیین تصحیح شده (Ra^2):

ارزش ضریب تعیین (R^2) معمولاً (اما نه همیشه) با افزایش تعداد پارامترها (K) زیاد می‌گردد. بنابراین لازم است مشخص گردد که آیا توانایی یک مدل در برازش بهتر بر داده‌های اندازه‌گیری شده به ذات مدل بستگی دارد و یا آن که فقط ناشی از افزایش تعداد پارامترها است. به این علت از ضریب تعیین تصحیح شده، Ra^2، برای حذف اثر تعداد پارامترها استفاده شد و برای مقایسه مدل‌های دارای تعداد متفاوت پارامترها یا مشاهده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (۳۰).

$$Ra^2 = 1 - \left(\frac{N-1}{N-K} \right) \frac{SSE}{SST} \quad (۲۱)$$

SSE مجموع مربعات خطا و SST مجموع مربعات کل مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. آماره RMSE، ترکیبی از هر دو اثر اُریب و صحت است. هر مدلی که دارای کمترین RMSE باشد در مقایسه با دیگر مدل‌ها از دقت بیشتری برخوردار است. در معیار اطلاعات آکایک، مدلی که دارای کوچک‌ترین ارزش AIC_c باشد به عنوان بهترین مدل انتخاب خواهد شد.

تجزیه کلاستر

کلارک و همکاران (۱۰) بیان کردند که هیچ نوع آزمون آماری برای تعیین تعداد مناسب کلاسترها وجود ندارد و کلاسترها بر اساس یک فاصله نسبی پدید خواهند آمد. برای رسم این نمودارها از آماره RMSE استفاده شد. برای کلاس‌بندی بین مدل‌ها در نمودار ایجاد شده بایستی یک سطح برش را در نظر گرفته و مدل‌هایی که در یک شاخه قرار می‌گیرند در یک کلاس خواهند بود. به هر اندازه که این سطح برش را بالاتر ببریم مدل‌ها در تعداد کلاس‌های کمتری قرار می‌گیرند و نهایتا در یک سطح مشخص تمام مدل‌ها در یک کلاس قرار خواهند گرفت که در این حالت تفاوتی بین مدل‌ها دیده نمی‌شود. هر چه قدر سطح مبنای سنجش پایین‌تر در نظر گرفته شود به تعداد کلاس‌ها افزوده و از تعداد مدل‌های هر کلاس کاسته و تفاوت در بین

1- Iterative nonlinear regression
2- Adjusted Coefficient of determination
3- Root Mean Square Error
4- Akike Information Criteria

Archive of SID

www.SID.ir

مدل‌ها به سمت حدکثر میل خواهد کرد. رسم این نمودارها به کمک نرم افزار SPSS 18 با روش وارد[1] صورت گرفته است. همچنین برای تعیین فاصله بین گروه‌ها از روش اوقلیدسی[2] استفاده شد.

نتایج و بحث

در جدول ۱ آماره‌های توصیفی اجزای رس، سیلت و شن به ترتیب برای کل نمونه‌های خاک و تمام گروه‌های بافتی آورده شده است. در شکل ۱ نیز توزیع نمونه خاک‌های مطالعه شده در مثلث بافت خاک نمایش داده شده است. بر اساس جدول ۱ اجزای بافتی دارای دامنه‌ی وسیعی بودند. این دامنه وسیع، پراکندگی نمونه‌ها در داخل کلاس‌ها را نشان می دهد. بر اساس شکل ۱، نمونه های مورد بررسی توزیع خوبی داشته و از ۱۲ کلاس بافتی به جز کلاس های، رس شنی، لوم رسی شنی، سیلت و شن بقیه کلاس ها را پوشش دادند.

مقایسه کارایی مدل‌ها برای کل نمونه‌های خاک

مقایسه میانگین آماره‌های ارزیابی دقت مدل‌ها در برازش منحنی توزیع اندازه ذرات خاک برای کل نمونه‌های خاک در جدول ۲ نشان داده شده است. مدل‌ها به ترتیب کمتر بودن RMSE مرتب شده‌اند. همچنین نمودار تجزیه کلاستر در شکل ۲ نمایش داده شده است.

آماره RMSE

نتایج RMSE در جدول ۲ نشان داد که مدل ویبول در کل نمونه خاک‌های مطالعه شده دارای بالاترین دقت بود. این مدل از نظر دیگر آماره‌های مورد بررسی نیز در سطح بالایی از دقت قرار گرفت. بعد از مدل ویبول مدل‌های روسین راملر، ون‌گنوختن و فردلاند قرار گرفتند. این سه مدل به همراه مدل ویبول در نمودار تجزیه کلاستر در یک کلاس قرار گرفتند و تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد با هم نداشتند. مدل جکی دقت برازش بهتری نسبت به مدل‌های ORL، SLM و ONL از خود نشان داد. به طوری که این تفاوت با هر سه مدل در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. این نتیجه با نتیجه بوچان و همکاران (۶) مطابقت داشت. در نمودار تجزیه کلاستر مدل جکی به همراه مدل توانی-نمایی در یک کلاس قرار گرفتند. مدل روسین راملر دقت بالاتری (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) نسبت به مدل‌های توزیع لوگ نرمال (ORL، SLM و ONL) داشت. نتیجه مشابهی نیز توسط گرکزا (۱۶) گزارش شده است. مدل‌های SLM، گمپرتز و ONL ضعیف‌ترین دقت پیش‌بینی (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) را در مقایسه با سایر مدل‌ها نشان دادند. حتی تفاوت بین مدل‌های SLM و گمپرتز با مدل ONL در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود و در نمودار تجزیه کلاستر مدل ONL به تنهایی در یک کلاس قرار گرفت و مدل‌های SLM و گمپرتز نیز در یک کلاس قرار گرفتند.

آماره AIC_c

نتایج AIC_c طبق جدول ۲ نشان داد که مدل ویبول در کل نمونه خاک‌های بررسی شده دارای کمترین مقدار AIC_c بود، که نشان‌دهنده‌ی مطلوبیت (دقت بیشتر و تعداد مناسب پارامتر) این مدل نسبت به دیگر مدل‌ها می‌باشد. این تفاوت با تمامی مدل‌ها به جز مدل‌های روسین راملر و ون‌گنوختن در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. در ادامه مدل فردلاند قرار داشت، اما تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد با مدل‌های ون‌گنوختن و توانی نمایی نداشت. این نتیجه با نتایج هوانگ (۲۲) که مدل فردلاند را نسبت به مدل ون‌گنوختن دقیق‌تر معرفی نموده بود همخوانی نداشت. با این وجود هوانگ (۲۲) بیان کرد که مدل‌های ویبول و ون‌گنوختن دقت برازش خوبی داشتند و در نتایج ما نیز از دقت قابل قبولی برخوردار بودند. تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد بین مدل‌های ORL، S شکل و هایپربولیک مشاهده نشد. مدل ORL دقت پیش‌بینی بالاتری (معنی‌داری در سطح ۵ درصد) نسبت به دو مدل SLM و ONL داشت. همچنین مدل ONL ضعیف‌ترین (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) دقت پیش‌بینی را در بین سایر مدل‌ها داشت. هاگن و همکاران (۱۸) نشان دادند که مدل‌های توزیع لوگ نرمال در برازش کامل بر داده‌های اندازه‌گیری شده توزیع اندازه ذرات در دو انتهای منحنی PSD شکست می‌خورند. از دلایل این محدودیت‌ها می‌توان به توزیع اغلب نامتقارن و یا دو نمایی اندازه ذرات (۱۲) و همچنین نبودن تعداد داده کافی در دامنه اندازه ذرات رس خاک (۶)، اشاره کرد.

آماره Ra^2

نتایج Ra^2 در جدول ۲ نشان داد که مدل‌های ویبول، روسین راملر، ون‌گنوختن، فردلاند و همچنین مدل‌های توانی-نمایی و جکی در یک گروه قرار گرفتند و تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد با هم نداشتند. این گروه‌بندی با گروه‌بندی بر اساس دو آماره قبلی منطبق نیست. بنابراین بر اساس Ra^2 این مدل‌ها از دقت یکسانی برخوردار هستند. شاید علت نتیجه‌ی بدست آمده این باشد که آماره Ra^2 ابزار قدرتمندی برای تمایز مدل‌های غیرخطی نیست (۶). بنابراین لازم است از آماره‌های دیگری که از قدرت بالاتری در تمایز آماری بین مدل‌ها برخوردار هستند، استفاده نمود. مدل فردلاند دارای Ra^2 بالاتری (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) نسبت به مدل S شکل و هایپربولیک بود، که با نتایج ویپولاناندن و همکاران (۳۷) مطابقت

1- Ward's Method
2- Euclidean distance

Archive of SID

www.SID.ir

دارد. مدل‌های SLM، گمپرتز و ONL برازش ضعیفی (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) در مقایسه با سایر مدل‌ها داشتند. حتی تفاوت بین مدل‌های ONL و گمپرتز با مدل SLM در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود.

مقایسه کارایی مدل‌ها در گروه‌های بافتی خاک

جدول ۳ مقایسه دقت مدل‌ها برای پیش‌بینی PSD در گروه بافتی رسی را نشان می‌دهد. همچنین نمودار تجزیه کلاستر نیز در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مدل ویبول از نظر هر سه آماره‌ی ارزیابی در بالاترین سطح دقت قرار داشت و از نظر آماره RMSE به جز مدل‌های روسین راملر، ون‌گنوختن، جکی، توانی–نمایی و ORL تفاوت آن با سایر مدل‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. در نمودار تجزیه کلاستر نیز مدل‌های ویبول، روسین راملر و ون‌گنوختن در یک کلاس و مدل‌های جکی، توانی نمایی و ORL نیز در یک کلاس قرار گرفتند. مدل‌های ONL و گمپرتز دقت پیش‌بینی ضعیف‌تری (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) نسبت به مدل‌های دیگر به لحاظ هر سه آماره AIC_c، RMSE و Ra^2 داشتند و در نمودار تجزیه کلاستر هر کدام در یک کلاس مجزا قرار گرفتند. این دو مدل از نظر آماره AIC_c تفاوت معنی داری در سطح ۵ درصد با هم نداشتند. در این گروه بافتی مدل جکی تک پارامتری از نظر هر سه آماره ارزیابی نتایج قابل قبول‌تری (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) نسبت به مدل‌های با پارامترهای بیشتر مانند مدل گمپرتز با چهار پارامتر و مدل ONL با سه پارامتر داشت. پس می‌توان نتیجه گرفت که همیشه با افزایش تعداد پارامترهای یک مدل دقت آن افزایش نمی‌یابد. این نتایج با نتایج بررسی هوانگ (۲۲) که مدل ون‌گنوختن را برای خاک‌های دارای رس زیاد مناسب نمی‌دانست، متفاوت بود. در این خاک‌ها آماره AIC_c به بهترین نحو تفاوت بین مدل‌ها را نشان داد، در حالی که آماره‌ی Ra^2 قابلیت تفکیک خوبی را نشان نداد.

جدول ۴ مقایسه دقت پیش‌بینی مدل‌ها برای گروه بافتی خاک‌های لومی را نشان می‌دهد. همچنین نمودار تجزیه کلاستر در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که مدل ویبول از نظر هر سه آماره ارزیابی بالاترین دقت برازش را داشت و از نظر آماره RMSE به جز مدل‌های فردلاند، روسین راملر، ون‌گنوختن و توانی–نمایی تفاوت آن با سایر مدل‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود و این مدل‌ها در نمودار تجزیه کلاستر نیز در یک کلاس قرار گرفتند. مدل ONL دقت برازش ضعیف‌تری (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) نسبت به سایر مدل‌ها از نظر آماره‌های RMSE و AIC_c داشت و در نمودار تجزیه کلاستر در یک کلاس قرار گرفت.

جدول ۱– ویژگی‌های آماری اجزای بافتی برای گروه‌های بافتی مختلف و برای کل نمونه‌های خاک

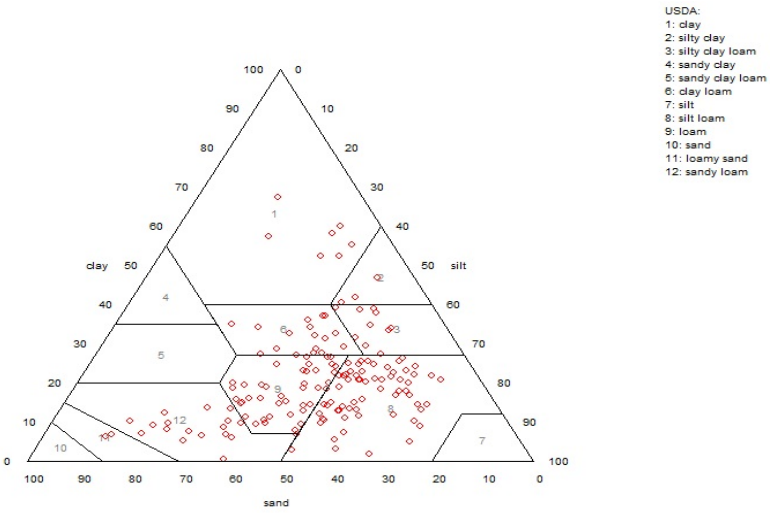
گروه بافتی	رس (٪)				سیلت (٪)				شن (٪)			
	بیشینه	کمینه	انحراف استاندارد	میانگین	بیشینه	کمینه	انحراف استاندارد	میانگین	بیشینه	کمینه	انحراف استاندارد	میانگین
رسی	۶۷/۲	۴۰/۴	۸/۳	۵۳/۱	۴۶	۱۶	۹/۸	۳۳/۶	۲۳/۵	۷/۲	۵/۱	۱۳/۲
لومی	۳۹	۰/۴	۸/۸	۱۸/۹	۷۳/۲	۱۵/۵	۱۲/۳	۴۸/۳	۷۴/۴	۷/۹	۱۵/۱	۳۳/۷
شنی	۶/۶	۶/۱	۰/۳	۶/۳	۱۳/۴	۱۲/۵	۰/۶۷	۱۲/۹	۸۱/۳	۷۹/۸	۱/۰	۸۰/۶
کل نمونه خاک	۶۷/۲	۰/۴۵	۱۲/۱	۲۰/۸	۷۳/۲	۱۲/۵	۱۳/۲	۴۶/۹	۸۱/۳	۷/۲	۱۶/۳	۳۲/۱

دو مدل گمپرتز و ONL از نظر آماره Ra^2 نیز ضعیف‌ترین نتایج را نشان دادند که تفاوت آن‌ها با سایر مدل‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. در این گروه بافتی باز هم مدل تک پارامتری جکی دقت

Archive of SID

www.SID.ir

برازش بالاتری (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) نسبت به مدل‌های با پارامترهای بیشتر مانند مدل گمپرتز با چهار پارامتر (از نظر هر سه آماره ارزیابی) و مدل‌های ONL (از نظر هر سه آماره ارزیابی) و ORL (از نظر آماره‌های RMSE و AIC_c) با سه پارامتر داشت. مدل فردلاند دارای Ra^2 بالاتری (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) نسبت به مدل S شکل و تانژانت هایپربولیک بود که با نتایج ویپولانانـدن و همکاران (۳۷) مطابقت دارد.



شکل ۱ - توزیع نمونه خاک‌های مطالعه شده در مثلث بافت خاک

جدول ۲- مقایسه دقت مدل‌ها برای پیش بینی PSD برای کل نمونه‌های خاک

مدل	Ra^2		AIC_c		RMSE	
	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین*
ویبول	۰/۰۷۸	۰/۹۷۲^{a}	۱۷/۵	-۱۰۵^{a}	۰/۰۲۶	۰/۰۳۹^{a}
روسین‌راملر	۰/۰۶۳	۰/۹۷۰^{ab}	۱۷/۱	-۱۰۴^{a}	۰/۰۲۴	۰/۰۴۲^{ab}
ون گنوختن	۰/۰۶۸	۰/۹۶۷^{ab}	۱۶/۲	-۱۰۲^{ab}	۰/۰۲۵	۰/۰۴۴^{ab}
فردلاند	۰/۱۷۸	۰/۹۴۳^{abc}	۱۷/۲	-۹۸/۹^{b}	۰/۰۳۳	۰/۰۴۵^{ab}
توان-نمایی	۰/۳۲۴	۰/۹۳۲^{abcd}	۱۷/۶	-۹۹/۱^{b}	۰/۰۴۷	۰/۰۵۲^{b}
جکی	۰/۰۶۹	۰/۹۴۲^{abc}	۱۹/۷	-۹۳/۴^{c}	۰/۰۳۰	۰/۰۶۲^{c}
لگاریتم	۰/۰۷۶	۰/۹۱۸^{bcde}	۱۸/۳	-۸۴/۸^{d}	۰/۰۳۳	۰/۰۷۵^{d}
ORL	۰/۰۹۷	۰/۹۱۲^{cde}	۱۲/۴	-۷۹/۸^{e}	۰/۰۲۹	۰/۰۷۶^{d}
S شکل	۰/۱۵۸	۰/۸۷۸^{ef}	۲۰/۹	-۷۸/۹^{e}	۰/۰۵۱	۰/۰۸۴^{de}
هایپربولیک	۰/۰۹۹	۰/۸۸۲^{def}	۱۰/۳	-۷۶/۲^{e}	۰/۰۲۷	۰/۰۹۰^{e}
نمایی	۰/۰۹۳	۰/۸۴۰^{fg}	۱۴/۶	-۷۰/۹^{f}	۰/۰۳۸	۰/۱۱۰^{f}
شامن	۰/۱۰۲	۰/۸۰۳^{g}	۱۳/۸	-۶۸/۸^{fg}	۰/۰۴۰	۰/۱۲۲^{g}
SLM	۰/۲۱۰	۰/۷۲۸^{h}	۹/۹	-۶۲/۵^{h}	۰/۰۴۲	۰/۱۳۳^{h}
گمپرتز	۰/۵۴۹	۰/۵۵۰^{i}	۲۷/۲	-۶۶/۲^{gh}	۰/۱۰۴	۰/۱۳۷^{h}
ONL	۰/۳۱۷	۰/۵۵۱^{i}	۱۶/۲	-۵۴/۶^{i}	۰/۰۶۴	۰/۱۶۶^{i}

*-حروف کوچک انگلیسی در جدول، نتایج مقایسه میانگین را نشان می‌دهند. در هر ستون حداقل یک حرف مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین مدل‌ها است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۵ مقایسه دقت مدل‌ها برای پیش‌بینی PSD در گروه بافتی شنی را نشان می‌دهد. همچنین نمودار تجزیه کلاستر نیز در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج این گروه بافتی نسبت به دو گروه بافتی قبل متفاوت است. به طوری که در این گروه بافتی مدل S شکل از نظر آماره‌های RMSE و AIC_c دقت پیش‌بینی بالاتری (معنی‌دار در سطح ۵ درصد) نسبت به مدل‌های دیگر داشت و در نمودار تجزیه کلاستر در یک کلاس قرار گرفت.

جدول ۳- مقایسه دقت مدل‌ها برای پیش‌بینی PSD در گروه بافتی رسی

مدل	Ra^2		AIC_c		RMSE	
	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین*
ویبول	۰/۰۲۳	۰/۹۷۳^{a}	۲۱/۳	−۱۱۷/۱^{a}	۰/۰۱۰	۰/۰۲۸^{a}
روسین‌راملر	۰/۰۲۳	۰/۹۷۲^{a}	۲۰/۴	−۱۱۷/۷^{a}	۰/۰۱۰	۰/۰۲۹^{a}
ون‌گنوختن	۰/۰۲۵	۰/۹۶۷^{a}	۱۸/۸	−۱۱۴/۳^{a}	۰/۰۱۰	۰/۰۳۲^{a}
جکی	۰/۰۵۰	۰/۹۳۶^{ab}	۲۳/۵	−۱۰۶/۶^{a}	۰/۰۱۹	۰/۰۴۵^{ab}
توان-نمایی	۰/۷۸۷	۰/۷۳۰^{abc}	۲۵/۹	−۱۰۹/۹^{a}	۰/۰۷۶	۰/۰۵۱^{abc}
ORL	۰/۰۳۸	۰/۹۰۱^{ab}	۱۱/۵	−۸۹/۰^{b}	۰/۰۰۹	۰/۰۵۹^{abc}
لگاریتم	۰/۰۷۲	۰/۸۷۲^{ab}	۱۷/۹	−۸۹/۹^{b}	۰/۰۲۰	۰/۰۶۶^{bcd}
شکل S	۰/۱۹۸	۰/۸۲۶^{abc}	۱۷/۶	−۸۰/۸^{bc}	۰/۰۳۶	۰/۰۶۹^{bcd}
هایپربولیک	۰/۰۵۶	۰/۸۵۶^{abc}	۱۱/۷	−۸۵/۳^{b}	۰/۰۱۰	۰/۰۷۱^{bcd}
فردلاند	۰/۵۲۸	۰/۶۸۰^{bc}	۲۵/۱	−۸۹/۵^{b}	۰/۰۷۳	۰/۰۷۸^{bcd}
نمایی	۰/۰۸۱	۰/۸۰۷^{abc}	۱۵/۱	−۸۱/۳^{bc}	۰/۰۲۱	۰/۰۸۳^{cd}
شامن	۰/۰۸۸	۰/۷۴۹^{abc}	۱۳/۴	−۷۸/۰^{bc}	۰/۰۲۲	۰/۰۹۶^{de}
SLM	۰/۲۱۸	۰/۵۹۴^{c}	۵/۴	−۶۷/۴^{c}	۰/۰۳۰	۰/۱۱۸^{e}
ONL	۰/۰۶۷	۰/۱۴۹^{d}	۸/۰	−۵۰/۸^{d}	۰/۰۲۶	۰/۱۷۹^{f}
گمپرتز	۰/۰۳۱	۰/۰۰۰^{e}	۷/۴	−۴۳/۰^{d}	۰/۰۳۱	۰/۲۱۵^{g}

*- حروف کوچک انگلیسی در جدول، نتایج مقایسه میانگین را نشان می‌دهند. در هر ستون حداقل یک حرف مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین مدل‌ها است.

جدول ٤- مقایسه دقت مدل‌ها برای پیش‌بینی PSD در گروه بافتی لومی

مدل	Ra^2		AIC_c		RMSE	
	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین*
ویبول	۰/۰۸۱	۰/۹۷۲^{a}	۱۶/۹	−۱۰۳/۹^{a}	۰/۰۲۶	۰/۰۳۹^{a}
فردلاند	۰/۱۱۰	۰/۹۶۰^{ab}	۱۶/۴	−۹۹/۲^{bc}	۰/۰۲۸	۰/۰۴۲^{a}
روسین‌راملر	۰/۰۶۵	۰/۹۷۰^{a}	۱۶/۷	−۱۰۳/۲^{ab}	۰/۰۲۵	۰/۰۴۳^{a}
ون‌گنوختن	۰/۰۷۰	۰/۹۶۶^{a}	۱۵/۸	−۱۰۱/۳^{abc}	۰/۰۲۵	۰/۰۴۵^{a}
توان-نمایی	۰/۲۷۰	۰/۹۴۵^{ab}	۱۶/۸	−۹۸/۷^{c}	۰/۰۴۵	۰/۰۵۱^{a}
جکی	۰/۰۷۱	۰/۹۴۳^{ab}	۱۸/۷	−۹۲/۶^{d}	۰/۰۳۰	۰/۰۶۳^{b}
لگاریتم	۰/۰۷۵	۰/۹۲۲^{abc}	۱۸/۲	−۸۴/۷^{e}	۰/۰۳۳	۰/۰۷۵^{c}
ORL	۰/۱۰۰	۰/۹۱۱^{bc}	۱۱/۵	−۷۸/۸^{f}	۰/۰۳۰	۰/۰۷۷^{cd}
S شکل	۰/۱۵۶	۰/۸۷۹^{cd}	۱۶/۹	−۷۷/۰^{f}	۰/۰۴۹	۰/۰۸۵^{de}
هایپربولیک	۰/۱۰۲	۰/۸۸۳^{cd}	۹/۸	−۷۵/۴^{f}	۰/۰۲۷	۰/۰۹۲^{e}
نمایی	۰/۰۹۳	۰/۸۴۱^{de}	۱۴/۳	−۷۰/۰^{g}	۰/۰۳۷	۰/۱۱۱^{f}
شامن	۰/۱۰۲	۰/۸۰۴^{e}	۱۳/۶	−۶۷/۹^{g}	۰/۰۴۰	۰/۱۲۵^{g}
گمپرتز	۰/۵۲۹	۰/۵۹۷^{g}	۲۶/۷	−۶۶/۹^{g}	۰/۱۰۴	۰/۱۳۳^{g}
SLM	۰/۲۰۷	۰/۷۳۴^{f}	۹/۹	−۶۲/۰^{h}	۰/۰۴۲	۰/۱۳۴^{g}
ONL	۰/۳۰۸	۰/۵۷۳^{g}	۱۵/۹	−۵۴/۳^{i}	۰/۰۶۵	۰/۱۶۴^{h}

*- حروف کوچک انگلیسی در جدول، نتایج مقایسه میانگین را نشان می‌دهند. در هر ستون حداقل یک حرف مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین مدل‌ها است.

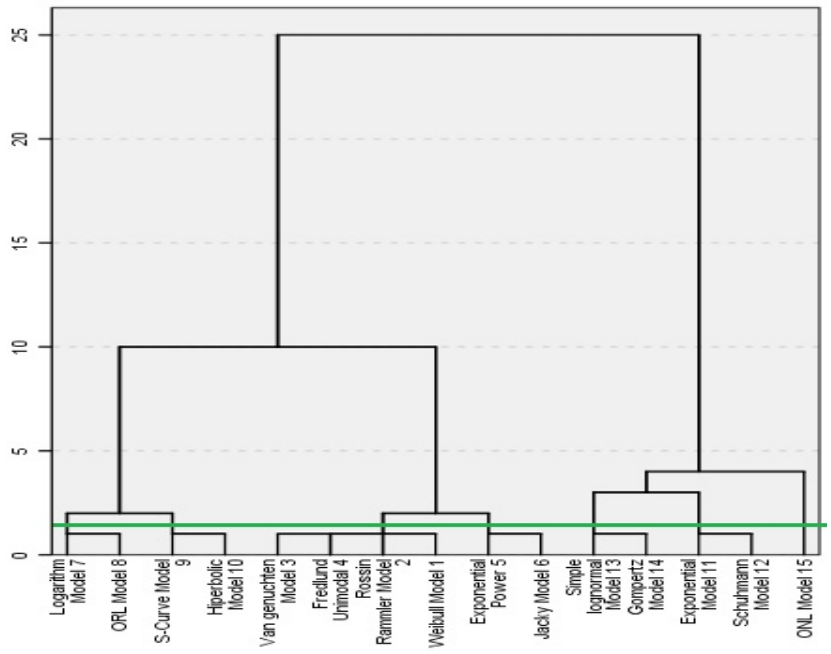
Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۵- مقایسه دقت مدل‌ها برای پیش‌بینی PSD در گروه بافتی شنی

مدل	Ra^2		AIC_c		RMSE	
	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین*
شکلS	۰/۰۰۰	۰/۹۹۷^{a}	۱۱/۲	-۱۷۲/۹^{a}	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۲^{a}
گمپرتز	۰/۰۰۱	۰/۹۹۶^{ab}	۳/۷	-۱۲۴/۸^{b}	۰/۰۰۲۰	۰/۰۱۸^{b}
ویبول	۰/۰۰۱	۰/۹۹۵^{ab}	۳/۴	-۱۲۳/۵^{b}	۰/۰۰۲۱	۰/۰۲۱^{bc}
فردلاند	۰/۰۰۱	۰/۹۹۴^{ab}	۳/۰	-۱۱۶/۸^{c}	۰/۰۰۲۱	۰/۰۲۴^{c}
ORL	۰/۰۰۱	۰/۹۹۰^{bc}	۱/۵	-۱۰۸/۸^{d}	۰/۰۰۱	۰/۰۳۲^{d}
ون‌گنوختن	۰/۰۰۰	۰/۹۸۵^{cd}	۰/۷	-۱۰۵/۱^{de}	۰/۰۰۰۷	۰/۰۳۸^{e}
روسین‌راملر	۰/۰۰۱	۰/۹۸۳^{cd}	۱/۰	-۱۰۳/۲^{de}	۰/۰۰۱۱	۰/۰۴۰^{ef}
ONL	۰/۰۰۲	۰/۹۸۱^{d}	۲/۰	-۹۸/۴^{ef}	۰/۰۰۲	۰/۰۴۳^{f}
هایپربولیک	۰/۰۰۰	۰/۹۷۳^{e}	۰/۱	-۹۵/۳^{fg}	۰/۰۰۰۱	۰/۰۵۱^{g}
جکی	۰/۰۰۱	۰/۹۶۶^{ef}	۰/۷	-۹۳/۰^{fgh}	۰/۰۰۱۲	۰/۰۵۸^{h}
نمایی	۰/۰۰۱	۰/۹۶۲^{f}	۰/۷	-۸۹/۴^{gh}	۰/۰۰۱۲	۰/۰۶۱^{h}
شامن	۰/۰۰۲	۰/۹۵۱^{g}	۰/۸	-۸۷/۰^{h}	۰/۰۰۲	۰/۰۶۹^{i}
توان-نمایی	۰/۰۰۳	۰/۹۲۸^{h}	۰/۹	-۷۸/۶^{i}	۰/۰۰۲۲	۰/۰۸۴^{j}
SLM	۰/۰۰۴	۰/۹۲۶^{h}	۱/۲	-۷۷/۲^{i}	۰/۰۰۳	۰/۰۸۵^{j}
لگاریتم	۰/۰۱۰	۰/۸۰۸^{i}	۰/۸	-۶۲/۰^{j}	۰/۰۰۳۳	۰/۱۳۷^{k}

*- حروف کوچک انگلیسی در جدول، نتایج مقایسه میانگین را نشان می‌دهند. در هر ستون حداقل یک حرف مشابه نشان دهنده عدم تفاوت معنی‌دار بین مدل‌ها است.



شکل ۲ - نمودار تجزیه کلاستر برای کل نمونه‌های خاک بر اساس دقت RMSE. خط تیره ممتد سطح تفکیک گروه‌ها را نشان می‌دهد.

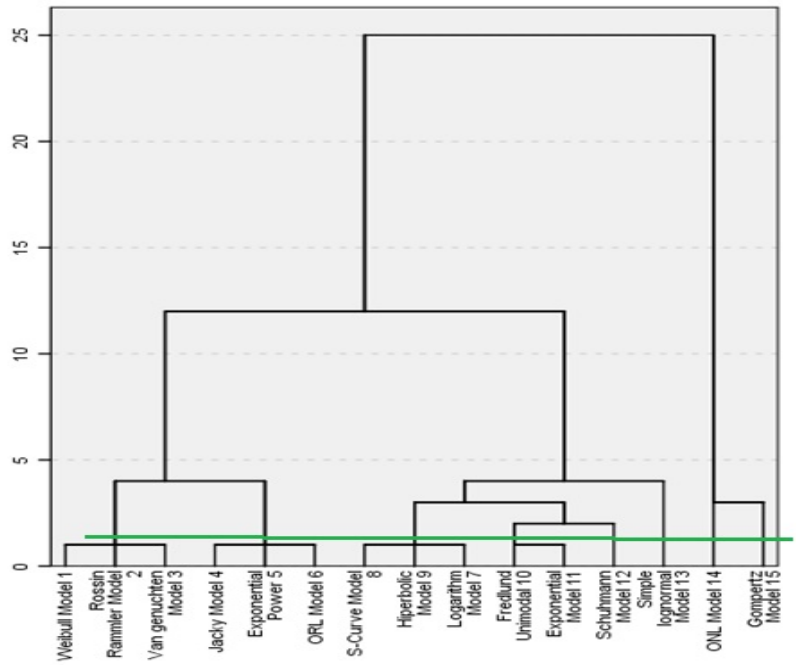
بعد از مدل S شکل، مدل‌های گمپرتز و ویبول قرار داشتند و تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد از نظر آماره‌های RMSE و AIC_c با هم نداشتند و در نمودار تجزیه کلاستر به همراه مدل فردلاند در یک کلاس قرار گرفتند. همچنین از نظر آماره Ra^2 مدل S شکل در بالاترین دقت برازش قرار داشت. به طوری که به جز مدل‌های گمپرتز، ویبول و فردلاند تفاوت آن با سایر مدل‌ها در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود. متفاوت بودن ترتیب مدل‌ها از نظر دقت در گروه‌های بافتی مختلف نشان می‌دهد که قابلیت مدل‌ها در برازش بر داده‌های هر گروه بافتی متفاوت است. بنابراین باید برای هر گروه بافتی دقیق‌ترین مدل را انتخاب کرد. هوانگ و همکاران (۲۱) نیز گزارش کردند که مدل گمپرتز در خاک‌های شنی و شن لومی برازش بهتری داشت. مدل‌های توانی-نمایی، SLM و لگاریتم ضعیف‌ترین

www.SID.ir

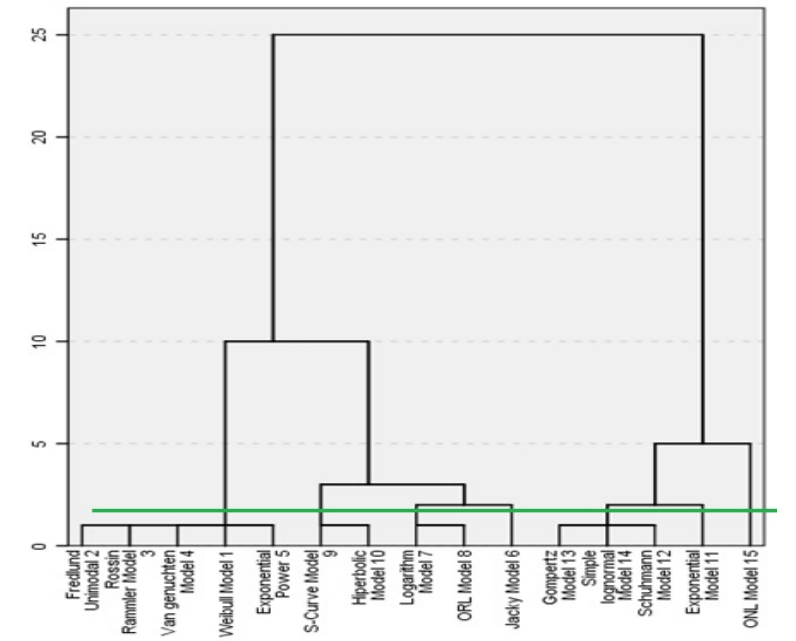
مدل‌ها برای گروه بافتی شنی بودند.

به طوری که از نظر هر سه آماره ارزیابی تفاوت معنی‌داری در سطح ۵ درصد با سایر مدل‌ها داشتند. حتی تفاوت مدل‌های توانی- نمایی و SLM با مدل لگاریتم از نظر هر سه آماره ارزیابی در سطح ۵ درصد معنی‌دار بود.

در شکل ۶ به ترتیب نمایش مقایسه برازش بهترین مدل‌ها برای گروه‌های بافتی رسی، لومی و شنی خاک‌ها نشان داده شده است. شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهد که هر کدام از مدل‌ها در چند درصد از نمونه‌های خاک (در کل نمونه‌ها و هر کدام از گروه‌های بافتی) بهترین برازش را داشته‌اند.

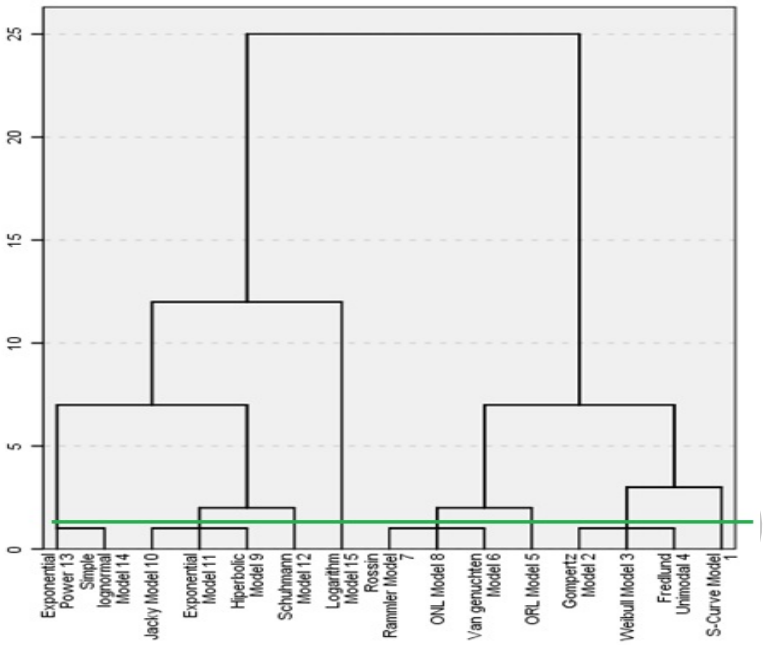


شکل ۳- نمودار تجزیه کلاستر برای گروه بافتی رسی بر اساس دقت RMSE. خط تیره ممتد سطح تفکیک گروه‌ها را نشان می‌دهد.

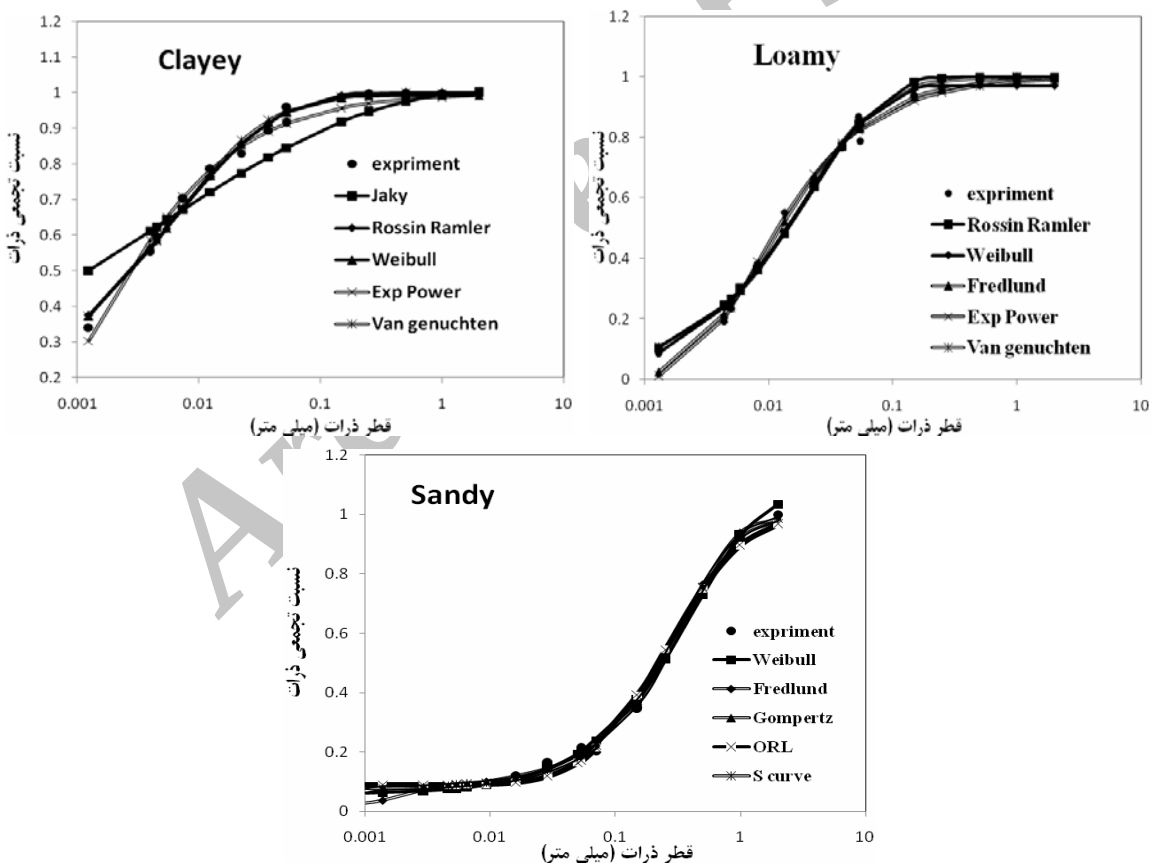


شکل ٤ - نمودار تجزیه کلاستر برای گروه بافتی لومی بر اساس دقت RMSE. خط تیره ممتد سطح تفکیک گروه‌ها را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

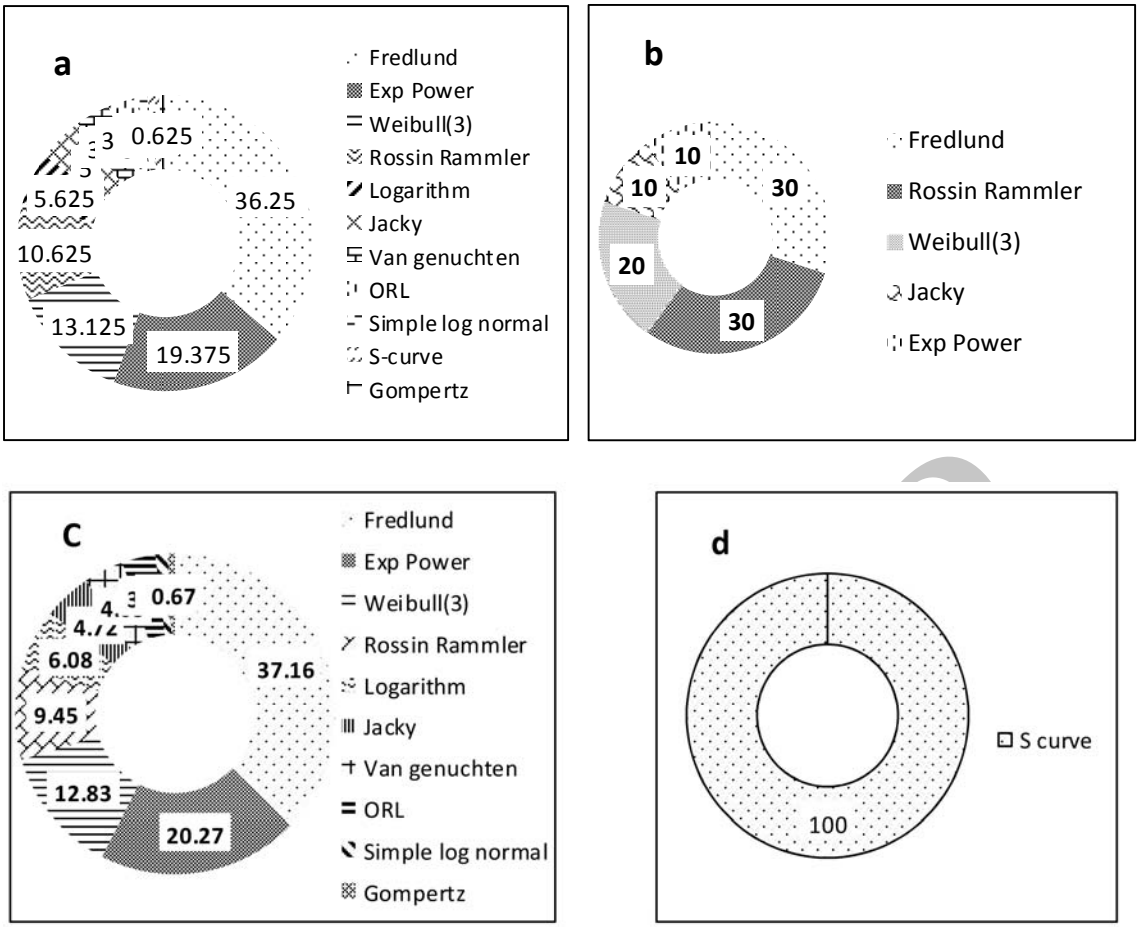


شکل ۵- نمودار تجزیه کلاستر برای گروه بافتی شنی بر اساس دقت RMSE. خط تیره ممتد سطح تفکیک گروه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ٦- نمایش مقایسه برازش پنج مدل برتر برای یک نمونه خاک در گروهای بافتی مختلف

www.SID.ir



شکل ۷ - کارایی نسبی مدل‌های توزیع اندازه ذرات برای (a) کل نمونه خاک و در گروه بافتی (b) رسی (c) لومی و (d) شنی بر پایه دقت RMSE

لازم به ذکر است که در اکثر بررسی‌های صورت گرفته در گذشته (۲۱، ۲۲ و ۳۷)، مدل فردلاند به عنوان بهترین مدل گزارش شده است. در این بررسی نیز برازش‌های قابل قبولی از مدل فردلاند به‌دست آمد.

به طوری که در شکل ۷، به جز گروه بافتی شنی، مدل فردلاند برای کل نمونه‌های خاک و برای گروه‌های بافتی رسی و لومی در بیشتر خاک‌ها بالاترین کارایی را در بین سایر مدل‌ها داشته و بهترین برازش را نشان داده است. این مدل به دلیل داشتن تعداد پارامترهای بیشتر نسبت به مدل‌هایی با تعداد پارامتر کمتر مثل توزیع لوگ نرمال، برازش بهتری دارد. همچنین با افزایش رس، این معادله برازش بهتری از خود نشان می‌دهد (۱۲ و ۲۲). دواتگر و همکاران (۱) نیز گزارش کردند که می‌توان مدل فردلاند و همکاران (۱۲) را یک مدل فیزیکی در نظر گرفت. با بررسی انحراف استاندارد مدل‌ها مشخص شد که مدل فردلاند دارای انحراف استاندارد بالاتری نسبت به مدل ویبول است که نشان دهنده‌ی بالا بودن میزان پراکنش داده‌ها از میانگینشان در مدل فردلاند می‌باشد.

نتیجه‌گیری

بیشتر مدل‌های مطالعه شده دارای دقت مناسبی برای پیش بینی منحنی توزیع اندازه ذرات خاک بودند.

نتایج نشان داد سه مدل ویبول، روسین راملر و ون گنوختن از نظر تمام آماره‌های مورد مطالعه برای مجموعه داده‌ها و گروه‌های بافتی رسی و لومی بهترین دقت پیش‌بینی را داشتند. بنابراین احتمال می رود که دقت این مدل‌ها وابستگی کمتری به گروه بافتی داشته باشد. نتایج نشان داد که در گروه درشت بافت مدل S شکل و گمپرتز برازش بهتری نسبت به مدل‌های دیگر داشتند. ارزیابی برازش پانزده مدل در پیش‌بینی توزیع اندازه ذرات نشان داد که مدل سه پارامتری ویبول از دقت بیشتری برخوردار است. ین توانایی از تعداد پارامترهای زیاد این مدل ناشی نمی‌گردید؛ زیرا مدل‌های گمپرتز، فردلاند، ONL و ORL با تعداد پارامتر بیشتر و مشابه دارای کارایی کمتر بودند. بنابراین افزایش تعداد پارامترها همیشه تضمینی بر افزایش کارایی مدل‌ها نخواهد بود. مدل فردلاند نیز در غالب خاک‌ها بهترین برازش را داشت. به همین علت می‌توان از مدل‌های ویبول و فردلاند با دقت

Archive

www.SID.ir

قابل قبول برای پیش‌بینی منحنی توزیع اندازه ذرات که ویژگی مهم در مکانیک و فیزیک خاک و هم‌چنین در اندازه‌گیری غیرمستقیم ویژگی هیدرولیک خاک است، استفاده نمود. البته تعمیم پذیری این نتایج مستلزم بررسی تعداد نمونه‌ها و مدل‌های بیشتر است. زیرا ممکن است دقت برازش این مدل ها با کلاس‌های بافتی متفاوت باشد که نیاز به تحقیقات بیشتری دارد.

منابع

۱- دواتگر ن. ۱۳۹۱. ارزیابی شش مدل متفاوت برای پیش‌بینی منحنی توزیع اندازه ذرات در خاک‌های شالیزاری ، مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. تحت چاپ

۲- صادقی م.، قهرمان ب.، داوری ک. ۱۳۸۷. مقایسه مدل‌های توزیع لوگ نرمال و گاما برای نمایش منحنی منحنی توزیع اندازه ذرات خاک. مجله علوم و صنایع کشاورزی، آب و خاک، جلد ۲۳، شماره ۳، ۲۰-۲۷.

۳- نبی زاده ا.، بیگی هرچگانی ح. ۱۳۹۰. کارایی هشت مدل ریاضی در توصیف اندازه ذرات در برخی خاک‌های استان چهار محال بختیاری، مجله آب و خاک، علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی ۷۵:۵۷-۶۳.

4- Arya L.M., Paris J.F. 1981. A physic empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. Soil Science Society of America Journal, 45: 1023-1030.

5- Bittelli M., Campbell G.S., and Flury M. 1999. Characterization of particle-size distribution in soils with a fragmentation model. Soil Sci. Soc. Amer. J, 63: 782-788.

6- Buchan G.D., Grewal K.S., and Robson A.B. 1993. Improved models of particle-size distribution: An illustration of model comparison techniques. Soil Sci. Soc. Am. J, 57:901–908.

7- Buchan G.D. 1989. Applicability of the simple lognormal model to particle-size distribution in soils. Soil Science, 147: 155-161.

8- Burnham K.P., Anderson D.R. 2002. Model selection and multi-model inference: a practical information-theoretic approach. Springer, 2002.

9- Campbell G.S. 1985. Soil Physics with Basic: Transport Models for Soil-Plant Systems. Elsevier, Amsterdam.

10- Clark W.C., Kuhl J.P., Keohan M.L., Knotkova H., Winer R.T., Griswold G.A. 2003. Factor analysis validates the cluster structure of the dendrogram underlying the Multidimensional Affect and Pain Survey (MAPS) and challenges the a priori classification of the descriptors in the McGill Pain Questionnaire (MPQ). Pain 106(3), 357-363.

11- Filgueira R.R., Fournier L.L., Sarli G.O., Aragon A., Rawls W.J. 1999. Sensitivity of fractal parameters of soil aggregates to dif.

12- Fredlund M.D., Fredlund D.G., and Wilson G.W. 2000. An equation to represent grain size distribution. Canadian Geotechnical Journal 37:817-827.

13- Gee G.W., Bauder J.W. 1986. Particle-size analysis, In: Klute, A., et al. (Ed.), Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods, second ed. ASA, Inc., Madison, WI, pp. 383–411.

14- Gee G.W., and Or D. 2002. Particle - Size Analysis. Methods of soil analysis. Part 4, 255-293.

15- Gimenez D., Rawls W.J., Pachepsky Y., Watt J.P.C. 2001. Prediction of a pore distribution factor from soil textural and mechanical parameters. Soil Science, 166: 79 – 88.

16- Gracza R. 1962. Average Particle Size and Specific Surface of Flours and Air Classified Flour Fractions. Cereal Chemistry Today 7, 272.

17- Gupta S.C., and Larson W.E. 1979a. Estimating soil-water Retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. Water Resources Research, 15(6): 1633-1635.

18- Hagen L., Skidmore E., and Fryrear D. 1987. Using two sieves to characterize dry soil aggregate size distribution. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 30(1), 162-165.

19- Haverkamp R., 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.

20- Hillel D. 1980. Fundamentals of Soil Physics. Academic Press, New York.

21- Hwang S.I., Lee K.P., and Powers S.E. 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. Soil Sci. Soc. Am. J., 66: 1143–1150.

22- Hwang S.I. 2004. Effect of texture on the performance of soil particle-size distribution models. Geoderma, 123:363-371.

23- Jaky J. 1944. Soil mechanics. (In Hungarian.) Egyetemi Nyomada, Budapest.

24- Millan H., Gonzalez-Posada M., Aguilar M, Dominguez J., and Cespedes W. 2003. On the fractal scaling of soil data. Particle-size distributions. Geoderma, 117: 117-128.

25- Montero E. 2005. Rényi dimensions of soil particle-size distributions. Ecol. Model, 182: 305-315.

26- Munkholm L., Perfect E. 2005. Brittle fracture of soil aggregates. Weibull models and methods of parameter

Archive of SID

www.SID.ir

estimation. Soil Science Society of American Journal, 69: 1565-1571.
27- Nemes A., Wosten J.H.M., Lilly A., and Voshaar J.H.O. 1999. Evaluation of different procedures to interpolate particle-size distributions to achieve compatibility within soil databases. Geoderma, 90:187-202.
28- Pasikatan M., Steele J., Milliken G., Spillman C., Haque E. 1999. Particle size distribution and sieving characteristics of first-break ground wheat. SABE paper MC99-129. St. Joseph, Mich.: ASABE.
29- Posadas A.N., Giménez D., Bittelli M., Vaz C.M., Flury M. 2001. Multifractal characterization of soils particle-size distributions. Soil Sci. Soc. Amer. J., 65: 1361-1367.
30- Rosin P., Rammler E. 1933. The laws of governing the fineness of powdered coal, Journal of the Institute of Fuel, 7: 29 –36.
31- SAS Institute. 2004. User's guide version 9.1: Statistics. SAS Institute, Cary, NC.
32- Scott H.D. 2000. Soil Physics, Agricultural and Environmental Applications. Iowa State University Press. Ames, Iowa, 410.
33- Shiozawa S., and Campbell G.S. 1991. On the calculation of mean particle diameter and standard deviation from sand, silt and clay fractions. Soil Science, 152:427-431.
34- Shirazi M.A., Boersma L. 1984. A unifying quantitative analysis of soil texture. Soil Science Society of American Journal, 48: 142-147.
35- Skaggs T., Arya L., Shouse P., Mohanty B. 2001. Estimating particle-size distribution from limited soil texture data. Soil Science Society of American Journal, 65: 1038-1044.
36- Sokal R.R., 1958. A statistical method for evaluating systematic relationships. Univ Kans Sci Bull 38, 1409-1438.
37- Vipulanandan C., Ozgurel H.G. 2009. Simplified Relationships for Particle-Size Distribution and Permeation Groutability Limits for Soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1190-1197.
38- Wraith J.M., and Or D. 1998. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. Journal of Natural Resources and Life Sciences Education, 27: 13-19.
39- Zhuang J., Jin Y., Miyazaki T. 2001. Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept. Soil Science, 166, 308 – 321.

Archive of SID

www.SID.ir

Journal of Water and Soil
Vol. 28, No. 1, Mar.-Apr. 2014, p. 111-126

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۲۸، شماره ۱، فروردین – اردیبهشت ۱۳۹۳، ص. ۱۲۶-۱۱۱

The Effect of Textural Groups on the Fitting Capability of Soil Particle Size Distribution Curve Models

M. Rastgo[1] - H. Bayat[2 *]- A. Rastgo[3] - E. Ebrahimi[4]

Received: 28-04-2013
Accepted: 06-01-2014

Abstract

The important step in using the soil particle size distribution (PSD) to predict soil moisture characteristic curve is the determination of accurate and continuous curve for PSD. Many models have been introduced to describe PSD curve and fitting to the experimental data, but their fitting capability in different textural groups have been rarely investigated. The aim of this study was to evaluate the ability of 15 models to fit the experimental data and determine the best model among them for the PSD of all soil samples and for each soil textural groups. In this study, 160 soil samples were collected from subsoil and top soils of Guilan, Hamedan and Kermanshah provinces, and after determining the PSD and soil texture, they were partitioned into three soil textural groups of sandy, loamy and clayey. Fifteen PSD models were fitted to the experimental data of all soil samples. The most accurate model was determined for the total data and for each of three groups based on error criteria. Results showed that the Weibull model was the most accurate model for all soil samples as well as for the clayey and loamy groups. After the Weibull model, the models of Rosin Rammler, Fredlund and van Genuchten were the most accurate ones; however, their differences were not significant at 5% level. The S-Curve model showed the better fit than the other models for the coarse texture group. The results indicated that the different models have higher accuracy in different textural groups.

Keywords: Fitting ability, Soil particle size distribution models, Textural groups, Weibull model

Archive of SID

1,2,4- MSc Student, Assistant Professor and MSc student of soil science, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Bu Ali Sina University, Hamedan, Iran, Respectively
(*- Corresponding Author Email: h.bayat@basu.ac.ir)
3- MSc Student Department of Electerical Engineering, Faculty of Engineering, Kordestan University, Kordestan, Iran

www.SID.ir