

تخمین سطح ویژه خاک به کمک توابع انتقالی

محمد تاجبخش^{۱*}، منوچهر فتحی مقدم^۲ و نادرقلی ابراهیمی^۳

^۱ دکتری سازه‌های هیدرولیکی، شرکت آب منطقه‌ای کرمانشاه

^۲ استاد دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز

^۳ استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری ایران

(دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۶، پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۳۱، نشر آنلاین: ۱۳۹۷/۶/۳۱)

چکیده

سطح ویژه (SSA) در تعامل یون‌ها و مولکول‌های آب با ذرات خاک حائز اهمیت است؛ این مؤلفه برای توصیف پدیده‌هایی مانند ظرفیت نگهداری آب، جذب سموم و آلاینده‌ها، انتقال آلودگی، هدایت هیدرولیکی و ... به کار می‌رود. بنابراین سطح ویژه به عنوان نمایه‌ای از رفتار خاک تلقی می‌شود. اندازه‌گیری این مؤلفه وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و تخمین آن توسط متغیرهای که به سهولت در خاک اندازه‌گیری می‌شود ارجحیت دارد. هدف این تحقیق ارائه توابع انتقالی جهت برآورد SSA انواع خاک با بافت سبک و سنگین و فاقد کانی‌های تورم‌پذیر رسی به کمک درصد ذرات تشکیل دهنده می‌باشد. در این راستا دو رابطه انتقالی ارائه شد؛ رابطه اول به صورت تابعی غیرخطی از درصد رس و انحراف استاندارد هندسی قطر ذرات ($σg$) و رابطه دوم تابعی نمایی از شیب خط رگرسیونی منحنی لگاریتم طبیعی دانه‌بندی می‌باشد. صحت‌سنجی روابط به دست آمده نشان داد هر دو تابع انتقالی با دقت تقریباً مساوی سطح مخصوص را دقیق‌تر از توابع ارائه‌شده توسط Sepaskhah و همکاران (۲۰۱۰) و Sepaskhah و Tafteh (۲۰۱۳) تخمین می‌زند.

کلیدواژه‌ها: تابع انتقالی، سطح ویژه، شیب خط رگرسیونی، منحنی دانه‌بندی.

۱- مقدمه

همکاران، (۱۹۹۶)، حدود اتربرگ^۳ (Dolinar, ۲۰۱۲) و Kaya و Aksoy (۲۰۱۰)

قدرت جذب و نگهداری آب (Or و Tuller, ۲۰۰۵)، بافت، محتوای کربنات کلسیم، شوری و ترکیب کانی‌شناسی (Amer و Monem, ۲۰۰۹) همبستگی قوی با سطح ویژه ذرات خاک دارد. سطح ویژه یک خصوصیت اصلی در ارزیابی ظرفیت جذب مواد معدنی توسط خاک است. علاوه بر اندازه، دسترسی به سطوح ذرات حائز اهمیت بوده که متأثر از سطح ویژه می‌باشد (Heister, ۲۰۱۶). Dietel و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند سطح ویژه و مقدار سیلیس و آلومینیوم محلول مؤلفه‌های اساسی در تعیین مناسب بودن رس‌ها به عنوان ماده خام در تولید ژئوپلیمرها^۴ می‌باشد.

برای ذرات خاک دو سطح خارجی و داخلی تعریف می‌شود. سطح خارجی شامل کل سطح احاطه‌کننده ذرات خاک می‌باشد. اگر خاک متشکل از یک شبکه تورم‌پذیر و یا شامل هرگونه شکافی در ساختار باشد، سطح داخلی را می‌توان به محیط بیرونی سطح ذرات اضافه کرد که به مجموع آن‌ها سطح کل می‌گویند (Suess, ۲۰۱۰).

سطح ویژه ذرات (SSA) به عنوان مجموع مساحت سطوح ذرات خاک در واحد جرم تعریف شده و دارای بعد L^2M^{-1} است (Cerato, ۲۰۰۱). این مؤلفه از جمله خصوصیات اصلی خاک بوده که می‌تواند به عنوان شاخصی از رفتار خاک در نظر گرفته شود (Utkaeva, ۲۰۰۷). به عنوان مثال سطح ویژه برای توصیف بسیاری از پدیده‌های فیزیکی و شیمیایی خاک مانند ظرفیت نگهداری آب، جذب مواد مغذی و مقدار مواد آلی خاک به کار می‌رود (Voronin, ۱۹۷۵). Kaya و Yukselen (۲۰۰۸)، سطح ویژه را شدیداً به قدرت پیوند خشک خاک‌های رسی، جذب مواد قطبی مانند سموم و آلاینده‌ها و رفتار تورمی و انقباضی خاک مرتبط می‌دانند. همچنین جذب مولکولی، تورم و انقباض (Utkaeva, ۱۹۹۶)، ساختمان خاک و کیفیت خاک‌دانه‌های آن (Utkaeva, ۲۰۰۷)، انتقال آلودگی و هدایت هیدرولیکی (Altin و همکاران, ۱۹۹۹)، فرایندهای بیولوژیکی خاک (Rawlins و همکاران, ۲۰۱۰)، ظرفیت تبادل کاتیونی^۱، Petersen و

3. Atterberg limits
4. Geopolymer

1. Specific surface area
2. Specific surface area

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۸۵۶۰۲۴۸۰

آدرس ایمیل: tajbakhsh_md@yahoo.com (م. تاجبخش)، fathi49@gmail.com (م. فتحی مقدم)، nebrahimi81@yahoo.com (ن. ابراهیمی).

دارای همبستگی مثبتی با محتوای سیلت در هر دو نوع خاک است. همچنین مقدار خاکستر در سطح مخصوص تأثیر ندارد. در مطالعه صورت گرفته توسط Sepaskhah و همکاران (۲۰۱۰) از میانگین هندسی قطر ذرات خاک (d_g) جهت تخمین سطح ویژه ۲۰ نمونه خاک برداشت شده از نقاط مختلف استان فارس استفاده شد. ایشان رابطه (۱) را ارائه نمودند:

$$SSA = 3.89 \times d_g^{-0.905} \quad (1)$$

در رابطه فوق، SSA سطح ویژه (m^2/gr) و d_g میانگین هندسی قطر ذرات خاک (mm) می‌باشد که طبق مطالعات Shirazi و Boersma (۱۹۸۴) توصیف ریاضی آن به صورت زیر است:

$$d_g = \exp(0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i) \quad (2)$$

در رابطه (۲)، n تعداد گروه‌های مجزای خاک (به عنوان مثال رس، سیلت و ماسه) و f درصد کل توده خاک در هر گروه است. Sepaskhah و همکاران (۲۰۱۰) قطر ذرات برای هر گروه (M) را برابر میانگین حسابی حد بالا و پایین آن گروه در نظر گرفتند. برای این منظور طبق استاندارد USDA خاک به سه گروه رس، سیلت و ماسه تقسیم شد (رس با قطر ذرات کمتر از 0.002 میلی‌متر؛ سیلت با قطر ذرات بین 0.002 تا 0.05 میلی‌متر و ماسه با قطر ذرات بین 0.05 تا 2 میلی‌متر). همچنین Sepaskhah و همکاران (۲۰۱۰) رابطه دیگری را به عنوان مدل فیزیکی ارائه نمودند که در آن سطح ویژه خاک به صورت رابطه (۳) بیان شد:

$$SSA = f_c \times SSA_{cl} + f_{si} \times SSA_{si} + f_{sa} \times SSA_{sa} \quad (3)$$

در رابطه فوق SSA سطح ویژه کل نمونه و f_{cl} ، f_{si} و f_{sa} به ترتیب درصد ذرات رس، سیلت و ماسه و SSA_{cl} ، SSA_{si} و SSA_{sa} به ترتیب سطح ویژه بخش رس، سیلت و ماسه می‌باشد. با فرض شکل ذرات کروی برای شن و سیلت و شکل تخت برای رس روابط (۴) و (۵) ارائه گردید (r شعاع متوسط ذرات سیلت و ماسه و z ارتفاع ذره رس):

$$SSA_s = \frac{3}{\rho_s r} \quad (4)$$

$$SSA_{cl} = \frac{2}{\rho_s z} \quad (5)$$

در روابط فوق SSA_s سطح ویژه ذرات شن و سیلت و SSA_{cl} سطح ویژه ذرات رس می‌باشد. همچنین Sepaskhah و همکاران جرم ویژه ذرات جامد خاک (ρ_s) را ثابت و معادل 2650 کیلوگرم بر متر مکعب فرض کردند و با توجه به وجود کانی رس ایلیت^۸ و

(۱۹۶۴). سطح ویژه خاک به دلیل تفاوت در ترکیب کانی، وجود ترکیبات آلی و توزیع اندازه و شکل ذرات دارای طیف گسترده‌ای است (Carter و همکاران، ۱۹۸۶). سطح ویژه با کاهش اندازه ذرات افزایش یافته و این امر به خصوص برای کانی‌های رس قابل ملاحظه است (Holtz و Kovacs، ۱۹۸۱). کانی‌های غیرقابل تورم مانند کائولینیت^۹، تنها دارای سطح خارجی هستند، در حالی که کانی‌های تورم‌پذیر مانند مونت موریلونیت^{۱۰} علاوه بر سطح خارجی دارای سطوح داخلی وسیعی نیز می‌باشد (Cerato، ۲۰۰۱).

به‌طور کلی SSA با اندازه‌گیری مقداری از یک مایع یا گاز (مانند بخار آب، نیتروژن و مایعات آلی) که برای پوشش سطح ذرات موردنیاز است تعیین می‌شود. سطح ویژه با توجه به موادی که در هر روش اندازه‌گیری، استفاده می‌شود بسیار متغیر است (Yukselen و Kaya، ۲۰۰۶). مقدار سطح ویژه کل اندازه‌گیری شده به روش اتیلن گلیکول برای رس تورم‌پذیر بین $800 - 560$ m^2/g (Heilman و همکاران، ۱۹۶۵) و مقدار سطح ویژه خارجی اندازه‌گیری شده به روش BET-N₂ بین $20 - 10$ m^2/g اندازه‌گیری می‌شود (Altin و همکاران، ۱۹۹۹). علت این امر را می‌توان به غیر قطبی بودن مولکول‌های گاز N₂ نسبت داد که موجب می‌شود این مولکول‌ها فقط جذب سطوح خارجی ذرات شده و به سطوح داخلی نفوذ ننمایند (Carter و همکاران، ۱۹۸۶).

ذرات آلی و غیر آلی نیز هر دو در مقدار SSA تأثیرگذار هستند؛ اما ارزیابی تأثیر بخش غیر آلی، از مواد آلی به صورت مجزا ممکن نیست. این به خاطر واکنش بین ماده آلی و ماده به کار رفته در اندازه‌گیری سطح ویژه می‌باشد. به عنوان مثال اتیلن گلیکول منو اتیل اتر و مولکول‌های قطبی دیگر که برای اندازه‌گیری سطح ویژه به کار می‌روند، سطح مواد آلی را پوشانده و موجب واکنش شیمیایی و انحلال کلئیدهای آلی می‌گردند (Pennel و همکاران، ۱۹۹۵).

Ersahin و همکاران (۲۰۰۶) ارتباط بعد فراکتالی توزیع اندازه ذرات، DS^* را با سطح ویژه و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC)^۸ برای ۲۲ خاک با بافت متفاوت (از بافت لوم^۹ شنی تا رسی) مشتق شده از مواد مادری مختلف در کشور ترکیه بررسی نمودند. روابط بین DS با SSA و CEC توسط معادله درجه دوم توصیف شد. نتایج نشان داد که بعد فرکتال می‌تواند به عنوان یک شاخص مناسب در برآورد SSA و CEC استفاده شود.

Hepper و همکاران (۲۰۰۶)، ۱۴ نمونه خاک از منطقه نیمه-خشک در کشور آرژانتین را مورد آزمایش قرار دادند. نمونه‌های مورد استفاده شامل نمونه‌های طبیعی حاوی خاکستر آتشفشانی و نمونه‌های فاقد خاکستر بود. نتایج نشان داد SSA اندازه‌گیری شده

8. Cation Exchange Capacity
9. Loam
10. Elite

5. Kaolinite
6. Montmorillonite
7. Surface fractal dimensions for particle-size distributions

(Ersahin و همکاران، ۲۰۰۶) و (Hepper و همکاران، ۲۰۰۶) فاقد کانی‌های رسی تورم‌پذیر است در این تحقیق نیز از نمونه‌های فاقد کانی‌های رسی تورم‌پذیر استفاده گردید. طبق استاندارد USDA این نمونه‌ها از انواع شنی تا رسی را شامل شده و دارای انواع بافت سبک و سنگین می‌باشد.

در این تحقیق از روش EGME^{۱۳} برای اندازه‌گیری سطح ویژه کل (مجموع سطوح داخلی و خارجی) بر اساس رابطه (۸) استفاده شد ((Carter و همکاران، ۱۹۸۶)). این روش سابقاً توسط محققانی مانند Ersahin و همکاران (۲۰۰۶)، Hepper و همکاران (۲۰۰۶) و Sepaskhah و همکاران (۲۰۱۰) مورد استفاده قرار گرفته است.

$$SSA = \frac{w_a}{w_s \times 0.000286} \quad (۸)$$

در رابطه فوق W_a جرم اتیلن گلیکول منواتیل^{۱۳} اتر جذب شده توسط نمونه (gr) ، W_s جرم خاک خشک شده (gr) ، SSA سطح ویژه خاک (m^2/gr) و ضریب 0.000286 جرم اتیلن گلیکول منواتیل اتر به سطح یک مترمربع و ضخامت یک لایه مولکول بر حسب گرم می‌باشد.

جهت صحت‌سنجی روابط ارائه شده از اطلاعات مقاله Ersahin و همکاران (۲۰۰۶) و Hepper و همکاران (۲۰۰۶) استفاده گردید. دلیل استفاده از داده‌های مقالات ذکر شده مشابه بودن خصوصیات خاک‌ها شامل نوع کانی‌های رسی موجود (در نمونه‌های مورد آزمایش و داده‌های صحت‌سنجی، کانی‌های رسی ایلیت و کلریت می‌باشد) همچنین کم بودن ماده آلی در خاک‌های مورد مطالعه ایشان می‌باشد. لازم به ذکر است ایشان نیز از روش EGME برای تخمین سطح ویژه استفاده نمودند.

جدول ۱- خصوصیات نمونه‌های مورد آزمایش و نمونه‌های مورد استفاده جهت صحت‌سنجی.

داده‌های آزمایش				
شاخص آماری	درصد رس	درصد سیلت	درصد ماسه	درصد مواد ارگائیک
حداکثر	۶۰	۶۰	۸۸	۳/۸
حداقل	۳	۹	۹	۰/۱۶
میانگین	۲۶٫۸	۳۳٫۲	۴۰	۲
داده‌های صحت‌سنجی (Ersahin و همکاران، ۲۰۰۶)				
حداکثر	۷۳	۶۰	۶۸	۵/۴
حداقل	۵	۱۵	۵	۰/۰۸
میانگین	۴۰/۱	۳۷/۱	۲۲/۹	۱/۷
داده‌های صحت‌سنجی (Hepper و همکاران، ۲۰۰۶)				
حداکثر	۲۷	۶۱	۸۳	۱۲/۶
حداقل	۷	۱۰	۲۰	۰/۹۹
میانگین	۱۶/۳	۳۷/۱	۴۶/۷	۲/۹

کلریت^{۱۱} ضخامت ذرات رس با فرض نسبت مساوی این دو کانی در معادله (۵)، $z=1/2$ در نظر گرفتند.

در سال ۲۰۱۳ Sepaskhah و Tafteh از بعد فرکتالی ذرات خاک جهت تخمین سطح ویژه استفاده کردند. ایشان بعد فرکتال را به کمک رابطه Zhang و Kravchenko (۱۹۹۸) محاسبه نمودند و به کمک تابع انتقالی (۶) بعد فرکتال را به اجزای بافت خاک و به‌وسیله تابع انتقالی (۷) سطح ویژه را تابعی از بعد فرکتال بیان کردند.

$$D_s = 3 - 0.118 \left[-\ln \left(\frac{CL}{100} \right) + \left(\frac{Si+Sa}{100} \right) \right] \quad (۶)$$

$$SSA = \exp(-25.06 + (10.66 \times D_s)) \quad (۷)$$

در روابط فوق CL ، Si و Sa به ترتیب درصد رس، سیلت و ماسه بوده و D_s بعد فرکتالی ذرات خاک است.

Bayat و همکاران (۲۰۱۵) از روش‌های مختلفی شامل رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی، رگرسیون درختی، شبکه عصبی مصنوعی و یک روش گروهی چندمنظوره داده جهت تخمین سطح ویژه ۱۲۷ نمونه خاک بر اساس شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی استفاده نمودند. نتایج تحقیقات ایشان نشان داد تابع انتقالی حاصل از شبکه عصبی مصنوعی بهترین تخمین را از سطح ویژه دارد. همچنین توابع شامل متغیرهای شن و ماسه، درصد رس، حد پلاستیک، حد مایع و شاخص تورم آزاد در تخمین SSA بهتر عمل می‌کنند. اندازه‌گیری سطح ویژه زمان‌بر و پرهزینه و در برخی خاک‌ها به علت زیاد بودن گچ و آهک دشوار است، در نتیجه استفاده از روش‌هایی که از داده‌های ارزان و اطلاعات ثانویه برای تخمین این پارامتر استفاده می‌کنند بسیار مفید خواهد بود (Bayat و همکاران، ۲۰۱۳) و (Arnepalli و همکاران، ۲۰۰۸).

هدف از تحقیق حاضر تسهیل در تخمین سطح ویژه کل خاک‌های با بافت سبک و سنگین با استفاده از توابع انتقالی به کمک اطلاعات حاصل از بافت خاک می‌باشد. این عمل توسط ارائه دو تابع انتقالی بر حسب خصوصیات از منحنی دانه‌بندی (میانگین هندسی قطر ذرات، شیب خط رگرسیونی لگاریتمی دانه‌بندی و ...) و بررسی دقت روابط ارائه شده توسط مقایسه آن‌ها با روابط موجود در منابع و در نهایت معرفی رابطه مناسب‌تر صورت گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲۳ نمونه خاک کشاورزی از نقاط مختلف شهر کرمانشاه تهیه شد. از آنجاکه تمام نمونه‌های به کار رفته جهت مقایسه (Sepaskhah، ۲۰۱۰) و (Tafteh و Sepaskhah، ۲۰۱۳) و اطلاعات نمونه‌های به کار رفته جهت صحت‌سنجی نتایج

با لگاریتم‌گیری طبیعی از رابطه بالا، رابطه خطی (۱۶) حاصل می‌شود:

$$\ln [w(\leq R)] = \ln C + B \times \ln R \quad (16)$$

مطالعات نشان داده بعد فرکتال با سطح ویژه خاک همبستگی دارد (Ersahin و همکاران، ۲۰۰۶)، اما اندازه‌گیری بعد فرکتال مشکل و زمان‌بر است، لذا در این تحقیق سعی شده شیب خط رگرسیونی منحنی لگاریتمی دانه‌بندی (مؤلفه B در رابطه (۱۶)) به سطح ویژه ذرات خاک مرتبط گردد. از آنجاکه منحنی دانه‌بندی نمونه‌ها وجود نداشت؛ برای تخمین منحنی دانه‌بندی از روی درصد مقادیر رس، سیلت و شن از روش ارائه‌شده توسط Skaggs و همکاران (۲۰۰۱) با به‌کارگیری روابط زیر استفاده گردید:

$$\beta_1 = \frac{1}{\ln \frac{r_1 - r_0}{r_2 - r_0}} \quad (17)$$

$$\beta_2 = \beta_1 \ln \frac{r_1 - r_0}{r_0} \quad (18)$$

$$V = \ln \frac{(cl+si)^{-1}-1}{(cl)^{-1}-1} \quad (19)$$

$$Z = \ln \frac{(cl+si+sa)^{-1}-1}{cl^{-1}-1} \quad (20)$$

$$C = \beta_1 \ln \frac{v}{z} \quad (21)$$

$$u = \frac{(-v)^{1-\beta_2}}{-z^{-\beta_2}} \quad (22)$$

$$W = \frac{1}{1+(cl^{-1}-1)\exp\{-u(R-1)^c\}} \quad (23)$$

که در آن‌ها cl کسر مربوط به ذرات کوچک‌تر از رس خاک (برحسب اعشار)، $cl+si$ کسر مربوط به ذرات کوچک‌تر از سیلت خاک به صورت تجمعی (برحسب اعشار)، $cl+si+sa$ کسر مربوط به ذرات کوچک‌تر از اندازه یا قطر در نظر گرفته شده از شن خاک (برحسب اعشار)، R شعاع ذرات خاک برحسب میکرومتر و w کسر مربوط به ذرات کوچک‌تر از شعاع R می‌باشد. با استفاده از معادله (۲۳) می‌توان از روی مقادیر رس، سیلت و ماسه، مقدار W را برای هر اندازه شعاع R محاسبه و منحنی دانه‌بندی خاک را رسم کرد. مقادیر r_0 ، r_1 و r_2 توسط Skaggs و همکاران به ترتیب برابر ۱، ۲۵ و ۱۲۵ میکرومتر که حد نهایی شعاع ذرات رس، سیلت و شن ریز می‌باشد در نظر گرفته شد.

با توجه به آنچه بیان شد ابتدا به کمک روش ارائه‌شده (روابط (۱۷) تا (۲۳)) برای هر یک از ۲۳ نمونه مورد آزمون منحنی دانه‌بندی تخمین زده شد و سپس مؤلفه B محاسبه گردید و در نهایت سطح ویژه به کمک معادله (۲۴) به صورت تابعی نمایشی از B ارائه شد:

برای صحت‌سنجی نتایج از معیارهای آماری خطای نسبی^{۱۴} و ریشه میانگین مربعات خطا^{۱۵} استفاده گردید:

$$RE = \frac{1}{100} \sum \frac{O_i - P_i}{O_i} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (O_i - P_i)^2} \quad (10)$$

در روابط فوق RE خطای نسبی، $RMSE$ ریشه میانگین مربعات خطا، O_i و P_i به ترتیب مقادیر سطح ویژه اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده و N تعداد نمونه‌های مورد آزمایش می‌باشد. در ادامه دو تابع انتقالی برای تخمین سطح ویژه ارائه می‌شود.

تابع انتقالی (۱) با استفاده از نرم‌افزار SPSS و با رگرسیون گیری غیرخطی ۱۶ سطح ویژه به شکل تابعی از درصد رس (Cl) و انحراف استاندارد هندسی قطر ذرات (σ_g) به صورت رابطه (۱۱) ارائه گردید:

$$SSA = a \times Cl^b + c \times \sigma_g^d + e \quad (11)$$

در رابطه فوق a ، b ، c ، d و e مقادیر ثابت معادله می‌باشد. طبق مطالعات Shirazi و Boersma (۱۹۸۴) توصیف ریاضی مؤلفه انحراف استاندارد هندسی قطر ذرات خاک (σ_g) به صورت زیر است:

$$\sigma_g = \exp a \quad (12)$$

$$a^2 = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln^2 M_i - b^2 \quad (13)$$

$$b = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i \quad (14)$$

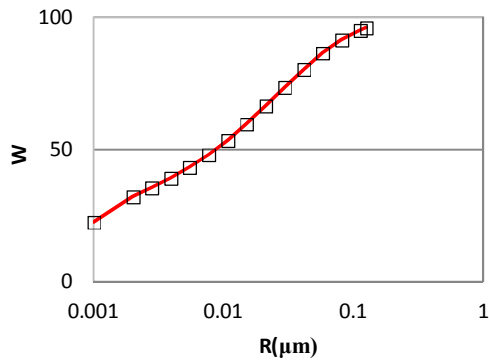
در روابط فوق n تعداد گروه‌های مجزای خاک (به عنوان مثال رس، سیلت و ماسه) و f درصد کل توده خاک در هر گروه است. بر اساس Krumbien و Pettijohn (۱۹۳۸)، Altin و همکاران (۱۹۹۹)، قطر ذرات برای هر گروه (M) برابر میانگین حسابی حد بالا و پایین آن گروه در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس طبق استاندارد USDA خاک به ۳ گروه رس، سیلت و ماسه تقسیم گردید.

تابع انتقالی (۲) این تابع حاصل توزیع اندازه ذرات خاک است. بر اساس مطالعات Zhang و Kravchenko (۱۹۹۸) رابطه بین جرم تجمعی ذرات با شعاع کوچک‌تر از R برابر است با:

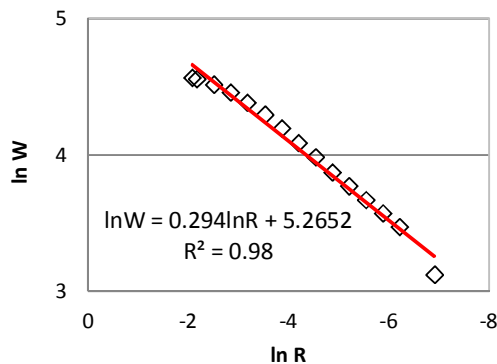
$$w(\leq R) = \int_{R_{min}}^R W(R) dR = C \times R^B \quad (15)$$

که در آن B تابعی درجه دوم از بعد فرکتال، D_s ، ذرات خاک می‌باشد، $W(R)$ جرم تجمعی ذرات خاک با شعاع R ، c ثابت معادله و R_{min} حداقل قطر ذرات خاک است که معادل صفر فرض می‌شود.

۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشد. پارامتر خطای نسبی (RE) برای توابع انتقالی ۱ و ۲ به ترتیب ۱/۲ و ۳/۰ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای توابع مذکور به ترتیب ۸/۵ m²/gr، ۱۱/۲ m²/gr می‌باشد.

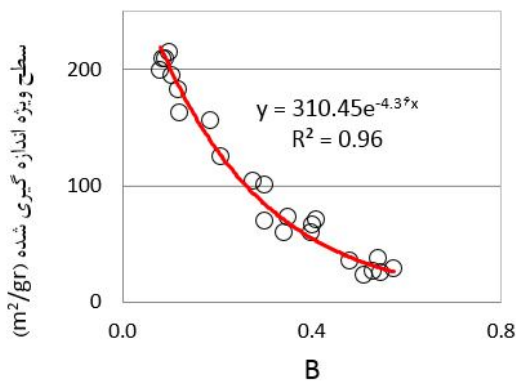


(الف)



(ب)

شکل ۱- الف) منحنی دانه‌بندی تولید شده، ب) خط رگرسیونی منحنی لگاریتم طبیعی دانه‌بندی تولید شده



شکل ۲- رابطه سطح ویژه اندازه‌گیری شده (SSA) و شیب خط رگرسیونی منحنی لگاریتمی دانه‌بندی ذرات خاک (B)

$$SSA = a \times e^{c \times B} \quad (24)$$

در رابطه فوق a و c ضرایب ثابت معادله می‌باشند.

۳- نتایج

در جدول (۲) اطلاعات نمونه‌های مورد آزمایش و مقادیر سطح ویژه اندازه‌گیری شده به روش EGME آورده شده است. همان‌طور که مشخص است بافت شنی کمترین و بافت رسی بیشترین مقادیر سطح ویژه را به خود اختصاص می‌دهد. تابع انتقالی (۱) رابطه بین مقادیر اندازه‌گیری شده سطح ویژه، درصد رس (Cl) و انحراف استاندارد هندسی قطر ذرات (σ_g) توسط رگرسیون‌گیری به صورت معادله (۲۵) به دست آمد:

$$SSA = 6.77 \times Cl^{0.87} + 45.5 \times \sigma_g^{-1.1} - 4.8 \quad (25)$$

در این رابطه Cl ، σ_g و SSA به ترتیب برحسب درصد و (mm) و (m²/gr) می‌باشد.

تابع انتقالی (۲) همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره گردید در این تابع ابتدا برای تمام نمونه‌ها منحنی دانه‌بندی به روش Skaggs و همکاران (۲۰۰۱) تخمین زده شد. به عنوان مثال برای نمونه‌ای که حاوی ۲۳ درصد رس، ۴۷ درصد سیلت و ۳۰ درصد شن می‌باشد (جدول (۲)، ردیف ۶)، تابع منحنی دانه‌بندی به شکل رابطه (۲۶) به دست آمد.

$$W = \frac{1}{1 + 3.4 \times \exp\{-0.48 \times (R-1)^{0.46}\}} \quad (26)$$

در رابطه فوق W و R به ترتیب برحسب درصد و میکرومتر می‌باشد. در شکل (۱-الف) منحنی دانه‌بندی (رابطه (۲۶)) و در شکل (۱-ب) خط رگرسیونی لگاریتم طبیعی آن ارائه شده است. شیب خط رگرسیونی عبوری $B=0.294$ می‌باشد.

مطابق شکل (۲) با رسم مقادیر B در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده سطح ویژه برای ۲۳ نمونه مورد آزمایش، سطح ویژه ذرات خاک به صورت رابطه (۲۷) بیان شد:

$$SSA = 311.1 e^{-4.35 \times B} \quad (27)$$

در این رابطه SSA برحسب (m²/gr) و B فاقد بعد می‌باشد. در معادله (۲۸) مؤلفه B به صورت تابعی از درصد ذرات تشکیل‌دهنده نشان داده شده است. در این معادله Si ، Sa و Cl به ترتیب درصد ماسه، سیلت و رس موجود در خاک برحسب اعشار می‌باشد.

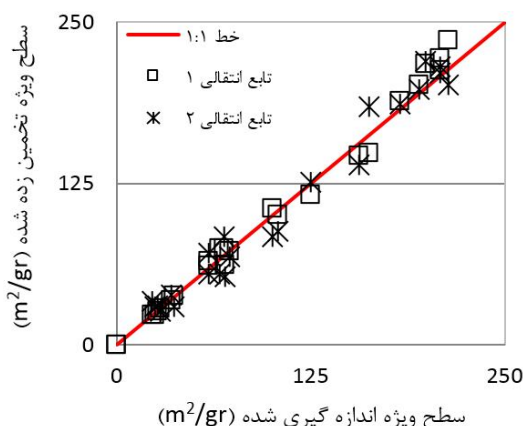
در شکل (۳) برای نمونه‌های مورد آزمایش مقادیر اندازه‌گیری شده سطح ویژه در مقابل مقادیر تخمین زده شده به کمک توابع انتقالی ۱ و ۲ ارائه شده است. برای این نمونه‌ها همبستگی مقادیر مشاهداتی و محاسباتی برای هر دو مدل فوق در سطح احتمال

جدول ۲- مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده (محاسبه شده) برای نمونه‌های مورد آزمایش

ردیف	درصد ذرات تشکیل دهنده			بافت خاک (USDA)	انحراف استاندارد هندسی قطر ذرات (σ_g)	شیب خط رگرسیونی منحنی لگاریتمی دانه‌بندی (B)	SSA (m ² /gr)
	ماسه	سیلت	رس				
۱	۸۸	۹	۳	شنی	۳/۷	۰/۵۴۶	۲۵/۳
۲	۸۳	۱۰	۷	شنی لومی	۵/۶	۰/۵۷۲	۲۷/۲
۳	۷۹	۱۳	۸	شنی لومی	۶/۳	۰/۵۱۰	۲۲/۸
۴	۹	۳۶	۵۵	رسی	۷/۹	۰/۰۹۹	۲۱۳/۶
۵	۴۹	۳۳	۱۸	لومی	۱۰/۱	۰/۲۸۵	۱۰۰/۶
۶	۳۰	۴۷	۲۳	لومی	۹/۳	۰/۳۹۴	۶۸/۵
۷	۴۳	۴۲	۱۵	لومی	۸/۶	۰/۳۹۸	۶۶/۷
۸	۷۰	۲۵	۵	لومی شنی	۵/۶	۰/۵۷۰	۲۷/۸
۹	۶۰	۲۵	۱۵	لومی شنی	۹/۵	۰/۴۱۱	۶۹/۸
۱۰	۲۴	۳۹	۳۷	لومی رسی	۱۰/۹	۰/۱۲۲	۱۶۳/۶
۱۱	۲۲	۶۰	۱۸	لومی سیلتی	۷/۰	۰/۳۳۸	۵۹/۹
۱۲	۱۳	۶۰	۲۷	لومی سیلتی	۶/۹	۰/۳۱۰	۱۲۴/۷
۱۳	۷۰	۲۴	۶	لومی شنی	۵/۹	۰/۵۴۱	۳۶/۴
۱۴	۵۶	۳۵	۹	لومی شنی	۷/۲	۰/۴۷۸	۳۵/۲
۱۵	۳۵	۴۸	۱۷	لومی	۸/۴	۰/۳۵۲	۷۲/۸
۱۶	۴۸	۳۶	۱۶	لومی	۹/۳	۰/۳۹۸	۵۹/۹
۱۷	۳۶	۳۹	۲۵	لومی	۱۰/۷	۰/۲۷۹	۱۰۳/۷
۱۸	۱۰	۵۳	۳۷	لومی رسی سیلتی	۷/۳	۰/۱۶۸	۱۵۶/۲
۱۹	۱۸	۳۱	۵۱	رسی	۱۰/۷	۰/۱۰۵	۱۹۵/۷
۲۰	۱۰	۴۳	۴۷	رسی سیلتی	۷/۹	۰/۱۱۹	۱۸۱/۵
۲۱	۲۱	۲۲	۵۷	رسی	۱۲/۲	۰/۰۸۴	۲۰۹/۳
۲۲	۲۹	۱۵	۵۶	رسی	۱۵/۳	۰/۰۸۷	۱۰۸/۶
۲۳	۱۸	۲۲	۶۰	رسی	۱۱/۲	۰/۰۸۱	۱۹۸/۱

(۲۰۱۰) و مدل فرکتالی برگرفته از Sepaskhah و Tafteh (۲۰۱۳) در مقابل مقادیر اندازه‌گیری شده توسط Ersahin و همکاران (۲۰۰۶) و Hepper و همکاران (۲۰۰۶) در شکل (۴) آورده شده است. با توجه به این شکل به نظر می‌رسد در مدل فیزیکی Sepaskhah و همکاران (۲۰۱۰) و مدل فرکتالی Sepaskhah و Tafteh (۲۰۱۳) با افزایش سطح مخصوص انحراف از مقادیر مشاهداتی افزایش می‌یابد.

با توجه به شکل (۵) پارامتر خطای نسبی (RE) برای توابع انتقالی ۱ و ۲، مدل‌های فیزیکی و توانی برگرفته از Sepaskhah و همکاران (۲۰۱۰) و مدل فرکتالی برگرفته از Sepaskhah و Tafteh (۲۰۱۳) به ترتیب ۱۱/۴، ۱۰/۶، ۲۰/۵، ۲۴/۷، ۳۰/۴ و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای مدل‌های مذکور به ترتیب ۳۲/۶ m²/gr، ۲۹/۸ m²/gr، ۶۹/۴ m²/gr و ۱۲۴/۵ m²/gr می‌باشد. برای هر دو داده‌های آزمایش و صحت‌سنجی به ترتیب توابع انتقالی ۱ و ۲ دارای بالاترین دقت است. دقت پایین مدل فیزیکی را می‌توان به انحراف شکل استوانه‌ای و کروی فرض شده برای ذرات خاک نسبت به شکل واقعی آن‌ها دانست. فرض نسبت مساوی دو کانی ایلیت و کلریت



شکل ۳- مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر تخمین زده شده سطح ویژه برای نمونه‌های مورد آزمایش توسط توابع انتقالی ۱ و ۲

مقادیر سطح ویژه به دست آمده توسط توابع انتقالی ۱ و ۲، مدل‌های فیزیکی و توانی برگرفته از Sepaskhah و همکاران

با در نظر گرفتن مقادیر RE و RMSE می‌توان به دقت بالاتر تابع انتقالی حاصل از شیب خط رگرسیونی منحنی لگاریتمی دانه‌بندی خاک صحنه گذاشت. ضریب همبستگی پیرسون^{۱۷} بین نتایج حاصل از این تابع و مقادیر مشاهداتی توسط Ersahin و همکاران (۲۰۰۶) و Hepper و همکاران (۲۰۰۶)، ۰/۹۱ می‌باشد که نشان دهنده دقت مناسب این تابع است. همچنین بین مقادیر مشاهداتی و محاسباتی همبستگی معنی‌داری در سطح احتمال ۰/۰۱ وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج تحقیق حاضر برای تخمین سطح ویژه در انواع بافت سبک و سنگین با شرط عدم وجود کانی‌های تورم‌پذیر رسی در شرایطی که فقط درصد ذرات تشکیل‌دهنده (درصد شن، سیلت و رس) موجود است می‌توان از تابع انتقالی حاصل از شیب خط رگرسیونی منحنی لگاریتمی دانه‌بندی توسعه‌یافته به روش توسط Skaggs و همکاران (۲۰۰۱) استفاده نمود. نتایج صحت-سنجی حاکی از دقت بالای تابع مذکور در مقایسه با توابع ارائه‌شده توسط Sepaskhah و همکاران (۲۰۱۰) و Tafteh و Sepaskhah (۲۰۱۳) می‌باشد. در تحقیقات آینده پیشنهاد می‌شود مطالعه بر روی رابطه بین سطح ویژه ذرات و خصوصیات فیزیکی نمونه‌های رسی تورم‌پذیر مانند بنتونیت انجام و همچنین تأثیر این مؤلفه در ضریب آب‌گذری نمونه‌های اشباع و غیراشباع بررسی شود.

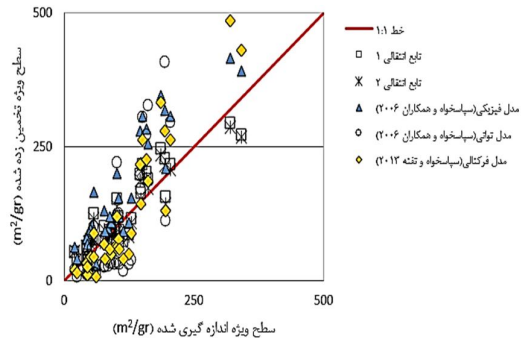
۵- قدردانی

بدین‌وسیله از همکاران دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز همچنین مدیریت و کارشناسان محترم پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری به دلیل همکاری ارزشمندی که در انجام این پروژه پژوهشی داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

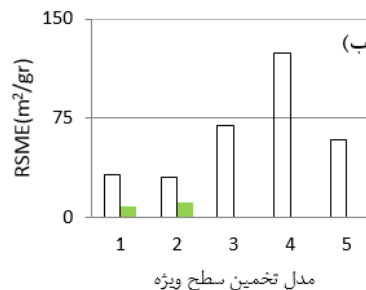
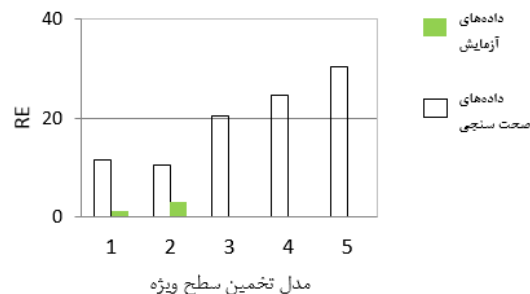
۶- مراجع

- Aksoy Y, Kaya A, "Method dependency of relationships between specific surface area and soil physicochemical properties", Applied Clay Science, 2010, 50,182-190.
- Altin O, Ozbelge HO, Dogu T, "Effect of pH in an aqueous medium on the surface area, pore size distribution, density, and porosity of montmorillonite", Journal of Colloid Interface Science, 1999, 217, 19-27.
- Arnepalli DN, Shanthakumar S, Hanumantha RB, Singh DN, "Comparison of methods for determining specific-surface area of fine-grained soils", Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26 (2), 121-132.
- Bayat H, Ebrahimi E, Ersahin S, Hepper E, Singh D, Amer A, Yukselen-Aksoy Y, "Analyzing the effect of various

در تمام نمونه‌ها و مقدار مفروض $\rho_s = 1650 \text{ kg/m}^3$ برای نمونه‌های مختلف که از مقدار واقعی متفاوت می‌باشد نیز عامل ایجاد خطا در این روش است. در مورد مدل فرکتالی Sepaskhah و Tafteh (۲۰۱۳)، ایشان در رابطه خود از بعد فرکتالی استفاده کرده اما آن را اندازه‌گیری نکرده بلکه به کمک روش Zhang و Kravchenko (۱۹۹۸) تخمین زدند که موجب افزایش خطا در رابطه ارائه‌شده می‌گردد.



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر تخمین زده شده سطح ویژه برای نمونه‌های Ersahin و همکاران (۲۰۰۶) و Hepper و همکاران (۲۰۰۶) توسط روش‌های مختلف



راهنما) ۱- تابع انتقالی ۱، ۲- تابع انتقالی ۲، ۳- مدل فیزیکی (Sepaskhah و همکاران، ۲۰۱۰)، ۴- مدل توانی (Sepaskhah و همکاران، ۲۰۱۰)، ۵- مدل فرکتالی (Sepaskhah و Tafteh، ۲۰۱۰)

شکل ۵- الف) خطای نسبی (RE)، ب) ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) برای روابط مختلف

17. Pearson correlation coefficient

- Rawlins BG, Turner G, Mounteney I, Wildman G, "Estimating specific surface area of fine stream bed sediments from geochemistry", *Applied Geochemistry*, 2010, 25, 1291-1300.
- Sepaskhah AR, Tafteh A, "Pedotransfer function for estimation of soil-specific surface area using soil fractal dimension of improved particle-size distribution", *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, 59, (1), 93-103.
- Sepaskhah AR, Tabarzad A, Fooladmand HR, "Physical and empirical models for estimation of specific surface area of soils", *Agronomy and Soil Science Journal*, 2010, 56 (3), 325-335.
- Shirazi MA, Boersma L, "A unifying quantitative analysis of soil texture", *Soil Science Society of American Journal*, 1984, 48, 142-147.
- Skaggs TH, Arya LM, Shouse PJ, Mohanty BP, "Estimating particle-size distribution from limited soil texture data", *Soil Science Society of American journal*, 1984, 65, 1038-1044.
- Suess MJ, "Surface Area Measurements and Adsorption of Soils", *Journal of the Irrigation and Drainage Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 1964, IR-1, 87-108.
- Tuller M, Or D, "Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents", *Water Resource Research*, 2005, 41, 1-6.
- Utkaeva VF, "Specific surface area and wetting heat of different soil types in European Russia", *Eurasian Soil Science*, 2007, 40 (11), 1193-1202.
- Voronin AD, "Surface phenomena in soils and directed changes in soil properties", *Doklady Vysshei Shkoly [Seria] Biologicheskie Nauki*, 1975, 12, 7-12.
- Yukselen Y, Kaya A, "Comparison of methods for determining specific surface area of soils", *Journal of Geotech and Geoenvironmental Engineering, Geoenviron*, 2006, 132, 931-936.
- Yukselen Y, Kaya A, "Suitability of the methylene blue test for surface area, cation exchange capacity and swell potential determination of clayey soils", *Engineering Geology*, 2008, 102, 38-45.
- soil properties on the estimation of soil specific surface area by different methods", *Applied Clay Science*, 2015, 116, 129-140.
- Bayat H, Ersahin S, Hepper EN, "Improving estimation of specific surface area by artificial neural network ensembles using fractal and particle size distribution curve parameters as predictors. *Environ*", *Model. Assess*, 2013, 18, 605-614.
- Carter DL, Mortland MM, Kemper WD, "Specific Surface", *Methods of Soil Analysis*, 1986, Chapter 16, Agronomy No. 9, Part 1, 2nd Ed., American Society of Agronomy.
- Cerato A, "Influence of specific surface area on geotechnical characteristics of fine-grained soils", *Master of Science Thesis, University of Massachusetts, USA*, 2001.
- Dietel J, Laurence N, Warr L, Bertmer M, Steudel A, Grathoff G, Emmerich K, "The importance of specific surface area in the geopolymerization of heated illitic clay", *Applied Clay Science*, 2017, 139, 99-107.
- Dolinar B, "A simplified method for determining the external specific surface area of non-swelling finegrained soils", *Applied Clay Science Journal*, 2012, 64, 34-37.
- Ersahin S, Gunal H, Kutlu T, Yetgin B, Coban S, "Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution", *Geoderma Journal*, 2006, 136, 588-597.
- Heilman MD, Carter DL, Gonzalez CL, "The ethylene glycol monoethyl ether (EGME) technique for determining soil-surface area", *Soil Science*, 1965, 100, 409-413.
- Heister K, "How accessible is the specific surface area of minerals? A comparative study with Al-containing minerals as model substances", *Geoderma*, 2016, 263, 8-15.
- Hepper EN, Buschiazzi DE, Hevia GG, Urioste A, Anton L, "Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents", *Geoderma*, 2006, 135, 216-227.
- Holtz RD, Kovacs WD, "An Introduction to Geotechnical Engineering", *Prentice Hall*, 1981, New Jersey.
- Kravchenko A, Zhang R, "Estimating the soil water retention from particle-size distribution: a fractal approach", *Soil Science*, 1998, 163, 171-179.
- Krumbien WC, Pettijohn FJ, "Manual of sedimentary petrography", *Appleton-Century Company, New York*. 1938.
- Monem A, Amer M, "Moisture adsorption capacity and surface area as deduced from vapour pressure isotherms in relation to hygroscopic water of soils", *Biologia*, 2009, 64 (3), 516-521.
- Pennell KD, Boyd SA, Abriola LM, "Surface area of soil organic matter reexamined", *Soil Science Society of American journal*, 1995, 59, 1012-1018.
- Petersen LW, Moldrup P, Jacobsen OH, and Rolston DE, "Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties", *Soil Science Journal*, 1996, 161 (1), 9-21.

EXTENDED ABSTRACT

Estimation of Specific Surface Area of Soils Using Pedotransfer Functions

Mohammad Tajbakhsh ^{a,*}, Manoochehr Fathi Moghadam ^b, Nader Ebrahimi ^c

^a Water Resource Authority, Kermanshah, Iran

^b School of Hydraulic Structures, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

^c Soil Conservation and Watershed Management Institute, Tehran, Iran

Received: 24 February 2017; Accepted: 22 September 2018

Keywords:

Pedotransfer function, PSD curve, Slope of linear regression, Specific surface area.

1. Introduction

The term "Specific Surface Area" (SSA) refers to the area per unit weight of soil. SSA is a fundamental soil property that can be used as an indicator of soil behavior (Utkaeva, 2007) to explain many of the physical and chemical phenomena of the soil: including fertility-determining components (such as the water holding capacity, the adsorption of plant nutrients, and the amount of organic matter) (Voronin, 1975). Measurement of the specific surface area is time-consuming and relatively expensive; therefore, its estimation by routinely measured soil variables is preferred. In the present paper two pedotransfer functions for estimating of total SSA (including external and internal specific surface area) was presented, one a multivariate pedotransfer function based on the standard deviation of the diameter of soil particles and clay percent and second an exponential pedotransfer function based on the slope of linear regression equation of logarithmic PSD Curve.

2. Methodology

Twenty-three agricultural samples were collected from different locations in Kermanshah province. Soil textures were loamy sand, sandy loam, silt loam, and silty clay loam thus ranging from light to heavy textures. The specific surface area of the soil samples was determined additionally using ethylene glycol monoethyl ether (EGME method) as described by Carter et al. (1986). Two pedotransfer functions for estimating of total SSA were applied:

2.1. Pedotransfer function no. 1

At first, SSA is estimated by a pedotransfer function based on the geometric mean of the soil particle diameter as follows:

$$SSA = a \times Cl^b + c \times \sigma_g^d + e \quad (1)$$

Where d_g is the geometric mean diameter of soil particles, Cl is clay content, and a, b, c, d and e are constants. The geometric mean diameter of soil particles for each soil is determined by using the proposed equation by Shirazi and Boersma (1984) as follows:

* Corresponding Author

E-mail addresses: tajbakhsh_md@yahoo.com (Mohammad Tajbakhsh), fathi49@gmail.com (Manoochehr Fathi Moghadam), nebrahimi81@yahoo.com (Nader Ebrahimi).

$$\sigma_g = \exp a \tag{2}$$

$$a^2 = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln^2 M_i - b^2 \tag{3}$$

$$b = 0.01 \sum_{i=1}^n f_i \ln M_i \tag{4}$$

2.2. Pedotransfer function no. 2

According to Kravchenko and Zhang (1998), the relationship between the cumulative mass of soil particles of radius R is as follows:

$$w(\leq R) = \int_{R_{min}}^R W(R)dR = C \times R^B \tag{5}$$

Where B is a function of the fractal dimension of the pore-solid interface, $W(R)$ is the soil mass of particle radius R , C is a constant, and R_{min} is the radius of the soil particles, which is assumed to be zero. Taking a natural logarithm of Equation (5) the following is obtained:

$$\ln [w(\leq R)] = \ln C + B \times \ln R \tag{6}$$

Studies have shown the fractal dimension associated with surface soil (Ersahin et al. 2006), but measurement of fractal dimension is time-consuming and difficult; therefore in this study, we tried to relate the slope of the linear regression of logarithmic PSD (component B on 6) and SSA by an exponential function:

$$SSA = a \times e^{c \times B} \tag{7}$$

Where a and c are constant. Also, particle size distribution curves were predicted by Skaggs et al. (2001) method. For validation of the so-called pedotransfer functions, data presented by Ersahin et al. (2006) and Hepper et al. (2006) were used.

3. Results and discussion

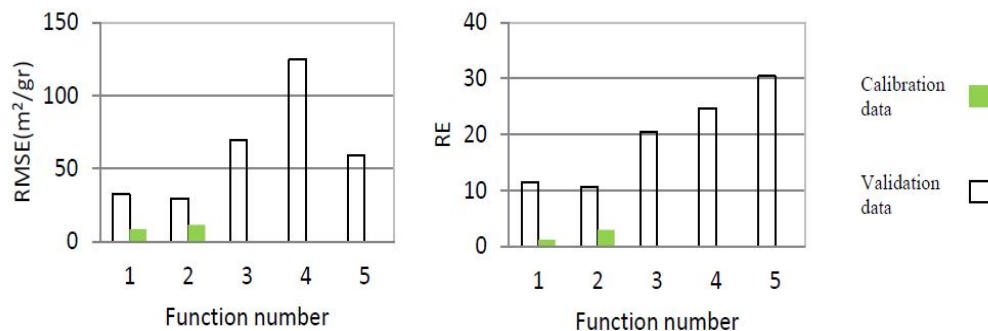
By applying the calibration data, the first and second pedotransfer functions achieve as bellow:

$$SSA = 6.77 \times Cl^{0.87} + 45.5 \times \sigma_g^{-1.1} - 4.8 \tag{8}$$

$$SSA = 311.1 e^{-4.35 \times B} \tag{9}$$

Where SSA is the specific surface area of soils (m²/gr), d_g is the geometric mean diameter of soil particles, Cl is clay content and B is the slope of the linear regression of logarithmic PSD.

The pedotransfer functions were validated, and it is concluded that they are able to predict the values of SSA accurately. The comparison of the pedotransfer functions performance with other methods indicated that both pedotransfer functions are superior to the models presented by Sepaskhah et al. (2010) and Sepaskhah and Tafte (2013) in the determination of SSA (Fig. 1).



Function number: 1- Pedotransfer function no. 1, 2- Pedotransfer function no. 2, 3-Physical model (by Sepaskhah et al. 2010) 4- Power function (by Sepaskhah et al. 2010), 5- Fractal function (by Sepaskhah and Tafteh, 2013).

Fig. 1. a) Root mean square error (RMSE), b) Relative error (RE) for different functions

4. Conclusions

Two pedotransfer functions are presented for estimation of specific surface area (SSA). One a multivariate pedotransfer function based on the standard deviation of the diameter of soil particles and clay percent, and the second one a power pedotransfer function based on the slope of linear regression equation of logarithmic PSD curve. In addition, a different set of data was used to validate the calibrated models. From statistical analysis, it is indicated that they are able to predict SSA accurately.

5. References

- Carter DL, Mortland MM, Kemper WD, "Specific Surface", Methods of Soil Analysis, 1986, Chapter 16, Agronomy 9, Part 1, 2nd Ed., American Society of Agronomy.
- Ersahin S, Gunal H, Kutlu T, Yetgin B, Coban S, "Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution", Geoderma Journal, 2006, 136, 588-597.
- Hepper EN, Buschiazzo DE, Hevia GG, Urioste A, Anton L, "Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents", Geoderma, 2006, 135, 216-227.
- Kravchenko A, Zhang R, "Estimating the soil water retention from particle-size distribution: a fractal approach", Soil Science, 1998, 163, 171-179.
- Sepaskhah AR, Tafteh A, "Pedotransfer function for estimation of soil-specific surface area using soil fractal dimension of improved particle-size distribution", Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, 59 (1), 93-103.
- Sepaskhah AR, Tabarzad A, Fooladmand HR, "Physical and empirical models for estimation of specific surface area of soils", Agronomy and Soil Science, 2010, 56 (3), 325-335.
- Shirazi MA, Boersma L, "A unifying quantitative analysis of soil texture", Soil Science Society of American journal, 1984, 48, 142-147.
- Utkaeva VF, "Specific surface area and wetting heat of different soil types in European Russia", Eurasian Soil Science, 2007, 40 (11), 1193-1202.
- Voronin AD, "Surface phenomena in soils and directed changes in soil properties", Doklady Vysshei Shkoly [seriia] Biologicheskie Nauki, 1975, 12, 7-12.