

بررسی پارامتریک ارتباط بین سطح ویژه ذرات خاک با منحنی مشخصه رطوبتی آن

امیر بهرامی^۱، حسینعلی بهرامی^{۲*}، شاهرخ زند پارسا^۳، محمد محمودیان شوشتری^۴ و محمد بای‌بوردی^۵

چکیده

سطح ویژه فاکتوری است که می‌تواند ویژگی‌های ریزمقیاس را به ویژگی‌های درشت مقیاس فیزیکی و شیمیایی در محیط‌های متخلخل ارتباط دهد. منحنی مشخصه رطوبتی خاک یکی از ویژگی‌های هیدرولیکی و بنیادی آن است که بیان کمی آن برای مدل‌سازی جریان آب، جذب آب با ریشه گیاهان و انتقال نمک‌ها در بخش غیراشباع خاک مهم است. در این مطالعه اثر سطح ویژه ذرات خاک بر منحنی مشخصه رطوبتی آن در ۳۰ نمونه خاک بررسی شد. سطح ویژه ذرات خاک با روش BET اندازه‌گیری شد. برای مشخص کردن منحنی مشخصه رطوبتی خاک، از دستگاه صفحات فشاری استفاده شد. نتایج نشان داد که سطح ویژه ذرات خاک با مقادیر رطوبت‌های اندازه‌گیری شده متناظر با فشارهای اعمال شده به صفحات فشاری دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح یک درصد بود. همچنین سطح ویژه ذرات با مقادیر رطوبت‌های اشباع و باقیمانده برآورد شده از رابطه ون‌گنوختن در سطح یک درصد همبستگی مثبت و معنی‌داری نشان داد، اما با مقادیر پارامترهای α و n رابطه ون‌گنوختن همبستگی معنی‌داری نشان نداد.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، سطح ویژه، منحنی مشخصه، ویژگی‌های هیدرولیکی.

ارجاع: بهرامی ا. بهرامی ح. زند پارسا ش. محمودیان شوشتری م. و بای‌بوردی م. ۱۳۹۳. بررسی پارامتریک ارتباط بین سطح ویژه ذرات خاک با منحنی مشخصه رطوبتی آن. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۴): ۸-۱.

۱- دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
۲- دانشیار گروه فیزیک و حفاظت خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز.
۴- استاد گروه مهندسی عمران آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۵- استاد گروه فیزیک خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.

* نویسنده مسوول: bahramih@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۳/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۳/۲۷

مقدمه

بیش از نیمی از سطح کره زمین را نواحی خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد و براساس گزارش بسیاری از پژوهشگران، بیابان‌زایی در اثر تغییر اقلیم (گرم شدن هوای کره زمین) و فعالیتهای انسانی در حال افزایش است. در چنین زمانی با توجه به افزایش جمعیت و کمی منابع غذایی، کمبود منابع آب از نگرانی‌های اصلی بشر به حساب می‌آید. درک چرخه آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک در حل این مشکلات ضروری است. مطالعه حرکت آب در محیط‌های غیراشباع، به عنوان بخشی از این چرخه، به نوبه خود به درک این مهم کمک خواهد کرد (کاتانا و همکاران، ۲۰۰۷).

شناخت بسیاری از فرآیندهای مهم در کشاورزی و محیط‌زیست، به داشتن اطلاعات کافی در زمینه فیزیک خاک نیاز دارد. پتانسیل آب خاک، رطوبت و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک، مشخصه‌های بسیار مهم خاک هستند که به طور معمول در قالب منحنی‌های مشخصه رطوبتی خاک و منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع بیان می‌شوند. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، تعیین کننده جذب آب به وسیله گیاهان، سرعت نفوذ و انتقال آب و آلاینده‌ها، تولید رواناب، سرعت تبخیر، وضعیت زهکشی و بسیاری جنبه‌های کاربردی دیگر است. بنابراین موفقیت در درک، مدل‌سازی و تفسیر بسیاری از فرآیندهای حاکم بر سیستم‌های کشاورزی، زیست‌محیطی و هیدرولوژیکی به تعیین داده‌های کافی و قابل اعتماد از $\theta(h)$ و $K(\theta)$ رطوبت حجمی خاک ($m^3 m^{-3}$)، ارتفاع فشار آب خاک (m) و هدایت هیدرولیکی خاک ($m s^{-1}$) در سطح‌های مختلف بستگی دارد (هیلل، ۲۰۰۴).

منحنی مشخصه رطوبتی خاک رابطه‌ای بین فشار آب خاک و درصد رطوبت خاک است. از این منحنی در مسائل جذب آب به وسیله ریشه گیاهان، طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی و مسائل مربوط به حرکت آب در خاک چه در حالت اشباع و چه در حالت غیراشباع استفاده زیادی می‌شود. همچنین با استفاده از این منحنی می‌توان به چگونگی نگهداری آب در خاک پی‌برده و مقدار آب قابل ذخیره در خاک را در هر پتانسیل به دست آورد. افزایش نگرانی عمومی در مورد آلودگی آب‌های زیرزمینی و تخلیه زیرسطحی فاضلاب‌ها، باعث پژوهش‌های جدیدی در زمینه جریان در محیط غیراشباع باعث شده است؛ یکی

از دستاوردهای حاصل از این نوع پژوهش‌ها به دست آوردن رابطه بین فشار آب خاک و درصد رطوبت خاک (منحنی مشخصه رطوبتی) است که در مدل‌های کامپیوتری جریان غیراشباع استفاده می‌شود (دسبارتز، ۱۹۹۵).

در بین معادلات موجود برای ارتباط خصوصیات هیدرولیکی خاک، معادله ون‌گنوختن برای ارائه توابع انتقالی پارامتریک بیشترین کاربرد را دارد (رابطه ۱).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (1)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (2)$$

که در آن، θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع ($m^{-3} m^{-3}$)، α (m^{-1}) و n ضریب‌های ثابت معادله، h فشار آب خاک (m) و $\theta(h)$ رطوبت در فشار h هستند. ضریب‌های α و n وابستگی زیادی به ساختمان خاک و اندازه سوراخ‌های خاک دارد و شاخصی از توزیع اندازه خلل و فرج خاک است (ون‌گنوختن، ۱۹۸۰).

سطح ویژه خاک به صورت سطح کل ذرات خاک در واحد جرم یا حجم ذرات و یا در واحد حجم خاک خشک تعریف شده که به طور معمول براساس مترمربع بر گرم بیان می‌شود. رفتار مهندسی بیشتر خاک‌ها (انبساط و انقباض، برآمدگی ناشی از یخبندان، فروریختگی و تراکم‌پذیری، ظرفیت تبادل کاتیونی، توانایی نگهداری آب، درجه خمیریایی^۱ و مقاومت خاک، فعالیت شیمیایی و ویژگی‌های جذب و واجدبی) بیشتر متأثر از سطح ویژه آن‌ها است و این ویژگی‌ها به طور کلی به توزیع اندازه ذرات و ترکیب کانی‌شناسی خاک بستگی دارند (سانتامارینا و همکاران، ۲۰۰۲ و دانیلز و همکاران، ۲۰۰۴). به هر حال پژوهشگران گزارش کرده‌اند که سطح ویژه خاک به تنهایی می‌تواند اثر ترکیبی این فاکتورها را در برگیرد؛ بنابراین این ویژگی می‌تواند برای پیش‌بینی رفتار مهندسی خاک‌ها (به ویژه خاک‌های ریزبافت) استفاده شود (سانتامارینا و همکاران، ۲۰۰۲).

خاک‌ها به دلیل تفاوت‌های کانی‌شناسی، ترکیب آلی و توزیع اندازه ذراتشان، از نظر سطح واکنش‌پذیر به طور گسترده‌ای اختلاف دارند. از آنجا که بسیاری از خصوصیات خاک به پدیده‌های سطح مشترک مربوط می‌شود، مطالعه سطح ویژه خاک بسیار ضروری است و اندازه‌گیری آن به

۱۹۳۸). برای اندازه‌گیری نقاط پتانسیلی برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک ابتدا نمونه‌ها اشباع شدند؛ برای اشباع کردن نمونه‌ها، حلقه‌های مخصوص نمونه را روی صفحات فشاری اشباع قرار داده و مقدار ۲۵ تا ۳۰ گرم (بسته به نوع بافت خاک) از هر نمونه در حلقه مربوط ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت برای اشباع کامل زمان داده شد. نمونه‌ها پس از اشباع کامل (اشباع از زیر صورت می‌گیرد) درون دستگاه صفحات فشاری قرار گرفتند؛ به نمونه‌ها فشارهای صفر، ۳۳، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال در ۳ تکرار اعمال شد. پس از آن نمونه‌ها در آون (درجه حرارت ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) خشک شدند. وزن خاک خشک و رطوبت وزنی محاسبه شد؛ با استفاده از چگالی ظاهری و رطوبت وزنی، رطوبت حجمی متناظر با فشارهای اعمال شده تعیین شد. با ترسیم مقادیر فشار در مقابل رطوبت، منحنی مشخصه رطوبتی خاک برای نمونه‌های مورد نظر به دست آمد. پس از این اندازه‌گیری‌ها با روابط رگرسیونی و نرم‌افزارهای SPSS و Excel، ارتباط بین سطح ویژه ذرات خاک با نقاط پتانسیلی اندازه‌گیری شده و پارامترهای رابطه ون‌گنوختن بررسی شد. برای برازش داده‌های منحنی مشخصه رطوبتی نمونه‌های خاک با مدل ون‌گنوختن و تعیین ضریب‌های آن، از برنامه کامپیوتری RETC (روش حداقل مربعات) استفاده شد.

نتایج و بحث

پس از اندازه‌گیری فراوانی نسبی اجزای شن، سیلت و رس، کلاس‌های بافت هر یک از نمونه‌های خاک مورد مطالعه تعیین شد. توزیع کلاس‌های بافت در کردار مثلی شکل ۱ نشان داده شده است. برای تعیین منحنی مشخصه رطوبتی نمونه‌های مورد نظر، ابتدا برخی از ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده که نتایج حاصل در جدول ۱ آمده است. همان طور که در این جدول و شکل ۱ مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات ذرات رس، سیلت و شن به ترتیب صفر تا ۴۵، صفر تا ۸۹ و ۶ تا ۱۰۰ درصد است؛ بنابراین سعی شده تا حد امکان از نمونه‌های با توزیع اندازه ذرات متنوع استفاده شود. همچنین دیگر ویژگی‌های خاک از جمله ظرفیت تبادل کاتیونی و جرم ویژه ظاهری نیز تغییرات زیادی دارند. در جدول ۲ نتایج تحلیل همبستگی خطی بین سطح ویژه

مطالعه و ارزیابی بسیاری از واکنش‌های خاک کمک می‌کند. اندازه‌گیری سطح ویژه به نسبت ساده بوده و اطلاع از رابطه‌های بین سطح ویژه و ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی ممکن است تعداد کل آزمایش‌های لازم برای توصیف خاک را کاهش دهد. بنابراین اندازه‌گیری سطح ویژه، با اینکه مانند اندازه‌گیری بافت خاک خیلی معمول نیست، ممکن است در تفسیر رفتار خاک‌ها، نسبت به درصد‌های شن، سیلت و رس، شاخص معنی‌دارتری باشد (هیلل، ۲۰۰۴). همچنین سطح ویژه فاکتوری است که می‌تواند ویژگی‌های ریزمقیاس را به ویژگی‌های درشت مقیاس فیزیکی و شیمیایی در محیط‌های متخلخل ارتباط دهد؛ از طرفی بخش غیراشباع خاک در چرخه آبی طبیعت مهم است. یکی از مهم‌ترین شاخص‌هایی که ویژگی این بخش را به صورت کمی بیان می‌کند، منحنی مشخصه رطوبتی خاک است که در بسیاری از پژوهش‌ها به عنوان اطلاعات پایه استفاده می‌شود. بنابراین اثبات رابطه‌های بین سطح ویژه و ویژگی‌های فیزیکی خاک، با توجه به اینکه سطح ویژه بسیار بالای ذرات خاک سبب برهمکنش زیاد بین یون‌ها و مولکول‌های آب با ذرات خاک را باعث می‌شود، سودمند است. در این پژوهش رابطه بین سطح ویژه ذرات و منحنی مشخصه رطوبتی خاک بررسی و مطالعه شده است.

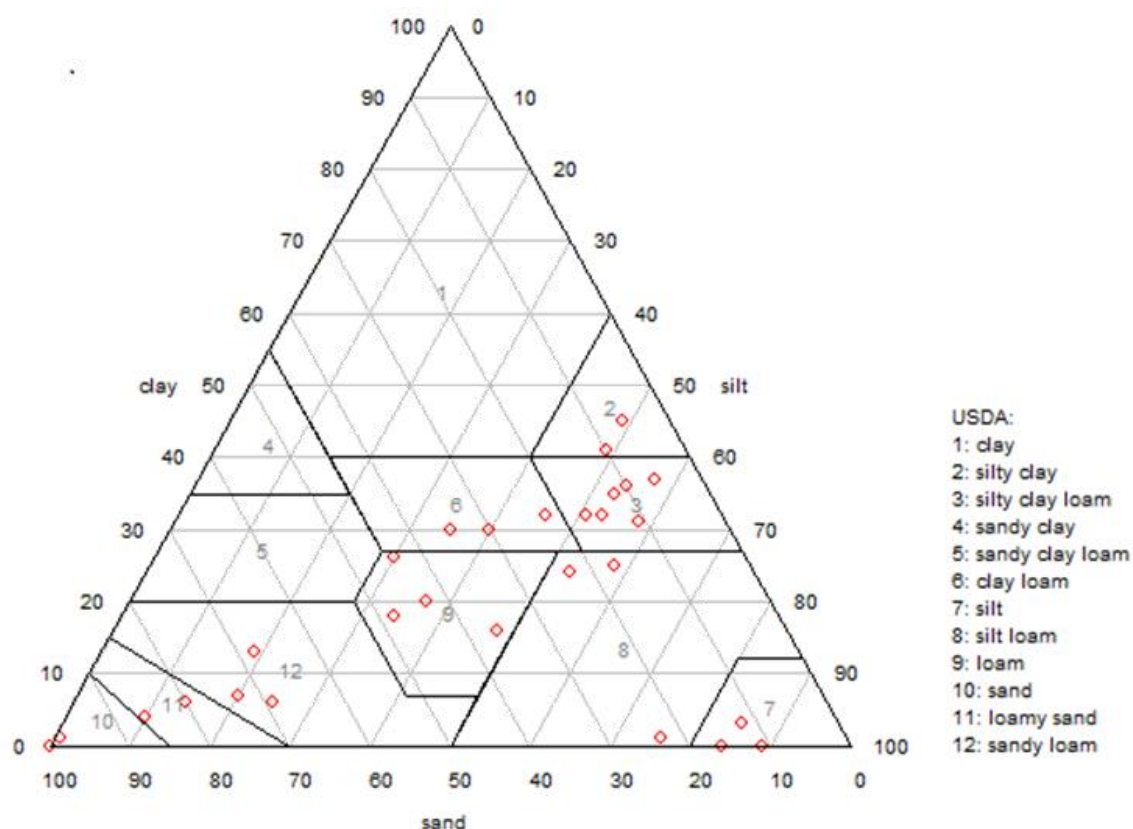
مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ۱۵۰ نمونه خاک از استان‌های تهران، فارس و گیلان تهیه شد که پس از تعیین توزیع اندازه ذرات آن‌ها، براساس نوع بافت ۳۰ نمونه خاک انتخاب شد. نمونه‌ها دست‌خورده بوده و پس از هوا خشک کردن و عبور از الک ۲ میلی‌متری، برای انجام آزمایش‌ها آماده شدند؛ سپس ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله جرم ویژه ظاهری (روش سیلندری^۱)، جرم ویژه حقیقی (روش پیکنومتری)، توزیع اندازه ذرات (روش هیدرومتری) (پیچ و همکاران، ۱۹۹۶)، ظرفیت تبادل کاتیونی (روش چاپمن)، قابلیت هدایت الکتریکی (هدایتسنجی)، PH خاک (پتانسیومتری) و کربن آلی خاک (روش والکلی و بلک) اندازه‌گیری شدند (دونالد، ۱۹۹۶). سطح ویژه ذرات خاک با روش BET (تکنیک جذب سطحی گاز ازت) اندازه‌گیری شد (برونور و همکاران،

این مشکل فقط به دلیل خود پارامترها نیست بلکه مشکلات ناشی از تعیین دقیق مقدار آب خاک در بار فشاری پایین (نزدیک اشباع) نیز در این امر نقش دارد. عدم اشباع کامل خاک ممکن است به دلیل مشکلات ترشدگی و وجود هوای حل شده و یا محبوس باشد که اندازه‌گیری رطوبت اشباع را تحت تأثیر قرار می‌دهند (وریکن و همکاران، ۲۰۱۰). شایان ذکر است که محبوس شدن هوا فقط در مقیاس‌های کرتی یا مزرعه‌ای اتفاق نمی‌افتد بلکه در مقیاس‌های آزمایشگاهی نیز رخ می‌دهد. بنابراین حتی در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی مقدار رطوبت اشباع، باید هوای محبوس شده را در نظر گرفت (هیلل، ۲۰۰۴).

ذرات و رطوبت‌های متناظر با مکش‌های اعمال شده در دستگاه صفحات فشاری مشاهده می‌شود. نتایج نشان داد که همبستگی سطح ویژه و میزان رطوبت در تمامی فشارها (صفر، ۳۳، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) مثبت و از نظر آماری در سطح یک درصد معنی‌دار است و همبستگی مثبت و معنی‌دار در دامنه آب قابل دسترس گیاه (ظرفیت مزرعه تا نقطه پژمردگی دائم) به این دلیل است که با دور شدن از ناحیه مرطوب منحنی و نزدیک شدن به ناحیه خشک آن، میزان رطوبت بیشتر به بافت خاک و در نتیجه به سطح ویژه ذرات آن مربوط می‌شود.

توصیف درست از بخش نزدیک به اشباع منحنی مشخصه رطوبتی هنوز به صورت یک چالش حل نشده مطرح است و



شکل ۱- توزیع کلاس‌های بافت نمونه‌های خاک مورد مطالعه

جدول ۱- برخی ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی نمونه‌های مورد آزمایش

Porosity	BD g cm-3	CEC cmol Kg-1	Sand %	Silt %	Clay %	pH	OC %	Soil Texture	شماره نمونه
۰/۵۴	۱/۱۶۵	۱۶/۴۰	۳۵	۳۵	۳۰	۷/۴۴	۰/۷۶	Clay Loam	۱
۰/۵۴	۱/۱۴۰	۱۲/۶۰	۱۶	۸۴	۰	۸/۰۵	۰/۱۲	Silt	۲
۰/۵۰	۱/۲۴۴	۱۲/۶۰	۱۱	۸۹	۰	۷/۸۶	۰/۴۵	Silt	۳
۰/۴۶	۱/۳۶۴	۵/۴۰	۶۸	۱۹	۱۳	۷/۸۲	۰/۲۵	Sandy Loam	۴
۰/۴۴	۱/۴۶۰	۲/۶۰	۷۳	۲۰	۷	۷/۷۱	۰/۱۰	Sandy Loam	۵
۰/۴۴	۱/۲۳۰	۱۰/۰۰	۳۶	۴۸	۱۶	۷/۷۵	۰/۵۸	Loam	۶
۰/۳۶	۱/۵۰۳	۲/۴۰	۸۶	۱۰	۴	۷/۳۰	۰/۱۳	Loamy Sand	۷
۰/۴۲	۱/۱۷۱	۱۶/۰۰	۱۷	۵۱	۳۲	۷/۹۵	۰/۶۴	Silty Clay Loam	۸
۰/۵۸	۱/۰۷۳	۱۷/۲۰	۶	۵۷	۳۷	۸/۰۵	۰/۹۱	Silty Clay Loam	۹
۰/۵۱	۱/۱۷۳	۱۳/۰۰	۱۰	۴۹	۴۱	۷/۸۵	۰/۳۰	Silty Clay	۱۰
۰/۵۰	۱/۱۸۴	۱۶/۶۰	۱۲	۵۳	۳۵	۷/۹۲	۰/۵۸	Silty Clay Loam	۱۱
۰/۵۲	۱/۰۷۷	۱۷/۴۰	۱۵	۵۳	۳۲	۷/۶۸	۰/۹۲	Silty Clay Loam	۱۲
۰/۳۸	۱/۳۱۶	۱۳/۶۰	۴۴	۳۰	۲۶	۷/۷۳	۰/۰۰	Loam	۱۳
۰/۵۲	۱/۱۳۹	۱۵/۶۰	۱۲	۸۵	۳	۷/۷۴	۰/۷۴	Silt	۱۴
۰/۴۳	۱/۳۳۷	۱/۲۰	۶۹	۲۵	۶	۷/۷۷	۰/۱۵	Sandy Loam	۱۵
۰/۴۲	۱/۵۴۹	۲/۲۰	۹۸	۱	۱	۷/۵۷	۰/۰۵	Sand	۱۶
۰/۳۹	۱/۳۰۰	۱۷/۰۰	۳۰	۴۰	۳۰	۷/۹۲	۰/۲۰	Clay Loam	۱۷
۰/۴۶	۱/۳۰۷	۴/۸۰	۸۰	۱۴	۶	۷/۴۵	۰/۱۲	Loamy Sand	۱۸
۰/۶۰	۱/۰۷۱	۱۲/۴۰	۱۷	۵۸	۲۵	۷/۸۳	۰/۶۹	Silty Loam	۱۹
۰/۵۷	۱/۱۳۴	۹/۶۰	۲۳	۷۶	۱	۷/۶۴	۰/۵۸	Silty Loam	۲۰
۰/۵۶	۱/۰۹۵	۱۲/۴۰	۲۳	۵۳	۲۴	۷/۷۸	۰/۹۷	Silty Loam	۲۱
۰/۵۴	۱/۱۲۰	۲۲/۸۰	۱۰	۵۴	۳۶	۶/۱۴	۱/۲۰	Silty Clay Loam	۲۲
۰/۴۸	۱/۱۸۹	۱۵/۴۰	۴۸	۳۴	۱۸	۴/۱۰	۱/۹۸	Loam	۲۳
۰/۵۳	۱/۰۵۳	۳۵/۲۰	۲۲	۴۶	۳۲	۴/۰۵	۳/۱۷	Clay Loam	۲۴
۰/۴۸	۱/۱۲۶	۲۹/۶۰	۴۳	۳۷	۲۰	۷/۰۹	۲/۶۱	Loam	۲۵
۰/۴۹	۱/۱۲۸	۲۸/۰۰	۶	۴۹	۴۵	۷/۰۲	۱/۷۲	Silty Clay	۲۶
۰/۴۷	۱/۱۰۹	۳۰/۴۰	۱۱	۵۸	۳۱	۶/۹۶	۲/۴۸	Silty Clay Loam	۲۷
۰/۴۸	۱/۲۸۶	۰/۰۰	۱۰۰	۰	۰	۷/۸۰	۰/۰۷	Sand	۲۸
۰/۴۴	۱/۳۴۷	۰/۲۰	۱۰۰	۰	۰	۷/۹۸	۰/۰۰	Sand	۲۹
۰/۴۳	۱/۳۴۲	۰/۲۰	۱۰۰	۰	۰	۸/۰۸	۰/۰۲	Sand	۳۰

OC: کربن آلی خاک، CEC: ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و BD: جرم ویژه ظاهری خاک.

جدول ۲- ضریب همبستگی خطی بین سطح ویژه ذرات خاک و رطوبت در فشارهای مختلف آب خاک

θ (1500)	θ (1000)	θ (500)	θ (300)	θ (100)	θ (33)	θ (0)	θh (kPa)
۰/۶۱۱ ^{xx}	۰/۵۸۰ ^{xx}	۰/۵۸۶ ^{xx}	۰/۵۸۵ ^{xx}	۰/۵۰۳ ^{xx}	۰/۵۸۸ ^{xx}	۰/۶۹۵ ^{xx}	SSSA (m ² .g ⁻¹)

SSSA: مساحت سطح ویژه ذرات، θ : رطوبت خاک و h : قدر مطلق مکش آب خاک.

xx: معنی‌دار در سطح ۱ درصد.

پارامترهای α و n همبستگی منفی و غیرمعنی‌دار است. در مورد θ_r می‌توان گفت که چون رطوبت باقیمانده برعکس رطوبت اشباع که در منافذ درشت قرار گرفته و بیشتر به ساختمان خاک بستگی دارد، به‌صورت لایه نازک آب روی سطح ذرات خاک قرار گرفته و به شدت تحت تأثیر بافت

ضریب همبستگی بین سطح ویژه ذرات خاک و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی (رابطه ون‌گنوختن) در جدول ۳ آمده است. با توجه به جدول مشاهده می‌شود که سطح ویژه با مقادیر θ_r و θ_s و تخلخل دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار است؛ اما بین سطح ویژه و

آنجا که بافت خاک از عامل‌هایی است که در تشکیل ساختمان آن دخالت دارد. بنابراین هر چه بافت خاک درشت‌تر باشد، ضریب α بیشتر بوده و مقدار سطح ویژه ذرات خاک کمتر می‌شود، که با نتایج دیگر پژوهشگران هماهنگی دارد (تولر و آر، ۲۰۰۱). درباره همبستگی منفی n هم می‌توان گفت که چون این پارامتر معیاری از توزیع اندازه ذرات است، به طور طبیعی با افزایش سطح ویژه ذرات باید مقدار آن کاهش یابد و بر عکس.

خاک و در نتیجه سطح ویژه آن است. بنابراین با افزایش سطح ویژه ذرات خاک، مقدار θ_r افزایش می‌یابد و با کاهش آن نیز θ_r کاهش می‌یابد.

دلیل همبستگی منفی سطح ویژه و α این است که ضریب α در معادله ون‌گنوختن با عکس پتانسیل نقطه ورود هوا به خاک متناسب است (ون‌گنوختن، ۱۹۸۰). ضریب α وابستگی زیادی به ساختمان خاک و اندازه منافذ خاک دارد و شاخصی از توزیع اندازه خلل و فرج خاک است. از

جدول ۳- ضریب همبستگی خطی بین سطح ویژه ذرات خاک و پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی (رابطه ون‌گنوختن)

Porosity	m	n	$\alpha(\text{cm}^{-1})$	$\theta_s (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	$\theta_r (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	SSSA($\text{m}^2.\text{g}^{-1}$)
۰/۴۱۵*	-۰/۲۱۳	-۰/۱۶۹	-۰/۲۸۶	۰/۶۱۵**	۰/۵۲۶**	

SSSA: مساحت سطح ویژه ذرات، θ_r : رطوبت باقیمانده، θ_s : رطوبت اشباع، α ، n و m ضریب‌های رابطه ون‌گنوختن و Porosity: تخلخل کل.

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد و * معنی‌دار در سطح ۵ درصد.

مقدار نگهداشت آب در این بخش علاوه بر نیروهای منفذی^۲، توسط نیروهای جذب مولکولی نیز انجام می‌شود (نیمو، ۱۹۹۱). رطوبت باقیمانده خاک مقدار رطوبتی است که در هنگام اعمال مکش بی‌نهایت اتفاق می‌افتد و در هنگام بهینه‌سازی مدل گاهی به‌صورت منفی نیز به دست می‌آید که برای جلوگیری از این کار بیشتر مواقع مرز پایین مقدار رطوبت باقیمانده را صفر می‌گیرند. اما در مورد ضعف رابطه ون‌گنوختن در بخش اشباع و نزدیک به اشباع منحنی مشخصه، دو مشکل ممکن است این رابطه را زیر سوال ببرد. یکی این که منافذ ساختاری در خاک فعال شده که باعث جریان غیرمنفذی می‌شود و رابطه ون‌گنوختن برای این نوع از جریان‌ها مناسب نیست. مشکل دیگر از بین رفتن پیوستگی فاز هوا است که باعث ایجاد خطا در برآوردها می‌شود (اپیچ و همکاران، ۲۰۰۶ و خلوصی و همکاران، ۲۰۰۸).

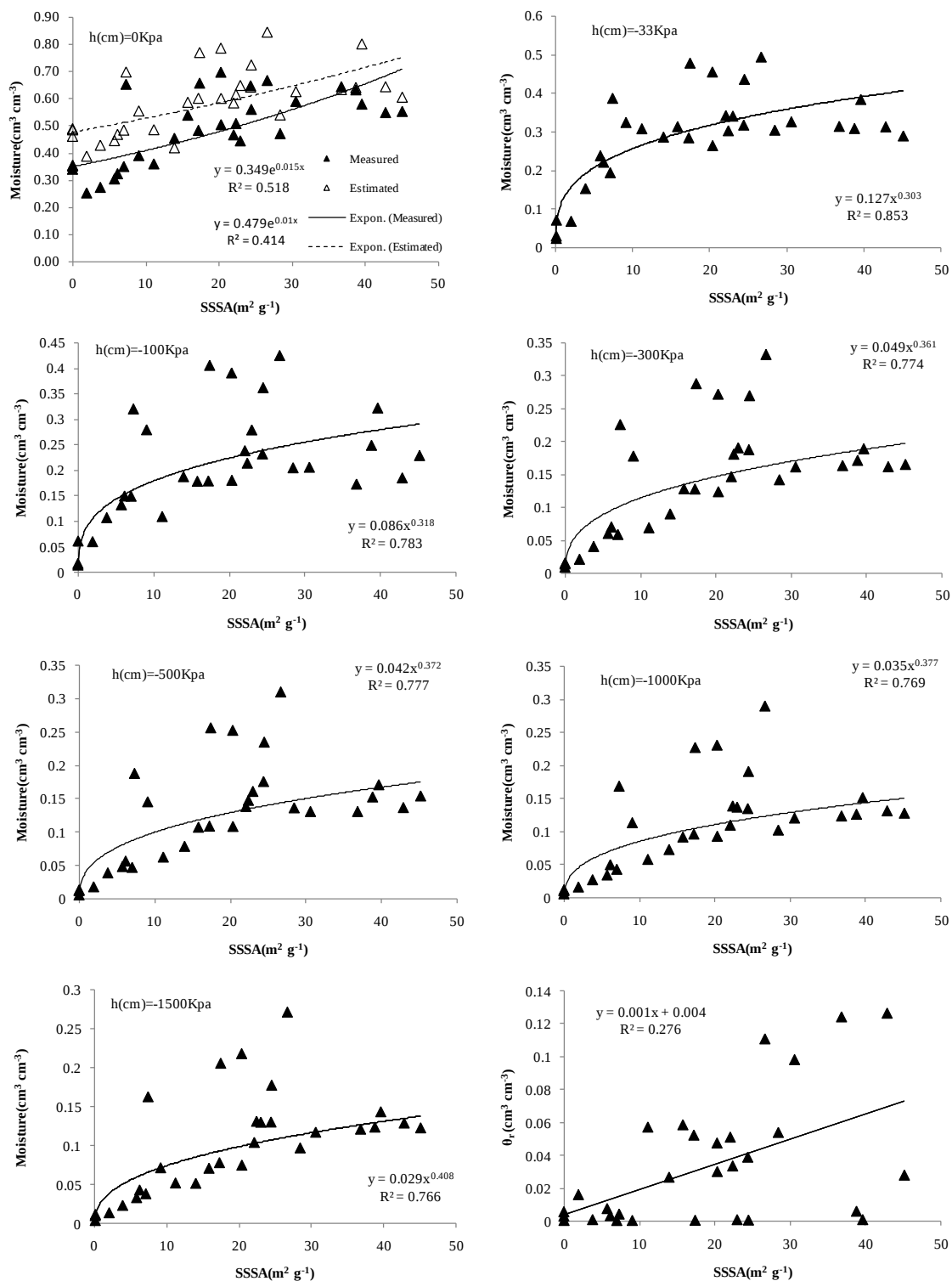
همبستگی سطح ویژه ذرات با مقادیر رطوبت در مکش‌های مختلف اندازه‌گیری شده توسط صفحات فشاری به‌صورت توانی است. با توجه به منابع، بیشترین همبستگی SSSA با رطوبت در رطوبت حد پژمردگی دیده شده است (پترسن و همکاران، ۱۹۹۶)، گرچه در این پژوهش پراکندگی توزیع اندازه ذرات سبب شده که ۵ خاک روند متفاوتی را نشان دهند. اما در کل بیشترین توان در رابطه SSSA با رطوبت، در مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال (۰/۴۰۸) مشاهده شده است. این مسئله نشان

در شکل ۲ ارتباط سطح ویژه ذرات با مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در فشارهای مختلف با صفحات فشاری و رطوبت باقیمانده و اشباع برآوردی از رابطه ون‌گنوختن نشان داده شده است. رابطه SSSA با θ_r و θ_s (رابطه ون‌گنوختن) به‌ترتیب به‌صورت خطی و نمایی بوده و نسبت به رطوبت‌های اندازه‌گیری شده با صفحات فشاری ضریب همبستگی پایین‌تری دارند، که این نشان دهنده ضعف رابطه ون‌گنوختن است. زیرا مطالعات زیادی به نقاط ضعف پارامترهای مدل ون‌گنوختن برای شرح بخش‌های انتهایی (مرطوب و خشک) منحنی مشخصه رطوبتی خاک اشاره کرده‌اند (خلوصی و همکاران، ۲۰۰۸). در کاربرد مدل ون‌گنوختن فرض بر این است که توزیع اندازه منافذ خاک می‌تواند به تنهایی توسط یک تابع توزیع اندازه منافذ توصیف شود، در صورتی که در برخی از خاک‌ها سیستم‌های منفذی به گونه‌ای هستند که قابل توصیف با یک مدل توزیع اندازه منافذ نیستند (دورنر، ۱۹۹۴). علاوه بر این سیستم منفذی به‌صورت دسته‌هایی از لوله‌های کاپیلاری فرض شده است که این لوله‌ها با آب یا هوا پر شده‌اند. در فرض دوم جریان لایه نازک^۱ که ممکن است در خاک‌های خشک به نسبت جریان غالبی باشد، در نظر گرفته نشده است (خلوصی و همکاران، ۲۰۰۸).

ضعف در توصیف بخش خشک انتهایی منحنی مشخصه رطوبتی بیشتر به این حقیقت نسبت داده می‌شود که

خوبی توسط پترسن و همکاران (۱۹۹۶) نیز نشان داده شده است.

می‌دهد که در مکش ذکر شده، ضخامت آب در اطراف ذرات خاک کم بوده و مساحت تماس آب- هوا در اطراف ذرات خاک به SSSA نزدیک‌تر می‌شود، که این رابطه به



شکل ۲- همبستگی بین سطح ویژه ذرات خاک و مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مکش‌های مختلف با صفحات فشاری، رطوبت باقیمانده و اشباع به دست آمده از رابطه ون‌گنوختن

8. Katata G. Nagai H. Ueda H. Agam N. and Berliner P. R. 2007. Development of a land surface model including evaporation and adsorption processes in the soil for the land-air exchange in arid regions. *Journal of Hydrometeorology*. 8:1307-1324.
9. Khlosi M. Cornelis W. M. Douaik A. van Genuchten M. Th. and Gabriels D. 2008. Performance evaluation of models that describe the soil water retention curve between saturation and oven dryness. *Vadose Zone Journal*. 7:87-96.
10. Nimmo J. R. 1991. Comment on the treatment of residual water content in A consistent set of parametric models for the two-phase flow of immiscible fluids in the subsurface by L. Luckner et al. *Water Resource Research*. 27:661-662.
11. Page A. L. Miller R. H. and Keeney D. R. 1996. *Methods of Soil Analysis, Part II, Physical properties*, ASA, SSSA, Madison, WI. pp. 181-199.
12. Petersen L. W. Moldrup P. Jacobsen O. H. and Rolston D. E. 1996. Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties. *Soil Science*. 161:9-21.
13. Santamarina J. C. Klein K. A. Wang Y. H. and Prencke E. 2002. Specific surface area: determination and relevance. *Canadian Geotechnical Journal*. 39:233-241.
14. Tuller M. and Or D. 2001. Hydraulic conductivity of variably saturated porous media: Film and corner flow in angular pore space. *Water Resource Research*. 37:1257-1276.
15. Van Genuchten M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society American Journal*. 44:892-898.
16. Vereecken H. Weynants M. Javaux M. Pachepsky Y. Schaap M. G. and Van Genuchten M. Th. 2010. Using Pedotransfer Functions to Estimate the van Genuchten-Mualem Soil Hydraulic Properties: A Review. *Vadose Zone Journal*. 9:795-820.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این پژوهش، همبستگی سطح ویژه ذرات خاک و میزان رطوبت اندازه‌گیری شده در مکش‌های صفر، ۳۳، ۱۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوپاسکال مثبت و در سطح یک درصد معنی‌دار است که در مکش صفر این رابطه از نوع نمایی و در سایر مکش‌ها از نوع توانی است. رابطه SSSA با θ_r و θ_s (رابطه ون‌گنوختن) به‌ترتیب به‌صورت خطی و نمایی، مثبت و معنی‌دار بوده و نسبت به رطوبت‌های اندازه‌گیری شده با صفحات فشاری ضریب همبستگی پایین‌تری دارند.

سیاس‌گذاری

نویسندگان از زحمات و همکاری بی‌دریغ آقای مهندس فرید باقری (مسئول محترم بخش خاک و آب مرکز تحقیقات چای کشور)، خانم مهندس زهرا طیب‌زاده (مسئول محترم آزمایشگاه گروه خاک‌شناسی دانشگاه تربیت مدرس) و خانم مهندس محبوبه کریمی (مسئول محترم آزمایشگاه BET دانشگاه صنعتی شریف) تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

1. Brunauer S. Emmett P. H. and Teller E. 1938. Adsorption of gases in multi-molecular layers. *Journal of American Chemical Society*. 60:309-319.
2. Daniels J. L. Inyanh H. I. and Brochu Jr. M. 2004. Specific surface area of barrier mixtures at various outgas temperature. *Journal of Environmental Engineer*. 130:867-872.
3. Desbarats A. J. 1995. Upscaling capillary pressure-saturation curves in heterogeneous porous media. *Water Resource Research*. 31:281-288.
4. Donald L. S. 1996. *Methods of Soil Analysis, Part III. Chemical Methods*, ASA. SSSA, Madison, WI. pp. 961-1010.
5. Durner W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resource Research*. 30:211-223.
6. Hillel D. 2004. *Introduction to environmental soil physics*. Elsevier Academic Press, Amsterdam. pp. 132-150.
7. Ippisch O. Vogel H. J. and Bastian P. 2006. Validity limits for the van Genuchten-Mualem model and implications for parameter estimation and numerical simulation. *Advanced Water Resource*. 29:1780-1789.