

مقایسه مدل‌های مختلف منحنی مشخصه آب خاک در ارزیابی شاخص کیفیت خاک‌های شالیزاری

لیلا رضائی¹، سید علی اکبر موسوی، ناصر دوات‌گر و محمود شعبانپور شهرستانی

دانشجوی دکتری، بخش علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ l.rezaee77@gmail.com

دانشیار، بخش علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز؛ aamousavi@gmail.com

دانشیار، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران؛ n_davatgar@yahoo.com

دانشیار، گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان؛ shabanpour@guilan.ac.ir

دریافت: 95/9/15 و پذیرش: 96/3/3

چکیده

کیفیت خاک به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نبوده و از شاخص‌های کیفیت خاک تعیین می‌شود. شیب در نقطه عطف منحنی مشخصه آب خاک (S) از جمله این شاخص‌ها است. این شاخص با عوامل مختلفی مانند کربن آلی، جرم مخصوص ظاهری، بافت و ساختمان خاک در ارتباط است. مطالعه جاری با هدف مقایسه سه مدل برای تعیین شاخص S و ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک‌های شالیزاری با استفاده از آن انجام شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی (بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، کربن آلی، رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه و رطوبت در نقطه پژمردگی دائم) در 35 نمونه دست‌خورده از خاک‌های شالیزاری شرق و غرب گیلان اندازه‌گیری شد. پارامترهای مدل ون‌گونختن با نرم افزار RETC و پارامترهای مدل‌های پروکز و کوری و گرانولت و گرانت با استفاده از نرم افزار MATLAB تعیین و شیب نقطه عطف منحنی مشخصه و شاخص S با استفاده از مدل‌ها محاسبه شد. شاخص‌های میانگین هندسی نسبت خطا (GMER)، انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا (GSDER)، میانگین خطا (ME) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، برای ارزیابی نکوتی برازش مدل‌ها و شاخص‌های (S) محاسبه شده از آنها بکار رفتند. مدل گرانولت و گرنت با حداقل میانگین خطا و حداقل ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده در همه مکش‌ها توانست منحنی مشخصه خاک‌های مورد مطالعه را بهتر شبیه‌سازی کند. همچنین میانگین هندسی نسبت خطا و انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا در این مدل نسبت به دو مدل دیگر در همه مکش‌ها به یک نزدیکتر بود. استفاده از مدل گرانولت و گرنت در تعیین شاخص S با $ME=-0.015$ و $NRMSE=0.4$ در مقایسه با سایر مدل‌ها از صحت بیشتری برخوردار بود. میانگین هندسی نسبت خطا و انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا نیز در مدل گرانولت و گرانت کمتر از سایر مدل‌ها بود ($GMER=0.85$ و $GSDER=1.33$). شاخص S با رس، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت نقطه پژمردگی دائم همبستگی منفی معنی‌دار ($P<0.01$) و با رطوبت قابل استفاده و سایر ویژگی‌ها همبستگی مثبت معنی‌دار ($P<0.05$) داشت. علی‌رغم اینکه برخی پژوهشگران بیان نموده‌اند که استفاده از شاخص S نمی‌تواند معیار مناسبی از کیفیت فیزیکی خاک باشد ولی شاخص S تعیین شده در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه، همبستگی معنی‌داری با بسیاری از ویژگی‌های موثر بر کیفیت فیزیکی خاک داشت. بنابراین به‌جای اندازه‌گیری چندین ویژگی موثر بر کیفیت فیزیکی خاک می‌توان با استفاده از این شاخص شرایط فیزیکی خاک‌های مختلف و اثر عملیات مدیریتی بر آنها را مقایسه نمود. در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه، شاخص کیفیت فیزیکی بیش از 0/035 بود که نشان‌دهنده کیفیت مناسب خاک‌ها برای شالیزاری است.

واژه‌های کلیدی: تراکم، ماده آلی، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، رطوبت ظرفیت مزرعه

¹ نویسنده مسئول، آدرس: شیراز، باجگاه، دانشکده کشاورزی، بخش علوم و مهندسی خاک

مقدمه

می‌شود. هنگامی که خاک‌ها یک یا چند مورد از شرایط زیر را داشته باشند نشان‌دهنده کیفیت فیزیکی ضعیف خاک است: نفوذ کم آب، وقوع رواناب سطحی، سله، تهویه ضعیف، توانایی ریشه‌زنی کم گیاه در خاک و توانایی کم انجام کار در خاک (دکستر، 2004a). هنگامی که خاک شرایط یاد شده را نداشته باشد از کیفیت فیزیکی مناسبی برخوردار است.

شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم بیانی از حجم منافذ خاک بوده و تابعی از آن می‌باشند (رینولدز و همکاران، 2009). تأثیرپذیری زیاد منحنی مشخصه از اندازه و آرایش منافذ خاک نشان می‌دهد که شیب منحنی رطوبتی در نقطه عطف (S) می‌تواند نشان‌دهنده جنبه‌های مختلفی از ساختمان و کیفیت فیزیکی خاک از قبیل نفوذپذیری، سخت‌شدگی و فشردگی باشد. به همین دلیل شیب منحنی مشخصه آب خاک در نقطه عطف شاخص کیفیت فیزیکی خاک نامیده می‌شود (دکستر، 2004a). بنابراین هر عاملی که بتواند اندازه و آرایش منافذ خاک را تحت تأثیر قرار دهد سبب تغییر شاخص S می‌شود. شاخص S به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در کمی‌سازی تخریب فیزیکی یا بهبود آن و نیز ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک‌ها معرفی شده است (دکستر، 2004b). محدوده نظری مقادیر S می‌تواند از صفر تا بی‌نهایت متغیر باشد. با این حال، گزارش شده این شاخص در خاک‌های کشاورزی در محدوده 0/007 تا 0/14 تغییر می‌کند (رینولدز و همکاران، 2009).

تخلخل خاک دارای دو بخش تخلخل بافتی و تخلخل ساختمانی است (گوریف و همکاران، 2001؛ دکستر و همکاران، 2008). تخلخل بافتی بین ذرات اولیه معدنی خاک وجود دارد، اما تخلخل ساختمانی شامل شکاف‌های کوچک، شکاف‌های بزرگ و منافذ زیستی بین خاکدانه‌ها بوده و بخشی از آنها در اثر عملیات شخم به وجود می‌آیند. شکاف‌های کوچک به دلیل نقش مهمی که در فرایند انتقال دارند، منافذ انتقال طولانی¹ نیز نامیده می‌شوند (پاگیلای و همکاران، 2004). تخلخل ساختمانی همچنین در فراهم آوردن فضای زندگی برای ریزجانداران خاک نقش مهمی ایفا می‌کند. تخلخل بافتی به میزان کمی تحت تأثیر عملیات مدیریتی قرار می‌گیرد، درحالی‌که تخلخل ساختمانی به‌شدت به عوامل مدیریتی مانند شخم، تراکم و روش کشت وابسته و حساس است. تفکیک منافذ خاک به دو گروه منافذ بافتی و منافذ ساختمانی سبب ایجاد توزیع اندازه منافذ دو مدی² در خاک می‌شود

کیفیت خاک به مفهوم ظرفیت خاک برای ایفای نقش در اکوسیستم‌های طبیعی یا تحت مدیریت است به-گونه‌ای که علاوه بر پایدار نگه داشتن تولیدات گیاهی و جانوری، منجر به حفظ و افزایش کیفیت آب و هوا شده و در نهایت سلامت انسان و سکونت‌گاهش را تأمین کند (کارلن و همکاران، 1997). کیفیت خاک شاخص ضروری برای مدیریت پایدار اراضی است (هریک، 2000؛ آرمینس و همکاران، 2013). از آنجا که عملکرد-های خاک به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند، ارزیابی کیفیت خاک با در نظر گرفتن و اندازه‌گیری برخی ویژگی‌ها به‌عنوان شاخص‌های کیفیت خاک انجام می‌شود. اندازه‌گیری کیفیت خاک تلاش برای شناخت ویژگی‌هایی از خاک است که این ویژگی‌ها پاسخی نسبت به مدیریت و متأثر و مرتبط با خروجی‌های محیطی بوده و با اعتبار مناسب قابل استفاده هستند (محمدی و همکاران، 1384). کیفیت خاک که در ارزیابی میزان تخریب اراضی یا اصلاح و تعیین نوع فعالیت‌های مدیریتی برای کاربری پایدار اراضی اهمیت دارد، معمولاً از سه جنبه شیمیایی، فیزیکی و زیستی مورد توجه قرار می‌گیرد. کیفیت خاک به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست و لازم است با استفاده از شاخص‌های کیفیت خاک بررسی شود. به‌طور کلی هنگامی که شاخص‌های تعیین‌کننده کیفیت خاک در محدوده بهینه قرار داشته باشند، عملکرد محصول افزایش یافته و همچنین تخریب خاک و محیط زیست کاهش می‌یابد (رینولدز و همکاران، 2009). امروزه کیفیت فیزیکی خاک با تعیین پارامترهای فیزیکی که درجه کیفیت خاک را تعیین می‌کنند بیان می‌شود. به‌عنوان نمونه دکستر (2004) شیب منحنی مشخصه آب خاک در نقطه عطف ($S - \frac{d\theta}{d(\ln h)}$) را به‌عنوان یکی از شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک معرفی کرد. منحنی مشخصه آب خاک که نشان‌دهنده رطوبت حجمی یا جرمی خاک در مقابل مکش (پتانسیل ماتریک) است دارای سه ناحیه ورود هوا، ناحیه موئینگی و ناحیه جذبی است. برای منحنی مشخصه آب خاک‌ها نمی‌توان شکل یا معادله مشخصی ارائه کرد، زیرا عوامل بسیار زیادی بر آن مؤثرند (علیزاده، 1386). اما در حالت کلی، منحنی مشخصه به شکل سیگموئیدی است و هر منحنی سیگموئیدی یک نقطه عطف دارد که شیب منحنی در آن نقطه تغییر کرده و با S نشان داده می‌شود. به عبارتی شاخص S شیب منحنی مشخصه آب خاک در حالتی است که منحنی بر پایه مقدار رطوبت جرمی خاک در برابر لگاریتم طبیعی مکش آب خاک رسم شود. کیفیت فیزیکی خاک به شکل‌های مختلفی مشخص

¹ Elongated transmission pores

² Bi-modal

جنگلی استفاده و گزارش کردند که 79 درصد تغییرات شاخص S در خاک بر اساس متغیرهای کربنات کلسیم و جرم مخصوص ظاهری نسبی قابل تبیین است. ترانبا و همکاران (2016) شاخص S خاک را در چهار نوع تناوب زراعی (نک کشتی برنج، برنج - ذرت - برنج - لوبیا - برنج و برنج - لوبیا - ذرت) بررسی و گزارش نمودند که خاک‌های تحت تناوب کشت برنج - ذرت - برنج و برنج - لوبیا - برنج از کیفیت فیزیکی مناسب‌تری در مقایسه با سایر تناوب‌ها برخوردارند.

برای محاسبه شاخص S به معادله منحنی مشخصه آب خاک نیاز است. اندازه‌گیری مستقیم شاخص S از روی شیب منحنی به‌ویژه زمانی که تعداد نقاط مناظر رطوبت حجمی - پتانسیل محدود باشد، مشکل است. از سوی دیگر برآورد شاخص S با استفاده از توابع انتقالی معمولاً با عدم قطعیت زیاد همراه است و قابل تعمیم به سایر خاک‌های ماورای محدوده نمونه‌برداری نمی‌باشد. در این شرایط استفاده از مولفه‌های مدل‌های برآورد منحنی مشخصه که نقطه عطف منحنی را به خوبی نشان می‌دهند (مانند مدل ون‌گنوختن) می‌تواند راه‌گشا باشد. اما در کنار مدل ون‌گنوختن، مدل‌هایی مانند بروکز و کوری (1964) و گرانولت و گرنیت (2004) نیز در برآورد منحنی مشخصه آب خاک با صحت مناسب موفقیت آمیز گزارش شدند (لایر، 2014). بررسی‌ها نشان داد در اغلب پژوهش‌ها انجام شده برای برآورد شاخص S از مدل ون‌گنوختن (1980) استفاده می‌شود (امامی و همکاران، 1387؛ شهاب آرخازلو و همکاران، 1390؛ دکستر، 2004؛ ویزیتو و همکاران، 2011).

خاک‌های شالیزاری با خاک‌های سایر اراضی کشاورزی متفاوت هستند. در این خاک‌ها که به‌نوعی مصنوع دست بشر می‌باشند، اراضی آبیاری شده و کشاورزان با گل‌خراب کردن خاک، تخریب ساختمان خاک و تبدیل منافذ بزرگ به کوچک، نیاز آبی گیاه برنج را با ایجاد لایه‌ای با هدایت هیدرولیکی کم کاهش می‌دهند. فرایند گل‌خرابی همچنین منجر به کنترل علف‌های هرز می‌شود. لایه گل‌خراب دارای قدرت مکانیکی کم بوده و اجازه سهولت نشاکاری و توسعه مؤثر ریشه گیاه برنج را می‌دهد. عملیات گل‌خراب کردن با استفاده از نیروی ماشین‌آلات کشاورزی انجام می‌شود. گل‌خرابی منجر به کاهش حرکت عمودی آب در خاک می‌شود، زیرا ساختمان و منفذهای بزرگ خاک را تخریب کرده و مقدار منفذهای کوچک را افزایش می‌دهد و بنابراین هدایت هیدرولیکی خاک کاهش می‌یابد (تونگ و همکاران، 1994). در زیر لایه گل‌خراب یک ناحیه فشرده

(دکستر و همکاران، 2008). دکستر (2004a) بیان کرد شیب منحنی مشخصه آب خاک در نقطه عطف عمدتاً ناشی از منافذ ساختمانی کوچک است و بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی مهم خاک به‌طور مستقیم تحت تأثیر شاخص S قرار می‌گیرند. خاک‌های با منافذ بافتی غالب، کیفیت فیزیکی خیلی ضعیفی دارند؛ از این‌رو وجود منافذ ساختمانی و در نتیجه مقادیر زیاد S، برای کیفیت مناسب خاک ضروری است. هنگامی که خاکی در حال خشک شدن است، در حد فاصل بین نقطه اشباع و نقطه عطف منحنی مشخصه منافذ ساختمانی از آب تخلیه می‌شوند، اما با ادامه فرایند خشک شدن و پس از نقطه عطف، عمدتاً منافذ بافتی از آب تخلیه می‌شوند. فرایند خشک شدن خاک می‌تواند توزیع اندازه منافذ خاک و در نتیجه شکل منحنی مشخصه آب خاک را تغییر دهد (بامگارتل و همکاران، 2000).

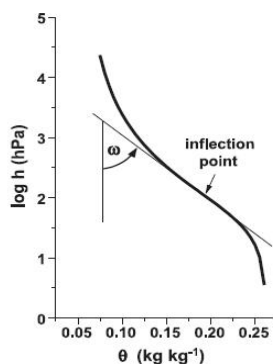
جونز (1983) با مرور مقالات مرتبط با رشد ریشه در خاک‌های با رطوبت ظرفیت مزرعه، درصد رس و جرم مخصوص ظاهری متفاوت یک نمودار دو بعدی با دو مرز مشخص (مرز بین خاک با رشد ریشه کم و بدون ریشه و مرز بین خاک با ریشه زیاد و ریشه کم) توسعه داد. دکستر (2004a) با بهره‌گیری از نمودار جونز، برای مقادیر مختلف شاخص S میزان رشد ریشه را تعیین و بیان نمود که در خاک‌هایی با مقادیر $S < 0.020$ ریشه رشد نمی‌کند و در خاک‌هایی با مقادیر $0.020 \leq S \leq 0.035$ ریشه به‌ترتیب به میزان کم و به اندازه کافی رشد می‌کند. ویزیتو و همکاران (2011) شاخص S را با استفاده از مولفه‌های معادله ون‌گنوختن تعیین و بیان کردند که خاک‌های با بافت متوسط در مقایسه با خاک‌های با بافت رسی و سنگین شاخص S بیشتری دارند. لایر (2014) با نقد نظری شاخص S بیان کرد که با توجه به اینکه یکی از مولفه‌های مدل گرانولت و گرنیت دارای همبستگی خطی با شاخص S است این مدل در مقایسه با سایر مدل‌ها (مانند مدل‌های ون‌گنوختن، بروکز و کوری) از برآورد بهتری برخوردار است. امامی و همکاران (1388) با تخمین رطوبت نقطه عطف منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از ویژگی‌های زودپافت خاک، رطوبت مناسب برای خاک‌ورزی را مشخص کردند. امامی و همکاران (1389) رابطه بین شیب منحنی مشخصه با برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک را بررسی و با توابع انتقالی رگرسیون شاخص S را با استفاده از ویژگی‌های زودپافت خاک برآورد نمودند. اصغری و همکاران (1395) از ویژگی‌های زودپافت برای برآورد شاخص کیفیت فیزیکی خاک‌های

مواد و روش‌ها

در این تحقیق 35 نمونه دست خورده از خاک‌های شالیزاری شرق و غرب استان گیلان برداشته شد. نمونه‌ها بعد از انتقال به آزمایشگاه در مجاورت هوا خشک شدند و سپس برای انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی به نرمی کوبیده و از الک دو میلی‌متری عبور داده شدند. بافت خاک به روش هیدرومتری (گی و بادر، 1986)، رطوبت وزنی در مکش‌های 0، 33، 100، 600، 300، 1000 و 1500 کیلوپاسکال به وسیله صفحات فشاری در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد (دان و هاپمنز، 2002). کربن آلی به روش والکللی بلک (نلسون و سامر، 1982)، جرم مخصوص ظاهری در نمونه‌های دست نخورده خاک به روش سیلندر (بلیک و هارتگ، 1986) و پ‌هاش در خمیر اشباع با پ‌هاش متر (لین، 1982) اندازه‌گیری شدند.

محاسبه نقطه عطف از روی منحنی مشخصه رطوبتی خاک

منحنی مشخصه آب خاک، هنگامی که مقدار رطوبت جرمی خاک (θ_g (kg.kg⁻¹)) در برابر لگاریتم طبیعی مکش خاک رسم می‌شود، تنها یک نقطه عطف دارد. نقطه عطف منحنی مشخصه آب خاک با دو ویژگی مشخص می‌شود موقعیت نقطه عطف (θ_i و $\ln h_i$) و شیب در نقطه عطف ($\omega = \tan \alpha = d\theta/d(\ln h)$ (دکستر، 2004)).



شکل 1- نمونه‌ای از یک منحنی مشخصه آب خاک ایده‌آل که نقطه عطف و شیب منحنی ($\tan \omega$) در نقطه عطف در آن نشان داده شده است (دکستر، 2004a).

سیس محاسبه شیب در نقطه عطف بر اساس مولفه‌های مدل، راحت‌تر و مناسب‌تر است. از این‌رو از معادلات بروکز و کوری (1964)، ون‌گنوختن (1980) و گرانولت و گران (2004) برای تعیین شاخص S و مقایسه آن با مقادیر واقعی استفاده می‌شود. در این تحقیق برای تعیین

در زیر چرخ ماشین‌های کشاورزی تشکیل می‌شود که به آن کفه شخم گفته می‌شود. افزون بر آن، در این لایه ته‌نشست ذرات رس اتفاق می‌افتد. فشردگی، انتقال و ته‌نشست ذرات رس منجر به ایجاد ناحیه‌ای با هدایت هیدرولیکی کم می‌شود. در پایین این لایه با نفوذپذیری کم، لایه خاکی غیرگل‌خراب با هدایت هیدرولیکی به نسبت زیاد و جریان غیراشباع وجود دارد (ووپریز و همکاران، 1993). بنابراین نیمرخ عمودی خاک‌های گل-خراب از یک لایه آب ایستایی، لایه نرم گل‌خراب با مقاومت جزئی در مقابل جریان آب، لایه فشرده شده در زیر لایه گل‌خراب با مقاومت زیاد در مقابل جریان آب و خاک تحت‌الارض غیرگل‌خراب تشکیل شده است. برپایه منابع علمی منتشر شده تاکنون شاخص S در اراضی شالیزاری، ارتباط آن با منافذ خاک و چگونگی کارکرد آن در ارزیابی کیفیت خاک‌های شالیزاری مطالعه نشده است. اولین گام در این خاک‌ها تعیین صحیح و آسان شاخص S در منحنی مشخصه آب خاک است. بنابراین این مطالعه با هدف مقایسه مدل‌های بروکز و کوری (1964)، ون-گنوختن (1980) و گرانولت و گرن (2004) برای تعیین شاخص S در خاک‌های شالیزاری، ارتباط این شاخص با برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک و بررسی کیفیت این خاک‌ها انجام شد.

در صورتی‌که منحنی مشخصه آب خاک، شکل مشخص سیگموئیدی داشته باشد می‌توان با رسم منحنی، شیب منحنی در نقطه عطف را به‌طور مستقیم و با رسم خط مماس بر منحنی تعیین نمود؛ اما معمولاً به‌دلیل تنوع در شکل منحنی مشخصه استفاده از مدل‌های برازش و

افزار RETC، مولفه‌های مدل تعیین شد. معادله زیر توسط ون‌گونختن (1980) برای منحنی رطوبتی خاک ارایه شده است:

$$\theta = (\theta_{sat} - \theta_{res}) [1 + (\alpha h)^n]^{-m} + \theta_{res} \quad (4)$$

که در این معادلات θ_r و θ_s به ترتیب مقادیر رطوبت اشباع و باقی‌مانده $(cm^3 cm^{-3})$ ، h مقدار مکش (cm) و m و n پارامترهای تجربی هستند.

مقدار شیب در نقطه عطف منحنی مشخصه با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (دکستر، 2004a, b):

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (5)$$

با قرار دادن $m = 1 - \frac{1}{n}$ در معادله 5 مقدار S با رابطه 6 قابل محاسبه است (دکستر، 2004a):

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left[\frac{2n-1}{n-1} \right]^{\left(\frac{1}{n}-2\right)} \quad (6)$$

محاسبه نقطه عطف با استفاده از معادله گرانولت و گرت (2004): گرانولت و گرت (2004) معادله ریاضی زیر را برای منحنی مشخصه آب خاک پیشنهاد کردند:

$$\theta = \theta_s - (\theta_s - \theta_r) \exp \left[- \left(\frac{h}{k} \right)^r \right] \quad (7)$$

که در آن k و r پارامترهای برازشی هستند (k بعدی همانند بعد h دارد). گرانولت و گرت (2004) گزارش کردند که داشتن یا نداشتن مفهوم فیزیکی این پارامترها باید بررسی شود. برای تعیین شاخص S در مدل گرانولت و گرت (2004)، از رابطه زیر استفاده شد (لایر، 2014):

$$S = \frac{r}{\theta} \frac{\theta_a}{\theta_b} (\theta_s - \theta_r) \quad (8)$$

برای تعیین پارامترهای معادلات بروکز و کوری (1964) و گرانولت و گرت (2004)، با استفاده از برازش معادلات ذکر شده به منحنی مشخصه، از نرم افزار *MATLAB* استفاده شد.

برای مقایسه روش‌های ذکر شده برآورد S و میزان همبستگی آنها با داده‌های واقعی (شاخص S بدست آمده از رسم خط مماس بر منحنی)، از آماره‌های صحت-سنجی میانگین هندسی نسبت خطا (GMER)، انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا (GSDER)، میانگین خطا

شاخص S در 35 نمونه خاک، ابتدا نقطه عطف منحنی مشخصه (جایی که انحنای منحنی برابر صفر است) تعیین شد. به این منظور با استفاده از بهترین تابع چندجمله‌ای برازش داده شده به منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده و تعیین صحت برازش با توجه به ضریب تبیین، از معادله بدست آمده از برازش، دوبار مشتق‌گیری شد. به این ترتیب رطوبت در نقطه عطف تعیین و نهایتاً نقطه عطف بدست آمد. سپس از رسم خط مماس بر نقطه عطف منحنی و محاسبه تانژانت زاویه مماس، شاخص S محاسبه شد (دکستر، 2004 a).

محاسبه نقطه عطف با استفاده از معادله بروکز و کوری (1964): بروکز و کوری (1964) رابطه زیر را برای منحنی مشخصه آب خاک ارایه کردند:

$$\theta = \left[\frac{h_b}{h} \right]^\lambda \quad \text{for } h \geq h_b$$

$$\theta = 1 \quad \text{for } h < h_b \quad (1)$$

که در آن h_b و λ پارامترهای برازشی و به ترتیب مکش ورود هوا (cm) و شاخص توزیع اندازه خلل و فرج خاک (بدون بعد) می‌باشند. θ نیز رطوبت اشباع مؤثر و برابر است با:

$$\theta = \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (2)$$

که در آن θ ، θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت اندازه‌گیری شده خاک، رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع $(cm^3 cm^{-3})$ می‌باشند.

برای محاسبه شاخص S در مدل بروکز و کوری (1964)، از رابطه زیر استفاده شد (لایر، 2014):

$$S = \lambda \frac{\rho_a}{\rho_b} (\theta_s - \theta_r) \quad (3)$$

که در آن ρ_a و ρ_b به ترتیب چگالی ظاهری خاک و چگالی آب می‌باشند.

محاسبه نقطه عطف با استفاده از معادله ون‌گونختن، VG (1980)

مبنای تعیین نقطه عطف منحنی مشخصه آب خاک، در مقالات ارائه شده توسط دکستر (2004) بر مبنای مدل ون‌گونختن (1980) می‌باشد. مدل ون‌گونختن به دلیل در دسترس بودن آسان نرم‌افزارهای RETC و یا HYDRUS برای برازش منحنی به داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت-مکش در سطح وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق، با برازش مدل ون‌گونختن به داده‌های منحنی مشخصه اندازه‌گیری شده توسط نرم-

داده‌ها است. اگر GSDER برابر یک باشد مقادیر اندازه-گیری و تخمین زده شده بر یکدیگر منطبق شده‌اند و مقادیر بزرگتر از یک نشان‌دهنده انحراف داده‌های تخمینی نسبت به اندازه‌گیری است. بنابراین مناسب‌ترین شرایط آن است که مقادیر GMER و GSDER نزدیک به یک باشند (تیتجی و هنینگر، 1996).

ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده معیاری از کیفیت برازش مدل است و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد اختلاف مقادیر تخمین زده شده با مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر بوده و مدل مناسب‌تر است. میانگین خطا (ME) معیاری از وجود اریب در برآورد مدل است و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است. مقادیر منفی و مثبت آماره ME نشان می‌دهد که مقدار برآورد به ترتیب کمتر و بیشتر از اندازه‌گیری می‌باشد.

نتایج و بحث

توزیع نمونه خاک‌های مطالعه شده در مثلث بافت خاک در شکل 2 نشان داده شده است. کلاس‌های بافتی غالب در این خاک‌ها بر پایه مثلث بافت خاک وزارت کشاورزی آمریکا عبارت بودند از: رس، رسی سیلتی، لوم رسی سیلتی، لومی رسی شنی، لوم رسی، لوم سیلتی و لوم. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد هرچند پراکندگی نمونه‌ها در مثلث بافت خاک مناسب است و نمونه‌های برداشته شده کلاس‌های نسبتاً وسیعی از مثلث بافت خاک را پوشش می‌دهند اما با توجه به شالیزاری بودن خاک‌ها، اغلب نمونه‌ها در خاک‌های با کلاس بافت متوسط تا ریز (سنگین) قرار داشتند (شکل 2).

(ME) و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) به شرح زیر استفاده شد:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)}{N} \quad (9)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} / \bar{y} \quad (10)$$

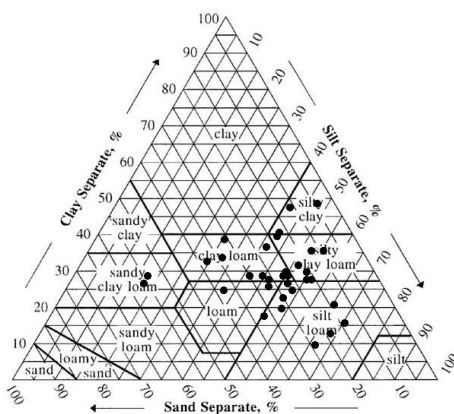
$$GMER = \exp \left[\frac{1}{N} \sum \ln(e_i) \right] \quad (11)$$

$$(12)$$

$$GSDER = \exp \left[\frac{1}{N-1} \sum [\ln(e_i) - \ln(GMER)]^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$e_i = \frac{\hat{y}_i}{y_i} \quad (13)$$

که در آنها y_i شاخص S است که به‌طور مستقیم از روی شکل منحنی مشخصه آب خاک اندازه-گیری شده است، \hat{y}_i شاخص S محاسبه شده با استفاده از معادلات بروکز و کوری (1964)، ون‌گنوختن (1980) و گرانولت و گرنیت (2004)، \bar{y}_i میانگین شاخص S تعیین شده از منحنی مشخصه آب خاک، N تعداد نمونه خاک و e_i نسبت خطا است. چنانچه GMER برابر یک شود، مقادیر اندازه‌گیری و تخمین زده شده شاخص S بر یکدیگر منطبق هستند. در صورتی که GMER کمتر و بیشتر از یک شود، مقادیر تخمین زده شده به ترتیب کمتر و بیشتر از مقادیر واقعی می‌باشند. انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا (GSDER) معیاری از پخشیدگی



شکل 2- توزیع نمونه خاک‌های مطالعه شده در مثلث بافت

(1980) و گرانولت و گرنیت (2004) آماره‌های GMER، ME و NRMSE بدست آمده و نکویی برازش مدل‌ها بررسی شد (جداول 1 تا 3). برای تخمین رطوبت

در هر خاک از برازش رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در هفت مکش با رطوبت حجمی برآورد شده با استفاده از مدل‌های بروکز-کوری (1964)، ون‌گنوختن

حداقل اریب (میانگین خطا) برخوردار بود و مقادیر این آماره در مدل مذکور نسبت به سایر مدل‌ها به صفر نزدیک‌تر بود. به‌طور کلی مقادیر آماره‌های ME، GMER و GSDER نشان داد که تفاوت این آماره‌ها در مدل گرانولت-گرت (2004) نسبت به شرایط ایده‌آل (ME) برابر صفر و GMER و GSDER برابر یک) در مقایسه با سایر مدل‌ها کمتر است.

آماره‌های توصیفی ویژگی‌های خاک‌های مورد مطالعه در جدول 4 نشان داده شده است. نتایج بدست آمده نشان داد دامنه تغییرات S در خاک‌های مورد مطالعه بین 0/03 تا 0/23 اما میانگین و میانه آنها به ترتیب 0/09 و 0/08 بود که بر اساس طبقه‌بندی دکستر (2004)، این خاک‌ها از کیفیت فیزیکی مناسبی برای رشد ریشه و قابلیت انجام کار برخوردار می‌باشند. ضریب تغییرات شاخص S، 0/476 بود که نشان‌دهنده غیر یکنواختی نسبتاً زیاد این ویژگی در خاک‌های مورد مطالعه می‌باشد.

اشباع (رطوبت در مکش صفر) در مدل‌های بروکز-کوری و گرانولت-گرت به دلیل وجود θ_s در فرمول از مکش نزدیک به اشباع (0/1 کیلوپاسکال) و در مدل ون‌گنوختن از θ_s بدست آمده از برنامه RETC استفاده شد و با θ_s اندازه‌گیری شده مقایسه شد.

همان‌گونه که نتایج نشان داد (جدول 1 تا 3) میانگین هندسی نسبت خطا (GMER) و انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا (GSDER) در مدل گرانولت-گرت (2004) نسبت به سایر مدل‌ها به یک نزدیک‌تر بود که نشان‌دهنده تطابق بیشتر رطوبت‌های اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده است. ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) در مدل گرانولت و گرت (2004) نسبت به سایر مدل‌ها به صفر نزدیک‌تر بود که نشان می‌دهد اختلاف مقادیر تخمین زده شده با مقادیر اندازه‌گیری شده کمتر بوده و مدل نسبت به سایر مدل‌ها مناسب‌تر است. همچنین مدل گرانولت و گرت (2004) از

جدول 1- برخی آماره‌های صحت برآورد ضرایب منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از مدل بروکز-کوری در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه (1964)

NRMSE	ME	GSDER	GMER	رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف (کیلوپاسکال)	
				$\theta_{0/1}$	θ_{33}
2/611	-1/241	1/545	2/818	θ_{100}	θ_{500}
0/046	-0/002	1/045	1/00	θ_{600}	θ_{1000}
0/097	0/019	1/089	0/953	θ_{1500}	میانگین
0/068	0/004	1/080	0/986		
0/116	-0/017	1/112	1/071		
0/033	-0/003	1/038	1/013		
0/132	-0/016	1/136	1/086		
0/443	-0/179	1/149	1/276		

GMER، GSDER، ME و NRMSE به ترتیب عبارتند از: آماره‌های صحت‌سنجی میانگین هندسی نسبت خطا، انحراف استاندارد هندسی نسبت خطا، میانگین خطا و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده.

جدول 2- برخی آماره‌های صحت برآورد ضرایب منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از مدل ون‌گنوختن (1980) در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه

NRMSE	ME	GSDER	GMER	رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف (کیلوپاسکال)	
				θ_0	θ_{33}
0/094	0/037	1/076	0/938	θ_{100}	θ_{300}
0/328	-0/024	1/093	1/048	θ_{600}	θ_{1000}
0/128	0/028	1/119	0/923	θ_{1500}	میانگین
0/236	0/061	1/158	0/801		
0/271	0/061	1/155	0/771		
0/315	0/073	1/132	0/705		
0/109	0/066	1/148	0/710		
0/211	0/043	1/126	0/842		

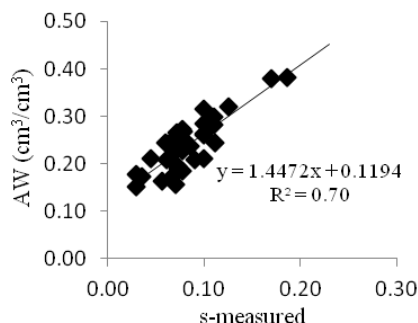
جدول 3- برخی آماره‌های صحت برآورد ضرایب منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از مدل گرانولت-گرنیت (2004) در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه

NRMSE	ME	GSDER	GMER	رطوبت حجمی در مکش‌های مختلف (کیلو پاسکال)
0/004	0/00	1/004	0/999	$\theta_{0/1}$
0/031	-0/002	1/031	1/00	θ_{33}
0/074	0/008	1/075	0/982	θ_{100}
0/070	0/001	1/080	0/994	θ_{300}
0/078	-0/010	1/079	1/045	θ_{600}
0/027	0/002	1/030	0/995	θ_{1000}
0/063	0/001	1/079	1/00	θ_{1500}
0/045	0/00	1/054	1/00	میانگین

λ در مدل بروکز و کوری (1964) و به دنبال آن شیب منحنی در ناحیه غیراشباع (گیمنز و همکاران، 2001) و نقطه عطف (S) افزایش می‌یابد.

یکی از مبانی فرضیه دکستر (2004) مبنی بر اینکه شاخص k_s معیاری از کیفیت فیزیکی خاک است، این است که چندین ویژگی فیزیکی مهم خاک به طور مستقیم می‌تواند از شاخص k_s تخمین زده شود. مقدار آب قابل دسترس یکی از ویژگی‌های فیزیکی خاک است که با شاخص k_s همبستگی مثبت معنی‌دار داشت (شکل 3). روابط مشابهی توسط ویزتو و همکاران (2011)، اصغرزاده و همکاران (2010) و گاته و همکاران (2006) گزارش شده است.

همبستگی بین ویژگی‌های خاک در جدول 5 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد همبستگی معنی‌داری بین شاخص k_s اندازه‌گیری شده با سیلت، رس، رطوبت در نقطه پژمردگی دائم و آب قابل دسترس وجود دارد. در بین شاخص‌های k_s برآورد شده با مدل‌های مختلف، بیشترین همبستگی با ویژگی‌های پایه خاک از آن مدل بروکز و کوری (1964) بود که همبستگی معنی‌دار و زیادی با چگالی ظاهری ($-0/778$) و رطوبت اشباع خاک ($0/718$) داشت. با غرقاب و گل‌خراب کردن خاک، ساختمان تخریب و منافذ بزرگ بین‌خاکدانه‌ای به منافذ ریز بافتی تبدیل و توزیع اندازه منافذ یکنواخت‌تر می‌شود. در این حالت منافذ خاک افزایش و چگالی ظاهری کاهش می‌یابد. با یکنواخت‌تر شدن توزیع اندازه منافذ، شاخص



شکل 3- رابطه آب قابل دسترس گیاه (AW) با شاخص کیفیت فیزیکی خاک، k_s در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه

جدول 4- ماتریس ضرایب همبستگی خطی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه

آماره	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	جرم مخصوص ظاهری (g/cm ³)	کربن آلی (%)	رطوبت اشباع (cm ³ /cm ³)	θ_{33kPa} (cm ³ /cm ³)	$\theta_{1500kPa}$ (cm ³ /cm ³)	مقدار آب قابل دسترس	S اندازه-گیری شده	S پروکز و کوری (1964)	S ون-گنوختن (1980)	S گرانولت و گرت (2004)
حداقل	4	17	10	0/78	0/35	0/42	0/36	0/10	0/15	0/03	0/03	0/06	0/03
حداکثر	56	70	49	1/56	5/64	0/74	0/56	0/31	0/38	0/23	0/21	0/31	0/14
میانگین	23/5	47/7	28/77	1/09	2/17	0/59	0/46	0/22	0/24	0/09	0/12	0/14	0/07
میانه	22	49/5	29	1/07	1/96	0/59	0/47	0/22	0/24	0/08	0/12	0/12	0/07
واریانس	125	161	83	0/036	1/84	0/004	0/003	0/002	0/003	0/002	0/002	0/003	0/0006
چولگی	1/21	-/505	0/088	0/499	0/979	-0/351	-0/333	-0/289	0/622	1/65	-0/16	1/31	0/44
کشیدگی	2/14	0/561	0/222	0/385	0/717	1/097	-1/1	-0/254	0/325	3/659	-0/34	1/95	0/27
ضریب تغییرات	0/47	0/266	0/316	0/176	0/624	0/106	0/126	0/219	0/238	0/476	0/38	0/40	0/35

جدول 5- آمار توصیفی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه

S گرانولت و گرت (2004)	S ون گنوختن (1980)	S پروکز و کوری (1964)	مقدار آب قابل دسترس	رطوبت نقطه پژمردگی	رطوبت ظرفیت زراعی	جرم مخصوص ظاهری	رس	سیلت	شن	رطوبت اشباع	کربن آلی
											0/581
										0/140 ^{ns}	0/079 ^{ns}
										-0/204 ^{ns}	-0/087 ^{ns}
										0/118 ^{ns}	0/028 ^{ns}
										-0/716	-0/087 ^{ns}
										-0/213 ^{ns}	0/028 ^{ns}
										-0/529 ^{***}	0/028 ^{ns}
										-0/212 ^{ns}	-0/732
										0/335 ^{ns}	جرم مخصوص ظاهری
										-0/198 ^{ns}	0/524
										-0/190 ^{ns}	رطوبت ظرفیت زراعی
										0/443	0/341
										-0/041 ^{ns}	رطوبت نقطه پژمردگی
										-0/317 ^{ns}	0/341
										0/443	مقدار آب قابل دسترس
										-0/573	0/245 ^{ns}
										0/373	0/245 ^{ns}
										-0/103 ^{ns}	0/585 ^{**}
										-0/287 ^{ns}	0/585 ^{**}
										0/415 [*]	S
										0/718 ^{**}	0/585 ^{**}
										-0/014 ^{ns}	S ون گنوختن (1980)
										0/427	0/147 ^{ns}
										0/427	0/147 ^{ns}
										0/146 ^{ns}	0/444 ^{**}
										0/151 ^{ns}	گرانولت و گرت (2004) S
										0/518 ^{**}	0/444 ^{**}
										0/036 ^{ns}	0/150 ^{ns}
										0/291 ^{ns}	S اندازه گیری شده
0/654	0/671	0/398	0/722	-0/488	0/294 ^{ns}	-0/212 ^{ns}	-0/530	0/351	0/036 ^{ns}	0/291 ^{ns}	0/150 ^{ns}

FC، PWP و AW به ترتیب رطوبت حجمی ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم (اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه به ترتیب در مکش‌های 33 و 1500 کیلوپاسکال) و رطوبت قابل دسترس برای گیاه می‌باشند.

*: معنی‌دار در سطح احتمال پنج درصد، **: معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد، ^{ns}: غیر معنی‌دار

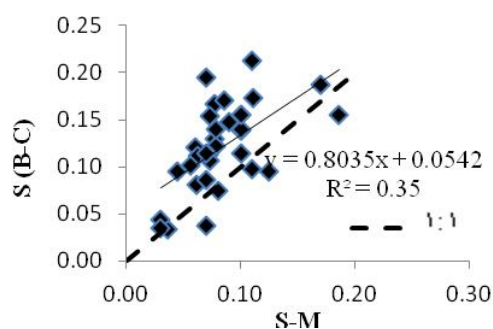
افزایش یافته و در نتیجه مقدار شاخص S کاهش می‌یابد. این روند کاهش‌ی توسط دکستر (2004)، امامی و همکاران (1387 و 1389) نیز گزارش شده است. همچنین ذرات رس دارای بار الکتریکی منفی بوده که با افزایش مقدار رس، دافعه بین ذرات افزایش و در نتیجه پایداری ساختمان خاک کاهش یافته و این امر منجر به کاهش شاخص S می‌شود (رحیمی و همکاران، 2000). همبستگی بین شاخص S اندازه‌گیری شده و رطوبت در نقطه پژمردگی دائم، منفی بود (جدول 5). رطوبت PWP تحت تأثیر بافت خاک و به‌ویژه مقدار رس است. گاردنر (1970) نشان داد که رطوبت در نقطه پژمردگی دائم (مکش 1500 کیلوپاسکال) همبستگی زیادی با بافت خاک دارد. شیب منحنی مشخصه و خروج آب از خاک‌های ریزبافت یکنواخت‌تر است در حالی که خاک‌های درشت-بافت رطوبت خود را در یک دامنه مکش معین به‌طور ناگهانی از دست می‌دهند. بنابراین همبستگی منفی بین شاخص S و رطوبت PWP مشاهده شد. به‌عبارتی افزایش رطوبت PWP، نشان‌دهنده افزایش رس و افزایش رس به-نوبه خود سبب کاهش S می‌شود.

پس از تعیین ضرایب معادلات بروکز و کوری (1964)، ون‌گنوختن (1980) و گرانولت و گرت (2004)، شاخص S در خاک‌های مورد مطالعه تعیین و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد (شکل‌های 4 تا 6). نتایج ارزیابی صحت برآورد شاخص S توسط مدل‌ها در جدول 6 نشان داده شده است. علی‌رغم آنکه شاخص S برآورد شده با مدل بروکز و کوری (1964) در مقایسه با سایر مدل‌ها همبستگی معنی‌دار بیشتری با برخی از ویژگی‌های خاک نشان داد، اما مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده شاخص S با مدل بروکز و کوری (1964) و به دنبال آن ون‌گنوختن (1980)، پراکندگی بیشتری در اطراف خط 1:1 نشان دادند و در بسیاری از موارد، مدل‌های مذکور شاخص S را بیش از مقادیر واقعی (اندازه-گیری شده) برآورد نمودند.

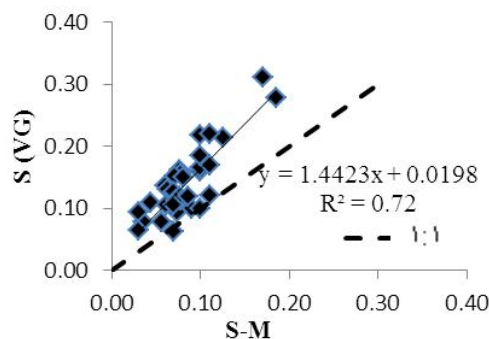
مطالعات دکستر (2004)، تورمنا و همکاران (2008)، کیونها و همکاران (2011) در خاک‌های غیر شالیزاری نیز نشان داد که همبستگی زیادی بین شاخص S با منافذ و چگالی ظاهری خاک وجود دارد. در اراضی کشاورزی غیر شالیزاری بر اثر عبور ماشین‌آلات کشاورزی و عبور دام‌ها، منافذ خاک به‌ویژه منافذ درشت‌تر که بیشتر مستعد فروپاشی هستند، تخریب می‌شوند. منافذ درشت و تخلخل کل خاک (و همچنین θ_s) کاهش یافته و در نتیجه چگالی ظاهری خاک افزایش می‌یابد. منافذ کوچک خاک کمتر تحت تأثیر این فرایند قرار می‌گیرند، حتی ممکن است بر تعداد این منافذ افزوده شود (سیگل و همکاران، 2005؛ باتلر و همکاران، 2007). هرگاه اختلاف بین رطوبت اشباع و رطوبت باقیمانده کاهش یابد، مقدار شاخص S نیز کاهش می‌یابد. محققین دیگری نیز اثرات مضر تراکم بر کیفیت فیزیکی خاک را گزارش کرده‌اند (بونت و همکاران، 1986؛ بتز و همکاران، 1998).

تراکم خاک، فرایندی از تخریب ساختار خاک است که در درجه اول سبب کاهش حجم بزرگترین منافذ شده و در ادامه سبب تغییر توزیع اندازه منافذ، شکل منحنی مشخصه آب خاک و در نهایت کاهش شیب این منحنی می‌شود (دکستر، 2004). خاک‌های شالیزاری به دلیل گل-خرابی فاقد منافذ ساختمانی بوده و در این خاک‌ها تنها منافذ بافتی وجود دارد. مطالعات دکستر و همکاران (2008) نشان داد که شاخص کیفی خاک همبستگی بیشتری با منافذ ساختمانی ($R^2=0.65$) در مقایسه با منافذ بافتی ($R^2=0.49$) دارد. نتایج این محققان همچنین نشان داد که وجود هر دو نوع منافذ در تعیین S اهمیت دارد و بین مجموع منافذ ریز و درشت و شاخص کیفیت فیزیکی خاک (S) همبستگی معنی‌داری ($R^2=0.86$) وجود دارد.

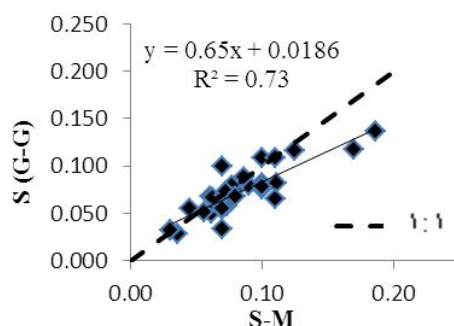
رس نیز نقش مهمی در کنترل ویژگی‌های فیزیکی خاک دارد. تغییرات شاخص S با تغییرات رس در خاک همبستگی منفی معنی‌دار داشت (جدول 5). زیرا با افزایش رس در خاک، منافذ بافتی نسبت به منافذ ساختمانی



شکل 4- مقایسه شاخص S اندازه‌گیری شده (S-M) و برآورد شده (S-B-C) از مدل بروکز و کوری (1964)



شکل 5- مقایسه شاخص S اندازه‌گیری شده (S-M) و برآورد شده (S-VG) از مدل ون‌گنوختن (1980)



شکل 6- مقایسه شاخص S اندازه‌گیری شده (S-M) و برآورد شده (S-G-G) از مدل گرانولت و گرنیت (2004)

جدول 6- مقایسه آماره‌های صحت برآورد شاخص S با استفاده از مدل‌های مختلف در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه

مدل	GMER	GSDER	ME	NRMSE
بروکز و کوری (1964)	1/38	1/50	0/032	0/65
ون‌گنوختن (1980)	1/64	1/38	0/052	0/76
گرانولت و گرنیت (2004)	0/85	1/33	-0/015	0/40

آماره‌های ME و GMER نشان داد این مدل شاخص S را کمتر از مقادیر واقعی برآورد می‌کند. مقادیر آماره‌های ME، GMER و GSDER نشان داد که فاصله این آماره‌ها در این مدل نسبت به شرایط ایده‌آل (ME برابر صفر و GMER و GSDER برابر یک) در مقایسه با سایر مدل‌ها کمتر است. بخشی از عدم قطعیت مدل ون‌گنوختن (1980) در برآورد شاخص S به محدودیت‌های آن در برآورد تام منحنی مشخصه آب خاک که نقطه عطف جزئی از آن است، مرتبط می‌شود. محدودیت مدل در محدوده ناحیه رطوبت باقیمانده و عدم تناسب آن در خاک‌های با توزیع اندازه منافذ دو مدی از جمله این محدودیت‌هاست (دکستر و همکاران، 2008). به همین

نتایج مربوط به آماره‌های صحت‌سنجی برآورد شاخص S نشان داد مدل گرانولت و گرنیت (2004)، دارای کمترین NRMSE و ME و پس از آن مدل بروکز و کوری (1964) در مقایسه با مدل ون‌گنوختن (1980) از NRMSE و ME کمتری برخوردار بودند (جدول 6). آماره‌های ME و GMER، نشان داد شاخص S برآورد شده با استفاده از مدل‌های ون‌گنوختن (1980) و بروکز و کوری (1964) در مقایسه با مدل گرانولت و گرنیت (2004) از بیش برآوردی بیشتری برخوردار بودند. هرچند نقاط مربوط به مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده با استفاده از مدل گرانولت و گرنیت (2004) تقریباً در اطراف خط یک به یک پراکنده هستند (شکل 6)، اما

(1980) است که در سطح وسیع رایج است، اما نتایج این مطالعه نشان داد که استفاده از مولفه‌های مدل گرانولت و گرت (2004) در تعیین شاخص S از صحت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها مانند مدل‌های ون‌گونختن (1980) و بروکز و کوری (1964) برخوردار است که بخشی از توانایی بیشتر این مدل در برآورد صحیح شاخص S به ارتباط مستقیم این شاخص با پارامتر r مدل مربوط است. بنابراین توصیه می‌شود برای ارزیابی کیفیت خاک‌های شالیزاری از شیب نقطه عطف مدل گرانولت و گرت (2004) استفاده شود.

علی‌رغم اینکه برخی پژوهشگران (لایر، 2014) بیان نموده‌اند که استفاده از شاخص S نمی‌تواند معیار مناسبی از کیفیت فیزیکی خاک باشد ولی شاخص S تعیین شده در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه، همبستگی معنی‌داری با بسیاری از ویژگی‌های مؤثر بر کیفیت فیزیکی خاک (مانند رس، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت نقطه پژمردگی دائم، و رطوبت قابل استفاده و ...) داشت. بنابراین به جای اندازه‌گیری چندین ویژگی مؤثر بر کیفیت فیزیکی خاک می‌توان با استفاده از شاخص S شرایط فیزیکی خاک‌های مختلف و اثر عملیات مدیریتی بر خاک‌ها را مقایسه نمود. چندین ویژگی فیزیکی مهم خاک مانند آب قابل دسترس برای گیاه به طور مستقیم از شاخص S تأثیر پذیرند. در خاک‌های مورد مطالعه، شاخص کیفیت فیزیکی بیش از 0/035 بود که نشان می‌دهد خاک‌ها از کیفیت مناسبی برای رشد ریشه و قابلیت انجام کار برخوردارند و این شاخص می‌تواند به عنوان معیاری در تصمیم‌سازی مدیریت آبیاری در اراضی شالیزاری استفاده شود.

ترتیب مدل بروکز و کوری (1964) نیز در خاک‌های ریزبافت و به‌ویژه در مکش ورود هوا و نزدیک به اشباع با محدودیت برآورد صحیح مواجه است (گیمنز و همکاران، 2001).

در مدل گرانولت و گرت (2004) دشواری‌های سایر مدل‌ها وجود ندارد. در بیشتر مدل‌ها، منحنی در پایانه خشک شدن محور مربوطه را قطع نمی‌کند و رطوبت خاک در هیچ مکشی به صفر نمی‌رسد. در سال 2004 گرانولت و گرت برای حل این مشکل معادله ساده‌ای را برای برآورد منحنی مشخصه آب خاک پیشنهاد کردند. به نظر می‌رسد یکی از موفقیت‌های مدل گرانولت و گرت (2004) در پیش‌بینی صحیح‌تر نقطه عطف منحنی به توانایی مدل در برازش پایانه خشک منحنی (رطوبت خشک شده در آن) و توانایی سه مولفه مدل در نشان دادن مناسب نقطه عطف منحنی است (گرانولت و گرت، 2004). خلوصی و همکاران (2008) نشان دادند مدل گرانولت و گرت (2004) برای شبیه‌سازی منحنی مشخصه دقت قابل قبولی دارد. از سوی دیگر در مدل گرانولت و گرت (2004)، نیز شاخص S به‌طور مستقیم با پارامتر برازشی r متناسب است. به نظر می‌رسد یکی از دلایل برتری این مدل نسبت به مدل ون‌گونختن (1980) وجود این رابطه مستقیم بین پارامترهای برازشی و S باشد.

نتیجه‌گیری

شیب نقطه عطف منحنی مشخصه آب خاک که به‌عنوان شاخص کیفیت فیزیکی خاک، S، نیز مشهور است می‌تواند نشان‌دهنده جنبه‌های مختلف کیفیت فیزیکی خاک از قبیل نفوذ آب، هوا و ریشه و تراکم باشد. اما اندازه‌گیری مستقیم این شاخص به دلیل تقدم تعیین منحنی مشخصه آب خاک وقت‌گیر و پرهزینه است. یک روش جایگزین و رایج برای برآورد سریع این شاخص استفاده از مدل‌های با مبنای فیزیکی و ریاضی مانند مدل ون‌گونختن

فهرست منابع:

- اصغری، ش.، ا. روزبان، و ح. خداوردیلو. 1395. اشتقاق توابع انتقالی برای برآورد مقاومت فروروی، پایداری خاکدانه و پارامترهای مدل منحنی مشخصه ون‌گونختن در اراضی جنگلی فندقلوی اردبیل. نشریه دانش آب و خاک. جلد 26، شماره 2، صفحات: 129-148.
- امامی، ح.، ا. لکزیان و م. مهاجرپور. 1389. بررسی رابطه بین شیب منحنی رطوبتی و بعضی از ویژگی‌های فیزیکی کیفیت خاک. نشریه آب و خاک. جلد 24، شماره 5، صفحات: 1035-1027.
- امامی، ح.، م. ر. نیشابوری، م. شرفاء و ع. ا. لیاقت. 1388. تخمین رطوبت نقطه عطف منحنی مشخصه با استفاده از ویژگی‌های زودپافت خاک. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 23، شماره 2، صفحات: 103-95.

4. امامی، ح.، م. شرفاء، م. ر. نیشابوری و ع. ا. لیاقت. 1387. برآورد شاخص کیفیت فیزیکی خاک با استفاده از ویژگی‌های زود یافت خاک در تعدادی از خاکهای شور و آهکی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران علوم کشاورزی ایران، دوره 39، شماره 1، صفحات: 46-39.
5. شهاب آرخازلو، ح.، ح. امامی، غ.ح. حق‌نیا و ع.ر. کریمی کارویه. 1390. مقایسه منحنی توزیع اندازه منافذ خاک اراضی مرتعی با اراضی کشاورزی به عنوان شاخص کیفیت فیزیکی خاک. دوازدهمین کنگره علوم خاک. تبریز.
6. علیزاده، ا. 1386. فیزیک خاک، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد، ایران.
7. محمدی، ج.، ح. خادمی و م. نائل. 1384. بررسی تغییر پذیری کیفیت خاک در اکوسیستم‌های انتخابی در منطقه زاگرس مرکزی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. جلد 9، شماره 3، صفحه: 120-105.
8. Armenise, E., M.A. Redmile-Gordon, A.M. Atellacci, A. Ciccarese and P. Rubino. 2013. Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil Till. Res.* 130: 91-98.
9. Asgarzadeh, H., M. R. Mosaddeghi, A. A. Mahboubi, A. Nosrati, and A. R. Dexter. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant Soil*, 335: 229-244.
10. Baumgartl, T., J. Rostek, and R. Horn. 2000. Internal and external stresses affecting the water retention curve. In: Horn, R., van den Akker, J., Arvidsson, J. (Eds.), *Soil Compaction: Distribution, Processes and Consequences* Advances in GeoEcology, vol. 32. Catena-Verlag, Reiskirchen, pp. 13– 21.
11. Blake, G.R., and K.H. Hartge. 1986. Bulk density. p. 363-375. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
12. Brooks R.H. and A.T. Corey. 1964. Hydraulic properties of porous media. *Colorado State University. Hydrol.* 3: 27.
13. Betz, D.L., R.R. Allmaras, S.M. Copeland, and G.W. Randal. 1998. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1384-1393.
14. Beutler, A.N., J.F. Centurion, M.A.P.C. Centurion, O.S. Freddi, E.L. Sousaneto, C.L. Leonel, and A.P. Dasilva. 2007. Traffic soil compaction of an Oxisol related to soybean development and yield. *Sci. Agric.* 64:608- 615.
15. Boonet, F.R., H.M.G. Werf, B. Kroesbergen, B.A. Haag, and A. Boers. 1986. The effect of compaction of arable layer in sandy soils on the growth of maize for silage. I. Critical potentials in relation to soil aeration and mechanical impedance. *Netherlands J. Agric. Res.* 34:155-171.
16. Cunha, E.Q., L.F. Stone, J.A.A. Moreira, E.P.B. Ferreira, A.D. Didonet, and W.M. Leandro. 2011. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I - Atributos físicos do solo. *R. Bras. Ci. Solo.* 35:589-602.
17. Dane. J. M., and J. W. Hopmans. 2002. Pressure plate extractor. p: 688- 690. In J. M. Dane and G. C. Topp. (Eds.) *Methods of soil analysis. Part 4.* Soil Sci. Soc. Am. Book series. 5. Madison, Wisconsin, USA.
18. Dexter, A.R. 2004a. Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120: 201-214.
19. Dexter, A.R. 2004b. Soil physical quality. Part II: Friability, tillage, tilth and hard-setting. *Geoderma*, 120: 215–226.
20. Dexter A.R., E.A. Czyz, G. Richard, and A. Reszkowska. 2008. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. *Geoderma*, 143: 143-253.
21. Gardner, W.R. 1970. Post-irrigation movement of soil water. *Water Resour. Res.* 6: 851-861.

22. Gate, O.P., E.A. Czyz, and A.R. Dexter. 2006. "Soil physical quality, S, as a basis for relationships between some key physical properties of arable soils". In R. Horn, H. Fleige, S. Peth & X. Peng (Eds.) *Soil Management for Sustainability. Advances in Geocology* 38, Catena Verlag, Germany, pp. 102-109.
23. Gee, G.W., and J.W. Bauder. 1986. Particle size analysis. p. 383-411. In A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
24. Gimenez, D., W.J. Rawls, Y. Pachepsky, and J.P.C. Watt. 2001. Prediction of a pore distribution factor from soil textural and mechanical parameters. *Soil Sci. J.* 166: 79-88.
25. Groenevelt, P.H., and C.D. Grant. 2004. A new model for the soil water retention curve that solves the problem of residual water contents. *Eur. J. Soil Sci.* 55: 479-485.
26. Gue´rif, J., G. Richard, C. Du´rr, J.M. Machet, S. Recous, and J. Roger- Estrade. 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Till. Res.* 61, 13– 32.
27. Herrick, J.E. 2000. Soil quality: an indicator of sustainable land management. *Applied Soil Ecology.* 15: 75–83.
28. Jones, R.J.A., 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1208-1211.
29. Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris, and G.E. Schuman. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
30. Khlosi, M., W.M. Cornelis, S. Douak, M.T. Van Genuchten, and D. Gabriel. 2008. Performance evaluation of models that describe the soil water retention curve between saturation and oven dryness. *Vadose Zone J.* 7: 87-96.
31. Leir, Q.J. 2014. Revisiting the S index for soil physical quality and its use in Brazil. *R. Bras. Ci. Solo.* 38: 1-10.
32. Mc Lean, E.O. 1982. Soil pH and lime requirement. p. 199-224. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
33. Nelson, D.W., and L.E. Sommers. 1982. Total carbon, Organic carbon and Organic matter. p. 539-580. In A.L. Page et al. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.*
34. Pagliai, M., N. Vignozzi, and S. Pellegrini. 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil Till. Res.* 79, 131–143.
35. Rahimi H., E. Pazira, and F. Tajik. 2000. Effect of soil organic matter, electrical conductivity and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. *Soil Till. Res.* 54:145-153.
36. Reynolds, W.D., C.F. Drury, C.S.Tan, C.A. Fox, and X.M. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152: 252-263.
37. Siegel-Issem, C.M., J.A. Burger, R.F. Powers, F. Ponder, and S.C. Patterson. 2005. Seedling root growth as a function of soil density and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:215-226.
38. Tietje, O. and Hennings, V. 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedotransfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma*, 69: 71-84.
39. Tormena, C.A., A.P. Dasilva, S.D.C Imhoff, and A.R. Dexter. 2008. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. *Sci. Agric.* 65:56-60.
40. Toung, T. P., M. S. C. Wopereis, J. A. Marques, and M. J. Kropff. 1994. Mechanisms and control of percolation losses in puddle rice fields. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1794-1803.

41. Tran ba, L., Kh. Le Van, S. Van Elsacker, and E. M. Cornelis. 2016. Effect of cropping system on physical properties of clay soil under intensive rice cultivation. *Land Degrad. Develop.* 27: 973-982.
42. Van Genuchten M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
43. Vizitiu, O., I. Calciu, I. Panoiu, and C. Simota. 2011. Soil physical quality as quantified by s index and hydrophysical indices of some soils from Arges hydrographic basin. *Research J. Agric. Sci.* 43(3): 249-256.
44. Wopereis, M. C. S., M. J. Kropff., J. H. M. Wosten, and J. Bouma. 1993. Sampling strategies for measurement of soil hydraulic properties to predict rice yield using simulation models. *Geoderma*, 59: 1- 20.

Comparison of Different Soil Water Retention Curve Models for Evaluation of Soil Quality Index (S) in Paddy Soils

L. Rezaee¹, A. A. Moosavi, N. Davatgar and M. Shabanpor Shahrestani

PhD student, Department of Soil Science, college of Agriculture, Shiraz University; E-mail:

l.rezaee77@gmail.com

Associate Professor, Department of Soil Science, college of Agriculture, Shiraz University;

E-mail: aamousavi@gmail.com

Associate Professor, Soil and Water Research Institute of Iran; E-mail: n_davatgar@yahoo.com

Associate Professor, Department of Soil Science, college of Agriculture, Guilan University;

E-mail: shabanpour@guilan.ac.ir

Received: December, 2016 and Accepted: May, 2017

Abstract

Soil quality is not directly measurable, and it is determined from soil quality indicators. The slope of the water retention curve at its inflection point is one of these indices. The S associated with different factors, for examples, organic carbon, bulk density, texture and soil structure. The purpose of this study was to compare three models for determining soil physical quality index and assessing the physical quality of paddy soils using this index. So, 35 distributed soil samples were collected from paddy soils in eastern and western parts of Guilan province, and texture, bulk density, organic carbon, saturation water content, water content at field capacity and wilting point were measured. The Brooks and Corey, van Genuchten, and Groenevelt and Grant models were used to determine the S index. The RETC program was used to estimate the parameters of the van Genuchten model, which were later used to estimate the slope of the water retention curve at its inflection point. By applying the MATLAB software, the parameters of Brooks and Corey (1964) and Groenevelt and Grant (2004) models were determined and then S index was obtained. The indicators of geometric mean error ratio (GMER), geometric standard deviation of error ratio (GSDER), mean error (ME) and normalized root mean square error (NRMSE) were used to evaluate the goodness of fits for the models. The Groenevelt and Grant model could estimate the SMRC with the minimum values of ME and NRMSE at all tensions. Furthermore, the GMER and GSDER values of this model at all tensions were closer to 1 as compared to the other models. The Groenevelt and Grant model with ME=-0.015 and NRMSE=0.4 was the best model compared with the other models. Also, the geometric mean error ratio and geometric standard deviation of error ratio (GMER=0.85, GSDER=1.33) were lower in Groenevelt and Grant model. Besides, results showed that physical quality of the studied soils was good. The significant correlations between S and clay, water content at wilting point, and bulk density were negative ($P<0.01$); whereas its correlation with available water and the other soil attributes were positive ($P<0.05$). Although some investigators believe that S cannot be a good index of soil physical quality, the determined S index of the studied paddy soils showed significant correlation with attributes affecting the physical quality of soils. Therefore, by applying the S quality index, it could be possible to compare the physical conditions of different soils and the effect of various management practices on them instead of measurements of several attributes affecting the soil physical quality. The physical quality index of the studied paddy soils was greater than 0.035, which indicated that the quality of the soils was good for paddy production.

Keywords: Bulk density, Compaction, Field capacity, Organic carbon, Wilting point

¹ Corresponding author: Department of Soil Science, college of Agriculture, Shiraz University, Shiraz.