

## The Effect of Field Capacity in Determination and Evaluation of the Soil Physical Quality Indices

FATEMEH MESKINI-VISHKAEI<sup>1\*</sup>, RASOUL MIRKHANI<sup>2</sup>

1. Assistant Professor, Soil and Water Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.

2. Ph.D. Student, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

(Received: July. 28, 2018- Revised: Sep. 3, 2018- Accepted: Sep. 11, 2018)

### ABSTRACT

Estimating the soil physical indices requires determination of soil moisture content at field capacity (FC). Therefore, the aim of this study was to evaluate the effect of various soil suctions according to field capacity on different soil physical quality indices and subsequently to evaluate the soil physical quality based on the calculated indices. In this study, 35 soil samples from agricultural lands of Alborz province were used to calculate Dexter's S, air capacity, plant available water and relative field capacity indices. The results showed that only 20 % of the soil samples were in weak soil physical quality groups ( $S < 0.035$ ) and the rest of soil samples had a good or better soil physical quality (80 %) on the basis of Dexter's S index. However, the results of other indices showed by assuming a FC moisture content at soil suction of 100, 330 cm and calculated suction based on the negligible drainage rate concept, 12, 44 and 70% of soil samples, respectively had a good physical quality in terms of soil aeration, water availability and microbial activity. There was no significant difference between the average FC at equivalent soil suction of 330 cm and the proposed approach based on the negligible drainage rate. Hence, the soil physical indices based on FC at soil suction of 330 cm can be used to evaluate the soil physical quality of the studied soils. Moreover, the results showed that despite of good ability of S index, use of other soil physical quality indices leads to a more comprehensive assessment of soil physical limitation on crop growth. However, determination of the soil quality indices requires an accurate estimation of soil moisture content at the field capacity.

**Keywords:** Air capacity index, Dexter's S index, Plant available water, Relative field capacity index.

## اثر رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در تعیین و ارزیابی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک

فاطمه مسکینی ویشکایی<sup>۱\*</sup>، رسول میرخانی<sup>۲</sup>

۱. استادیار، بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان خوزستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران.

۲. دانشجوی دکتری، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۵/۶ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۶/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۶/۲۰)

### چکیده

برآورد بسیاری از شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک مستلزم تعیین رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه‌ای (FC) است. لذا هدف این پژوهش، ارزیابی اثر مکش‌های مختلف معادل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای بر مقدار شاخص‌های مختلف کیفیت فیزیکی خاک و سپس ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه بر مبنای شاخص‌های محاسبه شده بود. در این پژوهش از ۳۵ نمونه خاک از اراضی کشاورزی استان البرز استفاده و شاخص‌های S دکستر، ظرفیت هوا، آب قابل استفاده گیاه و ظرفیت مزرعه‌ای نسبی محاسبه گردید. نتایج نشان داد که براساس شاخص S دکستر، تنها ۲۰ درصد از نمونه‌های خاک در گروه کیفیت فیزیکی ضعیف ( $S < 0.035$ ) قرار گرفتند و سایر نمونه‌های خاک از کیفیت فیزیکی خوب یا بهتری برخوردار بودند (۸۰ درصد). در حالی که نتایج سایر شاخص‌ها نشان داد که با فرض رطوبت FC در مکش‌های ۱۰۰، ۳۳۰ سانتی‌متر و مکش محاسبه شده براساس مفهوم شدت زهکشی ناچیز، به ترتیب ۱۲، ۴۴ و ۷۰ درصد از نمونه‌های خاک از لحاظ تهویه، قابلیت دسترسی آب خاک و فعالیت میکروبی، کیفیت فیزیکی مناسبی داشتند. بین میانگین رطوبت FC در مکش معادل ۳۳۰ سانتی‌متر و روش پیشنهادی براساس شدت زهکشی ناچیز اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. بنابراین، می‌توان از شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک بر مبنای رطوبت FC در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر برای ارزیابی کیفیت فیزیکی در خاک‌های مورد مطالعه استفاده نمود. نتایج نشان داد که علی‌رغم توانایی خوب شاخص S دکستر، استفاده از سایر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک موجب ارزیابی جامع‌تری از محدودیت‌های فیزیکی خاک بر رشد گیاه می‌گردد اما تعیین شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک مستلزم برآورد صحیحی از مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای خاک می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آب قابل استفاده گیاه، شاخص S دکستر، شاخص ظرفیت مزرعه‌ای نسبی، شاخص ظرفیت هوا.

### مقدمه

از اهداف مدیریت پایدار کشاورزی، به‌کارگیری روش‌های مدیریتی است که از یک‌سو باعث ارتقاء کمی و کیفی تولید محصول در طولانی‌مدت می‌شود و از سوی دیگر، باعث حفظ کیفیت و جلوگیری از تخریب آن می‌شوند. بنابراین، با پایش کیفیت خاک می‌توان تأثیر شیوه‌های مدیریت خاک را مورد ارزیابی قرار داد. کیفیت خاک به صورت "گنجایش خاک برای تولید در اکوسیستم و کاربری اراضی برای حفظ باروری بیولوژیکی، کیفیت محیط زیست و تقویت سلامتی گیاه و حیوان" تعریف شده است (Doran et al., 1994). حفظ یا بهبود کیفیت خاک می‌تواند باعث ایجاد استمرار در باروری خاک، افزایش کارایی جذب عناصر غذایی و آفت‌کش‌ها، بهبود کیفیت آب و هوا و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شود (USDA, 1997). کیفیت فیزیکی خاک‌های کشاورزی عمدتاً به پایداری

ساختمان خاک و توانایی آن‌ها در انتقال و ذخیره آب در ناحیه توسعه ریشه بستگی دارد (Reynolds et al., 2002; Topp et al., 1997). ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک برای هر منطقه، به‌منظور دستیابی به نوع مدیریت مناسب و پایدار و کمی‌کردن مفهوم مدیریت پایدار خاک ضروری است. از آنجایی که عملکرد خاک به‌طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست، ارزیابی کیفیت خاک با اندازه‌گیری برخی ویژگی‌ها به‌عنوان شاخص‌های کیفیت خاک انجام می‌شود. با بررسی شاخص‌های فیزیکی کیفیت خاک می‌توان از وضعیت خاک از نظر تهویه، سرعت نفوذ آب و دیگر شرایطی که برای رشد بهینه محصول مورد نیاز است، آگاه شد. همچنین این بخش از کیفیت خاک، تأثیر بسزایی بر فرآیندهای شیمیایی و بیولوژی در خاک و جذب آب و عناصر غذایی خاک توسط گیاه دارد (Dexter, 2004). بنابراین کیفیت فیزیکی خاک، نقشی اساسی در مطالعات کیفیت خاک ایفا می‌کند و بررسی آن

بلکه مقدار رطوبتی است که در آن، خروج آب از منطقه ریشه ناچیز می‌گردد و مقدار رطوبت خاک در طی زمان تغییر نمی‌یابد (Cassel and Nielsen, 1986). اخیراً (Assouline and Or, 2014) با فرض اینکه در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای، پیوستگی فاز مایع در طول ستون خاک در حال زهکشی از بین می‌رود، با استفاده از پارامترهای مدل ون‌گنوختن حاصل از برازش بر داده‌های منحنی مشخصه آب خاک، رابطه‌ای را پیشنهاد نمودند که قادر است مکش معادل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای را برای هر خاک محاسبه نماید.

بنابراین، با توجه به اهمیت ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک-های اراضی زراعی کشور و توسعه کشاورزی پایدار، بررسی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک بسیار حائز اهمیت است، اما انجام این کار مستلزم بررسی اثر تعیین مکش معادل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در محاسبه شاخص‌های مختلف است. لذا، هدف این پژوهش (۱) ارزیابی اثر مکش‌های مختلف معادل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (مکش‌های ثابت ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر و مکش محاسبه شده به روش پیشنهادی (Assouline and Or, 2014)) بر مقدار شاخص‌های مختلف کیفیت فیزیکی خاک و (۲) ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک‌های مورد مطالعه برمبنای شاخص‌های محاسبه شده می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

در این پژوهش ۳۵ نمونه خاک به صورت تصادفی از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری از اراضی کشاورزی استان البرز در شهرستان کرج نمونه‌برداری و به آزمایشگاه منتقل و برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه اندازه‌گیری شد. آماره‌های توصیفی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۱) آمده است. کرین آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (Walkley and Black, 1934)، میزان کل مواد خنثی‌شونده (TNV) به روش خنثی‌سازی با اسید، بافت خاک به روش هیدرومتر و الک (Gee and Or, 2002) و جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از نمونه دست‌نخورده و به روش سیلندر (Grossman and Reinsch, 2002) تعیین گردید. میانگین هندسی قطر ذرات،  $d_g$  (mm)، به روش Shirazi and Borsma (1984) برای هر کلاس بافت خاک با در نظر گرفتن هر سه جزء ذرات خاک (شن، سیلت و رس) محاسبه گردید. به منظور تعیین منحنی مشخصه آب خاک، ابتدا نمونه‌ها با محلول کلرید کلسیم ۰/۰۱ نرمال از پائین اشباع و رطوبت آن‌ها با استفاده از ستون قیف آویزان (در مکش ۱۰ تا ۱۵۰ سانتی‌متر)، دستگاه صفحات فشاری (در مکش ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ سانتی‌متر) و غشای فشاری (در

برای حفظ محیط زیست و جلوگیری از تخریب خاک، ضروری به نظر می‌رسد (Reynolds et al., 2009). به منظور بررسی وضعیت کیفیت فیزیکی خاک بایستی از ویژگی‌های معرف کیفیت پویای خاک بهره‌گیری نمود که نسبت به تغییر کاربری اراضی و اعمال مدیریت‌های مختلف حساس بوده و تأثیرپذیر باشند (Moebius et al., 2007).

با توجه به تأثیرپذیری قابل توجه منحنی مشخصه آب خاک از اندازه و آرایش منافذ خاک، در پژوهشی (Dexter, 2004) شیب منحنی مشخصه آب خاک در نقطه عطف را به عنوان شاخص S معرفی نمود که مؤید جنبه‌های مختلف کیفیت خاک از قبیل نفوذ، سخت‌شدگی و فشردگی است (Dexter and Richards, 2009). پژوهشگران مختلفی از شاخص S دکستر برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک استفاده نمودند (Emami et al., 2010; Shahab et al., 2011). اخیراً (Rezaee et al., 2017) نیز در پژوهشی برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک‌های شالیزار استان گیلان از این شاخص استفاده نموده و نشان دادند که بر مبنای این شاخص، تمامی خاک‌های مورد مطالعه از کیفیت خوبی برخوردار بودند. اما برخی از پژوهشگران معتقدند در صورت وجود منحنی مشخصه آب خاک، استفاده از یک نقطه (شیب منحنی در نقطه عطف به عنوان شاخص S دکستر) برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک کافی نیست (Moncada et al., 2015). در واقع کیفیت فیزیکی خاک تنها محدود به یک نقطه از توابع هیدرولیکی خاک نیست و بایستی به چند نقطه و یا حتی به کل تابع هیدرولیکی بسط داده شود (Reynolds et al., 2009). از این رو، در پژوهشی (Reynolds et al., 2008) چندین شاخص برمبنای چند نقطه از منحنی مشخصه آب خاک همانند شاخص-های ظرفیت مزرعه‌ای نسبی و تخلخل تهویه‌ای را برای ارزیابی بهتر کیفیت فیزیکی خاک پیشنهاد نمودند. نکته‌ای که باید به آن توجه نمود این است که محاسبه‌ی تمامی شاخص‌های پیشنهادی توسط Reynolds et al. (2008) مستلزم تعیین رطوبت خاک در نقطه ظرفیت مزرعه‌ای (FC) است. حال آنکه تعیین رطوبت FC و مکش معادل آن یکی از چالش‌های دانشمندان فیزیک خاک در سده اخیر است (Miller and McMurdie, 1953). به دلیل وجود مشکل در تعریف مفهوم FC برمبنای زمان لازم برای زهکشی خاک، از یک پتانسیل ماتریک مشخص برای تعیین رطوبت خاک در FC استفاده می‌شود (Twarakavi et al., 2009). اما مشاهدات آزمایشگاهی Colman (1947) به وضوح بیانگر عدم وجود پتانسیل ماتریک یکسان و مشخص برای کلیه خاک‌های واقع در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای بود (Jamison, 1956). برخی از بحث‌ها ناشی از این حقیقت می‌باشد که FC یک مقدار رطوبت مشخصی نیست

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^{1-\frac{1}{n}}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $\theta_r$  و  $\theta_s$  به ترتیب رطوبت حجمی باقیمانده و اشباع  $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$ ،  $h$  مکش ماتریک خاک  $(\text{cm})$ ،  $\alpha$   $(\text{cm}^{-1})$  و  $n(-)$  پارامترهای تعیین کننده شکل منحنی مشخصه آب خاک هستند.

مکش ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی متر) اندازه گیری شد (Dane and Hopmans, 2002). سپس با استفاده از نرم افزار RETC، معادله Van Genuchten (1980) (رابطه ۱) بر داده های منحنی مشخصه آب خاک اندازه گیری شده برازش داده شد.

جدول ۱- برخی از ویژگی های فیزیکی و شیمیایی خاک های مورد مطالعه

ویژگی های فیزیکی خاک					ویژگی های شیمیایی خاک		
$d_g$ (mm)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	جرم مخصوص ظاهری ( $\text{gcm}^{-3}$ )	TNV (%)	ماده آلی (%)	
۰/۲۰	۱۱	۱۸	۱۴	۱/۲	۷/۷۵	۰/۲۰	کمیله
۱/۷۲	۳۸	۵۴	۷۱	۱/۸	۲۷/۷۵	۱/۷۲	بیشینه
۰/۷۱	۲۴	۳۸	۳۸	۱/۵۵	۱۵/۵۰	۰/۷۱	میانگین

TNV: میزان کل مواد خنثی شونده و  $d_g$ : میانگین هندسی قطر ذرات خاک است.

که در آن  $\theta_{FC}$  رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه ای  $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$  است. Wesseling and van Wijk (1957) نشان دادند که پخشیدگی گازها در خاک زمانی که تخلخل تهویه ای کمتر از ۱۰ درصد است، متوقف می گردد. بنابراین ریشه گیاهان به حداقل ۱۰ درصد تخلخل تهویه ای برای بقای خود نیازمند است (Kirkham, 2005).

آب قابل استفاده گیاه (PAW): ظرفیت آب قابل استفاده گیاه،  $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$ ، حاکی از توانایی خاک برای ذخیره و فراهم نمودن آب قابل استفاده برای ریشه گیاهان می باشد. (1927) Veihmeyer and Hendrickson شاخص ظرفیت آب قابل دسترس را رطوبت نگه داری شده بین رطوبت ظرفیت مزرعه ای (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) تعریف نمودند (رابطه ۴).

(رابطه ۴)  $PAW = \theta_{FC} - \theta_{PWP}$  ;  $0 \leq PAW \leq \theta_{FC}$   
 که در آن  $\theta_{PWP}$  مقدار رطوبت خاک در مکش خاک معادل  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  ۱۵۰۰۰ است. مقادیر  $PAW \geq 0.20 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$  به عنوان شرایط "عالی" برای حداکثر رشد ریشه (Cockroft and Olsson, 1997)، و  $0.15 \leq PAW < 0.20 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$  به عنوان شرایط "خوب"،  $0.10 \leq PAW < 0.15 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$  شرایط "محدود" و  $PAW < 0.10 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$  شرایط "ضعیف و خشک" (Warrick, 2002; White, 2006) در نظر گرفته می شوند.

ظرفیت مزرعه ای نسبی (RFC): این شاخص بدون بعد بوده و توانایی خاک برای ذخیره آب و هوا نسبت به حجم کل منافذ خاک را نشان می دهد (Reynolds et al., 2008):

$$RFC = \left( \frac{\theta_{FC}}{\theta_s} \right) = \left[ 1 - \left( \frac{AC}{\theta_s} \right) \right] ; 0 \leq RFC \leq 1 \quad (\text{رابطه ۵})$$

#### شاخص های کیفیت فیزیکی خاک

شاخص های مورد مطالعه شامل شاخص S دکستر، ظرفیت هوا، ظرفیت آب قابل استفاده خاک برای گیاه و رطوبت ظرفیت مزرعه ای نسبی بودند. در ادامه مفهوم و روش محاسبه ای هر یک از شاخص های مذکور ارائه خواهد شد.

شاخص S دکستر: شیب منحنی مشخصه آب خاک در نقطه عطف را شاخص S دکستر می نامند که با استفاده از پارامترهای معادله ون گنوختن (رابطه ۱) قابل برآورد می باشد (Dexter, 2004):

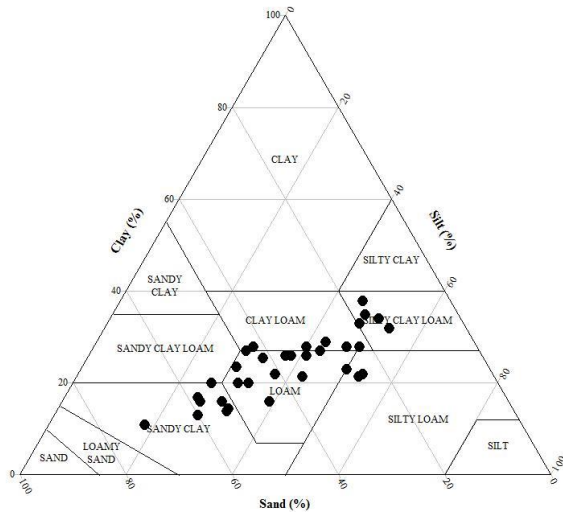
$$S = -n(\theta_{sg} - \theta_{rg}) \left[ \frac{2n-1}{n-1} \right]^{\frac{1}{n}-2} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $\theta_{sg}$  و  $\theta_{rg}$  به ترتیب رطوبت جرمی باقیمانده و اشباع خاک  $(\text{kg kg}^{-1})$  هستند که از تقسیم رطوبت های حجمی باقیمانده و اشباع بر جرم مخصوص ظاهری هر خاک محاسبه شد. قدرمطلق مقدار محاسبه شده با استفاده از رابطه (۲) به عنوان مقدار شاخص S دکستر گزارش می شود. از نظر کیفیت فیزیکی خاک و بر مبنای شاخص S دکستر، خاکها در ۴ گروه کیفیت فیزیکی خیلی ضعیف ( $0.020 > S$ )، ضعیف ( $0.020 > S \geq 0.035$ )، خوب ( $0.050 > S \geq 0.035$ ) و خیلی خوب ( $S \geq 0.050$ ) قرار دارند (Dexter, 2004).

ظرفیت هوا یا تخلخل تهویه ای (AC): شاخص AC  $(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$  در یک خاک دست نخورده مزرعه با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می شود (White, 2006):

$$AC = \theta_s - \theta_{FC} ; 0 \leq AC \leq \theta_s \quad (\text{رابطه ۳})$$

شکل (۱) نشان داده شده است. کلاس‌های بافتی شامل لوم، لوم رسی سیلتی، لوم سیلتی، لوم رسی و رس شنی بودند. با توجه به دامنه ویژگی‌های اندازه‌گیری شده (جدول ۱)، نمونه خاک‌های مورد مطالعه از تنوع مناسبی برخوردار بودند.



شکل ۱. توزیع بافت خاک نمونه‌های مورد مطالعه

در جدول (۲) میانگین مقدار پارامترهای معادله ون-گنوختن حاصل از برازش رابطه (۱) بر داده‌های منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده ( $R^2 > 0.99$ )، شاخص  $S$  دکستر و مقادیر مختلف رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه‌ای در سه روش مختلف با فرض مکش معادل ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتیمتر و مکش محاسبه شده به روش پیشنهادی Assouline and Or (2014) ارائه شده است. میانگین رطوبت اشباع در کل نمونه‌های خاک مورد مطالعه  $0.49 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  بود. میانگین شاخص  $S$  دکستر در مجموع ۳۵ نمونه خاک بیش از  $0.35$  به دست آمد (جدول ۲). براساس شاخص  $S$  دکستر، تنها ۲۰ درصد از نمونه‌های خاک در گروه کیفیت فیزیکی ضعیف ( $S < 0.35$ ) قرار گرفتند و ۷۴ و ۶ درصد از نمونه‌های خاک به ترتیب از کیفیت فیزیکی خوب ( $0.35 > S > 0.05$ ) و خیلی خوب ( $S > 0.05$ ) برخوردار بودند.

زمانی که  $0.6 \leq RFC \leq 0.7$  باشد، تعادل بهینه بین ظرفیت آب خاک در منطقه ریشه و ظرفیت هوای خاک رخ می‌دهد. در این شرایط بیشینه تولید میکروبی نترات که عنصر غذایی تعیین‌کننده رشد و عملکرد محصول است، رخ می‌دهد (Doran et al., 1990). مقادیر کمتر یا بیشتر RFC به دلیل کمبود به ترتیب آب خاک یا هوای خاک موجب کاهش تولید میکروبی نترات می‌گردد (Skopp et al., 1990).

### رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC)

در این پژوهش برای تعیین مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای از سه روش استفاده شد: (۱) رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در مکش معادل ۱۰۰ سانتیمتر ( $FC_{100}$ )، (۲) رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در مکش معادل ۳۳۰ سانتیمتر ( $FC_{330}$ ) و (۳) رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در مکش محاسبه شده به روش Assouline and Or (2014).  $FC_{Asso}$  که با استفاده از رابطه (۶) برآورد گردید:

$$h_{FC_{Asso}} = \frac{1}{\alpha} \left( \frac{n-1}{n} \right)^{(1-2n)/n} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

که در آن  $h_{FC_{Asso}}$  (cm) مقدار مکش معادل خاک در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای بر مبنای شدت زهکشی ناچیز به روش پیشنهادی Assouline and Or (2014) و  $\alpha$  و  $n$  پارامترهای حاصل از برازش معادله van Genuchten (1980) (رابطه ۱) بر داده‌های منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده می‌باشند. لذا، به جز شاخص  $S$  دکستر، سایر شاخص‌های مورد مطالعه شامل ظرفیت هوا، آب قابل استفاده گیاه و ظرفیت مزرعه‌ای نسبی با توجه به روش تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای، مقادیر متفاوتی خواهند داشت.

تجزیه و تحلیل آماری و مقایسه میانگین نمونه‌های خاک با استفاده از تجزیه واریانس یک طرفه (ANOVA) و آزمون دانکن با استفاده از نرم‌افزار SPSS v19 انجام شد.

### نتایج و بحث

توزیع بافت خاک نمونه‌های مورد مطالعه در مثلث بافت خاک در

جدول ۲. آماره‌های توصیفی مقدار پارامترهای معادله ون‌گنوختن حاصل از برازش رابطه (۱) بر داده‌های منحنی مشخصه آب خاک، شاخص  $S$  دکستر (رابطه ۲) و رطوبت خاک در ظرفیت مزرعه‌ای با فرض مکش معادل ۱۰۰ سانتیمتر ( $FC_{100}$ )، ۳۳۰ سانتیمتر ( $FC_{330}$ ) و مکش معادل به روش

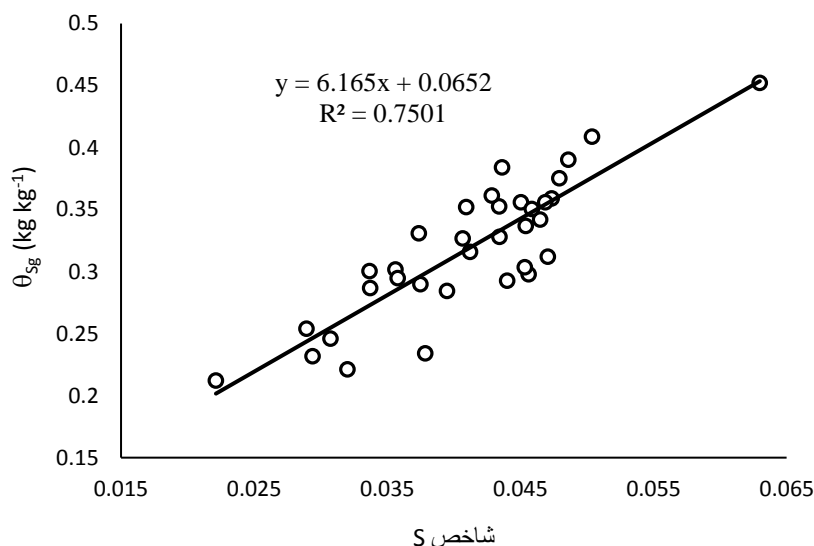
Assouline and Or (2014) ( $FC_{Asso}$ )

رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای			پارامترهای معادله ون‌گنوختن			
$FC_{Asso}$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	$FC_{330}$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	$FC_{100}$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	$S$ دکستر (-)	$n$ (-)	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )
۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۷	۰/۰۲۲	۱/۱۵۸	۰/۰۰۸۸	۰/۳۶
۰/۴۴	۰/۴۰	۰/۴۹	۰/۰۶۳	۱/۲۸۹	۰/۰۷۹۶	۰/۶۷
۰/۳۱	۰/۳۱	۰/۳۸	۰/۰۴۱	۱/۲۱۳	۰/۰۳۰۹	۰/۴۹

$\theta_s$ : رطوبت اشباع،  $\alpha$  و  $n$  پارامترهای شکل معادله ون‌گنوختن (رابطه ۱) می‌باشند.

پس از آن، با افزایش میانگین رس خاک تا ۵۰ درصد، مقدار شاخص S دکستر نیز افزایش می‌یافت که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. با توجه به جدول (۱) و شکل (۱) می‌توان بیان نمود که بیشتر نمونه‌های خاک مورد مطالعه در این پژوهش در کلاس‌های بافت خاک با میانگین رس در محدوده ۲۰-۵۰ درصد قرار داشتند. دلیل افزایش شاخص S دکستر در این محدوده با افزایش مقدار رس خاک را می‌توان افزایش منافذ ریز ساختمانی خاک دانست (Dexter, 2004). بیش‌ترین همبستگی بین شاخص S دکستر و درصد رطوبت اشباع جرمی خاک مشاهده شد به گونه‌ای که تنها با استفاده از رطوبت اشباع جرمی خاک می‌توان بیش از ۷۵ درصد تغییرات شاخص S دکستر نمونه‌های خاک مورد مطالعه را برآورد نمود (شکل ۲).

بررسی همبستگی بین شاخص S دکستر محاسبه شده و ویژگی‌های پایه خاک نشان داد که بین شاخص S دکستر با رس ( $r = 0/487$ )، سیلت ( $r = 0/837$ )، کربن آلی خاک ( $0/595$ ) و رطوبت اشباع جرمی خاک ( $r = 0/866$ ) همبستگی مثبت و با درصد شن خاک ( $r = -0/761$ ) و جرم مخصوص ظاهری خاک ( $r = -0/597$ ) همبستگی منفی وجود داشت ( $P < 0.05$ ). Dexter (2004) ارتباط منفی بین میانگین مقدار رس در هر کلاس بافت خاک و مقادیر شاخص S را گزارش نمود. اما، در کلاس‌های بافت خاک با میانگین محتوای رس ۳۰ تا ۵۰ درصد بیشترین مقدار شاخص S را مشاهده نمود. در واقع نتایج Dexter (2004) مؤید روند کاهش شدید شاخص S با افزایش مقدار رس در کلاس‌های بافت خاک با میانگین رس صفر تا ۲۰ درصد بود و



شکل ۲. رابطه بین شاخص S دکستر و رطوبت اشباع خاک در ۳۵ نمونه خاک مورد مطالعه

میکروبی دارای کیفیت فیزیکی مناسبی می‌باشند. Reynolds *et al.* (2009) و Ghiberto *et al.* (2015) نیز برای محاسبه شاخص-های کیفیت فیزیکی خاک از مکش ۱۰۰ سانتی‌متر برای محاسبه مقدار رطوبت FC استفاده نمودند.

با وجود اینکه محاسبه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک با فرض رطوبت FC<sub>330</sub> موجب کاهش مقادیر شاخص PAW نسبت به فرض FC<sub>100</sub> شد به گونه‌ای که در این شرایط ۲۶ درصد از نمونه خاک‌های مورد مطالعه از لحاظ مقدار آب قابل استفاده گیاه در گروه محدود قرار گرفتند ( $0.10 \leq PAW < 0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). اما، براساس شاخص AC، محدودیت تهویه در هیچ یک از نمونه خاک‌ها مشاهده نشد (جدول ۳). علاوه بر این، تقریباً ۶۰ درصد از نمونه‌های مورد مطالعه از لحاظ شاخص RFC در محدوده

مقادیر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک محاسبه شده با فرضیات مختلف

مقادیر شاخص‌های محاسبه شده با فرض FC<sub>100</sub> نشان داد که تمام نمونه‌های خاک مورد مطالعه براساس شاخص PAW در گروه خوب تا عالی ( $0/15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \leq PAW$ ) قرار گرفتند (جدول ۳). در حالی که شاخص‌های AC و RFC حاکی از وجود محدودیت شدید تهویه و فعالیت‌های میکروبی در خاک‌های مورد مطالعه است. براساس شاخص‌های AC و RFC به ترتیب ۵۰ و ۱۲ درصد از نمونه خاک‌های مورد مطالعه در محدوده مطلوب قرار داشتند ( $0.6 \leq RFC \leq 0.7$  و  $AC \geq 0.10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). در این حالت با در نظر گرفتن هر سه شاخص، تنها ۱۲ درصد از نمونه‌های خاک از لحاظ تهویه، آب قابل دسترس و فعالیت‌های

Moncada et al. (2015) نیز در محاسبه شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک و رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای از مکش معادل ۳۳۰ سانتی‌متر استفاده نمودند.

مطلوب قرار گرفت ( $0.6 \leq RFC \leq 0.7$ ). با در نظر گرفتن شرایط مطلوب برای همه شاخص‌های مورد نظر، نتایج مؤید کیفیت فیزیکی مناسب در ۴۴ درصد از نمونه خاک‌های مورد مطالعه بود.

جدول ۳. آماره‌های توصیفی مقادیر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک

FC <sub>Asso</sub>			FC <sub>330</sub>			FC <sub>100</sub>			
RFC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	PAW (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	AC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	RFC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	PAW (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	AC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	RFC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	PAW (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	AC (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	
۰/۵۸	۰/۱۱۸	۰/۱۱۸	۰/۵۴	۰/۱۱۲	۰/۱۱۸	۰/۶۷	۰/۱۵۹	۰/۰۵۱	کمینه
۰/۶۹	۰/۲۳۹	۰/۲۳۹	۰/۷۴	۰/۲۱۳	۰/۲۷۹	۰/۸۸	۰/۳۱۴	۰/۱۸۵	بیشینه
۰/۶۴	۰/۱۷۸	۰/۱۷۷	۰/۶۴	۰/۱۷۰	۰/۱۸۰	۰/۷۸	۰/۲۴۳	۰/۱۰۸	میانگین

FC<sub>Asso</sub> و FC<sub>330</sub> و FC<sub>100</sub> روش‌های مختلف تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای به ترتیب در مکش ۱۰۰، ۳۳۰ سانتی‌متر و مکش محاسبه شده به روش Assouline and Or (2014) (رابطه ۶) است. AC: ظرفیت هوا، PAW: آب قابل استفاده گیاه و RFC: ظرفیت مزرعه‌ای نسبی است.

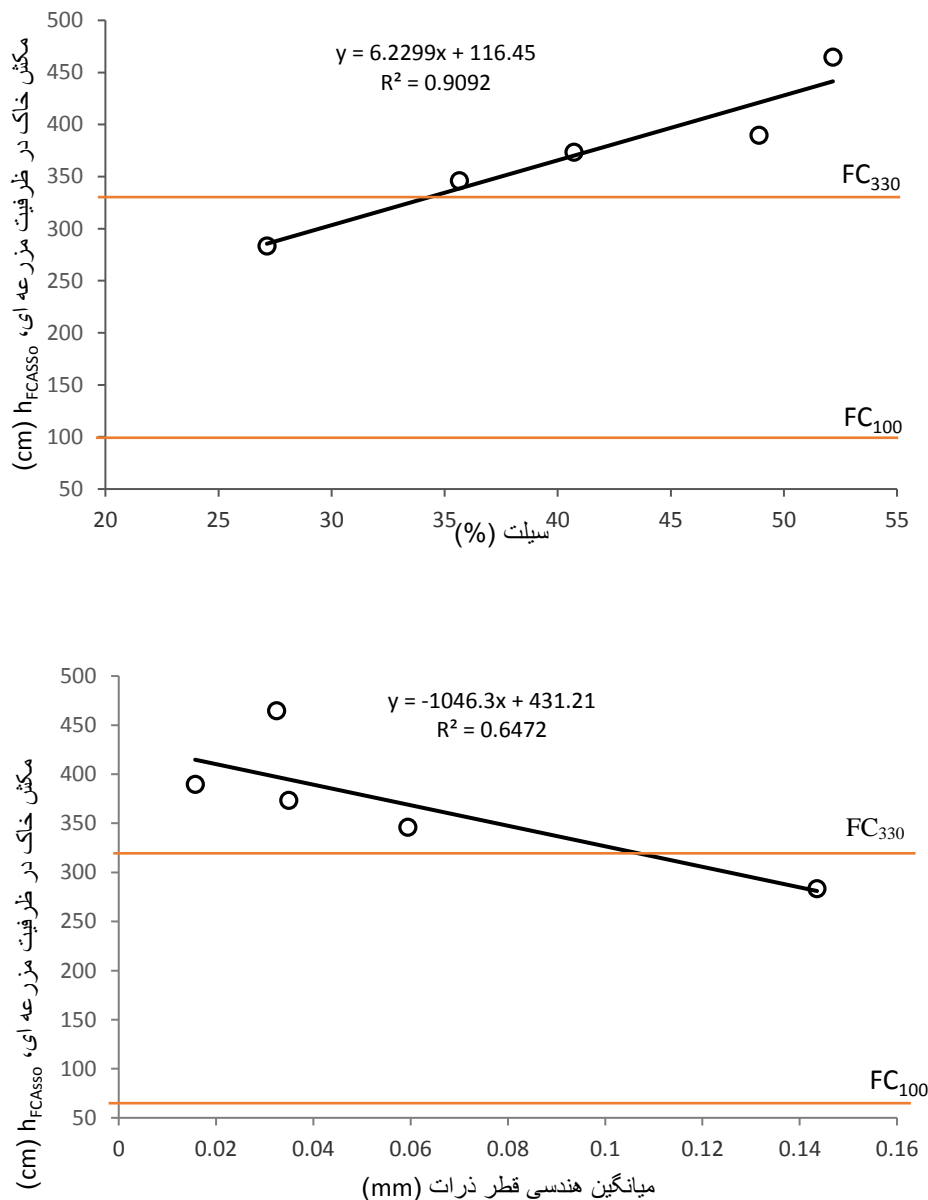
این پژوهش برای بررسی رابطه بین مقدار مکش معادل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و کلاس بافت خاک از میانگین هندسی قطر ذرات (d<sub>g</sub>) استفاده شد. مقادیر بالاتر h<sub>FCAsso</sub> در کلاس‌های بافتی خاک با مقدار d<sub>g</sub> کمتر مشاهده شد (شکل ۳ ب). همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، در تمامی کلاس‌های بافت خاک مورد مطالعه میانگین h<sub>FCAsso</sub> در اطراف خط فرضی برای مکش ۳۳۰ سانتی‌متر (خط FC<sub>330</sub> در شکل ۳) قرار داشت. در نمونه‌های مورد مطالعه در کلاس بافتی حاوی کمتر از ۳۵ درصد سیلت، رطوبت FC در مکش‌های خاک کمتر از ۳۳۰ سانتی‌متر بود (شکل ۳ الف). براساس میانگین هندسی قطر ذرات نیز روند مشابهی مشاهده شد. در کلاس‌های بافت خاک با میانگین قطر ذرات بیش از ۰/۱ میلی‌متر، مکش معادل رطوبت FC در مکش‌های کمتر از ۳۳۰ سانتی‌متر بود. با کمتر شدن مقدار d<sub>g</sub> و در واقع ریزتر شدن ذرات خاک در هر کلاس بافت خاک (افزایش درصد ذرات سیلت و رس)، مکش معادل رطوبت FC در مکش‌های بیش‌تری از ۳۳۰ سانتی‌متر اتفاق افتاد. این نتایج نشان می‌دهد که نمی‌توان از مقادیر شاخص‌های کیفیت خاک محاسبه شده با فرض FC<sub>100</sub> برای ارزیابی کیفیت فیزیکی نمونه خاک‌های مورد مطالعه در این پژوهش استفاده نمود.

نتایج مقایسه میانگین براساس آزمون دانکن نشان داد که بین میانگین مقدار رطوبت خاک در سه روش FC<sub>100</sub>، FC<sub>330</sub> و FC<sub>Asso</sub> اختلاف معنی‌داری وجود دارد ( $P < 0.01$ ). بین روش FC<sub>100</sub> با بیشترین مقدار میانگین رطوبت FC خاک با روش FC<sub>Asso</sub> اختلاف معنی‌داری وجود داشت در حالی که بین میانگین مقدار رطوبت FC در دو روش FC<sub>330</sub> و FC<sub>Asso</sub> اختلاف معنی‌داری مشاهده نشد. به منظور حصول اطمینان از عدم وجود اختلاف معنی‌دار بین مقادیر رطوبت FC مربوط به هر یک از نمونه‌های مورد مطالعه در دو روش FC<sub>330</sub> و FC<sub>Asso</sub> از آزمون T-test جفت شده استفاده شد. نتایج این

میانگین و کمترین مقدار رطوبت FC محاسبه شده در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر و مکش محاسبه شده به روش پیشنهادی Assouline and Or (2014) برابر با مقدار یکسانی به دست آمد (جدول ۲). مقادیر آماره‌های توصیفی شاخص‌های مختلف محاسبه شده با دو فرض FC<sub>330</sub> و FC<sub>Asso</sub> نیز تا حد زیادی مشابه است (جدول ۳). با این حال، تنها ۱۵ درصد از نمونه خاک‌ها از نظر شاخص PAW با فرض FC<sub>Asso</sub> در گروه محدود قرار گرفتند ( $0.10 \leq PAW < 0.15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) و بر اساس شاخص AC در هیچ یک از نمونه‌های خاک محدودیت تهویه مشاهده نشد. علاوه بر این، فعالیت میکروبی در ۱۵ درصد از نمونه خاک‌های مورد مطالعه موجب محدودیت گردید ( $RFC > 0.7 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  و RFC  $< 0.6 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). در نهایت، براساس مجموع شاخص‌های محاسبه شده با فرض FC<sub>Asso</sub> می‌توان بیان نمود که ۷۰ درصد از نمونه خاک‌های مورد مطالعه از لحاظ تهویه، مقدار رطوبت قابل استفاده و فعالیت میکروبی از کیفیت فیزیکی مناسبی برخوردارند. بررسی محدوده مکش معادل FC به روش پیشنهادی Assouline and Or (2014)، h<sub>FCAsso</sub> از ۱۰۶ تا ۷۴۳ سانتی‌متر با میانگین ۳۵۲ سانتی‌متر نشان داد که در نمونه خاک‌های مورد مطالعه، تنها بین میانگین سیلت و میانگین h<sub>FCAsso</sub> در کلاس‌های مختلف بافت خاک همبستگی بالایی وجود داشت ( $r = 0.94$ ), ( $p < 0.05$ ). تغییرات میانگین h<sub>FCAsso</sub> در کلاس‌های مختلف بافت خاک در برابر تغییرات میانگین محتوای سیلت نمونه‌های خاک موجود در هر کلاس بافت خاک در شکل (۳) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میانگین مقدار سیلت در کلاس‌های بافتی مختلف، شدت زهکشی ناچیز خاک در مکش‌های بالاتری اتفاق می‌افتد (شکل ۳ الف). بایستی به این نکته توجه نمود که در نظر گرفتن مقدار یک جزء از ذرات خاک (ذره سیلت) نمی‌تواند به خوبی مؤید یک کلاس بافت خاک باشد. از این رو، در

سانتی متر به منظور تعیین رطوبت FC خاک استفاده نمود و شاخص- های محاسبه شده بر این مبنا را برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک بکار برد.

آزمون نیز حاکی از عدم وجود اختلاف معنی دار بین مقادیر رطوبت FC برای هر یک از نمونه خاک‌های مورد مطالعه در دو روش مذکور بود. بنابراین نتایج نشان می‌دهد که در محدوده کلاس‌های بافت نمونه‌های خاک مورد مطالعه می‌توان از رطوبت خاک در مکش ۳۳۰



شکل ۳. تغییرات میانگین مکش خاک محاسبه شده در رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای به روش Assouline and Or (2014) در هر کلاس بافت خاک در برابر تغییرات میانگین درصد سیلت هر کلاس بافت خاک (الف) و میانگین هندسی قطر ذرات هر کلاس بافت خاک (ب) در ۳۵ نمونه خاک مورد مطالعه

مزرعه‌ای بسیار متفاوت به دست آمد. براساس مجموع شاخص- های ظرفیت هوا، آب قابل استفاده گیاه و ظرفیت مزرعه‌ای نسبی با فرض رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در مکش‌های ۱۰۰، ۳۳۰ و مکش معادل به روش شدت زهکشی ناچیز مشاهده شد که به- ترتیب ۱۲، ۴۴ و ۷۰ درصد از نمونه خاک‌های مورد مطالعه از

### نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش حاکی از اثر زیاد روش برآورد رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای بر مقادیر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک بود به گونه- ای که تعداد خاک‌هایی با کیفیت فیزیکی مناسب براساس شاخص‌های مورد مطالعه در سه روش برآورد رطوبت ظرفیت



خاک‌های مورد مطالعه در گروه کیفیت فیزیکی ضعیف قرار گرفتند اما زمانی که سایر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک بررسی شدند، نتایج مؤید کیفیت فیزیکی نامناسب در حداقل ۳۰ درصد از نمونه‌های خاک بود. بنابراین علی‌رغم توانایی خوب شاخص S دکستر در ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک، این شاخص نمی‌تواند تمام جنبه‌های کیفیت فیزیکی خاک تأثیرگذار بر رشد گیاه را در نظر بگیرد. نتایج نشان داد که برای ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک نباید تنها به یک نقطه از منحنی مشخصه آب خاک اکتفا نمود. بلکه ارزیابی مناسب کیفیت فیزیکی خاک مستلزم تعیین سایر شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک بر مبنای منحنی مشخصه آب خاک می‌باشد در این صورت می‌توان محدودیت‌های فیزیکی خاک و جنبه‌های مختلف تأثیرگذار بر رشد گیاه هم‌چون شرایط تهویه، مقدار آب قابل استفاده گیاه و فعالیت میکروبی خاک را در نظر گرفت.

لحاظ تهویه، مقدار رطوبت قابل استفاده و فعالیت میکروبی از کیفیت فیزیکی مناسبی برخوردار بودند. در واقع مقادیر شاخص‌های محاسبه شده و ارزیابی کیفیت خاک به شدت متأثر از روش تعیین مقدار رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای بود. نتایج نشان داد که می‌توان از مکش معادل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای براساس مفهوم زهکشی ناچیز و گسیختگی فاز مایع در طول ستون خاک به روش پیشنهادی (Assouline and Or (2014) برای محاسبه‌ی شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک استفاده نمود و با مقایسه مقدار رطوبت خاک در مکش معادل به روش زهکشی ناچیز و مقادیر رطوبت در مکش‌های متداول برآورد رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای، مناسب‌ترین مکش به منظور تعیین رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و در نهایت تعیین شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک را در محدوده‌ی کلاس‌های بافت خاک موردنظر تعیین نمود.

از دیگر سو، براساس شاخص S دکستر (شیب منحنی مشخصه آب خاک در نقطه عطف آن)، تنها ۲۰ درصد از نمونه

## REFERENCES

- Assouline, S. and Or, D. (2014). The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. *Water Resource Research*, 50: 1-16.
- Cassel, D. K. and Nielsen, D. R. (1986). Field capacity and available water capacity. In *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods. Agronomy Monograph*, 9: 901-926.
- Cockroft, B. and Olsson, K. A. (1997). Case study of soil quality in south-eastern Australia: *management of structure for roots in duplex soils*. In E. G. Gregorich and M. R. Carter, (Ed.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science: Elsevier*. (pp. 339-350). New York, NY.
- Colman, E. A. (1947). A laboratory procedure for determining the field capacity of soils. *Soil Science*, 63: 277-283.
- Dane, J. H. and Hopmans, J. W. (2002) Pressure cell. In J. H. Dane and G. C. Topp, (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 4, Physical Methods: SSSA Book Series*. (pp. 684-688). Soil Science Society of America, Inc: Madison, WI.
- Dexter, A. R. (2004). Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*. 120: 201-214
- Dexter, A. R. and Richard, G. (2009). Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. *Soil and Tillage Research*, 103: 113-118.
- Doran, J. W. and Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, and B. A. Stewart (Ed.), *Defining soil quality for a sustainable environment. SSSA Spec. Publ: Soil Science Society of America*. Madison, WI.
- Doran, J. W., Mielke, L. N., Power, J. F. (1990). Microbial activity as regulated by soil water filled pore space. Symposium III-3, Ecology of Soil Microorganisms in the Microhabitat Environments III. *Transactions of the 14th International Congress of Soil Science*, (pp. 94-99). August 12-18, Kyoto, Japan.
- Emami, H.m Lakzian, A. and Mohagerpour, M. (2010). Study of the relationship between slope of retention curve and some physical properties of soil quality. *Journal of Water and Soil*, 24 (5): 1027-1035. (In Farsi)
- Gee, G. W. and Or, D. (2002). Particle-size analysis. In J. H. Dane and G. C. Topp (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods: SSSA Book Series*. (pp. 255- 293). Madison.
- Ghiberto, P. J., Imhoff, S., Libardi, P.L., Silva, A.P., Tormena, C.A. and Pilatti, M.A. (2015). Soil physical quality of Mollisols quantified by a global index. *Scientia Agricola*, 72(2): 167-174.
- Grossman, R. B. and Reinsch, T. G. (2002). Bulk density and linear extensibility. In J. H. Dane and G. C. Clake (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods: SSSA Book Series* (pp. 201-228). Madison, Wisconsin, USA.
- Jamison, V. C. (1956). Pertinent factors governing the availability of soil moisture to plants. *Soil Science*, 81: 459-471.
- Kirkham, M. B. (2005). *Principles of soil and plant water relations*, Elsevier Academic Press, Amsterdam.
- Miller, R. D., and McMurdie, J. L. (1953). Field capacity in laboratory columns, *Soil Science Society of America Journal*, 17: 185-190.
- Moebius, B. N., van Es, H. M., Schindelbeck, R. R., Idowu, O. J., Clune, D. J. and Thies, J. E. (2007).

- Evaluation of laboratory-measured soil properties as indicators of soil physical quality. *Soil Science*, 172(11): 895-912.
- Moncada, M. P., Ball, B. C., Gabriels, D., Lobo, D. and Cornelis, W. M. (2015). Evaluation of soil physical quality index S for some tropical and temperate medium-textured soils. *Soil Science Society of America Journal*, 79:9-19.
- Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Drury, C. F., Tan, C. S. and Lu, X. (2002). Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110: 131-146.
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., and Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152: 252-263.
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Yang, X. M. and Tan, C. S. (2008). Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146: 466-474.
- Rezaee, L., Moosavi, A. A., Davatgar, N. and Shabanpor Shahrestani, M. (2017). Comparison of different soil water retention curve models for evaluation of soil quality index (S) in paddy soils. *Iranian Journal of Soil Research*, 31(4): 509-524. (In Farsi)
- Shahab, H., Emami, H., Haghnia, Gh. Karimi, A. (2011). Determination the optimal range of pore volume distribution by using of soil physical quality indicators and effect of soil properties on  $S_{gi}$  index. *Journal of Water and Soil*, 25(4): 881-891. (In Farsi)
- Shirazi, M. A. and Borsma, L. (1984). A unifying quantitative analysis of soil texture. *Soil Science Society of America Journal*, 48: 142-147.
- Skopp, J., Jawson, M. D., Doran, J. W. (1990). Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. *Soil Science Society of America Journal*, 54: 1619-1625.
- Topp, G. C., Reynolds, W. D., Cook, F. J., Kirby, J. M. and Carter, M. R. (1997). Physical attributes of soil quality. In E. G. Gregorich and M. R. Carter (Ed.), *Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Developments in Soil Science: Elsevier*, 25: 21- 58.
- Twarakavi, N. K. C., Sakai, M. and Šimupek, J. (2009). An objective analysis of the dynamic nature of field capacity. *Water Resource Research*, 45: W10410.
- USDA, Economic Research Service (1997). *Agricultural resources and environmental indicators, 1996-1997. Agric. Handb. 712. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.*
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44: 892-897.
- Veihmeyer, F. J. and Hendrickson, A. H. (1927). The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. *Proceeding the 1st International Congress of Soil Science*, 3: 498-513.
- Walkley, A. and Black, T. A. (1934). An examination of Degljiareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the choromic acid titration method. *Soil Science*, 37: 29-38.
- Warrick, A.W. (2002). *Soil Physics Companion*. CRC Press LLC, Boca Raton, USA.
- Wesseling, J. and van Wijk, W. R. (1957). Soil physical conditions in relation to drain depth. In J. N. Luthin (Ed.), *Drainage of agricultural lands: American Society of Agronomy*, Madison, Wisconsin.
- White, R. E. (2006). *Principles and Practice of Soil Science*. Blackwell Publishing, Oxford, UK.