

Investigation of the Integral Energy Concept for Estimation of Available Soil Water in Paddy Soils of Guilan Province

FATEMEH MESKINI-VISHKAEI^{1*}, NASER DAVATGAR²

1. Soil and Water Research Department, Khuzestan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Ahvaz, Iran.
2. Soil and Water Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
(Received: July. 2, 2018- Revised: July. 31, 2018- Accepted: Oct. 16, 2018)

ABSTRACT

To evaluate water, soil and plant relationships, soil water availability for plants is very important for irrigation management and scheduling. Integral energy shows the readily available water for plant in the range of soil available water. The purpose of this study was to investigate the concept of integral energy in 40 samples of paddy soils in Guilan province and to study the relationship between this index and various soil properties. The results showed that all soil samples had moderate to heavy texture. The mean Dexter S index in two soil textures including clay and clay loam was less than 0.35 (27% of the soil samples). The mean values of integral energy in the all studied soil samples, assuming the upper limit of soil water available at saturation, field capacity (at soil suctions of 100 and 330 cm) were 226.65, 270.21 and 336.91 J kg⁻¹, respectively. The results showed that the soil texture classes with the highest value of integral energy were associated with the lowest values of S index. Moreover, the results confirm the better correlation between the calculated integral energy, assuming the upper limit at field capacity in soil suction of 330 cm, with the other soil properties. In addition, the integral energy values can be accurately estimated using soil saturation moisture and organic carbon to clay content ratio for silty clay loam ($R^2=0.70$) and clay loam ($R^2=0.95$) textured soils, respectively.

Keywords: Soil available water, Dexter S index, Soil physical quality.

ارزیابی مفهوم انرژی انتگرالی در برآورد آب قابل دسترس خاک در اراضی شالیزاری استان گیلان

فاطمه مسکینی ویشکایی^{۱*}، ناصر دوات‌گر^۲

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

آموزش و ترویج کشاورزی، اهواز، ایران

۲. موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۴/۱۱-تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۵/۹-تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۷/۲۴)

چکیده

چگونگی دسترسی آب خاک برای گیاهان در ارزیابی روابط آب، خاک و گیاه به‌منظور استفاده در برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری مهم است. انرژی انتگرالی چگونگی سهولت دسترسی آب خاک برای گیاه در محدوده رطوبت قابل استفاده خاک را نشان می‌دهد. این پژوهش با هدف ارزیابی مفهوم انرژی انتگرالی در ۴۰ نمونه خاک اراضی شالیزاری استان گیلان و بررسی روابط این شاخص با ویژگی‌های مختلف خاک انجام شد. نتایج نشان داد که تمامی نمونه خاک‌های مورد مطالعه دارای بافت متوسط تا سنگین بودند. میانگین شاخص S دکستر در دو بافت خاک رس و لوم رسی کمتر از ۰/۰۳۵ به دست آمد (۲۷ درصد نمونه‌های خاک). متوسط انرژی انتگرالی در کل نمونه‌های خاک مورد مطالعه با در نظر گرفتن حد بالای آب قابل دسترس خاک در رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با ۲۲۶/۶۵، ۲۷۰/۲۱ و ۳۳۶/۹۱ $J kg^{-1}$ به دست آمد. نتایج نشان داد که کلاس‌های بافت خاک دارای بیشترین مقدار انرژی انتگرالی، کمترین مقادیر شاخص S دکستر را نیز به خود اختصاص داده‌اند. همچنین نتایج مؤید همبستگی بالاتر انرژی انتگرالی محاسبه شده با فرض رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر با سایر ویژگی‌های خاک بود. علاوه بر این با استفاده از رطوبت اشباع خاک و نسبت کربن آلی به رس خاک می‌توان مقدار انرژی انتگرالی خاک در اراضی شالیزاری را به ترتیب در کلاس بافت خاک لوم رسی سیلتی ($R^2=0/70$) و لوم رسی ($R^2=0/95$) با دقت مناسبی برآورد نمود.

واژه‌های کلیدی: آب قابل استفاده خاک، شاخص S دکستر، کیفیت فیزیکی خاک.

مقدمه

بر انرژی آب در خاک و جذب واحد حجم آب می‌باشد. این انرژی تابعی از مقدار آب یا به بیان دیگر تابعی از نقاط شروع و خاتمه دامنه رطوبتی خاک قابل استفاده برای گیاه می‌باشد. در محاسبه انرژی انتگرالی فرض بر این است که زمان کافی برای جذب آب توسط گیاه وجود داشته و شرایط دما و خشکی خیلی زیاد و همچنین تفاوت گیاهان در جذب آب و مراحل رشد گیاه در نظر گرفته نشده است. با این وجود، شاخص انرژی انتگرالی به عنوان شاخصی مناسب برای آب قابل استفاده گیاه توصیه شده است. نتایج Minasny and McBratney (2003) نشان داد که با افزایش مقدار رس خاک، مقدار این شاخص نیز افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر گیاهان برای جذب واحد حجم آب در محدوده رطوبت قابل استفاده خاک برای گیاه در خاک‌های ریزبافت باید انرژی بیشتری صرف کنند. (Asgarzadeh et al. (2011) انرژی انتگرالی را برای آب قابل استفاده خاک با استفاده از مفاهیم مختلفی همانند محدوده رطوبتی با حداقل محدودیت یا گنجایش جمعی آب خاک برای ۱۲ نمونه خاک از اراضی کشاورزی استان همدان

آب اثر زیادی بر رشد گیاه دارد و می‌توان از آن به‌عنوان یک شاخص مهم در پیش‌بینی عملکرد گیاه استفاده کرد (Timlin et al., 2001). با وجود اینکه کل مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاهان، همبستگی خوبی با عملکرد و پاسخ گیاه دارد، ولی برای جذب واحد حجم آب موجود در خاک توسط گیاه به انرژی مشخصی نیاز است که میزان سهولت جذب آب توسط گیاه را توجیه می‌کند. مفاهیم قبلی آب قابل استفاده گیاه به‌طور مستقیم مقادیر انرژی مورد نیاز گیاه برای جذب آب را نشان نمی‌دهند. (Minasny and McBratney (2003) انرژی انتگرالی آب را به عنوان معیاری برای برآورد آب قابل استفاده خاک برای گیاه ارائه نمودند. انرژی انتگرالی، بیانگر مقدار انرژی مورد نیاز گیاه برای جذب واحد حجم آب خاک در محدوده ظرفیت آب قابل استفاده می‌باشد. این پژوهشگران نشان دادند که منحنی مشخصه آب خاک ابزاری مناسب برای برآورد انرژی مورد نیاز گیاه برای غلبه

مواد و روش ها

استان گیلان با مساحتی برابر ۱۴۷۰۰۰۰ هکتار در محدوده ۳۶ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۸ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است که ۳۴۰۰۰۰ هکتار از آن را اراضی کشاورزی (حدود ۲۳ درصد) تشکیل می‌دهد. آب و هوای منطقه مرطوب و متوسط بارندگی سالیانه در استان ۱۵۰۶ میلی‌متر است. میانگین حداکثر حرارت در حدود ۲۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین حداقل حرارت ۶/۶ درجه سانتی‌گراد است. در این پژوهش ۴۰ نمونه خاک دست‌خورده از اراضی شالیزاری استان گیلان به صورت تصادفی از خاک سطحی نمونه‌برداری و به آزمایشگاه منتقل شد. پس از کوبیدن و خشک‌نمودن از الک دو میلی‌متری برای انجام تجزیه‌های فیزیکی و شیمیایی عبور داده شد. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد مطالعه در جدول (۱) آمده است. کربن آلی خاک به روش اکسیداسیون تر (Walkley and Black, 1934) اندازه‌گیری شد. بافت خاک به روش هیدرومتر و الک (Gee and Or, 2002) و جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از نمونه دست‌خورده و به روش سیلندر (Grossman and Reinsch, 2002) تعیین 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 مکش ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر) اندازه‌گیری شد (Dane and Hopmans, 2002). با استفاده از نرم‌افزار RETC معادله ون‌گنوختن (van Genuchten, 1980) (رابطه ۱) بر داده‌های منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده برازش داده شد:

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

θ_s و θ_r به ترتیب رطوبت حجمی باقیمانده و اشباع هوا (cm^{-3}) و cm^{-3} ، h مکش ماتریک خاک (cm)، α عکس مکش ورود هوا (cm^{-1}) و n پارامتر تعیین‌کننده شکل منحنی مشخصه آب خاک (-) است. تأثیرپذیری زیاد منحنی مشخصه آب خاک در نقطه عطف می‌تواند مؤید جنبه‌های مختلفی از کیفیت فیزیکی خاک باشد. شیب منحنی مشخصه آب خاک در نقطه عطف را شاخص S دکستر می‌نامند که با استفاده از پارامترهای معادله ون‌گنوختن (رابطه ۱) قابل برآورد می‌باشد (Dexter, 2004a):

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

که در آن θ_{sg} و θ_{rg} به ترتیب رطوبت جرمی باقیمانده و اشباع خاک

محاسبه نمودند. نتایج مطالعات این پژوهشگران نشان داد که می‌توان از انرژی انتگرالی به عنوان شاخصی از کیفیت خاک استفاده نمود. نتایج مطالعه (Armino and Wendroth, 2016) هم نشان داد که می‌توان از شاخص‌های بر مبنای انرژی انتگرالی برای ارزیابی ساختار و کیفیت فیزیکی خاک استفاده نمود. Barati et al. (2016) نیز در پژوهشی مقادیر آب قابل استفاده و انرژی انتگرالی دو گونه گیاهی را در پنج بافت مختلف خاک در زاگرس مرکزی محاسبه نمودند. نتایج آنها نشان داد که مقادیر بالاتر آب قابل استفاده و انرژی انتگرالی مؤید توان بیشتر گیاه در تحمل مقادیر کم رطوبت خاک است. (Zangiabadi et al., 2017) مقدار انرژی انتگرالی آب خاک را در ۳۰ نمونه خاک دارای بافت متوسط تا سبک در استان خراسان رضوی محاسبه و ارتباط آن را با ویژگی‌های ذاتی خاک بررسی نمودند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که به طور متوسط خاک‌های دارای بافت لوم شنی و لوم سیلتی کمترین و خاک‌های با بافت لوم رسی سیلتی بیشترین مقدار این شاخص را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین نتایج مطالعه آنها مؤید وجود همبستگی مثبت معنی‌دار بین انرژی انتگرالی و کربن آلی خاک بود.

بیشترین کشت برنج در ایران در سه استان گیلان، مازندران و گلستان، با ۷۲ درصد سطح زیر کشت برنج انجام می‌گیرد (Anonymous, 2011). خاک‌های شالیزاری با خاک 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 (Toung et al., 1994). مهم‌ترین منبع آبی تأمین‌کننده اراضی شالیزاری استان گیلان مخزن آبی سد سپیدرود است، اما به علت احداث سدهای متعدد در بالادست حوضه این سد و کاهش بارش در فصل رشد گیاه برنج، احتمال وقوع تنش خشکی در برخی از اراضی شالیزاری استان افزایش یافته است. (Sadradini and Salahshour Dalivand, 2012) نشان دادند که با وقوع تنش خشکی در اراضی شالیزاری استان گیلان به علت غالب بودن کانی‌های رسی انبساط‌پذیر مانند اسمکتیت و شدت انقباض خاک علاوه بر وقوع ترک، مقاومت خاک نسبت به نفوذ ریشه افزایش می‌یابد. در این رابطه توانایی و انرژی که گیاه برنج نسبت به جذب واحد حجم آب در خاک اقدام می‌نماید مهم خواهد بود. با توجه به ماهیت متفاوت خاک‌های اراضی شالیزاری، این پژوهش با هدف ارزیابی امکان استفاده از مفهوم انرژی انتگرالی به عنوان شاخصی از کیفیت فیزیکی خاک و بررسی روابط این شاخص با ویژگی‌های مختلف خاک انجام شد.

ظرفیت مزرعهای (FC) با فرض دو مکش ماتریک خاک معادل ۱۰۰ cm (FC₁₀₀) و ۳۳۰ cm (FC₃₃₀) در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه غیرهوازی بودن گیاه برنج و نیاز آبی زیاد این محصول، گلخراپ کردن خاکهای شالیزاری به منظور جلوگیری از هدررفت آب ناشی از زهکشی و استفاده گیاه از آب موجود در محدوده رطوبت اشباع تا رطوبت ظرفیت مزرعهای است. از این رو، Davatgar *et al.* (2009) از رطوبت خاک در حالت اشباع به عنوان حد بالای آب قابل استفاده خاک در خاکهای شالیزاری استان گیلان استفاده نمودند. لذا، در این مطالعه انرژی انتگرالی در سه حالت با فرض حد بالای آب قابل استفاده خاک در رطوبت اشباع (E_{I-S})، رطوبت ظرفیت مزرعهای در مکش معادل ۱۰۰ (E_{I100}) و ۳۳۰ سانتی متر (E_{I330}) محاسبه شد.

(kg kg⁻¹) هستند که از تقسیم رطوبت‌های 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 می‌شود. انرژی انتگرالی آب خاک در محدوده آب قابل استفاده خاک با استفاده از رابطه (۳) به روش Minasny and McBratney (2003) محاسبه گردید:

$$E_I[\theta_i, \theta_f] = \frac{1}{\theta_i - \theta_f} \int_{\theta_f}^{\theta_i} \psi(\theta) d(\theta) \quad \text{(رابطه ۳)}$$

θ_i و θ_f به ترتیب برابر با رطوبت خاک در حد بالا و حد پایین آب قابل استفاده خاک (نقطه پژمردگی دائم، PWP) می‌باشند. مقدار رطوبت خاک در مکش معادل ۱۵۰۰۰ cm و حد بالای آب قابل دسترس خاک برابر با رطوبت خاک در رطوبت

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های خاک مورد مطالعه

θ_{FC330} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{FC100} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{PWP} (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	کربن آلی (%)	جرم مخصوص ظاهری (g cm ⁻³)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	
۰/۲۲	۰/۲۴	۰/۱۱	۰/۲۸	۰/۰۴	۰/۹۱	۱۳	۳۶	۳	کمینه
۰/۵۹	۰/۶۹	۰/۲۵	۰/۷۶	۳/۴	۱/۷	۵۶	۷۰	۲۶	بیشینه
۰/۳۵	۰/۴۰	۰/۱۷	۰/۴۴	۱/۳	۱/۳	۳۴	۵۲	۱۴	میانگین

θ_s : رطوبت اشباع خاک؛ θ_{PWP} : رطوبت خاک در مکش معادل نقطه پژمردگی دائم (۱۵۰۰۰ سانتی‌متر)؛ θ_{FC100} : رطوبت ظرفیت مزرعهای در مکش معادل ۱۰۰ سانتی‌متر؛ θ_{FC330} : رطوبت ظرفیت مزرعهای در مکش معادل ۳۳۰ سانتی‌متر.

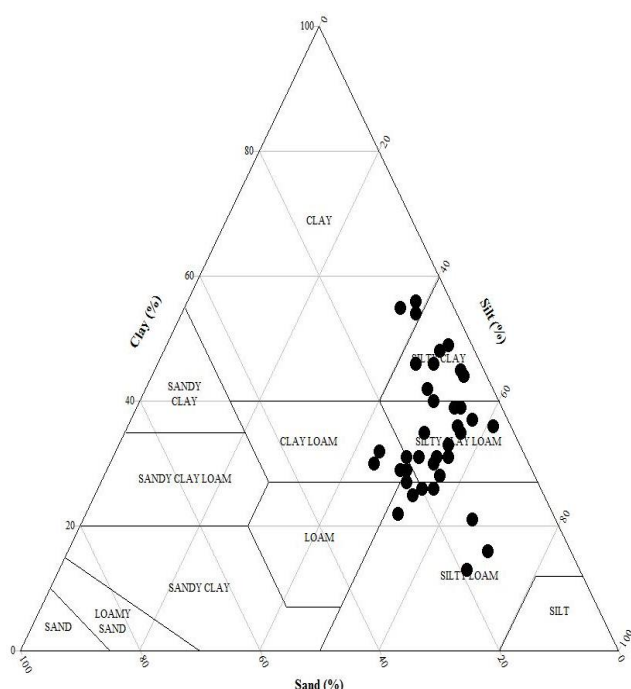
کربن آلی خاک و توزیع اندازه ذرات در نمونه‌های خاک (جدول ۱) مرتبط است.

تجزیه و تحلیل آماری، همبستگی خطی بین متغیرها و برازش رابطه رگرسیونی خطی به روش گام به گام با استفاده از نرم‌افزار SPSS 19 انجام شد.

نتایج

توزیع بافت خاک نمونه‌های مورد مطالعه در مثلث بافت خاک در شکل (۱) نشان داده شده است. کلاس‌های بافتی شامل لوم رسی سیلتی (۳۵ درصد از نمونه‌های خاک)، لوم سیلتی و رس سیلتی (هر یک ۲۰ درصد از نمونه‌های خاک)، لوم رسی (۱۷/۵ درصد از نمونه‌های خاک) و رسی (۷/۵ درصد از نمونه‌های خاک) بودند. تمامی نمونه خاک‌های مورد مطالعه دارای بافت خاک متوسط تا سنگین بودند. بیشتر اراضی شالیزاری استان گیلان در اراضی دشت‌های آبرفتی پست قرار دارند که به علت تجمع رسوبات دارای بافت متوسط تا سنگین هستند.

در شکل (۲) منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده در تمامی نمونه‌های خاک مورد مطالعه ارائه شده است. نمونه خاک‌های مورد مطالعه محدوده و تنوع گسترده‌ای از منحنی‌های مشخصه آب خاک را نشان می‌دهند. علت این تنوع به اختلاف در

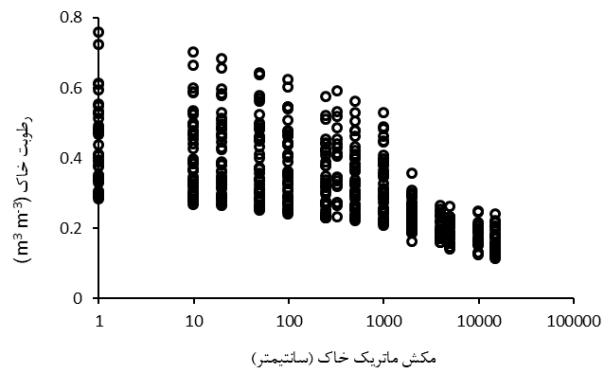


شکل ۱. توزیع بافت خاک نمونه‌های مورد مطالعه در مثلث بافت خاک

که کلاس‌های بافت خاک دارای بیشترین مقدار انرژی انتگرالی (رسی و لوم رسی) از مقادیر کمتری از شاخص S دکستر برخوردار بودند.

نتایج آنالیز همبستگی، مؤید وجود همبستگی خطی بیشتر E_{I330} نسبت به E_{I-S} و E_{I100} با سایر ویژگی‌های مورد مطالعه در این پژوهش بود (نتایج نشان داده نشده است). همبستگی ضعیف E_{I100} با ویژگی‌های مورد مطالعه احتمالاً ناشی از فرض اولیه برای محاسبه‌ی این مفهوم و در نظر گرفتن مکش ۱۰۰ سانتی‌متر برای رطوبت معادل ظرفیت مزرعه‌ای است. به علت متوسط تا سنگین بودن بافت خاک در اراضی شالیزاری مورد مطالعه، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در این خاک‌ها در مکش‌هایی بیش از مکش ۱۰۰ سانتی‌متر رخ می‌دهد. عدم وجود همبستگی معنی‌دار بین E_{I-S} و ویژگی‌های مورد مطالعه احتمالاً ناشی از این حقیقت است که در محاسبه E_{I-S} شرایط فیزیولوژیکی خاص گیاه برنج در جذب آب در شرایط غیرهوازی در نظر گرفته شده است در حالی که نه تنها مفهوم انرژی انتگرالی بلکه تمامی روش‌های مختلف محاسبه مقدار آب قابل‌استفاده خاک (آب قابل‌استفاده گیاه، محدوده رطوبتی با حداقل رطوبت، ظرفیت انتگرالی آب خاک)، هیچ‌یک تفاوت در ویژگی‌های فیزیولوژی گیاهان مختلف در جذب آب را در نظر نگرفته و تنها بر مبنای تفاوت در ویژگی‌های خاک قابلیت دسترسی آب خاک را برآورد می‌نمایند. اخیراً *Meskini et al.* (2018) با بازنگری مفهوم ظرفیت انتگرالی آب خاک، توابع وزنی جدیدی پیشنهاد نمودند که با وارد نمودن ویژگی‌های گیاهی قادر است مقدار آب قابل‌استفاده‌ی هر خاک مشخص را برای هر گیاه محاسبه نماید.

بر مبنای شاخص انرژی انتگرالی در این مطالعه می‌توان اظهار نمود که استفاده از مفهوم E_{I330} برای تعیین انرژی انتگرالی در خاک‌های شالیزاری مناسب‌تر خواهد بود. براین اساس، مقدار آب قابل‌استفاده خاک تنها برای رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در مکش ۳۳۰ سانتی‌متر محاسبه و در جدول (۲) ارائه شد. نتایج حاکی از آن است که به طور متوسط نمونه‌های خاک در بافت خاک رسی حاوی کمترین مقدار آب قابل‌استفاده خاک بودند که دلیل این امر مقدار بسیار کم کربن آلی خاک در این کلاس بافتی خاک است (جدول ۲). بیشترین مقدار آب قابل‌استفاده خاک در نمونه خاک‌های دارای بافت لوم سیلتی مشاهده شد. با وجود اینکه میانگین مقدار آب قابل‌استفاده خاک در دو بافت خاک لوم رسی سیلتی و رس سیلتی تقریباً یکسان بود ($0.20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)، اما مقدار انرژی لازم برای جذب آب قابل‌استفاده در دو بافت خاک متفاوت به دست آمد. *Minasny and McBratney* (2003) معتقدند که در خاک‌های مشابه از نظر مقدار آب قابل‌استفاده، ولی با مقدار انرژی انتگرالی متفاوت، رشد و عملکرد گیاه و به تبع



شکل ۲. منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده در ۴۰ نمونه خاک اراضی شالیزاری مورد مطالعه

در جدول (۲) میانگین مقدار پارامترهای معادله ون-گنوختن حاصل از برازش رابطه (۱) بر داده‌های منحنی مشخصه آب خاک اندازه‌گیری شده، شاخص S و مقادیر مختلف انرژی انتگرالی محاسبه شده در کلاس‌های مختلف بافت خاک ارائه شده است. میانگین رطوبت اشباع در کل نمونه‌های خاک مورد مطالعه $0.44 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ بود، در حالی که نمونه‌های خاک با بافت رسی و لوم سیلتی به ترتیب با 0.346 و $0.505 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ کمترین و بیشترین مقدار میانگین رطوبت اشباع را به خود اختصاص دادند. میانگین شاخص S دکستر در مجموع ۴۰ نمونه خاک بیش از 0.35 به دست آمد (جدول ۲). *Dexter* (2004b) با استفاده از شاخص S، خاک‌ها را از نظر کیفیت فیزیکی خاک در ۴ گروه کیفیت فیزیکی خیلی ضعیف ($S > 0.020$)، ضعیف ($0.035 > S \geq 0.020$)، خوب ($0.050 > S \geq 0.035$) و خیلی خوب ($S \geq 0.050$) قرار دادند. بر این اساس نتایج نشان‌دهنده کیفیت فیزیکی خوب خاک‌های مورد مطالعه است. با این حال با توجه به نتایج جدول (۲) می‌توان بیان نمود که در خاک‌های با بافت سنگین همچون بافت رسی و تا حدی لوم رسی، متوسط شاخص S دکستر کمتر از 0.35 بود؛ با سبک‌تر شدن بافت خاک و افزایش مقدار منافذ متوسط خاک، مقدار شاخص S دکستر و کیفیت فیزیکی خاک افزایش یافته است. *Rezaee et al.* (2017) نیز شاخص S دکستر را برای ۳۵ نمونه خاک اراضی شالیزاری استان گیلان محاسبه نمودند. نتایج آن‌ها نیز نشان داد که تمامی خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه دارای شاخص S دکستر بالاتر از 0.35 بوده و از کیفیت فیزیکی خوبی برخوردار بودند.

میانگین انرژی انتگرالی در کل نمونه‌های خاک مورد مطالعه با در نظر گرفتن رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر به ترتیب برابر با $270/21$ و $336/91 \text{ J kg}^{-1}$ به دست آمد. میانگین مقدار انرژی انتگرالی محاسبه شده برای بافت‌های مختلف خاک به ترتیب بافت رسی سیلتی > لوم سیلتی > لوم رسی سیلتی > لوم رسی یافت. نتایج نشان می‌دهد

آن کارایی مصرف آب متفاوت خواهد بود. رابطه خطی برازش داده شده بر چند ویژگی و دارای همبستگی بالا با انرژی انتگرالی محاسبه شده (E_{I330}) در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل میانگین هر ویژگی مدنظر در کلاس‌های مختلف بافت خاک در محور افقی و میانگین E_{I330} در کلاس‌های مختلف بافت خاک در محور عمودی نشان داده شده است. در اکثر مطالعات همبستگی مثبت معنی‌دار بین ذرات رس و انرژی انتگرالی (Asgarzadeh *et al.*, 2011; Barati *et al.*, 2016) و یا همبستگی منفی بین انرژی انتگرالی و ذرات شن خاک (Zangiabadi *et al.*, 2017) گزارش شده است. در حالی در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه در بین ذرات اولیه خاک تنها ارتباط معنی‌دار بین انرژی انتگرالی و ذرات در اندازه سیلت مشاهده شد. هر چند اثر مقدار ذرات سیلت خاک بر انرژی انتگرالی به شدت متأثر از مقدار کربن آلی خاک می‌باشد. بین میانگین ذرات سیلت در کلاس‌های مختلف بافت خاک و میانگین کربن آلی نمونه‌های خاک در هر کلاس بافت خاک همبستگی مثبت معنی‌دار مشاهده شد ($r = 0.75$). همچنین نتایج نشان داد که با افزایش میانگین کربن آلی در کلاس‌های مختلف بافت خاک، میانگین انرژی مورد نیاز برای جذب واحد حجم آب خاک کاهش یافت (شکل ۳ الف). اما در اکثر مطالعات گذشته با سنگین‌تر شدن بافت خاک و افزایش کربن آلی خاک، سطح ویژه خاک بیشتر شده و برداشت آب از آن سخت‌تر می‌گردد (Barati *et al.*, 2016). نتایج این پژوهش نشان داد که تأثیر کربن آلی بر انرژی انتگرالی در خاک‌های شالیزاری متفاوت از سایر خاک‌ها می‌باشد. که احتمالاً ناشی از ماهیت متفاوت این نوع اراضی و عملیات خاص آماده‌سازی زمین برای کشت برنج است. (Sahrawat 2004) بیان کرد که در خاک‌های شالیزاری در اثر فرایند احیاء و فقدان اکسیژن، اکسیداسیون و تجزیه مواد آلی به‌کندی و به‌صورت ناقص انجام می‌شود و مواد آلی تجمع پیدا می‌کنند. مهم‌ترین تفاوت فرایند تجزیه مواد آلی در خاک‌های شالیزاری نسبت به دیگر خاک‌های هوازی در ماهیت فرایند و محصول نهایی حاصل از تجزیه ماده آلی است. در خاک‌های با تهویه خوب در اثر فرایند اکسیداسیون کامل، علاوه بر عناصر معدنی، ترکیبات آلی باقیمانده مقاوم به تجزیه با جرم مولکولی و تراکم بار الکتریکی زیاد مانند هوموس هستند که می‌توانند آب را به خوبی نگهداری نموده و انرژی لازم برای جدا کردن واحد حجم آب از خاک را افزایش دهند. اما در خاک‌های شالیزاری علی‌رغم بالابودن مواد آلی، محصول نهایی به صورت متان، آمین و مقداری هیومید هستند که از جرم مولکولی و تراکم بار الکتریکی کمتری برخوردار هستند و در نتیجه توانایی آن‌ها در نگهداری آب در خاک کمتر است و در نتیجه در این شرایط به انرژی کمتری برای جدا کردن آب از خاک نیاز است. نتایج نشان می‌دهد که در بافت‌های خاک متوسط تا سنگین اراضی شالیزاری حاوی مقادیر بالاتر ذرات سیلت و کربن آلی خاک، سهولت دسترسی آب خاک برای گیاه بیشتر است.

جدول ۲. میانگین مقدار پارامترهای معادله ون گنوختن حاصل از برازش رابطه (۱) بر داده‌های منحنی مشخصه آب خاک، شاخص S دکستر (رابطه ۲)، انرژی انتگرالی محاسبه شده (رابطه ۳) و مقدار آب قابل استفاده گیاه در هر یک از کلاس‌های بافت خاک

مقدار آب قابل استفاده خاک # ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	انرژی انتگرالی			شاخص S دکستر	پارامترهای معادله ون گنوختن		ویژگی‌های پایه خاک			
	E_{I330} (J kg^{-1})	E_{I100} (J kg^{-1})	E_{I-S} (J kg^{-1})		θ_s	n	کربن آلی (%)	رس (%)	سیلت (%)	
۰/۲۰۱ (± 0.121)	۳۳۸/۴۱ (± 21.64)	۲۷۶/۸۶ (± 23.58)	۲۳۸/۴۹ (± 49.11)	۰/۰۶۴ (± 0.42)	۰/۴۳۰ (± 0.136)	۱/۲۴۰ (± 0.124)	۱/۲۴ (± 0.88)	۳۳/۷ (± 3.5)	۵۴/۵ (± 2.8) [*]	لوم رسی سیلتی
۰/۲۳۸ (± 0.88)	۳۳۱/۷۰ (± 21.96)	۲۷۱/۸۶ (± 31.43)	۲۲۳/۸۲ (± 27.80)	۰/۰۷۸ (± 0.22)	۰/۵۰۵ (± 0.125)	۱/۲۷۷ (± 0.122)	۱/۷۸ (± 0.72)	۲۰/۶ (± 5.1)	۶۱/۰ (± 7.9)	لوم سیلتی
۰/۲۰۷ (± 0.77)	۳۲۵/۱۷ (± 31.32)	۲۶۰/۴۲ (± 27.27)	۲۲۰/۳۰ (± 41.90)	۰/۰۶۷ (± 0.28)	۰/۴۷۷ (± 0.75)	۱/۲۷۰ (± 0.176)	۱/۴۴ (± 0.87)	۴۵/۰ (± 2.9)	۴۷/۶ (± 2.9)	رس سیلتی
۰/۱۲۲ (± 0.56)	۳۴۲/۲۸ (± 15.10)	۲۶۴/۲۸ (± 18.32)	۲۳۱/۳۷ (± 42.36)	۰/۰۳۷ (± 0.18)	۰/۳۶۶ (± 0.96)	۱/۱۵ (± 0.46)	۰/۹۹ (± 1.06)	۲۹/۸ (± 1.7)	۴۸/۰ (± 2.9)	لوم رسی
۰/۰۷۶ (± 0.11)	۳۶۱/۰۷ (± 0.71)	۲۷۹/۴۴ (± 5.64)	۱۸۷/۴۶ (± 20.82)	۰/۰۲۲ (± 0.03)	۰/۳۴۶ (± 0.42)	۱/۰۸۳ (± 0.16)	۰/۵۳ (± 0.30)	۵۵/۰ (± 1.7)	۳۷/۷ (± 1.5)	رسی
۰/۱۸۴ (± 0.101)	۳۳۶/۹۱ (± 23.12)	۲۷۰/۲۱ (± 24.26)	۲۳۶/۶۵ (± 41.85)	۰/۰۵۸ (± 0.35)	۰/۴۳۴ (± 0.119)	۱/۲۲۳ (± 0.131)	۱/۳ (± 0.88)	۴۳/۳ (± 10.5)	۵۲/۰ (± 7.6)	کل نمونه‌ها

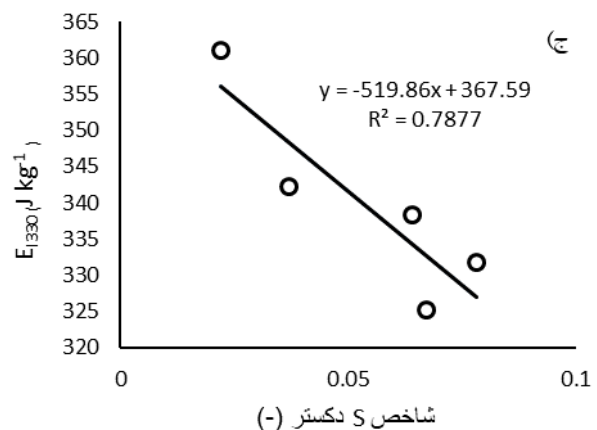
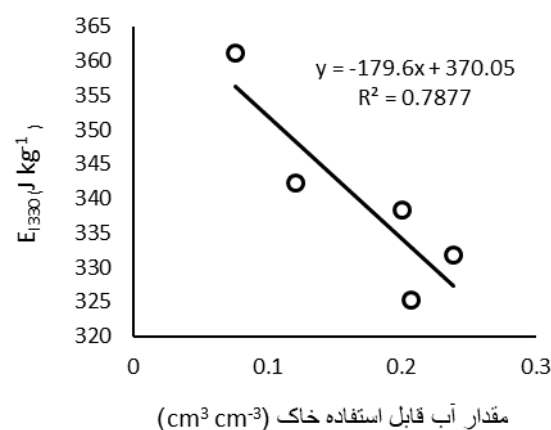
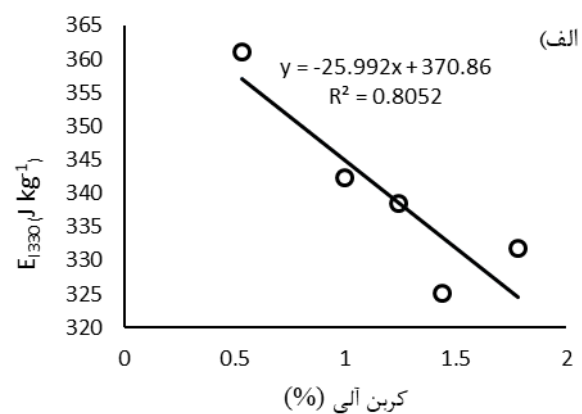
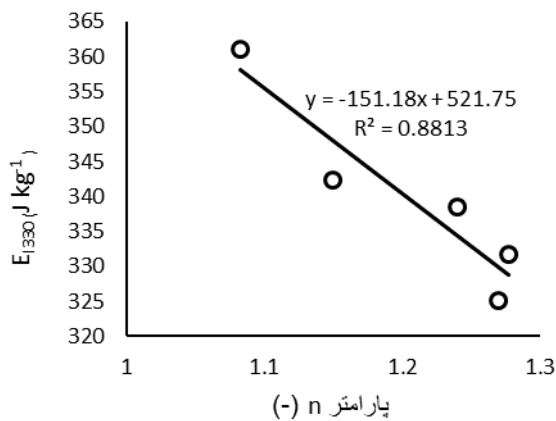
* انحراف استاندارد

مقدار آب قابل دسترس خاک که از تفاضل رطوبت خاک در مکش معادل ظرفیت مزرعه‌ای (مکش ۳۳۰ سانتی‌متر) و رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم (مکش ۱۵۰۰ سانتی‌متر) محاسبه شد.

n پارامتر شکل منحنی مشخصه آب خاک حاصل از برازش معادله ون گنوختن (۱۹۸۰)، θ_s رطوبت اشباع خاک، E_{I-S} ، E_{I100} و E_{I330} به ترتیب انرژی انتگرالی محاسبه شده با فرض رطوبت اشباع، رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای در مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتیمتر به عنوان حد بالای آب قابل استفاده خاک می‌باشند.

دامنه مکش معین به‌طور ناگهانی از دست می‌دهند دارای شیب منحنی مشخصه آب خاک بیشتری نسبت به خاک‌های با بافت سنگین هستند (Zangiabadi et al., 2017) و در نتیجه مستلزم صرف انرژی کمتری برای جذب واحد آب خاک می‌باشند. همچنین بین متوسط شاخص S دکستر در کلاس‌های مختلف بافت خاک و میانگین انرژی انتگرالی محاسبه‌شده رابطه منفی معنی‌دار مشاهده شد (شکل ۳ ج). هر چه شاخص S دکستر بیشتر باشد، کیفیت فیزیکی خاک و به تبع آن پایداری ساختمان خاک بهتر بوده و در نتیجه آب خاک با سهولت بیشتری در دسترس گیاه قرار خواهد گرفت.

نتایج بررسی رابطه بین پارامترهای معادله ون‌گنوختن (n) و α و انرژی انتگرالی حاکی از وجود همبستگی منفی معنی‌دار در سطح احتمال یک درصد بین مقادیر انرژی انتگرالی و پارامتر شکل منحنی مشخصه آب خاک (n) بود (شکل ۳ ب). پارامتر α عکس مکش ورود هوا به خاک است و روی شکل منحنی مشخصه آب خاک اثرگذار نیست بلکه در صورت ثابت بودن مقدار n، با تغییر α کل منحنی به محدوده مکش‌های کمتر یا بیشتر منتقل می‌شود. درحالی‌که n به شاخص توزیع اندازه منافذ خاک مرتبط است و خاک‌هایی با توزیع یکنواخت منافذ دارای مقادیر بالاتر n می‌باشند (Sillers et al., 2001). این بدین مفهوم است که خاک‌های با بافت سبک یا ساختمان ناپایدار که رطوبت خود را در یک

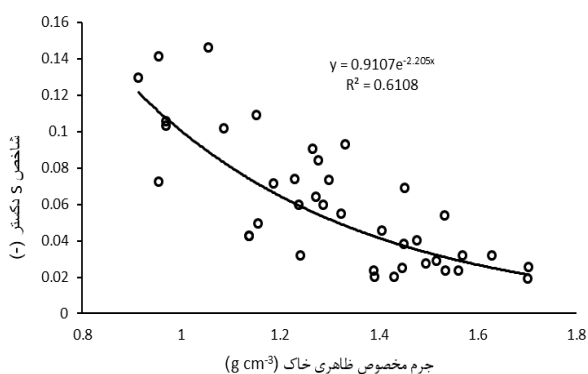


شکل ۳. روابط بین میانگین انرژی انتگرالی محاسبه‌شده در کلاس‌های مختلف بافت خاک و میانگین کربن آلی خاک (الف)، میانگین پارامتر شکل منحنی مشخصه آب خاک (n) (ب)، میانگین شاخص S دکستر (ج) و میانگین مقدار آب قابل استفاده خاک (د).

قابل استفاده در این پژوهش از تفاضل مقدار رطوبت خاک در دو نقطه رطوبتی (رطوبت ظرفیت مزرع‌ای و نقطه پژمردگی دائم) محاسبه شد. بر اساس مطالعات Tormena et al. (2008)، برای تعیین خاک‌هایی با مقدار شاخص S دکستر کمتر از ۰/۰۳۵، برای تعیین حد پایین آب قابل استفاده خاک نمی‌توان از رطوبت خاک معادل نقطه پژمردگی دائم استفاده نمود و بایستی رطوبت خاک در

در شکل (۳-د)، بین متوسط مقدار آب قابل استفاده خاک در هر کلاس بافت خاک با متوسط انرژی انتگرالی یک رابطه خطی برازش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در محدوده‌ی خاک‌های اراضی شالیزاری مورد مطالعه در این پژوهش، کلاس‌های بافت خاک حاوی مقادیر بالاتر آب قابل استفاده به انرژی کمتری برای جذب واحد حجم آب نیاز دارند. باید ذکر نمود که مقدار آب

قابل استفاده را با فرض رطوبت FC در مکش ۳۳۰ سانتیمتر در اراضی شالیزاری دارای بافت خاک لوم رسی سیلتی و لوم رسی به ترتیب با استفاده از مقدار رطوبت اشباع خاک و نسبت کربن آلی به درصد رس خاک با دقت خوبی برآورد نمود. درحالی که نتایج حاکی از توانایی کم روابط بسط داده شده در برآورد انرژی انتگرالی با استفاده از ویژگی های پایه در خاک اراضی شالیزاری با بافت لوم سیلتی و رس سیلتی بود ($R^2 \approx 0/40$). روابط رگرسیونی بسط داده شده و ضرایب تبیین روابط برازش داده شده در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۴. رابطه بین مقدار جرم مخصوص ظاهری نمونه خاک های شالیزاری و شاخص S دکستر

مکش معادل مقاومت مکانیکی 2MPa را به کار برد. بر این اساس، این پژوهشگران جرم مخصوص خاک معادل شاخص S دکستر ۰/۰۳۵ را به عنوان جرم مخصوص ظاهری بحرانی خاک پیشنهاد نمودند. در شکل (۴)، رابطه بین جرم مخصوص ظاهری خاک های شالیزاری مورد مطالعه و شاخص S دکستر نشان داده شده است. با افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک، شاخص S دکستر کاهش یافته است که با نتایج Rezaee et al. (2017) مطابقت دارد. با استفاده از معادله خط برازش داده شده در شکل (۴)، می توان جرم مخصوص ظاهری بحرانی در خاک های شالیزاری استان گیلان را برابر با ۱/۵ گرم در سانتی متر مکعب بیان نمود. لذا پیشنهاد می شود در محاسبه و تعیین حد پایین آب قابل استفاده در خاک های شالیزاری با جرم مخصوص ظاهری کمتر از ۱/۵ گرم در سانتی متر مکعب علاوه بر مکش معادل نقطه پژمردگی دائم، مکش معادل مقاومت مکانیکی ۲MPa نیز تعیین گردد.

چهار بافت غالب خاک در نمونه های مورد مطالعه شامل لوم رسی سیلتی، لوم سیلتی، رس سیلتی و لوم رسی بودند. برای برآورد انرژی انتگرالی در هر یک از کلاس های بافتی غالب خاک پس از بررسی هم راستایی چندگانه بین متغیرهای ورودی، رابطه رگرسیونی به روش گام به گام برازش داده شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که می توان انرژی انتگرالی خاک در محدوده رطوبت

جدول ۳. روابط رگرسیونی و ضرایب تبیین (R^2) برای برآورد انرژی انتگرالی در محدوده آب قابل استفاده خاک در نمونه خاک های اراضی شالیزاری در کلاس های مختلف بافت خاک

بافت خاک	رابطه برازش داده شده	ضریب تبیین (R^2)
لوم رسی سیلتی	$E_{I330} = -132/981 \theta_s + 395/613$	۰/۷۰۱
لوم سیلتی	$E_{I330} = -322/86 \left(\frac{\text{کربن آلی}}{\text{رس}} \right) + 361/1$	۰/۴۴۴
رس سیلتی	$E_{I330} = -23/309 OC + 358/67$	۰/۴۲۲
لوم رسی	$E_{I330} = -275/331 \times \left(\frac{\text{کربن آلی}}{\text{رس}} \right) + 354/214$	۰/۹۵۸

E_{I330} انرژی انتگرالی با فرض رطوبت ظرفیت مزرعه ای در مکش ۳۳۰ سانتیمتر، θ_s درصد رطوبت اشباع خاک و OC درصد کربن آلی خاک است.

برآورد آب قابل استفاده خاک است. در شرایطی که منحنی مشخصه آب خاک تنها داده موجود برای محاسبه آب قابل استفاده خاک باشد، استفاده از مفهوم سنتی آب قابل استفاده گیاه (تفاضل رطوبت خاک در دو مکش معادل ظرفیت مزرعه ای و نقطه پژمردگی دائم) نمی تواند به تنهایی شاخص مناسبی از شرایط خاک به منظور مدیریت مناسب آبیاری باشد. انرژی انتگرالی مفهوم نسبتاً جدیدی است که تنها با استفاده از منحنی مشخصه آب خاک قابل محاسبه است و معادل مقدار انرژی لازم برای جذب واحد حجم آب از خاک می باشد. نتایج این پژوهش نشان داد که

نتیجه گیری

با توجه به کمبود منابع آب و نیاز روزافزون به تولید محصولات کشاورزی، یکی از مهمترین چالش های عصر حاضر مدیریت آبیاری می باشد. مدیریت صحیح آبیاری مستلزم آگاهی از مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه است. مفاهیم مختلفی برای محاسبه مقدار آب قابل استفاده خاک برای گیاه پیشنهاد شده است که با افزایش دقت این مفاهیم، مقدار داده مورد نیاز برای برآورد آب قابل استفاده افزایش می یابد. منحنی مشخصه آب خاک اولین و مهمترین ویژگی خاک در تمامی روش های مختلف

در نتیجه موجب شده است که با افزایش کربن آلی در خاک‌های شالیزاری سهولت دسترسی آب خاک برای گیاه نیز افزایش یابد. همچنین بین انرژی انتگرالی محاسبه‌شده و شاخص کیفیت فیزیکی خاک (شاخص S دکستر) همبستگی منفی معنی‌دار مشاهده شد. این بدین معنی است که در خاک‌هایی با کیفیت فیزیکی مناسب‌تر، سهولت دسترسی آب خاک برای گیاه بیشتر است؛ بنابراین می‌توان انرژی انتگرالی را نیز به‌عنوان شاخص مناسبی از کیفیت فیزیکی خاک در نظر گرفت. بر اساس شاخص S دکستر مقدار جرم مخصوص ظاهری بحرانی در خاک‌های شالیزاری مورد مطالعه برابر با ۱/۵ گرم در سانتی‌متر مکعب به دست آمد. در جرم مخصوص ظاهری بحرانی خاک، مقدار مقاومت خاک در برابر نفوذ ریشه گیاه عامل محدودکننده جذب آب خاک توسط گیاه خواهد بود؛ و در محاسبه مقدار آب قابل‌استفاده خاک پیشنهاد می‌شود در تعیین حد پایین علاوه بر رطوبت خاک در نقطه پژمردگی دائم (رطوبت در مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر)، رطوبت خاک در مکش معادل مقاومت مکانیکی ۲ MPa نیز مدنظر قرار گیرد.

REFERENCES

- Anonymous. (2011). Cereal in statistics. Statistics and information department of Agriculture Ministry of Iran. (In Farsi).
- Armindo, R. A. and Wendroth, O. (2016). Physical soil structure evaluation based on hydraulic energy functions. *Soil Science Society of American Journal*, 80: 1167 -1180.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M. R., Mahboubi, A. A., Nosrati, A. and Dexter, A. R. (2011). Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma*, 166: 34-42.
- Barati, S., Vahabi, M. R., Mosaddeghi, M. R. and Bassiri, M. (2016). Plant –available water and integral energy for *Medicago sativa* and *Bromus tomentellus* in texturally different soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(1): 69-91.
- 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.
- Davatgar, N., Neishabouri, M. R., Sepaskhah, A. R., and Soltani, A. (2009) Physiological and morphological responses of rice (*Oryza sativa* L.) to varying water stress management strategies. *International Journal of Plant Production*, 3(4): 19-32.
- 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.
- Dexter, A. R. (2004b). Soil physical quality. Part III: Unsaturated hydraulic Conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120: 227–239.
- 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.
- 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 (no. 5)*. (pp. 201-228). Madison, Wisconsin: USA.
- Meskini-Vishkaee, F. M., Mohammadi, M. H., Neyshabouri, M. R. (2018). Revisiting the wet and dry ends of soil integral water capacity using soil and plant properties. *Soil Research*. <https://doi.org/10.1071/SR17025>
- Minasny, B. and McBratney, A. B. (2003). Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant Soil*, 249: 253–262.
- 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)
- Sadradini, A. A. and Salahshour Dalivand, F. (2012). The effect of salinity stress and irrigation regimes on yield and water productivity in cracked paddy rice field. *Cereal Research*, 2(3): 193-208. (In Farsi)
- Sahrawat, K. L. (2004). Fertility and organic matter in submerged rice soils. *Current science*, 88(5): 735-739.

- Sillers, W. S., Fredlund, D. G. and Zakerzadeh, N. (2001). Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models. *Geotechnical and Geological Engineering*, 19: 243-283.
- Timlin, D. J., Pachepsky, Y., Snyder, V. A. and Bryant, R. B. (2001). Water budget approach to quantify corn grain yields under variable rooting depths. *Soil Science Society of American Journal*, 65: 1219-1226.
- Tormena, C. A., da Silva, A. P., Imhoff, S. D. C. and Dexter, A. R. (2008). Quantification of the soil physical quality of a tropical oxisol using the S index. *Scientia Agricola (Piracicaba, Brazil)*, 65(1): 56-60.
- Toung, T. P., M. S. C. Wopereis, J. A. Marques, and Kropff, M. J. (1994). Mechanisms and control of percolation losses in puddle rice fields. *Soil Science Society of American Journal*, 58: 1794-1803.
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44: 892-897.
- 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.
- Zangiabadi, M., Gorji, M., Shorafa, M., Keshavarz, P. and Saadat, S. (2017). The relationship between integral energy (EI) of different soil moisture ranges and S-index in medium to coarse-textured soils. *Journal of Water and Soil*, 31(2): 386-398. (In Farsi)