DOI: 10.22059/ijswr.2019.283647.668236 تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۱، شماره ۳، خرداد ۱۳۹۹ (ص ۶۹۶-۶۸۷)

Comparison of Three Commonly Used Concepts in Explaining Soil Water Availability for Plants (CPAW, E_I and M_{h0}) and Their Feasibility as an Indicator of Soil Management

EHSAN GHEZELBASH[1], MOHAMMAD HOSSEIN MOHAMMADI[1*]

1. Department of Soil Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Iran

(Received: June. 30, 2019- Revised: Dec. 10, 2019- Accepted: Dec. 23, 2019)

ABSTRACT

The complexity of the concept of soil water availability has led to the emergence of a variety of methods to estimate it, which have always been changing, refining, and replacing. Among those, the conventional method of plant available water (CPAW=FC-PWP) due to convenient measurement has received more attention. In theory, however, the methods of Integral Energy (E_I) and Kirchhoff Potential (M_{h0}) have been considered due to the interference of soil properties and plant ability for water uptake. In this study, the available water was calculated with CPAW, E_I and M_{h0} concepts in a wide range of soils (72 samples) with various physical properties and results were compared. Also, different upper limits were tested to determine the water availability and the new field capacity moisture coefficient was used as the upper limit of the concept of water availability. Despite the weak correlation between E_I and M_{h0}, the trend of their variations in different soils is somewhat similar, indicating their similarity in the estimation of available water for plants. In contrast, the lack of a clear relationship between E_I and M_{h0} with CPAW confirmed their lack of correlation in explaining water availability of the plant. The convenience of using CPAW makes it even more preferable to study the variability of soils in terms of hydraulic properties. On the other hand, the use of E_I and M_{h0} results will be useful for explaining the available water content but still needs to be modified in terms of determining threshold limits.

Keywords: Field Capacity, Integral Energy, Kirchhoff Potential

* Corresponding Author's Email: mhmohmad@ut.ac.ir

مقایسه سه مفهوم پرکاربرد در تبیین فراهمی آب خاک برای گیاه (CPAW، E_I و M_{h0}) و قابلیت‌سنجی آن‌ها به عنوان شاخص مدیریت خاک

احسان قزلباش[1]، محمدحسین محمدی[1*]

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۹- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۹/۱۹- تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۰/۲)

چکیده

پیچیدگی مفهوم فراهمی آب خاک موجب ظهور روش‌های متنوعی برای برآورد آن شده است. از این بین روش مرسوم آب قابل استفاده برای گیاه (CPAW=FC-PWP) به دلیل سهولت در اندازه‌گیری، رایج تراست. اما از نظر تئوری روش‌های انرژی جمعی (E_I) و پتانسیل کرشهف (M_{h0}) به‌دلیل دخالت ویژگی‌های خاک و توان گیاه برای جذب آب، نیز مورد توجه اند. در این پژوهش فراهمی آب با استفاده از مفاهیم CPAW، E_I و M_{h0} در دامنه‌ی گسترده‌ای از ۷۲ نمونه‌ی خاک با ویژگی‌های فیزیکی متنوع تعیین و نتایج مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین دامنه‌های مختلف رطوبتی برای تعیین فراهمی آب مورد آزمون قرار گرفت و ضریب جدید رطوبت ظرفیت مزرعه به‌عنوان حد بالای مفهوم فراهمی آب محاسبه گردید. با وجود همبستگی ضعیف بین E_I و M_{h0}، روند تغییرات آن‌ها در خاک‌های مختلف تا حدودی نزدیک بود که بیانگر تشابه آن‌ها در برآورد آب قابل جذب توسط گیاهان است. در مقابل، عدم وجود یک رابطه مشخص بین E_I و M_{h0} با CPAW موید عدم همبستگی آن‌ها در تبیین فراهمی آب مورد نیاز گیاه بود. سهولت به‌کارگیری CPAW موجب می‌شود استفاده از آن برای بررسی تفاوت خاک‌ها از نظر ویژگی‌های هیدرولیکی همچنان ارجحیت داشته باشد. از طرفی استفاده از نتایج حاصل از E_I و M_{h0} برای تبیین فراهمی آب مفید خواهد بود اما همچنان از نظر تعیین حدود آستانه نیاز به اصلاح دارد.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت مزرعه، انرژی جمعی، پتانسیل کرشهف.

مقدمه

تلاش برای درک نحوه جذب آب خاک توسط گیاه و فراهمی آب[1] و بیان آن در قالب یک ویژگی قابل اندازه‌گیری و قابل پیش‌بینی یکی از چالش‌های مهم در علوم خاک است (Philip, 1972). همچنین مطالعه تغییرات فراهمی آب در انواع خاک‌ها از نظر مدیریتی و همچنین مدل‌سازی اقتصادی در کشاورزی حائز اهمیت است (Timlin et al., 2001).

مفاهیم مختلفی برای توصیف ملاک‌های فراهمی آب برای گیاه ارائه شده است. مرسوم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها مفهوم رایج آب قابل استفاده برای گیاه،[2] CPAW، است. این مفهوم مقدار آب خاک را در محدوده‌ی رطوبت ظرفیت مزرعه، FC[3]، تا نقطه‌ی پژمردگی دائم، PWP[4]، به عنوان مقدار فراهمی آب معرفی می‌نماید (Cassel and Nielsen, 1986). با این وجود عموماً ایراداتی به CPAW وارد می‌شود که در دو دسته کلی قرار می‌گیرند. دسته‌ی اول مربوط به انتخاب دو حد آستانه است که مبتنی بر تجربه و اغلب سلیقه‌ای است. دسته‌ی دوم نیز به این نکته مربوط است که با کاهش رطوبت خاک از FC تا PWP، گیاهان تحت تنش قرار می‌گیرند و این روند در CPAW نادیده گرفته شده است (Hillel, 1998). علاوه بر این، در طبیعت تبخیر و تعرق بالقوه و تراکم ریشه نیز بر فراهمی آب برای گیاه تاثیرگذار است (Minasny and McBratney, 2003). همچنین، مفهوم CPAW صرفا بر اساس پتانسیل آب خاک تعریف شده است و نیاز تهویه‌ای گیاه و عامل مقاومت مکانیکی خاک را لحاظ نمی‌کند.

به منظور اصلاح و بهینه‌سازی مفهوم فراهمی آب برای گیاه به ترتیب ملاک‌های دامنه رطوبتی بدون محدودیت، NLWR[5]، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، LLWR[6]، و گنجایش آب

* نویسنده مسئول: mhmohmad@ut.ac.ir

1 - Water Availability
2 - Conventional Plant available water
3 - Field moisture capacity
4 - Permanent wilting point
5 - Non-Limiting Water Range
6 - Least Limiting Water Range

جمعی، IWC[1]، معرفی شده است (Letey, 1958; da Silva *et al*., 1994; Groenevelt *et al*., 2001). هریک از این ملاک‌ها در یک یا چند دامنه از رطوبت خاک محاسبه شده‌اند و متکی به حدود آستانه هستند. وابستگی مفاهیم مذکور به برخی پیش-فرض‌ها و عدم توجه به خصوصیات گیاه موجب شد ملاکی با عنوان انرژی جمعی، E_I[2]، معرفی شود (Minasny and McBratney, 2003) که کل انرژی مورد نیاز برای جذب آب از خاک را بر اساس اطلاعات منحنی مشخصه آب خاک، SWC[3]، محاسبه می‌کند.

از طرفی Van Lier *et al*., (2006) بر اساس الگوریتم توسعه یافته توسط Van Dam and Feddes, (2000) یک روش عددی برای حل معادله‌ی ریچاردز ارائه کردند تا به‌صورت مستقیم خصوصیات خاک و گیاه را در محاسبه فراهمی آب دخیل نمایند. این روش هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک را مهم‌ترین عامل در توان خاک برای فراهم‌سازی آب برای گیاه در نظر می‌گیرد و بر اساس آن پتانسیل کرشهف، M_{h0}[4]، را به‌عنوان تابعی از خصوصیات هیدرولیکی خاک و شاخصی از فراهمی آب برای گیاه تعریف می‌کند (رابطه ۴) (VanLier *et al*., 2006).

دو ملاک E_I و M_{h0} توان خاک را برای فراهمی آب برای گیاه لحاظ می‌کنند و همین عامل مهمی است که تفاوت ساختاری قابل توجهی با سایر روش‌ها ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، مفاهیم LLWR و IWC با وجود داده‌های مورد نیاز و پیچیدگی‌هایی که نسبت به CPAW دارند، اما ویژگی‌های خاک و گیاه را برای تعیین و تعریف حدود آستانه، در نظر نمی‌گیرند. مفاهیم M_{h0} و E_I کاملا متکی به ویژگی‌های خاک هستند. به‌علاوه E_I با توجه به این‌که مفهوم انرژی را در خود جای داده است و میانگین وزنی انرژی لازم برای استخراج آب از خاک را محاسبه می‌کند، تا حدودی توان گیاهان را برای جذب آب مد نظر قرار می‌دهد. همچنین M_{h0} بر این فرض استوار است که فراهمی آب تابع مستقیمی از توان انتقال آب از نواحی مختلف خاک به سمت ریشه است و از این نظر می‌تواند بدون اینکه موجب خطا شود، به صورت مستقل از گیاه تعیین و محاسبه گردد.

در مفاهیم مختلف فراهمی آب از جمله E_I و M_{h0} ضریب رطوبتی FC نقش تعیین کننده‌ای دارد. این در حالی است که مشاهدات نشان می‌دهد شروع جذب آب توسط گیاهان مختلف و در خاک‌های متفاوت در رطوبت‌های بیش‌تر از FC هم رخ می‌دهد و برخی محققین درباره استفاده از آن به عنوان حد بالای فراهمی آب تردید دارند (Van Lier, 2017). به‌علاوه در رابطه با نحوه تعیین و به‌کارگیری مفهوم FC نیز اختلاف نظرهای فراوانی وجود دارد (ر.ک Nachabi, 1998; Twarakavi *et al*., 2009; Assouline and Or, 2014; Armindo and Wendroth, 2016; Van Lier and Wendroth, 2016; Van Lier, 2017). برای یکسان‌سازی مفهوم FC، یک روش بر پایه مفاهیم فیزیکی ارائه و مفهوم بازنگری شده ظرفیت مزرعه، RFC[5]، معرفی شده است (Assouline and Or, 2014) که در این پژوهش به عنوان یکی از معیارهای تعیین FC مد نظر قرار گرفت.

اهداف این پژوهش به‌ترتیب عبارت‌اند از؛ الف) محاسبه مقادیر ملاک‌های M_{h0} و E_I و CPAW برای دامنه‌ای از خاک‌های با ویژگی‌های مختلف ب) بررسی همبستگی هریک از ملاک‌های مذکور با خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک به‌منظور تعیین قابلیت استفاده از آن‌ها به عنوان یک شاخص مدیریتی خاک.

مواد و روش‌ها

۷۲ نمونه خاک با دامنه وسیعی از توزیع اندازه‌ای ذرات اولیه و ثانویه از بانک اطلاعاتی UNSODA انتخاب گردید (Nemes *et al*., 2001). در این خاک‌ها توزیع اندازه‌ای ذرات اولیه با روش (Gee and Or, 2002) و منحنی مشخصه آب خاک با استفاده از دستگاه‌های جعبه شن و صفحات تحت فشار اندازه‌گیری شده است. مدل منحنی رطوبتی Van Genuchten (1980) (رابطه شماره ۳) بر داده‌های تجربی برازش و پارامترهای θ_s و θ_r، α، n به‌دست آمد. منحنی هدایت هیدرولیکی خاک نیز بر اساس مدل van Genuchten- Mualem (Mualem, 1986) و با استفاده از نرم افزار RETC برآورد گردید (van Genuchten et al., 1991).

مقدار E_I بر حسب (J/kg)، مطابق با روش (Minasny and Mc Bratney, 2003) با استفاده از رابطه‌ی (۱) محاسبه گردید.

$$\boldsymbol{E}_I[\theta_i,\theta_f] = \frac{1}{\theta_i-\theta_f}\int_{\theta f}^{\theta i}\Psi(\theta)d\theta. \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

θ_i رطوبت حجمی ظرفیت مزرعه، θ_F رطوبت حجمی تحت مکش ۱۵۰۰ کیلوپاسکال و $\psi(\theta)$ مکش ماتریک نظیر هر رطوبت مشخص بر حسب کیلوپاسکال است. به دلیل اختلاف نظر در رابطه با حد بالای فراهمی آب (Van Lier *et al*., 2017; Meskini-Vishkaee *et al*., 2018) علاوه بر تعیین انرژی جمعی در دامنه FC تا PWP، در این مطالعه E_I برای خارج از این محدوده نیز محاسبه شد.

رطوبت ظرفیت مزرعه بر اساس دو تعریف رایج: مکش ۱۰۰

1 - Integral Water Capacity
2 - Integral Energy
3 - Soil water characteristic curve
4 - *Kirchhoff Potential*
5 - Revisited Field Capacity

سانتی‌متر (Nemes *et al*., 2011)، FC_{100}، و مکش ۳۳۰ سانتی-متر (Colman, 1947; Kirkham, 2014)، FC_{330}، و همچنین بر اساس RFC (Assouline and Or, 2014) (رابطه ۲) که برابر با رطوبت خاک در مکش، Ψ_{FC}، است نیز محاسبه شد.

$$\Psi_{FC}=\frac{1}{\alpha}\left(\frac{n-1}{n}\right)^{(1-2n)/n} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

α و n پارامترهای مدل منحنی مشخصه آب خاک (van Genuchten, 1980) (رابطه ۳) هستند.

$$\theta=\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{[1+(\alpha h)^n]^{[1-\frac{1}{n}]}} \quad \text{(رابطه ۳)}$$

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

θ_r و θ_S به‌ترتیب رطوبت حجمی باقیمانده و اشباع (cm^3cm^{-3})، h مکش ماتریک خاک (cm)، α ($\frac{1}{cm}$) و n پارامترهای شکل منحنی مشخصه آب خاک هستند.

Mh0 مطابق با رابطه (۴) و بر اساس روش (VanLier *et al*., 2006) محاسبه گردید.

$$M_{h0}=\int_{h0}^{h}K(h)dh \quad \text{(رابطه ۴)}$$

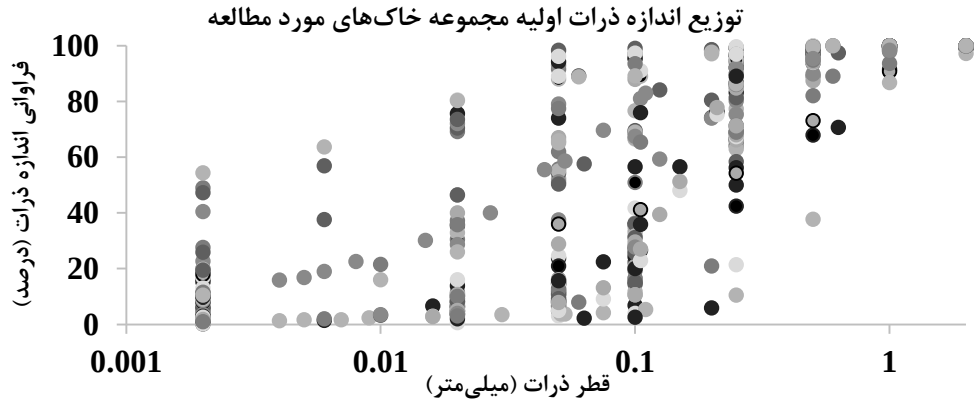
M_{h0} پتانسیل کرشهف ($m^2.d^{-1}$) و K(h) تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک ($m.d^{-1}$) است.

یافته‌ها

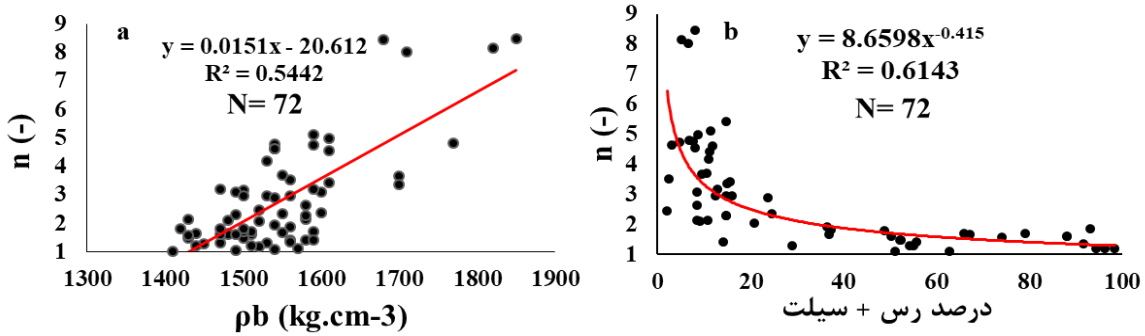
شکل (۱) پراکندگی داده‌های توزیع اندازه ذرات اولیه ۷۲ خاک مورد مطالعه را نشان می‌دهد. جرم مخصوص ظاهری و پارامترهای معادله منحنی مشخصه آب خاک (van Genochten, 1980) به همراه درصد ذرات رس و شن خاک و Ψ_{FC} نیز در جدول (۱) آمده است.

بافت خاک‌ها از سبک تا سنگین، مقادیر n از ۱ تا ۸/۴۸ و مقادیر α از ۰/۰۰۴ تا ۰/۰۹ ($\frac{1}{cm}$) و مقادیر m از ۰/۰۲ تا ۰/۸۸ متغیر بوده که مبین تنوع نسبی خاک‌های مورد مطالعه است.

شکل (۲) تغییرات پارامتر n را در برابر جرم مخصوص ظاهری و درصد رس+ سیلت خاک‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. به ترتیب همبستگی مثبت و منفی بین پارامتر n و جرم مخصوص ظاهری و درصد رس+ سیلت خاک برقرار است. پارامتر n به عنوان شاخص خصوصیات ساختمانی و هیدرولیکی است. تفاوت در ساختمان یا توزیع اندازه‌ای منافذ خاک ازجمله عواملی هستند که موجب کاهش ضریب تعیین در منحنی تغییرات پارامتر n با درصد رس+سیلت خاک می‌شوند (Dexter *et al*., 2004) و احتمالا اگر بخش وابسته به بافت SWC به‌صورت مستقل ترسیم و پارامتر n تنها برای این بخش تعیین گردد مقدار R^2 حاصل از منحنی تغییرات این پارامتر و درصد رس+سیلت افزایش می‌یابد.



شکل ۱-پراکندگی توزیع اندازه ذرات اولیه ۷۲ نمونه خاک انتخاب شده از بانک اطلاعاتی UNSODA



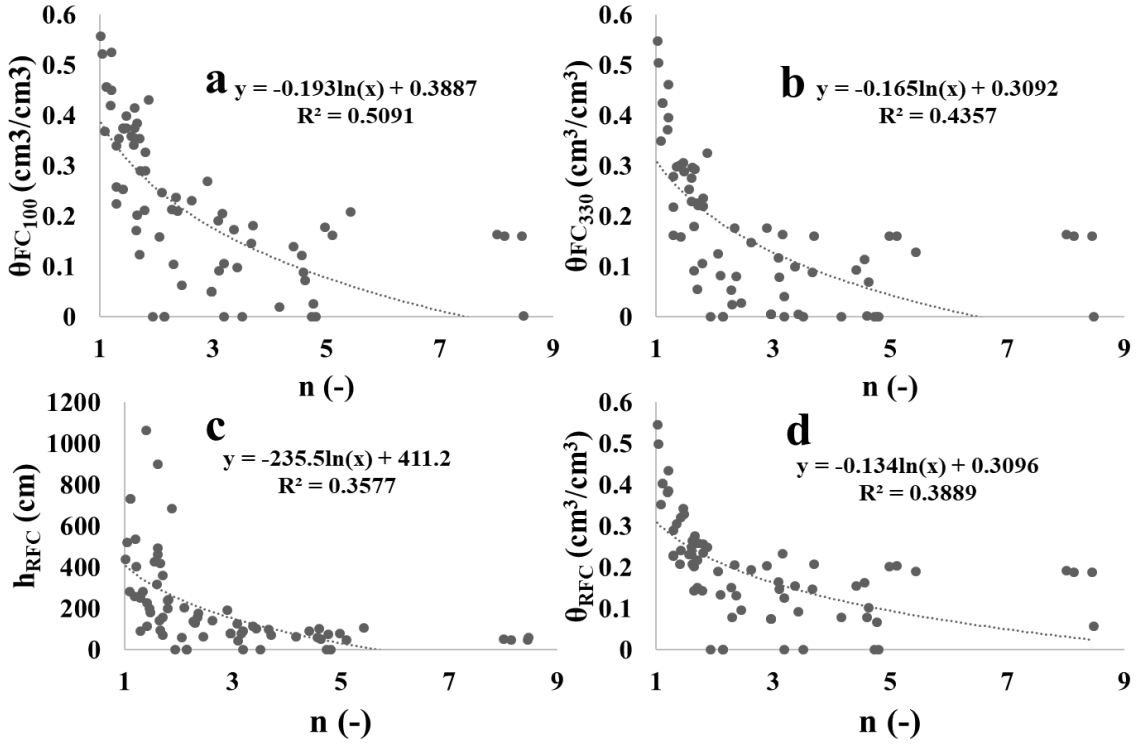
شکل ۱- تغییرات پارامتر n منحنی مشخصه رطوبتی (رابطه ۳) با a) جرم مخصوص ظاهری و b) درصد رس+سیلت خاک در ۷۲ نمونه خاک مورد مطالعه. (تعداد مشاهدات=N)

جدول ۱- بافت، جرم مخصوص ظاهری، ضرایب مدل ونگنوختن و مکش نظیر ظرفیت مزرعه در ۷۲ خاک مطالعه شده

درصد شن	درصد رس	α (cm^{-1})	n	m	θ_r ($m^3.m^{-3}$)	θ_s ($m^3.m^{-3}$)	ρb (kg.cm-3)	ψ_{FC} (cm)
۹۷/۵	۰/۰۱	۰/۰۹۰	۳/۵۱	۰/۷۲	۰/۰۸	۰/۳۱	۱۵۶۰	۱۹/۸
۹۷/۹	۱/۲	۰/۰۳۵	۲/۴۵	۰/۵۹	۰/۰۲	۰/۳۰	۱۵۲۰	۶۵/۱
۸۷/۲	۲/۹	۰/۰۲۴	۳/۱۶	۰/۶۸	۰/۱۶	۰/۴۸	۱۵۰۰	۷۷/۸
۹۳/۲	۲/۹	۰/۰۲۱	۴/۸۱	۰/۷۹	۰	۰/۳۶	۱۷۷۰	۷۱/۷
۹۵/۲	۲/۹	۰/۰۲۵	۴/۷۴	۰/۷۹	۰	۰/۳۷	۱۵۹۰	۶۰/۳
۸۹/۲	۴/۸	۰/۰۲۷	۲/۱۴	۰/۵۳	۰/۰۹	۰/۴۶	۱۵۸۰	۹۷/۸
۹۱/۶	۳/۳	۰/۰۲۷	۲/۱۴	۰/۵۳	۰/۰۹	۰/۴۶	۱۴۳۰	۹۷/۸
۹۲/۳	۳/۵	۰/۰۲۰	۴/۷۷	۰/۷۹	۰	۰/۳۶	۱۵۴۰	۷۶
۹۳/۴	۳/۶	۰/۰۲۵	۸/۰۱	۰/۸۸	۰/۱۶	۰/۳۵	۱۷۱۰	۵۰/۵
۹۴/۸	۱/۱	۰/۰۲۷	۸/۱۴	۰/۸۸	۰/۱۶	۰/۳۵	۱۸۲۰	۴۷/۴
۸۸/۵	۳/۷	۰/۰۳۰	۵/۱۱	۰/۸۰	۰/۱۶	۰/۴۰	۱۵۹۰	۴۹
۸۹/۱	۴/۵	۰/۰۲۶	۴/۱۷	۰/۷۶	۰	۰/۴۰	۱۵۳۰	۶۳/۴
۹۲	۳/۵	۰/۰۲۲	۸/۴۸	۰/۸۸	۰	۰/۳۷	۱۸۵۰	۵۸/۷
۸۸/۱	۳/۰	۰/۰۱۵	۴/۶۰	۰/۷۸	۰	۰/۴۲	۱۵۴۰	۱۰۳/۸
۹۰/۹	۲/۸	۰/۰۱۳	۲/۱۰	۰/۵۲	۰	۰/۴۲	۱۴۸۰	۲۰۳/۹
۹۱/۳	۲/۴	۰/۰۱۹	۴/۹۸	۰/۸۰	۰/۱۶	۰/۳۹	۱۶۱۰	۷۹/۴
۸۹/۵	۳/۱	۰/۰۲۴	۳/۷۰	۰/۷۳	۰/۱۶	۰/۳۹	۱۵۵۰	۷۱/۴
۹۰/۵	۴/۷	۰/۰۱۸	۳/۶۷	۰/۷۳	۰/۰۹	۰/۳۸	۱۷۰۰	۹۸/۵
۹۱/۵	۴/۹	۰/۰۱۵	۳/۰۹	۰/۶۸	۰/۱۱	۰/۳۴	۱۴۹۰	۱۲۶
۹۱/۶	۰/۳	۰/۰۱۶	۲/۶۲	۰/۶۲	۰/۱۳	۰/۳۷	۱۵۸۰	۱۴۰/۲
۹۶/۹	۰/۳	۰/۰۳۱	۴/۶۳	۰/۷۸	۰/۰۷	۰/۲۴	۱۵۴۰	۵۰
۹۳/۷	۳/۵	۰/۰۱۶	۱/۷۹	۰/۴۴	۰/۰۲	۰/۳۵	۱۴۲۰	۲۰۰/۱
۹۱/۹	۲/۹	۰/۰۲۵	۴/۵۶	۰/۷۸	۰/۱۱	۰/۳۸	۱۶۱۰	۶۱
۹۵	۲/۶	۰/۰۴۸	۱/۷۰	۰/۴۱	۰	۰/۳۸	۱۵۹۰	۷۳
۹۲/۱	۱/۸	۰/۰۲۶	۱/۶۴	۰/۳۹	۰/۰۱	۰/۳۳	۱۴۴۰	۱۴۳/۳
۹۸	۱/۰	۰/۰۴۲	۳/۱۰	۰/۶۸	۰/۰۸	۰/۳۸	۱۶۰۰	۴۵/۶
۹۱/۹	۲/۹	۰/۱۴۱	۱/۰۲	۰/۰۲	۰/۱۲	۰/۵۸	۱۴۱۰	۴۳۹/۸
۹۰/۹	۲/۷	۰/۰۲۱	۳/۱۹	۰/۶۹	۰/۰۳	۰/۴۳	۱۴۷۰	۸۹/۲
۷۹/۱	۷/۹	۰/۰۴۵	۲/۰۵	۰/۵۱	۰/۱۱	۰/۳۵	۱۵۲۰	۶۰/۶
۸۵/۲	۱۰/۵	۰/۰۲۵	۲/۹۷	۰/۶۶	۰	۰/۳۱	۱۵۶۰	۸۰/۲
۸۴	۱۰/۱	۰/۰۲۵	۲/۹۷	۰/۶۶	۰	۰/۳۱	۱۵۰۰	۸۰/۲
۸۷/۵	۸/۶	۰/۰۲۵	۲/۹۷	۰/۶۶	۰	۰/۳۱	۱۵۳۰	۸۰/۲
۸۵/۲	۵/۵	۰/۰۱۹	۲/۳۰	۰/۵۷	۰	۰/۲۷	۱۴۹۰	۱۲۸/۶
۸۳/۸	۱۰/۴	۰/۰۲۷	۸/۴۵	۰/۸۸	۰/۱۶	۰/۳۴	۱۶۸۰	۳۹/۳
۸۵/۹	۵/۰	۰/۰۴۲	۱/۴۲	۰/۲۹	۰	۰/۴۸	۱۵۶۰	۱۱۵/۷
۸۴/۵	۴/۴	۰/۰۱۷	۳/۴۳	۰/۷۱	۰	۰/۴۲	۱۶۱۰	۱۰۳/۲
۸۵/۲	۴/۷	۰/۰۱۸	۲/۲۸	۰/۵۶	۰	۰/۵۱	۱۵۸۰	۱۳۸/۸
۸۵/۲	۵/۸	۰/۰۱۳	۵/۴۳	۰/۸۲	۰/۱۳	۰/۴۸	۱۴۲۰	۱۰۷/۴
۸۵	۵/۶	۰/۰۱۶	۳/۳۷	۰/۷۰	۰/۰۹	۰/۳۷	۱۷۰۰	۱۱۳/۷
۸۸/۸	۶/۶	۰/۰۱۷	۴/۴۱	۰/۷۷	۰/۰۹	۰/۴۲	۱۳۶۰	۹۱/۹
۸۴/۳	۲/۹	۰/۰۱۴	۲/۳۷	۰/۵۸	۰/۰۴	۰/۳۶	۱۶۰۰	۱۷۵
۷۱	۶/۸	۰/۰۶۸	۱/۲۹	۰/۲۲	۰	۰/۴۰	۱۴۵۰	۹۱/۹
۷۶/۳	۱۰/۵	۰/۰۱۰	۲/۹۰	۰/۶۵	۰/۱۶	۰/۳۴	۱۵۴۰	۱۹۲/۷
۷۵/۴	۸/۳	۰/۰۱۵	۲/۳۴	۰/۵۷	۰/۱۶	۰/۳۳	۱۵۵۰	۱۵۷/۱
۶۳/۱	۱۸/۹	۰/۰۳۸	۱/۶۵	۰/۳۹	۰/۱۶	۰/۲۶	۱۴۸۰	۹۵/۴
۴۱/۳	۱۴/۰	۰/۰۰۷	۳/۱۹	۰/۶۹	۰/۱۱	۰/۳۹	۱۵۹۰	۲۵۷/۱
۴۹/۷	۱۹/۵	۰/۰۰۸	۱/۶۱	۰/۳۸	۰/۱۴	۰/۴۰	۱۵۱۰	۴۹۴/۲
۴۷/۹	۱۶/۵	۰/۰۲۳	۱/۴۶	۰/۳۲	۰/۱۶	۰/۵۴	۱۴۳۰	۲۰۰
۴۷/۶	۱۶/۳	۰/۰۲۵	۱/۴۸	۰/۳۲	۰/۱۶	۰/۵۱	۱۵۰۰	۱۸۲/۲
۴۴/۲	۱۶/۳	۰/۰۲۱	۱/۴۲	۰/۲۹	۰/۱۶	۰/۴۸	۱۵۸۰	۲۲۶/۶
۴۵/۷	۸/۷	۰/۰۲۳	۱/۳۰	۰/۲۳	۰/۱۱	۰/۴۳	۱۴۷۰	۲۶۱
۴۴/۹	۷/۹	۰/۰۲۵	۱/۲۹	۰/۲۳	۰/۱۰	۰/۳۲	۱۵۳۰	۲۵۰/۷
۳۴/۱	۱۹/۸	۰/۰۲۲	۱/۷۱	۰/۴۲	۰/۱۶	۰/۴۱	۱۵۱۰	۱۵۸/۱
۷	۱۹/۱	۰/۰۰۴	۱/۸۷	۰/۴۶	۰/۱۳	۰/۴۶	۱۵۶۰	۶۸۳/۷
۵/۶	۱۵/۴	۰/۰۱۹	۱/۲۱	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۵۲	۱۴۴۰	۴۰۴/۲
۳/۸	۱۷/۰	۰/۰۳۳	۱/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۵۰	۱۵۲۰	۲۵۸/۳
۱۲	۹/۰	۰/۰۱۲	۱/۶۰	۰/۳۸	۰/۰۸	۰/۴۴	۱۴۸۰	۳۱۸/۶
۲۱	۱۰/۰	۰/۰۱۰	۱/۷۰	۰/۴۱	۰/۰۷	۰/۴۴	۱۵۰۰	۳۶۱/۸
۲۶	۱۰/۰	۰/۰۰۹	۱/۵۶	۰/۳۶	۰/۰۷	۰/۴۳	۱۴۳۰	۴۲۵/۳
۱۲	۱۲/۰	۰/۰۰۸	۱/۶۲	۰/۳۸	۰/۱۰	۰/۴۹	۱۴۷۰	۴۶۲/۲
۲۲/۵	۱۱/۵	۰/۰۰۵	۱/۴۱	۰/۲۹	۰	۰/۴۱	۱۵۹۰	۱۰۶۲
۳۴/۸	۱۰/۵	۰/۰۰۴	۱/۶۱	۰/۳۸	۰/۰۶	۰/۴۰	۱۴۹۰	۸۹۸/۴
۳۲/۹	۱۶/۴	۰/۰۰۹	۱/۶۶	۰/۴۰	۰/۱۶	۰/۴۴	۱۵۵۰	۴۱۹/۲
۵۱/۳	۲۵/۹	۰/۰۱۴	۱/۸۰	۰/۴۴	۰/۱۶	۰/۴۲	۱۴۷۰	۲۳۷/۸
۶۲/۶	۲۲/۶	۰/۰۱۳	۱/۸۱	۰/۴۵	۰/۱۶	۰/۳۶	۱۵۰۰	۲۴۳
۶۳/۵	۲۰/۰	۰/۰۲۵	۱/۹۳	۰/۴۸	۰/۱۶	۰/۴۳	۱۵۴۰	۱۱۶/۸
۱/۶	۱۱/۴	۰/۰۱۵	۱/۲۰	۰/۱۷	۰/۱۴	۰/۵۹	۱۵۱۰	۵۳۷/۹
۸/۴	۲۷/۶	۰/۰۲۰	۱/۳۴	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۴۳	۱۵۶۰	۲۸۳/۶
۴۸/۸	۴۰/۶	۰/۰۱۷	۱/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۴۹	۱۶۱۰	۷۳۱
۴۳/۱	۴۷/۳	۰/۰۵۴	۱/۰۴	۰/۰۴	۰/۱۲	۰/۵۶	۱۴۹۰	۵۲۰/۶
۳۶/۳	۵۴/۴	۰/۰۱۷	۱/۱۱	۰/۱۰	۰/۱۴	۰/۴۹	۱۵۷۰	۷۳۱
۳۷/۲	۴۹/۸	۰/۰۵۴	۱/۰۹	۰/۰۸	۰/۱۶	۰/۴۰	۱۵۴۰	۲۸۰/۸

فراهمی آب مفهومی است که از اغلب خصوصیات خاک تاثیر می‌پذیرد و در نتیجه برای تعیین حدود آستانه در آن توجه به خصوصیات خاک اهمیت دارد. به‌علاوه باید به صورت مستقیم یا غیرمستقیم خصوصیات گیاه به عنوان عامل جذب کننده در تعیین فراهمی آب مد نظر قرار گیرد.

شکل (۳) منحنی تغییرات FC را بر اساس سه تعریف متفاوت آن در مقابل پارامتر n (به عنوان نماینده‌ای از ویژگی های هیدرولیکی خاک) نشان می‌دهد.



شکل ۲- تغییرات رطوبت ظرفیت مزرعه (FC_{100}، FC_{330}، RFC) در برابر پارامتر n خاک‌های مورد مطالعه

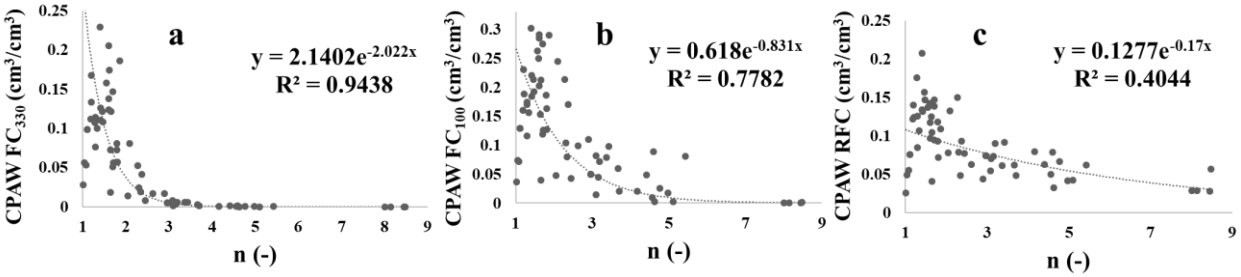
مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار n، رطوبت FC براساس هر سه تعریف کم می‌شود. ضرایب R^2 نشان می‌دهد تغییرات رطوبت ظرفیت مزرعه خاک‌های انتخابی از روند یکنواخت و ثابتی پیروی نمی‌کند (شکل‌های ۳-a و ۳-b). بخشی از این غیریکنواختی به تفاوت روش‌های FC_{100} و FC_{330} و بخشی از آن به تنوع ویژگی‌های خاک‌ها مربوط است. نکته قابل توجه این است که تعدادی از خاک‌ها تحت مکش ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر رطوبتی نزدیک به صفر دارند که این نشان می‌دهد نمی‌توان در همه‌ی خاک‌ها از این حدود رطوبتی به عنوان حد بالای فراهمی آب بهره برد. شکل‌های (۳-c) و (۳-d) به ترتیب تغییرات مکش ماتریک و رطوبت نظیر RFC را با پارامتر n منحنی مشخصه آب خاک نشان می‌دهند. مکش معادل رطوبت ظرفیت مزرعه تابعی از دو پارامتر n و α است (رابطه ۲) و براین اساس همبستگی قوی بین پارامتر n و مکش نظیر RFC مورد انتظار است. اما تفاوت در ساختمان در بین خاک‌های مختلف (بخصوص از نظر کمیت α) سبب شده است تا همبستگی قوی مشاهده نگردد. منحنی‌های شکل (۳) نشان می‌دهند که مفهوم FC علی‌رغم توصیف یک وضعیت هیدرولوژیکی مهم در خاک در برخی موارد کارایی لازم را به عنوان حد بالای فراهمی آب ندارد. بهتر است حد بالای فراهمی آب به صورت تجربی و بر اساس توانایی هر گیاه برای جذب آب انجام شود (Van Lier, 2017).

شکل (۴) تغییرات CPAW محاسبه شده بر اساس FC_{100}، FC_{330} و RFC را در برابر پارامتر n منحنی مشخصه آب خاک نشان می‌دهد. اختلاف بین $CPAW_{FC100}$ و $CPAW_{FC330}$ در مقادیر n برابر با ۲ تا ۴ قابل ملاحظه است که معمولاً مربوط به خاک‌های با بافت متوسط است. در واقع در خاک‌های سنگین بافت و سبک بافت اختلاف بین $CPAW_{FC100}$ و $CPAW_{FC330}$ کمتر است. اما مشاهده می‌شود که با به‌کارگیری RFC، به عنوان حد بالای CPAW، شیب تغییرات منحنی بسیار کم‌تر از دو حالت قبلی ($CPAW_{FC100}$ و $CPAW_{FC330}$) شده است. به‌عبارت دیگر، دامنه تغیرات $CPAW_{RFC}$ بین خاک‌ها بسیار کم‌تر از $CPAW_{FC100}$ و $CPAW_{FC330}$ است.

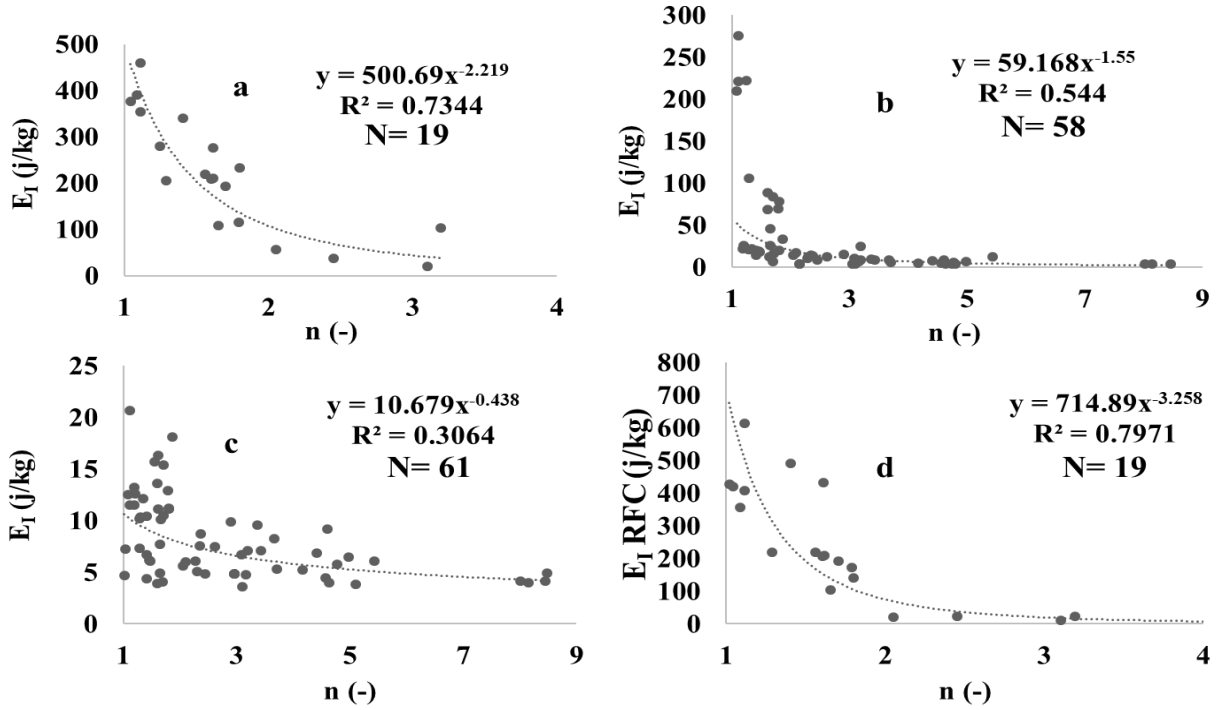
شکل (۴-c) نشان می دهد اگر RFC به عنوان حد بالای CPAW در نظر گرفته شود، همبستگی بین CPAW و عامل n و

نیز تنوع مقادیر CPAW کاهش می یابد. استفاده از FC_{100} و FC_{330} به عنوان حد بالای فراهمی آب موجب می‌شود تفاوت در مقادیر CPAW بین خاک‌های مختلف بهتر نمایان شود (شکل-های (a-۴) و (b-۴)) و در این حالت می‌توان از CPAW به عنوان یک شاخص بهتری از وضعیت خاک بهره برد. اما توجه به این نکته مهم است که بر اساس اطلاعات موجود در شکل (۴) نتیجه-گیری درباره صحت نتایج CPAW برای تبیین فراهمی واقعی آب برای گیاه به راحتی امکان‌پذیر نیست و نیاز به تحلیل بیش‌تری است.

انرژی جمعی (E_I) برای خاک‌های مورد مطالعه در سه حالت (محدوده‌ی FC تا PWP، کل دامنه‌ی SWC و محدوده‌ی رطوبت اشباع (θ_s) تا FC) به عنوان تابعی از پارامتر n در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴- تغییرات CPAW در برابر پارامتر n در سه حالت از رطوبت ظرفیت مزرعه (در مکش‌های ماتریک ۱۰۰ و ۳۳۰ سانتی‌متر و RFC)



شکل ۵- تغییرات E_I با پارامتر n خاک‌های مورد مطالعه: a) دامنه FC تا PWP (مکش ظرفیت مزرعه در خاک‌های سبک بافت برابر با ۱۰۰ و در خاک‌های سنگین بافت برابر با ۳۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد)، b) کل دامنه SWC ، c) دامنه θ_s تا FC، d) دامنه RFC تا PWP (تعداد مشاهدات=N)

شکل (a-۵) تغییرات E_I را با پارامتر n منحنی مشخصه آب خاک در دامنه FC تا PWP نشان می‌دهد. با افزایش n، انرژی جمعی به‌صورت نمایی کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد تا حدودی در خاک‌های سبک بافت برای جذب رطوبت موجود در دامنه FC تا PWP انرژی کم‌تری لازم است. نحوه انتخاب حدود آستانه در تعیین E_I و در صحت مقدار محاسبه شده‌ی فراهمی آب تعیین کننده است و باید با توجه به خصوصیات خاک اقدام به تعیین حد بالا و پایین E_I نمود. به‌عبارتی تعیین اینکه گیاه در چه رطوبتی شروع به جذب آب از خاک می‌کند و در چه رطوبتی جذب آب از خاک متوقف می‌شود باید با توجه به خصوصیات فیزیکی و ساختمانی خاک و نیز ویژگی های گیاه انجام گیرد. شکل‌های (b-۵) و (c-۵) به‌ترتیب تغییرات E_I را در برابر n در کل دامنه SWC و در دامنه θ_s تا FC نشان می‌دهد. روند کاهش انرژی مورد نیاز برای جذب آب در خاک‌های سبک‌بافت در این دو محدوده نیز قابل مشاهده است (شکل‌های b-۵ و c-۵)، اما پراکندگی داده‌ها نسبت به محدوده FC تا PWP (شکل a-۵) افزایش پیدا کرده

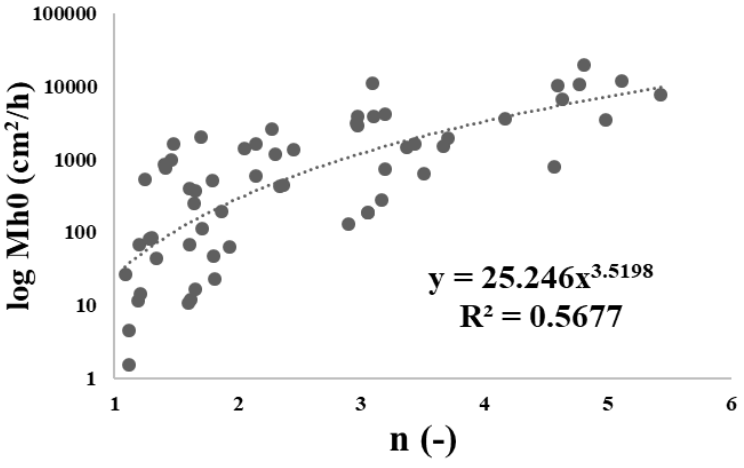
است. شکل (۵-d) تغییرات E_I را در برابر n و در دامنه FC تا PWP نشان می‌دهد، با این تفاوت که در آن از RFC استفاده شده است. مشخص است که در این حالت پراکندگی داده‌ها کاهش یافته است. بنابراین با تعیین حد بالای E_I بر اساس RFC به جای انتخاب سلیقه‌ای آن یعنی FC_{100} یا FC_{330} (Groenevelt *et al.* 2001; Minasny and McBratney 2003) تفاوت بین خاک‌ها به صورت مناسب‌تری تبیین گشته است. احتمالاً به دلیل اصلاح حد بالای فراهمی آب است که نتایج حاصل از روش E_I دارای همبستگی بیشتری با پارامتر n منحنی مشخصه آب خاک شده و نمایانگر بهتری از تنوع خاک می‌باشد. بنابراین علاوه بر این‌که مفهوم E_I می‌تواند به عنوان شاخص قابل قبولی از فراهمی آب مورد استفاده قرار گیرد، می‌تواند به عنوان یک شاخص مناسب برای مقایسه و تمایز خاک‌ها به کار رود.

شکل (۶) تغییرات پتانسیل کرشهف (M_{h0}) را با پارامتر n منحنی مشخصه آب خاک نشان می‌دهد. M_{h0} بر اساس اطلاعات حاصل از منحنی هدایت هیدرولیکی غیراشباع در دامنه مکش‌های حدود صفر تا FC محاسبه شد. در این مرحله برای محاسبه M_{h0} از RFC به عنوان حد بالای فراهمی آب استفاده گردید. همبستگی نسبتاً قوی بین مقادیر M_{h0} و پارامتر n موید تغییرات همنواخت این دو عامل است (شکل ۶). مقایسه نمودار شکل (۶) و نمودار نظیر آن درشکل (۴-c) می‌تواند موید این واقعیت باشد که این مفهوم احتمالا نسبت به مفهوم CPAW، تفاوت خاک‌های مختلف را بهتر تبیین می‌کند.

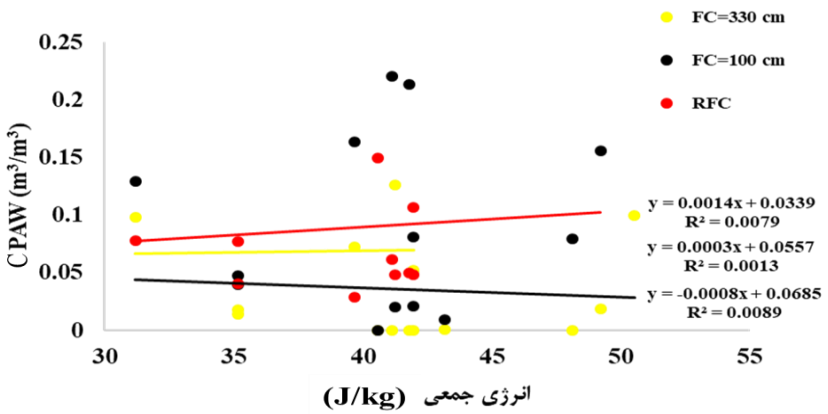
مقایسه شکل‌های (۵-d) و (۶) نشان می‌دهد که در مفاهیم E_I و M_{h0} در صورت استفاده از RFC به عنوان حد بالایی، قابلیت آن‌ها در بیان تفاوت خاک‌ها ارتقا پیدا می‌کند و می‌توانند از این لحاظ جایگزین CPAW شوند. اما برای محاسبه مقادیر صحیح فراهمی آب به تحلیل‌ها و بررسی‌های بیش‌تری نیاز است.

در مفهوم پتانسیل کرشهف، فراهمی آب برای گیاه بر اساس توان انتقال آب توسط خاک در مکش‌های ماتریک مختلف محاسبه می‌شود (VanLier *et al.*, 2006) و این در حالی است که انرژی جمعی بر اساس توان آزادسازی آب استوار است (Minasny and McBratney, 2003). باوجود اختلاف مفهومی این دو روش، مشاهده می شود که تفاوت خاک‌ها و فراهمی آب در هردو (M_{ho}, E_I) هم سو است و خاک‌های سبک بافت دارای سهل‌ترین فراهمی آب هستند (شکل‌های ۵ و ۶).

شکل (۷) تغییرات CPAW در برابر E_I را (در سه حالت FC_{100}، FC_{330} و RFC) نشان می‌دهد. همبستگی معنی داری بین دو ملاک وجود ندارد. جالب توجه است که هر دو ملاک E_I و CPAW فراهمی آب گیاه را در دامنه رطوبت FC و PWP در نظر می‌گیرند اما با توجه به این‌که در محاسبه E_I شیب SWC مورد توجه قرار می‌گیرد، نتایج آن کاملا متفاوت از روش CPAW است. هرچند اساساً CPAW بیانگر مقدار ($m^3.m^{-3}$) و E_I بیانگر سهولت فراهمی آب ($J.kg^{-1}$) هستند و از این نظر همخوانی عددی ندارند، اما انتظار بر این است که تغییرات این دو ملاک در یک جهت معین رخ داده و با افزایش CPAW، مقدار E_I هم با نسبت‌های مختلف کاهش یابد. این در هر حالی است که، نتایج حاصل از این دو روش هیچ‌گونه سمت و سوی مشترکی ندارند و نکته مهمی که از آن استنتاج می‌شود این است که احتمالا حداقل یکی از این روش‌ها منجر به برآورد غلط می‌شوند.

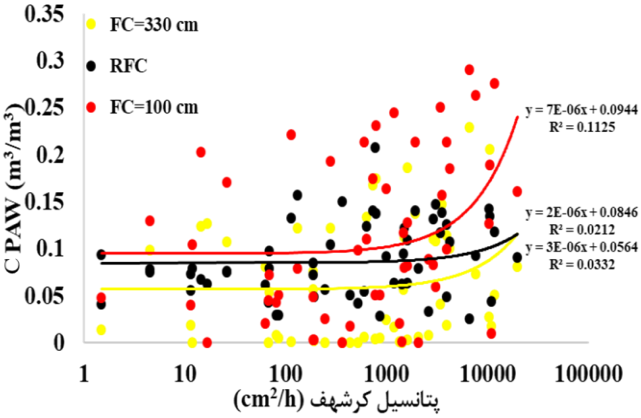


شکل ۶- تغییرات لگاریتم پتانسیل کرشهف در برابر پارامتر n منحنی مشخصه آب خاک

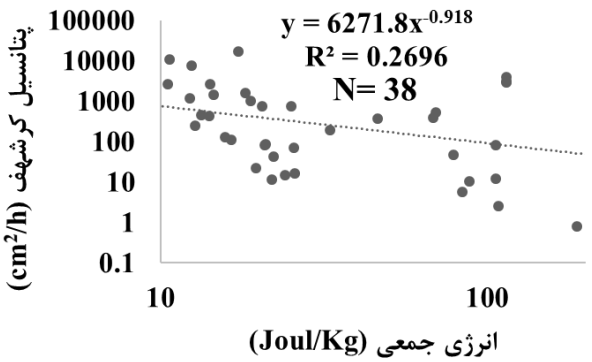


شکل ۷- تغییرات مقادیر E_I به عنوان تابعی از مقادیر CPAW

شکل (۸) تغییرات CPAW در برابر M_{h0} را نشان می‌دهد. عدم وجود همبستگی بین نتایج حاصل از دو روش به چشم می‌خورد و نحوه تغییرات ملاک‌های M_{h0} و CPAW در برابر یکدیگر روند مشخصی ندارد. احتمالا تفاوت‌های ساختاری دو روش و اینکه مفهوم M_{h0} بر خلاف CPAW خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک را هم در نظر می‌گیرد، موجب پراکندگی داده‌ها شده است.



شکل ۸- تغییرات مقادیر M_{h0} به عنوان تابعی از مقادیر CPAW



شکل ۹- تغییرات دو مفهوم E_I به عنوان تابعی از M_{h0} در تعدادی از نمونه‌های خاک مورد مطالعه (تعداد مشاهدات=N)

مقایسه شکل‌های (۷) و (۸) در کنار پیش‌فرض موجود در رابطه با نقص‌های ساختاری و مفهومی ملاک CPAW تردیدها را در رابطه با توانایی این ملاک برای تعیین فراهمی آب افزایش می‌دهد.

شکل (۹) تغییرات M_{h0} در برابر E_I را نشان می‌دهد. احتمالا تفاوت‌های ساختاری بین M_{h0} و E_I از نظر تعریف مفهوم فراهمی آب سبب عدم همبستگی قوی بین این دو عامل می‌گردد. با این وجود، به نظر می‌رسد که نتایج حاصل از دو روش از دو نظر سمت و سویی مشابه دارند؛ ۱- روند تغییرات نتایج حاصل از این دو ملاک از الگوی باثبات‌تری نسبت به نتایج مربوط به CPAW (شکل‌های (۷) و (۸)) برخوردار است و ۲- همبستگی منفی بین M_{h0} و E_I برقرار است و هرچه مقدار M_{h0} بیش‌تر شود انرژی لازم برای جذب آب از خاک توسط گیاه در E_I کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور ارزیابی و مقایسه ملاک‌های برآورد فراهمی آب برای گیاه، در دامنه وسیعی از انواع خاک‌ها مقادیر مربوطه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که همبستگی معنی‌داری بین CPAW با E_I و M_{h0} وجود ندارد. در مقابل همبستگی معنی‌دار ولی ضعیف بین E_I و M_{h0} مبین هم‌سانی نسبی ولی کم آنها در تبیین فراهمی آب است. به طور کلی به نظر می‌رسد برای طیف خاک‌های بررسی شده ملاک‌های مختلف فراهمی آب محاسبه شده تا حدودی مستقل از هم بوده و برای تعیین بهترین ملاک نیاز به ارزیابی آنها در شرایط کشت گیاهان مختلف باشد. یکی از دلایل عدم هم‌خوانی و روند یکسان این ملاک‌ها می‌تواند یکسان نبودن حدود بالا و پایین رطوبت قابل استفاده در این مفاهیم باشد. البته تفاوت اساسی در فرضییات استفاده شده در هر کدام از ملاک‌ها نیز می‌تواند یکی دیگر از دلایل عدم همبستگی بین این ملاک‌ها باشد. با توجه به اینکه هر کدام از این

ملاک‌ها بنا بر تجربه و دانش گروهی از محققین پیشنهاد شده است، احتمالاً دخیل کردن ویژگی‌های گیاهان در محاسبه هر کدام از این ملاک‌ها منجر به افزایش همبستگی بین آن‌ها گردد. در این مطالعه پارامتر n معادله منحنی رطوبتی به‌عنوان یک عامل برای دسته‌بندی خاک‌ها و روش معلم برای برآورد منحنی هدایت هیدرولیکی خاک‌ها استفاده گردید. خطاهای مستتر در این برازش و برآورد می تواند یکی دیگر از دلایل احتمالی مجزا و مستقل بودن ملاک‌های مورد بررسی باشد. به نظر می‌رسد ملاک‌های فراهمی آب باید با توجه به ویژگی‌های هر گیاه تعریف و تعیین شوند و فراهمی آب با هر ملاکی که محاسبه و یا برآورد گردد نمی‌تواند یک مفهوم انتزاعی و یک ویژگی ثابت از یک خاک باشد. هر چند شاید بتواند به عنوان یکی از معیارهای کیفیت خاک به‌کار گرفته شود.

REFERENCES

Armindo, R. A., & Wendroth, O. (2016). Physical soil structure evaluation based on hydraulic energy functions. *Soil Science Society of America Journal*, *80*(5), 1167-1180.

Assouline, S., & Or, D. (2014). The concept of field capacity revisited: Defining intrinsic static and dynamic criteria for soil internal drainage dynamics. *Water Resources Research*, *50*(6), 4787-4802.

Colman, E. A. (1947). A laboratory procdure for determining the field capacity of soils. *Soil Science*, *63*(4), 277-284.

Da Silva, A. P., Kay, B. D., & Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal*, *58*(6), 1775-1781.

Groenevelt, P. H., Grant, C. D., & Semetsa, S. (2001). A new procedure to determine soil water availability. *Soil Research*, *39*(3), 577-598.

Hillel, D. (1998). Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations. Elsevier.

Kirkham, M. B. (2014). Principles of soil and plant water.

Letey, J. O. H. N. (1958). Relationship between soil physical properties and crop production. In *Advances in soil science*(pp. 277-294). Springer, New York, NY.

Meskini-Vishkaee, F., 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*, *56*(4), 331-345.

Minasny, B., & McBratney, A. B. (2003). Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant and Soil*, *249*(2), 253-262.

Mualem, Y. (1986). Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, (methodsofsoilan1), 799-823.

Nachabe, M. H. (1998). Refining the definition of field capacity in the literature. *Journal of irrigation and drainage engineering*, *124*(4), 230-232.

Nemes, A., Pachepsky, Y. A., & Timlin, D. J. (2011). Toward improving global estimates of field soil water capacity. *Soil Science Society of America Journal*, *75*(3), 807-812.

Nemes, A.D., Schaap, M.G., Leij, F.J. and Wösten, J.H.M., 2001. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0. *Journal of Hydrology*, *251*(3-4), pp.151-162.

Philip, J. R. (1972). Future problems of soil water research. *Soil Science*, *113*(4), 294-301.

Timlin, D., Pachepsky, Y., & Reddy, V. R. (2001). Soil water dynamics in row and interrow positions in soybean (Glycine max L.). *Plant and Soil*, *237*(1), 25-35.

Twarakavi, N. K., Sakai, M., & Šimůnek, J. (2009). An objective analysis of the dynamic nature of field capacity. *Water Resources Research*, *45*(10).

Van Dam, J. C., & Feddes, R. A. (2000). Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. *Journal of Hydrology*, *233*(1-4), 72-85.

van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, *44*(5), 892-898.

van Genuchten, M.V., Leij, F.J. and Yates, S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.

Van Lier, Q. D. J. (2017). Field capacity, a valid upper limit of crop available water. *Agricultural water management*, *193*, 214-220.

Van Lier, Q. D. J., & Wendroth, O. (2016). Reexamination of the field capacity concept in a Brazilian Oxisol. *Soil Science Society of America Journal*, *80*(2), 264-274.

Van Lier, Q. D. J., Metselaar, K., & Van Dam, J. C. (2006). Root water extraction and limiting soil hydraulic conditions estimated by numerical simulation. *Vadose Zone Journal*, *5*(4), 1264-1277.