

پیشنهاد و ارزیابی یک روش آزمایشگاهی برای تعیین سریع کمیتهای مختلف آب قابل استفاده خاک برای گیاه

حسین عسگرزاده^{۱*}، محمد رضا مصدقی^۲

۱- استادیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه

۲- دانشیار گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان

* نویسنده مسئول: Asgarzadeh8688@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۸/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۲

چکیده

یک روش آزمایشگاهی برای تعیین سریع و قابل اطمینان آب قابل استفاده خاک برای گیاه (SAW) بر اساس مفاهیم آب قابل دسترس (PAW)، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) و گنجایش آب انتگرالی (IWC) پیشنهاد و کارایی آن ارزیابی شد. نگهداشت آب (θ) برای ۲۰ خاک کشاورزی در ۱۳ مکش ماتریک (h) توسط دستگاه‌های جعبه شن و صفحه فشاری تعیین شده و برای برازش مدل ون گنوختن منحنی مشخصه رطوبتی خاک در روش مینا (مرجع) به کار رفت. برای منحنی مشخصه رطوبتی خاک در روش پیشنهادی تنها از h های صفر، ۳۳۰ و ۱۵۰۰ hPa استفاده شد. مقاومت فروری (Q) ۱۰ نمونه دست‌نخورده در رطوبت‌های مختلف برای هر خاک با استفاده از ریزفروسنج در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. به غیر از PAW با فرض h برابر ۱۰۰ hPa برای گنجایش زراعی، تفاوت معنی‌داری بین میانگین مقادیر مختلف SAW محاسبه‌شده با روش پیشنهادی و روش مینا وجود نداشت. روابط رگرسیونی خطی قوی بین مقادیر نظیر SAW محاسبه‌شده با روش پیشنهادی و روش مینا به دست آمد. بنابراین بدون نیاز به اندازه‌گیری‌های زمان‌بر منحنی‌های مشخصه رطوبتی و مقاومت فروری خاک در h های مختلف، تنها با اندازه‌گیری مقدار نگهداشت آب خاک در h های صفر، ۳۳۰ و ۱۵۰۰ hPa و اندازه‌گیری سریع مقاومت فروری در رطوبت‌های مختلف می‌توان کمیتهای مختلف آب قابل استفاده خاک برای گیاه را تعیین نمود. روابط خطی منفی و معنی‌دار بین مقادیر PAW، LLWR و IWC با چگالی ظاهری نسبی (RBD) در خاک‌های مورد بررسی، نشان داد که مقادیر SAW محاسبه‌شده با روش پیشنهادی حساس به شرایط ساختمانی خاک بوده و می‌تواند به عنوان شاخص‌های کیفیت فیزیکی خاک استفاده شوند. نتایج بدست‌آمده مؤید مفیدبودن این روش برای بدست‌آوردن سریع و قابل اطمینان شاخص‌های آب قابل استفاده خاک برای اهداف کاربردی و برنامه‌ریزی آبیاری است.

واژه‌های کلیدی: آب قابل دسترس، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت، گنجایش آب انتگرالی، منحنی مشخصه رطوبتی، مقاومت فروری

مقدمه

اولین مفهومی است که در رابطه با SAW در علوم کشاورزی به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفت. PAW بر اساس انرژی آب خاک است و برای محاسبه آن تنها تعیین مقدار آب خاک در گنجایش زراعی^۳ (FC) و نقطه پژمردگی دائم^۴ (PWP) کافی است. از آنجایی که عوامل دیگری مانند میزان اکسیژن خاک، توانایی ریشه گیاه برای فروری در خاک، هدایت

اندازه‌گیری مقدار آب قابل استفاده خاک^۱ (SAW) برای گیاه به عنوان مهم‌ترین عاملی که بر رشد گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران تاثیر می‌نهد، اهمیتی ویژه برای پژوهش‌گران بخش کشاورزی دارد. آب قابل دسترس خاک برای گیاه^۲ (PAW) که توسط ویشمایر و هندریکسون (۱۹۲۷ و ۱۹۳۱) پیشنهاد شد،

3- Field capacity
4- Permanent wilting point

1- Soil available water
2- Plant available water

هر دو مفهوم LLWR و IWC با افزایش چگالی ظاهری خاک (BD) و چگالی ظاهری نسبی خاک (RBD) کاهش می‌یابند که بیان‌گر حساسیت این مفاهیم به تغییرات ساختمان خاک است (عسگرزاده و همکاران، ۲۰۱۰). بنابراین، علاوه بر درست‌تر بودن مقادیر آب قابل استفاده محاسبه‌شده با مفاهیم LLWR و IWC در مقایسه با روش PAW، قابلیت این مفاهیم برای تعیین کیفیت فیزیکی خاک نیز خیلی بیشتر از روش PAW می‌باشد (Asgarzadeh, Reynolds et al., 2007 & 2008). برای محاسبه LLWR و IWC هر دو منحنی مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی خاک نیاز است. دشوار بودن تعیین این دو ویژگی در آزمایشگاه سبب کاهش میل به استفاده از این مفاهیم سودمند در علوم کشاورزی شده است. از این رو ارائه روشی برای تعیین سریع و قابل اطمینان این مفاهیم بسیار سودمند خواهد بود. در این پژوهش یک روش آزمایشگاهی برای تعیین سریع و قابل اطمینان SAW بر اساس مفاهیم PAW، LLWR و IWC پیشنهاد و کارایی آن ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش در افق‌های رویین (A) و زیرین (B) ۱۰ سری خاک (در کل ۲۰ نوع خاک) از زمین‌های کشاورزی استان همدان انجام شد. زمین‌های مورد نظر به گونه‌ای انتخاب شدند که از نظر عوامل مؤثر بر آب قابل استفاده دارای دامنه وسیعی باشند (درصد رس بین ۱۳/۸ تا ۴۲/۰ درصد و چگالی ظاهری بین ۱/۲۳ تا ۱/۶۳ مگاگرم بر متر مکعب). ۱۶ نمونه خاک دست‌نخورده توسط سیلندرهای نمونه‌برداری (Kopecky) با قطر درونی ۵ cm و ارتفاع ۵/۱ cm از عمق ۱۰/۱-۵ سانتی‌متری هر افق برای اندازه‌گیری چگالی ظاهری (BD)، منحنی مشخصه رطوبتی و مقاومت فروری خاک برداشت شد. از همین لایه، نمونه‌های دست‌خورده خاک نیز برداشت شده و پس از هوا-خشک شدن برای اندازه‌گیری‌های معمول آزمایشگاهی از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند.

اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

بافت خاک به روش پیپت (Gee & Bauder, 1986) اندازه‌گیری شد. ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل اسیدیته خاک به وسیله دستگاه pH متر در عصاره ۱ به ۱ خاک و

هیدرولیکی خاک و قدرت تبخیرکنندگی جو بر SAW مؤثرند، مفاهیم دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت^۵ (LLWR) و گنجایش آب انتگرالی^۶ (IWC) برای تعیین درست‌تر و جامع‌تر مقدار آب قابل استفاده خاک مطرح شدند (Minasny & McBratney, 2003). مفهوم LLWR که توسط داسیلوا و همکاران، (۱۹۹۴) ارائه شد، سه ویژگی خاک مؤثر بر رشد گیاه را در یک کمیت جمع می‌کند؛ از این رو می‌تواند به عنوان شاخصی از کیفیت ساختمان خاک برای تولید محصول مورد استفاده قرار گیرد. داسیلوا و کی (۱۹۹۷) نشان دادند که رشد گیاه در خاک‌های با دامنه باریک‌تر LLWR نسبت به خاک‌های با دامنه وسیع‌تر LLWR، بیش‌تر در معرض آسیب از شرایط خشکی (محدودیت مقاومت مکانیکی) یا بارندگی زیاد (محدودیت تهویه) قرار دارند. داسیلوا و کی (۲۰۰۴) معتقدند LLWR می‌تواند به عنوان شاخص کیفیت ساختمان خاک در ارزیابی قابلیت خاک برای رشد گیاه مورد استفاده قرار گیرد. کارلن (۲۰۰۴) LLWR را شاخصی بالقوه برای ارزیابی کیفیت خاک نامید.

یکی از معایب LLWR این است که مرز مقادیر محدودکننده تخلخل تهویه‌ای، مقاومت مکانیکی، و پتانسیل آب خاک را ناگهانی در نظر می‌گیرد. در حالی که در طبیعت این مرزها به صورت تدریجی تغییر می‌کنند. برای رفع این کاستی، گنجایش آب انتگرالی (IWC) تعریف شد. گرونولت و همکاران (۲۰۰۱) کوشیدند تا آب قابل استفاده خاک را با عوامل محدودکننده پیوسته مشابه پاسخ گیاه به محدودیت‌های محیطی (Bengough 2006) (Betz et al., 1998; et al.,) محاسبه کنند. آنها روش گنجایش آب انتگرالی (IWC) را به عنوان روش نوین تعیین آب قابل استفاده خاک برای گیاه پیشنهاد کردند. برای محاسبه IWC توابع وزنی با توجه به دامنه تغییر محدودیت‌ها، به عنوان ضریب، در گنجایش ویژه رطوبتی خاک ضرب شده و سپس انتگرال‌گیری برای تعیین کل آب قابل استفاده انجام می‌گیرد. در این روش می‌توان سایر عوامل محدودکننده جذب آب مانند شوری را نیز به صورت یک تابع وزنی وارد محاسبات کرد (Groenevelt et al., 2004).

5- Least limiting water range

6- Integral water capacity

مدل سازی داده‌های نگاه‌داشت آب و مقاومت فروری خاک

برای محاسبه PAW، LLWR و IWC بر اساس روش مبنا مدل منحنی مشخصه رطوبتی ون‌گنوختن بر تمامی داده‌های نگاه‌داشت آب خاک برازش داده شد. در روش پیشنهادی تنها از داده‌های نگاه‌داشت آب خاک در مکش‌های ماتریک ۳۳۰ و ۱۵۰۰۰ hPa (یعنی FC و PWP) و رطوبت اشباع استفاده شد. میانگین تخلخل خاک (n) با استفاده از فرمول ($n = 1 - \frac{BD}{2.65}$) محاسبه گردید و به عنوان رطوبت اشباع در نظر گرفته شد. معادله ون‌گنوختن (۱۹۸۰) برای منحنی مشخصه رطوبتی خاک به صورت زیر است:

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

که در این رابطه، $\theta(h)$ ، رطوبت حجمی خاک بر حسب $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ، h مکش ماتریک خاک بر حسب hPa، θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع خاک بر حسب $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ و α مرتبط با عکس مکش ورود هوا بر حسب hPa^{-1} و n شاخص توزیع اندازه منافذ خاک می‌باشند. به علت روند غیرخطی داده‌های مقاومت فروری در برابر رطوبت حجمی خاک، معادله ون‌گنوختن نگاه‌داشت آب خاک پس از تنظیم شدن برای برازش بر داده‌های Q در برابر θ نیز به کار رفت:

$$Q = Q_{wet} + (Q_{dry} - Q_{wet}) \left[1 + (\alpha_{Q\theta} \theta)^{n_{Q\theta}} \right]^{-\frac{1}{n_{Q\theta}-1}} \quad (2)$$

که در این رابطه Q مقاومت فروری خاک بر حسب MPa، θ رطوبت حجمی خاک بر حسب $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ و Q_{dry} ، Q_{wet} ، $\alpha_{Q\theta}$ و $n_{Q\theta}$ پارامترهای برازش مدل، به ترتیب مرتبط با کم‌ترین و بیش‌ترین مقاومت فروری پیش‌بینی شده خاک بر حسب MPa، و پارامترهای مرتبط با نقطه عطف و شیب تابع مقاومت فروری در برابر رطوبت خاک می‌باشند.

پارامترهای مدل‌های ۱ و ۲ با برازش بر داده‌های اندازه‌گیری شده توسط ابزار Solver در نرم‌افزار Microsoft Excel بدست آمد. این برنامه از روش بهینه‌سازی غیرخطی حداقل مربعات خطا بر اساس الگوریتم مارکواردت برای تخمین پارامترهای نامعین مدل از روی داده‌های مشاهده‌ای و از طریق بهینه‌سازی مجموع

آب (Thomas, 1996)، رسانایی الکتریکی با رسانایی سنج الکتریکی در عصاره گل اشباع (Redos, 1996)، مقدار ماده آلی به روش اکسیداسیون تر (Walkley & Black, 1934) و مقدار کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با NaOH (Sims, 1996) اندازه‌گیری شد. چگالی ظاهری طبیعی (BD) با میانگین‌گیری از مقادیر BD مربوط به ۱۰ نمونه خاک از مجموع ۱۶ نمونه دست-نخورده برداشت‌شده بدست آمد. برای تعیین درجه فشردگی مستقل از ویژگی‌های ذاتی مانند بافت خاک، چگالی ظاهری مرجع (BD_{ref}) مورد نیاز بود (Håkansson, 1990؛ Håkansson & Lipiec, 2000). چگالی ظاهری خشک بیشینه با روش آزمون پروکتور استاندارد به عنوان BD_{ref} اندازه‌گیری شد. آزمون فشردگی پروکتور در پنج رطوبت مختلف برای تعیین BD_{ref} (ASTM, 1992) انجام گرفت. چگالی ظاهری نسبی (RBD)، به عنوان شاخصی از درجه فشردگی خاک، با تقسیم BD بر BD_{ref} (یعنی $RBD = BD/BD_{ref}$) بدست آمد (Håkansson, 1990؛ Håkansson & Lipiec, 2000).

برای اندازه‌گیری منحنی مشخصه رطوبتی خاک در آزمایشگاه، ۱۳ مکش ماتریک به نمونه‌های دست‌نخورده (۳ تکرار) اشباع‌شده اعمال گردید. مقادیر کم h (یعنی ۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ hPa) توسط جعبه شن (یعنی ستون آب آویزان) و مقادیر زیاد h (یعنی ۱۰۰، ۱۰۰۰، ۳۳۰، ۲۰۰۰، ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ hPa) توسط دستگاه صفحه فشاری اعمال شد (Reynolds & Topp, 2006). برای اندازه‌گیری منحنی مشخصه مقاومت فروری خاک، ۱۰ نمونه دست‌نخورده به رطوبت‌های وزنی مختلف (دامنه تقریبی رطوبتی بین مکش‌های ماتریک ۱۰۰ الی ۱۵۰۰۰ hPa) رسانده شد. برای همگن‌سازی و به تعادل رسیدن رطوبت، این نمونه‌های خاک به مدت ۴ هفته درون کیسه‌های نایلونی قرار گرفتند. پس از تعادل رطوبتی مقاومت فروری (Q) آنها توسط ریزفروسنج (زاویه مخروط ۳۰ درجه و قطر قاعده آن ۲/۵ mm) با سرعت فروری برابر 2 mm min^{-1} در ۳ تکرار و در عمق-های ۱، ۲، و ۳ سانتی‌متری نمونه‌های خاک قرائت شد. در نهایت میانگین هندسی از ۹ مقدار قرائت‌شده (۳ تکرار فروری در هر نمونه $3 \times$ عمق اندازه‌گیری در هر فروری) گرفته شده و به عنوان میانگین مقاومت فروری (Q) نمونه خاک در رطوبت مورد نظر استفاده شد.

می‌گیرد. بنابراین همواره مقادیر $E_i(h)$ کم‌تر یا در شرایطی $\omega_K(h)=1$ برابر مقادیر $C(h)$ است.

مقادیر تابع وزنی هدایت هیدرولیکی زیاد، $\omega_K(h)$ ، پیشنهادی توسط گرونولت و همکاران (۲۰۰۱)، از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\omega_K(h) = \left[\frac{K_{r(330)}}{K_r(h)} \right]^p \quad (6)$$

که در این معادله ضریب p برابر 0.8 در نظر گرفته شد. مقدار $\omega_K(h)$ در مکش ماتریک hPa 330 برابر با 1 بوده و با کاهش h (افزایش رطوبت) از مقدار آن کاسته می‌شود اما مقدار آن حتی در رطوبت اشباع هم به صفر نمی‌رسد. گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر هدایت هیدرولیکی، $E_K(h)$ ، از رابطه زیر محاسبه شد (Groenevelt *et al.*, 2001):

$$E_K(h) = \omega_K(h) C(h) \quad (7)$$

برای اعمال محدودیت تهویه در دامنه مرطوب، گرونولت و همکاران (۲۰۰۱) فرض کردند، تا AFP برابر 10 درصد هیچ آبی جذب گیاه نمی‌شود. از این رو تابع وزنی تخلخل تهویه‌ای، $\omega_a(h)$ ، تا AFP برابر 10 درصد برابر صفر بوده و با افزایش AFP به مقادیر بیش از 10 درصد، $\omega_a(h)$ از صفر بزرگ‌تر شده و در AFP برابر 15 درصد به 1 می‌رسد. معادله‌ای که به وسیله آن $\omega_a(h)$ محاسبه شد به صورت زیر است:

$$\omega_a(h) = A \log \left[\frac{h}{h_0} \right] \quad (8)$$

که در این رابطه h_0 مکش ماتریک در تخلخل تهویه‌ای 10 درصد و A از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$A = \frac{1}{\log \left[\frac{h_f}{h_0} \right]} \quad (9)$$

که در این رابطه h_f مکش ماتریک در تخلخل تهویه‌ای 15 درصد می‌باشد. گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر تخلخل تهویه‌ای، $E_a(h)$ ، از رابطه زیر محاسبه شد (Groenevelt *et al.*, 2001):

$$E_a(h) = \omega_a(h) C(h) \quad (10)$$

در صورتی که چند محدودیت هم‌زمان وجود داشته باشد ضرایب وزنی آنها هم‌زمان در $C(h)$ ضرب می‌شود. برای

مربعات مدل یا کمینه‌کردن مجموع مربعات باقی‌مانده (SSQ) استفاده می‌کند.

چگونگی محاسبه PAW، LLWR و IWC

آب قابل دسترس گیاه (PAW) از تفاضل مقدار آب در نقطه FC (مکش ماتریک 100 یا hPa 330) به عنوان حد بالایی و مقدار آب در نقطه PWP (hPa 15000) به عنوان حد پایینی بدست آمد. بسته به انتخاب مکش ماتریک 100 یا hPa 330 به عنوان FC، آب قابل دسترس به صورت PWP_{100} یا PWP_{330} نشان داده شد (Asgarzadeh *et al.*, 2010).

حد بالایی LLWR را FC (مکش ماتریک 100 یا hPa 330) یا رطوبت نظیر تخلخل تهویه‌ای 10 درصد، هر کدام که کم‌تر باشد و حد پایینی را PWP یا رطوبت نظیر مقاومت فروری 2 MPa هر کدام که بیش‌تر باشد، تعیین کرد (da Silva *et al.*, 1994). بسته به انتخاب مکش ماتریک 100 یا hPa 330 به عنوان FC، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت به صورت $LLWR_{100}$ یا $LLWR_{330}$ نشان داده شد (Asgarzadeh *et al.*, 2010).

مقادیر IWC با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد (Groenevelt *et al.*, 2001):

$$IWC = \int_0^\infty \left(\prod_{i=1}^n \omega_i(h) \right) C(h) dh \quad (3)$$

که در اینجا $C(h) = |d\theta/dh|$ ، گنجایش ویژه رطوبتی (مشتق معادله ون‌گنوختن) برحسب hPa^{-1} و $\omega_i(h)$ توابع وزنی برای انواع محدودیت‌های فیزیکی از i تا n مکش ماتریک بر حسب hPa و Π نشان‌دهنده این است که توابع وزنی مورد نظر ضرب‌پذیر هستند. تابع گنجایش ویژه رطوبتی، نشان‌دهنده شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک (شیب معادله ون‌گنوختن) به صورت زیر است:

$$C(h) = (\theta_s - \theta_r) (n-1) h^{-1} (\alpha h)^n \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{\frac{1-2n}{n}} \quad (4)$$

با ضرب کردن $C(h)$ در $\omega_i(h)$ ، که تمام محدودیت‌های فیزیکی را به عنوان تابعی از مکش ماتریک در نظر می‌گیرد، عبارت گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر، $E_i(h)$ ، به صورت زیر محاسبه شد:

$$E_i(h) = \omega_i(h) C(h) \quad (5)$$

مقدار $\omega_i(h)$ ، که ممکن است به صورت خطی یا غیرخطی با مکش ماتریک تغییر کند، در دامنه صفر تا 1 قرار

گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر نظیر آن، $E_{Kdry}(h)$ ، از رابطه زیر محاسبه شد:

$$E_{Kdry}(h) = \omega_{Kdry}(h) C(h) \quad (۱۶)$$

برای دامنه‌ای از مکش ماتریک که محدودیت هدایت هیدرولیکی کم و مقاومت مکانیکی زیاد (کاهش فروروی ریشه) هم‌زمان وجود داشت، گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر، $E_{RKdry}(h)$ ، از رابطه زیر محاسبه شد:

$$E_{RKdry}(h) = \omega_R(h) \omega_{Kdry}(h) C(h) \quad (۱۷)$$

در نهایت برای محاسبه IWC به کمک معادله ۳، دامنه مکش ماتریک ۰ تا ۱۵۰۰۰ hPa به تعداد زیادی فاصله تقسیم شده و انتگرال‌گیری به روش عددی (روش دوزنقه‌ای) انجام شد.

تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها

استخراج روابط رگرسیونی خطی بین مقادیر SAW محاسبه‌شده توسط روش‌های مختلف، با ویژگی‌های خاک، آزمون t برای مقایسه میانگین‌ها، و هم‌چنین رسم شکل‌ها توسط نرم‌افزار Microsoft Excel انجام شد. بررسی عدم تفاوت معنی‌دار شیب و عرض از مبدا روابط رگرسیونی خطی بین مقادیر SAW محاسبه‌شده توسط روش پیشنهادی و روش مرجع به ترتیب از مقادیر یک و صفر با نرم‌افزار SPSS انجام شد.

نتایج و بحث

برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی در جدول ۱ نشان داده شده است. ویژگی‌های خاک مانند توزیع اندازه ذرات، کلاس بافت، چگالی ظاهری، چگالی ظاهری نسبی و مقدار ماده آلی (OM) در دامنه وسیعی بودند که می‌تواند به تعیین روابط بین SAW و ویژگی‌های خاک کمک کنند.

پارامترهای برازش مدل ون‌گنوختن برای منحنی نگهداشت آب و پارامترهای مدل تنظیم‌شده ون‌گنوختن برای منحنی مقاومت فروروی برای تمام خاک‌های مورد بررسی در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر R^2 بدست‌آمده نشان می‌دهد که هر دو مدل به خوبی بر داده‌ها برازش یافتند.

نمونه اگر دو محدودیت ذکرشده هم‌زمان وجود داشت، گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر، حاصل ضرب توابع وزنی مربوط به هدایت هیدرولیکی زیاد و تخلخل تهویه‌ای در گنجایش ویژه رطوبتی بود:

$$E_{Ka}(h) = \omega_K(h) \omega_a(h) C(h) \quad (۱۱)$$

در دامنه خشک، محدودیت جذب آب از $Q = ۱/۵$ MPa آغاز شده و در $Q = ۲/۵$ MPa محدودیت کامل مقاومت مکانیکی خاک ایجاد می‌شود. بنابراین تابع وزنی مقاومت مکانیکی، $\omega_R(\theta)$ ، از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\omega_R(\theta) = 25 \left\{ Q_{wet} + (Q_{dry} - Q_{wet}) \left[1 + (\alpha_{\theta} \theta)^{n_{sp}} \right]^{-\frac{1}{n_{sp}}} \right\} \quad (۱۲)$$

و گنجایش ویژه رطوبتی مؤثر نظیر آن از رابطه زیر محاسبه شد:

$$E_R(h) = \omega_R(h) C(h) \quad (۱۳)$$

شروع محدودیت ناشی از کاهش هدایت هیدرولیکی، مکش ماتریک ۱۲۰۰۰ hPa در نظر گرفته شد. زمانی که مکش ماتریک برابر ۱۲۰۰۰ hPa باشد، $\omega_{Kdry}(h)$ برابر ۱ است و هر چه قدر مکش ماتریک از ۱۲۰۰۰ hPa بزرگ‌تر شود $\omega_{Kdry}(h)$ از ۱ کوچک‌تر می‌شود. هر چند $\omega_{Kdry}(h)$ مکش ماتریک ۱۵۰۰۰ hPa به صفر نمی‌رسد اما به دلیل کم‌بودن مقدار آب در مکش‌های ماتریک بیش‌تر از ۱۵۰۰۰ hPa، محاسبات IWC تا این مکش ماتریک انجام شد. تابع وزنی هدایت هیدرولیکی کم برای انتهای خشک، $\omega_{Kdry}(h)$ ، از رابطه زیر بدست آمد:

$$\omega_{Kdry}(h) = \left[\frac{12000}{h} \right]^{-d} \quad (۱۴)$$

که مقدار d از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_r(h) = ch^d \quad (۱۵)$$

در اینجا نمای d نشان‌دهنده چگونگی کاهش $K_r(h)$ با h است که می‌تواند به عنوان یک ثابت در تابع وزنی مورد استفاده قرار گیرد، و c ضریب برازش معادله می‌باشد.

جدول (۱) برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک‌های مورد بررسی*

Table 1) Some chemical and physical properties of the studied soils

| pH | ECe | RBD | BD | CaCO ₃ | OM | رس | سیلت | شن | شماره |
|------|--------------------|-------|--------------------|-------------------|------|------------------------|------|------|---------|
| | dS m ⁻¹ | | Mg m ⁻³ | | | kg 100kg ⁻¹ | | | خاک |
| 7.83 | 0.67 | 0.650 | 1.23 | 9.7 | 0.76 | 24.3 | 33.9 | 41.9 | 1 |
| 7.93 | 0.72 | 0.768 | 1.44 | 12.3 | 0.56 | 25.0 | 34.9 | 40.1 | 2 |
| 7.86 | 0.60 | 0.826 | 1.59 | 11.7 | 0.40 | 23.3 | 31.2 | 45.4 | 3 |
| 7.78 | 0.62 | 0.817 | 1.57 | 10.7 | 0.36 | 22.3 | 31.7 | 46.1 | 4 |
| 8.24 | 1.47 | 0.751 | 1.53 | 8.7 | 0.36 | 15.1 | 20.8 | 64.1 | 5 |
| 8.15 | 0.69 | 0.805 | 1.63 | 8.1 | 0.16 | 13.8 | 19.4 | 66.8 | 6 |
| 7.75 | 0.95 | 0.796 | 1.51 | 15.9 | 0.60 | 25.6 | 32.8 | 41.6 | 7 |
| 7.89 | 0.82 | 0.816 | 1.52 | 13.7 | 0.65 | 26.1 | 31.5 | 42.4 | 8 |
| 8.12 | 1.72 | 0.784 | 1.51 | 12.1 | 0.74 | 22.6 | 30.8 | 46.6 | 9 |
| 8.15 | 0.71 | 0.841 | 1.60 | 11.3 | 0.28 | 21.9 | 29.1 | 49.0 | 10 |
| 8.08 | 0.53 | 0.772 | 1.39 | 14.0 | 0.65 | 25.1 | 52.3 | 22.6 | 11 |
| 8.19 | 0.42 | 0.803 | 1.50 | 15.0 | 0.32 | 26.0 | 39.4 | 34.5 | 12 |
| 8.15 | 0.47 | 0.743 | 1.29 | 8.2 | 0.72 | 21.2 | 64.2 | 14.6 | 13 |
| 7.94 | 0.65 | 0.779 | 1.34 | 5.2 | 0.46 | 33.1 | 57.9 | 9.0 | 14 |
| 8.03 | 0.69 | 0.802 | 1.32 | 9.2 | 1.14 | 38.1 | 48.4 | 13.5 | 15 |
| 8.25 | 0.46 | 0.911 | 1.61 | 13.0 | 0.42 | 29.9 | 48.0 | 22.0 | 16 |
| 7.80 | 0.60 | 0.806 | 1.42 | 9.8 | 1.10 | 29.8 | 47.4 | 22.8 | 17 |
| 8.15 | 0.44 | 0.801 | 1.44 | 16.6 | 0.32 | 26.6 | 49.2 | 24.1 | 18 |
| 7.85 | 0.48 | 0.782 | 1.30 | 7.2 | 0.82 | 39.4 | 47.2 | 13.4 | 19 |
| 8.01 | 0.40 | 0.934 | 1.58 | 11.6 | 0.39 | 42.0 | 42.7 | 15.3 | 20 |
| 8.01 | 0.71 | 0.799 | 1.47 | 11.3 | 0.56 | 26.6 | 39.7 | 33.8 | میانگین |

* شن (۲-۰/۰۵ mm)، سیلت (۰/۰۵-۰/۰۰۲ mm)، رس (< ۰/۰۰۲ mm) بر اساس طبقه‌بندی USDA، چگالی ظاهری (BD)، چگالی ظاهری نسبی (RBD)، مقدار ماده آلی (OM)، اسیدیته خاک (pH) در عصاره ۱ به ۱ خاک به آب و رسانایی الکتریکی (ECe) در عصاره گل اشباع

مقادیر LLWR₁₀₀ نظیر این خاک‌ها به ترتیب برابر با ۰/۱۹۱ و ۰/۲۱۵ cm³ cm⁻³ بودند. دو خاک با بدترین کیفیت فیزیکی، خاک‌های شماره ۱۶ و ۲۰ با IWC، LLWR₁₀₀ و LLWR₃₃₀ برابر صفر می‌باشند که نشان می‌دهد محدودیت‌های تهویه و مقاومت فروروی (بیش‌تر به دلیل درجه فشردگی زیاد، رجوع به جدول ۱) باعث غیرقابل استفاده شدن آب خاک برای گیاه بر اساس روش-های IWC و LLWR شده‌اند. این نتایج نشان‌دهنده توانایی بهتر شاخص‌های IWC و LLWR برای بیان کیفیت فیزیکی خاک در مقایسه با شاخص PAW است (جدول ۳). داسیلوا و کی (۲۰۰۴) و کارلن (۲۰۰۴) معتقدند LLWR می‌تواند به عنوان شاخص کیفیت ساختمان خاک در ارزیابی قابلیت خاک برای رشد گیاه مورد استفاده قرار گیرد؛ در حالی که تغییرات کیفیت ساختمان خاک تاثیر کمی بر PAW دارد (Reynolds et al., 2007 & 2008). عسگرزاده و همکاران (۲۰۱۰) نیز مناسب بودن شاخص‌های LLWR و IWC را برای بیان کیفیت فیزیکی خاک گزارش کردند.

مقادیر SAW محاسبه‌شده با روش پیشنهادی در جدول ۳ نشان داده شده است. هرچند میانگین PAW₁₀₀ محاسبه‌شده با روش پیشنهادی تفاوت معنی‌داری (< ۰/۰۵) *P*، آزمون *t*) با روش مبنا داشت اما تفاوت معنی‌داری بین سایر میانگین‌های مقادیر مختلف SAW محاسبه‌شده با روش پیشنهادی و روش مبنا وجود نداشت (< ۰/۰۵) *P*، آزمون *t*). میانگین‌های LLWR₁₀₀ و IWC در روش پیشنهادی هم‌خوانی خیلی خوبی با میانگین آنها در روش مبنا داشتند (جدول ۳). به عبارت دیگر استفاده از دو نقطه منحنی مشخصه رطوبتی خاک (یکی در دامنه مرطوب و دیگری در دامنه خشک) می‌تواند به خوبی روند داده‌های این منحنی را برآورد کند بدون اینکه نیازی به اندازه‌گیری طاقت‌فرسای تعداد زیادی از نقاط منحنی نگهداشت آب خاک باشد. کیفیت فیزیکی خاک‌های مورد بررسی بر اساس معیارهای مختلف مقایسه شد. بر اساس مفهوم IWC دو خاک با بهترین کیفیت فیزیکی، خاک شماره ۱ با مقدار IWC برابر ۰/۲۳۳ cm³ cm⁻³ و خاک شماره ۱۳ با مقدار IWC برابر ۰/۱۸۶ cm³ cm⁻³ بودند.

جدول ۲) مقادیر پارامترهای مدل ون گنوختن برای منحنی نگه‌داشت آب و پارامترهای مدل تنظیم‌شده ون گنوختن برای منحنی مقاومت فروری برای خاک‌های مورد بررسی در روش پیشنهادی

Table 2) Parameters of van Genuchten model for water retention curve and modified van Genuchten model for the soil penetration resistance curve for the studied soils in the proposed method

| R^2 | $n_{Q\theta}$ | $\alpha_{Q\theta}$ cm ⁻³ cm ³ | Q | | R^2 | n | α hPa ⁻¹ | θ | | شماره خاک |
|-------|---------------|--|--------|-------|-------|-------|-------------------------------|----------|-------|--------------|
| | | | dry | wet | | | | MPa | s | |
| 1.000 | 9.305 | 5.862 | 2.176 | 0.176 | 1.0 | 1.389 | 0.046 | 0.533 | 0.089 | 1 |
| 1.000 | 8.226 | 4.810 | 3.874 | 0.000 | 1.0 | 1.256 | 0.040 | 0.444 | 0.073 | 2 |
| 0.996 | 7.403 | 5.376 | 6.645 | 0.000 | 1.0 | 1.287 | 0.036 | 0.419 | 0.074 | 3 |
| 0.989 | 11.946 | 5.749 | 8.925 | 0.824 | 1.0 | 1.297 | 0.042 | 0.415 | 0.094 | 4 |
| 0.998 | 4.024 | 22.243 | 15.000 | 0.773 | 1.0 | 1.459 | 0.036 | 0.413 | 0.079 | 5 |
| 0.907 | 7.844 | 8.376 | 15.000 | 0.389 | 1.0 | 1.504 | 0.038 | 0.379 | 0.094 | 6 |
| 0.978 | 6.693 | 8.386 | 15.000 | 1.428 | 1.0 | 1.279 | 0.042 | 0.439 | 0.101 | 7 |
| 0.987 | 15.000 | 4.302 | 3.132 | 0.745 | 1.0 | 1.268 | 0.038 | 0.427 | 0.091 | 8 |
| 1.000 | 15.000 | 4.959 | 3.395 | 0.733 | 1.0 | 1.313 | 0.039 | 0.438 | 0.098 | 9 |
| 0.941 | 15.000 | 4.465 | 4.081 | 0.000 | 1.0 | 1.365 | 0.046 | 0.418 | 0.130 | 10 |
| 0.994 | 11.093 | 3.785 | 3.513 | 0.067 | 1.0 | 1.243 | 0.017 | 0.473 | 0.050 | 11 |
| 0.904 | 6.560 | 5.049 | 4.385 | 0.000 | 1.0 | 1.351 | 0.034 | 0.438 | 0.093 | 12 |
| 0.931 | 3.806 | 5.323 | 4.019 | 0.000 | 1.0 | 1.312 | 0.015 | 0.530 | 0.042 | 13 |
| 0.991 | 3.646 | 9.104 | 15.000 | 0.337 | 1.0 | 1.236 | 0.016 | 0.491 | 0.043 | 14 |
| 0.957 | 5.587 | 6.755 | 15.000 | 0.579 | 1.0 | 1.202 | 0.038 | 0.500 | 0.096 | 15 |
| 0.989 | 7.214 | 4.524 | 15.000 | 0.000 | 1.0 | 1.123 | 0.042 | 0.394 | 0.100 | 16 |
| 0.996 | 15.000 | 3.978 | 4.894 | 0.699 | 1.0 | 1.204 | 0.035 | 0.461 | 0.085 | 17 |
| 0.921 | 6.666 | 4.212 | 4.160 | 0.000 | 1.0 | 1.223 | 0.026 | 0.453 | 0.067 | 18 |
| 0.982 | 3.331 | 6.621 | 6.188 | 0.000 | 1.0 | 1.194 | 0.049 | 0.510 | 0.098 | 19 |
| 0.956 | 10.413 | 3.932 | 15.000 | 0.190 | 1.0 | 1.118 | 0.041 | 0.403 | 0.089 | 20 |
| 0.971 | 8.688 | 6.391 | 8.219 | 0.347 | 1.0 | 1.281 | 0.036 | 0.449 | 0.084 | میانگین |

جدول ۳) مقادیر SAW محاسبه‌شده توسط مفاهیم مختلف برای خاک‌های مورد بررسی در روش پیشنهادی

Table 3) Values of SAW calculated by different approaches for the studied soils in the proposed method

| IWC | LLWR ₃₃₀ | LLWR ₁₀₀ | PAW ₃₃₀ | PAW ₁₀₀ | شماره خاک |
|--|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| ----- cm ³ cm ⁻³ ----- | | | | | |
| 0.233 | 0.107 | 0.191 | 0.118 | 0.202 | 1 |
| 0.101 | 0.052 | 0.114 | 0.118 | 0.180 | 2 |
| 0.072 | 0.026 | 0.088 | 0.111 | 0.173 | 3 |
| 0.078 | 0.035 | 0.091 | 0.098 | 0.155 | 4 |
| 0.165 | 0.085 | 0.156 | 0.088 | 0.158 | 5 |
| 0.075 | 0.010 | 0.071 | 0.068 | 0.128 | 6 |
| 0.093 | 0.056 | 0.114 | 0.105 | 0.164 | 7 |
| 0.065 | 0.028 | 0.085 | 0.108 | 0.166 | 8 |
| 0.100 | 0.045 | 0.107 | 0.105 | 0.167 | 9 |
| 0.058 | 0.010 | 0.064 | 0.079 | 0.133 | 10 |
| 0.085 | 0.059 | 0.130 | 0.162 | 0.232 | 11 |
| 0.092 | 0.028 | 0.096 | 0.108 | 0.176 | 12 |
| 0.186 | 0.118 | 0.215 | 0.198 | 0.295 | 13 |
| 0.117 | 0.093 | 0.145 | 0.174 | 0.246 | 14 |
| 0.127 | 0.093 | 0.152 | 0.128 | 0.187 | 15 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.079 | 0.109 | 16 |
| 0.067 | 0.044 | 0.094 | 0.122 | 0.177 | 17 |
| 0.077 | 0.054 | 0.104 | 0.134 | 0.195 | 18 |
| 0.148 | 0.108 | 0.165 | 0.124 | 0.181 | 19 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.082 | 0.113 | 20 |
| 0.097a | 0.052a | 0.109a | 0.115a | 0.177a* | میانگین روش پیشنهادی |
| 0.097a | 0.060a | 0.102a | 0.103a | 0.150b | میانگین روش مبنا |

*در هر ستون حروف مشابه نشان‌دهنده عدم معنی‌داری ($P < 0.05$, آزمون t) تفاوت میانگین‌های SAW محاسبه‌شده با روش پیشنهادی و روش مبنا می‌باشند.

مقادیر SAW محاسبه شده با روش مبنا (متغیر مستقل) و روش پیشنهادی (متغیر وابسته) در جدول ۴ نشان داده شده است. تمامی روابط رگرسیونی بدست آمده در سطح احتمال ۰/۰۱ معنی دار بودند. آزمون عدم برابری مقادیر شیب و عرض از مبدأ روابط بدست آمده به ترتیب از یک و صفر ($P < ۰/۰۵$) معنی دار نبود. یعنی مقادیر شیب و عرض از مبدأ روابط به ترتیب خیلی نزدیک به واحد و صفر بود که باعث پراکنش مناسب داده ها در اطراف خط ۱ به ۱ شد. این معیارها و نتایج نشان می دهند که روش پیشنهادی توانایی خوبی برای پیش بینی مقادیر SAW دقیق و هماهنگ با مقادیر بر اساس روش مبنا دارد.

روابط بین مقادیر نظیر SAW محاسبه ای به روش های پیشنهادی و مبنا

هر چند مقایسه میانگین کمیتهای آب قابل استفاده، اطلاعاتی درباره تشابه یا عدم تشابه دو روش به دست می دهد اما روابط خطی بین نتایج دو روش نیز بسیار مهم است. این امکان وجود دارد که مقادیر میانگین مشابه برای روش های مختلف بدست آید اما هم بستگی بین آنها معنی دار نباشد یا داده ها از خط ۱ به ۱ انحراف داشته باشند. بهترین هماهنگی زمانی است که میانگین های دو روش برابر بوده و یک رابطه رگرسیونی خطی با شیب ۱ و عرض از مبدأ برابر صفر با ضریب تبیین (R^2) برابر ۱ به دست آید. ضرایب روابط خطی بین

جدول ۴) ضرایب روابط خطی بین مقادیر SAW محاسبه شده با روش مبنا (متغیر مستقل) و روش پیشنهادی (متغیر وابسته) (Table 4) Coefficients of linier relations between SAW values calculated by the the reference method (independent variable) and proposed method (dependent variable)

| یک $b \neq$ | صفر $a \neq$ | R^2 | شیب (b) | عرض از مبدأ (a) | SAW |
|-------------|--------------|-------|---------|-----------------|---------------------|
| ns | ns | 0.817 | 1.212 | -0.006 | PAW ₁₀₀ |
| ns | ns | 0.833 | 1.223 | -0.011 | PAW ₃₃₀ |
| ns | ns | 0.968 | 1.080 | -0.001 | LLWR ₁₀₀ |
| ns | ns | 0.910 | 0.890 | -0.001 | LLWR ₃₃₀ |
| ns | ns | 0.994 | 1.024 | -0.002 | IWC |

محدودیتی برای رشد ریشه ایجاد نکند (Dexter et al., 2007). بررسی ها نشان می دهد که $BD_{critical}$ با BD خاک طبیعی مزرعه (جایی که ریشه گیاه در معرض محدودیت های محیطی است) هم بستگی قوی دارد (Mosaddeghi et al., 2009). عسگرزاده و همکاران (۲۰۱۰) نیز روابط قوی تر بین مقادیر SAW با RBD در مقایسه با BD را گزارش کردند. از این رو برای بررسی حساسیت مقادیر SAW محاسبه شده با روش پیشنهادی به تغییرات ساختمانی خاک از روابط خطی بین این شاخص ها با RBD استفاده شد (شکل ۱).

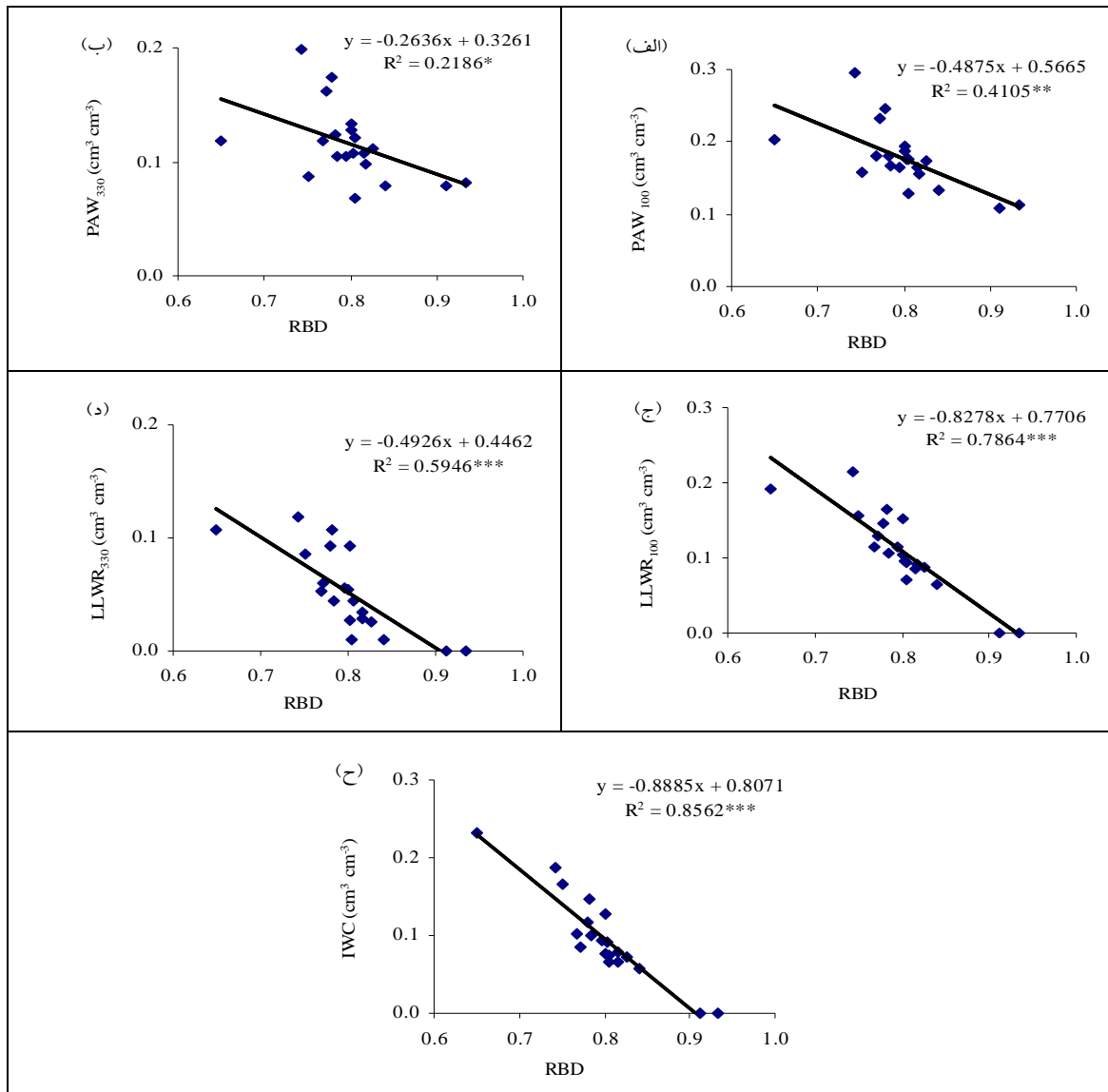
افزایش چگالی ظاهری نسبی تأثیر منفی بر مقدار آب قابل استفاده خاک داشت. در میان کمیتهای مختلف SAW، IWC بیشترین و PAW کمترین حساسیت را به تغییرات ساختمانی خاک نشان دادند (شکل ۱). عوامل محدودکننده تخلخل تهویه ای و مقاومت مکانیکی که در محاسبه IWC و LLWR مؤثرند، می توانند تحت تأثیر تغییرات ساختمانی خاک قرار گیرند. از این رو کمیتهای IWC و LLWR در مقایسه با کمیتهای PAW که صرفاً

روابط بین مقادیر SAW محاسبه شده با روش پیشنهادی و ویژگی های ساختمانی خاک

چگالی ظاهری (BD) یکی از ویژگی های مهم فیزیکی خاک است که شاخصی از ساختمان خاک می باشد (De Vos et al., 2005؛ Reynolds et al., 2002 & 2007 & 2008). چگالی ظاهری به عنوان یک پارامتر کیفیت فیزیکی خاک، ممکن است مقدار نگهداشت آب، تهویه و مقاومت فروری خاک و در نتیجه رشد ریشه را تحت تأثیر قرار دهد (Reynolds et al., 2002 & 2007 & 2008). علی رغم ارتباط BD با مقاومت مکانیکی خاک و سایر ویژگی های مؤثر در مقدار آب قابل استفاده، به نظر می رسد چگالی ظاهری نسبی (RBD) که نسبت BD طبیعی به BD مرجع (BD بحرانی برای رشد ریشه، $BD_{critical}$) می باشد، شاخص بهتری برای بیان درجه فشردگی خاک باشد (Håkansson & Håkansson, 1990؛ Lipiec, 2000). برای نمونه، BD برابر $1/4 \text{ Mg m}^{-3}$ ممکن است برای رشد گیاه در یک خاک ریزبافت محدودکننده باشد اما برای یک خاک درشتبافت

ایجاد شده بین مقادیر SAW محاسبه شده با روش پیشنهادی با RBD مؤید مفید بودن این روش برای بدست آوردن سریع و قابل اطمینان این شاخص‌های مفید برای اهداف کاربردی است.

وابسته به پتانسیل آب خاک است، همبستگی قوی‌تری با RBD برقرار کردند. داسیلوا و کی (۱۹۹۷) و ورما و شارما (۲۰۰۸) نیز کاهش مقدار LLWR با نامناسب شدن شرایط ساختمانی خاک را گزارش کردند. روابط قوی و معنی‌دار



شکل ۱) روابط خطی چگالی ظاهری نسبی (RBD) با مقادیر SAW شامل: (الف) PAW₁₀₀، (ب) PAW₃₃₀، (ج) LLWR₁₀₀، (د) LLWR₃₃₀ و (ه) IWC

Fig. 1) Linear relations between relative bulk density (RBD) and SAW values: (a) PAW₁₀₀, (b) PAW₃₃₀, (c) LLWR₁₀₀, (d) LLWR₃₃₀, and (e) IWC

به عبارت دیگر استفاده از دو نقطه منحنی مشخصه رطوبتی خاک (یکی در دامنه مرطوب و دیگری در دامنه خشک) می‌تواند به خوبی روند داده‌های این منحنی را برآورد کند بدون اینکه نیازی به اندازه‌گیری طاق‌فرسای

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۱- تفاوت معنی‌داری ($p < 0.05$) آزمون t) بین مقادیر میانگین PAW₃₃₀، LLWR₁₀₀، LLWR₃₃₀ و IWC محاسبه شده با روش پیشنهادی و روش مبنا وجود نداشت.

نتایج مؤید توانایی زیاد روش پیشنهادی برای پیش‌بینی مقادیر SAW دقیق و هماهنگ با مقادیر بدست‌آمده با روش مینا است.

۳- مقادیر LLWR، IWC محاسبه‌شده با روش پیشنهادی هم‌بستگی بسیار قوی و معنی‌داری ($P < 0/001$) با شاخص RBD برقرار کردند. این روابط منفی خطی، کارایی زیاد LLWR و IWC محاسبه‌شده با روش پیشنهادی برای پیش‌بینی و ارزیابی کیفیت فیزیکی خاک را نشان می‌دهند.

تعداد زیادی از نقاط منحنی نگهداشت آب خاک باشد. از آنجایی که در روش پیشنهادی منحنی مشخصه رطوبتی خاک تنها با اندازه‌گیری رطوبت خاک در حد FC و PWP برآورد می‌شود، صرفه‌جویی قابل توجهی در زمان صورت می‌گیرد.

۲- تمامی روابط رگرسیونی خطی بدست‌آمده بین مقادیر SAW محاسبه‌شده با روش پیشنهادی و روش مینا در سطح احتمال 0/001 معنی‌دار بودند. هم‌چنین آزمون عدم برابری مقادیر شیب و عرض از مبدأ روابط بدست‌آمده به ترتیب از یک و صفر ($P < 0/05$) معنی‌دار نبود. این

References

- Asgarzadeh H, Mosaddeghi MR, Mahboubi AA, Nosrati A and Dexter AR. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant Soil*, 335: 229–244.
- ASTM. 1992. Annual book of ASTM standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- Bengough AG, Bransby MF, Hans J, McKenna SJ, Roberts TJ and Valentine TA. 2006. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *Journal Exp. Bot.* 57: 437–447.
- Betz CL, Allmaras RR, Copeland SM and Randall GW. 1998. Least limiting water range: traffic and long term tillage influences in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1384–1393.
- Da Silva AP, and Kay BD. 1997. Estimating least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am J.* 61: 877–883.
- Da Silva AP, and Kay BD. 2004. Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality. *Soil and Tillage Research*, 79: 167–174.
- Da Silva AP, Kay BD and Perfect E. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775–1781.
- De Vos BM, Van Meirvenne, Quataert P, Deckers J, Muys B. 2005. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 500–510.
- Dexter AR, 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 AR, Czyż EA, and Gażę OP. 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research*, 93: 412–419.
- Gee GW and Bauder JW. 1986. Particle size analysis. In: Klute A (ed.), *Methods of soil analysis*, Part 1: Physical and mineralogical methods. 2nd Edition, Agron Monogr 9. ASA/SSSA, Madison, WI. 383–411 p.
- Groenevelt PH, Grant CD and Murray RS. 2004. On water availability in saline soils. *Aust. J. Soil Res.* 42: 833–840.
- Groenevelt PH, Grant CD and Semetsa S. 2001. A new procedure to determine soil water availability. *Aust. J. Soil Res.* 39: 577–598.
- Håkansson I. 1990. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Till. Res.* 16: 105–120.
- Håkansson I and Lipiec J. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till. Res.* 53: 71–85.
- Hutson JL and Cass A. 1987. A retentivity function for use in soil-water simulation models. *J. Soil Sci.* 38: 105–113.
- Karlen DL. 2004. Soil quality as an indicator of sustainable tillage practices. *Soil Till. Res.* 78: 129–130.

- Minasny B and McBratney AB. 2003. Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant and Soil*, 249:253–262.
- Mosaddeghi MR, Morshedizad M, Mahboubi AA, Dexter AR and Schulin R. 2009. Laboratory evaluation of a model for soil crumbling for prediction of the optimum soil water content for tillage. *Soil Till. Res.* 105: 242–250.
- Reynolds WD, Bowman BT, Drury CF, Tan CS and Lu X. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110: 131–146.
- Reynolds WD, Drury CF, Yang XM, Fox CA, Tan CS and Zhang TQ. 2007. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. *Soil Till Res.* 96: 316–330.
- Reynolds WD, Drury CF, Yang XM and Tan CS. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. *Geoderma*, 146: 466–474.
- Reynolds WD and Topp GC. 2006. Soil waterdesorption and imbibition: tension and pressure techniques. 981–997 P. In: Carter, M.R., E.G. Gregorich (Eds.), *Soil sampling and methods of analysis*, CRC Press Taylor & Francis Group.
- Sims JT. 1996. Lime requirement. In: Sparks, D.L. Page, A.L. Helmke, P.A. Loeppert, R.H. Soltanpour, P.N. Tabatabai, M.A. Johnston, C.T. and Sumner, M.E. (Eds.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. ASA/SSSA Madison, Wisconsin, USA. 491–515 p.
- Thomas GW. 1996. Soil pH and soil acidity. In: Sparks, D.L. Page, A.L. Helmke, P.A. Loeppert, R.H. Soltanpour, P.N. Tabatabai, M.A. Johnston, C.T. and Sumner, M.E. (Eds.) *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods*. ASA/SSSA Madison, Wisconsin, USA. 475–490p.
- Van Genuchten MTh. 1980 A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892–898.
- Veihmeyer FJ, Hendrickson AH. 1927 The relation of soil moisture to cultivation and plant growth. *Proc. 1st Intern. Cong. Soil Sci.* 3: 498–513.
- Veihmeyer FJ and Hendrickson A.H., 1931. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. *Soil Sci.* 32: 181–193.
- Verma S and Sharma PK. 2008. Long-term effects of organics, fertilizers and cropping systems on soil physical productivity evaluated using a single value index (NLWR). *Soil and Till. Res.* 98: 1–10.
- Walkley and Black IA. 1934. An examination of digestion method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration. *Soil Sci.* 37: 29–38.

Proposing and Evaluating a Laboratory Method for Quick Determination of Different Quantities of Soil Available Water to Plant

Hossein Asgarzadeh^{1*}, Mohammad Reza Mosaddeghi²

1- Department of Soil Science, College of Agriculture, Urmia University, Urmia

2- Department of Soil Science, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan

* Corresponding author: Asgarzadeh8688@gmail.com

Received: 22.10.2012

Accepted: 12.03.2013

Abstract

A laboratory method was proposed and its capability was evaluated for quick and reliable determination of soil available water (SAW) for plant using concepts of plant available water (PAW), least limiting water range (LLWR) and integral water capacity (IWC). Water retention (θ) of 20 agricultural soils was determined at 13 matric suctions (h) using sand box and pressure plate apparatuses. These data were fitted by the van Genuchten model and considered as the reference method. We used the soil water retention at h values of 0, 330 and 15000 hPa for the model fitting in the proposed method. Penetration resistance (Q) was measured on 10 undisturbed cores at different water contents for each soil using a lab micropenetrometer. Except for PAW (with h of 100 hPa considered as field capacity), there were not significant differences between the mean values of SAW determined by the reference and proposed methods. Strong regression lines were obtained between corresponding SAW values calculated by the two methods. Therefore, it is not needed to measure soil water retention and penetration resistance curves at several h values; instead water retention measurement at h values of 0, 330 and 15000 cm and quick measurement of penetration resistance at different water contents could be used for determination of different quantities for SAW. The PAW, LLWR and IWC were negatively and significantly regressed with relative bulk density (RBD) in the studied soils. These findings show that the SAW values calculated by the proposed method are susceptible to soil structure and might be considered as soil physical quality indices. The results showed suitability of the proposed method for quick and reliable determination of soil available water quantities which are useful for applied purposes and irrigation scheduling.

Keywords: plant available water, least limiting water range, integral water capacity, water characteristic curve, penetration resistance