

محاسبه گنجایش آب تجمعی با بکارگیری دمای پوشش سبز گیاه در فشردگی‌های مختلف خاک

زهرا کاظمی¹، محمدرضا نیشابوری، داوود زارع حقی و حسین عسگرزاده

دانشجوی دکتری، دانشگاه تبریز؛ zkazemi2016@gmail.com

استاد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز؛ neyshmr@hotmail.com

استادیار علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز؛ davoudhaghi@tabrizu.ac.ir

استادیار علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه؛ asgarzadeh8688@gmail.com

دریافت: 96/9/4 و پذیرش: 97/2/25

چکیده

گنجایش آب تجمعی (IWC)، انتگرال تابع گنجایش آب دیفرانسیلی از مکش صفر تا بی‌نهایت با اعمال توابع وزنی ناشی از محدودیت‌های مختلف خاک است که هرکدام در دامنه‌ای از مکش می‌تواند فراهمی آب برای ریشه گیاه را کاهش دهد. انتخاب دامنه مکش برای هر محدودیت جهت ایجاد تابع وزنی اکثراً اختیاری و بدون توجه به رفتار و پاسخ گیاه معین بوده است. هدف این پژوهش محاسبه گنجایش آب تجمعی (IWC_P) بر مبنای دمای پوشش سبز گیاه (T_L) به عنوان پاسخ گیاه در مقابل محدودیت‌های مختلف خاک بود. بدین منظور سه سطح فشردگی (جرم مخصوص ظاهری (D_p) مساوی 1/35، 1/55 و 1/75 گرم بر سانتی‌متر مکعب به ترتیب معادل D_1 ، D_2 و D_3) با بکارگیری یک خاک لوم رس شنی (عبور کرده از غربال 4/76 میلی‌متر) درلوله‌های پلیکا (قطر 30 و ارتفاع 70 سانتی‌متر) با سه تکرار ایجاد شد. پس از کاشت بذور جوانه زده آفتاب‌گردان (*Helianthus Annuus L.*) در آنها و استقرار کامل گیاه، دو دوره تر و خشکی اعمال گردید. با اندازه‌گیری روزانه رطوبت خاک در سه عمق گلدانها و تبدیل آن به مکش ماتریک خاک همراه با اندازه‌گیری نیمه روز T_L ، یک تابع وزنی بر مبنای پاسخ گیاه تعریف و IWC_P محاسبه گردید. گنجایش آب تجمعی با توابع وزنی پیشنهادی گرانولت و همکاران (IWC_G) نیز محاسبه و با هم مقایسه شدند. مقادیر IWC_P و IWC_G برای تیمار D_1 به ترتیب 0/187 و 0/229 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بدست آمد. در تیمار D_3 این ارقام به 0/152 و 0/038 تنزل یافتند که معادل 19% و 84% کاهش در فراهمی آب بوده و اثر قابل توجه فشردگی خاک روی فراهمی آب را نشان می‌دهد. در میانگین سه سطح فشردگی، IWC_P و IWC_G به ترتیب 0/169 و 0/140 حاصل شد و نشان می‌دهد که فراهمی آب برای گیاه آفتاب‌گردان بر مبنای پاسخ گیاه بطور متوسط 17 درصد بیشتر از رقمی است که IWC_G برآورد کرده است. این تفاوت و تأثیر پذیری بیش از حد (84%) از فشردگی خاک نشان می‌دهد که دامنه مکش‌های پیشنهاد شده توسط گرانولت و همکاران برای محدودیت‌های مختلف و روابط تجربی بکار رفته در ایجاد توابع انتقالی به منظور لحاظ تأثیر آنها در فراهمی آب، لازم است با توجه به نیاز و پاسخ‌های گیاه مورد نظر اصلاح یا تعدیل شوند.

واژه‌های کلیدی: آفتاب‌گردان، پاسخ گیاه، توابع وزنی، گنجایش آب دیفرانسیلی

¹ نویسنده مسئول، آدرس: تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم خاک

مقدمه

تاکنون دخالت دادن تأثیر محدودیت های فیزیکی ناشی از زهکشی سریع خاک، تهویه ناکافی، مقاومت مکانیکی خاک (گرانولت و همکاران، 2001؛ گرانولت و همکاران، 2010؛ عسگرزاده و همکاران، 2010) و شوری (گرانولت و همکاران، 2004؛ نانگ و همکاران، 2010) در ایجاد تابع $\omega_i(h)$ برای محاسبه IWC به صورت عام (بدون در نظر گرفتن ویژگی یا پاسخ گیاه معین) بوده است. گزارش شده است (عُنابی میلانی، 1395) که در چنین صورتی IWC حاصله با مقدار آب قابل دسترس گیاه می تواند تفاوت فاحش داشته باشد. در این پژوهش، برای تعیین IWC بر مبنای پاسخ گیاه در سطوح مختلف فشردگی خاک به عنوان یک عامل بسیار تأثیرگذار (داسیلوا و کی، 1997؛ چان و همکاران، 2006). در فراهمی آب خاک، گیاه آفتاب گردان انتخاب شد. ریشه گیاه مذکور به فشردگی خاک حساس است (آلیاری و همکاران، 1379) و بالطبع پاسخ خوبی به آن نشان خواهد داد.

دمای پوشش سبز گیاه (T_L^6) به عنوان شاخصی ارزشمند در پایش وضعیت آبی گیاه به کار رفته است. زیرا هم راحت و سریع اندازه گیری می شود (هلیس و همکاران، 2006)) و هم ارتباط تنگاتنگ با تعرق داشته و از این رو ملاک قابل اعتمادی برای سنجش تنش حاصل از کمبود آبی در گیاه است. (ایدسو و همکاران، 1981؛ جونز، 2007). هلیس و همکاران (2006) در مطالعه خود روی گیاه لوبیا مشاهده کردند که دمای پوشش سبز با افزایش تخلیه آب قابل استفاده ناحیه ریشه (30% به 75%) از 26/2 به 32/1 درجه سلسیوس افزایش یافت. در مطالعات گونزالس-دوگو و همکاران (2012)، گارسبیا تجرو و همکاران (2012) و عُنابی میلانی و همکاران (1394) نیز اندازه گیری دمای تاج درخت توسط دماسنج مادون قرمز به عنوان یک روش کارآمد برای ارزیابی تنش آبی بویژه در شرایط آب و هوایی خشک و نیمه خشک گزارش شده است.

هدف این پژوهش محاسبه گنجایش آب انتگرالی متکی به پاسخ گیاه برای گیاه آفتاب گردان (IWC_P) با بکارگیری دمای پوشش سبز گیاه و مقایسه آن با مقادیر محاسبه شده به روش گرانولت و همکاران (2001)، (IWC_G) بود.

مواد و روش ها

مهم ترین چالش این پژوهش یافتن خاکی با بافت مناسب بود که ایجاد سطوح فشردگی مختلف در آن میسر

گرانولت و همکاران (2001)، مفهوم گنجایش آب تجمعی (IWC^1) را به جای مفاهیم رطوبت قابل دسترس برای گیاه (PAW^2)، دامنه رطوبتی بدون محدودیت ($NLWR^3$) و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ($LLWR^4$) در خاک مطرح کردند که حاصل انتگرال گنجایش آب دیفرانسیلی⁵ در دامنه مکش صفر تا بی نهایت با اعمال توابع وزنی ناشی از محدودیت های مختلف خاک است. PAW و LLWR سرعت فراهمی آب بین دو حد مکش بالا و پایین را یکنواخت فرض می کنند درحالی که IWC تغییرات فراهمی آب بین دو حد بالا و پایین را به صورت تدریجی در نظر می گیرد. علاوه بر تهویه و مقاومت مکانیکی خاک IWC محدودیت هدایت هیدرولیکی خاک ($K(h)$) و شوری خاک را نیز در قالب توابع وزنی مدنظر قرار می دهد. گرانولت و همکاران (2001) پیشنهاد کردند توابع وزنی، به صورت پیوسته در دامنه وسیع از پتانسیل آب خاک بکار روند تا بتوان اثر همه عوامل محدود کننده جذب آب روی فراهمی آب را به حساب آورد. آنان IWC به صورت زیر تعریف کردند.

(1)

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

در رابطه داده شده، $C(h)$ گنجایش آب دیفرانسیلی (شیب منحنی رطوبتی) و $\omega_i(h)$ توابع وزنی هستند که برای محدودیت های مختلف در دامنه معین از مکش تعریف شده اند. علامت Π نشان می دهد توابع وزنی ضرب پذیر هستند. در مفهوم IWC آب خاک در کل دامنه منحنی رطوبتی برای گیاه بالقوه قابل استفاده فرض می شود، اما با اعمال $\omega_i(h)$ که در هر دامنه مکش بین صفر و یک (بسته به شدت عامل محدود کننده) متغیر است، آب قابل استفاده بالقوه به بالفعل یا عینی تبدیل می شود. در صورتی که در مفهوم PAW، ضریب $\omega_i(h)$ بین مکش - های 330 و 15000 سانتی متر و در مفهوم LLWR بین حد رطوبتی بالا ((مکش معادل تخلخل تهویه ای 10% یا FC) و حد رطوبتی پایینی (مکش معادل مقاومت مکانیکی 2 مگاپاسکال یا PWP) ثابت و مساوی 1 در نظر گرفته شده است.

1. Integral water capacity

2. Plant available water

3. Least limiting water range

4. Least limiting water range

5. Differential water capacity

6. Leaf temperature

یک سانتی‌متر با پرلیت پوشانده شد تا در حد امکان مانع تبخیر آب از سطح خاک شود. در طول دوره رشد تا قبل از شروع اعمال دوره‌های تر و خشکی، رطوبت خاک گلدان‌ها در حول و حوش رطوبت معادل 33 سانتی‌متر نگه داشته شد تا گیاهان به خوبی رشد نمایند. برای پیش وضعیت رطوبت خاک به صورت روزانه از دستگاه اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی خاک² (اهم‌متر) پس از واسنجی در هر کدام از سه سطح فشردگی استفاده گردید. شروع اولین دوره خشکی از انتهای رشد رویشی با قطع آبیاری در دو گلدان (تکرار) از هر تیمار آغاز و تاملتی که گیاه پژمردگی واضح نشان داد، ادامه یافت. طول این دوره 10 روز بود و در انتهای آن و درست قبل از آبیاری مکش خاک به 11000 تا 14000 سانتی‌متر تنزل یافت. پس از یک آبیاری کامل در این مرحله، دوره دوم خشکی شروع و تا مدت دو برابر دوره اول تا جایی که گیاه توانست دوام بیاورد، ادامه یافت. آبیاری گلدان سوم به طور مرتب و با افزودن آب مورد نیاز روزانه برای نگه داشتن رطوبت در FC ادامه یافت تا مشخص شود تنش مشاهده شده به دلیل اعمال تیمارهاست نه تاثیر شرایط محیطی نظیر بالا بودن قدرت تبخیر کنندگی اتمسفر. دمای برگ (T_L) با بکارگیری دماسنج مادون قرمز به صورت روزانه در بین دوازده و نیم تا 14 نیمروز در طی 2 دوره تر و خشکی که حدوداً یک ماه به طول انجامید، در برگ‌های سبز در حال رشد قرار گرفته در یک سوم قسمت بالایی تاج گیاه اندازه‌گیری شد.

T_L به عنوان یک متغیر گیاهی تمام محدودیت-های خاک (نظیر تهویه، شوری، هدایت هیدرولیکی بالا و پایین و مقاومت مکانیکی زیاد) و گیاه (مثل هرس ریشه یا انواع آفات و بیماریها در صورت وجود) را در فراهمی آب منعکس می‌کند (گونزالس-دوگو و همکاران، 2012؛ گارسیا تجرو و همکاران، 2012؛ غنایی میلانی و همکاران، 1394). مقادیر دمای نسبی روزانه با تقسیم دمای گیاه بدون تنش (گلدان مرجع) به دمای تیمارها (T_{L0}/T_L) به بدست آمد. مکش خاک در هر زمان از اندازه-گیری رطوبت خاک از روی منحنی مشخصه رطوبتی خاک تعیین شد. مقادیر روزانه T_{L0}/T_L به عنوان تابع وزنی متکی به پاسخ گیاه $\omega_p(h)$ به صورت تابعی از مکش خاک (h) با بکارگیری نرم افزار Curve Expert تعریف شد. از بین 50 مدل پیش فرض نرم افزار مذکور، بر مبنای کمینه

باشد. پس از نمونه‌برداری و بررسی اولیه خاک چندین منطقه یک خاک لوم رس شنی از حوالی شهرستان اهر ("46' 3' 47° طول شرقی و "13' 27' 38° عرض شمالی)، استان آذربایجان شرقی با اقلیم خشک تا نیمه خشک انتخاب و به مقدار مورد نیاز تهیه شد. خاک مورد استفاده در پژوهش اینسپیسول، تیپیک هاپلو زرپتس¹ بود. برای نیل به اهداف پژوهش لازم بود گیاهی انتخاب شود که با گسترش عمقی ریشه بتواند به سطوح فشردگی خاک خوب پاسخ نشان دهد. در این راستا پس از بررسی‌ها و مطالعات انجام شده گیاه آفتاب‌گردان برای انجام این پژوهش انتخاب گردید. این پژوهش در گلخانه‌ی دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز در تابستان سال 94 به انجام رسید.

به منظور اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های خاک مورد نظر، نمونه مرکب خاک از عمق صفر تا 25 سانتی-متر تهیه و پس از هوا خشک شدن با الک 2 میلی‌متری غربال شد. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی نظیر بافت، هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع (EC)، گنجایش تبادل کاتیونی (CEC)، نیتروژن کل (N)، فسفر قابل جذب (P) و پتاسیم قابل جذب (K)، رطوبت‌های معادل مکش-های 330 و 15000 سانتی‌متر به روش‌های متداول آزمایشگاهی (کلات، 1986 و اسپارکس و همکاران، 1996) اندازه‌گیری شدند. پس از بررسی نتایج آزمون خاک مقدار نیتروژن مورد نیاز در دو مرحله (قبل از کشت و در مرحله گلدهی) و مقدار فسفر در یک مرحله (قبل از کشت) بر اساس دستورالعمل شرکت دانه‌های روغنی (1375) مشخص و به خاک افزوده شد.

محاسبه IWC بر مبنای پاسخ گیاه

سه سطح جرم مخصوص ظاهری (D_b معادل 1/35، 1/55 و 1/75 گرم بر سانتی‌متر مکعب، به ترتیب D_1 ، D_2 و D_3) با ریختن خاک مورد نیاز در لوله‌های پلیکا (که از این به بعد گلدان نامیده می‌شوند) با قطر 30 و ارتفاع 70 سانتی‌متر به روش زارع حقی و همکاران (1393) ایجاد شد. سه سطح D_b انتخاب شده به ترتیب نشانه فشرده نبودن، فشردگی متوسط و فشردگی شدید در خاک بکار رفته تلقی گردید. با توجه به سنگینی کار و نیاز به انتقال حجم بالای خاک از صحرا به آزمایشگاه 3 تکرار برای هر سطح D_b در نظر گرفته شد و در مجموع 9 گلدان در قالب طرح کاملاً تصادفی (CRD) در گلخانه چیده شدند. بذور جوانه‌دار شده آفتاب‌گردان به تعداد 3 عدد در هر گلدان کشت شدند. سطح خاک هر گلدان به ضخامت

² Soiltest , Inc. Evanston, Illinois USA

¹ Inceptisoil Typic Haplozerepts

نیشابوری و همکاران (2014) و کاظمی و همکاران (1393) گزارش شده است. پارامترهای مدل منحنی رطوبتی ون گنوختن (1980) (معادله 3) و مدل توانی که توسط گرانولت و همکاران، (2001) و عسگرزاده و همکاران، (2010) استفاده شده است، (معادله 5)، از برازش دو مدل به داده های مذکور مشخص شدند.

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (ah)^n]^{(1-n)/n} \quad (3)$$

در رابطه بالا θ رطوبت حجمی بر حسب سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب، h مکش بر حسب سانتی متر و α ، θ_s و θ_r پارامترهای برازش منحنی هستند که با بکارگیری نرم افزار RETC (ون گنوختن و همکاران، 1991) به دست آمدند. واحد α یک بر سانتی متر و n بدون واحد است. مشتق معادله 3 (گنجایش آب دیفرانسیلی، $C(h)$) تعریف شده و به صورت زیر به دست می آید (ون گنوختن، 1980).

$$c(h) = (\theta_s - \theta_r)(n-1)h^{-1}(ah)^{n-1} [1 + (ah)^n]^{-\frac{1}{n}} \quad (4)$$

برای منحنی مقاومت مکانیکی خاک مدل نمایی زیر به کار گرفته شد.:

$$sr = ah^b \quad (5)$$

در معادله مذکور h مکش خاک بر حسب سانتی متر و SR مقاومت مکانیکی خاک بر حسب مگاپاسکال است. a (مگاپاسکال بر سانتی متر) و b بدون بعد، پارامترهای برازش هستند.

با بکارگیری ضرایب منحنی رطوبتی ون گنوختن، مقادیر هدایت هیدرولیکی غیر اشباع خاک ($K(h)$) از مدل ون-گنوختن (1980) - معلم (1976) (معادله 6) محاسبه شد.

$$k_r(h) = \left[1 - (ah)^{n-1} [1 + (ah)^n]^m \right]^2 [1 + (ah)^n]^{-m/2}, m = (n-1)/n \quad (6)$$

با بکارگیری معادلات 3 الی 6 و دامنه مکش-های پیشنهادی گرانولت و همکاران (2001) برای هرکدام از محدودیت های تهویه، زهکشی سریع، مقاومت مکانیکی و هدایت هیدرولیکی کم IWC برای هر کدام از سه تیمار D_1 ، D_2 و D_3 محاسبه و با IWC_p مقایسه گردید.

خطا و بیشینه ضریب همبستگی مدل منحنی فشار بخار¹ به صورت زیر بهترین مدل شناخته شد.

$$\omega_p(h) = \exp(a + b/x + c \ln(x)) \quad (2)$$

در رابطه مذکور a ، b ، c ضرایب تجربی هستند که برای هر تیمار D_b از طریق برازش داده ها به مدل بدست آمد. با بکارگیری این ضرایب در تابع 2 مقادیر $\omega_p(h)$ در هر مکش تعیین و با قرار دادن آنها در رابطه 1 مقادیر IWC_p در هر تیمار محاسبه گردید. محدوده مکش در محاسبات بین صفر تا مکش نهایی که گیاهان در دوره دوم خشکی تا آن مکش زنده ماندند، بسته به سطح فشردگی متغیر بود.

تعیین IWC به روش گرانولت و همکاران (2001)

همانطوری که از رابطه 1 مشخص است برای محاسبه IWC به روش گرانولت و همکاران (2001) لازم است اولاً رابطه بین θ و h که در قالب منحنی رطوبتی (WRC^2) در نظر گرفته می شود تعیین شود و ثانیاً برای محدودیت های مختلف در دامنه خشک و مرطوب منحنی رطوبتی، ضرایب وزنی تعیین شود.

تعیین منحنی های مشخصه آب و مقاومت مکانیکی خاک به منظور تعیین منحنی های مشخصه آب (WRC) و مقاومت مکانیکی (SR^3) خاک، همزمان با آماده سازی گلدان ها، تعداد 2 تشت (با قطر 35 و عمق 12 سانتی متر) برای هر کدام از سه سطح فشردگی (D_1 ، D_2 ، D_3) از خاک مورد نظر پر شدند. این تشت ها در گلخانه در شرایط مشابه با گلدان ها چندین مرتبه تحت دوره ترو خشک قرار گرفتند و سپس نمونه برداری از آنها انجام شد. برای تعیین رطوبت در مکش های 0 تا 1000 سانتی متر، از استوانه های نمونه برداری با قطر و ارتفاع 5 سانتی متر و در مکش های 5000 و 15000 سانتی متر از حلقه های نمونه برداری با قطر 5 و ارتفاع 1 سانتی متر استفاده شد (عسگرزاده و همکاران، 2014). (کلات، 1986).

از هر سطح D_b ، تعداد 7 نمونه بهم نخورده با استوانه ها و 2 نمونه با حلقه ها تهیه شد. با احتساب سه سطح فشردگی، در مجموع 27 نمونه تهیه شد. با بکارگیری این نمونه ها و با استفاده از وسایل ستون آب آویزان، صفحات فشار و فروسنج مخروطی دیجیتالی داده های رطوبت- مکش ($h-\theta$) و مقاومت مکانیکی خاک- مکش ($SR-\theta$) بدست آمدند. جزئیات کار توسط

1. Vapor pressure model

2. Water release curve

3. Soil resistance curve

نتایج و بحث

گیاه (IWC_p)، برای تیمارهای مختلف فشردگی خاک (D₁، D₂ و D₃)، در جدول 4 ارائه شده است. بافت خاک بکار رفته لوم رس شنی بود (جدول 1). درصد کربن آلی (OC)، هدایت الکتریکی (EC) و کربنات کلسیم معادل (CCE) خاک در حد کم بوده و خاک مشکل شوری یا آهکی بودن را نداشت. حد آستانه شوری برای آفتاب گردان 4/8 دسی زیمنس بر متر گزارش شده است (فائو 1985).

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده در پژوهش در جدول 1، مقادیر پارامترهای مدل ون گنوختن و منحنی مقاومت مکانیکی خاک، ضریب تبیین (R²) و حداقل مربعات خطا (SSE) برای سه تیمار D₁، D₂ و D₃ در جدول 2، ضرایب a، b و c توابع وزنی حاصل برای مدل فشار بخار برای سه تیمار فشردگی خاک در جدول 3 و مقادیر IWC محاسبه شده به دو روش گرانولت و همکاران (2001) (IWC_G) و بر مبنای دمای پوشش سبز

جدول 1- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده در پژوهش

شن	سیلت	رس	هدایت الکتریکی	کربن آلی	کربنات کلسیم معادل	نیترژن کل	فسفر قابل جذب	پتاسیم قابل جذب	رطوبت در مکش	رطوبت در مکش
(%)	(%)	(%)	(dS m ⁻¹)	(%)	(%)	(%)	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	cm ³ cm ⁻³	cm ³ cm ⁻³
52	26	22	1/3	1/36	3/4	0/116	12/44	262/15	0/122	0/311

جدول 2- مقادیر پارامترهای مدل ون گنوختن و مدل توانی منحنی مقاومت مکانیکی خاک، ضریب تبیین (R²) و حداقل مربعات خطا (SSE) برای سه تیمار D₁، D₂ و D₃

تیمارها	پارامترهای مدل ون گنوختن					پارامترهای مدل توانی منحنی مقاومت مکانیکی خاک					
	θ _r	θ _s	α	n	m	R ²	SSE	a	b	R ²	SSE
	(cm ³ cm ⁻³)	(cm ³ cm ⁻³)	cm ⁻¹	-	-	-	MPa cm ⁻¹	-	-	-	-
D ₁	0/513	0/000	0/033	1/200	0/166	0/990	0/002	0/071	0/335	0/984	0/028
D ₂	0/470	0/000	0/019	1/176	0/150	0/974	0/012	0/160	0/273	0/996	0/008
D ₃	0/414	0/000	0/004	1/190	0/160	0/966	0/002	0/321	0/223	0/911	0/267

D₁، D₂ و D₃ به ترتیب نشان دهنده تیمارهای با جرم مخصوص ظاهری مساوی 1/35، 1/55 و 1/75 مگاگرم بر متر مکعب است.

جدول 3- ضرایب a و b حاصل برای مدل فشار بخار (y=exp(a+b/x+cln(x))) برای تیمارهای مختلف فشردگی خاک (D₁، D₂ و D₃) و R (ضریب همبستگی مدل)

تیمار	a	b	C	R
D ₁	0/960	-58/489	-0/196	0/80
D ₂	2/012	-69/291	-0/351	0/77
D ₃	1/754	-69/243	-0/281	0/68

D₁، D₂ و D₃ به ترتیب نشان دهنده تیمارهای با جرم مخصوص ظاهری (D_b) مساوی 1/35، 1/55 و 1/75 گرم بر سانتی متر مکعب است.

جدول 4- مقادیر IWC_p و IWC_G در تیمارهای مختلف فشردگی خاک (D₁، D₂ و D₃)

تیمارهای فشردگی	D ₁	D ₂	D ₃
IWC _p (cm ³ cm ⁻³)	0/187	0/170	0/152
IWC _G (cm ³ cm ⁻³)	0/229	0/154	0/038

D₁، D₂ و D₃ به ترتیب نشان دهنده تیمارهای با جرم مخصوص ظاهری (D_b) مساوی 1/35، 1/55 و

1/75 گرم بر سانتی متر مکعب است.

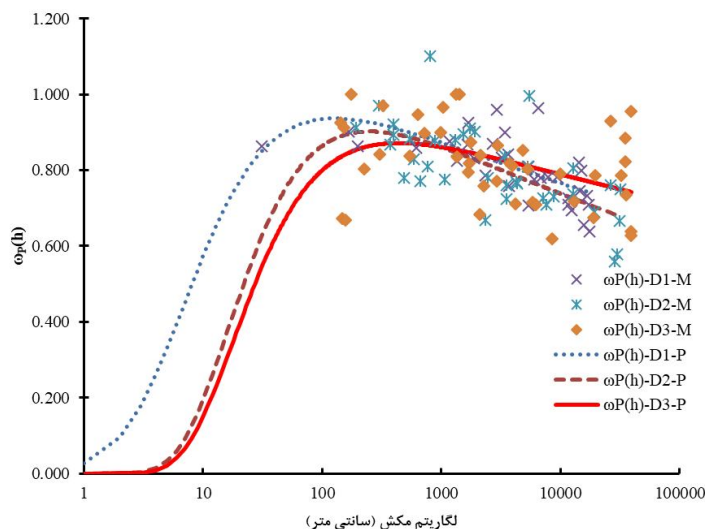
در مقایسه با IWC_G احتمالاً به این دلیل باشد که در توابع وزنی گرانولت و همکاران (2001) تاثیر شرایط محیطی نظیر قدرت تبخیر کنندگی اتمسفر مد نظر قرار نگرفته اند در حالی که تاثیر تمام عوامل محیطی در گلخانه و شدت تعرق ناشی از آن در دمای برگ منعکس می شود و در نهایت تاثیر تمام عوامل تاثیرگذار بر فراهمی آب و مقدار IWC در قالب تابع وزنی $\omega_p(h)$ دیده می شود.

نتایج پژوهش عسگرزاده و همکاران (2014) نشان داد مقاومت مکانیکی واقعی خاک در مقابل ریشه در شرایط مزرعه می تواند بمراتب کمتر از مقام مکانیکی اندازه گیری شده با فروسنج مخروطی در آزمایشگاه باشد. با بکارگیری رابطه تجربی ارائه شده ($SR_{Lab} + 0/5048$) با بکارگیری رابطه تجربی ارائه شده ($SR_{Field} = 0/3575$) توسط عسگرزاده و همکاران (2014) با تبدیل SR اندازه گیری شده آزمایشگاهی به مزرعه ای مشاهده شد که در هیچ یک از تیمارهای فشردگی خاک، مقاومت مکانیکی در دامنه محدودکننده ($1/5$ تا $2/5$ مگاپاسکال) نبود بنابراین مقادیر IWC محاسبه شده بعد از تبدیل مقاومت مکانیکی آزمایشگاهی به مزرعه ای (IWC_{GM})، نسبت به مقادیر IWC_G بیشتر بود. در محاسبه IWC_{GM} و بر مبنای رابطه تجربی ذکر شده، حتی برای تیمار D_3 در محدوده صفر تا 15000 سانتی متر محدودیت مقاومت مکانیکی مشاهده نمی شود و SR معادل $1/5$ ، 2 و $2/5$ مگاپاسکال به ترتیب در مکش های ماتریک 19230، 24000 و 158000 سانتی متر اتفاق می افتد. در مورد IWC_{GM} در دامنه مکش 983 تا 2734 سانتی متر محدودیت تهویه وجود داشت ولی از مکش 2734 تا 12000 سانتی متر که پس از آن $K(h)_{dry}$ فراهمی آب را پائین، هیچ گونه محدودیتی برای جذب آب وجود نداشت و مقدار ω مساوی 1 بود. بنابراین مقدار IWC_{GM} برای تیمار D_3 مساوی 0/094 سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب بدست آمد که خیلی بزرگتر از IWC_G (0/038) بود. این مقایسه هم باز غیر واقعی بودن ضریب وزنی اعمال شده برای مقاومت مکانیکی خاک در روش گرانولت و همکاران را تأیید می کند.

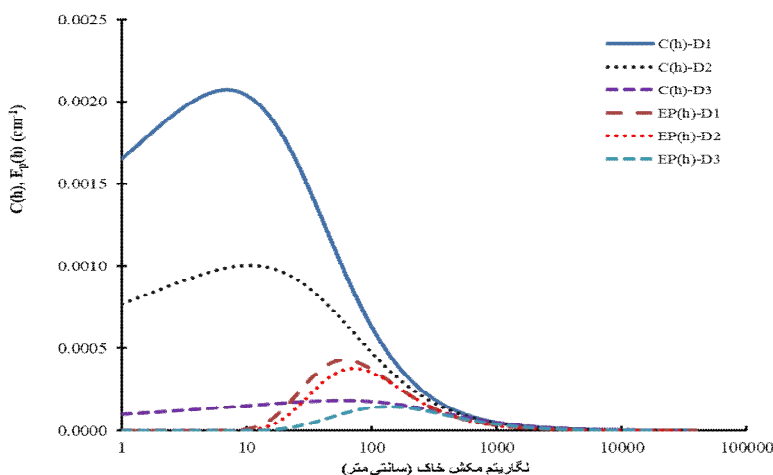
تابع وزنی بسط یافته ($\omega_p(h)$) بر مبنای پاسخ گیاه برای تیمارهای D_1 ، D_2 و D_3 در شکل 1، مقادیر $C(h)$ و $E_p(h)$ در شکل 2 و مقادیر توابع وزنی ($\omega_i(h)$) و IWC_G برای تیمارها در دامنه مکش های مختلف در جدول 5 ارائه شده است.

نگاه به جدول 4 تأثیر قابل توجه فشردگی هم روی $IWCG$ و هم روی $IWCP$ را بخوبی نشان می دهد. افزایش فشردگی خاک از $1/35$ به $1/75$ مقدار $IWCG$ را از $0/229$ به $0/038$ کاهش داده که معادل افت 83 درصد در آب قابل استفاده است. اینکه آیا این کاهش واقعی است یا ناشی از اعمال ضریب وزنی، $\omega_i(h)$ ، غیر معقول برای فشردگی، جای حرف دارد. کاهش در $IWCP$ ناشی از فشردگی، نزدیک به 19 درصد بوده که بسیار کمتر از 83 درصد است. این تفاوت نشان می دهد که حساسیت یا پاسخ عینی آفتاب گردان به فشردگی بمراتب کمتر از آن است که در محاسبه $IWCG$ در قالب ضریب وزنی منظور می شود. غنایی میلانی (1395) نیز با بکارگیری شاخص هدایت روزنه ای در درخت بادام یک تابع وزنی مشابه برای محاسبه IWC در سطوح مختلف شوری تعریف کرد. نتایج ایشان نیز نشان داد $IWCG$ 14 درصد کوچکتر از $IWCP$ بود. با افزایش فشردگی خاک از D_1 به D_2 مقدار کاهش در $IWCP$ کمتر از 10 درصد بود در حالیکه برای $IWCG$ این کاهش 33 درصد بود که باز قابل توجه است. میانگین $IWCG$ و $IWCP$ روی سه سطح فشردگی به ترتیب $0/169$ و $0/140$ است (در جدول نشان داده نشده). مقادیر کوچکتر IWC_G در مقایسه با مقادیر IWC_p به دلیل محدودیت های مقاومت مکانیکی زیاد خاک و تهویه نامناسب به ترتیب در دامنه خشک و خیس منحنی مشخصه رطوبتی در تعریف گرانولت و همکاران (2001) است. مطابق تعریف مذکور، دامنه مکش (h) محدود کننده برای تهویه 983 تا 2734 و برای مقاومت مکانیکی 1007 تا 9935 سانتی متر در نظر گرفته شده است.

بعبارت دیگر در مکش های ماتریک بالاتر از 9935 سانتی متر با وجود اینکه $0/209$ سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب رطوبت در خاک وجود دارد اما این رطوبت از نظر گرانولت و همکاران (2001) برای گیاه غیرقابل استفاده محسوب شده است. از این رو حداقل برای گیاه آفتاب گردان در خاک های با سطوح فشردگی زیاد، روش گرانولت و همکاران (2001) مقدار IWC را به خاطر حدود بحرانی مکش که برای SR ، محدودیت تهویه و هدایت هیدرولیکی خاک در نظر گرفته است، مقدار آب قابل استفاده را خیلی کم برآورد می کند. برای تعمیم این یافته لازم است پژوهش های بیشتر بر روی گیاهان و خاک های مختلف به ویژه در شرایط مزرعه انجام شود. برای فشردگی های کم، کوچکتر بودن مقدار IWC_p



شکل 1- تابع وزنی توسعه یافته بر مبنای پاسخ گیاه $\omega_p(h)$ برای تیمارهای D_3 و D_2 ، D_1 و M به ترتیب نشان دهنده داده‌های اندازه‌گیری شده و بدست آمده از طریق نرم‌افزار Curve Expert هستند



شکل 2- $C(h)$ و $E_p(h)$ محاسبه شده بر مبنای پاسخ گیاه به عنوان تابعی از مکش ماتریک خاک برای تیمارهای D_3 و D_2 ، D_1

جدول 5 - دامنه مکش (h)، توابع وزنی $\omega_i(h)$ و IWC_G برای تیمارهای مختلف فشردگی خاک (D_1 ، D_2 ، D_3)

D ₁			D ₂			D ₃		
h (cm)	$\omega_i(h)$	IWC_G ($cm^3 cm^{-3}$)	h (cm)	$\omega_i(h)$	IWC_G ($cm^3 cm^{-3}$)	h (cm)	$\omega_i(h)$	IWC_G ($cm^3 cm^{-3}$)
0-69/7	$\omega_{ak}(h)_{wet}$	0	0-170	$\omega_{ak}(h)_{wet}$	0	0-983	$\omega_{ak}(h)_{wet}$	0
69/7-155	$\omega_{ak}(h)_{wet}$	0/021	330-170	$\omega_{ak}(h)_{wet}$	0/012	983-1007	$\omega_a(h)$	0/0001
155-330	$\omega_k(h)_{wet}$	0/044	330-440	$\omega_k(h)_{wet}$	0/013	1007-2734	$\omega_{aR}(h)$	0/019
330-8973	1	0/151	440-3561	1	0/096	2734-9935	$\omega_R(h)$	0/019
8973-12000	$\omega_R(h)$	0/009	3561-12000	$\omega_R(h)$	0/031	12000-9935	$\omega_{Rk}(h)_{dry}$	0
12000-15000	$\omega_{Rk}(h)_{dry}$	0/0004	12000-15000	$\omega_{Rk}(h)_{dry}$	0/002	15000-12000	$\omega_{Rk}(h)_{dry}$	0

زیر پسوند های R ، k ، a به ترتیب نشان دهنده محدودیت فراهمی آب ناشی از تهویه، هدایت هیدرولیکی و مقامت مکانیکی خاک به تنهایی و یا باهم است. ضریب وزنی 1 نشان دهنده نبودن محدودیت فراهمی آب در دامنه مکش نشان داده شده است.

همانطور که جدول 5 نشان می دهد، در تیمار D_1 طبق تعریف گرانولت و همکاران (2001) در مکش کمتر از $69/7$ سانتی متر رطوبت خاک به دلیل محدودیت تهویه، غیر قابل دسترس برای گیاه به حساب می آید. در دامنه 330 تا 8973 سانتی متر، هیچگونه محدودیتی برای جذب آب وجود نداشت (ω مساوی 1). از مکش 8973 تا 12000 سانتی متر، محدودیت هدایت هیدرولیکی کم و از آن به بعد محدودیت های هدایت هیدرولیکی کم و مقاومت مکانیکی زیاد توأم بر فراهمی آب تاثیرگذار بودند (جدول 5). در روش پاسخ گیاهی، در تیمار D_1 فراهمی آب از مکش نزدیک 10 سانتی متر شروع شد و به تدریج با افزایش $\omega_p(h)$ مقدار جذب نیز افزایش یافت. بیشینه مقدار ضریب وزنی گیاهی در مکش حول و حوش 268 سانتی متر اتفاق افتاد (شکل 1). مقدار $E_p(h)$ در این دامنه مساوی $0/076$ بود و دخالت دادن $\omega_p(h)$ گنجایش آب دیفرانسیلی را حدود 60 درصد کاهش داد (شکل 2) (22 درصد کمتر از روش گرانولت و همکاران (2001)).

پس از مکش 268 سانتی متر با کاهش ضریب وزنی، فراهمی آب تا مکش حدود 39188 سانتی متر ادامه می یابد (شکل های 1 و 2) که بسیار بزرگتر از مکش 15000 سانتی متر است و به عنوان مکش حد نهایی جذب مدنظر قرار می گیرد. چاهال (2010) نیز در یک مطالعه گلخانه ای بر روی ذرت مشاهده نمود در خاک با بافت شن لومی، فراهمی آب تا مکش 23986 سانتی متر ادامه یافت.

مقدار $E_p(h)$ در سیر نزولی منحنی تابع وزنی برای تیمار D_1 مساوی $0/111$ بر سانتی متر بود (شکل 2) و دخالت دادن $\omega_p(h)$ گنجایش آب دیفرانسیلی را در محدوده مذکور حدود 45 درصد کاهش داد. در روش گرانولت و همکاران (2001) دخالت دادن ضریب وزنی مقدار گنجایش آب دیفرانسیلی را در محدوده مکش 268 تا 15000 سانتی متر تنها 3 درصد کاهش داد. در حقیقت بیشتر رطوبت قابل دسترس گیاه در روش گرانولت و همکاران (2001) در این محدوده قرار دارد و به دلیل عدم اعمال هر گونه محدودیت برای فراهمی آب در این محدوده (جدول 5)، مقدار IWC_G بزرگتر از IWC_P فراهمی به دست آمد، در حالیکه بر مبنای IWC_P فراهمی رطوبت از مکش پایین تر از $69/8$ سانتی متر نیز شروع شده بود (جدول 5).

برای تیمار D_3 ، در روش گرانولت و همکاران (2001) که در مکش های کمتر از 983 سانتی متر، مقدار فراهمی آب مساوی صفر بود (جدول 5)، در روش پاسخ گیاهی در محدوده مذکور به مقدار قابل توجهی فراهمی آب برای گیاه آفتاب گردان وجود داشت ($0/072$ سانتی - متر مکعب بر سانتی متر مکعب) (شکل 2)، $\omega_{pmax}(h)$ در این تیمار در مکش 410 سانتی متر اتفاق افتاد (شکل 1). $E_p(h)$ در محدوده مکش صفر تا 410 سانتی متر مساوی $0/028$ بر سانتی متر بود (شکل 2) و دخالت دادن $\omega_p(h)$ گنجایش آب دیفرانسیلی را حدود 30 درصد کاهش داد. در روش گرانولت و همکاران (2001) برای تیمار D_3 ، جذب آب از مکش 983 سانتی متر شروع و پس از رفع محدودیت تهویه در مکش 2734 سانتی متر تا مکش 9935 سانتی متر (مقاومت مکانیکی $2/5$ مگاپاسکال) فراهمی آب ادامه یافت و در مکش های ماتریک بالاتر از

همانطور که جدول 5 نشان می دهد، در تیمار D_1 طبق تعریف گرانولت و همکاران (2001) در مکش کمتر از $69/7$ سانتی متر رطوبت خاک به دلیل محدودیت تهویه، غیر قابل دسترس برای گیاه به حساب می آید. در دامنه 330 تا 8973 سانتی متر، هیچگونه محدودیتی برای جذب آب وجود نداشت (ω مساوی 1). از مکش 8973 تا 12000 سانتی متر، محدودیت هدایت هیدرولیکی کم و از آن به بعد محدودیت های هدایت هیدرولیکی کم و مقاومت مکانیکی زیاد توأم بر فراهمی آب تاثیرگذار بودند (جدول 5). در روش پاسخ گیاهی، در تیمار D_1 فراهمی آب از مکش نزدیک 10 سانتی متر شروع شد و به تدریج با افزایش $\omega_p(h)$ مقدار جذب نیز افزایش یافت. بیشینه مقدار ضریب وزنی گیاهی در مکش حول و حوش 268 سانتی متر اتفاق افتاد (شکل 1). مقدار $E_p(h)$ در این دامنه مساوی $0/076$ بود و دخالت دادن $\omega_p(h)$ گنجایش آب دیفرانسیلی را حدود 60 درصد کاهش داد (شکل 2) (22 درصد کمتر از روش گرانولت و همکاران (2001)).

پس از مکش 268 سانتی متر با کاهش ضریب وزنی، فراهمی آب تا مکش حدود 39188 سانتی متر ادامه می یابد (شکل های 1 و 2) که بسیار بزرگتر از مکش 15000 سانتی متر است و به عنوان مکش حد نهایی جذب مدنظر قرار می گیرد. چاهال (2010) نیز در یک مطالعه گلخانه ای بر روی ذرت مشاهده نمود در خاک با بافت شن لومی، فراهمی آب تا مکش 23986 سانتی متر ادامه یافت.

مقدار $E_p(h)$ در سیر نزولی منحنی تابع وزنی برای تیمار D_1 مساوی $0/111$ بر سانتی متر بود (شکل 2) و دخالت دادن $\omega_p(h)$ گنجایش آب دیفرانسیلی را در محدوده مذکور حدود 45 درصد کاهش داد. در روش گرانولت و همکاران (2001) دخالت دادن ضریب وزنی مقدار گنجایش آب دیفرانسیلی را در محدوده مکش 268 تا 15000 سانتی متر تنها 3 درصد کاهش داد. در حقیقت بیشتر رطوبت قابل دسترس گیاه در روش گرانولت و همکاران (2001) در این محدوده قرار دارد و به دلیل عدم اعمال هر گونه محدودیت برای فراهمی آب در این محدوده (جدول 5)، مقدار IWC_G بزرگتر از IWC_P فراهمی به دست آمد، در حالیکه بر مبنای IWC_P فراهمی رطوبت از مکش پایین تر از $69/8$ سانتی متر نیز شروع شده بود (جدول 5).

برای تیمار D_2 در روش گرانولت و همکاران (2001)، جذب آب از مکش 170 سانتی متر (θ_{app} معادل 10 درصد) شروع شد. در مکش های کمتر از آن، فراهمی آب صفر بود. از مکش 440 تا 3561 سانتی متر، هیچگونه

آب تاثیرگذار بوده است. برای تیمارهای با فشردگی کم اینگونه استدلال می‌شود که در شاخه نزولی هدایت هیدرولیکی کم در مقایسه با مقاومت مکانیکی زیاد بیشتر محدود کننده باشد اگر چه این مساله نیز در پژوهش حاضر مورد آزمایش قرار نگرفته و اثبات نشده است.

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر تغییرات نسبی روزانه دمای پوشش سبز گیاه آفتاب‌گردان به عنوان شاخص گیاهی در ایجاد تابع وزنی $w_p(h)$ برای محاسبه IWC_p و مقایسه آن با IWC_G بکار رفت. این روش IWC_p تیمارهای D_2 و D_3 را به ترتیب 75% و حدود 9/5% بزرگتر از IWC_G برای همان تیمارها و برای تیمار D_1 حدود 20% کمتر از روش گرانولت و همکاران (2001) برآورد کرد. برای تیمارهای D_1 ، D_2 و D_3 ، بیشینه مقدار $w_p(h)$ و در نتیجه بیشینه فراهمی آب به ترتیب در مکش‌های 198، 268 و 410 سانتی‌متر، معادل تخلخل تهویه‌ای 18%، 11% و 6% اتفاق افتاد. نتایج مذکور نشان می‌دهد ضرایب وزنی پیشنهاد شده توسط ابداع کنندگان IWC ممکن است برای گیاهان و خاک‌های مختلف به طور قابل توجهی متفاوت باشد و باید مورد بازنگری قرار گیرد. برای تیمارهای با جرم مخصوص ظاهری زیاد، روش گرانولت و همکاران (2001) به دلیل مقادیر تعریف شده محدودکننده برای تهویه و مقاومت مکانیکی خاک، حداقل برای گیاه آفتاب‌گردان و در این پژوهش به طور اغراق-آمیزی مقدار IWC را کوچکتر از مقدار واقعی آن برآورد کرد. روش استفاده از دمای پوشش سبز گیاه بعنوان پاسخ گیاه به فراهمی آب خاک نشان داد، برای این تیمارها محدودیت تهویه در مکش‌های کمتر از معادل تخلخل تهویه‌ای 10% رفع و جذب آب تا مکش‌هایی بالاتر از معادل مقاومت مکانیکی 2/5 مگاپاسکال ادامه می‌یابد. پیشنهاد می‌شود این پژوهش برای گیاهان و خاک‌های با بافت‌های مختلف در شرایط مزرعه و شرایط مختلف قدرت تبخیر کنندگی اتمسفر تکرار شود تا بتوان به طور دقیق در محدوده خیس و خشک منحنی رطوبتی، محدودیت‌های مختلف خاک برای جذب آب را از یکدیگر مجزا نمود.

9935 سانتی‌متر، به دلیل مقاومت مکانیکی زیاد 2/5 مگاپاسکال، رطوبت خاک توسط گیاه غیرقابل جذب فرض شده است (جدول 5). در حالیکه بررسی فراهمی آب با استفاده از دمای پوشش سبز گیاه بعنوان پاسخ گیاه، نشان داد که جذب آب توسط گیاه آفتاب‌گردان در این تیمار تا مکش حدود 17000 سانتی‌متر ادامه دارد (شکل-های 1 و 2). در شاخه نزولی منحنی تابع وزنی، $E_p(h)$ معادل 0/124 بر سانتی‌متر بود (شکل 2). در اینجا دخالت دادن $w_p(h)$ گنجایش آب دیفرانسیلی را حدود 34 درصد کاهش داد در حالیکه این کاهش در روش گرانولت و همکاران (2001) حدود 80% بود. در این تیمار برخلاف دو تیمار قبلی مقدار IWC_p بزرگتر از IWC_G به دست آمد. در این تیمار، در مقایسه با دو تیمار D_1 و D_2 عدم تطابق بیشتر بین دو روش محاسبه IWC ، باعث تفاوت بیشتر مقادیر IWC_p و IWC_G گردید.

از طرف برای تیمارهای D_1 ، D_2 و D_3 ، بیشینه مقدار w_p در تخلخل‌های تهویه‌ای به ترتیب معادل 18%، 11% و 6% اتفاق افتاد که مغایر با مقدار 10% است که توسط پژوهش‌گران مختلف (داسیلوا و همکاران، 1994؛ گرانولت و همکاران، 2001؛ عسگرزاده و همکاران، 2010 و عسگرزاده و همکاران، 2014) برای همه گیاهان و خاک‌ها به عنوان مقدار بحرانی تخلخل تهویه‌ای برای محاسبه $LLWR$ و IWC در نظر گرفته شده است. مقادیر تخلخل تهویه‌ای در بیشینه w_p بدست آمده بر مبنای شاخص هدایت روزنه‌ای برای این تیمارها نیز مغایر با مقدار 10% ارائه شده در منابع بود. نتایج مربوط به هدایت روزنه‌ای در این پژوهش ارائه نشده است.

در روش پاسخ گیاهی در شاخه صعودی منحنی تابع وزنی (شکل 1) محدودیت تهویه و هدایت هیدرولیکی زیادی خاک و در شاخه نزولی محدودیت مقاومت مکانیکی زیاد و هدایت هیدرولیکی کم وجود دارد ولی امکان تفکیک دقیق آنها در این پژوهش وجود نداشت اما با توجه به اینکه مقدار هدایت هیدرولیکی در مکش اشباع برای تیمار D_3 60% مقدار آن برای تیمار D_1 بود و از آنجا که به دلیل فشردگی زیاد خاک اکثر منافذ ماکرو از بین رفته‌اند، اینگونه استدلال می‌شود که در تیمار D_3 در شاخه صعودی منحنی تابع وزنی (شکل 1)، تهویه نامناسب و در شاخه نزولی نیز، محدودیت هدایت هیدرولیکی کم و مقاومت مکانیکی زیاد خاک بر جذب

فهرست منابع:

1. آلیاری، ه.، شکاری، ف. و شکاری، ف. 1379. دانه های روغنی زراعت و فیزیولوژی. نشر عمیدی، تبریز، ایران.
2. زارع حقی، د.، نیشابوری، م. ر.، گرجی، م.، صادقزاده ریحان، م. ا. و عمارت پرداز، جاوید. 1393. ارزیابی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در دانه های پسته رقم سرخسی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. جلد 28. شماره 2: 353-363.
3. شرکت دانه های روغنی. 1375. آمار تولید و مصرف روغن در طی دهه های اخیر و دلایل افزایش و کاهش آن. انتشارات شرکت سهامی توسعه کشت دانه های روغنی. تهران.
4. غنّابی میلانی، ا. 1395. ارزیابی شاخص های LLWR و IWC در سطوح مختلف شوری خاک با استفاده از سرعت صعود شیره آوندی در درخت بادام. پایان نامه دکتری علوم و مهندسی خاک. دانشگاه تبریز.
5. غنّابی میلانی، ا.، نیشابوری، م. ر.، مصدقی، م. ر. و زارع حقی، د. 1394. واکنش هدایت روزنه ای به تغییرات پتانسیل آب برگ و دمای تاج در درخت بادام تحت تنش شوری و کمبود آب. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. جلد 29. شماره 3: 297-316.
6. کاظمی، ز.، نیشابوری، م. ر.، بیات، ح.، اوستان ش.، و مقدم، م. 1393. کارایی مدل های برآورد دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در خاک. نشریه پژوهش های خاک: ج. 28. شماره 4: 688-699.
7. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A., and Dexter, A.R. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant and Soil*. 335(1-2): 229-244.
8. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., and Nikbakht, A.M. 2014. SAWCAL: A user friendly program for calculating soil available water quantities and physical quality indices. *Computers and electronics in agriculture*. 109:86-93.
9. Chahal, S.S. 2010. Evaluation of soil hydraulic limitations in determining plant-available-water in light textured soils. PhD thesis. School of Agriculture, Food and Wine. The University of Adelaide. Adelaide, South Australia, Australia.
10. Chan, K.Y., Oates, A., Swan, A.D., Hayes, R.C., Dear, B.S., and Peoples. M.B. 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil Till Res* 89:13-21
11. da Silva, A.P., Kay, B.D., and Perfect, E. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *J. Soil Sci. Soc. Am.* 58:1775-1781
12. da Silva, A.P., and Kay, B.D. 1997 Estimating least limiting water range of soils from properties and management. *J. Soil Sci. Soc. Am.* 61:877-883.
13. FAO. 1985. *Irrigation Water Management: Introduction to Irrigation Chapter 7: Salty Soils*.
14. García-Tejero, I., Durán-Zuazo, V.H., Arriaga, J., Hernández, A., Vélez, L.M., and Muriel-Fernández, J.L. 2012. Approach to assess infrared thermal imaging of almond trees under water-stress conditions. *Fruits* 67: 463-474.
15. Gee, G.W., and Or, D. 2002. Particle size analysis. In Dane, J.H., Topp, C.G. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 4, Physical Methods*. SSSA Book Series 5.3. SSSA, Madison, WI. USA. pp: 255-293.
16. Grant, C.D., Groenevelt, P.H., Robinson, N.I., and Chahal, S.S. 2010. The matric flux potential as a measure of plant-available water in soils restricted by hydraulic properties alone. 19th World Congress of Soil Science, *Soil Solutions for a Changing World*.
17. Groenevelt, P.H., Grant, C.D., and Semetsa, S. 2001. A new procedure to determine soil water availability. *Australian Journal of Soil Research* 39: 577-598.
18. Groenevelt, P.H., Grant, C.D., and Murray, R.S., 2004. On water availability in saline soils. *Australian Journal of Soil Research* 42: 833-840.

19. Gonzalez-Dugo, V., P. Zarco-Tejada, J.A.J., Berni, L., Suarez, D., Goldhamer, and Fereres, E. 2012. Almond tree canopy temperature reveals intra-crown variability that is water stress-dependent. *Agric. Forest Meteorol.* 154–155: 156–165.
20. Helyes, L., Pék, Z., and McMichael, B. 2006. Relationship between the stress degree day index and biomass production and the effect and timing of irrigation in snap bean (*Phaseolus vulgaris* var. Nanus) stands: results of a long term experiments. *Acta Bot. Hung.* 48: 311–321.
21. Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J. and Hatfield, J.L. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24: 45–55.
22. Jones, H. 2007. Monitoring plant and soil water status: established a novel revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *J. Exp. Bot.* 58: 119–30.
23. Klute, A., 1986. Water retention: Laboratory Methods: In: Klute, A., (Ed.) *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods.* SSSA Book Series. Agron. Monogr.9. ASA and SSSA, Madison, WI. USA. pp: 635-662.
24. Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water. Resur. Res.* 12 (3):513-522.
25. Nang, N.D., Grant, C.D., and Murray, R.S. 2010. An evaluation of plant available water during reclamation of saline soils: Laboratory and field approaches, 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia. Published on DVD.
26. Neyshabouri, M.R., Kazemi, Z., Oustan, Sh., Moghaddam, M. 2014. PTFs for predicting LLWR from various soil attributes including cementing agents. *Geoderma*, Vol. b226-227: 179-187.
27. Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A. Leopert, R.H. (Eds), 1996. *Methods of Soil Analysis Part 3-Chemical Methods.* SSSA Book Ser 5.3.SSSA, ASA, Madison, WI.
28. Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed- form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892- 898.
29. Van Genuchten, M.Th., Leyj, F.J., Yates, S.R., 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. EPA/600/2-91/065, R.S.Kerr Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, Ada, OK. 93.

Computation of Integral Water Capacity Using Plant Green Leaf Temperature at Different Soil Compaction Levels

Z. Kazemi¹, M. R. Neyshabouri, D. Zaree Haghi, and H. Asgarzadeh

PhD Student, University of Tabriz; E-mail: zkazemi2016@gmail.com

Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz;

E-mail: neyshmr@hotmail.com

Assistant Professor., University of Tabriz; E-mail: davoudhaghi@tabrizu.ac.ir

Assistant Professor. of University of Urmia; E-mail: asgarzadeh8688@gmail.com

Received: Noveber, 2017 and Accepted: May, 2018

Abstract

Integral water capacity (IWC) is the integral of differential water capacity functions in the range of 0 to infinity soil matric potential multiplied by weighting functions each taking into account the effect of various soil limitations that may develop at a given soil matric potential domain and restrict soil water availability to plant roots. The domains selected for development of weighting functions in most studies have seldom been based on plant response, but rather arbitrary. The purpose of this study was implementing midday green leaf temperature (T_L) as a plant-response-based variable to compute integral water capacity. For this purpose, a sandy clay loam soil passed through 4.76 mm sieve was evenly compacted to three bulk densities of $D_1=1.35$, $D_2=1.55$, and $D_3=1.75$ g cm⁻³, each replicated thrice, in PVC tubes (called pots hereafter) with 30 cm diameter and 70 cm height. Sunflower (*Helianthus Annuus L*) seedlings were planted in the pots and, after their full establishment, two periods of wetting and drying cycles were imposed. By monitoring daily soil moisture content at the three depths in the pots and converting them to soil moisture suctions along with the midday T_L measurements, a plant-response-based weighting function was developed and integral water capacity (IWC_P) was computed. Integral water capacity (designated as IWC_G) was also computed by adopting the weighting functions proposed by Groenevelt et al. IWC_P and IWC_G in D_1 treatment were obtained as 0.187 and 0.229 cm³cm⁻³, respectively. At the highly compacted D_3 treatment, the corresponding values diminished to 0.152 and .038, respectively, equivalent to 19% and 84% reduction in soil water availability and reflecting the dominant effect of soil compaction on water availability. Averaged over the three compaction levels, IWC_P and IWC_G were 0.169 and 0.14 cm³cm⁻³, indicating that water availability determined on the plant response basis was 17% greater than that predicted by IWC_G . This difference and over-susceptibility (84%) of IWC_G to soil compaction imply that the soil suction domains proposed for the various soil limitations and the experimental relations employed in Groenevelt et al. approach to quantify their restricting effects as weighing functions need to be modified according to each particular plant needs or response.

Keywords: Sunflower, Plant response, Weighting function, Differential water capacity

¹ Corresponding author: Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz.