

محاسبه گنجایش آب انتگرالی با استفاده از جریان شیره آوندی

در درختان پسته

علی عطایی¹، محمدرضا نیشابوری، مهدی اکبری، اصلان اگدرنژاد و اثر در عنابی میلانی

فارغ التحصیل دکتری دانشگاه تبریز، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی خاک؛ Aliataee.kh@gmail.com

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

دانشیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج-ایران؛ Akbari_m43@yahoo.com

استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران؛ A_eigder@ymail.com

استادیار بخش تحقیقات خاک و آب، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

تبریز، ایران؛ a_o_milani@yahoo.com

دریافت: 98/8/4 و پذیرش: 99/4/25

چکیده

گنجایش آب انتگرالی یا IWC به عنوان یکی از معیارهای جدید فراهمی آب خاک، از ضرایب وزنی تعریف شده برای در نظر گرفتن محدودیت‌های فیزیکی مختلف استفاده می‌کند. همچنین این قابلیت را دارد که از پاسخ گیاهی نیز برای استخراج ضریب وزنی استفاده نماید. در این پژوهش پس از اعمال تیمارهای آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) و زیرسطحی (SDI) و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی خاک و توزیع رطوبت و شوری ناحیه ریشه، سعی شد که ضمن محاسبه IWC با خصوصیات فیزیکی خاک، از جریان شیره آوندی (SF) به‌عنوان یک پاسخ گیاهی، برای استخراج ضریب وزنی در محاسبه IWC استفاده شود. نتایج نشان داد که مقدار SF در طول دوره آبیاری کاهش یافت و میزان کاهش در سامانه DI بیشتر از SDI بود. با توجه به حجم یکسان آب آبیاری در این دو تیمار، اختلافات مذکور ناشی از چگونگی توزیع رطوبت و املاح در ناحیه ریشه در این دو سامانه و بیان‌کننده مزیت آبیاری SDI در فراهمی آب خاک بود. محاسبه معیارهای فراهمی آب نشان داد که با اعمال محدودیت شوری از طریق رابطه گرانولت IWC_{Gr} در سامانه DI و SDI به ترتیب 0/0557 و $cm^3 cm^{-3}$ 0/0545 به دست آمد؛ اما IWC به دست آمده از IWC_{SF} ، 0/176 و 0/191 و نزدیک به IWC بدون اعمال شوری (0/188) بود. تابع شوری و نگونختن اثر شوری را به صورت منطقی تری در IWC_{VG} اعمال کرد (به ترتیب 0/146 و 0/151) و مشاهده شد که علاوه بر کاهش کمتر در IWC، مقدار انرژی جذب واحد آب نزدیک به IWC_{SF} بود. این یافته نشان می‌دهد که ضرایب وزنی در نظر گرفته شده برای اعمال محدودیت‌های فیزیکی در IWC_{VG} از نظر انرژی جذب و میزان فراهمی آب بهترین برآورد را از شرایط فیزیکی خاک دارد. بر پایه تمامی معیارهای فراهمی آب خاک، سامانه آبیاری SDI آب قابل استفاده بیشتری و انرژی جذب آب کمتری را نسبت به DI نشان داد.

واژه‌های کلیدی: ضریب وزنی، فراهمی آب خاک، مکش خاک، محدودیت جذب آب

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

مقدمه

پسته به عنوان یکی از محصولات راهبردی ایران با ارزش اقتصادی بالا، بیشتر در مناطق خشک با محدودیت کمی و کیفی منابع آب کشت می‌شود. درخت پسته (*Pistacia vera L.*) از خانواده آناکاردیاسه¹ است و در بردارنده گونه‌هایی بوده که در برابر شوری بسیار مقاوم هستند (فرگوسن و همکاران، 2002). این درختان به عنوان گونه‌هایی با عمر طولانی یا پایدار، در طی تکامل با شرایط زیستی متنوعی رو به رو شده‌اند و این باعث توسعه مکانیسم‌های مقاومتی متفاوت بسته به مرحله رشد، طبیعت محیط اطراف، شدت و مدت دوره تنش در آن‌ها شده است (مهدی - تونسی و همکاران، 2017). علیرغم مقاومت زیاد درختان پسته در برابر شوری و خشکی، برای رسیدن به حداکثر تولید محصول، تأمین آب با حداقل مقدار انرژی برای جذب آب ضروری است.

تاکنون معیارهای مختلفی برای بیان فراهمی آب خاک برای گیاه استفاده شده است. ابتدایی‌ترین و متداول‌ترین آن‌ها "آب قابل استفاده گیاه (PAW^2)" است که دسترسی یکنواخت آب را بین دو حد پتانسیل ماتریک (معاادل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای تا پژمردگی دائم)، بدون در نظر گرفتن شکل منحنی مشخصه رطوبتی، فرض می‌کند و از دیگر عوامل محدود کننده فراهمی آن برای گیاه صرف نظر می‌نماید. معیارهای جایگزین آب قابل استفاده گیاه مانند "دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت ($LLWR^3$)" و "گنجایش آب انتگرالی" (IWC^4)، محدودیت‌های ناشی تهویه نامناسب، مقاومت فروری خاک و حتی شوری را نیز در نظر می‌گیرند تا میزان آب قابل استفاده در خاک را به درستی برآورد نمایند (عسگرزاده و همکاران، 2014b).

عسگرزاده و همکاران (2010) سه روش PAW ، $LLWR$ و IWC را در 12 نوع خاک بدون حضور گیاه مقایسه کردند آنها رطوبت FC را در دو مکش 10 و 33 کیلو پاسکال مد نظر قرار داده و میانگین آب قابل استفاده در این 12 خاک بر مبنای PAW_{33} ، PAW_{10} ، $LLWR_{33}$ ، $LLWR_{10}$ و IWC به ترتیب برابر 0/1408، 0/2061، 0/1291، 0/1935 و 0/2096 مترمکعب بر مترمکعب به دست آمد. آن‌ها نتیجه گرفتند که اگر حد بالایی آب قابل استفاده مکش 10 کیلو پاسکال در نظر گرفته شود اختلاف معنی‌داری بین سه روش وجود ندارد و همچنین در

صورت اتخاذ مکش 33 کیلو پاسکال برای حد بالایی باز اختلاف دو روش PAW و $LLWR$ معنی‌دار نیست. اما اختلاف چه بین PAW_{33} و PAW_{10} و چه بین $LLWR_{33}$ و $LLWR_{10}$ معنی‌دار بود که نشانگر این مطلب است که مقدار آب نگهداری شده بین دو مکش 33 و 10 کیلو پاسکال قابل توجه و معنی‌دار است. گرانولت و همکاران (2001) و همچنین عسگرزاده و همکاران (2010) نتیجه گرفتند که در مجموع مقدار آب قابل استفاده تعیین شده به روش IWC بیشتر از $LLWR$ است و علت آن تغییر تدریجی جذب آب توسط ریشه با افزایش عامل محدودکننده است. عسگرزاده و همکاران (2010) همچنین نتیجه گرفتند که همبستگی بین $LLWR$ و IWC قوی‌تر از همبستگی بین IWC با PAW می‌باشد. اعتقاد بر این است که IWC رفتار پدیده‌های طبیعی در خاک را بهتر منعکس می‌کند؛ اما دانش ما از عوامل محدودکننده آن هنوز کامل نیست و محدوده‌های توابع وزنی در IWC تا اندازه‌ای به طور دلخواه انتخاب شده‌اند. از این رو به پژوهش‌های تکمیلی برای تعیین مرزها و توابع وزنی در حضور گیاه نیاز است.

نانگ و همکاران (2012) روش IWC را برای یک نیمرخ شور تا عمق بیش از 150 سانتی‌متر به کار بردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش یاد شده و اعمال محدودیت شوری در جذب آب توسط گیاه باعث می‌شود که مقدار IWC نسبت به تعریف کلاسیک آن (PAW) 33 درصد کاهش یابد. مسکینی ویشکایی (1393) مقدار IWC را برای دو گیاه گندم و کلزا تحت شرایط رطوبتی مختلف خاک (از رطوبت‌های نزدیک اشباع تا رطوبت کمتر از نقطه پژمردگی دائم) در دو خاک با بافت لوم شنی و لوم رسی با استفاده از عوامل خاک و گیاه ارزیابی کردند و با مقادیر IWC حاصل بر مبنای روش گرانولت و همکاران (2001) مقایسه نمودند. نتایج نشان داد که مقدار IWC محاسبه شده به روش پیشنهادی مسکینی ویشکایی (1393) در دامنه مرطوب در خاک لوم شنی، بیشتر تحت تأثیر زهکشی سریع و در خاک لوم رسی بیشتر متأثر از محدودیت تهویه خاک است. بر مبنای توابع وزنی پیشنهادی IWC کمتر برای گندم در خاک لوم شنی و IWC بیشتر برای گندم و کلزا در خاک لوم رسی به دست آمد. نتایج نشان داد که روش حاصل از تلفیق تابع وزن-دهی شدت جریان زهکشی و شدت تنفس ریشه در دامنه مرطوب و تابع وزن‌دهی هدایت هیدرولیکی خاک و مقاومت مکانیکی خاک در دامنه خشک بهترین روش برای برآورد میزان آب قابل دسترس خاک (IWC) برای

1. Anacardiaceae

2. Plant available water

3. Least limiting water range

4. Integral water capacity

شده در این باغ، آبیاری قطره‌ای سطحی، به صورت دو ردیفه در دو طرف ردیف درختان با فواصل 50 سانتی‌متر از تنه درختان بود. منبع آب آبیاری یک رشته قنات است که آب آن به یک استخر ذخیره آب هدایت شده بود. در این مزرعه با توجه به مدیریت باغدار، آبیاری‌ها هر هشت روز یک‌بار و به مدت شش ساعت انجام شد. تغییرات شوری آب آبیاری در طول فصل زراعی ناچیز بوده و مقدار شوری آن برابر 6/6 ds/m بود.

به منظور مطالعه تأثیر آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در ابتدای فصل رشد (اردیبهشت ماه سال 1396) در یک ردیف از درختان، قطره چکان‌ها به عمق 35 سانتی‌متری از سطح خاک انتقال داده شد. به منظور استخراج اثرات تنش شوری و خشکی بر پایه پاسخ گیاهی در نصف ردیف از درختان نیز آبیاری قطره‌ای سطحی با استفاده از آب شیرین (EC=1.5ds/m) و در دوره‌های سه یا چهار روزه انجام شد. از این‌رو سه تیمار آزمایشی شامل آبیاری قطره‌ای سطحی با آب شور (DI)، آبیاری قطره‌ای زیر سطحی با آب شور (SDI) و آبیاری قطره‌ای سطحی با آب شیرین (A) در مزرعه پیاده شد.

نمونه‌برداری و آزمایش‌ها

به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک در ابتدای آزمایش یک خاک‌رخ حفر و تا عمق 80 سانتی‌متری به فواصل 20 سانتی‌متری نمونه‌های دست‌خورده و دست‌نخورده (در سیلندرهایی به حجم تقریباً 100cm^3) تهیه شد. واکنش خاک (pH)، هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع، درصد کربن آلی لایه‌های مختلف در نمونه‌های مرکب به روش هضم تر والکی - بلک (نلسون و سامرز، 1996)، بافت خاک به روش هیدرومتری (گی و باودر، 1986)، جرم مخصوص ظاهری و تخلخل در نمونه‌های دست‌نخورده، هدایت هیدرولیکی اشباع به روش بار ثابت (کلوت، 1986) و منحنی نگهداری آب خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشار اندازه‌گیری شد و به دلیل مشاهده شکل دوآلگویی¹ در نتایج مدل منحنی رطوبتی دورنر (1994) با استفاده از نرم افزار RETC به آن برازش داده شد:

(1)

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(w_1 [1 + (a_1 h)^{n_1}]^{\frac{1}{n_1} - 1} + w_2 [1 + (a_2 h)^{n_2}]^{\frac{1}{n_2} - 1} \right)$$

مشق اول معادله دورنر (1994) برای تعیین گنجایش رطوبت نقطه‌ای (C(h)) مورد استفاده قرار گرفت (عسگرزاده و همکاران، 2014):

کلزا و گندم است. نتایج این پژوهش مؤید ضرورت توجه به خصوصیات گیاه در تعیین مقدار IWC بود.

جریان شیره آوندی گیاه (SF) به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین پاسخ‌های گیاهی به شرایط رطوبتی خاک، تابعی از شرایط اقلیمی منطقه (تعرق بالقوه) و شرایط رطوبتی خاک است. اندازه‌گیری جریان شیره آوندی یکی از دقیق‌ترین روش‌های تعیین مستقیم تعرق گیاهی می‌باشد (کول و همکاران، 2014) و سرعت جریان شیره آوندی عمدتاً تحت تأثیر فیزیولوژی و آناتومی گونه‌های گیاهی است. در ضمن جریان شیره آوندی مشابه با شدت تعرق از تغییرات اقلیمی همانند رطوبت نسبی، تابش خورشیدی، کمبود فشار بخار اشباع (اورن و همکاران، 1999؛ پتاکو و همکاران، 2000) اثر می‌پذیرد (اثر-راکی و همکاران، 2009). به‌دلیل تفاوت در اندازه درخت و شاخص سطح برگ، سرعت جریان شیره آوندی می‌تواند از درختی به درخت دیگر نیز تغییر کند، اما حساسیت مشابهی نسبت به شرایط محیطی و شرایط آب خاک خواهد داشت (ایستهام و گری، 1998). نسبت پاسخ گیاهی یا محصول در شرایط رطوبتی معین به شرایط بدون محدودیت رطوبت یا حداکثر محصول، به‌عنوان یک روش مرسوم برای از بین بردن اثرات اقلیمی بر پاسخ‌های گیاهی شناخته شده است (متسلار و ونلیئر، 2007؛ کاظمی و همکاران، 1397). مسکینی ویشکایی و همکاران (2018)، شرودر و همکاران (2014) نیز از نسبت تعرق گیاهان تحت تنش به تعرق گیاهان در شرایط مطلوب برای نرمال‌سازی اثرات محیطی استفاده کردند.

اگرچه تا به حال مطالعات مختلفی در زمینه آبیاری قطره‌ای با آب شور در مناطق خشک و نیمه و خشک انجام شده است، اما افزایش اطلاعات در رابطه با اثرات تغییر سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی به قطره‌ای زیرسطحی بر چگونگی فراهمی آب خاک و پاسخ گیاهی در این شرایط ضروری است. از این‌رو تحقیق حاضر با هدف مطالعه فراهمی آب در سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی و قابلیت جریان شیره آوندی برای استخراج ضریب وزنی جامع در محاسبه IWC انجام شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این پژوهش در سال 1396 در یک باغ پسته 10 هکتاری واقع در دهستان اخترباد از توابع شهرستان شهریار استان تهران به طول جغرافیایی $37^{\circ} 37' 46''$ شرقی و عرض جغرافیایی $35^{\circ} 34' 10''$ شمالی و ارتفاع 880 متر از سطح دریا به اجرا درآمد. درختان پسته 12 ساله با رقم احمد آقایی بود. سامانه اصلی آبیاری استفاده

¹ bimodality

(2) می‌دهد در خاک شن لومی (60 - 80 سانتی‌متری) خاصیت دوالگویی غالب‌تر از لایه‌های سطحی می‌باشد. اندازه‌گیری جریان شیره آوندی

پس از نیمه فصل رشد که منجر به تغییر توزیع رطوبت و شوری در ناحیه ریشه بین دو روش آبیاری قطره ای سطحی و زیر سطحی شد، شدت جریان شیره آوندی در دو درخت از هر تیمار (به دلیل محدودیت در تعداد سنجنده‌های دستگاه) با استفاده از روش اتلاف گرمایی گرانیور (1985) و با دستگاه TDP² ساخت شرکت داینامکس (Dynamax) آمریکا اندازه‌گیری شد. نصب و راه‌اندازی دستگاه طبق دستورالعمل شرکت سازنده انجام گرفت. دستگاه یاد شده شامل 6 سنجنده هرکدام با دو پروب سوزنی است که در داخل یکی از پروب‌ها یک گرم کننده الکتریکی و یک ترموکوپل قرار دارد و در پروب دیگر هم یک ترموکوپل جایگذاری شده است. ترموکوپل-ها برای اندازه‌گیری اختلاف دمای بین دو سنجنده مورد استفاده قرار می‌گیرند. این اختلاف، تحت تأثیر شدت جریان شیره آوندی قرار می‌گیرند. با استفاده از رابطه (4)، از روی اختلاف دمای اندازه‌گیری شده سرعت شیره آوندی محاسبه گردید (گرانیور، 1985؛ لو و همکاران، 2004):

$$F_d = 118.99 \times 10^{-6} \left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (4)$$

شدت جریان شیر آوندی (m³.m⁻².s⁻¹): F_d

اختلاف دمای بین دو سنجنده که توسط دستگاه ثبت می‌شود و ΔT_{max} حداکثر اختلاف دمای اندازه‌گیری شده که نشان‌دهنده شدت جریان صفر است. دستگاه به صورت 24 ساعته در حال ثبت اختلاف دما بود و نرم‌افزار دستگاه طوری برنامه‌ریزی شد که در هر 5 ثانیه یک قرائت انجام دهد و میانگین قرائت‌های 10 دقیقه را ثبت نماید. همزمان با اندازه‌گیری جریان شیره آوندی، رطوبت خاک نیز در فواصل و عمق‌های مختلف نسبت به درخت با استفاده از رطوبت سنج پروفیل پروب³ اندازه‌گیری شد.

$$C(h) = (\theta_s - \theta_r) \left[w_1 \left(1 - \frac{1}{n_1} \right) n_1 \alpha_1^{n_1} h^{n_1-1} (1 + (\alpha_1 h)^{n_1})^{\left(\frac{1-2n_1}{n_1} \right)} + w_2 \left(1 - \frac{1}{n_2} \right) n_2 \alpha_2^{n_2} h^{n_2-1} (1 + (\alpha_2 h)^{n_2})^{\left(\frac{1-2n_2}{n_2} \right)} \right]$$

در این روابط θ رطوبت حجمی خاک (cm³cm⁻³)، h مکش ماتریک (cm)، θ_s و θ_r به ترتیب رطوبت باقیمانده و رطوبت اشباع خاک (cm³cm⁻³)، α₁، n₁ و α₂، n₂ پارامترهای برازشی برای خم اول و خم دوم منحنی مشخصه رطوبتی و w₁ و w₂ ضرایب وزنی مرتبط با سهم نسبی هر خم از منحنی رطوبتی در مدل دورنر هستند.

مقاومت فروری با استفاده از دستگاه فروسنج مخروطی دیجیتالی به قطر مخروط 3 میلی‌متر، زاویه مخروط 30 درجه، قطر میله 2 میلی‌متر و سرعت فروری 2 میلی‌متر در دقیقه در نمونه‌های دست نخورده اندازه‌گیری شد. (عسگرزاده همکاران 2014، نیشابوری و همکاران، 2014). دستگاه مذکور مقاومت فروری خاک را بر حسب مگاپاسکال به دست می‌دهد که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برای لایه‌های میانی به عنوان مقاومت فروری هر نمونه در مکش مربوطه مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت منحنی مقاومت فروری برای هر لایه به صورت تابعی از مکش خاک و طبق رابطه معادله 3 رسم گردید

(3) $SR = ah^b$
h مکش ماتریک خاک بر حسب سانتی‌متر، SR مقاومت فروری خاک بر حسب مگاپاسکال و a (مگاپاسکال بر سانتی‌متر) و b بدون بعد، پارامترهای برازش هستند. به منظور برازش داده‌ها به رابطه فوق از ابزار برازش منحنی¹ نرم‌افزار MATLAB استفاده شد. نتایج ویژگی‌های فیزیکی خاک به همراه ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی و مقاومت مکانیکی خاک برازش یافته به خاک در جدول 1 آمده است.

مشاهده می‌شود که مدل دورنر با دقت بالایی به داده‌های منحنی رطوبتی به دست آمده برازش یافته است و در همه لایه‌ها ضرایب تبیین بالای 0/99 است. در لایه 60 تا 80 سانتی‌متری بافت خاک شن لومی رطوبت اشباع بسیار کمتری را نسبت به بافت لوم شنی نشان داده است. نکته دیگر مقادیر مربوط به ضریب w₁ و w₂ است نشان

² Thermal dissipation probe

³ Moisture meter profile probe, type PR2

¹ Curve fitting tool

جدول 1- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی و پارامترهای معادلات برازش یافته به منحنی رطوبتی و منحنی مقاومت فروری خاک مورد مطالعه

عمق (cm)	شن %	سیلت %	رس %	کلاس بافتی	pH	(dS/m)	کربن آلی %	BD g	cm/day
20-0	68	19	13	لوم شنی	7/5	6/8	2/08	1/46	154
40-20	63	19	18	لوم شنی	7/4	5/9	0/936	1/56	103
60-40	66	20	14	لوم شنی	7/6	5/51	0/585	1/65	57
80-60	81	10	9	شن لومی	7/8	5/37	0/1	1/66	48

عمق	ضرایب منحنی رطوبتی دورنر										ضرایب مدل مقاومت فروری		
	a	b	R2	w2	w1	n2	n1	α2	α1				
				-	-	-	-	1/cm	1/cm				
0-20	0/473	0/0402	0/00016	0/025	2/784	1/646	0/223	0/777	0/9997	0/294	0/4461	0/944	
20-40	0/449	0	0/00018	0/051	1/875	1/330	0/321	0/697	0/991	0/1274	0/3131	0/943	
40-60	0/419	0/049	0/00022	0/023	2/353	1/794	0/354	0/646	0/997	0/1442	0/3087	0/940	
60-80	0/34	0/023	0/0065	0/0455	1/257	1/837	0/517	0/482	0/996	0/605	0/1684	0/810	

(5)

$$b(r, z) = \left[\left(1 - \frac{z}{z_m} \right) \right] \left[\left(1 - \frac{r}{r_m} \right) \right] e^{-\left(\frac{P_z}{z_m} |z^* - z| + \frac{P_r}{r_m} |r^* - r| \right)}$$

(r, z) بیان کننده توزیع فضایی دوبعدی جذب آب به وسیله ریشه به صورت بدون واحد¹، z_m و r_m حداکثر عمق و شعاع محوری ریشه دوانی، P_z ، z^* ، P_r و r^* پارامترهای تجربی هستند. z و r عمق و فاصله محوری از خط امتداد محور گیاه (cm) می‌باشند.

محاسبه گنجایش آب انتگرالی

بر پایه تعریف گنجایش آب انتگرالی (IWC) با افزایش مکش ماتریک خاک از رطوبت اشباع ($h=0$) تا خشک ($h=\infty$)، فراهمی آب خاک برای گیاه به طور تدریجی در پاسخ به محدودیت‌های مختلف فیزیکی خاک تغییر می‌یابد. مقدار IWC برای هر لایه خاک براساس رابطه گرانولت و همکاران (2001) از ادغام توابع وزنی عوامل محدود کننده با تغییرات تدریجی رطوبت خاک محاسبه گردید:

(6)

$$IWC = \sum_{i=1}^n \int_{h_i}^{h_f} \prod_{j=1}^m \omega_j(h) C(h) dh$$

h_i تا h_f ابتدا و انتهای محدوده مکشی است که در آن یک یا چند عامل محدود کننده (m) وجود دارد و عامل

تعیین میانگین مکش دامنه ریشه در سامانه آبیاری قطره‌ای غیریکنواختی خاک همراه با ساختار غیریکنواخت ریشه باعث الگوی متغیر جذب آب (و همچنین توزیع مکش خاک) در 2 یا 3 بعد می‌شود (گانگ و همکاران، 2006). از این رو لازم است که ضمن داشتن مکش خاک در نقاط مختلف از دامنه توسعه ریشه، نقش هر نقطه در جذب آب ریشه تعیین شود. با توجه به اینکه اندازه‌گیری رطوبت یا مکش خاک در فواصل مکانی و زمانی کم ممکن نیست، از مدل هایدروس برای به دست آوردن مکش خاک در محدوده‌های بسیار ریز (mesh) هایی با اندازه تقریبی چند سانتی‌متر مربع استفاده شد. نتایج مدل‌سازی با هایدروس (در زمان منطبق به اندازه‌گیری رطوبت خاک و جریان شیره آوندی) قابلیت بالای این مدل را در برآورد رطوبت خاک نشان داد (جزئیات روش و نتایج در گزارشات عطایی و همکاران، 1397 و 1398 در دسترس است). وزنه‌ی هر نقطه از ناحیه ریشه در جذب آب ($b(r, z)$) از مدل پیشنهادی ورات و همکاران (2001) محاسبه شد (معادله 5) و با ضرب در مکش ماتریک آب در آن نقطه و جمع اعداد حاصله، مکش متوسط خاک در دامنه ریشه به دست آمد.

¹ Dimensionless

عامل نیز به عنوان یک ضریب وزنی جامع در محاسبه IWC قابل استفاده است. برای این منظور ابتدا داده‌های جریان شیره آوندی در تیمارهای DI, SDI نسبت به داده‌های حاصله در شرایط مشابه اتمسفری شاهد ولی بدون تنش شرایط رطوبتی و شوری نرمال‌سازی شد (SF/SF_0). نسبت یاد شده به صورت تابعی از میانگین مکش خاک رسم و با استفاده از نرم افزار Curve Expert بهترین تابع ریاضی به آن برازش داده شد. مدل مناسب مشابه با مدل بلیسدال¹ (1966) به صورت زیر در آمد:

$$\omega_{SF}(h) = \frac{SF}{SF_0} = \frac{1}{(\alpha + \beta h)^\delta} \quad (9)$$

معادله 9 علاوه بر قدرت بالای برازش به داده‌ها، امکان تعریف فیزیکی پارامترها بر اساس خصوصیات خاک و گیاه را نیز دارد. ضریب α نشان دهنده اثر عوامل محدود کننده محیطی بر جریان شیره آوندی نرمال شده، β مقاومت گیاه در برابر تنش خشکی و توان δ ادغام کننده اثرات شرایط خاص محیطی بر SF/SF_0 می‌باشد. از این تابع به عنوان تابع ضریب وزنی پاسخ گیاهی در کل دامنه مکش خاک استفاده شد. در این شیوه به جای بکارگیری چندین تابع متفاوت بسته به دامنه مکش از یک تابع در بر گیرنده برای کل دامنه مکش استفاده شد.

برای محاسبه IWC بر مبنای پاسخ گیاهی (SF/SF_0) لازم است که دامنه مکش متناظر با جذب آب تعیین شود. در سامانه‌های آبیاری با توزیع رطوبت موضعی و به‌ویژه در سامانه آبیاری قطره‌ای مطالعه شده که فواصل زمانی بین آبیاری‌ها طولانی بوده است، در هیچ زمانی از دور آبیاری کل ناحیه ریشه به حالت اشباع درنیامد و فقط در بخش محدودی از ناحیه ریشه (نقطه قرار گیری قطره‌چکان‌ها) درصد رطوبت زیاد و نزدیک به اشباع مشاهده شد که در نتیجه بازتوزیع رطوبت بعد از قطع آبیاری، رطوبت آن نقاط نیز کاهش یافتند. از این رو با استفاده از سامانه آبیاری قطره‌ای در باغات احتمال مشاهده کمبود تهویه بسیار پایین می‌باشد. با توجه به توزیع آهسته و نقطه‌ای آب و قابل توجه بودن حرکات جانبی رطوبت خاک، در این سامانه‌های آبیاری امکان زهکشی سریع نیز کاهش می‌یابد. در ضمن کمترین مکش ماتریک اندازه‌گیری شده در هر دو سامانه آبیاری در زمان 6 ساعت بعد از آبیاری در حدود 100 سانتی‌متر بوده است. این مکش به عنوان نقطه آغاز فراهمی آب خاک در نظر گرفته شد.

محدود کننده z از طریق ضریب ω اثر خود را اعمال می‌نماید. n تعداد محدوده مکش‌ها، $C(h)$ مقدار گنجایش رطوبت نقطه‌ای (cm^{-1}) همان شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک ($|d\theta/dh|$) می‌باشد. $\omega(h)$ تابع وزنی است که نشانگر شدت تأثیر عامل محدودکننده برای فراهمی آب در هر مکش (h) بوده و به تعداد عوامل محدودکننده از 1 تا m در هم ضرب می‌شوند و خود تابعی از h می‌باشد. مقادیر توابع وزنی از صفر (برای محدودکننده‌ترین شرایط) تا یک (برای شرایط عدم محدودیت) تغییر می‌کند.

پنج تابع وزنی مختلف برای گنجایش آب دیفرانسیلی به کار برده می‌شود. این توابع وزنی محدودیت‌های ناشی از زهکشی سریع و کمبود اکسیژن (تهویه نامناسب) در قسمت مرطوب منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی کم و مقاومت فروروی زیاد در قسمت خشک منحنی به انضمام اثر شوری در تمام دامنه منحنی هستند (گرانولت و همکاران، 2001؛ گرانولت و همکاران، 2004). برای اعمال اثر شوری از رابطه 7 (گرانولت و همکاران 2004) استفاده شد:

$$\omega_{sa} = \frac{dh_m}{dh_{om}} = (1 + \frac{C(h)h_{os}\theta_s}{\theta(h)^2})^{-1} \quad (7)$$

h_m و h_o به ترتیب پتانسیل اسمزی و ماتریک خاک، h_{om} مجموع پتانسیل اسمزی و ماتریک، h_{os} پتانسیل اسمزی در رطوبت اشباع خاک (θ_s) و $\theta(h)$ رطوبت تابعی از مکش ماتریک است، $C(h)$ گنجایش رطوبت نقطه‌ای یا همان مشتق رطوبت نسبت به پتانسیل ماتریک است. این تابع وزنی فرضی، از نوع گیاه صرف‌نظر کرده و برای بیشترین کاهش تئوریک آب قابل استفاده می‌باشد؛ اما گونه‌های مختلف گیاهی توانایی متفاوتی نسبت به تحمل شوری دارند، در این پژوهش علاوه بر تابع فوق، از تابع سیگموئید شکل ونگنوختن (1987) نیز برای اعمال محدودیت شوری استفاده شد:

$$\omega_{sa} = a(h, h_o) = \frac{1}{1 + (\frac{h_m}{h_{m50}})^p} \times \frac{1}{1 + (\frac{h_{os}}{h_{o50}})^p} \quad (8)$$

h_{m50} و h_{o50} به ترتیب پتانسیل ماتریک و پتانسیل اسمزی آب خاک (cm) که هر کدام منجر به کاهش 50 درصد جذب آب توسط ریشه گیاه می‌شود، و P پارامتر برازشی که عموماً 3 در نظر گرفته می‌شود (ونگنوختن و گوپتا، 1993).

با توجه به اینکه تمامی عوامل محدود کننده جذب آب، اثر خود را در پاسخ گیاهی نمایان می‌کنند، این

¹ Bleasdale

10 به منظور تبدیل واحد انتگرال انرژی از hPa به J kg⁻¹ وارد معادله شده است (عسگرزاده و همکاران، 2011).

نتایج و بحث

در ابتدا مقادیر فراهمی آب خاک بر مبنای مفهوم IWC و بدون توجه به نقش گیاه، مدیریت آبیاری و توزیع شوری برای لایه‌های مختلف خاک محاسبه شد که در جدول 2 دامنه‌های مختلف رطوبتی با محدودیت فیزیکی نظری آمده است که در آن تأکید بر محدودیت‌های بالقوه و مهم غیر از شوری است. این جدول نشان می‌دهد در هر دامنه از مکش به دلیل کدام محدودیت فیزیکی چه مقدار از آب موجود از دسترس گیاه خارج می‌شود.

طبق نظر گرانولت و همکاران (2001) و عسگرزاده و همکاران (2010)، محدودیت تهویه در دامنه رطوبتی مربوط به تخلخل تهویه‌ای 10 تا 15% محدودیت زهکشی سریع در محدوده مکش 0 تا 330 سانتی‌متری، محدودیت مقاومت فروروی در دامنه 1/5 تا 2/5 مگاپاسکال و محدودیت هدایت هیدرولیکی کم در دامنه مکش 12000 تا 15000 سانتی‌متر اعمال گردید. با تفکیک کل دامنه مکش خاک به این محدوده‌ها و اعمال ضرایب مربوطه در هریک از دامنه‌ها، در نهایت جمع رطوبت‌های به دست آمده در هر دامنه، آب قابل استفاده خاک بر مبنای IWC بدون اعمال محدودیت شوری محاسبه شد (جدول 2). به‌عنوان نمونه برای لایه 20 - 0 سانتی‌متری، تخلخل تهویه‌ای 10 و 15% معادل مکش 50 و 85 سانتی‌متر می‌باشد. در این دامنه مکش ماتریک خاک، دو محدودیت تهویه و زهکشی سریع و برپایه منحنی مشخصه رطوبتی خاک، $0/0498 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ رطوبت وجود دارد که به دلیل محدودیت‌های ذکر شده با کاهش حدود 65% به $0/0173 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ می‌رسد. بعد از آن در دامنه 330 - 85 سانتی‌متری محدودیت زهکشی سریع وجود دارد که باعث کاهش رطوبت قابل استفاده خاک از $0/1020 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ به $0/0855 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ شده است.

در دامنه مکش 6747 - 330 سانتی‌متر هیچ محدودیت فیزیکی در جذب آب وجود ندارد و از این رو کل آب موجود ($0/1115 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) قابل استفاده برای گیاه می‌باشد. در دامنه 12000 - 6747 سانتی‌متر محدودیت مقاومت فروروی خاک باعث کاهش 19/7% فراهمی آب شده و $0/0273 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ از آب موجود قابل استخراج توسط گیاه می‌باشد. از مکش 12000 تا 15000 هم محدودیت‌های مقاومت فروروی و هدایت هیدرولیکی کم مجموعاً باعث کاهش 63% فراهمی آب موجود شده است. سرانجام از مجموع $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

هرچند بزرگترین میانگین از مکش ماتریک اندازه‌گیری شده در مزرعه در فواصل بین دو آبیاری 11000 سانتی‌متر بود اما در برخی نقاط از دامنه ریشه به 18000 سانتی‌متر نیز رسیده بود (عطایی و همکاران، 1397). این اختلاف ناشی از تجمع املاح در برخی از نقاط خاک است که می‌تواند باعث ایجاد محدودیت در جذب آب شود. از این رو در بیشتر نواحی دامنه ریشه، امکان جذب آب تا مکش 18000 سانتی‌متر میسر نیست و می‌تواند منجر به صدمه جدی بر درختان تیمارها شود. براساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای اختلاف بین نقاط با بیشترین و کمترین شوری در حدود 8 ds/m بود (عطایی و همکاران، 1398) که باعث ایجاد پتانسیل اسمزی حدود 3000 سانتی‌متر می‌شود (گرانولت و همکاران، 2004). از این رو به منظور جلوگیری از آسیب درختان در نتیجه پتانسیل آب خاک بسیار کم، با تفریق مکش اسمزی از حداکثر مکش ماتریک مشاهده شده، حد بالایی مکش جذب آب مشابه با تعریف PWP برای هر دو سامانه 15000 سانتی‌متر در نظر گرفته شد. در نهایت با انتگرال گیری از حاصل ضرب تابع ضریب وزنی پاسخ گیاهی در گنجایش رطوبت نقطه‌ای در بازه بین 100 تا 15000 سانتی‌متر مقدار IWC متکی بر پاسخ گیاهی در هر سامانه آبیاری به دست آمد (چاهال 2010):

$$IWC_{SF} = \int_{100}^{15000} \omega_{SF}(h) C(h) dh$$

انرژی انتگرالی

اگرچه مقدار IWC با توانمندی گیاه برای جذب آب همبستگی خوبی دارد، اما انرژی لازم برای جذب واحد جرم آب است که مشخص می‌کند گیاه به چه سهولتی می‌تواند آب را از خاک جذب نماید (عسگرزاده و همکاران، 2011). مقادیر انرژی انتگرالی (J kg^{-1}) برای مقادیر آب در دسترس معین که از IWC به دست آمده است، با استفاده از معادله تعمیم یافته میناسنی و مک-برانتی (2003) (معادله 10) محاسبه شد (عسگرزاده و همکاران، 2011):

$$E_I = \frac{1}{10W} \int_{h_i}^{h_f} h C(h) dh$$

h_i و h_f به ترتیب مکش ماتریک در ابتدا و انتهای دامنه رطوبتی معینی است که در آن یک یا چند عامل محدودیت برای جذب آب می‌تواند وجود داشته باشد؛ W مقدار رطوبت حجمی قابل استفاده گیاه که به روش IWC محاسبه شده است ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)؛ و $C(h)$ گنجایش رطوبت نقطه‌ای می‌باشند. مقدار ثابت

0/3067 رطوبت موجود در دامنه مکش 50 تا 15000 سانتی‌متری، بر پایه محدودیت‌های فیزیکی قراردادی اعمال شده $0/2451 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ آن قابل استفاده برای گیاه است. در مورد لایه 60 تا 80 سانتی‌متری مشاهده می‌شود که محدودیت مقاومت فروری بالا از مکش 219

سانتی‌متری آغاز شده و در مکش 4561 سانتی‌متری تکمیل شده و در مکش‌های بعد از آن باعث به صفر رسیدن آب قابل استفاده شده است.

جدول 2- رطوبت حجمی خاک و انرژی انتگرالی در پنج دامنه مکش و رطوبت قابل استفاده گیاه با اعمال محدودیت ممکن در هر دامنه و مجموع آن‌ها به عنوان IWC

IWC	محدودیت مقاومت فروری + هدایت هیدرولیکی کم	محدودیت مقاومت فروری	بدون محدودیت	محدودیت زه کشی سریع	محدودیت تهویه + زه‌کشی سریع	واحد	پارامتر	عمق
50 - 15000	12000 - 15000	6747 - 12000	330 - 6747	85 - 330	50- 85	(cm)	دامنه مکش	0 - 20
0/3067	0/0093	0/034	0/1115	0/1020	0/0498	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	رطوبت نگهداری شده	
0/2451	0/0035	0/0273	0/1115	0/0855	0/0173	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	رطوبت قابل استفاده	
20/1	63/4	19/7	0	16/2	65/3	%	کاهش ناشی از محدودیت	
294/4	3602	1121	242/7	20/2	19	j/kg	انرژی انتگرالی	
55-13436	12000 - 13436	2629 - 12000	330 - 2629	144 - 330	55 - 144	(cm)	دامنه مکش	20 - 40
0/2525	0/0066	0/0873	0/0726	0/0361	0/0499	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	رطوبت موجود	
0/1743	0/0003	0/0484	0/0726	0/0334	0/0197	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	رطوبت قابل استفاده	
31	59/9	44/6	0	7/5	60/5	%	کاهش ناشی از محدودیت	
422/7	30755	1156	112/4	23/9	23/2	j/kg	انرژی انتگرالی	
- 10316 70	-	1972 - 10316	330 - 1972	139 - 330	70 - 139	(cm)	دامنه مکش	40 - 60
0/2259	-	0/0898	0/0444	0/0424	0/0494	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	رطوبت موجود	
0/1459	-	0/045	0/0444	0/0381	0/0183	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	رطوبت قابل استفاده	
35/4	-	49/9	0	10/1	63	%	کاهش ناشی از محدودیت	
363/7	-	1060	88/2	23/6	26/8	j/kg	انرژی انتگرالی	
60 - 4561	-	330 - 4561	219 - 330*	172 - 219	60 - 172	(cm)	دامنه مکش	60 - 80
0/147	-	0/0717	0/0156	0/0098	0/0499	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	رطوبت موجود	
0/0803	-	0/038	0/0142	0/0088	0/0194	$\frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$	رطوبت قابل استفاده	
45/4	-	47	9	10/2	61/1	%	کاهش ناشی از محدودیت	
139/3	-	264/9	29/7	21/6	26/8	j/kg	انرژی انتگرالی	

* در این عمق در دامنه مکش 330 - 219 سانتی‌متر علاوه بر محدودیت زه‌کشی سریع، محدودیت مقاومت فروری نیز مشاهده و اعمال شده است و لذا دامنه بدون محدودیت وجود ندارد.

دوم بسیار بیشتر از لایه اول خاک است. لازم به ذکر است علاوه بر محدودیت‌های فیزیکی، شکل منحنی رطوبتی و حدود بالایی و پایینی در نظر گرفته شده نیز بر IE مؤثر است؛ از این رو در لایه سوم و چهارم با وجود بیشتر شدن محدودیت‌های فیزیکی، با کاهش حد بالایی مکش ماتریک خاک از 15000 به ترتیب به 10316 و 4561

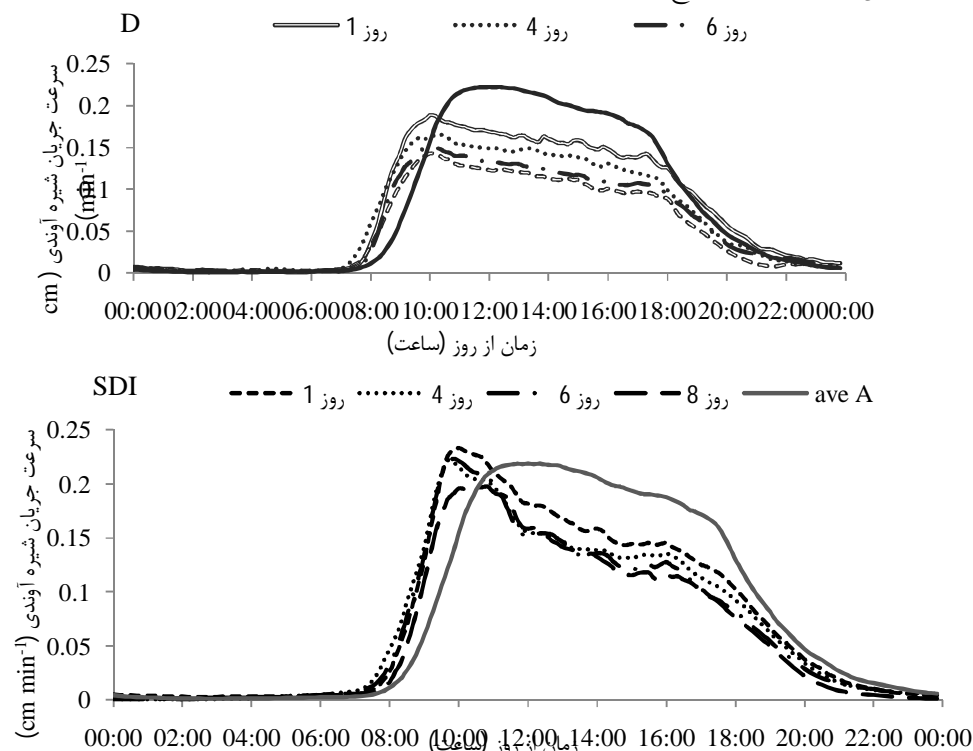
در جدول 2 مشاهده می‌شود که در قسمت‌های مرطوب منحنی مشخصه رطوبتی انرژی نگهداری جذب آب کم و در قسمت انتهایی بالا می‌باشد. با افزایش محدودیت‌های جذب و در نتیجه کاهش فراهمی آب (W) در معادله (11)، مشاهده می‌شود که انرژی انتگرالی (IE) نیز افزایش می‌یابد. به این دلیل است که IE کلی در لایه

می‌رسد. حرکت جریان شیره آوندی در DI و SDI زودتر از تیمار A آغاز می‌شود. این می‌تواند به دلیل بیشتر بودن پتانسیل آب ساقه در درختان خوب آبیاری شده باشد (نتیجه‌ای از شوری کمتر و رطوبت بیشتر خاک در تیمار A است) که باعث می‌شود وقوع تعرق با اختلاف زمانی سبب ایجاد اختلاف پتانسیل و حرکت شیره آوندی گردد. فراهم بودن آب در تیمار A از طرف دیگر باعث جذب بیشتر آب و بالا بودن SF در طول روز نسبت به دو تیمار دیگر شده است. همچنین تنظیم اسمزی ناشی از تنش شوری و آبی در دو تیمار DI و SDI علت دیگری است که می‌تواند منجر به باز شدن زودتر روزنه‌ها شده و عامل وقوع جلوتر تعرق در دو تیمار مذکور باشد. در تحقیق رمورینی و مازای (2003) و توگنتی و همکاران (2004) نیز مشاهده شد که بیشینه مقدار جریان شیره آوندی در درختان دیم زودتر از درختان تحت آبیاری رخ می‌دهد.

سانتی‌متر، آب با انرژی بالا از محاسبات حذف و IE نسبت به لایه بالایی کاهش پیدا کرده است. در ادامه مقادیر IWC و IE برای هر سامانه آبیاری با اعمال مقدار شوری ناحیه ریشه لایه‌های مختلف، از طریق دو تابع نظری گرانولت و ونگنوختن (معادلات 7 و 8) محاسبه و میانگین گیری شد. این نتایج در جدول 5 آمده است.

جریان شیره آوندی

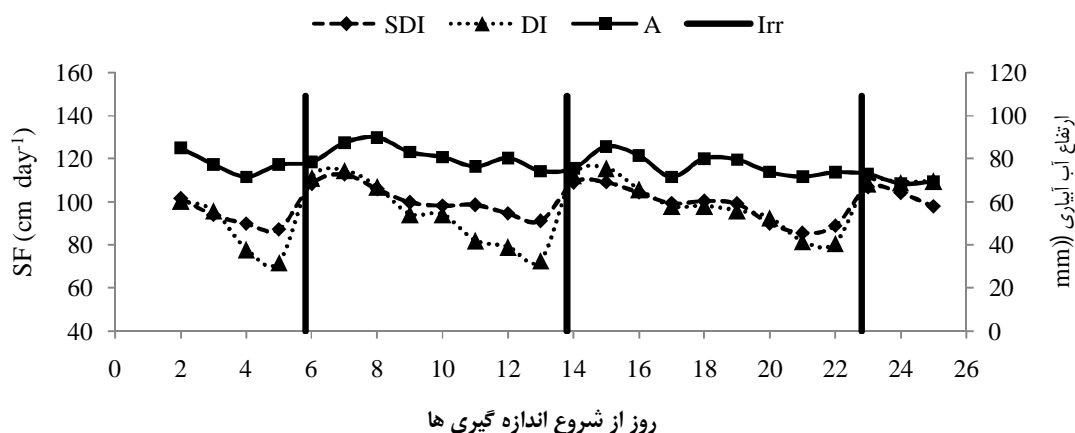
تعرق آغاز کننده حرکت آب در سیستم پیوسته خاک - گیاه - اتمسفر است و جریان شیره آوندی در ارتباط مستقیم با تعرق قرار دارد. با باز شدن روزنه‌ها پس از طلوع آفتاب تعرق آغاز شده و باعث شروع جریان شیره آوندی می‌شود. میانگین (دو تکرار سه دور آبیاری از هر سامانه) تغییرات سرعت جریان شیره آوندی در طول روزهای مختلف در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی در مقایسه با میانگین کل درختان خوب آبیاری شده در شکل 1 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در طول شب جریان تقریباً صفر بوده و با طلوع خورشید و باز شدن روزنه‌ها، سرعت جریان شیره آوندی افزایش می‌یابد و قبل از ساعت 10 صبح به بیشینه مقدار خود



شکل 1- جریان شیره آوندی در طول 24 ساعت در چهار روز مختلف بعد از آبیاری در تیمارهای آبیاری قطره‌ای سطحی (DI) و زیرسطحی (SDI)

زیر منحنی سرعت جریان شیره آوندی (cm/min) تابعی از زمان (min) است که با استفاده از نرم افزار MATLAB محاسبه شد.

میانگین سرعت روزانه جریان شیره آوندی در طول روزهای بعد از آبیاری برای سه تیمار محاسبه و در شکل 2 نمایش داده شد. مقدار حاصله برابر با مساحت



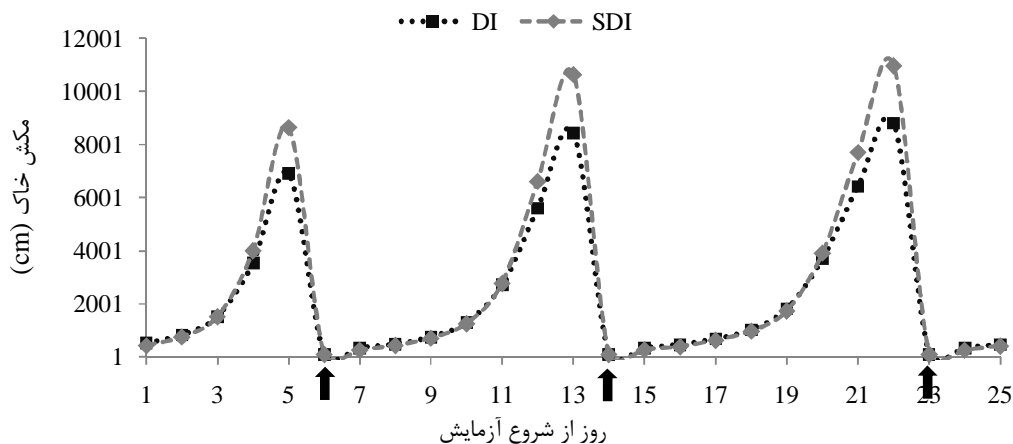
شکل 2- سرعت جریان روزانه شیره آوندی ($cm^3 cm^{-2} day^{-1}$) در طول روزهای بعد از آبیاری

یکسان آب آبیاری در این دو تیمار اختلاف حاصله ناشی از چگونگی توزیع رطوبت و املاح در این دو سامانه می-باشد. در نتیجه مشخص می‌شود که جریان شیره آوندی یکی از پاسخ‌های حساس گیاه نسبت به شرایط رطوبتی خاک بوده و استفاده از آن در محاسبه فراهمی آب خاک می‌تواند اطلاعات ارزنده‌ای را در اختیار قرار دهد.

میانگین مکش دامنه ریشه

در شکل 3 تغییرات میانگین مکش ماتریک خاک در دامنه ریشه در روزهای مختلف، آمده است.

با فاصله گرفتن از آبیاری و کاهش رطوبت خاک جذب آب از خاک کاهش می‌یابد که در قالب کاهش جریان شیره آوندی قابل مشاهده است. برای تیمار A که آبیاری با دور کوتاه‌تر با آب شیرین انجام شده بود کاهش چندانی مشاهده نشد و SF همواره در سطح بالایی قرار داشت؛ اما در دو تیمار DI و SDI به دلیل حضور املاح حتی در اولین روز آبیاری نیز میزان SF از تیمار A کمتر بود (شکل 2). در بررسی روند کاهش SF مشاهده می‌شود که در تیمار DI جریان شیره آوندی به مقادیر کمتری نسبت به تیمار SDI رسیده است. با توجه به حجم



شکل 3- تغییرات میانگین مکش ماتریک خاک (عمق 0-100 و فاصله از درخت 0-100 سانتی‌متری) در دو سامانه آبیاری در روزهای مختلف آزمایش (علامت ↑ زمان آبیاری را نشان می‌دهد)

ماتریک خاک تقریباً برابر بوده و به تدریج بر مقدار آن افزوده می‌شود که این افزایش در SDI بیشتر از DI

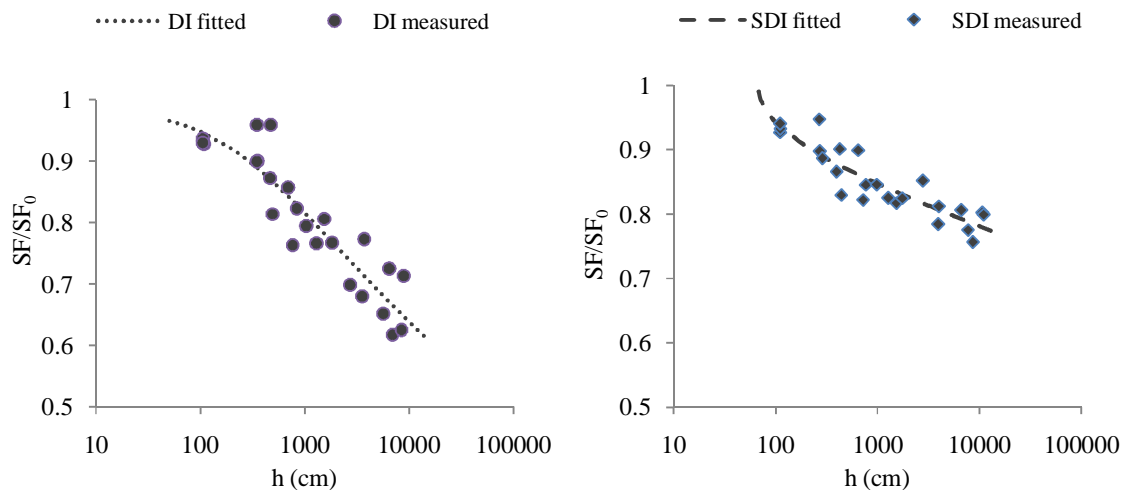
شکل 3 نشان می‌دهد که در روزهای اولیه بعد از آبیاری، در هر دو سامانه DI و SDI میانگین مکش

β بزرگ‌تر از DI می‌باشد. با دقت در رابطه برازش یافته می‌توان بیان کرد که ضریب α نقش محدودیت‌های محیطی غیر از مکش خاک (همانند شوری) را در کاهش جریان شیره آوندی مشخص می‌کند و هرچه محدودیت‌های محیطی بیشتر باشد، ضریب α بزرگ‌تر می‌شود. ضریب β میزان تأثیر h در کاهش SF را نشان می‌دهد و هر چه بزرگتر باشد مکش خاک مهمترین عامل کاهش جریان شیره آوندی خواهد بود. با این تفاسیر مشخص می‌شود که در تیمار SDI نسبت به DI شوری نقش کمتر و افزایش مکش خاک تأثیر بیشتری در کاهش SF دارد.

می‌باشد. به عبارت دیگر در SDI گیاه در یک روز مشخصی آب بیشتری نسبت به DI از خاک جذب شده و باعث افزایش مکش ماتریک خاک گردیده است که نشان می‌دهد شرایط مساعدتری برای جذب آب در SDI وجود دارد. این روند تغییرات در تطابق با تغییرات جریان شیره آوندی (شکل 2) است.

IWC و IE بر مبنای پاسخ گیاهی

نتایج حاصل از برازش تابع ریاضی (معادله 8) به SF نرمال شده در مقابل مکش ماتریک خاک در شکل 4 نشان داده شده است. ضرایب برازشی (جدول 4) نشان می‌دهد که در SDI ضریب α کوچک‌تر و منفی، ضریب



شکل 4- تغییرات SF/SF_0 به صورت تابعی از مکش ماتریک خاک (h) در دو سامانه آبیاری

جدول 4- ضرایب مدل برازشی (معادله 8) به داده‌های SF/SF_0 به صورت تابعی از مکش ماتریک خاک

SE	r	δ	β	α	سامانه آبیاری
0/0414	0/917**	0/841	0/1154	0/0047	DI
0/013	0/900**	0/810	0/035	-7/073	SDI

(جدول 5). همچنین مقادیر IWC و IE به دست آمده از خصوصیات فیزیکی خاک در لایه‌های مختلف میانگین-گیری و در این جدول گزارش شده است.

با استفاده توابع وزنی به دست آمده از جریان شیره آوندی برای سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی، مقدار IWC و IE هر یک از سامانه‌ها محاسبه گردید

جدول 5 - گنجایش آب انتگرالی (m^3/m^3) و انرژی انتگرالی (J/kg) با شرایط متفاوت

IE		IWC		وضعیت شوری
SDI	DI	SDI	DI	
360/3		0/1884		بدون اعمال شوری
971/6	999/4	0/0545	0/0557	با اعمال شوری بر مبنای مدل گرانولت (2004)
440/1	460	0/151	0/1464	با اعمال شوری طبق مدل ونگنوختن (1987)
431	464/9	0/1905	0/1766	بر مبنای پاسخ گیاهی (SF/SF_0)

می‌دهد که استفاده از معیار IWC در مدیریت آبیاری باید با احتیاط صورت گیرد. همچنین مقدار IE محاسبه شده در روش ونگنوختن بسیار نزدیک به IE محاسبه شده بر مبنای SF می‌باشد. این یافته نشان می‌دهد که ضرایب وزنی در نظر گرفته شده برای اعمال محدودیت‌های فیزیکی در IWC_{VG} از نظر انرژی جذب آب واقع بینانه می‌باشند. براساس تمامی معیارهای فراهمی آب خاک نیز مشخص شد که در سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی شرایط رطوبتی بهتری برای گیاه مهیا می‌باشد و گیاه برای جذب آب نیاز است که انرژی کمتری را نسبت به سامانه آبیاری قطره‌ای سطحی مصرف کند.

نتیجه گیری

آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (SDI) با حذف تبخیر از سطح خاک، انتقال مراکز تجمع املاح به نواحی دورتر از ناحیه فعالیت ریشه و تطابق بهتر الگوی توزیع رطوبت با الگوی جذب آب، در مقایسه با آبیاری قطره‌ای سطحی (DI)، باعث فراهمی بیشتر آب برای گیاه می‌شود. در این پژوهش از جریان شیره آوندی به عنوان یکی از مهم‌ترین پاسخ‌های گیاهی به شرایط رطوبتی خاک برای محاسبه فراهمی آب خاک در قالب IWC استفاده شد. نتایج مربوط به اندازه-گیری جریان شیره آوندی بیان‌کننده مزیت آبیاری با سامانه قطره‌ای زیر سطحی از نظر فراهمی آب خاک بود.

در این پژوهش برای اعمال شوری در محاسبه IWC، از دو تابع وزنی گرانولت و همکاران (2004) و ونگنوختن (1987) استفاده شد. تابع گرانولت با اغراق در اثر شوری، کمترین مقدار آب قابل استفاده با بیشترین مقدار IE را نشان داد؛ در مقابل ضریب وزنی ونگنوختن (1987) با اعمال منطقی اثر شوری، مقدار IWC و IE را نزدیک به پاسخ گیاهی برآورد نمود. IWC_{SF} که بر پایه جریان شیره آوندی در طول روز محاسبه شد، بیشترین

نتایج جدول 5 نشان می‌دهد که IWC محاسبه شده با مدل شوری گرانولت (IWC_{Gr} معادله 6) کمترین میزان آب قابل استفاده با بیشترین IE را برآورد می‌کند. ضریب وزنی پیشنهادی توسط گرانولت و همکاران (2004) بدون توجه به خصوصیات گیاهی شدیدترین کاهش جذب آب در نتیجه شوری را در نظر می‌گیرد که در مورد گیاه مقاوم و شور پسندی مانند پسته نمی‌تواند صادق باشد. در مدل ونگنوختن (معادله 7) کاهش جذب آب در نتیجه شوری خاک به صورت منحنی S شکل در نظر گرفته می‌شود و هر مقدار افزایش شوری بسته به خصوصیات گیاهی (EG_{50}) باعث کاهش جذب آب می‌شود. به همین دلیل است که IWC_{VG} نسبت به روش گرانولت و همکاران (2004) مقدار رطوبت بیشتری را برآورد کرده و به واقعیت (به دست آمده از پاسخ گیاهی) نزدیک‌تر است.

IWC به دست آمده بر مبنای سرعت جریان شیره آوندی (IWC_{SF}) که در طول روز اندازه‌گیری شده است، در واقع کل آب استخراج شده را نشان می‌دهد. آب قابل استفاده در این مبنای نظر کمی در حدود IWC بدون اعمال شوری و حتی بیشتر از آن می‌باشد. این نتیجه به این دلیل است که گیاه پسته در برابر محدودیت‌های فیزیکی موجود مقاومت زیادی داشته و آب بیشتری را نسبت به مقادیر محاسبه شده با مفهوم IWC استخراج می‌کند. به تعبیر دیگر معیار پاسخ گیاهی SF بیان‌کننده کل رطوبت موجود در خاک می‌باشد که گیاه آن را استخراج می‌نماید. اما ممکن است شدت جذب آب پاسخگوی نیاز تعرقی نبوده و گیاه دچار تنش شود. می‌توان این‌گونه نیز بیان کرد که گیاه با تمام انرژی که صرف جذب آب می‌کند می‌تواند به مقدار IWC_{SF} رطوبت را از خاک جذب کند، اما شدت جذب آب در شرایط تعرق شدید پاسخگوی نیاز گیاهی نیست. از این رو مشاهدات (تنش گیاه در میانه روز و به‌ویژه در روزهای آخر آبیاری) نشان

ای سطحی فراهم کرد. نتایج این پژوهش مشخص کرد که محاسبه فراهمی آب خاک با استفاده از پاسخ گیاهی شرایط واقعی مزرعه را بهتر منعکس می‌کند و بنابراین بهتر است که محاسبه IWC و به خصوص تعیین توابع مربوط به ضرایب محدودیت‌ها، تنها خاک محور نباشد و به ویژگی‌های گیاه نیز توجه شود و در صورت امکان از یک پاسخ گیاهی نیز استفاده شود.

مقدار آب قابل استخراج از خاک توسط گیاه پسته در شرایط مزرعه را نشان داد. این نتایج مشخص کرد که گیاه با تمام انرژی که صرف جذب آب می‌کند می‌تواند به مقدار IWC_{SF} رطوبت را از خاک جذب کند، اما شدت جذب آب در شرایط تعرق شدید پاسخگوی نیاز گیاهی نیست. بر اساس تمامی معیارهای فراهمی آب خاک، سامانه آبیاری قطره‌ای زیرسطحی آب قابل استفاده بیشتری و انرژی جذب آب کمتری نسبت به سامانه آبیاری قطره-

فهرست منابع:

1. عطایی، ا.، نیشابوری، م.ر.، اکبری، م.، زارع‌حقی، د. و عنابی میلانی، ا. 1397. ارزیابی مدل هایدروس دو بعدی برای تعیین توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیر سطحی درختان پسته. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. جلد 32. شماره 4. صفحات 581-595.
2. عطایی، ا.، نیشابوری، م.ر.، اکبری، م.، زارع‌حقی، د. و عنابی میلانی، ا. 1398. پاسخ گیاه پسته به توزیع رطوبت و شوری در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی. آبیاری و زهکشی ایران. جلد 13. شماره 1. صفحات 115-128.
3. کاظمی، ز.، نیشابوری، م.ر.، زارع‌حقی، د. و عسگرزاده، ح. 1397. تعیین دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت بر مبنای پاسخ گیاه آفتابگردان. نشریه پژوهش‌های خاک (علوم خاک و آب). جلد 32. شماره 2. صفحات 165-177.
4. مسکینی ویشکایی، ف. 1393. برآورد دامنه رطوبت قابل دسترس برای گیاه گندم و کلزا با استفاده از عوامل خاک و گیاه. رساله دکتری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان. ایران.
5. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R. and Nikbakht, A.M. 2014a. SAWCal: A user-friendly program for calculating soil available water quantities and physical quality indices. *Computers and Electronics in Agriculture*. 109: 86-93.
6. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Dexter, A.R., Mahboubi, A.A. and Neyshabouri, M.R. 2014b. Determination of soil available water for plants: Consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*. 226-227: 8-20.
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: 229-244.
8. Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A. and Dexter, A.R. 2011. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. *Geoderma* 166: 34-42.
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. Durner, W. 1994. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*. 30: 211-223.
11. Eastham, J. and Gray, S.A. 1998. A preliminary evaluation of the suitability of sap flow sensors for use in scheduling vineyard irrigation. *American Journal of Enology and Viticulture*. 49: 171-176.
12. Er-Raki, S., Chehbouni, A., Ezzahar, J., Khabba, S., Boulet, G., Hanich, L. and Williams, D. 2009. Evapotranspiration partitioning from sap flow and eddy covariance techniques for olive orchards in semi-arid region. *Acta Horticulturae*. 846: 201-208.

13. Ferguson, L., Heraclio, C., Blake, S., Steve, G. and Zachary, H. 2002. Salinity tolerance evaluation of pistachio rootstocks. *Production Research*. 7:122-124.
14. Gee, G.W. and Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. In: Klute, A. (Ed.), *Methods of Soil Analysis, Part 1 – Physical and Mineralogical Methods*. Lewis Publishers. Madison, WI. pp. 383–411.
15. Gong, D., Kang, Sh., Zhang, Lu., Du, T. and Yao, L. 2006. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements. *Agricultural Water Management*. 83:119–129.
16. Granier, A., 1985. A new method of sap flow measurement in tree stems. *Annales des Sciences Forestieres (France)*.
17. Groenevelt, P., Grant C. and Semetsa, S. 2001. A new procedure to determine soil water availability. *Soil Research*. 39: 577-598.
18. Groenevelt, P., Grant, C. and Murray, R. 2004. On water availability in saline soils. *Soil Research*. 42: 833-840.
19. Klute, A. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. In: Klute, A. (ed.), *Methods of soil analysis: part 1: Physical and mineralogical methods*. Agronomy monograph vol 9, 2nd edn. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin. p. 687–732.
20. Kool, D., Agam, N., Lazarovitch, N., Heitman, J.L., Sauer, T.J. and Ben-Gal, A. 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agriculture Forest Meteorology*. 184:56–70.
21. Lu, P., Urban, L. and Zhao, P. 2004. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Botanica Sinica-english edition*. 46(6): 631-646.
22. Mehdi-Tounsi, H., Chelli-Chaabouni, A., Mahjoub-Boujnah, D. and Boukhris, M. 2017. Long-term field response of pistachio to irrigation water salinity. *Agricultural Water Management*. 185: 1-12.
23. Meskini-Vishkaee, F., Mohammadi, M.H. and 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.
24. Metselaar, K. and van Lier, Q. 2007. The shape of the transpiration reduction function under plant water stress. *Vadose Zone Journal*. 6(1): 124-139
25. Nang, N.D. 2012. Plant availability of water in soils being reclaimed from the saline-sodic state. PhD Thesis. The University of Adelaide. Australia.
26. Nelson, D.W. and Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Sparks, D.L., Page, A.L., Helmke, P.A., Loeppert, R.H., Soltanpour, P.N., Tabatabaei, M.A., Johnson C.T. and Sumner M.E. (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. Soil Science Society of America Book Serie 5. SSSA, Madison, WI, USA. pp. 967-1010.
27. Oren, R., Philips, N., Ewers, B.E., Pataki, D.E. and Megonigal, J.P. 1999. Sap-flux scaled transpiration responses to light, vapour pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest. *Tree Physiol*. 19: 337–347.
28. Pataki, D.E., Oren, R. and Smith, W.K. 2000. Sap flux of co-occurring species in a western subalpine forest during seasonal soil drought. *Ecology*. 81(9): 2557-2566.
29. Remorini, D. and Massai, R. 2003. Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science*. 22: 39–46.
30. Schröder, N., Lazarovitch, N., Vanderborght, J., Vereecken, H. and Javaux, M. 2014. Linking transpiration reduction to rhizosphere salinity using a 3D coupled soil-plant model. *Plant and Soil*. 377(1-2): 277-293.

31. Tognetti, R., diAndria, R., Morelli, G., Calandrelli, D. and Fragnito, F. 2004. Irrigation effects on daily and seasonal variations of trunk sap flow and leaf water relations in olive trees. *Plant and Soil*. 263: 249–264.
32. Van Genuchten, M.T. 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, US Salinity Laboratory, Reverside.
33. Vrugt J. A., Hopmans, J. W., & Simunek, J. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 1027-1037.

