

Irrigation Management Based on PAW and IWC and Its Effect on Soil Salinity Distribution and Root Water Uptake

ALI ATAEE^{1*}, MOHAMMAD REZA NEYSHABOURI¹, MEHDI AKBARI², ASLAN EGDERNEZHAD³, SAFOORA ASADI KAPOURCHAL⁴

1. Department of Soil Sciences and Engineering, Faculty of Agricultural Sciences, Tabriz University, Tabriz, Iran.
 2. Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
 3. Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.
 4. Department of Soil Science, Faculty of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran.
- (Received: June. 29, 2020- Revised: Sep. 1, 2020- Accepted: Sep. 14, 2020)

ABSTRACT

Plant Available Water (PAW) is the most common criteria for Soil Available Water (SAW) to plants which assumes uniform water availability between two matric potential limits (field capacity to permanent wilting point) and ignore other limiting factors for plants. Integral Water Capacity (IWC) is one of the most recently developed criteria for SAW that consider all soil restrictions including insufficient aeration, rapid drainage, resistance of root penetrability and salinity, in order to estimate the SAW properly. In this study, in order to compare the applicability of PAW and IWC criteria in irrigation management, soil physical and hydraulic properties of a pistachio garden, with drip irrigation system, were measured and PAW and IWC were calculated. Based on these criteria, two irrigation regimes (IR_{PAW} and IR_{IWC}) were determined. According to the results, the irrigation periods for IR_{PAW} and IR_{IWC} were 8 and 12 days and irrigation duration were obtained 6 and 12 hours, respectively. Soil salinity distribution and root water uptake in two irrigation regimes were simulated using HYDRUS-2D model after validation for garden condition which showed a high accuracy for modeling. The results showed that in IR_{IWC} , soil salinity is driven to areas farther from the root of the tree and the area with low salinity levels, which plays an effective role in water absorption, are expanded. Based on the simulation, 63.7% and 48.1% of crop water requirement were provided through IR_{IWC} and IR_{PAW} managements, respectively. Therefore, by using IWC index, irrigation management could have a better accommodation to field conditions and leads to less water and salinity stress.

Keywords: Hydrus Model, Integral Water Capacity, Plant Available Water, Soil Water Availability.

کاربرد معیارهای PAW و IWC در مدیریت آبیاری و نقش آن بر توزیع شوری خاک و جذب آب گیاه

علی عطائی^{۱*}، محمد رضا نیشابوری^۱، مهدی اکبری^۲، اصنان اگدرنژاد^۲، صفورا اسدی کپورچال^۴

۱. گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.

۳. گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۴. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۶/۱۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۶/۲۴)

چکیده

ابتدایی‌ترین و متداول‌ترین معیار فراهمی آب خاک برای گیاه "آب قابل استفاده گیاه (PAW)" است که دسترسی یکنواخت آب را بین دو حد پتانسیل ماتریک (معادل رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای تا پژمردگی دائم) فرض می‌کند و از سایر عوامل محدود کننده فراهمی آب برای گیاه صرف‌نظر می‌نماید. معیارهای جدیدتر فراهمی آب مانند "ظرفیت آب انتگرالی (IWC)"، محدودیت‌های ناشی از تهویه نامناسب، زهکشی سریع، مقاومت فروری خاک و شوری را مدنظر قرار می‌دهد تا میزان آب قابل استفاده در خاک را به درستی برآورد نماید. در این پژوهش به منظور مقایسه کارایی دو معیار PAW و IWC، در یک باغ پسته تحت سامانه آبیاری قطره‌ای، با اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی خاک، مقدار PAW و IWC محاسبه و با استفاده از آن‌ها دو مدیریت آبیاری IR_{PAW} و IR_{IWC} تعیین گردید که به ترتیب دور آبیاری ۸ و ۱۲ روز و مدت آبیاری ۶ و ۱۲ ساعت به دست آمد. پس از صحت‌سنجی مدل هایدروس برای شرایط باغ که دقت بالای مدل‌سازی را نشان داد، توزیع شوری و جذب آب گیاه برای دو مدیریت آبیاری مدل‌سازی شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان داد که در IR_{IWC} شوری خاک به مناطق دورتری از ریشه درخت رانده شده و ناحیه با سطوح شوری پایین که نقش موثری در جذب آب دارد گسترش می‌یابد. از این رو می‌توان بیان کرد که IR_{IWC} در مقایسه با IR_{PAW} آب بیشتری در دسترس گیاه قرار می‌دهد. براساس مدل‌سازی صورت گرفته در IR_{IWC} و IR_{PAW} به ترتیب ۶۳/۷ و ۴۸/۱ درصد از نیاز رطوبتی گیاه تامین شد. بنابراین با استفاده از معیار IWC، مدیریت آبیاری صورت گرفته می‌تواند تطابق بهتری با شرایط مزرعه داشته و تنش‌های کمتری متوجه گیاه شود.

واژه‌های کلیدی: آب قابل استفاده گیاه، ظرفیت آب انتگرالی، فراهمی آب خاک، مدل هایدروس.

مقدمه

مفهوم کلاسیکی آب قابل استفاده این بود که رطوبت خاک بین این دو حد به‌طور یکسان برای گیاه قابل استفاده است و هر مقدار کاهش رطوبت در داخل این دامنه تا زمانی که به رطوبت نقطه پژمردگی نرسیده است، تأثیری بر کارکرد گیاه ندارد، اما بعد از رسیدن به نقطه پژمردگی دائم فعالیت گیاه به‌طور ناگهانی متوقف می‌شود. در مدیریت آبیاری و به‌منظور جلوگیری از اعمال تنش بر گیاه، در مکش‌های کمتر از PWP رطوبتی با عنوان رطوبت بحرانی در نظر گرفته شده و آب موجود بین FC تا رطوبت بحرانی آب سهل الوصول نامیده شده و برای محاسبه آن از ضریب "حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی" (MAD)^۲ استفاده می‌شود (Fazel, et al., 2017; Meskini Vishkaei et al., 2017). مقدار این ضریب تابعی از نوع گیاه، خاک و اقلیم منطقه است و FAO

آب خاک افزون بر تأثیر مستقیم روی رشد و باردهی گیاهان، از طریق فراهمی، سایر ویژگی‌های فیزیکی خاک (همانند تهویه و مقاومت فروری) را که مؤثر بر رشد گیاه هستند نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. مفاهیم مختلفی جهت بیان تأمین آب مورد نیاز گیاه توسط خاک ارائه شده است. مفهوم ظرفیت آب قابل استفاده^۱ (AWC) یا آب قابل استفاده گیاه (PAW) از زمانی که توسط وهمیر و هندریکسون پیشنهاد داده شده است به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (Hartemink et al., 2001; Minasny and McBratney, 2003). این مفهوم به صورت مقدار آب نگهداری شده بین دو حد رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای (FC) و نقطه پژمردگی دائم (PWP) تعریف شده است. مهم‌ترین فرض

* نویسنده مسئول: aliaataee.kh@gmail.com

1 Available water capacity
2 Maximum allowable depletion

دید کلی از باز توزیع رطوبت در خاک ارائه می‌دهد که می‌تواند در مدیریت آبیاری بسیار مناسب باشد. با توجه به محاسبات پیچیده و نقش عوامل متعدد در توزیع رطوبت خاک، نرم‌افزارهای متعددی در این زمینه توسعه یافته‌اند که هایدروس جامع‌ترین نرم‌افزار موجود می‌باشد. مدل HYDRUS یکی از مدل‌های شبیه‌سازی است که جریان آب و املاح را در یک، دو و یا سه بُعد در شرایط اشباع و غیراشباع، با و بدون در نظر گرفتن جذب آب و املاح توسط ریشه گیاهان، و اعمال ضرایب سنتیکی مختلف برای واکنش‌های املاح در خاک، شبیه‌سازی می‌کند (Šimůnek et al., 2012). مدل هایدروس دوبعدی و سه‌بعدی در مطالعات پیشین شبیه‌سازی جریان آب در سامانه آبیاری قطره‌ای موفق عمل کرده است (Skaggs et al., 2004; AbouLila et al., 2012; Phogat et al., 2012).

با توجه به نقش عوامل متعدد در فراهمی آب خاک برای گیاه و تلاش برای ساده‌سازی این مفاهیم در قالب‌های کاربردی از قبیل PAW و IWC، در این پژوهش سعی شد که ضمن تعیین مدیریت آبیاری بر اساس این دو مفهوم، چگونگی توزیع رطوبت و شوری خاک، میزان تعرق و جذب آب گیاه در این دو مدیریت با استفاده از نرم‌افزار هایدروس بررسی شود. با دقت در نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان نقش مدیریت آبیاری را در توزیع شوری و مقدار آب جذب شده توسط گیاه روشن کرد و در افزایش بهره‌وری آب موثرتر عمل کرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

عملیات اجرایی این پژوهش در یک باغ پسته ۱۰ هکتاری واقع در دهستان اخترآباد از توابع شهرستان شهریار استان تهران انجام شده است. میانگین، کمترین و بیشترین متوسط دمای منطقه در سال مطالعه طبق آمار نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی کشور (ایستگاه هواشناسی شهریار - استان تهران) به ترتیب ۱۸/۲، ۵/۹۹- و ۴۱/۳ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی سالانه ۱۷۳ میلی‌متر گزارش شده است (آمار سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۷).

درختان مورد مطالعه این باغ ۱۲ ساله و از رقم احمد آقایی با فاصله کاشت بین ردیف ۵ متر و متوسط فاصله روی ردیف ۱/۲ متر بود. سامانه اصلی آبیاری مورد استفاده در باغ مذکور، آبیاری قطره‌ای سطحی، به صورت دو ردیفه در دو طرف ردیف درختان با فواصل ۵۰ سانتی‌متر از تنه درختان است. قطره‌چکان‌ها

در گزارشی مقادیر MAD را برای گیاهان مختلف گزارش نموده است (Allen et al., 1998).

مقدار آب قابل جذب از خاک هم متأثر از خصوصیات خاک همچون منحنی نگهداری آب و هدایت هیدرولیکی خاک و هم متأثر از ویژگی‌های گیاه همچون تراکم، عمق ریشه‌دوانی و هدایت روزنه‌ای می‌باشد (Meskini Vishkaei et al., 2017). با این حال معیار PAW تنها براساس انرژی آب خاک تعریف شده است. از آنجایی که اثرات عوامل دیگری مانند میزان اکسیژن خاک، توانایی ریشه گیاه برای فروری در خاک، هدایت هیدرولیکی خاک بر فراهمی آب خاک شناخته شده است، مفاهیم جدیدی برای بیان فراهمی آب خاک ارائه گردید..

(Groenevelt et al., 2001) مفهوم ظرفیت آب انتگرالی^۱ (IWC) را برای برآورد آب قابل استفاده خاک با استفاده از توابع وزنی متناظر با عوامل مختلف محدود کننده جذب آب معرفی کردند. بر اساس این تعریف، با افزایش مکش ماتریک خاک از رطوبت اشباع تا خاک خشک (رطوبت صفر)، فراهمی آب خاک برای گیاه به‌طور تدریجی در پاسخ به محدودیت‌های مختلف فیزیکی خاک تغییر می‌یابد. این تغییرات تدریجی برای گیاهان مختلف و در شرایط محیطی مختلف در یک خاک معین متفاوت خواهد بود (Asgarzadeh et al., 2010; Meskini-Vishkaei et al., 2018). در این شاخص در دامنه خشک منحنی رطوبتی، جذب آب به دلیل مقاومت فروری زیاد خاک در برابر ریشه و کاهش هدایت هیدرولیکی کاهش می‌یابد. در دامنه مرطوب به دلیل کمبود تهویه و یا زهکشی سریع، جذب آب با محدودیت مواجه می‌شود (Asgarzadeh et al., 2010; Groenevelt et al., 2001). شوری هم با کاهش انرژی آب خاک در تمام دامنه منحنی رطوبتی سبب کاهش جذب آب می‌شود (Mohammadi and Khataar, 2018). استفاده از این مفهوم در مدیریت آبیاری روز به روز در حال گسترش است و در آخرین تحقیقات Mohammadi and Khataar (2018) مدل جدیدی را برای اعمال اثر شوری بر IWC ارائه داده‌اند. اعتقاد بر این است که IWC رفتار پدیده‌های طبیعی در خاک را بهتر منعکس می‌کند (Asgarzadeh et al., 2010) و لذا می‌تواند جهت مدیریت مناسب آبیاری و دستیابی به حداکثر عملکرد مورد استفاده قرار گیرد.

در سوی دیگر فراهمی آب خاک، مباحث جریان آب در خاک مطرح است که به توزیع رطوبت و جذب آب از خاک می‌پردازد. چگونگی جریان آب در خاک با حل عددی معادله ریچاردز و با در نظر گرفتن منابع مختلف ورود، خروج و ذخیره آب، یک

$$(h) = (\theta_s - \theta_r) \left[w_1 \left(1 - \frac{1}{n_1} \right) n_1 a_1^{n_1} h^{n_1-1} \left(1 + (\alpha_1 h)^{n_1} \right)^{\frac{1-2n_1}{n_1}} + w_2 \left(1 - \frac{1}{n_2} \right) n_2 a_2^{n_2} h^{n_2-1} \left(1 + (\alpha_2 h)^{n_2} \right)^{\frac{1-2n_2}{n_2}} \right]$$

که در این روابط θ رطوبت حجمی خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، h مکش ماتریک (cm)، θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت باقی مانده و رطوبت اشباع خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، a_1 ، n_1 و a_2 ، n_2 پارامترهای برازشی برای خم اول و خم دوم منحنی رطوبتی و w_1 و w_2 ضرایب وزنی مرتبط با سهم نسبی هر خم از منحنی رطوبتی در مدل دورنر می‌باشند.

مقاومت فروروی با استفاده از دستگاه فروسنج مخروطی دیجیتالی به قطر مخروط ۳ میلی‌متر، زاویه مخروط ۳۰ درجه، قطر میله ۲ میلی‌متر و سرعت فروروی ۲ میلی‌متر در دقیقه در نمونه‌های دست‌نخورده و مکش‌های ۰/۵، ۱، ۳، ۷، ۱۰ و ۱۵ بار اندازه‌گیری شد (Asgarzadeh *et al.*, 2014b; Neyshabouri *et al.*, 2014). دستگاه مذکور مقاومت فروروی خاک را بر حسب مگاپاسکال به دست می‌دهد که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده برای لایه‌های میانی به عنوان مقاومت فروروی هر نمونه در مکش مربوطه مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت منحنی مقاومت فروروی برای هر لایه به صورت تابعی از مکش خاک و طبق رابطه ۳ رسم گردید:

$$SR = ah^b \quad (\text{رابطه ۳})$$

h مکش ماتریک خاک بر حسب سانتی‌متر، SR مقاومت فروروی 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 منحنی^۱ نرم‌افزار MATLAB استفاده شد.

اندازه‌گیری توزیع شوری و رطوبت در خاک

در ابتدای فصل آزمایش جهت تعیین شرایط اولیه شوری خاک در فواصل عرضی مختلف از درختان، نمونه‌هایی در فواصل عمقی ۲۰ سانتی‌متری تا عمق ۸۰ سانتی‌متری با استفاده از اوگر تهیه شد. در نیمه‌های فصل رشد (۱۸ مرداد ماه) جهت بررسی تغییرات توزیع شوری خاک در نتیجه آبیاری با آب شور، در فواصل معین از درخت تا عمق ۸۰ سانتی‌متری نمونه‌برداری با اوگر انجام شد (به دلیل وجود لایه سخت و مقاومت بالای خاک، نمونه‌برداری تا عمق بیشتر ممکن نبود). به منظور بررسی توزیع رطوبت خاک در اطراف درخت، لوله‌هایی از جنس PVC به قطر ۳۲ میلی‌متر در حفره‌های ایجاد شده با اوگر نصب گردید و در دوره آزمایش و به

با دبی ۸ لیتر در ساعت با فاصله ۷۵ سانتی‌متر از یکدیگر قرار دارند. منبع آب آبیاری یک رشته قنات است که آب آن به یک استخر ذخیره آب هدایت شده بود. تغییرات شوری آب آبیاری در طول فصل زراعی ناچیز بوده و مقدار شوری برابر $6/6 \text{ dS m}^{-1}$ اندازه‌گیری گردید. در این مزرعه با توجه به مدیریت باغدار، آبیاری‌ها هر هشت روز یکبار و به مدت ۶ ساعت صورت می‌گرفت.

ویژگی‌های خاک

به منظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و هیدرولیکی خاک در ابتدای فصل رشد پروفیلی حفر و از هر لایه ۲۰ سانتی‌متری تا عمق ۸۰ سانتی‌متری، ۷ نمونه دست‌نخورده در سیلندرهایی به قطر ۶ و ارتفاع ۴ سانتی‌متری تهیه گردید. این ۷ نمونه علاوه بر اندازه‌گیری منحنی رطوبتی، برای تعیین منحنی فروروی در مکش‌های مشخص (که منجر به از بین رفتن نمونه می‌شوند) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک نیز استفاده شدند. همچنین با استفاده از مته خاک (اوگر) در ۳ نقطه تصادفی از محل آزمایش در باغ، نمونه‌های دست‌خورده برای لایه‌های ۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک تا عمق ۸۰ سانتی‌متری تهیه شد و با ترکیب آن‌ها نمونه مرکب برای هر لایه خاک به دست آمد. واکنش خاک (pH) و قابلیت هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع، درصد کربن آلی لایه‌های مختلف در نمونه‌های مرکب به روش هضم تر والکی-بلک (Nelson and Sommers, 1996)، درصد کربنات کلسیم معادل (آهک) به روش تیتراسیون معکوس (Nelson, 1982)، بافت خاک به روش هیدرومتری (Gee and Bauder, 1986)، جرم مخصوص ظاهری در نمونه‌های دست‌نخورده به روش سیلندر (Gee and Bauder, 1986) و هدایت هیدرولیکی اشباع با روش بار ثابت (Klute, 1986) اندازه‌گیری شد. منحنی نگهداری آب خاک با استفاده از دستگاه صفحات فشاری (Dane and Hopmans 2002) اندازه‌گیری و با مشاهده الگوی دو مدی در شکل نمودار حاصله، مدل منحنی رطوبتی دورنر (Durner, 1994) با استفاده از نرم افزار RETC به آن برازش داده شد:

(رابطه ۱)

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

مشتق اول معادله دورنر برای تعیین گنجایش رطوبت نقطه‌ای (C(h)) مورد استفاده قرار گرفت (Asgarzadeh *et al.*, 2014a):

(رابطه ۲)

(2016) در رفسنجان ۷۵٪ در نظر گرفتند. با نبود اطلاعات دقیق در منطقه مورد مطالعه، در این پژوهش بنابه توصیه FAO از ضریب ۰/۴ استفاده شد (Allen et al., 1998). در نهایت برای بدست آوردن کل آب قابل استفاده گیاه، عمق آب به دست آمده از حاصلضرب عمق لایه در PAW، در چهار لایه با هم جمع گردید.

مقدار IWC نیز برای هر لایه خاک بر اساس رابطه گرانتولت از ادغام توابع وزنی عوامل محدود کننده با تغییرات تدریجی رطوبت خاک محاسبه گردید (Asgarzadeh et al., 2010):

$$IWC = \sum_{i=1}^n \int_{h_i}^{h_f} \prod_{j=1}^m \omega_j(h) C(h) dh \quad (\text{رابطه } ۵)$$

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 محدود کننده از طریق ضریب ω اثر خود را اعمال می‌نماید. n تعداد محدوده مکش‌ها، $C(h)$ مقدار گنجایش رطوبت نقطه‌ای (cm^{-1})، یا همان شیب منحنی مشخصه رطوبتی خاک ($|d\theta/dh|$) می‌باشد. $\omega(h)$ تابع وزنی است که نشانگر شدت تأثیر عامل محدود کننده برای فراهمی آب در هر مکش (h) بوده و به تعداد عوامل محدود کننده از ۱ تا m در هم ضرب می‌شوند و خود تابعی از h می‌باشد. مقادیر توابع وزنی از صفر (برای محدود کننده‌ترین شرایط) تا یک (برای شرایط عدم محدودیت) تغییر می‌کند. توابع مورد استفاده برای محدودیت‌های در نظر گرفته شده در دامنه‌های مکش متناظر به قرار زیر است (Asgarzadeh et al., 2010):

مدت سه دور آبیاری، رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت سنج پروفیل پروب^۱ به فواصل عمقی ۱۰ سانتی‌متر در این لوله‌ها اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است که در ابتدای آزمایش به منظور واسنجی دستگاه، نمونه‌هایی تهیه شده و رطوبت آن‌ها به روش وزنی اندازه‌گیری شد.

محاسبه PAW و IWC

آب قابل استفاده گیاه (PAW) به محتوی رطوبتی خاک بین رطوبت ظرفیت مزرعه‌ای و نقطه پژمردگی دائم اطلاق می‌گردد که با مد نظر قرار دادن رطوبت نظیر مکش ظرفیت زراعی (FC) برای حد بالائی و نقطه پژمردگی دائم (PWP) برای حد پائینی، برای هر لایه خاک محاسبه شد (Asgarzadeh et al., 2010; Hosseini et al., 2016):

$$PAW = \int_{FC}^{PWP} C(h) dh \quad (\text{رابطه } ۴)$$

که در آن $C(h)$ گنجایش رطوبت نقطه‌ای (cm^{-1}) یا همان مشتق تابع منحنی رطوبتی در θ مشخص می‌باشد. باتوجه به بافت سبک خاک (جدول ۳) برای FC مکش ۱۰۰ سانتی‌متر و برای PWP مکش ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. از آنجایی که فقط بخشی از آب موجود در دامنه مکش ۱۰۰ تا ۱۵۰۰۰ برای گیاه قابل استفاده است، ضریب حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (MAD) نیز در محاسبه PAW اعمال شد. گزارش‌های مختلفی برای مقدار MAD درختان پسته وجود دارد. Goldhamer (2005) مقدار این ضریب را در کالیفورنیا ۵۰٪ و Sedaghati et al.,

جدول ۱- توابع ضرایب وزنی مورد استفاده برای اعمال محدودیت‌ها در IWC و دامنه‌های مکش متناظر با آن

تابع ریاضی	دامنه مکش موثر (cm)	نوع محدودیت
$\omega_K(h) = \left(\frac{K_r(330)}{K_r(h)}\right)^p$	۰ تا ۳۳۰	زهکشی سریع
$\omega_a(h) = \log\left(\frac{h}{h_a}\right) / \log\left(\frac{h_f}{h_a}\right)$	مکش معادل تخلخل تهویه ایی ۱۰ تا ۱۵ درصد	تهویه
$\omega_{Kdry}(h) = \left[\frac{12000}{h}\right]^{-\beta}$	$12000 >$	هدایت هیدرولیکی کم
$\omega_{SR}(h) = 2.5 - ah^b$	مکش معادل مقاومت ۱/۵ تا ۲/۵ مگاپاسکال	مقاومت فروری
$\omega_{sa} = \begin{cases} 1, & 0 < EC_i \leq EC_T \\ 1 - \frac{EC_i - EC_T}{EC_F - EC_T}, & EC_T < EC_i < EC_F \\ 0, & EC_i \geq EC_F \end{cases}$	تمام دامنه رطوبتی خاک	شوری

در این روابط $\omega_K(h)$ ، $\omega_a(h)$ ، $\omega_{Kdry}(h)$ ، $\omega_{SR}(h)$ و $\omega_{sa}(h)$ به ترتیب توابع وزنی مربوط به محدودیت‌های زهکشی سریع، تهویه، هدایت هیدرولیکی کم، مقاومت مکانیکی و شوری می‌باشند. $K_r(h)$ هدایت هیدرولیکی نسبی خاک است که در این تحقیق تابع ترکیبی معلم دورنر برای خاک‌های دو مدی مورد استفاده قرار گرفته است (Asgarzadeh et al., 2014)؛ پارامتر تجربی که معمولاً ۰/۰۸ در نظر گرفته می‌شود، h_a و h_f به ترتیب مکش معادل تخلخل تهویه‌ای ۱۰٪ و ۱۵٪؛ پارامتر تجربی که از رسم هدایت هیدرولیکی نسبی در برابر مکش خاک (در دامنه مکش بالای ۱۲۰۰۰ سانتی‌متر) و برازش رابطه توانی به دست می‌آید؛ a و b پارامترهای معادله برازش داده‌ها به منحنی مقاومت فروری در برابر مکش خاک (جدول ۳)؛ EC_i ، EC_T و EC_F به ترتیب شوری آب خاک در زمان i (مثلاً ابتدای فصل رشد)، شوری آستانه تحمل گیاه، و حداکثر شوری قابل تحمل توسط گیاه می‌باشد. در این پژوهش از تابع Mohammadi and Khataar (2018) برای اعمال محدودیت شوری در محاسبه IWC استفاده شد.

حجم آب قابل استفاده در کل پروفیل به دست آمد. سپس با تقسیم عمق آب قابل استفاده به میزان تبخیر و تعرق پتانسیل،

محاسبه دور و زمان آبیاری پس از محاسبه فراهمی آب برای هر لایه از پروفیل خاک، عمق و

تعرق گیاه و در نهایت جذب آب ریشه، از مدل HYDRUS-2D استفاده شد. به منظور مدل‌سازی شرایط اولیه (شامل مقدار رطوبت و شوری خاک) و شرایط مرزی (مرزهای عمودی بدون جریان، مرز پایینی زهکشی آزاد، مرز بالایی شرایط اتمسفری شامل تبخیر و تعرق و بارندگی، و برای نقطه قرارگیری قطره‌چکان در هنگام وجود جریان مقدار جریان ثابت) تعیین شده و در مدل لحاظ گردید. پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز برای حل معادلات جریان آب طبق توابع ترکیبی منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی خاک ارائه شده توسط ونگنوختن - معلم از برازش به داده‌های مکش - رطوبت خاک، پارامترهای توزیع ریشه طبق تابع ورات و همکاران (Vrugt et al., 2001)، پاسخ گیاه به تنش آب و شوری طبق تابع ضرب‌پذیر (Van Genuchten, 1987)، و پارامترهای انتقال املاح طبق تابع حرکت توده‌ای - پخشیدگی برای انتقال یک نمک غیرواکنش‌پذیر در محیط همسان و یکنواخت، تعیین و وارد مدل گردید. مقادیر پارامترهای ورودی مدل‌سازی هایدروس در جدول (۲) آمده است. لازم به ذکر است شدت جریان ورودی آب به ناحیه ریشه همانند سایر شرایط در دو مدیریت یکسان بوده و تفاوت دو مدیریت IR_{PAW} و IR_{IWC} در دور و مدت زمان آبیاری است.

دور آبیاری، و با تقسیم حجم آب قابل استفاده به دبی قطره چکان زمان آبیاری محاسبه شد. در نهایت دو رژیم آبیاری مختلف یکی بر اساس PAW (IR_{PAW}) و دیگری بر اساس IWC (IR_{IWC}) برای باغ مذکور تعریف گردید.

داده‌های اقلیمی مورد نیاز برای بدست آوردن تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) از سایت سازمان هواشناسی کشور^۱ برای دو ایستگاه شهریار و فرودگاه امام خمینی استخراج شد و ET_0 (برحسب سانتی‌متر در روز) برای تمام ماه‌های سال با استفاده از نرم‌افزار ET₀ Calculator Version 3.2 محاسبه شد. برای ضریب گیاهی درختان پسته (K_c) در دوره‌های مختلف رشد نیز از مقادیر ارائه شده توسط Goldhamer (1995) استفاده شد. این مقادیر توسط سایر پژوهشگران نیز مورد استفاده قرار گرفته است (Dastoorani et al., 2012; Testi et al., 2008; Guerrero et al., 2005). تبخیر و تعرق در طول ماه‌های آبیاری (از خرداد تا مهر ماه) برای درختان پسته در منطقه مورد مطالعه ۰/۹۳ سانتی-متر در روز محاسبه گردید.

مدلسازی با هایدروس

به منظور مقایسه اثر دو مدیریت آبیاری اتخاذ شده بر مبنای مفاهیم PAW و IWC بر چگونگی توزیع املاح در خاک، مقدار

جدول ۲- پارامترهای ورودی به مدل هایدروس

فرایند	معادله	پارامترهای لازم برای ورود به نرم افزار					
		K_s (cm.day ⁻¹)	n	α (cm ⁻¹)	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	عمق
جریان آب	ریچاردز	۱۵۴	۱/۴۲۴	۰/۰۲۷۵	۰/۰۶۵	۰/۴۷۳	۰ - ۲۰
		۱۰۳	۱/۴۱۳	۰/۰۱۶۳	۰/۰۹	۰/۴۴۸	۲۰ - ۴۰
		۵۷	۱/۳۹۱	۰/۰۲۲۷	۰/۰۷۶	۰/۴۱۸	۴۰ - ۶۰
		۴۸	۱/۴۴۷	۰/۰۴۰۴	۰/۰۷۳	۰/۳۴	۶۰ - ۸۰
انتقال املاح	حرکت توده‌ای - پخشیدگی	D_w (cm ² day ⁻¹)	D_L (cm)	D_T (cm)	BD (g. cm ⁻³)		
		۰	۱۰	۱	برابر جدول ۳		
توزیع ریشه	معادله ورات	P_r	r^*	r_m	P_z	z^*	z_m
		۲/۹۱۸	۴۰	۲۰۰	۳,۲۱۴	۲۰	۷۰
پاسخ گیاه به خشکی و شوری	معادله ونگنوختن	P_{50}	C_{50}	P			
		۸۹۲۵	۲۹/۷	۳			

K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک؛ n و α پارامترهای معادله منحنی رطوبتی ونگنوختن؛ θ_r و θ_s به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و باقیمانده خاک؛ D_w ضریب پخشیدگی مولکولی در آب آزاد؛ D_L ضریب انتشار پذیری طولی؛ D_T ضریب انتشار پذیری عرضی، BD جرم مخصوص ظاهری؛ r_m و z_m حداکثر عمق و طول محوری ریشه دوانی؛ P_r ، r^* ، z^* پارامترهای تجربی؛ P_{50} مکش ماتریک آب خاک در حالتی که جذب آب توسط ریشه ۵۰ درصد کاهش می‌یابد؛ C_{50} غلظت املاح (در اینجا هدایت الکتریکی) آب خاک که منجر به کاهش ۵۰ درصد جذب آب توسط ریشه گیاه می‌شود؛ و P پارامتر

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین پارامترهای مدل منحنی رطوبتی دورنر برازش یافته به داده‌های مکش-رطوبت خاک و مدل توانی برازش یافته به داده‌های مقاومت فروری در جدول (۳) ارائه شده است.

این نتایج نشان می‌دهد که از سطح به عمق بافت خاک درشت‌تر شده و درصد منافذ و رطوبت اشباع کاهش می‌یابد. همچنین میزان جرم مخصوص ظاهری نیز افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش تراکم و کاهش هدایت هیدرولیکی خاک است. در لایه سطحی خاک در ابتدای فصل رشد مقدار زیادی کود دامی افزوده شده بود که موجب بالا رفتن درصد کربن آلی

آن شده است. براساس این جدول برازش مدل دورنر به داده‌های منحنی رطوبتی از دقت بالایی برخوردار بوده و در همه لایه‌ها ضریب تبیین بالای ۰/۹۹ است. در لایه ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متری، بافت 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 که نشان می‌دهد در خاک شن لومی (۶۰ - ۸۰ سانتی-متری) خاصیت دوآلگویی غالب‌تر از لایه‌های سطحی می‌باشد. چرا که هر یک از خم‌های منحنی سهم نسبی تقریباً برابری دارند. تغییرات مقاومت فروری (افزایش ضریب a و کاهش توان b) نیز نشان می‌دهد که در لایه‌های زیرین خاک حتی در رطوبت‌های بالا نیز مقاومت خاک زیاد بوده و می‌تواند رشد ریشه را با محدودیت مواجه کند. این نتیجه با افزایش جرم مخصوص ظاهری و کاهش تخلخل خاک همسو می‌باشد.

جدول ۳- 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	EC _e (dS.m ⁻¹)	درصد اشباع (g.g ⁻¹)	آهک (%)	کربن آلی (%)	BD (gcm ⁻³)	K _s (cm.day ⁻¹)
۰-۲۰	۶۸	۱۹	۱۳	لوم شنی	۷/۵	۶/۸	۰/۳۲۳	۱۶	۲/۰۸	۱/۴۶	۱۵۴
۲۰-۴۰	۶۳	۱۹	۱۸	لوم شنی	۷/۴	۵/۹	۰/۲۸۷	۱۷	۰/۹۳۶	۱/۵۶	۱۰۳
۴۰-۶۰	۶۶	۲۰	۱۴	لوم شنی	۷/۶	۵/۵۱	۰/۲۵۱	۱۳	۰/۵۸۵	۱/۶۵	۵۷
۶۰-۸۰	۸۰/۹	۹/۹	۹/۲	شن لومی	۷/۸	۵/۳۷	۰/۲۰۴	۱۱	۰/۱	۱/۶۶	۴۸

عمق (cm)	ضرایب منحنی رطوبتی دورنر										مدل توانی مقاومت فروری		
	n1	n2	w1	w2	α ₁ (cm ⁻¹)	α ₂ (cm ⁻¹)	θ _r (cm ³ cm ⁻³)	θ _s (cm ³ cm ⁻³)	a	b	R ²		
۰-۲۰	۱/۲۵۷	۱/۸۳۷	۰/۵۱۷	۰/۴۸۲	۰/۹۹۶	۰/۹۹۶	۰/۴۷۳	۰/۴۷۳	۰/۲۹۴	۰/۴۴۶۱	۰/۹۴۴		
۲۰-۴۰	۱/۸۷۵	۱/۳۳۰	۰/۳۲۱	۰/۶۹۷	۰/۹۹۱	۰/۹۹۱	۰/۴۴۹	۰/۴۴۹	۰/۱۲۷۴	۰/۳۱۳۱	۰/۹۴۳		
۴۰-۶۰	۲/۳۵۳	۱/۷۹۴	۰/۳۵۴	۰/۶۴۶	۰/۹۹۷	۰/۹۹۷	۰/۴۱۹	۰/۴۱۹	۰/۱۴۴۲	۰/۳۰۸۷	۰/۹۴۰		
۶۰-۸۰	۱/۲۵۷	۱/۸۳۷	۰/۵۱۷	۰/۴۸۲	۰/۹۹۶	۰/۹۹۶	۰/۳۴	۰/۳۴	۰/۶۰۵	۰/۱۶۸۴	۰/۸۱۰		

فراهمی آب خاک

مقدار رطوبت FC، PWP و PAW، دور و مدت آبیاری محاسبه شده با آن در جدول (۴) ارائه شده است. سطح خیس شده در سامانه آبیاری قطره‌ای پیاده شده در مزرعه یک مستطیل به ابعاد ۱۲۰ × ۲۰۰ (فاصله بین درختان در دو برابر فاصله قطره‌چکان از تنه درخت در دو جهت) است که آب مورد نیاز توسط ۳/۲ قطره‌چکان با دبی ۸ لیتر در ساعت تأمین می‌شود. بر این اساس دور آبیاری هر ۷ روز یکبار و مدت آبیاری ۶ ساعت محاسبه گردید. لازم به ذکر است که

دور و مدت زمان آبیاری انجام شده در باغ مورد مطالعه از پیش و توسط مهندسیین دایر کننده سامانه آبیاری قطره‌ای و براساس مفهوم PAW تعیین شده است و اختلاف یک روز به‌دست آمده می‌تواند در نتیجه خطاهای موجود در اندازه‌گیری‌ها، روش تعیین تبخیر و تعرق و مواردی از این قبیل باشد؛ لذا مدل‌سازی هایدروس با اتکا به شرایط مزرعه و دور آبیاری ۸ روز صورت گرفت.

جدول ۴- مقادیر رطوبت PAW، PWP، FC و عمق آب قابل استفاده گیاه در لایه‌های مختلف خاک و دور و مدت آبیاری محاسبه شده

عمق	θ_{FC} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{FPWP} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	PAW ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	عمق آب قابل استفاده* (cm)	دور آبیاری (روز)	مدت آبیاری قطره‌ای (ساعت)
۰ - ۲۰	۰/۳۰۹	۰/۰۶۵	۰/۲۴۴	۱/۹۴۸		
۲۰ - ۴۰	۰/۳۱۷	۰/۰۹	۰/۲۲۷	۱/۸۱۸		
۴۰ - ۶۰	۰/۲۹۱	۰/۰۷۶	۰/۲۱۵	۱/۷۲۴	۷/۱	۶
۶۰ - ۸۰	۰/۲۱۴	۰/۰۷۳	۰/۱۴۱	۱/۱۳		

* با در نظر گرفتن درصد تخلیه مجاز برابر با ۰/۴ محاسبه شده است.

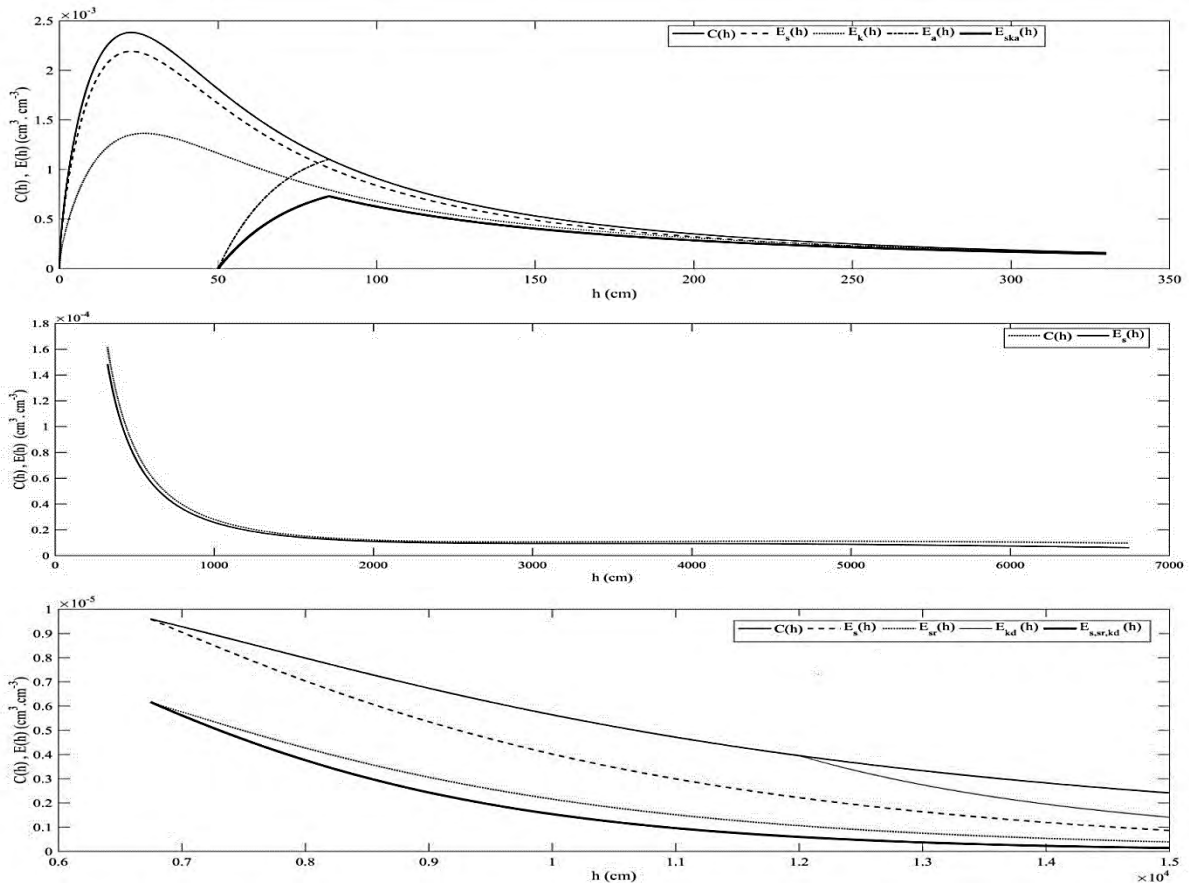
باعث کاهش ۹۲/۵٪ فراهمی آب موجود شده است. در نهایت از مجموع $۰/۳۰۶۷ \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ رطوبت موجود در دامنه مکش ۵۰ تا ۱۵۰۰۰ سانتی‌متری، بر اساس محدودیت‌های فیزیکی قراردادی اعمال شده $۰/۲۰۵۳ \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ آن قابل استفاده برای گیاه است. در مورد لایه ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متری مشاهده می‌شود که محدودیت مقاومت فروری بالا از مکش ۲۱۹ سانتی‌متری آغاز شده و در مکش ۴۵۶۱ سانتی‌متری به حداکثر مقدار خود رسیده و باعث به صفر رسیدن مقدار آب قابل استفاده خاک شده است. با مقایسه IWC با PAW مشاهده می‌شود که خاک حتی در مکش‌های کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متری در تامین آب قابل استفاده گیاه نقش دارد و گیاه می‌تواند در این دامنه رطوبتی قسمتی از آب خاک را جذب نماید. نکته جالب دیگر مشاهده درصد کاهش آب قابل استفاده در مفهوم IWC که هرچند در دامنه‌های مکش مختلف متفاوت است، اما به صورت میانگین حدود عدد ۰/۴ می‌باشد که نزدیک به MAD در نظر گرفته شده در مفهوم PAW است. با این وجود اختلاف مشاهده شده بین این دو مفهوم از کاهش حد بالایی آب قابل استفاده به زیر مکش ۱۰۰ سانتی‌متر و اعمال اثر متفاوتی از محدودیت‌های فیزیکی در دامنه‌های مختلف مکش خاک می‌باشد که در کل باعث شده است در مفهوم IWC آب قابل استفاده بیشتری برای گیاه محاسبه شود. با به دست آوردن IWC، عمق آب قابل استفاده خاک برای هر لایه محاسبه شد. براساس IWC جمعاً در لایه ۰ - ۸۰ سانتی-متری، $۱۱/۴۵ \text{ cm}$ آب قابل استفاده گیاه وجود دارد و با تقسیم آن به تبخیر و تعرق گیاهی دور آبیاری ۱۲ روز به دست می‌آید. با افزایش عمق آب آبیاری از $۶/۶۲ \text{ cm}$ در IR_{PAW} (که در مزرعه با توصیه مهندسان دایر کننده سامانه آبیاری اعمال شده بود) به $۱۱/۴۵ \text{ cm}$ در IR_{IWC} ، سطح خیس شده خاک نیز حدود ۱۰ سانتی‌متر در هر جهت افزایش یافت (با مدلسازی سطح خیس شده در IR_{IWC} برابر ۱۲۰×۲۲۰ به دست آمد). در نهایت مدت زمان آبیاری در مدیریت IR_{IWC} ۱۲ ساعت محاسبه گردید.

برای محاسبه IWC، طبق جدول (۵) کل دامنه مکش خاک به اجزای کوچکتر دارای محدودیت‌های شناخته شده تفکیک شد و با استفاده از ضرایب مربوطه در هریک از دامنه‌ها، مقدار فراهمی آب در هر محدوده و جمع کل به دست آمد (جدول ۵). رابطه ریاضی محاسبه آب قابل استفاده برای لایه ۲۰ - ۰ سانتی‌متری به صورت زیر می‌باشد:

$$IWC = \int_{50}^{85} \omega_s(h) \omega_K(h) \omega_a(h) C(h) dh + \int_{85}^{330} \omega_s(h) \omega_K(h) C(h) dh + \int_{330}^{6747} \omega_s(h) C(h) dh + \int_{6747}^{12000} \omega_s(h) \omega_{SR}(h) C(h) dh + \int_{12000}^{15000} \omega_s(h) \omega_{SR}(h) \omega_{Kdry}(h) C(h) dh$$

همچنین به عنوان نمونه تغییرات ضرایب محدود کننده در دامنه‌های مختلف مکش و گنجایش رطوبت نقطه‌ای $C(h)$ و گنجایش رطوبت نقطه‌ای موثر $E(h)$ که از حاصلضرب ضرایب وزنی در $C(h)$ به دست می‌آیند، برای لایه ۲۰ - ۰ در شکل (۱) نشان داده شده است.

با توجه به محاسبات صورت گرفته برای لایه ۲۰ - ۰ سانتی‌متری، تخلخل تهویه‌ای ۱۰ و ۱۵٪ معادل مکش ۵۰ و ۸۵ سانتی‌متر می‌باشد. بنابراین در این دامنه مکش ماتریک خاک، سه محدودیت تهویه و زهکشی سریع و شوری وجود دارد. در این دامنه از منحنی رطوبتی خاک، $۰/۰۴۹۸ \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ رطوبت وجود دارد که به دلیل محدودیت‌های ذکر شده با کاهش حدود ۶۸٪ به $۰/۱۵۹ \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ می‌رسد. بعد از آن و با اتمام محدودیت تهویه، در دامنه ۳۳۰ - ۸۵ سانتی‌متری محدودیت زهکشی سریع به همراه شوری وجود دارد که باعث کاهش رطوبت قابل استفاده خاک از $۰/۱۰۲۰ \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ به $۰/۰۷۸۶ \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ شده است. در دامنه مکش $۶۷۴۷ - ۳۳۰$ سانتی‌متر محدودیت شوری باعث کاهش ۱۳ درصدی آب قابل استفاده شده است. در دامنه $۱۲۰۰۰ - ۶۷۴۷$ سانتی‌متر محدودیت مقاومت فروری خاک در کنار شوری باعث کاهش فراهمی آب از $۰/۰۳۴$ به $۰/۰۱۳۱ \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ شده و در دامنه مکش ۱۲۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ هم مجموع محدودیت‌های مقاومت فروری، هدایت هیدرولیکی کم و شوری در مجموع



شکل ۱- گنجایش آب دیفرانسیلی (C(h)) و گنجایش آب دیفرانسیلی موثر E(h) برای مکش‌های دامنه مرطوب (مکش ۳۳۰-، ۰-، دامنه بدون محدودیت ۶۷۴۷) و دامنه خشک (مکش ۱۵۰۰۰-۶۷۴۷) منحنی رطوبتی لایه ۲۰-۰ سانتی متری

جدول ۵- رطوبت حجمی و رطوبت قابل استفاده گیاه با اعمال محدودیت ممکن در پنج دامنه مکش و مجموع آن‌ها به‌عنوان IWC

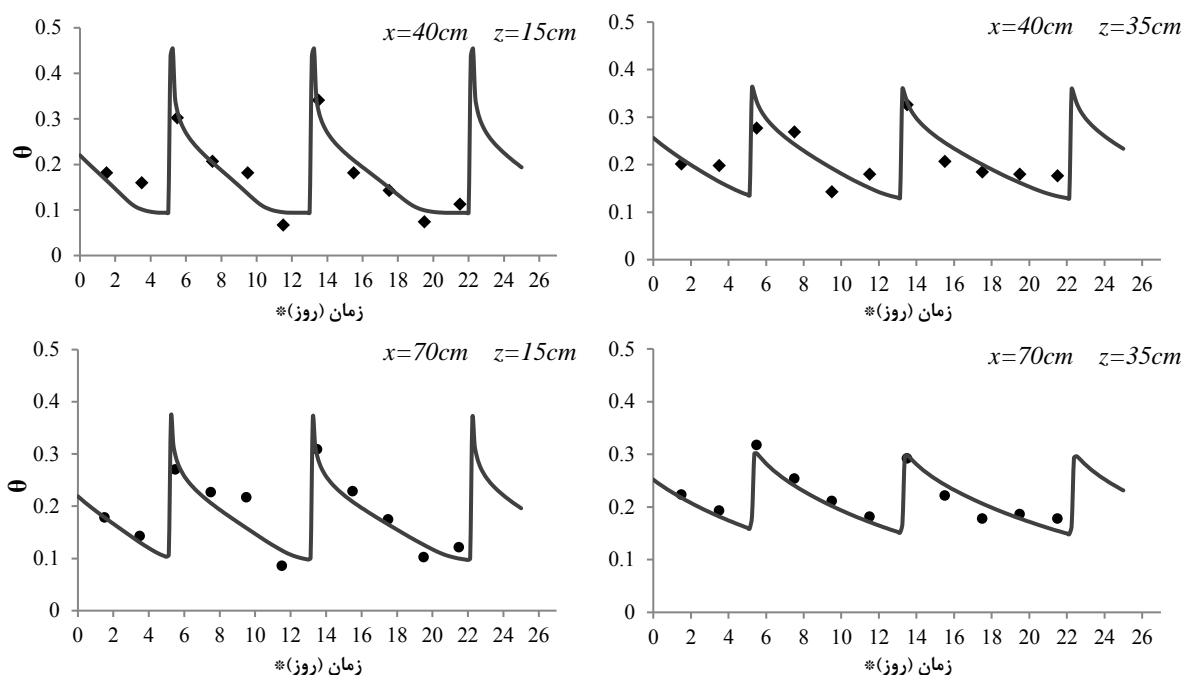
IWC	محدودیت مقاومت فروری + هدایت هیدرولیکی کم + شوری	محدودیت مقاومت فروری + شوری	محدودیت شوری	محدودیت زهکشی سریع + شوری	محدودیت تهویه + زهکشی سریع + شوری	واحد	پارامتر	عمق (cm)
۵۰-۱۵۰۰۰	۱۲۰۰۰-۱۵۰۰۰	۶۷۴۷-۱۲۰۰۰	۳۳۰-۶۷۴۷	۸۵-۳۳۰	۵۰-۸۵	(cm)	دامنه مکش	
۰/۳۰۶۷	۰/۰۰۹۳	۰/۰۳۴	۰/۱۱۱۵	۰/۱۰۲۰	۰/۰۴۹۸	cm ³	رطوبت نگهداری شده	۰
۰/۲۰۵۲	۰/۰۰۰۷	۰/۰۱۳۱	۰/۰۹۶۹	۰/۰۷۸۶	۰/۰۱۵۹	cm ³	رطوبت قابل استفاده	۰
۳۳	۹۲/۵	۶۱/۴	۱۳/۱	۲۲/۹	۶۸/۱	%	کاهش ناشی از محدودیت	
۵۵-۱۳۴۳۶	۱۲۰۰۰-۱۳۴۳۶	۲۶۲۹-۱۲۰۰۰	۳۳۰-۲۶۲۹	۱۴۴-۳۳۰	۵۵-۱۴۴	(cm)	دامنه مکش	
۰/۲۵۲۵	۰/۰۰۶۶	۰/۰۸۷۳	۰/۰۷۲۶	۰/۰۳۶۱	۰/۰۴۹۹	cm ³	رطوبت موجود	۰
۰/۱۵۵۹	۰/۰۰۰	۰/۰۳۷۲	۰/۰۶۸۴	۰/۰۳۱۶	۰/۰۱۸۶	cm ³	رطوبت قابل استفاده	۰
۳۸/۲	۹۹	۵۷/۴	۵/۸	۱۲/۵	۶۲/۷	%	کاهش ناشی از محدودیت	
۷۰-۱۰۳۱۶	۱۵۰۰۰-۱۰۳۱۶	۱۹۷۲-۱۰۳۱۶	۳۳۰-۱۹۷۲	۱۳۹-۳۳۰	۷۰-۱۳۹	(cm)	دامنه مکش	
۰/۲۲۵۹	.	۰/۰۸۹۸	۰/۰۴۴۴	۰/۰۴۲۴	۰/۰۴۹۴	cm ³	رطوبت موجود	۰
۰/۱۳۴۴	.	۰/۰۳۸۱	۰/۰۴۲۳	۰/۰۳۶۴	۰/۰۱۷۵	cm ³	رطوبت قابل استفاده	۰
۴۰/۵	-	۵۷/۶	۴/۷	۱۴/۱	۶۴/۶	%	کاهش ناشی از محدودیت	
۶۰-۴۵۶۱	۱۵۰۰۰-۴۵۶۱	۳۳۰-۴۵۶۱ ^②	۲۱۹-۳۳۰ ^①	۱۷۲-۲۱۹	۶۰-۱۷۲	(cm)	دامنه مکش	
۰/۱۴۷	.	۰/۰۷۱۷	۰/۰۱۵۶	۰/۰۰۹۸	۰/۰۴۹۹	cm ³	رطوبت موجود	۰
۰/۰۷۶۹	.	۰/۰۳۶۳	۰/۰۱۳۶	۰/۰۰۸۴	۰/۰۱۸۶	cm ³	رطوبت قابل استفاده	۰
۴۷/۷	-	۴۹/۴	۱۲/۸	۱۴/۳	۶۲/۷	%	کاهش ناشی از محدودیت	

① در این عمق در دامنه مکش ۳۳۰-۲۱۹ سانتی‌متر علاوه بر محدودیت زهکشی سریع و شوری، محدودیت مقاومت فروری نیز مشاهده و اعمال شده است. ② در دامنه مکش ۴۵۶۱-۳۳۰ سانتی‌متر تنها عامل محدود کننده مقاومت فروری زیاد به همراه شوری می‌باشد.

مدلسازی با هایدروس

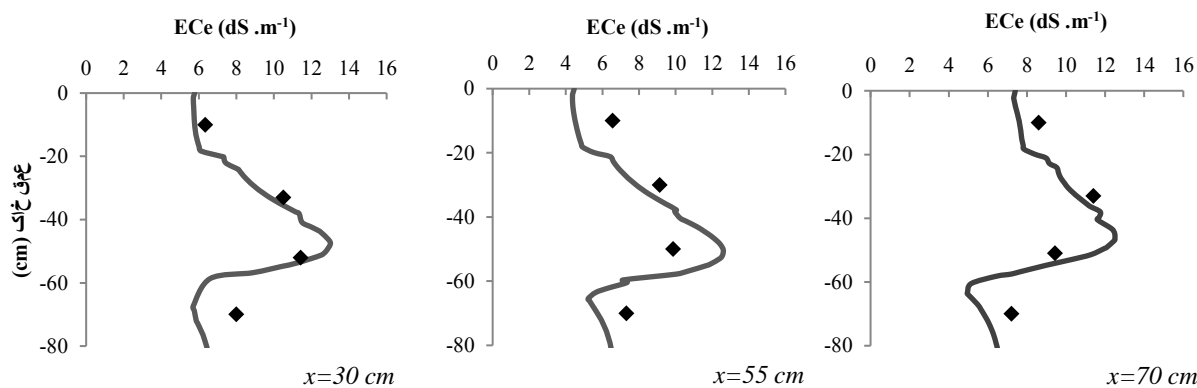
برای مقایسه دو برنامه آبیاری به دست آمده از دو مفهوم مختلف نیاز است که باز توزیع رطوبت در خاک، چگونگی تجمع املاح در خاک و در نهایت میزان جذب آب توسط گیاه مورد بررسی قرار گیرد. به همین منظور از نرم افزار هایدروس برای مدلسازی توزیع رطوبت و شوری خاک، و همچنین جذب آب ریشه استفاده شد. با وارد کردن پارامترها و شرایط اولیه و مرزی تعیین شده (جدول ۲) در مدل هایدروس، ابتدا برای IR_{PAW} (که مدیریت رایج در باغ است) توزیع رطوبت و شوری خاک مدل سازی و صحت سنجی

شد و در محل و زمان های منطبق بر اندازه گیری ها نتایج استخراج گردید. در شکل (۲) تغییرات رطوبت با زمان و در شکل (۳) تغییرات شوری با عمق برای داده های اندازه گیری شده و مدلسازی شده برای چند نقطه مشاهده ای نشان داده شده است. در جدول (۴) نیز صحت مدلسازی با استفاده از آماره های میانگین خطا^۱ (ME)، میانگین ریشه دوم خطا^۲ (RMSE)، کارایی نش-ساتکلیف^۳ (E) و میانگین ریشه دوم خطای نرمال شده^۴ (NRMSE) بیان شده است.



شکل ۲- تغییرات رطوبت ($cm^3 cm^{-3}$) اندازه گیری (*) و مدلسازی شده (—) در فواصل (x) و عمق های (z) متفاوت از درخت برای روش مدیریت آبیاری براساس مفهوم آب قابل استفاده گیاه (IR_{PAW})

* لازم به ذکر است که روز اول آزمایش های میدانی دو روز بعد از آبیاری بود که با تطبیق مدلسازی با شرایط مزرعه باعث شد اولین پیک رطوبتی در روز ۶ام از شروع آزمایشها مشاهده گردد.



شکل ۳- مقایسه شوری مدلسازی شده (—) و اندازه گیری شده (♦) در عمق و فواصل (x) مختلف از درخت در مدیریت آبیاری براساس مفهوم آب قابل استفاده گیاه (IR_{PAW})

۳ Nash-Sutcliff

۴ Normalized root mean square error

۱ Mean error

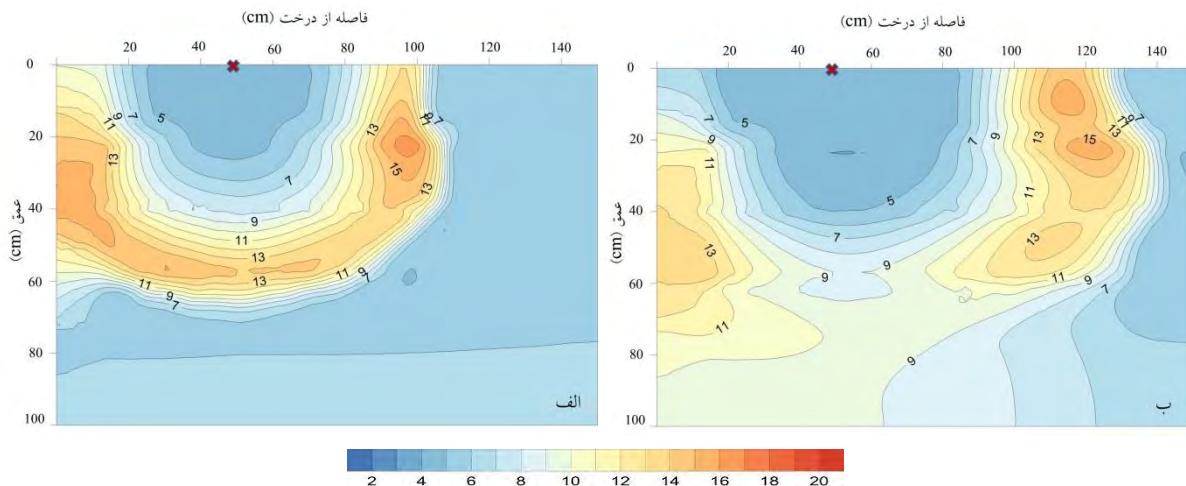
۲ Root mean square error

جدول ۶- مقادیر آماره‌های واسنجی برای برآورد توزیع رطوبت و شوری خاک در مدل هایدروس

نوع مدل‌سازی	تعداد داده	ME	RMSE	E	NRMSE
توزیع رطوبت	۵۱۵	-۰/۰۰۴	۰/۰۲۳	۰/۸۶۳	۱۵/۱۵
توزیع شوری	۲۳	-۰/۵۸۲	۱/۴۲۵	۰/۴۵۶	۱۶/۴

علیرغم اختلافات موجود که ناشی از ترکیب خطاهای موجود در اندازه‌گیری، کالیبراسیون و مدل‌سازی می‌باشد، آماره-های صحت سنجی نشان می‌دهد که مدل‌سازی با دقت خوبی انجام شده است. بر اساس جدول (۴)، مشاهده می‌شود که مدل‌سازی هرچند اندکی کم برآوردی دارد، و این کم برآوردی در توزیع شوری بیشتر مشهود است، اما با توجه به آماره NRMSE صحت مدل‌سازی در بازه دقت خوب قرار دارد (Jamieson et al., 1991). بالا بودن دقت مدل‌سازی توزیع رطوبت و شوری ناحیه ریشه درختان پسته در شرایط مزرعه و تحت مدیریت کامل باغدار نشان‌دهنده قابلیت بالای مدل هایدروس در شرایط پیچیده می‌باشد که با نتایج سایر پژوهشگران همخوانی دارد (Skaggs et al., 2004; AbouLila et al., 2012; Phogat et al., 2012). پس از کالیبراسیون مدل هایدروس برای شرایط باغ و تعیین صحت مدل، زمان و دور آبیاری که در مزرعه صورت گرفته بود با زمان و دور آبیاری پیشنهادی بر اساس IWC تغییر یافت و مدل بر اساس مدیریت جدید اجرا شد. در شکل (۴) چگونگی توزیع شوری حاصل از دو مدیریت آبیاری IR_{PAW} و IR_{IWC} نشان داده شده است.

با مقایسه توزیع رطوبت و شوری مدل‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده، مشاهده می‌شود که رطوبت مدل‌سازی شده تطابق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد اما با دور شدن از زمان آبیاری خطای مدل اندکی افزایش یافته است. به نحوی که در لایه سطحی مقدار رطوبت بیشتر و در لایه عمقی مقدار رطوبت کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده به دست آمد. در مورد توزیع شوری نیز دقت مدل‌سازی در نواحی نزدیک به قطره‌چکان کاهش یافته است. در این نواحی آبشویی بیشتر املاح در نزدیکی قطره‌چکان و تجمع زیاد در فواصل دورتر از آن، شبیه‌سازی شده است. همچنین در لایه عمقی ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متر مدل یک گسستگی بین نتایج مشاهده می‌شود که به دلیل تغییر ویژگی‌های هیدرولیکی اندازه‌گیری شده است. این احتمال وجود دارد که در طبیعت تغییرات به صورت تدریجی صورت گرفته است، اما با توجه به ماهیت نمونه برداری، اندازه‌گیری‌ها و مدل‌سازی، یعنی به عبارتی به دلیل کمبود اطلاعات، وارد کردن تدریجی تغییرات ممکن نبوده است. اختلاف زیاد ایجاد شده در ویژگی‌های هیدرولیکی بین دو لایه منجر به گسستگی در محاسبات شده است.



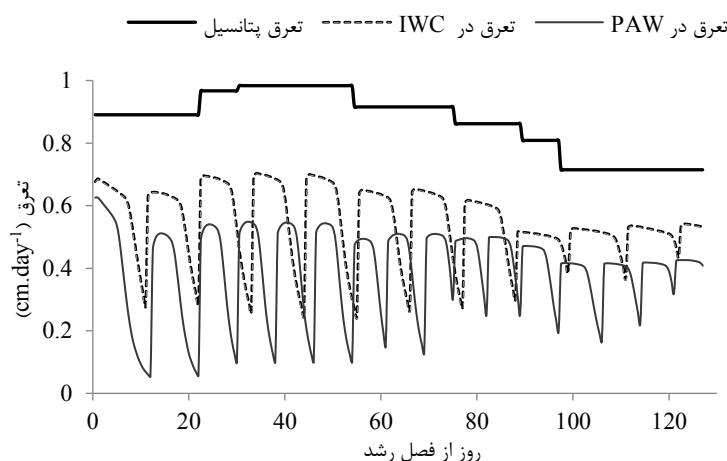
شکل ۴- تغییرات توزیع شوری مدل‌سازی شده با هایدروس در دو رژیم آبیاری برنامه‌ریزی شده بر اساس (الف) مفهوم PAW و (ب) IWC؛ موقعیت درخت در {۰،۰} و نشان دهنده موقعیت قطره چکان می‌باشد.

ناحیه تجمع املاح که در IR_{PAW} به صورت یک حلقه کوچک در اطراف قطره چکان مشاهده می‌شود، در IR_{IWC} گسترده‌تر شده و تجمع املاح هم در نزدیکی درخت و هم در موقعیت زیر قطره-چکان به عمق‌های پایین‌تر شسته شده است. با توجه به اینکه

مشاهده می‌شود که با افزایش دور و زمان آبیاری در IR_{IWC} (شکل ۴-ب)، ناحیه خیس شده افزایش یافته و سطح متاثر از آبیاری از ۱۰۵ سانتی‌متر در IR_{PAW} (شکل ۴-الف) به حدود ۱۰۵ سانتی‌متر (شکل ۴-ب) گسترش پیدا کرده است. همچنین

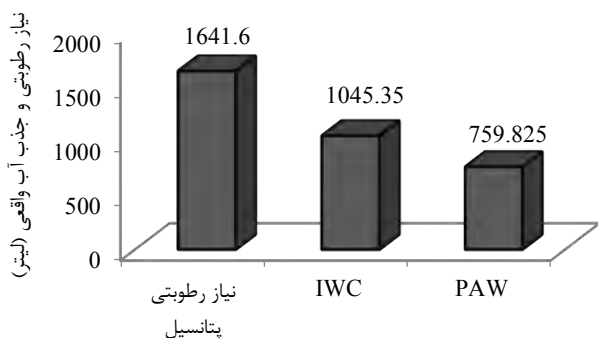
بیشتری را از خاک استخراج نماید. در همین راستا در شکل (۵) مقدار تعرق گیاهی محاسبه شده توسط مدل هایدروس برای دو رژیم آبیاری در مقایسه با تعرق پتانسیل در طول ۴ ماه از دوره رشد ترسیم شده است. لازم به ذکر است که (Ataee et al., 2019) نشان دادند که همبستگی مثبت و معنی داری بین تعرق به دست آمده از مدل هایدروس با هدایت روزنه‌ای و جریان شیره آوندی اندازه گیری شده در مزرعه وجود دارد.

حداکثر مقدار شوری به دست آمده در دو رژیم آبیاری تقریباً برابر است، دامنه توزیع شوری در IR_{IWC} گسترده‌تر شده است و این نشان می‌دهد که حجم بیشتری از خاک در تامین رطوبت مورد نیاز گیاه نقش دارند. علاوه بر این، با دورتر شدن مرکز تجمع املاح از درخت و کاهش شدت تجمع املاح در اعماق زیر قطره-چکان مشاهده می‌شود که مساحت نواحی دارای شوری پایین که مساعدتر برای جذب آب هستند، افزایش یافته و گیاه می‌تواند آب



شکل ۵- تغییرات تعرق مدل‌سازی شده برای گیاه پسته در روزهای مختلف سال در دو رژیم آبیاری IR_{PAW} و IR_{IWC}

لازم برای شرایط بدون تنش که توسط نرم افزار هایدروس محاسبه گردیده است، ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در مدیریت IR_{IWC} مقدار بیشتری از نیاز رطوبتی پتانسیل گیاه در مقایسه با IR_{PAW} تأمین می‌شود.



شکل ۶- مقدار نیاز رطوبتی پتانسیل و مقدار آب جذب شده در IR_{IWC} و IR_{PAW}

نتیجه گیری

افزایش اطلاعات در زمینه محدودیت‌ها و فرایندهای جذب آب در سال‌های اخیر باعث توسعه مدل‌های جامع‌تر برای محاسبه فراهمی آب خاک شده است. IWC مدلی است که می‌تواند عوامل محدود کننده جذب آب را در قالب توابع وزنی بر فراهمی آب خاک اعمال نماید. در این پژوهش محاسبه رطوبت قابل استفاده

در شکل (۵) مشاهده می‌شود تعرق جذب آب در IR_{IWC} همواره بیشتر IR_{PAW} می‌باشد و این اختلاف به‌ویژه در زمانی که تبخیر و تعرق پتانسیل (ET_p) بالا است، افزایش می‌یابد و با کاهش آن مقدار جذب آب در دو رژیم آبیاری بهم نزدیک می‌شود. مدل‌سازی نشان می‌دهد که در آخر فصل رشد با کاهش تبخیر و تعرق پتانسیل، مقدار جذب آب و تعرق گیاهی کاهش می‌یابد. نرم افزار هایدروس برای محاسبه جذب آب از مدل ترکیبی ضرب پذیر استفاده می‌کند که در آن "سرعت جذب آب بالقوه" به "تابع پاسخ گیاه به تنش آب و شوری و ننگنختن" ضرب می‌گردد (Šimůnek et al., 2012). این تابع بیشترین تطابق را با داده‌های مزرعه‌ای نشان داده است (Babazadeh et al., 2017; Hoseini et al., 2016). بنابراین با توجه به حضور املاح در خاک، همواره جذب آب کمتر از حالت پتانسیل خواهد بود و به ویژه در آخر فصل رشد که غلظت املاح به بیشترین مقدار خود می‌رسد، این اختلاف نیز افزایش می‌یابد. بر مبنای این نتایج در صورت استفاده از IWC در مدیریت آبیاری، گیاه کمتر با تنش روبه رو می‌گردد. علاوه بر این در IR_{IWC} تعداد روزهایی که گیاه دارای حداکثر تعرق است (یعنی مقطع صاف بالای منحنی) بسیار بیشتر از IR_{PAW} می‌باشد. این نشان دهنده افزایش مقدار جذب آب قبل از شروع محدودیت خشکی در IR_{IWC} می‌باشد. در شکل (۶) نیز مقدار کل آب جذب شده در هر یک از مدیریت‌ها با مقدار آب

به لایه‌های زیرین خاک شسته شده است. همین امر سبب افزایش فضای مناسب برای جذب آب توسط گیاه (از نظر شوری) شده و در نتیجه آب بیشتری در دسترس گیاه قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر مفهوم IWC با در نظر گرفتن تمام خصوصیات خاک، برآورد دقیق‌تری از فراهمی آب خاک ارائه می‌دهد و با استفاده از آن در مدیریت آبیاری، نقش شوری در کاهش فراهمی آب خاک دخالت داده شده و جبران می‌گردد. مدلسازی نشان داد که در IR_{IWC} ۶۳٪ درصد از نیاز رطوبتی گیاه تامین می‌گردد در حالی که در IR_{PAW} این رقم ۴۸٪ درصد می‌باشد. براساس این نتایج مشخص می‌شود که دخالت دادن شکل منحنی رطوبتی، محدودیت‌های جذب آب موجود در شرایط رطوبتی مختلف خاک و شرایط هیدرولیکی خاک در محاسبه فراهمی آب در قالب IWC می‌تواند باعث برآورد دقیق‌تر آب قابل استفاده خاک شود. با برآورد دقیق ظرفیت نگهداری رطوبت خاک، مدیریت آبیاری صورت گرفته نیز تطابق بهتری با نیاز آبی گیاهی داشته و در نتیجه تنش‌های کمتری به گیاه وارد می‌شود.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

REFERENCES

- AbouLila, T.S., Berndtsson, R., Persson, M., Somaïda, M., El-Kiki, M., Hamed, Y. & Mirdan, A. (2012). Numerical evaluation of subsurface trickle irrigation with brackish water. *Irrigation Science*. 31, 1125-1137.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R. & 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.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Dexter, A.R., Mahboubi, A.A. & Neyshabouri, M.R. (2014b). Determination of soil available water for plants: Consistency between laboratory and field measurements. *Geoderma*. 226-227, 8-20.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A. & 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.
- Asgarzadeh, H., Mosaddeghi, M.R., Mahboubi, A.A., Nosrati, A. & 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.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Ataee, A., Akbari, M., Neyshaboori, M.R., Zarehaghi, D. & Onnabi Milani, A. (2019). Pistachio response to water and salinity distribution in surface and subsurface drip irrigation systems. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 13(1), 115-128. (In Farsi).
- Ataee, A., Neyshaboori, M.R., Akbari, M., Zarehaghi, D. & Onnabi Milani, A. (2018). Evaluation of HYDROUS-2D model for determination of soil moisture distribution under surface and sub-surface drip irrigation of pistachio trees. *Journal of Water Research in Agriculture*. 32(4), 581- 595. (In Farsi).
- Babazadeh, H., Tabrizi, M.S. & Homaeae, M. (2017). Assessing and Modifying Macroscopic Root Water extraction basil (*Ocimum basilicum*) models under simultaneous water and salinity stresses. *Soil Science Society of America Journal*. 81(1), pp.10-19.
- Dane, J. H. & Hopmans, J. (2002). Water retention and storage. In Dane J. H. & Clake, G. C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods*. (pp. 671-720). Madison: SSSA Book Series.
- Dastoorani, M., Poormohammadi, S. & Rahimian, M.H. (2012). Estimation of actual evapotranspiration in ardakan pistachio orchards using remote sensing. *Journal of Water Research in Agriculture*. 26(1), 1- 13. (In Farsi).
- Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. *Water Resources Research*. 30, 211-223.
- Fazel, F., Gheysari, M., Mohamadian, M. & Etemadi, N. (2017). Effect of maximum allowable depletion on

بر اساس مفهوم IWC نشان داد که آب قابل استفاده گیاه در بافت لوم شنی از مکش‌های کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متر شروع می‌شود. هرچند درصد کاهش فراهمی آب در مفهوم IWC در حدود ۰/۴ و نزدیک به MAD در نظر گرفته شده در مفهوم PAW است، اما به دلیل اعمال اثر متفاوتی از محدودیت‌ها در دامنه‌های مختلف مکش خاک در IWC، مقدار رطوبت قابل استفاده برآورد شده در دو مفهوم با یکدیگر اختلاف قابل توجهی دارد. در نتیجه دور و مدت زمان آبیاری به دست آمده از این دو روش متفاوت بوده و در IR_{PAW} دور آبیاری هر هشت روز یکبار و به مدت ۶ ساعت آبیاری به دست آمد در حالی که IR_{IWC} با افزایش برآورد ذخیره رطوبتی خاک دور آبیاری ۱۲ روز و مدت آبیاری ۱۲ ساعت به دست آمد.

پس از صحت سنجی مدل هایدروس برای شرایط باغ، مدلسازی توزیع شوری خاک و جذب آب گیاه نشان داد که رژیم آبیاری تعریف شده با استفاده از IWC باعث انتقال شوری به فواصل دور از درخت شده و همچنین افق تجمع املاح که در رژیم آبیاری تعریف شده با PAW در عمق ۴۰ تا ۶۰ سانتی‌متری وجود داشت

- irrigation use and plant parameters of grass under subsurface drip irrigation management. *Journal of Irrigation Sciences and Engineering*. 40(1), 155-165.
- Gee, G.W. & 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.
- Goldhamer, D.A. (1995). Irrigation management. In: Ferguson, L. (Ed.), *Pistachio Production Manual. Center for Fruit and Nut Research and Information, Davis*, pp. 71-81
- Goldhamer, D. A. (2005). Tree water requirements and regulated deficit irrigation. *Pistachio production manual*, 4, 103-116.
- Groenevelt, P., Grant, C. & Semetsa, S. (2001). A new procedure to determine soil water availability. *Soil Research*. 39, 577-598.
- Guerrero, J., Moriana, A., Pérez-López, D., Couceiro, J., Olmedilla, N. & Gijón, M. (2005). Regulated deficit irrigation and the recovery of water relations in pistachio trees. *Tree physiology*. 26, 87-92.
- Hartemink, A. E., McBratney, A. B., & Cattle, J. A. (2001). Developments and trends in soil science: 100 volumes of *Geoderma* (1967–2001). *Geoderma*, 100(3-4), 217-268.
- Hosseini, F., Mosaddeghi, M., Hajabbasi, M. & Sabzalian, M. (2016). Role of fungal endophyte of tall fescue (*Epichloë coenophiala*) on water availability, wilting point and integral energy in texturally-different soils. *Agricultural Water Management*. 163,197-211.
- Hoseini, Y., Babazadeh, H. & Khakpour Arablou, B. (2016). Evaluating water uptake reduction functions under salinity and water stress conditions in pepper (*capsicum annum*). *Journal of Water Research in Agriculture*. 29(4), 509- 523. (in Farsi)
- Jamieson, P. D., Porter, J. R. & Wilson, D. R. (1991). A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field crops research*, 27(4), 337-350.
- 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.
- Meskini-Vishkaei, F., Mohammadi, M.H., Neishabouri, M.R. & Shekari, F. (2017). A model to estimate soil water depletion coefficient using plant and soil properties. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 48(4), 749-758. (In Farsi).
- Meskini-Vishkaei, F., Mohammadi, M.H. & Neyshabouri, M.R. (2018). Revisiting the wet and dry ends of soil integral water capacity using soil and plant properties. *Soil Research*. 56(4), 331-345.
- Minasny, B. & McBratney, A.B. (2003). Integral energy as a measure of soil-water availability. *Plant and Soil*. 249, 253-262.
- Mohammadi, M.H. & Khataar, M. (2018). A simple numerical model to estimate water availability in saline soils. *Soil Research*, 56(3), 264-274.
- Nelson, D.W. & Sommers, L.E. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. In: D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabaei, C.T. Johnson and M.E. Sumner (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 3, Chemical Methods*. Soil Science Society of America Book Serie 5. SSSA, Madison, WI, USA. pp. 967-1010.
- Nelson, R.E. (1982). Carbonate and Gypsum. In: A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney (eds.) *Methods of Soil Analysis part 2, 2nd ed., Chemical and microbiological properties*. Agronomy Monograph 9, American Society of Agronomy, Madison, WI. Pp. 181–197.
- Neyshabouri, M.R., Kazemi, Z., Oustan, S. & Moghaddam, M. (2014). PTFs for predicting LLWR from various soil attributes including cementing agents. *Geoderma* 226-227, 179-187.
- Phogat, V., Mahadevan, M., Skewes, M. & Cox, J.W. (2012). Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design. *Irrigation Science*. 30, 315-333.
- Sedaghati, N., Alizadeh, A., Ansari, H., & Hosseinifard, S. J. (2016). Study of Changes in Soil Moisture and Salinity under Plastic Mulch and Drip Irrigation in Pistachio Trees. *Journal of Nuts (International Journal of Nuts and Related Sciences)*. 7, 21-33.
- Šimunek, J., Van Genuchten, M.T. & Šejna, M. (2012). The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical Manual, version 2, 230.
- Skaggs, T., Trout, T., Šimunek, J. & Shouse, P. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 130, 304-310.
- Testi, L., Goldhamer, D., Iniesta, F. & Salinas, M. (2008). Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. *Irrigation Science*. 26, 395-405.
- 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, Riverside.
- 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.