

تعیین دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت بر مبنای پاسخ گیاه آفتاب‌گردان

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: 96/8/3 و پذیرش: 97/2/25

چکیده

دامنه‌ای از محتوای رطوبت خاک که محدودیت برای رشد گیاه در ارتباط با پتانسیل ماتریک، تهویه و مقاومت مکانیکی خاک حداقل باشد، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت (LLWR) نامیده می‌شود. این پژوهش با هدف مقایسه دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت برآورد شده به روش داسیلوا و همکاران با مقادیر محاسبه شده بر مبنای پاسخ گیاه آفتاب‌گردان (*Helianthus Annuus L.*) (LLWR_P) انجام گرفت. محاسبه در هر دو روش بر مبنای تفاضل دو حد رطوبتی بالا (θ_{UL}) و پائین (θ_{LL}) است. در روش اول انتخاب یا تعیین دو حد اغلب بر پایه منحنی‌های مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی خاک و عملاً بدون توجه به نوع و نیاز یا رفتار ویژه گیاه است. در روش دوم طبق روش پیشنهادی این پژوهش، دو حد رطوبتی بر مبنای هدایت روزنه‌ای گیاه در یک خاک لوم رس شنی فشرده شده در لوله‌های PVC با قطر 30 و ارتفاع 70 سانتی‌متر (که از این به بعد گلدان نامیده شدند) در سه سطح فشردگی (جرم مخصوص ظاهری برابر 1/35، 1/55 و 1/75 مگاگرم بر متر مکعب) که به ترتیب با D_1 ، D_2 و D_3 نشان داده می‌شوند، تعیین گردید. در هر گلدان سه بذر آفتابگردان کشت و گلدانها تا شروع مرحله گلدهی در شرایط مطلوب نگهداری شدند. در این مرحله دو چرخه متوالی تر و خشک شدن خاک اعمال و رطوبت خاک و هدایت روزنه‌ای تیمروز به طور منظم اندازه‌گیری شد. LLWR_P بر مبنای رابطه بین مکش ماتریک خاک و هدایت روزنه‌ای گیاه محاسبه شد. نتایج نشان داد بر مبنای رفتار روزنه‌ای آفتاب‌گردان جذب آب در تیمارهای D_1 ، D_2 و D_3 به ترتیب از مکش‌های ماتریک حدود 16، 44 و 60 سانتی‌متر شروع و تا مکش‌های ماتریک 39983، 31614 و 17394 سانتی‌متر ادامه یافت. تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین LLWR محاسبه شده با دو روش مذکور مشاهده شد. مقدار این اختلاف در تیمارهای با فشردگی بیشتر خاک، به ویژه هنگامی که حد رطوبتی بالا (θ_{UL}) برابر مقدار رطوبت در مکش ماتریک 330 سانتی‌متر (LLWR₃₃₀) بود، بیشتر به دست آمد. مقادیر LLWR₃₃₀ برای سه تیمار D_1 ، D_2 و D_3 به ترتیب 0/148، 0/147 و 0/080 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد که به ترتیب 51، 49 و 63 درصد کمتر از LLWR_P بود. این تفاوتها نشان می‌دهد که دو حد رطوبتی (θ_{UL} و θ_{LL}) در نظر گرفته شده توسط داسیلوا و همکاران برای محاسبه LLWR، نباید به طور یکسان برای همه گیاهان به کار برده شود و بر حسب پاسخ یا نیاز گیاه نیز نیاز به اصلاح دارد.

واژه‌های کلیدی: آفتاب‌گردان، منحنی مشخصه رطوبتی خاک، منحنی مشخصه مقاومت مکانیکی خاک، هدایت روزنه‌ای

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

مقدمه

داسیلوا و همکاران (2004) نشان دادند که رشد ذرت خارج از محدوده‌های تخلخل تهویه‌ای 10 درصد و مقاومت مکانیکی دو مگاپاسکال، کاملاً محدود نمی‌شود و با سرعت کمتری ادامه می‌یابد. محمدی و همکاران (2010) نشان دادند موقعی که مقدار مصرف اکسیژن توسط گیاهان کمتر از دو میکرو مول بر مترمکعب بر ثانیه باشد، حد بالایی LLWR به رطوبت حجمی در نقطه اشباع نزدیک می‌گردد و در خاک‌های سنگین بافت مقدار رطوبت حد بالایی بزرگتر از رطوبت معادل 100 سانتی متر مکش ماتریک بود. نتایج فوق نشان داد که رطوبت خاک در تخلخل تهویه‌ای 10% یا در مکش 100 سانتی متر نمی‌تواند لزوماً حد بالایی مناسب برای تعیین دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت باشد. نچبه (1998) مکش ماتریکی را که در آن هدایت هیدرولیکی خاک پس از زهکشی اولیه به 0/05 میلی‌متر بر روز می‌رسد به عنوان نقطه FC در نظر گرفت. محمدی و همکاران (2010) مشاهده کردند بر اساس تعریف اخیر 4/3 روز زمان لازم بود تا رطوبت خاک شنی به آن حد برسد که به عنوان زمان شروع جذب قابل اعتماد به نظر نمی‌رسید. صرفنظر از حساس یا متحمل بودن گیاه به تهویه، کاهش تنفس و مرگ سلولی غیر قابل برگشت در اثر غرقاب، تنها چند ساعت پس از اشباع شروع می‌شود.

نوبل و پالتا (1989) و پالتا و نوبل (1989) مرگ سلول‌های کورتیکال را 4 ساعت پس از غرقاب برای *Opuntia ficusindica*، *Ferocactus accanthodes* و *Ageva desert* گزارش کردند. وارتا پتین (1991) برای نخود این زمان را 9 ساعت گزارش کرد. براملی و همکاران (2007) گزارش کردند کاهش جذب آب ناشی از کمبود اکسیژن در کمتر از 24 ساعت پس از غرقاب اتفاق می‌افتد و در نظر گرفتن تخلخل تهویه‌ای 12/5 یا 15 درصد هم کمکی به حل مشکل تنش فیزیولوژیکی گیاه نمی‌کند. نتایج محمدی و همکاران (2010) نشان داد برای طیف گسترده‌ای از گیاهان حد بالایی LLWR بزرگتر از رطوبت در حد FC، محتوای رطوبت در حد تخلخل تهویه‌ای 10 درصد و رطوبت حاصل بر مبنای پیشنهاد نچبه (1998) بود. حتی با فرض در نظر گرفتن 1/7 روز (بر طبق پیشنهاد مذکور) برای رسیدن به رطوبت مورد نظر در خاک سبک بافت، 12 درصد آب قابل دسترس گیاه در این فاصله از خاک زهکشی می‌شود. برای خاک رسی نتایج مشابهی گزارش شد و باعث شد 15 درصد رطوبت قابل دسترس از دست برود.

داسیلوا و همکاران (1994) نشان دادند LLWR به حد تخلخل تهویه‌ای بؤیژه در خاک‌هایی با بافت

دامنه‌ای از رطوبت خاک که در آن شرایط فیزیکی خاک از نظر تهویه، مقاومت مکانیکی و مکش ماتریک برای فراهمی آب به گیاه کمترین محدودیت را دارد با LLWR¹ بیان می‌شود (داسیلوا و همکاران، 1994؛ دسوزا و همکاران، 2017) به کارگیری LLWR به عنوان شاخص تولید محصول بالقوه (بنجامین و همکاران، 2003؛ داسیلوا و همکاران، 2004) و شاخص کیفیت ساختمانی خاک (داسیلوا و همکاران، 1994؛ دجانگ ون لیر و گویانی، 2015؛ دلیما و همکاران، 2015) و نیز در مقیاس مزرعه‌ای برای ارزیابی سیستم‌های مدیریتی پیشنهاد شده است (کی و همکاران، 2006؛ راموس و همکاران، 2015). مفید بودن LLWR به عنوان شاخص کیفیت فیزیکی خاک برای گیاهان، خاک‌ها و انواع مختلف عملیات شخم و مدیریت خاک توسط محققین مختلف گزارش شده است (داسیلوا و همکاران، 1994؛ کلین و کامارا، 2007؛ بنجامین و همکاران، 2014).

داسیلوا و همکاران (1994) به تبع از لتی (1985) LLWR را تفاضل دو حد رطوبتی بالا و پائین خاک تلقی نمودند. حد بالایی LLWR، میزان رطوبت در مکش ماتریک 100 سانتی متر (θ_{100}) و یا در تخلخل تهویه‌ای 10 درصد (θ_{AFP})، هر کدام که کمتر باشد و حد پایینی آن میزان رطوبت در مکش مانریک معادل نقطه پژمردگی دائم (θ_{PWP}) یا در مقاومت مکانیکی خاک برابر 2 مگاپاسکال (θ_{SR})، هر کدام که بیشتر باشد، تعیین شد. تفاضل بین دو حد رطوبتی بالا و پایین، دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت است. برای مشخص شدن این حدهای رطوبتی و محاسبه LLWR نیاز به تعیین منحنی مشخصه رطوبتی خاک (WRC^2)، که با یکی از توابع ون‌گنوختن (1980)، داسیلوا و کی (1994)، فردلاند و زینگ (1994) و کاسوگی (1994) یا گرانولت و گرانت (2004) قابل توصیف است و مقاومت مکانیکی خاک (SR^3) می‌باشد. رابطه بین SR و θ و جرم مخصوص ظاهری (D_b) نیز با عنوان منحنی مشخصه مقاومت مکانیکی خاک (SRC^4) در مطالعات بوسچر (1990)، داسیلوا و کی (1997) و داسیلوا و همکاران (1994) و یا در قالب توابع توانی (گرانولت و همکاران، 2001؛ عسگرزاده و همکاران، 2010 و 2014) مورد استفاده قرار گرفته است.

1. Least limiting water range

2. Water release curve

3. Soil resistance

4. Soil resistance curve

ای رطوبت قابل دسترس گیاه را در قالب ظرفیت آب انتگرالی برای دو گیاه سورگوم و ذرت محاسبه نمود. زارع حقی و همکاران (1393) دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت را برای یک خاک با دو سطح فشردگی 1/5 و 1/8 مگاگرم بر متر مکعب با به کارگیری هدایت روزانه‌ای دانه‌های پسته مورد ارزیابی قرار دادند. اخیراً از دمای تاج گیاهی (عُثابی میلانی، 1395) نیز به عنوان پاسخ گیاه استفاده شده است.

هدف این پژوهش تعیین مکش‌های شروع و پایان جذب آب توسط گیاه بر مبنای داده‌های روزانه هدایت روزانه‌ای گیاه آفتاب‌گردان و مقایسه آن با LLWR برآوردی به روش داسیلوا و همکاران (1994) در سطوح مختلف فشردگی خاک است.

مواد و روش‌ها

انتخاب خاک، گیاه و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی

تعیین خاکی که ایجاد فشردگی مختلف در آن میسر باشد در اجرای پژوهش مهم بود. پس از نمونه‌برداری و بررسی اولیه خاک چندین منطقه یک خاک¹ لوم رس شنی از حوالی شهرستان اهر (38° 27' عرض شمالی)، استان آذربایجان شرقی با اقلیم خشک تا نیمه خشک انتخاب و به مقدار مورد نیاز تهیه و به گلخانه منتقل شد. به علت تنوع در اندازه ذرات خاک (انحراف استاندارد هندسی برابر 15/4 درصد) راحت‌تر قابل فشردگی شدن بود. همچنین 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 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 سانتی‌متر تهیه و پس از هوا خشک شدن با الک 2 میلی‌متری غربال شد. ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی شامل بافت خاک، هدایت الکتریکی عصاره گل اشباع (EC)، گنجایش تبادل کاتیونی (CEC)، نیتروژن کل (N)، فسفر قابل جذب (P) و پتاسیم قابل جذب (K)، رطوبت‌های معادل مکش‌های ماتریک 330 و 15000 سانتی‌متر (کلات، 1986 و اسپارکس و همکاران، 1996) اندازه‌گیری شدند. پس از بررسی نتایج آزمون خاک به منظور جلوگیری از کمبود عناصر در طول کشت گیاه آفتابگردان نیتروژن مورد نیاز

سنگین، خیلی حساس است و میزان این حساسیت به جرم مخصوص ظاهری خاک بستگی دارد. سیگل اسم و همکاران (2005) گزارش نمودند که برخی گیاهان بسته به نوع خاک، در خارج از محدوده رطوبتی LLWR (تخلخل تهویه‌ای کمتر از 10 درصد) می‌توانند نسبت به داخل محدوده رشد بهتری داشته باشند. این امر نشان می‌دهد LLWR شاخص دقیقی از رطوبت قابل جذب برای همه گیاهان نیست. زارع حقی و همکاران (1393) نیز نشان دادند که مقادیر LLWR برآورد شده از مدل داسیلوا و همکاران (1994) متفاوت از مقادیر محاسبه شده بر مبنای پاسخ گیاهی دانه‌های پسته در یک خاک لوم شنی بود. این یافته‌ها بیانگر این واقعیت است که در تعیین مکش‌های ماتریک شروع و پایان جذب آب، علاوه بر ویژگی‌های خاک نیاز یا پاسخ گیاه نیز باید مورد نظر باشد. کووان (1977) و توزات و همکاران (2003) گزارش کردند که هدایت روزانه‌ای در گیاه توسط اثرات توأم دمای برگ، شدت نور، غلظت دی‌اکسید کربن بین سلولی و کمبود فشار بخار اتمسفر و هم‌چنین پتانسیل آب برگ تنظیم می‌شود و هدایت روزانه‌ای پاسخ فیزیولوژیکی سریع به پتانسیل آب برگ است (پری، 2014). کاهش رطوبت خاک باعث کاهش هدایت روزانه‌ای می‌شود و حساس‌ترین پاسخ گیاه به کمبود رطوبت خاک، شدت رشد گیاه و هدایت روزانه‌ای است.

این دو شاخص خیلی بیش‌تر از پتانسیل آب برگ به وضعیت رطوبتی خاک حساسیت نشان می‌دهند (گریمز و ویلیامز، 1990؛ کوپوس و همکاران، 2006). کریدمن و اسمارت (1969) بیان کردند بسته شدن روزنه‌ها یکی از اولین پاسخ‌های گیاه به کمبود آب است و کاهش فتوسنتز ناشی از کمبود آب به دلیل بسته شدن روزنه‌ها می‌باشد. جاهال (2010) گزارش کرد ساده‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص اندازه‌گیری پاسخ گیاه به وضعیت رطوبتی خاک هدایت روزانه‌ای است. هدایت روزانه‌ای گیاه تمام محدودیت‌های خاک را که در تعریف LLWR مد نظر قرار گرفته (تهویه، مقاومت مکانیکی و پتانسیل آب در خاک) منعکس می‌سازد (اینتریگیلیو و کاستل، 2006). از آنجائی که دستیابی به دو منحنی مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی خاک وقت‌گیر و پرهزینه بوده و نیز در تحقیقات متعدد عدم تطابق LLWR برآوردی به روش داسیلوا و همکاران (1994) با LLWR حاصل از پاسخ گیاهی نشان داده است به همین دلیل به کارگیری پاسخ گیاه در مقادیر مختلف پتانسیل ماتریک خاک می‌تواند جهت محاسبه LLWR واقعی مفید واقع شود. جاهال (2010) با استفاده از مقادیر روزانه هدایت روزنه-

¹ Inceptisoil Typic Haplozerepts

افزوده شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده در جدول 1 ارائه شده است.

در دو مرحله (قبل از کشت و در مرحله گلدهی) و فسفر در یک مرحله (قبل از کشت) بر اساس دستورالعمل شرکت دانه‌های روغنی (1375) مشخص و به خاک

جدول 1- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک استفاده شده

رطوبت 1500kPa	رطوبت 33kPa	پتاسیم قابل جذب	فسفر قابل جذب	هدایت الکتریکی (dS m ⁻¹)	کربنات کلسیم معادل	نیتروژن کل	کربن آلی	رس	سیلت	شن
θ_v	θ_v	(mg kg ⁻¹)	(mg kg ⁻¹)	(dS m ⁻¹)		درصد				
0/122	0/311	262/15	12/44	1/3	3/4	0/116	1/36	22	26	52

روی خاک متراکم شده ریخته شد تا بستر مناسب برای رشد بذرهای جوانه دار شده آفتاب گردان و استقرار گیاه در گلدانها باشد. بذر جوانه دار شده آفتاب گردان به تعداد 3 عدد در هر گلدان کشت شدند. همچنین روی سطح خاک هر گلدان به ضخامت یک سانتی متر با پرلیت پوشانده شد تا تبخیر آب از سطح خاک را به حداقل برساند. در طول دوره رشد تا قبل از شروع اعمال دوره-های تر و خشکی، رطوبت خاک گلدانها در حد مطلوب (حول و حوش رطوبت معادل 330 سانتی متر) نگه داشته شد تا گیاهان به خوبی رشد نمایند. برای پایش وضعیت رطوبت خاک به صورت روزانه، از دستگاه اندازه گیری مقاومت الکتریکی خاک (اهم متر)¹ پس از واسنجی در هر کدام از سه سطح فشردگی استفاده گردید. بدین منظور سه سطح فشردگی (1/35، 1/45 و 1/75) در 5 سطح رطوبتی از نزدیک اشباع تا 5 درصد رطوبت در خاک در گلدان-های مختلف (شاهد) ایجاد و مقدار مقاومت الکتریکی الکتریکی آنها به کمک اهم متر اندازه گیری شد. برای تعیین رطوبت دقیق گلدانها پس از اندازه گیری با اهم-متر نمونه برداری انجام گرفت و در دستگاه آن به مدت 24 ساعت قرار داده شد و میزان رطوبت خاک به روش وزنی تعیین گردید.

شروع اولین دوره خشکی از انتهای رشد رویشی با قطع آبیاری در دو گلدان (تکرار) از هر تیمار آغاز و تا مدتی که گیاه پژمردگی واضح نشان داد، ادامه یافت. طول این دوره 10 روز بود و در انتهای آن و درست قبل از آبیاری مکش ماتریک خاک به 11000 تا 14000 سانتی متر 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 (تکرار) سوم هر تیمار به طور مرتب

ایجاد سطوح مختلف فشردگی خاک و اعمال چرخه تر-خشک

سه سطح فشردگی (D_b) با مقادیر 1/35، 1/55 و 1/75 مگاگرم بر متر مکعب (به ترتیب D_1 ، D_2 و D_3) در استوانه های پی وی سی فشار قوی (که از این به بعد گلدان نامیده می شوند) با قطر 30 و ارتفاع 70 سانتی متر ایجاد شد. سه سطح D_b انتخاب شده به ترتیب نشانه فشرده نبودن، فشردگی متوسط و فشردگی شدید تلقی گردید (ارشد و همکاران، 1996). با توجه به سنگینی کار و نیاز به انتقال حجم بالای خاک (نزدیک یک تن) 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 در گلخانه چیده شدند.

برای ایجاد فشردگی یکنواخت در هر سطحی، ابتدا خاک در حالت هوا خشک از غربال 4/76 میلی متر عبور داده شد و سپس جرم خاک مرطوب (m_w) لازم برای هر لایه 5 سانتی متری (به حجم V) داخل گلدانها از روی جرم مخصوص ظاهری مرطوب (D_{bw}) محاسبه شد ($m_w = V * D_{bw}$ ، $D_{bw} = D_{bd} / (1 - \theta_m)$) در این روابط D_{bd} برابر 1/35، 1/55 یا 1/75 و رطوبت جرمی خاک برای فشرده کردن در گلدانها معادل 20 درصد تعیین شد (دی، 2001). بنابراین خاک لازم در بسته های متعدد و کافی توزین و در پر کردن گلدانها به کار گرفته شد. جهت فشرده کردن خاک، یک صفحه فلزی متصل به یک میله روی اولین بسته خاک ریخته شده در گلدانها قرار گرفت. یک وزنه 8/5 کیلوگرمی که در طول میله می توانست سقوط آزاد داشته باشد از ارتفاع 60 سانتی متری بر روی همین صفحه فلزی به دفعات مورد نیاز رها گردید تا خاک ریخته شده زیرین فشرده شده و به حجم از قبل تعیین شده برسد. این عمل ریختن یکی یکی بسته های خاک و فشرده کردن تا پر شدن گلدانها به عمق 60 سانتی متری ادامه یافت. در هر گلدان چهار تا پنج سانتی متر خاک نرم

¹. Soiltest , Inc. Evanston, Illinois USA

در معادله دوم h مکش ماتریک خاک بر حسب سانتی‌متر، SR مقاومت مکانیکی خاک بر حسب مگاپاسکال و a (مگاپاسکال بر سانتی‌متر) و b بدون بعد، پارامترهای برازش هستند. با داشتن این پارامترها مقادیر θ_{FC} و θ_{PWP} از معادله 1 و θ_{SR} از معادله 2 به دست آمدند. منظور از θ_{FC} رطوبت حجمی در مکش ماتریک 100 سانتی‌متر (θ_{100}) یا 330 سانتی‌متر (θ_{330}) است. مقدار θ_{AFP} برابر با $\theta_s - 0.1$ منظور شد. با در دست داشتن چهار حد رطوبتی مذکور $LLWR$ مطابق روش داسیلوا و همکاران (1994) برای هر سه تیمار محاسبه شد. مقادیر آب قابل دسترس خاک برای گیاه (PAW^b) به روش متداول (FC-PWP) نیز جهت مقایسه محاسبه گردید. با در نظر گرفتن دو مکش ماتریک 100 و 330 سانتی‌متر برای FC مقادیر محاسبه شده به صورت PAW_{100} ، PAW_{330} ، $LLWR_{100}$ و $LLWR_{330}$ معرفی گردید.

تعیین $LLWR_p$ بر مبنای پاسخ گیاه

اساس این شیوه به دست آوردن دو حد مکش ماتریک خاک است. در حد پائین به علت رفع یا کاهش محدودیت ناشی از تهویه، روزنه‌ها شروع می‌کنند به باز شدن و تا رسیدن به حد بالا باز می‌مانند و تعرق و فتوسنتز برای گیاه فراهم می‌شود. با نزدیک شدن مکش ماتریک به حد بالا به علت ایجاد محدودیت‌های توأم ناشی از کاهش انرژی آب خاک، مقاومت مکانیکی زیاد و یا هدایت هیدرولیکی کم و متعاقباً کاهش جذب آب، روزنه‌ها شروع به بسته شدن می‌کنند. لازمه تشخیص یا تعیین این دو حد اندازه‌گیری و پایش مستمر هدایت روزنه‌ای و رطوبت خاک در طول مدت هر کدام از چرخه تر- خشک بود. برای این منظور پس از اندازه‌گیری رطوبت خاک (اغلب به صورت روزانه)، هدایت روزنه‌ای (g_s) در برگ‌های شاخص (که در قسمت بالائی تاج گیاه در معرض آفتاب قرار داشت) نیز بلافاصله با بکارگیری دستگاه پورومتر مدل AP-4 ساخت شرکت Delta-T (Cambridge, UK) اندازه‌گیری و ثبت شد (شاکل، 2011؛ گارسیا-تیچرو و همکاران، 2012). اندازه‌گیری‌ها و اعمال دوره‌های تر و خشکی بعد از اتمام دوره رشد رویشی انجام گرفت. دو دوره تر- خشک در مجموع حدود یک ماه به طول انجامید اما برای تیمار D_1 طول دوره در هر دو چرخه تر- خشک حدود 3 الی 6 روز طولانی‌تر از تیمارهای D_2 و D_3 بود و تیمارهای D_1 تا مکش‌های بالاتری به جذب آب ادامه دادند. با جمع‌آوری داده‌ها، مقادیر g_s به عنوان متغیر وابسته در برابر مقادیر مختلف h به عنوان متغیر مستقل به نرم افزار Curve Expert، وارد و بهترین مدل ریاضی بر مبنای حداقل خطا

و با افزودن آب مورد نیاز روزانه برای نگه داشتن رطوبت در حد مطلوب ادامه یافت.

تعیین منحنی‌های مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی خاک و محاسبه $LLWR$ به روش داسیلوا و همکاران (1994)

لازمه تعیین منحنی‌های مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی خاک تهیه نمونه‌های خاک مشابه با خاک گلدان‌ها در سه سطح فشردگی بود. برای این منظور همزمان با آماده سازی گلدان‌ها، تعداد دو تشت با قطر 35 و عمق 12 سانتی‌متر نیز در سه سطح فشردگی (D_2 ، D_1 و D_3) از خاک مورد نظر پر شدند. این تشت‌ها در گلخانه در شرایط مشابه با گلدان‌ها چندین مرتبه تحت دوره تر و خشک قرار گرفتند. نمونه‌برداری از آنها با استوانه‌هایی به قطر و ارتفاع 5 سانتی‌متر برای تعیین رطوبت در مکش-های ماتریک صفر تا 1000 سانتی‌متر و با حلقه‌هایی به قطر 5 و ارتفاع 1 سانتی‌متر برای تعیین رطوبت در مکش-های ماتریک 5000 و 15000 سانتی‌متر انجام شد (عسگرزاده و همکاران، 2014 و کلات، 1986). با بکارگیری این نمونه‌ها و با استفاده از وسایل ستون آب آویزان، صفحات فشار و فروسنج مخروطی دیجیتال داده‌های مکش ماتریک- رطوبت ($\theta-h$) و مکش ماتریک- مقاومت مکانیکی خاک ($SR-h$) بدست آمدند. جزئیات کار توسط نیشابوری و همکاران (2014) و کاظمی و همکاران (1393) گزارش شده است. برای نوصیف منحنی مشخصه رطوبتی از مدل 1 (فردلاند و زینگ، 1994) که در محدوده مکش 0 تا 10 میلیون سانتی-متر کارایی دارد و منحنی مقاومت مکانیکی از مدل 2 (گرانولت و همکاران، 2001) استفاده شد.

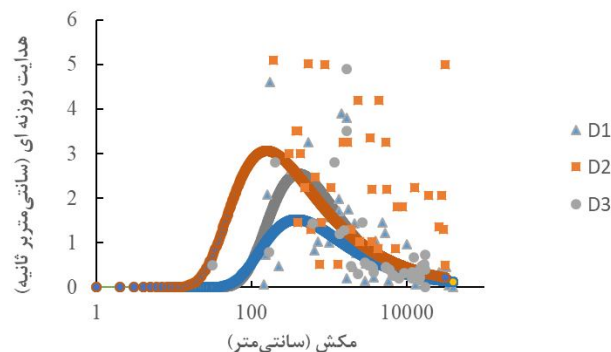
(1)

$$\theta(h) = \theta_s \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{h}{a} \right)^n \right]} \right]^m$$

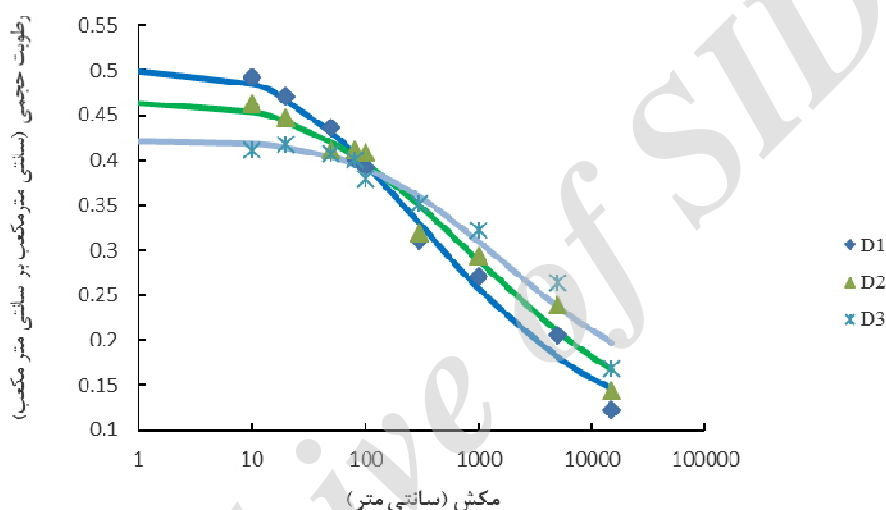
در رابطه بالا θ رطوبت حجمی بر حسب سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب، h مکش ماتریک بر حسب سانتی‌متر، e عدد نپر (2/718)، θ_s درصد رطوبت اشباع خاک، a ، n و m ضرایب یا پارامترهای برازشی هستند که با بکارگیری برنامه Solver در نرم‌افزار Excel به دست آمدند. واحد a سانتی‌متر و m و n بدون واحد است.

(2)

$$SR = ah^b$$



شکل 1- منحنی مدل فشار بخار بین هدایت روزانه ای (سانتی متر بر ثانیه) و مکش ماتریک خاک (سانتی متر) در سه تیمار D₁, D₂ و D₃ به ترتیب نشان دهنده تیمارهای با جرم مخصوص ظاهری مساوی 1/35، 1/55 و 1/75 مگاگرم بر مترمکعب است.



شکل 2- منحنی مشخصه رطوبتی خاک برای سه تیمار D₁, D₂ و D₃ به ترتیب نشان دهنده تیمارهای با جرم مخصوص ظاهری مساوی 1/35، 1/55 و 1/75 مگاگرم بر مترمکعب می باشند.

برای آفتاب گردان 4/8 دسی زیمنس بر متر گزارش شده است (فائو 1985).

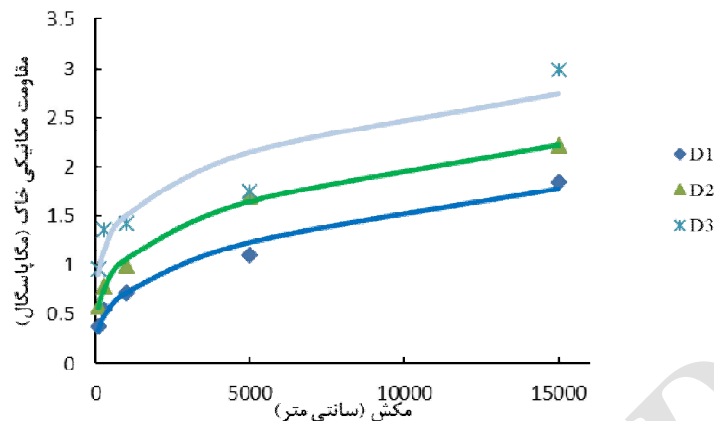
مقادیر پارامترهای مدل فردلانگ و زینگ (1994) و منحنی مقاومت مکانیکی خاک، ضریب تبیین (R^2) و حداقل مربعات خطا (SSE) برای تیمار D₁, D₂ و D₃ در جدول 2 و منحنی های مشخصه رطوبتی و مقاومت مکانیکی خاک برای همین تیمار ها به ترتیب در شکل- های 2 و 3 آورده شده است.

و حداکثر ضریب همبستگی، مدل منحنی فشار بخار¹ (شکل 1) بدست آمد. با در دست داشتن ضرایب مدل، دو حد مکش ماتریک برای هر تیمار برآورد گردید. مقدار LLWR_p از تفاضل رطوبت در مکش شروع و پایان جذب محاسبه و با مقادیر LLWR داسیلوا و همکاران مقایسه شد.

نتایج و بحث

مطابق جدول 1 بافت خاک بکار رفته لوم رس شنی بود. درصد کربن آلی (OC)، هدایت الکتریکی (EC) و کربنات کلسیم معادل (CCE) خاک در حد کم و خاک مشکل شوری یا آهکی بودن را نداشت. حد آستانه شوری

¹ Vapor pressure model



شکل 3- منحنی مشخصه مقاومت مکانیکی خاک برای سه تیمار D1، D2 و D3

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

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

پارامترهای مدل توانی منحنی مقاومت مکانیکی خاک				پارامترهای مدل فردلانند و زینگ				تیمارها		
SSE	R ²	b	A	SSE	R ²	m	n	a	θ _s	
-	-	-	MPacm ⁻¹	-	-	-	-	cm	(cm ³ cm ⁻³)	
0/028	0/984	0/335	0/071	0/002	0/98	0/68	1	58	0/52	D ₁
0/008	0/996	0/273	0/160	0/004	0/97	0/59	1	106	0/47	D ₂
0/267	0/911	0/223	0/321	0/003	0/96	0/56	1	320	0/42	D ₃

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

مقادیر R² و حداقل مربعات خطا (SSE) در جدول 2 نشان می‌دهد که مدل فردلانند و زینگ (1994) برای منحنی مشخصه رطوبتی و مدل نمایی به کار رفته برای منحنی مقاومت مکانیکی خاک برازش بسیار خوبی بر داده‌های تجربی در هر سه تیمار D₁، D₂ و D₃ دارد. ضرایب رطوبتی θ₁₀₀، θ₃₃₀، θ_{AFP}، θ_{PWP} و θ_{SR} برای سه تیمار D₁، D₂ و D₃ در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3- مقادیر ضرایب رطوبتی θ₁₀₀، θ₃₃₀، θ_{AFP}، θ_{PWP} و θ_{SR} برای سه تیمار D₁، D₂ و D₃

تیمارها					
θ _{SR}	θ _{PWP}	θ _{AFP}	θ ₃₃₀	θ ₁₀₀	
(cm ³ cm ⁻³)					
0/154	0/160	0/416	0/308	0/393	D ₁
0/192	0/183	0/373	0/338	0/406	D ₂
0/245	0/197	0/325	0/363	0/401	D ₃

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

21187 سانتی‌متر حاصل گردید. برای تیمار D₂، حد بالایی LLWR₁₀₀ و LLWR₃₃₀ به ترتیب θ_{AFP} (رطوبت خاک در مکش ماتریک 183 سانتی‌متر) و θ₃₃₀ و حد پایینی هر دو، θ_{SR} بود که در مکش ماتریک 10195 سانتی‌متر حاصل گردید. برای تیمار D₃ با چگالی ظاهری 1/75 مگاگرم بر متر مکعب، حد بالایی LLWR₁₀₀ و LLWR₃₃₀

بر اساس جدول 3، برای تیمار D₁، حد بالایی و پایینی LLWR₁₀₀ و LLWR₃₃₀، θ_{FC} و θ_{PWP} بود و مقدار آن معادل آب قابل دسترس متداول (FC-PWP) شد. رطوبت خاک در تخلخل تهویه‌ای 10 درصد (θ_{AFP}) و رطوبت خاک در مقاومت مکانیکی 2 مگا پاسکال (θ_{SR}) برای این تیمار به ترتیب در مکش‌های ماتریک 71 و

روزنه‌ای به ترتیب 0/035، 0/058 و 0/071 سانتی‌متر بر ثانیه شروع و به طور تدریجی افزایش یافت و به ترتیب در مکش‌های 156، 380 و 400 سانتی‌متر به حداکثر مقدار خود رسید. در حالی که مطابق روش داسیلوا و همکاران (1994) شروع جذب به ترتیب از مکش‌های 100، 183 و 729 برای $LLWR_{100}$ و 330، 330 و 729 سانتی‌متر برای $LLWR_{330}$ برآورد می‌شود. مقادیر $LLWR$ محاسبه شده بر مبنای دمای پوشش سبز گیاه (در این مقاله آورده نشده است) نیز نتایج مربوط به تیمارهای D_1 تا D_3 را تایید کرد. پایان جذب آب هم بر مبنای پاسخ گیاه در مقادیر بسیار بالاتری از مکش‌های ماتریک پیش‌بینی شده بر اساس ضوابط مقرر شده در روش داسیلوا و همکاران (1994) اتفاق افتاد (15000، 10195 و 3565 سانتی‌متر به ترتیب برای D_1 ، D_2 و D_3). مکش ماتریکی که گیاهان تا آن حد توانستند آب جذب کنند 39983، 31614 و 17394 سانتی‌متر به ترتیب برای تیمارهای D_1 ، D_2 و D_3 بود. مقدار مقاومت مکانیکی خاک برای سه تیمار به ترتیب 2/83، 2/72 و 2/47 مگاپاسکال به دست آمد که به ترتیب در هدایت روزنه‌ای برابر 0/179، 0/172 و 0/124 سانتی‌متر بر ثانیه اتفاق افتاد. مقادیر PAW_{100} ، PAW_{330} ، $LLWR_{100}$ و $LLWR_{330}$ در جدول 4 آورده شده است.

برابر با رطوبت معادل تخلخل تهویه‌ای 10 درصد بود که در مکش ماتریک 729 سانتی‌متر اتفاق افتاد. حد پایین آن θ_{SR} بود که در مکش ماتریک 3655 سانتی‌متر واقع شد (جدول 3). در یک بررسی انجام شده توسط دلیما و همکاران (2015) روی $LLWR$ در درجات مختلف فشردگی خاک و با جرم مخصوص ظاهری بحرانی مساوی 1/35 و 1/79 مگاگرم بر متر مکعب، محدوده تغییرات $LLWR$ توسط محتوای رطوبت در فاصله θ_{100} و θ_{SR} محدود شد. در پژوهش زارع حقی و همکاران (1393) حد بالایی و پایینی $LLWR$ برای D_b مساوی 1/5 مگاگرم بر متر مکعب به ترتیب θ_{100} و θ_{PWP} و برای D_b مساوی 1/8 مگاگرم بر متر مکعب به ترتیب θ_{AFP} و θ_{SR} به دست آمد. نتایج راموس و همکاران (2015) نیز نشان داد در مزارعی که شخم نخورده بودند با خشک‌تر شدن خاک، رشد و توسعه گیاه به ویژه به دلیل مقاومت مکانیکی بالای خاک محدود شد و θ_{SR} به ترتیب به عنوان حد پایین $LLWR$ مد نظر قرار گرفت.

بر مبنای پاسخ هدایت روزنه‌ای (شکل 1) مشاهده گردید که در هر سه تیمار D_1 ، D_2 و D_3 جذب آب به ترتیب از مکش‌های ماتریک حدود 44، 16 و 60 سانتی‌متر، خیلی پایین‌تر از مکش ماتریک تعیین شده بر اساس پیشنهاد داسیلوا و همکاران (1994) شروع شد. علت کمتر بودن مکش شروع جذب در تیمار در تیمار D_2 در مقایسه با تیمار D_1 مشخص نشد. جذب در هدایت

جدول 4- مقادیر آب قابل دسترس خاک برای گیاه و دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت به روش داسیلوا و همکاران (1994) و بر مبنای پاسخ گیاه آفتاب گردان برای سه تیمار D_1 ، D_2 و D_3

تیمارها	$LLWR_p$	$LLWR_{330}$	$LLWR_{100}$	PAW_{330}	PAW_{100}
					($cm^3 cm^{-3}$)
D_1	0/301	0/148	0/233	0/148	0/233
D_2	0/291	0/147	0/182	0/155	0/223
D_3	0/217	0/080	0/080	0/166	0/204

D_1 ، D_2 و D_3 به ترتیب نشان دهنده تیمارهای با جرم مخصوص ظاهری مساوی 1/35، 1/55 و 1/75 مگاگرم بر متر مکعب است.

0/233) و در سطح فشردگی D_3 (بالاترین سطح فشردگی) کمترین مقدار ($0/080 cm^3 cm^{-3}$) به دست آمد. این نتیجه با یافته‌های بتز و همکاران (1998) مبنی بر کاهش دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت با افزایش فشردگی خاک مطابقت دارد. مقدار $LLWR$ با افزایش فشردگی خاک کاهش می‌یابد زیرا توزیع اندازه منافذ خاک یافته و منافذ ماکرو کاهش و تخلخل ریز افزایش می‌یابد (چن و همکاران، 2014).

همان طور که نتایج جدول 4 نشان می‌دهد مقادیر $LLWR_{100}$ و $LLWR_{330}$ برای تیمار D_3 (بالاترین سطح فشردگی خاک) طبق روش داسیلوا و همکاران (1994) در مقایسه با D_1 و D_2 بسیار کوچک بدست آمد. با افزایش فشردگی مقادیر هر دو کاهش یافت. در سطح فشردگی D_1 (پایین‌ترین سطح فشردگی) بیشترین مقدار ($cm^3 cm^{-3}$)

مکش ماتریک بسیار کمتر شروع و تا مقادیر بالاتر از مکش ماتریک 15000 سانتی‌متر که برای تمام گیاهان و خاک‌ها به عنوان PWP مد نظر قرار می‌گیرد، ادامه یافت و با کمتر شدن فشردگی خاک این حد بالای مکش ماتریک هم بالاتر رفت. مقادیر کوچکتر LLWR برآورد شده به روش داسیلوا و همکاران (1994) ظاهراً به دلیل اهمیت بیش از حد قائل شدن برای مقاومت مکانیکی خاک و تهویه نامناسب به ترتیب است. مطابق روش مذکور در دامنه مکش‌های ماتریک (h) کمتر از 183 و 729 سانتی-متر به ترتیب در تیمارهای D_2 و D_3 به دلیل پیش فرض محدودیت تهویه، رطوبت خاک غیر قابل فراهم برای گیاه محسوب شده است. در انتهای خشک منحنی رطوبتی برای همین تیمارها به ترتیب در مکش‌های ماتریک بالای 1095 و 3565 به دلیل مقاومت مکانیکی زیاد فراهمی آب برای گیاه صفر در نظر گرفته می‌شود و مقادیر رطوبت بالاتر از آن برای گیاه غیر قابل استفاده محسوب شده است. برای تیمار D_1 مقاومت مکانیکی 2 مگاپاسکال خاک در مکش ماتریک 21187 سانتی‌متر اتفاق افتاد و قبل از آن مقدار رطوبت در مکش ماتریک 15000 سانتی‌متر به عنوان حد پایین LLWR در نظر گرفته شد. حد بالایی LLWR نیز رطوبت در حد FC بود. از این رو حداقل برای گیاه آفتاب‌گردان و با شرایط این پژوهش، روش داسیلوا و همکاران (1994) مقدار LLWR را به خاطر حدود بحرانی مکش ماتریک غیر واقعی خیلی کمتر برآورد می‌کند. برای قطعیت این یافته لازم است پژوهش‌های بیشتر توسط محققین دیگر بر روی گیاهان و خاک‌های مختلف به ویژه در شرایط مزرعه انجام شود. نتایج زارع حقی و همکاران (1393) برای D_b مساوی 1/5 و 1/8 مگاگرم بر متر مکعب نشان داد LLWR برآوردی بر مبنای شاخص هدایت روزنه‌ای در گیاه پسته به ترتیب 48 و 50 درصد بیشتر از LLWR محاسبه شده به روش داسیلوا و همکاران (1994) بود. سیگل اسم و همکاران (2005) نیز گزارش کردند که محدوده رطوبتی LLWR برای رشد گیاهچه‌های Lobolly-Pines مناسب نیست، همخوانی دارد.

در LLWR برآوردی به روش داسیلوا و همکاران (1994) فرض ضمنی این است که جذب آب بوسیله گیاه تنها در فاصله بین دو حد مکش ماتریک بالا و پائین و آنهم با سهولت برابر اتفاق می‌افتد و به محض گذر مکش به خارج از محدوده جذب بلافاصله و به صورت پرشی به صفر می‌رسد. نادرستی این الگوی جذب آب در گیاهان مورد توجه دیگر محققان (کیرکهام، 2004) نیز بوده است و همین نقص در واقع منجر به ارائه گنجایش

در پژوهش دلیما و همکاران (2015) نیز D_b بحرانی (جرم مخصوص ظاهری که در آن LLWR مساوی صفر می‌شود) برای تولید محصول در خاک آلفی سول (که به مدل 15 سال تناوب سویا و لوبیا در تابستان و یولاف و گندم در زمستان بود) و اکسی سول (تناوب 6 ساله سویا در تابستان و گندم در زمستان) به ترتیب 1/79 و 1/35 گرم بر سانتی‌متر مکعب گزارش شد. در این محدوده LLWR از صفر تا 0/14 در خاک آلفی سول و صفر تا 0/04 در خاک اکسی سول متغیر بود. نتایج دسوزا و همکاران (2017) نیز نشان داد در کشت مخلوط قهوه کنیولون با هلو و گلیریکیدیا (یک گونه درختی)، به دلیل محدودیت فیزیکی کمتر برای رشد گیاه به خاطر سیستم ریشه شاخه-ای هلو و گلیریکیدیا که منجر به ایجاد یک ساختار خوب در خاک با منافذ پیوسته شد و به حرکت آب و گاز در خاک کمک کرد، مقادیر بزرگتر LLWR را نشان داد (10/0 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب). مقادیر کمتر LLWR (0/05 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب) برای کشت مخلوط قهوه با موز رخ داد که به محدودیت فیزیکی ناشی از D_b بالا، قدرت نگهداری بالای آب در میکروپورها و یا مقاومت بالای خاک (> 2.5 MPa) در برابر نفوذ ریشه قهوه ربط داده شد.

مطابق مقادیر LLWR_p درج شده در جدول 4 مقدار رطوبتی که در محدوده شروع تا پایان جذب برای هر کدام از تیمارها از طریق تفاضل رطوبت در محدوده 2 مکش مذکور به دست آمد برابر 0/301، 0/291 و 0/217 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب بود.

بین مقادیر PAW₁₀₀، PAW₃₃₀، LLWR₁₀₀، LLWR₃₃₀ از یک طرف و مقادیر LLWR_p از طرف دیگر تفاوت قابل ملاحظه‌ای وجود دارد (جدول 4) و تطابقی بین آنها مشاهده نگردید. تفاوت LLWR_p با LLWR₁₀₀ برای سه تیمار D_1 ، D_2 و D_3 به ترتیب 0/068، 0/109 و 0/137 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب و با LLWR₃₃₀ به ترتیب 0/153، 0/144 و 0/137 سانتی‌متر مکعب بر سانتی‌متر مکعب حاصل گردید (جدول 4). به عبارت دیگر بر مبنای LLWR₁₀₀ روش داسیلوا و همکاران (1994) آب قابل استفاده آفتاب‌گردان را برای تیمارهای D_1 تا D_3 به ترتیب 21، 37 و 62 (متوسط 40) درصد و بر مبنای LLWR₃₃₀ به ترتیب 51، 49 و 63 (متوسط 54) درصد کمتر از مقدار آن بر مبنای LLWR_p برآورد کرد. این تفاوت نشان می‌دهد که حساسیت یا پاسخ عینی آفتاب‌گردان به فشردگی و تهویه بمراتب کمتر از آن است که در محاسبه LLWR به روش داسیلوا و همکاران (1994) منظور می‌شود و جذب آب از مقادیر

داسیلوا و همکاران (1994) منظور می‌شود و جذب آب از مقادیر مکش ماتریک بسیار کمتر شروع و تا مقادیر بالاتر از مکش ماتریک 15000 سانتی‌متر که برای تمام گیاهان و خاک‌ها به عنوان PWP مد نظر قرار می‌گیرد، ادامه می‌یابد و این حد بالای مکش ماتریک برای جذب به ویژه در خاک‌هایی که فشردگی محدودیت برای جذب ایجاد نکند بسیار بالاتر از 15000 سانتی‌متر است. در روش پیشنهادی این پژوهش، علاوه بر خصوصیات خاک، پاسخ گیاه نیز دخالت داده می‌شود در حالیکه در روش اول انتخاب دو حد رطوبتی و دو حد مکش ماتریک معادل آنها عموماً قراردادی و بدون توجه به نوع گیاه است. البته روش پیشنهادی یک محدودیت می‌تواند داشته باشد چون لازمه بکارگیری آن اندازه‌گیری و پایش مستمر یک ویژگی گیاه است که مبنائی برای تعیین یا تشخیص مکش‌های حد پائین و حد بالای خاک مورد نظر باشد.

آب انتگرالی (IWC) توسط گرانولت و همکاران (2001) شد. در LLWR_p مطابق شکل 1، جذب آب از مکش ماتریک حد پائین که هم وابسته به خاک و هم به گیاه است شروع و به صورت تدریجی افزایش یافته و پس از رسیدن به نقطه اوج (به ترتیب مکش‌های 380، 156 و 400 سانتی‌متر برای تیمارهای D₁، D₂ و D₃) مجدداً به صورت تدریجی کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

حدود بالایی و پایینی LLWR بر مبنای روش داسیلوا و همکاران (1994) و مکش‌های ماتریک شروع و پایان جذب بر مبنای شاخص گیاهی (LLWR_p) با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که تطابقی بین این دو روش وجود ندارد و این عدم تطابق بویژه در فشردگی‌های بیش‌تر خاک مشهودتر بود. این تفاوت نشان می‌دهد حساسیت یا پاسخ عینی آفتاب‌گردان به فشردگی و تهویه بر مراتب کمتر از آن است که در محاسبه LLWR به روش

فهرست منابع:

1. زارع حقی، د.، نیشابوری، م.، ر.، گرجی، م.، صادقزاده ریحان، م.، ا.، و عمارت‌پرداز، جاوید. 1393. ارزیابی دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در دانه‌های پسته رقم سرخسی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. جلد 28. شماره 2: 363-353.
2. کاظمی، ز.، نیشابوری، م.، ر.، بیات، ح.، اوستان، ش.، و مقدم، م. 1393. کارایی مدل‌های برآورد دامنه رطوبتی با حداقل محدودیت در خاک. نشریه پژوهش‌های خاک: ج. 28. شماره 4: 688-699.
3. شرکت دانه‌های روغنی. 1375. آمار تولید و مصرف روغن در طی دهه‌های اخیر و دلایل افزایش و کاهش آن. انتشارات شرکت سهامی توسعه کشت دانه‌های روغنی. تهران.
4. غنّابی میلانی، ا. 1395. ارزیابی شاخص‌های LLWR و IWC در سطوح مختلف شوری خاک با استفاده از سرعت صعود شیره آوندی در درخت بادام. پایان‌نامه دکتری علوم و مهندسی خاک. دانشگاه تبریز.
5. Arshad, M.A., Lowery, B. and Grossman, B. 1996. Physical tests for monitoring soil quality. In: *Methods for Assessing Soil Quality*. (Eds.): Doran, J.W. and Jones, A.J. SSSA Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI. pp: 123-141.
6. 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.
7. 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.
8. Benjamin, J.G., Nielsen, D.C., and Vigil, M.F. 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116: 137- 148.
9. Benjamin, J.G., Nielsen, D.C., Vigil, M.F., Mikha, M.M., Calderon, F. 2014. Water Deficit Stress Effects on Corn (*Zea mays L.*) Root: Shoot Ratio. *Open J. Soil Sci.* 4 (4):151-160.

10. Betz, C.L., Allamars, P.R., Copeland, S.M., and Randall, G.W. 1998. Least limiting water range: traffic and long- term tillage influences in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 1384- 1393.
11. Bramley, H., Turner, D.W., Tyerman, S.D., Turner, N.C. 2007 Water flow in the roots of crop species: the influence of root structure, aquaporin activity, and waterlogging. *Adv Agron* 96:134–196.
12. Buscher, W.J. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water. *Trans. ASAE.* 33: 519- 524.
13. 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.
14. Chen, G.; Weil, R.R.; Hill, R.L. 2014. Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 136: 61-69.
15. Cowan, I.R. 1977. Stomatal behavior and environment. *Advances in Botanical Research* 4: 117–228.
16. Cuevas, E., Baeza P., and Lissarrague, J.R. 2006. Variation in stomatal behavior and gas exchange between mid-morning and mid-afternoon of north-south oriented grapevines (*Vitis vinifera* L. cv. ‘Tempra-nillo’) at different levels of soil water availability. *Scientia Hort.* 108:173–180.
17. Da Silva, A.P., Kay, B.D., and Perfect, E. 1994. Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775- 1781.
18. Da Silva, A.P., Imhoff, S., and Kay, B.D. 2004. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system. *Scientia Agricola.*61:451-456.
19. Day, Robert W. 2001. *Soil Testing Manual: Procedures, Classification Data, and Sampling Practices.* New York: McGraw Hill, Inc. pp: 293–312.
20. de Jong van Lier, Q., and Gubiani, P.I. 2015. Beyond the least limiting water range rethinking soil physics in Brazil. *R. Bras. Ci. Solo:* 39: 925-939.
21. de Lima, C. L.R., Suzuki, L.E.A. S., Reinert, D.L.; Reichert, J.M. 2015. Least limiting water range and degree of compactness of soil under no tillage. *Biosci. J., Uberlândia,* v. 31, n. 4: p. 1071-1080.
22. de Souza, G.S., Alves, D.I. , Dan, M.L. de Souza Lima, J. S., da Fonseca, A. L. C. C., Araújo J. B. S. and Guimarães, L. A. O. P. 2017. Soil physico-hydraulic properties under organic conilon coffee intercropped with tree and fruit species. *Pesq. agropec. bras., Brasília,* v.52, n.7: 1-9.
23. FAO. 1985. *Irrigation Water Management: Introduction to Irrigation Chapter 7: Salty Soils.*
24. . Fredlund, D. G. and Xing, A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.* 31: 521–532.
25. 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.
26. Grimes, D.W., and Williams, L.E. 1990. Irrigation effects on plant water relations and productivity of ‘Thompson Seedless’ grapevines. *Crop Sci.* 30: 255–260.
27. Groenevelt, P., Grant, C.D., 2004. A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water contents. *European Journal of Soil Science* 55(3), 479-485.
28. Intrigliolo, D.S., and Castel, J.R. 2006. Vine and soil-based measures of water status in a Tempranillo vineyard. *Vitis* 45: 157–163.

29. Kirkham MB, 2004. Principles of Soil and Palnt Water Relations. Elsevier Academic Press.
30. 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.
31. Kriedemann, P.E., and Smart R.E. 1969. Effects of irradiance, temperature, and leaf water potential on photosynthesis of vine leaves. *Photosynthetica* 5: 15–19.
32. Kosugi, K. 1994. Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. *Water Resources Research* 30(4): 891-901.
33. Mohammadi, M.H., Asadzadeh, F., and Vanclooster, M. 2010. Refining and unifying the upper limits of the least limiting water range using soil and plant properties. *Plant Soil*. 334: 221-234.
34. Nachabe, M.H. 1998. Refining the definition of field capacity in the literature. *J Irrigation Drainage Eng.* 124: 230–232..
35. Nobel PS, Palta JA (1989) Soil O₂ and CO₂ effects on root respiration of cacti. *Plant Soil* 120:263–271.
36. Neyshabouri, M.R., Kazemi, Z., Oustan, Sh., Moghaddam, M. 2014. PTFs for predicting LLWR from various soil attributes including cementing agents. *Geoderma*, 226-227: 179-187.
37. Palta, J.A., Nobel, P.S. 1989. Influence of soil O₂ and CO₂ on root respiration for Agave deserti. *Physiol Plant* 76:187–192.
38. Parry, C.K., 2014. Biophysically-based measurement of plant water status using canopy temperature. PhD Thesis, Utah State University. Paper 3563.
39. Ramos, F.T., de Souza Maia, J.K., Roque, M.W., de Azevedo, E.C., Júnior, J.H.C., Weber, O.L.S., and Bianchini, A. 2015. Correlation of the least limiting water range with soil physical attributes, nutrient levels and soybean yield .*African Jurnal of Agricultural Research*. Vol. 10 (21): 2240-2247.
40. Shackel, K. 2011. A plant-based approach to deficit irrigation in trees and vines. *Hort. Sci.* 46(2): 173–177.
41. Siegel – Issem, C.M., Burger, J.A., Powers, R.F., Ponder Fand Patterson, S.C. 2005. Seedling root growth as a function of soil density and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 215-226.
42. 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.
43. Tuzet, A., Perrier, A., and Leuning, R. 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell and Environment*. 26(7): 1097–1116.
44. Vartapetian, B.B. 1991. Flood-sensitive plants under primary and secondary anoxia: ultrastructural and metabolic responses. In: Jackson, M.B., Davies, D.D., Lambers, H. (eds) *Plant life under oxygen deprivation*. SPB, The Hague, Netherlands, 201–216.

Determination of the Least Limiting Water Range Based on Sunflower Plant Response

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

Received: October, 2017 and Accepted: May, 2018

Abstract

The range of soil water content where plant growth is least limited by water potential, soil aeration or mechanical resistance is called least limiting water range (LLWR). This study evaluated the values of LLWR determined according to the procedures proposed by da Silva et al. with those calculated on the basis of sunflower plant (*Helianthus annuus* L) response (LLWR_P). In both methods LLWR is taken as the difference between the two soil moisture limits designated as upper (θ_{UL}) and lower (θ_{LL}). In the first method, the two limits are determined basically from the soil moisture and soil resistance characteristic curves, almost overlooking the plant type and its particular needs or behaviors. In the second method, as proposed in this research, the two limits are determined based on the stomatal response in a sandy clay loam soil packed into PVC tubes (called pots hereafter) with 30 cm diameter and 70 cm height at three compaction levels (soil bulk density equal to 1.75, 1.55 and 1.35 Mg.m⁻³) designated as D₁, D₂ and D₃. Each pot was planted with three pre-soaked sunflower seeds and pots were kept under optimum condition until onset of the flowering stage. At this time two successive drying cycles were imposed and soil moisture and midday stomatal conductance were routinely measured. LLWR_P were computed on the basis of relationship between soil matric suction and stomatal conductance. Results showed that on the basis of stomatal conductance behavior water uptake began at the soil matric suctions of 44, 16, 60 and continued up to 17394, 31614, 39983 cm in D₁, D₂ and D₃ treatments, respectively. Appreciable differences were observed between LLWR and LLWR_P particularly when the lower limit moisture suction (equivalent to θ_{UL} for LLWR) was set at 330 cm (LLWR₃₃₀). LLWR₃₃₀ values of 0.148, 0.147 and 0.080 cm³ cm⁻³ were obtained for D₁, D₂, D₃ treatments, respectively, which were 51, 49 and 63 percent lower than the corresponding LLWR_P values. This differences imply that the two moisture limits (θ_{UL} and θ_{LL}) proposed by da Silva et al. may not be applied indiscriminately for all plants and thus need to be modified according to plant needs or responses.

Keywords: Soil moisture characteristic curve, Soil mechanical characteristic resistance curve, Stomatal conductance

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