

مقاله علمی-پژوهشی

واسنجی مدل HYDRUS-2D و شبیه‌سازی الگوی رطوبتی خاک در آبیاری نواری تیپ کشت نشائی چغندر قند با و بدون مالچ

کریم رحمانی^۱، معصومه دلبری^{۲*}، پیمان افراسیاب^۳، فریبرز عباسی^۴، ولی‌الله یوسف آبادی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲

چکیده

این تحقیق به منظور واسنجی مدل HYDRUS-2D و شبیه‌سازی الگوی توزیع رطوبتی خاک در آبیاری نواری تیپ در کشت نشائی چغندر قند با و بدون مالچ انجام شد. پژوهش حاضر طی فصل زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ در ۱۴ کرت (۷ کرت با مالچ و ۷ کرت بدون مالچ) با ۲ ردیف نوار تیپ به آرایش ۴۰*۵۰ اجرا شد. از ۱۲ کرت برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش وزنی و از دو کرت برای نصب لوله‌های دسترسی دستگاه PR2 به منظور پایش توزیع رطوبت خاک در فواصل مختلف از نوار تیپ و در عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از سطح خاک استفاده شد. واسنجی دستگاه PR2 در دور آبیاری ۷ روز و ۶ نوبت آبیاری انجام شد. نتایج واسنجی نشان داد که پارامترهای پیش‌فرض $a_0 = 1/6$ و $a_1 = 1/4$ پیشنهاد شده توسط شرکت سازنده PR2 برای بافت لومی مزرعه جوابگو نبوده و برای تحقیق حاضر، پارامترهای a_0 و a_1 برای رطوبت‌های بیشتر از ظرفیت زراعی به ترتیب به $1/8$ و $1/3$ و برای رطوبت‌های کمتر از ظرفیت زراعی به ترتیب به $1/2$ و $1/6$ اصلاح شد. بعد از واسنجی، از دستگاه PR2 برای اندازه‌گیری رطوبت در پنج نوبت آبیاری و هر آبیاری به مدت ۶ ساعت، در حین آبیاری و پس از آن تا آبیاری بعدی استفاده شد. نتایج صحت‌سنجی مدل HYDRUS-2D در پنج نوبت آبیاری با و بدون مالچ (با مقادیر میانگین قدر مطلق خطا (MAE) کمتر از ۰/۰۳۵، جذر متوسط مربعات خطا (RMSE) کمتر از ۰/۰۴۲، مجموع مربعات خطا (SSQ) کمتر از $0/41 \text{ (cm}^3/\text{cm}^3)$ و ضریب همبستگی (R) بالای ۰/۷) نشان از عملکرد مناسب مدل در شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک دارد. در شرایط کاربرد مالچ به شرطی که پارامترهای هیدرولیکی خاک برای این حالت نیز واسنجی شود، مدل همان کارایی را خواهد داشت. مدل HYDRUS-2D به دلیل شبیه‌سازی خوب حین و بعد از آبیاری برای طراحی، انتخاب آرایش نوار تیپ و مدیریت آبیاری نوار تیپ پیشنهاد می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بقایای گیاهی، دستگاه PR2، رطوبت حجمی خاک، مدل ریاضی، واسنجی

مقدمه

در ایران همانند دیگر مناطق خشک و نیمه خشک جهان، استمرار تولید محصولات زراعی و رسیدن به حداکثر بازده آبیاری علاوه بر

انتخاب روش مناسب آبیاری، مستلزم شناخت و تخمین مناسب تمامی خصوصیات و عوامل موثر بر آن است (محمدیان و صدراقین، ۱۳۸۸). آبیاری نواری تیپ برای کشت چغندر قند یک روش موثر در افزایش تولید و سود بالا از طریق کاهش هزینه عوامل تولید در مقایسه با آبیاری سطحی و بارانی است (Albayrak et al., 2010). طی پژوهش انجام شده در آریزونا، عملکرد بهتر تیپ نسبت به قطره چکان‌ها، به دلیل کارگزاری نواری و ایجاد پیاز رطوبتی یکپارچه آن، تأیید شده است (Roberts et al., 2008). ابعاد پیاز رطوبتی و توزیع رطوبت حاصل از این حجم رطوبتی، دو فاکتور مهم در تعیین فواصل بین قطره‌چکان‌ها و نوارها، به منظور دستیابی به یک توزیع بهینه آب و کود در منطقه توسعه ریشه است (Kandelous and Simunek, 2010a). ابعاد الگوی رطوبتی مبنای مهمی برای بهینه‌سازی فواصل نوار تیپ، آرایش و انتخاب سامانه مناسب آبیاری و یکی از مهم‌ترین عوامل در طراحی سامانه آبیاری است (Fan et al., 2021). طراحی

- ۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران
 - ۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران
 - ۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران
 - ۴- استاد، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
 - ۵- استادیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه بذر چغندر قند، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
- *-نویسنده مسئول: (Email: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir)

کاهش دهد، کارایی مصرف آب را بهبود بخشد و آب را در مناطق بسیار خشک حفظ کند (Han et al., 2015; Tian et al., 2022). در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ در آزمایشی که در مزرعه تحقیقاتی شی-یانگ‌هی دانشگاه کشاورزی در وی‌وای استان گانسو شمال غربی چین دارای آب و هوای معتدل قاره‌ای انجام شد، استفاده از مالچ پلاستیکی تحت آبیاری نواری تیپ در کشت سیب زمینی، مصرف آب را در سال اول و دوم به ترتیب ۵۰ و ۶۷ میلی‌متر کاهش داد (Yang et al., 2017). از طرفی یکی از پارامترهای مهم در آبیاری نواری تیپ، عرض نوار خیس شده است. به این دلیل که هر چه آب در امتداد عرض گسترش پیدا کند از گسترش آن در عمق جلوگیری می‌شود، در نتیجه تلفات عمقی آب کاهش می‌یابد. در خاک‌های سبک بافت که عرض خیس‌شدگی کمتر و عمق خیس‌شدگی بیشتر است، هزینه اجرای نوار تیپ بیشتر می‌شود (خانجانی و دلیر حسن‌نیا، ۱۳۹۳). مدیریت و برنامه‌ریزی آبیاری نیازمند تعیین یا پیش‌بینی دقیق حجم خاک مرطوب شده اطراف ریشه گیاه است، چرا که آبیاری بیش از اندازه منجر به خارج شدن آب و املاح از ناحیه ریشه گیاه و کاهش راندمان آبیاری می‌شود. بنابراین، تعیین قطر، حجم و توزیع خیس‌شدگی خاک در طراحی سامانه آبیاری نواری تیپ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Yao et al., 2011). به دلیل اینکه تعیین حجم خاک مرطوب شده از طریق اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد می‌باشد، محققان با ارائه معادلات و مدل‌های فیزیکی و عددی متنوع، سعی در شبیه‌سازی پیشروی جبهه رطوبتی نموده‌اند (قربانیان و همکاران، ۱۳۹۳). در پژوهشی، مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک و نفوذ جریان در باغ زیتون در دو سامانه مختلف آبیاری طی سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاکی از توانایی مدل برای شناسایی وضعیت محصول کشاورزی در مراحل مختلف رشد گیاه بود (Autovino et al., 2018). شبیه‌سازی عددی با مدل HYDRUS-2D برای بررسی تأثیر بافت خاک، مقدار رطوبت اولیه و فشار ابتدایی بر پیاز رطوبتی خاک انجام شد و نتایج نشان داد که مقدار اولیه آب، فشار اولیه و مدت آبیاری، تأثیر زیادی روی سطح افقی و حجم خاک مرطوب شده دارد (Fan et al., 2018). علیرغم استفاده گسترده از آبیاری نواری تیپ و کود آبیاری، تحقیقات محدودی در مورد الگوهای خیس شدن خاک و توزیع مواد مغذی در خاک‌های کشاورزی وجود دارد (Hardie et al., 2018). عملکرد HYDRUS با مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده شده رطوبت و شوری خاک در سه بعد، در آبیاری قطره‌ای همراه با خاک‌ورزی در منطقه شمال غربی چین مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان‌دهنده کارآمدی مدل بود (Qi et al., 2018). دقت مدل HYDRUS-3D در شبیه‌سازی رطوبت خاک در دو فصل زراعی در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ در شرایط مزرعه برای کشت گندم و ذرت تحت آبیاری نواری تیپ در جنوب شرقی فرانسه

سامانه آبیاری نواری تیپ کارآمد، نیاز به دانش کامل و اطلاعات در مورد الگوهای خیس‌شدگی تحت قطره‌چکان دارد. پیاز رطوبتی حاصل از آبیاری قطره‌ای سطحی و نواری تیپ به شکل یک کره ناقص و یا بیضی و در آبیاری قطره‌ای زیرزمینی به شکل کروی یا بیضوی می‌باشد (Al-Ogaidi et al., 2016a). شوارتزمن و زور از اولین کسانی بودند که به منظور تخمین ابعاد پیاز رطوبتی گام‌های مؤثری برداشتند. آن‌ها توانستند روابط نیمه تجربی را برای تعیین ابعاد پیاز رطوبتی به ازای منبع تغذیه نقطه‌ای و خطی به دست آورند (Schwartzman and Zur, 1986). امروزه مدل‌های مختلف رایانه‌ای توسعه داده شده است که با دقت‌های متفاوتی اقدام به شبیه‌سازی تغییرات رطوبت و یا همان پیاز رطوبتی در خاک می‌کند که در عمل بر ای کاهش هزینه‌ها بسیار مفید است (Kandelous and Simunek, 2010b). چندین مدل برای تعیین الگوی پیاز رطوبتی سامانه آبیاری نواری طراحی شده‌اند که رایج‌ترین آن‌ها، مدل‌های عددی، تحلیلی و تجربی هستند (Subbaiah, 2013). ابعاد الگوی رطوبتی خاک تحت آبیاری نواری تیپ می‌تواند توسط عوامل بسیاری تحت تأثیر قرار گیرد که برخی از این عوامل به خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک مانند هدایت هیدرولیکی اشباع، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اولیه و همگن بودن خاک ارتباط دارد و برخی عوامل دیگر به خواصی از سامانه آبیاری نواری مانند دبی قطره‌چکان‌ها، فاصله بین قطره‌چکان‌ها و لترال‌ها، موقعیت قطره‌چکان (سطح یا زیرسطح) و نوع کاربرد آب (مداوم یا متناوب) بستگی دارد (Al-Ogaidi et al., 2015). مدل HYDRUS یک مدل عددی برای شبیه‌سازی حرکت آب خاک در شرایط مختلف است. برخلاف مدل‌های تجربی که ممکن است برای شرایط محدود مناسب باشند (Al-Ogaidi et al., 2016b). مدل‌های عددی برای دامنه وسیعی از شرایط کاربرد دارند. طی پژوهشی، مدل‌های تجربی، تحلیلی و عددی در برآورد ابعاد الگوی خیس‌شدگی خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی با یکدیگر مقایسه شد که در آن، مدل HYDRUS-2D به دلیل شبیه‌سازی خوب و قابلیت استفاده آن در دو روش آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی به عنوان بهترین مدل معرفی شد (Kandelous and Simunek, 2010a). آزمایش‌های مزرعه‌ای و مدل‌سازی ریاضی با HYDRUS برای ارزیابی توزیع رطوبت بین دو قطره‌چکان مجاور هم زمانی که پروفیل رطوبتی آن‌ها شروع به هیوشانی می‌کند، در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی استفاده شد (Kandelous et al., 2011). آب‌گریزی و آب‌دوستی ویژگی‌های مهم فیزیکی هستند که تأثیر زیادی بر ویژگی‌های هیدرولیکی خاک دارند. در سامانه آبیاری قطره‌ای، ویژگی‌های هیدرولیکی خاک زیر قطره‌چکان‌ها بر ابعاد هندسی پیاز رطوبتی و عملکرد گیاه مؤثر است (تدوین نژاد و همکاران، ۱۳۹۶). آبیاری نواری تیپ تحت مالچ یک فناوری آبیاری صرفه‌جو در مصرف آب است که می‌تواند تبخیر را

طرح آزمایش

در این پژوهش سامانه آبیاری نواری تیپ همراه با فیلتراسیون با آرایش ۴۰×۵۰ کشت نشائی گلدانی چغندر قند در ۱۴ کرت (۷ کرت با مالچ و ۷ کرت بدون مالچ) انجام شد. ابعاد هر کرت ۳×۵ متر مربع و در هر کرت از ۲ ردیف نوار تیپ به فاصله ۹۰ سانتی‌متر از هم و به طول ۴ متر استفاده شد. در طرفین هر نوار تیپ به فاصله ۲۰ سانتی-متر، کشت انجام شد. فاصله بوته‌های چغندر قند روی هر ردیف کشت به‌طور مساوی حدود ۲۰ سانتی‌متر منظور گردید. برای جلوگیری از تداخل آب آبیاری، کرت‌ها به فاصله ۱ متر از یکدیگر ایجاد شدند. در ۱۲ کرت (شش کرت بدون مالچ و شش کرت با مالچ) نمونه‌گیری خاک با استفاده از اوگر برای اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش وزنی در عمق‌های ۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰ و ۶۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر در مجاورت نوار تیپ انجام شد. از دو کرت باقی‌مانده (یکی بدون مالچ و یکی با مالچ) برای نصب لوله‌های دسترسی دستگاه پراب پروفیل PR2 (محصول شرکت (Delta-T Devices Cambridge, UK) (Qi and Helmers, 2010) برای پایش توزیع رطوبت خاک استفاده شد (شکل ۱). برای انتخاب با کیفیت‌ترین نوار تیپ در بین نوار تیپ‌های تولید داخل و خارج کشور موجود در منطقه، بر اساس طول ۱۰۰ متر لاترال، پنج نوع نوار تیپ با دبی ۲ لیتر در ساعت و فاصله قطره‌چکان ۲۰ سانتی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس بهترین ضریب یکنواختی کریستین سن و یکنواختی توزیع (Keller and Bliessner, 1992)، نوار تیپ پلاک‌دار شرکت Sun Stream-FLD کشور ترکیه برای اجرا انتخاب شد. قبل از انجام آزمایش، نمونه‌برداری از عمق‌های ۰ تا ۳۰، ۳۰ تا ۶۰ و ۶۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر خاک مزرعه برای مشخص کردن خواص فیزیکی و شیمیایی خاک (شامل شوری، پ-هاس، درصد اشباع، ازت، رس، لای، شن و جرم مخصوص ظاهری) انجام شد (جدول ۱). همچنین منبع آب آبیاری (چاه نیمه عمیق) از نظر کیفیت مورد آزمایش قرار گرفت (جدول ۲). برای تعیین نقطه پژمردگی دائم و ظرفیت زراعی خاک از نرم افزار Soil Water Characteristics استفاده شد (Saxton and Willey, 2006) (جدول ۳).

انجام شد و طبق نتایج، رطوبت خاک شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده تطابق خوبی داشت (Al-Ogaidi et al., 2016b). در تحقیقی به بررسی و شبیه‌سازی توزیع آب و شوری خاک تحت تیمارهای مختلف آبیاری قطره‌ای سطحی بدون مالچ و با مالچ پلاستیکی و آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در رژیم‌های آبیاری روزانه و دو هفته‌ای در یک خاک لومی شنی پرداختند. در این آزمایش، آبیاری قطره‌ای سطحی با مالچ پلاستیکی و رژیم آبیاری روزانه سطوح شوری پایین‌تری در دامنه جریان در مقایسه با دیگر تیمارها و رژیم‌های آبیاری نشان داد (Selim et al., 2013). با وجود مطالعات متعدد در زمینه شبیه‌سازی الگوی توزیع رطوبتی خاک توسط مدل HYDRUS-2D، هنوز اطلاعات محدودی در زمینه شبیه‌سازی الگوی توزیع رطوبتی خاک در حین آبیاری و در شرایط استفاده از مالچ در آبیاری نواری تیپ وجود دارد. بنابراین، هدف از این تحقیق واسنجی مدل HYDRUS-2D و شبیه‌سازی الگوی رطوبتی خاک در آبیاری نواری تیپ در کشت نشائی چغندر قند با و بدون مالچ است. همچنین در این تحقیق دستگاه پروب پروفیل PR2 برای اندازه‌گیری رطوبت حجمی خاک واسنجی شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در ۷ کیلومتری جنوب شهرستان بوکان در شمال غرب ایران واقع شده است. این منطقه جزء محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه با مساحت ۵۱۷۶۲ کیلومتر مربع یکی از شش حوضه آبریز اصلی ایران است. تحقیق حاضر در زمین‌های کشاورزی روستای بیگ بسی با طول جغرافیایی ۶۰۳۵۴۷ و عرض جغرافیایی ۴۵۳۵۵۹۳ و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۵۱ متر طی دو فصل زراعی ۱۳۹۷-۱۳۹۸ انجام شد. اقلیم منطقه نیمه خشک فراسرد و سرد می‌باشد. بر اساس میانگین دوره آماری ۱۳۹۶-۱۳۸۶ ایستگاه هواشناسی شهرستان بوکان، میانگین بارندگی و تبخیر سالانه منطقه به ترتیب ۳۶۱/۴ و ۱۷۹۹/۷ میلی‌متر، متوسط دمای سالانه حدود ۷/۶ درجه سانتی‌گراد و حداکثر تعداد روزهای یخبندان ۱۰۰ روز در سال می‌باشد (National Meteorological Organization, 2018).

جدول ۱- خواص فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

بافت Texture	شن Sand (%)	لای Silt (%)	رس Clay (%)	ازت کل Total Nitrogen (T.N)%	درصد اشباع Saturation (SP)%	اسیدیته pH	شوری EC (dS/m)	عمق Depth (cm)
لوم Loam	۳۶	۳۹	۲۵	۰/۰۸	۴۷	۷/۶۸	۰/۷۳۱	۰-۳۰
لوم Loam	۳۴	۴۱	۲۵	۰/۰۵	۴۸	۷/۷۴	۰/۴۷۴	۳۰-۶۰
لوم Loam	۳۳	۴۲	۲۵	۰/۰۴	۴۸	۷/۹۸	۰/۴۲۵	۶۰-۱۰۰

جدول ۲- آنالیز مشخصات خاک با نرم افزار Soil Water Characteristics

جرم مخصوص ظاهری Soil Bulk Density (g/cm ³)	هدایت هیدرولیکی Hydraulic Conductivity (cm/hr)	آب در دسترس Available Water (cm ³ /cm ³)	ظرفیت زراعی Field Capacity (cm ³ /cm ³)	نقطه پژمردگی Wilting Point (cm ³ /cm ³)	عمق Depth (cm)
۱/۴۲	۱۰	۱۴	۰/۳۰۸	۰/۱۶۴	۰-۳۰
۱/۴۱	۹/۸۹	۱۵	۰/۳۱۲	۰/۱۶۴	۳۰-۶۰
۱/۴۱	۹/۸۵	۱۵	۰/۳۱۴	۰/۱۶۴	۶۰-۱۰۰

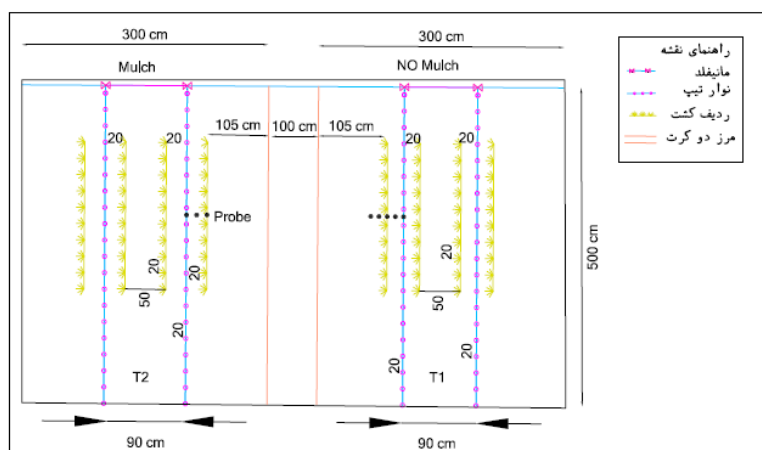
جدول ۳- نتایج تجزیه شیمیایی آب آبیاری در مزرعه آزمایشی

نسبت جذب سدیم SAR (mg/l)	کلاس Class	پتاسیم K ⁺ (mg/l)	سدیم Na ⁺ (mg/l)	بی کربنات HCO ₃ ⁻ (mg/l)	کلر Cl ⁻ (mg/l)	شوری EC (dS/m)	سولفات SO ₄ ²⁻ (mg/l)	اسیدیته pH	کل مواد جامد محلول TDS (mg/l)
۱/۴	C2S1	۱/۴	۰/۳	۳/۷	۱/۸	۰/۵۷	۳	۷/۳۱	۳۴۱

تهیه نشاء، عملیات کاشت و مالچ پاشی

برای تهیه نشاء چغندر قند مورد نیاز ابتدا مخلوط مناسبی از خاک بعنوان بستر کشت بذر در خزانه برای پر کردن گلدان‌ها تهیه شد. گلدان‌های کاغذی ژاپنی با ترکیبی از خاک زراعی، کود دامی کاملاً پوسیده، پرلیت، کوکوپیت و خاک برگ پر شد و بذر شکوفا کرج چغندر قند در داخل آن‌ها در سال ۱۳۹۷ در ۱۲ اردیبهشت و در سال ۱۳۹۸ در ۱۰ اردیبهشت در گلخانه کشت شد. جوانه‌زنی بذر و مراحل اولیه رشد گیاهچه‌ها به مدت حدود ۴۵ روز در این محیط سپری شد. نشاء تولیدی در مرحله ۴ تا ۶ برگی بهمراه گلدان به زمین و کرت‌های مورد نظر در سال ۱۳۹۷ در ۲۸ خرداد ماه و در سال ۱۳۹۸ در ۲۵

خرداد ماه منتقل شد. با توجه به اینکه کشت نشائی _ گلدانی را می-توان بعد از برداشت گندم به‌عنوان کشت متناوب و کشت دوم هم انجام داد و از طرفی بعضی کشاورزان در حوضه آبریز دریاچه ارومیه کلتش باقی مانده را در مزرعه آتش می‌زنند، بنابراین، به‌منظور بررسی تأثیر کلتش باقی مانده بر شبیه‌سازی الگوی رطوبتی خاک، کشت چغندر قند در شرایط با و بدون کاربرد مالچ کلتش انجام شد. بعد از آماده کردن زمین، مالچ کلتش گندم به میزان ۲ تن در هکتار به سطح خاک اضافه شد. برای جلوگیری از باد بردگی مالچ، کلتش تا عمق ۱۰ سانتی‌متری با خاک مخلوط شد. مالچ پاشی بعد از کرت‌بندی و قبل از اجرای سامانه نوار تیپ انجام شد (شکل ۱).



شکل ۱- شماتیک سامانه آبیاری نوار تیپ و محل کارگذاری پروب‌های دستگاه PR2 در کرت با مالچ و بدون مالچ

واسنجی دستگاه PR2 و برنامه‌ریزی آبیاری

دستگاه پروپ پروفیل (Delta-T Devices, Cambridge, UK)، دارای دو مدل PR2/4 و PR2/6 است که مدل PR2/4 رطوبت خاک را در عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر و مدل PR2/6 رطوبت خاک را در عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری سطح خاک اندازه‌گیری می‌کند (Qi and Helmers, 2010). در این تحقیق از مدل PR2/6 استفاده شد. این دستگاه شامل یک میله به قطر حدود ۲۵ میلی‌متر از جنس پلی کربنات است. روی میله چندین حسگر الکتریکی به صورت جفت حلقه‌های ضد زنگ در طول میله پروپ در فاصله‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ قرار گرفته است (Qi and Helmers, 2010). قرائت رطوبت خاک در هر نقطه در اعماق مختلف زمانی که میله درون لوله دسترسی نصب شده در خاک قرار گیرد، انجام می‌شود. دو جفت حلقه حسگر به‌عنوان دو صفحه یک خازن عمل می‌کند و رطوبت خاک را بصورت ولتاژ محاسبه می‌کند و این مقدار می‌تواند به ضریب گذردهی تبدیل شود (فیروزه‌ای و همکاران، ۱۳۹۵). خروجی ولتاژ در عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر با استفاده از HH2 متر ثبت می‌شود. دو روش برای تبدیل ضریب گذردهی رطوبت سنج خازنی چند حسگر دستگاه پروپ پروفیل PR2 به مقدار رطوبت خاک وجود دارد؛ یکی استفاده از معادله پیش فرض ارائه شده توسط شرکت سازنده و دومی واسنجی دستگاه در منطقه مورد مطالعه (Qi and Helmers, 2010). معادله پیش فرض بصورت رابطه (۱) است (Delta-T Devices, 2008):

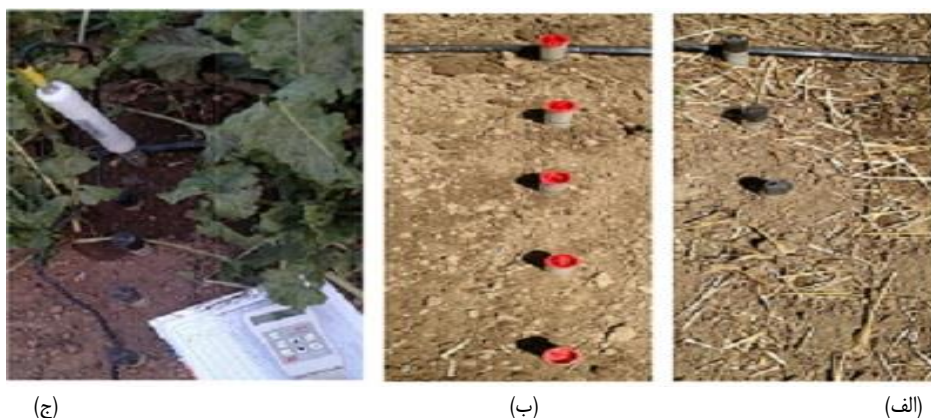
$$\sqrt{\varepsilon} = 1.125 - 5.53V + 67.17V^2 - 234.42V^3 + 413.56V^4 - 356.68V^5 + 121.53V^6 \quad (1)$$

که در آن: ε ، ثابت دی الکتریک و V ولتاژ برحسب میلی ولت

است. کارخانه سازنده با استفاده از تابع خطی رسم $\sqrt{\varepsilon}$ در مقابل رطوبت حجمی خاک، پارامترهای a_0 و a_1 که منعکس کننده نوع خاک هستند، را تعیین کرده است:

$$\theta_v = \frac{\sqrt{\varepsilon} - a_0}{a_1} \quad (2)$$

که در آن: θ_v رطوبت حجمی خاک (cm^3/cm^3) و پارامترهای پیش فرض a_0 و a_1 (پارامترهای واسنجی) توسط دستگاه Delta-T برای خاک‌های معدنی به ترتیب $1/6$ و $1/4$ و برای خاک‌های آلی به ترتیب $1/3$ و $7/7$ پیشنهاد شده است (Qi and Helmers, 2010) در این پژوهش با توجه به وجود دستگاه آون در مزرعه، واسنجی دستگاه PR2 در منطقه مورد مطالعه به روش وزنی انجام شد. سه ماه قبل از انتقال نشاء به مزرعه، لوله‌های دسترسی دستگاه پروپ برای تعیین زمان آبیاری و اندازه‌گیری رطوبت در دو کرت با و بدون مالچ در مزرعه برای واسنجی در فواصل ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر از نوار تیپ نصب شد (شکل ۲). از اوگر به قطر ۶ سانتی‌متر برای نصب لوله‌های دسترسی استفاده شد. یک ماه بعد از نصب لوله‌های دسترسی و از آبیاری ششم به بعد، قرائت HH2 متر ۲۴ ساعت بعد از آبیاری ۶ ساعته، هر ۲۴ ساعت به مدت ۷ روز انجام شده و همزمان نمونه‌گیری خاک با استفاده از اوگر و اندازه‌گیری رطوبت خاک به روش وزنی در کرت‌های مجاور انجام گرفت. نمونه‌ها در دمای ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۷۲ ساعت خشک شدند. این عملیات تا سه تکرار ادامه پیدا کرد. از دستگاه PR2 پس از واسنجی، برای اندازه‌گیری رطوبت خاک در عمق‌های مختلف در مزرعه برای تعیین زمان آبیاری در کل فصل زراعی استفاده شد (شکل ۲).



شکل ۲- نمایش محل کارگذاری لوله‌های دسترسی PR2 در کرت با مالچ (الف) و کرت بدون مالچ (ب) و اندازه‌گیری رطوبت خاک با استفاده از دستگاه PR2 در مزرعه (ج)

در ردیف کشت) تعیین شد. بدین ترتیب دور آبیاری متغیر و مدت زمان آبیاری در هر دور ثابت و برابر با ۶ ساعت بود. حجم آب آبیاری در هر دور آبیاری و در کل دوره رشد گیاه چغندر قند نشایی با توجه به مدت زمان آبیاری و دبی خروجی مشخص هر قطره چکان و تعداد قطره-چکان‌ها در هر تیمار یا هر هکتار بدست آمد. شرح مدت زمان آبیاری و حجم آب آبیاری در طول فصل کشت برای دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در جدول ۴ آمده است.

آبیاری مزرعه بلافاصله پس از انتقال نشاء (کشت گلدان‌ها در زمین اصلی) یکی از عوامل بسیار مهم در استقرار مناسب نشاءهای انتقال یافته در مزرعه است. زمان آبیاری گیاه چغندر قند در دو آبیاری اول بر اساس ۵۰ درصد تخلیه رطوبت در دسترس در عمق ریشه (معادل رطوبت حجمی ۲۳/۱۶ درصد در عمق ۳۰ سانتی‌متر در ردیف کشت) و در آبیاری‌های بعدی بر اساس ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس (معادل رطوبت حجمی ۲۲/۱۶ درصد در عمق ۳۰ سانتی‌متر

جدول ۴- حجم و مدت زمان آبیاری در تیمارهای با و بدون مالچ در دو سال ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸

سال زراعی	تیمار	آرایش کشت	تعداد پلاک در هکتار	مقدار نوار نیپ در هکتار (لیتر در ساعت)	دبی پلاک‌ها (لیتر در ساعت)	تعداد نوبت آبیاری در فصل	مدت زمان آبیاری در نوبت (ساعت)	جمع مدت زمان آبیاری در فصل (ساعت)	حجم آب آبیاری (متر مکعب در هکتار)	حجم بارندگی موثر (متر مکعب در هکتار)	جمع حجم آب آبیاری و بارندگی موثر (متر مکعب در هکتار)
۱۳۹۷	با مالچ	دو طرفه	۵۵۵۰۰	۱۱۱۰۰	۲	۱۸	۶	۱۰۸	۱۱۹۸۸	۳۲	۱۲۰۲۰
	بدون مالچ	دو طرفه	۵۵۵۰۰	۱۱۱۰۰	۲	۱۸	۶	۱۰۸	۱۱۹۸۸	۳۲	۱۲۰۲۰
۱۳۹۸	با مالچ	دو طرفه	۵۵۵۰۰	۱۱۱۰۰	۲	۱۷	۶	۱۰۲	۱۰۲۰۰	۶۵	۱۱۳۸۷
	بدون مالچ	دو طرفه	۵۵۵۰۰	۱۱۱۰۰	۲	۱۷	۶	۱۰۲	۱۰۲۰۰	۶۵	۱۱۳۸۷

مخصوص ظاهری و رطوبت اولیه خاک، پارامترهای هیدرولیکی خاک (پارامترهای منحنی رطوبتی و هدایت آبی وان گنوختن- معلم) و اطلاعات گیاهی از قبیل نوع گیاه (Database Sugar Beet – Wesseling, 1991)، پارامترهای مدل جذب آب (مدل فلدس)، تبخیر-تعرق، عمق و پراکنش ریشه است. به دلیل تقارن زیاد نیمه راست و چپ نیمرخ رطوبتی خاک در شرایط واقعی در نوار تیپ، شبیه-سازی نیمرخ رطوبتی با مدل تنها برای یک طرف صورت گرفت. محیط شبیه‌سازی شده در مدل، محدوده‌ای به عرض ۴۰ سانتی متر و ارتفاع ۱۰۰ سانتی متر است که تغذیه توسط نوار تیپ از بالای محدوده شبیه‌سازی شده انجام می‌پذیرد. برای ایجاد شرایط مرزی، مرزهای عمودی بدون جریان در نظر گرفته شد و در حاشیه پایینی محدوده جریان در عمق یک متری، شرایط مرزی زهکشی آزاد در نظر گرفته شد. برای حاشیه بالایی محدوده جریان (تبخیر-تعرق و بارندگی) شرایط مرزی اتمسفری در نظر گرفته شد (شکل ۳). شرایط مرزی برای نقاط قرارگیری پلاک‌های نوار تیپ در هنگام وجود و عدم وجود جریان متفاوت در نظر گرفته شد. در نوار آبیاری با فاصله کم قطره-چکان‌ها، نوار به‌عنوان یک منبع خطی عمل کرده و در سامانه آبیاری قطره‌ای نوری که عملاً فاصله قطره‌چکان‌ها کم است، پیاز رطوبتی ناحیه‌ای که آبیاری می‌شود به‌صورت ممتد و پیوسته ایجاد شده و در

شبیه‌سازی حرکت آب با استفاده از مدل HYDRUS-2D

مدل HYDRUS-2D یکی از مدل‌های پیشرفته در زمینه حرکت دو بعدی آب، املاح و گرما در خاک می‌باشد که توسط سیمونک و همکاران در آزمایشگاه شوری خاک آمریکا ارائه شده است (Kandelous and Simunek, 2010a). این مدل شامل حل عددی رابطه ریچاردز به روش تفاضل محدود (Finite Difference Method) برای بررسی حرکت آب در خاک است. این مدل قادر به شبیه‌سازی در شرایط اشباع و غیراشباع در جهات افقی، عمودی و شعاعی بوده و توانایی تخمین خصوصیات فیزیکی خاک به روش حل معکوس را دارد. معادله ریچاردز با فرض خاک همروند و یکنواخت و حرکت دو بعدی آب در خاک به صورت زیر نوشته می‌شود (Kandelous and Simunek, 2010a):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k(h) \frac{\partial h}{\partial z} + k(h) \right] \quad (3)$$

که در آن، θ رطوبت حجمی (cm^3/cm^3)، t زمان (min)، k هدایت هیدرولیکی (cm/min)، h پتانسیل فشاری آب موجود در خاک (cm) و x و z به ترتیب مختصات افقی و عمودی می‌باشد. داده‌های ورودی به مدل شامل خصوصیات فیزیکی خاک مانند بافت، جرم

بالقوه (Tp) با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$Tp = Kc \times ET_0 - Es \quad (۴)$$

Kc ضریب گیاهی، ET₀ تبخیر-تعرق مرجع و Es نشان دهنده تبخیر از سطح خاک می‌باشد که طبق تحقیقات هانسون و همکاران (۲۰۰۸) میزان تبخیر از سطح خاک در آبیاری قطره‌ای برابر با ۵ درصد تبخیر-تعرق کل می‌باشد. لذا، در این تحقیق نیز با توجه به اینکه آزمایش، در مرحله میانی و پایانی کشت چغندر قند قرار داشت و سطح مزرعه با برگ چغندر قند کامل پوشش داده شده بود، این مقادیر استفاده شدند. شبیه‌سازی با استفاده از نسخه HYDRUS (2014) 2.04.0580 انجام شد.

تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک

در این تحقیق برآورد پارامترهای هیدرولیکی خاک توسط مدل ROSETTA Lite V.1.1 (Schaap et al., 2001) انجام شد. این مدل در مدل HYDRUS-2D قرار داده شده است و برای پیش‌بینی پارامترهای هیدرولیکی خاک بر اساس شبکه عصبی از درصد ذرات دانه‌بندی، جرم مخصوص ظاهری، درصد رطوبت در حد ظرفیت مزرعه و نقطه پژمردگی دائم خاک استفاده می‌کند. نتایج بدست آمده از این مدل در جدول ۵ ارائه شده است.

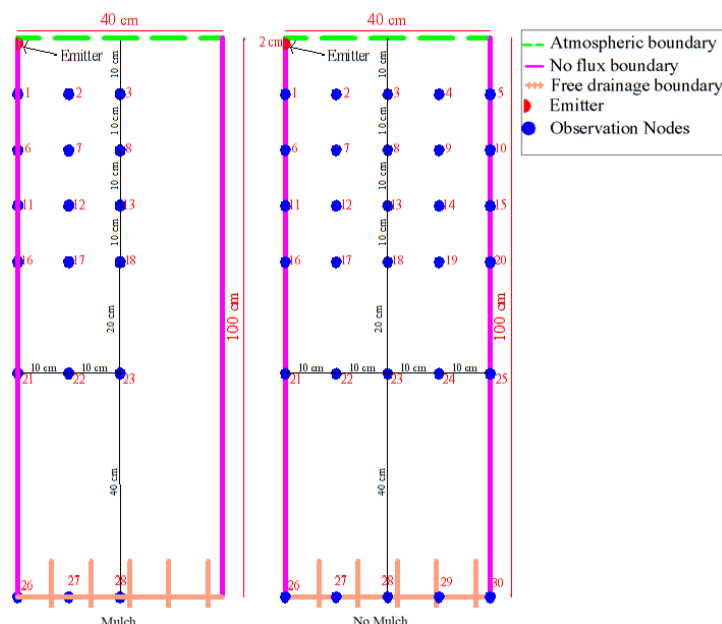
عمل می‌توان با فرض منبع خطی نوار تیپ، پیاز رطوبتی را در دو بعد بررسی کرد (Javadzadehat et al., 2017; Siyal and Skagg, 2009). در اینجا نیز شبیه‌سازی بر این اساس صورت گرفت. در دوره آبیاری، مرز مربوط به نوار تیپ جریان ثابتی دارد که میزان آن برابر با سرعت کاربرد آب در تمام سطح مقطع نوار تیپ است (Phogat et al., 2012). شعاع قطره‌چکان برابر با ۱ سانتی‌متر، محیط قطره‌چکان برابر با $(\pi \times 1^2) \times 6/283$ سانتی‌متر و دبی هر متر نوار تیپ با توجه به فاصله ۲۰ سانتی‌متری قطره‌چکان‌ها و دبی هر قطره‌چکان (۲ لیتر در ساعت)، برابر ۱۰ لیتر در ساعت در نظر گرفته شد (شکل ۳). بنابراین، سرعت کاربرد آب در تمام سطح مقطع نوار تیپ برابر است با ۱۵/۹۲ سانتی‌متر در ساعت است:

$$q = \left(\frac{10 \times 1000}{100 \times 6.283} \right) = 15.92 \text{ cm / hr} \quad (۴)$$

شرایط اولیه رطوبت خاک در هر دو سال برای هر آبیاری، برابر شرایط آخر آبیاری قبلی در نظر گرفته شد. میزان بارندگی موثر از معادله SCS تعیین شد (Fernandez et al., 2020):

$$Pe = P \times \left(\frac{(125 - (0.2 \times P))}{125} \right) \quad (۵)$$

که در آن، P_e بارندگی موثر (mm) و P بارندگی ماهیانه (mm) می‌باشد. تبخیر-تعرق مرجع از طریق نرم‌افزار کراپ وات ۸ با استفاده از آمار اداره هواشناسی شهرستان بوکان بدست آمد. سرعت تعرق



شکل ۳- شرایط مرزی و موقعیت نقاط مشاهده‌ای برای مدل‌سازی توزیع رطوبت خاک

جدول ۵- تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک منطقه مورد مطالعه توسط مدل (Rosetta Lite v.1.1 (Schaap et al., 2001)

θ_r (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)	α (1/cm)	n (-)	Ks (cm/hr)	تیمارها	عمق خاک (cm)
۰/۰۵۹۲	۰/۴۲۰۷	۰/۰۱۰۸	۱/۳۵	۰/۵۰۸۳	No Mulch	۳۰-۰
۰/۰۵۹۶	۰/۴۲۳۴	۰/۰۰۹۹	۱/۳۶	۰/۵۳۷	No Mulch	۶۰-۳۰
۰/۰۵۹۸	۰/۴۲۳۶	۰/۰۰۹۵	۱/۳۷	۰/۵۳۷	No Mulch	۱۰۰-۶۰

* θ_r : رطوبت باقی مانده در خاک، θ_s : رطوبت اشباع خاک، KS : هدایت آبی اشباع، α : مقدار معکوس ورود هوا به خاک، n : شاخص توزیع اندازه خلل و فرج خاک است.

جذب آب ریشه

۴۰ سانتی‌متر و بیشترین شعاع ریشه تا ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. عرض سطح خاک در فرایند انتقال برابر ۴۰ سانتی‌متر و تعرق پتانسیل در هد h_2 و h_3 به ترتیب برابر ۰/۰۲ و ۰/۰۴۲ سانتی‌متر بر ساعت در نظر گرفته شد.

در HYDRUS-2D، جذب آب ریشه به‌عنوان یک جزء تخلیه در معادله ریچاردز، با استفاده از تابع عکس العمل تنش که توسط فدس و همکاران (1987) در HYDRUS-2D ارائه گردیده، مدل‌سازی می‌شود:

$$S(h) = \alpha(h)b(x, z)StTp \quad (7)$$

واسنجی و اعتبارسنجی مدل HYDRUS-2D

در این پژوهش برای واسنجی مدل HYDRUS-2D از داده‌های سال اول (۱۳۹۷) و به روش سعی و خطا استفاده شد (Steduto et al., 2009). برای انجام آنالیز حساسیت به‌منظور تخمین بهتر پارامترهای هیدرولیکی با و بدون مالچ، از داده‌های رطوبت قرائت شده توسط دستگاه PR2 واسنجی شده قبل از آبیاری (به فاصله یک ساعت) و بعد از آبیاری (به فاصله ۲۴ ساعت) در طول فصل زراعی سال اول در ۶ نوبت آبیاری (آبیاری ششم تا یازدهم) استفاده شد. وقتی ضریب همبستگی برای تمام پارامترهای هیدرولیکی در پنجره مربوطه در مدل HYDRUS به مقادیر قابل قبول (بالای ۷۰ درصد) رسید، این آزمون متوقف شد (سلامتی و همکاران، ۱۳۹۴). ضریب همبستگی قابل قبول، حاصل برازش مقادیر رطوبتی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل بود. پارامترهای هیدرولیکی واسنجی شده با و بدون مالچ در جدول ۶ نشان داده شده است.

که در آن، $S(h)$ میزان جذب آب ریشه، $\alpha(h)$ تابع عکس العمل تنش آب، $b(x, z)$ تابع توزیع تراکم ریشه، St عرض سطح خاک در فرایند انتقال و Tp تعرق پتانسیل می‌باشد. پارامترهای تابع عکس العمل تنش آب برابر $h_1 = -10 \text{ cm}$ ، $h_2 = -25 \text{ cm}$ و $h_3 = -320 \text{ cm}$ طبق تحقیقات وسلینگ (1991) در مدل هایدروس در نظر گرفته شد. ریشه چغندرقد از هد h_1 شروع به استخراج آب از خاک می‌کند و در هد h_2 حداکثر جذب آب، از h_2 تا h_4 به‌صورت خطی کاهش یافته و در h_5 که نقطه پژمردگی است، جذب آب توسط ریشه متوقف می‌شود. همچنین پارامترهای پارامترهای جذب آب ریشه چغندرقد در جهت z ، که شامل حداکثر عمق ریشه‌زایی برابر ۱۰۰ سانتی‌متر، عمق حداکثر ریشه تا ۴۰ سانتی‌متر و در جهت x ، حداکثر شعاع ریشه برابر

جدول ۶- پارامترهای هیدرولیکی واسنجی شده در تیمارهای با و بدون مالچ* (Mualem, 1978; van Genuchten, 1980)

θ_r (cm^3/cm^3)	θ_s (cm^3/cm^3)	α (1/cm)	n (-)	Ks (cm/hr)	I	تیمارها	عمق خاک (cm)
۰/۰۸۵۶۴	۰/۴۳۷۴	۰/۰۰۶۹۲۱	۱/۶	۰/۵۹۸۳	۰/۴۰۳	No Mulch	۳۰-۰
۰/۰۸۹۰۸	۰/۴۳۷۴	۰/۰۰۷۰۵۴	۱/۵۷	۰/۶۴۳۶	۰/۴۰۳	Mulch	۳۰-۰
۰/۰۸۵۷۵	۰/۴۳۸۲	۰/۰۰۶۸۱۷	۱/۶۱	۰/۶۱۷۲	۰/۴۰۳	No Mulch	۶۰-۳۰
۰/۰۸۵۷۷	۰/۴۳۹۱	۰/۰۰۶۷۱۵	۱/۶۲	۰/۶۲۹۱	۰/۴۰۳	No Mulch	۱۰۰-۶۰

* θ_r : رطوبت باقی مانده در خاک، θ_s : رطوبت اشباع خاک، KS : هدایت آبی اشباع، α : مقدار معکوس ورود هوا به خاک، n : شاخص توزیع اندازه خلل و فرج خاک و I : پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک است.

(ME)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، جذر متوسط مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (R) و مجموع مربعات خطا (SSQ) برای ارزیابی نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده شد:

بعد از تعیین پارامترهای هیدرولیکی براساس داده‌های سال اول (۱۳۹۷)، اعتبارسنجی مدل برای داده‌های سال دوم (۱۳۹۸) برای ۵ نوبت آبیاری (آبیاری سیزدهم تا هفدهم) در دوره میانی و پایانی کشت چغندرقد نشائی انجام شد. از نمایه‌های آماری میانگین خطا

فرض a_0 و a_1 را به ترتیب به $1/8$ و $1/3$ ، برای رطوبت بالای ظرفیت زراعی و به $1/2$ و $1/6$ ، برای رطوبت کمتر از ظرفیت زراعی تغییر داد. رابطه رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با دستگاه PR2 با پارامترهای پیشنهادی پیش فرض نسبت به رطوبت حجمی دستگاه آن در رابطه ۱۳ آورده شده است:

$$\theta_{OVEN} = -0.009\theta_{PR2}^2 + 1.321\theta_{PR2} - 0.3891 \quad (13)$$

که در آن: θ_{OVEN} و θ_{PR2} به ترتیب رطوبت حجمی (درصد) اندازه‌گیری شده از طریق آن و دستگاه PR2 است. نتایج فوق با نتایج محققان پیشین، Mwale et al., 2005; Qi and Helmers, (2010) که اظهار داشتند پروب پروفیل PR2 در بیشتر موارد به-میزان قابل توجهی میزان رطوبت خاک را بیش از حد تخمین زده است، مشابه است.

نتایج شبیه‌سازی الگوی رطوبتی خاک با مدل - HYDRUS 2D

نمودار تغییرات رطوبت حجمی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده (براساس ۳۰ نقطه) در ۵ نوبت آبیاری متوالی از آبیاری سیزدهم تا هفدهم از زمان شروع آبیاری در هر نوبت آبیاری تا پایان آبیاری به مدت ۶ ساعت و بعد از پایان آبیاری، هر ۲۴ ساعت تا شروع نوبت آبیاری بعدی در سال دوم زراعی برای کشت چغندرقد نشایی گلدانی در حالت بدون مالچ برای برخی عمق‌ها و فاصله از نوار تیپ به‌عنوان نمونه در شکل ۵ نشان داده شده است.

$$ME = \frac{\sum (O_i - P_i)}{n} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum (|O_i - P_i|)}{n} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$R = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right) \quad (11)$$

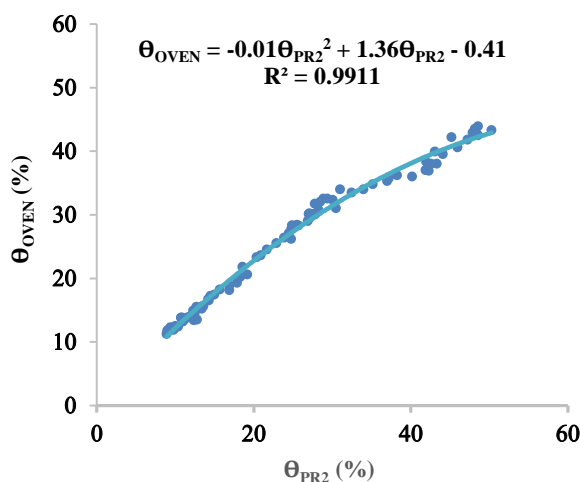
$$SSQ = \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \quad (12)$$

در روابط فوق، P_i مقادیر شبیه‌سازی شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد اندازه‌گیری‌ها، \bar{P} مقدار متوسط پارامتر شبیه‌سازی شده و σ مقدار متوسط پارامتر اندازه‌گیری شده می‌باشد.

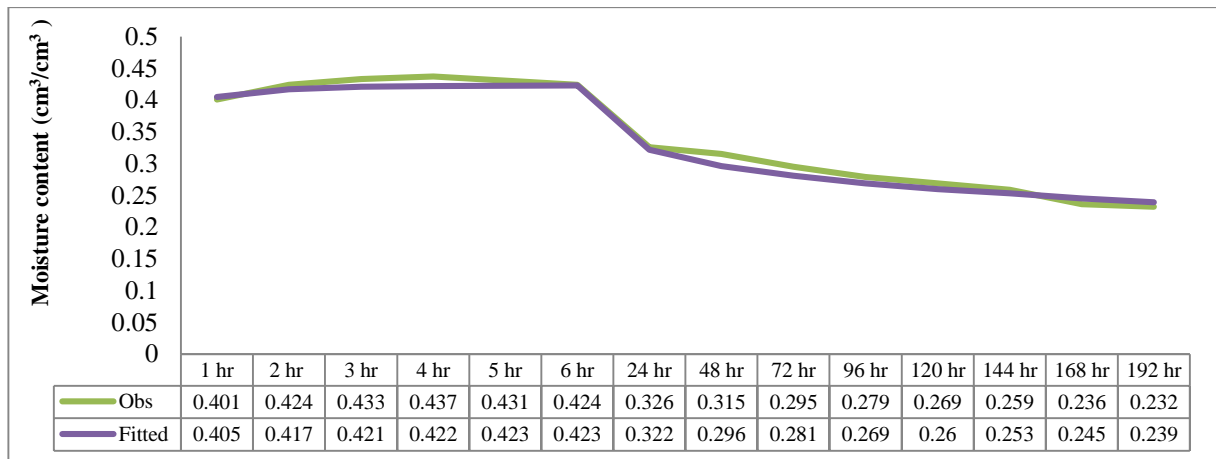
نتایج و بحث

واسنجی دستگاه PR2

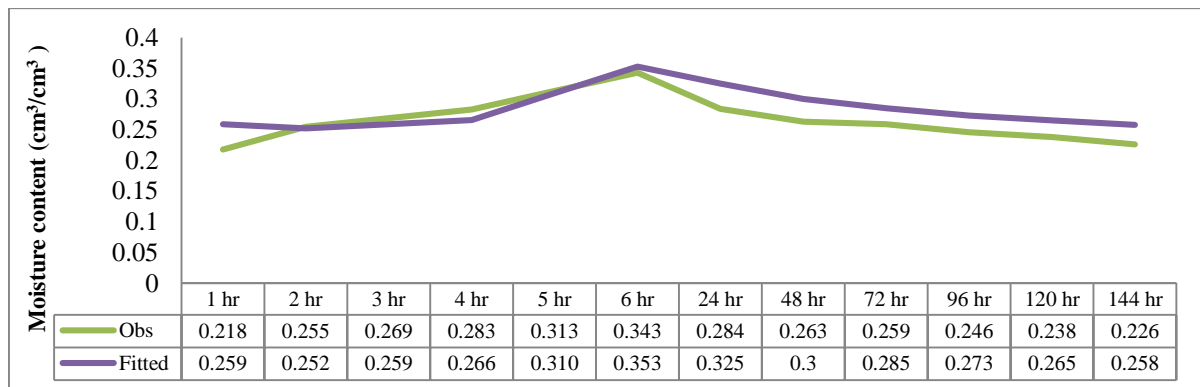
دستگاه PR2 براساس معادله پیش‌فرض ارائه شده توسط شرکت سازنده، در مزرعه مورد آزمایش با بافت لومی برای رطوبت‌های بیشتر از رطوبت ظرفیت زراعی، رطوبت را بیشتر و برای رطوبت‌های کمتر از ظرفیت زراعی، رطوبت را کمتر از رطوبت واقعی نشان داد (شکل ۴). برای تصحیح آن بایستی پارامترهای پیشنهادی پیش-



شکل ۴- رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده با دستگاه PR2 در مقابل رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده از طریق اون



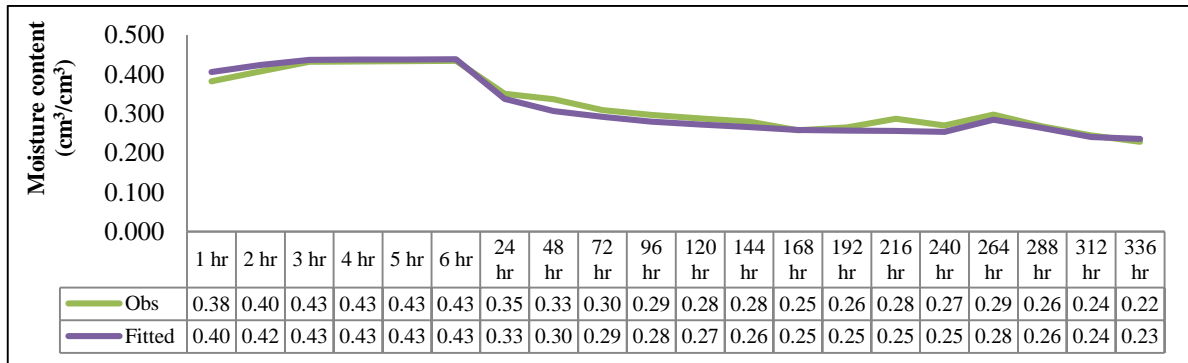
الف- تغییرات رطوبت حجمی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دور آبیاری ۱۳ در مجاورت نوار تیپ و در عمق ۱۰ سانتی‌متر



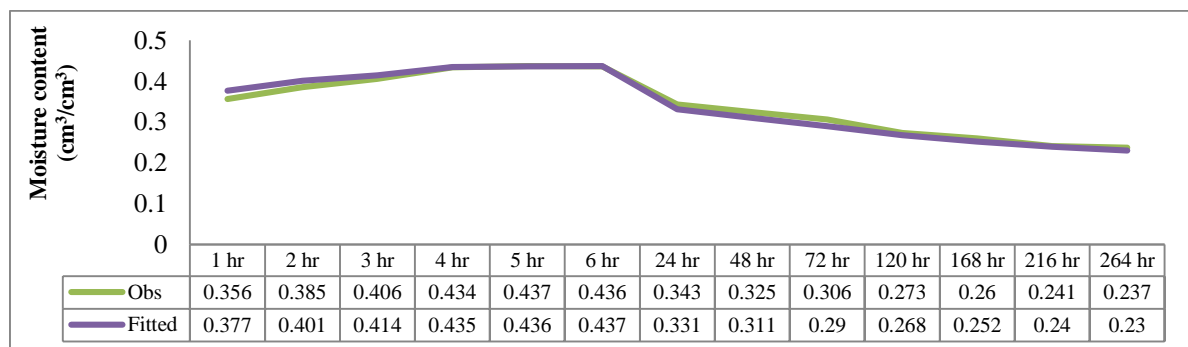
ب- تغییرات رطوبت حجمی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دور آبیاری ۱۴ در ۴۰ سانتی‌متری نوار تیپ و در عمق ۱۰ سانتی‌متر



ج- تغییرات رطوبت حجمی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دور آبیاری ۱۵ در ۳۰ سانتی‌متری نوار تیپ و در عمق ۱۰۰ سانتی‌متر



د- تغییرات رطوبت حجمی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دور آبیاری ۱۶ در ۱۰ سانتی‌متری نوار تیپ و در عمق ۲۰ سانتی‌متر

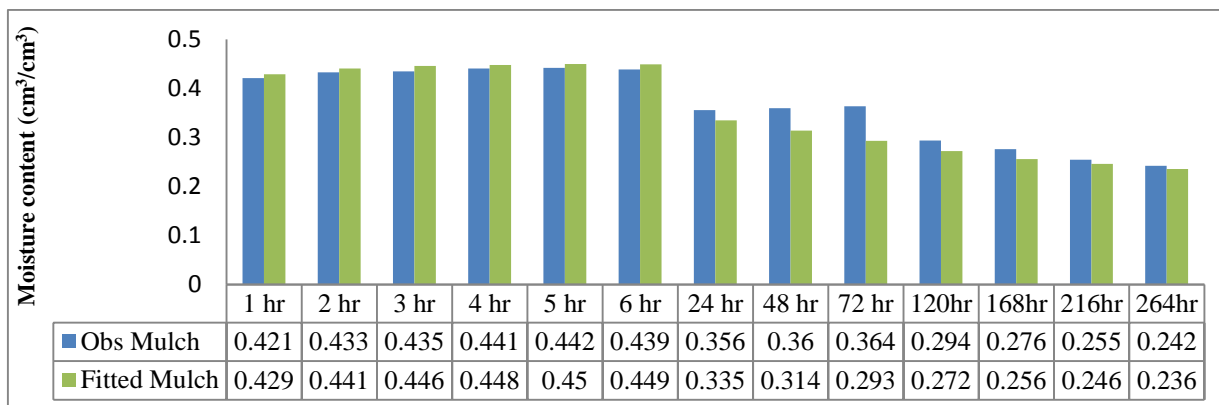


ه- تغییرات رطوبت حجمی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده دور آبیاری ۱۷ در ۲۰ سانتی‌متری نوار تیپ و در عمق ۳۰ سانتی‌متر

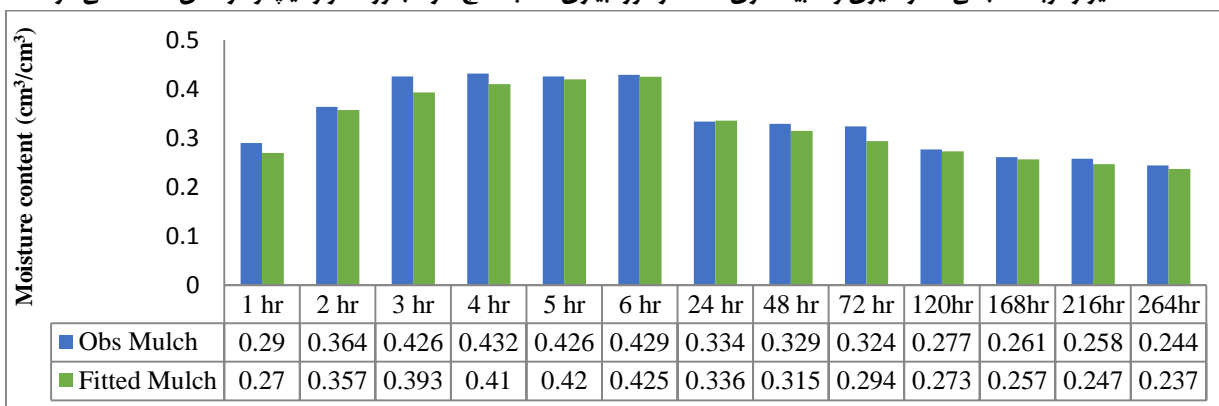
شکل ۵- مقایسه تغییرات رطوبت حجمی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دور آبیاری ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷

واقع در مجاورت نوار تیپ و ۳ ساعت پس از آبیاری و نقاط واقع در ۲۰ سانتی‌متری نوار تیپ و ۶ ساعت پس از آبیاری در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۸، مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده در دور آبیاری ۱۵ در دو حالت با و بدون مالچ در اعماق مختلف برای دو حالت ۱۰ سانتی‌متری نوار تیپ و ۲۶۴ ساعت پس از آبیاری و نیز ۲۰ سانتی‌متری نوار تیپ و ۶ ساعت پس از آبیاری نشان داده شده است. مطابق شکل‌های ۶ و ۷ و ۸ مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک توسط مدل حین آبیاری (ساعتی) و بعد از آبیاری (به فاصله ۲۴ ساعت) تا آبیاری بعدی در طول فصل زراعی دوم در پنج نوبت آبیاری در تیمارهای با و بدون مالچ بهم نزدیک است. این نتایج نشان دهنده توانایی نرم افزار HYDRUS-2D در برآورد رطوبت خاک در بازه‌های مختلف زمانی و مکانی می‌باشد.

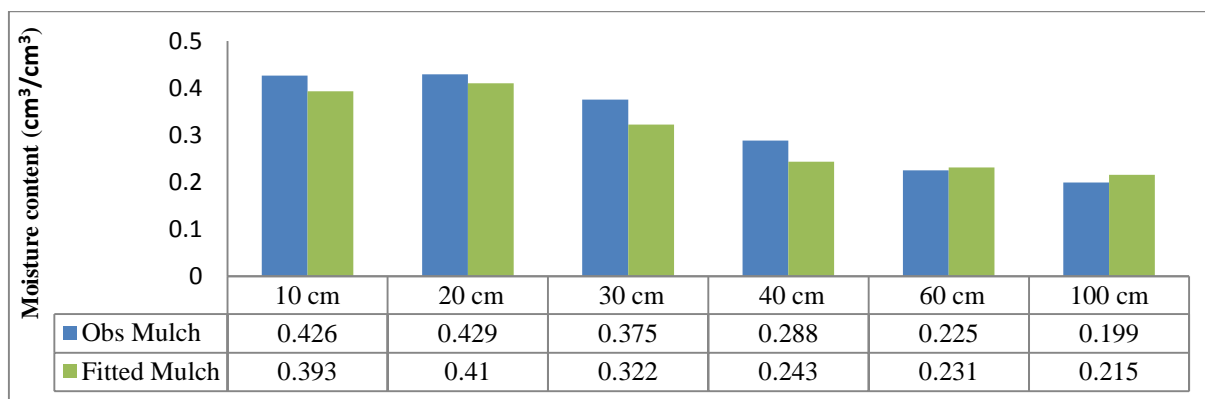
با توجه به شکل ۵، نشان داده شد که در کشت چغندرقد نشائی در سال دوم رطوبت خاک در پایان دور آبیاری ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷ با دوره‌های آبیاری متفاوت به ترتیب بعد از ۸، ۷، ۱۱، ۱۴ و ۱۱ روز به حدود ۲۲ درصد (حدود ۶۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس در عمق ریشه) می‌رسد و مدیریت آبیاری در طول سال زراعی دوم، درست انجام گرفته است. همچنین در دور آبیاری هفدهم، به علت وقوع بارندگی در روز هشتم تا یازدهم، رطوبت حجمی در خاک افزایش یافته است. در شکل ۶ تغییرات مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده (براساس ۱۸ نقطه مشاهده‌ای) در دور آبیاری ۱۵ و عمق ۱۰ سانتی‌متری با مالچ بعنوان نمونه در مجاورت نوار تیپ و ۲۰ سانتی‌متری نوار تیپ نشان داده شده است. مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در دور آبیاری ۱۵ برای عمق‌های مختلف و با مالچ به عنوان نمونه برای نقاط



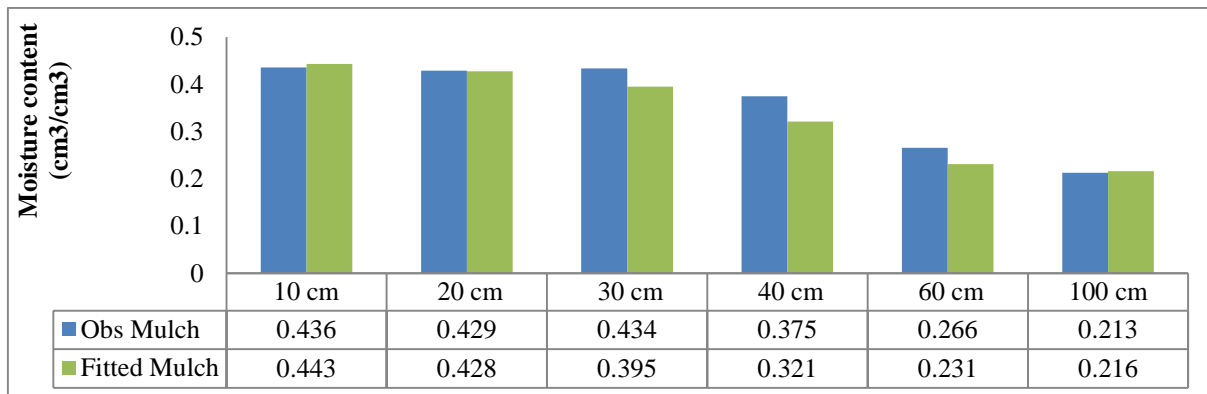
الف- مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در دور آبیاری ۱۵ با مالچ در مجاورت نوار تیپ و در عمق ۱۰ سانتی‌متر



ب- مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در دور آبیاری ۱۵ با مالچ در ۲۰ سانتی‌متری نوار تیپ و در عمق ۱۰ سانتی‌متر
 شکل ۶- مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در دور آبیاری ۱۵ و عمق ۱۰ سانتی‌متری با مالچ در مجاورت نوار تیپ (الف) و (ب) ۲۰ سانتی‌متری نوار تیپ (ب).

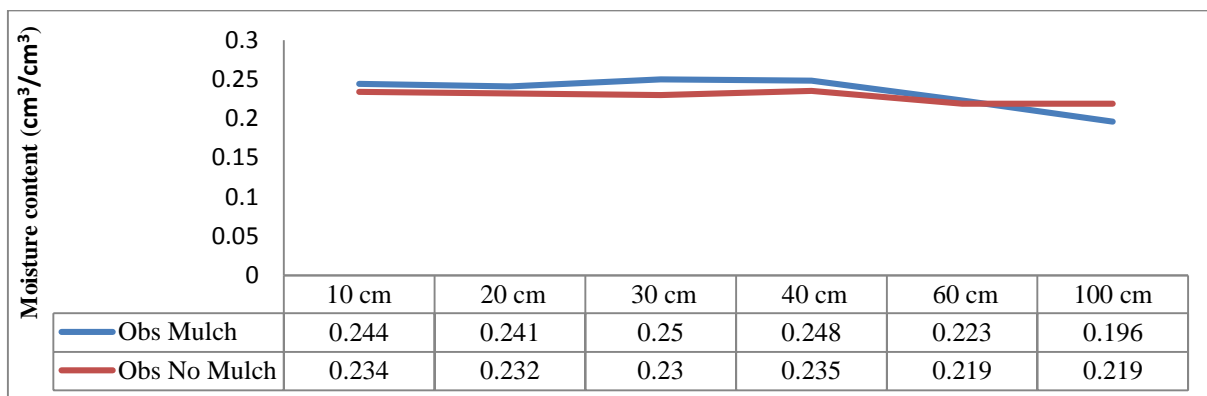


الف- مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در دور آبیاری ۱۵ با مالچ در مجاورت نوار تیپ و در اعماق مختلف ۳ ساعت پس از آبیاری

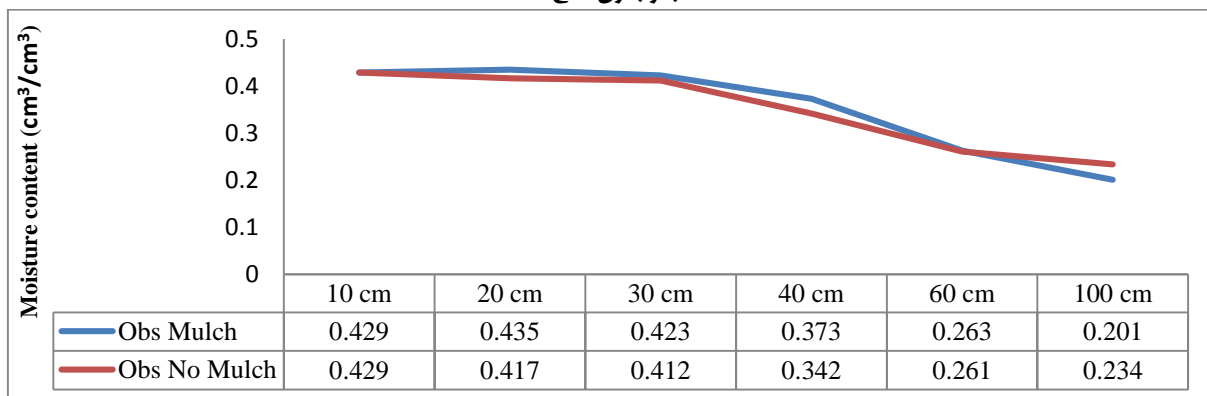


ب- مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در دور آبیاری ۱۵ با مالچ در ۱۰ سانتی‌متری نواری تیپ در اعماق مختلف خاک ۶ ساعت پس از آبیاری

شکل ۷- مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در دور آبیاری ۱۵ برای عمق‌های مختلف و با مالچ (الف) در مجاورت نواری تیپ و ۳ ساعت پس از آبیاری و (ب) ۲۰ سانتی‌متری نواری تیپ و ۶ ساعت پس از آبیاری



الف- مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری در دور آبیاری ۱۵ در ۱۰ سانتی‌متری نواری تیپ در اعماق مختلف خاک ۲۶۴ ساعت پس از آبیاری در حالت با و بدون مالچ



ب- مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده در دور آبیاری ۱۵ در ۲۰ سانتی‌متری نواری تیپ در اعماق مختلف خاک ۶ ساعت پس از آبیاری در حالت با و بدون مالچ

شکل ۸- مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در دور آبیاری ۱۵ در دو حالت با و بدون مالچ در اعماق مختلف (الف) در ۱۰ سانتی‌متری نواری تیپ ۲۶۴ ساعت پس از آبیاری و (ب) ۲۰ سانتی‌متری نواری تیپ ۶ ساعت پس از آبیاری

رطوبت حجمی خاک از عمق ۴۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر در شرایط مالچ نسبت به بدون مالچ کمتر بود که نشان دهنده این است که افزودن مالچ به خاک در حفظ رطوبت و کاهش نفوذ عمقی موثر است. این نتایج با یافته‌های محققان قبلی مطابقت دارد (Tian et al., 2022; Han et al., 2015). مقادیر آماره‌های صحت سنجی (جدول ۷) نشان می‌دهد میانگین قدرمطلق خطا (MAE) در پنج نوبت آبیاری و در دو حالت کمتر از ۰/۰۳۵، جذر متوسط مربعات خطا (RMSE) کمتر از ۰/۰۴۲، ضریب همبستگی (R) بالای ۰/۷۰ و مجموع مربعات خطا (SSQ) کمتر از ۰/۴۱ می‌باشد که با توجه به تعداد بالای مشاهدات، موید عملکرد خوب مدل می‌باشد. RMSE در بیشترین حالت ۴/۲ درصد است که این مقدار با توجه به ۳۰ نقطه مشاهده‌ای حین آبیاری قابل توجه نمی‌باشد. گرکو و همکاران (۲۰۲۳) نیز با به-دست آوردن RMSE بین ۱ تا ۴ درصد برای مدل‌سازی HYDRUS در شرایط مختلف نتیجه گرفتند از این مدل برای مدیریت آبیاری می-توان بهره جست (Grecco et al., 2023). همچنین نتایج این پژوهش با نتایج تیان و همکاران (۲۰۱۱)، فن و همکاران (۲۰۲۱)، سلیم و همکاران (۲۰۱۳)، فوگت و همکاران (۲۰۱۲)، عطایی و همکاران (۱۳۹۷) و خرمی و همکاران (۱۳۹۲) تطابق دارد.

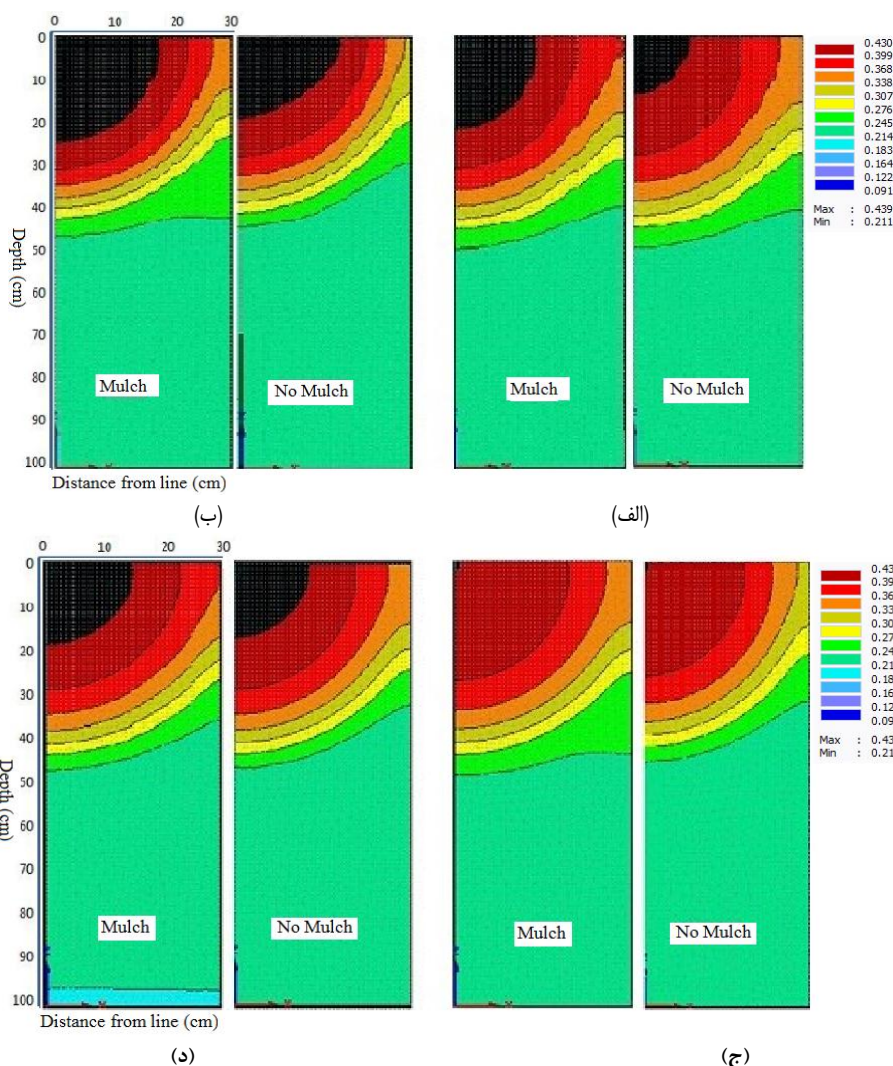
صحت‌سنجی مدل برای شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک در طول فصل زراعی سال دوم در پنج نوبت آبیاری در خاک لومی با و بدون مالچ در کشت چغندر نشایی گلدانی انجام شد. شاخصه‌های ارزیابی آماری در حالت بدون مالچ بر اساس ۳۰ نقطه مشاهده‌ای به فواصل ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر از نوار تیپ و در عمق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از نوار تیپ و در عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از نوار تیپ در جدول ۷ نشان داده شده است. به‌طور کلی نتایج نشان داد که مدل HYDRUS-2D توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی رطوبت خاک در حین آبیاری و بعد از آبیاری دارد. همچنین در شرایط مالچ‌دار به شرطی که پارامترهای هیدرولیکی خاک برای حالت مالچ‌دار هم واسنجی شود، همان کارایی را خواهد داشت. نتایج این تحقیق، با یافته‌های تیان و همکاران (۲۰۲۲) که گزارش کردند سازگاری خوب بین داده‌های مشاهده شده رطوبت در آبیاری نوار تیپ در شرایط مالچ و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-2D وجود دارد، مطابقت دارد (Tian et al., 2022). رطوبت حجمی خاک داده‌های مشاهده شده در شرایط مالچ تا عمق ۴۰ سانتی‌متری در هر پنج نوبت آبیاری نسبت به شرایط بدون مالچ بیشتر بود در حالی که

جدول ۷- معیارهای آماری محاسبه شده برای ارزیابی مدل HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی رطوبت حجمی خاک (cm^3/cm^3) در کل نیم‌رخ خاک با

و بدون مالچ					Observed & Fitted
SSQ	R	RMSE	MAE	ME	
۰/۴۱	۰/۷۰۳۹	۰/۰۴۲	۰/۰۳۵	-۰/۰۰۹	No Mulch-Obs Points 30 (5 Probs)-Irrig 13
۰/۲۷	۰/۷۳۶	۰/۰۳۱	۰/۰۲۵	-۰/۰۰۴۵	No Mulch-Obs Points 30 (5 Probs)-Irrig 14
۰/۲۳	۰/۷۸	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱۸	-۰/۰۰۲۶	No Mulch-Obs Points 30 (5 Probs)-Irrig 15
۰/۳۲	۰/۷۳	۰/۰۲۶	۰/۰۲۲	-۰/۰۰۹۸	No Mulch-Obs Points 30 (5 Probs)-Irrig 16
۰/۲۷	۰/۷۴	۰/۰۳۰	۰/۰۲۳	-۰/۰۰۴۷	No Mulch-Obs Points 30 (5 Probs)-Irrig 17
۰/۲۴	۰/۷۹۷	۰/۰۲۵	۰/۰۱۹	-۰/۰۰۴۳	Mulch-Obs Points 18 (3 Probs) -Irrig 13
۰/۱۲	۰/۸۸	۰/۰۲۷	۰/۰۲	-۰/۰۰۴۷	Mulch-Obs Points 18 (3 Probs) -Irrig 14
۰/۱۷	۰/۸۶	۰/۰۲۸	۰/۰۲	-۰/۰۰۵۳	Mulch-Obs Points 18 (3 Probs) -Irrig 15
۰/۲۶	۰/۷۵	۰/۰۳	۰/۰۲۲	-۰/۰۰۳۸	Mulch-Obs Points 18 (3 Probs) -Irrig 16
۰/۲۲	۰/۸۲	۰/۰۳۵	۰/۰۲۸	-۰/۰۰۱۴	Mulch-Obs Points 18 (3 Probs) -Irrig 17

می‌دهد که مالچ باعث افزایش حرکت رطوبت در جهت افقی (پیاز رطوبتی) در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در دوره‌های آبیاری ۱۳ تا ۱۶ شده است و تا حدودی موجب کاهش حرکت عمودی آب شده است که این مورد در دور آبیاری ۱۴ بیشتر نمایان است. تیان و همکاران به-طور مشابه بیان کردند که مالچ باعث افزایش حرکت افقی آب در خاک می‌شود (Tian et al., 2022).

در شکل ۹ الگوی توزیع رطوبت شبیه‌سازی شده با مدل HYDRUS-2D بر اساس فواصل ۰، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر در حالت مالچ ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متر در حالت بدون مالچ از نوار تیپ و در عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر از سطح زمین در آبیاری سیزدهم، چهاردهم، پانزدهم و شانزدهم در سال دوم زراعی بعد از ۶ ساعت آبیاری نشان داده شده است. مقایسه تغییرات الگوی توزیع رطوبت در کرت بدون مالچ با کرت با مالچ (شکل ۹) نشان



شکل ۹- الگوی توزیع رطوبت خاک (cm^3/cm^3) شبیه‌سازی شده با مدل HYDRUS-2D در حالت با و بدون مالچ در دوره‌های آبیاری ۱۳ الف)، ۱۴ (ب)، ۱۵ (ج) و ۱۶ (د)

نتیجه‌گیری

می‌باشد. همچنین در شرایط مالچ‌دار به شرطی که واسنجی شود، مدل همان کارایی را خواهد داشت. مقایسه الگوی توزیع رطوبت خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل هایدروس در کرت با و بدون مالچ نشان داد که مالچ باعث افزایش حرکت افقی رطوبت در عمق ۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در دوره‌های آبیاری ۱۳ تا ۱۶ شده است و تا حدودی باعث کاهش حرکت عمودی رطوبت شده است. پیشنهاد می‌شود از مدل HYDRUS-2D به دلیل توانایی شبیه‌سازی خوب حین و بعد آبیاری برای طراحی، انتخاب آرایش نوار تپ و مدیریت آبیاری نوار تپ استفاده شود.

نتایج این تحقیق نشان داد معادله پیش فرض ارائه شده توسط شرکت سازنده دستگاه پروب پروفیل PR2 در بافت لومی مزرعه مورد مطالعه، مقدار رطوبت خاک را برای رطوبت‌های بیشتر از ظرفیت زراعی، بیش‌برآورد و برای رطوبت‌های کمتر از ظرفیت زراعی، کم-برآورد می‌کند. بنابراین، بهتر است قبل از استفاده از دستگاه PR2 در مزرعه، واسنجی انجام گیرد. مقایسه رطوبت خاک شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-2D با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه حین آبیاری (به مدت ۶ ساعت) و بعد از پایان آبیاری (به فاصله هر ۲۴ ساعت) تا آبیاری بعدی نشان دهنده قدرت نرم افزار هایدروس دوبعدی در برآورد رطوبت خاک در بازه‌های مختلف زمانی و مکانی

Albayrak, M., Gunes, E. and Gulcubuk, B. 2010. The effects of irrigation methods on input use and productivities of sugarbeet in Central Anatolia, Turkey. *African Journal of Agricultural Research*. 5:188-195.

Al-Ogaidi, A. A. M., Aimrun, W., Rowshon, M. and Abdullah, A. 2016a. WPEDIS – wetting pattern estimator under drip irrigation systems. *International Conference on Agricultural and Food Engineering, (Cafei2016) 23-25 August 2016*.

Al-Ogaidi, A. A. M., Aimrun, W., Rowshon, M. and Abdullah, A. 2016b. Modelling soil wetting patterns under drip irrigation using hydrus-3D and comparison with empirical models. *International Conference on Agricultural and Food Engineering. Global Journal of Engineering and Technology Review 1(1): 17-25*.

Al-Ogaidi, A. A. M., Wayayok, A., Rowshon, M. and Abdullah, A. 2015. A modified empirical model for estimating the wetted zone dimensions under drip irrigation. *J. Teknol.* 76, 69-73.

Autovino, D., Rallo, G. and Provenzano, G. 2018. Predicting soil and plant water status dynamic in olive orchards under different irrigation systems with Hydrus-2D: Model performance and scenario analysis. *Agricultural Water Management*. 203: 225-235.

Delta-T Devices. 2008. User manual for the profile probe type PR2. Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK.

Fan, Y., Yang, Z. and Wei, H. 2021. Establishment and verification of the prediction model of soil wetting pattern size in vertical moistube irrigation. *Water Supply*. 21 (1): 331-343.

Fan, Y.W., Huang, N., Gong, J.G., Shao, X.X., Zhang, J. and Zhao, T. 2018. Simulation of soil wetting pattern of vertical moistube-irrigation. *Water*. 10 (5): 601.

Feddes, R.A., Kowalik, P. and Zarandy, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. The Netherlands: Pudoc Wageningen.

Fernandez, J.E., Alcon, F., Diaz-Espejo, A., Hernandez-Santana, V. and Cuevas, M.V. 2020. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. *Agricultural Water Management*. 237: 106074.

Grecco, K.L. and Souza, C.L. 2023. Numerical simulations to estimate wetted soil volumes in subsurface drip irrigation. *Revista Ciência Agronômica*. 54: 1-12.

Han, M., Zhao, C., Feng, G., Yan, Y. and Sheng, Y.

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه زابل با کد پژوهانه UOZ-GR-6621 انجام شد که بدینوسیله از آن تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

تدوین نژاد، م.، قربانی دشتکی، ش.، مصدقی، م.، محمدی، ج. و پناعی، م. ۱۳۹۶. اثر مدت زمان اجرای سامانه آبیاری قطره‌ای و پلی اکریل آمید بر آب‌گریزی خاک در باغ به. نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار. ۷ (۲): ۸۵-۱۰۲.

خانجانی، س. و دلیر حسن نیا، ر. ۱۳۹۳. بررسی گسترش جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای تحت منبع خطی در خاک دو لایه. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۸ (۲): ۴۱۹-۴۲۹.

خرمی، م.، علیزاده، ا. و انصاری، ح. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی حرکت آب و توزیع مجدد رطوبت در خاک در آبیاری قطره‌ای توسط مدل Hydrus 2D/3D. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷ (۴): ۶۹۲-۷۰۲.

سلامتی، ن.، دلبری، م.، عباسی، ف. و شینی دشتگل، ع. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی انتقال آب و نیترات در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-1D در آبیاری جویچه‌ای نیشکر. *مجله علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی)*. ۱۹ (۷۴): ۱۹۱-۱۷۹.

فیروزی، ع.، میرلطیفی، س. م.، دهقانی سانج، ح. و طباطبایی، س. ح. ۱۳۹۵. واسنجی دستگاه رطوبت‌سنج PR2 با استفاده از لوله PVC32 دومین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۲-۴ شهریور. دانشگاه صنعتی اصفهان.

قربانیان، م.، منجزی، م.، ص.، ابراهیمیان، ح. و لیاقت، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی مدل‌های HYDRUS-2D و SEEP/W در برآورد پیاز رطوبتی آبیاری قطره‌ای ثقلی و سطحی و زیرسطحی. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۸ (۱): ۱۷۹-۱۸۹.

عطایی، ع.، نیشابوری، م.، ر.، اکبری، م.، زارع حقی، د. و عنابی میلانی، ا. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل هایدروس دو بعدی برای تعیین توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زیرسطحی درختان پسته. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۲۳ (۴): ۵۸۱-۵۹۵.

محمدیان، ر. و صدرقاین، ح. ۱۳۹۱. تعیین مناسبترین آرایش کاشت چغندرقتد تحت شرایط آبیاری نواری-قطره‌ای. *مجله چغندرقتد*.

- almond and implications of system design. *Irrigation Science*. 30: 315–333.
- Roberts, T.L., White, S.A., Warrick, A.W. and Thompson, T.L. 2008. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 95: 669–677.
- Saxton, K.E., and Willey, P.H. 2006. The SPAW model for agricultural field and pond hydrologic simulation. In V.P. Singh and D.K. Frevert (ed.) *Watershed models*. CRC Press, Boca Raton, Fl. P. 401–435.
- Schaap, M. G., Leij, F. J., and van Genuchten, M. T. 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions, *J. Hydrol.*, 251: 163–176.
- Schwartzman, B.M. and Zur, B. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *J. Irrig. Drain. Eng.* 112: 242–253.
- Selim, T., Bouksila, F., Berndtsson, R. and Person, M. 2013. Soil Water and Salinity Distribution under Different Treatments of Drip Irrigation. *Soil Science Society of America Journal*. 77(4): 1144-1156.
- Siyal, A.A. and Skaggs, T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*. 96: 669–677.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 101: 426–437.
- Subbaiah, R. 2013. A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31(3): 225–258.
- Tian, H., Bo, L., Mao, X., Liu, X., Wang, Y. and Hu, Q. 2022. Modelling Soil Water, Salt and Heat Dynamics under Partially Mulched Conditions with Drip Irrigation, Using HYDRUS-2D. *Water*. 14: 2791.
- Van Genuchten, M. T. 1980. “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892–898.
- Wesseling, J. 1991. Meerjarige simulaties van grondwateronttrekking voor verschillende bodemprofielen, grondwatertrappen en gewassen met het model SWATRE. SC-DLO Rep. 152. DLO Winand Staring Ctr., Wageningen, the Netherlands.
- Yang, K., Wang, F., Shock, C.C., Kang, S., Huo, Z., Song, N. and Ma, D. 2017. Potato performance as influenced by the proportion of wetted soil volume and nitrogen under drip irrigation with plastic mulch. *Agricultural water management*. 179: 260–270.
2015. Evaluating the effects of mulch and irrigation amount on soil water distribution and root zone water balance using HYDRUS-2D. *Water*. 7: 2622-2640.
- Hardie, M., Ridges, J., Swarts, N. and Close, D. 2018. Drip irrigation wetting patterns and nitrate distribution: comparison between electrical resistivity (ERI), dye tracer, and 2D soil–water modelling approaches. *Irrigation science*. 36: 97-110.
- Javadzadeh, F., Khaledian, M., Navabian, M. and Shahinroksar, P. 2017. Simulations of both soil water content and salinity under tape drip irrigation with different salinity levels of water. *Geosystem Engineering*. 20 (4): 231-236.
- Kandelous, M.M. and Simunek, J. 2010a. Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*. 28: 435-444.
- Kandelous, M.M. and Simunek, J. 2010b. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 97: 1070 – 1076.
- Kandelous, M.M., Simunek, J., Van Genuchten, M.T. and Malek, K. 2011. Soil water content distributions between two emitters of a subsurface drip irrigation system. *Soil Science Society of America Journal*. 75 (2): 488-497.
- Keller, J. and Blisner, R.D. 1992. *Sprinkler and Trickle Irrigation*. Avi Book. Van No strand Reinhold, New York.
- Monthly Statistics of the National Meteorological Organization. 2018. <https://data.irimo.ir>
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12, 57–64.
- Mwale, S.S., Azam-Ali, S.N. and Sparkers, D.L. 2005. Can the PR1 capacitance probe replace the neutron probe for routine soil water measurement? *Soil Use and Management*. 21: 340–347.
- Qi, Z. and Helmers, M.J. 2010. The conversion of permittivity as measured by a PR2 capacitance probe into soil moisture values for Des Moines lobe soils in Iowa. *Soil use and management*. 26 (1): 82-92.
- Qi, Z., Feng, H., Zhao, Y., Zhang, T. and Yang, A. 2018. Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, northwest China. *Agricultural Water Management*. 201: 219-231.
- Phogat, V., Mahadevan, M., Skewes, M., and Cox, J.W. 2012. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of

root zone under drip irrigation. In 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (Vol. 1, pp. 684-688). IEEE.

270.

Yao, P., Dong, X. and Hu, A. 2011, May. Using HYDRUS-2D simulate soil water dynamic in jujube

Calibration of HYDRUS-2D Model and Simulation of Soil Moisture Pattern in Transplanting Sugar beet with and without Mulch under Tape Irrigation

K. Rahmani¹, M. Delbari^{2*}, P. Afrasiab³, F. Abbasi⁴ and V. Yosefabadi⁵

Received: Jan.30, 2023

Accepted: July.24, 2023

Abstract

This study aimed to calibrate the HYDRUS-2D model for simulating soil moisture distribution under tape irrigation in transplanting sugar beet, with and without mulching. The research was carried out during the cropping seasons 2017-2018 in 14 plots (7 plots with mulch and 7 plots without mulch) with 2 rows of 40x50 tape. To monitor soil moisture distribution, soil samples were collected from 12 plots, and access tubes of the PR2 device were installed at depths of 10, 20, 30, 40, 60, and 100 cm in two plots. The PR2 device was calibrated for a 7-day irrigation frequency and 6 irrigations. The calibration results showed that the default parameters $a_0=1.6$ and $a_1=8.4$ proposed by the PR2 manufacturing company were not appropriate for the loam-textured soil of the study area. For this research, a_0 and a_1 were modified to 1.8 and 8.3 for soil water contents higher than the field capacity and to 1.2 and 8.6 for soil water contents lower than the field capacity, respectively. The PR2 device was then used to measure soil moisture contents for five irrigations (6 hours each irrigation), during and after irrigation until the next irrigation. The results showed that the HYDRUS-2D model performs appropriately in simulating soil water content for five irrigation intervals with and without mulch application. The mean absolute error (MAE) was less than 0.035, root mean square error (RMSE) was less than 0.042, the sum of squared error (SSQ) was less than 0.41 (cm^3/cm^3), and the correlation coefficient (R) was above 0.7. If the hydraulic parameters of the soil were recalibrated for the use of mulch, the HYDRUS-2D model provided the same efficiency. Therefore, the HYDRUS-2D model is recommended for designing and managing tape irrigation due to its good simulation during and after irrigation.

Keywords: Calibration, Mathematical model, Plant residues, PR2 device, Soil water content

1- PhD. Student of irrigation and drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran

4- Professor, Agricultural Engineering and Technical Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

5- Assistant Professor, Seed Breeding and Preparation Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(*- Corresponding author Email: masoomeh.delbari@uoz.ac.ir)