

مقایسه توزیع رطوبتی خاک در آبیاری کوزه‌ای تحت فشارهای منفی و آبیاری قطره‌ای

بهنام حبیب‌زاده آذر^۱، کامران زینال‌زاده^{۲*}، سینا بشارت^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۲/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۳/۲۷

چکیده

توزیع رطوبتی خاک حاصل از آبیاری کوزه‌های رسی با فشارهای منفی مختلف و آبیاری قطره‌ای در اراضی کشاورزی دشت ارومیه بررسی گردید. این تحقیق بر روی ۴ خط آبیاری (۴ تیمار)، ۳ خط آبیاری کوزه‌ای با فشارهای ۵، ۰- و ۱۵- سانتی‌متر و ۱ خط آبیاری قطره‌ای انجام شد. رطوبت خاک در هر خط آبیاری کوزه‌ای برای ۳ کوزه (۳ تکرار) در موقعیت‌های ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متری از مرکز کوزه‌ها و ۶ عمق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری، با TDR-PR2 در یک دوره ۴ روزه اندازه‌گیری گردید. در خط آبیاری قطره‌ای، برای ۳ قطره‌چکان در شرایط مشابه اندازه‌گیری‌ها انجام شد. بافت خاک براساس سیستم USDA Clay Silt Loam طبقه‌بندی گردید. همچنین، الگوی رطوبتی خاک حاصل از کوزه‌ها و قطره‌چکان‌ها توسط مدل دوبعدی HYDRUS شبیه‌سازی شد. تحلیل آماری اختلاف معنی‌داری بین مقادیر رطوبت خاک در خطوط آبیاری نشان داد. نتایج مدل شبیه‌سازی نشان داد الگوی رطوبتی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در تطابق خوبی با یکدیگر بودند. نتایج مدل‌سازی ثابت کرد که با کاهش فشار منفی در کوزه‌ها، مدل شبیه‌سازی مقادیر کم‌تری برآورد می‌کند. مقادیر رطوبت خاک در خط فشار ۱۵- سانتی‌متر و آبیاری قطره‌ای به ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقادیر بودند. این تحقیق می‌تواند در طراحی بهینه یک روش آبیاری کوزه‌ای با فشارهای منفی در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با بحران آب مواجه‌اند موثر واقع گردد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری کوزه‌ای، آبیاری قطره‌ای، الگوی رطوبتی، شبیه‌سازی، فشار منفی، هیدروس

مقدمه

در سال‌های اخیر، خشک‌سالی‌های پیاپی از یک طرف و استفاده بی‌رویه از منابع آب موجود، موجب بروز بحران‌های زیست محیطی بسیاری مانند خشک شدن تالاب‌ها، دریاچه‌ها و نشست دشت‌ها شده است. آنچه مسلم است بخش عمده‌ای از منابع آبی در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. امروزه، استفاده از روش‌های آبیاری با راندمان بالا مورد توجه محققین قرار گرفته است. آبیاری قطره‌ای از روش‌هایی است که روز به روز در بخش کشاورزی گسترش می‌یابد. از عوامل موثر در افزایش راندمان آبیاری، کاهش تبخیر از سطح آب و خاک و جلوگیری از تلفات نفوذ عمقی در منطقه توسعه ریشه گیاه می‌باشد. این امر موجب توسعه روش‌هایی همچون آبیاری زیرسطحی شده است (Siyal and Skaggs., 2009). از گذشته، این روش‌ها به شیوه‌های مختلفی مانند آبیاری کوزه‌ای یا سفالی (بین بریج، ۲۰۰۱ و

سیال و همکاران، ۲۰۰۹) و آبیاری با لوله‌های سفالی رسی متخلخل (اشرفی و همکاران، ۲۰۰۲ و کیشنگ و همکاران، ۲۰۰۷) به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطالعه و اجرا شده است (Bainbridge., 2001; Siyale et al., 2009; Ashrafi et al., 2002; Qiaosheng et al., 2007). در سیستم‌های آبیاری زیرسطحی سنتی، آب از درون لوله‌های سوراخ شده و یا لوله‌های متخلخل دفن شده در خاک به منطقه ریشه نشت پیدا می‌کند (Siyal and Skaggs., 2009). بچلر و همکاران و بین بریج نشان دادند که روش‌های آبیاری زیرسطحی سنتی راندمان مصرف آب بالایی دارند (Batchelor et al., Bainbridge., 2001). 1996. این روش‌های آبیاری سنتی مانند آبیاری کوزه‌ای، با وجود مزایا و راندمان‌های بالا کم‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند (Siyal et al., 2009). در روش آبیاری کوزه‌ای، سرعت جریان تراوش آب از کوزه تحت تاثیر بار آبی، هدایت هیدرولیکی اشباع مواد کوزه، ضخامت دیواره کوزه، مساحت سطح کوزه، نوع خاک، نوع محصول و عوامل موثر در تبخیر و تعرق می‌باشد. برای طراحی و برنامه‌ریزی بهینه آبیاری کوزه‌ای و تعیین فواصل مناسب آن‌ها از یکدیگر به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، شناخت کافی از عوامل موثر در تراوش آب از کوزه و نحوه توزیع رطوبت در خاک ضروری است (Siyal et al., 2009). سیال و همکاران در تحقیقی اثر حجم کوزه‌ها در ابعاد

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آبیاری زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ایران

۳- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران
(Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir * نویسنده مسئول)

برای یک میزان آب کاربردی مشخص، پتانسیل تبخیر از سطح خاک تاثیر کم‌تری بر روی شکل ناحیه خیس شده دارد. استفاده از روش آبیاری کوزه‌ای در باغات و اراضی کوچک در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران از سال‌های بسیار قبل مرسوم بوده است. وسعت کوچک و نامنظم بودن شکل هندسی اراضی کشاورزی و محدودیت‌های اقتصادی، امکان توسعه روش‌های مدرن و پر هزینه آبیاری را در این مناطق محدود کرده است. توسعه و ارتقا روش آبیاری کوزه‌ای و تلفیق آن با تکنولوژی‌های ساده و کم هزینه جدید می‌تواند در بهبود مصرف آب در اراضی کشاورزی موثر باشد. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد علی‌رغم تحقیقات گسترده انجام شده بر عملکرد سیستم آبیاری قطره‌ای، تحقیقات محدودی روی عملکرد سیستم‌های سنتی زیرسطحی به‌خصوص آبیاری کوزه‌ای انجام شده است (Siyal and Skaggs., 2009). اکثر این تحقیقات در شرایط بدون اعمال فشار و یا تحت فشار مثبت با نصب مخزن تامین آب در ارتفاع بالاتر از سطح کوزه‌ها بوده است. از طرفی، محققین نشان داده‌اند که کوزه‌ها می‌توانند قابلیت خود تنظیمی داشته باشند. به عبارتی نشت آب از کوزه با مکش آب در خاک که تابعی از مقدار رطوبت خاک اطراف کوزه است، کنترل می‌شود (Stein., 1998; Cliff-Hill., 1985; Chigura., 1994; Abu-Zreig et al., 2006). با توجه به اینکه در اغلب موارد در خاک‌های زراعی، آب ذخیره شده تحت مکش می‌باشد و تغییرات این مکش با مقدار تبخیر از سطح خاک و جذب آب توسط ریشه گیاه ارتباط دارد، ما تلاش نمودیم سیستم آبیاری کوزه‌ای تحت فشار منفی برای اراضی کوچک کشاورزی طراحی نماییم. این سیستم توانایی کنترل بیش‌تر و خودکار بر تراوش آب از کوزه، منطبق با نیازهای تبخیر و تعرق گیاه بدون نیاز به سنسورهای رطوبتی را دارد. همچنین سیستم مذکور برخلاف سیستم‌های آبیاری تحت فشار، نیازی به پمپ، سیستم‌های کنترل مرکزی و انرژی ندارد و این موجب کاهش هزینه‌های اجرا و نگهداری خواهد شد. نحوه توزیع رطوبت و الگوی خیس‌شدگی هر سیستم آبیاری از مهم‌ترین پارامترها در تعیین راندمان می‌باشد. هدف اصلی این تحقیق، مطالعه الگوی رطوبتی خاک در اثر فشار منفی آب در کوزه‌ها و یک سیستم آبیاری قطره‌ای می‌باشد. در نهایت، چگونگی پیشروی جانبی و عمقی آب از کوزه‌های تراوا تحت فشار منفی و سیستم آبیاری قطره‌ای با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل HYDRUS-2D مقایسه و ارزیابی گردید.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

تحقیق حاضر، در اراضی کشاورزی دشت ارومیه با مختصات جغرافیای طول شرق $20^{\circ} 9' 45''$ و عرض شمال $37^{\circ} 42' 19''$ واقع

پیاز رطوبتی خاک را بررسی نمودند (Siyal et al., 2009). آن‌ها گزارش کردند که کوزه‌های کوچک (حجم ۱۱ لیتر) با هدایت هیدرولیکی بالا (0.14 Cm/day) تقریباً پیاز رطوبتی یکسان با کوزه‌های بزرگ (حجم ۲۰ لیتر) با هدایت هیدرولیکی کم‌تر (0.07 Cm/day) را ایجاد می‌نمایند.

مدل‌های شبیه‌سازی با توانایی برآورد هندسه و توزیع پیاز رطوبتی برای انواع شرایط جریان، بافت خاک و آرایش لوله‌ها، در طراحی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های آبیاری زیرسطحی بسیار مفید می‌باشند (Zur., 1996). تاکنون تحقیقات بسیاری روی الگوهای خیس‌شدگی خاک تحت آبیاری میکرو، سطحی و زیرسطحی انجام شده است (Bresler., 1978; Assoulin., 2002; Cote et al., 2003; Skaggs et al., 2004; Gardenas, et al., 2005; Singh., et al., 2006; Wang et al., 2006; Lazarovitch et al., 2007). کندلوس و سیمونیک نتایج صحرایی آبیاری قطره‌ای و داده‌های بدست آمده از شبیه‌سازی توسط چند مدل تجربی را در تخمین ابعاد پیاز رطوبتی مقایسه نمودند (Kandelous and Simunek., 2010). نتایج آن‌ها بیانگر شبیه‌سازی مناسب توسط مدل هایدروس بود. همچنین محققین تلاش نموده‌اند با لحاظ هندسه و خصوصیات هیدرولیکی لوله یا کوزه، جریان را از لوله‌ها و یا کوزه‌های رسی مدفون مدل‌سازی نمایند. اشرفی و همکاران نتایج شبیه‌سازی عددی الگوی رطوبتی حاصل از لوله‌های رسی را با مقادیر اندازه‌گیری شده در یک جعبه خاک با ابعاد $15 \times 124 \times 124$ سانتی‌متر مقایسه نمودند (Ashrafi et al., 2002). آن‌ها نشان دادند که در یک بافت مشخص، توسعه جبهه رطوبتی به عمق نصب و حجم آب کاربردی حساسیت بالایی دارد. همچنین، آن‌ها گزارش کردند که میزان هدایت هیدرولیکی خاک، فاکتوری تاثیرگذار در پیشروی جبهه رطوبتی می‌باشد. نایک و همکاران الگوی رطوبتی در سه نوع کوزه با مواد متفاوت را بررسی نمودند. آن‌ها گزارش کردند جبهه رطوبتی ابتدا در جهت افقی افزایش یافته و در نهایت در فاصله‌ای متوقف شده است (Naik et al., 2013).

کاظمی (۱۳۹۰) پیاز رطوبتی تشکیل یافته در سیستم آبیاری قطره‌ای را در عمق‌های مختلف با توجه به داده‌های صحرایی توسط نرم‌افزار هایدروس شبیه‌سازی کرد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، توانایی مدل را در شبیه‌سازی پیاز رطوبتی ایجاد شده توسط قطره‌چکان‌ها نشان داد.

تحقیقات متعدد بیانگر تطابق مناسب توزیع رطوبت پیش‌بینی شده در مدل HYDRUS با مقادیر اندازه‌گیری شده از کوزه‌های با فشار مثبت می‌باشد (Zhang et al., 2007; Siyal et al., 2009). سیال و اسکگز با شبیه‌سازی توسط مدل هایدروس نشان دادند افزایش فشار آب روی کوزه، ابعاد منطقه خیس‌شدگی را افزایش می‌دهد (Siyal and Skaggs., 2009). همچنین، آن‌ها گزارش کردند

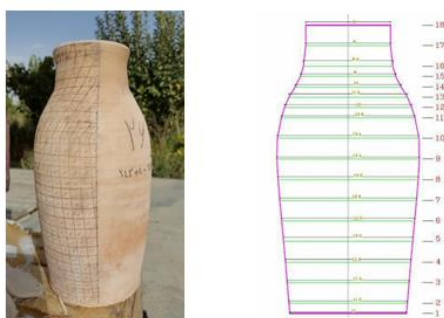
با روش بار ثابت اندازه‌گیری گردید (Abu-Zreig and Atoum., 2004). اندازه ذرات خاک مورد استفاده در ساخت کوزه‌ها با روش هیدرومتری ۳۸٪ رس، ۵۸٪ سیلت و ۴٪ ماسه بدست آمد. جرم مخصوص ظاهری کوزه‌ها با روش پارافین و تراوش روزانه از کوزه‌ها با اندازه‌گیری حجم آب خارج شده در مدت ۲۴ ساعت از کوزه تعیین شدند. همچنین، با شکستن چند کوزه در انتهای آزمایش، ضخامت جداره‌ها با کولیس بدست آمد. جدول ۱ مشخصات کوزه‌های مورد استفاده را ارائه می‌نماید.

محاسبه سطح جانبی کوزه‌ها

مساحت سطح کوزه‌ها با دوروش محاسباتی و پوشش دقیق با مربعات ۱*۱ سانتی‌متر انجام شد (شکل ۲). در روش محاسباتی با استفاده از روابط ۱ و ۲، سطح خارجی کوزه محاسبه گردید (Siyal et al., 2015):

$$a_i = 2\pi r_i (z_i - z_{i-1}) \quad (1)$$

$$A = \sum_{i=1}^n a_i \quad (2)$$



شکل ۲- نحوه محاسبه سطح جانبی کوزه‌ها

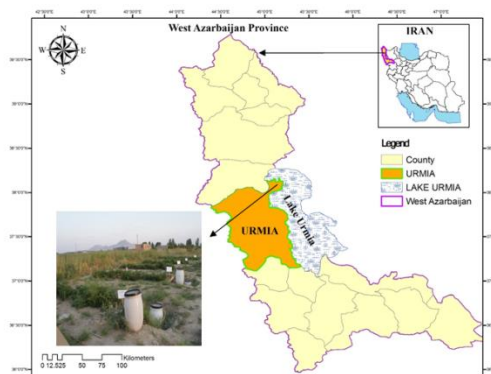
که در آن، a_i مساحت سطح بخش i ام (L^2)، r_i شعاع خارجی بخش i ام، z_i ارتفاع بخش i ام در بالای پایه کوزه، n تعداد بخش‌ها و A مساحت سطح کل کوزه (L^2) است. مساحت خارجی کوزه‌ها با اختلاف $\pm 2 \text{ cm}^2$ از دو روش محاسباتی و مجموع مربعات بدست آمد.

جدول ۱ - متوسط مشخصات کوزه‌های مورد استفاده در تحقیق

سطح جانبی	ضخامت جداره	حجم کوزه	حجم تراوش	جرم مخصوص ظاهری	هدایت هیدرولیکی اشباع جداره کوزه
(cm^2)	(cm)	(cm^3)	(cm^3/day)	(g/cm^3)	(cm/day)
۱۰۰۴	۰/۹۷	۲۰۷۳	۴۰۵	۱/۵۴	۱/۰۱

در فاصله ۳ متری از یکدیگر برای احداث ۴ خط آبیاری حفر گردید. پس از کارگذاری لوله زهکش در کف هر ترانشه، خاک مخلوط شده با

در استان آذربایجان غربی، ایران اجرا شد (شکل ۱). این دشت با متوسط بارش سالانه ۳۴۱ میلی‌متر و متوسط دمای سالانه ۹/۸ درجه سانتی‌گراد، دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک سرد می‌باشد. دشت ارومیه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع گردیده است. در سال‌های اخیر، این حوضه آبریز با کمبود شدید منابع آب و خشک شدن دریاچه ارومیه به‌عنوان دومین دریاچه بزرگ شور دنیا مواجه بوده است. تلاش‌های ملی و بین‌المللی زیادی جهت ارائه راهکارهایی برای کاهش مصرف آب کشاورزی به‌عنوان موثرترین راه کار احیای این دریاچه در حال انجام است.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در دشت ارومیه و استان آذربایجان غربی

کوزه‌های مورد آزمایش

در تحقیقات قبلی، برای افزایش یکنواختی تراوش از کوزه و همچنین کاهش هزینه‌ها، اغلب استفاده از کوزه‌های با اندازه کوچک توصیه شده است (Zhang, et al., 2007, Siyal et al., 2009). در این تحقیق نیز، تعداد ۶۰ کوزه کوچک رسی با ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر و قطر ۱۵ سانتی‌متر در یکی از کارگاه‌های محلی به‌صورت دستی ساخته شد. از میان کوزه‌های سفارش شده، ۱۸ کوزه همسان با مشخصات مشترک (هدایت هیدرولیکی اشباع جداره، وزن خشک، وزن اشباع و سطح جانبی) انتخاب گردید. هدایت هیدرولیکی اشباع جداره کوزه‌ها

آماده‌سازی تیمارهای تحقیق

به منظور انجام آزمایش، چهار ترانشه در ابعاد $10 \times 1/2 \times 1/2$ متر

طول تحقیق در این مخزن ثابت نگه می‌داشت. برخلاف سیستم‌های آبیاری رایج، سطح آب در مخزن شماره ۲ پایین‌تر از سطح تراز کوزه‌های نصب شده بود. فشارهای منفی مورد نظر در هر سیستم آبیاری (فشارهای ۰، ۵- و ۱۵- سانتی‌متر) با اختلاف ارتفاع بین تراز کارگذاری کوزه‌ها و سطح آب ثابت در مخزن شماره ۲، تنظیم گردید. شکل ۳ اجزای تشکیل دهنده سیستم آبیاری کوزه‌ای تحت فشار منفی را نشان می‌دهد. با توجه به تحت فشار منفی بودن سیستم آبیاری کوزه‌ای در این تحقیق، تمام اجزا سیستم از جمله اتصالات و درب کوزه‌ها برای جلوگیری از ورود هوا، آب‌بندی گردید. تنها راه خروج آب از هر سیستم آبیاری کوزه‌ای، میزان آب تراوش یافته از کوزه‌ها بود.

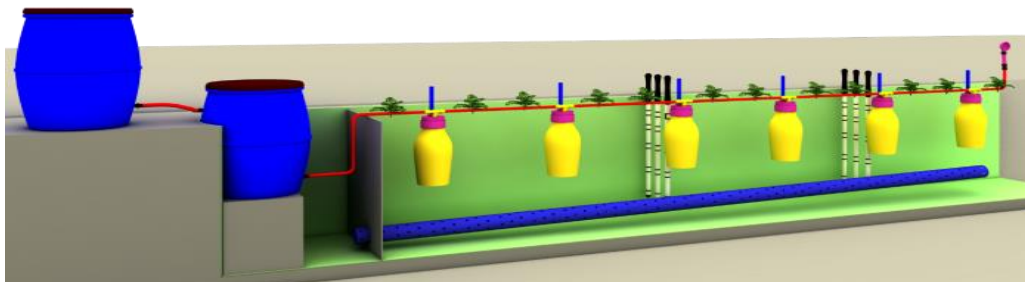
نحوه تأمین و تنظیم دبی در سیستم آبیاری قطره‌ای

در سیستم آبیاری قطره‌ای (خط ۴) برای تأمین آب و تنظیم فشار لازم از یک مخزن در ارتفاع ۳ متری نسبت به سطح تراز طراحی شده استفاده شد. دبی خروجی از قطره چکان‌ها به صورت حجمی اندازه‌گیری و طی چند نوبت در طول آزمایش کنترل گردید. شکل ۴ اجزای تشکیل دهنده سیستم آبیاری قطره‌ای و شکل ۵ نیز مراحل انجام تحقیق را نشان می‌دهند.

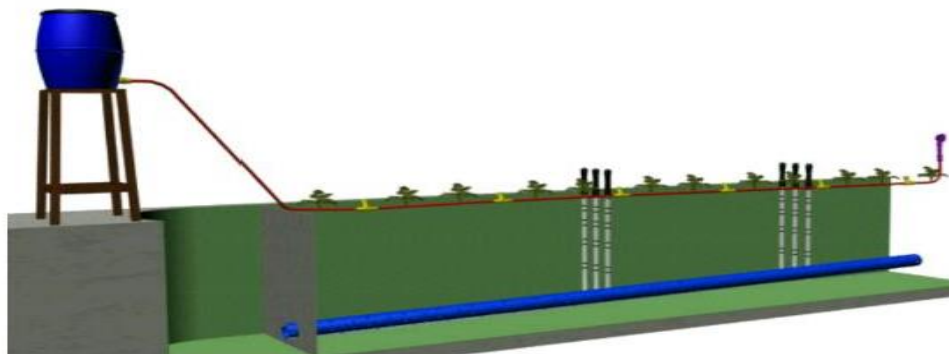
کود حیوانی (به میزان ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار)، به صورت یکنواخت به درون ترانشه‌ها برگردانده شد. در انتهای هر لوله زهکش برای جمع‌آوری آب زهکشی شده، منهولی به ابعاد $1/2 \times 1/2 \times 1$ متر ایجاد گردید. برای جلوگیری از نشست خاک در طول آزمایش و تثبیت تراز کوزه‌های کار گذاشته شده و اطمینان از حصول الگوی رطوبتی یکنواخت در هر خط آبیاری، قبل از نصب کوزه‌ها و قطره‌چکان‌ها و شروع آزمایشات، یک مرحله آبیاری غرقابی سنگین در ترانشه‌ها انجام شد. در وسط ترانشه برای هر یک از خطوط ۱، ۲ و ۳ یک سیستم آبیاری کوزه‌ای شامل دو مخزن آب، لوله انتقال آب به کوزه‌ها و ۶ کوزه رسی با فواصل یک متر و در یک خط تراز طراحی و اجرا گردید. در وسط خط ۴ نیز، یک سیستم آبیاری قطره‌ای شامل یک مخزن آب در ارتفاع ۳ متری، لوله انتقال آب و ۶ قطره‌چکان تنظیم شونده با فواصل یک متری و در یک خط تراز طراحی و اجرا گردید.

نحوه تأمین و تنظیم فشار منفی در سیستم آبیاری کوزه‌ای

در هر سیستم آبیاری کوزه‌ای (خطوط ۱، ۲ و ۳) برای تنظیم فشار آب، از دو مخزن استفاده شد (شکل ۳). مخزن شماره ۱، آب مورد نیاز مخزن شماره ۲ را تأمین می‌نمود. آب ورودی به مخزن شماره ۲ توسط یک شیر یک‌طرفه مجهز به شناور، سطح آب را در



شکل ۳- نحوه قرارگیری اجزا سیستم آبیاری کوزه‌ای تحت فشار منفی در این تحقیق



شکل ۴- اجزای تشکیل دهنده سیستم آبیاری قطره‌ای



شکل ۵- مراحل انجام تحقیق

نمونه برداری و اندازه گیری های تحقیق

مشخصات خاک مزرعه مورد تحقیق شامل چگالی ظاهری (با روش استاندارد سیلندر)، هدایت هیدرولیکی اشباع (با روش پرماترگلف) و بافت خاک (با روش هیدرومتری) در شش موقعیت

مختلف (شش تکرار) اندازه گیری گردید. بافت خاک مزرعه مورد آزمایش Clay Silt Loam (لوم سیلتی رسی) طبقه بندی شد. مقادیر میانگین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش در جدول ۲ ارایه گردیده است.

جدول ۲ - مقادیر میانگین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد آزمایش

پارامتر	ρ_b (gr/cm ³)	K_s (cm/day)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)
میزان	۱/۳۲	۵۷/۶	۳/۵۹	۵۷/۹۵	۳۸/۴۶

اندازه گیری های تحقیق، براساس طرح کاملا تصادفی در ۴ تیمار، (۳ خط آبیاری کوزه ای با فشارهای ۰، ۵-، ۱۵- سانتی متر و ۱ خط آبیاری قطره ای)، با ۳ تکرار (برای ۳ کوزه و ۳ قطرچکان) برای هر خط آبیاری اجرا شد. در هر تکرار، رطوبت خاک در فواصل ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی متری از کوزه ها و قطرچکان های مورد نظر و در هر فاصله در شش عمق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی متری، با TDR- PR2 اندازه گیری گردید. اندازه گیری ها در یک دوره ۴ روزه در شهریور ۱۳۹۵ انجام شد. از مقادیر اندازه گیری شده برای ارزیابی و مقایسه تغییرات رطوبتی در تیمارهای تحقیق استفاده گردید.

(Assoulin., 2002; Cote et al., 2003; Skaggs et al., 2004;) (Gardenas et al., 2005; Siyal., 2009). در این تحقیق نیز، برای شبیه سازی عددی چگونگی توزیع رطوبت حاصل از یک سیستم آبیاری کوزه ای تحت فشارهای منفی و مقایسه آن با سیستم آبیاری قطره ای، از مدل هایدروس دوبردی^۱ استفاده شد. همچنین توابع هدایت هیدرولیکی خاک $\theta(h)$ (منحنی رطوبتی خاک) و $K(h)$ (هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک) به ترتیب با مدل وان گنوختن (۱۹۸۰) و معلم (۱۹۷۶) با روابط ۳ و ۴ توصیف شدند. (van Genuchten., 1980; Mualem., 1976)

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha h)^n)^m} \quad (3)$$

$$K(h) = K_s S_e' \left(1 - (1 - S_e'^{1/m})^m\right)^2 \quad (4)$$

که در آن، θ_r رطوبت باقی مانده ($L^3 L^{-3}$)، θ_s رطوبت اشباع ($L^3 L^{-3}$)، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع (L^{-1})، α ، n و m (بدون

شبیه سازی پیاز رطوبتی خاک

مدل هایدروس، یک مدل پیشرفته در شبیه سازی حرکت دو و سه بعدی آب، املاح و گرما در خاک می باشد که توسط سیمونک و همکاران (۱۹۹۹) در آزمایشگاه شوری خاک امریکا ارایه شده است (Simunak et al., 1999). در سال های اخیر، این مدل در شبیه سازی الگوی رطوبتی خاک مورد توجه بسیاری از محققین بوده است

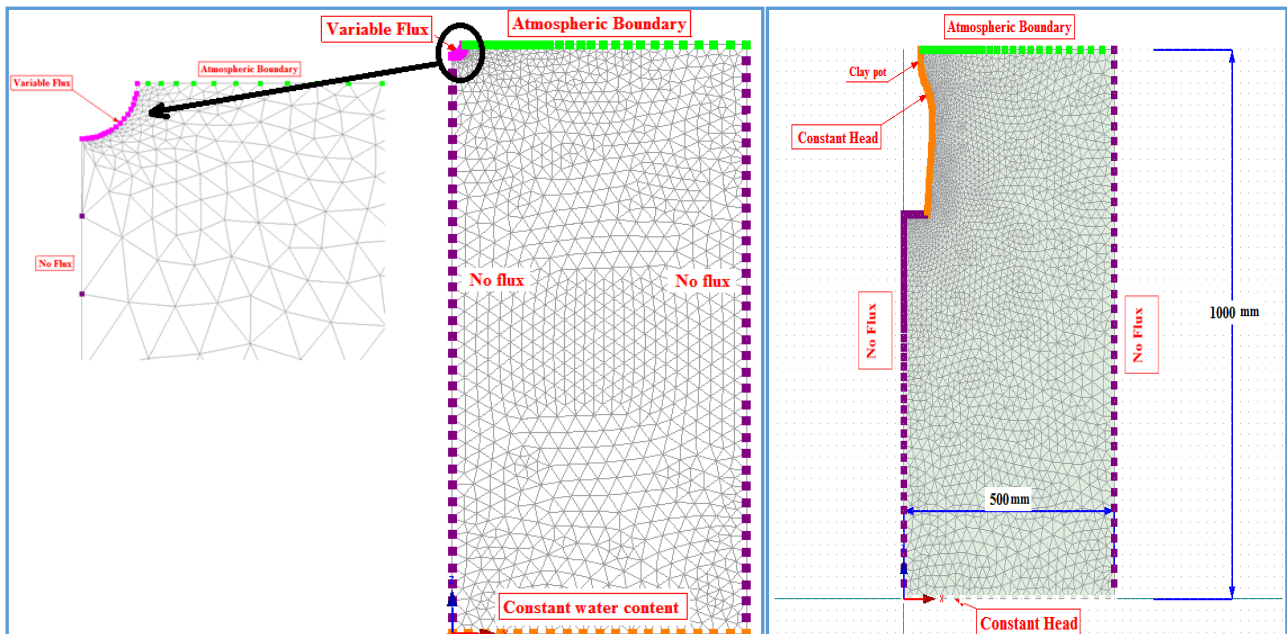
به آزمایش‌های انجام شده در رابطه با پیشروی جبهه رطوبتی (قبل از شروع فرآیند اندازه‌گیری‌ها) در نظر گرفته شد. مقدار رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در فواصل و اعماق مختلف، در ابتدای دوره شبیه‌سازی به‌عنوان شرایط اولیه رطوبتی خاک لحاظ گردید. مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در روز ۴ (پس از شروع آزمایش) در تحلیل تغییرات رطوبت در تیمارها و ارزیابی کارایی شبیه‌سازی مدل استفاده گردید. در سیستم آبیاری کوزه‌ای جداره داخلی کوزه به‌عنوان مرزی با بار آبی ثابت در فشارهای منفی ۰، -۵، -۱۵ سانتی‌متر و در سیستم قطره‌ای سطح قطره‌چکان با جریان متغیر در نظر گرفته شدند. همچنین در دو سیستم آبیاری، مرز پایین محدوده مورد نظر در عمق ۱۰۰ سانتی-متری خاک به‌عنوان مرزی با رطوبت ثابت، سطح خاک در تماس با اتمسفر و انتهای سمت راست و چپ سطح مدل شده، به‌صورت مرزهای بدون جریان برای شرایط مرزی مدل لحاظ شدند (شکل ۶). در آبیاری کوزه‌ای، دو محیط متخلخل در مدل‌سازی به‌صورت یکی، لایه‌ای با ضخامت ۱ سانتی‌متر (ضخامت دیواره) در امتداد مرز منحنی جداره کوزه و لایه دومی، محیط متخلخل خاک مزرعه در محدوده مدل‌سازی (به‌صورت خاک همگن) تعریف گردید. در هر دو سیستم، میزان تبخیر از سطح خاک حدود ۰/۹ (cm/day) در طول اندازه‌گیری‌ها برای شرط مرزی سطح خاک در نظر گرفته شد. به دلیل وجود سطح ایستابی بالا در منطقه، در طول اندازه‌گیری‌ها، رطوبت در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری تقریباً ثابت و نزدیک به اشباع بود.

بعد) پارامترهای تجربی شکل می‌باشند. m و Se (اشباع موثر) با روابط ۵ و ۶ معرفی می‌شوند.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad n > 1 \quad (5)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (6)$$

مقادیر پارامترهای θ_s ، θ_r و α با توجه به مشخصات خاک با استفاده از مدل تابع انتقالی روزتا Rosetta (اسکپ و همکاران، ۲۰۰۱) برآورد شدند (Schaap, et al., 2001). مقادیر پارامترهای مذکور برای خاک مزرعه مورد مطالعه $\theta_s = 0.42$ ، $\theta_r = 0.04$ ، $\alpha = 0.018$ و $n = 1.45$ تعیین گردید. مقدار پارامتر $I = 0.5$ در نظر گرفته شد (Mualem., 1976). برای جداره کوزه‌ها نیز با توجه به درصد ذرات تشکیل دهنده آن، $\theta_s = 0.25$ ، $\theta_r = 0.04$ و $n = 1.5$ در شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مطابق تحقیق سیال و همکاران، برای اشباع ماندن جداره کوزه در طول بازه زمانی شبیه‌سازی، در این تحقیق نیز میزان شاخص α به میزان بسیار پایین ($\alpha = 0.001$) در نظر گرفته شد (Siyal et al., 2009). مطابق تحقیق سیال و اسکگز، به دلیل تقارن پروفیل رطوبتی در خاک، تنها نصف سطح مقطع عمودی پروفیل رطوبتی حاصل از هر کوزه و قطره‌چکان شبیه‌سازی شد (شکل ۶) (Siyal and Skaggs., 2009). سطح شبیه‌سازی با ابعاد (cm) 50×100 لحاظ شد. این ابعاد با توجه



شکل ۶ - مشخصات محدوده شبیه‌سازی آبیاری کوزه‌ای (سمت راست) و قطره‌ای (سمت چپ) در این تحقیق

شده، گسترش الگوی رطوبتی در جهت‌های جانبی و عمقی صورت گرفته است (Siyal et al., 2009).

در این تحقیق، میزان رطوبت اندازه‌گیری شده، از سطح به عمق افزایش یافته است (شکل ۷). به عبارتی در تحقیق حاضر، برخلاف تحقیقات مشابه (مانند سیال و همکاران، ۲۰۰۹) رطوبت در اعماق پایین به دلیل حضور سطح ایستایی کاهش نیافته است که بیانگر تاثیر رطوبت بالای خاک در عمق ۱۰۰ سانتی‌متری بر روی رطوبت خاک فوقانی است.

آزمون معنی‌دار بودن مقادیر رطوبت خاک

بررسی شکل ۷ نشان می‌دهد که مقادیر رطوبت خاک برای تمام نقاط اندازه‌گیری شده در سیستم آبیاری قطره‌ای بیش‌تر از ۳ خط آبیاری کوزه‌ای مورد مطالعه بود. بر اساس جدول تجزیه واریانس (جدول ۳)، مقادیر رطوبتی خاک در ۴ خط آبیاری تغییرات معنی‌داری در سطح ۱ درصد داشتند.

جدول ۳- جدول تجزیه واریانس نقاط اندازه‌گیری در ۴ خط آبیاری و

عمق ۶		
میانگین مربعات X_1	درجه آزادی	منابع تغییرات
۱۹۸/۵۶۴**	۲	تکرار
۳۴۸/۶۲۹**	۳	تیمار
۲۵۲/۹۲۲**	۵	عمق
۲۸/۰۴۳**	۱۵	تیمار×عمق
۳/۹۸	۴۶	خطا

** معنی‌داری در سطح ۱٪

همچنین، نتایج جدول ۳ بیانگر تغییرات معنی‌دار مقادیر رطوبت خاک در عمق‌های مختلف در ۴ خط آبیاری در سطح ۱٪ می‌باشد. جدول تجزیه واریانس مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در سه خط آبیاری کوزه‌ای (مطابق جدول ۴) نشان می‌دهد که تغییرات فشار منفی آب در کوزه تاثیر معنی‌داری در سطح ۱ درصد بر رطوبت خاک در فواصل مختلف (۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی‌متر) داشت.

جدول ۴- جدول تجزیه واریانس برای فواصل اندازه‌گیری در ۳

خط آبیاری کوزه‌ای		
میانگین مربعات X_1	درجه آزادی	منابع تغییرات
۱۷/۸۶**	۲	تیمار
۲۳۷/۹۲**	۲	فاصله
۰/۷۱۳**	۴	تیمار×فاصله
۰/۵۵	۱۸	خطا

** معنی‌داری در سطح ۱٪

مقایسه مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده در هر تیمار با شاخص‌های CRM، GMER، RMSE و R^2 انجام گرفت (روابط ۷ تا ۱۰).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^j (O_i - P_i)^2}{j}} \quad (7)$$

$$GMER = \exp\left[\frac{1}{j} \sum_{i=1}^j \ln\left(\frac{P_i}{O_i}\right)\right] \quad (8)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^j O_i - \sum_{i=1}^j P_i}{\sum_{i=1}^j O_i} \quad (9)$$

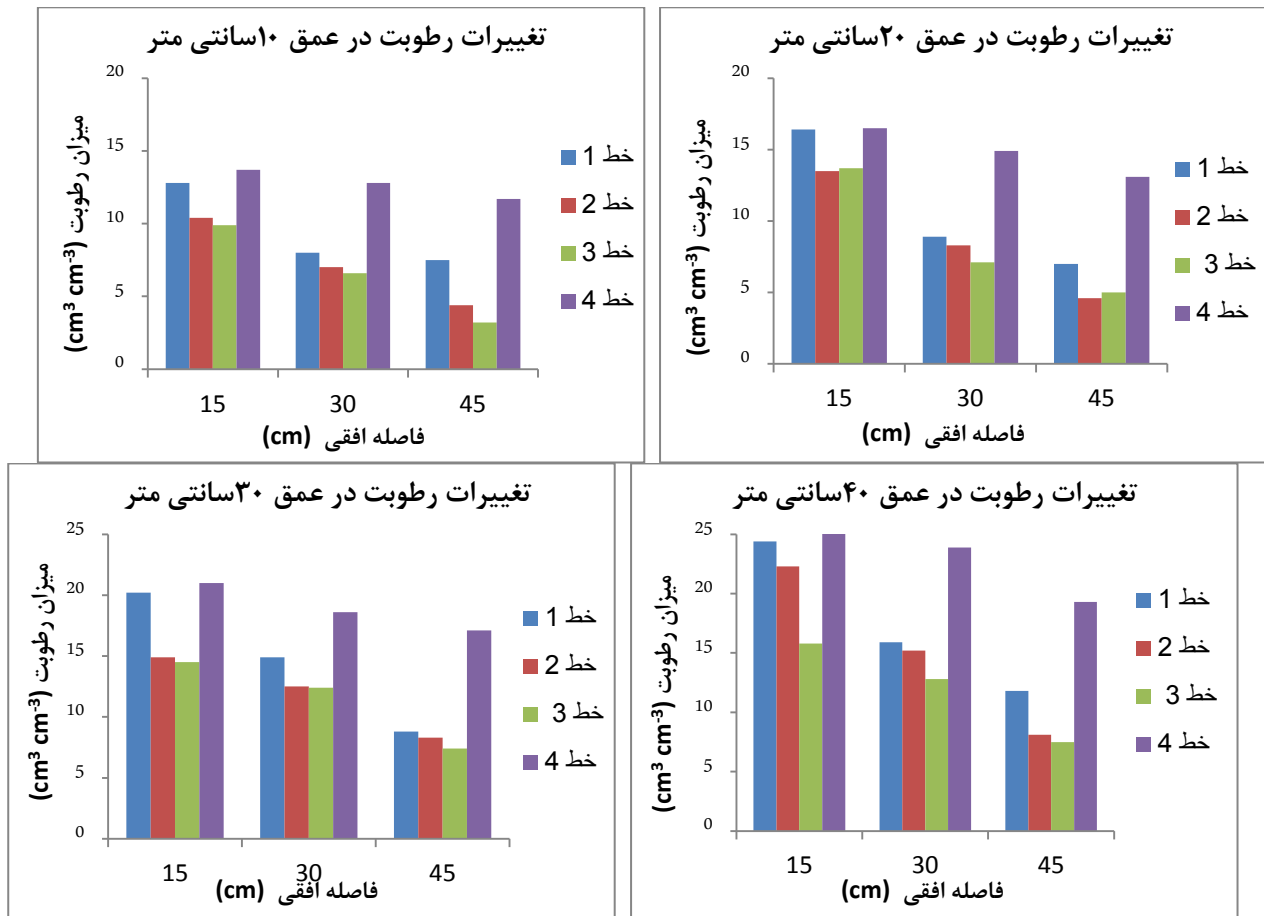
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^j (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^j (O_i - O_{ave})^2} \quad (10)$$

که در آن، j تعداد مشاهدات، O_i مقدار مشاهده‌ای i ام رطوبت خاک، O_{ave} میانگین مقادیر مشاهده‌ای P_i مقدار پیش‌بینی شده i ام رطوبت خاک می‌باشند. مقدار CRM، میزان گرایش مدل به تخمین‌های بالا یا پایین را نشان می‌دهد و هرچه به صفر نزدیک‌تر باشد، تخمین دقیق‌تر است. پارامتر GMER، بیان‌کننده وجود هماهنگی و تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و برآوردی می‌باشد و اگر مقدار آن برابر با یک باشد بیانگر مطابقت کامل بین این مقادیر است. از سویی، بیش‌تر و کم‌تر بودن این پارامتر نسبت به مقدار یک، به-ترتیب کم‌برآوردی یا بیش‌برآوردی مدل را نشان می‌دهد. ارزیابی نتایج مدل برای انتهای دوره زمانی شبیه‌سازی (روز ۴) صورت گرفت.

نتایج و بحث

نتایج این تحقیق، شامل مطالعه تغییرات الگوی رطوبتی کوزه‌ها در فشارهای منفی مختلف و مقایسه آن با نتایج حاصل از قطره-چکان‌ها و ارزیابی مدل هایدروس دوبعدی در شبیه‌سازی الگوی رطوبتی حاصل از کوزه‌ها تحت فشار منفی و قطره‌چکان‌ها ارایه می‌گردند.

شکل ۷، تغییرات رطوبت خاک را در خطوط آبیاری کوزه‌ای با فشارهای منفی مختلف (خطوط ۱، ۲ و ۳) و خط آبیاری قطره‌ای (خط ۴) در فواصل و اعماق مختلف نشان می‌دهد. بررسی این شکل بیانگر کاهش میزان رطوبت با افزایش فاصله از کوزه‌ها می‌باشد. همچنین با کاهش فشار منفی در کوزه‌ها (از صفر به ۱۵- سانتی‌متر)، پیاز رطوبتی در خاک کوچک‌تر گردید. سیال و همکاران در خصوص پیشروی جبهه رطوبتی در بازه‌های فشاری مثبت ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سانتی‌متری، نشان دادند که با افزایش میزان بار فشاری اعمال



شکل ۷- تغییرات رطوبت در عمق‌ها و فواصل مختلف از مرکز خطوط آبیاری مورد مطالعه

مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در خطوط آبیاری کوزه‌ای نسبت به آبیاری قطره‌ای از تطابق بیشتری برخوردار است. مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی رطوبت تحت آبیاری کوزه‌ای در مکش صفر نسبت به مکش ۵- و ۱۵- سانتی‌متر از تطابق بیشتری برخوردار است. مقادیر شاخص‌های RMSE، GMER و CRM برای مقادیر شبیه‌سازی شده در فشار صفر سانتی‌متر به ترتیب (cm³/cm³) ۰/۰۰۰۱۸، ۰/۰۹۸ و ۰/۰۲۴ می‌باشند.

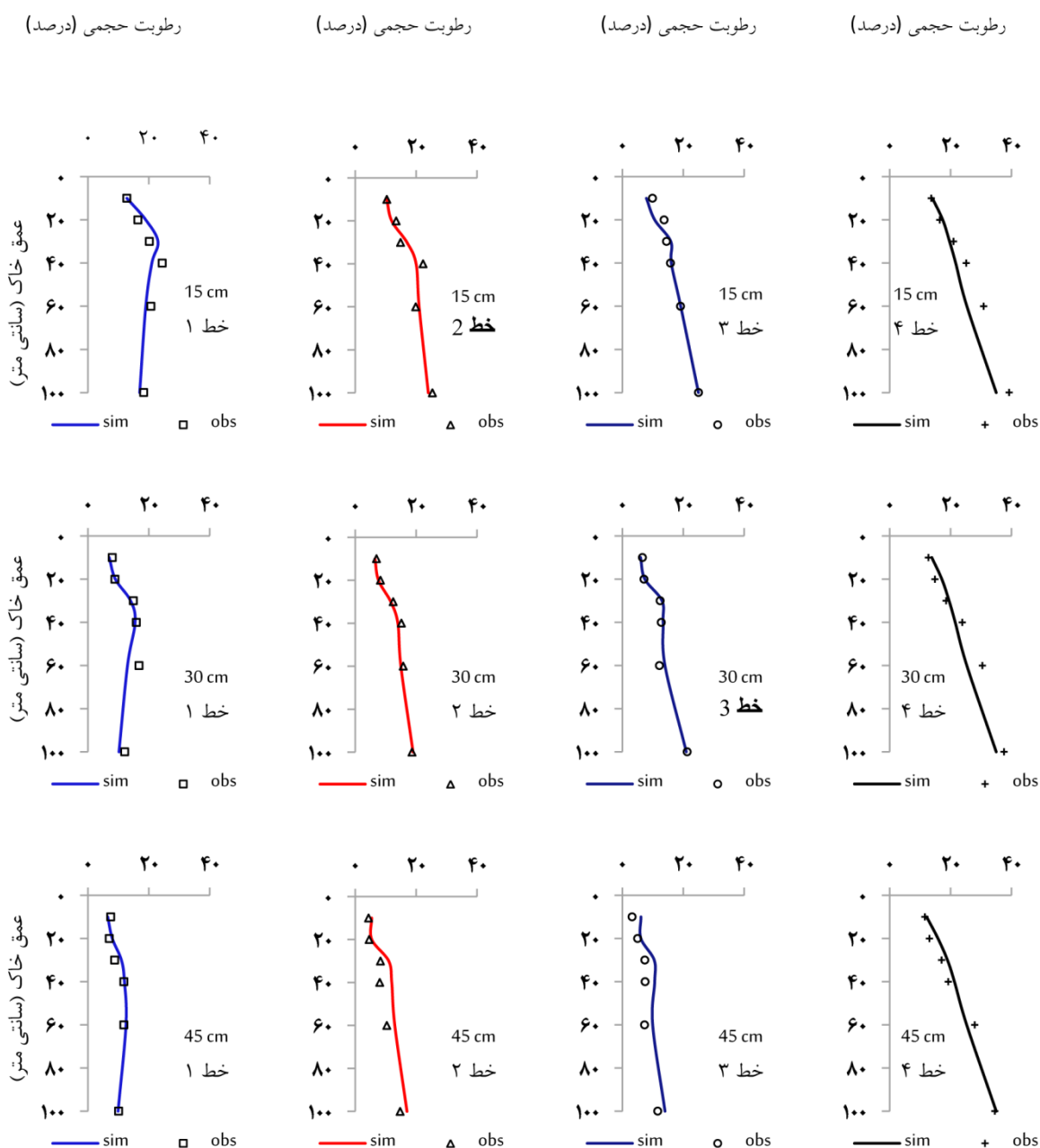
شبیه‌سازی الگوی رطوبتی حاصل در خطوط مختلف با استفاده از مدل HYDRUS/2D

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی رطوبت برای روز چهارم در

شکل ۸ ارائه شد. با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی رطوبت به صورت نظیر به نظیر با فواصل جانبی ۱۵، ۳۰ و ۴۵ سانتی-متر تحت چهار خط آبیاری مشاهده شد، الگوی رطوبتی حاصل از

جدول ۵- پارامترهای آماری مدل شبیه‌سازی شده در مکش‌های مختلف

روش آبیاری	Pressure Head (cm)	RMSE (cm ³ /cm ³)	GME R (-)	CRM (-)	R ² (-)
	۰	۰/۰۰۰۱۸	۰/۹۸	۰/۰۲۴	۰/۹۹
کوزه‌ای	-۵	۰/۰۰۰۱۷	۱/۰۵	-۰/۰۳۲	۰/۹۹
	-۱۵	۰/۰۰۰۱۸	۱/۱۰	-۰/۰۶۷	۰/۹۹
قطره‌ای		۰/۰۰۰۲۷	۰/۹۹	۰/۰۳۵	۰/۹۹

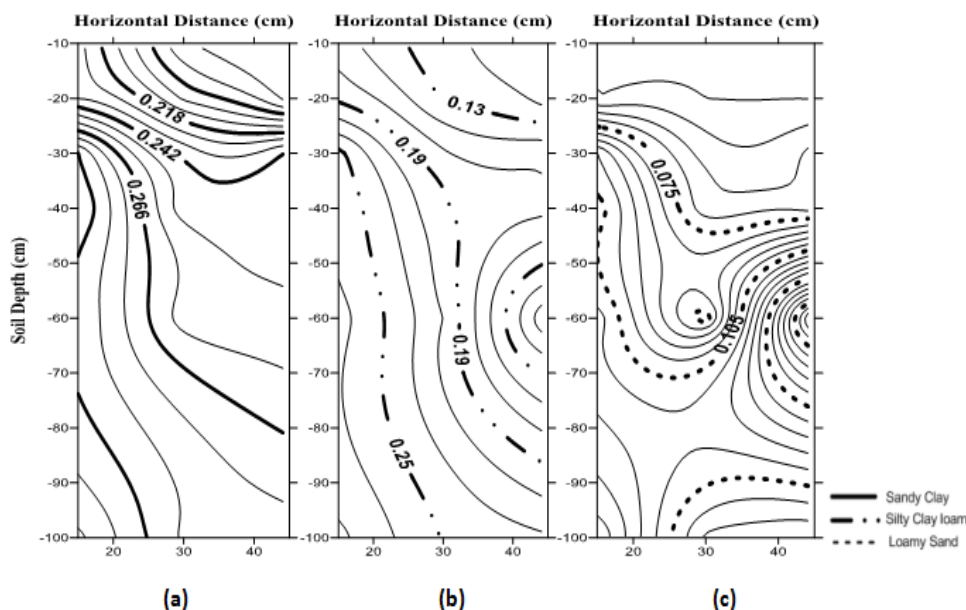


شکل ۸- مقایسه مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده روز چهارم

شبیه‌سازی پیاز رطوبتی در خاک‌های با بافت متفاوت

برای ارزیابی تاثیر بافت‌های خاک روی الگوی رطوبتی خاک حاصل از کوزه‌های تحت فشار منفی، یک مدل شبیه‌سازی برای خط آبیاری تحت فشار منفی ۵- سانتی‌متر در ۳ بافت مختلف خاک (رس- شنی، لوم‌سیلتی‌رسی و شن‌لومی) اجرا شد (شکل ۹). بررسی این شکل نشان می‌دهد که رطوبت خاک در شن‌لومی و رس‌شنی به- ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار را داشتند. بنابراین، برای خاک‌های با بافت سبک، سیستم آبیاری کوزه‌ای تحت فشار منفی توصیه نمی‌گردد.

ژانگ و همکاران و سیال و همکاران نیز تطابق خوبی بین شدت- های نفوذ اندازه‌گیری شده و محاسبه شده حاصل از فشارهای مثبت مختلف در اطراف کوزه گزارش کردند (Zhang et al., 2009; Siyal et al., 2007). جدول ۵ نشان داد که با کاهش فشار منفی در کوزه- ها، مقدار پارامتر GMER از ۰/۹۸ به ۱/۱۰ افزایش یافت و مدل به- صورت کم برآورد مقادیر رطوبت را شبیه‌سازی می‌کند.



شکل ۹- سناریو شبیه‌سازی آبیاری کوزه‌ای برای سه بافت مختلف a- رس شنی، b- لومرسی سیلتی و c- شن لومی

نتیجه‌گیری

ندارد و موجب کاهش هزینه‌های نصب و راه‌اندازی خواهد شد. سیستم آبیاری کوزه‌ای با فشار منفی یک سیستم خود تنظیم می‌باشد. برخلاف تحقیقات قبلی مانند سیال و همکاران که کوزه‌ها نیاز به پرکردن دائم آب داشته، در این مطالعه در طول دوره اندازه‌گیری‌ها، سیستم آبیاری کوزه‌ای بدون نیاز به پرکردن مداوم کوزه‌ها، به‌خوبی جریان آب از منبع به کوزه را تامین نمود (siyal et al., 2015).

منابع

کازمی، ه.، ۱۳۹۰. بررسی تجربی و عددی توزیع رطوبت خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی و زی سطحی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

Assouline, s. 2002. The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. Soil Science Society of America Journal. 66: 1630-1636.

Abu-Zreig, Atoum, F.M. 2004. Hydraulic characteristics of clay pitchers produced in Jordan. Canada Biosystems Engineering. 46.1: 15-20.

Abu-Zreig, M., Abe, M.Y., Isoda, H. 2006. The auto regulative capability of pitcher irrigation systems. Agricultural water management 85. 272-278.

Ashrafi, S.H., Gupta, A., Singh, M.B., Izumi, N., Loof, R. 2002. Simulation of infiltration from porous clay pipe in subsurface irrigation. Hydrological Sciences Journal. 47. 2: 253-263.

در روش آبیاری کوزه‌ای، تراوش آب از کوزه به‌صورت پیوسته صورت می‌گیرد و مقدار تراوش متناسب با جذب و تعرق گیاه می‌باشد. توزیع رطوبت از کوزه به نیم‌رخ خاک به خوبی می‌تواند نیاز آبی گیاه را تامین نماید. مطابق نتایج این تحقیق در روش آبیاری کوزه‌ای، مقدار رطوبت در لایه سطحی خاک نسبت به لایه‌های زیرین نیم‌رخ خاک کم‌تر بوده که باعث می‌گردد تبخیر از سطح خاک در مقایسه با آبیاری قطره‌ای کاهش یابد. در این تحقیق، مقدار تراوش تحت فشار صفر بیش‌تر از فشار ۵- و ۱۵- سانتی‌متر بود که نشان داد هر اندازه مقدار فشار منفی آب در کوزه کم‌تر باشد، تراوش بیش‌تری به خاک خواهد شد. مقایسه مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده پياز رطوبتی در خط آبیاری قطره‌ای با خطوط آبیاری کوزه‌ای بیانگر امکان‌پذیر بودن نفوذ عمقی در سامانه قطره‌ای بود ولی این نفوذ در سامانه کوزه‌ای به حداقل ممکن رسید. در ارتباط با شبیه‌سازی رطوبت نیم‌رخ خاک توسط مدل هایدروس، مدل توزیع رطوبت در سیستم آبیاری کوزه‌ای تحت مکش‌های مختلف با دقت مناسب شبیه‌سازی گردید. متوسط خطای نسبی مدل در شبیه‌سازی رطوبت در روش آبیاری کوزه‌ای و تحت مکش‌های صفر، ۵- و ۱۵- سانتی‌متر به ترتیب ۲/۵، ۳/۳ و ۶/۸ درصد به دست آمد. بنابراین می‌توان سناریوهای مختلف فشار آب اعمال شده به آب درون کوزه، فواصل و عمق کارگذاری کوزه‌ها را با دقت مناسب توسط مدل هایدروس شبیه‌سازی نمود. سیستم آبیاری کوزه‌ای تحت مکش (فشار منفی) آب نیاز به تجهیزات اعمال فشار

- Stein, T.M. 1998. Development and evaluation of design criteria for pitcher irrigation systems. Beiheft No. 66, Selbstverlag des Verbandes der Tropenlandwirte. Witzhausen e.V., Witzhausen, ISBN3-88122-971
- Schaap, M.G., Leijl, F.J., van Genuchten, M.T. 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic properties with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. 251: 163-176.
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J., Shouse, P.J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 30: 304-310.
- Singh, D.K., Rajput, T.B.S., Singh, D.K., Sikarwar, H.S., Sahoo, R.N., Ahmad, T. 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Agricultural Water Management*. 83: 130-134.
- Simunek, J., Sejna, M., van Genuchten, M.T. 1999. The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. IGWMC-TPS 53, Version 2.0, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO.
- Siyal, A.A., Skaggs, T.H. 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management*. 96: 893-904.
- Siyal, A.A., Soomro, S.A., Siyal, A.G. 2015. Performance of pitcher irrigation with saline water under high evapotranspiration rates. *Journal of Chinese soil and water conservation*. 46.1: 61-69.
- Siyal, A.A., van Genuchten, M.T.H., Skaggs, T.H. 2009. Performance of pitcher irrigation system. *Soil Science*. 174.6: 312-320.
- van Genuchten, M.T.H. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Proceedings*. 44: 892-898.
- Wang, F.X., Kang, Y., Liu, S.P. 2006. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain. *Agricultural Water Management*. 79: 248-264.
- Zhang, J., Nagasawa, K., Suzuki, S., Nishimura, T., Toko, M. 2007. Development of subsurface irrigation technology by utilizing ceramic pitcher. *Journal Arid Land Studies*. 17.3: 113-121.
- Zur, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrigation Science*. 16: 101-105.
- Bainbridge, D.A. 2001. Buried clay pot irrigation: a little known but very efficient traditional method of irrigation. *Agricultural Water Management*. 48: 79-88.
- Batchelor, C., Lovell, C., Murata, M. 1996. Simple micro irrigation techniques for improving irrigation efficiency on vegetable gardens. *Agricultural Water Management*. 32: 37-48.
- Bresler, E. 1978. Analysis of trickle irrigation with application to design problems. *Irrigation Science*. 1: 3-17.
- Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J., Thorburn, P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*. 22: 143-156.
- Chigira, P.K. 1994. Application of pitcher design in predicting pitcher performance. Unpublished MSc Thesis, UK. Cranfield Institute of Technology, Silsoe College.
- Cliff-Hill, A. 1985. Investigations of the design requirements, operation and performance of pitcher irrigation. Unpublished MSc Thesis, UK. Cranfield Institute of Technology, Silsoe College.
- Gardenas, A., Hopmans, J.W., Hanson, B.R., Simunek, J. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under microirrigation. *Agricultural Water Management*. 74: 219-242.
- Kandelous, M.M and Simunek, J. 2010. 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.
- Lazarovitch, N., Warrick, A.W., Furman, A., Simunek, J. 2007. Subsurface water distributions from drip irrigation described by moment analysis. *Vadose Zone Journal*. 6: 116-123.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 12: 513-522.
- Naike, B.S., Panda, R.K., Nayak, S.C., Sharma, S.D., Sahu, A.P. 2013. Impact of Pitcher Material and Salinity of Water Used on Flow Rate, Wetting Front Advance, Soil Humidity and Salt Distribution in Soil in Pitcher Irrigation: A Laboratory Study. *Irrigation and Drainage*. 62: 687-694.
- Qiaosheng, S., Zuoxin, L., Zhenying, W., Haijun, L. 2007. Simulation of the soil wetting shape under porous pipe sub-irrigation using dimensional analysis. *Irrigation and Drainage*. 56: 389-398.

Comparison Soil Moisture Distribution in Pot Irrigation With Negative Pressures and Drip Irrigation

B. Habibzadeh Azr¹, K. Zeinalzadeh^{2*}, S. Besharat³

Received: Jun.30, 2017

Accepted: Agus.6, 2017

Abstract:

Soil water distribution due to clay pots irrigation with various negative pressures and drip irrigation investigated in the agricultural lands of the Urmia plain. This research was performed on 4 irrigation lines (4 treatments), 3 pot irrigation lines with pressures of 0,-5 and -15 cm and one drip irrigation line. The soil moisture were measured for 3 pots (3 replications) per irrigation line at locations 15, 30 and 45 (cm) away from the pot center and the six depths of 10, 20, 30, 40, 60 and 100 (cm) with TDR-PR2 in a period of 4-day. In the drip irrigation line, the measurements were performed in the same conditions for three emitters. The soil texture was classified as Clay Silt Loam according to USDA system. Also, the soil wetting pattern of the pots and the emitters were simulated using a two-dimensional HYDRUS model. The statistical analysis showed a significant difference among the soil moisture values in the irrigation lines. The results of the simulation model showed the measured and the simulated moisture pattern were in good agreement with each other. The results of modeling demonstrated that by reducing the negative pressure in the pots, the model simulation gets underestimate. The soil water values in line -15 (cm) and drip irrigation were the lowest and the highest values, respectively. This research can be effective in the design of an optimized clay pot irrigation method with negative pressures in arid and semi-arid areas which are facing a water crisis.

Keywords: Drip irrigation, HYDRUS, Negative pressure, Pot irrigation Simulation, Wetting pattern.

1- Department of Water Engineering, University of Urmia, Iran

2- Department of Water Engineering, Urmia Lake Research Institute, University of Urmia, Iran

(*- Corresponding Author Email: k.zeinalzadeh@urmia.ac.ir)