

تأثیر آبیاری غرقابی و قطره‌ای هوشمند بر نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی با استفاده از مدل فیزیکی

حمیدرضا ناصری^۱، فاطمه عسگری^۲، کمال خدایی^۳ و فرشاد علیجانی^۴

۱. استاد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد آب‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳. استادیار، پژوهشکده علوم پایه جهاد دانشگاهی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۴. استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۲/۲۴

چکیده

از آنجایی که سالانه سهمی معادل ۷۰ تا ۹۰ درصد از منابع آب قابل برداشت زیرزمینی به بخش کشاورزی اختصاص می‌یابد، با به کارگیری روش‌های مناسب آبیاری، علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب می‌توان مانع برهم زدن تعادل آبخوان شد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر دو روش متفاوت آبیاری بر تغییرات تراز سطح ایستابی انجام شد. به این منظور دو مدل آزمایشگاهی با ارتفاع دو متر و سطح مقطع ۴۰۰۰ سانتی‌متر مربع ساخته شد. پس از انتخاب گیاه (کاهو) در یک مدل از روش غرقابی و در مدل دیگر از روش قطره‌ای هوشمند برای آبیاری استفاده شد. آبیاری قطره‌ای هوشمند در این پژوهش به کمک شیر برقی و دستگاه قرائت‌گر انجام شد، بدین طریق که با قرار گرفتن خاک در شرایط کمتر از ۳۵ درصد اشباع، آبیاری شروع و بیشتر از ۸۰ درصد به صورت خودکار قطع شد. میزان نفوذ آب در این مدل‌ها نیز با استفاده از سنسورهای رطوبت پایش شد و در نرم‌افزار HYDRUS/2D شبیه‌سازی شد. در طول یک دوره چهار ماهه تراز سطح آب زیرزمینی در مدل دارای سیستم آبیاری قطره‌ای هوشمند ۱۰ سانتی‌متر بالاتر و میزان مصرف آب ۶۸ درصد کمتر از سیستم غرقابی، اندازه‌گیری شد. این نتایج نشان داد که با جایگزین کردن آبیاری قطره‌ای هوشمند به جای غرقابی می‌توان محصولات با همان کیفیت قبلی ولی استفاده‌ی بسیار کمتر آب را تولید کرد که از نزولی شدن شیب هیدروگراف آبخوان‌ها نیز جلوگیری می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آبیاری غرقابی، آبیاری قطره‌ای هوشمند، تراز سطح آب زیرزمینی، مدل فیزیکی.

مقدمه

سازمان خواروبار جهانی (FAO, 2012) افزایش ۳۵ درصدی جمعیت جهان تا سال ۲۰۳۰ را پیش‌بینی کرده است. رشد سریع جمعیت جهان، تقاضا برای مواد غذایی را افزایش داده است که کاهش امنیت غذایی را در پی خواهد داشت. به همین دلیل بقای حیات بشر سازمان خواروبار جهانی (FAO, 2012) افزایش ۳۵ درصدی جمعیت جهان تا سال ۲۰۳۰ را پیش‌بینی کرده است. رشد سریع جمعیت جهان، تقاضا برای مواد غذایی را افزایش داده است که کاهش امنیت غذایی را در پی خواهد داشت. به همین دلیل بقای حیات بشر

* نویسنده مرتبط: khodaieik@yahoo.com

نیازمند افزایش تولید در بخش کشاورزی خواهد بود. این در حالی است که تولید محصولات کشاورزی به طور فزاینده با محدودیت‌های زیست محیطی مواجه است. یکی از مهمترین محدودیت‌ها در راستای افزایش تولیدات کشاورزی، بحران جهانی آب می‌باشد (Greenland et al., 2018). در کشورهای خشک و نیمه خشک از یک طرف

al., 2018) با دقت بالا شبیه‌سازی شده است. در این پژوهش تأثیر آبیاری غرقابی و قطره‌ای هوشمند با استفاده از مدل فیزیکی بر نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت.

روش مطالعه

با توجه به هدف این پژوهش و این‌که انجام آزمایش در مزرعه نیازمند دستگاه‌ها و تجهیزات مختلف، صرف وقت و هزینه می‌باشد از مدل فیزیکی استفاده شده است. به همین منظور دو محفظه یکسان با ارتفاع دو متر و سطح مقطع ۴۰۰۰ سانتی‌متر مربع از جنس فلز ساخته و داخل هر دو محفظه با ضد زنگ پوشیده شد. برای جلوگیری از سرریز آب در حین آبیاری، پنج سانتی‌متر بالای محفظه‌ها خالی در نظر گرفته شد. به همین دلیل برای پایش رطوبت در عمق‌های ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ سانتی‌متری خاک، پورت‌های مخصوص برای وارد کردن سنسورهای رطوبت، در عمق‌های ۳۵، ۵۵، ۷۵ و ۹۵ سانتی‌متری و همچنین دو عدد خروجی در پایین محفظه‌ها تعبیه شد (شکل ۱-الف).

برای پر کردن محفظه‌ها با خاک مناسب بایستی سه نوع خاک برای به‌وجود آمدن حداقل لایه‌بندی در نظر گرفته می‌شد. لایه‌ی زیرین بایستی برای تشکیل آبخوان مناسب باشد، به همین دلیل ماسه اوتاوا به عنوان بهترین گزینه برای این لایه و خاکی متشکل از ماسه و رس برای لایه میانی انتخاب شد. برای لایه‌ی بالایی به منظور فراهم کردن شرایط مناسب برای کشت گیاه مورد نظر، خاک باغچه در نظر گرفته شد. برای نشست این لایه از خاک، به هر محفظه پنج لیتر آب وارد شد و خروجی پایین محفظه‌ها برای تخلیه آب جمع شده باز گذاشته شد. پس از ۴۸ ساعت آزمایش‌های نفوذ آغاز شد (جدول ۱). این آزمایش‌ها با کمک دو عدد سنسور رطوبت و با هدف تعیین میزان نفوذ آب در این خاک‌ها انجام شد. به این صورت که می‌بایست با وارد کردن حجم‌های متفاوتی از آب و قرار دادن هر دو سنسور در یک محفظه، زمان رسیدن آب به عمق مورد نظر و میزان افزایش رطوبت مشخص شود. سنسور مورد استفاده در این پژوهش ECH2O EC-5 بود که پس از کالیبره کردن ضریب تعیین ۰/۹۹ به دست آمد.

عدم تغذیه مناسب آب زیرزمینی و افزایش تقاضای آب، و از طرف دیگر عدم دانش کافی از مؤلفه‌های بیلان آب جهت مدیریت بهینه مصرف، شرایط بحرانی را بر این منابع آبی ایجاد کرده است. در چنین مناطقی استفاده بیش از حد از آب زیرزمینی نگرانی‌هایی را در مورد پایین افتادن سطح ایستابی به وجود آورده است (Kirby et al., 2015).

با توجه به این‌که شیب هیدروگراف معرف اغلب آبخوان‌های ایران نزولی می‌باشد، تعادل بخشی آبخوان‌ها اصلی‌ترین سیاستی است که امروزه در وزارت نیرو دنبال می‌شود. در برنامه تعادل بخشی آبخوان، محاسبه بیلان مهم‌ترین نیاز می‌باشد که باید میزان آب ورودی و خروجی از سیستم محاسبه و موازنه شوند (ولی‌زاده، ۱۳۸۶). یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مجهول در بیلان، آب برگشتی کشاورزی است. زیرا بخش کشاورزی، بزرگترین مصرف‌کننده‌ی منابع آب شیرین است و سالانه سهمی معادل ۷۰ تا ۹۰ درصد از منابع آب قابل برداشت را به خود اختصاص می‌دهد (Steduto et al., 2017). با به‌کارگیری روش‌های مناسب آبیاری می‌توان علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف آب و کاهش برداشت آب‌های زیرزمینی، مانع برهم زدن تعادل آبخوان شد.

پژوهش‌های زیادی در رابطه با استفاده از آبیاری قطره‌ای به منظور کاهش مصرف آب و افزایش راندمان تولید محصولات (Sanchis-Ibor et al., 2015; Doaxi et al., 2016)؛ (dos Santos et al., 2016; Schmidt et al., 2018) و همچنین کاهش تبخیر از سطح خاک (Elmaloglou and Diamantopolous, 2009; Espadafor et al., 2018) برای گیاهان مختلف (Zhang et al., 2017; Singh et al., 2017) انجام شده است ولی این‌که استفاده از روش‌های مختلف آبیاری چه میزان می‌تواند بر نوسانات تراز سطح آب زیرزمینی تأثیرگذار باشد تا کنون در ایران بررسی نشده است. در برخی از پژوهش‌ها نیز با استفاده از HYDRUS/2D سیستم آبیاری قطره‌ای (Skaggs et al., 2004; Kandelous and Simunek, 2010; Mohammad et al., 2014; Mguidiche et al., 2017; Honari et al., 2015)؛ و نفوذ آب در خاک (Ma et al., 2010; Akbar et al., 2015; Szymkiewicz et

جدول ۱. مشخصات آزمایش‌های نفوذ

روز	شماره آزمایش	محفظه	شماره پورت	میزان آب
اول	۱	۲	۲ و ۱	۱۷ لیتر در زمان صفر ۸/۲ لیتر بعد از ۲۵ دقیقه ۴ لیتر بعد از ۴۴ دقیقه
دوم	۲	۱	۳ و ۱	۶/۴۵ لیتر در زمان صفر ۷/۶۵ لیتر بعد از ۱۵ دقیقه
پنجم	۳	۲	۳ و ۱	۱۳/۲ لیتر در زمان صفر
ششم	۴	۱	۲ و ۱	۵/۸ لیتر در زمان صفر
هفتم	۵	۲	۴ و ۱	۶/۱ لیتر در زمان صفر
هشتم	۶	۱	۴ و ۱	۹/۶ لیتر در زمان صفر
سیزدهم	۷	۲	۳ و ۲	۲۱/۵ لیتر در زمان صفر
چهاردهم	۸	۱	۳ و ۲	۷/۸ لیتر در زمان صفر



شکل ۱. الف) محفظه‌های ۱ و ۲ ساخته شده برای مدل فیزیکی، ب) نشاء کاهو بعد از کاشت بر روی محفظه‌ها

هوشمند بود از شیر برقی، سنسور رطوبت، شلنگ‌های آبیاری و منبع آب استفاده شد. ابتدا در سه سانتی‌متری زیر سطح خاک شلنگ‌های آبیاری قرار داده شد که یک سمت آن بسته و سمت دیگر به شیر برقی متصل بود. همچنین این محفظه نیاز به منبعی داشت که در صورت کاهش رطوبت و روشن شدن شیر برقی آب مورد نیاز را تأمین کند که آب داخل این منبع از پورت خروجی در پایین همان محفظه تأمین می‌شود. بعد از پر کردن این منبع با آب و قرار دادن آن در ارتفاع زیاد برای تأمین فشار مورد نیاز، یک دیوش برای جلوگیری از تبخیر آب داخل منبع و یک شیر یک‌طرفه برای جلوگیری از گندیده شدن آب استفاده شد. برای اولین آبیاری میزان ۱۰ لیتر آب داخل این منبع ریخته شد و برای

در این پژوهش به گیاهی نیاز بود که دارای عمق ریشه کم و نیاز آبی متوسط تا زیاد باشد. با توجه به این که زمان کاشت هم‌زمان با شروع فصل سرد شد می‌بایست به سرما نیز مقاوم می‌بود. از این رو کاهو به عنوان گیاه مناسب برای کاشت انتخاب شد. با رعایت فاصله هشت عدد نشاء کاهو در هر کدام از محفظه‌ها کاشته شد (شکل ۱-ب). سیستم آبیاری غرقابی به این صورت طراحی شد که به میزان آب مورد نیاز گیاه (هر چهار روز یک‌بار) از پورت خروجی که در پایین محفظه قرار گرفته است آب برداشت و به بالای همان محفظه ریخته شود. در این صورت بدون وارد کردن آب اضافه می‌توان مقدار کاهش سطح ایستابی به دلیل هدر رفت آب را مشخص کرد. در محفظه دیگر که آبیاری قطره‌ای

بعد با شیب بسیار ملایم شروع به افزایش رطوبت کرده است (شکل ۳-ب). نتایج آزمایش سوم نشان می‌دهد که رطوبت در پورت اول از ابتدا روند افزایشی داشته و در دقیقه ۳۰ به بالاترین مقدار خود رسیده و پس از آن روند کاهشی پیدا کرده است. پورت سوم از دقیقه ۶۰ با شیب ملایمی شروع به افزایش رطوبت کرده است و پس از ۲۳۰ دقیقه که به بالاترین مقدار خود در این آزمایش می‌رسد شروع به کاهش رطوبت کرده است (شکل ۳-الف). در آزمایش چهارم به دلیل کمتر بودن حجم آب وارد شده، پیک افزایش رطوبت نیز کمتر بوده است (شکل ۲-ب). نتایج آزمایش پنجم نشان می‌دهد که بعد از وارد کردن شش لیتر آب، رطوبت در پورت اول از ابتدای آزمایش و پورت چهارم بعد از گذشت ۲۸۰ دقیقه افزایش پیدا کرد (شکل ۴-الف). نتایج حاصل از آزمایش ششم نشان می‌دهد که رطوبت پورت اول به سرعت پس از وارد کردن آب افزایش یافته و پس از ۷۰ دقیقه شروع به از دست دادن رطوبت کرد. پورت چهارم افزایش رطوبت بسیار کمی در پایان این آزمایش نشان داد (شکل ۴-ب). به دلیل گذشت پنج روز از آزمایش قبلی و خشک شدن خاک سطحی در آزمایش هفتم آب بیشتری وارد محفظه شد و در نتیجه پیک ناگهانی در افزایش رطوبت نشان داده شده است (شکل ۵-الف). در آزمایش نهم نیز در هر دو پورت دوم و سوم با فاصله ۶۰ دقیقه افزایش رطوبت دیده شد (شکل ۵-ب).

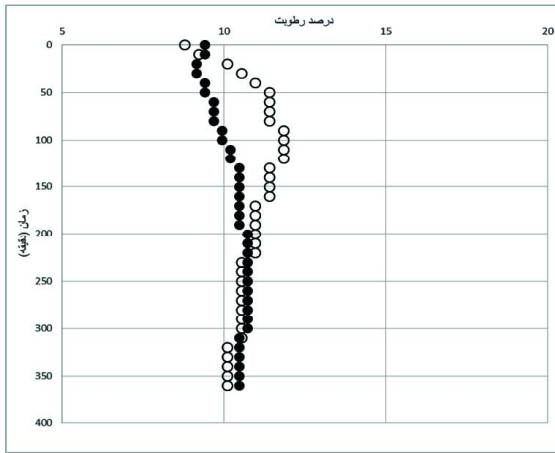
بعد از ساخت مدل فیزیکی و پر کردن آن‌ها با خاک مناسب، یک هفته پس از کاشت گیاه سیستم آبیاری قطره‌ای راه‌اندازی شد. در اولین روز فشار هیدرولیکی در هر دو مدل برابر با ۶۲ سانتی‌متر بوده است. همان‌طور که پیش از این توضیح داده شد ابتدا به هر کدام از مدل‌ها ۱۰ لیتر آب اضافه شد و پس از آن آب مورد نیاز از آبخوان همان مدل تأمین شد. با توجه به نیاز آبی گیاه در هر کدام از مدل‌ها با روش مشخص شده آبیاری انجام شد (مدل شماره ۱ آبیاری قطره‌ای هوشمند و مدل شماره ۲ آبیاری غرقایی). در آخرین روز آزمایش فشار هیدرولیکی در مدل ۱ به دلیل کاهش تبخیر از سطح خاک، ۲/۵ سانتی‌متر افزایش و مدل ۲، ۷/۵ سانتی‌متر کاهش داشته است. در شکل ۶ تغییرات فشار هیدرولیکی و در شکل ۷ مراحل رشد گیاه در طول آزمایش اصلی نشان داده شده است.

یکسان کردن شرایط، ۱۰ لیتر آب نیز به محفظه ۲ (با سیستم آبیاری غرقایی) در طی چند دوره آبیاری، داده شد. کار شیر برقی در سیستم آبیاری قطره‌ای هوشمند به این صورت است که بر اساس رطوبتی که دستگاه متصل به سنسور نشان می‌دهد، اگر خاک به ۳۰ درصد اشباع برسد، شیر برقی روشن شده و با رسیدن به ۸۰ درصد اشباع خاموش می‌شود. با این کار از هدر رفتن آب جلوگیری می‌شود.

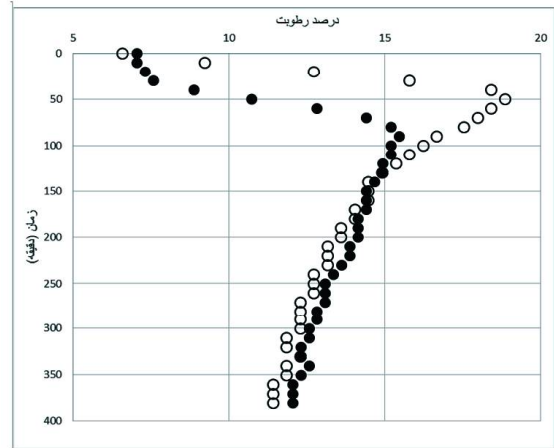
به منظور شبیه‌سازی نفوذ، در محیط هایدروس (Hydrus/2D) یک مدل مشابه با محفظه فیزیکی ساخته شده با طول یک متر و ارتفاع دو متر تعریف و پس از آن طبق لایه‌بندی مدل فیزیکی، این مدل نیز لایه‌بندی شد. شرایط اولیه شامل رطوبت اولیه و تعیین مرزها می‌باشد که درصد رطوبت طبق آنچه که قبل از شروع اولین آزمایش برای هر کدام از محفظه‌ها قرائت شده بود، به مدل وارد شد. تمامی مرزها به جز سطح که محل ورود آب به محفظه می‌باشد، بدون جریان می‌باشند. به دلیل این‌که در آزمایش‌های انجام شده حجم آب ورودی به محفظه‌ها یکسان نیست می‌بایست دو مدل مفهومی با همین شرایط تعریف شود که تنها اختلاف آن‌ها در حجم آب ورودی باشد. همچنین با توجه به این‌که آزمایش‌ها در هر محفظه با تاخیر یک یا چند روزه انجام شده بایستی زمان شروع هر آزمایش محاسبه و به مدل مورد نظر وارد شود. هر آزمایش با توجه به طول زمان اندازه‌گیری رطوبت برای ۳۰۰ تا ۴۲۰ دقیقه بعد از شروع با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه شبیه‌سازی شد.

بحث

نتایج آزمایش اول از سری آزمایش‌های نفوذ نشان می‌دهد که پورت اول در ۵۰ دقیقه اول حالت افزایشی و بعد از آن تا پایان زمان آزمایش حالت کاهشی داشته است. پورت دوم بعد از ۲۰ دقیقه شروع به افزایش رطوبت کرده است که در دقیقه ۹۰ به بالاترین مقدار خود در این آزمایش می‌رسد (شکل ۲-الف). در آزمایش دوم نیز رطوبت در پورت اول از ابتدای آزمایش شروع به افزایش کرد و در دقیقه ۴۰ با حدود هشت درصد افزایش به اوج خود رسید. همچنین از دقیقه ۵۰ به بعد سیر کاهشی پیدا کرد و تا پایان آزمایش هفت درصد رطوبت خود را از دست داد. پورت سوم از دقیقه ۹۰ به

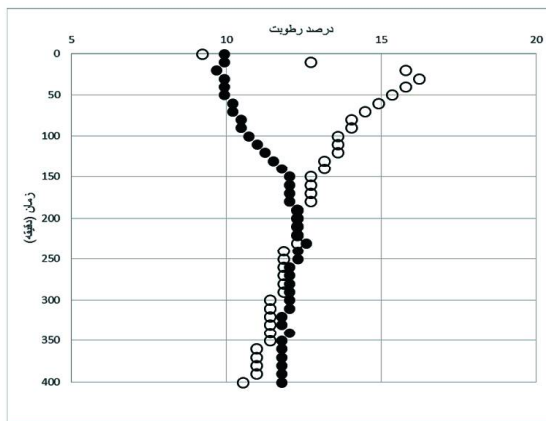


(ب)

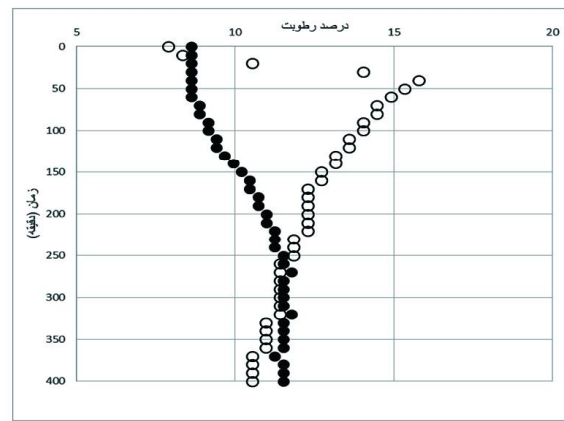


(الف)

شکل ۲. نمودار تغییرات رطوبت در پورت‌های اول (دایره تو خالی) و دوم (دایره تو پر). (الف) محفظه ۱، (ب) محفظه ۲

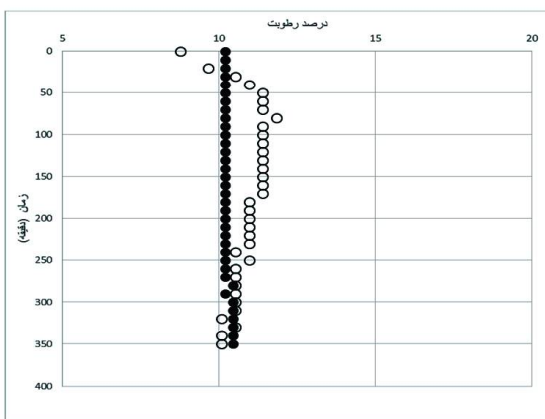


(ب)

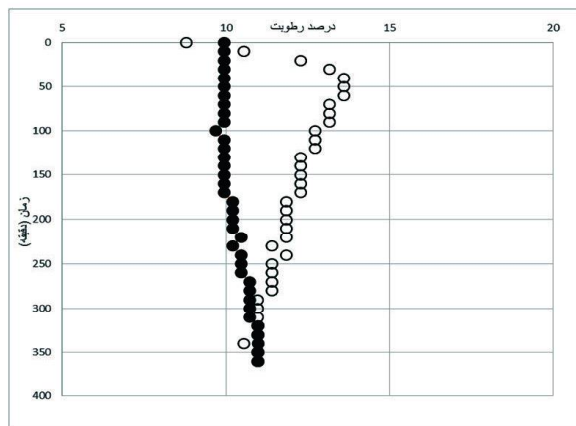


(الف)

شکل ۳. نمودار تغییرات رطوبت در پورت‌های اول (دایره تو خالی) و سوم (دایره تو پر). (الف) محفظه ۱، (ب) محفظه ۲

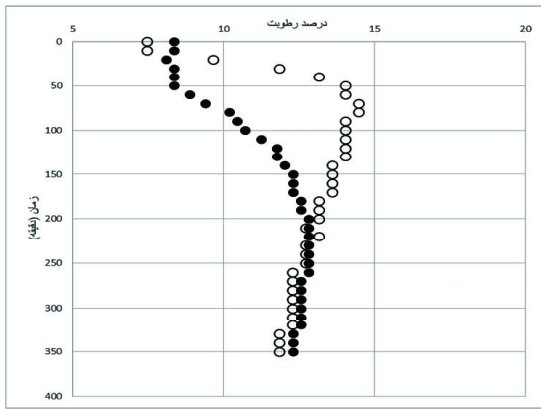


(ب)

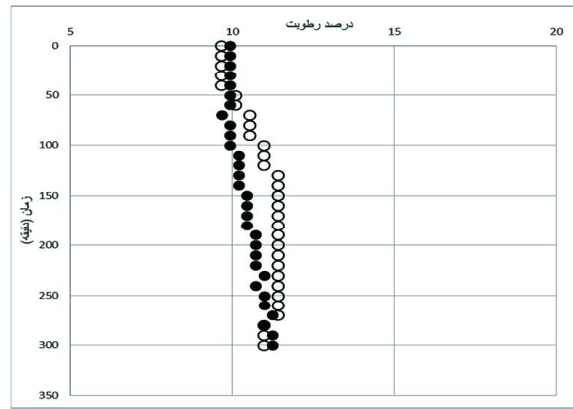


(الف)

شکل ۴. نمودار تغییرات رطوبت در پورت‌های اول (دایره تو خالی) و چهارم (دایره تو پر). (الف) محفظه ۱، (ب) محفظه ۲

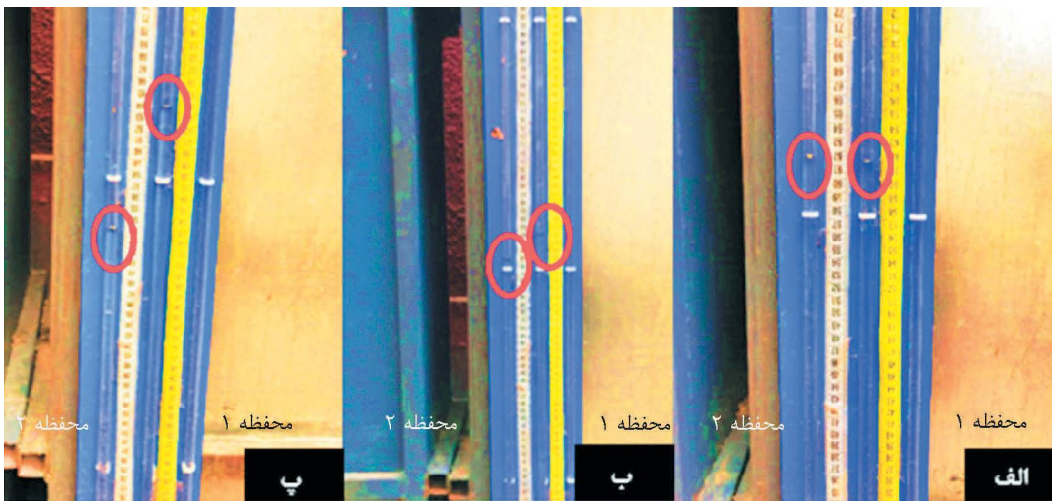


(ب)



(الف)

شکل ۵. نمودار تغییرات رطوبت در پورت‌های دوم (دایره تو خالی) و سوم (دایره تو پر). الف) محفظه ۱، ب) محفظه ۲



شکل ۶. فشار هیدرولیکی. الف) روز اول، ب) یک ماه بعد، پ) پایان آزمایش



شکل ۷. مراحل رشد گیاه. الف و ب) شروع آزمایش، پ و ت) آخرین روز آزمایش

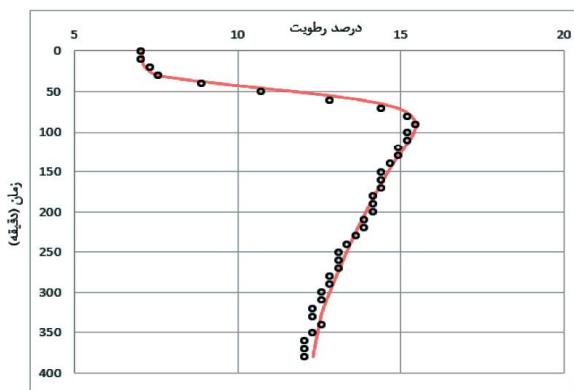
بر اساس نتایج آزمایش‌های نفوذ انجام شده مدل عددی هایدروس با تغییر پارامترها کالیبره شد (جدول ۲). در جدول ۱، Q_s و Q_r به ترتیب بیانگر محتوای رطوبتی باقی مانده و اشباع هستند. K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، α پارامتر میزان ارتباط منافذ، α و n نیز ضرایب تجربی می‌باشند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی آزمایش‌های نفوذ در شکل‌های ۸ تا ۱۵ آورده شده است. هم‌چنین پارامترهای آماری R^2 ، MBE و $RMSE$ برای آن‌ها محاسبه شد (جدول ۳).

جدول ۲. مقادیر پارامترهای سه نوع خاک در مدل هایدروس

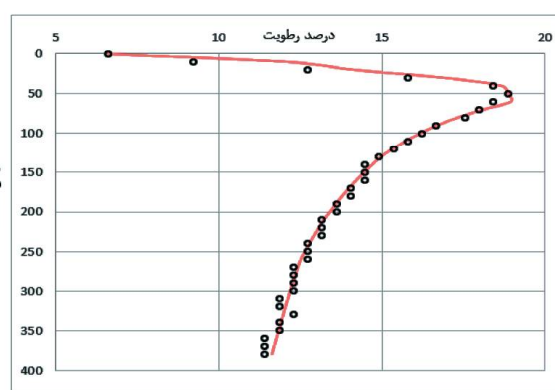
نام خاک	Q_r	Q_s	α (1/m)	n	K_s (m/min)	l
Sandy Loam	۰/۰۴۵	۰/۳۸	۳/۶	۲	۰/۰۲۲	۰/۵
Clay Sand	۰/۰۴	۰/۳۶	۲/۸	۲/۵۶	۰/۰۱۵	۰/۵
Sand	۰/۰۳۸	۰/۳۵	۳	۲/۶۲	۰/۰۳	۰/۵

جدول ۳. نتایج پارامترهای آماری مدل کالیبره شده

شماره آزمایش	شماره پورت	RMSE	MBE	R^2
دوم	۱	۰/۱۶	۰/۱۶۲	۰/۹۵۲
	۲	۰/۰۴۶	۰/۱۶۷	۰/۹۸۷
سوم	۱	۰/۰۲	۰/۰۱۱	۰/۹۳۴
	۲	۰/۰۱	۰/۰۸۸	۰/۹۵۹
چهارم	۱	۰/۰۱۴	۰/۰۶۶	۰/۹۸۹
	۳	۰/۰۱۷	۰/۰۷۹	۰/۹۶۵
پنجم	۱	۰/۰۸۷	۰/۰۷۱	۰/۹۴۱
	۳	۰/۰۰۹	۰/۰۵۹	۰/۹۹
ششم	۱	۰/۰۱۱	۰/۰۲۳	۰/۹۴۷
	۴	۰/۰۰۵	۰/۰۶۸	۰/۹۰۳
هفتم	۱	۰/۰۱۱	۰/۰۱۴	۰/۹۷۷
	۴	۰/۰۱۶	۰/۰۴۳	۰/۹۴۰
هشتم	۲	۰/۰۲	۰/۱۱۳	۰/۹۹
	۳	۰/۰۲۳	۰/۱۳۲	۰/۹۹۲
نهم	۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۹	۰/۹۶۵
	۳	۰/۰۰۷	۰/۰۱۴	۰/۹۵۶

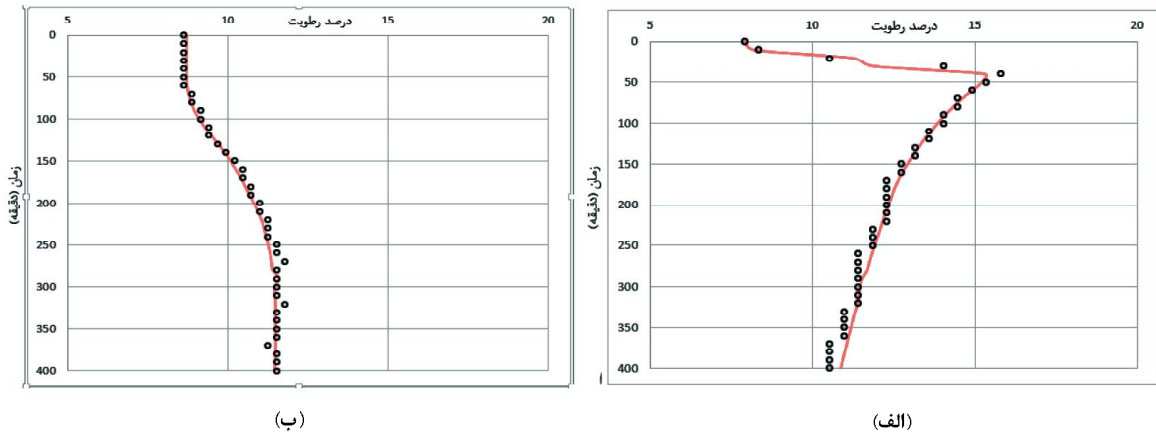


(ب)

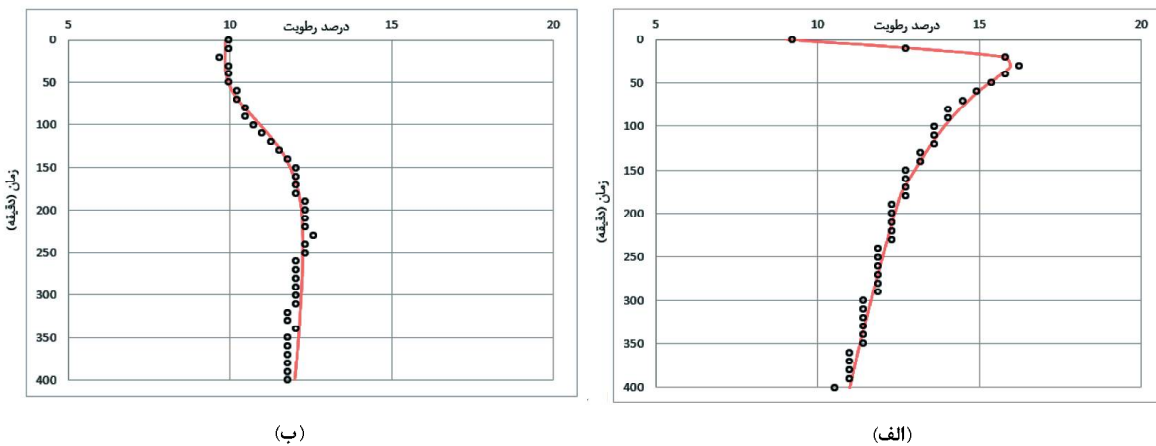


(الف)

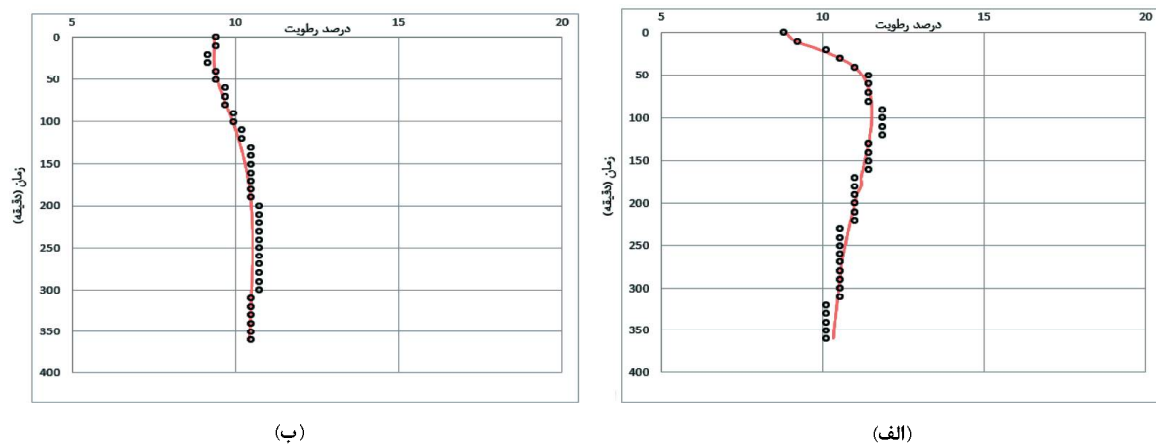
شکل ۸. نتایج پورت‌ها در آزمایش اول با علامت نقطه و برآورد مدل هایدروس با علامت خط. (الف) پورت اول، (ب) پورت دوم



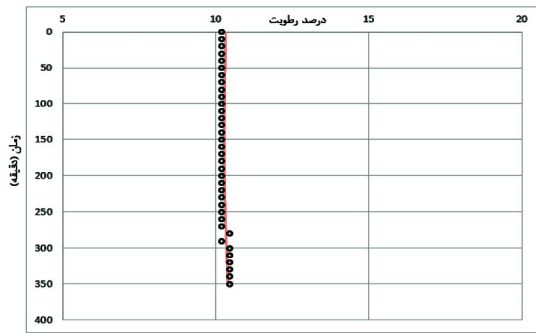
شکل ۹. نتایج پورت‌ها در آزمایش دوم با علامت نقطه و برآورد مدل هایدروس با علامت خط. الف) پورت اول، ب) پورت سوم



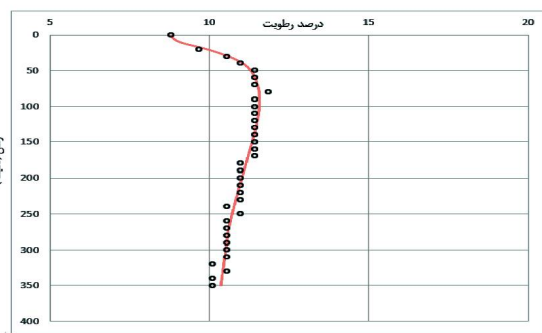
شکل ۱۰. نتایج پورت در آزمایش سوم با علامت نقطه و برآورد مدل هایدروس با علامت خط. الف) پورت اول، ب) پورت سوم



شکل ۱۱. نتایج پورت در آزمایش چهارم با علامت نقطه و برآورد مدل هایدروس با علامت خط. الف) پورت اول، ب) پورت دوم

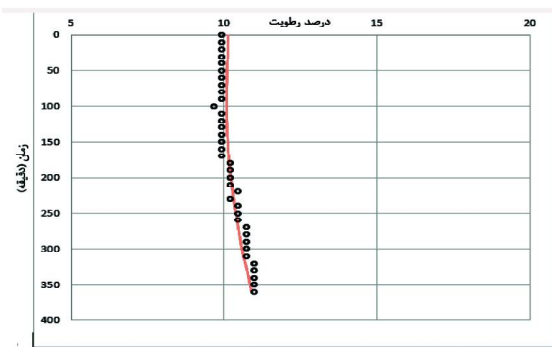


(ب)

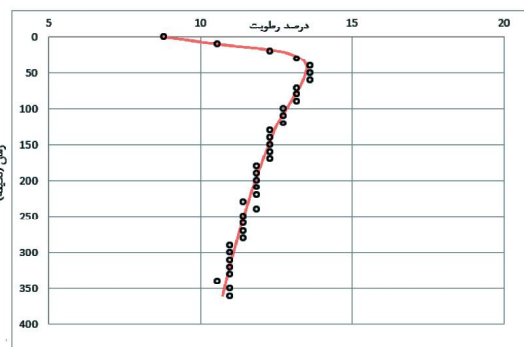


(الف)

شکل ۱۲. نتایج پورت در آزمایش پنجم با علامت نقطه و برآورد مدل هایروس با علامت خط. الف) پورت اول، ب) پورت چهارم

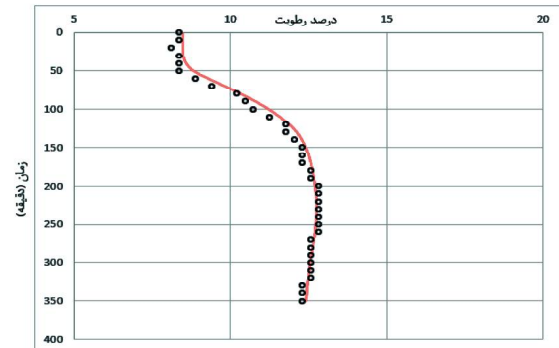


(ب)

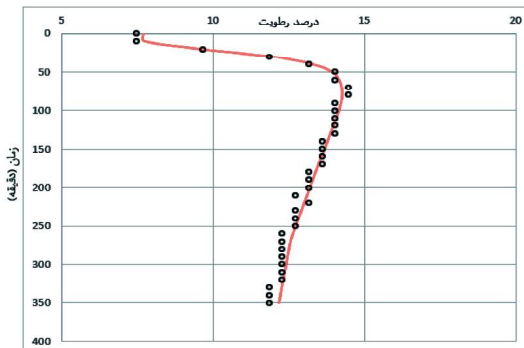


(الف)

شکل ۱۳. نتایج پورت در آزمایش ششم با علامت نقطه و برآورد مدل هایروس با علامت خط. الف) پورت اول، ب) پورت چهارم

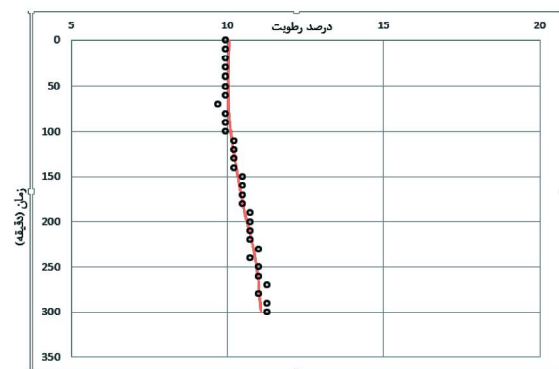


(ب)

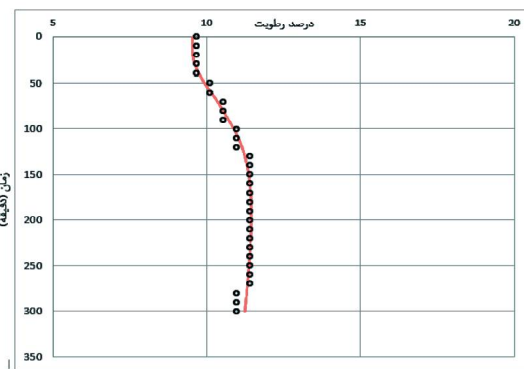


(الف)

شکل ۱۴. نتایج پورت در آزمایش هفتم با علامت نقطه و برآورد مدل هایروس با علامت خط. الف) پورت دوم، ب) پورت سوم



(ب)



(الف)

شکل ۱۵. نتایج پورت در آزمایش هشتم با علامت نقطه و برآورد مدل هایروس با علامت خط. الف) پورت دوم، ب) پورت سوم

on wide beds in clay and sandy clay loam using HYDRUS-2D. *Irrigation Science*, 33,3, 177-190.

- Daoxi, L., Zihui, L. and Zengjin, L., 2016. Research on water consumption characteristics of pepper under drip irrigation in greenhouse. *Water-saving Irrigation*, 10, 44-46.

- Dos Santos, L.N., Matsura, E.E., Gonçalves, I.Z., Barbosa, E.A., Nazario, A.A., Tuta, N.F., Elaiuy, M.C., Feitosa, D.R. and de Sousa, A.C., 2016. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. *Agricultural Water Management*, 170, 91-98.

- Elmaloglou, S. and Diamantopoulos, E., 2009. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from linear sources. *Agricultural Water Management*, 96,11, 1587-1595.

- Espadafor, M., Orgaz, F., Testi, L., Lorite, I.J., Garcia-Tejera, O., Villalobos, F.J. and Fereres, E., 2018. Almond tree response to a change in wetted soil volume under drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 202, 57-65.

- Food and Agriculture Organization of The United Nations (FAO), 2012. *The State of Food and Agriculture*, Rome, Italy.

- Greenland, S.J., Dalrymple, J., Levin, E. and O'Mahony, B., 2018. Improving Agricultural Water Sustainability: Strategies for Effective Farm Water Management and Encouraging the Uptake of Drip Irrigation. In *The Goals of Sustainable Development*, 111-123, Springer, Singapore.

- Honari, M., Ashrafzadeh, A., Khaledian, M., Vazifedoust, M. and Mailhol, J.C., 2017. Comparison of HYDRUS-3D soil moisture simulations of subsurface drip irrigation with experimental observations in the South of France. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143,7,

نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که آبیاری در فصل پاییز تا زمستان انجام شده است، تبخیر کمتر می‌باشد و میزان هدر رفت آب در بخش غرقابی نیز کمتر در نظر گرفته می‌شود. با این حال پایین بودن ۱۰ سانتی‌متری فشار هیدرولیکی در مدل غرقابی بعد از گذشت حدود چهار ماه بسیار قابل توجه می‌باشد. این در حالی است که میزان رشد گیاه در هر دو روش آبیاری مشابه بوده و تنها آب بیشتری در روش غرقابی هدر رفته است. بنابراین با جایگزین کردن آبیاری هوشمند به جای آبیاری غرقابی بدون تغییر در سطح زیر کشت، می‌توان محصولات با همان کیفیت قبلی ولی استفاده‌ی بسیار کم تر آب را تولید کرد. همچنین با در نظر گرفتن تخلخل ۳۵ درصدی برای بخش آبخوان مدل، افزایش ۲/۵ سانتی‌متری فشار هیدرولیکی در بخش قطره‌ای نشان‌دهنده ذخیره‌ی ۳/۵ لیتر از ۱۰ لیتر آب اضافه شده می‌باشد. در نتیجه در طول حدود چهار ماه تنها ۶/۵ لیتر آب در این بخش استفاده شده است. در حالی که در همین شرایط در بخش غرقابی علاوه بر استفاده‌ی ۱۰ لیتر آب اضافه شده، ۷/۵ سانتی‌متر هم کاهش فشار هیدرولیکی مشاهده شده است که با همان تخلخل، ۱۰/۵ لیتر آب از بخش آبخوان برداشت شده است. در نتیجه در طول آزمایش ۲۰/۵ لیتر آب در این بخش استفاده شده است. به طور کلی در بازه‌ی زمانی ۱۰۰ روزه برای کاهو با استفاده از آبیاری قطره‌ای هوشمند علاوه بر ۳۵ درصد تغذیه آبخوان، ۶۸ درصد آب کمتری استفاده می‌شود.

پارامترهای آماری برای آزمایش‌های نفوذ نشان‌دهنده‌ی همبستگی دقیق بین درصد رطوبت اندازه‌گیری شده و برآورد شده توسط مدل می‌باشد.

منابع

- ولی‌زاده، ن.، ۱۳۸۶. نگرشی بر روش‌های خودکار کردن سامانه‌های آبیاری تحت فشار. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

- Akbar, G., Raine, S., McHugh, A.D. and Hamilton, G., 2015. Managing lateral infiltration

410-417.

- 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*, 97,7, 1070-1076.

- Kirby, J.M., Ahmad, M.D., Mainuddin, M., Palash, W., Qadir, M.E., Shah-Newaz, S.M. and Hossain, M.M., 2015. The impact of irrigation development on regional groundwater resources in Bangladesh. *Agricultural Water Management*, 159, 264-276.

- Liu, H., Wang, X., Zhang, X., Zhang, L., Li, Y. and Huang, G., 2017. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao irrigation District of China. *Agricultural Water Management*, 179, 144-157.

- Ma, Y., Feng, S., Su, D., Gao, G. and Huo, Z., 2010. Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71, S40-S47.

- Mguidiche, A., Provenzano, G., Douh, B., Khila, S., Rallo, G. and Boujelben, A., 2015. Assessing HYDRUS-2D model to simulate water content and salt accumulation in a soil irrigated with a subsurface drip system: Application in a semiarid area of central Tunisia. *Irrigation and Drainage*, 64,2, 263-274.

- Mohammad, N., Alazba, A.A. and Simunek, J., 2014. HYDRUS simulation of the effects of dual-drip irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Irrigation Science*, 32,2, 111-125.

- Sanchis-Ibor, C., Macian-Sorribes, H., Garcia-Molla, M. and Pulido-Velazquez, M., 2015. Effects of drip irrigation on water consumption at basin scale (Mijares river, Spain). 26th Euro-mediterranean Regional Conference and Workshops "Innovate to improve irrigation performances", 12-15 October 2015. Montpellier, France.

- Schmidt, J.E., Peterson, C., Wang, D., Scow, K.M. and Gaudin, A.C., 2018. Agroecosystem tradeoffs associated with conversion to subsurface drip irrigation in organic systems. *Agricultural Water Management*, 202, 1-8.

- Singh, A., Srivastava, S.K., Kumar, K.J., Denis, D.M. and Thomas, A., 2017. Yield, irrigation production efficiency and economic return of onion under variable irrigation methods. *The Allahabad Farmer*, 73, 1, 3-7.

- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Simunek, J. and Shouse, P.J., 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigations with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130,4, 304-310.

- Steduto, P., Hoogeveen, J., Winpenny, J. and Bruke, J., 2017. Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security. Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome, Italy.

- Szymkiewicz, A., Gumula-Kawecka, A., Simunek, J., Leterme, B., Beegum, S., Jaworska-Szule, B., Pruszkowska-Caceres, M., Gorzewska-Langner, W., Angulo-Jaramillo, R. and Jacques, D., 2018. Simulations of freshwater lens recharge and salt/freshwater interfaces using the HYDRUS and SWI2 packages for MODFLOW. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66,2, 246-256.

- Zhang, H., Xiong, Y., Huang, G., Xu, X. and Huang, Q., 2017. Effects of water stress on processing tomatoes yield, quality and water use efficiency with plastic mulched drip irrigation in sandy soil of the Hetao Irrigation District. *Agricultural Water Management*, 179, 205-214.