

## بررسی چگونگی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی و مقایسه داده‌ها با نتایج

### HYDRUS 2D

علی شینی دشتکل<sup>۱</sup>، جلیل کرمان نژاد<sup>۲</sup>، مجید حمودی<sup>۳</sup> و الهام قنبری عدیوی<sup>۴\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۱۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۲۶

۱-مدیر گروه تحقیقات به‌زراعی، مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان

۲ و ۳- کارشناس محقق موسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان

۴- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه شهرکرد

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghanbariadi@sku.ac.ir

### چکیده

توزیع رطوبت یکی از فاکتورهای مهم و تعیین کننده در انتخاب روش آبیاری متناسب با گیاه است. در این مطالعه به بررسی توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی نیشکر در خاک با بافت رسی سیلتی پرداخته شده است. آزمایش‌ها به ازای دبی قطره‌چکان‌ها ۱/۲ لیتر در ساعت و دو فاصله قطره‌چکان ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر (L<sub>۵۰</sub> و L<sub>۶۰</sub>) و کارگذاری لوله آبد در سه عمق ۱۵، ۲۰، ۳۰ سانتی‌متر (d<sub>۱۵</sub>، d<sub>۲۰</sub> و d<sub>۳۰</sub>) در سه تکرار انجام شده است. نمونه‌برداری از خاک جهت تعیین رطوبت، در سه فاصله افقی ۰، ۳۰ و ۶۰ سانتی‌متری از لوله آبد و به ترتیب از اعماق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری در سه مرحله طی شش ماه دوره آزمایش، انجام گرفت. با استفاده از نرم‌افزار هایدروس (دو بعدی) توزیع رطوبت در اطراف لوله‌های آبد در سه عمق کارگذاری شده برای فاصله ۶۰ سانتی‌متری بین قطره‌چکان‌ها برآورد گردید. جهت بررسی دقت نرم‌افزار هایدروس، مقادیر رطوبت در طول دوره آزمایش با استفاده از دستگاه تی‌دی‌آر، در ۱۵ نقطه اطراف لوله‌های آبد مذکور اندازه‌گیری گردید. طبق رطوبت‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه مقادیر رطوبت تا فاصله افقی ۶۰ و عمودی ۹۰ سانتی‌متری از لوله‌های آبد در تمامی تیمارها بین حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم قرار گرفته‌اند. دقت نرم‌افزار هایدروس (دو بعدی) در شبیه‌سازی رطوبت خاک در اطراف لوله‌های آبد در حالت فاصله ۶۰ سانتی‌متر بین قطره‌چکان‌ها با توجه به عمق قرارگیری لوله‌ها d<sub>۱۵</sub>، d<sub>۲۰</sub> و d<sub>۳۰</sub> طبق معیار جذر میانگین مربعات خطا-نرمال شده (NRMSE)، به ترتیب در محدوده متوسط، خوب و متوسط قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای زیر سطحی، توزیع رطوبت، تی‌دی‌آر، هایدروس، نیشکر

## Investigation of Moisture Distribution in Subsurface Drip Irrigation and Comparison of the Data with HYDRUS-2D Results

A. Sheini-Dashtgol<sup>1</sup>, J. kermannezhad<sup>2</sup> M. Hamoodi<sup>3</sup> and E. Ghanbari-Adivi<sup>\*4</sup>

Accepted: July 5, 2020 Received: November 26, 2018

<sup>1</sup> Director of Agronomy Division Research Department, Khuzestan Sugar Cane Research and Training Institute

<sup>2,3</sup> Researcher Expert of Khuzestan Sugar Cane Research and Training Institute.

<sup>4</sup> Assist. Prof., Dept. of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

\* Corresponding Author, Email: ghanbariadivi@sku.ac.ir

### Abstract

Moisture distribution is one of the most important factors in selecting the suitable irrigation method for a crop. In this study, distribution of soil moisture content was investigated in sugarcane subsurface drip irrigation in silty-clay soil. The experiments were carried out with drippers having the discharge rate of 1.2 liter per hour, three installation depths of 15, 20 and 30 centimeters (d15, d20, d30), and two spaces of 50 and 60 centimeters (L50 and L60), with three replications. Soil water content sampling during the experiment was performed at the three stages with three horizontal distances of 0, 30 and 60 cm from the drip pipe and at depths of 0-30, 6-30 and 90-60 cm, respectively. Using HYDRUS-2D, moisture distribution around the supply pipes installed at three depths in the condition of 60 cm distance between the drippers, was determined. To evaluate the accuracy of HYDRUS, the moisture content was measured by TDR device at 15 observation points around supply pipe. The moisture content around the supply pipe within the horizontal distance of 60 cm and the vertical distance of 90 cm was within range of wilting point and field capacity. Accuracy of HYDRUS-2D software in simulation of soil moisture around the supply pipe for condition of 60 cm distance between the drippers at the depths of d15, d20, and d30 based on the NRMSE criterion, were in the medium, good and medium range, respectively.

**Keywords:** HYDRUS, Moisture distribution, Subsurface drip irrigation, Sugarcane, TDR

### مقدمه

حرکت ادوات در زمین در مرحله داشت، انعطاف در طراحی و هزینه‌های آزمایشگاهی کمتر اشاره کرد (ایرماک و همکاران ۲۰۱۶). همچنین این روش کمک می‌کند که آب به‌طور دقیق، در مقادیر کم و به‌طور مستقیم در محیط ریشه توزیع شده و خاک به‌صورت موضعی مرطوب شود (کومار و همکاران ۲۰۱۵). بررسی اثر توزیع رطوبت خاک و الگوی خیس‌شدگی روی میزان محصول تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بسیار حائز اهمیت است. به عبارت دیگر الگوی توزیع رطوبت یکی از اطلاعات پایه‌ای جهت طراحی و مدیریت

در طول دهه‌های گذشته، استفاده از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی برای درختان دائمی افزایش یافته و به‌عنوان یک استراتژی قوی برای مدیریت امیدبخش آب در مناطق کم‌آب پیشنهاد شد (کانسلی و همکاران ۲۰۱۴). آبیاری قطره‌ای زیرسطحی یک روش مفید آبیاری است و از مزایای آن می‌توان به افزایش کارایی مصرف آب، کاهش علف‌های هرز و بیماری‌ها، کاهش فرسایش خاک، افزایش کارایی مصرف کود، امکان

یک سیستم آبیاری است. آگاهی از الگوی توزیع رطوبت، تأثیر زیادی در اثربخشی آبیاری قطره‌ای دارد. یکنواختی کاربرد آب در مزرعه به وسیله یکنواختی شبکه لوله‌ها و یکنواختی فواصل قطره‌چکان‌ها حاصل می‌گردد که ممکن است به علت افزایش زهکشی یا تفاوت فشار، آب به صورت غیریکنواخت در زمین توزیع گردد که می‌توان با کاربرد قطره‌چکان‌های تنظیم‌کننده فشار، یکنواختی بیشتری به دست آورد. به طور کلی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بایستی به دو عامل، هزینه اجرا و نگهداری بالا و عدم خاک‌ورزی غلبه نماید که اگر این مشکلات نسبت به سایر روش‌های آبیاری کاهش یابد، کاربرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی در آینده نزدیک افزایش خواهد یافت (شاجو ۲۰۱۷). موریس و همکاران (۲۰۱۶) کارآیی سیستم آبیاری سطحی و زیرسطحی را به ازای سطوح مختلف کاربرد آب در خاک و الگوی توزیع رطوبت بررسی نموده و همچنین رابطه بین ظرفیت رطوبت، فاصله و عمق را مورد ارزیابی قرار دادند و بر اساس شعاع الگوی خیس‌شدگی، یک معادله خطی بین دو حالت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و سطحی تعیین نمودند. با توسعه دقیق تکنولوژی آبیاری، سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی به علت کارآیی مصرف آب بیشتر، پیشرفت قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به دیگر روش‌های آبیاری داشته است. در این روش، قطره‌چکان‌ها زیر سطح خاک قرار می‌گیرند و با کاربرد مستقیم آب در منطقه توسعه ریشه گیاه، می‌توان تبخیر آب از سطح خاک را به حداقل رساند (کمپ ۱۹۹۸، سینگ و همکاران ۲۰۰۶).

در یک پروژه تحقیقاتی، توزیع رطوبت در خاک با استفاده از دستگاه تی‌دی‌آر (TDR)<sup>۱</sup> به همراه کود آبیاری زیرسطحی مورد ارزیابی قرار گرفت.

آزمایش‌ها در مخازن ۵۰۰ لیتری خاک شنی با استفاده از قطره‌چکان‌هایی با دبی ۱ و ۱/۶ لیتر در ساعت انجام گردید. نتایج نشان داد که مقادیر توزیع تدریجی رطوبت در هر دو تیمار در نزدیکی قطره‌چکان‌ها از تراکم بالاتری برخوردار است. همچنین گرایش به توزیع عرضی در پیاز رطوبتی در فاصله بیش از ۳۰ سانتی‌متری از محل قطره‌چکان مشاهده شده است (بیزاری و همکاران ۲۰۱۴). ونگ و همکاران (۲۰۱۸) کاربرد آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کم‌عمق در مناطق خشک را مورد ارزیابی قرار داده و آزمایش‌هایی به ازای سه عمق ۵، ۱۰ و ۲۰ سانتی‌متر با قطره‌چکان با دبی ۳/۲ لیتر در ساعت انجام دادند. نتایج نشان داد که توزیع عمودی رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی (لوله آبدار در عمق ۲۰ سانتی‌متری از سطح خاک) به طور عمده در عمق ۶۰-۷۰ سانتی‌متری متمرکز شده است، در حالی که در آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کم‌عمق (لوله آبدار در عمق ۵ و ۱۰ سانتی‌متری از سطح خاک) تمرکز رطوبت در عمق متوسط ۳۰-۴۰ سانتی‌متری قرار گرفته است. همچنین توزیع ریشه در هر دو روش در عمق ۳۰-۴۰ سانتی‌متری متمرکز گردیده است. کارآیی مصرف آب به ازای آبیاری قطره‌ای زیرسطحی کم‌عمق بیشتر از آبیاری قطره‌ای زیرسطحی عمیق‌تر بوده است، بنابراین عمق ۱۰ سانتی‌متری برای لوله آبدار در مناطق خشک پیشنهاد شد.

در تحقیقی تأثیر اعماق مختلف آبیاری در روش آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر روی توزیع رطوبت خاک بررسی و نتایج نشان داد که کارگذاری لوله در عمق ۳۵ سانتی‌متر، بیشترین کارآیی مصرف آب را داشته است. (دوو و همکاران ۲۰۱۳). خصوصیات فیزیکی خاک می‌تواند در پارامترهای هیدرولیکی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی اثرگذار باشد. در تحقیقی اثر پارامترهای هیدرولیکی نظیر فشار کارکرد، رطوبت اولیه و جرم-مخصوص ظاهری خاک بر روی دبی جریان اندازه‌گیری شد که آزمایش‌ها با استفاده از سه بافت

<sup>۱</sup> Time Domain Reflectometry

توزیع آب و املاح در خاک است (کوته و همکاران ۲۰۰۳). در برخی پژوهش‌ها از آنالیز ابعادی جهت شبیه‌سازی الگوی تغییرات رطوبتی خاک در پروفیل رطوبتی آبیاری قطره‌ای استفاده می‌شود. بر این اساس نرم‌افزارهای مختلفی بسط یافته و نتایج با نرم‌افزار هایدروس نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است (خلیلی و همکاران ۲۰۱۴). کوک و همکاران (۲۰۰۶) پیشروی جبهه رطوبتی در سه نوع خاک مختلف را با استفاده از روش عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از حل معادله فیلیپ (۱۹۸۴) در اکثر موارد سازگاری خوبی با نتایج حاصل از حل عددی معادله ریچاردز نشان داد. خان‌محمدی و بشارت (۲۰۱۳) تحقیقی برای تخمین ابعاد جبهه رطوبتی حاصل از یک منبع نقطه‌ای انجام دادند و قابلیت نرم‌افزار هایدروس دوبعدی را با روش آبیاری نواری بررسی نموده و از توانایی این نرم‌افزار اطمینان حاصل کردند. سپس با استفاده از نرم‌افزار هایدروس و با به‌کارگیری قضیه  $\pi$  باکینگهام روابطی ساده برای تخمین مقدار عمق و بیشینه قطر خیس‌شدگی خاک توسط هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، دبی قطره‌چکان‌ها و مدت‌زمان کارکرد سیستم ارائه نمودند. مقایسه ابعاد جبهه رطوبتی با نتایج به‌دست‌آمده از روابط فوق نشان داد که می‌توان از این روابط برای تخمین ابعاد پیاز رطوبتی استفاده نمود.

هدف از این پژوهش اندازه‌گیری دقیق میدانی پروفیل رطوبتی آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و مقایسه نتایج با نرم‌افزار شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار هایدروس 2D/3D می‌باشد. طبق نتایج تحقیقات ارائه شده، توزیع رطوبت در خاک به ازای حجم یکسان کاربرد آب، بیشتر وابسته به عواملی نظیر بافت خاک و عمق نصب لوله آبدار می‌باشد و نرم‌افزار هایدروس قابلیت قابل قبولی در نرم‌افزار کردن توزیع رطوبت در خاک دارد لذا در این مطالعه توزیع رطوبت در آبیاری قطره‌ای زیر سطحی در خاکی با بافت سیلتی‌رسی به

خاک شنی، سیلتی لوم ورسی به ازای دو جرم-مخصوص ظاهری ( $1/4$  و  $1/25$  گرم بر سانتی‌متر مکعب) و دو مقدار رطوبت اولیه خاک (۱۲ و ۱۸ درصد وزنی) و قطره‌چکان غیرتنظیم‌کننده فشار انجام شد. نتایج نشان داد که فشار کارکرد عامل اصلی میزان دبی قطره‌چکان بوده که با افزایش فشار، دبی نیز افزایش می‌یابد. رطوبت اولیه و جرم‌مخصوص ظاهری در خاک شنی سبک بیش از دیگر بافت‌های مورد مطالعه اثرگذار بوده است. حساسیت دبی به پارامترهای هیدرولیکی، وابسته به بافت خاک بوده و مقدار این حساسیت به-ترتیب شنی بیش از سیلتی لوم و بیش از رسی است. همچنین حساسیت دبی به پارامترهایی نظیر هدایت-هیدرولیکی با افزایش فشار، رطوبت اولیه خاک و چگالی ظاهری خاک، کاهش می‌یابد (فان و لی ۲۰۱۸). انتخاب روش مناسب آبیاری، خصوصاً آبیاری زیرسطحی علاوه بر بافت خاک تابع خصوصیات گیاه نیز می‌باشد. آزمایشی به‌منظور تعیین اثر توزیع رطوبت در خاک بر روی پارامترهای کمی و کیفی نیشکر تحت آبیاری قطره‌ای زیرسطحی با دبی‌های  $1/6$  و  $3/5$  لیتر در ساعت انجام‌گرفت که لوله‌های آبدار در عمق ۳۰ سانتی‌متری کارگذاری و مقادیر رطوبت با استفاده از TDR اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که توزیع رطوبت در خاک در لایه‌های مختلف در طول آزمایش‌ها به تعادل رسیده و یک رابطه مشخص بین ظرفیت‌نگهداری آب در خاک و حجم خاک مرطوب‌شده وجود دارد. همچنین دبی قطره‌چکان‌ها تأثیری در توزیع رطوبت و نیترات در پروفیل خاک، میزان کمی و کیفی محصول و تراکم ریشه نداشته‌اند (سوزا و بیزاری ۲۰۱۸) به طور کلی، بهینه‌سازی دستگاه‌های آبیاری قطره‌ای زیرسطحی و استفاده درست از این سیستم آبیاری، نیازمند پیش‌بینی دقیقی از هندسه پروفیل رطوبتی و توزیع آب در خاک می‌باشد (زار ۱۹۹۶).

البته باید توجه داشت که، طراحی و مدیریت کارآمد سیستم‌های آبیاری قطره‌ای نیازمند فهم الگوی

طراحی و ساخته شد. لوله‌های آبدۀ از نوع کنترل فشار و آنتی‌سیفون با قطر خارجی ۱۶ میلی‌متر انتخاب گردید.

نمونه‌هایی جهت تعیین پیاز رطوبت در اطراف قطره‌چکان تهیه و پس از توزین، به مدت ۲۴ ساعت در آون و در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس قرار داده‌شد و در نهایت میزان رطوبت وزنی نمونه‌ها تعیین‌شد. نمونه-برداری از خاک در سه مرحله در طی شش ماه در طول فصل کشت، انجام‌شد. همچنین به ازای فاصله قطره‌چکان ۶۰ سانتی‌متر (L۶۰) و سه عمق کارگذاری لوله آبدۀ ۱۵، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر (d۱۵، d۲۰ و d۳۰) دقیقاً مقابل قطره‌چکان و به فواصل افقی ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی‌متر، ۵ عدد لوله‌ترایم تا عمق ۹۰ سانتی‌متری جهت قرائت رطوبت با دستگاه TDR نصب‌شد که در پنج نوبت در طول دوره آزمایش (تقریباً هر ۲ ماه) مقادیر رطوبت اندازه‌گیری و در نهایت میانگین این مقادیر جهت ارزیابی نتایج هیدروس استفاده شد (بدلیل محدودیت تعداد لوله‌های ترایم، فقط در لوله‌های آبدۀ با فاصله قطره‌چکان ۶۰ سانتی‌متر این بررسی انجام شده است). ظرفیت زراعی و حد پژمردگی دائم به ترتیب ۲۵/۱ و ۱۲/۸۵ درصد وزنی تعیین گردید. در جدول ۱ تا ۳ به ترتیب مشخصات هیدرولیکی و اجرایی لوله‌های آبدۀ، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه طرح و پارامترهای هواشناسی منطقه ارائه‌شده است.

ازای اعماق مختلف نصب لوله آبدۀ مورد ارزیابی قرار گرفت و با نتایج نرم‌افزار هیدروس مقایسه گردید.

## مواد و روش‌ها

آزمایش‌ها در زمینی به مساحت ۱/۲ هکتار در مؤسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان واقع در کیلومتر ۳۵ جاده اهواز-آبادان انجام شد. بافت خاک سیلتی‌رسی بوده که در رده خاک‌های سنگین طبقه‌بندی می‌گردد. به‌منظور انتخاب دبی مناسب قطره‌چکان‌ها، علاوه بر در نظر گرفتن بافت خاک، تعدادی آزمایش اولیه نیز در مزرعه موردنظر انجام گردیده که در نهایت بر اساس بافت خاک و میزان رواناب حاصله دبی ۱/۲ لیتر در ساعت انتخاب گردید. شکل ۱ نحوه اتصال لوله‌های آبدۀ به مانیفولد و یکی از تیمارهای طرح آزمایشی را نشان می‌دهد. آزمایش‌ها در ۶ تیمار شامل سه عمق کارگذاری لوله آبدۀ ۱۵، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر (d۱۵، d۲۰ و d۳۰) و دو فاصله قطره‌چکان ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر (L۵۰ و L۶۰) در سه تکرار با طول لوله‌های آبدۀ برابر ۲۴۰ متر و فاصله از یکدیگر معادل ۱/۸۳ متر انجام گردید. قلمه‌های نیشکر بافاصله ۴۰ سانتی‌متری از یکدیگر کشت‌شد و لوله آبدۀ در وسط دو ردیف قلمه و در زیر سطح خاک قرارگرفت. در ایستگاه پمپاژ از سه پمپ فشارقوی WKL 80/3 به همراه دو عدد فیلتر هیدروسیکلون و ۶ عدد فیلتر شنی و دیسکی (۱۲۰ میکرومتر) استفاده‌شد. به‌منظور کارگذاری لوله‌های آبدۀ در مزرعه، دستگاه لوله‌گذار مناسب کشت نیشکر



شکل ۱- نحوه اتصال لوله آبدۀ به مانیفولد و گیاه نیشکر در یکی از تیمارها.

جدول ۱- مشخصات هیدرولیکی و اجرایی لوله‌های آبد.

| تیما | دبی<br>قطره‌چکان‌ها<br>q(L hr <sup>-1</sup> ) | فاصله<br>قطره‌چکان‌ها<br>روی لوله<br>L(cm) | عمق کارگذاری<br>لوله<br>d(cm) | فاصله<br>لوله‌های آبد<br>B(cm) | قطر خارجی<br>لوله آبد<br>D(mm) | طول لوله<br>آبد<br>l (m) | فشار ابتدای<br>خط<br>Pi(Bar) | فشار انتهایی<br>خط<br>Pn(Bar) |
|------|---|--|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| اول  | ۱/۲   | ۵۰   | ۳۰                            | ۱۸۳                            | ۱۶                             | ۲۴۰                      | ۳/۴                          | ۱/۸                           |
|      |   |  | ۲۰                            |                                |                                |                          | ۳/۴                          | ۱/۸                           |
|      |   |  | ۱۵                            |                                |                                |                          | ۳/۴                          | ۱/۸                           |
| دوم  | ۱/۲   | ۶۰   | ۳۰                            | ۱۸۳                            | ۱۶                             | ۲۴۰                      | ۳/۴                          | ۱/۴                           |
|      |   |  | ۲۰                            |                                |                                |                          | ۳/۴                          | ۱/۴                           |
|      |   |  | ۱۵                            |                                |                                |                          | ۳/۴                          | ۱/۴                           |

جدول ۲- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای طرح.

| SAR   | کاتیون‌ها (meq L <sup>-1</sup> ) |                  |                  |                | $\rho_b$<br>(g cm <sup>-3</sup> ) | pH   | EC(dS m <sup>-1</sup> ) | بافت خاک  | عمق نمونه (cm) |
|-------|----------------------------------|------------------|------------------|----------------|-----------------------------------|------|-------------------------|-----------|----------------|
|       | Na <sup>+</sup>                  | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> |                                   |      |                         |           |                |
| ۱۵/۳۰ | ۵۱/۳                             | ۱۱/۰۹            | ۱۱/۵۲            | ۰/۱۸           | ۱/۵                               | ۷/۱۹ | ۶/۹۷                    | سیلتی رسی | ۰-۳۰           |
| ۱۲/۶۴ | ۳۵/۶                             | ۷/۸۲             | ۸/۰۴             | ۰/۱۲           | ۱/۵۷                              | ۷/۲۸ | ۴/۷۵                    | سیلتی رسی | ۳۰-۶۰          |
| ۱۰/۰۷ | ۳۲/۴                             | ۹/۸۹             | ۱۰/۸۲            | ۰/۰۱           | ۱/۶۱                              | ۷/۲۹ | ۴/۷۳                    | سیلتی رسی | ۶۰-۹۰          |

جدول ۳- مقادیر متوسط پارامترهای مهم هواشناسی در منطقه مطالعاتی (۲۰۱۷-۱۹۹۷).

| حداکثر دما (C°) | حداقل دما (C°) | حداکثر تبخیر (mm day <sup>-1</sup> ) | متوسط تبخیر سالانه (mm) |
|-----------------|----------------|--------------------------------------|-------------------------|
| ۵۱/۵            | -۴/۵           | ۲۸/۲                                 | ۳۲۱۸                    |

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r K(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad [1]$$

که در آن؛  $\theta$  رطوبت حجمی آب خاک (L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>)،  $h$  پتانسیل فشاری آب (L)،  $t$  زمان (T)،  $r$  محور افقی،  $z$  محور عمودی و  $K(h)$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک است. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از نرم‌افزار ونگنوختن-معلم و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک با نرم‌افزار معلم، طبق معادلات ۲ و ۳ به دست می‌آید (النصر و همکاران ۲۰۱۴).

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|)^n} ; m = 1 - \frac{1}{n} ; n > 1 \quad [2]$$

### نرم‌افزار هایدروس<sup>۱</sup>

هایدروس یکی از نرم‌افزارهای پیشرفته در ارتباط با حرکت آب، گرما و املاح در خاک می‌باشد. این نرم‌افزار شامل حل عددی معادله ریچاردز در تلفیق با روابط ونگنوختن برای بررسی حرکت آب در خاک می‌باشد (نوروزیان و همکاران ۲۰۱۶). معادله ریچاردز، معادله حاکم بر جریان آب در یک محیط همگن و ایزوتروپیک خاک است که به شرح زیر می‌باشد.

<sup>1</sup>HYDRUS

گیری شده توسط TDR به عنوان نقاط مشاهداتی در پروفیل شبیه سازی شده در نرم افزار هایدروس انتخاب گردید. با توجه به اینکه اندازه گیری های انجام شده توسط دستگاه TDR چندین ماه پس از شروع آبیاری انجام شد لذا در نرم افزار هایدروس ۱۰ نوبت آبیاری با دوره یک روزه و مدت ۱۰ ساعت نرم افزار سازی شد (مطابق برنامه آبیاری مزرعه) و مقادیر نرم افزار سازی شده رطوبت ۲۴ ساعت پس از آخرین آبیاری با داده های TDR مقایسه گردید.

### ارزیابی نرم افزار هایدروس

به منظور ارزیابی میزان دقت نتایج نرم افزار هایدروس در مقایسه با داده های دستگاه TDR، از معیار جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) استفاده شد که مطابق معادله شماره ۴ است.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}}{\bar{x}} \times 100 \quad [4]$$

در معادله بالا  $x_i$ ،  $n$ ،  $y_i$  و  $\bar{x}$  به ترتیب تعداد داده ها، مقادیر رطوبت های اندازه گیری شده، مقادیر رطوبت های برآورد شده و میانگین مقادیر رطوبت های اندازه گیری شده می باشند. به طور کلی مقادیر NRMSE در بازه  $[0, +\infty)$  قرار دارد و دقت نرم افزار در برآورد نتایج با توجه به مقادیر NRMSE به این صورت قابل دسته بندی است که کمتر از ۱۰٪ عالی، بین ۱۰-۲۰٪ خوب، بین ۲۰-۳۰٪ متوسط و بیشتر از ۳۰٪ ضعیف خواهد بود (بنایان و هوگنبوم ۲۰۰۹).

### نتایج و بحث

#### توزیع رطوبت در خاک

در شکل ۲، نتایج میزان رطوبت موجود در خاک، اندازه گیری شده در تیمارهای مختلف ارائه شده است. تقریباً در تمامی نقاط اندازه گیری شده به استثنای چند نقطه مقادیر رطوبت بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطه

$$K(h) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l \left[ 1 - \left( 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad [3]$$

به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و رطوبت حجمی باقیمانده در خاک ( $L^3 L^{-3}$ )، پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک،  $h$  مکش ماتریک ( $L$ )،  $m$  و  $n$  پارامترهای شکل منحنی مشخصه رطوبتی خاک،  $\alpha$  عکس مقدار ورود هوا ( $L^{-1}$ ) و  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $L T^{-1}$ ) می باشند. نرم افزار هایدروس نیاز به پارامترهای هیدرولیکی خاک مانند  $\theta_s$ ،  $n$ ،  $\theta_r$ ،  $K_s$  و  $\alpha$  مقادیر رطوبت خاک برای شرایط اولیه دارد. در این تحقیق برآورد این پارامترها توسط نرم افزار رزتا (اسچپ و همکاران ۲۰۰۱) انجام گرفت. به این صورت که پارامترهای مورد نیاز نرم افزار مذکور در مزرعه اندازه گیری شد و در نرم افزار رزتا استفاده گردید. پروفیل شبیه سازی شده در نرم افزار هایدروس دارای عرض ۰/۸ متر و عمق ۱ متر بود. در تعیین شرایط مرزی محل لوله آبد، متوسط طولی جریان ورودی از لوله آبد به خاک، بر اساس دبی، فاصله قطره چکان ها و قطر لوله آبد، برابر شدت جریان ثابت ۳/۲ سانتی متر بر ساعت در نظر گرفته شد. همچنین در مرز بالایی پروفیل که در تماس با اتمسفر قرار دارد به مقدار ۱۸ میلی متر تبخیر در روز اعمال گردید و مرز پایینی نیز بصورت زهکشی آزاد انتخاب گردید و در بخش شرایط اولیه، رطوبت اولیه خاک ۱۷ درصد حجمی تعیین گردید. جهت بررسی توانایی نرم افزار هایدروس در برآورد توزیع رطوبت در خاک با بافت سنگین تحت آبیاری قطره ای زیر سطحی از نتایج رطوبت اندازه گیری شده با دستگاه TDR (۲۴ ساعت پس از آبیاری) در فواصل افقی ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ سانتی متری از لوله آبد و در عمق های ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی متری استفاده شد. به همین منظور نقاطی نظیر به نظیر نقاط اندازه-

تفاوت در حجم آب، موجب تغییر در مقدار رطوبت نقاط مختلف شده، و این روند در شکل‌های ارائه شده به ازای مراحل یک تا سه نیز مشاهده شد. از مقایسه مقادیر رطوبت در دو تیمار L۵۰ و L۶۰ این مورد مشاهده می‌گردد که مقادیر رطوبت در تیمار L۵۰ بیش از تیمار L۶۰ است. با توجه به هم‌پوشانی بیشتر قطره‌چکان‌ها در تیمار L۵۰ این موضوع موجب گسترش بیشتر رطوبت در اطراف قطره‌چکان شده است.

#### نرم‌افزار هایدروس:

در شکل شماره ۳ تغییرات رطوبت حجمی در طول دوره ۱۰ روزه آبیاری را که بوسیله نرم‌افزار هایدروس برآورد شده را در چند سری نقاط مشاهداتی نشان می‌دهد. در این شکل نقاط N1-N3 در فاصله افقی ۰ سانتی‌متری از لوله، نقاط N4-N6 در فاصله افقی ۱۵ سانتی‌متری از لوله، نقاط N7-N9 در فاصله افقی ۳۰ سانتی‌متری از لوله، نقاط N10-N12 در فاصله افقی ۴۵ سانتی‌متری از لوله و نقاط N13-N15 در فاصله افقی ۶۰ سانتی‌متری از لوله قرار دارند. در هر سری نقاط، میزان رطوبت در سه عمق ۱۵، ۴۵ و ۷۵ سانتی‌متری بطور جداگانه نمایش داده شده است. همچنین در ادامه توزیع رطوبت در پروفیل‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار هایدروس در شکل ۴ ارائه شده است.

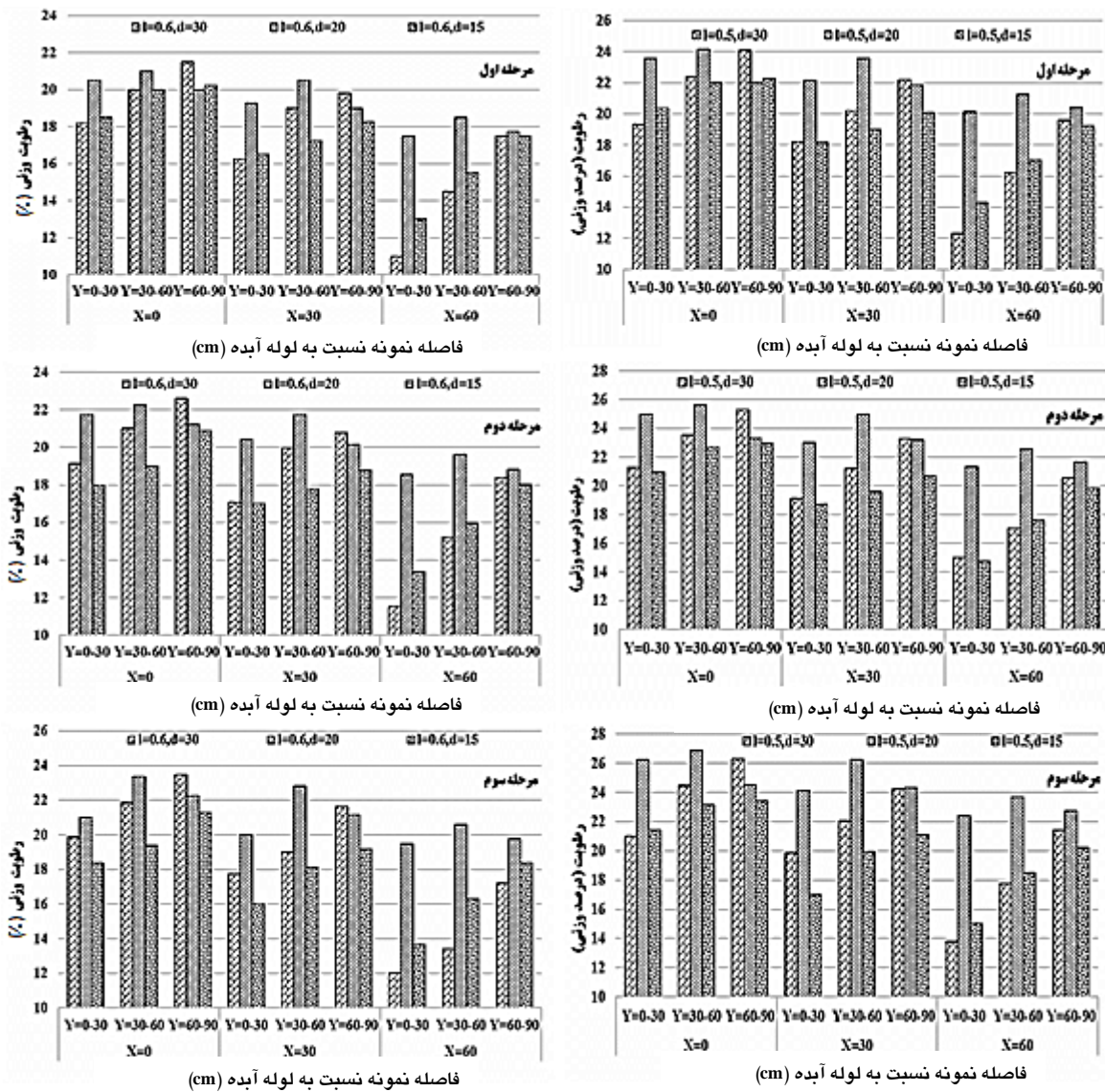
همانطور که مشاهده می‌شود در نقاط نزدیک به لوله آبدۀ نواسانات رطوبت حجمی به وضوح قابل مشاهده است البته در نقاط مشاهداتی که در فاصله بیشتری از لوله آبدۀ قرار دارند نواسانات کمتری مشاهده شد.

بطور کلی روند تغییرات رطوبت در تمامی نقاط افزایشی بود البته به علت تبخیر از سطح خاک در نقاط نزدیک به سطح میزان رطوبت ابتدا روندی کاهش‌ی داشت ولی در ادامه (حدوداً پس از ۱۰۰ ساعت) میزان رطوبت به دلیل توسعه پیاز رطوبتی افزایش یافت.

پژمردگی دائم بوده‌اند. همچنین قابل مشاهده است که بافاصله گرفتن از لوله آبدۀ، مقادیر رطوبت وزنی روند نزولی داشته است. علت این پدیده را می‌توان به این صورت بیان نمود که بافاصله گرفتن از لوله و توسعه پیاز رطوبتی، آب در حجم خاک بیشتری توسعه یافته و رطوبت کمتری به نقاط دورتر می‌رسد، این کاهش مقادیر رطوبت به‌طور واضح در خطوط میانگین نشان داده شده است. در شکل شماره ۲ در برخی نقاط مقادیر رطوبت از حد پژمردگی دائم کمتر شده، زیرا این نقاط در فاصله افقی ۶۰ سانتی‌متری از لوله آبدۀ و در عمق ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک قرار داشته و الگوی خیس-شدگی به نحوی است که جریان عرضی تا این ناحیه نمی‌رسد. نکته دیگری که مشاهده می‌گردد توزیع متفاوت رطوبت در عمق‌های مختلف است. به این صورت که در تیمار d۳۰ و d۱۵ از سطح تا عمق خاک مقادیر رطوبت روند افزایشی داشته ولی در تیمار d۲۰ از سطح تا عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر روند افزایشی بوده و پس از آن کاهش می‌گردد. علت این موضوع به دلیل شکل توسعه پیاز رطوبتی در این سه تیمار است. در تیمار d۲۰ بیشترین میزان رطوبت در عمق ۶۰-۹۰ سانتی‌متری سطح خاک ایجاد شده است.

بنابراین مقدار رطوبت از سطح تا عمق روندی افزایشی دارد. در تیمار d۲۰ بیشترین مقدار رطوبت در عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متری ایجاد شده لذا از سطح تا این عمق مقادیر رطوبت روندی افزایشی و پس از آن روندی کاهش‌ی داشته است. در تیمار d۱۵ به علت نزدیکی قطره‌چکان به سطح خاک، بخشی از جریان به رواناب تبدیل شده و موجب گردیده که گسترش عرضی رطوبت کمتر شود این موضوع باعث شده تا حداکثر میزان رطوبت به‌صورت عمقی توسعه یافته و به همین علت در شکل ۳، مقادیر رطوبت از سطح به عمق خاک روندی افزایشی دارد. میزان حجم آب داده شده در مرحله یک، دو و سه به ترتیب ۸، ۱۱ و ۱۴ میلی‌متر بوده است. این

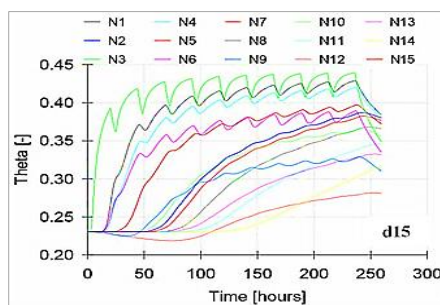
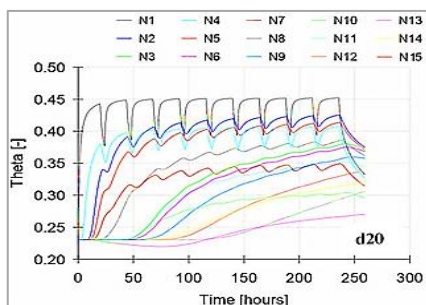


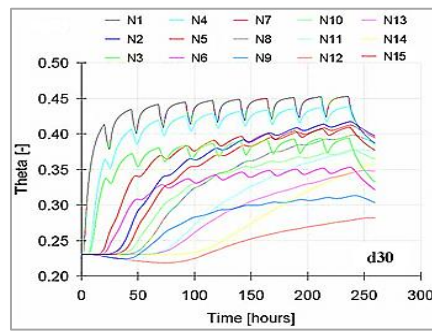


شکل ۲- مقادیر رطوبت در تیمارهای مورد بررسی به ازای میانگین سه مرحله اندازه‌گیری رطوبت.

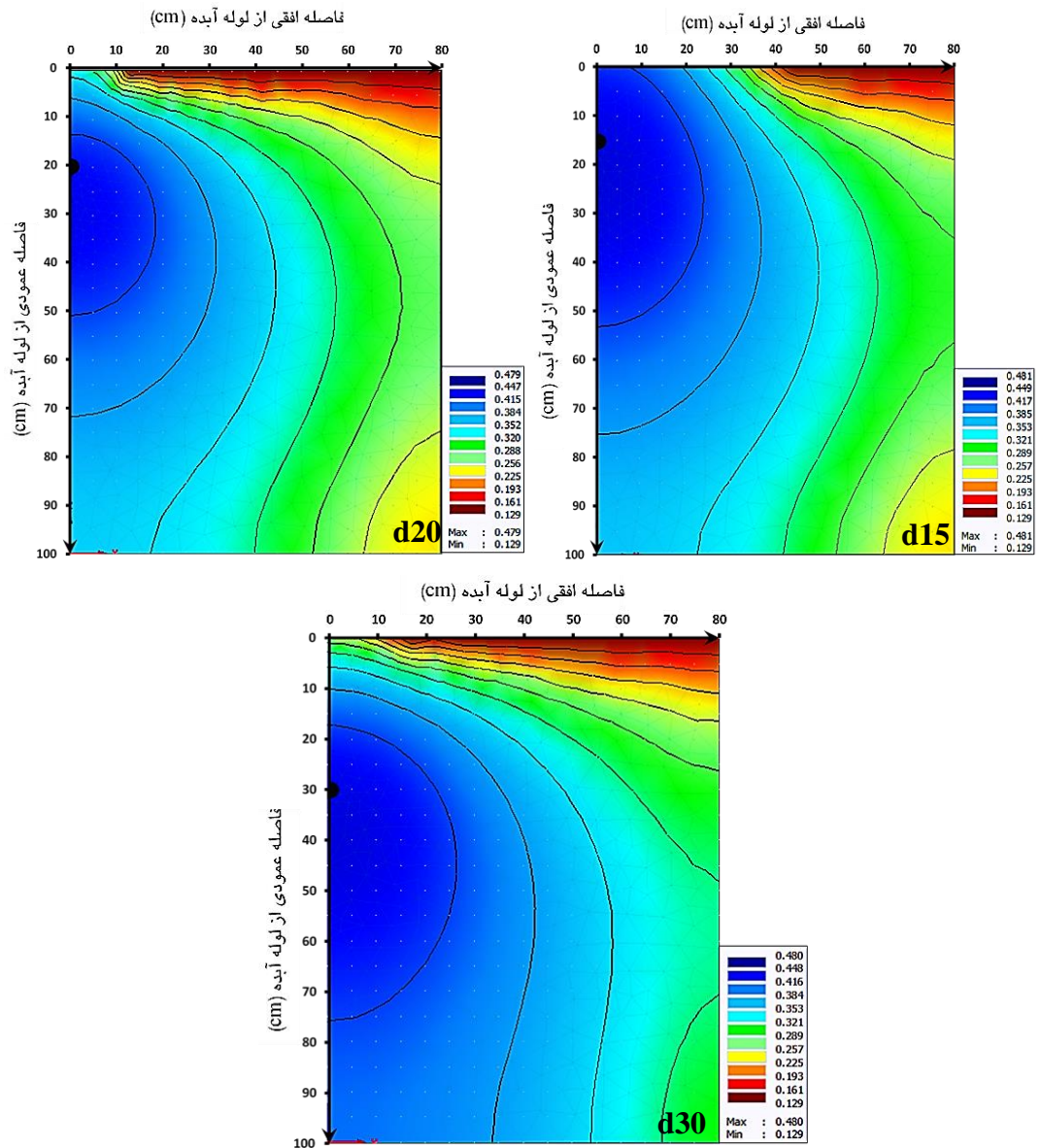
سطح خاک به کمتر از ۷۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی رسیده است. بیشترین میزان توزیع عرضی رطوبت در تیمار d۳۰ مشاهده گردید، زیرا در این تیمار کاهش تلفات تبخیر از سطح خاک موجب افزایش گسترش عرضی پیاز رطوبتی شده است.

با توجه به شکل ۴ مشخص می‌گردد که با افزایش عمق کارگذاری لوله آبد، مقدار کمتری رطوبت به سطح خاک رسیده است به طوری که در تیمار d۱۵ تا فاصله افقی ۲۰ سانتی‌متری از لوله، میزان رطوبت به ظرفیت زراعی رسیده است ولی در تیمار d۳۰ میزان رطوبت





شکل ۳- نواسانات زمانی رطوبت حجمی برآورد شده در نقاط مشاهداتی.



شکل ۴- توزیع رطوبت حجمی برآورد شده با نرم افزار هایدروس به ازای قرار گیری لوله آبده در عمق های ۱۵، ۲۰ و ۳۰ سانتی متری.

نزدیکی قطره‌چکان در محدوده عالی و در فاصله ۱۰ سانتی‌متری قطره‌چکان در محدوده خوب گزارش نمودند. بنایان و هوگنبوم (۲۰۰۹) میزان دقت هایدروس دو بعدی در برآورد رطوبت آبیاری قطره‌ای زیر سطحی در یک خاک لومی را در محدوده عالی گزارش نمودند.

### نتیجه‌گیری کلی

طبق اندازه‌گیری‌های انجام‌شده بافاصله گرفتن از لوله آبد، مقادیر رطوبت روند کاهشی دارد. همچنین مقادیر رطوبت تا فاصله افقی ۶۰ و عمودی ۹۰ سانتی‌متری از لوله آبد در تمامی تیمارها بین حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم قرار گرفته‌اند.

در تیمار d۳۰ و d۱۵ از سطح تا عمق خاک مقادیر رطوبت روندی افزایشی دارد ولی در تیمار d۲۰ از سطح تا عمق ۶۰-۳۰ سانتی‌متر، روند افزایشی بوده و پس از آن کاهشی می‌گردد. بیشترین مقادیر رطوبت در سطح خاک ۲۴ ساعت پس از اتمام آبیاری به ترتیب مربوط به تیمار d۲۰، d۱۵ و d۳۰ تعیین گردید.

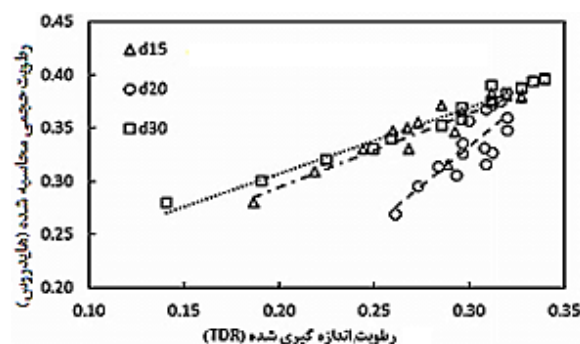
از مقایسه مقادیر رطوبت در دو تیمار L۵۰ و L۶۰ مشاهده گردید که مقادیر رطوبت در تیمار L۵۰ بیش از تیمار L۶۰ است.

طبق نتایج نرم‌افزار هایدروس در طول دوره ۱۰ روزه آبیاری، رطوبت در نقاط مشاهداتی نزدیک به قطره‌چکان تغییرات سینوسی داشت. البته در نقاط دورتر، این نوسانات کمتر مشاهده شد. بطور کلی روند تغییرات رطوبت در تمامی نقاط مشاهداتی در طول دوره آبیاری افزایشی بود. البته به‌علت تبخیر از سطح خاک در نقاط نزدیک به سطح میزان رطوبت ابتدا روندی کاهشی داشت ولی در ادامه (حدوداً پس از ۱۰۰ ساعت) میزان رطوبت به‌دلیل توسعه پیاز رطوبتی افزایش یافت.

براساس نتایج نرم‌افزار هایدروس، با افزایش عمق کارگذاری لوله آبد، مقدار کمتری رطوبت به سطح خاک رسیده به‌طوری که در تیمار d۱۵ بلافاصله پس از

### مقایسه مقادیر رطوبت TDR با نرم‌افزار هایدروس

همان‌طور که در قسمت‌های قبل ذکر شد به‌منظور بررسی کارایی نرم‌افزار هایدروس ۱۵ نقطه مشاهداتی در پروفیل‌های شبیه‌سازی شده به ازای سه عمق کارگذاری لوله آبد در نظر گرفته شد که این نقاط دارای مختصات یکسان با نقاط اندازه‌گیری شده توسط TDR هستند. با استفاده از معادله شماره ۴ مقادیر مشاهداتی و محاسباتی با هم مقایسه شدند که نتایج آن در جدول شماره ۴ ارائه شد. در شکل ۵ مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر محاسباتی به ازای عمق‌های مختلف کارگذاری لوله آبد ارائه شده است.



شکل ۵-مقایسه رطوبت‌های حجمی اندازه‌گیری شده با مقادیر محاسباتی.

جدول ۴- تعیین دقت نرم‌افزار هایدروس در برآورد مقادیر رطوبت.

|       | تیمار d۱۵ | تیمار d۲۰ | تیمار d۳۰ |
|-------|-----------|-----------|-----------|
| NRMSE | ۲۶/۴      | ۱۲/۵      | ۲۸/۲      |
|       | متوسط     | خوب       | متوسط     |

با توجه به مقادیر NRMSE، دقت نرم‌افزار هایدروس در سه تیمار d۱۵، d۲۰ و d۳۰ به‌ترتیب متوسط، خوب و متوسط ارزیابی گردید. بزانه و همکاران (۲۰۱۶) دقت نرم‌افزار هایدروس دو بعدی را در تخمین پیشروی رطوبت در خاک لوم شنی تحت آبیاری قطره‌ای در

## تقدیر و تشکر:

بدینوسیله از موسسه تحقیقات و آموزش نیشکر خوزستان جهت فراهم نمودن امکانات اجرای این طرح و فراهم نمودن داده‌های مورد استفاده در این پژوهش قدردانی می‌شود.

اتمام آبیاری رطوبت سطح خاک در حد ظرفیت زراعی برآورد گردید ولی در تیمار  $d_{30}$  میزان رطوبت سطح خاک کمتر از ۷۰ درصد رطوبت ظرفیت زراعی تخمین زده شد. همچنین بیشترین میزان توزیع عرضی رطوبت در این نرم‌افزار در تیمار  $d_{30}$  رخ داد.

براساس مقادیر NRMSE، دقت نرم‌افزار هایدروس در سه تیمار  $d_{15}$ ،  $d_{20}$  و  $d_{30}$  به ترتیب در محدوده متوسط، خوب و متوسط تعیین گردید.

## منابع مورد استفاده

- Bannayan M and Hoogenboom G, 2009. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model. *Field Crops Research* 111(3): 290-302.
- Bazaneh M, Khorsand A, Zeinalzadeh K and Besharat S, 2016. Evaluation of HYDRUS 2D software to estimate storedwater and wetting pattern of surface drip Irrigation. *Water and Soil Science- University of Tabriz* 26(1.2):287-301. (In Persian with English abstract)
- Bizari DR, Grecco KL, Oliveira PD, Querido DCM and Souza CF, 2014. Soil solution distribution under subsurface drip fertigation determined using TDR technique. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 8(2): 139-146.
- Camp CR, 1998. Subsurface drip irrigation: a review. *Transactions of the ASAE* 41(5): 33-53.
- Consoli S, Stagno F, Rocuzzo G, Cirelli GL and Intrigliolo F, 2014. Sustainable management of limited water resources in a young orange orchard. *Journal of Agricultural Water Management* 132: 60-68.
- Cook FJ, Fitch P, Thorburn PJ, Charlesworth PB and Bristow KL, 2006. Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Journal of Environmental Modelling & Software* 21(9): 1353-1359.
- Cote CM, Bristow KL, Charlesworth PB, Cook FJ and Thorburn PJ, 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Journal of Irrigation Science* 22: 143-156.
- Douh B, Boujelben A, Khila S and Mguidiche A, 2013. Effect of subsurface drip irrigation system depth on soil water content distribution at different depths and different times after irrigation. *Larhyss Journal* 13: 7-16.
- El-nesr M, Alazba A and Simunek J, 2014. Hydrus simulations of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soils. *Journal of Irrigation Science* 32(2): 111-125.
- Fan W and Li G, 2018. Effect of soil properties on hydraulic characteristics under subsurface drip irrigation. In IOP Conference Series. *Earth and Environmental Science* 121(5): 042-052
- Irmak S, Djaman K and Rudnick DR, 2016. Effect of full and limited irrigation amount and frequency on subsurface drip-irrigated maize evapotranspiration, yield, and water use efficiency and yield response factors. *Irrigation Science* 34: 271-286.
- Khalili M, Akbari M, Hezarjaribi A, Zakerinia M and Abbasi F, 2014. Numerical versus empirical models for estimating wetting patterns in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Agriculture Engineering Research* 15(2): 1-14. (In Persian with English abstract)
- Khanmohamadi N and Besharat S, 2013. Simulating wetting front in drip irrigation using Hydrus-2D. *Journal of Water and Soil Resource Conservation* 4(2):15-27. (In Persian with English abstract)
- Kumar D, Kumar A, Sarkar S, Mohodi D, Thakuria P and Das J, 2015. Optimal design of flow rate in drip irrigation system to enhance the tomato cultivation. *International Journal of Agriculture. Environment and Biotechnology* 8(1): 11-19.
- Maurice B, Emile N and Charlotte U, 2016. Assessment of wetting pattern and moisture distribution under point source drip irrigation in NYAGATARE – RWANDA. *International Journal of Innovation and Scientific Research* 26(2): 484-493.

- Norouzian Z, Sadraddini AA, Nazemi AH and Delirhasannia R, 2016. Experimental and numerical investigations of soil water distribution under subsurface drip irrigation in level and sloping layered soils. *Water and Soil Science- University of Tabriz* 26(4.2):13-27. (In Persian with English abstract)
- Philip JR, 1984. Travel times from buried and surface infiltration point sources. *Journal of Water Resources Research* 20(7):990-994.
- Schaap MG, Leij FJ and van Genuchten MTh, 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic properties with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 25(1): 163–176.
- Shaju N, 2017. Soil moisture distribution status and wetting pattern under SDI. *International Journal of Engineering Science* 34(2): 47-48.
- Singh DK, Rajput TBS, Singh DK, Sikarwar HS, Sahoo RN and Ahmad T, 2006. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source. *Journal of Agriculture and Water Management* 83(1): 130-134.
- Souza CF, and Bizari DR, 2018, Soil solution distribution in subsurface drip irrigation in sugarcane. *Journal of Engenharia Agrícola* 38(2): 217-224.
- Wang S, Jiao X, Guo W, Lu J, Bai Y and Wang L, 2018. Adaptability of shallow subsurface drip irrigation of alfalfa in an arid desert area of Northern Xinjiang. *PLOS One*. 13(4): 0195965.
- Zur B, 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Journal of Irrigation Science*. 16: 101-106.