

ارزیابی نرم‌افزار HYDRUS 2D در برآورد عمق آب ذخیره‌شده و الگوی رطوبتی آبیاری قطره‌ای سطحی

محمد بزانه^{1*}، افشین خورسند¹، کامران زینالزاده²، سینا بشارت²

تاریخ دریافت: 94/03/19 تاریخ پذیرش: 94/10/29

1- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mohammad.bazzaneh@gmail.com

چکیده

مشخصات جبهه رطوبتی خاک حاصل از یک منبع نقطه‌ای سهم بسزایی در کارایی آبیاری قطره‌ای دارد. شکل پیاز رطوبتی به عوامل مختلفی نظیر بافت خاک، لایه‌بندی، ساختمان خاک و دبی قطره‌چکان بستگی دارد. اهداف این مطالعه شامل ارزیابی پیشروی جبهه رطوبتی شبیه‌سازی‌شده آبیاری قطره‌ای سطحی توسط نرم‌افزار HYDRUS 2D با داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه و برآورد عمق آب ذخیره‌شده در لایه‌های خاک هست. در این تحقیق، آبیاری قطره‌ای با روش T-Tape در مزرعه‌ای با خاک لوم شنی در 4 زمان مختلف (2، 4، 8 و 24 ساعت) انجام گرفت. رطوبت حجمی نمونه‌ها به روش وزنی اندازه‌گیری شد. ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده رطوبت حجمی خاک با استفاده از ضریب تبیین و پارامترهای خطای نسبی و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده انجام گرفت. بر اساس نتایج، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده برای مقادیر رطوبت در پروفیل خاک در فواصل شعاعی صفر و 10 سانتی‌متری از قطره‌چکان به ترتیب در محدوده 10 تا 15 و 7 تا 14 درصد محاسبه گردید. هم‌چنین متوسط خطای نسبی برای مقادیر مشابه رطوبت حجمی به ترتیب در محدوده 8 تا 16 و 7 تا 13 درصد و مقدار متوسط ضریب تبیین به ترتیب، 0/96 و 0/95 محاسبه شد. نتایج نشان داد که نرم‌افزار HYDRUS 2D در پیش‌بینی رطوبت حجمی خاک، دارای دقت قابل قبول هست. هم‌چنین سه سناریو شامل: 1- افزایش دبی دو برابری قطره‌چکان (Q2)، 2- افزایش چگالی ظاهری خاک (S1) و 3- کاهش چگالی ظاهری خاک (S2) جهت بررسی مقدار عمق آب ذخیره‌شده در پروفیل خاک مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تأثیر پارامتر چگالی ظاهری خاک (S1 و S2) بر روی مقدار عمق آب ذخیره‌شده به مراتب بیشتر از تأثیر دبی (Q2) هست. به طوری که کاهش 5 درصدی چگالی ظاهری خاک، مقدار عمق آب ذخیره‌شده در پروفیل خاک را به طور متوسط به میزان 69/85 درصد افزایش داد، این در حالی است که میزان این افزایش برای سناریوی افزایش 2 برابری دبی 41/91 درصد بود.

واژه‌های کلیدی: آبیاری قطره‌ای سطحی، پارامترهای هیدرولیکی خاک، جریان آب در خاک، نرم‌افزار دوبعدی هایدروس

Evaluation of HYDRUS 2D Software to Estimate Stored Water and Wetting Pattern of Surface Drip Irrigation

M. Bazaneh^{1*}, A. Khorsand¹, K. Zeinalzadeh², S. Besharat²

Received: 9 June 2015 Accepted: 19 January 2016

¹ Ph.D. Student of Irrigation and Drainage Engin., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Urmia Univ., Urmia, Iran

² Assist. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Urmia University, Urmia, Iran

*Corresponding Author, E-mail: mohammad.bazaneh@gmail.com

Abstract

Characteristics of a produced soil wetting front by a point source plays considerable role in the efficiency of drip irrigation. The Shape of wetting pattern depends on various factors such as soil texture and layers, soil structure and emitter discharge. The purposes of this study include evaluation of wetting front advancement and comparison of HYDRUS 2D model simulations of surface drip irrigation with measured data on the field and estimating the depth of stored water in soil layers. In this study, a drip irrigation using T-Tape method was carried out on a sandy-loam soil at four different irrigation times (2, 4, 8 and 24 hour). Volumetric water content of soil samples were measured by gravimetric method. Evaluation of the simulated and measured soil water content was performed by using adjusted coefficient of correlation (R^2), relative error (RE) and normalized root mean square errors (NRMSE) values. Based on the results, the NRMSE value for water content of soil profile with radial distances of zero and 10 (cm) from the dripper location, was calculated in the range of 10 to 15 and 7 to 14 percent, respectively. Also, the RE and average R^2 values for the same water content were calculated in the range of 8 to 16 and 7 to 13 percent and 0.96 and 0.95, respectively. The results indicated that the HYDRUS 2D model could predict the soil water content with appropriate precision. Also, three scenarios including 1-double discharge increment (Q2), 2-soil bulk density increment (S1) and 3- soil bulk density reduction (S2), were evaluated for investigating the amount of water stored in the soil profile. The results showed that the effect of soil bulk density parameter (S1 and S2) on the amount of stored water depth is greater than the impact of discharge (Q2). So as a reduction of 5% in bulk density, on average, increased the stored water depth in the soil profile the rate of 69.85 percent, while this enhancement for the 2-fold increase in the discharge scenario was 41.91 percent.

Keywords: HYDRUS 2D Software, Soil hydraulic parameters, Surface drip irrigation, Water flow in soil

توسط قطره‌چکان‌ها، الگوی خیس شدگی خاک برای تعیین فاصله مناسب قطره‌چکان‌ها باید مشخص شود (خانجانی و دلیر حسن‌نیا 1393). تحقیقات زیادی با استفاده از نرم‌افزارهای تجربی، تحلیلی و عددی برای

مقدمه

آبیاری قطره‌ای به دلیل راندمان بالا، سیستم مناسب آبیاری در بسیاری از مناطق کم آب است. برای اطمینان از مرطوب شدن محدوده مورد نظر خاک

هیدرولیکی خاک بسیار ضروری است و شناسایی این پارامترها با کاربرد نرم‌افزار HYDRUS درجه اطمینان را بالا می‌برد (شهیدی و همکاران 1391). اسکگز و همکاران (2004) شبیه‌سازی‌های جریان رطوبتی حاصل از آبیاری قطره‌ای در خاک به‌دست‌آمده توسط نرم‌افزار HYDRUS را با نتایج مزرعه‌ای مقایسه کردند و نشان دادند که نتایج حاصل از این نرم‌افزار تطابق بالایی با داده‌های واقعی دارد.

سیال و اسکگز (2009) به بررسی الگوی پخش آب ایجادشده با لوله‌های سفالی به طول 20 متر و عمق 40 سانتی‌متر برای 4 ارتفاع فشار در مزرعه آزمایشی در پاکستان پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که داده‌های واقعی با نتایج حاصل از نرم‌افزار HYDRUS در تخمین الگوی رطوبتی تطابق بالایی دارد. تحقیقات مشابه دیگری برای ارزیابی نحوه پیشروی جبهه رطوبتی تحت منبع قطره‌ای صورت گرفته است (لی و همکاران 2004، زارع ایبانه و همکاران 1389، دابرال و همکاران 2012). رحیم‌زادگان و همکاران (1977) و خان‌محمدی و همکاران (1391) مطالعاتی در مورد تأثیر مشخصات هیدرولیکی خاک در آبیاری قطره‌ای سطحی انجام داده‌اند. در این زمینه در مورد آبیاری قطره‌ای سطحی و به‌خصوص تأثیر مشخصات هیدرولیکی خاک در کارایی این روش آبیاری، مطالعات محدودی انجام گرفته است.

اهداف این تحقیق، ارزیابی تأثیر مشخصات هیدرولیکی خاک در پیشروی جبهه رطوبتی عمودی و افقی آب حاصل از آبیاری قطره‌ای سطحی با روش T-Tape و مقایسه داده‌های مزرعه‌ای و داده‌های شبیه‌سازی‌شده با نرم‌افزار HYDRUS 2D است. همچنین سه سناریو مختلف، برای ارزیابی تأثیر افزایش 2 برابری دبی (Q2)، افزایش و کاهش 5 درصدی چگالی ظاهری خاک (S1 و S2) بر میزان عمق آب ذخیره‌شده در لایه‌های مختلف خاک توسط نرم‌افزار HYDRUS 2D شبیه‌سازی گردید.

تخمین الگوی جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای انجام شده است. شوارتزمن و زور (1986) از اولین کسانی بودند که به‌منظور تخمین ابعاد پیاز رطوبتی گام‌های مؤثری برداشتند.

نرم‌افزار HYDRUS 2D دارای قابلیت‌هایی همچون شبیه‌سازی جریان آب و املاح در خاک اشباع و غیراشباع از طریق حل عددی معادله ریچاردز، توزیع مکانی ریشه، جذب آب توسط ریشه، نرم‌افزار دورنر و کوسوگی برای خصوصیات هیدرولیکی خاک، شبیه‌سازی انتقال ویروس، کلئید و باکتری هست. (سیمونک و همکاران 2006). همچنین با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان آبشویی عناصر سمی و انتقال آن‌ها به آب‌های زیرزمینی را شبیه‌سازی نمود، خروجی‌های این نرم‌افزار به‌شدت وابسته به دقت و صحت داده‌های ورودی مربوط به خصوصیات هیدرولیکی خاک هست. همچنین وجود یون‌های سدیم، پتاسیم، منیزیم، کلسیم و سولفات در خاک نیز تا حدودی می‌توانند در دقت خروجی‌های نرم‌افزار محدودیت ایجاد کنند. این محدودیت به‌دلیل جایگزینی فلزات سنگین با این یون‌ها در واکنش‌های تعادلی هست (سیمونک و همکاران 2006).

از این نرم‌افزار در مطالعات بسیاری برای تحلیل رطوبت و شوری خاک و نیز مسائل مرتبط با رشد گیاه استفاده شده است (فورکتسا و همکاران 2009، سیمونک و همکاران 2008، خی و همکاران 2011). سیمونک و همکاران (2008) شبیه‌سازی شبکه غیر-متعادل آب و املاح را با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS انجام دادند. با استفاده از داده‌های مربوط به جریان آب، نرم‌افزار HYDRUS مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد نرم‌افزار، ارزیابی خوبی از داده‌ها دارد و توانسته است توزیع آب را در مقایسه با مقادیر مشاهداتی به‌خوبی توصیف نماید. مدل‌سازی سیستم کود آبیاری در کشت پیاز نشان داد که برای افزایش کارایی مصرف، شناخت درست از پارامترهای

مواد و روش‌ها

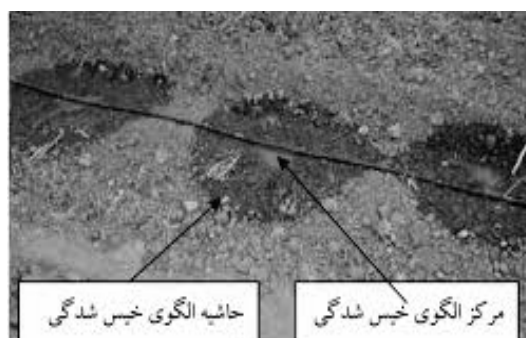
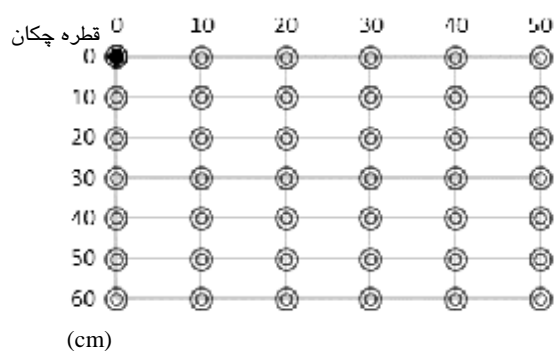
آزمایش‌های میدانی

زمان‌های آبیاری 2، 4، 8 و 24 ساعت در نظر گرفته شد. مقدار دبی قطره‌چکان‌ها بر اساس اندازه‌گیری حجمی 3 لیتر در ساعت و در طول آزمایش ثابت بود. بر اساس دبی قطره‌چکان‌ها و زمان کاربرد، حجم آب کاربردی به ترتیب 6، 12، 24 و 72 لیتر به دست آمد. در انتهای هر آبیاری، پروفیلی از خاک در وسط پياز رطوبتی حفر گردید. شکل 1 تصویر شماتیک نقاط نمونه‌برداری و محل قطره‌چکان را نشان می‌دهد. رطوبت وزنی نمونه‌های به دست آمده از پروفیل‌های حفر شده پس از خشکاندن در آون محاسبه گردید (شکل 1).

آزمایش‌های میدانی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه ارومیه با مختصات 37 درجه و 32 دقیقه شمالی، 45 درجه و 2 دقیقه شرقی و ارتفاع 1332 متر از سطح دریا انجام گرفت. خاک محل آزمایش تا عمق 80 سانتی-متری، برای یکنواختی بیشتر شخم زده شد. بافت خاک به روش هیدرومتری، لوم شنی تعیین گردید. نتایج خصوصیات فیزیکی خاک در جدول 1 ارائه شده است (خان‌محمدی و همکاران 1391). در این تحقیق از روش آبیاری قطره‌ای T-Tape استفاده گردید. قطر لوله‌ها 2 سانتی‌متر و فاصله قطره‌چکان‌ها روی لوله 1 متر بود.

جدول 1- مشخصات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی (خان‌محمدی و همکاران 1391).

رطوبت خاک (%)		چگالی ظاهری ($gc\ m^{-3}$)	رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	بافت خاک	عمق (cm)
مکش 1500 (kpa)	مکش 33 (kpa)						
5/4	28	1/55	5/6	39/6	54/8	لوم شنی	0-100



شکل 1- شمای کلی نقاط نمونه‌برداری و محل قطره‌چکان.

نرم‌افزار HYDRUS 2D/3D

آب در یک محیط همسان، معادله ریچاردز است که از ترکیب معادله داریسی و قانون بقای جرم به صورت زیر هست (بایبوردی 1385):

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

با توجه به عدم هم‌پوشانی قطره‌چکان‌ها، روند حرکت آب در طول نفوذ و توزیع، به صورت متقارن در نظر گرفته شد. جهت شبیه‌سازی نفوذ و توزیع رطوبت خاک، نرم‌افزار HYDRUS 2D مورد استفاده قرار گرفت (سیمونک و همکاران 2006). معادله‌ی حاکم بر جریان

در این تحقیق، سه سناریو مختلف توسط نرم افزار HYDRUS 2D تعریف شد و تأثیر آن‌ها روی عمق آب ذخیره شده در لایه‌های خاک ارزیابی گردید. این سناریوها عبارت‌اند از: 1- افزایش 2 برابری دبی قطره‌چکان در پروفیل 60 سانتی‌متری خاک (Q2) -2- افزایش 5 درصدی چگالی ظاهری خاک نسبت به مقدار اولیه برای 30 سانتی‌متر عمق اولیه خاک (S1) -3- کاهش 5 درصدی چگالی ظاهری خاک نسبت به مقدار اولیه آن برای 30 سانتی‌متر عمق اولیه خاک (S2).

ارزیابی نرم افزار HYDRUS 2D

برای ارزیابی و سنجش اعتبار نرم افزار با نتایج اندازه‌گیری در سطح مزرعه از یک سری شاخص‌های ارزیابی شامل ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده¹، جذر میانگین مربعات خطا²، معیار نش ضریب باقی‌مانده‌ها⁴، خطای نسبی⁵ و ضریب تبیین⁶ استفاده گردید. روابط مورد استفاده به شرح زیر می‌باشند:

$$\text{NRMSE} = \frac{1}{O} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \cdot 100 \quad [4]$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad [5]$$

$$\text{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [6]$$

$$\text{CRM} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad [7]$$

$$\text{RE} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \cdot 100 \quad [8]$$

1- Normalized root mean square error

2- Root mean square error

3- Nash-Sutcliffe

4- Coefficient of residuals

5- Relative error

6- Coefficient of determination

که در آن؛ q رطوبت حجمی آب خاک ($L^3 L^{-3}$)، h پتانسیل فشاری آب (L)، t زمان (T)، r محور افقی، z محور عمودی و $K(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک ($L T^{-1}$) هست. ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از مدل ون‌گنوختن-معلم و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک با مدل معلم، طبق معادلات 2 و 3 به دست می‌آید (ونگنوختن 1980، معلم 1976، النصر و همکاران 2014):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|)^m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n \neq 1 \quad [2]$$

$$K(h) = K_s \frac{q - q_r}{q_s - q_r} \left(\frac{h}{h_0} \right)^{\frac{1}{n}} \quad [3]$$

q_r و q_s به ترتیب رطوبت حجمی اشباع و رطوبت حجمی باقی‌مانده در خاک ($L^3 L^{-3}$)، L پارامتر تجربی مربوط به پیوستگی خلل و فرج خاک، h مکش ماتریک (L)، n و m پارامترهای شکل منحنی مشخصه رطوبتی خاک، a عکس مقدار ورود هوا (L^{-1}) و K_s هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ($L T^{-1}$) می‌باشند. در طول کاربرد آب در مرز، شدت جریان ثابت 2/387 سانتی‌متر بر ساعت برای لوله مورد استفاده قرار گرفت که بر اساس متوسط شدت کاربرد آب 3 لیتر بر ساعت در واحد متر و مساحت خیس شده قطره‌چکان محاسبه گردید. رطوبت اندازه‌گیری شده خاک قبل از انجام آزمایش (10 درصد)، به عنوان شرایط اولیه در نظر گرفته شد و این مقدار در تمام پروفیل خاک دارای مقداری ثابت بود. اجرای نرم افزار HYDRUS 2D به پارامترهای هیدرولیکی خاک (α ، L ، n ، K_s ، q_r ، q_s) نیاز دارد. در این مطالعه پارامترهای هیدرولیکی خاک توسط مدل Rosetta که در HYDRUS 2D گنجانده شده است، صورت گرفت (اسچاپ و همکاران 2001).

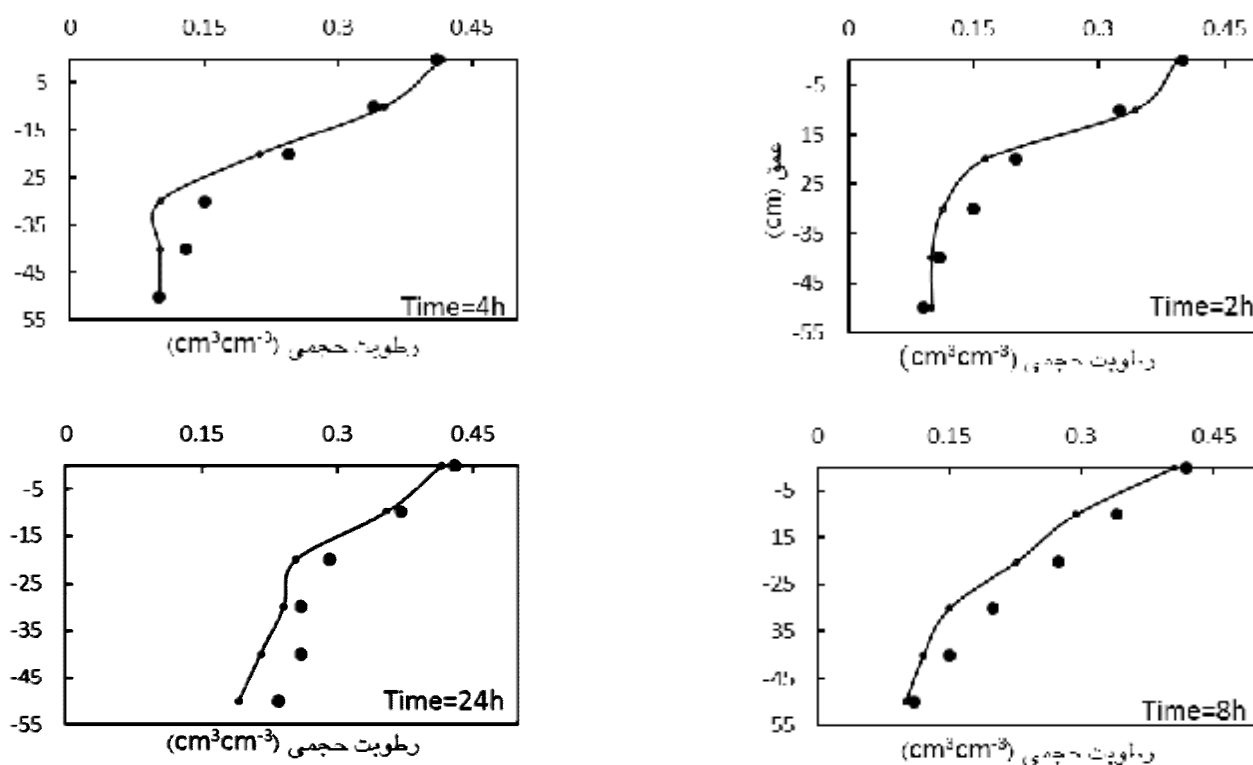
سناریوهای مورد مطالعه

همکاران (2008). آماره CRM نشانگر تمایل نرم افزار برای بیش برآورد و یا کم برآورد در مقایسه با اندازه گیری ها هست. که مقادیر مثبت آن نشانگر کم برآورد و مقادیر منفی بیانگر بیش برآورد است. همچنین هر چه این مقدار از نظر قدر مطلق به صفر نزدیکتر باشد کم یا بیش برآورد، کمتر است.

شاخص نش سائکلیف هرچه به یک نزدیکتر باشد بیانگر دقت مناسب مدل بوده و مقدار شاخص جذر میانگین مربعات خطا نیز هر چه به عدد صفر نزدیکتر باشد حاکی از دقت مدل است.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}} \quad [9]$$

که در آن: S_i مقادیر پیش بینی شده، O_i مقادیر اندازه گیری شده، n تعداد مشاهدات و \bar{O} میانگین مقادیر اندازه گیری شده هست. مقدار NRMSE ایده آل برای مدل سازی کمتر از 10% هست. NRMSE در بازه 10 تا 20% و 20 تا 30% به ترتیب نشانگر وضعیت مناسب و متوسط نرم افزار در پیش بینی و بیشتر از 30% نشان دهنده عدم اطمینان از نرم افزار هست (سینگ و



شکل 2- مقایسه رطوبت های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با استفاده از HYDRUS 2D در زیر قطره چکان، اندازه گیری ها (نقاط پر) و شبیه سازی ها (خط ممتد).

مدت زمان 2، 4، 8 و 24 ساعت ارائه شده است. همچنین مقادیر کمی پارامترهای ارزیابی و سنجش اعتبار نرم افزار در پیش بینی رطوبت حجمی، در جدول 2 درج شده است. مقدار NRMSE در هر 4 زمان مختلف کمتر از 20 درصد (در محدوده 10 تا 15 درصد)

نتایج و بحث

شبیه سازی رطوبت حجمی

مقایسه مقادیر رطوبت حجمی اندازه گیری شده در مزرعه و پیش بینی شده توسط نرم افزار HYDRUS 2D در شکل 2 به صورت عمقی، برای زیر قطره چکان در

رطوبت حجمی، مناسب هست. کمترین و بیشترین مقدار خطای نرمال‌شده برای زمان 2 و 8 ساعت به ترتیب برابر با 9/89 و 13/47 درصد به دست آمد. مقدار RMSE، برای رطوبت حجمی در هر 4 زمان مختلف کمتر از 0/03 (در محدوده 0/01 تا 0/03 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) به دست آمد که این آماره در اعماق مختلف برای شعاع 10 سانتی‌متر از قطره‌چکان، کمی زیاد به دست آمده است. شاخص نش‌ساتکلیف برای زمان‌های 2، 4، 8 و 24 ساعت در همین فاصله از قطره‌چکان نزدیک به یک بوده و نشان‌دهنده دقت مناسب نرم‌افزار، در پیش‌بینی رطوبت هست. لازم به ذکر است که مقادیر شاخص نش‌ساتکلیف در اعماق مختلف برای منطقه زیر قطره‌چکان نسبت به شعاع 10 سانتی‌متر از آن، کمی مناسب‌تر و با دقت بالا محاسبه گردیدند. مثبت بودن مقادیر CRM نشان می‌دهد که در مجموع نرم‌افزار HYDRUS 2D، رطوبت را کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌کند. محدوده CRM برای شعاع 10 سانتی‌متر در 2، 4، 8 و 24 ساعت بین 0/06 تا 0/12 هست. با توجه به جدول 3، متوسط خطای نسبی نرم‌افزار در پیش‌بینی رطوبت حجمی، در عمق‌های مختلف خاک زیر قطره‌چکان برای 2، 4، 8 و 24 ساعت در محدوده 7 تا 13 درصد محاسبه گردید که بیشترین خطا در بین 4 زمان مختلف مربوط به زمان 8 ساعت هست. ضریب تبیین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی رطوبت حجمی برای شعاع 10 سانتی‌متر در زمان‌های 2، 4، 8 و 24 ساعت نزدیک به یک بوده و بالای 90 درصد محاسبه گردید. سیال و اسکاگز (2009) برای شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک در آبیاری سطحی از نرم‌افزار HYDRUS (2D/3D) (سیمونک و همکاران 2006) بهره بردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که پیش‌بینی درصد رطوبت خاک با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS همبستگی خوبی با داده‌های مشاهداتی دارد (ضریب تبیین 0/98 به دست آمد).

به دست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی رطوبت حجمی، مناسب هست. کمترین و بیشترین مقدار خطای نرمال برای زمان 2 و 8 ساعت به ترتیب برابر با 9/59 و 14/37 درصد بود. مقدار RMSE، برای رطوبت حجمی در هر 4 زمان مختلف کمتر از 0/04 (در محدوده 0/02 تا 0/04 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) تعیین شد. استفاده از این معیار برای مقایسه اختلاف نتایج مدل برای شبیه‌سازی یک فرآیند، مناسب بوده و هر چه کوچک‌تر باشد آن مدل بهتر خواهد بود. شاخص نش - ساتکلیف برای زمان‌های 2، 4، 8 و 24 ساعت، در بیش از 70 درصد موارد نزدیک به یک بود و نشان‌دهنده دقت مناسب نرم‌افزار، در پیش‌بینی رطوبت هست. مقدار آماره CRM در هر 4 زمان مختلف، مثبت به دست آمد که نشان داد، نرم‌افزار HYDRUS 2D کمی تمایل به کم‌برآورد دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که این نرم‌افزار، رطوبت را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده، شبیه‌سازی می‌کند. محدوده CRM برای اعماق مختلف برای در زیر قطره‌چکان در 4 زمان مختلف بین 0/05 تا 0/14 هست. متوسط خطای نسبی نرم‌افزار در پیش‌بینی رطوبت، برای زیر قطره‌چکان در 2، 4، 8 و 24 ساعت، در محدوده 8 تا 16 درصد محاسبه گردید (جدول 3). همچنین بیشترین خطای نسبی کم‌برآورد، مربوط به زمان 8 ساعت با مقدار 15/7 درصد بود. نمایه ضریب تبیین (R^2)، پراکنش مقادیر اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده را نسبت به هم نشان می‌دهد. ضریب تبیین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی رطوبت حجمی برای شعاع صفر سانتی‌متر در زمان‌های 2، 4، 8 و 24 ساعت خیلی نزدیک به یک و بالای 90 درصد محاسبه گردید. مقدار NRMSE برای زمان‌های 2 و 24 ساعت کمتر از 10 درصد (در محدوده 7 تا 10 درصد) به دست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی رطوبت حجمی برای دو زمان 2 و 24 ساعت، عالی هست. مقدار NRMSE برای زمان‌های 4 و 8 ساعت کمتر از 20 درصد (در محدوده 12 تا 14 درصد) به دست آمد که بر اساس این آماره، مدل‌سازی

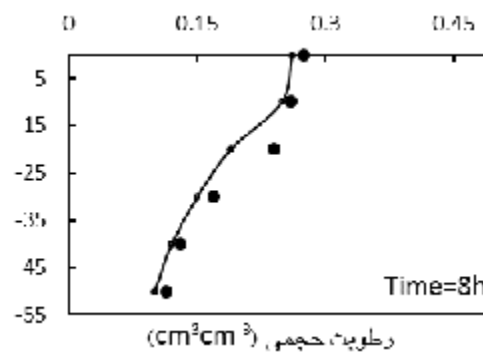
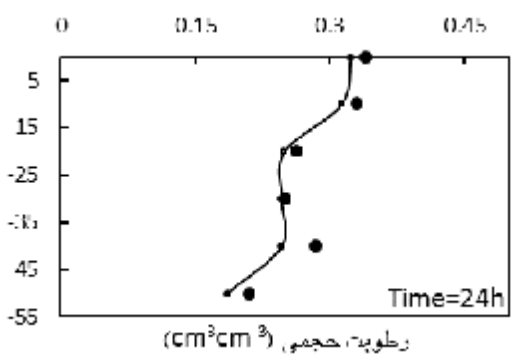
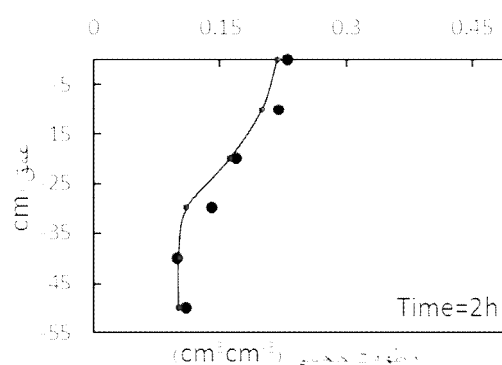
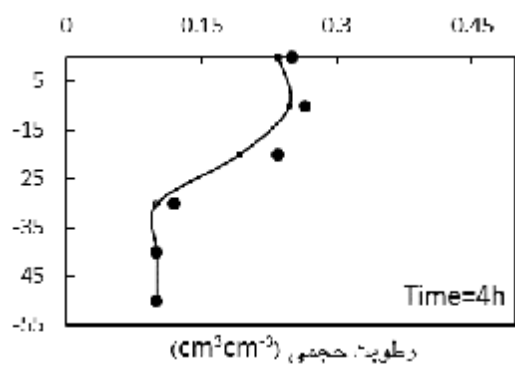
جدول 2- پارامترهای آماری ارزیابی نرم افزار برای رطوبت حجمی در زیر قطره چکان.

NRMSE (%)	RMSE ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	NS (-)	CRM (-)	RE* (%)	R ² (-)	زمان (hr)
9/59	0/023	0/96	0/051	8/2	0/967	2
11/93	0/031	0/92	0/075	12/9	0/949	4
14/37	0/039	0/83	0/134	15/7	0/954	8
10/33	0/032	0/79	0/094	10/5	0/948	24
11/56	0/031	0/88	0/089	11/83	0/955	متوسط

* مقادیر مثبت بیانگر بیش برآورد هست.

نرم افزار HYDRUS 2D پرداختند. آن‌ها نتایج شبیه سازی‌ها را با داده‌های به دست آمده از مزرعه در زمان‌های مختلف پس از آبیاری و 72 ساعت پس از آبیاری مورد مقایسه قرار دادند. این نتایج نشان داد که نرم افزار توانسته روند تغییرات را مشابه آنچه که در پروفیل خاک رخ داده است شبیه سازی کند.

در تحقیق حاضر، ضریب تبیین رطوبت حجمی در اعماق مختلف برای منطقه زیر قطره چکان و شعاع 10 سانتی متر از آن در مدت زمان‌های 2، 4، 8 و 24 ساعت بالای 90 درصد محاسبه گردید که با نتایج سیال و اسکاگز (2009) تطابق مناسبی دارد. نقوی و همکاران (1391) در تحقیقی به بررسی توزیع رطوبت در خاک اطراف یک قطره چکان نقطه‌ای با شبیه سازی توسط



شکل 3- مقایسه رطوبت‌های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده با استفاده از HYDRUS 2D در $R=10$ اندازه گیری‌ها (نقاط پر) و شبیه سازی‌ها (خط ممتد).

سپری شدن 72 ساعت از اتمام آبیاری و میانگین خطای RMSE 0/002 به دست آمد که به مقادیر واقعی نزدیک‌تر شده بود. تحقیق حاضر از نظر میانگین خطای RMSE رطوبت حجمی خاک برای قطره‌چکان در شعاع صفر و 10 سانتی‌متری آبیاری قطره‌ای به ترتیب 0/031 و 0/023 به دست آمد که در مقایسه با میانگین خطای RMSE تحقیق نقوی و همکاران (1391) کمی زیاد به دست آمده است.

البته میزان رطوبت خاک در نقاطی که افزایش رطوبت در آنجا رخ داده است، با خطای بیشتری برآورد شده بود. بیشینه میزان خطای RMSE 0/05 به دست آمد که به ازای زمان 1/5 ساعت از شروع آبیاری در عمق 30 سانتی‌متری در محل نصب قطره-چکان مشاهده شد. همچنین با افزایش زمان آبیاری و یکنواخت شدن رطوبت خاک در اثر توزیع مجدد رطوبت، نرم‌افزار برآورد بهتری ارائه کرد. برآوردها با

جدول 3- پارامترهای آماری ارزیابی نرم‌افزار برای رطوبت حجمی در فاصله شعاعی 10 سانتی‌متر.

NRMSE (%)	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	NS (-)	CRM (-)	RE* (-)	R ² (-)	زمان (hr)
9/89	0/017	0/88	0/079	7/8	0/955	2
12/22	0/024	0/88	0/098	9/4	0/963	4
13/47	0/028	0/73	0/116	12/9	0/921	8
7/82	0/022	0/76	0/069	7/1	0/945	24
10/85	0/023	0/81	0/091	9/3	0/946	متوسط

*مقادیر مثبت بیان‌گر بیش‌برآورد می‌باشد.

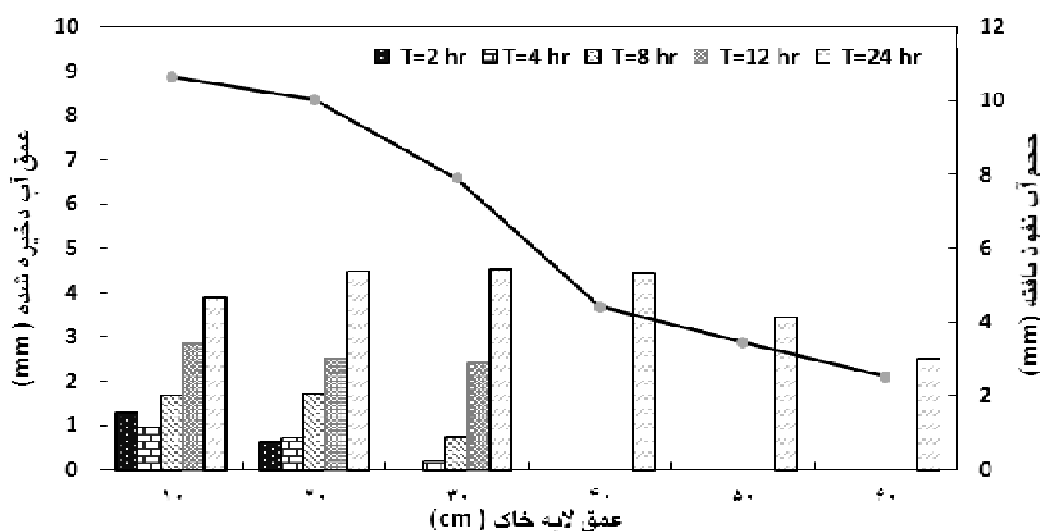
می‌توان دور آبیاری را طولانی‌تر نمود. شکل‌های 6 تا 8 مربوط به مقادیر عمق آب ذخیره‌شده در سناریوهای مختلف برای زمان‌های 2، 4، 8، 12 و 24 ساعت هست. عمق آب ذخیره‌شده برای حالت نرمال و 2 برابر افزایش دبی در 6 عمق (10، 20، 30، 40، 50 و 60 سانتی‌متر) محاسبه گردید. در حالت نرمال برای عمق‌های 40، 50 و 60 سانتی‌متر در زمان 24 ساعت، آب ذخیره‌شده وجود دارد (شکل 5). در سناریوی Q2 برای عمق‌های 40، 50 و 60 سانتی‌متر علاوه بر زمان 24 ساعت، در زمان 12 ساعت هم آب ذخیره‌شده وجود دارد (شکل 6). همچنین زمانی که دبی 2 برابر شده، عمق آب ذخیره‌شده در عمق‌های 30، 40 و 50 سانتی‌متر افزایش یافته است. با توجه به شکل‌های 5 و 6، بیشترین افزایش عمق آب ذخیره‌شده در لایه‌ها بیشتر در زمان‌های 2 و 24 ساعت مشاهده می‌شود که در زمان 2 ساعت در حالت افزایش 2 برابری دبی نسبت به حالت نرمال، مقدار عمق آب ذخیره‌شده تقریباً دو برابر شده است. به‌طورکلی

سناریوهای مختلف

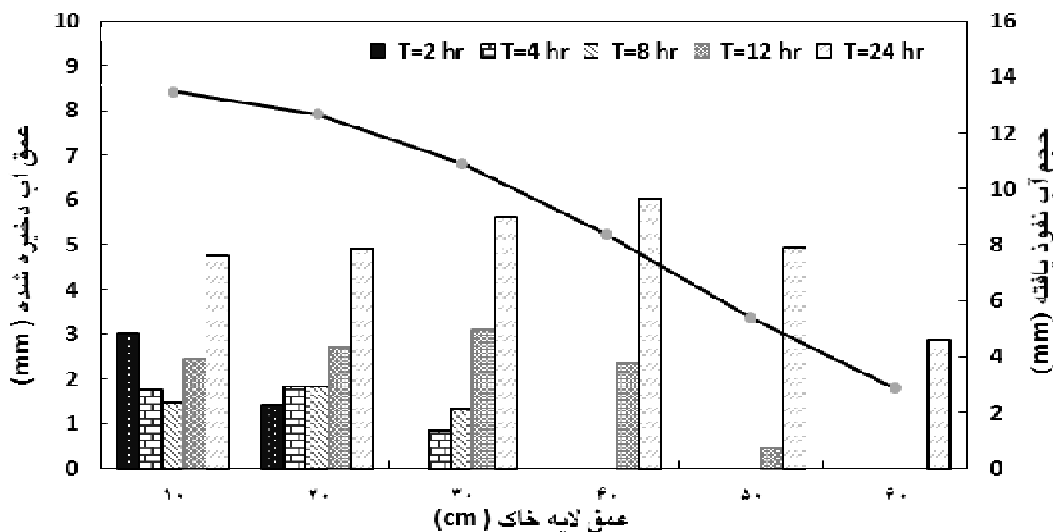
نتایج توزیع رطوبت خاک برای سناریوهای افزایش 2 برابری دبی (Q2) و کاهش چگالی ظاهری خاک (S2)، نشان داد که رطوبت حجمی تا عمق و فاصله 30 سانتی‌متری افزایش پیدا کرده که این افزایش در سناریوی کاهش چگالی ظاهری خاک بیشتر مشهود است. همچنین در سناریوی افزایش چگالی ظاهری خاک (S1)، رطوبت حجمی کاهش چشم‌گیری داشته، به‌طوری‌که در عمق و فاصله 30 سانتی‌متری، رطوبت حجمی از 35 درصد به 20 درصد کاهش یافته است. نظر به تأثیر پتانسیل ماتریک خاک در جذب آب توسط گیاه با توجه به نتایج سناریوهای حاضر می‌توان بیان نمود که مکش معادل با رطوبت ظرفیت مزرع‌ای برای سناریوهای (Q2)، (S2) و (S1) به ترتیب در عمق‌های 16، 20 و 5 سانتی‌متری رخ می‌دهد. بنابراین به دلیل بیشتر بودن توزیع عمقی آب سهل‌الوصول در ناحیه توسعه ریشه و امکان جذب بیشتر گیاه، برای سناریوی (S2)

دلیل کاهش نفوذپذیری لایه‌های سطحی خاک بوده است. همچنین با توجه به شکل 8 می‌توان اذعان نمود که بیشترین تأثیر در میزان عمق آب ذخیره‌شده در خاک مربوط به سناریوی کاهش چگالی ظاهری خاک (S2) هست. در این حالت، به‌طور متوسط مقدار عمق آب ذخیره‌شده در پروفیل خاک به میزان 69/85 درصد افزایش یافته است که 1/66 برابر نسبت به سناریوی افزایش 2 برابری دبی است. بیشترین افزایش عمق آب ذخیره‌شده در زمان‌های 2 ساعت (عمق آب از 0/8 به 3/8 میلی‌متر در عمق 10 سانتی‌متری و از عمق آب 0/3 به 1/8 میلی‌متر در عمق 20 سانتی‌متری افزایش پیدا کرده) و 24 ساعت مشاهده می‌شود. همچنین قابل‌ذکر است که در زمان 12 ساعت برای حالت نرمال، در عمق‌های 30-40 و 40-50 آبی در پروفیل خاک ذخیره نشده است، درحالی‌که مقدار عمق آب ذخیره‌شده برای عمق‌های مذکور در سناریوی S2 به ترتیب برابر با 3/9 و 2 میلی‌متر هست (شکل 8).

می‌توان گفت که با افزایش 2 برابری دبی (Q2)، عمق آب ذخیره‌شده برای زمان‌های 2، 4، 8، 12 و 24 ساعت، دو برابر نشده و افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در عمق آب ذخیره‌شده به‌خصوص در عمق‌های بالاتر مشاهده نشد. مقایسه شکل 7 با اشکال 5 و 6 نشان می‌دهد که تأثیر افزایش چگالی ظاهری خاک (S1) بر روی مقدار عمق آب ذخیره‌شده به‌مراتب بیشتر از تأثیر دبی هست. با توجه به شکل 7 مشاهده می‌شود که مقدار آب ذخیره‌شده در عمق‌های 50 و 60 سانتی‌متری بسیار کم شده و به ترتیب با کاهش 67/45 و 91/9 درصدی مواجه گردید است، لذا می‌توان بیان نمود که افزایش چگالی ظاهری لایه‌های سطحی خاک موجب کاهش بیش‌ازحد عمق آب ذخیره‌شده گردیده (به‌خصوص در لایه‌های زیرین) و گیاه را با تنش آبی مواجه خواهد کرد. از آنجایی‌که در سناریوی S1، افزایش چگالی ظاهری خاک صرفاً بر روی عمق 30 سانتی‌متری از سطح لایه خاک اعمال‌شده، لذا می‌توان نتیجه‌گیری نمود که کاهش مقدار آب ذخیره‌شده در عمق‌های پایین به



شکل 5- عمق آب ذخیره شده (محور چپ) و کل آب نفوذ یافته (محور راست) برای حالت نرمال.



شکل 6- عمق آب ذخیره شده (محور چپ) و کل آب نفوذ یافته (محور راست) برای افزایش 2 برابری دبی.

افزایش چگالی ظاهری، مقدار عمق آب ذخیره شده (از نظر قدر مطلق) 47/86 درصد برای 6 عمق خاک (پروفیل 60 سانتی متری) کاهش داشته است. شایان ذکر است که افزایش چگالی ظاهری خاک رابطه معکوس با عمق آب ذخیره شده نشان می‌دهد. این امر می‌تواند به دلیل تراکم شدن خاک و به تبع آن، کاهش تخلخل خاک باشد. همچنین در سناریوی S2، بیشترین و کمترین افزایش عمق آب ذخیره شده در لایه‌های 30-40 و 20-40/25 و 129/8 که مقادیرشان به ترتیب برابر با 40/25 درصد اتفاق افتاده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به‌طور متوسط با کاهش چگالی ظاهری خاک، مقدار عمق آب ذخیره شده 69/85 درصد برای 6 عمق خاک افزایش داشته است. از آنجایی که کاهش مقدار چگالی ظاهری خاک برای لایه 30 سانتی متری از سطح خاک اعمال شده است لذا در چنین حالتی با افزایش میزان نفوذپذیری آب در لایه فوقانی دور از انتظار نیست که آب ذخیره شده در این عمق از خاک بیشترین مقدار را داشته باشد. لذا می‌توان در آبیاری قطره‌ای به جای افزایش دبی قطره‌چکان، با کاهش چگالی ظاهری خاک علاوه بر افزایش میزان آب ذخیره شده، از توزیع رطوبتی مناسبی در پروفیل خاک نیز برخوردار شد.

در شکل‌های 5 تا 8، محور عمودی سمت راست مربوط به عمق آب نفوذی بر حسب میلی‌متر هست. همان‌طور که مشاهده می‌شود عمق آب نفوذ یافته در لایه 10 تا 60 سانتی متری، روندی نزولی دارد. بیشترین عمق آب نفوذ یافته 15 میلی‌متر (لایه 10 سانتی متری) است که مربوط به سناریوی کاهش چگالی ظاهری خاک (S2) هست (شکل 8). و کمترین عمق آب نفوذی حدود 1 میلی‌متر (لایه 60 سانتی متری) است که مربوط به افزایش چگالی ظاهری خاک (S1) هست (شکل 7). درصد تغییرات عمق آب ذخیره شده در سناریوهای مختلف نسبت به حالت نرمال در جدول 4 درج شده است. که بر اساس این مقادیر، در سناریوی Q2، بیشترین و کمترین افزایش عمق آب ذخیره شده در لایه‌های 30-40 و 60-50 اتفاق افتاده است به ترتیب با مقادیر 89/39 و 14/29 درصد رخ داده است. همچنین قابل ذکر است که با افزایش 2 برابری دبی، مقدار عمق آب ذخیره شده برای پروفیل 60 سانتی متری خاک، به‌طور متوسط 41/91 درصد افزایش داشته است. در سناریوی S1، بیشترین و کمترین کاهش عمق آب ذخیره شده در لایه‌های 60-50 و 30-40 با مقادیر (از نظر قدر مطلق) به ترتیب برابر با 91/9 و 30/49 درصد هست. به‌طور متوسط با

است و تأثیر تغییرات دبی لوله‌ها نسبت به تأثیر مشخصات خاک ناچیز به دست آمده است این نتایج با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد. با توجه به شکل‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در تحقیق حاضر (شکل 4) و در مقایسه با تحقیق رحیم‌زادگان (1977) می‌توان مشاهده کرد که با افزایش فاصله و عمق مقدار رطوبت کاهش یافته است. در تحقیق حاضر تغییرات چگالی ظاهری خاک که یکی از مشخصات هیدرولیکی خاک هست نسبت به افزایش 2 برابری دبی تأثیر بیشتری روی عمق آب ذخیره شده در پروفیل 60 سانتی‌متری داشت.

مطالعه قانی و همکاران (2015) نشان داد که نوع و میزان شخم زمین تأثیر معنی‌داری بر روی فرصت زمان نفوذ و عمق آب نفوذ یافته دارد و افزایش عمق شخم موجب کاهش چگالی ظاهری خاک و به تبع آن باعث افزایش حجم آب نفوذ یافته در پروفیل خاک خواهد شد که مطابقت خوبی با نتایج تحقیق حاضر دارد. همچنین النصر و همکاران (2014) خاطر نشان کردند که وجود یک لایه متراکم یا مرز غیرقابل نفوذ تأثیر بیشتری نسبت به دبی و تعداد قطره‌چکان در توزیع آب در ناحیه ریشه دارند. طبق تحقیق سیال و اسکاگز (2009) مشخصات هیدرولیکی خاک مهم‌ترین پارامتر در تغییرات شکل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای بوده

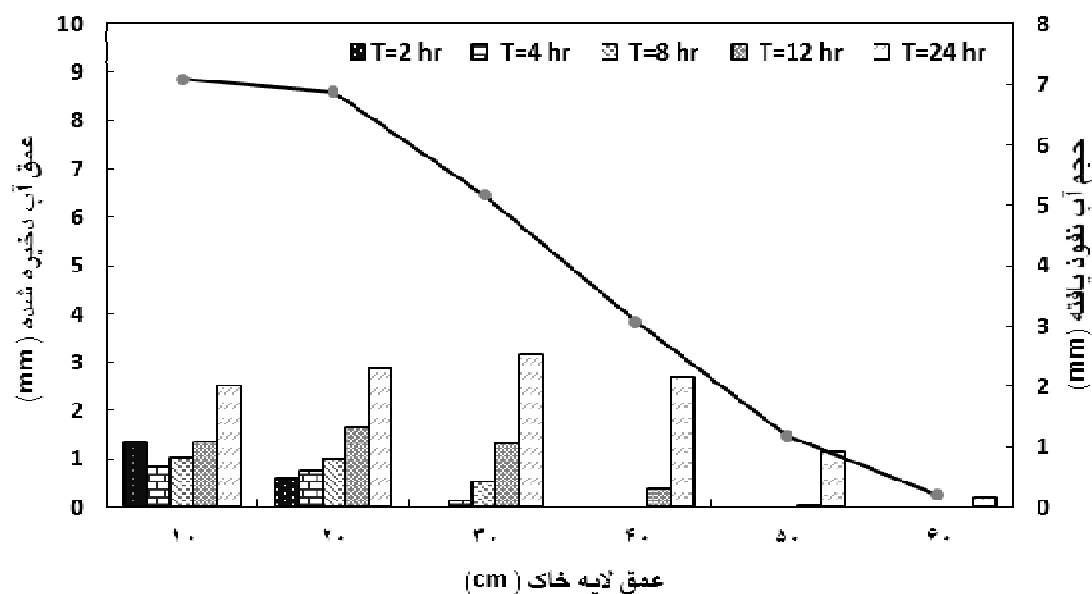
جدول 4- درصد تغییرات عمق آب ذخیره شده در سناریوهای مختلف نسبت به حالت نرمال.

عمق لایه خاک	افزایش 2 برابری دبی	افزایش چگالی ظاهری	کاهش چگالی ظاهری
0-10	26/58	-33/42	43/18
10-20	26/6	-31/39	40/25
20-30	38/34	-34/42	64/37
30-40	89/39	-30/49	129/8
40-50	56/27	-65/47	74/27
	14/29	-91/9	67/12
متوسط	41/91	-47/86	69/85

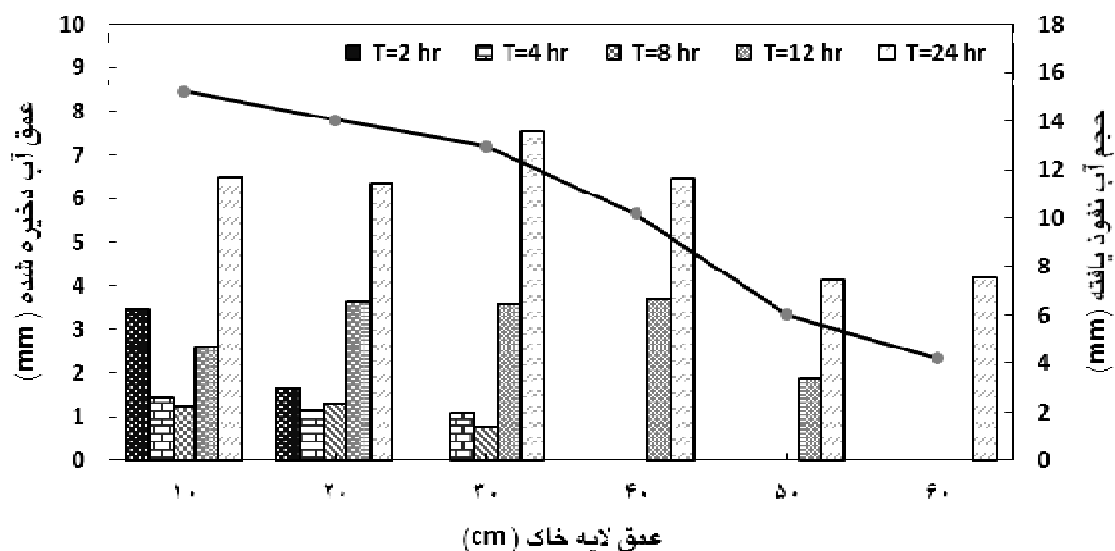
نتیجه‌گیری کلی

بیشترین افزایش عمق آب ذخیره شده در پروفیل 60 سانتی‌متری خاک بیشتر در زمان‌های 2 و 24 ساعت مشاهده گردید. نتایج نشان داد که تأثیر سناریوی S1 نسبت به سناریوی افزایش 2 برابری دبی به مراتب بیشتر است. در سناریوی S2 عمق آب ذخیره شده در لایه‌های پایین‌تر به شدت کاهش یافت. همچنین قابل‌ذکر است که بیشترین تأثیر در میزان عمق آب ذخیره شده در پروفیل 60 سانتی‌متری خاک به سناریوی S2 با افزایش متوسط مقدار عمق آب ذخیره شده به میزان 69/85 درصد مربوط است.

در تحقیق حاضر، مقادیر رطوبت حجمی اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار به صورت عمقی و شعاعی، در مدت‌زمان‌های 2، 4، 8 و 24 ساعت مقایسه شده و مقادیر آن‌ها با پارامترهای آماری ارزیابی شد که نتایج نشان‌گر تطابق خوب مشاهدات با نتایج نرم‌افزار بود. همچنین سه سناریوی افزایش 2 برابری دبی (Q2)، افزایش 5 درصدی (S1) و کاهش 5 درصدی (S2) چگالی ظاهری خاک توسط نرم‌افزار تعریف و با حالت نرمال مقایسه شد. در سناریوی Q2،



شکل 7- عمق آب ذخیره شده (محور چپ) و کل آب نفوذ یافته (محور راست) برای افزایش 5 درصدی چگالی ظاهری خاک.



شکل 8- عمق آب ذخیره شده (محور چپ) و کل آب نفوذ یافته (محور راست) برای کاهش 5 درصدی چگالی ظاهری خاک.

مطابق نتایج تحقیق حاضر، این تحکیم با افزایش چگالی ظاهری خاک، منجر به کاهش ظرفیت رطوبتی خاک می‌گردد. بنابراین می‌توان اذعان نمود که جهت کاهش تنش آبی گیاه و همچنین جلوگیری از آبیاری بی‌رویه، می‌توان با شخم‌زدن لایه سطحی خاک و به تبع آن کاهش چگالی ظاهری خاک، میزان آب قابل‌دسترس برای گیاه در پروفیل خاک را افزایش داد.

در این تحقیق مشخص گردید که چگالی ظاهری خاک یکی از مهم‌ترین پارامترها در میزان آب ذخیره‌شده در پروفیل خاک است. به طوری که بیشترین و کمترین مقادیر آب ذخیره‌شده در کل پروفیل خاک مربوط به کاهش و افزایش چگالی ظاهری خاک هست. در اواسط فصول زراعی، عملیات کشاورزی و آبیاری موجب تحکیم و متراکم شدن لایه سطحی خاک خواهد شد و

منابع مورد استفاده

- بایبوردی م، 1385. فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- خانجانی س و دلیر حسن نیا ر. 1393. بررسی گسترش جبهه رطوبتی در آبیاری قطره‌ای تحت منبع خطی در خاک دو لایه. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد 28، شماره 2، صفحه‌های 419 تا 429.
- خان‌محمدی ن، رضایی ح، بشارت س و بهمنش ج، 1391. ارزیابی شبیه‌سازی پروفیل رطوبتی خاک در آبیاری قطره‌ای بر اساس مشخصات هیدرولیکی خاک و اندازه‌گیری‌های میدانی. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، جلد 6، شماره 3، صفحه‌های 187 تا 195.
- زارع ایبانه ح، فرخی ا، وظیفه‌دوست م و اژدری خ، 1389. برآورد الگوی توزیع رطوبت خاک تحت آبیاری قطره‌ای در مزرعه پیاز، نشریه آب و خاک، جلد 24، شماره 6، صفحه‌های 1197 تا 1209.
- شهیدی ع و احمدی م، 1391. آموزش تصویری مدل هایدروس (شبیه‌سازی حرکت آب، املاح، حرارت، جذب آب توسط ریشه). انتشارات کلک زرین، تهران.
- نقوی ه، حسینی نیا م، کریمی‌گوغری ش و ایراندوست م، 1391. توانایی نرم افزار HYDRUS 2D در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک تحت سیستم آبیاری قطره‌ای زیرسطحی. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، جلد 16، شماره 61، صفحه‌های 59 تا 69.
- Dabral PP, Pandey Pk, Pandey A, Singh Kp and Singh MS, 2012. Modelling of wetting pattern under trickle source in sandy soil of Nirjuli, Arunachal Pradesh (India). *Irrigation Science* 30(1): 287-292.
- El-nesr M, Alazba A, 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. *Irrigation Science* 32(2): 111-125.
- Forkutsa I, Sommer R, Shirokova YI, Lamers JPA, Kienzler K, Tischbein B, Martius C and Vlek PLG, 2009. Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II. Soil salinity dynamics. *Irrigation Science* 27: 319-330.
- Ghani A, Raine S, Mc Hugh A, Hamilton G, 2015. Managing lateral infiltration on wide beds in clay and sandy clay loam using Hydrus 2D. *Irrigation Science* 33(3): 177-190.
- Li J, Zhang J and Rao M, 2004. Wetting patterns and nitrogen distribution as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agricultural Water Management* 67(2): 89-104.
- Mualem Y, 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12(3): 513-522.
- Rahimzadegan R, 1977. Water movement in field soil from a point source. M.Sc. Thesis, Utah State Univ., Logan, Utah, USA.
- 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* 251: 163-176.
- Schwartzman, M., and Zur, B. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 112(3): 242-253.
- Singh AK, Tripathy R and Chopra UK. 2008. Evaluation of CERES Wheat and Crop System models for water-Nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural Water Management* 95: 776-786.
- Šimunek J and van Genuchten MTh, 1998. Estimating unsaturated soil hydraulic properties from laboratory tension disc infiltrometer experiments. *Water Resources Research* 32(9): 2683-2696.
- Šimunek J, van Genuchten MTh and Šejna M, 2008. Development and application of HYDRUS and STANDMOD software package and related codes. *Vadose Zone Journal* 7(2): 587-600.
- Šimunek J, van Genuchten MTh and Šejna M, 2006. The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Technical Manual, Version 1.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, pp. 241.

- Siyal AA, Skaggs TH, 2009. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. *Agricultural Water Management* 96: 893-904.
- Skaggs TH, Trout TJ, Simunek J and Shouse PJ, 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 30: 304–310.
- Van Genuchten MT, 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal* 44: 892–898.
- Xie T, Liu X, and Sun T, 2011. The Effects of Groundwater Table and Flood Irrigation Strategies on Soil Water and Salt Dynamics and Reed Water Use in the Yellow River Delta, China. *Ecological Modeling* 222: 241-252.