

## شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در خاک با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D

احسان محمدی<sup>۱\*</sup> و معصومه دلبری<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۳/۲۴

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

<sup>۲</sup> دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

\*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Mohammadi0508@gmail.com

### چکیده

در این تحقیق از نرم‌افزار HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی انتقال آب و نمک در پروفیل خاک استفاده شده است. آزمایش‌های مزرعه‌ای در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۴ تیمار و در ۵ تکرار در مزرعه پردیس دانشگاه زابل انجام گرفت. تیمارها شامل ۱۰ نوبت آبیاری با مقدار ۱۰۰ میلی‌متر آب آبیاری در هر نوبت و با فواصل زمانی ۳ روزه (T1)، ۷ نوبت آبیاری با مقدار ۱۵۰ میلی‌متر آب و با فواصل زمانی ۴ روزه (T2)، ۵ نوبت آبیاری با مقدار ۲۰۰ میلی‌متر آب و با فواصل زمانی ۶ روزه (T3) و ۴ نوبت آبیاری با مقدار ۲۵۰ میلی‌متر آب و با فواصل زمانی ۷ روزه (T4) بودند. اندازه‌گیری رطوبت و نمک خاک شامل  $EC_e$ ، pH، TDS، Na، K، Ca و Mg از عمق‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متری خاک هر هفت روز یک بار در هر تیمار انجام شد. مقایسه میانگین اختلاف ویژگی‌های مورد مطالعه در کل پروفیل خاک قبل و بعد از آبیاری نشان داد که تیمار T1 بیشترین مقدار آبیاری TDS،  $EC_e$ ، Na، K، Ca و Mg را داشته است. با اینحال اختلاف بین تیمارها برای Ca از نظر آماری ( $p \leq 0.05$ ) معنی‌دار نبود. تیمار T1 با T4 در مقادیر TDS،  $EC_e$ ، Na، Mg و با تیمار T3 در مقادیر K و Mg اختلاف معنی‌دار ( $p \leq 0.05$ ) داشت. نتایج ترسیمی نشان داد که نرم‌افزار HYDRUS-1D بیشترین دقت در شبیه‌سازی  $EC_e$ ، TDS و Ca را در عمق ۴۰ سانتی‌متری داشته است. شبیه‌سازی Na در عمق ۲۰ سانتی‌متری و Mg و K در عمق ۸۰ سانتی‌متری، بیشترین دقت را دارا بود. از طرفی دقت شبیه‌سازی رطوبت خاک در عمق ۴۰ سانتی‌متری بیشتر از سایر عمق‌ها بود. در همه تیمارها و صفات اندازه‌گیری شده، مقدار  $R^2$  بین ۰/۷۲ تا ۰/۸۸، مقدار  $RMSE$  تقریباً برابر با انحراف معیار داده‌ها و مقدار EF بین ۰/۵۲ تا ۰/۹۷ به دست آمد که نشان می‌دهد نرم‌افزار HYDRUS-1D از توانایی خوبی برای شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در خاک و تخمین پروفیل رطوبت و شوری برخوردار است. بنابراین می‌توان در آینده از این نرم‌افزار برای مدیریت بهتر آبیاری و آبیاری نمک خاک‌های شور در سطح منطقه بهره جست.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، رطوبت خاک، غلظت نمک، HYDRUS-1D

## Simulation of Water and Salt Transport in Soil Using the HYDRUS-1D Software

E Mohammadi<sup>\*1</sup>, M Delbari<sup>2</sup>

Received: 2 March 2014 Accepted: 14 June 2014

<sup>1</sup>- Former M.Sc. Student of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Soil, Univ. of Zabol, Iran

<sup>2</sup>- Assoc. Prof., Dept. of Water Eng., Faculty of Water and Soil, Univ. of Zabol, Iran

\* Corresponding Author, Email: Mohammadi0508@gmail.com

### Abstract

In this study the HYDRUS-1D software has been applied to simulate water and salt transport through the soil profiles. Field experiments were performed as a randomized complete blocks design in Zabol University campus. Four leaching treatments with five replications were conducted within the blocks. The treatments included 10 irrigations with 100 mm water every 3 days (T1), 7 irrigations with 150 mm water every 7 days (T2), 5 irrigations with 200 mm water every 6 days (T3) and 4 irrigations with 250 mm water every 4 days (T4). For each treatment, soil samples were taken from five depth intervals 0-20, 20-40, 40-60, 60-80 and 80-100 cm and their water contents and soil chemical properties ( $EC_e$ , pH, TDS, and Na, K, Ca and Mg) were measured every 7 days. Comparing the mean values of the differences between the studied soil properties amounts before and after leaching over the whole soil profile for different treatments showed that T1 had the highest leaching of TDS,  $EC_e$ , Na, K, Ca and Mg. However, the differences between the treatments were not statistically significant ( $p \leq 0.05$ ) for Ca. T1 was statistically ( $p \leq 0.05$ ) different from T4 for TDS,  $EC_e$ , Na, and Mg values and from T3 for K and Mg values. The graphical results showed that the HYDRUS-1D had the highest accuracy in simulating TDS,  $EC_e$  and Ca in depth of 40 cm. The highest simulation accuracy resulted for Na in soil depth of 20 cm and for Mg, and K in the depth of 80 cm. The highest simulation accuracy of SWC was seen for the depth of 40 cm. For all treatments and properties, the values of  $R^2$  ranged from 0.72 to 0.88, the RMES values were almost equal to the data standard deviations and the EF values ranged from 0.52 to 0.97, which indicated that the HYDRUS-1D software had a good ability to appropriately simulate water and salt transport in soil and predict water content and  $EC_e$  profiles, satisfactorily. Therefore, it should be used for better management of irrigation and leaching of saline soils over the region in the future.

**Keywords:** HYDRUS-1D, Moisture, Salt concentration, Simulation

## مقدمه

بافت خاک به همراه یکسری توابع انتقالی برای تعیین هدایت هیدرولیکی و منحنی رطوبتی خاک استفاده می‌گردد. از مدل HYDRUS-1D در مطالعات متعددی برای شبیه‌سازی حرکت آب و نمک و نیز مسائل مرتبط با رشد گیاه استفاده شده است (وان گنوختن و همکاران ۱۹۹۱، جاکوز و همکاران ۲۰۰۸، دونت سوا و همکاران ۲۰۰۹، جیانگ و همکاران ۲۰۰۹). در آزمایشی روی یک ستون خاک به عمق ۳ متر سرعت نفوذ لحظه‌ای، نفوذ جمعی و عمق جبهه خیس شده با بکارگیری مدل Green-Ampt اصلاح شده مطالعه و با نتایج حاصل از مدل HYDRUS-1D مقایسه شد. نتایج نشان داد که مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی مقادیر سرعت نفوذ لحظه‌ای و جمعی نسبت به مقادیر عمق خیس شده از دقت بیشتری برخوردار است (بیانگ ۲۰۱۰). هیت‌ول و همکاران (۲۰۰۷) مدل HYDRUS-1D را به منظور مدل‌سازی پتانسیل انتقال نیتروژن در شرایط غیراشباع در منطقه وسیعی در حومه شهر کلرادو که در مجاورت سیستم فاضلاب قرار داشت، بکار بردند. نتایج حاکی از دقت بالای مدل در تخمین انتقال نیترات حاصل از فاضلاب و سرعت نیترات‌زدایی بود. از مدل HYDRUS-1D همچنین برای بررسی تأثیر روش‌های مختلف آبیاری و تغییرات مکانی هدایت هیدرولیکی اشباع خاک بر فرایند انتقال نمک در آبیاری جویچه‌ای استفاده شد (وانگ و همکاران ۱۹۹۷). زاکری‌نیا و همکاران (۱۳۸۶) مدل HYDRUS-1D را برای تخمین ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و بررسی تغییرات زمانی آن‌ها در اثر آبیاری‌های مکرر با آب شور به کار بردند. نتایج تحقیق نشان داد که در صورت داشتن داده‌های کافی، مدل HYDRUS-1D توانایی بالایی در برآورد ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و روند تغییرات زمانی آن‌ها دارد. اژدری و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از مدل HYDRUS-1D به بررسی روند تغییرات رطوبت و نیتروژن در خاک در مزرعه‌ای که تحت سیستم آبیاری قطره‌ای قرار داشت، پرداختند. نتایج نشان داد که تکرار آبیاری هر ۴۸ ساعت یکبار می‌تواند میزان رطوبت ناحیه ریشه را در حد ظرفیت مزرعه نگه داشته، جریان

ناحیه غیراشباع خاک به‌عنوان بخش جدانشدنی از چرخه هیدرولوژیکی نقش بسیار مهمی در بسیاری از فرایندها مانند نفوذپذیری، ذخیره رطوبتی خاک، تبخیر، جذب آب توسط ریشه، تغذیه مجدد آب زیرزمینی، رواناب و فرسایش دارد (سیمونک و همکاران ۲۰۰۸a). به دلیل افزایش نگرانی در مورد کاهش کیفیت محیط زیرسطحی خاک بر اثر فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری، در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. به طوری که در طی چند دهه اخیر پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه درک مفهومی و توصیف ریاضی فرایند انتقال آب و نمک در ناحیه غیراشباع خاک صورت گرفته است که منجر به ارائه مدل‌های عددی مختلفی شده است. مدل‌های عددی با شبیه‌سازی شرایط واقعی حرکت آب و نمک در محیط متخلخل، قادر به ارزیابی مناسب وضعیت رطوبت و نمک خاک هستند و می‌توان از آن‌ها در مطالعات آب و خاک استفاده کرد (دروگوز و همکاران ۲۰۰۰). در سال‌های اخیر مدل‌های شبیه‌ساز معتبری برای پاسخگویی به مسائل مربوط به حرکت آب و نمک در خاک ارائه شده است. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل MACRO (مویز و همکاران ۲۰۱۲)، SWAP (کروز و همکاران ۱۹۹۰)، LEACHM (واگنت و هاتسون ۱۹۸۹)، SWATRE (فیچر و همکاران ۱۹۹۹) و HYDRUS-1D (سیمونک و همکاران ۲۰۰۸a) اشاره کرد. مدل HYDRUS-1D یکی از مدل‌های پیشرفته با قابلیت شبیه‌سازی حرکت یک بعدی آب، نمک، گرما و جذب آب توسط ریشه و همچنین رشد ریشه در شرایط اشباع و غیراشباع در خاک می‌باشد (سیمونک و همکاران ۲۰۰۸a). مدل HYDRUS-1D به حل عددی معادله ریچاردز برای جریان آب در خاک و معادلات انتشار-پخشیدگی برای انتقال نمک و گرما می‌پردازد. این مدل توسط گروهی از دانشمندان با همکاری آزمایشگاه شوری خاک آمریکا و دانشگاه کالیفرنیا در ریورساید بسط داده شده است (سیمونک و همکاران ۲۰۰۸b). در این مدل از اطلاعات مربوط به

کامل تصادفی با ۴ تیمار و در پنج تکرار به مرحله اجرا در آمد که تیمارها به شرح زیر می‌باشند:

T1: ۱۰ نوبت آبخوبی با مقدار ۱۰۰ میلی‌متر آب

آبیاری و با فواصل زمانی ۳ روزه

T2: ۷ نوبت آبخوبی با مقدار ۱۵۰ میلی‌متر آب

آبیاری و با فواصل زمانی ۴ روزه

T3: ۵ نوبت آبخوبی با مقدار ۲۰۰ میلی‌متر آب

آبیاری و با فواصل زمانی ۶ روزه

T4: ۴ نوبت آبخوبی با مقدار ۲۵۰ میلی‌متر آب

آبیاری و با فواصل زمانی ۷ روزه

همانطور که مشاهده می‌شود کل حجم آبی که به تیمارها داده شده است یکسان (۱۰۰۰ میلی‌متر) است و فقط دور آبیاری و مقدار آب داده شده در هر دور آبیاری متغیر است. حجم آب وارد شده به کرت‌ها به وسیله کنتور حجمی که در ابتدای هر کرت نصب شده بود اندازه‌گیری شد. نمونه برداری از خاک قبل از شروع آبخوبی و نیز در مراحل مختلف آبخوبی جهت اندازه‌گیری تغییرات رطوبت و نمک خاک از عمق‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متری صورت گرفت. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک محل اجرای طرح پیش از آبخوبی به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است. در جدول ۳، مشخصات شیمیایی آب چاه مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.

ویژگی‌های فیزیکی شامل بافت خاک به روش هیدرومتری (جی و ار ۲۰۰۲)، چگالی ظاهری با استفاده از نمونه‌های دست نخورده خاک و رطوبت خاک به روش وزنی (جی و ار ۲۰۰۲) اندازه‌گیری شدند. ویژگی‌های شیمیایی خاک شامل هدایت الکتریکی عصاره اشباع (EC<sub>e</sub>) و pH گل اشباع به ترتیب با دستگاه‌های EC متر و pH متر (مکالین ۱۹۸۲)، کل جامدهای محلول (TDS) با دستگاه TDS سنج، سدیم (Na) و پتاسیم (K) به روش فلیم‌فتمتری (رابینز و ویگند ۱۹۹۰) و کلسیم (Ca) و منیزیم (Mg) به روش تیتراژ کردن (لانیون و هلد ۱۹۸۲) اندازه‌گیری شدند. در طی آبخوبی هر ۷ روز یک بار نمونه‌های خاک از ۵ عمق ذکر شده از وسط هر کرت (با فرض یکنواختی مشخصات خاک) برداشت و به آزمایشگاه منتقل گردید و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن‌ها اندازه‌گیری شد.

عمودی آب را کند و میزان نفوذ عمقی را به حداقل برساند. نتایج، قابلیت مدل را در شبیه‌سازی توزیع رطوبت در خاک برای مدت زمان‌های طولانی نشان داد. منطقه دشت سیستان از جمله مناطق گرم و خشک ایران محسوب می‌شود. یکی از محدودیت‌های بنیادی کشاورزی منطقه سیستان به‌ویژه شهرستان زابل بعد از مسئله کمبود آب، شوری خاک است. سدیمی بودن خاک باعث تخریب خاکدانه‌ها، پراکندگی ذرات رس، سله‌بندی و کاهش تخلخل و نفوذپذیری می‌شود. از جمله اقدامات اولیه به منظور اصلاح خاک شور مطالعات آبخوبی می‌باشد. بنابراین شبیه‌سازی حرکت آب و نمک به منظور تعیین بهترین عمق و دور آبیاری در خاک‌های منطقه شهرستان زابل از اهمیت قابل توجهی برخوردار است که در این زمینه مدل HYDRUS-1D با توجه به کارایی و قابلیت‌های آن می‌تواند مفید واقع شود. بنابراین هدف از این تحقیق شبیه‌سازی حرکت آب و نمک و تعیین بهترین نحوه آبخوبی در جهت کمک به اصلاح خاک‌های منطقه زابل با استفاده از مدل HYDRUS-1D می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

این تحقیق در پاییز ۱۳۹۰ در مزرعه پردیس دانشگاه زابل واقع در عرض جغرافیایی ۳۱°۳' و طول جغرافیایی ۶۱°۲۹' انجام گرفت. شهرستان زابل از نظر اقلیمی در تیپ خشک بیابانی قرار دارد و ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۴۸۰ متر می‌باشد. متوسط بارندگی سالیانه آن ۵۸ میلی‌متر و میزان تبخیر آن قریب به ۵۰۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشد.

آزمایش‌های آبخوبی به منظور بررسی نحوه تغییرات شوری در زمینی به مساحت ۳۰۰ متر مربع انجام شد. برای انجام این تحقیق ابتدا به آماده‌سازی زمین و ایجاد کرت‌هایی با ابعاد ۲ متر در ۲ متر، فاصله کرت‌ها از هم ۱ متر و فاصله بلوک‌ها از یکدیگر ۲ متر پرداخته شد. سپس براساس مطالعات و بررسی‌های انجام شده در منطقه زابل و مصاحبه‌هایی که با کشاورزان منطقه در مورد دور و مقدار آب آبیاری انجام شد، آزمایش‌های آبخوبی در قالب طرح بلوک‌های

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک محل اجرای طرح.

عمق (cm)	اجزاء بافت خاک		کلاس بافت خاک	چگالی ظاهری (g/cm <sup>3</sup> )	رطوبت حجمی	
	شن	سیلت رس			FC (۲۲۰-سانتی‌متر)	PWP (۱۵۰۰۰-سانتی‌متر)
	(%)	(%)	-		(%)	
۰-۲۰	۳۷/۸	۳۴	لومی رسی	۱/۴۶	۲۶/۲	۱۱/۱
۲۰-۴۰	۳۳/۸	۳۷/۹	لومی رسی	۱/۴۳	۲۷	۱۱/۲
۴۰-۶۰	۳۳/۸	۳۴	لومی رسی	۱/۴۵	۲۷/۵	۱۲/۳
۶۰-۸۰	۲۳	۳۳	رسی	۱/۳۶	۳۱/۴	۱۵/۸
۸۰-۱۰۰	۱۸/۸	۳۶	رسی	۱/۳۷	۳۲/۲	۱۶

جدول ۲- مشخصات شیمیایی خاک محل اجرای طرح.

عمق (cm)	ECe (dS/m)	pH	TDS* (mg/L)	Na	K	Ca	Mg
۰-۲۰	۲/۵۲	۸/۶	۲۶۰۰	۶۷۰	۳/۲	۲۰	۴۰
۲۰-۴۰	۳/۸	۸/۵	۳۵۸۰	۱۰۰۰	۳	۲۵	۶۰
۴۰-۶۰	۵/۲	۸/۴	۴۲۶۰	۱۴۵۰	۳	۳۰	۱۰۰
۶۰-۸۰	۶/۳۶	۸/۳	۴۶۱۰	۱۸۰۰	۳/۵	۴۵	۱۲۰
۸۰-۱۰۰	۶/۹۴	۸/۳	۵۶۰۰	۲۰۰۰	۴	۵۲	۱۳۰

\* اختلاف مقادیر TDS با مجموع کاتیون‌ها و نیز مقدار EC<sub>e</sub> می‌تواند به دلایل بالا بودن غلظت آنیون‌ها و یا پایین بودن دقت اندازه‌گیری دستگاه TDS سنج باشد.

جدول ۳- مشخصات آب آبیاری.

منبع آب	ECe (dS/m)	pH	TDS (mg/L)	Na	K	Ca	Mg
چاه	۲	۸/۲	۱۵۰۰	۲۸۰	۱۵	۲۰	۶۰

### مدل HYDRUS-1D و داده‌های مورد نیاز

با فرض اینکه فاز گازی خاک در فرایند جریان آب نقش چندانی نداشته باشد و با صرف‌نظر کردن از جریان آب بر اثر شیب دمایی، حرکت یک بعدی آب در خاک با استفاده از حل عددی رابطه ریچاردز اصلاح شده بیان می‌شود (سیمونک و همکاران ۲۰۰۸):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \beta \right) \right] - S \quad [1]$$

که در آن  $\theta$  رطوبت حجمی  $[L^3/L^3]$ ،  $t$  زمان  $[T]$ ،  $K(\theta)$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع  $[L/T]$ ،  $h$  مکش ماتریک  $[L]$ ،  $\beta$  زاویه بین مسیر جریان و محور عمودی

(برای حرکت عمودی آب در خاک  $\beta = 0$ ، برای حرکت افقی  $\beta = 90$  و برای سایر مسیرها  $0 < \beta < 90$  می‌باشد)،  $S$  آب جذب شده توسط ریشه  $[L^3/(L^3.T)]$  و  $x$  فاصله  $[L]$  است. توصیف مشخصات هیدرولیکی خاک مانند منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی غیراشباع در معادله فوق توسط روابط متعددی انجام شده است که از متداولترین آن‌ها رابطه وان گنوختن معلم است (وان گنوختن ۱۹۸۰):

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h > 0 \end{cases} \quad [2]$$

خصوصیات خاک (درصد اجزای بافت خاک، تعداد لایه-های خاک، عمق خاک)، چگالی ظاهری و تبخیر-تعرق می‌باشد. از طرفی خروجی‌های مدل شامل مقدار رطوبت، مکش و بیلان رطوبت خاک و غلظت نمک در زمان‌های مورد نظر می‌باشد. در این تحقیق از اطلاعات زودیافت خاک شامل درصد اجزای بافت خاک، چگالی ظاهری و مقدار رطوبت در مکش‌های ۳۳۰ سانتی‌متر (ظرفیت زراعی) و ۱۵۰۰۰ سانتی‌متر (نقطه پژمردگی دائم) و نرم‌افزار Rosetta برای تخمین اولیه مشخصات هیدرولیکی خاک ( $K_s$  و  $\alpha$ ،  $n$ ،  $\theta_r$ ،  $\theta_s$ ) استفاده گردید (شاپ و همکاران ۲۰۰۱).

#### تحلیل حساسیت مدل

برای استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی تحلیل حساسیت مدل ضروری می‌باشد. با تحلیل حساسیت می‌توان تأثیرپذیری خروجی‌های مدل را از داده‌های ورودی بررسی کرد (سیمونک و همکاران ۲۰۰۸a). نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که اندازه‌گیری چه پارامترهایی از اهمیت بیشتری برخوردارند تا حداکثر دقت در اندازه‌گیری آن‌ها به کاربرده شود.

برای تحلیل حساسیت مدل HYDRUS-1D نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک (رطوبت باقی مانده، رطوبت اشباع، ضریب شکل منحنی رطوبتی و ضریب نگهداری آب در خاک) از روش پیشنهادی توسط لین و فریرا (۱۹۹۰) استفاده گردید. بدین ترتیب که داده‌های خروجی مدل وان گنوختن در لایه‌های مختلف در تیمار T1 به عنوان مبنا در نظر گرفته شد و مدل با استفاده از این داده‌ها اجرا گردید. نتایجی که در این حالت به دست آمد به عنوان مبنا در نظر گرفته شد. سپس در هر نوبت یکی از داده‌های ورودی مقداری تغییر داده شد (برای هر مولفه دو تغییر مثبت و منفی به میزان ۵۰ درصد انجام گرفت) و بقیه داده‌ها ثابت نگه داشته شدند و مدل با استفاده از شرایط جدید اجرا گردید. نتایج به دست آمده در دو حالت مذکور با نتایج به دست آمده در حالت مبنا مقایسه شدند. به منظور مقایسه نتایج، حداکثر قدرمطلق درصد اختلاف مقادیر هر یک از پارامترهای خروجی در دو حالت جدید نسبت به مقدار

$$K(h) = K_s S_e^l \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad [۳]$$

$$m = 1 - 1/n \quad (n > 1) \quad [۴]$$

که در آن  $\theta_r$  و  $\theta_s$  به ترتیب رطوبت حجمی باقی-مانده و اشباع،  $K_s$  هدایت هیدرولیکی اشباع  $[L/T]$  و  $S_e$  اشباع نسبی می‌باشد.  $\alpha$  یک پارامتر تجربی است که غالباً به معکوس مکش ورود هوا بستگی دارد  $[1/L]$ ،  $l$  پارامتر پیوستگی خلل و فرج است که برای اکثر خاک‌ها مقدار آن ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود (معلم ۱۹۷۶).  $n$  یک پارامتر تجربی است که مرتبط با توزیع خلل و فرج است و در شیب منحنی رطوبتی خاک انعکاس می‌یابد، مقدار  $n$  در خاک‌های درشت‌بافت که منحنی رطوبتی خاک در آن‌ها شیب تند و تیزی دارد، بزرگتر از خاک‌های ریزبافت است (بیانگ و همکاران ۲۰۱۰). کلیه معادلات حرکت آب و نمک در HYDRUS-1D به صورت عددی حل می‌شوند. برای حل معادله ریچاردز، از روش اجزای محدود گالرکین استفاده می‌شود.

شرایط اولیه و مرزی برای شبیه‌سازی حرکت آب و نمک به شرح زیر تعریف می‌گردد:

$$\theta(x, t) = \theta_0(x) \quad t = 0 \quad x \geq 0 \quad [۵]$$

$$c(x, t) = c_0(x) \quad t = 0 \quad x \geq 0 \quad [۶]$$

$$\theta(x, t) = \theta \quad x = 0 \quad t > 0 \quad [۷]$$

$$c(x, t) = c \quad x = 0 \quad t > 0 \quad [۸]$$

معادلات ۵ و ۶ به ترتیب بیانگر شرایط اولیه رطوبت و غلظت نمک ( $c$ ) در همه اعماق خاک است که معادل میزان رطوبت و غلظت اندازه‌گیری شده اولیه ( $\theta_0$  و  $c_0$ ) در عمق مورد نظر می‌باشد. معادلات ۷ و ۸ شرایط مرزی در مرز بالادست یعنی  $x=0$  را بیان می‌کنند که به ترتیب برای رطوبت و غلظت نمک معادل عمق آب روی سطح خاک و غلظت نمک آب آبیاری می‌باشد. برای شرایط مرزی پایین دست ( $x=L$ ) زهکشی آزاد برای جریان آب و شیب غلظت صفر برای انتقال نمک در نظر گرفته شده است.

اطلاعات ورودی به مدل علاوه بر شرایط اولیه و شرایط مرزی شامل اطلاعات منحنی رطوبتی خاک،

لامین داده ورودی اولیه (حالت مبنا) و  $P_i^m$  مقدار محاسبه شده یک پارامتر خروجی با استفاده از لامین داده ورودی تعدیل شده (پس از تغییر داده شده در متغیر ورودی) می‌باشد. پس از محاسبه  $D_{max}$  با استفاده از جدول ۴ طبقه بندی درجه حساسیت پارامترهای ورودی انجام گرفت.

همان مولفه در شرایط مبنا با استفاده از معادله زیر محاسبه شد (دهقان و همکاران ۱۳۸۹):

$$D_{max} = \left| \frac{P_i^m - P_i^b}{P_i^b} \right| \times 100 \quad [9]$$

که در آن:  $D_{max}$  حداکثر مطلق اختلاف،  $P_i^b$  مقدار محاسبه شده یک پارامتر خروجی با استفاده از

جدول ۴- تعریف شاخص حساسیت (SI) براساس مقادیر  $D_{max}$  (لین و فریرا ۱۹۹۰).

تعریف	SI	$D_{max}(\%)$
غیر حساس	۰	۰
کمی حساس	۱	۰-۱۰
حساس	۲	۱۰-۵۰
خیلی حساس	۳	>۵۰

#### ارزیابی مدل

برای ارزیابی عملکرد مدل HYDRUS-1D و مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده از روش ترسیمی و نیز از شاخص‌های آماری استفاده گردید. معیارهای ارزیابی صحت تخمین مورد استفاده در این تحقیق شامل ضریب تبیین  $(R^2)$ ، جذر میانگین مربعات خطا  $(RMSE)$ ، کارایی مدل  $(EF)$ ، ضریب جرم باقی‌مانده  $(CRM)$  و میانگین مطلق خطا  $(MAE)$  می‌باشد (پیغمبری ۱۳۸۸، لاگ و گرین ۱۹۹۱، چاناسیک و همکاران ۲۰۰۴):

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad [12]$$

$$CRM = \frac{\left( \sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right)}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad [13]$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad [14]$$

در این روابط  $O_i$  مقادیر اندازه‌گیری شده،  $P_i$  مقادیر پیش‌بینی شده،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها می‌باشد.

مقدار  $R^2$  نشان دهنده پراکندگی داده‌ها حول خط رگرسیون است. مقادیر  $RMSE$  و  $MAE$  بیان کننده دقت مدل بوده و نشان می‌دهند که پیش‌بینی‌ها تا چه حد، متغیر مورد نظر را بیشتر یا کمتر از مقادیر واقعی تخمین زده‌اند. مقدار  $RMSE$  در بهترین حالت بایستی کوچکتر از انحراف معیار ( $SD$ ) داده‌های مشاهده‌ای باشد.  $EF$  کارایی مدل را نشان می‌دهد. مقدار  $EF$  بین ۱ تا منفی بینهایت متغیر است. اگر  $EF$  منفی شود نشان دهنده این است که مدل پیش‌بینی کننده بدتری نسبت به

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad [10]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad [11]$$

<sup>1</sup> Coefficient of Determination

<sup>2</sup> Root Mean Square Error

<sup>3</sup> Modelling Efficiency

<sup>4</sup> Coefficient of Residual Mass

<sup>5</sup> Mean Absolute Error

زمانی است که تنها از مقادیر میانگین بعنوان پیش‌بینی‌کننده استفاده گردد (لاگ و گرین ۱۹۹۱). شاخص  $CRM$  گرایش مدل به سمت تخمین بیش از حد یا کمتر از حد را نشان می‌دهد. مقدار منفی  $CRM$  نشانگر گرایش مدل به سمت تخمین بیش از حد است. در شرایطی که مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند (بهترین حالت) مقادیر عددی  $RMSE$ ،  $R^2$

زمانی است که تنها از مقادیر میانگین بعنوان پیش‌بینی‌کننده استفاده گردد (لاگ و گرین ۱۹۹۱). شاخص  $CRM$  گرایش مدل به سمت تخمین بیش از حد یا کمتر از حد را نشان می‌دهد. مقدار منفی  $CRM$  نشانگر گرایش مدل به سمت تخمین بیش از حد است. در شرایطی که مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند (بهترین حالت) مقادیر عددی  $RMSE$ ،  $R^2$

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های اختلاف ویژگی‌های مورد مطالعه قبل و پس از آبیروی در تیمارهای مختلف.

Mg	Ca	K	Na	TDS	EC <sub>e</sub>	تیمار
(mg/L)						(dS/m)
<sup>a</sup> ۶۱/۹	<sup>a</sup> ۳۱/۷	<sup>a</sup> ۲/۲	<sup>a</sup> ۱۱۳۲	<sup>a</sup> ۳۳۶۸	<sup>a</sup> ۳/۳۶	T1
<sup>ab</sup> ۴۲/۲	<sup>a</sup> ۲۱/۴	<sup>ab</sup> ۱/۴۵	<sup>ab</sup> ۱۰۷۱	<sup>a</sup> ۳۲۳۰	<sup>a</sup> ۲/۹۷	T2
<sup>b</sup> ۱۳/۴	<sup>a</sup> ۱۸/۳	<sup>b</sup> ۱/۰۸	<sup>ab</sup> ۱۰۶۰	<sup>ab</sup> ۲۸۰۸	<sup>a</sup> ۲/۹۷	T3
<sup>b</sup> ۲۸/۳	<sup>a</sup> ۱۴/۵	<sup>ab</sup> ۱/۱	<sup>b</sup> ۱۰۰۰	<sup>b</sup> ۲۱۳۶	<sup>b</sup> ۱/۴۵	T4

\* اعداد دارای حروف لاتین مشابه در هر ستون از نظر آماری اختلاف معنی‌داری با هم ندارند ( $p \leq 0.05$ ).

ضریب پخشیدگی<sup>۱</sup> بسیار حساس ( $SI=3$ ) و نسبت به مقدار ضرایب  $n$  و  $\alpha$  حساس ( $SI=2$ ) می‌باشد. بنابراین در مرحله واسنجی مدل این پارامترها آنقدر تغییر داده شدند تا بهترین تطابق بین رطوبت مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده حاصل گردد. مقادیر پارامترهای واسنجی و سایر پارامترهای هیدرولیکی خاک تولید شده توسط مدل Rosetta ( $K_r$  و  $\theta_r$ ) برای اعماق مختلف خاک در جدول ۶ ارائه شده است.

مقایسه ترسیمی مقادیر برآورد شده رطوبت و غلظت نمک توسط مدل HYDRUS-1D و مقادیر اندازه‌گیری شده به عنوان نمونه در تیمار T2 به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود مدل HYDRUS-1D تقریباً در شبیه‌سازی  $EC_e$ ،  $TDS$  و  $Na$  در ۲ هفته اول تمایل به برآورد نسبتاً پایین‌تری نسبت به حالت مشاهده شده دارد و در روزهای بعد از دقت بهتری نسبت به حالت مشاهده‌ای برخوردار است ولی در شبیه‌سازی  $Mg$ ،  $Ca$  و  $K$  در طول دوره شبیه‌سازی دقت خوب و نزدیک به حالت

## نتایج و بحث

### آبیروی

میانگین‌های اختلاف ویژگی‌های مورد مطالعه در کل پروفیل خاک قبل از آبیروی و پس از پایان دوره آبیروی برای تیمارهای T1، T2، T3 و T4 در جدول ۵ ارائه شده است. مقایسه میانگین‌ها نشان می‌دهد که تیمار T1 بیشترین آبیروی صفات مورد بررسی را نسبت به تیمارهای دیگر داشته است. بعبارت دیگر آبیاری با دور کمتر (۳ روزه) و عمق کمتر (۱۰۰ میلی-متر) باعث آبیروی بیشتر املاح خاک شده است (جدول ۵). با اینحال در مورد آبیروی  $Ca$  اختلاف بین تیمارها از نظر آماری معنی‌دار نشد ( $p \leq 0.05$ ). در مورد  $EC_e$  و  $TDS$  فقط تیمار T4 با دیگر تیمارها اختلاف معنی‌دار داشت ( $p \leq 0.05$ ). در مورد  $Na$  بین T1 و T4، در مورد  $K$  بین T1 و T3 اختلاف معنی‌دار مشاهده شد ( $p \leq 0.05$ ). از طرفی در مورد  $Mg$  بین تیمار T1 و دو تیمار T3 و T4 اختلاف معنی‌داری مشاهده شد ( $p \leq 0.05$ ).

### شبیه‌سازی انتقال آب و نمک در خاک

تحلیل حساسیت مدل روی تیمار T1 نشان داد مدل HYDRUS-1D نسبت به مقادیر رطوبت اشباع و

<sup>1</sup> Diffusivity



کارایی مدل (EF) در جدول ۷، نشان دهنده این است که مدل در پیش‌بینی غلظت نمک (با دارا بودن EF بزرگتر) نسبت به رطوبت خاک دقت بیشتری داشت. همچنین مقادیر کم MAE های بدست آمده نشان دهنده دقت خوب مدل در برآورد رطوبت خاک و غلظت نمک می‌باشد. مقدار منفی CRM نشان دهنده تمایل مدل برای برآورد بیشتر در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است، بر این اساس در این آزمایش مدل تمایل دارد صفات رطوبت، کلسیم و منیزیم را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد کند. در تحقیقی از مدل HYDRUS-1D برای شبیه‌سازی حرکت آب در خاک در منطقه جیرفت استفاده کردند و خطای مطلق را برابر ۰/۲۸ درصد حجمی و مقدار کارایی مدل را برابر ۰/۳۴۳- بدست آوردند (مقبلی دامنه و دلفاردی ۱۳۸۸). در تحقیق دیگری مدل SWAP را در شبیه‌سازی انتقال آب و نمک در نیم‌رخ خاک مورد ارزیابی قرار دادند و مقادیر ضریب تعیین و MAE را برای رطوبت به ترتیب برابر با ۶۵ درصد و ۱/۷ درصد حجمی و برای شوری برابر با ۶۴ درصد و ۰/۷ دسی‌زیمنس بر متر به دست آوردند (کیانی و همایی ۱۳۸۶). بطور کلی شاخص‌های آماری ارائه شده در جدول ۷ نشان می‌دهد که مدل HYDRUS-1D از کارایی مطلوبی در شبیه‌سازی کلیه صفات برخوردار است و می‌تواند رطوبت و غلظت نمک خاک را در اعماق و زمان‌های مختلف با دقت خوبی پیش‌بینی کند.

مشاهده‌ای داشت. از نظر دقت شبیه‌سازی در عمق‌های مختلف همانطور که در شکل‌های ۱-الف، ۱-ب و ۱-ج مشاهده می‌شود مدل HYDRUS-1D بیشترین دقت در شبیه‌سازی EC<sub>e</sub>، TDS و Ca را در عمق ۴۰ سانتی متری نسبت به سایر عمق‌ها داشته است. همچنین نتایج نشان داد که مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی Na (شکل ۱-ر) در عمق ۲۰ سانتی‌متری و در مورد Mg و K (شکل‌های ۱-د و ۱-س) در عمق ۸۰ سانتی‌متری بیشترین دقت را دارد. از طرفی شکل ۲ نشان می‌دهد که مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی رطوبت در کل دوره تمایل به برآورد نسبتاً بالاتری نسبت به حالت مشاهده‌ای دارد. این در حالی است که دقت شبیه‌سازی رطوبت خاک در عمق ۴۰ سانتی‌متری بیشتر از سایر عمق‌ها است. در مجموع می‌توان گفت مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی غلظت نمک مورد نظر و رطوبت خاک از دقت قابل قبولی برخوردار است.

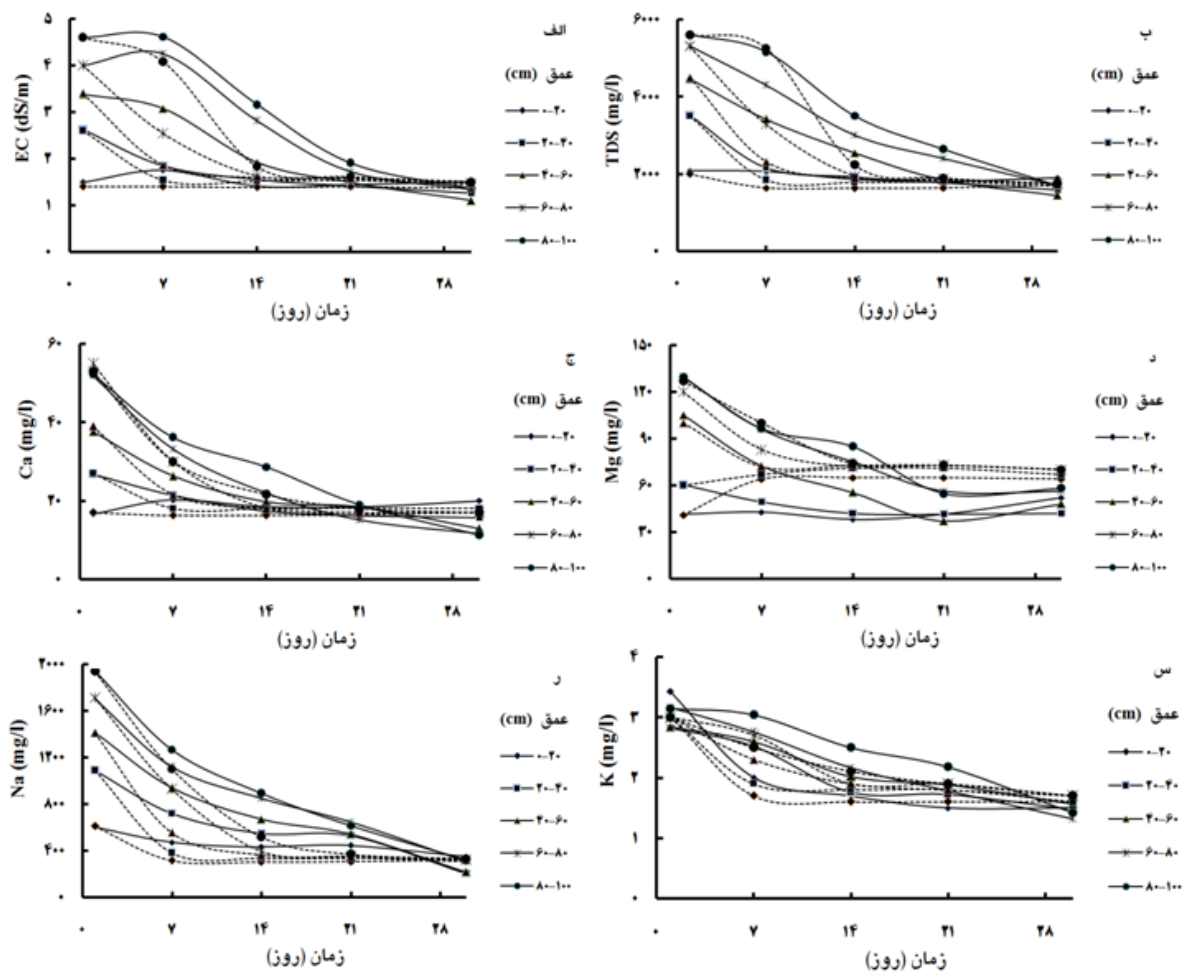
برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی مقدار رطوبت و غلظت نمک شاخص‌های آماری محاسبه شده و نتایج در جدول ۷ ارائه شده است. مقایسه مقادیر  $R^2$  مربوط به تمامی صفات مورد نظر، نشان دهنده همبستگی خوب بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده است. در تحقیق حاضر متوسط ضریب  $R^2$  برابر ۰/۷۹ می‌باشد که بسیار رضایت بخش است. همچنین مقدار  $RMSE$  در اکثر صفات کمتر از مقدار انحراف معیار ( $SD$ ) است (به غیر از مقدار غلظت منیزیم) که نشان می‌دهد مدل در پیشگویی داده‌ها از دقت خوبی برخوردار است. مقایسه مقادیر

جدول ۶- پارامترهای هیدرولیکی مدل وان گنوختن-معلم.

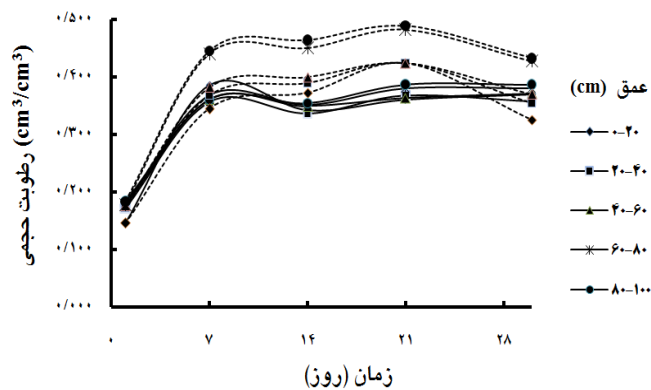
عمق (cm)	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	A (1/cm)	$K_s$ (cm/day)	n
۰-۲۰	۰/۴۲۱۷	۰/۰۷۵۲	۰/۰۱۳	۶/۱۹	۱/۴۱۹
۲۰-۴۰	۰/۴۲۸۴	۰/۰۷۶۵	۰/۰۱۰۹	۸/۴۷	۱/۴۵۰۳
۴۰-۶۰	۰/۴۳۳۲	۰/۰۸۰۴	۰/۰۱۳۲	۶/۴۹	۱/۳۹۸۸
۶۰-۸۰	۰/۴۶۶۴	۰/۰۹۲۱	۰/۰۱۵	۱۰/۱۶	۱/۳۲۲
۸۰-۱۰۰	۰/۴۷۶۵	۰/۰۹۴۶	۰/۰۱۴۲	۱۳/۳۸	۱/۳۳

جدول ۷- ارزیابی صحت مدل HYDRUS-1D در شبیه‌سازی مقدار رطوبت و غلظت نمک.

K	Na	Mg	Ca	TDS	EC <sub>e</sub> (dS/m)	رطوبت حجمی (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	شاخص‌های
							آماره‌ی
۰/۷۲	۰/۸۴	۰/۷۶	۰/۸۸	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۷۵	R <sup>2</sup>
۰/۹۷	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۴	۰/۵۲	EF
۲/۶۱	۸۹۱/۳	۷۱/۹	۲۵/۲۷	۳۲۰۲/۴	۳/۸۹	۰/۰۸	SD
۲/۴۱	۸۱۵	۷۸/۱۲	۲۵/۰۲	۲۸۴۰/۶۷	۳/۵۲	۰/۱	RMSE
۰/۳۳	۱۶۶/۹	۱۲/۰۷	۲/۸۳	۴۱۲	۰/۶	۰/۰۴	MAE
۰/۰۸۸	۰/۱۶۲	۰/۱۲۲	۰/۰۰۱	۰/۱۲	۰/۰۹۵	۰/۰۶۷	CRM



شکل ۱- مقایسه غلظت نمک مشاهده‌ای (—) و شبیه‌سازی شده (---) در تیمار T2.



شکل ۲- مقایسه مقدار رطوبت مشاهده‌ای (—) و شبیه‌سازی شده (....) در تیمار T2.

باشد. براساس مقایسه ترسیمی و شاخص‌های آماری محاسبه شده، مقادیر رطوبت خاک و غلظت نمک شبیه‌سازی شده در پروفیل خاک با مقادیر اندازه‌گیری شده در شرایط مزرعه تطابق خوبی داشت که نشان دهنده کارایی خوب مدل می‌باشد. طبق نتایج بدست آمده مدل در شبیه‌سازی حرکت نمک نسبت به حرکت آب از دقت بالاتری برخوردار بود. در نهایت پیشنهاد می‌گردد مدل HYDRUS-1D در بافت‌های دیگر خاک و در شرایط وجود گیاه نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری کلی

این مطالعه به منظور شبیه‌سازی توزیع رطوبت و غلظت نمک در طول پروفیل خاک در منطقه سیستان انجام گرفت. آزمایش‌های آبشویی در قالب طرح بلوک-های کامل تصادفی با ۴ تیمار و در پنج تکرار به مرحله اجرا در آمد. نتایج نشان داد که بهترین آبشویی در تیمار T1 یعنی با عمق آبیاری کمتر و دور آبیاری کوتاه‌تر صورت می‌گیرد. تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک نشان داد که مدل نسبت به مقادیر رطوبت اشباع و ضریب پخشیدگی بسیار حساس و نسبت به مقادیر ضرایب  $n$  و  $\alpha$  حساس می‌-

### منابع مورد استفاده

- اژدری خ، فرخی ا و زارع ابیانه ح، ۱۳۸۸. مطالعه تغییرات کود نیتروژن و رطوبت در مزرعه‌ای مجهز به سیستم کودآبیاری قطره‌ای. مجموعه مقالات کنفرانس بین المللی مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی شاهرود. صفحه‌های ۲۱۴ تا ۲۲۱.
- پیغمبری سع، ۱۳۸۸. "طرح‌های آزمایشی در علوم کشاورزی"، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- دهقان ه، علیزاده ا، حقایقی مقدم س ا و انصاری ح، ۱۳۸۹. پیش‌بینی رطوبت نیم‌رخ خاک در سه مزرعه گندم با استفاده از مدل SWAP. نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، صفحه‌های ۱۰۰۰ تا ۱۰۱۸.
- ذاکری‌نیا م، عباسی ف و سهرابی ت، ۱۳۸۶. بررسی تغییرات هدایت هیدرولیکی خاک با استفاده از روش معکوس. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۸، شماره ۳، صفحه‌های ۱۷ تا ۳۰.
- کیانی‌ع و همایی م، ۱۳۸۶. ارزیابی مدل SWAP در شبیه‌سازی انتقال آب و نمک در نیم‌رخ خاک. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۸، شماره ۱، صفحه‌های ۱۳ تا ۳۰.
- مقبلی دامنه ا و دلفارادی ص، ۱۳۸۸. ارزیابی مدل در شبیه‌سازی حرکت آب در خاک (مطالعه موردی: جیرفت). همایش ملی علوم آب، خاک، گیاه و مکانیزاسیون کشاورزی، ۱۱-۱۲ اسفند، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول.

- Chanasyk DS, Mapfumo E, Willms WD and Naeth MA, 2004. Quantification and simulation of soil water on grazed fescue watersheds. *Journal of Range Management* 57: 169-177
- Dontsova KM, Pennington JC, Hayes C, Simunek J and Williford C W, 2009. Dissolution and transport of 2,4-DNT and 2,6-DNT from M1 propellant in soil. *Chemosphere* 77(4): 29-41.
- Droogers P, Akbari M, Torabi M and Pazira E, 2000. Exploring field scale salinity using simulation modeling, Example for Rudasht area, Esfahan Province, Iran. IAERI-IWMI Research Reports 2, 16p.
- Fechter J, Allison BE, Sivalcumar MVK, Van Der Ploeg RR and Beley J, 1991. An evaluation of the SWATRER and CERES-Millet models for southwest Niger. Pp. 505-513. In: Sivakumar MVK, Wallace JS, Renard C, Giroux C (Eds). *Soil Water Balance in the Sudano-Sahellian Zone*. International Association of Hydrological Sciences, Wallingford, UK.
- Gee GW and Or D, 2002. Particle-size analysis. Pp. 255-293. In: Dane, J H. and Topp G C (eds). *Methods of Soil Analysis, Part 4- Physical Methods*. Agronomy Monograph, Vol. 9. ASA and SSSA, Madison, WI.
- Heatwole KK and Mccary JE, 2007. Modeling potential vadose-zone transport of nitrogen from onsite wastewater at the development seal. *Journal of Contaminant Hydrology* 91: 184-201.
- Jacques D, Simunek J, Mallants D, Van Genuchten MT, 2008. Modelling coupled water flow, salt transport and geochemical reactions affecting heavy metal migration in a podzol soil. *Geoderma* 145: 449-461.
- Jiang Sh, Pang L, Buchan GD, Simunek J, Noonan MJ and Close ME, 2009. Modeling water flow and bacterial transport in undisturbed lysimeters under irrigation of dairy shed effluent and water using HYDRUS-1D. *Water Research* 44: 1050-1061.
- Kroes JG, van Dam JC, Huygen J and Vervoor RW, 1999. Simulation of water flow, salt transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment. User's Guide of SWAP version 2.0;. Wageningen Agricultural University. Report 81, DLO Winand Staring Centre. Technical Document 53, 128 p.
- Lane LJ and Ferrira VA, 1990. Sensitivity analysis. Pp. 113-158. In: WG Knisel (ed). *CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*. Washington, DC: USDA-SEA.
- Lanyon LE and Heald WR, 1982. Magnesium, calcium, strontium and barium. Pp. 247-262. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 2-2nd ed*. Agronomy No. 9 ASA, Madison WI
- Loague K, Green RE, 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology* 7: 51-73.
- McLean EO, 1982. Soil pH and lime requirement. Pp.199-223. In: Page AL (ed). *Methods of Soil Analysis, part 2*, ASA-SSSA, Madison.
- Moeys J, Larsbo M, Bergström L, Brown CD, Coquet Y and Jarvis NJ, 2012. Functional test of pedotransfer functions to predict water flow and salt transport with the dual-permeability model MACRO. *Hydrology and Earth System Sciences* 16: 2069-2083.
- Mualem Y, 1976. A new model for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research* 12 (3): 13-522.
- Robbins CW and Wiegand CL, 1990. Field and laboratory measurements. Pp. 203-219. In: Tanji KK (ed). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE, New York.
- Schaap MG, Leij FJ and van Genuchten MT, 2001. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology* 251: 163-176.
- Simunek J, Sejna M, Saito H, Sakai M and van Genuchten MT, 2008a. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Salts in Variably Saturated Media, Version 4.0, HYDRUS Software Series 3, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 2008.
- Simunek J, Van Genuchten MT and Sejna M, 2008b. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone Journal* 7: 587-600.
- van Genuchten MT, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44(5): 892-898.
- van Genuchten MT, Leij FJ and Yates SR, 1991. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency ADA, Oklahoma.
- Wagenet RJ and Hutson JL, 1989. Leaching Estimation and Chemistry Model: LEACHM. Water Resource Institute, Ithaca, NY.
- Wang D, Yates SR, Simunek J and Van Genuchten MT, 1997. Salt transport in simulated conductivity fields under different irrigations. *Irrigation Drainage Engineer* 123(5): 336-343.
- Yiang M, Shaoyuan F, Dongyuan S, Guangyuo G and Zailin H, 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: 40-47.