

Study of Water Flow and Nitrate Transport under Center Pivot Irrigation Using the HYDRUS-3D Model

S. Etminan¹, V. Jalali^{2*}

1- Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

2- Department of Nature Engineering, Shirvan Faculty of Agriculture, University of Bojnord, Iran

(*- Corresponding Author Email: V.Jalali@ub.ac.ir)

Received: 22 April 2025

Revised: 05 August 2025

Accepted: 19 August 2025

Available Online: 19 August 2025

How to cite this article:

Etminan, S., & Jalali, V. (2025). Study of water flow and nitrate transport under center pivot irrigation using the HYDRUS-3D model. *Journal of Water and Soil*, 39(3), 259-274. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93128.1480>

Introduction

Climate change and drought events over the past decades have led to a decrease in surface and groundwater resources, particularly fresh water sources. On the other hand, the global population growth rate is increasing, which has resulted in a rising demand for food. One of the essential pillars of food security is providing adequate water resources for agricultural use. In recent years, water resource management aimed at improving efficiency has emerged as both a management and research challenge. One proposed strategy is blending saline and fresh water with the application of modern irrigation techniques at the farm scale. This study examines the effects of center-pivot irrigation using saline water sources on alfalfa farm performance over four consecutive years. The effect of this management approach was analyzed using the HYDRUS-3D model, focusing on plant growth and yield, soil moisture variations, leaching rates, and nitrate accumulation within the farm.

Materials and Methods

In this study, a four-year-old alfalfa farm at Birjand University, covering an area of 3 hectares and irrigated using the center-pivot method, was selected. A one-meter-deep soil profile was excavated to examine changes in the soil's physical and chemical properties over time. Soil moisture was measured using Time Domain Reflectometry (TDR) at different depths and various irrigation intervals to assess root-zone moisture dynamics. Since the soil in the study area was deficient in organic matter, soil samples were collected before planting alfalfa. To ensure adequate phosphorus levels, diammonium phosphate fertilizer was applied during the tillering stage. Ammonium and nitrate concentrations were also analyzed by collecting soil samples at different depths over various periods and measuring them using a spectrophotometer. The Levenberg-Marquardt optimization algorithm was employed to estimate hydraulic parameters and solute transport characteristics. To model changes in ammonium and nitrate levels in the soil, the Freundlich adsorption coefficient was applied. For simulating variations in soil moisture, ammonium, nitrate, and plant growth trends in the second and fourth years, the HYDRUS-3D hydraulic model was utilized.

Results and Discussion

The accuracy and efficiency of the HYDRUS-3D model in analyzing soil variations in terms of water flow and solutes transport were assessed using two statistical indices: RMSE (Root Mean Square Error) and NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency). The RMSE values of calibration for soil moisture variations at three studied depths (0-40 cm, 40-60 cm, and 60-100 cm) were 0.0057, 0.0049, and 0.0044 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectively. The NSE values at these depths during the calibration phase were 0.91, 0.98, and 0.99, respectively. For the validation phase, the RMSE and NSE values at 0-40 cm were 0.0021 and 0.97 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, at 40-60 cm were 0.0038 and 0.99, and at 60-100 cm were 0.0029 and 0.99, respectively. Based on the results, the efficiency of the Levenberg-Marquardt optimization algorithm and the capability of the HYDRUS-3D model in simulating soil moisture dynamics in the plant root



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2025.93128.1480>

zone under center-pivot irrigation were verified. The RMSE values for ammonium simulation at the three depths during validation were 0.0055, 0.0003, and 0.0008 mg.l, while the NSE values were 0.97, 0.99, and 0.99, respectively. For nitrate concentration analysis at the same depths, the RMSE values were 0.009, 0.009, and 0.008 mg.l, while the NSE values were 0.99, 0.98, and 0.99, respectively. These findings confirm the effectiveness of the HYDRUS-3D model in estimating solute variations in soil. However, accuracy decreased with depth due to soil heterogeneity and unsaturated conditions, as the model assumes a homogeneous environment. Nitrate accumulation in plants showed an increasing trend as the plant growth period increased. The measured nitrate concentration in two-year-old alfalfa was significantly lower than that in four-year-old alfalfa. Additionally, nitrate accumulation in the root zone of four-year-old plants was higher than the younger ones. This process is influenced by fertilization practices and the expansion of the root system in the fourth year, which enhances nutrient uptake efficiency.

Conclusion

Based on the statistical indices obtained from the simulation of soil variations using the HYDRUS-3D model compared to measured values, it can be concluded that the Levenberg-Marquardt optimization algorithm had provided an accurate and practical estimation of soil hydraulic parameters under the applied management conditions. Furthermore, the HYDRUS-3D model had effectively simulated long-term variations over a four-year period within this management framework. Therefore, both the optimization algorithm and the HYDRUS-3D model demonstrated sufficient capability for assessing soil moisture dynamics and solute variations under modern irrigation management techniques at the farm scale. These methods can serve as powerful tools for formulating management strategies and evaluating the outcomes of different irrigation practices.

Keywords: Hydrous model, Modern irrigation, Reverse solution, Soil salts

مطالعه جریان آب و انتقال نیترات تحت روش آبیاری سنتریپوت با استفاده از مدل HYDRUS-3D

سمانه اطمینان^۱ - وحیدرضا جلالی^{۲*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸

چکیده

روش‌های نوین آبیاری در سطح مزرعه راهکاری کاربردی در مدیریت معضل کاهش منابع آب شیرین است. در بحث مدیریت منابع آب، نیاز به برآورد پارامترهای هیدرولیکی- فیزیکی خاک می‌باشد. در این پژوهش، با هدف مطالعه میزان کارایی الگوریتم لونبرگ- مارکوارت، به ارزیابی جریان غیراشباع آب تحت روش آبیاری سنتریپوت، انتقال و آبشویی نیترات در سطح مزرعه یونجه چهار ساله در مدل HYDRUS-3D پرداخته شد. در این تحقیق پارامترهای حاکم بر میزان نفوذپذیری آب و انتقال املاح با استفاده از الگوریتم لونبرگ- مارکوارت در شرایط واقعی برآورد گردید. به‌منظور شبیه‌سازی روند تغییرات غلظت نیترات و آمونیوم در امتداد ستون خاک از ضریب جذب فروندلیچ بهره گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی HYDRUS-3D، بیانگر دقت مدل در شبیه‌سازی جریان آب با $RMSE = 0.0057 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ (خطای ریشه میانگین مربعات) و $NSE = 0.98$ (ناش-ساتکلیف) و $0.98 = NSE$ در لایه سطحی، و $RMSE = 0.0049 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ و $NSE = 0.99$ در لایه عمقی خاک بود. میزان دقت مدل در بررسی روند تغییرات نیترات خاک نیز در دو لایه سطحی و عمقی به‌ترتیب برابر با $RMSE = 0.009 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ و $RMSE = 0.008$ به دست آمد. همچنین در این تحقیق به بررسی روند جذب نیترات توسط گیاه طی چهارسال پرداخته شد که روند تغییرات بیانگر افزایش جذب نیترات در گیاه بود. براساس نتایج حاصله می‌توان ذکر نمود که الگوریتم لونبرگ- مارکوارت به‌خوبی توانسته روند تغییرات پارامترها را در مدل HYDRUS-3D تحت روش آبیاری سنتریپوت شبیه‌سازی نماید. از این رو می‌توان بیان نمود الگوریتم لونبرگ- مارکوارت قادر به برآورد تغییرات پارامترها تحت روش‌های نوین آبیاری حتی در مدل‌های چند بعدی نیز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری نوین، املاح خاک، حل معکوس، مدل هایدروس

مقدمه

مدیریت آب با هدف مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری آن، مورد توجه محققین و کشاورزان در سطح مزرعه در طی سال‌های اخیر قرار گرفته است. توسعه روش‌های مدیریت منابع آب نیازمند ارزیابی میزان نفوذ، جریان آب در پروفیل خاک و بررسی میزان عملکرد محصولات بسته به نوع روش مدیریت آبیاری می‌باشد (Wang et al., 2015). از آنجایی که مطالعه روش‌های آبیاری در گیاهان گوناگون در سطح مزرعه، بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد، به‌طور معمول از روش‌های ریاضی و مدل‌های عددی در توصیف ویژگی‌های آب خاک و انتقال

افزایش جمعیت و نیاز روزافزون بشر به مواد غذایی و از سوی دیگر کاهش منابع آب و افت سطح آب‌های زیرزمینی در چند دهه اخیر به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک سبب فشار مضاعف بر منابع آب شیرین شده است (Ghazouani, Autovino, Rallo, Douh, & Provenzano, 2016). از آنجایی که کارایی مدیریت آب در بخش کشاورزی اهمیت بسزایی در افزایش تولیدات آبی دارد، روش‌های نوین

۱- دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران

۲- گروه مهندسی طبیعت، دانشکده کشاورزی شیروان، دانشگاه بجنورد، ایران

(*)- نویسنده مسئول: Email: V.Jalali@ub.ac.ir

Parameters (BEST) method تخمین زدند و با کاربرد روش حل معکوس پارامترهای مورد نظر بهینه‌سازی شدند. کای و همکاران (Cai, Vanderborght, Couvreur, Mboh, & Vereecken, 2018) در مطالعه میزان جذب آب توسط ریشه‌های گندم زمستانه با استفاده از روش حل معکوس پارامترهای موردنیاز در برآورد میزان جریان آب در خاک و پتانسیل رشد ریشه و جذب رطوبت توسط آن بهینه‌سازی نمودند. صالحی و همکاران (Salehi, Navabian, Varaki, & Pirmoradian, 2017) با استفاده از Marquardt-Levenberg optimization algorithm (Marquardt, 1963) به بهینه نمودن پارامترهای مورد نیاز برای مطالعه انتقال نیترات و میزان جریان آب طی فرآیند زهکشی در مزارع زیرکشت برنج پرداختند. ایشان بیان نمودند که مدل هایدروس به خوبی توانسته میزان انتقال نیترات خاک را شبیه‌سازی نماید. همچنین نتایج مطالعات بaram و همکاران (Baram et al., 2016) نشان داد که با کاربرد مدل هایدروس می‌توان روند تغییرات نیترات خاک در محدوده ریشه درختان میوه تا عمق ۳ متر را مورد ارزیابی قرار داد. مطالعات صورت گرفته بیانگر اهمیت مطالعه نیترات در امتداد پروفیل خاک در محدوده ریشه گیاهان زراعی و باغی است.

با توجه به افزایش کاربرد کودهای شیمیایی مطالعه روند آبشویی نیترات در محدوده ریشه گیاه، میزان آلودگی خاک و آب‌های زیرزمینی یکی از مسائل مهم در بحث مدیریت کشاورزی به‌ویژه کشاورزی پایدار در سطح جهان می‌باشد (Viers et al., 2012). از این‌رو، مطالعات بسیاری در ارزیابی و توسعه روش‌هایی که به خوبی بتواند روند آبشویی و تغییرات مکانی و زمانی غلظت نیترات خاک را نشان داد، صورت گرفته است که می‌توان به مطالعات تورکلتاب و همکاران (Turkeltaub, Kurtzman, & Dahan, 2016; Turkeltaub, Kurtzman, Russak, & Dahan, 2015) اشاره نمود. همچنین مطالعات بسیاری در زمینه آبشویی نیترات با توجه به روش آبیاری، سیستم کشت و کار، کوددهی و ویژگی‌های خاک با هدف بررسی تغییرات کمی و کیفی نیترات در سطح مزرعه صورت گرفته است. نتایج این تحقیقات بیانگر اهمیت روند تغییرات نیترات تحت روش آبیاری و روند کوددهی است همچنین، نشان‌دهنده قابلیت مدل‌های عددی در فرآیند شبیه‌سازی انتقال نیترات و جریان آب در خاک است که با کاهش محدودیت‌ها به‌عنوان ابزاری سودمند و کاربردی در مطالعه و ارزیابی روش‌های مدیریتی شناخته شده‌اند (Salehi et al., 2017). با توجه به مطالعات صورت گرفته بررسی روند تغییرات غلظت عناصر غذایی در محیط ریشه متأثر از روش مدیریتی (کوددهی و آبیاری) به‌کار رفته در جهت افزایش عملکرد همراه با کاهش مصرف بهینه منابع آب و همچنین ارزیابی روند آلودگی و تجمع عناصر غذایی در خاک به‌منظور حفظ سلامت خاک امری ضروری است. در این چند دهه اخیر از مدل‌های فیزیکی- هیدرولیکی برای برآورد تغییرات حاصل در سطح

املاح استفاده می‌گردد (Wang et al., 2010; Liu et al., 2011; He et al., 2013). مدل‌های عددی یک روش کارآمد در مطالعه میزان انتقال آب و املاح در سرتاسر پروفیل خاک تحت روش‌های مختلف مدیریتی هستند. مطالعات بسیاری در زمینه انتقال آب و املاح با استفاده از مدل‌های عددی، میزان پاسخگویی محصولات تحت شرایط مختلف اقلیمی و زراعی را بررسی نموده‌اند (Rallo, Baiamonte, Juárez, & Provenzano, 2014; Ghazouani et al., 2016). در میان مدل‌های هیدرولوژیکی، مدل هایدروس به‌دلیل عملکرد مناسب آن در شبیه‌سازی آب، گرما و انتقال املاح تحت شرایط مختلف آزمایشگاهی و میدانی به‌طور وسیع مورد توجه قرار گرفته است. محققین مختلفی میزان عملکرد مدل هایدروس در شبیه‌سازی جریان آب و انتقال نیترات در ستون افقی خاک رسی را بررسی کردند که بیانگر توانایی مدل هایدروس در یکپارچه‌سازی فرآیندهای جریان غیراشباع و انتقالی است هر چند که فرضیات بکاررفته در این مدل برپایه شرایط همگن است (Ebrahimian, Liaghat, Parsinejad, Abbasi, & Navabian, 2012; Dash, Sarangi, Singh, Singh, & Adhikary, 2015; Jha, Sahoo, & Panda, 2017; Kirkham, Smith, Doyle, & Brown, 2019). مطالعاتی نیز در زمینه قابلیت برآورد تغییرات توزیع آب و انتقال نیترات تحت روش‌های مختلف حفاظتی توسط مدل هایدروس صورت گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان داد که مدل هایدروس قابلیت لازم برای ارزیابی روند تغییرات رطوبت و املاح خاک تحت روش‌های مختلف کشاورزی را دارد (Shafeeq et al., 2020; Rana et al., 2022; Morianou, Karatzas, Arampatzis, Pisinaras, & Kourgialas, 2025). نتایج مطالعات (Wang et al., 2015) نشان داد که مدل هایدروس در روش آبیاری بارانی به خوبی قادر به بررسی میزان حرکت آب، نفوذپذیری خاک و همچنین قادر به ارزیابی میزان عملکرد محصول و ضریب کارایی آب تحت شرایط گوناگون هیدرولوژیکی می‌باشد. در فرآیند شبیه‌سازی جریان آب، هدایت گرما و انتقال املاح در امتداد پروفیل خاک نیاز به تعیین مقدار حقیقی پارامترها از نظر فیزیکی می‌باشد. روش حل معکوس یکی از روش‌های کاربردی و متداول در برآورد پارامترها در بسیاری از مدل‌های خاک است که امروزه به‌عنوان یک ابزار بهینه‌ساز برای کاربران مدل‌های عددی شناخته شده است (Hopmans, Šimůnek, Romano, & Durner, 2002; Wöhling, Vrugt, & Barkle, 2008). الگوریتم لونبرگ-مارکوارت و روش بیزین از جمله روش‌های حل معکوس محسوب می‌شوند که می‌توانند برای بهینه‌سازی پارامترهای خاک برپایه داده‌های اندازه‌گیری‌شده در یک مسئله تعریف‌شده بکار گرفته شوند (Vrugt & Bouten, 2002; Mallants, Karastanev, Antonov, & Perko, 2007). سیلوا و همکاران (Silva Ursulino et al., 2019) به‌منظور مدل‌سازی جریان آب در خاک با استفاده از مدل Soil Transfer، پارامترهای هیدرولیکی خاک را با روش

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه بیرجند واقع در ۵ کیلومتری شهرستان بیرجند، استان خراسان جنوبی (32°53' N, 55°13' E) واقع در شرق ایران انجام شد. بیرجند با میانگین دمای سالانه برابر با ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد، با ۱۷۱ میلی‌متر میانگین بارش سالانه و با ۴۸ روز یخبندانی در طول سال، در منطقه‌ای با آب و هوای خشک-نیمه خشک و با ارتفاع ۱۴۸۰ متر از سطح دریا واقع شده است (Golmohammadi, 2014).

این پژوهش در زمینی به وسعت سه هکتار زیرکشت یونجه چهار ساله صورت گرفت. از این رو، به‌منظور ارزیابی ویژگی‌های خاک، پروفیلی به ابعاد ۷۰×۷۰×۱۰۰ سانتی‌متر مکعب حفاری گردید. پروفیل مورد نظر از دو لایه خاک به‌ترتیب از عمق ۴۰-۱۰۰ و ۴۰-۰ سانتی‌متر تشکیل شده است. با هدف مطالعه ویژگی‌های فیزیکی-شیمیایی خاک از هر دو لایه نمونه‌برداری صورت گرفت (جدول ۱). در این مزرعه با توجه به اقلیم منطقه و با هدف افزایش بهره‌وری و کاهش منابع آب، از روش آبیاری سنتریپوت استفاده گردید.

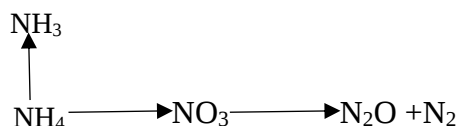
مزرعه طی مدیریت‌های اعمال‌شده با اهداف مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از مدل‌های هیدرولیکی مانند HYDRUS که قابلیت چند بعدی دارند از جهت ارزیابی روند تغییرات غلظت عناصر غذایی و جریان آب در خاک از ابعاد مختلف حائز اهمیت و ارزش علمی بالایی دارد. همچنین برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در سطح مزرعه با شرایط مختلف اقلیمی و روش‌های مدیریتی مختلف یکی دیگر از مسائل مطرح است که روش برآورد و میزان دقت آن بازگو کننده میزان دقت مدل در بررسی روش‌های مدیریتی تحت شرایط مختلف جغرافیایی و اقلیمی می‌باشد. بدین منظور با توجه به اهمیت بررسی انتقال عناصر غذایی و رطوبت در محیط ریشه تحت تأثیر روش‌های مدیریتی آبیاری و کوددهی، هدف این پژوهش ارزیابی دقت مدل HYDRUS-3D در شبیه‌سازی توزیع مکانی و زمانی نیترات، آمونیوم و رطوبت خاک در مزرعه یونجه با سامانه آبیاری سنتریپوت می‌باشد. بدین منظور، در مرحله نخست با استفاده از مدل-HYDRUS 1D و الگوریتم بهینه‌ساز Marquardt-Levenberg، بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک صورت گرفت. در ادامه، عملکرد مدل HYDRUS-3D در شبیه‌سازی سه‌بعدی حرکت آب و املاح و تحلیل نقش روش آبیاری در بهبود جذب عناصر غذایی، کاهش آبخسوی و حفظ سلامت خاک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین دقت الگوریتم بهینه‌سازی مذکور در شرایط اقلیمی منطقه و تحت مدیریت اعمال‌شده ارزیابی شد.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و آب

Table 1- Soil physical and chemical properties

ویژگی‌های فیزیکی خاک Soil physical properties	توزیع اندازه ذرات خاک Soil particle size distribution (%)				جرم مخصوص Bulk Density (g cm ⁻³)	هدایت هیدرولیکی اشباع Saturated hydraulic conductivity (cm day ⁻¹)	تخلخل Porosity	درجه اشباع خاک Degree of soil saturation (cm ³ cm ⁻³)
	افق‌های خاک Soil layers (cm)	شن Sand	سیلت Silt	رس Clay				
	0-40	61	18	21	1.55	8.3	0.4	0.39
	40-100	77	6	17	1.72	42.9	0.34	0.33
ویژگی‌های شیمیایی خاک Soil chemical properties	افق‌های خاک Soil layers (cm)	هدایت الکتریکی electrical conductivity (dS m ⁻¹)	pH	مواد آلی Organic matter (%)	کربنات کلسیم Carbonate Calcium (%)	نیتروژن کل Total Nitrogen (%)	فسفر قابل دسترس Phosphor available (mg kg ⁻¹)	پتاسیم قابل دسترس Potassium available (mg kg ⁻¹)
	0-40	4.5	7.68	0.6	8.25	5	16.2	227
	40-100	8.3	7.91	0.43	10	6	18.6	230
ویژگی‌های آب Water properties	هدایت الکتریکی Electrical Conductivity (dS m ⁻¹)	pH	آمونیم Ammonium mg L ⁻¹	نیترات Nitrate mg L ⁻¹	فسفر Phosphorus mg L ⁻¹	سدیم Sodium mg L ⁻¹	کلسیم Calcium mg L ⁻¹	منیزیم Mangnesium mg L ⁻¹
	2.82	7.93	---	----	---	380	0.305	1.28

شده است. از این رو، با استفاده از زنجیره تغییر شکل مرتبه اول میزان انتقال نیترات ارزیابی گردید. براساس مطالعه هانسون (Hanson, 2006) (Šimunek & Hopmans, 2006) روند تغییرات NH_4 به شرح زیر است:



(۶)

چرخه فوق شامل چند فرآیند می‌باشد: (۱) تبخیر آمونیاک، (۲) نیتریفیکاسیون، (۳) دنیتریفیکاسون، (۴) جذب سطحی آمونیوم در سطح خاک، و (۵) جذب آمونیوم و نیترات توسط سیستم ریشه که فرآیندهای ذکر شده با استفاده از زنجیره تغییر شکل مرتبه اول مورد ارزیابی قرار می‌گیرد (Hanson et al., 2006). در این تحقیق کود مصرفی به روش سرک به خاک اضافه گردید. بنابراین می‌توان از فرآیند تبخیر آمونیاک صرف‌نظر نمود. همچنین به دلیل پایین بودن درصد ماده آلی خاک و اعمال شرایط غیراشباع طی روش آبیاری در سطح خاک، فرآیند دنیتریفیکاسیون نیز قابل صرف‌نظر می‌باشد. برای بررسی سایر فرآیندها از زنجیره تغییر شکل مرتبه اول استفاده می‌گردد.

معادلات دیفرانسیلی حاکم بر انتقال املاح طی جریان آب در خاک در یک محیط متخلخل با شرایط اشباع تغییرپذیر در زنجیره تغییر شکل مرتبه اول در نظر گرفته می‌شود (Šimunek et al., 2013):

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_w \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C}{\partial z} - \mu_w \theta C \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho S_1}{\partial t} + \frac{\partial a_v g_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_1^w \frac{\partial C_1}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(a_v D_1^g \frac{\partial g_1}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C_1}{\partial z} \\ &- \mu_{w,1} \theta C_1 + \mu_{w,2} \theta C_2 \\ &+ \gamma_{s,1} \rho - r_{a,1} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta C_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_2^w \frac{\partial C_2}{\partial z} \right) - \frac{\partial q C_2}{\partial z} \\ &- \mu_{w,2} \theta C_2 + \mu_{w,1} \theta C_1 \\ &- r_{a,2} \end{aligned} \quad (9)$$

C: غلظت املاح در فاز مایع (mg L^{-1})، S: غلظت املاح در فاز جامد (mg g^{-1})، g: غلظت املاح در فاز گاز (mg L^{-1})، θ : درصد رطوبت حجمی خاک ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، ρ : جرم مخصوص ظاهری (g cm^{-3})، q: شدت جریان (cm day^{-1})، μ_w : نرخ ثابت مرتبه

برای بررسی جریان آب در امتداد پروفیل خاک در دوره آبیاری از TDR (مدل IMKO) در ۳ عمق (۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متر) استفاده گردید که درصد رطوبت خاک قبل و بعد از آبیاری و در فواصل دوره آبیاری اندازه‌گیری شد. دوره آبیاری شش روزه، به مدت هشت ساعت با دبی ۰/۵ متر مکعب در ثانیه صورت گرفت.

همچنین برای بررسی میزان انتقال نیترات و آمونیوم نیز در بازه زمانی قبل و بعد از کوددهی در امتداد پروفیل نمونه‌برداری صورت گرفت و به روش اسپکترومتر و کج‌لدال اندازه‌گیری شد.

مدل هایدروس

مدل هیدرولوژیکی هایدروس با حل عددی معادله ریچاردز (Šimunek et al., 2013) به بررسی جریان آب در خاک می‌پردازد:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K \left(K_{ij}^A \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{iz}^A \right) \right] - S \quad (1)$$

θ : درصد رطوبت حجمی خاک (بدون بعد)، h: بار فشاری [L]، S: بیانگر جذب آب توسط ریشه است $[T^{-1}]$ ، x_i و x_j : مختصات مکانی [L]، t: زمان [T]، K_{ij}^A : اجزاء ناهمسانگرد تانسور بدون بعد و K: تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک $[LT^{-1}]$.

در این مطالعه، مدل هایدروس برای تشریح منحنی رطوبتی خاک، $\theta(h)$ و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک، $K(h)$ از معادله ون‌گنوختن - معلم (۱۹۷۶) استفاده می‌گردد:

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

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

$$m = 1 - 1/n \quad (4)$$

$$K = \begin{cases} K_s S_e^L \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 & \text{if } h \leq 0 \\ K_s & \text{if } h > 0 \end{cases} \quad (5)$$

θ_s و θ_r : به ترتیب درصد رطوبت باقی‌مانده و اشباع خاک (بدون بعد)، α : عکس مکش در نقطه ورود هوا $[L^{-1}]$ ، K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع خاک $[LT^{-1}]$ ، n: شاخص توزیع اندازه ذرات (بدون بعد)، S_e : اشباع مؤثر (بدون بعد) و l: پارامتر اعوجاج (بدون بعد) برابر با ۰/۵ تخمین زده شده است (Mualem, 1976).

با کاربرد مدل هایدروس می‌توان به‌طور همزمان سرنوشت و انتقال چند نوع نمک را در زنجیره تغییر شکل مرتبه اول و صفر بررسی نمود (Šimunek et al., 2013). در این تحقیق به بررسی انتقال نیترات در امتداد پروفیل خاک طی کاربرد کود سوپر فسفات دی آمونیوم پرداخته

برابر با ۰/۸ در نظر گرفته شد. شاخص سطح برگ نیز با اندازه‌گیری سطح هر برگ با استفاده از دستگاه برگ‌سنج مدل Licow تعیین گردید.

شرایط مرزی برای جریان آب و انتقال املاح در مدل سه بعدی هایدروس

مرز بالایی به علت اینکه در تماس با اتمسفر است و میزان تبخیر از سطح خاک، بارندگی، ترق از سطح گیاه و سطح آب زیرزمینی تأثیر دارند، شرایط مرزی اتمسفری در نظر گرفته شد. از سوی دیگر به دلیل پایین بودن سطح آب زیرزمینی در سطح مزرعه، آب مازاد از منطقه ریشه خارج گردید و امکان تهویه و تنفس ریشه گیاه فراهم بود، زهکشی آزاد به‌عنوان شرایط مرزی پایینی انتخاب گردید. برای بررسی انتقال املاح نیز از شرایط مرزی نوع سوم کوشی، مرز بالایی از نوع ۳ (دبی غلظت شرایط مرزی) و مرز پایینی از نوع ۲ (شیب غلظت صفر) در نظر گرفته شد.

برآورد پارامترهای هیدرولیکی موردنیاز در مدل هایدروس
برای بررسی جریان آب در خاک، میزان انتقال نیترات در امتداد پروفیل خاک نیاز به تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک می‌باشد که در این تحقیق از روش حل معکوس برپایه Marquardt–Levenberg optimization algorithm (Marquardt, 1963) در محیط مدل هایدروس ۱ بعدی به‌منظور کاهش عدم قطعیت مدل و برآورد بهتری از پارامترها استفاده گردید. در مدل ۳ بعدی تغییرات مکانی و زمانی سبب افزایش عدم قطعیت در برآورد پارامترها می‌گردد. برای اجتناب از افزایش خطا از مدل هایدروس ۱ بعدی استفاده شد. برای بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک نیاز به تعیین مقدار اولیه آن‌ها می‌باشد که از خروجی نرم‌افزار Rosetta استفاده گردید. بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی با هدف کمینه‌کردن مقدار رطوبت اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی شده در دو عمق مورد مطالعه در زمان‌های مختلف آبیاری صورت گرفت. همچنین پارامترهای انتقال املاح: μ_w ، μ_s ، K_d ، ε_L ، ε_T نیز با هدف کمینه‌کردن اختلاف بین غلظت آمونیوم و نیترات اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده در دو عمق و در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری بهینه‌سازی شدند. ضریب پخشیدگی مولکولی آمونیوم و نیترات در آب خالص به‌ترتیب برابر با ۰/۰۶۴ و ۰/۰۶۸ سانتی‌متر مربع در ساعت (Hanson et al., 2006; Ravikumar et al., 2011) در نظر گرفته شد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل هایدروس

در این تحقیق داده‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک، غلظت نیترات و آمونیوم در سه عمق موردنظر در طی سه ماه متوالی از ژوئن (تیر ماه)

اول برای املاح در فاز مایع (day^{-1})، μ_w : مشابه نرخ ثابت مرتبه اول که ارتباط بین گونه‌های منحصر به فرد زنجیره را فراهم می‌سازد. γ_s : نرخ ثابت مرتبه صفر ام در فاز جامد (day^{-1})، x_d : جذب عناصر غذایی توسط ریشه ($mg\ L^{-1}day^{-1}$)، D_w : ضریب پخشیدگی در فاز مایع ($cm^2\ day^{-1}$)، D_g : ضریب پخشیدگی در فاز گاز ($cm^2\ day^{-1}$)، زیرنویس ۱ و ۲ نیز به‌ترتیب بیانگر NH_4 و NO_3 است. جذب و واجذب NH_4 بین سطح محلول خاک و مکان‌های تبدیلی خاک به‌عنوان یک واکنش فوری در نظر گرفته می‌شود (Nakason, Abbas, & Kuroda, 2004).

$$S_1 = K_{d1} C_1 \quad (۱۰)$$

K_{d1} : ضریب توزیع NH_4 ($L\ mg^{-1}$) است. در مدل هایدروس علاوه بر توزیع آب در خاک، جذب آب توسط ریشه گیاه تحت کشت با استفاده از مدل المان محدود و مدل فدس (RWU (root water uptake) قابل برآورد می‌باشد. در معادله ریچاردز پارامتر S تعریف شده است که درواقع بیانگر میزان آب جذب‌شده توسط ریشه براساس مدل فدس می‌باشد.

$$S_r(\phi xz) = \alpha(\phi xz) \times b(xz) \times T_p \times L \quad (۱۱)$$

$\alpha(\phi, x, z)$ عبارت است از تابع پاسخ تنش آبی که یک تابع بدون بعد از پتانسیل ماتریک خاک (ϕ) است. همچنین $b(xz)$ تابع توزیع نرمال شده جذب آب، L (cm) عرض سطح خاک در ارتباط با ترق و T_p ($cm\ day^{-1}$) نرخ پتانسیل ترق است (Deb, Shukla, & Šimůnek, 2013). در این مطالعه گیاه تحت تنش آبی قرار نداشت. از این‌رو، مقدار α برابر با ۱، طی تغییرات (ϕ) در دامنه بین ۱۰۰ و ۱۰۰۰ سانتی‌متر و بین ۱۰۰ و ۳۰۰۰ سانتی‌متر به‌ترتیب در بازه حداکثر و حداقل پتانسیل ترق روزانه در نظر گرفته شد. برای تعیین پارامترهای موردنیاز $b(xz)$ که به‌ترتیب عبارتند از حداکثر عمق ریشه‌دهی، عمق حداکثر تراکم ریشه، شعاع حداکثر ریشه‌دهی و شعاع حداکثر تراکم طولی ریشه است، از عمق‌های ۱۰۰-۶۰ و ۴۰-۰ سانتی‌متر نمونه‌برداری صورت گرفت. برای تعیین پتانسیل برای برآورد ET_0 روزانه از گزارش‌های ایستگاه هواشناسی دانشگاه بیرجند استفاده گردید. ET_c نیز طی ضرب ET_0 در ضریب محصول مورد نظر (K_c) براساس نشریه ۵۶-FAO تخمین زده شد. همچنین برای تعیین مقدار پتانسیل تبخیر از سطح خاک (E_p) و نرخ پتانسیل ترق (T_p) از فرمول زیر استفاده گردید:

$$E_p = ET_c \exp(-k LAI) \quad (۱۲)$$

$$T_p = ET_c - E_p \quad (۱۳)$$

k ضریب جذب نور می‌باشد که در این مطالعه برای گیاه یونجه

تا ماه اوت (پایان شهریور ماه) در سال ۲۰۱۸ صورت گرفت. برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های دو ماه ژوئن و ژوئیه استفاده گردید. داده‌های ماه اوت برای واسنجی مدل به کار گرفته شد. به منظور ارزیابی میزان عملکرد مدل از سه شاخص آماری، ضریب تبیین (R^2)، خطای ریشه میانگین مربعات (RMSE) و معیار ناش-ساتکلیف (NSE) استفاده گردید.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [P_i - O_i]^2} \quad (15)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

O_i : مقدار اندازه‌گیری‌شده در روز i ام. P_i : مقدار شبیه‌سازی‌شده در روز i ام. $\bar{O}$: میانگین مقدار اندازه‌گیری‌شده. N : تعداد کل نقاط نمونه‌برداری.

شاخص $NSE = 1$ بیانگر تطبیق کامل بین شبیه‌سازی مدل و مقادیر اندازه‌گیری است. $NSE = 0$ میزان دقت برآورد مدل برابر با میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده است. درحالی که مقدار NSE کمتر از صفر به دست آید، میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده نسبت به خروجی مدل دارای عملکرد بهتری می‌باشد. بنابراین، هر چه مقدار NSE به یک نزدیک‌تر باشد، مدل در شبیه‌سازی دارای دقت بالای است (Nash, 1970).

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل ۳ بعدی هایدروس

با توجه به جدول ۱، از نظر توزیع اندازه ذرات، خاک مزرعه در لایه سطحی از نوع سنگین (Sandy Clay Loam) و در لایه عمقی از نوع سبک (Sandy Loam) بود. از این رو، دوره آبیاری ۶ روز با دبی ۰/۵ متر مکعب در ثانیه انتخاب شد. در هر دوره آبیاری مزرعه به مدت ۸ ساعت و دامنه رشد گیاه پونجه ۴۵ روزه بود. با توجه به نتایج جدول ۱، خاک مزرعه از نظر مواد آلی نسبتاً فقیر بود و همچنین از نظر عناصر غذایی نیز در محدودیت قرار داشت. از این رو، از کود سوپر فسفات دی آمونیوم به‌طور تناوبی در هر دوره آبیاری به‌صورت سرک استفاده گردید. به دلیل فقیر بودن خاک از نظر فسفر، تأمین فسفر از طریق کوددهی در زمان آماده‌سازی زمین جواب‌گوی نیاز گیاه طی دوره چهار ساله نبود. در کنار بازه طولانی مدت دوره کشت، خاک منطقه از نوع آهکی است که مانع در دسترس قرار گرفتن فسفر برای ریشه گیاه نیز می‌گردد. بنابراین به‌منظور تأمین فسفر در بازه‌های زمانی مختلف، این کود متناوباً در چین‌های یک درمیان استفاده شد. قابل ذکر است اگرچه گیاه تحت مطالعه از خانواده بقولات بود. به دلیل درصد پایین مواد آلی خاک،

بالا بودن دمای سطح خاک و مصرف کود و همچنین استفاده از آب نسبتاً شور به‌عنوان منبع آبیاری سبب عدم تشکیل غدد تثبیت‌کننده نیتروژن در سیستم ریشه‌ی گیاه گردید (Eardly, Hannaway, & Bottomley, 1985; Hannaway & Shuler, 1993). برای بررسی میزان جریان آب در خاک طی روش آبیاری و همچنین مطالعه انتقال املاح در امتداد پروفیل خاک نیاز به برآورد پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح می‌باشد. در این مطالعه پارامترهای موردنیاز برای برآورد رطوبت و غلظت املاح با استفاده از داده‌های رطوبت خاک طی اندازه‌گیری با TDR در زمان‌های مختلف آبیاری و مقدار غلظت نترات و آمونیوم در زمان‌های گوناگون با استفاده از حل معکوس برپایه الگوریتم لوبرگ-مارکوارت بهینه‌سازی گردید. قابل ذکر می‌باشد که روند تغییرات رطوبت و املاح در خاک تحت مدل هایدروس ۳ بعدی بررسی شد. تغییرات مکانی از عوامل مؤثر در افزایش خطا و کاهش دقت مدل در بهینه‌سازی پارامترها است. به‌منظور به حداقل رساندن عدم قطعیت پارامترها در مرحله بهینه‌سازی از مدل هایدروس ۱ بعدی بهره گرفته شد. در این تحقیق با هدف کاهش منبع آبیاری و افزایش بهره‌وری از روش آبیاری سنتریپوت استفاده شد. بنابراین در فرآیند شبیه‌سازی جریان آب در خاک، جریان غیراشباع خاک، با در نظر گرفتن شرایط اتمسفری در حد بالای شرایط مرزی حکمفرما است. پارامترهای هیدرولیکی مورد نیاز برای مطالعه جریان آب در خاک طی روش آبیاری سنتریپوت برپایه مقادیر اولیه حاصل از نرم‌افزار Rosetta بهینه‌سازی شدند (جدول ۲).

در کنار جریان آب در خاک، میزان انتقال نترات و آمونیوم در سرتاسر پروفیل بررسی گردید که قابل ذکر می‌باشد که به دلیل پایین بودن درصد مواد آلی، نیتروژن و فسفر خاک سبب اعمال مدیریت کوددهی در سطح مزرعه به روش سرک شد. با توجه به فرآیند کوددهی و کاربرد آب آبیاری با EC بالا در مرز شوری سبب عدم تشکیل غدد تثبیت‌کننده نیتروژن در سطح ریشه گیاه گردید. همچنین به دلیل حاکم بودن شرایط غیراشباع در محیط ریشه گیاه در تمام دوره کشت، در این تحقیق فرآیند نیتریفیکاسیون طی فرآیند کوددهی با توجه به شرایط حاکم در نظر گرفته شد. با در نظر گرفتن فرآیند نیتریفیکاسیون پارامترهای مورد نیاز، ضریب جذب (K_d)، ضریب انتشارپذیری طولی و عرضی (ϵ_L و ϵ_T) و μ_s و μ_w برای هر دو عنصر مورد مطالعه بهینه‌سازی شدند (جدول ۲). ضریب توزیع در دو عمق مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۳/۰۹ و ۳ سانتی‌متر مکعب بر گرم به‌دست آمد که در محدوده تغییرات حاصل توسط هانسون و همکاران (Hanson et al, 2016) قرار دارد و با نتایج آزاد و همکاران (Azad, Behmanesh, Rezaverdinejad, Abbasi, & Navabian, 2018) طی بهینه‌سازی پارامترهای انتقال نترات و آمونیوم در خاک نیز هم‌خوانی دارد.

جدول ۲- مقادیر بهینه شده از الگوریتم مارکوآدت-لویبنبرگ

Table 2- Optimized values of Marquardt-Levenberg algorithm

افق های خاک Soil layers (cm)	ویژگی های هیدرولیکی خاک Soil hydraulic properties					پارامترهای انتقال املاح Solute Transport Parameters				
	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (-)	K_s (cm day ⁻¹)	ε_T (cm)	ε_L (cm)	K_d (cm ³ g ⁻¹)	μ_s (day ⁻¹)	μ_w (day ⁻¹)
0-40	0.051	0.34	0.03	1.25	8.1	0.4	0.04	3.09	0.179	0.166
40-100	0.06	0.38	0.027	1.5	47.2	0.6	0.06	3	0.202	0.2

θ_r : The residual water content. θ_s : The saturated water content. α : The inverse of the air-entry value. n: the pore size distribution index. K_s : The saturated hydraulic conductivity. ε_T : Transversal dispersivity of soil. ε_L : Longitudinal dispersivity of soil. K_d : Distribution coefficient of NH₄⁺-N sorption by soil particles. μ_s : Rate coefficient of nitrification in the solid phase. μ_w : Rate coefficient of nitrification in a liquid phase.

θ_r : رطوبت باقی مانده، θ_s : رطوبت اشباع. α : نقطه ورود هوا. n: شاخص توزیع اندازه خلل و فرج. K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع. ε_T : پراکندگی عرضی خاک. ε_L : پراکندگی طولی خاک. K_d : ضریب پخشیدگی جذب آمونیوم توسط ذرات خاک. μ_s : ضریب نرخ نیتریفیکاسیون در فاز جامد. μ_w : ضریب نرخ نیتریفیکاسیون در فاز مایع.

روند تغییرات املاح در سه عمق با نتایج حاصل از شبیه سازی از مدل هایدروس ۳ بعدی مورد مقایسه قرار گرفت. روند تغییرات رطوبت، نیترات و آمونیوم خاک در امتداد پروفیل خاک براساس ۳ شاخص آماری، R²، RMSE و NSE بررسی شدند (جدول ۳). مقدار شاخص RMSE برای رطوبت خاک در عمق های مورد مطالعه در مرحله واسنجی به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵۷، ۰/۰۰۴۹ و ۰/۰۰۴۴ به دست آمد.

برای ارزیابی عملکرد مدل هایدروس ۳ بعدی برپایه بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح طی حل معکوس لونبرگ-مارکوآدت در مدل هایدروس ۱ بعدی، نیاز به واسنجی مدل هایدروس ۳ بعدی می باشد. بدین منظور برای بررسی میزان جریان آب در خاک و میزان کارایی عملکرد مدل هایدروس ۳ بعدی در انتقال نیترات و آمونیوم، به ترتیب مقدار رطوبت اندازه گیری شده با استفاده از TDR و

جدول ۳- نتایج حاصل از شاخص های آماری بین رطوبت و انتقال املاح اندازه گیری شده و شبیه سازی شده

Table 3- The obtained results of the statistical analysis between measured and simulated soil water content and solute transport.

	Soil layers (cm)	Statistical Index	Water content (cm ³ cm ⁻³)	NO_3^{-1} (mg L ⁻¹)	NH_4^{+} (mg L ⁻¹)
Validation of HYDRUS 3-D model	0-40	RMSE		0.0057	0.009
		NSE		0.91	0.99
		R ²		0.93	0.93
	40-60	RMSE		0.0049	0.009
		NSE		0.98	0.98
		R ²		0.94	0.91
	60-100	RMSE		0.0044	0.008
		NSE		0.99	0.99
		R ²		0.95	0.93
Validation of HYDRUS 3-D model	0-40	RMSE		0.0021	0.009
		NSE		0.97	0.98
		R ²		0.94	0.94
	40-60	RMSE		0.0038	0.006
		NSE		0.99	0.99
		R ²		0.96	0.95
	60-100	RMSE		0.0029	0.008
		NSE		0.99	0.99
		R ²		0.96	0.95

همچنین برای بررسی دقت مدل در مرحله واسنجی از شاخص NSE و R^2 استفاده گردید که بر طبق **جدول ۳** مقدار NSE به ترتیب در عمق‌های ۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متر برابر با ۰/۹۸، ۰/۹۱ و ۰/۹۹ و مقادیر R^2 برابر ۰/۹۳، ۰/۹۴ و ۰/۹۵ به ترتیب بدست آمد. براساس شاخص NSE و R^2 می‌توان ذکر نمود که مدل هایدروس در عمق‌های مورد نظر در برآورد رطوبت خاک از دقت بالایی برخوردار است. روند تغییرات RMSE به ترتیب برای آمونیوم و نیتрат در محدوده بین ۰/۰۰۸-۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۹-۰/۰۰۸ mg.l می‌باشد که بیانگر روند تغییرات شدید غلظت آمونیوم در امتداد پروفیل خاک است. براساس نتایج **جدول ۳** می‌توان بیان نمود مدل هایدروس ۳ بعدی به خوبی توانسته روند تغییرات غلظت هر دو نمک مورد نظر را برآورد نماید. هر چند که در برآورد روند تغییرات نیترات عملکرد بهتری نسبت به آمونیوم داشته است. از نتایج آخرین ماه نمونه‌برداری برای بررسی میزان صحت‌سنجی مدل استفاده گردید که با توجه به نتایج ارائه شده در **جدول ۳** می‌توان ذکر نمود که میزان توانایی مدل در برآورد مقدار رطوبت و دو نمک مورد مطالعه با افزایش عمق دارای روند افزایشی است. آزاد و همکاران (Azad et al., 2018) با مطالعه روند شبیه‌سازی نیترات و آمونیوم زیرکشت ذرت با مدل دو بعدی هایدروس بیان نمودند که میزان دقت مدل هایدروس در برآورد غلظت نمک‌ها با افزایش عمق دارای روند افزایشی است. نتایج تحقیق داش و همکاران (Dash et al., 2015) نیز بیانگر افزایش عملکرد مدل هایدروس در برآورد روند تغییرات نیترات و رطوبت خاک با افزایش عمق خاک است. در عمق‌های پایین تغییرات درصد رطوبت و غلظت املاح در خاک پایین است به همین دلیل در این تحقیق و سایر تحقیقات مشاهده گردید که در عمق‌های پایین روند افزایشی حاصل شد.

شبیه‌سازی رطوبت و نیترات خاک

روند تغییرات رطوبت خاک و غلظت دو نمک مورد نظر در سه عمق ۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۱۰۰ سانتی‌متر در **شکل ۱** ارائه شده است. با توجه به **شکل ۱** می‌توان بیان نمود که آمونیوم اضافه‌شده به خاک از طریق کوددهی جذب خاک و طی فرآیند نیتریفیکاسیون به نیترات تبدیل شده و جذب گیاه گردید. از آنجایی که کوددهی در این تحقیق به صورت سرک و به صورت تناوبی انجام شده است، از این‌رو می‌توان بیان نمود که آمونیوم دارای روند تغییرات چندانی در عمق زیرین نمی‌باشد. از سوی دیگر سبب کاهش شدید غلظت آمونیوم، در روزهایی که مدیریت مزرعه با عدم کوددهی بوده است.

روند تغییرات غلظت آمونیوم در این دوره نیز توسط مدل به خوبی شبیه‌سازی شد. در مقابل، غلظت نیترات در عمق‌های زیرین نسبت به عمق سطحی به دلیل تجمع ریشه و عمل آیشویی دارای روند افزایشی

می‌باشد. همچنین قابل ذکر است روند تغییرات غلظت هر دو نمک در امتداد پروفیل خاک حاصل کوددهی است زیرا با وجود اینکه گیاه یونجه از خانواده بقولات می‌باشد ولی به دلیل مصرف آب آبیاری با هدایت الکتریکی بالا، درصد پایین مواد آلی و عناصر غذایی مانند فسفر و نیتروژن در خاک و از سوی دیگر اعمال روش کوددهی به صورت تناوبی سبب عدم تشکیل غدد در ریشه گیاه یونجه گیاه گردید. از این سو، نیترات موجود در خاک فقط حاصل فرآیند نیتریفیکاسیون می‌باشد. با توجه به شرایط ذکر شده و **شکل ۳**، نیترات موجود در خاک جذب گیاه گردید و همچنین با توجه به **شکل ۱** انتقال نیترات در امتداد ریشه گیاه از لایه سطحی خاک به مرز بین دو لایه که بیشترین تراکم ریشه است، رخ داده است. در حالی که تجمع نیترات طی شبیه‌سازی و اندازه‌گیری مشاهده نشد. شفیق و همکاران (Shafeeq et al., 2020) با مطالعه آمونیوم و نیترات در محیط ریشه گیاه گندم با استفاده از مدل هایدروس دو بعدی بیان نمودند طی فرآیند کوددهی آمونیوم سریع به نیترات تبدیل گردید و طی شبیه‌سازی مدل هایدروس می‌توان روند تغییرات آمونیوم در خاک بررسی نمود. ایشان بیان نمودند که طی تبدیل آمونیوم به نیترات، تمرکز غلظت نیترات در لایه سطحی خاک است هر چند که تحت فرآیند انتقال به لایه زیرین خاک منتقل می‌گردد.

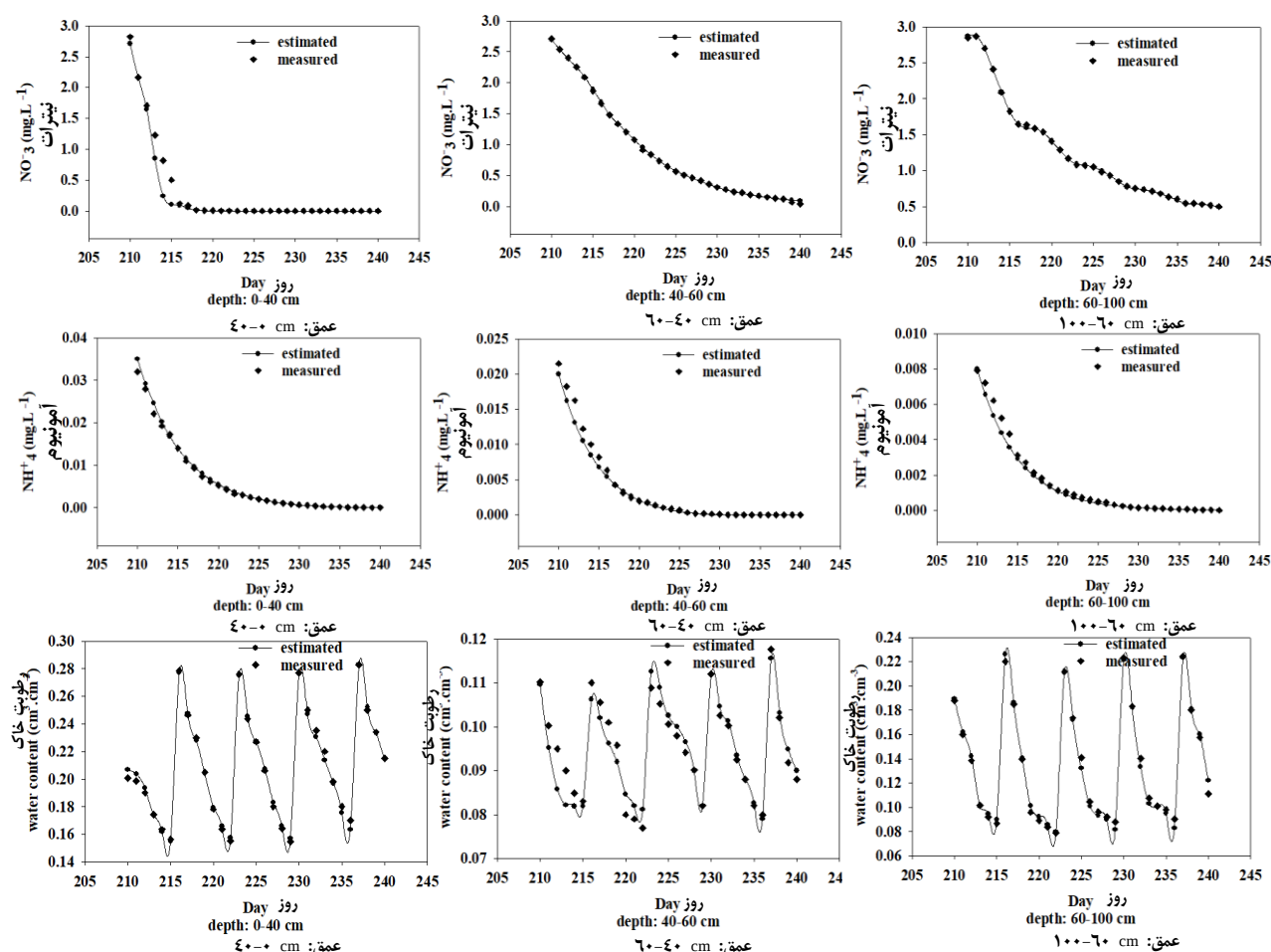
جها و همکاران (Jha et al., 2017) نیز با مطالعه انتقال نیترات تحت لایسیمتر بیان نمودند که با افزایش عمق طی آبیاری، نیترات به لایه‌های زیرین انتقال می‌یابد و سبب افزایش غلظت نیترات در لایه‌های پایینی پروفیل خاک می‌گردد. نتایج تحقیق داش و همکاران (Dash et al., 2014) نیز نشان داد که غلظت نیترات در لایه سطحی خاک روند کاهشی دارد. در مقابل در عمق ۶۰-۳۰، ۹۰-۶۰ و ۱۲۰-۹۰ بر غلظت نیترات خاک افزوده می‌گردد که بیانگر فرآیند انتقال و جذب نیترات توسط گیاه در طول فصل کشت است.

شکل ۱ بیانگر روند تغییرات رطوبت خاک در عمق ۰-۴۰ سانتی‌متر است که در دامنه بین $cm^3 cm^{-3}$ ۰/۰-۱۵۴۶/۲۸۲۹ در حال نوسان می‌باشد. در مقابل دامنه تغییرات رطوبت در عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متر بین $cm^3 cm^{-3}$ ۰/۰-۰۷۷/۱۱۷۶ حاصل شد که در مقایسه با دو عمق دیگر دارای نوسانات کمتری است ولی همان‌طور که در **شکل ۲** نشان داده شد دارای ضریب همبستگی کمتری نسبت به دو عمق سطحی و زیرین خاک می‌باشد.

نوسانات رطوبت در عمق ۴۰-۶۰ سانتی‌متری پروفیل را می‌توان به تغییرات ویژگی‌های هیدرولیکی خاک نسبت داد که در این عمق به دلیل تغییر بافت خاک، توزیع اندازه ذرات دستخوش تغییرات شدیدی می‌گردد. همچنین در این لایه تراکم ریشه نیز بالا است که سبب افزایش جذب آب توسط ریشه می‌شود. کیرتام و همکاران (Kirtham et al., 2019) نیز با استفاده از مدل ۳ بعدی هایدروس به شبیه‌سازی رطوبت و نیترات خاک در عمق‌های مختلف خاک پرداختند که بیانگر

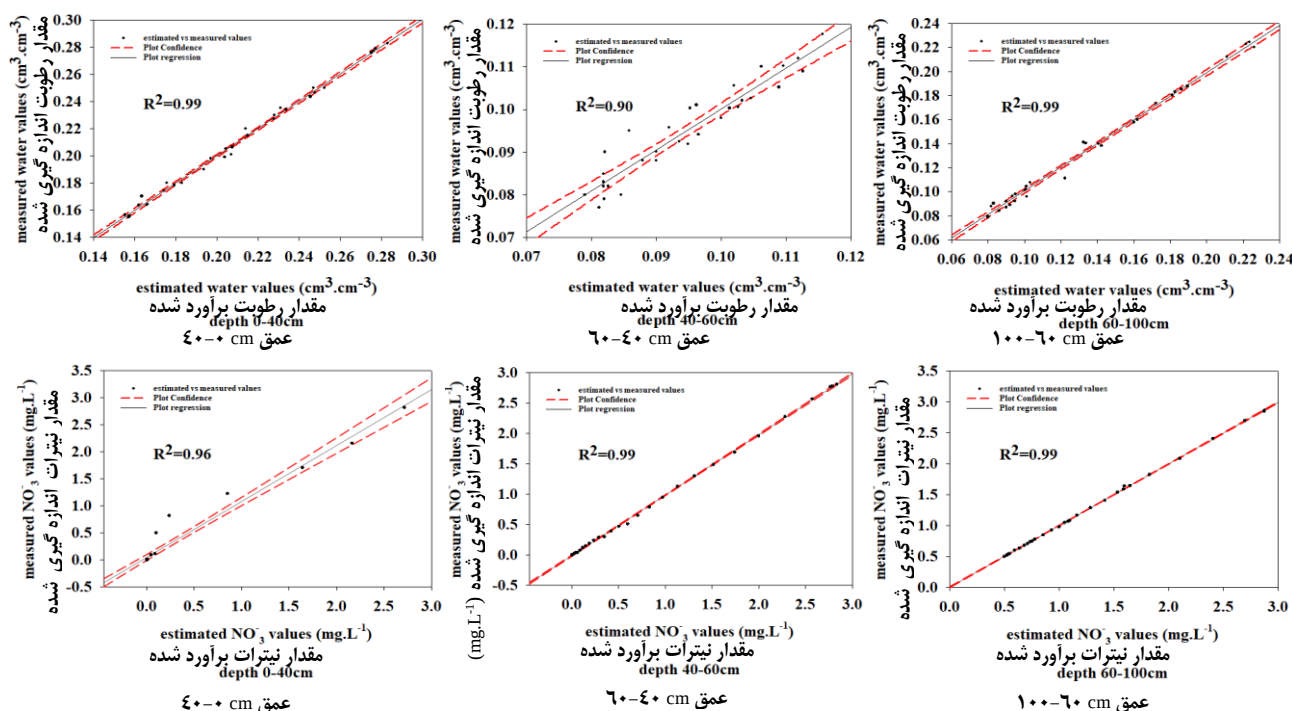
عمق سطحی (۰-۴۰ سانتی متر) می باشد. همچنین روند تغییرات در این بازه دارای نوسانات بالایی است. این روند تغییرات می توان به دلیل مصرف کود سوپر فسفات دی آمونیوم در این عمق باشد. بنابراین غلظت نیترات در این عمق طی فرآیند نیتریفیکاسیون دارای روند تغییرات بالایی است از سوی دیگر تحت فرآیند انتقال نیز می باشد. روند تغییرات غلظت نیترات در عمق ۶۰-۱۰۰ سانتی متری بیانگر فرآیند انتقال در امتداد پروفیل خاک است. هر چند که با توجه به شکل ۲ در این عمق تجمع نیترات رخ نمی دهد ولی تحت فرآیند انتقال قرار دارد. در عمق ۴۰-۶۰ سانتی متری اگرچه مقدار نیترات حاصل از اندازه گیری با مقدار نیترات شبیه سازی توسط مدل ۳ بعدی هایدروس دارای ضریب همبستگی بالایی می باشد ولی نسبت دو عمق دیگر از مقدار کمتری برخوردار است که این کاهش غلظت را می توان به جذب نیترات توسط ریشه گیاه به دلیل افزایش تراکم ریشه در این عمق و همچنین فرآیند انتقال آن نسبت داد.

توانایی مدل هایدروس ۳ بعدی در شبیه سازی رطوبت و نیترات خاک طی بهینه سازی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح با استفاده از الگوریتم مارکوارت- لونبرگ است. ایشان بیان نمودند روش حل معکوس نسبت به روش های آزمایشگاهی یک روش ساده و کاربردی تر در تعیین پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح با دقت بالا می باشد. نتایج تحقیق ابراهیمیان و همکاران (Ebrahimian et al., 2012) نیز نشان داد که مدل هایدروس توانست روند تغییرات رطوبت خاک تحت روش های مختلف آبیاری به خوبی شبیه سازی نماید و همبستگی بالایی بین مقدار رطوبت اندازه گیری شده و شبیه سازی مشاهده گردید که البته این همبستگی در نتایج مدل ۲ بعدی هایدروس نسبت به مدل یک بعدی هایدروس از دقت بیشتری برخوردار بود. در شکل ۲ میزان هم پوشانی مقدار نیترات اندازه گیری شده با مقدار نیترات برآورد شده توسط مدل در عمق های مختلف با استفاده از ضریب همبستگی مورد مقایسه قرار گرفت. کمترین ضریب همبستگی برابر با ۰/۹۶ مربوط به



شکل ۱- روند شبیه سازی رطوبت، آمونیوم و نیترات در عمق های مختلف پروفیل خاک

Figure 1- Trend of simulation soil water, ammonium and nitrate in the different soil depth



شکل ۲- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده غلظت نیترات و رطوبت خاک در عمق‌های مورد مطالعه
Figure 2- Comparison of the measured and simulated values of soil water and nitrate in studied soil depths.

صرف‌نظر می‌باشد. علاوه بر موارد ذکر شده باید به این نکته توجه نمود که این مطالعه در پروفیلی متشکل از دو بافت سنگین و سبک صورت گرفت و در فرآیند مدل‌سازی با مدل هایدروس، شرایط خاک به صورت همگن فرض می‌شود و از سوی دیگر از تغییرات مکانی- زمانی صرف نظر می‌گردد که در شرایط مزرعه به‌ویژه در حالتی که پروفیل خاک از دو لایه بافت با توزیع اندازه ذرات کاملاً متفاوت تشکیل شده است، نادیده گرفتن این شرایط سبب تفاوت عملکرد مدل در فرآیند شبیه‌سازی می‌گردد.

نیتروژن گیاه

با توجه به روش کوددهی، در شکل ۳ به بررسی میزان جذب نیترات توسط ریشه گیاه پرداخته شد. نتایج شکل ۳ حاصل مدل‌سازی جذب نیترات توسط گیاه با استفاده از مدل هایدروس ۳ بعدی است. روند جذب نیترات در طی ۲ سال مدیریتی، سال دوم و چهارم پس از کشت متوالی گیاه یونجه و اعمال روش مدیریتی، با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده و با استفاده از مدل هایدروس ۳ بعدی شبیه‌سازی گردید. روند جذب نیترات در شکل ۳ دارای یک نقطه عطف برای سال‌های مورد مطالعه است که مربوط به زمان کوددهی می‌باشد که با گذشت زمان طی انتقال در دوره‌های آبیاری سبب کاهش جذب نیترات توسط ریشه گیاه می‌گردد. هر چند که میزان جذب نیترات بعد از ۴ سال کشت

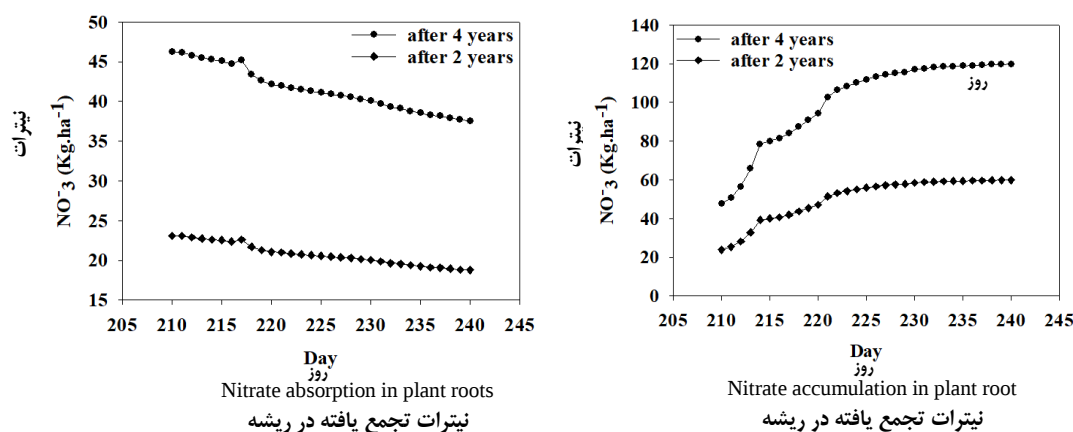
در این تحقیق ضریب توزیع (K_d) برابر با ۰/۰۰۱، توان (Beta) فروندلیچ برابر با ۱ و Nu در ساختار مدل که متناظر با پارامتر جذب سطحی لانگمویر است وقتی برابر با صفر قرار گیرد، پس از ضرایب معادله فروندلیچ در بحث فعالیت املاح در شبیه‌سازی نیترات و آمونیوم با استفاده از مدل ۳ بعدی هایدروس استفاده گردید که با توجه نتایج مطالعه کیرتام و همکاران (Kirtham et al., 2019) می‌توان بیان نمود که در نظر گرفتن معادلات جذب در بحث انتقال املاح نقش شایانی در شبیه‌سازی فرآیند آیشویی و انتقال املاح در امتداد پروفیل خاک دارد و سبب افزایش دقت عملکرد مدل می‌گردد. همچنین ایشان بیان نمودند که طی کاربرد روش حل معکوس، ضریب همبستگی بین نیترات مشاهداتی با نیترات شبیه‌سازی نسبت به نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیترات بر پایه روش‌های آزمایشگاهی دارای دقت بهتری می‌باشد. نتایج بررسی میزان توانایی مدل ۳ بعدی هایدروس در شبیه‌سازی رطوبت، نیترات و آمونیوم خاک نشان داد که با توجه به شاخص‌های آماری می‌توان ذکر نمود که مدل ۳ بعدی هایدروس براساس بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح توانسته است روند تغییرات رطوبت و نمک در امتداد پروفیل خاک تحت روش آبیاری سترپیوت برآورد نماید. هرچند که تفاوت‌هایی با مقادیر اندازه‌گیری شد در سطح مزرعه مشاهده می‌گردد که با توجه به روش آبیاری، نوع گیاه و مدیریت اعمال شده در سطح مزرعه این تفاوت قابل

اندازه‌گیری شده در سیستم ریشه و مقدار شبیه‌سازی شده (شکل ۴) می‌توان به کارایی مدل هایدروس ۳ بعدی اشاره نمود. راموس و همکاران (Ramos et al., 2012) نیز بیان نمودند که با افزایش دوره‌ی کوددهی سبب افزایش جذب نیتروژن به شکل نیترات توسط سیستم ریشه می‌گردد که در شکل ۴ روند افزایشی نیتروژن جذب شده در گیاه نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

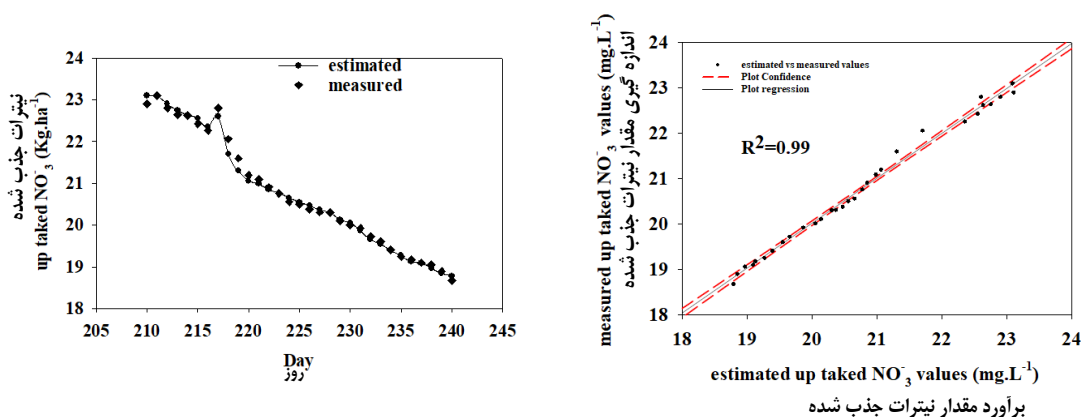
برای بررسی روند تغییرات مکانی- زمانی املاح در روش آبیاری سنتریپوت در محیط ریشه گیاه یونجه چهار ساله، شبیه‌سازی رطوبت و املاح خاک از مدل هایدروس ۳ بعدی بهره گرفته شد.

متوالی نسبت به ۲ سال کشت متوالی بیشتر می‌باشد که این افزایش جذب به توسعه و تکامل ریشه گیاه باز می‌گردد. از سوی دیگر با توسعه و افزایش تراکم ریشه در عمق ۶۰-۴۰ سانتی‌متری در یک بافت سبک به دلیل ویژگی‌های هیدرولیکی یک خاک سبک انتظار می‌رود که میزان انتقال نیترات خاک افزایش گردید که منجر به خارج شدن نیترات در محیط سیستم ریشه‌ای گیاه می‌شود. نتایج تحقیق شاهرخیان و سپاسخواه (Shahrokhnia & Sepaskhah, 2018) نیز نشان داد میزان نیتروژن جذب شده در اندام گیاه در نیمه دوم مرحله رشد دارای روند افزایشی است. ایشان بیان نمودند که با توسعه و تکامل سیستم ریشه سبب افزایش جذب نیتروژن در ریشه اندام هوایی گیاه می‌گردد. همچنین روند تغییرات نتایج ایشان با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل هایدروس بیانگر دقت و کارایی مدل هایدروس در برآورد مقدار نیتروژن ذخیره شده در گیاه است. در این تحقیق نیز با مقایسه نیتروژن



شکل ۳- روند جذب و تجمع نیترات در ریشه گیاه در دو سال مدیریتی

Figure 3- Nitrate absorption and accumulation process in plant roots in two management years.



شکل ۴- روند تغییرات نیترات جذب شده توسط گیاه و میزان همبستگی آن با مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل ۳ بعدی هایدروس
Figure 4- Variation trend of nitrate uptake by plant and correlation between the measured and simulated values by HYDRUS model-3D

با انجام کوددهی در طی چهار سال زمینه برای جذب و تجمع نیترات در سطح ریشه گیاه فراهم می‌گردد. با توجه به نتایج حاصل مدل هایدروس ۳ بعدی می‌توان ذکر نمود که نتایج به‌دست آمده از روش حل معکوس برپایه Marquardt–Levenberg optimization algorithm به‌خوبی توانسته است میزان روند تغییرات رطوبت خاک، آمونیوم و نیترات طی روش آبیاری سنتریپوت به خوبی شبیه‌سازی نماید. با توجه به اینکه این مطالعه در یک بازه طولانی مدت صورت گرفته است، پس الگوریتم بهینه‌ساز Marquardt–Levenberg کارایی لازم و قابلیت ارزیابی تغییرات مورد نظر در این بازه داشته و به خوبی توانسته به بررسی روند تغییرات پارامترهای هیدرولیکی و انتقال املاح در حضور گیاه در حال رشد بپردازد. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد کاربرد روش‌های نوین آبیاری، روش آبیاری سنتریپوت، می‌تواند یک راه حل مناسب مدیریتی برای حل مسئله کاهش منابع آبی طی خشکسالی و تغییر اقلیم در نظر گرفت.

روند واسنجی مدل ۳ بعدی هایدروس در این تحقیق در فرآیند شبیه‌سازی نشان داد که در بحث رطوبت خاک با $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ و $\text{RMSE} = 0.004$ در عمق $0-40 \text{ cm}$ و $\text{RMSE} = 0.0049$ $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ به‌ترتیب در عمق‌های $40-60$ و $60-100 \text{ cm}$ مدل به‌خوبی توانسته است روند تغییرات رطوبت خاک را تحت روش آبیاری سنتریپوت شبیه‌سازی کند. دامنه تغییرات نشان‌دهنده کارایی مدل هایدروس ۳ بعدی در بررسی روند انتقال املاح خاک است. مقایسه مقدار شبیه‌سازی نیترات توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده با استفاده از ضریب همبستگی ارزیابی گردید که بیانگر ضریب همبستگی برابر با 0.96 و 0.99 به‌ترتیب در عمق $0-40 \text{ cm}$ و دو عمق $40-60$ و $60-100 \text{ cm}$ است. روند شبیه‌سازی جذب و تجمع نیترات در گیاه در مدل هایدروس ۳ بعدی بیانگر روند افزایشی در پایان سال چهارم است که با توسعه و تکامل ریشه و از سوی دیگر

References

1. Azad, N., Behmanesh, J., Rezaverdinejad, V., Abbasi, F., & Navabian, M. (2018). Evaluation of fertigation management impacts of surface drip irrigation on reducing nitrate leaching using numerical modeling. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(36), 36499-36514. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06699-2>
2. Baram, S., Couvreur, V., Harter, T., Read, M., Brown, P. H., Kandelous, M., & Hopmans, J.W. (2016). Estimating nitrate leaching to groundwater from orchards: comparing crop nitrogen excess, deep vadose zone data-driven estimates, and HYDRUS modeling. *Vadose Zone Journal*, 15(11), 125-142. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.07.0061>
3. Cai, G., Vanderborght, J., Couvreur, V., Mboh, C.M., & Vereecken, H. (2018). Parameterization of root water uptake models considering dynamic root distributions and water uptake compensation. *Vadose Zone Journal*, 17(1), 110-128. <https://doi.org/10.2136/vzj2016.12.0125>
4. Dash, C.J., Sarangi, A., Singh, D.K., Singh, A.K., & Adhikary, P.P. (2015). Prediction of root zone water and nitrogen balance in an irrigated rice field using a simulation model. *Paddy and Water Environment*, 13(3), 281-290.
5. Deb, S.K., Shukla, M.K., Šimůnek, J., & Mexal, J.G. (2013). Evaluation of spatial and temporal root water uptake patterns of a flood-irrigated pecan tree using the HYDRUS (2D/3D) model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(8), 599-611. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000611](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000611)
6. Ebrahimian, H., Liaghat, A., Parsinejad, M., Abbasi, F., & Navabian, M. (2012). Comparison of one-and two-dimensional models to simulate alternate and conventional furrow fertigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(10), 929-938. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000482](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000482)
7. Eardly, B.D., Hannaway, D.B., & Bottomley, P.J. (1985). Nitrogen nutrition and yield of seedling alfalfa as affected by ammonium nitrate fertilization 1. *Agronomy Journal*, 77(1), 57-62. <https://doi.org/10.2134/agronj1985.00021962007700010014x>
8. Ghazouani, H., Autovino, D., Rallo, G., Douh, B., & Provenzano, G. (2016). Using Hydrus-2D model to assess the optimal drip lateral depth for Eggplant crop in a sandy loam soil of central Tunisia. *Italian Journal Agrometeorology*, 1, 47-58. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2015024>
9. Golmohammadi, F. (2014). Saffron and its farming, economic importance, export, medicinal characteristics and various uses in South Khorasan Province-East of Iran. *International Journal of Farming and Allied Sciences*, 3(5), 566-596.
10. Hannaway, D.B., & Shuler, P.E. (1993). Nitrogen fertilization in alfalfa production. *Journal of Production Agriculture*, 6(1), 80-85. <https://doi.org/10.2134/jpa1993.0080>
11. Hanson, B.R., Šimůnek, J., & Hopmans, J.W. (2006). Evaluation of urea–ammonium–nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management*, 86(1-2), 102-113. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.06.013>
12. He, Y., Hu, K.L., Wang, H., Huang, Y.F., Chen, D.L., Li, B.G., & Li, Y. (2013). Modeling of water and nitrogen

- utilization of layered soil profiles under a wheat–maize cropping system. *Mathematical and Computer Modelling*, 58(3-4), 596-605. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.10.060>
13. Hopmans, J.W., Šimůnek, J., Romano, N., & Durner, W. (2002). 3.6. 2. Inverse Methods. *Methods of soil analysis: Part 4 Physical methods*, 5, 963-1008. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4c40>
14. Jha, R.K., Sahoo, B., & Panda, R.K. (2017). Modeling the water and nitrogen transports in a soil–paddy–atmosphere system using HYDRUS-1D and lysimeter experiment. *Paddy and Water Environment*, 15(4), 831-846. <https://doi.org/10.1007/s10333-017-0596-9>
15. Kirkham, J.M., Smith, C.J., Doyle, R.B., & Brown, P.H. (2019). Inverse modelling for predicting both water and nitrate movement in a structured-clay soil (Red Ferrosol). *Peer Journal*, 6, e6002. <https://doi.org/10.7717/peerj.6002>
16. Liu, H.L., Yang, J.Y., Tan, C.S., Drury, C.F., Reynolds, W.D., Zhang, T.Q., & Hoogenboom, G. (2011). Simulating water content, crop yield and nitrate-N loss under free and controlled tile drainage with subsurface irrigation using the DSSAT model. *Agricultural Water Management*, 98(6), 1105-1111. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.01.017>
17. Mallants, D., Karastanev, D., Antonov, D., & Perko, J. (2007, January). *Innovative in-situ determination of unsaturated hydraulic properties in deep Loess sediments in North-West Bulgaria*. In The 11th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (pp. 733-739). American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. <https://doi.org/10.1115/ICEM2007-7202>
18. Marquardt, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441. <https://doi.org/10.1137/0111030>
19. Morianou, G., Karatzas, G.P., Arampatzis, G., Pisinaras, V., & Kourgialas, N.N. (2025). Assessing soil water dynamics in a drip-irrigated grapefruit orchard using the HYDRUS 2D/3D model: A comparison of unimodal and bimodal hydraulic functions. *Agronomy*, 15(2), 504. <https://doi.org/10.3390/agronomy15020504>
20. Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
21. Nakasone, H., Abbas, M.A., & Kuroda, H. (2004). Nitrogen transport and transformation in packed soil columns from paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 2(3), 115-124. <https://doi.org/10.1007/s10333-004-0050-7>
22. Nash, J.E. (1970). River flow forecasting through conceptual models part 1-A discussion of principle. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
23. Rallo, G., Baiamonte, G., Juárez, J.M., & Provenzano, G. (2014). Improvement of FAO-56 model to estimate transpiration fluxes of drought tolerant crops under soil water deficit: application for olive groves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(9), A4014001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000693](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000693)
24. Ramos, T.B., Šimůnek, J., Gonçalves, M.C., Martins, J.C., Prazeres, A., & Pereira, L.S. (2012). Two-dimensional modeling of water and nitrogen fate from sweet sorghum irrigated with fresh and blended saline waters. *Agricultural Water Management*, 111, 87-104. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.05.007>
25. Rana, B., Parihar, C.M., Nayak, H.S., Patra, K., Singh, V.K., Singh, D.K., & Jat, M.L. (2022). Water budgeting in conservation agriculture-based sub-surface drip irrigation using HYDRUS-2D in rice under annual rotation with wheat in Western Indo-Gangetic Plains. *Field Crops Research*, 282, 108519. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108519>
26. Ravikumar, V., Vijayakumar, G., Šimůnek, J., Chellamuthu, S., Santhi, R., & Appavu, K. (2011). Evaluation of fertigation scheduling for sugarcane using a vadose zone flow and transport model. *Agricultural Water Management*, 98(9), 1431-1440. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.04.012>
27. Salehi, A.A., Navabian, M., Varaki, M.E., & Pirmoradian, N. (2017). Evaluation of HYDRUS-2D model to simulate the loss of nitrate in subsurface controlled drainage in a physical model scale of paddy fields. *Paddy and Water Environment*, 15(2), 433-442. <https://doi.org/10.1007/s10333-016-0561-z>
28. Shafeeq, P.M., Aggarwal, P., Krishnan, P., Rai, V., Pramanik, P., & Das, T.K. (2020). Modeling the temporal distribution of water, ammonium-N, and nitrate-N in the root zone of wheat using HYDRUS-2D under conservation agriculture. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(2), 2197-2216. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06642-5>
29. Shahrokhnia, M.H., & Sepaskhah, A.R. (2018). Water and nitrate dynamics in safflower field lysimeters under different irrigation strategies, planting methods, and nitrogen fertilization and application of HYDRUS-1D model. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8563-8580. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1184-7>
30. Silva Ursulino, B., Maria Gico Lima Montenegro, S., Paiva Coutinho, A., Hugo Rabelo Coelho, V., Cezar dos Santos Araújo, D., Cláudia Villar Gusmão, A., & Angulo-Jaramillo, R. (2019). Modelling soil water dynamics from soil hydraulic parameters estimated by an alternative method in a tropical experimental basin. *Water*, 11(5), 1007. <https://doi.org/10.3390/w11051007>
31. Šimůnek, J., Jacques, D., Langergraber, G., Bradford, S.A., Šejna, M., & Van Genuchten, M.T. (2013). Numerical modeling of contaminant transport using HYDRUS and its specialized modules. *Journal Indian Inst. Science*, 93(2), 265-284. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-10247>

32. Turkeltaub, T., Kurtzman, D., & Dahan, O. (2016). Real-time monitoring of nitrate transport in the deep vadose zone under a crop field—implications for groundwater protection. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(8), 3099-3108. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3099-2016>
33. Turkeltaub, T., Kurtzman, D., Russak, E.E., & Dahan, O. (2015). Impact of switching crop type on water and solute fluxes in deep vadose zone. *Water Resources Research*, 51(12), 9828-9842. <https://doi.org/10.1002/2015WR017612>
34. Viers, J.H., Liptzin, D., Rosenstock, T.S., Jensen, V.B., Hollander, A.D., McNally, A., & Fryjoff-Hung, A., HE Canada, S., Laybourne, C., McKenney, J., Darby, Quinn, JF., & Harter, T. (2012). Nitrogen sources and Loading to Groundwater. *Addressing Nitrate in California's Drinking Water with a Focus on Tulare Lake Basin and Salinas Valley Groundwater, Technical Report*, 2, 37-56. <https://doi.org/10.2134/jeq2013.10.0411>
35. Vrugt, J.A., & Bouten, W. (2002). Validity of first-order approximations to describe parameter uncertainty in soil hydrologic models. *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1740-1751. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1740>
36. Wang, H., Ju, X., Wei, Y., Li, B., Zhao, L., & Hu, K. (2010). Simulation of bromide and nitrate leaching under heavy rainfall and high-intensity irrigation rates in North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97(10), 1646-1654. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.022>
37. Wang, X., Huang, G., Yang, J., Huang, Q., Liu, H., & Yu, L. (2015). An assessment of irrigation practices: Sprinkler irrigation of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 159, 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.011>
38. Wöhling, T., Vrugt, J.A., & Barkle, G.F. (2008). Comparison of three multiobjective optimization algorithms for inverse modeling of vadose zone hydraulic properties. *Soil Science Society of America Journal*, 72(2), 305-319. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0176>