

ارزیابی مدل HYDRUS 2D در شبیه‌سازی حرکت آب و نیتрат در آبیاری فارو ذرت

الناز رضائی آباجلو^{۱*}، سینا بشارت^۲، وحید رضوردی‌نژاد^۲

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۲/۲۴

^۱ دانشجوی دکتری تخصصی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: e_rezayi2010@yahoo.com

چکیده

امروزه شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در روش‌های آبیاری متفاوت با استفاده از مدل‌های مختلفی انجام و ارزیابی می‌گردد. هدف این تحقیق مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی تیمارهای مختلف آبیاری فارو در مدل دو بعدی HYDRUS با آزمایش‌های تجربی مزرعه می‌باشد. تیمارهای مورد مطالعه شامل آبیاری سنتی (CI)، آبیاری یک در میان ثابت (FPRI) و کم‌آبیاری (DI) بود. مقادیر شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مربوط به رطوبت برآوردی در سه تیمار، در بازه ۰/۰۳ تا ۰/۰۵ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) محاسبه شده است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، با گذشت ۱۰ روز از دوره شبیه‌سازی، نحوه توزیع رطوبت در اطراف منطقه جذب ریشه در حدود رطوبت سهل الوصول قرار داشته و امکان افزایش دور آبیاری تا ۱۳ روز به جای ۱۰ روز وجود داشت. میزان نیترات برآوردی تیمار FPRI و DI در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده، حالت بیش‌برآوردی از خود نشان داده است. پتانسیل آبخویی نیترات از عمق ۴۰ (cm) در تیمارهای مختلف نیز به صورت $\text{FPRI} < \text{DI} < \text{CI}$ بوده است. بدین ترتیب، در تیمارهای کم‌آبیاری نیتروژن بیشتری در اختیار گیاه قرار می‌گیرد. بنابراین، مدل دو بعدی HYDRUS به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در شبیه‌سازی و اعمال مدیریت‌های مختلف مصرف آب و املاح در آبیاری فارو قابل توصیه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری یک‌درمیان ثابت، انتقال نیترات، توزیع رطوبت، شبیه‌سازی، کم‌آبیاری

Evaluation of HYDRUS - 2D Model in Water and Nitrate Transport Simulation at Maize Furrow Irrigation

E Rezaei Abajelu^{*1}, S Besharat², V Rezaverdineghad²

Received: 14 February 2016

Accepted: 14 March 2017

1 - Ph.D. Student, Water Eng. Dept., Faculty of Agriculture, University of Urmia, Iran

2-Assist. Prof., Water Eng. Dept., Faculty of Agriculture, University of Urmia, Iran

*Corresponding Author, Email: e_rezayi2010@yahoo.com

Abstract

Nowadays, Water and solute transport simulations in different irrigation methods are evaluated using different models. The purpose of this study was to compare the simulation results of HYDRUS-2D model for different furrow irrigation treatments with field experiments. Treatments included Conventional Irrigation (CI), Fixed Partial Root Irrigation (FPRI) and Deficit Irrigation (DI). Root Mean Square Error (RMSE) values were calculated in the range of 0.03 to 0.05 ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) for the estimated water content in the treatments. According to the simulation results, after a period of a 10 days, the distribution of moisture around the root zone was in the range of the readily available water content, so it was possible to increase irrigation interval up to 13 days instead of 10 days. Estimated nitrate values of FPRI and DI treatments showed an overestimation in comparison with the measured values. The potential for nitrate leaching at 40 cm depth would be estimated in the order of $\text{CI} > \text{DI} > \text{FPRI}$ for different treatments. Thus, more nitrogen was available to the plant in deficit irrigation treatments (DI, FPRI). Therefore, HYDRUS-2D model is advisable as a powerful tool in the simulation and management of water and solute consumptions in the furrow irrigation.

Keywords: Deficit irrigation, Fixed partial root irrigation, Nitrate transport, Simulation, Water distribution

مقدمه

۲۰۱۰، ابراهیمیان و همکاران ۲۰۱۱ و اسلاتنی و همکاران (۲۰۱۱). هر روش آبیاری که بتواند نیاز آبی گیاه را برطرف کند در حالی که باعث نفوذ عمقی مواد مغذی نشود، مطمئناً بهینه‌ترین شرایط رطوبتی را در منطقه ریشه ایجاد می‌کند. طی مطالعات انجام شده، مشاهده شد که در روش آبیاری جویچه‌ای یک در میان متناوب، مقدار جذب نیتروژن نسبت به آبیاری جویچه‌ای معمولی بیشتر بوده است (هو و همکاران ۲۰۰۹). مدل‌های شبیه‌سازی انتقال آب و املاح، به کاربر توانایی تصمیم‌گیری در زمینه‌های مختلف مدیریت آب و کود در مزرعه را می‌دهد. عباسی و همکاران (۲۰۰۴) نشان دادند که مدل هایدرس^۱ دو بعدی با دقت بالایی

در سال‌های اخیر منابع آبی در دسترس برای مصارف کشاورزی به دلیل افزایش در مصارف صنعتی و خانگی (شهری) کاهش یافته است. بنابراین افزایش میزان ذخیره آب و بهره‌وری آب به منظور مقابله با بحران آبی موجود در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضرورت می‌یابد. قابل توجه است که حدود ۹۰ درصد اراضی زراعی با استفاده از روش فارو مورد آبیاری قرار می‌گیرند (تیرسلین و ویدال ۲۰۰۶). لیکن در صورت اعمال طراحی خاص این روش آبیاری و روش‌های مدیریتی، راندمان بهره‌وری آب می‌تواند به میزان قابل توجهی، افزایش یابد (ورلت و همکاران، ۱۹۹۸). محققان بسیاری، استفاده از روش آبیاری فارو متناوب را در این راستا توصیه نمودند (تیند و همکاران

¹ HYDRUS-2D

آبیاری فارو به‌همراه انتقال نیترات در صورت افزایش بهره‌وری مصرف آب و نیترات می‌باشد. مدل مذکور برای شبیه‌سازی انتقال آب و نیترات در مقطع عرضی آبیاری فارو متناوب (FPRI) و سنتی (CFI) و نیز تیمار کم‌آبیاری (DI) به کار رفته است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌منظور گردآوری داده‌های لازم در مزرعه پژوهشی دانشکده کشاورزی واقع در دانشگاه ارومیه در موقعیت جغرافیایی با طول جغرافیایی ۴۵ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه شمالی در ارتفاع ۱۳۳۲ متر بالاتر از سطح دریا انجام گردیده است. تیمارها مشتمل بر آبیاری جویچه‌ای سنتی و آبیاری متناوب ثابت و کم‌آبیاری (آبیاری با ۷۵ درصد آب مورد نیاز) همراه با اعمال کود می‌باشد. در آبیاری جویچه‌ای به‌صورت سنتی، همه جویچه‌ها آبیاری شده و محصول، تحت هیچگونه تنش نبوده است (CI). در آبیاری یک در میان ثابت، در هر دوره آبیاری جویچه‌ها به‌صورت یک در میان آبیاری می‌شوند و از اول تا آخر فصل رشد، جویچه‌های آبیاری شده ثابت می‌مانند و جویچه‌های آبیاری نشده هم، خشک و بدون آبیاری باقی می‌مانند. در تیمار آبیاری مذکور، ۷۵٪ آب مورد نیاز گیاه، به آن داده می‌شود (FPRI). تیمار کم‌آبیاری (DI) مشابه با تیمار آبیاری سنتی بوده با این تفاوت که ۲۵ درصد آب کمتری را در اختیار داشته است. برای تعیین زمان آبیاری و مقدار آب آبیاری از نسخه ۸ نرم‌افزار کراپ‌وات^۲ استفاده شده است. دور آبیاری ۱۰ روزه در طی فصل رشد ذرت در نظر گرفته شد. به‌منظور اندازه‌گیری رطوبت خاک در نقاط مختلف آزمایش در شیار آبیاری‌شده، شیار آبیاری‌نشده و روی پشته تیمارها، از دستگاه TDR (مدل PR2) استفاده گردید. دستگاه رطوبت‌سنج با هر قرارگیری در نقطه مورد نظر، هم‌زمان عمق‌های ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ (cm) را اندازه می‌گیرد. به‌این‌ترتیب، رطوبت یک روز قبل از آبیاری،

می‌تواند حرکت آب و املاح در آبیاری فارو را شبیه‌سازی نماید. کریویزر و همکاران (۲۰۰۸) آبیاری فارو سنتی و متناوب را در مدل هایدرس دوبعدی در شرایط پخش کود، کالیبره و اعتبارسنجی نمود. مدل مذکور با دقت بالایی توانست پتانسیل ماتریک خاک، غلظت نیترات و آبشویی نیتروژن به‌خصوص در شرایط آبیاری فارو سنتی را شبیه‌سازی نماید. آنها نشان دادند که تلفات ناشی از آبشویی کود، علاوه بر مدیریت آب به مدیریت کود نیز بستگی دارد. به هر حال، مدیریت بهینه آب و کود برای جلوگیری از کاهش کیفیت منابع آب و خاک به‌علت مصرف بی‌رویه کودهای شیمیایی اجتناب ناپذیر است. ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۲) کوددهی در آبیاری فارو متناوب را با استفاده از مدل ترکیبی هایدرس و مدل کوددهی سطحی (عباسی و همکاران ۲۰۰۴) شبیه‌سازی نمودند. سیمونیک و همکاران (۲۰۱۶) با شبیه‌سازی آبیاری فارو در بافت لومی، تاثیر زمان‌های مختلف کوددهی را بر روی میزان جذب آب و املاح، نفوذ عمقی و آبشویی ارزیابی نمودند. بیشترین کمترین میزان جذب املاح توسط گیاه در صورت اعمال کود آبیاری به‌ترتیب در زمان میانه و آغاز دوره آبیاری مشاهده می‌گردید. نتایج شبیه‌سازی سناریو آبیاری فارو متناوب با سطح پوششی پلاستیکی، نشان داد که با وجود راندمان ذخیره بالای آب و کاهش آب مصرفی تا حدود ۵۰ درصد، محصول تولیدی در حدود کمتر از ۲۰ درصد کاهش یافته است. دب و همکاران (۲۰۱۶) توزیع مکانی و زمانی نیترات-نیتروژن ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) در آبیاری فارو متناوب پیاز را با کاربرد مدل دو بعدی هایدرس شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که میزان $\text{NO}_3^- - \text{N}$ مشاهده‌شده در زیر ناحیه توسعه ریشه بالاتر از حدود استانداردهای (مخصوص آب شرب) توصیه‌شده بوده که سبب حجم بالای آبشویی از این منطقه می‌گردد. بنابراین بایستی با افزایش دفعات کودآبیاری در مراحل اولیه تشکیل پیاز، هم میزان املاح مورد نیاز گیاه تأمین گردد و هم پتانسیل آبشویی کمتری برای $\text{NO}_3^- - \text{N}$ وجود داشته باشد. هدف از این مطالعه ارزیابی دقت مدل هایدرس در شبیه‌سازی

² Cropwat Software

تخلیه جریان آب در معادله ریچاردز، C_S غلظت مربوط به جزء تخلیه (g cm^{-3}) که D_{ij} می‌تواند به صورت زیر تعریف گردد (عباسی و همکاران ۱۳۸۶):

[۵]

$$\theta D_{ij}^w = D_T |q| \delta_{ij} + (D_L - D_T) \frac{q_i q_j}{|q|} + \theta D_w \tau_w \delta_{ij}$$

که در آن D_w ضریب انتشار مولکولی در آب آزاد ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$) که میزان آن برای نیترات 0.068 انتخاب شد (باون و همکاران ۱۹۹۳)، τ_w : عامل خمیدگی خلل و فرج خاک، δ_{ij} : تابع دلتای کرونکر (مقدار آن یک یا صفر است)، D_L ضریب پخش‌پذیری طولی (cm) و D_T ضریب انتشارپذیری عرضی (cm) که میزان آن بنا بر باون (۱۹۹۳) برابر با $0.1 \times D_L$ در نظر گرفته شد. جزء تخلیه (S) معرف حجم آب تخلیه‌شده از حجم واحد خاک به‌منظور جذب گیاهی می‌باشد. در مدل هایدرس این پارامتر بر اساس معادله فوس و همکاران (۱۹۷۸) استخراج می‌گردد. غلظت نیترات و رطوبت اندازه‌گیری شده در محیط جریان به‌عنوان مقادیر اولیه شبکه حل در نظر گرفته شدند. غلظت بیشینه نیترات در جزء تخلیه (C_S) بنا بر توصیه کریویزر و همکاران (۲۰۰۸) می‌باشد. در مدل هایدرس این پارامتر بر اساس معادله فوس و همکاران (۱۹۷۸) استخراج می‌گردد. غلظت نیترات و رطوبت اندازه‌گیری شده در محیط جریان به‌عنوان مقادیر اولیه شبکه حل در نظر گرفته شدند. غلظت بیشینه نیترات در جزء تخلیه (C_S) بنا بر توصیه کریویزر و همکاران (۲۰۰۸) برابر با $10^{-3} \times 0.15$ (g cm^{-3}) انتخاب گردید. هندسه شبیه‌سازی شده در آبیاری یک در میان ثابت در شکل ۱ نشان داده شده است.

روز آبیاری و در روزهای متوالی پس از آبیاری اندازه‌گیری شدند. نمونه‌برداری خاک برای اندازه‌گیری غلظت نیترات در عمق‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ (cm) خاک صورت گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری نیترات موجود در خاک با استفاده از روش کاهشی کادمیم اندازه‌گیری گردید. برای بررسی جریان آب در محیط متخلخل از معادله دو بعدی ریچاردز در مدل هایدرس استفاده شده است. منحنی رطوبتی خاک $\theta(h)$ با معادله وان گنوختن و هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک $K(h)$ با مدل کاپیلاری معلم مطابق روابط زیر به‌دست آمده است. در روابط ۱، ۲ و ۳، θr رطوبت باقی‌مانده ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، θs رطوبت اشباع ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)، Se اشباع نسبی و $1, m, \alpha, n$ پارامترهای تجربی هستند. مقادیر پارامترهای تجربی با استفاده از توابع انتقالی موجود در هایدرس (مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی) استخراج شدند. این مدل شامل حل عددی معادله ریچاردز برای بررسی حرکت املاح در خاک توسط معادلات انتقال-انتشار است که معادلات مربوط با شرایط اولیه و مرزی خاص به‌روش عناصر محدود Galerkin حل گردیده‌اند. در این تحقیق انتقال نیترات (NO_3^-) با حل معادله زیر شبیه‌سازی شده است (عباسی ۱۳۸۶).

$$\theta(h) = \theta r + \frac{\theta s - \theta r}{(1 + (\alpha h)^n)^m} \quad [۱]$$

$$K(h) = K_s \cdot Se^l \left(1 - (1 - Se^{1/m})^m\right)^2 \quad [۲]$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, n > 1 \quad [۳]$$

$$Se = \frac{\theta - \theta r}{\theta s - \theta r} \quad [۴]$$

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\theta D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial q_i c}{\partial x_i} + \gamma_w \theta - SC_s$$

که در آن c غلظت نیترات در خاک، q_i جزء \vec{q} فلوکس حجمی (cm h^{-1})، D_{ij} تانسور پخشیدگی هیدرودینامیکی ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$)، γ_w ($\text{g cm}^{-3} \text{h}^{-1}$)، ضریب

شامل (D_L, γ_w) با استفاده از روش حل معکوس به روش لونبرگ- مارکوآرت در مدل یک بعدی بهینه‌سازی گردیده (رابطه ۶) و سپس در محیط دو بعدی با استفاده از داده‌های غلظت نیترات موجود در خاک، واسنجی صورت گرفته است. این مرحله از واسنجی برای شرایط ده روز پس از روز کوددهی صورت گرفته است.

در فاز صحت‌سنجی نیز نتایج برآوردی مدل برای شرایط بعد از آبیاری با نتایج مشاهداتی در مزرعه مورد تحلیل قرار گرفت. در رابطه ۶، $\phi(q, b)$ برابر با تابع هدف به منظور بهینه‌سازی، $q_j^*(z, t_i)$ بردار عوامل مشخصه مجهول، $b(D_L, \gamma_w)$ مقادیر اندازه‌گیری شده در عمق z و زمان t_i ، $q_j(z, t_i, b)$ مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل در عمق z و زمان t_i و m به ترتیب تعداد سری‌های اندازه‌گیری شده (رطوبت خاک، مکش ماتریک، غلظت املاح و...) و تعداد قرائت‌ها (داده‌ها) برای هر سری داده و w_{ij} و v_j به ترتیب ضرایب وزنی برای هر قرائت و هر سری از داده‌های اندازه‌گیری شده هستند.

[۶]

$$\phi(q, b) = \sum_{j=1}^m v_j \sum_{i=1}^n w_{ij} [q_j^*(z, t_i) - q_j(z, t_i, b)]^2$$

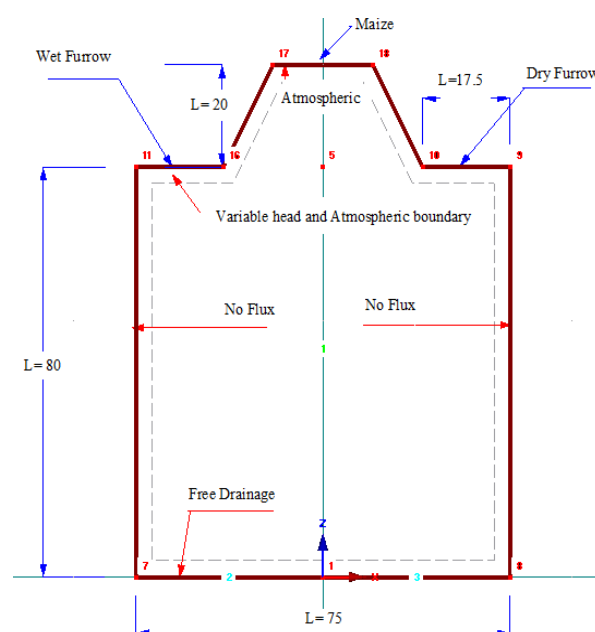
در تحقیق حاضر، به منظور ارزیابی قابلیت کاربرد مدل در برآورد مقدار رطوبت و نیترات خاک، از شاخص‌های $RMSE$ ، CRM و $GMER$ استفاده شد. روابط شاخص‌های مورد استفاده به شرح ذیل می‌باشند:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (O_i - P_i)^2}{k}} \quad [7]$$

$$GMER = \exp \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \ln \left(\frac{P_i}{O_i} \right) \right] \quad [8]$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^k O_i - \sum_{i=1}^k P_i}{\sum_{i=1}^k O_i} \quad [9]$$

که در آن‌ها، k تعداد مشاهدات، O_i مقدار مشاهده‌ای داده، O_{ave} میانگین مقادیر مشاهده‌ای داده، P_i مقدار پیش‌بینی شده برای داده موردنظر، می‌باشند.



شکل ۱- شماتیک تیمار آبیاری FPRI شبیه‌سازی شده در مدل هایدرس.

شرایط مشابهی برای آبیاری سنتی و حالت کم‌آبیاری نیز اعمال شده است. هندسه پروفیل خاک طوری در نظر گرفته شده است که پروفیل توزیع ریشه به صورت متقارن در زیر پشته قرار گیرد. قسمتی از مرز پشته‌ها در طی فرآیند آبیاری به صورت بار آبی متغیر و سپس شرایط تبخیر از سطح خاک (برای زمان پس از آبیاری) در نظر گرفته شده است. در طی فرآیند آبیاری میزان تعرق از گیاه برابر با صفر و در زمان پس از ۳ روز از آبیاری میزان تبخیر از سطح خاک برابر با صفر عنوان شده است (ورات و همکاران ۲۰۰۱). نتایج تحلیل بافت خاک و خصوصیات هیدرولیکی آن از سه عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ (cm) سطح خاک در جدول ۱ گردآوری شده است. یک فرآیند سه مرحله‌ای واسنجی مدل دو بعدی هایدرس برای شبیه‌سازی انتقال آب و املاح منظور گردید. در هر تیمار (ابراهیمیان و همکاران ۲۰۱۲) به عنوان مرحله اول، پارامتر هیدرولیکی n که بنا بر رچا و همکاران (۲۰۰۶) حساس‌ترین پارامتر در آبیاری فارو می‌باشد و به عنوان مرحله دوم با استفاده از مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده در روز آبیاری، مورد واسنجی قرار گرفت. در مرحله سوم مقادیر مربوط به پارامترهای انتقال املاح

شبیه‌سازی میزان انتقال نیترات در پروفیل خاک ارائه شده است.

الف: شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک

در شکل ۲، رطوبت برآوردی زمان‌های بلافاصله پس از آبیاری (پروفیل ترسیم‌شده در بخش a) و ۱۰ روز پس از فرآیند آبیاری (پروفیل ترسیم شده در بخش b) در هر سه تیمار مورد مطالعه، به صورت پروفیل رطوبتی در مقطع محور کارتیزین (دقیقا در محور عمودی پشته) با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج حاصل شده بیان‌گر دقت بالای شبیه‌سازی توسط مدل می‌باشد. در شکل ۳، پروفیل برآوردی میزان رطوبت خاک در زمان‌های بلافاصله پس از فرآیند آبیاری تیمارهای CI، FPRI و DI با دقت بالایی مشاهده می‌گردد. در کل شیب نزولی تغییرات زمانی رطوبت در عمق ۲۰-۰ (cm) بیشتر از دو عمق دیگر می‌باشد. این امر می‌تواند به دلیل تاثیر تبخیر روی کاهش رطوبت خاک سطحی باشد.

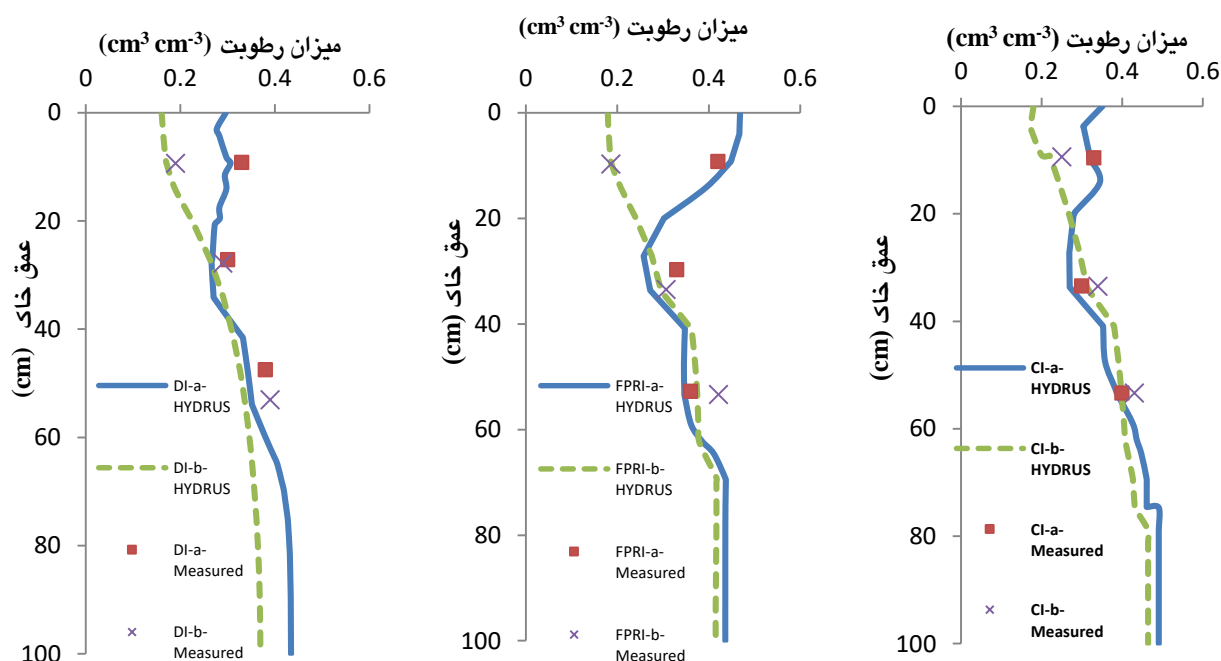
ارزیابی موجود در نتایج به منظور مقایسه شرایط بعد از آبیاری صورت گرفته است. مقدار CRM میزان گرایش مدل به تخمین‌های بالا یا پایین را نشان می‌دهد به طوری که هرچه CRM به صفر نزدیکتر باشد، تخمین دقیق‌تر است. پارامتر GMER بیان‌کننده وجود هماهنگی و تطابق بین مقادیر مشاهده‌ای و برآورد شده می‌باشد. چنانچه مقدار ضریب GMER برابر با یک باشد، بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده مطابقت کامل وجود دارد. از سویی، بیشتر و کمتر بودن این پارامتر نسبت به مقدار یک، به ترتیب نشان‌دهنده کم-برآوردی یا بیش‌برآوردی مدل می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج در سه بخش مجزا شامل شبیه‌سازی میزان رطوبت خاک در پروفیل ۱۰۰ (cm) زیر پشته، جذب آب و نیترات توسط ریشه در مدیریت‌های مختلف آبیاری و

جدول ۱- نتایج تحلیل بافت خاک و خصوصیات هیدرولیکی در لایه‌های مختلف.

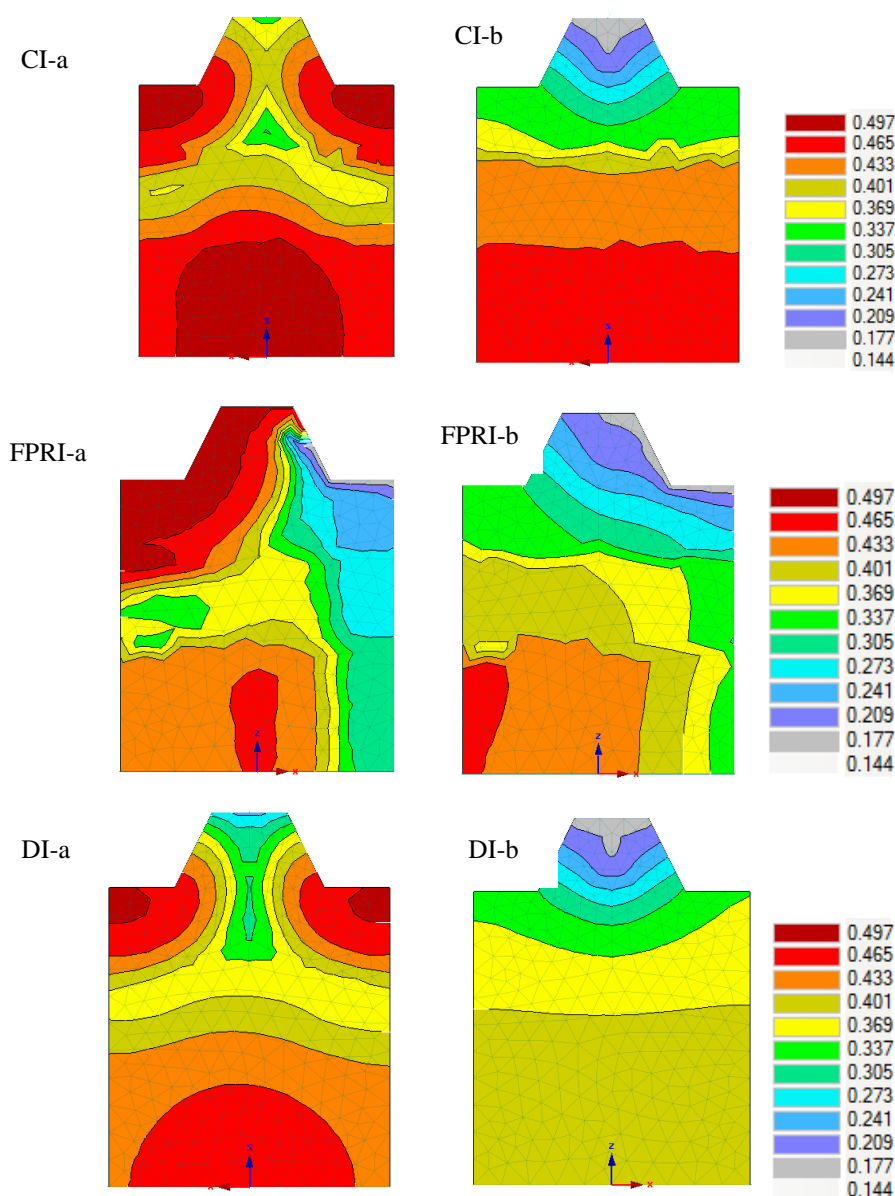
l (-)	α (cm^{-1})	K_s ($cm\ day^{-1}$)	θ_s ($cm^3\ cm^{-3}$)	θ_r ($cm^3\ cm^{-3}$)	چگالی ظاهری ($g\ cm^{-3}$)	ظرفیت زراعی ($cm^3\ cm^{-3}$)	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	عمق خاک (cm)
۰/۵	۰/۰۰۹۵	۲/۸	۰/۵	۰/۰۹۴۲	۱/۵	۳۵/۴	۲۱/۵	۳۰/۸	۴۷/۷	۳۰-۰
۰/۵	۰/۰۱۰۱	۲/۷	۰/۵	۰/۰۹۶۳	۱/۵	۳۶/۱	۱۷/۴	۳۲/۱	۵۰/۵	۶۰-۳۰
۰/۵	۰/۰۱۴۶	۳/۵	۰/۵	۰/۰۹۷۹	۱/۴	۳۶/۳	۱۱/۲	۳۰/۸	۵۸/۰	۹۰-۶۰



شکل ۲- مقایسه مقادیر برآوردی رطوبت با مقادیر اندازه‌گیری شده در مقطع محور پشته در سه تیمار DI,FPRI,CI (در زمان‌های بلافاصله پس از آبیاری (a) و ۱۰ روز پس از فرآیند آبیاری (b)).

درد (CI- b). با توجه به نتایج شبیه‌سازی این تیمار تا ۱۳ روز، به‌جای ۱۰ روز می‌توان اطمینان حاصل نمود که توزیع رطوبت در منطقه ریشه نزدیک به رطوبت سهل الوصول قرار گرفته و به‌این ترتیب پیشنهاد افزایش دور آبیاری را اعمال نمود. در شیار تحت آبیاری در هر سه عمق اندازه‌گیری، مقادیر رطوبت در تیمار آبیاری شیار یک در میان (FPRI) در تمام زمان‌ها کمتر از مقادیر رطوبت در تیمار CI می‌باشد. با توجه به اینکه آبیاری این تیمارها، یک‌درمیان صورت گرفته، جریان جانبی در کاهش مقادیر رطوبت خاک تأثیرگذار بوده است (FPRI-a,b) و این اختلاف رطوبت تیمار CI با دو تیمار دیگر، با افزایش عمق بیشتر می‌گردد.

در تمام تیمارها، جهش مقدار رطوبت پشته، در عمق ۲۰-۴۰ بیشتر از دو عمق دیگر بوده است به‌نحوی‌که با انجام آبیاری، رطوبت در عمق مذکور افزایش قابل توجهی پیدا کرده است. در عمق ۴۰-۶۰ (cm) خاک بدلیل عدم وجود تبخیر سطحی، احتمالاً کاهش تراکم ریشه و در نتیجه جذب کمتر ریشه در این ناحیه، تغییرات رطوبت کمتر از دو عمق دیگر است. همان‌طور‌که در شکل CI-a مشاهده می‌گردد فرآیند آبیاری زمانی صورت گرفته است که از عمق ۵۰ سانتی‌متر سطح پایین زمین درصد رطوبت خاک در حالت رطوبت اشباع قرار دارد. حتی با گذشت ۱۰ روز از دوره شبیه‌سازی، نحوه توزیع رطوبت در اطراف منطقه جذب ریشه در حدود رطوبت سهل الوصول قرار



شکل ۳- پروفیل برآوردی میزان رطوبت خاک تیمارهای مختلف در زمان‌های پس از آبیاری (a) بلافاصله و (b) ۱۰ روز پس از فرآیند آبیاری.

پروفیل خاک، می‌توان با افزایش دور آبیاری به میزان بیشتری در مصرف کلی آب، صرفه‌جویی نموده و بهره‌وری بالاتری را حاصل نمود. در این تیمار نیز در صورت اعمال ۱۲-۱۳ روز دور آبیاری به جای ۱۰ روز تقریباً دو نوبت از تعداد آبیاری‌ها در کل کاسته شده و به میزان حدود ۲۶۰۰ مترمکعب علاوه بر ۲۵ درصد کاهش مصرف تیمار مربوطه صرفه‌جویی بیشتری با حفظ میزان عملکرد نتیجه می‌گردد. میزان افزایش

اختلاف رطوبت تیمار CI با تیمار FPRI در پشته معنی‌دار است و این امر به دلیل اعمال مدیریت خاص در آبیاری می‌باشد البته در تیمار DI شرایط حد میانی این دو حالت بود. پس می‌توان دریافت که شرایط رطوبتی مورد نیاز برای رشد گیاه در تیمار CI مناسب‌تر از دیگر تیمارها بوده است. با وجود ۲۵ درصد مصرف آب کمتر و با مشاهده نتایج شبیه‌سازی در محیط متخلخل (FPRI-b)، مبنی بر میزان رطوبت بالای

خاک موجود در هر سه تیمار با دقت بالایی برآورد گردیده است. در مورد تعداد بیشتری از مقادیر رطوبت مربوط به تیمار FPRI، بیش‌برآوردی به وجود آمده است و با افزایش عمق میزان خطای رطوبت برآوردی مدل نیز در حال افزایش است. مقادیر رطوبتی دو تیمار CI و DI به‌خصوص در عمق‌های سطحی خاک، با دقت بالاتری از نظر شاخص‌های خطا مورد پیش‌بینی قرار گرفتند. ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۲) شاخص خطای استاندارد در تیمارهای آبیاری سنتی و یک در میان ثابت را به‌ترتیب برابر با ۰/۰۹۶ و ۰/۰۸۹ گزارش نمودند.

بهره‌وری در حدود ۳۰ درصد قابل افزایش است. با مقایسه دو شکل DI-a,b، میزان نفوذ عمقی در این تیمار بیشتر از تیمار FPRI بوده است. کمترین میزان مکش خاک در پایان ۱۰ روز در حدود ۸۰۰۰ سانتی‌متر و فقط تا حدود ۱۰ (cm) سطح خاک (ناشی از تبخیر از سطح خاک) قابل مشاهده است. بنابراین نتایج حاصل از افزایش دور آبیاری در این تیمار نیز صدق می‌نماید. در جدول ۲، مقادیر رطوبت برآوردی با مدل هایدروس تیمارهای مختلف با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفتند. با توجه به جدول ۲، مقادیر شاخص خطای RMSE نشان می‌دهد که میزان رطوبت

جدول ۲- ارزیابی مقادیر رطوبت برآوردی در محل پشته و عمق‌های مختلف سه تیمار CI,FPRI,DI.

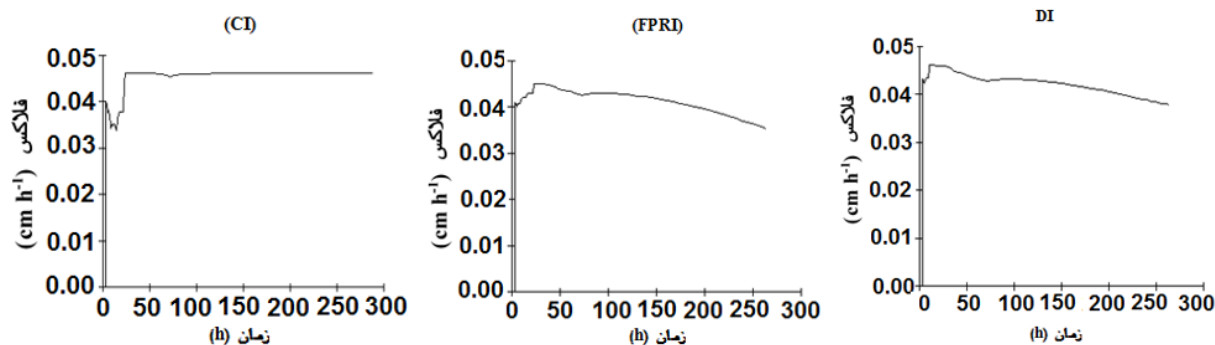
DI			FPRI			CI			عمق (cm)
GMER (cm ³ cm ⁻³)	CRM (cm ³ cm ⁻³)	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	GMER (cm ³ cm ⁻³)	CRM (cm ³ cm ⁻³)	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	GMER (cm ³ cm ⁻³)	CRM (cm ³ cm ⁻³)	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	
۰/۸۷۴	۰/۰۴۰	۰/۰۵۴	۰/۸۹۳	۰/۰۶۹	۰/۰۳۳	۰/۹۲۷	۰/۰۱۰	۰/۰۴۱	۰-۲۰
۰/۹۵۷	۰/۰۶۶	۰/۰۳۶	۰/۸۴۹	۰/۱۰۸	۰/۰۵۳	۰/۹۸۵	۰/۰۲۰	۰/۰۳۳	۴۰-۲۰
۰/۹۶۱	۰/۱۰۹	۰/۰۳۴	۰/۹۹۸	۰/۱۵۲	۰/۰۷۰	۰/۹۵۲	۰/۱۲۳	۰/۰۴۷	۶۰-۴۰

الگوی جذب آب در دو تیمار FPRI و DI بسیار نزدیک بوده است.

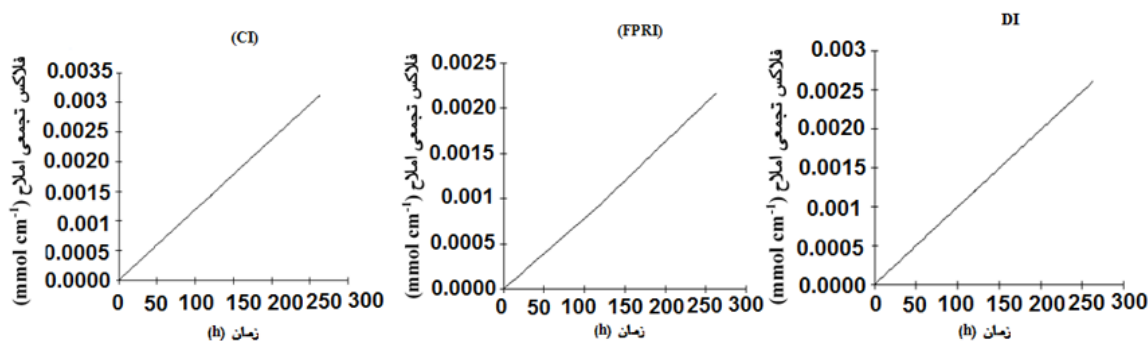
جذب آب تیمار CI در مقایسه با تیمارهای FPRI و DI به‌دلیل در اختیار بودن حجم آب بیشتر به‌خصوص در اواخر دوره آبیاری، بیشتر بوده است. در مورد جذب املاح روند یکسانی در تیمارها قابل مشاهده است. انتقال حجم رطوبتی بیشتر در تیمار CI سبب انتقال املاح بیشتری در مقایسه با سایر تیمارها گردیده است.

ب: نتایج جذب آب و نیترات ریشه در مدیریت‌های مختلف آبیاری

در شکل‌های ۴ و ۵، مقادیر رطوبت و نیترات جذب شده توسط ریشه، در هر سه تیمار نشان داده شده است. روند جذب آب و نیترات در یک دوره ۱۰ روزه شبیه‌سازی شده است. به‌عبارت دیگر شکل ۴ و ۵ منتج شده از حل معادلات انتقال آب و املاح پس از اجرای محیط شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار می‌باشد.



شکل ۴- مقادیر رطوبت جذب شده توسط ریشه در سه تیمار CI,FPRI,DI.



شکل ۵- مقادیر نیترات جذب شده توسط ریشه در سه تیمار CI, FPRI, DI.

جدول ۳- ارزیابی میزان نیترات برآوردی در عمق‌های مختلف سه تیمار مورد مطالعه در محل پشته.

DI			FPRI			CI			عمق (cm)
GMER (mmol cm ⁻³)	CRM (mmol cm ⁻³)	RMSE (mmol cm ⁻³)	GMER (mmol cm ⁻³)	CRM (mmol cm ⁻³)	RMSE (mmol cm ⁻³)	GMER (mmol cm ⁻³)	CRM (mmol cm ⁻³)	RMSE (mmol cm ⁻³)	
۱/۰۸۳	-۰/۰۸	۰/۰۱۱	۱/۰۸۳	-۰/۰۸	۰/۰۱۱	۱/۰۸۳	-۰/۰۸	۰/۰۱۱	۲۰-۲۰
۱/۰۲۱	-۰/۰۲۱	۰/۰۰۲	۱/۰۹۷	-۰/۰۹۸	۰/۰۰۹	۰/۹۲۴	۰/۰۷۵	۰/۰۰۹	۴۰-۲۰
۱/۰۳۳	-۰/۰۳۳	۰/۰۰۲	۱/۰۳۳	-۰/۰۳۳	۰/۰۰۲	۰/۸۸۶	۰/۱۱	۰/۰۰۹	۶۰-۴۰
۰/۹۴۷	-۰/۰۵۳	۰/۰۰۴	۰/۹۴۷	۰/۰۵۳	۰/۰۰۴	۰/۹۴۷	۰/۰۵۳	۰/۰۰۴	۸۰-۶۰

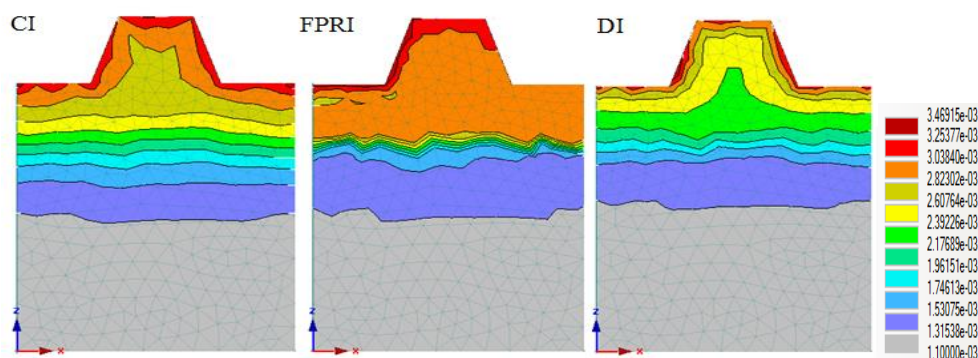
در نهایت موجب کاهش پتانسیل انتقال آب و نیتروژن به لایه‌های پایین‌تر شده و نیتروژن بیشتری را در اختیار گیاه قرار می‌دهد (شکل ۶). در تیمار DI، آب ثقیلی زیاد نبوده است. در این تیمار کاهش غلظت نیترات در عمق ۲۰ (cm) با سرعت پایینی صورت گرفته و با وجود آبشویی ناچیز از عمق ۲۰ (cm) می‌توان انتظار داشت مقدار اندکی از نیترات به عمق ۴۰ (cm) وارد شود. تمرکز بیشتر آب آبیاری در لایه ۴۰-۰ (cm)، موجب تغییرات محدودتر غلظت نیترات در عمق‌های ۶۰ و ۸۰ (cm) در تمام تیمارها گردید (شکل ۷). در جدول ۳، میزان غلظت نیترات برآوردی در سه تیمار با مقادیر اندازه‌گیری شده مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نتایج جدول ۳، میزان نیترات برآوردی تیمار FPRI و DI در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده بیش‌برآورد بوده است. میزان خطای محاسبه شده در صورت افزایش عمق (در عمق ۸۰ (cm))، در هر سه تیمار به‌صورت برابر (۰/۰۰۴ mmol cm⁻³) حاصل گردید. میزان خطای استاندارد گزارش شده توسط ابراهیمیان و همکاران (۲۰۱۲) در تیمارهای آبیاری سنتی و یک در میان ثابت به‌ترتیب ۰/۲۰۵ و ۰/۱۴۴ (mg cm⁻³)

ج: ارزیابی شبیه‌سازی میزان انتقال نیترات

توجه به نتایج شکل ۶ مشاهده می‌گردد که میزان غلظت نیترات در عمق ۲۰ (cm) بسیار دینامیک بوده و مرتب در حال کاهش است که علت آن انتقال نیتروژن به لایه‌های زیرین و همچنین جذب بیشتر به‌وسیله گیاه از این لایه می‌باشد اما عبور بیشتر نیتروژن از عمق ۲۰ (cm) به‌خصوص در تیمار CI به دلیل فراهم بودن حجم آب بیشتر در این تیمار در مقایسه با تیمارهای دیگر موجب تغییرات بیشتر غلظت نیترات در عمق ۴۰ (cm) شده است. تغییرات مذکور در سایر تیمارها محدودتر بوده است. در تیمار FPRI نیز آبشویی نیترات در عمق ۲۰ (cm) صورت گرفته است ولی مقدار آبشویی کمتر از تیمار CI بوده است. در تیمار FPRI در روزهای اول بعد از آبیاری رطوبت در این شیارها بالا رفته و نیترات حل شده در شیارهای آبیاری شده همراه با آب ثقیلی به لایه‌های پایین‌تر نفوذ کرده است. اما از طرفی دیگر خشک بودن شیارهای جانبی باعث ایجاد اختلاف پتانسیل رطوبتی در جهت افقی می‌شود و این امر از شدت نفوذ عمقی آب و نیترات می‌کاهد. در نتیجه امکان ذخیره بیشتر آب آبیاری در هر لایه را فراهم آورده و

گرفتند. مطابق نتایج پژوهش‌های مایلپول و همکاران (۲۰۰۱)، اگر عمق آب کاربردی زیاد باشد به دلیل اینکه علاوه بر نیروی موئینگی، نیروی ثقلی هم در جابه‌جایی املاح و انتقال املاح از لایه‌های سطحی به لایه‌های زیرین مؤثر می‌باشد، احتمال افزایش آب شویی نیترات به طور معناداری افزایش می‌یابد.

می‌باشد. در مقابل دقت بالای نتایج انتقال نیترات در خاک برای تیمار آبیاری سنتی در مقایسه با آبیاری متناوب توسط کریویزر و همکاران (۲۰۰۸) گزارش شده است. تفته و سپاسخواه (۲۰۱۲) نیز بالا بودن میزان آبشویی نیترات را در تیمار CI به میزان ۵۶ درصد در مقایسه با آبشویی نیترات تیمارهای یک در میان ثابت و یک در میان متغیر را با مدل یک‌بعدی هایدرس نتیجه



شکل ۶- میزان انتقال نیترات در پروفیل خاک در سه تیمار CI, FPRI, DI.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش دقت مدل دو بعدی هایدرس در شبیه‌سازی حرکت آب و انتقال املاح در خاک مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج به دست آمده مشخص شد که مدل مذکور توانایی بالایی در شبیه‌سازی آبیاری فارو و مدیریت‌های مصرف آب اعمال شده داشته و قادر است شرایط رطوبتی و انتقال نیترات در خاک را در طول دور آبیاری با دقت بالایی تخمین بزند. فرآیند حرکت آب در خاک در زمان‌های مختلف در آبیاری سنتی با دقت بالاتری نسبت به آبیاری یک در میان و تیمار کم‌آبیاری برآورد شده

منابع مورد استفاده

عباسی ف، ۱۳۸۶، فیزیک خاک پیشرفته، انتشارات دانشگاه تهران.

Abbasi F, Feyen J and van Genuchten MT, 2004. Two dimensional simulation of water flow and solute transport below furrows: Model calibration and validation. *Journal of Hydrology* 290(1-2): 63-79.

Beven KJ, Henderson DE and Reeves AD, 1993. Dispersion parameters for undisturbed partially saturated soil. *Journal of Hydrology* 143: 19-43.

Crevoisier D, Popova Z, Mailhol JC and Ruelle P, 2008. Assessment and simulation of water and nitrogen transfer under furrow irrigation. *Agricultural Water Management* 95(4): 354-366.

- Deb SK, Sharma P, Shukla MK, Ashigh J and Šimůnek J, 2016. Numerical evaluation of nitrate distributions in the onion root zone under conventional furrow fertigation. *Journal of Hydrologic Engineering* 21(2): 1-12.
- Ebrahimian H, Liaghat A, Parsinejad M, Abbasi F and Navabian M, 2011. Yield production and water use efficiency under conventional and alternate furrow fertigations. ICID's 21st Int. Congress on Irrigation and Drainage, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), New Delhi, India.
- Ebrahimian H, Liaghat A, Parsinejad M, Abbasi F and Navabian M, 2012. Comparison of One- and Two-dimensional models to simulate alternate and conventional furrow fertigation. *Irrigation and Drainage Engineering* 138(10): 929-938.
- Feddes RA, Kowalik PJ and Zaradny H, 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*, Wiley, New York.
- Hu T, Kang Sh, Li F and Zhang J, 2009. Effects of partial root-zone irrigation on the nitrogen absorption and utilization of maize. *Agricultural Water Management* 96: 208-214.
- Mailhol JC, Ruelle P and Nemeth I, 2001. Impact of fertilization practices on nitrogen leaching under irrigation. *Irrigation Science* 20: 139-147.
- Rocha D, Abbasi F and Feyen J, 2006. Sensitivity analysis of soil hydraulic properties of subsurface water Flow in furrows. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 132(4): 418-424.
- Šimůnek J, Bristow KL, Helalia SA and Siyal AA, 2016. The effect of different fertigation strategies and furrow surface treatments on plant water and nitrogen use. *Irrigation Science* 34(1): 53-69.
- Slatni A, Zayani K, Zairi A, Yacoubi S, Salvador R and Playán E, 2011. Assessing alternate furrow strategies for potato at the Cherfech irrigation district of Tunisia. *Biosystems Engineering* 108(2): 154-163.
- Tafteh A and Sepaskhah AL, 2012, Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. *Agricultural Water Management* 113: 19- 29.
- Thind HS, Buttar GS and Aujla MS, 2010. Yield and water use efficiency of wheat and cotton under alternate furrow and check-basin irrigation with canal and tube well water in Punjab, India. *Irrigation Science* 28(6): 489-496.
- Tiercelin JR and Vidal A, 2006. *Traite' d'Irrigation (Irrigation Treatment)*, 2nd edition. Lavoisier edition, Paris, France.
- Varlev I, Popova Z and Gospodinov I, 1998. Furrow surge irrigation as water saving technique. pp. 131-140. In: Pereira, L.S., Gowing, J. (Eds.), *Selected Papers of the First Inter-Regional Conference of ICID Environment—Water: Innovative Issues in Irrigation and Drainage*, Lisbon.
- Vrugt JA, M Tvan Wijk, JW Hopmans and Šimůnek J, 2001. One, two and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling, *Water Resources Research* 37(10): 2457-2470.