



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷
صفحه‌های ۱۴۸-۱۳۱

کاربرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی آبشویی نترات و جذب نیتروژن در کشت ذرت تحت سناریوهای مختلف کودآبیاری قطره‌ای

نسرين آزاد^۱، جواد بهمنش^{۲*}، وحید رضوردی‌نژاد^۳، فریبرز عباسی^۴، مریم نوابیان^۵

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران.
۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران.
۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ایران.
۴. استاد، مؤسسه تحقیقات مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۵. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۱۶

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۲۹

چکیده

مدیریت کاربرد کودهای نیترا ته در مزرعه یک ابزار مؤثر در کاهش آلودگی آب زیرزمینی می‌باشد. هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر سناریوهای مختلف کودآبیاری بر آبشویی نترات و جذب نیتروژن توسط ذرت در سیستم آبیاری قطره‌ای نواری سطحی در خاک لوم رسی شنی بود. بدین منظور از مدل HYDRUS-2D جهت شبیه‌سازی حرکت آب و نیتروژن در خاک استفاده شده و داده‌های مورد نیاز جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل با انجام آزمایشات مزرعه‌ای جمع‌آوری گردید. سپس جذب نیتروژن و آبشویی نترات در تناوب‌های مختلف کودآبیاری در مدل واسنجی شده شبیه‌سازی شد. استراتژی‌های مذکور در یک خاک لوم رسی شنی نیز اجرا شد تا با نتایج مرحله قبل مقایسه گردد. نتایج نشان داد که جذب نترات توسط گیاه، آبشویی و تجمع آن در انتهای فصل رشد در ناحیه ریشه در تناوب هفتگی و یک هفته در میان و در دو خاک مورد مطالعه مشابه بود. با کاهش تعداد تقسیمات کود به سه مرحله، جذب نترات توسط گیاه در خاک لوم رسی شنی به ۷۳ درصد افزایش و کل تلفات آبشویی و تجمع در ناحیه ریشه به ۲۷ درصد کاهش یافت. اما در خاک لوم رسی شنی با تقسیم سه مرحله‌ای، جذب نترات به ۴۸ درصد کاهش و کل تلفات نترات به ۵۲ درصد افزایش یافت.

کلیدواژه‌ها: آلودگی آب زیرزمینی، بهینه‌سازی PSO، تناوب کودآبیاری، رشد دینامیک ریشه، لوم رسی شنی، لوم شنی.

مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت و نیاز به تولید بیشتر مواد غذایی، در سال‌های اخیر کشاورزان مصرف کودهای شیمیایی را افزایش داده‌اند؛ ولی به علت عدم مدیریت مناسب آب و کود، تعادل عناصر غذایی خاک بهم خورده و مسایل عمده زیست‌محیطی مطرح شده است. کودهای نیتروژنی که در کشاورزی استفاده می‌شوند شامل ترکیبی از نیترات^۱ و آمونیوم^۲ می‌باشند. زمانی که این کودها در خاک استفاده می‌شوند، به فرم نیترات فعال تبدیل می‌گردند که به آسانی در ناحیه بالای پروفیل خاک توسط ریشه جذب می‌شوند (۲۸). اگر مقدار اضافه‌شده بیشتر از جذب گیاه باشد، نیترات باقی‌مانده به خارج از این ناحیه شسته شده و به تدریج به لایه‌های دیگر نفوذ می‌کند و سرانجام به سفره آب زیرزمینی شسته می‌شود. جهت رفع مشکلات کمی و کیفی زه‌آب‌های کشاورزی، بایستی راهنمای استفاده بهینه از کودآبیاری در سیستم‌های آبیاری ارائه و بهترین عملیات مدیریتی در آن توصیف گردد.

راهکارهای مدیریتی که مقدار ورود آب و نیتروژن را بدون تقلیل در عملکرد محصول کاهش می‌دهد، می‌تواند پتانسیل خطر آلودگی آب زیرزمینی به نیترات را کاهش دهد (۳۹). این مدیریت‌ها بایستی شامل استراتژی‌های مختلف مدیریت رطوبت خاک برای انتقال نیترات و در نظر گرفتن مقدار نیاز گیاه به نیتروژن باشد. محققین مختلفی در سراسر جهان به اهمیت این موضوع پی برده و مطالعات مختلفی جهت بررسی تأثیر استراتژی‌های گوناگون کودآبیاری بر حرکت و توزیع نیتروژن در خاک انجام داده‌اند. در برخی تحقیقات تلفات عمقی نیترات در جویچه‌های انتها باز (۲) و در برخی دیگر در آبیاری بارانی کشت ذرت در سطوح مختلف آب و کود (۱۳)

بررسی شده است. در یک مطالعه دیگر توزیع نیترات و آمونیوم در آبیاری جویچه‌ای و جذب نیتروژن توسط ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود اوره بررسی شد. نتایج تحقیق مذکور نشان داد که با افزایش ۶۷ درصدی کاربرد کود، مقدار جذب نیتروژن حدود ۲۱ درصد افزایش و تجمع نیترات در انتهای فصل کشت نسبت به ابتدای فصل، در عمق ۶۰ سانتی‌متری زیر جویچه و پشته‌ها به ترتیب بیش از ۳ و ۷ برابر افزایش داشت (۱). بررسی تأثیر عملیات کودآبیاری قطره‌ای بر بازیابی نیتروژن خاک توسط پنبه و عملکرد پنبه در فصل رشد نشان داد که در استراتژی که در آن کودآبیاری در ابتدای سیکل آبیاری انجام شد، بیشترین پتانسیل تلفات کود را از ناحیه ریشه داشت. اما کاربرد نیتروژن در انتهای سیکل آبیاری موجب کاهش تلفات نیتروژن از ناحیه ریشه گردید (۱۷). در برخی تحقیقات نیز تأثیر تناوب‌های مختلف آبیاری یا کودآبیاری بر جذب نیتروژن توسط گیاه و حرکت نیترات در خاک بررسی شده است (۹ و ۲۴).

توسعه مدل‌های شبیه‌سازی فرایند انتقال گونه‌های نیتروژن در خاک و بررسی تأثیرات زیست‌محیطی مرتبط با مدیریت نیتروژن، هم‌اکنون به عنوان یک فاکتور اساسی برای بهبود تکنیک‌های کشت و برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های کشاورزی و بهبود راندمان آبیاری و کودآبیاری در کشاورزی شناخته شده است. در مطالعه‌ای یک بررسی اجمالی و مثال‌هایی از توسعه تعداد زیادی ابزارهای کامپیوتری برای مطالعه جریان آب و انتقال آلودگی‌ها در خاک ارائه شده است که می‌تواند به خوبی در کشاورزی استفاده گردد (۴۰). یکی از پیشرفته‌ترین و پرکاربردترین بسته‌های نرم‌افزاری HYDRUS است که توسط محققین زیادی در بررسی جریان آب و املاح در خاک و شبیه‌سازی استراتژی‌های مختلف مدیریت کودآبیاری استفاده شده است. در یک پژوهش با استفاده

1. Nitrate (NO_3^-)
2. Ammonium (NH_4^+)

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷

کاربرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی آبشویی نیترات و جذب نیتروژن در کشت ذرت تحت سناریوهای مختلف کودآبیاری قطره‌ای

مختلف آبیاری و کود و زمان‌های تزریق متفاوت)، تلفات کود و جذب آن توسط ریشه بررسی گردید. در یک مطالعه دیگر با استفاده از مدل HYDRUS-2D، تأثیر مقادیر مختلف آبیاری و کود را در حرکت آب و نیتروژن در آبیاری قطره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که ترکیب سطح آبیاری ۷۰ درصد و شدت تزریق کود نیتروژن ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار بهترین استراتژی مدیریت آب و کود در شرایط آبیاری جزئی می‌باشد (۲۱).

با توجه به اهمیت مباحث مذکور و بررسی منابع انجام‌شده، مدیریت مناسب کودآبیاری قطره‌ای به‌منظور کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی بسیار ضروری می‌باشد. پتانسیل آبشویی نیترات در طول دوره رشد فعال گیاه کم است اما قبل و بعد از دوره فعال در طول پاییز و زمستان، زمانی که بارندگی بیشتر از ظرفیت نگهداری آب در خاک است و با سطوح بالای غلظت نیترات باقیمانده در انتهای فصل رشد همراه می‌شود، آبشویی نیترات به آب‌های زیرزمینی اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر گزینه‌های مدیریتی زیادی برای کاهش آبشویی نیترات در زمستان که گیاهان رشد نمی‌کنند وجود ندارد و بنابراین استراتژی‌های مدیریتی بایستی بر کاهش سطوح نیترات خاک قبل از شروع آبشویی در فصل پاییز متمرکز گردند. از اینرو در این تحقیق سعی شده است با استفاده از ابزار شبیه‌سازی در مدل HYDRUS-2D، تأثیر استراتژی‌های کودآبیاری بر کاهش آبشویی نیترات و نحوه جذب نیتروژن توسط ذرت در دو بافت سنگین و سبک در سیستم آبیاری قطره‌ای نواری سطحی بررسی گردد. در این راستا بر خلاف پژوهش‌های دیگر، رشد ریشه در شبیه‌سازی دویبعی در مدل HYDRUS در نظر گرفته شده است تا تغییرات عمق ریشه در طول فصل رشد و تأثیر آن بر جذب و حرکت املاح در خاک لحاظ گردد.

از مدل HYDRUS-2D تأثیر استراتژی کودآبیاری و نوع بافت خاک بر پتانسیل آبشویی نیترات در چهار سیستم مختلف آبیاری قطره‌ای (در چهار کشت مختلف) بررسی شد (۱۱). در ادامه تحقیق مذکور آبشویی نیترات، اوره و آمونیوم در دو نوع سیستم آبیاری قطره‌ای با در نظر گرفتن استراتژی‌های مختلف شامل غلظت‌های متفاوت کود بررسی گردید (۱۴). نتایج تحقیق مذکور نشان داد که بایستی از تزریق کوتاه‌مدت در اوایل سیکل آبیاری طولانی اجتناب کرد. بررسی و مدل‌سازی آبشویی و توزیع نیترات در مزرعه آزمایشی پیاز در دبی‌های مختلف قطره‌چکان و در گزینه‌های گوناگون کودآبیاری نشان داد که با انتخاب دبی مناسب و طول مدت آبیاری و فواصل آبیاری و کودآبیاری مناسب، آبشویی حتی در ریشه‌های کم‌عمق نیز می‌تواند حداقل باشد (۴).

بررسی انتقال آب و نیتروژن با کمک مدل HYDRUS در کودآبیاری قطره‌ای سورگوم نشان داد که جذب بالای نیترات زمانی اتفاق می‌افتد که تعداد رویدادهای کودآبیاری بیشتر و مقدار به‌کار برده‌شده در هر واقعه کمتر باشد (۳۴). در مطالعه حرکت آب و دینامیک نیترات در یک درخت پرتقال در لایسیمتر، یک شبیه‌سازی ۲۹ روزه با آبیاری قطره‌ای در مدل HYDRUS2D/3D انجام گرفت (۳۱). نتایج تحقیق مذکور نشان داد که راندمان جذب نیترات نسبتاً بالایی زمانی اتفاق افتاد که کودآبیاری در اواخر آبیاری روزانه استفاده شد و یا در طول کل مدت آبیاری پخش شد (نسبت به کاربرد آن در اوایل یا اواسط آبیاری). در یک پژوهش دیگر نیز حرکت آب و نیترات در آبیاری قطره‌ای پرتقال به‌صورت فصلی شبیه‌سازی شده و گزینه‌های مدیریتی کاهش آبشویی مورد بررسی قرار گرفت (۳۲). در تحقیق مذکور از مدل HYDRUS2D استفاده شده و با انجام آزمایشاتی برای صحت‌سنجی مدل، در سناریوهای آبیاری و کودآبیاری (شامل مقادیر

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷

مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام این پژوهش، گیاه ذرت (رقم ماکسیما) تحت آبیاری قطره‌ای نواری سطحی در تاریخ ۴ تیر ۱۳۹۵ در زمینی به ابعاد ۲۰×۳۰ متر در مزرعه تحقیقاتی گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه در دشت ارومیه کشت شد. آزمایش‌های شیمیایی و آزمون خاک به‌منظور تعیین مقدار کود مورد نیاز گیاه قبل از کاشت انجام شد. طبق آزمایشات انجام گرفته، میزان پتاسیم خاک کافی بوده و به‌دلیل کمبود فسفر خاک، کود سوپر فسفات تریپل به مقدار ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار در زمان آماده سازی زمین داده شد. کود نیترات آمونیوم نیز به‌عنوان منبع تأمین ازت مورد نیاز خاک به میزان ۳۳۴ کیلوگرم در هکتار همراه با آبیاری در نظر گرفته شد. آبیاری با قطره‌چکان‌هایی به فاصله ۳۰ سانتی‌متر در هر لوله قطره‌چکان (مجاورت هر بوته) و نوارهای آبیاری به فاصله ۷۵ سانتی‌متر (در کنار هر ردیف ذرت) انجام شد. دبی قطره‌چکان‌ها ۴/۵ لیتر بر ساعت بوده و آبیاری دو بار در هفته انجام شد. ویژگی‌های فیزیکی خاک مزرعه در جدول ۱ ارائه شده است. کودآبیاری نیترات آمونیوم به‌صورت هفتگی و

به‌مدت ۱۰ هفته انجام شد. تزریق کود به‌مدت ۱۰ دقیقه در انتهای آبیاری اول هر هفته انجام شد و پس از اتمام تزریق، آبیاری به‌مدت ۱۰ دقیقه جهت شستشوی قطره‌چکان‌ها و جلوگیری از گرفتگی آن‌ها ادامه پیدا کرد. به منظور اندازه‌گیری تغییرات رطوبت خاک و غلظت گونه‌های نیتروژن خاک در طول فصل رشد، نمونه‌های خاک با استفاده از آگر از عمق‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متر و از فاصله ۱۵ سانتی‌متر بوته و قطره‌چکان جمع‌آوری شد. نمونه‌برداری ۵ بار در هفته (قبل از آبیاری اول، ۱، ۲، ۳ و ۴ روز بعد از آبیاری اول؛ که نمونه‌برداری چهارم قبل از آبیاری دوم در هر هفته بود) انجام شد. رطوبت نمونه‌ها به روش وزنی اندازه‌گیری شده و همچنین میزان آمونیوم و نیترات نمونه‌ها به روش کج‌دال تعیین گردید (۷). اندازه‌گیری‌ها به‌مدت ۱۴ هفته انجام شده و در نهایت ذرت‌ها پس از ۱۶ هفته در تاریخ ۲۳ مهر ۱۳۹۵ برداشت شدند. با نمونه‌برداری در آخرین روز فصل کشت از سه عمق مذکور، در کل ۲۱۳ نمونه جمع‌آوری گردید.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک مزرعه آزمایشی

θ_{ppp} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_{Fc} ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	چگالی ظاهری (gr cm^{-3})	بافت خاک	درصد ذرات خاک			عمق خاک (cm)
				شن	سیلت	رس	
۰/۱۰۵	۰/۲۷۰	۱/۴۷	لوم رسی شنی	۵۰/۳۷	۱۸/۴۸	۳۱/۱۵	۰-۳۰
۰/۱۰۹	۰/۲۷۳	۱/۵۶	لوم رسی شنی	۵۲/۱۶	۱۷/۰۰	۳۰/۸۴	۳۰-۶۰

المان‌های محدود گالرکین می‌باشد (۴۱ و ۴۲). در این تحقیق به‌منظور تعریف محیط شبیه‌سازی دویبعدی در مدل HYDRUS، مستطیلی به عرض ۳۷/۵ سانتی‌متر و عمق ۱۲۰ سانتی‌متر تعریف شد. شرایط اولیه رطوبت و غلظت نیترات و آمونیوم اندازه‌گیری شد به مدل معرفی شده و

در این پژوهش، به منظور شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در خاک از مدل HYDRUS استفاده شد (۴۲). شبیه‌سازی جریان آب در خاک در مدل HYDRUS بر مبنای حل عددی معادله ریچاردز (۳۷) و انتقال املاح در خاک بر اساس معادله انتقال-انتشار به روش حل عددی

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷

کاربرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی آبشویی نیترات و جذب نیتروژن در کشت ذرت تحت سناریوهای مختلف کودآبیاری قطره‌ای

برگ‌ها و سپس پردازش آن‌ها توسط نرم‌افزار Digimizer محاسبه شده است (۲۷). جهت محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع، از داده‌های دستگاه هواشناسی سیار نصب‌شده در نزدیکی محل انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای (شامل داده‌های درجه حرارت، رطوبت نسبی هوا، سرعت باد و تابش خورشیدی) استفاده گردید. دقت دستگاه هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق به کمک داده‌های ایستگاه هواشناسی کشاورزی دانشگاه ارومیه (وابسته به سازمان هواشناسی کشور) مورد تأیید قرار گرفت. طبق اندازه‌گیری‌های باران‌سنج دستگاه هواشناسی، بارندگی در طول انجام آزمایش‌ها در فصل رشد بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر بود. جهت محاسبه عمق مورد نیاز و مدت آبیاری در هر واقعه آبیاری، از مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل روزهای قبل از آبیاری استفاده گردید. به‌منظور شبیه‌سازی رشد ریشه و تغییرات عمق و شعاع ریشه در طول زمان، اخیراً یک مدول محاسباتی جدید در مدل HYDRUS فراهم شده است (۱۵). در این مدول، مقادیر متغیر عمق ریشه در طول زمان می‌تواند توسط کاربر در نظر گرفته شود و یا به‌صورت رابطه (۴) محاسبه گردد (۴۳):

$$L_R(t) = L_m f_r(t) \quad (4)$$

در این رابطه، $L_R(t)$ و L_m عمق ریشه واقعی و حداکثر و $f_r(t)$ ضریب رشد ریشه می‌باشد که بر اساس تابع رشد لجستیک (رابطه ۵) محاسبه می‌شود:

$$f_r(t) = \frac{L_0}{L_0 + (L_m + L_0) \exp(-rt)} \quad (5)$$

در این رابطه، L_0 عمق اولیه ریشه (L) و r شدت رشد (T^{-1}) می‌باشد. شدت رشد یا بر اساس مقدار عمق ریشه در زمان مشخص و یا با فرض رشد ۵۰ درصدی عمق ریشه تا میانه فصل رشد محاسبه می‌گردد. در تعریف ریشه دینامیک، توزیع ریشه از طریق یکی از توابع ورات و همکاران (۴۵ و ۴۶) یا هافمن و ون-گنوختن

فرض گردید که دارای مقادیر یکنواخت در پروفیل خاک باشند. با توجه به روش آبیاری قطره‌ای نواری سطحی با الگوی خیس‌شدگی نواری در امتداد لوله قطره‌چکان، شرایط مرزی نوع فلاکس متغیر در بخش چپ سطح خاک که محل ورود آب و املاح در طول آبیاری از طریق یک عرض اشباع بر اساس مشاهدات مزرعه در کنار قطره‌چکان بود در نظر گرفته شد (۴۷). علاوه بر این، شرایط مرزی زهکشی آزاد در پایین پروفیل خاک، شرایط مرزی نوع سوم کوشی^۱ در محل ورود املاح در سطح خاک و شرایط مرزی بدون فلاکس آب و املاح در سایر مرزهای پروفیل خاک تعریف گردید. لازم به ذکر است که در مواقع غیر از آبیاری، مقادیر تبخیر با علامت مخالف به‌عنوان فلاکس در نظر گرفته شد. در این پژوهش به‌منظور محاسبه مقادیر تبخیر پتانسیل از سطح خاک و تعرق پتانسیل از طریق گیاه، ابتدا مقدار تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) به‌روش پنمن-مونتیث فائو و همچنین تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه (ET_p) طبق رابطه (۱) محاسبه شد (۶). سپس مقدار ET_p محاسبه‌شده بر اساس رابطه Ritchie (۳۸) طبق روابط (۲) و (۳) به‌صورت تبخیر پتانسیل (E_p) و تعرق پتانسیل (T_p) جدا گردید (۱۹، ۲۲، ۲۶ و ۴۵):

$$ET_p = K_C \times ET_0 \quad (1)$$

$$E_p = ET_p \times \exp(-\beta \times LAI) \quad (2)$$

$$T_p = ET_p - E_p \quad (3)$$

در این رابطه، LAI شاخص سطح برگ (L^2L^{-2}) و β ضریب ثابت جذب نور می‌باشد که مقدار آن برای ذرت ۰/۶۵ گزارش شده است (۵). در این تحقیق شاخص سطح برگ از طریق اندازه‌گیری مساحت برگ‌های گیاه ذرت به‌صورت هفتگی و در سه تکرار با عکسبرداری از

1. Third-type Cauchy boundary condition

نادیده گرفته شدند (۴، ۱۴ و ۳۵). علاوه بر این فرآیندهای تصعید آمونیوم و نیترات زدایی نیز به دلیل کاربرد کود همراه با آب آبیاری و شرایط غیراشباع و هوای خاک در نظر گرفته نشدند (۳۵). در نهایت جذب فعال نامحدود املاح توسط ریشه تعریف گردید (۳۴).

به دلیل اینکه مدول جدید شبیه سازی ریشه دینامیک در حال حاضر وارد مدل HYDRUS نشده است و گزینه حل معکوس جهت تخمین پارامترهای هیدرولیکی خاک و ضرایب معادلات انتقال املاح در مدل HYDRUS با مدول جدید قابل اجرا نیست، از الگوریتم بهینه سازی PSO^۱ (الگوریتم بهینه سازی انبوه ذرات) جهت واسنجی ضرایب مذکور استفاده شد. این الگوریتم با الگوگیری و شبیه سازی رفتار پرواز دسته جمعی پرندگان یا حرکت دسته جمعی ماهی ها بنا نهاده شده است. در الگوریتم PSO، تعدادی از موجودات وجود دارند که به آن ها ذره گفته می شود که در فضای جستجوی تابعی که قصد کمینه کردن (و یا بهینه کردن) مقدار آن را دارند، پخش می شوند. هر عضو یا ذره در این گروه توسط بردار سرعت و بردار موقعیت در فضای جستجو تعریف می گردد و مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می کند. سپس در هر تکرار زمانی، موقعیت جدید ذرات با توجه به بردار سرعت فعلی، بهترین موقعیت یافت شده توسط آن ذره و بهترین موقعیت یافت شده توسط بهترین ذره موجود در گروه، به روزرسانی شده و مقدار تابع هدف دوباره محاسبه می گردد. این مراحل چندین بار تکرار می شوند تا اینکه جواب بهینه به دست آید (۲۳). در برنامه بهینه سازی این تحقیق، تابع هدف طبق رابطه (۶) تعریف گردید:

$$\text{Minimize : OF}(b) = \sum_{i=1}^n [q * (x, z, t_i) - q(x, z, t_i, b)]^2 \quad (6)$$

(۱۶) در نظر گرفته می شود. در این پژوهش با در نظر گرفتن رشد عمودی و افقی ریشه، از تابع توزیع ورات استفاده گردید. در رابطه با پارامترهای تابع مذکور، مشاهدات مزرعه ای نشان داد که حداکثر عمق و شعاع ریشه به ترتیب ۶۰ و ۳۵ سانتی متر بود که مشابه مقادیر گزارش شده در برخی تحقیقات دیگر بود (۱۳ و ۴۷). همچنین حداکثر تراکم عمودی و افقی ریشه ۱۰ و صفر سانتی متر در نظر گرفته شدند (۴۷). علاوه بر این، مقدار اندازه گیری شده عمق ریشه در زمان مشخص از دوره رشد برای تعریف رشد دینامیک ریشه استفاده گردید. در نهایت کاهش جذب آب توسط ریشه با استفاده از روش ماکروسکوپی فوس (۱۰) و ضرایب ذرت موجود در پایگاه داده مدل تعریف گردید.

به منظور حل عددی معادله ریچاردز در مدل HYDRUS، پارامترهای رابطه معلم- ون گنوختن (θ_s)، رطوبت اشباع خاک، θ_r ، رطوبت باقیمانده خاک، K_s : هدایت هیدرولیکی اشباع خاک و α و n پارامترهای تجربی رابطه معلم- ون گنوختن (۴۴)) به کمک ابزار بهینه سازی واسنجی شدند. همچنین ضرایب معادلات انتقال املاح به همراه معادلات چرخه نیتروژن به روش مذکور واسنجی شدند. در این راستا، فرآیند نیترات زایی (تبدیل آمونیوم به نیترات در خاک) به عنوان اصلی ترین فرآیند چرخه نیتروژن در نظر گرفته شده و بنابراین ضرایب تبدیل آمونیوم به نیترات در فازهای جامد و مایع (μ'_s و μ'_w) به همراه ضریب ایزوترم جذب خطی آمونیوم به ذرات خاک (K_d) و همچنین ضرایب انتشارپذیری طولی (ϵ_L) و عرضی (ϵ_T) خاک واسنجی شدند. لازم به ذکر است که مقدار ضریب پخشیدگی مولکولی آمونیوم و نیترات در آب خالص به ترتیب ۰/۰۶۴ و ۰/۰۶۸ سانتیمترمربع بر ساعت در نظر گرفته شدند. فرآیندهای معدنی شدن و غیرمتحرک شدن نیتروژن مشابه برخی تحقیقات به دلیل مقدار کم ماده آلی و ازت کل خاک، دیگر

کاربرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی آبشویی نیترات و جذب نیتروژن در کشت ذرت تحت سناریوهای مختلف کودآبیاری قطره‌ای

خطای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای میانگین (ME) استفاده شد (۳۴).

در این پژوهش از مدل واسنجی شده جهت شبیه‌سازی سناریوهای مختلف طراحی و مدیریت کودآبیاری قطره‌ای استفاده شد. بدین منظور با در نظر گرفتن سه برنامه تقسیم مختلف شامل تزریق در هر هفته (تزریق هفتگی)، یک هفته در میان و برنامه تقسیم سه مرحله‌ای اجرا شده توسط کشاورزان محلی (۵۰ درصد در ابتدای فصل، ۲۵ درصد در مرحله زانوئی شدن و ۲۵ درصد در مرحله ظهور گل تاجی)، اجزای بیلان انتقال آب و املاح در خاک، آبشویی نیترات و جذب نیتروژن توسط گیاه در طول فصل رشد بررسی شد. در این راستا، با در نظر گرفتن تزریق کود در انتهای آبیاری (قبل از فرصت لازم برای شستشوی لوله‌ها و قطره‌چکان‌ها)، مدت تزریق در سناریوهای مختلف بر اساس ضابطه حداکثر محدودیت متوسط مجاز شوری آب در آبیاری قطره‌ای ($EC_{iw} < 3ds/m$) (۲۹) محاسبه شده و حداقل مدت تزریق نیز پنج دقیقه در نظر گرفته شد. در این پژوهش علاوه بر بررسی سناریوهای مذکور در بافت سنگین مورد آزمایش، شبیه‌سازی‌ها در یک بافت سبک (لوم شنی) نیز انجام شد تا با نتایج بافت سنگین مقایسه گردد. بدین منظور مقدار کل آب به‌کار برده شده در فصل رشد مشابه بافت سنگین اعمال شد؛ اما مقدار و مدت آبیاری در هر واقعه به‌دلیل دور آبیاری مختلف، متفاوت در نظر گرفته شد. به‌طوری‌که آبیاری در بافت سنگین به‌صورت دوبار در هفته و در بافت سبک سه بار در هفته اجرا گردید. در بافت سبک نیز رشد ریشه به‌صورت دینامیک و بر اساس رشد ۵۰ درصدی عمق ریشه تا میانه فصل رشد در نظر گرفته شد. تعیین پارامترهای هیدرولیکی خاک بر اساس پایگاه داده مدل HYDRUS و پارامترهای انتقال املاح μ'_w ، μ'_s و K_d بر اساس مقادیر گزارش شده در مطالعات انجام شد (۱۴). همچنین ضریب انتشارپذیری طولی خاک یک دهم عمق خاک و ضریب

در این رابطه، $q(x, z, t_i, b)$ و $q^*(x, z, t_i)$ مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده متغیر در موقعیت x و z و در زمان t_i ، n تعداد اندازه‌گیری‌ها و b بردار مجهولات (پارامترهای هیدرولیکی خاک و انتقال املاح) می‌باشد. در ابتدا برنامه تابع مذکور جهت بهینه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی خاک (α ، θ_s ، θ_r و n و K_s) با هدف کمینه کردن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رطوبت خاک در زمان‌ها و عمق‌ها مختلف خاک اجرا شد ($q=\theta$ در رابطه (۶)). برنامه بهینه‌سازی با مدول رشد ریشه در محیط برنامه‌نویسی MATLAB و با لینک به مدل HYDRUS اجرا گردید. به‌منظور تخمین اولیه پارامترهای مذکور، از مدل RETC بر اساس دو گزینه برازش تابع ون-گنوختن بر منحنی رطوبتی خاک (اندازه‌گیری شده توسط دستگاه صفحات فشاری) و توابع انتقالی شبکه عصبی مصنوعی بر اساس داده‌های جدول (۱) و همچنین هدایت هیدرولیک اشباع اندازه‌گیری شده به‌روش پرماترگلف در سطح خاک (۳۶) استفاده گردید. با استفاده از مقادیر واسنجی شده پارامترهای هیدرولیکی خاک، برنامه جهت بهینه‌سازی پارامترهای انتقال املاح (μ'_w ، μ'_s ، K_d ، ϵ_L و ϵ_T) با هدف کمینه کردن اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده غلظت آمونیوم و نیترات در زمان‌ها و عمق‌های مختلف خاک اجرا شد ($q=C$ در رابطه (۶)). تخمین اولیه پارامترهای مذکور نیز بر اساس مطالعات قبلی استخراج گردید (۴، ۸، ۱۱، ۱۴، ۱۸، ۳۴، ۳۵ و ۴۷). به‌دلیل اینکه پس از واسنجی، تفاوت معنی‌داری بین پارامترهای مدل HYDRUS در دو لایه خاک مشاهده نگردید، در نهایت شبیه‌سازی بر اساس یک لایه در مدل انجام شد. در این تحقیق ۸۰ درصد داده‌های اندازه‌گیری شده جهت واسنجی ضرایب مدل و ۲۰ درصد داده‌ها جهت صحت‌سنجی استفاده گردید. به منظور ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک، غلظت آمونیوم و نیترات در خاک، از شاخص‌های

نسرین آزاد، جواد بهمنش، وحید رضوردی‌نژاد، فریبرز عباسی، مریم نوابیان

ضریب توزیع (K_d) در محدوده مقادیر گزارش شده توسط محققین دیگر (یعنی به ترتیب $0/02-0/72$ بر روز و $3-4$ سانتی متر مکعب بر گرم) قرار دارد (۱۴). محدوده گسترده‌ای از مقادیر ضریب پراکندگی طولی انتقال املاح در خاک در تحقیقات مختلف گزارش شده است ($0/3$ ، 5 ، 20 ، $12/2$ و $25/8$ ، 5 و 20 سانتی متر) (۴، ۱۴، ۳۲، ۳۴، ۳۵ و ۴۷). جدول ۳ نتایج آماری مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این جدول مشخص است، مقدار خطای RMSE در شبیه‌سازی جریان آب در خاک در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی در عمق‌های مختلف خاک در محدود $0/11-0/24$ سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب قرار دارد. در تحقیقات دیگر نیز مقدار خطای RMSE در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک در محدوده $0/17-0/15$ ، $0/45-0/11$ و $0/33-0/28$ سانتی متر مکعب بر سانتی متر مکعب (۴، ۲۰ و ۳۴) گزارش شده است. مقادیر کم خطای ME در جدول ۳ عملکرد مناسب مدل را نشان می‌دهد.

انتشارپذیری عرضی نیز یک دهم ضریب پراکندگی طولی (۱۲) در نظر گرفته شدند. شبیه‌سازی برای کل فصل رشد انجام شده و در نهایت مقدار جذب نیتروژن شبیه‌سازی شده در سناریوهای مختلف با مقدار نیتروژن مورد نیاز گیاه در طول فصل رشد مقایسه گردید. در این تحقیق جهت برآورد نیتروژن مورد نیاز گیاه ذرت در عملکرد پتانسیل، از تابع عملکرد گیاه- جذب نیتروژن (۲۵) استفاده شد. سپس از منابع معتبر (۳ و ۳۰) نیاز هفتگی ذرت در مراحل مختلف رشد بر اساس درصدی از نیاز کل محاسبه گردید.

نتایج و بحث

مقادیر ضرایب واسنجی مدل در جدول ۲ ارائه شده است. در رابطه با مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک، مقادیر مشابهی در خاکی با بافت مشابه گزارش شده است (۴). همان‌گونه که جدول ۲ نشان می‌دهد، ثابت شدت برای تبدیل آمونیوم به نترات توسط فرآیند نترات‌زایی و همچنین

جدول ۲. مقادیر واسنجی شده پارامترهای مدل HYDRUS

پارامترهای انتقال املاح				پارامترهای هیدرولیکی خاک					پارامتر	
μ_s (day ⁻¹)	μ_w (day ⁻¹)	K_d (cm ³ gr ⁻¹)	τE (cm)	$L E$ (cm)	K_s (cm day ⁻¹)	n (-)	α (cm ⁻¹)	θ_s (-)	θ_r (-)	مقدار کالیبره شده
0/204	0/201	3/516	1/410	14/103	34/022	0/401	0/003	0/412	0/041	

جدول ۳. نتایج آماری دقت مدل HYDRUS در شبیه‌سازی رطوبت خاک (SWC)، غلظت آمونیوم ($N-NH_4^+$) و نترات ($N-NO_3^-$)

$N-NO_3^-$		$N-NH_4^+$		SWC		عمق خاک
ME (mg cm ⁻³ soil)	RMSE (mg cm ⁻³ soil)	ME (mg cm ⁻³ soil)	RMSE (mg cm ⁻³ soil)	ME (cm ³ cm ⁻³)	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	(cm)
دوره واسنجی						
0/0090	0/019	-0/0009	0/0026	-0/0052	0/0206	20
0/0095	0/0159	-0/0003	0/0012	-0/0013	0/0134	40
0/0009	0/0091	-0/00008	0/0004	0/0010	0/0105	60
دوره صحت‌سنجی						
0/0092	0/0203	-0/0011	0/0033	-0/0029	0/0236	20
0/0105	0/0172	-0/0005	0/0014	-0/0003	0/0154	40
0/0017	0/0093	3/79E-17	6/6E-17	-0/0008	0/0129	60

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷

کاربرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی آبشویی نیترات و جذب نیتروژن در کشت ذرت تحت سناریوهای مختلف کودآبیاری قطره‌ای

شکل ۲ نیز نتایج شبیه‌سازی غلظت آمونیوم و نیترات در سه لایه خاک در مرحله صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. شکل مذکور بیانگر هماهنگی مناسب بین مقادیر غلظت نمک‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده می‌باشد. غلظت کم آمونیوم در لایه‌های مختلف خاک نشان‌دهنده جذب آمونیوم به ذرات خاک و سپس تبدیل آنها به نیترات در اثر فرآیند نیترات‌زایی در مجاورت محل تزریق کود در سطح خاک می‌باشد. در نتیجه آمونیوم تزریق شده حتی تا عمق ۲۰ سانتی‌متر نیز نمی‌رسد. تغییرات نیترات خاک نشان‌دهنده یک روند افزایشی بعد از هر واقعه کودآبیاری به‌خصوص در لایه سطحی خاک می‌باشد. اما پس از جذب توسط گیاه و همچنین آبشویی، غلظت نیترات تا کودآبیاری بعدی کاهش می‌یابد. تبدیل تدریجی آمونیوم به نیترات در مجاورت محل تزریق و سپس آبشویی تدریجی آن به اعماق پایین‌تر می‌تواند بر تغییرات نیترات خاک مؤثر می‌باشد.

در رابطه با اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده رطوبت خاک و همچنین غلظت نیترات و آمونیوم می‌توان به خطاهای ساختاری مدل، خطاهای موجود در ورودی‌ها و ضرایب مدل و خطای اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای اشاره نمود. شبیه‌سازی در مدل HYDRUS با فرض همگن بودن خاک انجام شده و تغییرات مکانی و زمانی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک و همچنین وجود جریان‌های ترجیحی نادیده گرفته شده است. از طرف دیگر تخمین دقیق مقادیر تعرق گیاه، تبخیر از سطح خاک و ضرایب کاهش جذب آب در مدل فلدس در شبیه‌سازی دقیق ضرایب آب و املاح در خاک مؤثر می‌باشند. در نهایت ذکر این نکته ضروری است که شبیه‌سازی غلظت آمونیوم و نیترات در خاک همانند اغلب مطالعات صورت گرفته در این زمینه (۴، ۱۱، ۱۴ و ۳۵) با نادیده گرفتن برخی فرآیندهای چرخه نیتروژن در خاک از جمله معدنی شدن مواد آلی و باقیمانده‌های گیاهی در خاک و یا تثبیت

بر اساس جدول ۳، خطای مدل در شبیه‌سازی غلظت آمونیوم و نیترات در عمق‌های مختلف خاک در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب کمتر از ۰/۰۳۳ و ۰/۰۲۰ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مکعب خاک می‌باشد. در تحقیقات دیگری مقدار خطای RMSE در شبیه‌سازی غلظت نیترات در خاک توسط مدل HYDRUS بین ۰/۳۹-۱۰/۹ میلی‌گرم بر لیتر و ۲/۶-۸/۹ میلی‌گرم بر کیلوگرم گزارش شده است (۴۷ و ۲۱). در مطالعه دیگری نیز مقدار خطای RMSE در شبیه‌سازی غلظت آمونیوم و نیترات به ترتیب ۰/۰۴۲ و ۳/۰۷۸ میلی‌مول بر لیتر بیان شده است (۳۴). مقادیر مثبت شاخص خطای ME در جدول ۳ نشان‌دهنده بیش‌برآوردی و مقادیر کمتر آن نشان‌دهنده کم‌برآوردی مدل می‌باشد. این جدول نشان می‌دهد که عملکرد مدل در شبیه‌سازی جریان آب و املاح در لایه‌های پایین خاک بهتر از لایه سطحی می‌باشد. دلیل این موضوع می‌تواند به تغییرات کم رطوبت و غلظت نمک‌ها در لایه‌های پایین خاک مربوط باشد.

در شکل ۱ نتایج صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک در سه عمق نشان داده شده است. همان‌گونه که شکل ۱ نشان می‌دهد، در اوایل فصل رشد با توجه به نیاز آبی کم گیاه، تغییرات رطوبت کم می‌باشد. در اواسط فصل رشد، با افزایش نیاز آبی و مقادیر آبیاری، تغییرات رطوبتی بیشتری مشاهده شده و سپس در انتهای فصل رشد نیز تغییرات رطوبت کمتر می‌گردد. در این رابطه لازم به توضیح است که اندازه‌گیری رطوبت ۲۴ ساعت پس از آبیاری شروع شده و این می‌تواند تغییرات کم رطوبت در داخل خاک را توجیه کند. تغییرات رطوبت در لایه سطحی خاک به دلیل افزایش رطوبت در اثر آبیاری و سپس جذب توسط گیاه و همچنین تبخیر از سطح خاک بیشتر از لایه‌های پایین‌تر است. در عمق‌های پایین خاک به دلیل این‌که اثر تبخیر وجود نداشته و جذب توسط گیاه نیز به‌خصوص در اوایل فصل رشد کمتر است، تغییرات رطوبت ناچیز است.

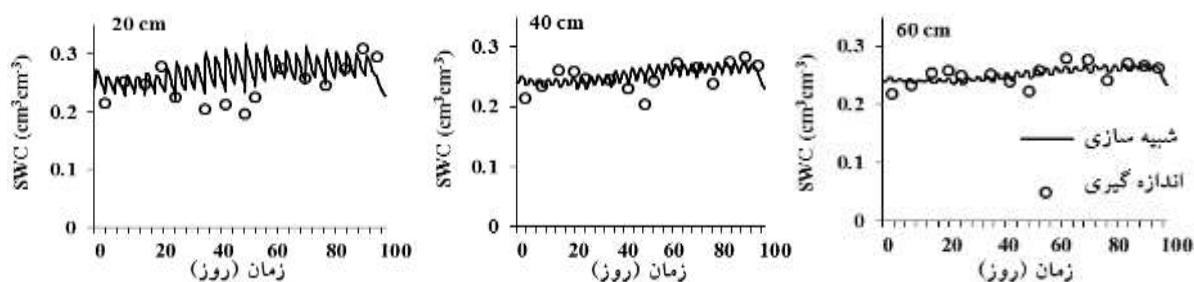
مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷

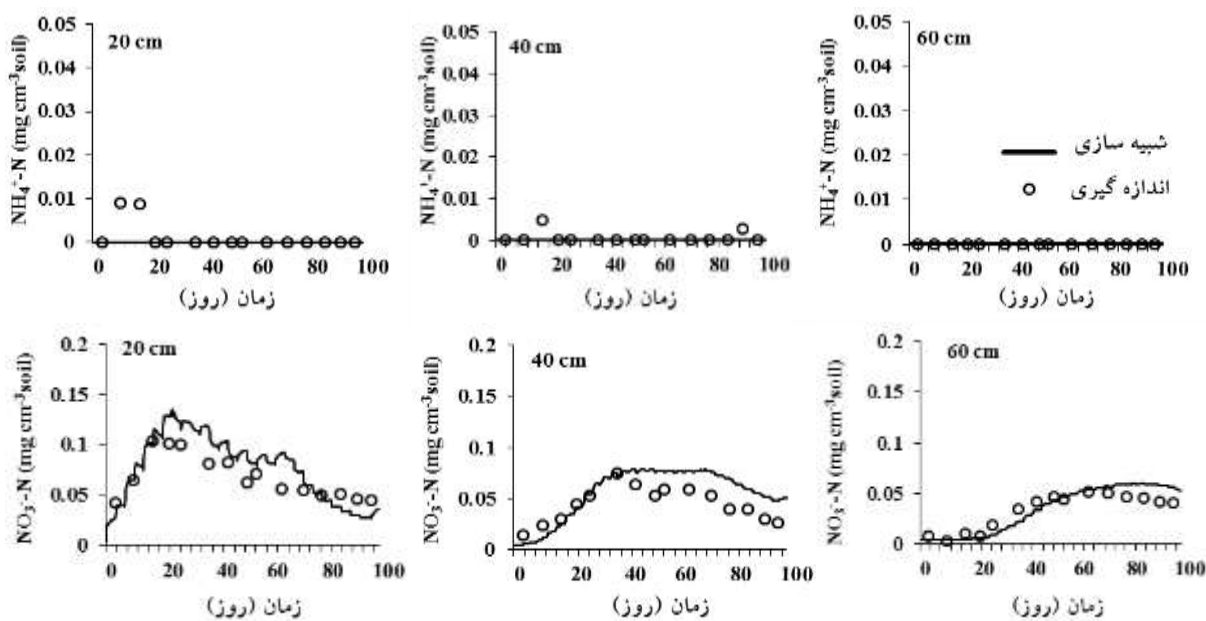
نسرین آزاد، جواد بهمنش، وحید رضاوودی نژاد، فریبرز عباسی، مریم نوایان

واسنجی شده جهت شبیه سازی استراتژی ها و سناریوهای مختلف کودآبیاری استفاده گردید. در جدول ۴ اجزای بیلان رطوبت خاک در طول فصل رشد ذرت در دو بافت سنگین (لوم شنی رسی: SCL) و سبک (لوم شنی: SL) نشان داده شده است.

نیترژن اتمسفر انجام شده است که می تواند موجب اختلاف بین مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده گردد. با توجه به نتایج مناسب صحت سنجی مدل HYDRUS در شبیه سازی انتقال آب، آمونیوم و نیترات در خاک، از مدل



شکل ۱. مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده رطوبت خاک (SWC) در عمق های مختلف خاک لوم رسی شنی



شکل ۲. مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده غلظت آمونیوم و نیترات در عمق های مختلف خاک لوم رسی شنی

جدول ۴. نتایج شبیه سازی اجزای بیلان آب خاک در مدل HYDRUS در دو بافت مختلف خاک

اجزای بیلان آب (میلی متر)						بافت خاک
نفوذ عمقی	جذب ریشه	تعرق پتانسیل	تبخیر	بارندگی	آبیاری	
۴۴/۵	۲۸۲/۳	۳۲۳/۸	۱۱۷/۱	۰	۴۴۶/۴	لوم رسی شنی
۱۵۵/۵	۲۶۸/۱	۳۲۳/۸	۸۲/۸	۰	۴۴۶/۳	لوم شنی

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷

کاربرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی آبشویی نیترات و جذب نیتروژن در کشت ذرت تحت سناریوهای مختلف کودآبیاری قطره‌ای

پتانسیل آبشویی توسط بارندگی‌های فصل پاییز بعد از برداشت محصول را دارد. بنابراین جزء تلفات محسوب شده و بایستی با برنامه‌ریزی مناسب از آبشویی در طول فصل رشد و تجمع آن در پروفیل خاک اجتناب نمود. بر اساس جدول ۵، در خاک سنگین میزان جذب نیترات توسط گیاه، آبشویی و همچنین مقدار تجمع نیترات در انتهای فصل رشد در ناحیه ریشه در تناوب هفتگی و یک هفته در میان مشابه می‌باشد. به طوری که از کل مقدار نیترات موجود در خاک، نیترات اضافه‌شده و آمونیومی که به نیترات تبدیل می‌گردد، حدود ۶۳ درصد توسط گیاه جذب شده و ۳۷ درصد تلف شده است. اما با کاهش تعداد تقسیط کود به سه مرحله، مقدار جذب نیترات توسط گیاه به ۷۳ درصد افزایش و میزان کل تلفات به ۲۷ درصد کاهش یافته است. این موضوع می‌تواند به دلیل آبشویی کمتر نیترات در این خاک سنگین باشد. زیرا اغلب کود تزریق‌شده در ناحیه ریشه تجمع یافته و در مراحل مختلف رشد، به خصوص در مراحل با نیاز کودی بیشتر، در دسترس گیاه بوده و مقدار جذب آن حتی از نیاز گیاه نیز بیشتر می‌باشد. بنابراین به دلیل جذب بیشتر، مقادیر نیترات باقی‌مانده در خاک و در نتیجه تلفات کل نیز در آن کمتر است. از طرف دیگر همان‌گونه که جدول ۵ نشان می‌دهد، در یک خاک سبک نیز در تناوب هفتگی و یک هفته در میان، مقدار جذب نیترات توسط گیاه (حدود ۶۲ درصد)، میزان آبشویی نیترات در کل فصل رشد (در حدود ۱۴ درصد) و مقدار تجمع نیترات در ناحیه ریشه تا انتهای فصل رشد (حدود ۲۴ درصد) تقریباً یکسان می‌باشد. اما با کاهش تعداد تقسیط به سه مرحله، مقدار جذب نیترات به حدود ۴۸ درصد کاهش و میزان آبشویی نیترات به حدود ۳۵ درصد افزایش یافته و در نتیجه کل تلفات نیترات به ۵۲ درصد رسیده است.

همان‌گونه که این جدول نشان می‌دهد، مقدار تبخیر از سطح خاک در خاک سنگین ۱۱۷/۱ میلی‌متر (یعنی ۲۶/۲ درصد از کل مقدار آبیاری) و در خاک سبک ۸۲/۹ میلی‌متر (۱۸/۶ درصد) می‌باشد. در تحقیقات مختلف نیز مقادیر متفاوت تبخیر از خاک توسط مدل HYDRUS در شرایط مختلف داده شده است. در یک پژوهش در آبیاری قطره‌ای سورگوم در شرایط متفاوتی از شوری آب آبیاری و سطوح کود نیتروژن، میزان تبخیر از کل مقدار آبیاری و بارندگی ۲۰/۲ تا ۲۹/۵ درصد به دست آمده است (۳۴). همچنین در یک تحقیق دیگر در شبیه‌سازی آبیاری قطره‌ای درخت پرتغال در یک فصل، میزان تبخیر ۱۷/۷ درصد از کل مقدار آبیاری و بارندگی گزارش شده است (۳۲). مقدار نفوذ و تلفات عمقی آب از زیر ناحیه ریشه ($z > 65 \text{ cm}$) در خاک سنگین (با مقدار ۹/۹۷ درصد) در حدود ۲۵ درصد کمتر از تلفات عمقی آب در خاک سبک (با مقدار ۳۴/۹۶ درصد) می‌باشد. کم بودن میزان تلفات عمقی از زیر ناحیه ریشه موجب افزایش جذب رطوبت در خاک سنگین (با مقدار ۶۳/۲۶ درصد) نسبت به خاک سبک (با مقدار ۶۰/۱۳ درصد) شده است.

در جدول ۵ اجزای بیلان نیتروژن خاک در طول فصل رشد در سناریوهای مختلف در دو بافت سنگین و سبک ارائه شده است. همان‌گونه که این جدول نشان می‌دهد، به علت جذب آمونیوم به ذرات خاک و سپس تبدیل آن به نیترات، اغلب آمونیوم به نیترات تبدیل شده و درصد مربوط به جذب آمونیوم توسط گیاه و همچنین میزان آمونیوم باقی‌مانده در ناحیه ریشه در انتهای فصل رشد بسیار کم می‌باشد. در این جدول بخش تلفات، مجموع میزان آبشویی در طول فصل رشد و میزان نیتروژن باقی‌مانده در ناحیه ریشه می‌باشد. علت این امر به این دلیل است که علاوه بر آبشویی که در طول فصل می‌تواند اتفاق بیفتد، میزان نیتروژن باقی‌مانده در پروفیل خاک نیز

نسرین آزاد، جواد بهمنش، وحید رضوردی‌نژاد، فریبرز عباسی، مریم نوابیان

جدول ۵. نتایج بیلان اجزای نیتروژن خاک در مدل HYDRUS در سناریوهای مختلف تناوب هفتگی (weekly)، یک هفته در میان (biweekly) و تقسیط سه مرحله‌ای (3split) در دو بافت لوم رسی شنی (SCL) و لوم شنی (SL)

سناریوها						اجزای بیلان	شکل‌های
SL-3split	SL-biweekly	SL-weekly	SCL-3split	SCL-biweekly	SCL-weekly	نیتروژن (kg/ha)	نیتروژن
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	مقدار اولیه	
۷۵/۱۵	۷۵/۰۸	۷۵/۹۴	۷۴/۹۲	۷۵/۰۷	۷۴/۳۱	به‌کار برده شده	
۷۴/۲۰	۷۳/۲۳	۷۲/۹۹	۷۴/۴۰	۷۳/۶۵	۷۲/۱۲	چرخه نیتروژن [†]	
۱/۱۷	۱/۴۹	۱/۴۹	۰/۷۴	۱/۰۳	۱/۰۲	جذب ریشه	N-NH ₄ ⁺
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	آبشویی	
۰/۰۰	۰/۶۰	۱/۶۹	۰/۰۰	۰/۶۰	۱/۳۶	تجمع در خاک	
۰/۰۰	۰/۶۰	۱/۶۹	۰/۰۰	۰/۶۰	۱/۳۶	تلفات کل ^{††}	
۶/۸۳	۶/۸۳	۶/۸۳	۶/۸۳	۶/۸۳	۶/۸۳	مقدار اولیه	
۲۵۸/۸۵	۲۵۸/۵۹	۲۵۸/۵۷	۲۵۸/۶۶	۲۵۸/۵۹	۲۵۸/۹۵	به‌کار برده شده	
۷۴/۱۴	۷۳/۱۶	۷۲/۹۳	۷۴/۳۳	۷۳/۵۹	۷۲/۰۶	چرخه نیتروژن [†]	
۱۶۴/۲۲	۲۰۸/۲۴	۲۰۸/۶۵	۲۴۵/۳۸	۲۱۶/۹۶	۲۰۹/۷۷	جذب ریشه	N-NO ₃ ⁻
۱۱۷/۶۲	۵۲/۰۵	۴۵/۸۳	۲۹/۵۹	۱۴/۹۰	۱۳/۳۹	آبشویی	
۵۷/۹۷	۷۸/۳۰	۸۶/۸۵	۶۴/۲۵	۱۰۷/۱۵	۱۱۱/۶۶	تجمع در خاک	
۱۷۵/۵۹	۱۳۰/۳۴	۱۳۲/۶۸	۹۳/۸۵	۱۲۲/۰۵	۱۲۵/۰۶	تلفات کل ^{††}	

[†] تبدیل آمونیوم به نیترات، جزء کاهنده آمونیوم و افزایش نیترات -^{††} مجموع آبشویی و تجمع در پروفیل خاک.

هفته هفتم به اوج خود رسیده (در سناریوی تقسط سه مرحله‌ای با مقادیر بیشتر) و سپس تا انتهای فصل رشد، آبشویی با یک روند نزولی کاهش می‌یابد.

به‌منظور تحلیل تأثیر تعداد تقسیط بر مقدار جذب نیتروژن توسط گیاه می‌توان به شکل ۳ مراجعه نمود. در شکل ۳ میزان نیاز هفتگی ذرت به نیتروژن در طول فصل رشد به همراه مقدار و زمان تزریق نیتروژن و روند جذب آن توسط ریشه ذرت در سناریوهای مختلف نشان داده شده است. همان‌گونه که این شکل نشان می‌دهد، در خاک لوم رسی شنی به‌دلیل سنگین بودن خاک و تلفات عمقی بسیار کم رطوبت در آن، نیتروژن تزریق شده به خاک در تزریق تدریجی هفتگی و یک هفته در میان، به‌صورت تدریجی جذب ریشه شده و بخشی از آن نیز در اثر آبیاری‌های بعدی شسته می‌شود. البته به‌دلیل اینکه

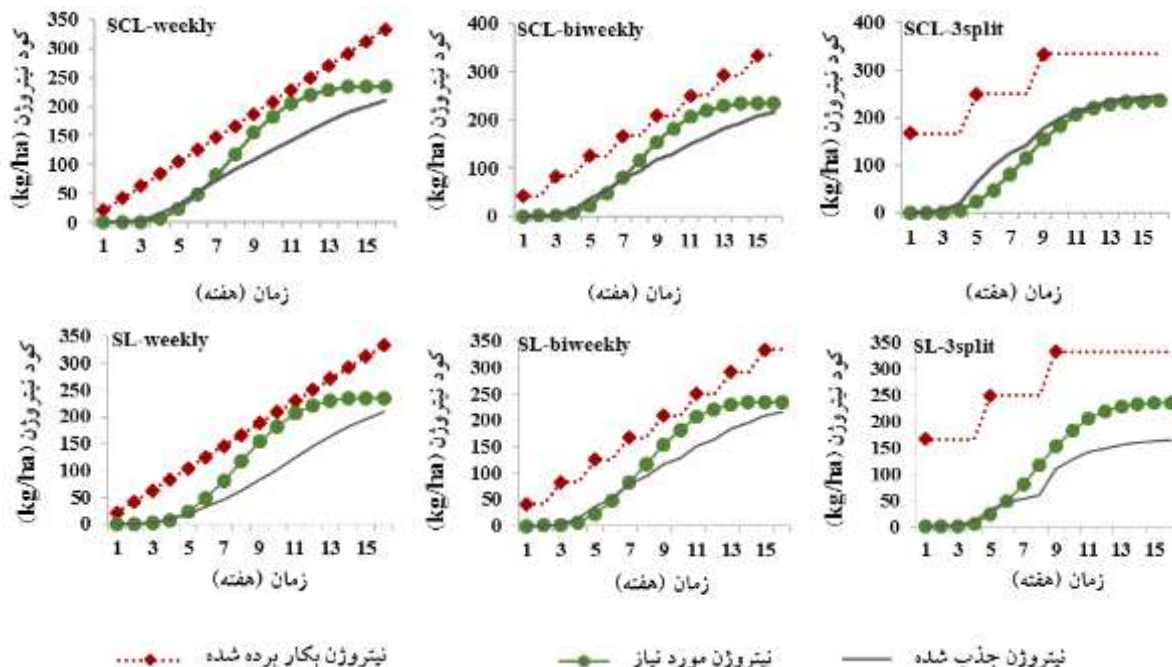
نتایج این تحقیق نشان داد که در خاک لوم رسی شنی، در تناوب هفتگی و یک هفته در میان، آبشویی نیترات از هفته هشتم آغاز شده و با یک روند تقریباً ثابت تا انتهای فصل رشد ادامه می‌یابد. همچنین میزان نیتراتی که در هر هفته در ناحیه ریشه تجمع می‌یابد در ۳ هفته اول فصل رشد بیشتر بوده و از هفته چهارم با افزایش میزان جذب آن توسط ریشه، تجمع نیترات در ناحیه ریشه کاهش یافته و از هفته ۱۴ با کاهش میزان جذب نیترات، مقادیر بیشتری در خاک تجمع می‌یابد. در تقسیط سه مرحله‌ای در این بافت خاک، آبشویی از هفته ششم و با مقدار بیشتری از دو سناریوی قبل تا انتهای فصل ادامه می‌یابد. اما به‌علت مقادیر زیاد جذب نیترات پس از هر مرحله تزریق کود، مقدار تجمع نیترات در آن کمتر است. از طرف دیگر در خاک سبک لوم شنی، آبشویی نیترات از هفته پنجم آغاز شده و با روند افزایشی در

کاربرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی آبشویی نترات و جذب نیتروژن در کشت ذرت تحت سناریوهای مختلف کودآبیاری قطره‌ای

اما در تزریق سه مرحله‌ای، به دلیل آبشویی زیاد که در طول فصل در خاک سبک اتفاق می‌افتد، بخش قابل توجه نترات تزریق شده در هر مرحله توسط آبیاری‌های بعدی شسته شده و از دسترس ریشه خارج می‌گردد. بنابراین میزان جذب نیتروژن توسط ریشه نیز کاهش می‌یابد. نتایج یک پژوهش در بررسی و مدل‌سازی دو بعدی وضعیت آب و نیتروژن در سورگوم در یک خاک با بافت متوسط نشان داد که جذب نترات زمانی بیشتر بود که تعداد رویدادهای کودآبیاری بیشتر و مقدار به کار برده شده در هر واقعه کمتر بود (۳۴). نتایج یک مطالعه دیگر که حاوی خاکی با بافت متوسط بود نیز نشان داد که یک کوددهی تدریجی در طول کل فصل رشد پتانسیل آبشویی و آلودگی سفره آب زیرزمینی را کاهش می‌دهد (۲۸). همچنین بر اساس نتایج به دست آمده از پژوهشی دیگر (۳۳)، افزایش تناوب کودآبیاری در یک خاک لوم شنی موجب افزایش عملکرد پیاز گردید.

در مقادیر یکسان به خاک تزریق می‌گردد، در زمان‌های اوج نیاز ذرت به نیتروژن، به اندازه کافی در خاک موجود نبوده و در نتیجه کمتر از مقدار مورد نیاز جذب می‌گردد. اما زمانی که در این خاک سنگین، کود به صورت سه مرحله‌ای تزریق می‌شود، به دلیل ماهیت سنگین بودن خاک و عدم آبشویی توسط آبیاری، مقادیر نیتروژن تزریق شده در خاک تجمع یافته و به تدریج توسط گیاه جذب می‌گردد. در نتیجه به دلیل اینکه در زمان‌های حداکثر نیاز ذرت، نیتروژن کافی در ناحیه ریشه وجود دارد، مقدار جذب کافی و حتی بیشتر از مقدار مورد نیاز می‌باشد.

همان‌گونه که شکل ۳ نشان می‌دهد، در خاک سبک با تلفات عمقی زیاد و آبشویی بیشتر، در تناوب هفتگی و یک هفته در میان که کود به تدریج تزریق می‌گردد، آبشویی زیاد، کمتر بر جذب تأثیر گذاشته و نمودار جذب نیتروژن توسط ذرت به نمودارهای مشابه در بافت سنگین نزدیک می‌باشد.



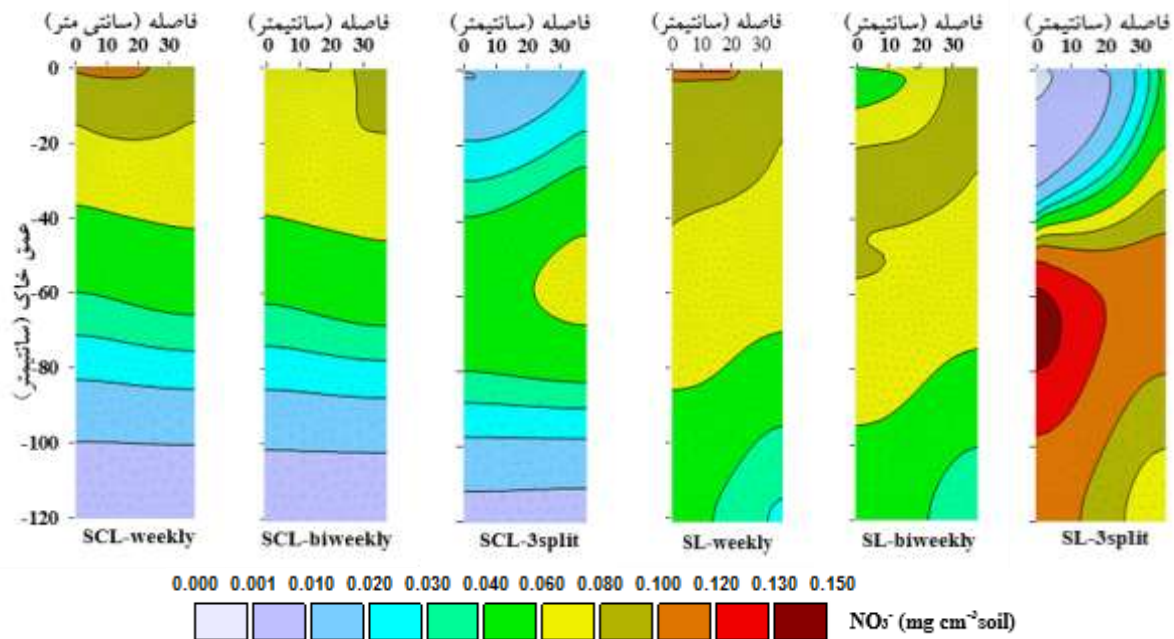
شکل ۳. مقایسه کود نیتروژن به کار برده شده، مورد نیاز گیاه و جذب شبیه‌سازی شده در مدل HYDRUS در سناریوهای مختلف تناوب هفتگی (weekly)، یک هفته در میان (biweekly) و تقسیم سه مرحله‌ای (3split) در دو بافت لوم رسی شنی (SCL) و لوم شنی (SL)

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷

هفتگی و یک هفته در میان، تجمع نیترات در لایه سطحی خاک بیشتر می‌باشد ولی در تزریق سه مرحله‌ای، بخشی از نیترات در عمق ۶۰ سانتی‌متر تجمع یافته است. بر اساس شکل ۴، پیشروی و آبشویی نیترات در پروفیل خاک در خاک سبک بیشتر از خاک سنگین می‌باشد. همچنین در تقسیط سه مرحله‌ای، تجمع زیادی از نیترات در زیر ناحیه ریشه ($z > 65 \text{ cm}$) مشاهده می‌گردد که قابلیت آبشویی بالایی توسط بارندگی فصل پاییز بعد از برداشت محصول و انتقال به آب‌های زیرزمینی را دارد. بنابراین تزریق سه مرحله‌ای کود که توسط کشاورزان محلی اجرا می‌گردد، به هیچ عنوان در خاک‌های سبک توصیه نمی‌گردد.

شکل ۴ توزیع نیترات در پروفیل خاک را در زمان برداشت محصول در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۴، در خاک سنگین و در سناریوهای تناوب هفتگی و یک هفته در میان، پیشروی نیترات در پروفیل خاک تقریباً یکسان می‌باشد. تفاوت اندکی که در میزان نیترات لایه سطحی خاک وجود دارد به دلیل تزریق کود در هفته آخر در سناریوی تزریق هفتگی و تبدیل تدریجی آمونیم به نیترات در لایه سطحی خاک در طول هفته می‌باشد. اما در تزریق سه مرحله‌ای، پیشروی آبشویی نیترات در خاک بیشتر بوده؛ ولی به دلیل جذب بیشتر توسط ریشه، تجمع آن در انتهای فصل رشد به خصوص در لایه سطحی خاک کمتر می‌باشد. در واقع در تزریق



شکل ۴. توزیع مکانی غلظت نیترات در پروفیل خاک در زمان برداشت ذرت در سناریوهای مختلف تناوب هفتگی (weekly)، یک هفته در میان (biweekly) و تقسیط سه مرحله‌ای (3split) در دو بافت لوم رسی شنی (SCL) و لوم شنی (SL)

مزرعه می‌تواند به‌عنوان یک روش مؤثر در کاهش آلودگی بخش کشاورزی باشد. این پژوهش با هدف بررسی تأثیر استراتژی‌های مختلف کودآبیاری بر جذب نیتروژن توسط

نتیجه‌گیری کلی

کشاورزی از اصلی‌ترین دلایل افزایش غلظت نیترات در آب زیرزمینی است و مدیریت کاربرد کود نیتروژن در

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۸ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۷

کاربرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی آبشویی نیترات و جذب نیتروژن در کشت ذرت تحت سناریوهای مختلف کودآبیاری قطره‌ای

نمود. در این راستا استفاده از ابزارهای بهینه‌سازی در کنار مدل‌های شبیه‌سازی به‌منظور بهینه‌سازی پارامترهای طراحی و مدیریتی تزریق کود در هر واقعه کودآبیاری و همچنین بهینه‌سازی مقدار تزریق کود در هر مرحله در طول فصل رشد پیشنهاد می‌گردد. در حقیقت با کمک این ابزار، ضمن کاهش آبشویی نیترات در مراحل مختلف کودآبیاری، می‌توان مقدار تزریق کود را در هر مرحله بر اساس نیاز و جذب گیاه تنظیم نمود تا نیتروژن اضافی در پروفیل خاک تجمع نیابد.

منابع

1. رنجبر آ.، رحیمی خوب ع.، وراوی پور م. و ابراهیمیان طالشی ح (۱۳۹۶) بررسی توزیع نیترات و آمونیوم در زیر جویچه و پشه و جذب نیتروژن توسط ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود اوره. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۸(۴): ۸۹۱-۹۰۴.
2. محسنی ا.، میرسید حسینی ح. و عباسی ف (۱۳۹۱) مقایسه کودآبیاری با کوددهی سطحی بر کارایی مصرف آب، کود، عملکرد، اجزای عملکرد ذرت و تلفات عمقی نیترات. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۶(۵): ۱۱۸۱-۱۱۸۹.
3. Abendroth LJ, Elmore RW, Boyer MJ and Marlay SK (2011) Corn Growth and Development. Iowa State University. Extension and Outreach. Amsterdam, Iowa, 60 p.
4. Ajdary K, Singh DK, Singh AK and Khanna M (2007) Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation. Agricultural Water Management. 89: 15-28.
5. Allen LH, Yocum CS and Lemon ER (1964) Photosynthesis under field conditions. VII. Radiant energy exchanges within a corn crop canopy and implications in water use efficiency. Agronomy. 56: 253-259.
6. Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M (1998) Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56. Rome, Italy, 333 p.

ذرت و آبشویی نیترات در سیستم آبیاری قطره‌ای نواری سطحی انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که در خاک سنگین لوم رسی شنی با تزریق تدریجی کود نیتروژن به‌صورت هفتگی و یک هفته در میان، نیتروژن تزریق‌شده به خاک به‌صورت تدریجی جذب ریشه شده و بخشی از آن نیز در اثر آبیاری‌های بعدی شسته می‌شود. اما به‌دلیل اینکه در مقادیر یکسان به خاک تزریق می‌گردد، در زمان‌های اوج نیاز ذرت به نیتروژن، به اندازه کافی در ناحیه ریشه موجود نبوده و در نتیجه کمتر از مقدار مورد نیاز جذب می‌گردد. در این شرایط نیترات در خاک تجمع می‌یابد. اما با تزریق سه مرحله‌ای کود، مقادیر نیتروژن تزریق‌شده در خاک تجمع یافته و به‌تدریج توسط گیاه جذب می‌گردد. در نتیجه به‌دلیل اینکه در زمان‌های حداکثر نیاز ذرت، نیتروژن کافی در ناحیه ریشه وجود دارد، مقدار جذب کافی می‌باشد. در نتیجه تجمع آن در انتهای فصل رشد به‌خصوص در لایه سطحی خاک کمتر است.

در خاک سبک لوم شنی با تلفات عمقی زیاد و آبشویی بیشتر، در تناوب هفتگی و یک هفته در میان که کود به‌تدریج تزریق می‌گردد، آبشویی زیاد، کمتر بر جذب تأثیر گذاشته و روند جذب نیتروژن توسط ذرت مشابه بافت سنگین می‌باشد. اما در تزریق سه مرحله‌ای، بخش قابل‌توجه نیترات تزریق‌شده توسط آبیاری‌های بعدی شسته شده و از دسترس ریشه خارج می‌گردد. بنابراین میزان جذب نیتروژن توسط ریشه نیز کاهش می‌یابد. تجمع زیاد نیترات در زیر ناحیه ریشه قابلیت آبشویی بالایی توسط بارندگی فصل پاییز بعد از برداشت محصول و انتقال به آب‌های زیرزمینی را دارد.

به‌منظور مدیریت کودآبیاری بایستی با توجه به بافت خاک و برنامه‌ریزی مناسب، از آبشویی نیترات در طول فصل رشد و همچنین تجمع آن در پروفیل خاک اجتناب

7. Bremner JM and Keeney DR (1965) Steam distillation methods for determination of ammonium, nitrate and nitrite. *Analytica Chimica Acta*. 32: 485-495.
8. Doltra J and Munoz P (2010) Simulation of nitrogen leaching from a fertigated crop rotation in a Mediterranean climate using the EU-Rotate_N and Hydrus-2D models. *Agricultural Water Management*. 97: 277-285.
9. Farneselli M, Benincasa P, Tosti G, Simonne E, Guiducci M and Tei F (2015) High fertigation frequency improves nitrogen uptake and crop performance in processing tomato grown with high nitrogen and water supply. *Agricultural Water Management*. 154: 52-58.
10. Feddes RA, Kowalik PJ and Zaradny H (1978) Simulation of field water use and crop yield. *Simulation Monographs Pudoc*. Wageningen, Netherlands, 16 p.
11. Gardenas AI, Hopmans JW, Hanson BR and Šimůnek J (2005) Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management*. 74: 219-242.
12. Gelhar LW, Welty C, Rehfeldt KR (1992) A critical review of data on field scale dispersin in aquifers. *Water Resources Research*. 28(7): 1955-1974.
13. Gheysari M, Mirlatif SM, Homae M, Asadi ME and Hoogenboom G (2009) Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. *Agricultural Water Management*. 96: 946-954.
14. Hanson BR, Šimůnek J and Hopmans JW (2006) Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling. *Agricultural Water Management*. 86: 102-113.
15. Hartmann A, Šimůnek J, Aidoo MK, Seidel SJ and Lazarovitch N (2018) Implementation and application of a root growth module in HYDRUS. *Vadose Zone*. pp. 16, doi: 10.2136/vzj2017.02.0040. (in Press)
16. Hoffman GJ and van Genuchten M.Th (1983) Soil properties and efficient water use: Water management for salinity control. In: *Limitations to efficient water use in crop production*. H. M. Taylor, W. Jordan and T. Sinclair (Eds.) American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. 73-85.
17. Hou Z, Chen W, Li X, Xiu L and Wu L (2009) Effects of salinity and fertigation practice on cotton yield and 15N recovery. *Agricultural Water Management*. 96: 1483-1489.
18. Hu K, Li B, Chen D, Zhang Y and Edis R (2008) Simulation of nitrate leaching under irrigated maize on sandy soil in desert oasis in Inner Mongolia, China. *Agricultural Water Management*. 95: 1180-1188.
19. Jiang S, Pang L, Buchan GD, Šimůnek J, Noonan MJ and Close ME (2010) Modeling water flow and bacterial transport in undisturbed lysimeters under irrigations of dairy shed effluent and water using HYDRUS-1D. *Water Research*. 44: 1050-1061.
20. Kandelous MM and Šimůnek J (2010) Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*. 97: 1070-1076.
21. Karandish F and Šimůnek J (2017) Two-dimensional modeling of nitrogen and water dynamics for various N-managed water-saving irrigation strategies using HYDRUS. *Agricultural Water Management*. 193: 174-190.
22. Kemp PR, Reynolds JF, Pachepsky Y, Chen JL (1997) A comparative modeling study of soil water dynamics in a desert ecosystem. *Water Resources Research*. 33(1): 73-90.
23. Kennedy J, Eberhart RC (1995) Particle swarm optimization. In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*. IEEE Press. Piscataway, N. J.
24. Kumar M, Rajput TBS, Kumar R and Patel N (2016) Water and nitrate dynamics in baby corn (*Zea mays L.*) under different fertigation frequencies and operating pressures in semi-arid region of India. *Agricultural Water Management*. 163: 263-274.
25. Lemaire G, Charrier X, Hébert Y (1996) Nitrogen uptake capacities of maize and sorghum crops in different nitrogen and water supply conditions. *Agronomie, EDP Sciences*. 16(4): 231-246.
26. Li Y, Šimůnek J, Jing L, Zhang Z and Ni L (2014) Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D. *Agricultural Water Management*. 142: 38-46.
27. Ma X, Zhang J and Huang B (2016) Cytokinin-mitigation of salt-induced leaf senescence in perennial ryegrass involving the activation of antioxidant systems and ionic balance. *Environmental and Experimental Botany*. 125: 1-11.
28. Marinov I and Marinov AM (2014) A Coupled Mathematical Model to Predict the Influence of Nitrogen Fertilization on Crop, Soil and

کاربرد مدل HYDRUS-2D در شبیه‌سازی آبشویی نیترات و جذب نیتروژن در کشت ذرت تحت سناریوهای مختلف کودآبیاری قطره‌ای

- Groundwater Quality. Water Resources Management. 28: 5231-5246.
29. Nakayama FS, Bucks DA (1986) Trickle irrigation for crop production: design, operation, and management. Elsevier, New York.
 30. Okeeffe K (2009) Maize growth & development. Department of Primary Industries, United Kingdom, 60 p.
 31. Phogat V, Skewes MA, Cox JW, Alam J, Grigson G and Šimůnek J (2013) Evaluation of water movement and nitrate dynamics in a lysimeter planted with an orange tree. Agricultural Water Management. 127: 74-84.
 32. Phogat V, Skewes MA, Cox JW, Sanderson G, Alam J and Šimůnek J (2014) Seasonal simulation of water, salinity and nitrate dynamics under drip irrigated mandarin (Citrus reticulata) and assessing management options for drainage and nitrate leaching. Hydrology. 513: 504-516.
 33. Rajput TBS and Patel N (2006) Water and nitrate movement in drip-irrigated onion under fertigation and irrigation treatments. Agricultural Water Management. 79: 293-311.
 34. Ramos TB, Šimůnek J, Goncalves MC, Martins JC, Prazeres A and Pereira LS (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.
 35. Ravikumar V, Vijayakumar G, Šimůnek J, Chellamuthu S, Santhi R and Appavu K (2011) Evaluation of fertigation scheduling for sugarcane using a vadose zone flow and transport model. Agricultural Water Management. 98: 1431-1440.
 36. Reynolds WD and Elrick DE (1986) A method for simultaneous in situ measurements in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the conductivity-pressure head relationship. Ground Water Monitoring & Remediation. 6: 84-95.
 37. Richards LA (1931) Capillary conduction of fluid through porous mediums. Physics. 1, 318-333.
 38. Ritchie JT (1972) Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research. 8: 1204-1212.
 39. Shrestha RK, Leslie R, Cooperband LR and MacGuidwin AE (2010) Strategies to Reduce Nitrate Leaching into Groundwater in Potato Grown in Sandy Soils: Case Study from North Central USA. American Journal of Potato Research. 87: 229-244.
 40. Šimůnek J and Bradford SA (2008) Vadose zone modeling: Introduction and importance. Vadose Zone. 7(2): 581-586.
 41. Šimůnek J and Hopmans JW (2009) Modeling compensated root water and nutrient uptake. Ecological Modelling. 220: 505-521.
 42. Šimůnek J, van Genuchten MTh and Sejna M (2011) The HYDRUS software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. In: Technical Manual, Version 2. PC Progress, Prague, Czech Republic, 260 p.
 43. Šimůnek J and Suarez DL (1993) Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 1. Model development, Water Resources Research. 29(2): 487-497.
 44. van Genuchten MTh (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated Soil Science Society of America. 44: 892-898.
 45. Vrugt JA, Hopmans JW and Šimůnek J (2001) Calibration of a two-dimensional root water uptake model, Soil Science Society of America. 65(4): 1027-1037.
 46. Vrugt JA, van Wijk MT, Hopmans JW and Šimůnek J (2001) One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling, Water Resources Research. 37(10): 2457-2470.
 47. Wang Z, Li J and Li Y (2014) Simulation of nitrate leaching under varying drip system uniformities and precipitation patterns during the growing season of maize in the North China Plain. Agricultural Water Management. 142: 19-28.



Water and Irrigation Management

(Scientific Journal of Agriculture)
(College of Abouraihan – University of Tehran)

Vol. 8 ■ No. 1 ■ Spring & Summer 2018

Application of HYDRUS-2D in simulation of nitrate leaching and nitrogen uptake in corn cultivation under different drip fertigation scenarios

Nasrin Azad¹, Javad Behmanesh^{2*}, Vahid Rezaverdinejad³, Fariborz Abbasi⁴, Maryam Navabian⁵

1. Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran.
2. Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran.
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Iran.
4. Professor of Agricultural Engineering Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.
5. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Guilan University, Iran.

Received: March 20, 2018

Accepted: July 7, 2018

Abstract

Managing nitrogen fertilizers application in the field is an effective tool to mitigate groundwater pollution. The objective of this research was to investigate the effect of various fertigation scenarios on the nitrate leaching and nitrogen absorption by corn in surface tape micro-irrigation system and sandy clay loam soil. For this purpose, HYDRUS-2D model was used to simulate water and nitrogen movement in soil and the requirement data for the model calibration and validation were collected by the field experiments. Then, the nitrogen uptake and nitrate leaching in the different fertigation frequencies were simulated in the calibrated model. The mentioned scenarios in a sandy loam soil were also exerted to compare with the results of the previous stage. The results showed that the nitrate uptake by the plant, leaching and its accumulation at the end of the growth season in the root zone were similar in weekly and biweekly frequencies in the studied soils. Reducing the number of fertigation frequencies to three splits, nitrate uptake by the plant in sandy clay loam soil increased to 73 percent and total losses of leaching and accumulation in the root zone, decreased to 27 percent. However, in three-stage splits in sandy loam soil, the nitrate uptake by the plant decreased to 48 percent and total nitrate losses increased to 52 percent.

Keywords: Dynamic root growth, Fertigation frequency, Groundwater pollution, PSO optimization, Sandy loam, Sandy clay loam.