

تحلیل اثرات مدیریت کوددهی در افزایش بهره‌وری آب و کود در کشت دیم ذرت: تحلیل

سناریوها با استفاده از مدل HDYRUS

نرگس ابراهیمی^۱، فاطمه کاراندیش^{۲*}، پریسا کهخامقدم^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۹/۲۰

چکیده

آبشویی از اراضی کشاورزی از مهم‌ترین منابع نقطه‌ای نیتروژن محسوب می‌شود که باعث آلودگی آبخوان‌های طبیعی می‌شود. اگرچه نیتروژن یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی در تکمیل فرآیند رشد گیاه است، اما کوددهی بدون مدیریت و فراتر از حد نیاز گیاه، باعث افزایش آبشویی نیتروژن به منابع آب زیرزمینی شده و منتج به ناپایداری زیست‌محیطی می‌شود. این مساله به ویژه در کشت دیم به دلیل وقوع بارندگی‌های ناخواسته که ممکن است بیش‌تر از ظرفیت نگهداشت آب در خاک باشد، از اهمیت بیش‌تری برخوردار خواهد بود. به همین دلیل در این پژوهش، سطح بهینه‌ی کود نیتروژن در کشت ذرت دیم در استان مازندران تعیین شد. بدین منظور، ابتدا مدل HYDRUS-2D با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده طی تحقیقی دو ساله در مزرعه ذرت، برای پارامترهای هیدرولیکی و شیمیایی واسنجی و صحت‌سنجی شد. سپس، از مدل برای شبیه‌سازی میزان آبشویی نیترات، نیتروژن جذب شده و نیتروژن باقی‌مانده در خاک در ۹ سناریوی شدت کودی شامل تیمار بدون کود (تنها در نظر گرفتن ۱۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن اولیه در خاک)، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار استفاده شد. در نهایت، ضمن تحلیل این پارامترها، از معیارهای کارایی مصرف نیتروژن و نسبت عملکرد محصول به شدت کود نیتروژن، بهترین سطح کوددهی در کشت دیم ذرت تعیین شد. اگرچه بر اساس معیارهای جذرمیانگین مربعات خطا (۱/۱۸-۰/۸ میلی‌متر برای رطوبت، ۷/۹۵-۰/۳۸ میلی‌گرم در لیتر برای غلظت نیترات و ۹۶/۸-۳۷/۹۶ کیلوگرم در هکتار برای میزان نیتروژن جذب شده به وسیله گیاه)، مدل HYDRUS-2D از دقت مقبولی در شبیه‌سازی انتقال آب و املاح در خاک برخوردار است، اما، تغییرات کم‌تر رطوبت و غلظت املاح در لایه‌های پایینی خاک در طول فصل رشد سبب شد تا دقت مدل در شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در این لایه‌ها بیش‌تر از لایه‌های سطحی باشد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی شده با مدل معلوم شد به ازای هر ۵۰ کیلوگرم در هکتار افزایش در میزان کود تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، میزان جذب به طور متوسط ۲۰ کیلوگرم در هکتار افزایش می‌یابد، اما پس از آن، به ویژه برای سطوح بالاتر از ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، میزان جذب کم‌تر از ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. همگام با کاهش جذب نیتروژن به وسیله گیاه، میزان آبشویی نیتروژن از محدوده‌های عمقی مختلف خاک نیز افزایش یافته و باعث خروج عناصر غذایی از لایه‌های سطحی و تجمع آن در لایه‌های زیرین در انتهای فصل رشد می‌شود. شاخص کارایی مصرف کود بیش‌ترین مقدار خود را در سطح کوددهی ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار داشته و در سطوح بالاتر، ثابت مانده و یا کاهش می‌یابد. این در حالی است که افزایش شدت کود نیتروژن همواره باعث کاهش میزان عملکرد تولیدی به ازای واحد کود مصرفی شد.

واژه‌های کلیدی: آبشویی نیترات، جذب نیتروژن، عملکرد ذرت دیم، کارایی مصرف کود، مدل HYDRUS-2D

مقدمه

نیتروژن (N)، از عناصر غذایی مهم برای تکمیل فرآیند رشد گیاه محسوب شده (Jia et al., 2014; Wienhold et al., 1995) و بخش مهمی از کلروفیل، پروتئین و دیگر اجزای حیاتی ملکولی در گیاه

را تشکیل می‌دهد. میزان نیتروژن در بافت‌های گیاهی اغلب بیش‌تر از میزان فسفر و پتاسیم در آن‌ها می‌باشد. نیتروژن روی کمیت و کیفیت محصولات زراعی و باغی تاثیر بالایی داشته و به عنوان یک ماده غذایی اصلی برای گیاه محسوب می‌شود. کمبود این ماده غذایی در خاک، انگیزه‌ی لازم برای کوددهی در راستای رفع این محدودیت و در نتیجه، افزایش محصول را در کشاورزان ایجاد می‌نماید. علی‌رغم اهمیت بالای نیتروژن در افزایش محصول، مصرف آن همواره خطری جدی برای آلودگی آب‌ها محسوب می‌گردد (Groffman., 2000; Davies., 2000). زیرا کود نیتروژن به صورت سالانه و گاها یک‌جا

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل

۳- مربی گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل

* - نویسنده مسئول: (Email: Karandish_h@yahoo.com)

نیترات آب زیرزمینی را از حد مجاز فراتر برده و احتمال بیماری‌های ناشی از آشامیدن آب‌های آلوده توسط بشر را در حد معنی‌داری افزایش داده است (Karandish et al., 2017). همچنین، درزی نفت‌چالی و همکاران، به تخریب اراضی تحت کشت و آلودگی آبخوان‌های کم‌عمق در نتیجه‌ی اعمال فعالیت‌های ناصحیح کشاورزی در برخی از مناطق استان مازندران را خاطرنشان ساختند (Darzi-Naftchali et al., 2017). از سوی دیگر، انجام چنین پژوهش‌هایی در سطح مزرعه، حتی در کشت‌های آبی، به دلایلی هم-چون محدودیت هزینه‌ها و زمان، اغلب شامل تیمار محدود بوده و امکان تعیین سطح بهینه‌ی واقعی کود را بر اساس نتایج حاصل غیرممکن می‌سازد. استفاده از مدل‌های توان‌مندی هم‌چون HYDRUS-2D، علاوه بر صرفه‌جویی در زمان و هزینه، امکان تحلیل سناریوهای مدیریتی متعدد را فراهم می‌آورد. به همین دلیل در پژوهش حاضر، ضمن واسنجی و صحت‌سنجی این مدل در تحلیل حرکت آب و املاح بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده طی دو فصل زراعی، به تعیین سطح مطلوب کوددهی در کشت دیم ذرت در استان مازندران پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه‌ی مطالعاتی و جمع‌آوری داده‌ها

محدوده‌ی مطالعاتی، مزرعه‌ی تحقیقاتی واقع در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری بود. این منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن، دارای اقلیم مرطوب بوده و میانگین بلندمدت مجموع بارش سالانه و میانگین دمای حداقل و حداکثر سالانه در آن به ترتیب ۶۱۶ میلی‌متر، ۶- و ۳۸/۹ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. بخش اعظم بارش در حد فاصل ماه‌های آبان تا بهمن رخ داده بنابراین امکان کشت دیم در فصول پاییز و زمستان را فراهم می‌آورد. خاک مزرعه‌ی منتخب در لایه‌ی سطحی (۲۰-۰ سانتی‌متر) دارای بافت لوم رسی-شنی بوده و تا عمق ۱۰۰ سانتی‌متری بافت لوم-رسی دارد. ویژگی‌های فیزیکی خاک در مزرعه‌ی منتخب در جدول ۱ ارائه شد.

معرفی مدل HYDRUS-2D و تحلیل سناریوها

معرفی مدل و شرایط مرزی و اولیه

مدل HYDRUS-2D (simunek et al., 2008) یکی از مدل‌های توانا در شبیه‌سازی جریان دوبعدی آب، املاح و گرما در خاک است که می‌تواند در محدوده‌ی وسیعی از شرایط مرزی به کار گرفته شود. جریان آب در این مدل، با معادله‌ی ریچاردز شبیه‌سازی می‌شود (رابطه ۱).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \frac{\partial k}{\partial z} - WU(h, x, z) \quad (1)$$

در اختیار گیاه قرار می‌گیرد، اما فعالیت‌های میکروبی در خاک قادر نخواهد بود تا تمام نیترات موجود در محلول خاک را استخراج نماید، بنابراین بخشی از آن از دسترس گیاه خارج شده و به منابع آب زیرزمینی می‌پیوندد.

اعمال بیش از مقدار مشخصی از کود نیتروژن در خاک از یک سو و افزایش بارندگی‌ها و یا آبیاری فراتر از نیاز در طول فصل کشت گیاه می‌تواند موجبات آبشویی نیترات را فراهم آورد (Hallberg, 1989; Pratt, 1985). به همین دلیل، بسیاری از محققان، به بررسی مدیریت تلفیقی سطح کود و آب مصرفی در کشت‌های آبی با هدف ارتقای بهره‌وری آب و کود پرداختند (Haverkort et al., 2003; Daudén et al., 2004; Alva et al., 2006; Barton et al., 2006; Hutton et al., 2008; Wei et al., 2009; Gheysari et al., 2009; Jia et al., 2014). نتایج این تحقیقات نشان داد که گیاه در شرایط مواجه با تنش آبی، به سطح کود کم‌تری نیاز داشته و عدم اصلاح سطح کود بر اساس حجم آب آبیاری می‌تواند کارایی مصرف کود را کاهش دهد. اما، سطح مطلوب کود در یک کشت معین همواره یکسان نبود و به نوع استراتژی آبیاری اعمال شده بستگی دارد (Karandish and Simunek., 2017).

مدیریت کوددهی به ویژه در فصولی که گیاه به صورت دیم کشت شده و میزان بارش فراتر از نیاز آبی گیاه است (مانند بعضی از مناطق شمال ایران)، از اهمیت بیش‌تری برخوردار بوده و عدم اتخاذ تدابیر مدیریتی سازگار با این نوع کشت، می‌تواند به دلیل عدم کنترل میزان آبشویی نیترات، کشاورزی پایدار را به مخاطره بیندازد. مناطق شمال ایران، به دلیل داشتن بالاترین متوسط بارش سالانه و وقوع آن در فصول پاییز و زمستان، مستعد کشت دیم هستند. بر اساس آمار منتشر شده توسط سازمان جهاد کشاورزی، مجموع سطح تحت کشت دیم در سه استان مازندران، گیلان و گلستان در فصل زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۳، حدود ۱/۳ میلیون هکتار بوده که این مقدار، در حدود ۲۴ درصد از کل اراضی تحت کشت دیم در کشور را شامل می‌شود. مجموع تولید از اراضی تحت کشت دیم در سه استان مذکور در سال زراعی مشابه، حدود ۱/۷ میلیون تن بوده که این مقدار، معادل ۲۷ درصد از کل تولید اراضی دیم کشور می‌باشد. این مساله، اهمیت اعمال مدیریت‌های بهینه‌ی زراعی در کشت دیم، به ویژه در استان‌های شمالی کشور را به اثبات می‌رساند.

علی‌رغم لزوم توجه به کشت دیم در مناطق پر بارش برای استفاده بهینه از آب سبز و کاهش فشار بر منابع آبی محدود، به ویژه در کشورهای مانند ایران که از بحران آب در بخش‌های وسیعی از کشور در طول یک سال آبی رنج می‌برند، تعیین سطح مطلوب کود نیتروژن در کشت دیم کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. کاراندیش و همکاران طی پژوهشی در برخی از اراضی تحت کشت در استان مازندران دریافتند که عدم توجه به مدیریت کوددهی در این اراضی، مقادیر

جدول ۱- ویژگی‌های نیم‌رخ خاک در مزرعه‌ی آزمایشی

بافت خاک	شن (%)	سیلت (%)	رس (%)	ظرفیت مزرعه (%)	نقطه پژمرگی (%)	چگالی ظاهری (g cm ⁻³)	محدوده عمقی (cm)
لومرسی-شنی	۴۹	۲۲	۲۷	۳۰	۱۵	۴۰/۱	۲۰-۰
لومرسی	۴۰	۲۵	۳۵	۳۲	۱۴	۳۸/۱	۴۰-۲۰
لومرسی	۳۰	۳۶	۳۴	۳۲	۱۴	۳۵/۱	۶۰-۴۰
لومرسی	۳۷	۳۰	۳۳	۳۲	۱۴	۳۷/۱	۸۰-۶۰
لومرسی	۳۶	۲۸	۳۴	۳۲	۱۴	۳۷/۱	۱۰۰-۸۰

شبیه‌سازی، شرایط "بدون جریان" تعریف شد. در انتقال املاح، در مزره بالادست که درگیر ورود نمک به خاک است، و در مزره پایینی که زهکشی آزاد نمک از آن صورت می‌گیرد، شرایط مرزی نوع سوم تعریف شد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

از آنجایی که شبیه‌سازی دینامیک آب و نیتروژن در خاک با استفاده از مدل HYDRUS-2D به ترتیب، بر اساس معادله‌ی ریچاردز و معادله‌ی انتقال - انتشار (در پژوهش حاضر) صورت می‌گیرد، بنابراین تخمین دقیق ویژگی‌های هیدرولیکی و شیمیایی خاک، اساس افزایش دقت مدل در شبیه‌سازی خواهد بود. همان‌گونه که بسیاری از محققان پیشین ادعان نموده‌اند، چنان‌چه در مزرعه‌ای، ویژگی‌های هیدرولیکی و شیمیایی خاک، که اغلب مستقل از زمان کشت (دیم یا آبی) است، درست تخمین زده شود، می‌توان از مدل برای شبیه‌سازی انتقال آب و املاح تحت سایر سناریوهای تدوین شده در همان مزرعه نیز استفاده نمود (Simunek et al., 2008; Simunek et al., 2016; Karandish and Simunek., 2016ab). به همین دلیل، در این پژوهش نیز ابتدا مدل بر اساس داده‌های مزرعه‌ای جمع‌آوری شده طی دو فصل کشت در کشت ذرت آبی و واسنجی و صحت‌سنجی شد و پس از اطمینان از حصول دقت قابل-قبول برای مدل در تخمین صحیح مولفه‌های انتقال آب و املاح در مزرعه‌ی مورد نظر، از آن برای سناریوهای تدوین شده در طول فصل کشت ذرت دیم در همان مزرعه استفاده شد.

واسنجی و صحت‌سنجی ویژگی‌های هیدرولیکی و شیمیایی خاک در حرکت آب و املاح در مزرعه‌ی منتخب با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده طی دو فصل زراعی در کشت ذرت آبی در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ صورت گرفت. شکل ۱، شماتیک مزرعه‌ی تحت کشت آبی ذرت و آرایش سنسورهای رطوبت‌سنج در محدوده‌ی ریشه‌ی گیاه را نشان می‌دهد. جزئیات اجرای این پژوهش در تحقیقات کاراندیش و سیمونک (Karandish and Simunek., 2016ab, 2017) ارائه شده است. بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده

که در آن، θ رطوبت حجمی (L^3L^{-3})، k هدایت هیدرولیکی غیراشباع (LT^{-1})، h فشار رطوبت خاک (L)، x فاصله‌ی افقی (L)، z فاصله‌ی عمودی (L)، t زمان (T) و $WU(h, x, z)$ جذب آب به‌وسیله‌ی ریشه (LT^{-1}) را نشان می‌دهد. WU با رابطه‌ی ۲ محاسبه می‌شود.

$$U(h, x, z) = \gamma(h)RDF(x, z)WT_{pot} \quad (2)$$

که در آن، $\gamma(h)$ تابع بدون بعد تنش رطوبتی در خاک (Feddes et al., 1978)، RDF توزیع جذب آب نرمال شده (L^{-2})، T_{pot} حداکثر شدت تعرق (LT^{-1}) و W عرض سطحی از خاک (L) که تعرق از آن صورت می‌گیرد. در این پژوهش، از تابع ورگت و همکاران (Vrugt., 2001) برای توصیف توزیع ریشه در خاک استفاده شد. میزان نحوه‌ی تخمین T_{pot} در پژوهش کاراندیش و سیمونک ارائه شد (Karandish and Simunek., 2016).

برای شبیه‌سازی حرکت املاح در خاک، از معادله‌ی انتقال - انتشار (CDE) استفاده شد. شکل کلی این معادله در فضای دوبعدی به صورت رابطه ۳ در مدل گنجانده شده است.

$$\frac{\partial \theta c}{\partial t} = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + \theta D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} + \theta D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \right\} - \left(\frac{\partial q_x c}{\partial x} + \frac{\partial q_z c}{\partial z} \right) - S_c \quad (3)$$

که در این معادله، c غلظت نمک (ML^{-3})، q_x و q_z به ترتیب شدت جریان حجمی آب در راستاهای افقی و عمودی (LT^{-1})، D_{xx} و D_{zz} ضرایب پخشیدگی در راستاهای مختلف (L^2T^{-1}) و S_c ترم تخلیه نمک از خاک ($ML^{-3}T^{-1}$) می‌باشد. میزان S_c با استفاده از معادله‌ی ۴ تخمین زده می‌شود.

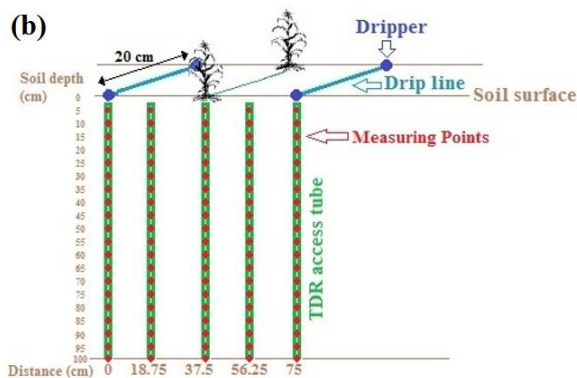
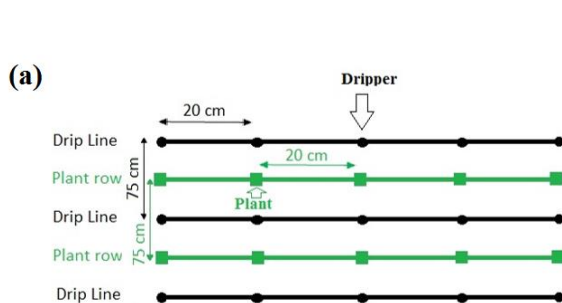
$$S_c = C_s \cdot WU(x, z, h) \quad (4)$$

که در آن، C_s غلظت نمک جذب شده به‌وسیله‌ی ریشه‌ی گیاه (ML^{-3}) است که خود تابعی از غلظت نمک مورد نظر در خاک و حداکثر غلظت قابل جذب به‌وسیله‌ی ریشه می‌باشد. ($C_{s,max}$)

شرایط اولیه در محدوده‌ی مدل‌سازی به صورت میزان رطوبت و غلظت نیتروژن نیتروژن نیتراتی در لایه‌های مختلف خاک تعریف شد. در شبیه‌سازی جریان آب، مزره بالادست در محل قطره‌چکان‌ها به صورت جریان متغیر و در سایر نقاط به صورت شرایط مرزی اتمسفری تعریف شد. در مزره پایین دست، زهکشی آزاد و در سایر مزره‌ها در محدوده‌ی

شد. این ویژگی‌ها بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده در فصل کشت دوم صحت‌سنجی شد.

در فصل کشت اول، ویژگی‌های هیدرولیکی بر اساس داده‌های مشاهده‌ای رطوبت خاک، و ویژگی‌های شیمیایی در انتقال اصلاح بر اساس داده‌های مشاهده‌ای غلظت نیتروژن نیتراتی در خاک واسنجی



شکل ۱- نحوه‌ی آرایش گیاه و لوله‌های آبد در کشت آبی (الف) و آرایش سنسورهای رطوبتی در محدوده‌ی ریشه‌ی گیاه (ب)

دلیل سناریوهای مدیریتی برای این گیاه تعریف شد. بدین منظور، ۹ سطح کودی شامل بدون کود (تنها در نظر گرفتن ۱۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن اولیه در خاک)، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰ و ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد که طبق روش رایج در منطقه، در دو مرحله به زمین داده شد. لازم به ذکر است که این سطوح، مقادیر خالص نیتروژن در کود هستند. سپس، میزان آبشویی نیترات، نیتروژن جذب شده و نیتروژن باقی‌مانده در لایه‌های عمقی ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۸۰ سانتی‌متر با استفاده از مدل شبیه‌سازی شد. در نهایت، ضمن تحلیل این پارامترها، از معیارهای کارایی مصرف کود نیتروژن (نسبت نیتروژن جذب شده توسط گیاه به میزان نیتروژن اولیه و نیتروژن ورودی از طریق کود) و نسبت عملکرد محصول به سطح کود نیتروژن، بهترین سطح کوددهی در کشت ذرت دیم تعیین شد.

ارزیابی دقت مدل

مقادیر به دست آمده از مدل HYDRUS-2D، بر اساس سه معیار ضریب کارایی مدل (EF^1)، جذر میانگین مجموع مربعات خطا ($RMSE^2$) و میانگین خطای انحراف (MBE^3) با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه شد (Ghorbani et al., 2009; Nash and Sutcliffe, 1970; Dashtaki et al., 2009). مقادیر کم‌تر MBE و $RMSE$ و مقادیر نزدیک‌تر به یک برای EF نشانه‌ی برتری مدل خواهد بود (روابط ۵ تا ۷) (Parchami et al., 2013; Ghorbani Dashtaki et al., 2009;)

1- Efficiency (EF)

2- Root Mean Square Error (TMSE)

3- Mean Bias Error

در ابتدای فصل کشت و در طول فصل رشد گیاه و به صورت روزانه، مقادیر رطوبت خاک در یک فضای دوبرگه در محدوده‌ی ریشه‌ی گیاه (شکل ۱-ب) با استفاده از سنسورهای رطوبت‌سنج TRIME-FM اندازه‌گیری شد. علاوه بر آن در هر یک از دو فصل کشت، در ۱۰ نوبت، میزان رطوبت خاک در جبهه‌ی پیشروی رطوبت در زمان‌های قبل از آبیاری، ۲، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲ و ۹۶ ساعت بعد از آبیاری اندازه‌گیری شد. علاوه بر تعیین میزان غلظت نیتروژن نیتراتی در ۲۵ نقطه (در پنج فاصله‌ی افقی شامل پای بوته و فواصل ۱۸/۷۵ و ۳۷/۵ سانتی‌متر از دو طرف آن و در پنج محدوده‌ی عمقی شامل ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متری)، غلظت آن در دیگر نمونه‌های خاک، که به صورت هفتگی در طول فصل رشد گیاه از نقاط مذکور جمع‌آوری می‌شدند، تعیین شد. در تاریخ‌های یکسان، میزان نیتروژن جذب شده به وسیله‌ی اندام گیاهی، به تفکیک اجزای آن، نیز تعیین شد.

سناریوهای مدیریتی و تحلیل آن‌ها

پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل HYDRUS-2D، از آن برای تحلیل سناریوهای منتخب با هدف تعیین بهترین سطح کود در کشت دیم ذرت در منطقه استفاده شد. کاراندیش و هوکسترا (۲۰۱۷) در پژوهش خود به تناسب کشت ذرت دیم در اقلیم مرطوب ایران تاکید داشتند (Karandish and Hoekstra, 2017). نتایج ایشان نشان داد که از میان گیاهان خانواده‌ی گروه غلات شامل گندم، جو، ذرت و برنج، گیاه ذرت دارای ردپای آب کم‌تری به ازای هر واحد محصول تولیدی بوده و توسعه‌ی کشت آن، به ویژه در شرایط دیم، می‌تواند تا حد زیادی از میزان فشار بر منابع آبی بکاهد. به همین

(Nash and Sutcliffe, 1970)

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (5)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - P_i}{n} \quad (6)$$

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

که در آن ها، O_i و P_i به ترتیب مقادیر اندازه‌گیری شده و برآورد شده میزان نفوذ (یا سرعت نفوذ) در زمان t_i میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده میزان نفوذ (یا سرعت نفوذ) در زمان t_i و n تعداد داده‌ها می‌باشد. مقادیر کم‌تر معیارهای MBE و $RMSE$ و همچنین مقادیر نزدیک‌تر به یک برای پارامتر EF نشان‌دهنده برتری مدل خواهد بود.

نتایج و بحث

دقت مدل HYDRUS در شبیه‌سازی اجزای بیلان آب و خاک

جدول ۲ حد معیارهای ارزیابی در مقایسه‌ی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی اجزای بیلان آب و نیتروژن با استفاده از مدل HYDRUS-2D در حین فرآیندهای واسنجی و صحت‌سنجی را نشان می‌دهد. به لحاظ عمق معادل آب، دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک در محدوده‌های عمقی مختلف بین ۰/۲۸ تا ۱/۱۸ میلی‌متر بوده و میزان خطای انحراف در بازه‌ی ۰/۴۸ تا ۱/۲ تغییر می‌کند. دقت ۱۰-۵ میلی‌متر در شبیه‌سازی رطوبت خاک در پژوهش‌های کندلوس و سیمونک و وانگ و همکاران نیز گزارش شده است (Kandelous and Simunek, 2010; Wang et al., 2014). علی‌رغم دقت قابل‌قبول مدل در شبیه‌سازی رطوبت خاک، این اختلاف اندک در کم برآورد نمودن رطوبت خاک می‌تواند نشأت گرفته از این واقعیت باشد که داده‌های مشاهده‌ای رطوبت، به‌وسیله‌ی سنسورهای رطوبت‌سنج در یک حجم معینی از خاک گزارش می‌شوند، این در حالی است که مقادیر شبیه‌سازی شده منسوب به یک المان^۱ معین در محدوده‌ی محاسباتی بود (Mguidiche et al., 2015).

تغییر مقادیر جذر میانگین مربعات خطا در بازه‌ی ۰/۳۸-۷/۹۵ میلی‌گرم بر لیتر و مقادیر ضریب انحراف در محدوده‌ی ۲/۵۷- تا ۴/۹۱ میلی‌گرم بر لیتر در جدول ۲ حاکی از توانایی مدل در تخمین میزان غلظت نیتروژن نیتراتی در محدوده‌ی ریشه‌ی گیاه حین فرآیندهای مختلف شبیه‌سازی می‌باشد. بیش‌ترین اختلاف در محدوده‌های عمقی سطحی، که به دلیل فرآیندهایی همچون بارندگی، آبیاری و کوددهی، دست‌خوش تغییرات بیش‌تری در میزان

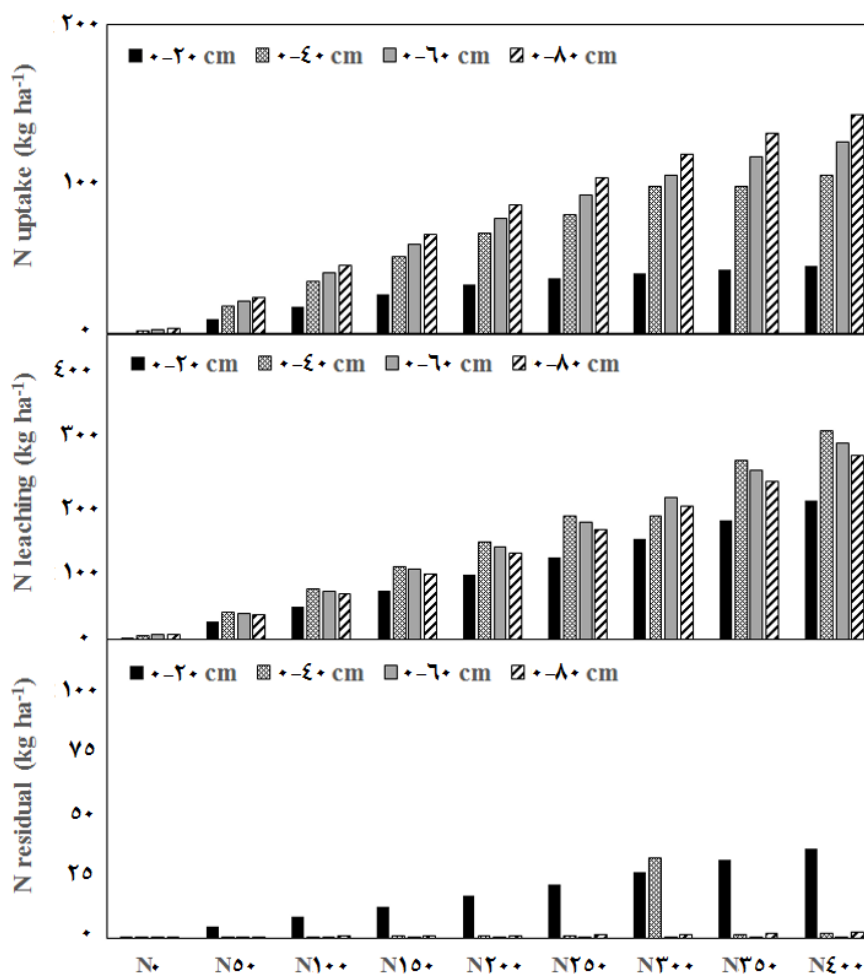
غلظت نیتروژن نیتراتی در طول فصل رشد گیاه می‌شوند مشاهده شد. این در حالی است که همانند رطوبت، بیش‌ترین دقت در تخمین غلظت نیتروژن نیتراتی در لایه‌ی عمقی ۸۰-۶۰ سانتی‌متری مشاهده شد که دلیل آن، تغییرات کم‌تر غلظت نیتروژن نیتراتی در این لایه در طول فصل رشد گیاه بود. یافته‌های آلو و همکاران (۲۰۰۶) و هاتن و همکاران (۲۰۰۷) نیز مقادیر بالاتر خطا در شبیه‌سازی غلظت نیتروژن نیتراتی در لایه‌های سطحی خاک را نشان می‌دهد (Alva et al., 2006, Hotton et al., 2007). با این وجود، مقایسه‌ی معیارهای ارزیابی در پژوهش حاضر با مقادیر گزارش شده در پژوهش‌های مشابه پیشین، قابلیت مدل در درک فرآیند انتقال املاح در منطقه‌ی مطالعاتی را به اثبات می‌رساند (Tournebize et al., 2012; Ramos et al., 2012; Ajdari et al., 2007). تخمین میزان جذب نیتروژن با دقتی فراتر از ۱۰ کیلوگرم در هکتار نیز این یافته را تصدیق می‌کند. در مجموع، تحلیل یافته‌های گزارش شده در این بخش نشان می‌دهد که نتایج حاصل از مدل می‌تواند با دقت مقبولی در تحلیل سناریوهای مدیریتی با هدف یافتن بهترین سطح آب و کود در مزرعه‌ی منتخب مورد استفاده قرار بگیرد که این نتیجه با یافته‌های محققان پیشین انطباق دارد (Cote et al., 2003; Gärdenäs et al., 2005; Hanson et al., 2006; Ajdari et al., 2007; Simunek and Hopmans, 2009; Phogat et al., 2013; Li and Liu, 2011; Ramos et al., 2012).

دینامیک نیتروژن در خاک تحت مدیریت سطح کود

شکل ۲ میزان جذب نیتروژن در سطوح مختلف کوددهی از محدوده‌های عمقی مختلف خاک را نشان می‌دهد. اگرچه افزایش سطح کوددهی همواره میزان جذب نیتروژن به وسیله‌ی گیاه را افزایش می‌دهد، لکن این افزایش از شیب یکسانی تبعیت نمی‌کند. در حد فاصل شدت‌های ۵۰ تا ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار، میزان جذب نیتروژن به وسیله‌ی گیاه به ازای هر ۵۰ کیلوگرم افزایش در میزان نیتروژن اعمال شده، به طور متوسط ۲۰ کیلوگرم در هکتار افزایش می‌یابد. ارتقای سطح کوددهی از ۲۰۰ به ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، میزان جذب نیتروژن را ۱۵ کیلوگرم در هکتار افزایش داده و از آن پس، افزایش شدت کوددهی تنها موجب ۱۰ تا ۱۵ درصد افزایش در میزان جذب نیتروژن در مقایسه با سطوح قبلی کوددهی خواهد شد. بنابراین می‌توان دریافت که اعمال کود با شدت‌های بالاتر از ۲۵۰-۲۰۰ کیلوگرم در هکتار می‌تواند عواقب زیست‌محیطی منفی را در کشت ذرت دیم به همراه داشته باشد، زیرا در چنین شرایطی، نیتروژن باقی‌مانده در خاک افزایش یافته و می‌تواند به واسطه‌ی بارندگی به آبخوان‌های محلی منتقل شده و از کیفیت آن‌ها بکاهد.

جدول ۲- حد معیارهای ارزیابی در مقایسه‌ی مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی اجزای بیلان آب و نیتروژن در خاک

فصل زراعی ۱۳۸۹		فصل زراعی ۱۳۹۰		عمق خاک (cm)	پارامتر
RMSE	MBE	RMSE	MBE		
۸/۰	۱/۱	۱۸/۱	-۰/۸۹	۲۰-۰	SW (mm)
۸۵/۰	۲/۱	۳۸/۰	۱۲	۴۰-۲۰	
۷۸/۰	۸۵/۰	۴۸/۰	۰/۸	۶۰-۴۰	
۲۸/۰	۴۸/۰	۴۱/۰	-۰/۷۵	۸۰-۶۰	
۱۷/۶	۳۱/۲	۸۲/۴	۹/۱	۲۰-۰	NO ₃ ⁻ -N (mg l ⁻¹)
۹۵/۷	۹۱/۴	۶۶/۵	۲۶/۰	۴۰-۲۰	
۷۹/۳	۲۳/۰-	۶۱/۶	۵۷/۲	۶۰-۴۰	
۳۸/۰	۰/۵	۵۱/۲	۲۵/۲	۸۰-۶۰	
۹۶/۸	۳۲/۵-	۹۶/۳	۸۶/۱	-	N uptake (kg ha ⁻¹)



شکل ۲- میزان جذب (الف)، آبشویی (ب) و باقی‌مانده‌ی نیتروژن (ج) در محدوده‌های عمقی مختلف خاک تحت سطوح مختلف کود نیتروژن در کشت دیم ذرت

(شکل ۲). مطابق با یافته‌های دیگر محققان افزایش شدت کوددهی، میزان گذر نیتروژن از لایه‌های سطحی خاک را بیش‌تر از لایه‌های

همگام با کاهش جذب نیتروژن به وسیله‌ی گیاه، میزان آبشویی نیتروژن از محدوده‌های عمقی مختلف خاک نیز افزایش می‌یابد

جدول ۳ نشان می‌دهد که افزایش سطح کوددهی تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار میزان کارایی کود را تا ۱۵ درصد افزایش می‌دهد؛ لکن بهره‌وری کود نیتروژن در حد فاصل شدت‌های ۱۵۰ تا ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار تغییر چندانی نمی‌کند. این نتیجه موید آن است که در این حد فاصل، اگرچه آبشویی در حدی نخواهد بود که از موجودیت نیتروژن در لایه‌های سطحی بکاهد، لکن کود اضافی در محدوده‌ی ریشه میزان جذب را در حد قابل توجهی متاثر نمی‌سازد. با این وجود، استعمال کود نیتروژن در شدت‌های بیش‌تر از ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار، به دلیل افزایش کسر باقی‌مانده‌ی نیتروژن در خاک، تا ۱۶ درصد از میزان بهره‌وری کود در مقایسه با شدت‌های پایین‌تر می‌کاهد. دیگر محققان نیز در یافته‌های خود، به کاهش کارایی مصرف نیتروژن به وسیله‌ی گیاه در صورت اعمال کود در سطوح بالاتر از حد مورد نیاز تاکید نموده‌اند (Jia et al., 2014; Daudén, and Quilez, 2004; Gasser et al., 2002; Mosier et al., 2002). نگاهی به جدول ۳ همچنین نشان می‌دهد که میزان محصول تولیدی به ازای واحد کود مصرفی نیز در شدت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار بالاترین حد خود را دارد. بنابراین می‌توان دریافت که اعمال کود نیتروژن در کشت دیم ذرت در منطقه‌ی مطالعه‌ی ما با شدت ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار می‌تواند شرایط لازم برای نیل توانمان به منافع اقتصادی و زیست‌محیطی را فراهم نماید.

کاراندیش و سیمونک (۲۰۱۷)، سطح کودی ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار را به عنوان بهترین سطح کودی در کشت ذرت آبی در منطقه‌ی مطالعه‌ی ما معرفی نموده‌اند (Karandish and Simunek, 2017). علت این امر، کنترل عمق آب آبیاری در کشت ذرت آبی بر اساس نیاز واقعی گیاه بود، این در حالی است که بارندگی‌های غیرقابل پیش‌بینی در طول فصل کشت ذرت دیم، می‌تواند خطر آبشویی را افزایش دهد. به همین دلیل، استعمال ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار کود نیتروژن در کشت دیم ذرت، می‌تواند ضمن کاهش ۶ درصد در میزان کارایی مصرف کود، و کاهش ۱۸ درصدی در میزان محصول تولیدی به ازای واحد کود مصرفی در مقایسه با مقدار این شاخص‌ها در سطح کودی ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، منتج به افزایش مخاطرات زیست‌محیطی از یک سو، و تهدید منافع اقتصادی زارعان محلی از سوی دیگر شود. این مساله، اهمیت اصلاح سطح کود در فصول کشت دیم به منظور حفظ آبخوان‌های طبیعی از ورود آلاینده‌های نیتروژن را به اثبات می‌رساند. این در حالی است که نگاهی به آمارهای جمع‌آوری شده در منطقه‌ی مطالعه‌ی ما نشان می‌دهد که اغلب زارعان محلی دانش کافی در زمینه‌ی مدیریت کوددهی مطابق با نیاز گیاه نداشته، و بدون توجه به تفاوت کشت دیم و آبی، سطح کودی یکسانی را در کشت‌های دیم و آبی برای گیاه در نظر می‌گیرند (IMAJ., 2016). به همین دلیل، اغلب منابع آب زیرزمینی در نواحی شمالی کشور از مشکل آلودگی در نتیجه‌ی استعمال سطوح

زیرین متاثر می‌سازد (Jia et al., 2014; Daudén and Quilez., 2002; Mosier et al., 2002; Gasser et al., 2002). از مهم‌ترین پیامدهای منفی استعمال بی‌رویه‌ی کودهای نیتروژن، خروج عناصر غذایی از لایه‌های سطحی به واسطه‌ی بارندگی و یا آبیاری و تجمع آن‌ها در لایه‌های زیرین می‌باشد. افزایش میزان آبشویی نیتروژن از لایه‌های سطحی خاک اهمیت بسیاری در کاهش میزان کارایی جذب نیتروژن به وسیله‌ی گیاه دارد، زیرا بیش‌ترین جذب آب و املاح از لایه‌های سطحی اتفاق افتاده و حفظ عناصر غذایی در این محدوده، جذب پیوسته‌ی املاح از خاک در زمان‌های مورد نیاز در طول فصل رشد گیاه را تضمین می‌کند (Phoghat et al., 2013; Krandish and Simunek., 2017). از سوی دیگر، حفظ نیتروژن در لایه‌های سطحی، حتی اگر در طول فصل رشد گیاه زمستانه نیز جذب نشود، کشت‌های بهاره را از کوددهی اولیه بی‌نیاز ساخته و شرایط مطلوب برای رشد گیاه در روزهای آغازین را فراهم می‌کند. این در حالی است که تجمع نیتروژن در لایه‌ی زیرین حین آبشویی در فصل رشد گیاه، علاوه بر ایجاد عواقب منفی ناشی از کاهش موجودیت نیتروژن در خاک، خطر آلودگی آبخوان‌ها در خارج از فصل کشت را نیز افزایش می‌دهد. به این ترتیب، تعیین سطح بهینه‌ی کوددهی، علاوه بر حفظ منافع اقتصادی زارع، همواره به عنوان یک استراتژی مناسب برای نیل به پایداری آگروهیدرولوژیکی در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال، کورتزمن و همکاران دریافتند که ۲۵ درصد کاهش در میزان کود مصرفی در سطح حوضه می‌تواند تا ۵۰ درصد از میزان آلاینده‌های ورودی به آبخوان‌های تحت پوشش بکاهد (Kurtzman et al., 2013).

بهره‌وری کود و نسبت عملکرد به کود مصرفی

از دیدگاه زارع، میزان عملکرد محتمل محصول، مهم‌ترین عامل در پذیرش یک استراتژی جدید محسوب می‌شود؛ زیرا منافع اقتصادی زارعان محلی کاملاً وابسته به درآمد حاصل از کشت بوده و هرگونه خطر احتمالی در کاهش محصول می‌تواند درگیری‌های اجتماعی بسیاری را حین توسعه‌ی یک روش پیشنهادی به همراه داشته باشد (Parades et al., 2014; Karandish., 2016). به همین منظور در این پژوهش، بر اساس رابطه‌ی خطی توسعه داده شده در مزرعه‌ی منتخب توسط کاراندیش و سیمونک (Karandish and Simunek, 2017) برای تخمین میزان محصول بر اساس میزان نیتروژن جذب شده، ابتدا میزان محصول تحت هر یک از سطوح کوددهی منتخب برآورد شد. سپس میزان بهره‌وری کود به صورت نسبت نیتروژن جذب شده به شدت کوددهی برای هر سناریو محاسبه شد. در ادامه، با مقایسه‌ی این دو معیار با یکدیگر، بهترین سطح کوددهی با هدف حفظ توانمان منافع اقتصادی و زیست‌محیطی تعیین شد.

بالای کودهای معدنی رنج می‌برند. گزارش مقادیر نیترات فراتر از حد استاندارد در منابع آب زیرزمینی در محدوده‌ی پژوهش نیز گواه این مدعا است (Karandish et al., 2016).

جدول ۳- تاثیر مدیریت کوددهی بر کارایی مصرف کود و نسبت عملکرد به سطح کود مصرفی

سطح کوددهی (کیلوگرم بر هکتار)										پارامتر
۴۰۰	۳۵۰	۳۰۰	۲۵۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۵۰	۰		
۳۴/۲	۲۵/۷	۳۷/۰	۳۷/۳	۳۹/۵	۳۹/۸	۳۹/۶	۳۹/۲	۳۴/۹	FUE (%)	
۱۳/۲	۱۴/۰	۱۴/۹	۱۶/۰	۱۷/۳	۲۱/۹	۲۱/۸	۲۰/۷	-	Y/N (ds)	

*FUE کارایی مصرف کود، Y/N نسبت میزان محصول تولیدی به ازای واحد کود مصرفی، ds بی‌بعد

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده‌ی HYDRUS-2D بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده طی دو فصل زراعی در کشت ذرت، سطح مطلوب کود نیتروژن در کشت ذرت دیم در شهرستان ساری، واقع در اقلیم مرطوب کشور تعیین شد. نتایج پژوهش حاضر، ارتباط معنی‌دار و غیرخطی بین میزان جذب نیتروژن، میزان آبشویی از محدوده‌ی ریشه و میزان نیتروژن باقی‌مانده خاک در انتهای فصل کشت را نشان داد. بر اساس یافته‌های تحقیق حاضر، افزایش سطح کودی تا ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار، از هر دو دیدگاه اقتصادی و زیست‌محیطی، افزایش منافع را به همراه داشته و پس از آن، بدون ایجاد تغییرات قابل توجه در میزان محصول تولیدی و جذب ماده‌ی غذایی، تنها زمینه‌ی آلاینده‌ی بیش‌تر منابع آب زیرزمینی را فراهم می‌کند. همچنین، نتایج این پژوهش، تفاوت معنی‌دار بین سطح کود مطلوب در کشت دیم و آبی ذرت در منطقه‌ی مطالعاتی و لزوم اصلاح کوددهی متناسب با نوع کشت را به اثبات رساند. بر خلاف ذرت آبی، نیاز کودی در کشت ذرت دیم در منطقه، ۴۰ درصد کم‌تر بوده و بی‌توجهی به آن می‌تواند مخاطرات زیست‌محیطی قابل توجهی را به همراه داشته باشد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، دستیابی به کشاورزی پایدار در یک منطقه، نه تنها نیازمند اصلاح سطح کودی متناسب با نوع گیاه خواهد بود، بلکه نوع کشت نیز می‌تواند میزان کود مورد نیاز گیاه را متاثر سازد و این مساله، باید برای تمام گیاهان زراعی و باغی کشور، در اولویت برنامه‌های اصلاحی برای نیل به پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی قرار بگیرد.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله، از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه زابل جهت انجام این پژوهش قدردانی می‌گردد. هزینه‌های پژوهش حاضر، از محل گرنت شماره‌ی UOZ_GR_9517_6 پرداخت شد.

منابع

- Ajdary, K., Singh, D.K., Singh, A.K., Khanna, M. 2007. Modeling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation. *Agricultural water management*. 89.1: 15-28.
- Alva, A.K., Paramasivam, S., Obreza, T.A., Schumann, A.W. 2006. Nitrogen best management practice for citrus trees I. Fruit yield quality, and leaf nutritional status. *Scientia horticulturae*. 107.3: 233-244.
- Barton, L., Colmer, T.D. 2006. Irrigation and fertilizer strategies for minimizing nitrogen leaching from turfgrass. *Agricultural Water Management*. 80.1: 160-175.
- Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J., Thorburn, P.J. 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*. 22.3-4: 143-156.
- Daudén, A., Quilez, D. 2004. Pig slurry versus mineral fertilization on corn yield and nitrate leaching in a Mediterranean irrigated environment. *European Journal of Agronomy*. 21: 7-19.
- Davies, D.B. 2000. The nitrate issue in England and Wales. *Soil Use Management*. 16: 142 - 144
- Darzi-Naftchali, A., Karandish, F., Asgari, A. 2017. Diagnosing drainage problems in coastal area using machine-learning and geostatistical models. *Irrigation and Drainage*. 66.3: 428-438.
- Feddes, R.A., Kowalik, P.J., Zaradny, H. 1978. Simulation of field water use and crop yield. In: *Simulation Monographs*. Pudoc, Wageningen.
- Gärdenäs, A.I., Hopman, J.W., Hanson, B.R., Simunek, J. 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural water management*. 74.3: 219-242.
- Gasser, M.O., Laverdiere, M.R., Lagace Caron, R.J. 2002. Impact of potato-cereal rotation and slurry applications on nitrate leaching and nitrogen balance in sandy soils. *Canadian journal of soil science* 82:

- Hydrology. 543: 892-909.
- Karandish,F., Shahnazari,A. 2016. Soil temperature and maize nitrogen uptake improvement under partial root zone drying irrigation. *Pedosphere*. 26.6: 872-886
- Karandish,F., Simůnek,J. 2016b. A field-modeling study for assessing temporal variations of soil-water-crop interactions under water-saving irrigation strategies. *Agricultural Water Management*. 178: 291-303.
- Karandish,F., Simůnek,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.
- Karandish,F., Darzi-Naftchali,A., Asgari,A. 2017. Application of machine-learning models for diagnosing health hazard of nitrate toxicity in shallow aquifers. *Paddy and Water Environment*. 15: 201-215.
- Kurtzman,D., Shapira,R.H., Bar-Tal,A., Fine,P., Russo,D. 2013. Nitrate fluxes to groundwater under citrus orchards in a Mediterranean climate: observation, calibrated models, simulations and agro-hydrological conclusions. *Journal Contaminant Hydrology*. 151: 93-104.
- Li,J., Liu,Y. 2011. Water and nitrate distributions as affected by layered-textural soil and buried dripline depth under subsurface drip fertigation. *Irrigation science*. 29.6: 469-478.
- Mguidiche,A., Provenzano,G., Douh,B., Khila,S., Rallo,G., Boujelben,A. 2015. Assessing HYDRUS-2D to simulate soil water content (SWC) and salt accumulation under an SDI system: application to a potato crop in a semi-arid area of central Tunisia. *Irrigation and Drainage*. 64.2: 263-274.
- Mosier,A.R., Bleken,M.A., Chaiwanakupt,P., Ellis,E.C., Freney,J.R., Howarth,R.B., Matson,P.A., Minami,K.,
- Nash,J.E and Sutcliffe,J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10: 2082-2090.
- Naylor,R., Weeks,K.N., Zhu,Z.L. 2002. Policy implications of human-accelerated nitrogen cycling. In *The nitrogen cycle at regional to global scales* (pp: 477-516). Springer Netherlands.
- Parchami,F., Mirlatifi,S.M., GhorbaniDashtaki,S.h and Mahdian,M.H. 2010. Estimating cumulative soil water infiltration using pedo-transfer functions in calcareous soils. *Journal of Water and Soil Conservation*. 17.3: 25-44.
- Paredes,P., Rodrigues,GC., Alves,I, Pereira,LS. 2014. Partitioning evapotranspiration, yield prediction and
- 469-479.
- Gheysari,M., Mirlatifi,S.M., Homae,M., Asadi,M.E., Hoogenboom,G. 2009. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. *Agricultural water management*. 96.6: 946- 954.
- Ghorbani-Dashtaki,Sh., Homaei,M and Mahdian,MH. 2009. Estimating the infiltration parameters using neural network. *Journal of Water and Soil*. 23.1: 185-198. Green,W.H
- Groffman,M.P. 2000. Nitrate in the environment. In: Sumner, M. (Ed.), *Handbook of Soil Science*. CRC Press, pp. C 190 n C 200.
- Hallberg, G.R.1989. Nitrate in groundwater in the United States. In: Follee, R.F. (Ed.), *Nitrogen Management and Groundwater Protection*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp.35n138.
- Hanson,B.R., Simunek,J., Hopmans,J.W. 2006. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numericalmodeling. *Agricultural water management*. 86.1: 102-113.
- Haverkort,A.J., Vos,J., Booij,R. 2003. Precision management of nitrogen and water in potato production through monitoring and modelling. In *XXVI International Horticultural Congress: Potatoes, Healthy Food for Humanity: International Developments in Breeding*. 619:213-224.
- Hutton,R., Holzapfel,B., Smith,J., Hutchinson,P., Barlow,K., Bond,W. 2008. Influence of irrigation and fertilizer management on the movement of water and nutrients within and below rootzone of vines for sustainable grape production. *CRC for Viticulture-Final Report S2.3.6*
- IMAJ. 2016. Iran's Ministry of Agriculture-Jahad. <http://www.maj.ir/>.
- Jia,X., Shao,L., Liu,P., Zhao,B., Gu,L., Dong,S.H., Bing,S.H., Zhang,J., Zhao,B. 2014. Effect of different nitrogen and irrigation treatments on yield and nitrate leaching of summer maize (*Zea mays* L.) under lysimeter conditions. *Agricultural Water Management*. 137: 92-103.
- Kandelous,M.M., Simůnek,J. 2010. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*. 97.7: 1070-1076.
- Karandish,F., Hoekstra,A.Y. 2017. Informing national food and water security policy through water footprint assessment: the case of Iran. *Water* 9 .11: 831-856.
- Karandish,F., Simůnek,J. 2016a. A comparison of numerical and machine-learning modeling of soil water content with limited input data. *Journal of*

- Tournebize, J., Gregoire, C., Coupe, R.H., Ackerer, P. 2012. Modelling nitrate transport under row intercropping system: vines and grass cover. *Journal of hydrology*. 440: 14-25.
- Vrugt, J.A., Hopmans, J.W., Simunek, J. 2001. Calibration of a two-dimensional root water uptake model. *Soil Science Society of America Journal*. 65.4:1027-1037
- Wang, Z., Li, J., 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.
- Wei, Y.P., Chen, D.L., Hu, K.L., Willett, I.R., Langford, J. 2009. Policy incentives for reducing nitrate leaching from intensive agriculture in desert oases of Alxa, Inner Mongolia, China. *Agricultural water management*, 96.7: 1114-1119.
- Wienhold, B.J., Trooien, T.P., Reichman, G.A. 1995. Yield and nitrogen use efficiency of irrigated corn in the northern Great Plains. *Agronomy Journal*. 87.5: 842-846.
- economic returns of maize under various irrigation management strategies. *Agriculture Water Management*. 135:27-39.
- Phogat, V., Skewes, M.A., Cox, G., Alam, J., Grigson, G., Simunek, J. 2013. Evaluation of water movement and nitrate dynamics in a lysimeter planted with an orange tree. *Agricultural water management*. 127: 74-84.
- Pratt, P.F. 1985. *Agriculture and groundwater quality*. CAST report, p. 103.
- Ramos, T.B., Simunek, J., Goncalves, 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.
- Simunek, J., Van Genuchten, M.Th., Sejna, M. 2008. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes. *Vadose Zone Journal*. 7.2: 587-600.
- Simunek, J., Hopmans, J.W. 2009. Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecological modelling*, 220.4: 505-521.

Analyzing the Consequences of Fertilization Management in Increasing Water and Nitrogen Productivity under Rainfed Maize Cultivation: Scenarios Assessment by Using the HYDRUS Model

N. Ebrahimi¹, F. Karandish^{2*}, P. Kahkhamoghadam³

Received: Nov.20, 2017

Accepted: Dec.11, 2017

Abstract

Nitrogen (N) loss from the agricultural lands is one of the most important point-source of N which pollutes natural aquifers. While N is one of the driving nutrition in fulfilling crop growth cycle, unmanaged fertilization beyond crop demand leads to increased N leaching to groundwater resources and causes environmental unsustainability. This issue is more highlighted in rainfed cultivation due to unexpected rainfall events which might be beyond crop water requirement. Hence, we determined optimal N fertilizer rate under rainfed maize cultivation in Mazandaran province. In this regard, HYDRUS-2D was first calibrated and validated for soil hydraulic and chemical parameters based on data collected during a two-year maize field investigation. The model was then used for simulating the amount of nitrate leaching, N uptake and N residual in soil under 9 fertilization levels treatments including no fertilization (only 10 kg ha⁻¹ was considered as initial soil N nitrogen), 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 and 400 kg ha⁻¹. Finally, optimal fertilization rate for rainfed maize was determined based on N use efficiency and the ratio of crop yield to N fertilization rate. While according to RMSE (0.8-1.18 mm for water content, 0.38-7.95 mg l⁻¹ for nitrate concentration, and 3.96-8.96 kg ha⁻¹ for crop N uptake), HYDRUS-2D was capable enough for simulating soil water and solute dynamics, the lower variation in soil water content and solute concentration during the cropping cycle caused the model to be more accurate for simulating soil water and solute dynamics in these layers compared to the surface layer. Based on the simulated results, N uptake will increase by 20 kg ha⁻¹ on average in response to every 50 kg ha⁻¹ increase in N fertilization rate beyond 200 kg ha⁻¹. N leaching below different soil depths increased along with reduced crop N uptake, which led to nutrient removal from the surface soil layers and its aggregation in underlying soil layers at the end of the growing season. Fertilizer use efficiency had its highest value at fertilization rate of 150 kg ha⁻¹, while it remained unchanged at higher N rates. Nevertheless, increased N rate always lead to yield reduction per unit applied fertilizer.

Keywords: Fertilizer use efficiency, Nitrate leaching, N Uptake, Rainfed maize yield, The HYDRUS-2D model

1- MSc Student in Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, University of Zabol

2- Associate Professor Water Engineering Department, University of Zabol

3- Instructor, Water Engineering Department, University of Zabol

(*- Corresponding Author Karandish_h@yahoo.com)