

شبیه سازی حرکت رطوبت، نیترات و آمونیوم در خاک تحت کشت ذرت با استفاده از مدل LEACHN

محمد خرمیان^{1*}، سعید برومند نسب²، فریبرز عباسی³، سید رضا اشرفی زاده⁴

*1- نویسنده مسوول: استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات کشاورزی صفی آباد دزفول، خوزستان، ایران
(khorramy.mohamad@yahoo.com)

2- استاد دانشکده مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران، اهواز، خوزستان، ایران

3- دانشیار پژوهش موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج، البرز، ایران

4- استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی، مرکز تحقیقات کشاورزی صفی آباد دزفول، خوزستان، ایران

تاریخ دریافت: 1391/07/12 تاریخ پذیرش: 1392/08/05

چکیده

این پژوهش با هدف بررسی مدل LEACHN برای پیش بینی انتقال رطوبت، نیترات و آمونیوم در نیمرخ خاک برای دوره رشد گیاه ذرت در منطقه شمال استان خوزستان در 2 سال متوالی اجرا شد. آب در سه سطح (50، 75 و 100 درصد نیاز آبی گیاه) و کود نیتروژن در سه سطح (150 Kg ha^{-1} ، 225 و 300) و سه تقسیط مساوی قبل از کاشت، مرحله 6-8 برگی و قبل از گلدهی اعمال شد. نتایج واسنجی مدل نشان داد که مقادیر ضرایب نیترات زایی، نیترات زدایی و انتشار پذیری به ترتیب برابر با $0/17$ ، $0/004$ و 200 mm کمترین خطای متوسط (MBE) و بالاترین کارایی مدل (EF) در طول دوره رشد را ایجاد کرد، به طوری که محدوده تغییرات این شاخص ها برای نیترات به ترتیب بین $2/09$ - تا $3/89$ و $0/1$ - تا $0/88$ می باشد. با این حال، دقت مدل در پیش بینی انتقال آمونیوم کمتر از نیترات بود. مقادیر اندازه گیریو پیش بینی شده مدل نشان داد که انتقال نیترات به لایه های پایین تر از 60 cm در هیچ یک از تیمارها صورت نگرفت. شاخص های آماری MBE، EF و ضریب تغییرات (CV) مدل برای پیش بینی رطوبت خاک در عمق های مختلف به ترتیب بین $0/003$ تا $0/019$ ، $0/24$ تا $0/73$ و $5/8$ تا $17/9$ درصد تغییر نمود که بیانگر دقت بالای مدل در پیش بینی رطوبت خاک می باشد.

کلید واژه ها: نیتروژن معدنی، انتقال املاح، واسنجی، LEACHN

مقدمه

فعالیت های کشاورزی، نقش مهمی در حرکت و انتقال نیترات در نیمرخ خاک و در نتیجه آلودگی آبهای زیرزمینی به نیترات دارد؛ بنابراین، آگاهی از سرنوشت نیتروژن و انتقال آن برای مدیریت بهتر آبهای زیرزمینی ضروریه نظر می رسد. برای این منظور می توان از مدل های ریاضی به عنوان ابزار سودمندی برای ترکیب

فرایندهای درگیر در انتقال نیتروژن در خاک استفاده کرد و از این طریق سناریوهای مختلفی را که پیاده نمودن آنها در مزرعه مشکل و پرهزینه است، شبیه سازی نمود (کلمنت و همکاران¹، 1994). مدل یک بعدی LEACHN یکی از مدل هایی است که برای توصیف کمی روند حرکت نیترات در نیمرخ خاک در

برخی از مناطق ایران با حضور گیاه نیشکر (بهمنی و همکاران، 1388) و چغندر قند (جلینی و عباسی، 1387) مورد مطالعه قرار گرفته است، لازم است که مطالعات بیشتری در زمینه پیش بینی حرکت نیترات در خاک در دوره رشد ذرت دانه ای در شرایط اقلیمی شمال خوزستان صورت گیرد. لذا هدف اصلی این مقاله استفاده از مدل LEACHN برای پیش بینی انتقال رطوبت، نیترات و آمونیوم در لایه های خاک در شرایط کشت ذرت در شمال استان خوزستان است.

مواد و روش ها

این تحقیق در سالهای 1388 و 1389 در مرکز تحقیقات کشاورزی صفی آباد واقع در اراضی شبکه آبیاری دز در شمال استان خوزستان انجام شد. خاک این منطقه از نوع رسوبی و بافت آن عموماً لوم رسی سیلتی است (جدول 1). سه مقدار آب آبیاری 50، 75 و 100 درصد نیاز آبی خالص گیاه با علامت به ترتیب I_{50} ، I_{75} و I_{100} به عنوان کرت اصلی و سه سطح نیتروژن 150، 225 و 300 کیلوگرم در هکتار از منبع اوره با علامت به ترتیب N_{150} ، N_{225} و N_{300} به عنوان کرت فرعی به صورت کرت های یک بار خرد شده در قالب طرح بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار اجرا شد. عرض هر کرت 6 متر (8 جویچه برای هر سطح کودی) و طول کرت ها 110 متر با شیب طولی 0/2 درصد بود. کاشت ذرت (رقم سینگل کراس 704) در مناسب ترین تاریخ کاشت منطقه یعنی دهه اول مرداد انجام شد. فسفر مورد نیاز در قالب سوپر فسفات تریپل به میزان 100 کیلوگرم در هکتار و پتاسیم مورد نیاز به شکل سولفات پتاسیم به میزان 150 کیلوگرم در هکتار مطابق آزمون خاک قبل از گیری شد. ضرایب ثابت معادله کمپیل (معادله 1) با اندازه گیری رطوبت حجمی خاک (θ) در پتانسیل های فشاری

شرایط مختلف مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفته است (جابرو و همکاران¹، 2009؛ لوتسه و همکاران²، 1992؛ جانسون و همکاران³، 1987). این مدل برای مدیریت سطح آب زیر زمینی (زهکشی کنترل شده و زهکشی آزاد) در ترکیب با دو روش خاک ورزی (استفاده از گاوآهن برگردان دار و چیزل) برای دو حالت کاربری اراضی (با و بدون کشت مخلوط ذرت و علوفه چاودار یکساله) در یک خاک لومی رسی استفاده شده است. نتایج حاکی از آن بود که مدل مذکور، آبتوی نیترات در تیمار زهکشی کنترل شده را بهتر از تیمار زهکشی آزاد پیش بینی می نماید (نگ و همکاران⁴، 2000). جمیسن و همکاران⁵ (1994) از دو روش برای واسنجی مدل LEACHN در شرایط استفاده از کود آلی در مزرعه ذرت استفاده نمودند. روش اولواسنجی مدل برای یک سال و اعتباربخشی مدل با داده های مستقل حاصل از سال های بعدی و روش دوم واسنجی مدل برای هر سال و استفاده از متوسط مقادیر حاصل برای اعتبار بخشی مدل بود. نتایج نشان داد که در صورت استفاده از روش دوم، دقت پیش بینی تلفات آبتویی را در تابستان بیش از حد و در بهار کمتر از مقادیر مشاهده شده پیش بینی کرد. لوتسه و همکاران (1992) مدل LEACHN را برای پیش بینی مقدار آبتویی نیترات، توزیع آن در خاک و جذب توسط گیاه برای دو حالت استفاده از کود دامی و بدون استفاده از آنبررسی نمودند. تحلیل حساسیت نشان داد که خروجی مدل تحت تاثیر مقادیر اندک افزایش یا کاهش ثابت نیترات زایی و نیترات زدایی است؛ حال آن که به تغییرات ثابت سرعت معدنی شدن حساسیت کمتری نشان داد. با وجود این که شبیه سازی حرکت نیترات در خاک در

1-Jabro *et al.*

2- Lotse *et al.*

3- Johnson *et al.*

4- Ng *et al.*

5- Jemison *et al.*

جدول 1- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه

جرم مخصوص ظاهری (gcm ⁻³)	درصد ذرات خاک (%)			رطوبت حجمی (%)		pH	Ntot (mg Kg ⁻¹)	OC (%)	عمق (cm)
	ماسه	لای	رس	PWP	FC				
1/61	16	51	33	17/9	33	7/64	810	0/75	0-30
1/68	15	50	35	18	33	7/79	560	0/5	30-60
1/7	13	49	38	18/4	34/2	7/93	420	0/47	60-90
1/7	40	39	21	-	-	7/86	380	0/34	90-120

OC: درصد مواد آلی خاک Ntot: نیتروژن کل خاک pH: اسیدیته خاک

بافت خاک به روش هیدرومتری، هدایت هیدرولیکی به روش دستگاه نفوذ سنج مکشی دیسک، جرم مخصوص ظاهری خاک با استفاده از رینگ های مخصوص به ارتفاع و قطر 50 میلی متر اندازه گیری شد. ضرایب ثابت معادله کمپیل (معادله 1) با اندازه گیری رطوبت حجمی خاک (θ) در پتانسیل های فشاری مختلف (h بر حسب کیلو پاسکال) با استفاده از دستگاه صفحات فشار به دست آمد. به این صورت که پس از یافتن منحنی رطوبتی، معادله کمپیل¹ (رابطه 1) بر داده های اندازه گیری برازش و ضرایب ثابت a و b به دست آمدند. در معادله کمپیل θ_s رطوبت حجمی خاک در حالت اشباع است.

$$h = a \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad (1)$$

مقادیر نترات و آمونیوم نیم رخ خاک در 7 نوبت در فواصل زمانی قبل از کود آبیاری، 10 روز پس از هر کود آبیاری (فاصله زمانی که امکان جذب توسط گیاه و نفوذ عمقی به همراه آب آبیاری و دیگر فعل و انفعال های شیمیایی وجود داشته باشد) و همچنین پس از برداشت ذرت اندازه گیری شد. نمونه برداری ها برای تیمار و تکرارهای مختلف از عمق های 0-30، 30-60، 60-90 و 90-120 سانتی متر برای هر دو سال زراعی به صورت یکسانی صورت گرفت. نمونه ها بلافاصله به آزمایشگاه انتقال و پس از خشک کردن و کوبیدن آنها، از الک 2 میلیمتری عبور داده شد. نترات و آمونیوم

کاشت در سطح تمام کرت ها به صورت یکسان توسط کودپاش گریز از مرکز توزیع شد. نیتروژن مورد نیاز به شکل اوره $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (محتوی 46 درصد نیتروژن) در سه تقسیم مساوی، قبل از کاشت، مرحله 6-8 برگی (19 روز پس از کاشت) و قبل از گلدهی (52 روز پس از کاشت) به صورت کود آبیاری در اختیار گیاه قرار گرفت. برای دستیابی به تراکم مورد نظر (75000 بوته در هکتار) پس از چهار تا شش برگه شدن بوته ها، مزرعه تنک و همزمان با آبیاری چهارم تیمارهای آبیاری اعمال شد. اندازه گیری جریان ورودی و خروجی به هر یک از کرت ها، توسط فلوم های WSC نصب شده در ابتدا و انتهای هر کرت به دست آمد. مقدار آب نفوذ یافته از تفاضل مقادیر فلوم ورودی و خروجی محاسبه شد. مقدار آب آبیاری تیمار 100% در هر دور آبیاری از مجموع مقادیر تبخیر و تعرق گیاه و با اعمال بازدهی آبیاری 70 درصد به صورت تجمعی محاسبه شد. این مقدار به عنوان تیمار آبیاری کامل و 75 و 50 درصد آن به عنوان تیمارهای تنش آبی (I50 و I75) از طریق فلوم های نصب شده در ابتدای تیمارهای آبیاری در اختیار گیاه قرار گرفت. رطوبت خاک طی دوره رشد، در مراحل قبل و پس از هر آبیاری در عمق های 0-20، 20-40، 40-60 و 60-80 سانتی متر با استفاده از دستگاه ترایم IPH (Voucher Number: T95WV-VC6YG) در دو نقطه ابتدا و انتهای تیمارهای آبیاری کرت N225 اندازه گیری و از متوسط این مقادیر برای مقایسه رطوبت خاک با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل استفاده شد.

$$L \quad (2)$$

در رابطه (2)، D_{max} اختلاف مطلق حداکثر، P_m مقدار برآورد شده بر اساس داده ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد شده بر اساس داده ورودی پایه است. به این صورت که اگر مقدار D_{max} برابر صفر، 0-10، 10-50 و یا بیش از 50 باشد، آنگاه مدل نسبت به آن پارامتر به ترتیب غیر حساس ($SI=0$)، کمی حساس ($SI=1$)، حساس ($SI=2$) و یا خیلی حساس ($SI=3$) خواهد بود (لن و فریرا، 1990). برای ارزیابی نتایج و آزمون اعتبار مدل از شاخص های آماری استفاده شد (جدول 2). مقدار خطای متوسط (MBE) و ضریب تغییرات (CV) در حالتی که مقادیر برآورد شده و اندازه گیری شده مساوی باشند (حالت بهینه) برابر صفر و علامت مثبت آن نیز بیانگر آن است که مدل مقادیر را بیشتر تخمین می زند، علامت منفی نشان دهنده آن است که مدل مقادیر را کمتر پیش بینی می کند. کارایی مدل (EF) نیز نشان دهنده صحت برازش داده هاست و از منفی بی نهایت (در بدترین حالت) تا یک (در زمان برازش کامل داده ها) تغییر می کند (کلمنت و همکاران، 1994).

نتایج و بحث

تحلیل حساسیت

نتایج تحلیل حساسیت نشان داد که افزایش جرم مخصوص ظاهری خاک در هر لایه، باعث کاهش مقادیر رطوبت، غلظت نیترات و آمونیوم خاک می شود (شکل 1)؛ بنابراین یکی از پارامترهای حساس ورودی به مدل به شمار می رود. ضریب b معادله کمپیل در پیش بینی مقدار رطوبت خاک پس از جرم مخصوص ظاهری خاک حساسیت بالایی دارد. مطالعات جابرو و همکاران (2009) نتایج مشابهی را نشان داده است. غلظت نیترات خاک تحت تاثیر هدایت هیدرولیکی خاک بود و تجمع نیترات در هر لایه بیانگر کاهش هدایت هیدرولیکی آن لایه است. درصد پوشش گیاهی حداکثر، از بینندهای مربوط

نمونه ها به روش تقطیر بخار آب (برمنر و کینی¹، 1965) اندازه گیری شد. برای تحلیل حساسیت و واسنجی مدل از روش واسنجی ضرایب برای یک سال و یک تیمار معین و استفاده از آن برای ارزیابی مدل در دیگر تیمارها و سال ها استفاده شد (جانسون و همکاران، 1987). برای این منظور اطلاعات مربوط به مقادیر نیترات و آمونیوم موجود در پروفیل خاک در تیمار آبیاری بهینه و کود نیتروژن 300 کیلوگرم در هکتار ($I_{100} N_{300}$)، علاوه بر داده های مربوط به خصوصیات فیزیکی خاک (جرم مخصوص ظاهری خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، ضرایب منحنی مشخصه رطوبتی)، داده های گیاهی (زمان کاشت، جوانه زنی، پوشش کامل، زمان برداشت، حداکثر عمق ریشه و مقدار جذب سالانه نیتروژن توسط گیاه)، مقادیر نیتروژن معدنی و آلی و درصد کربن آلی اولیه خاک، استفاده شد. مرحله واسنجی مدل با تغییر ضرایب نیترات زایی، نیترات زدایی، ضریب انتشار و ضریب جذب آمونیوم در یک محدوده قابل قبول صورت گرفت. پس از اجرای مدل، غلظت نیترات و آمونیوم پیش بینی شده و مشاهده شده با استفاده از معادلات آماری مقایسه شدند (جمیسون و همکاران، 1994) (جدول 2). تکرار این فرایند زمانی خاتمه یافت که برای شاخص کارایی مدل عدد نسبتاً بالا (نزدیک به یک) و برای شاخص خطای متوسط، عدد پایینی (نزدیک به صفر) در طول دوره قبل و پس از کودآبیاری ها به دست آید. تحلیل حساسیت مدل با کم و زیاد نمودن 50 درصدی داده های ورودی مهم تعیین مقادیر اختلاف مطلق حداکثر² (D_{max}) و شاخص حساسیت³ (SI) رطوبت، غلظت نیترات و آمونیوم خاک به عنوان خروجی های مدل، صورت گرفت (لن و فریرا⁴، 1990).

1- Bremner and Keeney

2- Maximum Absolute Difference

3- Sensitivity Index

4- Lane and Ferrira

شکل 2 نتایج مقادیر پیش بینی مدل (منحنی ترسیم شده) به همراه محدوده مقادیر مشاهده شده نیمرخ خاک را در طول دوره نمونه برداری نشان می دهد. مقادیر نیترات خاک در مراحل قبل از کودآبیاری با علامت BF و 10 روز پس از کودآبیاری با علامت AF نمایش داده شده است. همان طوری که مشاهده می شود، پس از کودآبیاری اول (N_{300} -AF1) مقادیر پیش بینی و مشاهده شده همپوشانی خوبی داشته به طوری که مقدار کارایی مدل 0/83 و خطای مطلق 1/07- حاصل شد. قبل از کود آبیاری دوم مقدار نیترات پیش بینی شده در لایه های 30-60 و 60-90 سانتی متر بیش از مقادیر مشاهده ای است. از این رو کارایی مدل نسبت به حالت قبل کاهش یافته است، پس از کود آبیاری دوم انطباق بین داده های اندازه گیری و پیش بینی شده مدل افزایش یافت. به طوری که کارایی مدل 0/79 شده است. قبل از کود آبیاری سوم (N_{300} -BF3) مقدار غلظت نیترات پیش بینی شده در سه لایه اول نسبت به حالت های قبل، خارج از محدوده مقادیر اندازه گیری است؛ این امر باعث شده تا شاخص کارایی مدل به کمترین مقدار، حدود 0/03، کاهش یابد. پس از کودآبیاری سوم تطابق بین داده های پیش بینی و مشاهده شده نسبت به حالت قبل افزایش یافت؛ اما نسبت به مراحل کودآبیاری اول و دوم قدری پایین تر است.

به گیاه از حساسیت بیشتری برخوردار بود. ضریب انتشارپذیری و نیترات زایی در روند انتقال نیترات در پروفیل خاک نسبت به بقیه ضرایب موجود در شکل 1 حساسیت بیشتری را نشان دادند. بقیه ضرایب به جز ضریب توزیع (حساس در انتقال آمونیوم)، حساسیت کمتری داشتند (شکل 1).

واسنجی مدل

ضرایب ورودی مدل نقش مهمی در واسنجی مدل دارند. برخی از این ضرایب به صورت سعی و خطا و با توجه به محدوده تغییرات آنها در مطالعات قبلی در نظر گرفته شدند (جدول 3). نتایج حاصل از تغییر ضرایب نیترات زایی، نیترات زدایی و ضریب انتشار در دامنه مورد انتظار نشان داد که مقادیر به ترتیب $0/17 \text{ days}^{-1}$ ، $0/004$ و 200 mm کمترین خطای متوسط و بالاترین کارایی مدل را در طول دوره رشد ذرت داشتند (شکل 2 تیمار N_{300})؛ لذا، این ضرایب برای دیگر تیمارهای آب و کود نیتروژن و برای هر دو سال اجرای آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند. نگ و همکاران (2000) در شرایط مزرعه ای کشت علف چاودار و بافت خاک لومی رسی در جنوب غربی آنتاریو ضرایب نیترات زایی، نیترات زدایی و ضریب انتشار را به ترتیب $0/1$ ، $0/1$ و 120 mm به دست آوردند. جلیبی و عباسی (1387) این ضرایب را برای چغندرقد در خاکی با بافت لومی سیلتی در شرایط نیمه خشک منطقه خراسان به ترتیب $0/01$ ، $0/004$ و 80 mm در نظر گرفتند.

جدول 2- شاخص های آماری مورد استفاده برای آزمون اعتبار مدل

نام شاخص	رابطه ریاضی
میانگین خطا	M
ضریب تغییرات	C
کارایی مدل	E

P_i : مقدار برآورد شده، O_i : مقدار مشاهده شده، \bar{O} : میانگین مقدار مشاهده شده، n : تعداد نقاط، MBE: خطای متوسط، CV: ضریب تغییرات و EF: کارایی مدل سازی

خرمیان و همکاران: شبیه سازی حرکت رطوبت، نیترات و ...

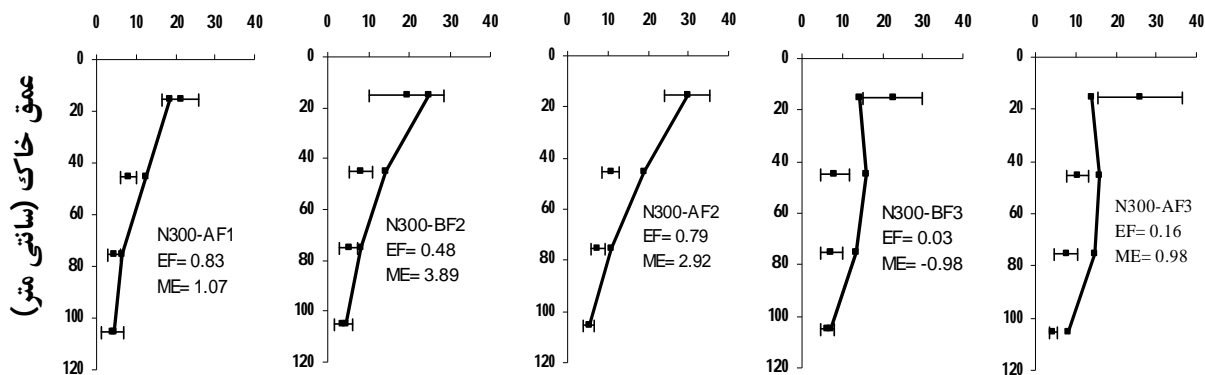
جدول 3- داده های مربوط به عوامل ورودی مدل LEACHN

منبع	مقدار	واحد	عامل
لوتسه و همکاران، 1992	1	$L\ kg^{-1}$	ضریب جذب اوره (k_d)
اسپارکس و همکاران، 1979	0/08	$L\ kg^{-1}$	ضریب جذب NH_4-N (k_d)
لوتسه و همکاران، 1992	0	$L\ kg^{-1}$	ضریب جذب NO_3-N (k_d)
جانسون و همکاران، 1987	0/5	-	فاکتور کارایی سنتز (f_c)
جانسون و همکاران، 1987	0/2	-	فاکتور هموسی شدن (f_h)
جلینی و عباسی، 1387	3	-	فاکتور Q_{10}
هاتسون و واگنت، 1992	0/08	$m^3\ m^{-3}$	هوای محبوس در خاک اشباع
-	0/002	d^{-1}	ثابت معدنی شدن بقایا
جانسون و همکاران، 1987	10	$mg\ L^{-1}$	ثابت نیمه اشباع نیترات زدایی
جانسون و همکاران، 1987	8	-	$\frac{NO_3}{NH_4}$ محلول برای نیترات زایی



شکل 1- نتایج تحلیل حساسیت مدل نسبت به برخی از پارامترهای ورودی

غلظت نیترات در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)



شکل 2- مقادیر مشاهده (میل افقی) و پیش بینی شده (منحنی) نیترات برای سطوح مختلف کودی تیمار I_{100}

آزمون اعتبار مدل

به طوری که محدوده تغییرات خطای متوسط، ضریب تغییرات و کارایی مدل در تمام تیمارها و دو سال نمونه برداری به ترتیب بین 2/09- تا 3/89، 20/04 تا 66/5 و 0/1- تا 0/88 می باشد (تمام نتایج ارائه نشده است). نتایج محدوده تغییرات ضرایب یاد شده در مطالعات جلینی و عباسی (1387) در منطقه نیمه خشک خراسان به ترتیب 4/82- تا 2/29، 9/6 تا 40/19 و 9/77- تا 0/98 به دست آمده است.

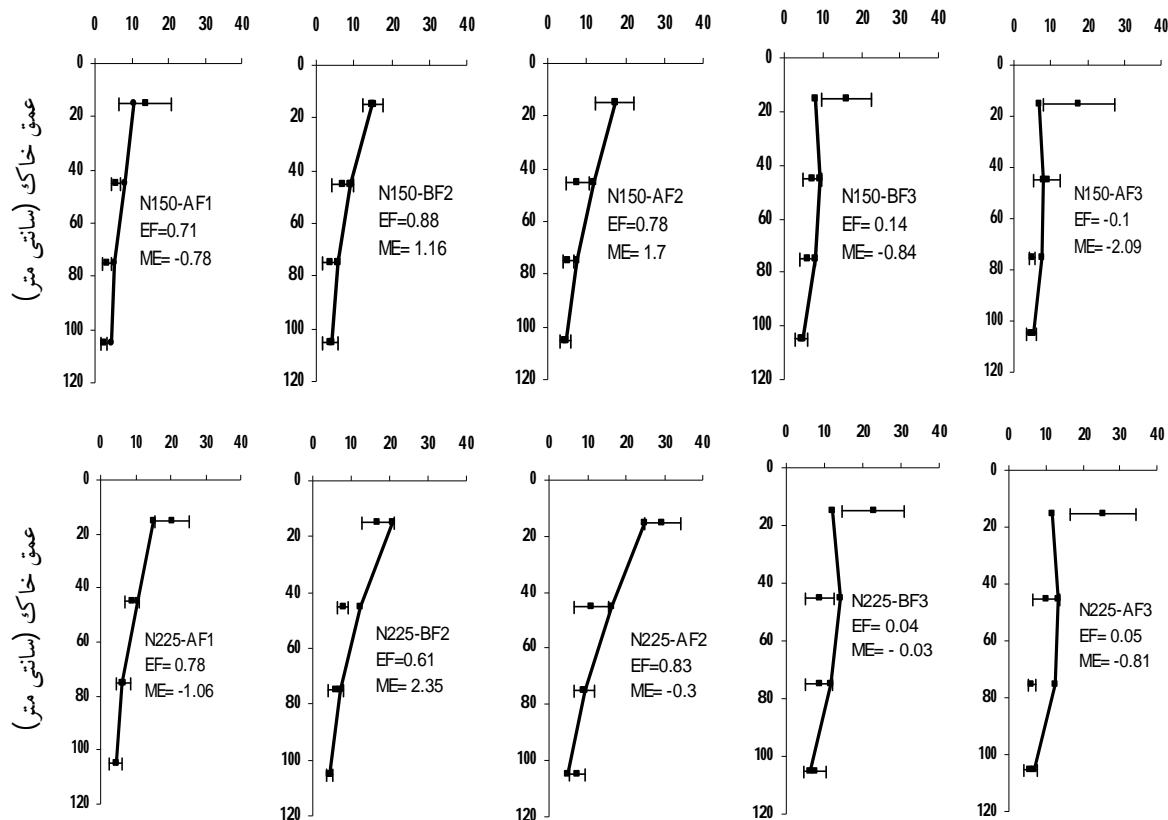
تأثیر عمق بر غلظت نیترات و آمونیوم خاک

غلظت نیترات لایه های مختلف خاک در شکل های 2 و 3 نشان داده شده است. مقایسه مقادیر نیترات (نمودار میله‌ای) در فواصل زمانی قبل و پس از هر کودآبیاری نشان می دهد که پراکندگی مقادیر نیترات و در نتیجه انحراف معیار آنها در لایه 0-30 سانتی متر (میله های افقی ترسیم شده در نمودار) به مراتب بیش از لایه های زیرین است و نتایج مدل نیز اغلب در این محدوده قرار دارد. از طرف دیگر کود تزریقی در هر سطح کودآبیاری تا عمق 30 cm نفوذ نموده و با افزایش مقدار کود تزریقی از 225 به 300 کیلوگرم در هکتار، غلظت نیترات باقی مانده تا عمق 60cm افزایش یافته و در اعماق پایین تر از آن تا عمق 110cm خاک ثابت باقی مانده است. نتایج حاصل از مدل نیز نشان می دهد که انتقال نیترات به لایه های پایین تر از 60 سانتی متر ناچیز است (منحنی های شکل 2 و 3). اگر چه نیترات آنیون بوده و به همراه آب به سمت پایین انتقال می یابد، عواملی همچون تبخیر و تعرق بالا در دوره رشد ذرت، تقسیط کود در چند مرحله، اعمال کودآبیاری در زمان پیشروی آب و قطع جریان آب ورودی قبل از رسیدن آب به انتها باعث شده تا نیترات به لایه های پایین تر از 60 cm نفوذ نکند (عباسی و همکاران، 1387 و عباسی و همکاران²، 2012). مطالعات کود آبیاری در یک خاکلومی بدون پوشش نیز نشان داد

بهره گیری از پیش بینی نتایج یک مدل زمانی قابل اطمینان و کاربرد است که نتایج آن پس از مرحله واسنجی با نتایج مزرعه ای، که شرایط مقادیر آب، کود، روش تهیه زمین و سال تغییر نموده است، مقایسه شود. شکل 3 محدوده مقادیر اندازه گیری شده (میله های افقی) و مقادیر پیش بینی شده نیترات (منحنی ترسیم شده) را به همراه شاخصهای آماری کارایی مدل (EF) و میانگین خطا (ME) برای دوره زمانی رشد ذرت به ترتیب برای دو تیمار I₁₀₀-N₂₂₅ و I₁₀₀-N₁₅₀ نشان می دهد. میزان کارایی مدل در تیمار I₁₀₀-N₁₅₀ بین 0/1- تا 0/88 و مقدار خطای متوسط بین 2/09- تا 1/7 در نوسان بوده که این امر بیانگر دقت نسبتاً بالای مدل برای پیش بینی غلظت نیترات لایه های خاک در طول دوره رشد گیاه است (شکل 3). برآورد مدل برای تیمار I₁₀₀-N₂₂₅ نسبت به تیمار I₁₀₀-N₁₅₀ دقت مشابهی داشته به طوری که محدوده تغییرات کارایی مدل بین 0/04 تا 0/83 اندازه گیری شده است (شکل 3). نتایج حاکی از پایین بودن کارایی مدل در مراحل قبل و پس از کود آبیاری سوم در مرحله واسنجی و اعتبار سنجی مدلاست، به طوری که میزان کارایی مدل برای تیمارهای I₁₀₀-N₁₅₀ و I₁₀₀-N₂₂₅ بین 0/14 و 0/1- به دست آمد. تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی (هدایت هیدرولیکی اشباع و غیر اشباع خاک و پارامتر توزیع اندازه خلل و فرج خاک (زینال زاده و همکاران، 1389) و خصوصیات بیوشیمیایی خاک، همانند تنفس میکروبی (کاوالنکو و کمرون¹، 1976) و همچنین فرایند رشد و نمو گیاه احتمالاً باعث شده تا در فرایند انتقال نیترات در لایه های خاک تأثیر گذاشته و در نتیجه فاصله بین مقادیر مشاهده شده و پیش بینی شده بیشتر شود. مجموع نتایج دو ساله نشان داد که روند حرکت نیترات در پروفیل خاک توسط مدل LEACHN در حد قابل قبولی پیش بینی شده است؛

خرمیان و همکاران: شبیه سازی حرکت رطوبت، نیترات و ...

غلظت نیترات در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)



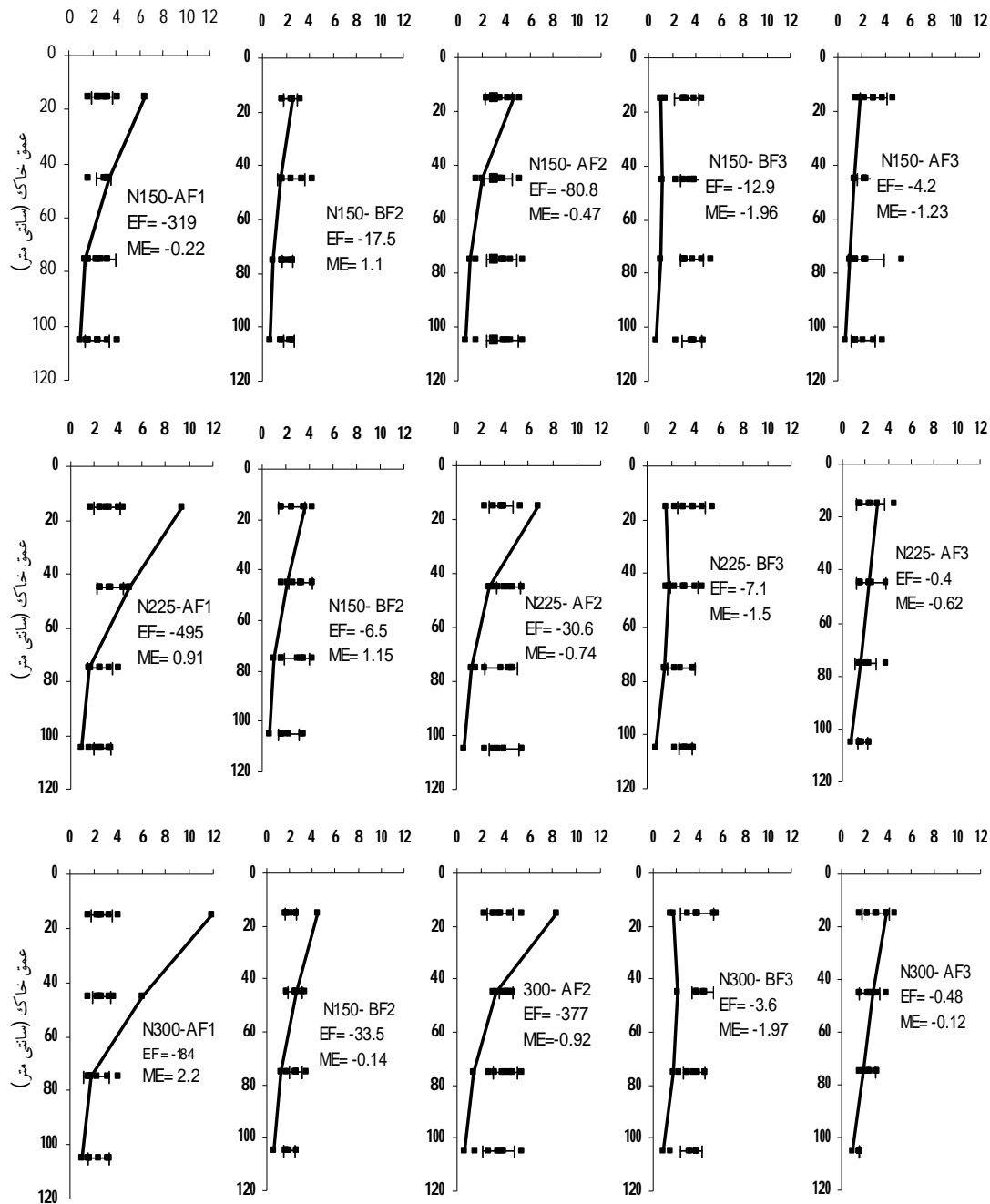
شکل 3- مقادیر مشاهده (میله افقی) و پیش بینی شده (منحنی) نیترات برای سطوح مختلف کودی تیمار I₁₀₀

(منحنی ترسیم شده) در شکل 4 نشان می دهد که مدل در شبیه سازی مقادیر آمونیوم دقت پایینی دارد. تخمین مدل در لایه های بالایی بیشتر و در لایه های پایینی کمتر از مقادیر مشاهده شده بود. این روند تغییرات با مقادیر واقعی متفاوت بوده به طوری که تغییرات خطای متوسط، ضریب تغییرات و کارایی مدل در تمام حالت ها به ترتیب بین 2/14- تا 2/61، 28/1 تا 192/4 و 0/12- تا 52/6- محاسبه شده است. فانگ و همکاران¹ (2006) نیز نشان دادند که تغییرات آمونیوم در لایه صفر تا 100 سانتی متری پروفیل خاک در تناوب گندم- ذرت برای چهار مقدار کود نیتروژن و دو رژیم رطوبتی خاک یکسان بوده و تفاوت معنی داری بین تمام تیمارها

که کود تزریقی تا عمق 70cm نفوذ نموده و تغییرات غلظت نیترات در اعماق پایین تر 40cm ناچیز است (عباسی و همکاران، 1387). شکل 4 تغییرات مقادیر آمونیوم خاک را در مراحل قبل (با علامت BF) و 10 روز پس از کودآبیاری (با علامت AF) در دو حالت اندازه گیری و پیش بینی توسط مدل نشان می دهد. تغییرات اندک مقادیر آمونیوم اندازه گیری شده در پروفیل خاک در تمام تیمارهای کودی بیانگر شرایط مناسب رطوبتی، دمایی و pH مناسب محیط جهت تسریع روند تبدیل آمونیوم به ترکیبات دیگر و تثبیت به وسیله لایه های رسی است؛ به طوری که حتی یک روز پس از کود آبیاری غلظت آن در نیمرخ خاک ثابت اندازه گیری شده است. مقایسه نتایج مقادیر اندازه گیری شده (میله های افقی) و مقادیر پیش بینی شده آمونیوم

1- Fang et al.

غلظت آمونیوم در خاک (میلی گرم بر کیلوگرم)

شکل 4- مقادیر مشاهده (میله افقی) و پیش بینی شده (منحنی) آمونیوم برای سطوح مختلف کودی تیمار I₁₀₀

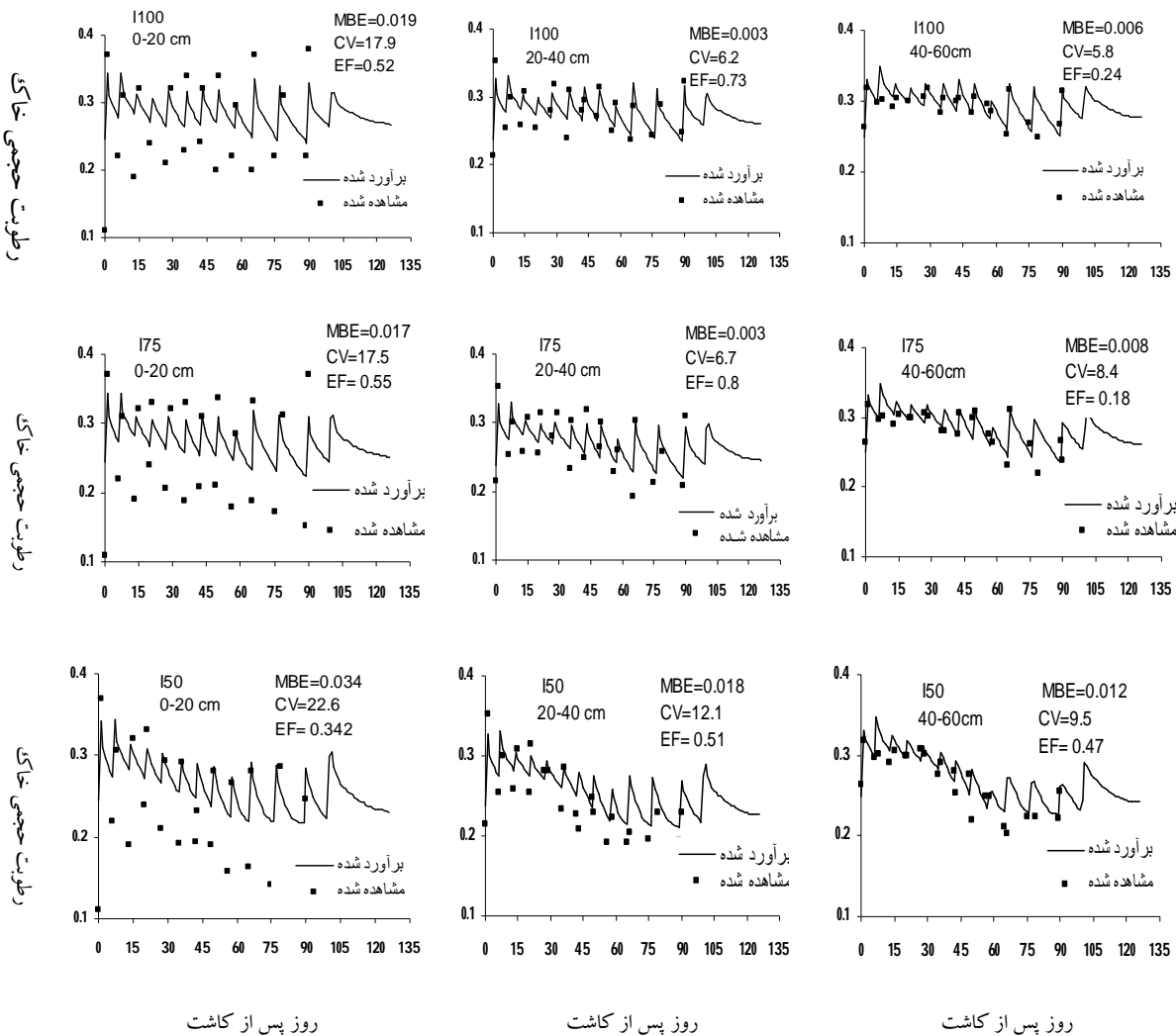
بینی های مدل LEACHN در شرایط استفاده از مقادیر مختلف آب و کود نیترات آمونیوم مشابه مقادیر غلظت آمونیوم نیمرخ خاک در طول دوره رشد چغندر قند است.

مشاهده نشد. بنابراین اختلاف معنی دار غلظت آمونیوم خاک با مقادیر پیش بینی شده توسط مدل حاکی از آن است که مدل در برآورد مقدار آمونیوم خاک دقت لازم را ندارد؛ اما جلینی و عباسی (1387) نشان دادند که پیش

رطوبت پروفیل خاک

بیش از لایه های دیگر است. همین امر باعث شده تا انطباق کمتری بین مقادیر مشاهده شده (نقاط موجود در شکل 5) و مقادیر پیش بینی شده (منحنی موجود در شکل های یاد شده) وجود داشته باشد. با ملاحظه روند تغییرات رطوبت لایه 0-20 سانتی متر در هر یک از سطوح آبیاری مشاهده می شود که بیشترین تفاوت رطوبت بین داده های قبل از آبیاری است. دمای بالا و انتقال افقی گرما در طول دوره رشد ذرت به خصوص در مراحل ابتدایی رشد باعث شده تا لایه سطحی خاک رطوبت خود را سریع تر از دست داده و مقادیر واقعی رطوبت خاک کمتر از مقادیر برآورد شده توسط مدل باشد.

شکل 5 نتایج مقایسه بین مقادیر رطوبت برآورد و اندازه گیری شده را برای سه تیمار I₅₀، I₇₅ و I₁₀₀ نشان می دهد. با توجه به شکل 5 ملاحظه می شود که در تیمار I₁₀₀ مقدار خطای متوسط (MBE) از 0/003 در لایه دوم تا 0/019 در لایه اول متغیر بود و علامت مثبت آن بیانگر آن است که مدل مقادیر را بیشتر از واقعیت برآورد می نماید. از طرف دیگر مقدار کارایی مدل (EF) در سه لایه بین 0/24 تا 0/73 و ضریب تغییرات (CV) بین 5/8 تا 17/9 درصد متغیر است. این نتایج نشان می دهد که پراکنش داده ها و همچنین تفاوت بین مقادیر مشاهده و پیش بینی شده در لایه 0-20 سانتی متر



شکل 5- مقایسه مقادیر رطوبت برآورد و مشاهده شده در تیمارهای مختلف آبیاری

خطای متوسط و بالاترین کارایی مدل در طول دوره رشد را ایجاد می‌نماید. استفاده از این ضرایب در تیمارهای دیگر و تجزیه و تحلیل آماری بیانگر آن است که مدل نیترات خاک را با دقت قابل قبولی برآورد می‌کند؛ به طوری که میزان خطای متوسط، ضریب تغییرات و کارایی مدل به ترتیب بین 2/09- تا 3/89، 20/04 تا 66/5 و 0/1- تا 0/88 به دست آمد. این مقادیر در محدوده مقادیر گزارش شده توسط سایر محققان است. اندازه گیری نیترات در نیمرخ خاک، نشان می‌دهد که کود تزریقی در هر سطح کود آبیاری تا عمق 30 نفوذ نموده و با افزایش مقدار کود تزریقی از 225 به 300 کیلوگرم در هکتار، غلظت نیترات باقی مانده تا عمق 60cm افزایش یافته و در اعماق پایین تر از آن تا عمق 110cm خاک ثابت باقی مانده است. نتایج حاصل از مدل نیز نشان داد که انتقال نیترات به لایه‌های پایین تر از 60 سانتی متر ناچیز است. تقسیط کود در چند مرحله، اعمال کود آبیاری در زمان پیشروی آب و قطع جریان آب ورودی قبل از رسیدن آب به انتها باعث شد تا نیترات به لایه‌های پایین تر از 60cm نفوذ نکند. دقت مدل LEACHN در برآورد رطوبت لایه سطحی خاک برای تمام تیمارهای آبیاری در مرحله قبل از آبیاری ذرت پایین تر از لایه های دیگر بود. به این مفهوم که مقدار خطای متوسط و ضریب تغییرات در هر یک از تیمارهای یاد شده برای لایه سطحی خاک بیش از دو لایه دیگر بود و برآورد مدل در لایه های پایینی بهتر از لایه سطحی خاک صورت گرفت. در مجموع، به نظر می‌رسد که مدل LEACHN می‌تواند در پیش بینی نیترات و رطوبت خاک مورد استفاده قرار گیرد؛ لذا پیشنهاد می‌شود که در این زمینه مدل های مختلف دیگری واسنجی و اعتبار سنجی شده و رفتار آنها در درازمدت با حضور گیاهان مختلف در تناوب با مدل LEACHN مورد مقایسه و ارزیابی قرار گیرد.

به عبارت دیگر دقت مدل در برآورد رطوبت لایه سطحی خاک در مرحله قبل از آبیاری ذرت پایین تر از لایه های دیگر است. برآورد رطوبت خاک توسط مدل LEACHN برای تیمارهای تنش آبی (تیمارهای I75 و I50 در شکل 5) تقریباً مشابه با تیمار I100 بود. به این مفهوم که مقدار خطای متوسط و ضریب تغییرات در هر یک از تیمارهای یاد شده برای لایه سطحی خاک بیش از دو لایه دیگر است و برآورد مدل در لایه های پایینی بهتر از لایه سطحی خاک است. نتایج تحقیقات کلمنت و همکاران (1994) مقدار خطای متوسط مدل LEACHN را بین 3/94- تا 3/25 و مقدار ضریب تغییرات مدل را بین 5/25 تا 32 درصد گزارش نموده است. با این وجود، آنان پیش بینی رطوبت خاک توسط این مدل را قابل قبول ارزیابی نموده‌اند. اسمیت و همکاران¹ (1995) مقدار خطای نسبی مدل LEACHN برای پیش بینی رطوبت خاک را بین 4/1- تا 16/5، مقدار انحراف معیار بین 0/01 تا 10/1 و مقدار ضریب تغییرات را بین 2/3 تا 20/5 درصد گزارش نموده است. این آمار نشان می‌دهد که دقت مدل در برآورد رطوبت خاک با نتایج سایر محققان مطابقت داشته و استفاده از آن در اراضی محل اجرای طرح در زمینه برنامه ریزی آبیاری مفید خواهد بود.

نتیجه گیری

تحلیل حساسیت مدل LEACHN نشان داد که از بین پارامترهای فیزیکی، مدلبه تغییرات جرم مخصوص ظاهری خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع و ضریب b معادله کمپیل و از بین پارامترهای شیمیایی ضریب نیترات زایی و ضریب انتشار پذیری در انتقال نیترات حساسیت بالاتری دارد. نتایج واسنجی مدل نشان داد که ضریب نیترات زایی، نیترات زدایی و انتشار پذیری مقادیر به ترتیب $0/17\text{days}^{-1}$ ، 0/004 و 200mm کمترین

منابع

1. بهمنی، ا.، برومند نسب، س.، بهزاد، م. و ناصری، ع.ع. 1388. بررسی پتانسیل شستشوی نیترات و آمونیوم در پروفیل خاک تحت تاثیر کم آبیاری. مجله آبیاری و زهکشی ایران، 3 (1): 37-44.
2. جلیلی، م. و عباسی، ف. 1387. بررسی روند تغییرات نیترات و آمونیوم در نیمرخ خاک با استفاده از مدل ریاضی LEACHN. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، 9 (1): 31-47.
3. زینال زاده، ک.، کشکولی، ح.ع.، ناصری، ع.ع.، دادمهر، ر. و عیوضی، ع. 1389. تغییرات زمانی پارامترهای هیدرولیکی خاک در کاربری های مختلف اراضی کشاورزی. پژوهش آب در کشاورزی، 24 (1): 1-11.
4. عباسی، ف.، لیاقت، ع. و گنجه ا. 1387. ارزیابی یکنواختی کودآبیاری در آبیاری جویچه ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، 39 (1): 117-127.
5. Abbasi, F., Rezaee, H.T., Jolaini, M., and Alizadeh, H.A. 2012. Evaluation of fertigation in different soils and furrow irrigation regimes. *Irrigation and Drainage*, 61(4): 533-541.
6. Bremner, J.M., and Keeney, D.R. 1965. Stream distillation methods for determination of ammonium, nitrite and nitrate. *Analytical Chemistry*, 32: 485-495.
7. Clemente, R.S., De Jong, R., Hayhoe, H.N., Reynolds, W.D., and Hares, M. 1994. Testing and comparison of three unsaturated soil water flow models. *Agricultural Water Management*, 25: 135-152.
8. Fang, F., Wang, Q., Chen, Y.E., Zhang, Y.G., Wang, J., and Li, L. 2006. Soil nitrate accumulation, leaching and crop nitrogen use as influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat–maize double cropping system in the North China Plain. *Plant and Soil*, 284: 335–350.
9. Hutson, J.L., and Wagent, R.J. 1992. LEACHN. Leaching Estimation and Chemistry Model: A process based model of water and solute movement, transformations, plant uptake and chemical reactions in unsaturated zone. Version 3. Department of Agronomy, Cornell University, Ithaca, NY, USA.
10. Jabro, J.D., Stout, W.L., Fales, S.L., and Fox, R.H. 2009. Nitrate leaching from soil core Lysimeters Treated with Urine or Feces under Orchard grass: Measurement and Simulation. *Journal of Environmental Quality*, 26: 89-94.
11. Jemison, J.M., Jabro, J.D., and Fox, R.H. 1994. LEACHN evaluation: I. Simulation of cumulative drainage. bromide leaching. and corn bromide uptake. *Agronomy Journal*, 86: 843-851.
12. Johnsson, H., Bergstrom, L., Jansson, P.E., and Paustian, K. 1987. Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 18: 333-356.

13. Kowalenko, C.G., and Cameron, D.R. 1976. Nitrogen transformation in an incubated soil as affected by combinations of moisture content and temperature and adsorption-fixation of ammonium. *Canadian Journal of Soil Science*, 56(2): 63-70.
14. Lane, J.W., and Ferrira, V.A. 1990. Sensitivity analysis. In Knisel, W.G. (ed.), *CREAMS, A Field Scale Model for Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management System, Vol. A. Model Documentation*. USDA Conservation Research, Report Np. 26. Washington D.C., pp. 113-158.
15. Lotse, E.G., Jabro, J.D., Simmons, K.E., and Baker, D.E. 1992. Simulation of nitrogen dynamics and leaching from arable soils. *Journal of Contamination Hydrology*, 10: 183-186.
16. Ng, H.Y.F., Drury, C.F., Serem, V.K., Tan, C.S., and Gaynor, J.D. 2000. Modeling and testing of the effect of tillage, cropping and water management practices on nitrate leaching in clay loam soil. *Agricultural Water Management*, 43: 111-131.
17. Smith, W.N., Reynolds, W.D., De Jong, R., Clemente, R.S., and Topp, E. 1995. Water flow through intact soil columns: Measurement and simulation using LEACHN. *Journal of Environment Quality*, 24: 874-881.
18. Sparks, D.L., Blevins, R.L., Baily, H.H., and Barnhisel, R.I. 1979. Relationship of ammonium distribution to mineralogy in a Hapludalf soil. *Soil Science Society of America Journal*, 43:786-789.