مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۹/ شماره ۱/ بهار ۱۳۸۷/ص ۴۸-۳۱

بررسی روند تغییرات نیترات و آمونیم در نیمرخ خاک با استفاده از مدل ریاضی LEACHN

محمد جلینی و فریبرز عباسی*

* استادیار پژوهش بخش تحقیقات فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی؛ و استادیار پژوهش موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، نشانی: کرج، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ص. پ. ۸۴۵-۳۱۵۸۵، تلفن: ۲۷۰۵۳۲۰ (۰۲۶۱)، پیامنگار: abbasi_fariborz@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۸۵/۶/۴؛ تاریخ پذیرش: ۸۶/۱۱/۶

چکیده

این پژوهش به منظور بررسی حرکت آب و نیتروژن در خاک تحت شرایط مختلف آبی به مدت دو سال زراعی (۱۳۷۹و ۱۳۸۰) در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان روی چغندرقند اجرا شد. سه تیمار آبی بدون تنش، تنش مداوم، و تنش ابتدایی و سه سطح نیتروژن با مقادیر ۸۰، ۱۶۰ و ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار مورد بررسی قرار گرفت. مقدار تخلیهٔ رطوبتی در تیمارهای آبی به ترتیب برابر با ۵۰، ۸۰، و ۹۰ درصد آب قابل استفاده بود. از مدل LEACHN برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد. مقایسهٔ نتایج مدل با مقادیر اندازه‌گیری‌شده نشان داد که مدل روند تغییرات غلظت آمونیم و نیترات خاک را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند. همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری و براوردشده در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود. بلافاصله بعد از کاربرد نیتروژن، مقدار آمونیم و نیترات در لایه‌های سطحی به شدت افزایش یافت. در لایه‌های سطحی مقدار آمونیم در تیمار بدون تنش آبی کمتر از سایر تیمارها بود. در زمان تنش آبی، جذب آمونیم و نیترات کاهش ولی بعد از شکسته‌شدن تنش، مقدار آن افزایش یافت. با افزایش عمق خاک، مقدار نیترات در تیمار بدون تنش افزایش یافت. در تیمارهای با تنش آبی، میزان تلفات نیتروژن بر اثر تصعید آمونیم، نیترات زدایی، و آبشویی نیترات کاهش یافت.

واژه‌های کلیدی

آمونیم، چغندرقند، مدل LEACHN، نیترات

مقدمه

اصلاح مدیریت آبیاری و برنامه‌ریزی دقیق جهت استفادهٔ بهینه از آب و کود در مناطق مختلف با کاربرد مدل‌های ریاضی قابل اجراست. به طوری که در دهه‌های اخیر استفاده از مدل‌ها به عنوان ابزار مدیریتی و تحقیقی روز به روز در حال توسعه است. مدل‌های ریاضی، روند حرکت آب و املاح را در سیستم خاک-گیاه و اتمسفر به صورت کمی شبیه‌سازی می‌کنند (Antonopoulos, 1997; 2000). یکی از مدل‌های شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک، مدل LEACHM است که در پژوهش‌های مختلف استفاده شده است (Acutis, 1997; Alen *et al*., 1999; Hutson &

© 2011,The Author(s). Published by Agricultural Engineering Research Institute. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Wagenet, 1992; Jabro *et al*., 1995; Jabro *et al*., 1993; Jabro *et al*., 1997; Jemison *et al*., 1994).

راموس و کاربنل (Ramos & Carbonell, 1991) برای پیش‌بینی مقدار آب و نیتروژن معدنی در پروفیل خاک یک مزرعهٔ گندم، از مدل LEACHM استفاده کردند. آزمایش به‌مدت ۲ سال و در سه محل مختلف اجرا شد. نتایج نشان داد که مدل ظرفیت آب خاک را بیشتر از واقعیت براورد کرده است و این را به نامناسب‌بودن معادلهٔ منحنی رطوبتی خاک، مخصوصاً در حالت اشباع، و وجود سطح ایستابی کم عمق (۱ تا ۱/۵ متر) ربط دادند. شبیه‌سازی نشان داد که تحت شرایط آزمایش، نیتروژن معدنی خاک به دلیل اضافه‌شدن کود، معدنی‌شدن نیتروژن آلی، و نیترات زدایی متغیر است. جمیسون و همکاران (Jemison *et al*., 1994) با کاربرد مدل LEACHN مقدار آبشویی نیترات را در یک مزرعه ذرت شبیه‌سازی کردند که مقادیر مختلف کود نیتروژنی دریافت کرده بود. مدل برای تعدیل ضرایب نیترات‌زایی، نیترات‌زدایی، و تصعید آمونیم واسنجی شد. نتایج نشان داد که مدل دقت قابل قبولی دارد و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی در کشاورزی و آبیاری به کار رود. جابرو و همکاران (Jabro *et al*., 1995) در تحقیقی از مدل LEACHN جهت پیش‌بینی آبشویی نیترات استفاده کردند. آزمایش در خاک سیلتی لوم و به مدت ۵ سال اجرا شد. مقدار نیترات آبشویی‌شده از عمق ۱/۲ متری در این مدت ماهیانه اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مقادیر پیش‌بینی‌شده در محدوده ۹۵ درصد اطمینان قرار دارد. جابرو و همکاران (Jabro *et al*., 1997) در تحقیق دیگری با کاربرد مدل LEACHN آبشویی نیترات را در یک خاک سیلتی لوم شبیه‌سازی نمودند. آزمایش در لایسیمترهایی به طول ۱۰۰ و قطر ۶۰ سانتی‌متر اجرا شد. ضرایب تبدیل بین فرم‌های مختلف نیتروژن با استفاده از واسنجی مدل به‌دست آمد. آنالیز آماری نشان داد که مدل با دقت قابل قبولی مقادیر آب زهکشی‌شده و نیترات آبشویی‌شده را تخمین می‌زند. آکیوتیس (Acutis, 1997) مدل LEACHN را برای خاک‌های مختلف و گیاهان گوناگون در سه منطقهٔ ایتالیا ارزیابی و واسنجی کرد. بافت خاک از لوم شنی تا لوم رسی متغیر بود. نتایج نشان داد که مدل برای پیش‌بینی آبشویی نیتروژن در چند سال توأم یا برای هر سال یا ماه جداگانه تطابق خوبی دارد ولی در کاربردهای لحظه‌ای و کمتر از یک ماه تطابق خوبی ندارد. پاره‌کار (Parehkar, 1998) از مدل LEACHM برای شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در محیط متخلخل استفاده و با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه کرد و به نتایج قابل قبولی دست یافت. ان جی و همکاران (Ng *et al*., 2000) در تحقیقی تاثیر نوع خاک‌ورزی و عملیات مدیریتی آب و گیاه را روی آبشویی نیترات در یک خاک لوم رسی بررسی و با مدل LEACHN شبیه‌سازی کردند. کنترل سطح ایستابی با آبیاری زیرزمینی، سیستم زهکشی آزاد، و شرایط مختلف نوع شخم از عملیات مدیریتی بود. هم نتایج مزرعه‌ای و هم نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که سیستم کنترل سطح ایستابی می‌تواند به عنوان روشی نو جهت کاهش آبشویی نیترات به‌کار رود. سوجبدجی و همکاران (Sogbedji *et al*., 2001a, b, c) سرنوشت نیتروژن و انتقال آن را تحت شرایط مختلف، شامل تاریخچهٔ کشت و کار و شدت نیتروژن مصرفی روی خاک‌های شن لومی و لوم رسی با استفاده مدل LEACHN بررسی و شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که شدت نیترات‌زدایی برای خاک‌های رسی بیشتر از خاک‌های شنی ولی میزان نیترات‌زایی کمتر است. شدت کاربرد نیتروژن تأثیری بر مقادیر

ضرایب نیترات‌زایی و نیترات‌زدایی نداشت ولی بر تاریخ کشت مؤثر بود. جهت استفاده از مدل، ضرایب آن با استفاده از واسنجی تخمین زده شد. مدل غلظت نیترات داخل نیمرخ خاک و مقدار جذب در گیاه را با دقت بالایی براورد کرد. سئودی و همکاران (Soudi *et al*., 1997) تأثیر مقادیر مختلف آب را روی آبشویی نیتروژن بررسی کردند. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط در حدود ۵۱/۲ کیلوگرم نیتروژن در هکتار به صورت نیترات از طریق آبشویی تلف می‌شود. کاربرد مدل ریاضی نشان داد که مصرف یک سانتی‌متر آب باعث می‌شود که نیترات در حدود هشت میلی‌متر در پروفیل خاک حرکت کند. لینگ و ال‌کادی (Ling & El-Kadi, 1998) می‌گویند پیش‌بینی حرکت نیترات در حالت غیر اشباع به دلیل تأثیر عوامل مختلف، پیچیده و مشکل است. مدل‌های مختلفی جهت این منظور ارائه شده است ولی به دلیل در دسترس‌نبودن تمام اطلاعات، کاربرد آنها در شرایط مزرعه با مشکل همراه است. این محققان با ارائهٔ یک مدل ساده که فقط حرکت نیترات را در نظر می‌گرفت به نتایج قابل قبولی دست یافتند. ویکنر و همکاران (Vickner *et al*., 1998) با بسط یک مدل اقتصادی که در آن فاکتورهای مؤثر و کنترل‌کننده نیتروژن لحاظ‌شده بود نشان دادند که می‌توان با شبیه‌سازی طوری فاکتورهای مؤثر را تعیین کرد که حداکثر سود به‌دست آید. جلینی و همکاران (Jolaini *et al*., 2005) از مدل LEACHM برای براورد رطوبت در محدودهٔ توسعهٔ ریشهٔ چغندرقند استفاده کردند. نتایج تحقیقات آنان نشان داده است که مدل، مقدار رطوبت را با دقت قابل قبولی براورد می‌کند.

هدف اصلی از این تحقیق بررسی رفتار حرکت نیتروژن در خاک تحت شرایط مختلف آبی و مقادیر مصرف کود اوره در مزرعه چغندرقند با استفاده از مدل LEACHN است.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای

این تحقیق در ایستگاه طرق مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ اجرا شد. بر اساس داده‌های هواشناسی ۳۰ ساله، ماه مرداد با دمای ۱۷/۹ تا ۳۴/۴ درجهٔ سانتی‌گراد گرمترین و بهمن‌ماه با ۵/۱- تا ۶/۷ درجهٔ سانتی‌گراد سردترین ماه سال است. میانگین بارندگی سالانه در محل آزمایش ۲۵۴ میلی‌متر است. منطقهٔ آزمایش نیمه‌خشک تا خشک به‌حساب می‌آید.

آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در ۳ تکرار به اجرا درآمد. ابعاد هریک از کرت ها ۲/۵×۶ متر، فاصلهٔ کرت‌ها از یکدیگر ۲ متر و فاصلهٔ بلوک‌ها از هم ۳ متر بود. تیمارهای آبی در پلات اصلی و تیمارهای نیتروژن در پلات فرعی هر کدام با سه سطح در نظر گرفته شد. تیمارهای آبی عبارت بودند از: I_1: آبیاری به هنگامی که ۵۰ درصد رطوبت قابل دسترس از منطقهٔ ریشه تخلیه شود (تیمار بدون تنش) I_2: آبیاری زمانی که ۸۰ درصد رطوبت قابل دسترس تخلیه شود (تنش مداوم)، و I_3: آبیاری زمانی که ۹۰ درصد رطوبت قابل دسترس تخلیه شود (تنش ابتدایی). مدت زمان تنش ابتدایی ۴۱ روز بود. در این مدت هیچ‌گونه آبیاری انجام نشد و بعد از آن آبیاری همانند تیمار یک تا آخر فصل رشد صورت گرفت. علیزاده (Alizadeh, 1999) حداکثر تخلیهٔ مجاز رطوبتی را

برای آنکه چغندرقند به دلیل تنش آبی متحمل صدمه‌ای نشود ۵۵ درصد پیشنهاد کرده است. عمق آب آبیاری بر اساس میزان تخلیهٔ رطوبت از محدودهٔ توسعهٔ ریشهٔ محاسبه و در هر آبیاری رطوبت خاک تا ظرفیت زراعی از آب پر شد. حجم آب مورد نیاز بر اساس مساحت هر پلات براورد و با کنتورهای حجمی به زمین داده شد. برای هر تیمار آبی یک کنتور جداگانه در نظر گرفته شد. جهت توزیع یکنواخت آب در سطح کرت بعد از هر کنتور لولهٔ پلی‌اتیلنی به اندازهٔ عرض کرت قرار داده شد که روی آن سوراخ‌هایی به فواصل ۵۰ سانتی‌متر (برابر عرض پشته‌ها) تعبیه شده بود. بنابراین، به هر خط در هر کرت تقریباً به یک مقدار آب وارد می‌شد. حجم آب مصرفی در تیمارها (I_1 ، I_2، و I_3) به‌ترتیب برابر با ۱۲۳۰۰، ۷۱۰۰، و ۹۷۰۰ مترمکعب در هکتار بود. تیمارهای نیتروژن عبارت بود از N_1: ۸۰ کیلوگرم، N_2: ۱۶۰ کیلوگرم، و N_3: ۲۴۰ کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار. بذر چغندرقند IC از نوع پلی‌ژرم روی پشته‌ها کشت شد. عمق کاشت ۳ سانتی‌متر، فاصلهٔ پشته‌ها از هم ۵۰ سانتی‌متر و فاصلهٔ بوته‌ها پس از تنک‌کردن حدود ۲۰ سانتی‌متر بود. روش آبیاری کرتی و زمین محل آزمایش در سال قبل آیش بود. قبل از کاشت، از لایه‌های خاک جهت تعیین وضعیت عناصر غذایی نمونه‌برداری شد. کمبودهای فسفر، پتاسیم، و سایر عناصر ریز مغذی بر اساس توصیهٔ کودی (۳۰۰ کیلوگرم فسفات و ۲۰۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم) به زمین داده شد. پس از استقرار کامل گیاه و آغاز مقاومت نسبی آن، اعمال تیمارهای تنش شروع شد. تاریخ کاشت در سال‌های ۷۹ و ۸۰ به‌ترتیب ۲۰ و ۲۳ اردیبهشت و تاریخ برداشت نیز به‌ترتیب ۱ آذر و ۲۰ آبان‌ماه بود. تیمارهای تنش آبی در سال ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ به‌ترتیب ۱۶ و ۲۹ روز بعد از کاشت اعمال شد.

طی دورهٔ رشد، رطوبت خاک در فواصل زمانی معین (معمولاً ۳ روزه) از لایه‌های ۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰ و ۸۰-۶۰ سانتی‌متری با دستگاه ترایم قرائت شد. رطوبت فقط در تیمارهای آبی با مصرف ۱۶۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار اندازه‌گیری و جهت مقایسه از متوسط سه تکرار استفاده شد. زمان جوانه‌زنی، سبز شدن، شروع رشد رویشی، رسیدن و برداشت محصول، درصد پوشش گیاهی و عمق توسعهٔ ریشه (برای استفاده در مدل به منظور محاسبهٔ میزان تعرق) طی آزمایش‌هایی اندازه‌گیری شد. بافت خاک، جرم مخصوص ظاهری، هدایت آبی اشباع خاک (به روش بار ثابت در آزمایشگاه)، میزان تبخیر از تشتک کلاس A در مزرعه، دمای حداقل و حداکثر و نیز میزان آبیاری و بارندگی از دیگر پارامترهایی بود که اندازه‌گیری و تعیین شد. برخی ویژگی‌های فیزیکی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. منحنی رطوبتی خاک، در آزمایشگاه با استفاده از دستگاه صفحات فشاری[1] اندازه‌گیری شد. سپس معادله کمپل به منحنی‌های رطوبتی هر لایه برازش و ضرایب معادله مذکور در هر لایه به‌دست آمد.

1- Pressure Plates

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی خاک مزرعهٔ آزمایشی

هدایت آبی اشباع (میلی‌متر در روز)	رطوبت حجمی (درصد)		جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	درصد ذرات خاک			بافت خاک	عمق لایه (سانتی‌متر)
	نقطه پژمردگی	ظرفیت زراعی		سیلت	رس	شن		
۰-۲۰	سیلتی لوم	۲۸	۱۴	۵۸	۱/۴۱	۲۷/۹۹	۱۲/۲۰	۳۱۹
۲۰-۴۰	سیلتی لوم	۲۴	۲۲	۵۴	۱/۵۱	۲۹/۹۰	۱۲/۷۰	۲۵
۴۰-۶۰	لوم	۲۶	۲۴	۵۰	۱/۴۵	۲۶/۹۲	۱۳/۳۰	۱۸۴
۶۰-۸۰	لوم	۳۶	۱۸	۴۶	۱/۴۲	۲۳/۷۱	۹/۸۰	۸۱
۸۰-۱۱۰	شن لومی	۸۰	۵	۱۵	۱/۶۰	۷/۳۴	۱/۶۰	۱۰۰۰

توصیف مدل

مدل LEACHM یکی از مدل‌های شبیه‌سازی است که در چند سال اخیر برای پیش‌بینی و توصیف حرکت آب و املاح در خاک از آن استفاده می‌شود. این مدل از مدل‌های تحقیقاتی است ولی اگر بتوان برخی از داده‌های ورودی آن را (که اندازه‌گیری آنها مشکل است) براورد کرد، می‌تواند به‌عنوان مدل مدیریتی نیز استفاده شود (Hutson & Wagenet, 1992; Nima & Hanks, 1973; Sogbedji *et al*., 2001b). این مدل، شامل پنج مدل مجزاست: LEACHW حرکت آب را در خاک بررسی می‌کند و پیش فرضی برای چهار مدل بعدی است. LEACHN حرکت و واکنش نیتروژن را در خاک بررسی می‌کند. LEACHP حرکت آفت‌کش‌ها را در خاک بررسی می‌کند. LEACHC جریان یون‌های غیر آلی از قبیل کلسیم، منیزیم، سدیم، پتاسیم، سولفات، کلر، کربنات، و بی‌کربنات را شبیه‌سازی می‌کند. و LEACHB مسائل میکروبیولوژی خاک را بررسی می‌کند. در مدل LEACHM یک زیر برنامه وجود دارد که حرکت گرما را در خاک پیش‌بینی و برخی از ویژگی‌های هیدرولیکی یا انتقال املاح را نیز با توجه میزان دما در خاک تعدیل می‌کند. در هر پنج مدل یک قسمت اصلی[1] وجود دارد که وظیفه فراخوانی زیر برنامه‌ها[2] و محل ثبت متغیرهای اولیه را به‌عهده دارد (Hutson & Wagenet, 1992).

ورودی‌های اصلی مورد نیاز مدل LEACHN برای شبیه‌سازی حرکت نیتروژن در خاک عبارت‌اند از:

۱- داده‌های خاک برای لایه‌های مختلف شامل: مقدار اولیه رطوبت یا پتانسیل آب، ضرایب مدل‌های منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی، و مقدار نیتروژن معدنی اولیه در هر لایه.

۲- شرایط مرزی[3] سطح خاک شامل: مقدار بارندگی یا آبیاری و شدت کاربرد آنها، میزان کاربرد کودهای معدنی و زمان آن، متوسط دمای هوا و نیز تفاوت دمای حداکثر و حداقل و مقدار تبخیر از تشتک به‌صورت هفتگی. یادآوری می‌شود که مقدار نیترات و آمونیم در نیمرخ خاک در ابتدای فصل رشد اندازه‌گیری و به‌عنوان شرایط اولیه وارد مدل شد. از نظر شرایط مرزی نیز در سطح خاک حالت تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه یا به‌عبارتی تبخیر و تعرق به‌صورت مقادیر

1 - Main Program 2- Subroutines 3- Boundary Conditions

خروجی و مقدار آبیاری و بارندگی به‌عنوان مقادیر ورودی آب معرفی شد. شرایط مرزی پایین‌دست نیز زهکشی آزاد در نظر گرفته شد.

۳- داده‌های گیاهی شامل: زمان کاشت، زمان رسیدن گیاه و برداشت محصول، درصد پوشش گیاهی و حداکثر عمق توسعهٔ ریشه، ضریب تشتک تبخیر جهت محاسبهٔ تبخیر و تعرق پتانسیل و حداقل مقادیر پتانسیل گیاه و خاک برای جذب آب.

۴- دیگر داده‌های مورد نیاز شامل: ضریب پخشیدگی، ضریب انتشارپذیری، شدت تغییر و تحولات نیتروژن (تصعید آمونیم، نیترات‌زایی، و نیترات‌زدایی).

جز داده‌های ردیف چهار که بعد از مرور منابع موجود و یا از طریق واسنجی مدل مقادیر آنها استخراج گردید، بقیه داده‌های ورودی مورد نیاز مدل، در مزرعه و یا در آزمایشگاه تعیین شد.

نتایج و بحث

واسنجی[1] مدل

داده‌های ورودی مورد نیاز مدلی مانند LEACHN ممکن است مستقیماً در مزرعه یا آزمایشگاه اندازه‌گیری یا با بررسی منابع و از راهنمای مدل تخمین و انتخاب شود. برخی از ضرایب نیز که اندازه‌گیری آنها مشکل یا ناممکن است طی فرایند واسنجی مدل براورد می‌شود (Hutson & Wagenet, 1992; Jabro *et al*., 1995; Jabro *et al*., 1997). واسنجی مدل روشی است که در آن برخی از ضرایب و داده‌های ورودی مدل در حد و دامنه‌ای مورد انتظار به نحوی تغییر می‌کنند که اختلاف بین مقادیر مشاهده و شبیه‌سازی‌شده به حداقل ممکن برسد (Sogbedji *et al*., 2001a). خصوصیات فیزیکی خاک (جرم مخصوص ظاهری، هدایت هیدرولیکی اشباع، و غیره)، ضرایب منحنی رطوبتی و هدایت هیدرولیکی، مقادیر رطوبت اولیه، داده‌های گیاهی (زمان کاشت، جوانه‌زدن، پوشش کامل گیاه، برداشت، حداکثر عمق توسعهٔ ریشه و مقدار جذب سالانهٔ نیتروژن توسط گیاه)، میزان نیتروژن آلی و معدنی و درصد کربن آلی اولیه، مقادیر آبیاری و تبخیر از تشتک و پارامترهای اقلیمی و هواشناسی، از جمله داده‌هایی بودند که اندازه‌گیری و بدون هرگونه تعدیل در مدل استفاده گردید و به‌عبارتی این داده‌ها در واسنجی مدل مورد استفاده قرار نگرفتند. با توجه به نتایج تحلیل حساسیت، مقدار ضرائب نیترات‌زایی و نیترات‌زدایی از طریق واسنجی مدل براورد شد. جهت واسنجی مدل روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از عمومی‌ترین روش‌ها آن است که ضرایب برای یک سال و یک تیمار معین واسنجی و از آن برای ارزیابی مدل در دیگر سال‌ها و تیمارها استفاده شود. روش دیگر آن است که مقدار ضرایب برای هر سال و تیمار جداگانه تعیین و سپس از متوسط ضرایب برای ارزیابی مدل در سال‌ها، تیمارها، یا مکان‌های مختلف استفاده شود (Sogbedji *et al*., 2001a). با این همه، نتایج تحقیقات حاکی از آن است که تفاوت چندانی بین این دو روش وجود ندارد (Sogbedji *et al*., 2001a). در این تحقیق از روش اول بهره گرفته شد. مقادیر آمونیم و نیترات کل خاک در تیمار بدون تنش آبی در سال ۸۰، به‌عنوان داده‌های مشاهده‌شده برای واسنجی مدل به کارگرفته شد. ضرایب مربوط در دامنهٔ مورد انتظار که در منابع مختلف پیشنهاد شده بود تغییر داده شد و پس از اجرای مدل، مقدار آمونیم و نیترات کل شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهده‌شده مقایسه شد و زمانی کار خاتمه یافت که

1- Calibration

خطای متوسط[1] و مجموع مربع خطا[2] کم و ضریب تبیین (R^2) نسبتاً بالا بود. مقدار ضرایب نیترات‌زایی و نیترات‌زدایی به‌ترتیب برابر ۰/۰۱ و ۰/۰۰۴، کمترین خطای متوسط و بیشترین ضریب تبیین را ایجاد کرد و از آنها به‌عنوان مقادیر ورودی در مدل استفاده شد. ضریب‌های نیترات‌زایی بین ۰/۰۰۵ تا ۰/۳۰ و نیترات‌زدایی در منابع بین ۰/۰۰۰۳ تا ۰/۱ گزارش شده است (Hanks & Ritchie, 1991; Jabro *et al*., 1995; Jabro *et al*., 1997; Parehkar, 1998; Sogbedji *et al*., 2001a). ضریب توزیع برای نیترات صفر و برای آمونیم بین ۱ تا ۳ پیشنهاد شده است (Jabro *et al*., 1997; Jemison *et al*., 1994; Ramos & Carbonell, 1991). در این تحقیق ضریب توزیع برای آمونیم ۱ در نظر گرفته شد.

آزمون اعتبار[3] مدل

جهت ارزیابی نتایج و آزمون اعتبار مدل از پارامترهای آماری زیر استفاده شد (Loague & Green, 1991):

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

$$CV = 100(\sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2/n)^{0.5}/ \bar{O}$$

$$EF = (\sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^{n} (P_i - O_i)^2) / \sum_{i=1}^{n} (O_i - \bar{O})^2$$

که در آن، Pi= مقدار براورد شده؛ Oi= مقدار مشاهده‌شده؛ $\bar{O}$= میانگین مقدار مشاهده‌شده؛ n= تعداد نقاط؛ MBE= خطای متوسط؛ CV= ضریب تغییرات[4]؛ و EF= کارایی مدلسازی[5] است.

تعداد خطای متوسط و ضریب تغییرات در حالت اپتیمم یا حالتی که مقادیر براورد و اندازه‌گیری‌شده مساوی باشند، برابر با صفر و کارایی یا راندمان مدل در این حالت برابر با یک است. خطای متوسط شاخصی از مقایسه با مقادیر پایه است به‌طوری که مقدار نزدیک به صفر آن به مفهوم آن است متوسط مقادیر براورد و اندازه‌گیری‌شده متشابه است. علامت مثبت آن نیز نشان‌دهندهٔ آن است که مدل مقادیر را بیشتر تخمین می‌زند، علامت منفی نشان‌دهندهٔ آن است که مدل مقادیر را کمتر پیش‌بینی می‌کند. مقدار EF نیز نشان‌دهنده صحت برازش داده‌هاست و از منفی بی‌نهایت (در بدترین حالت)، تا یک (در زمان برازش کامل داده‌ها) تغییر می‌کند (Antonopoulos, 1997; Antonopoulos, 2000).

در جدول ۲ مقدار شاخص‌های آماری در سال ۷۹ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که در مجموع، مدل از دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی مقادیر آمونیم و نیترات خاک برخوردار است. نتایج آماری حاکی از آن است که جز در عمق ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متری در تیمار بدون تنش آبی و ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری در تیمار تنش آبی ابتدایی که مدل میزان آمونیم را بیشتر براورد می‌کند (علامت مثبت خطای متوسط)، در بقیهٔ موارد و لایه‌ها مقدار آمونیم را کمتر تخمین می‌زند (با توجه به علامت منفی خطای متوسط). بر عکس، مدل مقدار نیترات را معمولا بیشتر براورد می‌کند. میزان خطای متوسط، ضریب تغییرات، و کارایی مدل به‌ترتیب از ۴/۸۲- تا ۲/۲۹، ۹/۶۰ تا ۴۰/۱۹، و ۹/۷۷- تا ۰/۹۸ تغییر یافت. خطای متوسط، ضریب تغییرات، و کارایی مدل جهت براورد مقادیر آمونیم و نیترات در پژوهش‌های مختلف به‌ترتیب برابر با ۰/۰۷۲- تا ۱۶/۱، ۲/۰ تا ۹۳/۰، و ۰/۶۲۱ تا ۰/۷۰۲ گزارش شده است (Jabro *et al*., 1997; Jemison *et al*., 1994; Sogbedji *et al*., 2001c).

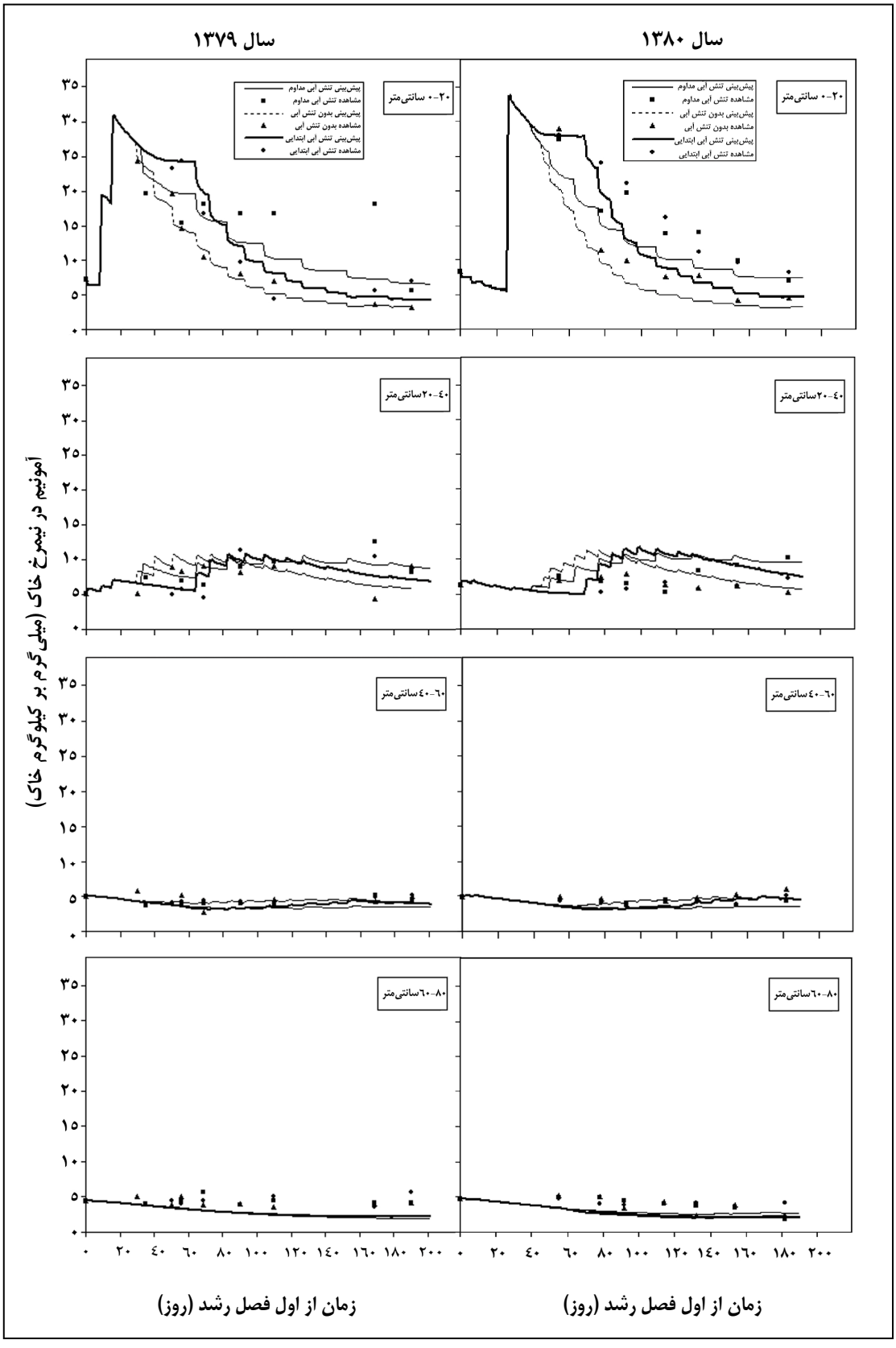
1- Mean Bias Error (MBE) 2- Root Mean Square Error (RMSE) 3- Validation
4- Coefficient of Variation 5- Modelling Efficiency

جدول ۲- نتایج ارزیابی آماری مدل LEACHN برای پیش‌بینی آمونیم و نیترات خاک در سال ۱۳۷۹

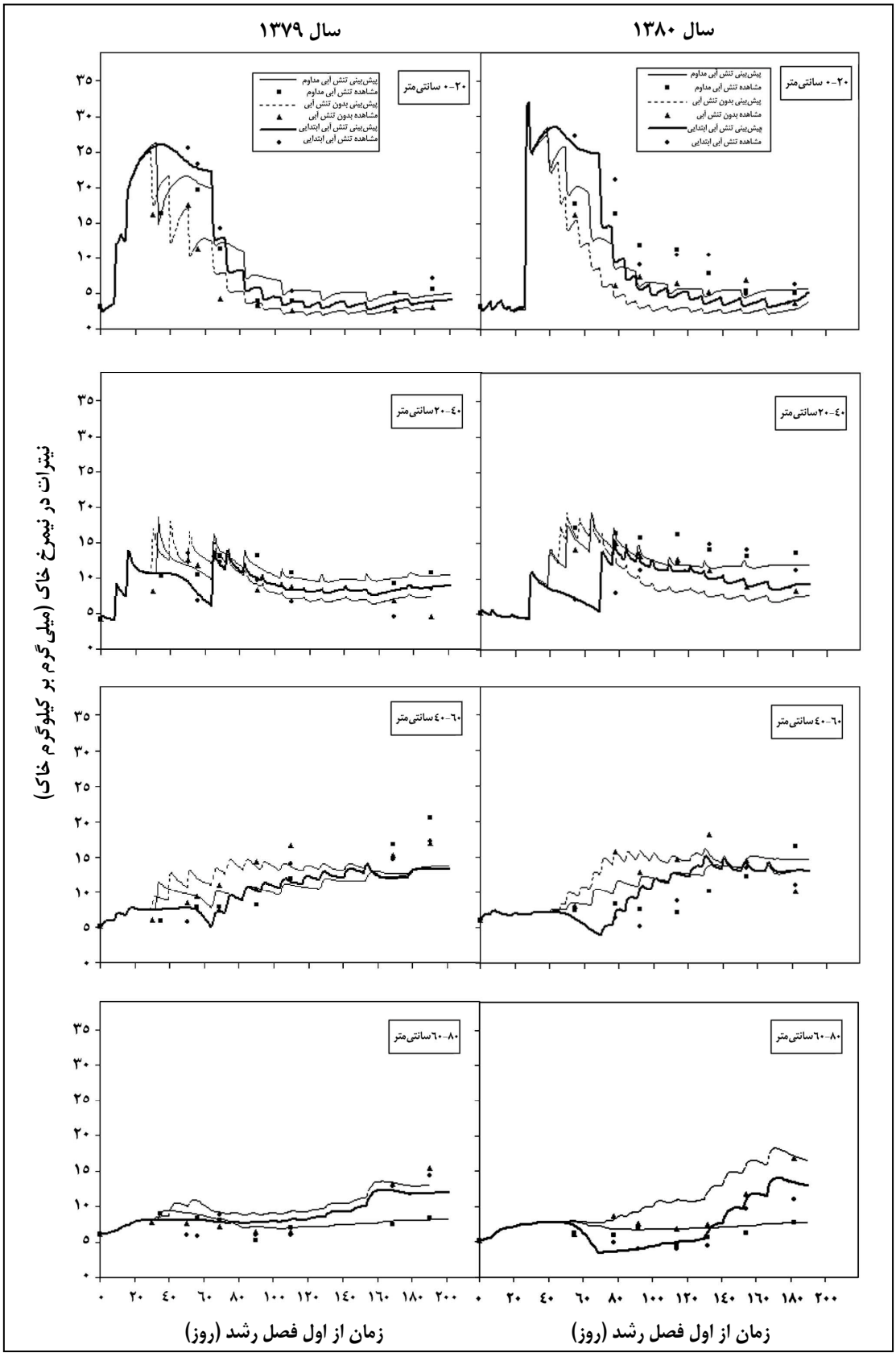
تیمار و عمق خاک	آمونیم در نیمرخ خاک			نیترات در نیمرخ خاک		
	خطای متوسط (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	ضریب تغییرات (درصد)	کارایی مدلسازی	خطای متوسط (میلی‌گرم بر کیلوگرم)	ضریب تغییرات (درصد)	کارایی مدلسازی
بدون تنش:						
۰-۲۰	-۰/۳۸	۹/۱۲	۰/۹۸	۰/۶۶	۱۸/۷۵	۰/۹۸
۲۰-۴۰	۰/۵۴	۲۴/۴۰	۰/۰۴	۱/۳۰	۳۶/۴۹	-۰/۳۸
۴۰-۶۰	-۰/۲۶	۱۸/۳۴	۰/۰۱	-۰/۰۸	۲۱/۵۵	۰/۵۶
۶۰-۸۰	-۱/۰۵	۲۸/۵۰	-۴/۹۰	۱/۱۹	۲۳/۳۸	۰/۵۳
متوسط	-۰/۲۹	۲۰/۰۹	-۰/۹۷	۰/۷۷	۲۵/۰۴	۰/۴۱
تنش مداوم:						
۰-۲۰	-۲/۲۹	۳۴/۳۴	-۰/۰۴	۱/۴۱	۲۶/۹۴	۰/۸۵
۲۰-۴۰	-۰/۲۵	۱۹/۵۵	۰/۴۴	۰/۱۳	۸/۸۴	۰/۸۸
۴۰-۶۰	-۰/۴۷	۱۷/۲۶	-۰/۸۶	-۰/۲۳	۳۲/۳۵	۰/۵۷
۶۰-۸۰	-۱/۴۵	۳۸/۲۶	-۹/۷۷	۰/۴۱	۹/۶	۰/۶۲
متوسط	-۰/۹۹	۲۷/۴۳	-۲/۵۶	۰/۴۳	۱۹/۴۳	۰/۷۳
تنش ابتدایی:						
۰-۲۰	۰/۷۴	۱۷/۲۹	۰/۹۲	-۰/۶۵	۱۶/۸۰	۰/۹۶
۲۰-۴۰	-۰/۲۰	۲۲/۶۰	۰/۵۵	۰/۳۲	۲۴/۵۲	۰/۵۸
۴۰-۶۰	-۰/۷۴	۱۹/۰۶	-۲/۹۳	-۰/۹۸	۱۹/۷۰	۰/۷۸
۶۰-۸۰	-۱/۴۸	۴۰/۱۹	-۷/۵۹	۰/۵۲	۲۱/۵۸	۰/۷۱
متوسط	-۰/۴۲	۲۴/۷۸	-۲/۲۶	-۰/۲۰	۲۰/۶۵	۰/۷۶

بررسی روند تغییرات آمونیم و نیترات در نیمرخ خاک

روند تغییرات غلظت آمونیم و نیترات در تیمارهای آبی بررسی شد. از بین تیمارهای مختلف فقط روند تغییرات تیمار نیتروژن با ۱۶۰ کیلوگرم در هکتار تجزیه و تحلیل می‌شود. این میزان نیتروژن تقریباً برابر با میزان توصیهٔ کودی برای اراضی محل آزمایش بود. مقدار نیتروژن مصرفی در سال ۷۹ در دو نوبت، ۹ و ۱۶ روز بعد از کاشت و در سال ۸۰ در یک نوبت، ۲۷ روز بعد از کاشت، به زمین داده شد. نوع کود استفاده‌شده نیترات آمونیم بود که با توجه به مقدار نیتروژن خالص (۱۶۰ کیلوگرم) به میزان ۴۶۰ کیلوگرم در هکتار تعیین و در زیر خاک توزیع شد. شکل‌های ۱ و ۲ به‌ترتیب روند تغییرات آمونیم و نیترات را در سال‌های ۷۹ و ۸۰ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بلافاصله بعد از کاربرد کود، مقدار آمونیم و نیترات در لایهٔ ۰ تا ۲۰ سانتی‌متری افزایش یافته است. در سال ۷۹، به دلیل کاربرد کود در دو نوبت، افزایش مقدار آمونیم نیز در دو مرحله اتفاق افتاده است.



شکل ۱- مقایسهٔ مقادیر آمونیم براورد و مشاهده‌شده در نیمرخ خاک در تیمارهای مختلف طی سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰



شکل ۲- مقایسهٔ مقادیر نیترات براورد و مشاهده‌شده در نیمرخ خاک در تیمارهای مختلف طی سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰

روند تغییرات نشان می‌دهد که مقدار آمونیم در تیمار بدون تنش آبی در این لایه و در هر زمان (البته بعد از اعمال تنش‌های آبی) کمتر از تیمارهای تنش آبی است زیرا در این تیمار آبی، آب قابل دسترس بیشتر و در نتیجه مقدار آمونیومی که بر اثر نیترات‌زایی به نیترات تبدیل شده زیادتر است که به کاهش مقدار آمونیم انجامیده است.

در تیمار تنش آبی ابتدایی، در زمان اعمال تنش مقدار آمونیم تغییری نکرده و از بقیه تیمارها نیز بیشتر بود. دلیل اصلی آن کمتربودن رطوبت است که قبل از رفع تنش حتی میزان رطوبت به نزدیکی نقطهٔ پژمردگی دائم نیز رسیده است. ولی بعد از آن که تنش شکسته شد و آبیاری طبق نیاز کامل به زمین و مزرعه داده شد، مقدار آن شروع به کاهش کرد هرچند تا حدود ۸۰ روز بعد از کاشت مقدار آن باز هم از بقیهٔ تیمارها بیشتر بود. بعد از این مدت زمان، میزان آمونیم در این تیمار کاهش یافت و مقدار آن از تیمار تنش آبی مداوم کمتر و از تیمار بدون تنش آبی بیشتر شد. می‌توان چنین استنباط کرد که در زمان اعمال تنش آبی ابتدایی، که حدود ۴۹ روز در سال ۷۹ و ۴۱ روز در سال ۸۰ به‌طول انجامید، آمونیم در گیاه جذب نشده است. ولی بعد از آن، با فراهم‌شدن شرایط مناسب از نظر رطوبتی، علاوه بر جذب آمونیم توسط گیاه، مقداری نیز بر اثر نیترات‌زایی به نیترات تبدیل شده است. شیب تند کاهش آمونیم در تیمار تنش آبی ابتدایی، بعد از رفع تنش، نشان از شدت جذب بیشتر آن توسط گیاه و تغییر شکل آن به نیترات دارد.

در تیمار تنش آبی مداوم میزان آمونیم از ۸۰ روز بعد از اوایل فصل رشد تا آخر آن، بیشتر از بقیه است. که دلیل آن کمتربودن رطوبت و تجمع آمونیم در این تیمار است.

نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که مقدار رطوبت خاک عاملی مهم در شدت فرایند نیترات‌زایی است (Hanks & Ritchie, 1991). در لایهٔ دوم، مقدار آمونیم تا قبل از شکستن تنش آبی ابتدایی به‌ترتیب در تیمار بدون تنش، تیمار تنش مداوم، و تیمار تنش آبی ابتدایی کاهش می‌یابد. ولی بعد از آن روند بر عکس می‌شود و در تیمار تنش مداوم از بقیه بیشتر می‌گردد. در لایه‌های پایین‌تر، مقدار آمونیم تغییر چندانی نمی‌کند و برابر با مقدار اولیه آن در خاک است که نشان از نبودن تحرک آمونیم در خاک دارد زیرا بار مثبت آن بر اثر ذرات خاک دارای بار منفی جذب می‌شود.

شکل ۲، روند تغییرات نیترات را در خاک نشان می‌دهد. در این شکل می‌بینیم که در لایهٔ اول روند تغییرات نیترات تقریباً مشابه آمونیم است. مقدار نیترات در تیمار بدون تنش آبی در هر زمان کمتر از بقیه است و نشان از آن دارد که بر اثر آبیاری کامل مقدار نیترات از لایه‌های بالایی به لایه‌های زیرین انتقال یافته است. در تیمار تنش آبی ابتدایی، مقدار نیترات نیز مانند آمونیم تا قبل از اتمام تنش، از دو تیمار دیگر بیشتر است ولی بعد از آن به شدت کاهش می‌یابد و به زیر منحنی تغییرات نیترات در تنش آبی مداوم می‌رسد. در اواخر فصل، بین مقدار نیترات در دو تیمار بدون تنش و تنش ابتدایی تفاوت چندانی وجود ندارد. در سال ۸۰ این اختلاف‌ها کمی بیشتر است.

به طور کلی روند کاهش نیترات، خصوصاً در تیمار تنش آبی ابتدایی، در فصل رشد نسبت به آمونیم زیادتر است که می‌تواند به دو دلیل باشد، یکی اینکه انحلال‌پذیری نیترات در آب بسیار بالاست و با جبهه رطوبتی در داخل نیمرخ خاک حرکت می‌کند. دیگر اینکه گیاه مقدار نیتروژن مورد نیاز خود را عمدتاً به شکل

نیترات جذب می‌کند.

تأثیر تیمارهای آبی بر مقدار نیترات خاک را می‌توان در لایه‌های پایین‌تر جستجو کرد. در لایهٔ سوم و چهارم مقدار نیترات در تیمار بدون تنش آبی، بر خلاف لایه‌های بالاتر، بیشتر است. زیرا در اثر استفاده از مقدار آب بیشتر در این تیمار، نیترات از لایه‌های بالایی شسته‌شده و به لایه‌های پایین‌تر انتقال یافته است. مقدار نیترات در سال ۸۰ و در لایهٔ چهارم نسبت به سال ۷۹ زیادتر است. نتایج بسیاری از پژوهش‌ها حکایت از شستشوی نیترات بر اثر آبیاری دارد (Groves & Baily, 1997; Winter, 1990; Mirnia *et al*., 2000). نتایج مزرعه‌ای نشان می‌دهد که مقدار جذب نیتروژن و عملکرد ریشه در تیمارهای تنش آبی کمتر است. با وجود این به نظر می‌رسد که فراهم‌بودن نیتروژن در تیمارهای تنش آبی تا حدودی توانسته است از شدت کاهش عملکرد بکاهد. به عبارتی مقدار جذب نیتروژن توسط گیاه به آب و نیز به نیتروژن قابل دسترس بستگی دارد که در تیمارهای تنش آبی تا حدودی نیتروژن بیشتر در خاک تأثیر آب را کاهش داده است.

نتایج اندازه‌گیری مزرعه‌ای آمونیم و نیترات در زمان‌های مختلف نیز حاکی از آن است که روند تغییرات آمونیم و نیترات در نیمرخ خاک و در لایه‌های چهارگانه تقریباً مشابه پیش‌بینی‌های مدل است.

بیلان نیتروژن معدنی در خاک

در جدول ۳، بیلان نیتروژن در نیمرخ خاک در سال زراعی ۱۳۷۹ نشان داده شده است. در این جدول دیده می‌شود که با افزایش مقدار آب مصرفی، میزان معدنی‌شدن نیتروژن آلی و نیترات‌زایی آمونیم افزایش یافته است. فاکتورهای بسیاری از قبیل مقدار آمونیم، میزان اکسیژن، دما، تهویه، و رطوبت خاک بر نیترات‌زایی تأثیر دارند (Focht & Verstraete, 1977). به نظر می‌رسد جز مقدار رطوبت خاک، بقیهٔ عوامل تغییر چندانی در تیمارهای آبی ندارند از این رو به احتمال زیاد رطوبت یا آب قابل دسترس بیشتر در تیمار بدون تنش آبی باعث نیترات‌زایی بیشتر شده است.

جدول ۳- بیلان نیتروژن در زمان‌های مختلف طی فصل رشد در تیمارهای آبی سال ۱۳۷۹ (کیلوگرم در هکتار)

زمان از شروع فصل رشد (روز)	مقدار نیتروژن اولیه در نیمرخ خاک	دریافتی از کود نیتروژنی	مقادیر براوردشده توسط مدل (تجمعی)					مقدار نیتروژن معدنی موجود		اختلاف براورد و اندازه‌گیری شده
			نیترات‌زایی آمونیم	معدنی‌شده	تصعید و نیترات زدایی	آبشویی‌شده	جذب توسط گیاه	پیش‌بینی‌شده	اندازه‌گیری‌شده	
			تیمار آبی بدون تنش							
۰	۱۱۶/۸۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۶/۸۳	۱۱۶/۸۳	۰
۳۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۲۹/۲۰	۷/۱۲	۰/۴۰	۰/۱۰	۱۶/۶۹	۲۶۶/۷۵	۲۲۴/۲۰	۴۲/۵۵
۳۵	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۳۴/۹۶	۸/۴۰	۰/۴۴	۰/۲۰	۲۱/۶۵	۲۶۲/۹۸	–	–
۵۶	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۵۴/۴۱	۱۳/۸۶	۱/۲۱	۲/۲۰	۵۴/۳۷	۲۲۳/۹۹	۲۱۴/۴۰	۱۸/۵۹

ادامه جدول ۳-

زمان از شروع فصل رشد (روز)	مقدار نیتروژن اولیه در نیمرخ خاک	دریافتی از کود نیتروژنی	مقادیر براوردشده توسط مدل (تجمعی)					مقدار نیتروژن معدنی موجود		اختلاف براورد و اندازه‌گیری شده
			نیترات‌زایی آمونیم	معدنی‌شده	تصعید و نیترات زدایی	آبشویی‌شده	جذب توسط گیاه	پیش‌بینی‌شده	اندازه‌گیری‌شده	
تیمار آبی بدون تنش										
۶۹	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۶۵/۵۹	۱۷/۲۷	۱/۳۰	۲/۸۰	۸۲/۹۷	۲۰۷/۰۰	۱۸۰/۲۰	۲۶/۸۰
۹۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۷۹/۵۲	۲۲/۵۱	۱/۴۰	۳/۰۰	۱۲۴/۸۷	۱۷۰/۱۶	۱۶۴/۹۰	۵/۲۶
۱۱۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۸۸/۷۸	۲۶/۴۸	۱/۵۰	۳/۰۰	۱۴۶/۴۷	۱۵۲/۴۵	۱۷۰/۷۰	-۱۸/۲۵
۱۶۹	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۱۰۸/۵۶	۳۵/۶۷	۱/۶۰	۳/۰۰	۱۵۹/۰۷	۱۴۸/۷۷	۱۵۶/۷۰	-۷/۹۳
۱۹۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۱۱۲/۸۶	۳۷/۵۱	۱/۶۰	۳/۲۰	۱۵۹/۴۱	۱۵۰/۲۱	۱۷۸/۲۰	-۲۷/۹۹
۰	۱۱۶/۸۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۶/۸۳	۱۱۶/۸۳	۰
۳۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۲۹/۳۴	۷/۱۸	۰/۳۰	۰/۱۴	۱۴/۰۵	۲۶۹/۵۱	-	-
۳۵	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۳۴/۶۱	۸/۳۹	۰/۵۸	۰/۲۱	۱۷/۹۷	۲۶۶/۴۲	۲۱۹/۳۰	۴۷/۱۲
۵۶	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۵۱/۶۴	۱۲/۹۴	۰/۶۹	۱/۰۸	۴۵/۴۵	۲۴۲/۵۴	۲۲۱/۰۰	۲۱/۵۴
۶۹	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۵۸/۲۸	۱۴/۸۷	۰/۷۸	۱/۲۲	۶۹/۲۶	۲۲۰/۳۹	۲۱۴/۸۰	۵/۵۹
۹۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۶۸/۱۰	۱۸/۰۱	۰/۸۵	۱/۲۸	۱۰۴/۰۶	۱۸۸/۶۲	۱۸۶/۴۰	۲/۲۲
۱۱۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۷۴/۵۲	۲۰/۱۲	۰/۹۰	۱/۲۹	۱۲۲/۰۱	۱۷۲/۶۴	۱۹۸/۸۰	-۲۶/۱۶
۱۶۹	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۸۹/۹۲	۲۵/۰۵	۰/۹۸	۱/۳۰	۱۳۲/۵۶	۱۶۷/۱۵	۲۲۷/۷۰	-۶۰/۵۵
۱۹۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۹۴/۱۳	۲۶/۴۳	۰/۹۹	۱/۳۱	۱۳۲/۸۴	۱۶۸/۱۴	۱۷۶/۶۰	-۸/۴۶
تیمار آبی تنش ابتدایی										
۰	۱۱۶/۸۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۱۶/۸۳	۱۱۶/۸۳	۰
۳۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۲۹/۲۹	۷/۱۷	۰/۳۰	۰/۱۴	۱۵/۶۰	۲۶۷/۹۳	-	-
۳۵	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۳۴/۵۸	۸/۵۲	۰/۳۱	۰/۲۱	۲۰/۰۵	۲۶۴/۷۵	-	-
۵۶	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۴۴/۳۰	۱۱/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۹	۵۰/۵۰	۲۳۶/۹۲	۲۳۴/۷۰	۲/۲۲
۶۹	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۵۱/۳۵	۱۳/۲۲	۰/۴۴	۰/۴۵	۷۶/۹۲	۲۱۲/۱۸	۲۰۹/۳۰	۲/۸۸
۹۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۶۷/۳۲	۱۸/۱۱	۰/۶۰	۰/۴۹	۱۱۵/۶۵	۱۷۸/۲۱	۱۷۰/۸۰	۷/۴۱
۱۱۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۷۸/۳۷	۲۲/۰۱	۰/۷۰	۰/۵۲	۱۳۵/۶۵	۱۶۲/۰۰	۱۶۰/۳۰	۱/۷۰
۱۶۹	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۱۰۱/۵	۳۰/۹۰	۰/۹۶	۰/۶۰	۱۴۷/۲۹	۱۵۹/۲۲	۱۷۲/۴۰	-۱۳/۱۸
۱۹۰	۱۱۶/۸۳	۱۶۰	۱۰۶/۳۹	۳۳/۰۱	۰/۹۷	۰/۷۴	۱۴۱/۶۱	۱۶۰/۶۴	۲۱۲/۲۰	-۵۱/۵۶

بین تیمارها از لحاظ مقدار تصعید و نیترات‌زدایی تفاوت چندانی وجود ندارد. در کل، به دلیل پایین‌بودن شدت این فرایندها در آزمایش مذکور تلفات نیتروژن ناشی از این موارد به حداقل ممکن رسیده است.

عوامل مختلفی مانند مقدار آب خاک، مقدار آب آبیاری، دما، ظرفیت تبادل کاتیونی، بافت خاک، و مقدار نیتروژن مصرفی بر میزان تلفات نیتروژن ناشی از تصعید آمونیم و نیترات‌زدایی مؤثرند (Focht & Verstraete, 1977; Mirnia *et al*., 2000).

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که نیترات‌زدایی فقط زمانی اتفاق می‌افتد که رطوبت خاک بیشتر از رطوبت ظرفیت زراعی باشد (Focht & Verstraete, 1977). با این حال پتانسیل نیترات‌زدایی وقتی خاک مرطوب نگه داشته شود، افزایش می‌یابد. در نتیجه تلفات در تیمار بدون تنش آبی و تنش آبی ابتدایی به‌دلیل مصرف بیشتر آب و بالاتربودن رطوبت خاک در هر زمان، بیشتر است. میزان تلفات ناشی از آبشویی نیترات به‌دلیل آنکه مقدار آب مصرفی در حد گنجایش ظرفیت زراعی خاک بود، حداقل است.

تفاوت عمده از نظر بیلان نیتروژن در تیمارهای آبی، ناشی از مقدار جذب نیتروژن توسط گیاه است. در تیمار بدون تنش آبی به دلیل آنکه درصد رطوبت قابل جذب به‌وسیله گیاه در طول فصل رشد بیشتر بوده است، در نتیجه میزان جذب نیتروژن نیز افزایش یافته است.

بعد از این تیمار، تیمار تنش آبی ابتدایی جذب نیتروژن بیشتری داشته است. به عبارتی، رابطهٔ بین جذب نیتروژن و مقدار رطوبت خاک، رابطه‌ای مثبت است. در تیمار تنش آبی مداوم، به دلیل بیشتربودن مقدار نیتروژن قابل دسترس در خاک، باید بر میزان جذب نیتروژن افزوده شود، ولی کمتربودن رطوبت قابل دسترس جذب نیتروژن را تا حدودی کاهش داده است. نتایج تحقیقات حکایت از رابطهٔ خطی مثبت بین جذب نیتروژن توسط چغندرقند و مقدار آب قابل دسترس خاک دارد (Groves & Baily, 1997; Winter, 1990).

از نظر مقدار نیتروژن باقیمانده در آخر فصل رشد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل مقدار نیتروژن باقیمانده در نیمرخ خاک را با دقت قابل قبولی براورد می‌کند. با این حال میزان نیتروژن باقیمانده در تیمار تنش آبی ابتدایی از دو تیمار دیگر بیشتر است.

نتیجه‌گیری

بررسی روند تغییرات نیتروژن معدنی خاک نشان داد که بلافاصله بعد از کاربرد کود، مقدار آمونیم و نیترات در لایهٔ اول به‌شدت افزایش می‌یابد. در لایهٔ سطحی، مقدار آمونیم در تیمار بدون تنش آبی کمتر از تیمارهای تنش آبی بود که دلیل آن شاید افزایش پدیدهٔ نیترات‌زایی باشد زیرا بالابودن رطوبت، شرایط مناسب را برای این فرایند مهیا می‌کند.

در تیمار تنش آبی مداوم تقریباً در سرتاسر فصل رشد (جز در مراحل اولیه) مقدار آمونیم در این لایه بیشتر بود که به‌دلیل خشکی بیشتر، از نظر زمانی رطوبت چندانی برای این فرایند وجود نداشته است.

در تیمار تنش آبی ابتدایی، در زمان اعمال تنش آبی میزان آمونیم تغییری نکرد و بیشتر از بقیه بود ولی بعد از آنکه تنش شکسته شد مقدار آن به‌شدت کاهش یافت. شیب تند کاهش آمونیم، نشان از شدت جذب این ماده

توسط گیاه و نیز رخ دادن نیتراتزایی دارد. در لایهٔ دوم نیز روند تغییرات آمونیم تقریباً مشابه لایهٔ اول ولی با مقادیر بهمراتب کمتر بود. در اعماق پایینتر، آمونیم تغییر چندانی نکرد که نشاندهندهٔ جذب نشدن آمونیم از لایههای پایینی و نیز بهدلیل بار مثبت آمونیم و تحرک بسیار کم آن است. روند تغییرات نیترات در لایهٔ اول مشابه آمونیم بود. تیمار بدون تنش آبی کمترین مقدار و تیمار تنش آبی مداوم بیشترین مقدار را دارا بود.

از نظر شدت تغییرات، نیترات نسبت به آمونیم تغییرات بیشتری داشت. که دو دلیل دارد: یکی اینکه با توجه به انحلالپذیری بالای نیترات، این ماده با آب و جبههٔ رطوبتی به صورت تودهای انتقال مییابد. دیگر اینکه گیاه مقدار نیتروژن مورد نیاز خود را بیشتر به شکل نیترات جذب میکند.

با افزایش عمق خاک، مقدار نیترات در تیمار بدون تنش آبی افزایش یافت که دلیل آن شتشوی نیترات و حرکت آن به سمت لایههای پایینتر است و بهعبارت بهتر، در تیمار بدون تنش آبی در هر زمان مقدار نیترات کمتری برای استفادهٔ گیاه در لایههای بالا وجود دارد و برعکس در تیمارهای تنش مقدار آن بیشتر است.

استفاده از مدلهای ریاضی در بررسی روابط آب، خاک و گیاه روز به روز در حال افزایش است. پیشنهاد میشود که مدلهای مختلف، خصوصاً مدلهایی که در آن عملکرد گیاه را نیز براورد و در نظر میگیرند، در تحقیقات به کار گرفته شوند تا بتوان از آنها بهعنوان ابزار مدیریتی بهره جست.

مراجع

Acutis, M. 1997. Modeling leaching of nitrate: Calibration and validation of LEACHN model in different soils and forage crops .Rivista-di-Agronomia. (Italy). 31(1): 42-51.

Alan, D. J., Miguel, L. C. Daniel, V. M. and David, E. R. 1999. LEACHN simulations of nitrogen dynamics and water drainage in an ultisol. Agron. J. 91, 597-606.

Alizadeh, A. 1999. Relation of Water, Soil and Plant. Emam Reza University Pub. Mashhad. Iran. (in Farsi)

Antonopoulos, V. Z. 1997. Simulation of soil moisture dynamics on irrigated cotton in semi-arid climates. Agric. Water Manag. 34, 233-246.

Antonopoulos, V. Z. 2000. Modeling of soil water dynamics in an irrigated corn field using direct pedotransfer functions for hydraulic properties. Irrig. Drain. Sys. 14, 325-342.

Focht, D. D. and Verstraete, W. 1977. Biochemical ecology of nitrification and denitrification. Adv. Microb. Ecol. 1, 135-214.

Groves, S. J. and Baily, R. J. 1997. The influence of sub-optimal irrigation and drought on crop yield, N uptake and risk of N leaching from sugar beet. Soil Use Manag. 12, 129-133.

Hanks, R. J. and Ritchie, J. T. 1991. Modeling plant and soil systems. Publishers Madison. Wisconsin USA.

Hutson, J. L. and Wagenet, R. J. 1992. LEACHM. 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. Dept. of Agronomy. Cornell University. Ithaca. N. Y.

Jabro, J. D., Jemison, J. M. Lengnick, L. L. Fox, R. H. and Fritton, D. D. 1993. Field validation and comparison of LEACHM and NCSWAP models for predicting nitrate leaching. Trans. ASAE 36(6): 1651-1657.

Jabro, J. D., Toth, J. D., Dou, Z., Fox, R. H. and Fritton, D. D. 1995. Evaluation of nitrogen version of LEACHM for prediction nitrate leaching. Soil Sci. 160(3): 209-217.

Jabro, J. D., Stout, W. L. Fales, S. L. and Fox, R. H. 1997. Nitrate leaching from soil core lysimeters treated with urine or feces under orchard grass: Measurement and simulation. J. Environ. Qual. 26, 89-94.

Jemison, J. M., Jabro, J. D. and Fox, R. H. 1994. Evaluation of LEACHM: II. Simulation of nitrate leaching from nitrogen-fertilized and manure corn. Agron. J. 86, 852-859.

Jolaini, M., Pazira, A. Parehkar, M. and Abedi, M. J. 2005. Estimation the moisture in sugar beet root development limit by using LEACHM model. J. Agric. Sci. Natural Resources of Gorgan University. Iran. Special Issue on Agronomy and Plant Breeding Dec.-Jan.12, 28-38. (In Farsi)

Ling, Ge. and El-Kadi, A. I. 1998. A Lumped parameter model for nitrogen transformation in the unsaturated zone. Water Resour. Res. 34(2): 203-212.

Loague, K. and Green, R. E. 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. J. Contam. Hydrol. 7, 51-73.

Mirnia, S., Mohammadian, M. and Fallah, W. M. 2000. Nitrogen management in irrigated agriculture. Mazandaran University Pub. Iran. (in Farsi)

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. Agri. Water Manag. 43, 111-131.

Nima, M. N., and Hanks, R. J. 1973. Model for estimation of soil water, plant, and atmospheric interrelations: I. Description and sensitivity. Soil Sci. Am. Proc. 37, 522-527.

Parehkar, M. 1998. Recharge processes under arid semi-arid areas (laboratory experiment and modeling). Ph.D. Thesis. Cranfield University. Silsoe. England.

Ramos, C. and Carbonell, E. A. 1991. Nitrate leaching and soil moisture prediction with the LEACHM model. Fertilizer Res. 27, 171-180.

Sogbedji, J. M., Van Es, H. M. and Hutson, J. L. 2001a. N fate and transport under variable cropping history and fertilizer rate on loamy sand and clay loam soils: I. Calibration of the LEACHN model. Plant and Soil. 229, 57-70.

Sogbedji, J. M., Van Es, H. M. Hutson, J. L. and Geohing, L. D. 2001b. N fate and transport under variable cropping history and fertilizer rate on loamy sand and clay loam soils: II. Performance of LEACHMN model using different calibration scenarios. Plant and Soil. 229, 71-82.

Sogbedji, J. M., Van Es, H. M. Klausner, S. D. Bouldin, D. R. and Cox, W. J. 2001c. Spatial and temporal processes affecting nitrogen availability at the landscape scale. Soil Till. Res. 58, 233-244.

Soudi, B., Agbani, M. and Badraoui, M. 1997. Impact of N-fertigation of sugar beet on nitrate leaching. Comptes Rendusdes Congres de Institut International de Recherches Betteravieres, Belgium. 60, 265-271.

Vickner, S. S., Hoag, D. L. Frasier, W. M. and Ascoagh, J. C. 1998. A dynamic economic analysis of nitrate leaching corn production under nonuniform irrigation conditions. Am. Agric. Econ (USA). 80(2): 397-408.

Winter, S. R. 1990. Sugarbeet response to nitrogen as affected by seasonal irrigation. Agron. J. 82, 984-988.

AERI JAER *Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.9/No.1/Spring 2008/P: 31-48*

Assessment of Ammonium and Nitrate Variations in Soil Profiles Using the LEACHN Model

M. Jolaini and F. Abbasi*

*Corresponding Author: Assistant Professor, Agricultural Engineering Research Institute, P. O. Box: 31585-845, Karaj, Iran. E-mail: abbasi_fariborz@yahoo.com

The effect on sugar beets of water and nitrogen movement in the soil under different water conditions was assessed over two years (2000-1) at the Khorasan Agricultural Research Center. Three water treatments (no water stress, continuous stress and primary stress) and three N amounts (80, 160 and 240 kg N/ha) were investigated. The amount of moisture depletion in the water treatments was 50%, 80% and 90%, respectively. The leaching estimation and chemistry model (LEACHM) is a process-based model developed by Hutson and Wagenet (1992) that describes water and solute movement, transformation, plant uptake and chemical reactions in unsaturated soils. The model applies numerical techniques to the Richard's water flow equation and the convection dispersion equation (CDE) using finite difference methods. The LEACHM model contains four modules: LEACH-W simulates only the water regime, LEACH-N simulates nitrogen transport and transformation; LEACH-P simulates the pesticide displacement and degration; LEACH-C simulates the transient movement of inorganic ions. LEACH-N, the version of LEACHM that addresses N dynamics, was selected for this study because it has subroutines to calculate water flow, NO_3 leaching, evapotranspiration, heat flow, rate content adjustments for temperature and water content, N transformations and uptake. Mineralization, nitrification, denitrification and volatilization are the major N transformation processes modeled by LEACH-N. The model predicted the amounts of moisture, ammonium and nitrate in the soil with acceptable precision. The correlation between the measured and predicted amounts was significant at the 1% level. Immediately after the application of N, the amounts of ammonium and nitrate in the surface layers increased sharply. The amount of ammonium in the surface layers was less for the non-stress treatment than the other treatments. Ammonium and nitrate uptake decreased at the time of stress, but increased after stress. By increasing the soil depth, the amount of nitrate in the non-stress treatment increased. In stress treatments, the amount of N losses caused by ammonium volatilization, denitrification and nitrate leaching decreased.

Key Words: Ammonium, LEACH-N Model, Nitrate, Sugarbeet