

## واسنجی و اعتبارسنجی مدل WAVE در شبیه‌سازی اجزای بیلان نیتروژن خاک

نرجس زارع و محمدرضا خالدیان<sup>1</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، مهندسی آب، دانشگاه گیلان، رشت، ایران؛ mkh572000@yahoo.com

استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان، رشت، ایران؛ Khaledian@guilan.ac.ir

دریافت: 92/3/26 و پذیرش: 92/8/15

### چکیده

کاربرد مدل‌ها در توصیف روابط آب، خاک و گیاه تحت شرایط مختلف، باعث سهولت بررسی سناریوهای گوناگون مدیریتی و تعیین حالت بهینه به منظور استفاده حداقل از نهاده‌های گران‌قیمت تولید برای دستیابی به حداکثر عملکرد شده است. با توجه به اینکه مطالعات مزرعه‌ای زمان‌بر و هزینه‌بر هستند و گاهی اوقات نتایج آن تحت تأثیر شرایط غیرقابل کنترل محیطی قرار می‌گیرند بنابراین استفاده از مدل‌های کارآمد در توصیف فرآیندهای پیچیده ناشی از اثرات متقابل آب، خاک و گیاه می‌تواند راهگشا باشد. هدف از این تحقیق کاربرد مدل WAVE<sup>2</sup> به منظور تعیین اجزای بیلان نیتروژن و شبیه‌سازی ذخیره رطوبت خاک در طول فصل زراعی ذرت در سال 2007 و همچنین اجزای بیلان نیتروژن خاک بدون پوشش از زمان برداشت محصول ذرت تا زمان کشت فصل زراعی بعد (میان فصل 2007-2008) است. این تحقیق در موسسه تحقیقاتی ایرستیا در شهر مونپلیه فرانسه در دوره زمانی 2007-2008 صورت گرفت. مقادیر خروجی مدل شامل شاخص سطح برگ ( $r^2=0/95$ )، ذخیره آب خاک ( $r^2=0/96$ ) و میزان نیتروژن نهایی خاک (اختلاف حداکثر 0/6 کیلوگرم در هکتار) با مقادیر اندازه‌گیری شده تطابق قابل قبولی را نشان داد. همچنین براساس شاخص‌های آماری  $nRMSE^3$  و  $NSE^4$  در خصوص واسنجی ذخیره آب خاک که به ترتیب معادل 7 درصد و 0/95 حاصل شدند، کارایی مدل در رده عالی ارزیابی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: حرکت آب، حرکت املاح در خاک، مدل‌سازی، آبخویی نیترات

### مقدمه

راستا، استفاده بی‌رویه فرآورده‌های شیمیایی در بخش کشاورزی موجب آلودگی محیط‌زیست به‌خصوص آلودگی منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. عنصر نیتروژن یک عامل حیاتی برای رشد و نمو گیاه است. هرگونه کمبود نیتروژن موجب کاهش عملکرد گیاه و در نتیجه درآمد کشاورز خواهد بود. از این رو کشاورزان،

افزایش نیاز آبی در کشاورزی، صنعت و سایر بخش‌ها، همچنین کاهش منابع آبی در دسترس، موجب افزایش رقابت در بخش‌های مختلف به منظور تأمین آب شده است (خالدیان و همکاران، 2013). از طرفی توسعه دخالت بشر در محیط‌زیست طبیعی، باعث پراکنده شدن آلودگی‌ها در محیط زیرسطحی خاک شده است. در این

<sup>1</sup> نویسنده مسئول: آدرس: رشت، دانشگاه گیلان، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب کدپستی 4713986-13996

<sup>2</sup> Water and Agrochemicals in the soil, crop and Vadose Environment

<sup>3</sup> Normalized Root Mean Square Error

<sup>4</sup> Nash- Sutcliffe Efficiency

از پروفیل خاک در عمق یک متر و در دوره شبیه‌سازی، بین 10- تا 10+ کیلوگرم در هکتار پیش‌بینی شد. نتایج آنالیز حساسیت حاکی از آن است که مقدار ضریب گیاهی بر مقادیر شبیه‌سازی شده به‌وسیله‌ی مدل WAVE، تأثیر چشمگیری دارد. با توجه به شاخص‌های آماری ( $EF^2$  و  $RMSE^1$ ) مربوط به رطوبت حجمی خاک که در سال واسنجی به‌ترتیب 15/58 و 0/96 و برای سال اعتبارسنجی به‌ترتیب 15/62 و 0/96 محاسبه شد؛ می‌توان گفت که توانایی پیش‌بینی روند تغییرات آب در خاک آبیاری شده درشت دانه مناسب بوده است (فرناندز و همکاران، 2002).

دوویگ و همکاران (2003) در شمال کشور فرانسه این مدل را روی دو سری از داده‌ها مورد ارزیابی قرار دادند. در سه سال متوالی، سرعت آب و غلظت نیترات در مناطق دارای پوشش سطحی و کود اعمالی متفاوت اندازه‌گیری شد. پس از انجام آنالیز حساسیت، قابلیت پیش‌بینی مدل با مقایسه مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده میزان جریان نیترات و آب در دو سال متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. بهترین نتایج مدل، مربوط به شرایط مرطوب بوده است و آلودگی آب‌های زیرزمینی به‌عنوان یک مشکل بحرانی بیان شده است. در نهایت با وجود پیش‌بینی کاملاً مناسب مدل، مطالعات بیشتر در خصوص آن پیشنهاد شد. برای ارزیابی میزان شستشوی نیتروژن، تعدادی آزمایش مزرعه‌ای در خصوص مدل-سازی تغییرات نیتروژن با استفاده از مدل WAVE انجام شد. این آزمایش در سه مرحله واسنجی، اعتبارسنجی و آنالیز سناریوهای مختلف برای آزمون عوامل مؤثر در شستشوی نیتروژن در عمق ریشه، انجام شد.

یکی از مشکلات این تحقیق، اندازه‌گیری نیتروژن معدنی شده و مقدار اولیه مواد آلی در زیرلایه‌های مختلف در مرحله واسنجی بود. نتیجه آنالیز سناریوها مشخص کرد که شستشوی نیتروژن در خارج از نیم‌رخ خاک تحت تأثیر عواملی از جمله فعالیت کوددهی، عمق بارندگی و توزیع آن، بافت خاک، ظرفیت معدنی شدن و فعالیت کوددهی گذشته کنترل می‌شود (دوشین و همکاران، 2001). خاک‌های مختلف دارای الگوهای مختلف آبشویی هستند. این امر به دلیل رفتار متفاوت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک همچنین پیشینه زراعی خاک است (ورهاگن و بوما، 1998).

میزان کود نیتروژن مصرفی را افزایش می‌دهند تا حداکثر محصول را برداشت کنند. به‌همین دلیل آلودگی منابع آب به‌وسیله‌ی نیتروژن ناشی از مصرف بی‌رویه کودها، به‌عنوان یک موضوع مطالعاتی مهم درآمده است. هرگونه آبشویی نیتروژن در زیر منطقه توسعه ریشه گیاه می‌تواند موجب آلودگی منابع آب گردد. بررسی تأثیر کوددهی بر محیطزیست می‌تواند هم از طریق آزمایش مزرعه‌ای و هم از طریق مدل صورت گیرد (فالت و همکاران، 1995). بنابراین اهمیت شبیه‌سازی بیلان نیتروژن در مجموعه به-هم پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر مشخص می‌گردد.

مدل‌ها ابزار مناسبی برای بازسازی یک سامانه واقعی براساس قوانین حاکم بر بخش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن هستند؛ هرچند گاه تأمین بخشی از ورودی‌های مدل با دشواری‌هایی روبروست (ادیسکات و همکاران، 2001). مدل‌های مختلفی با کاربردهای گوناگون به‌منظور درک بهتر از فرآیند انتقال آب و املاح در خاک و نیز حل مشکلات مرتبط با آلودگی محیطزیست، ناشی از کشاورزی صنعتی، توسعه داده شده‌اند (ادیسکات و همکاران، 1985؛ بروسیو و راوو، 1990؛ سیمونک و همکاران، 1999). هر چند مدل کردن این فرآیندها به دلیل پیچیده بودن بیلان نیتروژن و انجام فرآیندهای مختلف فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی همچنین وجود تغییرات زمانی و مکانی در مقیاس مزرعه و حوزه آبخیز، کار ساده‌ای نیست؛ به‌همین دلیل تعداد مدل‌های جامع‌نگری که توسعه داده شده‌اند زیاد نیست، از طرف دیگر این مدل‌ها بسیار پیچیده بوده و تأمین داده‌های ورودی همچنین واسنجی و اعتبارسنجی آن‌ها کار مشکلی است. مدل WAVE در یک اقلیم معتدل توسعه داده شده است (ون‌کلستر و همکاران، 1994). یک مدل باید قبل از کاربرد در مکانی دیگر واسنجی و اعتبارسنجی گردد (دوویگ و همکاران، 2003).

ون‌کلستر و همکاران (1995) از داده‌های یک دوره سه ساله برای ارزیابی مدل WAVE استفاده کردند. داده‌های سال اول برای واسنجی و سایر داده‌های باقی‌مانده برای ارزیابی پیش‌بینی برخی پارامترها شامل درصد آب خاک، میزان نیترات و آمونیوم خاک، دمای خاک، مکش آب خاک، میزان توسعه سطح برگ و ماده خشک تجمعی در اندام‌های مختلف گیاه استفاده شد. بررسی آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که بیلان نیتروژن محاسبه شده، نسبت به خصوصیات هیدرولیکی خاک و عامل‌های ضریب گیاهی حساس می‌باشد. این حساسیت به‌وسیله‌ی شبیه‌سازی مونت کارلو مورد بررسی قرار گرفت. با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی خاک، میزان نیترات خارج

<sup>1</sup> Root Mean Square Error

<sup>2</sup> Efficiency Factor

محل انجام آزمایش جمع‌آوری شد (جدول 1). براساس روش USDA<sup>1</sup> (عمق 0-120 سانتی‌متر)، بافت غالب خاک، لومی می‌باشد. سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده خاک در جدول 2 ارائه شده است.

تحقیقی به‌وسیله‌ی ون‌کلوستر و همکاران (2000) به منظور اعتبارسنجی مدل WAVE در مورد شستشوی آفت‌کش انجام شد. در مدل WAVE برای شبیه‌سازی جذب و انتقال آفت‌کش از ایزوترم جذب خطی استفاده می‌شود. بررسی‌های مدل در دو خاک شنی و لومی انجام گرفت. نتایج نشان داد که تشریح وضعیت و انتقال آفت-کش به‌وسیله‌ی مدل، ضعیف بوده است. با توجه به ضعف‌های مدل که شامل تشریح جذب غیرخطی و تصعید آفت‌کش می‌باشد، بهتر است که توسعه آینده مدل در راستای بهبود پارامترسازی، کاهش خروجی نامطمئن و پردازش بهتر پروسه‌های ضروری قرار گیرد.

در مطالعه السادک و همکاران (2003) مدل WAVE برای شبیه‌سازی بیلان نیتروژن در یک خاک شنی با کاربرد کود حیوانی در کشور بلژیک به‌کار برده شده است. در مطالعه ورسترانتن و همکاران (2005) از این مدل برای محاسبه تبخیر-تعرق واقعی استفاده شده است. در مطالعه ون‌کلوستر و همکاران (1995) از مدل برای شبیه‌سازی بیلان آب و نیتروژن گیاه چغندر و گندم در آلمان استفاده شده است. هدف تحقیق حاضر ارزیابی مدل WAVE به‌منظور تخمین اجزای بیلان نیتروژن و میزان آب خاک در منطقه توسعه ریشه گیاه در یک اقلیم مدیترانه‌ای با کاربرد کود شیمیایی می‌باشد که تاکنون انجام نشده است. اقلیم مدیترانه‌ای دارای بارندگی‌های نامنظم است و در منطقه مورد مطالعه معمولاً در ابتدای پاییز یک بارندگی سنگین مشاهده می‌شود که بیلان نیتروژن خاک را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد.

در صورت مطلوب بودن نتایج مدل می‌توان از آن در مناطق شالیزاری در شمال کشور که دارای اقلیم مشابهی است برای مدیریت بهتر آب و کود و بخصوص جلوگیری از آلودگی به نترات منابع آبی استفاده کرد.

### مواد و روش‌ها

به‌منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل WAVE آزمایشی مزرعه‌ای در مرکز تحقیقاتی ایرستیا (43°40' شمالی، 3°50' شرقی با ارتفاع 30 متر از سطح دریا) واقع در جنوب فرانسه و 15 کیلومتری شمال دریای مدیترانه، روی گیاه ذرت در فصل زراعی 2007 و خاک بدون پوشش در فاصله فصل زراعی ذرت در سال 2007 و 2008 انجام شد. بارندگی متوسط سالانه در این منطقه بر اساس یک دوره آماری 20 ساله، 780 میلی‌متر در سال گزارش شد. میزان تبخیر و تعرق سالانه که به روش پنمن محاسبه شد (870 میلی‌متر در سال)، از بارندگی سالانه تحت شرایط آب و هوایی مدیترانه‌ای بیش‌تر بوده است. داده‌های اقلیمی، به‌وسیله‌ی ایستگاه هواشناسی واقع در

<sup>1</sup> United State Department of Agriculture

جدول 1- میانگین ماهانه داده‌های هواشناسی (1991-2010)

شماره ماه سال	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
حداکثر دما (°C)	12	14	17	19	23	28	31	30	25	21	16	31
حداقل دما (°C)	2	1	4	7	11	14	16	17	13	11	5	2
تبخیر و تعرق (mm)	12	27	57	86	122	153	108	141	84	42	18	9
بارندگی (mm)	73	41	36	62	46	36	24	50	145	107	80	89

جدول 2- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک منطقه مورد مطالعه (عمق 0-30 سانتی‌متر از سطح خاک)

رس (%)	سیلت (%)	شن (%)	نوع بافت (USDA)	ماده آلی (%)	کربن آلی (%)	نیتروژن کل (%)	نسبت C/N
18	47	35	لومی	1/34	0/78	0/08	10

منبع نیترات آمونیم در دو نوبت ابتدای فصل رشد و 70 روز پس از کشت، اعمال شد که به ترتیب مقادیر 93 کیلوگرم در هکتار و 87 کیلوگرم در هکتار را شامل می‌شوند. بعلاوه میزان نیتروژن اولیه خاک معادل 166 کیلوگرم در هکتار تا عمق 1/5 متری نیز اندازه‌گیری شد. نیتروژن موجود در بخش‌های مختلف اندام هوایی گیاه از جمله برگ، ساقه و دانه نیز به‌وسیله‌ی روش کج‌لدال در زمان برداشت محاسبه شد. برای تخمین میزان نیتروژن معدنی شده از رابطه 1 (سکستون و همکاران، 1996) کمک گرفته شد.

$$N_{\text{Min}} = N_{\text{F}} - N_{\text{I}} + N_{\text{P}} + N_{\text{MF}} - N_{\text{MI}} \quad (1)$$

$N_{\text{F}}$  و  $N_{\text{I}}$  مقادیر اولیه و نهایی نیتروژن خاک در دوره مورد مطالعه،  $N_{\text{P}}$  مقدار نیتروژن جذبی توسط گیاه،  $N_{\text{MI}}$  و  $N_{\text{MF}}$  مقادیر ابتدایی و انتهایی نیتروژن خاکپوش می‌باشند. به این دلیل که در مطالعه حاضر مقدار خاکپوش ناچیز بوده از آن صرف‌نظر شد و دو پارامتر  $N_{\text{MI}}$  و  $N_{\text{MF}}$  از معادله بیلان استفاده شده حذف گردید.

برای اطلاعات بیشتر در مورد محاسبه بیلان نیتروژن به خالدیان و همکاران (2011 و 2012) رجوع شود.

مدل یک بعدی WAVE (ون‌کلستر و همکاران، 1994) انتقال و تبدیل مواد و انرژی را در محیط به هم پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر توصیف می‌کند. این مدل در واقع دو مدل SWATNIT (ورکن و همکاران، 1991) و SUCROS (ون‌کلون و همکاران، 1982) و اسپیترز و همکاران، (1988) را جفت می‌کند. به دلیل غیرفعال بودن مدل گیاهی SUCROS در نسخه موجود مدل WAVE از مدل گیاهی PILOTE که در منطقه مورد تحقیق به‌وسیله‌ی خالدیان و همکاران (2009) برای گیاه ذرت توسعه داده شده است استفاده گردید.

معادلات حرکت آب و املاح در لایه‌های مختلف خاک که ضخامت آن‌ها به وسیله کاربر مشخص می‌گردد با

در مزرعه مطالعاتی ابتدا از دیسک کلوشکن و سپس به ترتیب از گاوآهن، هارو و بذرکار خطی در عملیات خاکورزی استفاده شد. شخم اولیه که با استفاده از دیسک کلوشکن انجام شده، به منظور بریدن و مدفون کردن بقایای گیاهی صورت گرفت. سپس شخم ثانویه به وسیله‌ی گاوآهن اعمال گشت به نحوی که به‌طور میانگین عمق خاکورزی، 0/25 متر بود. بستر بذر به‌وسیله‌ی هارو مهیا گشته و کشت بذر به‌وسیله‌ی بذرکار خطی انجام پذیرفت. در این تحقیق از روش آبیاری بارانی استفاده شد. برای تعیین زمان آبیاری از پایش روزانه مکش خاک و پایش هفتگی رطوبت خاک با دستگاه نوترون پروب استفاده شد. در مزرعه تحقیقاتی یک عدد تیوب دسترسی نوترون‌متر نصب شد. در طی دوره تحقیق رطوبت خاک با استفاده از دستگاه نوترون‌متر اندازه‌گیری و ثبت شد تا در پایان بتوان از این مقادیر در ارزیابی مقادیر شبیه‌سازی شده رطوبت خاک به‌وسیله‌ی مدل استفاده کرد.

اندازه‌گیری رطوبت خاک تا عمق 1/5 متر و در هر 0/10 متر از سطح صورت گرفت. تقریباً هر هفته کار اندازه‌گیری رطوبت انجام می‌شد. همچنین به‌منظور بررسی بیلان نیتروژن خاک شامل میزان نیترات و آمونیم خاک در ابتدا و انتهای فصل کشت ذرت همچنین ابتدا و انتهای دوره‌ای که خاک بدون پوشش گیاهی بود تعیین شد. بدین منظور از هفت نقطه مزرعه نمونه‌ی خاک با استفاده از اوگر از عمق‌های مختلف (0 تا 0/10، 0/10 تا 0/30، 0/30 تا 0/60، 0/60 تا 0/90، 0/90 تا 1/20 و 1/20 تا 1/50 متر) برداشت شد. نمونه‌های برداشت شده از عمق‌های یکسان با هم ترکیب و الک شده تا برای هر عمق، یک نمونه‌ی مرکب حاصل شود. این کار به منظور کاهش هزینه‌های آنالیز صورت گرفت. با ارسال نمونه‌ها به آزمایشگاه و براساس روش استاندارد، تعیین نیترات و آمونیم خاک صورت گرفت. برای تکمیل اجزای بیلان نیتروژن، میزان کود نیتروژن توزیع شده همزمان با پخش کود در طول فصل نیز کنترل شد. میزان کود نیتروژن از

مدل کار شبیه‌سازی را برای دو دوره مجزا انجام داد. دوره اول از 24 آوریل سال 2007 همزمان با کشت ذرت شروع شد و تا 19 سپتامبر سال 2007 ادامه یافت. این دوره برای واسنجی استفاده شد. دوره دوم از 19 سپتامبر 2007 شروع شد و تا 17 آوریل سال 2008 برای یک خاک بدون پوشش (وضعیت آیش) به عنوان صحت-سنجی مدل انجام شد. میزان رطوبت خاک در ابتدای هر دوره شبیه‌سازی اندازه‌گیری و به عنوان شرایط اولیه به مدل معرفی شد. همچنین میزان نیتروژن خاک در ابتدای هر دو دوره شبیه‌سازی اندازه‌گیری و به عنوان شرایط مرزی به مدل معرفی شد. خصوصیات هیدرولیکی خاک (پارامترهای شکل و مقیاس در معادله ون‌گونوختن با شرایط معلم) با توجه به اندازه‌گیری‌های مستقیم مزرعه‌ای (مبارک و همکاران، 2009) به مدل معرفی شد. خصوصیات مربوط به انتقال املاح نظیر ضریب پخشیدگی هیدرودینامیک و سرعت پوسیدگی مواد آلی با حل معکوس تعیین شدند و ضریب نظیر نیتروژن‌زایی و ثابت تصعید نیتروژن با توجه به مقادیر پیش‌فرض مدل به مدل معرفی گردید.

با توجه به تعیین برخی از ورودی‌های مدل WAVE با استفاده از مدل رشد گیاهی PILOTE، برای آشنایی بیش‌تر، توضیح مختصری در خصوص این مدل ارائه می‌گردد. PILOTE یک مدل گیاهی برای شبیه‌سازی بیان آب خاک و عملکرد گیاه، براساس شبیه‌سازی شاخص سطح برگ با گام‌های زمانی روزانه می‌باشد. شبیه‌سازی در این مدل با این فرض صورت می‌گیرد که تنها عامل محدود کننده رشد و عملکرد گیاه، آب است و محدودیت عناصر غذایی وجود ندارد. این مدل با استفاده از داده‌های برداشت شده از مزرعه تحقیقاتی واسنجی و اعتبارسنجی شده بود، لذا از خروجی‌های مدل به عنوان ورودی‌های مدل WAVE استفاده گردید (مایول و همکاران، 1997؛ خالدیان و همکاران، 2009؛ خالدیان و همکاران، 2013).

برای اجرای مدل WAVE باید شرایط اولیه شامل رطوبت و میزان نیتروژن، ماده آلی و کربن آلی در لایه‌های مختلف خاک به مدل معرفی گردد. در این تحقیق خاک به 15 لایه با ضخامت 0/10 متر تقسیم شد. هدف تعیین مقدار رطوبت در لایه‌های مختلف خاک یا عبارتی در کل نیم‌رخ خاک در طول دوره همچنین میزان نیترات ( $\text{NO}_3^-$ ) و آمونیم ( $\text{NH}_4^+$ ) در انتهای دوره مطالعاتی است. اطلاعات مربوط به خصوصیات هیدرولیکی خاک نیز باید به مدل معرفی شود که برای این کار داده‌های مورد نظر از آزمایش تعیین خصوصیات هیدرولیکی خاک نظیر هدایت

روش تفاضل محدود حل می‌گردد. در این مدل، برای تشریح انتقال آب در یک بعد در حالت هموزن و ایزوتروپ در المان‌های بسیار کوچک خاک، معادله ریچاردز به کار گرفته شده است:

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(\Theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right)] - S \quad (2)$$

به طوری که  $\Theta$ ، میزان رطوبت حجمی ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )؛  $z$  مختصات عمودی (cm)؛  $t$  زمان (day)؛  $K(\Theta)$  هدایت هیدرولیکی غیراشباع ( $\text{cm} \cdot \text{day}^{-1}$ )؛  $h$  هد فشار آب در خاک (cm) و  $S$  میزان جذب آب به وسیله گیاه (mm) می‌باشد. برای انتقال املاح نیز از معادله زیر استفاده شده است:

$$\frac{\partial(\theta C_r)}{\partial t} + K_d \frac{\partial C_r}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (\theta D_s \frac{\partial C_r}{\partial z}) - \frac{\partial(q C_r)}{\partial z} \sum \varphi_i \quad (3)$$

در این معادله؛  $C_r$  غلظت ساکن ( $\text{M} \cdot \text{L}^{-3}$ ) در محلول خاک،  $\rho$  چگالی ظاهری خاک خشک ( $\text{M} \cdot \text{L}^{-3}$ )،  $K_d$  ضریب توزیع املاح ( $\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}$ )،  $D_s$  ضریب پراکندگی ظاهری ( $\text{L}^2 \cdot \text{T}^{-1}$ )،  $q$  شار آب داری ( $\text{L} \cdot \text{T}^{-1}$ ) و  $\sum \varphi_i$  بخش جذب املاح که شامل جذب گیاه و انتقال است ( $\text{M} \cdot \text{L}^{-3} \cdot \text{T}^{-1}$ ).

مدل WAVE نمونه‌ای از یک ابزار وابسته به ریاضیات است. این مدل در واقع نقل و انتقال و تبدیلات مواد و انرژی‌های موجود در خاک و گیاه را تشریح می‌کند. این مدل، یک مدل قطعی معرفی شده است. با توجه به اینکه مدل WAVE یک مدل عددی محسوب می‌شود، نقل و انتقال ماده و انرژی در سامانه پیوسته گیاه و خاک را با استفاده از حل معادلات دیفرانسیل به روش تفاضل محدود تشریح می‌کند. به دلیل در نظر گرفتن جهت عمودی برای نقل و انتقال حاکم، این مدل تک بعدی می‌باشد. در نهایت می‌توان گفت که WAVE یک مدل تشریحی است، به این دلیل که به فهم بهتر فرآیندها و فعل و انفعالات حاکم (به عنوان مثال فرآیندهای شیمیایی در خاک) کمک می‌کند. هرچند نتایج حاصل از این بررسی‌های تشریحی، منجر به مطالعات پیش‌بینی‌گرایانه در زمینه تصمیم‌گیری‌ها خواهد شد. بنابراین می‌توان این مدل را یک ابزار منحصر به فرد برای فهم بهتر فرآیندهای کنترل انتقال و فرآیندهای شیمیایی خاک، ارزیابی داده‌های مزرعه‌ای، پیش‌بینی کوتاه مدت و بلند مدت اثرات استراتژی‌های کشاورزی روی کیفیت خاک و آب‌های زیرزمینی و گسترش مقیاس محیطی خاک برای کاربرد کودها دانست (ون‌کلوستر و همکاران، 1994).

یک می‌باشد. روابط مربوط به آماره‌های  $RSR^2$ ،  $NSE$  و  $MAE$  در زیر آمده است:

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 / n}} \quad (4)$$

$$nRMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n} \cdot \frac{100}{\bar{O}} \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (7)$$

$O_i$ : مقدار مشاهده شده پارامتر مدنظر،  $P_i$ : مقدار شبیه‌سازی شده پارامتر مدنظر،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده شده و  $n$ : تعداد کل مشاهدات.

### نتایج و بحث

مدل WAVE دارای پنج زیربخش آب، نیتروژن، حرارت، گیاه و املاح می‌باشد؛ این موضوع بیانگر این مطلب است که اجرای این برنامه نیازمند ورودی‌های بسیاری است. با بررسی پارامترهای ورودی مدل WAVE و آنالیز حساسیت، حساسیت مدل به پارامترها به صورت کیفی مشخص شد. میزان حساسیت پارامترهایی با حساسیت متوسط و بالا در جدول 3 مشخص شده‌اند. دو پارامتر رطوبت حجمی خاک در حالت اشباع و پارامتر شکل منحنی که مربوط به خصوصیات خاک منطقه هستند اندازه‌گیری شدند. با توجه به وارپته گیاه کشت شده حداکثر مقدار جذب نیتروژن توسط گیاه نیز در انتهای فصل به اندازه‌گیری مستقیم در آزمایشگاه مشخص شد. ضریب توزیع آمونیم در مرحله واسنجی مدل براساس بهترین شاخص‌های آماری تخمین زده شد.

هیدرولیکی اشباع، طول لوله‌های مویین و قطر متوسط خلل و فرج فعال در انتقال با استفاده از روش بیرکن و استوانه‌های مضاعف انجام شده در محل (مبارک و همکاران، 2009) استفاده شد.

مدل گیاهی PILOTE نیاز به داده‌های هواشناسی دارد که از داده‌های ایستگاه هواشناسی موجود در محل استفاده شد. ضریب گیاهی نیز براساس دوره‌های مختلف رشد که در محل مشاهده شده بود و براساس داده‌های ادیسکات و همکاران (1985) تعیین شد. مقدار شاخص سطح برگ ( $LAI^1$ ) نیز در طول دوره رشد گیاه با استفاده از دستگاه LiCorLAI2000 اندازه‌گیری شد تا با داده‌های شبیه‌سازی شده به وسیله WAVE مقایسه گردد. خروجی‌های مدل گیاهی PILOTE نظیر سری عمق ریشه، ضریب گیاهی و شاخص سطح برگ از کاشت تا برداشت به عنوان ورودی مدل WAVE مورد استفاده قرار گرفت.

به دلیل وجود اثرات متقابل بین بخش‌های مختلف مدل به خصوص بیلان آب و بیلان نیتروژن مدل به روش گام به گام واسنجی شد. یعنی برای واسنجی یک پارامتر حساس در مدل (براساس نتایج آنالیز حساسیت مدل) مقداری (مثلاً پنج درصد) به مقدار پیش فرض مدل اضافه و یا کم می‌شد و سپس براساس شاخص‌های آماری کیفیت شبیه‌سازی در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده سنجیده می‌شد و در صورت مطلوب نبودن این کار تکرار می‌شد تا مقدار بهینه پارامتر مدنظر تعیین گردد. پارامترهای مربوط به انتقال و تبدیل نیتروژن در کشت ذرت واسنجی شدند و روی خاک بدون پوشش اعتبارسنجی مدل در سال دوم صورت گرفت.

برای تعیین میزان دقت مدل در شبیه‌سازی بیلان نیتروژن و آب خاک، از برخی شاخص‌های آماری کمک گرفته شد. یکی از شاخص‌های متداول در ارزیابی مدل‌ها،  $RMSE$  می‌باشد که مقادیر کم‌تر این آماره، عملکرد بهتر مدل را نشان می‌دهد. پارامتری به نام  $RSR$  که شکل توسعه یافته  $RMSE$  می‌باشد، در واقع حاصل استانداردسازی  $RMSE$  با استفاده از انحراف استاندارد مقادیر مشاهده‌ای است (سینگ و همکاران، 2004). مقدار صفر نشان‌دهنده بهترین شبیه‌سازی ممکن است.  $NSE$  یک آماره نرمال شده است که مقدار نسبی واریانس باقی‌مانده را در مقایسه با واریانس داده‌های اندازه‌گیری شده محاسبه می‌کند (نش و ساتکلیف، 1970). دامنه تغییرات  $NSE$  شامل منفی بی‌نهایت تا یک است که مقدار بهینه آن

<sup>2</sup> RSR-observations Standard deviation Ratio

<sup>1</sup> Leaf Area Index

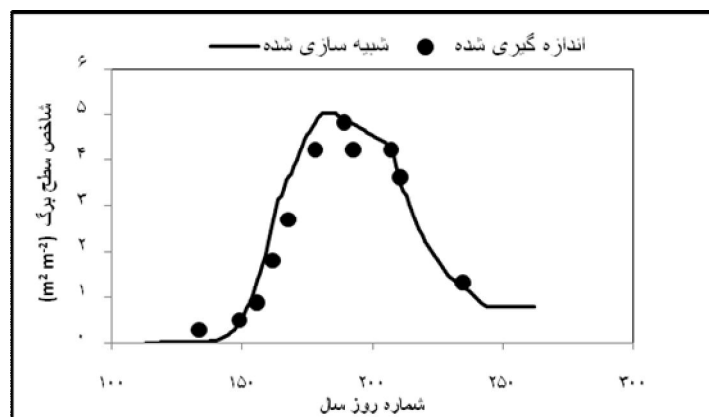
جدول 3- سطح حساسیت برخی پارامترهای مدل WAVE

پارامتر	واحد	حساسیت
شاخص سطح برگ	$m^2 \cdot m^{-2}$	M
ضریب گیاهی	-	H
حجم آب خاک در حالت اشباع	$m^3 \cdot m^{-3}$	H
پارامتر شکل منحنی (شیب)	-	H
ضریب توزیع $NH_4^+$	$cm^3 \cdot g^{-1}$	M
حداکثر جذب نیتروژن	$Kg \cdot ha^{-1}$	M

H: حساسیت پذیری بالا، M: حساسیت پذیری متوسط

همکاران (2005) همچنین دوشین و همکاران (2001) مطابقت دارد هرچند نتایج دوشین و همکاران (2001) نشان داد که مدل قدری بیش‌برآوردی دارد ولی در تحقیق حاضر چنین مشکلی مشاهده نشد که می‌تواند به دلیل جایگزینی مدل PILOTE، با توانایی مناسب در برآورد شاخص سطح برگ (خالدیان و همکاران، 2009؛ خالدیان و همکاران، 2013) به‌جای مدل SUCROS باشد.

شکل 1 تغییرات شاخص سطح برگ را در طول فصل رشد نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مدل به‌خوبی توانسته است مراحل توسعه گیاه، حداکثر رشد گیاه در مرحله گلدهی همچنین مرحله برگ-ریزان را به خوبی شبیه‌سازی کند. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مطابقت خوبی دارند. نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق ون‌کلستر و همکاران (1995) و ورستران و



شکل 1- مقایسه مقادیر شاخص سطح برگ اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در روزهای مختلف سال (RMSE=0.5,  $r^2=0.95$ )

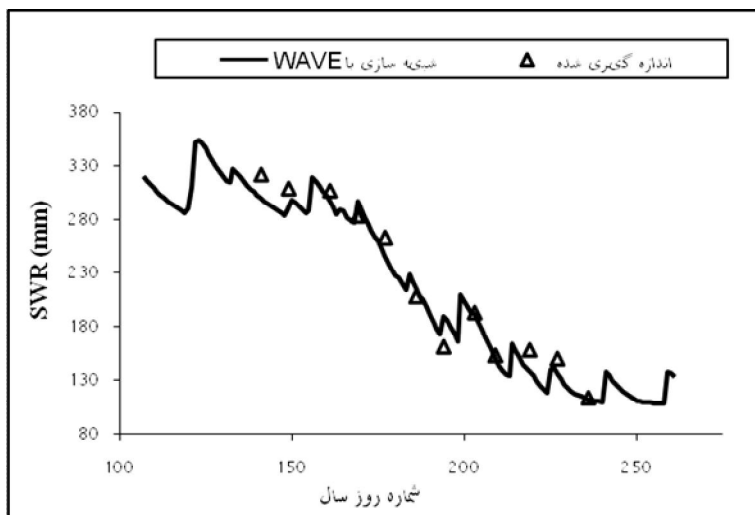
برداری‌های انجام شده در 12 روز مختلف از فصل رشد صورت گرفت. همان‌طوری‌که در شکل مشاهده می‌شود توزیع داده‌ها اطراف خط یک به یک با کمترین فاصله ممکن از آن بوده و اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده کم است لذا می‌توان گفت که مدل توانسته با موفقیت ذخیره آب خاک را شبیه‌سازی کند، عاملی که روی دقت شبیه‌سازی بیلان نیتروژن تأثیر مثبت خواهد گذاشت. در خصوص ارزیابی مدل، از آماره‌های بیان شده استفاده شد. جدول 4 آماره‌های مربوط به واسنجی ذخیره آب خاک را ارائه می‌دهد. براساس مقادیر این شاخص‌ها و حدود بهینه مشخص شده برای هر یک از آن‌ها، می‌توان گفت که شبیه‌سازی مدل در رده عالی ارزیابی می‌شود. ون‌کلستر و همکاران (1995) مدل

شکل 2 میزان ذخیره آب در خاک ( $SWR^1$ ) را که در مزرعه اندازه‌گیری شده همچنین به‌وسیله‌ی مدل شبیه‌سازی شده، نشان می‌دهد. برای ارزیابی بهتر شبیه‌سازی صورت گرفته، نمودار 3 ارائه شده است که با استفاده از خط یک به یک، مقایسه‌ای بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده صورت گرفته است. رطوبت در عمق‌های مختلف با استفاده از نوترون‌متر اندازه‌گیری گردید. سپس ضخامت هر لایه، در میزان رطوبت حجمی بدست آمده آن لایه ضرب شد که در نهایت مجموع مقادیر بدست آمده در عمق‌های مختلف هر نمونه برداری، میزان ذخیره آب خاک بر حسب میلی‌متر را نشان می‌دهد. نمونه-

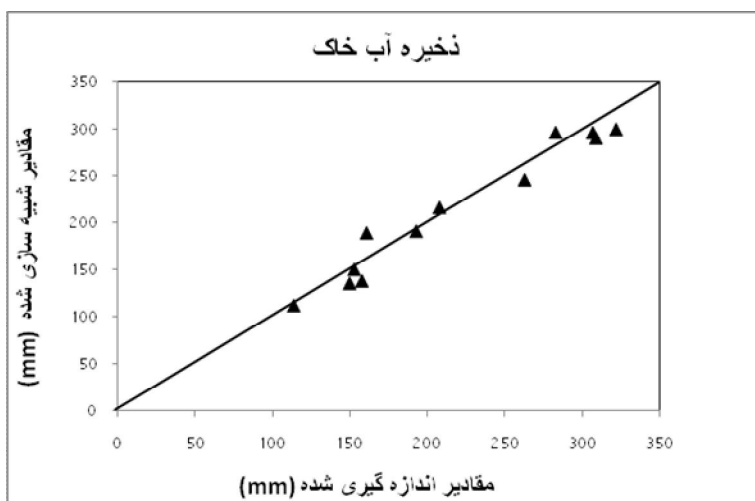
<sup>1</sup> Soil Water Reserve

همکاران (2005) نتایج شبیه‌سازی رطوبت خاک به وسیله-  
ی این مدل را مطلوب گزارش کردند که با نتایج تحقیق  
حاضر همخوانی دارد.

WAVE را برای شبیه‌سازی رطوبت خاک تحت کشت دو  
محصول گندم و چغندر قند به کار بردند. نتایج نشان داد که  
مدل با موفقیت شبیه‌سازی تغییرات رطوبت خاک در طول  
فصل کشت را انجام داده است. همچنین ورستراتن و



شکل 2- مقایسه مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده (SWR) تا عمق 1/2 متر



شکل 3- خط به خط برای مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده ذخیره آب خاک تا عمق 1/2 متر

جدول 4- شاخص‌های آماری مربوط به دوره واسنجی پارامتر ذخیره آب خاک (سال 2007)

شاخص‌های آماری	RMSE (mm)	nRMSE (%)	RSR	NSE	MAE <sup>1</sup>
	15	7	0/211	0/95	6/5

<sup>1</sup> Mean Absolute Error



نزدیک می‌باشند که این موضوع دلیلی بر دقت بالای مدل در شبیه‌سازی بیلان نیتروژن می‌باشد. ون‌کلستر و همکاران (1995) و دوشین و همکاران (2001) نتایج شبیه‌سازی مدل در مورد نیترات و آمونیم را مطلوب گزارش کردند. السادک و همکاران (2003) دو مدل WAVE و DRAINMOD-N را برای شبیه‌سازی برخی اجزای بیلان نیتروژن خاک برای یک دوره سی ساله کشت ذرت در یک خاک شنی در منطقه کمپن بلژیک مقایسه کردند. نتایج نشان داد که نتایج هر دو مدل مطلوب است.

به دلیل شرایط نامناسب در زمین بایر در رابطه با اندازه‌گیری SWR توسط نوترون متر و مخاطرات برای فردی که اندازه‌گیری را باید انجام دهد، امکان اعتبارسنجی پارامتر مورد نظر وجود نداشت. بنابراین ارزیابی ذخیره آب خاک فقط شامل واسنجی مدل می‌باشد.

در جدول 5 مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به وسیله‌ی مدل WAVE با توجه به اجزای اصلی بیلان نیتروژن ارائه شده است. مقایسه مقادیر مشاهده شده و نتایج مدل، نشان می‌دهد که مقادیر بسیار به یکدیگر

جدول 5- مقادیر اجزای اصلی بیلان نیتروژن در واسنجی و اعتبارسنجی مدل ( $\text{kg N ha}^{-1}$ )

میزان نیتروژن نهایی خاک	نیتروژن آبشویی شده	نیتروژن معدنی شده	واسنجی
178/2 (148/7*+29/5**)	16	110	مشاهده شده
178/8 (149*+29/8**)	17	99	شبیه‌سازی شده
166/3 (140/9*+25/5**)	7	110	اعتبارسنجی مشاهده شده
165/8 (140/5*+34**)	10	109	شبیه‌سازی شده

\* مقدار نیترات و \*\* مقدار آمونیم

مقادیر مختلف کود نیتروژن به منظور رسیدن به حداکثر عملکرد و حداقل آبشویی استفاده کرد تا هم درآمد مطلوب کشاورز با مصرف حداقل کود نیتروژن فراهم شود و هم کمترین آسیب به منابع آب سطحی و زیرزمینی وارد شود. همچنین از این مدل برای مدیریت بهینه و همزمان آب و کود نیتروژن در مناطق شالیزاری شمال کشور پس از ارزیابی مجدد می‌توان استفاده کرد.

### نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق مدل WAVE به منظور شبیه‌سازی شاخص سطح برگ، اجزای بیلان نیتروژن و ذخیره آب خاک در آزمایشی مزرعه‌ای تحت کشت ذرت واسنجی شد و سپس اجزای بیلان نیتروژن برای یک خاک بدون پوشش مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که این مدل دقت مناسبی در شبیه‌سازی اجزای بیلان نیتروژن را دارا می‌باشد. بنابراین از مدل برای بررسی

### فهرست منابع:

- Addiscott, T.M., and Wagenet, R.J. 1985. Concepts of solute leaching in soils: A review of modelling approaches. *Journal of Soil Sciences*. 36:411–424.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). In: *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56*, FAO, Rome.
- Brusseau, M.L. and Rao, P.S. 1990. Modeling solute transport in structured soils: A review. *Geoderma*. 46:169–192.
- Ducheyne, S., Schadeck, N., Vanongeval, L., Vandendriessche, H., and Feyen, J. 2001. Assessment of the parameters of a mechanistic soil-crop-nitrogen simulation model using historic data of experimental field sites in Belgium. *Agricultural Water Management*. 51:53–78.
- Duwing, C., Normand, B., Vauclin, M., Vachaud, G., Green, S. and Becquer, T. 2003. Evaluation of the WAVE model for predicting nitrate leaching for two contrasted soil and climate conditions. *Vadose Zone Journal*. 2(1):76-89.

6. El-Sadek, A., Oorts, K., Sammels, L., Timmerman, A., Radwan, M., and Feyen, J. 2003. Comparative study of two nitrogen models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129, 44–52.
7. Fernandez, J.E., Slawinskib, C., Morenoa, F., Walczakb, R.T., and Vanclooster, M. 2002. Simulating the fate of water in a soil–crop system of a semiarid Mediterranean area with the WAVE 2.1 and the EURO-ACCESS-II models. *Agricultural Water Management*. 56:113–129.
8. Follet, R.F., and Wieringa, P.J. 1995. Integrated nitrogen management in relation to leaching and groundwater quality. (Special Issue) *J. Contaminant Hydrol.* Elsevier, Amsterdam, 20.
9. Khaledian, M.R., Mailhol, J.C., Ruelle, P., and Rosique, P. 2009. Adapting PILOTE model for water and yield management under direct seeding system: The case of corn and durum wheat in a Mediterranean context. *Agricultural Water Management*. 96: 757-770.
10. Khaledian, M.R., Mailhol, J.C., Ruelle, P., Mubarak, I., and Maraux, F. 2011. Nitrogen balance and irrigation water productivity for corn, sorghum and durum wheat under direct seeding into mulch when compared with conventional tillage in the southeastern France. *Irrigation Science*. 29(5): 413-422.
11. Khaledian, M.R., Mailhol, J.C., Ruelle, P., and Mubarak, I. 2012. Impacts of direct seeding into mulch on the yield, water use efficiency and nitrogen dynamics for corn, sorghum and durum wheat. *Irrigation and Drainage*. 61: 398-409.
12. Khaledian, M.R., Mailhol, J.C., Ruelle, P., and Dejean, C. 2013. Effect of cropping strategies on the irrigation water. *Plant, Soil and Environment*. 59(1):29-36.
13. Mailhol, J.C., Olufayo, A.A., and Ruelle, P. 1997. Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. *Agricultural Water Management*. 35:167–182.
14. Mubarak, I., Mailhol, J.C., Angulo-Jaramillo, R., Ruelle, P., Boivin, P., and Khaledian, M. 2009. Temporal variability in soil hydraulic properties under drip irrigation. *Geoderma*. 150: 158-165.
15. Munoz-Carpena, R., Ritter, A., Bosch, D.D., Schaffer, B., and Potter, T.L. 2008. Summer cover crop impacts on soil percolation and nitrogen leaching from a winter corn field. *Agricultural Water Management*. 95:633–644.
16. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3):282-290.
17. Sexton, B.T., Moncrief, J.F., Rosen, C.J., Gupta, S.C., and Cheng, H.H. 1996. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil. *Journal of Environment Quality*. 25:982–992.
18. Simunek, J., Sejna, M., and van Genuchten, M.Th. 1999. The HYDRUS-2D Software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media. IGWMC-TPS 53, Version 2.0. Int. Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO.
19. Singh, J., Knapp, H.V., and Demissie, M. 2004. Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. ISWS CR 2004-08. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey.
20. Spitters, C.J.T., van Keulen, H., and van Kraaijng, D.W.G. 1988. A simple but universal crop growth simulation model, SURCROS87. In R. Rabbinge et al. (ed.) *Simulation and systems management in crop protection*. Fertilizer Research PUDOC, Wageningen, The Netherlands.
21. Vanclooster, M., Viaena, J., and Christiaens, K. 1994. WAVE a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. Reference & user's manual (release 2.0).

22. Vanclooster, M., Viaene, P., Diels, J., and Feyen, J. 1995. A deterministic evaluation analysis applied to an integrated soil-crop model. *Ecological Modeling*. 81:183-195.
23. Vanclooster, M., Ducheyne, S., Dust, M., and Vereecken, H. 2000. Evaluation of pesticide dynamics of the WAVE-model. *Agricultural Water Management*. 44:371-388.
24. van Keulen, H., Penning de Vries, F.W.T., and Drees, E.M. 1982. A summary model for crop growth. p. 87-98. In F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar (ed.) *Simulation of crop growth and crop production*. PUDOC, Wageningen, The Netherlands.
25. Vereecken, H., Vanclooster, M., Swerts, M., and Diels, J. 1991. Simulating water and nitrogen behavior in soil cropped with winter wheat. *27:233-243*.
26. Verhagen, J., and Bouma, J. 1998. Defining threshold values for residual soil N levels. *Geoderma*. 85: 199-211.
27. Verstraeten, W.W., Muys, B., Feyen, J., Veroustrate, F., Minnaert, M., Meiresonne, L., and De Schrijver, A. 2005. Comparative analysis of the actual evapotranspiration of Flemish forest and cropland, using the soil water balance model WAVE. *Hydrology and Earth System Sciences*. 9: 225-241.