# حساسیت سنجی مدل CSM-CERES-Maize نسبت به ظرفیت زراعی خاک برای شبیه سازی سرنوشت نیتروژن در نیمرخ خاک

**راحله ملکیان[۱] و مهدی قیصری[۲*]**

۱) دانشجوی سابق دکتری آبیاری و زهکشی، دانشگاه صنعتی اصفهان، گروه مهندسی آب

۲*) استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، نویسنده مسئول مکاتبات: gheysari@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۹۰/۰۸/۵

**چکیده**

ظرفیت زراعی (FC) از مهم‌ترین پارامترهای ورودی مدل‌های آب، خاک، گیاه و اتمسفر است که تعیین و اندازه‌گیری دقیق آن نیازمند صرف وقت و هزینه زیادی می‌باشد. هدف از این پژوهش آنالیز حساسیت مدل CSM-CERES-Maize نسبت به FC خاک در شبیه‌سازی غلظت نیترات و آمونیوم در لایه‌های مختلف خاک و اندام‌های گیاهی و همچنین میزان برداشت نیتروژن از خاک توسط گیاه است. بدین منظور آزمایش مزرعه ای بر روی ذرت علوفه ای سینگل کراس ۷۰۴ در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳ در جنوب تهران انجام شد. تیمارهای آبیاری شامل چهار سطح ۰/۷، ۰/۸۵، ۱ و ۱/۱۳ تخلیه رطوبتی آب خاک و سه سطح کوددهی صفر، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار بود. نتایج نشان داد که بر اثر تغییر ۲۵ درصدی FC (افزایش و یا کاهش)، غلظت نیترات خاک نسبت به مقدار پایه بین ۷/۱۷ و ۹۶/۷۵ درصد تغییر می‌کند. این مقدار برای غلظت آمونیوم خاک بین ۳۳/۳۱ و ۱۳۹/۰۱ درصد می‌باشد. مدل CERES در تخمین غلظت نیترات و آمونیوم خاک نسبت به تغییرات FC حساس بوده که این حساسیت در لایه‌های مختلف خاک متفاوت می‌باشد. این مدل در تعیین میزان معدنی‌شدن نیتروژن، نیتریفیکاسیون و همچنین غلظت نیتروژن در گیاه نسبت به تغییرات FC دارای حساسیت کمی می‌باشد. بدین ترتیب می توان گفت که با انتخاب درست و دقیق FC موجب کاهش عدم قطعیت در برآورد غلظت نیترات و آمونیوم در خاک می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** آبشویی؛ آمونیوم؛ نیترات؛ مدل‌های گیاهی؛DSSAT

## مقدمه

نیتروژن یکی از عناصر مهم و حیاتی برای گیاهان به شمار می‌رود که در بیشتر خاک‌ها کمبود آن وجود دارد. با توجه به نقش حیاتی نیتروژن در گیاهان و از طرفی کمبود آن در خاک، مدیریت منابع نیتروژن در تولید گیاهان دارای اهمیت زیادی می‌باشد (Novoa and Loomis, 1981). لذا سرمایه‌گذاری‌های زیادی برای افزایش راندمان کاربرد کودهای نیتروژنه انجام گرفته است، ولی با این وجود راندمان کاربرد کود در مزرعه بسیار پایین است. نیتروژن مازادی که توسط گیاه برداشت نمی شود، ممکن است از طریق تبخیر و یا دنیتریفیکاسیون وارد اتمسفر گردد، در اثر آبشویی از ناحیه ریشه خارج شود و یا در درون خاک به صورت غیر متحرک درآمده و برای گیاه غیر قابل برداشت شود. میزان هر یک از فرآیندهای ذکر شده به شرایط اقلیمی، خاک و فاکتورهای کشاورزی بستگی دارد (Godwin and Jones, 1991). میزان

نیتروژنی که از دسترس گیاه خارج می‌شود، منبع بسیاری از آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌باشد. در نتیجه به دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی، تحقیقات جدید به دنبال بهبود بخشی به راندمان کاربرد کود در زمین‌های کشاورزی می‌باشند.

تغییر نیتروژن از فرمی به فرم دیگر و فراوانی فاکتورهای مؤثر در چرخه نیتروژن، آن را به یکی از پیچیده‌ترین مواد مغذی مورد مطالعه در گیاه تبدیل کرده است. لذا جهت به دست آوردن اطلاعات مورد نیاز در ترسیم منحنی پاسخ گیاه به نیتروژن، لازم است آزمایشات مزرعه‌ای تحت سطوح مختلف نیتروژن مصرفی برای تعیین عملکرد گیاه انجام شوند و این اطلاعات برای تعیین مقدار بهینه کود کاربردی گیاه به کار گرفته شوند. اما این روش هزینه بر و زمان زیادی نیاز دارد و علاوه بر این امکان بررسی استراتژی‌های مختلف مدیریتی در این روش وجود ندارد. از طرفی مدل‌های رگرسیون واکنش کودی استاتیک بوده و قادر به محاسبه برای تغییرات فصلی در منبع آب و یا نیتروژن نخواهند بود. اما مدل‌های کامپیوتری که قادر به ضبط نکات جزئی آب و هوایی، تأثیر خصوصیات خاک‌های گوناگون و فعالیت‌های کشاورزی بر روی حرکت مواد مغذی و فرایندهای رشد گیاه هستند، می‌توانند دانش ما را نسبت به رفتار کودها در سیستم گیاهی افزایش دهند. چنین مدل‌هایی با توانایی شبیه‌سازی برای گیاهان مختلف و استراتژی‌های مدیریت کود، می‌توانند سبب افزایش راندمان مصرف کود گردند (Godwin and Jones, 1991).

محققان بر این باورند که برای کاربردی نمودن یافته‌های تحقیقات میدانی و انتقال دانش و تکنولوژی از مکانی به مکان دیگر استفاده از مدل‌های گیاهی اجتناب ناپذیر است (Jones et al., 2003). مدل CERES[1] یکی از مدل‌های خاک، گیاه و اتمسفر است که رشد، توسعه و عملکرد غلات را شبیه‌سازی می‌کند (Jones and Kiniry, 1986). این مدل که در بسته نرم‌افزاری DSSAT[2] موجود است، قادر به پیش‌بینی بیلان نیتروژن خاک و گیاه و همچنین شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریت نیتروژن در مزرعه بوده و تاکنون توسط بسیاری از محققان مورد استفاده قرار گرفته است (Gerakis *et al.*, 2006). Vigil et al., (1991) از اولین نسخه CERES جهت تخمین میزان نیتروژن معدنی شده از بقایای گیاهی برای گیاهان سورگوم و گندم استفاده کردند و عملکرد مناسب مدل را مشاهده نمودند. Gerakis (1994) مدل CERES را با داده‌های لایسیمتر با سطح ایستابی کنترل شده مورد بررسی قرار داد و عملکرد مناسب مدل را در شبیه‌سازی میزان نیتروژن خروجی از لایسیمتر مشاهده کرد.

برای کاربرد مدل‌های گیاهی نیاز به داده‌های ورودی می‌باشد که اندازه‌گیری برخی از آنها بخصوص زمانی که مدل برای سطح یک حوزه آبریز یا یک منطقه وسیع به کار برده می‌شود بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر می‌باشد. یکی از داده‌های ورودی مهم برای تمام مدل‌های گیاهی مقدار ظرفیت زراعی (FC) خاک می‌باشد. این پارامتر در تعیین میزان آب قابل دسترس گیاه که از فاکتورهای مهم در تعیین میزان آب آبیاری، تولید گیاه و مدیریت زراعی است، نقش اساسی داشته

[1]. Crop Estimation through Resource and Environment Synthesis

[2]. Decision Support System for Agrotechnology Transfer

و همچنین یکی از مهم‌ترین پارامترهای مدل‌های آب، خاک، گیاه و اتمسفر می‌باشد. مفهوم ظرفیت زراعی اولین بار توسط Veihmeyer and Hendrickson (1931) به عنوان مقدار آبی که پس از زهکشی آب اضافی و کاهش یافتن اساسی حرکت رو به پایین آب در خاک باقی می‌ماند معرفی شد. روش دیگر اندازه‌گیری ظرفیت زراعی که توسط بسیاری از محققان ارائه شده است، استفاده از فشار کاپیلاری پایه (به طور مثال ۳۳ کیلوپاسکال برای خاک سنگین و ۱۰ کیلوپاسکال برای خاک سبک) و تعیین ظرفیت زراعی در آزمایشگاه روی نمونه دست نخورده خاک می‌باشد. با توجه به پیوسته بودن پدیده زهکشی، ظرفیت زراعی در تفسیری دقیق‌تر بر مبنای شار جریان، میزان آبی در نظر گرفته می‌شود که در آن تغییرات زهکشی ناچیز می‌شود. نتایج تحقیقات نشان داده است که روش اندازه گیری FC مبنی بر مکش از دقت کمتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است (Twarakavi *et al.*, 2009). مسأله مهمی که باید در رابطه با ظرفیت زراعی در نظر گرفته شود این است که این پارامتر با فرایندهای طبیعی دینامیک خاک در ارتباط است و در تخمین این پارامتر باید این مهم مورد توجه قرار گیرد (Twarakavi et al., 2009). به همین دلیل محققان زیادی سعی در گسترش روش‌های تخمین ظرفیت زراعی با استفاده از روش‌های دینامیک کرده‌اند (Campbell and Campbell, 1982; Meyer and Gee, 1999 and Zacharias and Bohne, 2008). با توجه به وقت‌گیر و هزینه بر بودن روش‌های دقیق اندازه‌گیری FC خاک، بررسی تأثیر دقت اندازه‌گیری FC بر خروجی‌های مدل‌های گیاهی ضروری است، تا امکان استفاده از FC بدست آمده از روش‌های اندازه‌گیری با دقت کمتر و یا توابع انتقالی خاک (PTF) در مدل‌های گیاهی مشخص گردد.

آنالیز حساسیت تکنیکی است که با استفاده از آن می‌توان میزان حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی مختلف را تعیین کرد و به این ترتیب با صرف هزینه کمتر پارامترهایی که مدل نسبت به آنها حساس نمی‌باشند را با استفاده از مطالعات قبلی و مقادیر موجود در منابع تعیین و به مدل وارد کرد (Patal and Shekh, 2005). Patal and Shekh (2005) در بررسی حساسیت مدل CERES-Wheat به برخی از پارامترهای ورودی، حساسیت کمی را در مدل نسبت به میزان تشعشع خورشیدی مشاهده کردند. در حالی‌که حساسیت مدل نسبت به میزان دما بیشتر بود. همچنین مدل حساسیت قابل توجهی را نسبت به تراکم کشت نشان داد.

با وجود اهمیت FC در مدل‌های گیاهی، تا کنون در هیچ مقاله علمی تأثیر دقت اندازه‌گیری FC بر نتایج خروجی مدل‌های گیاهی بررسی نشده است. در این راستا در مطالعه حاضر با استفاده از روش آنالیز حساسیت میزان حساسیت مدل CSM-CERES-Maize نسبت به تغییرات ظرفیت زراعی خاک در شبیه سازی غلظت نیترات و آمونیوم در لایه‌های مختلف خاک و اندام هوایی گیاه در سطوح کم آبیاری و بیش آبیاری برای سطوح مختلف کاربرد کود نیتروژن بررسی شده است.

## مواد و روش‌ها

آزمایش مزرعه‌ای روی ذرت علوفه‌ای در سال‌های ۱۳۸۲ و۱۳۸۳ در مرکز تحقیقات کشاورزی شهرستان ورامین با طول جغرافیایی ´۳۸ °۵۱ شرقی، عرض جغرافیایی ´۲۰ °۳۵ شمالی و ارتفاع ۹۷۲ متر از سطح دریا انجام شد. در این

تحقیق سه سطح کودی صفر، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (که به ترتیب $N_0$، $N_{150}$ و $N_{200}$ نام گذاری شد) و چهار سطح آبیاری SMD[1]۰/۷، ۰/۸۵SMD، ۱SMD و ۱/۱۳SMD با استفاده از طرح آماری کرت‌های نواری در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. هر کرت شامل ۱۵ جوی و پشته به فاصله ۷۵ سانتی‌متر و طول ۱۶ متر و بذر مصرفی از نوع هیبرید ذرت علوفه‌ای سینگل کراس ۷۰۴ بود. متوسط بارندگی سالانه در این منطقه ۱۷۰ میلی‌متر می‌باشد و سطح آب زیرزمینی در عمقی بیشتر از ۱۰ متری سطح خاک قرار دارد. بافت خاک لوم رسی با چگالی ظاهری $gr/cm^3$ ۱/۲۳ $gr/cm^3$ و چگالی واقعی $gr/cm^3$ ۲/۵۵ می‌باشد (Gheysari *et al.,* 2009a and Gheysari *et al.,* 2009b).

برای آبیاری گیاه از سیستم آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک استفاده شد. کود نیتروژنی از منبع کودی اوره به همراه آب آبیاری تأمین و در طی دوره رشد توزیع گردید. داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل ماکزیمم و مینیمم درجه حرارت روزانه، ساعات آفتابی و میزان بارندگی از ایستگاه هواشناسی ورامین واقع در فاصله ۵۰۰ متری محل اجرای طرح، تهیه شدند. به منظور تعیین زمان و عمق آبیاری، از پایش رطوبت خاک استفاده شد. در سال ۱۳۸۲رطوبت خاک به روش وزنی در عمق‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۸۰ سانتی‌متری با استفاده از مته نمونه‌برداری خاک تعیین شد. نمونه‌های خاک پیش و پس از آبیاری از تمام کرت‌ها و از سه نقطه در هر کرت (سه رأس یک مثلث) برداشت شد. در سال ۱۳۸۳ رطوبت خاک با استفاده از نوترون متر در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، و ۹۰ سانتی متری اندازه گیری شد. از آنجایی‌که بارش‌های منطقه مورد نظر بیشتر در پاییز و زمستان رخ می‌دهد، طی دوره رشد ذرت بارندگی رخ نداد. عمق آبیاری با هدف جایگزین‌کردن رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه تا حد FC برای تیمار بدون تنش رطوبتی محاسبه شد و دیگر تیمارهای آبی ضریبی از عمق آبیاری تیمار بدون تنش رطوبتی را دریافت کردند. زمان آبیاری بر اساس تخلیه مجاز رطوبتی (MAD) برابر ۵۰ درصد آب قابل دسترس خاک (پتانسیل ماتریک ۱۰- کیلوپاسکال) در تیمار بدون تنش رطوبتی تعیین شد. عمق آب آبیاری با استفاده از کنتورهای حجمی که در مسیر جریان نصب شده بودند، کنترل می‌شد (Gheysari *et al.,* 2009a and Gheysari *et al.,* 2009b). در این مطالعه از سطح کم آبیاری ۰/۸۵SMD ($M_1$) و سطح بیش آبیاری ۱/۱۳SMD ($M_2$) در سه سطح کود نیتروژن ۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار (به ترتیب $N_0$، $N_{150}$، $N_{200}$) برای اجرای مدل CERES-Maize استفاده شد.

مدل CERES یکی از اجزای مهم بسته نرم افزاری DSSAT است که توسط شبکه بین المللی سایت‌های مبنا جهت انتقال تکنولوژی کشاورزی (IBSNAT) توسعه یافته است (Tsuji *et al.,* 1994). بسته نرم‌افزاری DSSAT با قابلیت شبیه-سازی رشد، فنولوژی، بیلان آب و نیتروژن و عملکرد ۲۸ گیاه مختلف توسعه داده شده است. مدل CERES قادر به شبیه‌سازی تأثیرات گونه گیاهی، تراکم کشت، آب و هوا، آب خاک و نیتروژن بر رشد، توسعه و عملکرد غلات می‌باشد (Gerakis *et al.,* 2006). این مدل برای شرایط محیطی متنوع طراحی شده و نیاز به داده‌های محدودی از داده‌های قابل دسترس مزرعه‌ای دارد.

[1] تخلیه رطوبتی آب خاک (Soil Moisture Depletion)

برای استفاده از مدل CERES نیاز به ساخت فایل خاک، آب و هوا، فایل X، فایل‌های T و A همچنین ضرایب ژنتیکی واریته مورد بررسی (Hunt, 1993 and Ritchie, 1993) می‌باشد.

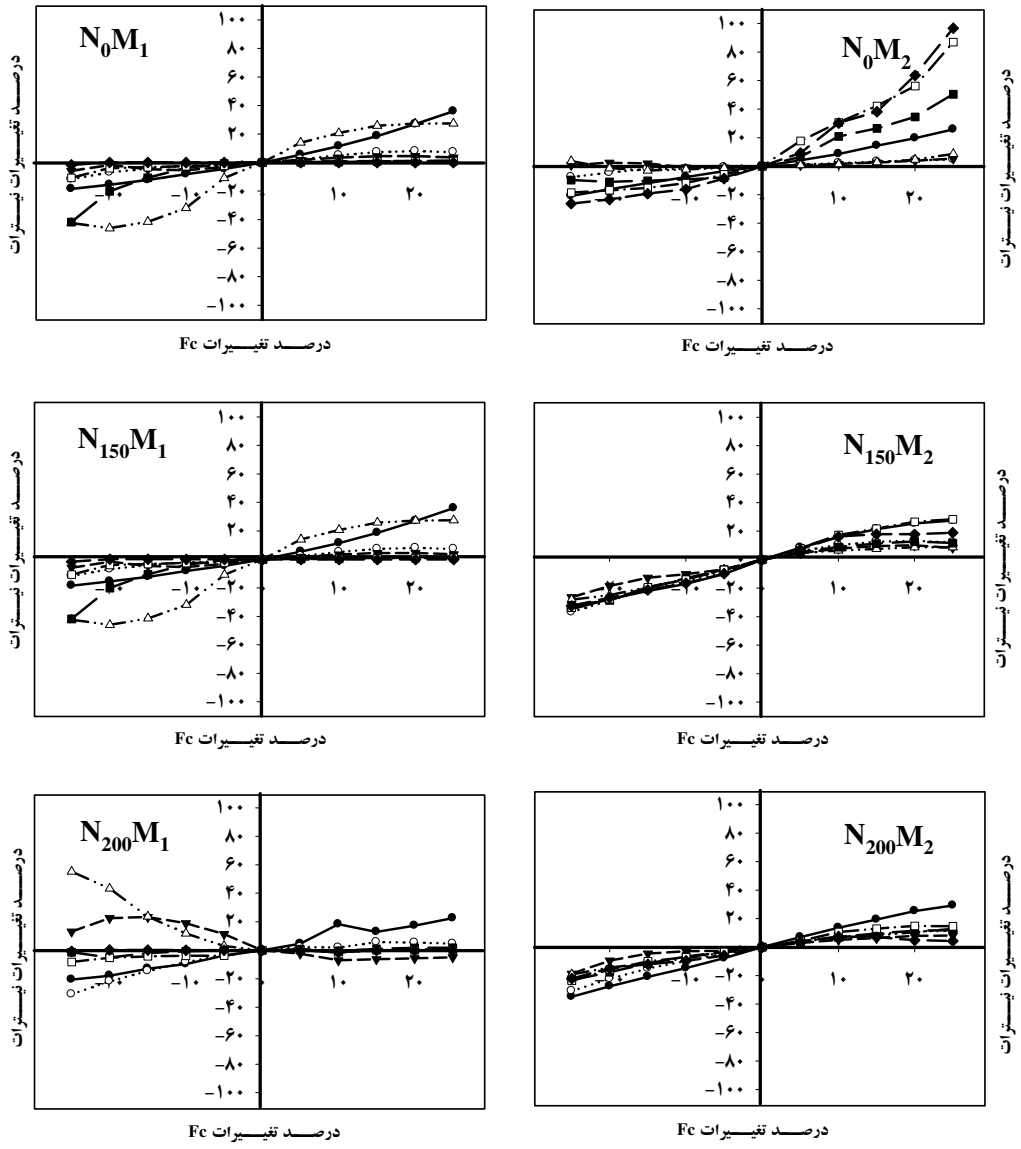
داده‌های هواشناسی شامل تابش خورشیدی در بالای پوشش گیاهی یا ساعات آفتابی، ماکزیمم و مینیمم دمای هوا در بالای گیاه و همچنین بارندگی به صورت روزانه در فایل آب و هوای مدل استفاده شد. خصوصیات نگهداری آب در خاک، چگالی ظاهری، خصوصیات فیزیکی خاک در فایل خاک مدل ثبت شد. خصوصیات مدیریتی گیاه شامل نام و نوع گونه کشت شده، زمان کاشت، عمق و روش کاشت، فاصله و جهت کاشت، تراکم کشت، فاکتورهای مدیریت آب آبیاری شامل روش و میزان آبیاری، میزان و روش کاربرد کود و نوع کود کاربردی و زمان برداشت در فایل X ثبت گردید. فایل A و T با استفاده از داده‌های مزرعه ای تهیه شد. ضرایب ژنتیکی ذرت علوفه ای سینگل کراس ۷۰۴ از تحقیقات قبلی که در ایران انجام شده است (قیصری و همکاران، ۱۳۸۸) استخراج گردید. با توجه به اینکه ضرایب ژنتیکی برای واریته مورد استفاده در این تحقیق قبلا استخراج شده است (قیصری و همکاران، ۱۳۸۸) مدل CSM-CERES-Maize نیاز به کالیبره مجدد ندارد.

در این مطالعه میزان حساسیت پارامترهای خروجی مدل شامل: غلظت نیترات و آمونیوم در لایه‌های ۵-۰، ۱۵-۵، ۲۰-۱۵، ۳۰-۲۰، ۴۰-۳۰، ۵۰-۴۰ و ۶۰-۵۰ سانتی‌متری خاک، معدنی شدن و دنیتریفیکاسیون خاک و همچنین میزان نیتروژن در اندام هوایی گیاه، میزان نیتروژن در ریشه و برداشت نیتروژن توسط گیاه نسبت به ظرفیت زراعی خاک مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق با روش به کار گرفته در تحقیقات پیشین (Skaggs, 1981; Patal and Shekh, 2005 and Imran *et al.*, 2007)، آنالیز حساسیت از طریق اجرای مدل در سناریوهایی که در آنها میزان پارامتر ورودی ظرفیت زراعی در هر عمق بین ۲۵٪- و ۲۵٪+ از بهترین میزان تخمین آن (اندازه-گیری شده در مزرعه) با بازه ی ۵٪ تغییر می‌کرد، انجام شد. به طور مثال میزان ظرفیت زراعی در لایه اول بین مقادیر ۰/۲۲۵ و ۰/۳۷۶ تغییر داده شد و میزان تغییرات هر پارامتر خروجی مورد نظر نسبت به مقدار پارامتر خروجی در بهترین تخمین FC (مقدار پایه پارامتر خروجی) تعیین شد. سپس میزان تغییرات پارامتر خروجی نسبت به تغییرات FC ترسیم شد. تغییرات زیاد در پارامتر خروجی نشان‌دهنده حساسیت آن پارامتر نسبت به FC می-باشد.

## نتایج و بحث

### ۱- حساسیت مدل نسبت به تغییرات FC در برآورد غلظت نیترات لایه‌های مختلف خاک

شکل (۱) درصد تغییرات غلظت نیترات خاک از مقدار پایه (غلظت نیترات تخمین زده شده توسط مدل با استفاده از FC اندازه‌گیری شده در مزرعه) را در ازای تغییرات FC در لایه‌های مختلف خاک و برای تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، محدوده تغییرات غلظت نیترات خاک در اثر تغییر ۲۵ درصدی FC (افزایش و یا کاهش) بین ۷/۱۷ و ۹۶/۷۵ درصد می‌باشد. با توجه به شکل (۱) همچنین مشاهده می‌شود که میزان حساسیت مدل در لایه‌های مختلف خاک متفاوت می‌باشد. به طور مثال در تیمار N0M1، ۲۵ درصد کاهش در میزان FC سبب کاهش ۱۸/۴ درصدی غلظت نیترات در لایه اول شده است، در حالی‌که در لایه هفتم ۱/۵۸ درصد کاهش در این پارامتر مشاهده شد (شکل ۱).




**شکل ۱- درصد تغییرات غلظت نیترات خاک نسبت به مقدار پایه تحت تأثیر تغییرات FC در لایه‌های مختلف خاک و تیمارهای مختلف.** $N_0$: **عدم استفاده از کود نیتروژن،** $N_{150}$: **۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار،** $N_{200}$: **۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار،** $M_1$: **کم آبیاری (۰/۷SMD)،** $M_2$: **بیش آبیاری (۱/۱۳SMD). (—•— لایه اول خاک، ····○···· لایه دوم خاک، - - -▼- - - لایه سوم خاک، — —△— — لایه چهارم خاک، — ■ - لایه پنجم خاک، - -□- - لایه ششم خاک، — —◄— — لایه هفتم خاک)**

در تمامی تیمارهای بررسی شده میزان غلظت نیترات خاک برآورد شده توسط مدل در لایه اول نسبت به تغییرات FC حساس می‌باشد. در تیمارهای کم‌آبیاری بیشترین حساسیت مدل در لایه‌های اول و چهارم و در تیمارهای بیش آبیاری بیشترین حساسیت در لایه‌های اول، ششم و هفتم

مشاهده می‌شود. در تیمار N0 با افزایش میزان آب مصرفی، میزان حساسیت مدل نسبت به ظرفیت زراعی در شبیه‌سازی غلظت نیترات خاک مزرعه افزایش یافته است (شکل ۱).

از آنجایی‌که در مدل CERES بیشترین تفاوت موجود در میزان آبشویی شبیه‌سازی شده در خاک-های با بافت مختلف ناشی از تفاوت بین نسبت آب قابل تحرک و به میزان آب زهکشی شده از پروفیل خاک نسبت داده می‌شود (گودوین و جونز، ۱۹۹۱)، دلیل حساسیت مدل نسبت به FC را می-توان در ایجاد تغییر در میزان آب قابل تحرک در اثر تغییر در FC دانست. با توجه به اینکه میزان تغییرات غلظت نیترات در هر لایه با توجه به میزان آب و نیترات ورودی به هر لایه و میزان آب و نیترات خروجی از آن لایه تعیین می‌شود، حساسیت مدل در لایه‌های مختلف متفاوت است.

## ۲- حساسیت مدل نسبت به تغییرات FC در برآورد غلظت آمونیوم لایه‌های مختلف خاک

شکل (۲) درصد تغییرات غلظت آمونیوم از مقدار پایه را در ازای تغییرات ظرفیت زراعی خاک در لایه‌های مختلف خاک و برای تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، درصد تغییرات میزان آمونیوم شبیه‌سازی شده توسط مدل در لایه‌های مختلف خاک متفاوت می-باشد. در تیمارهای کم آبیاری ($M_1$) حساسیت مدل در بیشتر لایه‌های خاک مشاهده می‌شود. در حالی-که در تیمار بیش آبیاری ($M_2$) این حساسیت تنها در لایه سوم و چهارم مشهود است (شکل ۲). به طور کلی حساسیت مدل به تغیرات FC برای شبیه سازی آمونیوم در تیمارهای کم آبیاری ($M_1$) بیشتر از تیمار بیش آبیاری ($M_2$) است.

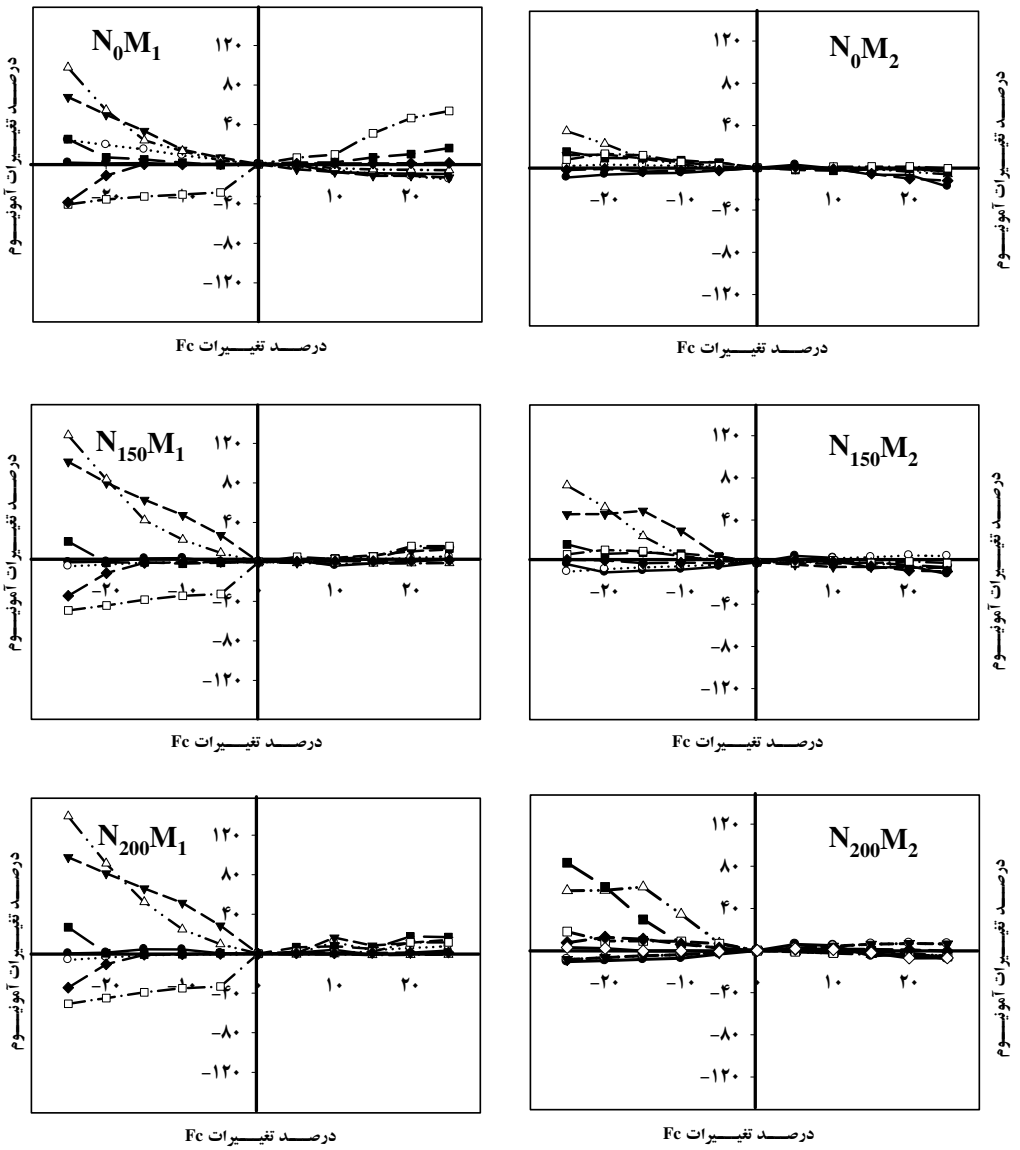
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، محدوده تغییرات غلظت آمونیوم خاک در اثر تغییر ۲۵ درصدی FC (افزایش و یا کاهش) بین ۳۳/۳۱ و ۱۳۹/۰۱ درصد می‌باشد (شکل ۲). با مقایسه این محدوده با محدوده تغییرات غلظت نیترات خاک می‌توان گفت که حساسیت مدل نسبت به تغییرات FC در برآورد غلظت آمونیوم خاک نسبت به برآورد غلظت نیترات خاک بیشتر است. از طرفی محدوده تغییرات غلظت آمونیوم در اثر کاهش FC از مقدار پایه بین ۵۰/۶۸ و ۱۳۹/۰۱درصد و در اثر افزایش FC بین ۳۳/۳۱ و ۵۳/۷۹ درصد می‌باشد (شکل ۲). بنابراین چنانچه مقدار FC کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شود، انحراف بیشتری در تخمین غلظت آمونیوم خاک توسط مدل نسبت به مقدار واقعی مشاهده خواهد شد.

همان‌گونه که در شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود، محدوده تغییرات میزان معدنی‌شدن و همچنین نیتریفیکاسیون برآورد شده توسط مدل در اثر تغییرات FC بین ۳ تا ۶ درصد می‌باشد. به این ترتیب میزان معدنی‌شدن و همچنین نیتریفیکاسیون برآورد شده توسط مدل حساسیت چندانی نسبت به تغییرات FC نشان نمی‌دهند.

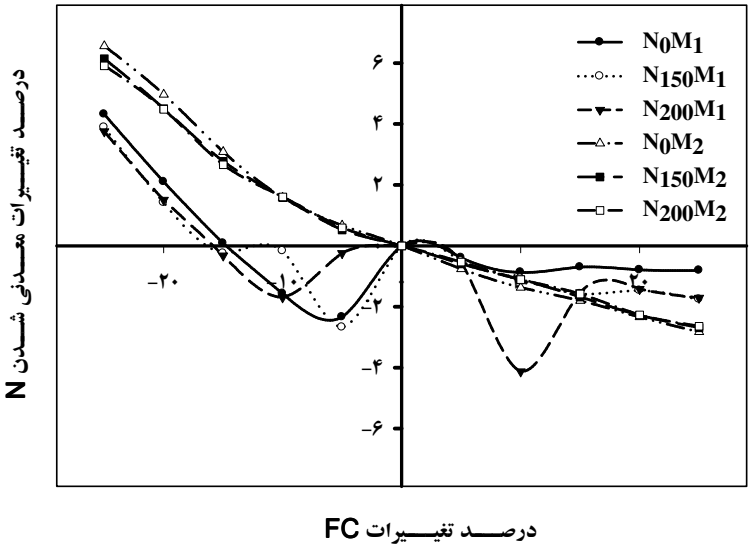
در مدل CERES تنها نیترات و اوره قابل تحرک در لایه‌های مختلف خاک می‌باشند و یون آمونیوم به صورت غیر قابل تحرک در خاک در نظر گرفته می‌شود (گودوین و جونز، ۱۹۹۱).

میزان آمونیوم در هر لایه در اثر فرایندهایی همچون معدنی‌شدن، نیتریفیکاسیون، تثبیت نیتروژن و همچنین برداشت آمونیوم توسط گیاه تغییر می-کند. در صورت کاربرد کود اوره، نیتروژن آزاد شده در اثر هیدرولیز اوره به منابع آمونیوم نیتروژن خاک افزوده می‌شود (Godwin and Jones, 1991).

به همین دلیل حساسیت آمونیوم شبیه‌سازی شده توسط مدل را می‌توان در مکانیسم‌های تحرک و هیدرولیز اوره موجود در مدل جستجو کرد. در مدل CERES هیدرولیز اوره خاک تحت تأثیر دما، رطوبت و pH خاک قرار دارد (Godwin and Jones, 1991)، به این ترتیب می‌توان گفت، احتمالاً تغییرات میزان آمونیوم خاک در اثر تغییر در ظرفیت زراعی تحت تأثیر تغییرات تحرک اوره و همچنین رطوبت خاک قرار می‌گیرد.




**شکل ۲- درصد تغییرات غلظت آمونیوم خاک نسبت به مقدار پایه تحت تأثیر تغییرات FC در لایه‌های مختلف خاک و تیمارهای مختلف.** $N_0$: **عدم استفاده از کود نیتروژن،** $N_{150}$: **۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار،** $N_{200}$: **۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار،** $M_1$: **کم آبیاری (۰/۷SMD)،** $M_2$: **بیش آبیاری (۱/۱۳SMD). (لایه اول خاک، لایه دوم خاک، لایه سوم خاک، لایه چهارم خاک، لایه پنجم خاک، لایه ششم خاک، لایه هفتم خاک)**

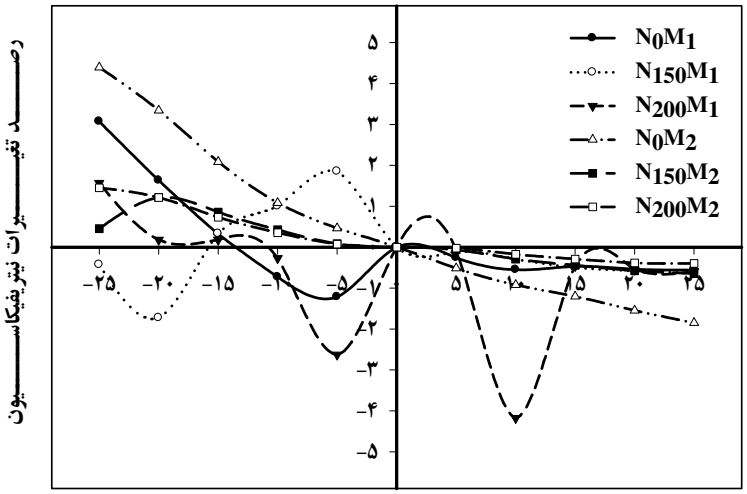



**شکل ۳- درصد تغییرات معدنی شدن N در خاک نسبت به مقدار پایه تحت تأثیر تغییرات FC در تیمارهای مختلف.** $N_0$**: عدم استفاده از کود نیتروژن،** $N_{150}$**: ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار،** $N_{200}$**: ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار،**$M_1$**: کم آبیاری (۰/۷SMD)،** $M_2$**: بیش آبیاری (۱/۱۳SMD)**

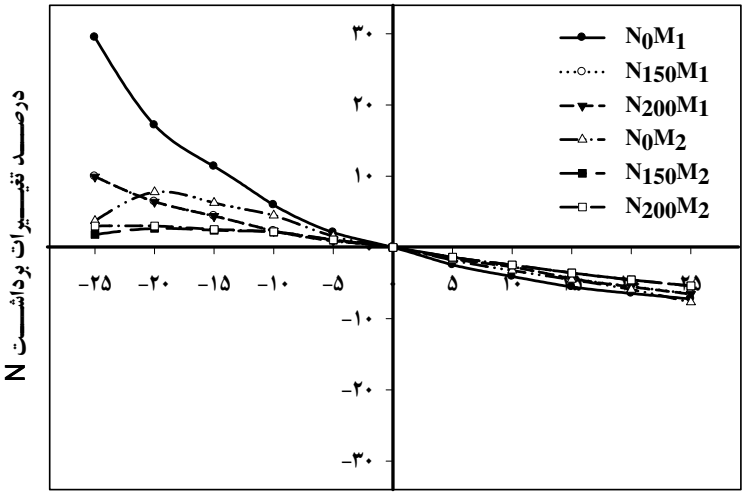
## ۳- حساسیت مدل نسبت به تغییرات FC در برآورد غلظت و میزان نیتروژن گیاه

در این مطالعه درصد تغییرات غلظت نیتروژن گیاه نسبت به تغییرات ظرفیت زراعی خاک در تیمارهای مختلف بررسی شد (شکل ارائه نشده است). نتایج نشان داد در تمام تیمارهای مورد بررسی به جز تیمار $N_0M_1$، مدل CERES در برآورد غلظت نیتروژن موجود در اندام‌های هوایی گیاه و همچنین غلظت نیتروژن ریشه نسبت به تغییرات FC دارای حساسیت کمی (کمتر از ۲ درصد) می‌باشد.

بیشترین درصد تغییرات نیتروژن برداشت شده توسط گیاه تحت تأثیر تغییرات FC حدود ۳۰ درصد برای تیمار $N_0M_1$ و حدود ۱۰ درصد برای تیمارهای $N_{150}M_1$ و $N_{200}M_1$ رخ داد (شکل ۵). نتایج همچنین نشان داد که درصد تغییرات نیتروژن برداشت شده توسط گیاه تحت تأثیر تغییرات FC در تیمارهای بیش آبیاری کمتر از تیمارهای کم آبیاری است. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت مدل نسبت به تغییرات FC برای شبیه سازی نیتروژن برداشت شده توسط گیاه در تیمارهای کم آبیاری بیشتر است.

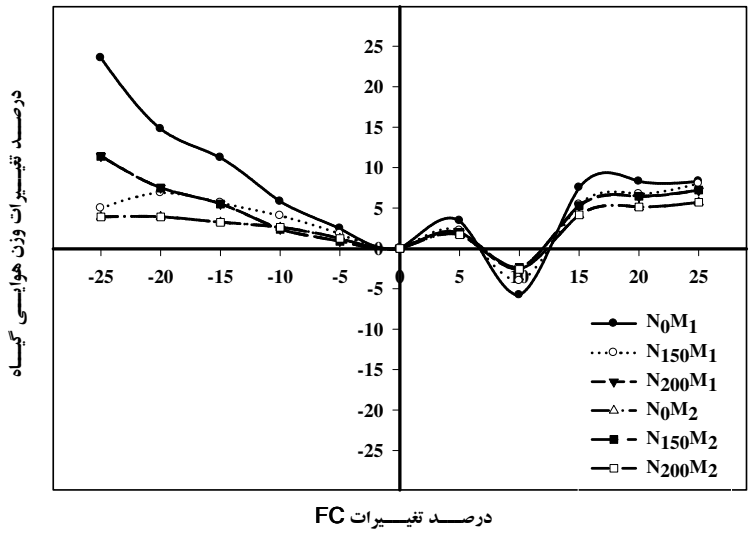



**شکل ۴- درصد تغییرات نیتریفیکاسیون در خاک نسبت به مقدار پایه تحت تأثیر تغییرات FC در تیمارهای مختلف. $N_0$: عدم استفاده از کود نیتروژن، $N_{150}$: ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، $N_{200}$: ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، $M_1$: کم آبیاری (۰/۷SMD)، $M_2$: بیش آبیاری (۱/۱۳SMD)**




**شکل ۵- درصد تغییرات نیتروژن برداشت شده توسط گیاه نسبت به مقدار پایه تحت تأثیر تغییرات FC در تیمارهای مختلف. $N_0$: عدم استفاده از کود نیتروژن، $N_{150}$: ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، $N_{200}$: ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار، $M_1$: کم آبیاری (۰/۷SMD)، $M_2$: بیش آبیاری (۱/۱۳SMD)**

همان‌گونه که در شکل (۶) مشاهده می‌شود، تغییرات وزن اندام هوایی گیاه تحت تأثیر تغییر در میزان FC، در تیمار $N_0M_1$ بیشترین مقدار و در تیمار $N_{200}M_2$ کمترین مقدار را دارد. این موضوع حساسیت بیشتر مدل به تغییرات FC در تیمارهای تنش رطوبتی در مقایسه با شرایط بیش آبیاری را تأیید می‌کند.




**شکل ۶- تغییرات وزن اندام هوایی گیاه از مقدار پایه در اثر تغییرات FC در تیمارهای مختلف.** $N_0$**: عدم استفاده از کود نیتروژن،** $N_{150}$**: ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار،** $N_{200}$**: ۲۰۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار،** $M_1$**: کم آبیاری (۰/۷SMD)،** $M_2$**: بیش آبیاری (۱/۱۳SMD)**

## نتیجه‌گیری

نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که مدل CERES در برآورد غلظت نیترات و آمونیوم در لایه‌های خاک نسبت به پارامتر ورودی FC حساس می‌باشد که این حساسیت در برآورد غلظت آمونیوم خاک بیشتر است. مقدار حساسیت مدل نسبت به تغییرات FC در شرایط کم آبیاری بیشتر از بیش آبیاری است. حساسیت مدل نسبت به تغییرات FC برای شبیه سازی غلظت نیتروژن گیاه، معدنی شدن نیتروژن و نیتریفیکاسیون کم می‌باشد. بطور کلی مدل گیاهی CERES به تغییرات FC حساس بوده و حساسیت مدل در شرایط تنش رطوبتی افزایش می‌یابد. بنابراین برای استخراج نتایج رضایت بخش از مدل‌های گیاهی در روابط آب، خاک و گیاه بویژه در شرایطی که مدل برای بررسی استراتژی‌های کم آبیاری استفاده می‌شود، باید در اندازه‌گیری و تعیین FC دقت کرد.

## فهرست منابع


۱) قیصری م. میرلطیفی س.م. زارعیان م.ج. و بیابانکی م. ۱۳۸۸. ارزیابی مدل CSM-CERES-Maize در مقیاس مزرعه‌ای. دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، ۱۹ تا ۲۱ بهمن، کرمان.

2) Campbell G.S. and Campbell M.D. 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: Theory and practice. Advanced Irrigation 1: 25-41.

3) Gerakis A. 1994. Simulation and measurement of atrazine and nitrate losses as influenced by water table management. PhD dissertation. Michigan State University: East Lansing, Michigan.

4) Gerakis A. Rasse D.P. Kavdir Y. Smucker, A.J.M. Katsalirou, I. and Ritchie J.T. 2006. Simulation of leaching losses in the nitrogen cycle. Communications in Soil Science and Plant Analysis 37: 1973-1997.

5) Gheysari M. Mirlatifi S.M. Bannayan M. Homaee M. and Hoogenboom G. 2009a. Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage. Agricultural Water Management 96: 809-821.

6) Gheysari M. Mirlatifi S.M. Homaee M. Asadi M.E. and Hoogenboom G. 2009b. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rate. Agricultural Water Management 96: 946-954.

7) Godwin D.C. and Jones C.A. 1991. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. In: Hanks, J. and Ritchie J.T. (eds.), Modeling Plant and Soil Systems (Agronomy monograph no. 31). American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 287-321.

8) Hunt L.A. 1993. Designing improved plant types: a breeder's viewpoint. In: Penning de

Vries F. Teng P. and Metselaar, K. (eds.), Systems Approaches for Agricultural Development. Kluwer Academic Press, Boston, pp. 3- 17.

9) Imran A. Rudra R. McKague K. Gharabaghi B. and Ogilvie J. 2007. Evaluation of the Root Zone Water Quality Model (RZWQM) for Southern Ontario: Part I: sensitivity analysis, calibration, and validation. Water Quality Research Journal of Canada 42(3): 202-218.

10) Jones J.W. Hoogenboom G. Porter C.H. Boote K.J. Batchelor W.D. Hunt L.A. Wilkens P.W. Singh U. Gijsman A.J. and Ritchie J.L. 2003. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy 18: 235-265.

11) Jones C.A. and Kiniry J.R. 1986. CERES–Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development, Texas A&M Press: College Station, Texas. 194p.

12) Meyer P.D. and Gee G. 1999. Flux-based estimation of field capacity. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 125(7): 595-599.

13) Novoa R. and Loomis R.S. 1981. Nitrogen and plant production. Plant and Soil 58: 177-204.

14) Patal H.R and Shekh A.M. 2005. Sensitivity analysis of CERES-Wheat model to various weather and non-weather parameters for wheat (CV.GW-496). The Journal of Agricultural Science 1(2): 21-30.

15) Ritchie J.T. 1993. Genetic specific data for crop modeling. In: Penning de Vries F. Teng, P. and Metselaar K. (eds.). Systems Approaches for Agricultural Development. Kluwer Academic Press, Boston, pp. 77- 93.

16) Skaggs R.W. 1981. Methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables. DRAINMOD Reference Report. USDA-SCS, 329 p.

17) Tsuji G.Y. Uehara, G. and Balas S. (eds.). 1994. DSSAT v3; University of Hawaii: WI. Honolulu, Hawaii.

18) Twarakavi N.K.C. Masaru S. and Simunek J. 2009. An objective analysis of the dynamic nature of field capacity. Water Resources Research Vol. 45, W10410, doi:10.1029/2009WR007944.

19) Veihmeyer F.J. and Hendrickson A.H. 1931. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils. Soil Science 32: 181-193.

20) Vigil M.F. Kissel D.E. and Smith S.J. 1991. Field crop recovery and modeling of nitrogen mineralized from labeled sorghum residues. Soil Science Society of America Journal 55: 1031-1037.

21) Zacharias S. and Bohne K. 2008. Attempt of a flux-based evaluation of field capacity. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171(3): 399-408.