

شبیه‌سازی تغییرات نیتروژن خاک و گیاه توسط مدل CERES-Wheat

فرزاد مندنی^{۱*} - بابک غلامی^۲ - علیرضا باقری^۳ - غلامرضا محمدی^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۲۰

چکیده

مصرف بیش از حد نیتروژن باعث آبخش نیترات و آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود، بنابراین اطلاع از توزیع اشکال مختلف نیتروژن و چگونگی حرکت آن‌ها در خاک اهمیت بالایی دارد. به منظور شبیه‌سازی اثر کود نیتروژن بر رشد و عملکرد گندم و همچنین تغییرات نیتروژن خاک و گیاه با استفاده از مدل CERES-Wheat، دو آزمایش در سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ اجرا شد. هر دو آزمایش در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کاربرد سطوح کود نیتروژن (۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار) بود. از نتایج یک آزمایش به منظور استخراج ضرایب ژنتیکی و واسنجی مدل و از دیگری به منظور ارزیابی مدل استفاده شد. نتایج واسنجی نشان داد که مدل قادر است با حداقل اختلاف ویژگی‌های رشد و نمو گندم را شبیه‌سازی کند که بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده بود. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که مدل قادر بود با دقت بالای صفات مورد ارزیابی گندم را شبیه‌سازی کند، بطوریکه میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده برای مراحل نمو، وزن خشک کل و عملکرد دانه به ترتیب در حدود ۷ تا ۸، ۵ تا ۹ و ۱۱ تا ۱۷ درصد میانگین مشاهدات بود. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد، همزمان با کاربرد کود اوره محتوای یون‌های نیترات و آمونیوم خاک افزایش یافت. بیشترین میزان نیترات در تیمارهای ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۴۱/۳، ۵۴/۵، ۷۲/۱ و ۸۰/۹ کیلوگرم در هکتار بود. با افزایش مصرف نیتروژن، مقدار آبخش نیتروژن نیز به شدت افزایش یافت، به طوری که میزان هدر رفت نیتروژن در تیمارهای ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۲۵۹/۳، ۲۷۶/۲، ۳۱۰/۴ و ۳۳۵/۵ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین با افزایش کاربرد کود اوره میزان نیتروژن در اندام‌های هوایی و دانه گندم افزایش یافت. بطورکلی نتایج این بررسی نشان داد که مدل CERES-Wheat توانایی قابل قبولی در شبیه‌سازی تغییرات وضعیت نیتروژن خاک و گیاه دارد.

واژه‌های کلیدی: آبخش نیتروژن، ارزیابی مدل، عملکرد دانه، کارایی نیتروژن، واسنجی مدل

مقدمه

دانه گندم است که تحت تاثیر زمان و میزان مصرف کود نیتروژن قرار دارد. پروتئین دانه گندم به دلیل حجم بالای مصرف، بخش عمده‌ای از نیاز غذایی انسان را تامین می‌کند (۲۲). همچنین بین عملکرد دانه، مقدار پروتئین دانه گندم و عرضه نیتروژن از منابع مختلف رابطه مستقیمی وجود دارد (۲۲). نیتروژن مهم‌ترین عنصر غذایی پر مصرف است که در ساختمان مولکول‌های پروتئین، آنزیم‌ها، کوآنزیم‌ها، اسیدهای نوکلئیک و سیتوکروم‌ها نقش دارد (۱۶). نیتروژن از طریق تاثیر بر تعداد پنجه، سنبله بارور، تعداد دانه و وزن هزار دانه بر تمام اجزای عملکرد دانه گندم تاثیر می‌گذارد. بنابراین تامین نیتروژن در زمان‌های مختلف رشد و مطابق با نیاز گیاه می‌تواند بر افزایش جذب آن و سرعت رشد و عملکرد گیاهان زراعی موثر باشد (۴۱).

در بیشتر مناطق جهان منبع اصلی آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی، نیتروژن مصرف شده در بوم نظام‌های کشاورزی است. کودهای نیتروژنی به دلیل آبخش سریع یون نیترات در خاک و همچنین استفاده بیش از حد نیاز، یکی از عوامل اصلی آلوده کننده

در بین محصولات زراعی گندم با سطح زیر کشت حدود ۲۱۰ میلیون هکتار و میزان تولید حدود ۶۰۰ میلیون تن نقش بسیار مهمی در جیره غذایی مردم دنیا و کشور ایران ایفاء می‌کند (۹ و ۳۷). کیفیت دانه گندم تحت تاثیر مدیریت‌های زراعی نظیر میزان، زمان و چگونگی مصرف نیتروژن، نوع ژنوتیپ و شرایط محیطی در مراحل قبل و پس از گرده افشانی و همچنین برهمکنش عوامل محیطی و نوع ژنوتیپ قرار دارد (۳۹). میزان پروتئین یکی از شاخص‌های کیفیت

۱، ۲ و ۴ - به ترتیب استادیار اکولوژی گیاهان زراعی، دانشجوی کارشناسی ارشد اکرواکولوژی و دانشیار اکولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

۳ - استادیار علوم شناسایی و مبارزه با علف‌های هرز، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

(* - نویسنده مسئول: Email: F.mondani@razi.ac.ir

DOI: 10.22067/jsw.v32i4.70443

مراحل فنولوژی گندم در شرایط رژیم‌های رطوبتی مختلف در اهواز (۹)، شبیه سازی عملکرد و مراحل فنولوژی گندم دوروم در ایتالیا (۱۰)، پیش بینی اثرات تغییر اقلیم بر تولید گندم (۱۵ و ۳۵) و بررسی اثر شرایط اقلیمی، رژیم‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن بر عملکرد گندم اشاره کرد (۴). از آنجا که استان کرمانشاه یکی از مناطق مهم تولید محصولات کشاورزی در ایران است و گندم نقش بارزی در تناوب زراعی این استان دارد، این مطالعه به منظور ارزیابی توانایی مدل CERES-Wheat در شبیه سازی تاثیر مدیریت مصرف نیتروژن بر مراحل رشد و نمو و عملکرد گندم و همچنین بررسی وضعیت تغییرات نیتروژن خاک و گیاه انجام شد.

مواد و روش‌ها

تشریح مدل

به منظور شبیه سازی رشد و نمو گندم از مدل سیستم گیاهی گندم (CSM- CERES-Wheat) از بسته نرم افزار DSSAT نسخه ۴/۶ استفاده شد (۱۸، ۲۰). این مدل رشد و نمو و تولید دانه را با در نظر گرفتن ویژگی‌های آب و هوایی، خاک و همچنین میزان نیتروژن و آب خاک شبیه سازی می‌کند. در این مدل امکان تعیین استراتژی‌های مدیریت مزرعه بر اساس تفاوت واکنش ارقام مختلف به مواردی نظیر زمان کشت، مقدار کود نیتروژن و تیمار آبیاری وجود دارد (۱). ورودی‌های این مدل شامل عملیات مدیریت زراعی، اختلافات ارقام، نوع و ویژگی‌های خاک و اطلاعات آب و هوایی است. برای شبیه‌سازی توسط این مدل لازم است که داده‌های مورد نیاز ابتدا تحت فایل‌های خاصی سازماندهی و به مدل ارائه شوند. هر کدام از این فایل‌ها جنبه خاصی از رشد و نمو گیاه و یا شرایط محیطی را نشان می‌دهند. فایل X شامل اطلاعات مدیریت زراعی نظیر تاریخ کاشت، تراکم بوته، عمق کاشت، فاصله ردیف کاشت، رقم مورد کاشت، شرایط اولیه خاک (رطوبت و حاصلخیزی) و جزئیات برداشت بود که توسط زیر مدل XBUILD به مدل ارائه گردید. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز شامل تشعشع خورشیدی روزانه (بر حسب مگاژول در متر مربع)، کمینه و بیشینه درجه حرارت روزانه (بر حسب درجه سانتی‌گراد) و میزان بارندگی روزانه (بر حسب میلی‌متر) برای سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ میلادی بود که از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه که در فاصله ۴ کیلومتری از محل اجرای آزمایش‌ها قرار دارد تهیه شد و سپس توسط زیر مدل Weather Man در مدل تعریف گردید. فایل A حاوی اطلاعاتی نظیر عملکرد دانه (بر حسب کیلوگرم در هکتار)، وزن خشک کل (بر حسب کیلوگرم در هکتار)، حداکثر شاخص سطح برگ، تعداد روز از کاشت تا گلدهی و تعداد روز از کاشت تا گدھی و در نهایت فایل T در برگیرنده ویژگی‌های روند تغییرات مراحل نمو فنولوژیک، روند

منابع آب شناخته شده‌اند (۲). به دلیل انحلال پذیری و قابلیت انتقال بالای یون نترات، آب‌های زیرزمینی که تنها منبع آب آشامیدنی بسیاری از مردم دنیا هستند، به‌طور دائم در معرض تهدید آلودگی قرار دارد (۱۴). میانگین جذب نیتروژن توسط محصولات زراعی مختلف کمتر از ۵۰ درصد گزارش شده است که نشان می‌دهد بیش از ۵۰ درصد از نیتروژن مصرف شده در سیستم‌های کشاورزی می‌تواند به شکل‌های مختلف هدر رود (۴۵). کارایی پایین جذب نیتروژن در بسیاری از گیاهان زراعی عامل مهمی در تشدید تلفات از طریق آبشویی، تصعید و انتشار این عنصر کلیدی مورد نیاز گیاه است که به راحتی در خاک و اتمسفر رها می‌شوند.

همانطور که گفته شد گندم اهمیت قابل توجهی در تامین انرژی مردم دارد. بنابراین ارزیابی وضعیت آینده تولید این محصول از مسائلی است که توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب نموده است (۳۲). برای تعیین زمان مطلوب و میزان استفاده از نیتروژن مطالعات طولانی مدت و پرهزینه مزرعه‌ای ضروری است. از طرفی انجام اینگونه مطالعات با در نظر گرفتن عوامل تاثیرگذار بر فرایندهای جذب نیتروژن و بررسی برهمکنش آنها در مزرعه بسیار مشکل است (۳۷). براساس پیشرفت‌های به عمل آمده امروزه نرم‌افزارهای رایانه‌ای برای مدیریت نظام‌های زراعی به عنوان یک ابزار قوی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۹). از جمله این نرم افزارها مدل‌های شبیه سازی رشد و نمو گیاهان هستند. این مدل‌ها ابزارهای کمی هستند که بر اساس اصول علمی استوار بوده و می‌توانند اثرات متفاوت اقلیم، خاک، آب و مدیریت زراعی را روی تولید محصولات زراعی مورد ارزیابی قرار دهند (۳۲). با استفاده از این مدل‌ها همچنین می‌توان به پیش بینی میزان نترات شسته شده، انتقال آن به آب‌های زیرزمینی و مدیریت مصرف آن تحت شرایط مختلف در مزرعه پرداخت (۳۳). استفاده از مدل‌های شبیه سازی به دلیل هزینه کم، سرعت زیاد و ارائه اطلاعات کامل گزینه مناسبی برای تکمیل و توسعه آزمایش‌های مزرعه‌ای است (۴۰).

تاکنون مدل‌های مختلفی برای شبیه سازی رشد گندم توسعه یافته‌اند که در بین آنها مدل CERES1-Wheat از بسته نرم افزاری DSSAT2 یکی از معروف‌ترین آن‌هاست (۲۰ و ۱۸). این مدل رشد و نمو غلات را با توجه به مقدار نیتروژن، آب و شاخص‌های خاک و اقلیم محاسبه می‌کند (۱). در زمینه ارزیابی توانایی این مدل در شبیه سازی نقش مدیریت زراعی و عوامل اقلیمی بر تولید گندم مطالعات بسیاری در دنیا انجام شده است که از آن جمله می‌توان به پیش بینی عملکرد گندم در استان خراسان (۲۱)، شبیه سازی رشد، عملکرد و

- 1- Crop Estimation through Resource and Environment synthesis
- 2-Decision Support System for Agrotechnology Transfer

پژمردگی دائم و میزان رطوبت اشیاء بود که از اعماق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر، ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر و ۶۰ تا ۹۰ سانتی‌متر خاک محل آزمایش اندازه‌گیری شد (جدول ۱) و توسط بخش SBuild بسته نرم افزاری مدل DSSAT در قالب فایل خاکشناسی به عنوان ورودی‌های مدل معرفی گردید.

تغییرات عملکرد دانه، روند تغییرات وزن خشک کل و روند تغییرات شاخص سطح برگ گندم بود که در طول فصل رشد اندازه‌گیری شده بود. علاوه بر این، اطلاعات خاکشناسی مورد نیاز شامل درصد رس، شن و سیلت، وزن مخصوص ظاهری، اسیدیته خاک، کل نیتروژن قابل جذب توسط گیاه، درصد کربن آلی، نقطه ظرفیت زراعی، نقطه

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک محل آزمایش
Table 1- Soil physico-chemical properties of experimental field

عمق خاک (سانتیمتر) Soil Depth (cm)	بافت خاک Soil Texture	رس (%) Clay (%)	سیلت (%) Silt (%)	شن (%) Sand (%)	کربن آلی (%) Orga nic Carbo n (%)	نیتروژن (%) Nitrogen (%)	اسیدیته خاک pH	وزن مخصوص ظاهری Bulk Density	نقطه پژمردگی دائم Permanent Wilting Point	نقطه ظرفیت زراعی Field Capacity	رطوبت اشباع Saturation
0-30	Clay-Silt	44.3	39.0	16.7	1.5	0.17	7.4	1.4	0.205	0.325	0.49
30-60	Clay-Silt	44.7	38.7	16.7	1.1	0.17	7.4	1.5	0.205	0.325	0.49
60-90	Clay-Silt	42.3	40.0	17.7	1.0	0.17	7.4	1.6	0.225	0.355	0.495

هستند که لازم است جهت واسنجی مدل از اطلاعات مستخرج از آزمایش‌های مزرعه و یا منابع معتبر استخراج شوند. پس از انجام فرایند واسنجی و کسب اطمینان از دقت ضرایب ژنتیکی، لازم است که مدل مورد ارزیابی توسط اطلاعات مستخرج از آزمایش‌های مستقل (آزمایش‌هایی که به منظور استخراج ضرایب ژنتیکی استفاده نشده‌اند) قرار گیرد. در این بررسی استخراج ضرایب ژنتیکی به منظور واسنجی مدل و همچنین فرایند ارزیابی از طریق آزمایش‌های مزرعه‌ای صورت گرفت.

آزمایش مزرعه

به منظور واسنجی و ارزیابی مدل CERES-Wheat جهت شبه‌سازی اثر نیتروژن بر رشد، مراحل فنولوژیکی، عملکرد گندم و مطالعه تغییرات نیتروژن خاک و گیاه از اطلاعات مستخرج از دو آزمایش استفاده شد. به این صورت که یک آزمایش به منظور استخراج ضرایب ژنتیکی برای واسنجی مدل و آزمایش دیگر به منظور ارزیابی مدل بود. این آزمایش‌ها در سال زراعی ۱۳۹۴-۱۳۹۵ در مزرعه تحقیقاتی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی (طول جغرافیایی ۴۷ درجه ۵/۹۴ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۹/۵۲ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۳۲۰ متر) اجرا شدند. میانگین بلند مدت سالانه بارندگی و دما منطقه به ترتیب، ۴۳۷ میلی‌متر و ۱۵/۳ درجه سانتی‌گراد است. آب و هوای منطقه بر اساس تقسیم بندی اقلیمی دومارتن سرد و نیمه خشک است. خاک محل آزمایش دارای بافت لومی-رسی بود (جدول ۱).

هر دو آزمایش در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایش شامل کاربرد کود نیتروژن در چهار

یکی از مهمترین بخش‌های مدل سیستم گیاهی گندم در بسته نرم افزار DSSAT اطلاعات مربوط به ارقام گیاهان زراعی است که در فرایند واسنجی مدل بر مبنای تنظیم و تعیین یک سری ضرایب ژنتیکی برای رقم مورد نظر بکار برده می‌شود (۹). از آنجا که ارقام مختلف گیاهان زراعی از نظر ویژگی‌های فیزیولوژیکی و مرفولوژیکی با یکدیگر تفاوت دارند، این اختلافات روی رشد، نمو و عملکرد آنها تاثیرگذار خواهد بود. بنابراین این اختلافات وارپته‌ای باید به نوعی در مدل‌های شبه‌سازی گیاهان زراعی در نظر گرفته شوند تا پیش بینی قابل قبولی انجام شود. در گندم این مشخصه‌ها به وسیله هفت پارامتر و به نام ضرایب ژنتیکی در مدل CERES-Wheat ارایه شده‌اند. این ضرایب مشخص می‌کنند که چگونه یک ژنوتیپ نسبت به عوامل محیطی مانند درجه حرارت، طول روز، محتوی آب خاک و نیتروژن واکنش نشان می‌دهد و یا اینکه طول دوره رشد و مرفولوژی رقم چگونه است (۲۱). این ضرایب شامل: P1V، میزان حساسیت ارقام گندم به بهاره‌سازی و نشان دهنده تعداد روزهایی است که گیاه باید درجه حرارت مناسب برای بهاره‌سازی در حد مطلوب باشد، PID، میزان تاخیر در نمو گندم به ازای قرار گرفتن گیاه در دوره نوری با یک ساعت کوتاه‌تر از دوره نوری مطلوب را نشان می‌دهد، P5، طول دوره پر شدن دانه بر اساس درجه روز رشد، G1، تعداد دانه در هر واحد جامعه گیاهی در واحد سطح در زمان گرده افشانی بر حسب تعداد در گرم، G2، سرعت پر شدن دانه بر حسب میلی‌گرم در روز که بر اساس فراهمی منابع محاسبه می‌شود، G3، وزن خشک ساقه (شامل پهنک و غلاف برگ به علاوه سنبله)، در زمانی که سرعت طولیل شدن ساقه متوقف می‌شود بر حسب گرم و PHINT، فاصله زمانی بین ظهور نوک دو برگ متوالی بر مبنای واحد درجه روز رشد،

بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT استفاده شد (۲۸). برنامه محاسبه ضرایب ژنتیکی، ضرایب را از طریق اجرای متعدد مدل CERES-Wheat براساس شرایط آب و هوایی و خاکشناسی و همچنین مدیریت زراعی تعریف شده در مدل، برای رقم پیش‌تاز تخمین می‌زند. در این مرحله ضرایب ژنتیکی از طریق مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با مشاهدات مزرعه و انتخاب حداقل اختلاف بین آنها تعیین و بطور خودکار در فایل ضرایب ژنتیکی مدل جایگزین می‌شود. اطلاعات لازم برای محاسبه ضرایب ژنتیکی شامل طول دوره نمو از سبز شدن تا گلدهی و رسیدگی فیزیولوژیک، روند تغییرات شاخص سطح برگ، حداکثر شاخص سطح برگ، روند تغییرات عملکرد ماده خشک کل و روند تغییرات عملکرد دانه گندم بود که از تیمار ۳۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار (شرایط مطلوب) آن آزمایشی که منظور واسنجی مدل طرح ریزی شده بود، استخراج گردید.

ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی مدل از اطلاعات مراحل نمو فنولوژیک، شاخص سطح برگ، عملکرد ماده خشک کل و عملکرد دانه استخراج شده از تیمارهای آزمایش مزرعه‌ای (۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار) که به منظور ارزیابی مدل طرح ریزی شده بود، استفاده شد. شاخص‌های ارزیابی مورد استفاده در این بررسی نیز شامل برآزش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) و شاخص توافق ویلموت (d) بود که از طریق روابط زیر محاسبه شد (۴۶):

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

$$nRMSE = \frac{RMSE}{\sigma} \times 1 \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \sigma| + |O_i - \sigma|)} \quad (3)$$

در این معادلات، P_i ، مقادیر پیش‌بینی شده، O_i ، مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده شده)، n ، تعداد نمونه‌های بکار رفته، σ ، مقدار متوسط مشاهده شده است. R^2 ، نسبت پراکندگی را بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. RMSE و nRMSE با نشان دادن مقدار خطا دقت مدل را مورد بررسی قرار می‌دهند. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند، مقدار عددی آماره های RMSE و nRMSE برابر صفر می‌شود (۹). جذر میانگین مربعات خطا نشان دهنده میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است. جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز نشان دهنده درصد نسبی میانگین اختلاف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد که مقادیر صفر تا ۱۰، ۱۰ تا ۲۰، ۲۰ تا ۳۰ درصد به ترتیب بیانگر

سطح ۳۰، ۶۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز گیاه گندم که به ترتیب معادل، ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار در نظر گرفته شد. در این مطالعه میزان کودهای مورد نیاز گندم با توجه به نتایج آزمون خاک انجام گرفته ۳۰۰ کیلوگرم اوره، ۱۵۰ کیلوگرم سوپر فسفات تریپل و ۵۰ کیلوگرم سولفات پتاسیم در هکتار در نظر گرفته شد. تمامی کودهای فسفره و پتاسه در زمان کشت به خاک محل آزمایش اضافه گردید. کود اوره نیز در ۳ نوبت مصرف شد، به این ترتیب که یک سوم از آن در مرحله ۲ تا ۴ برگ و بقیه در انتهای مرحله پنجه زنی و انتهای ساقه رفتن به مزرعه اضافه گردید.

آماده سازی مزرعه شامل شخم نیمه عمیق و سپس دیسک زنی و هموار سازی زمین در ابتدای پاییز انجام گرفت. بذر گندم مورد استفاده در این آزمایش رقم پیش‌تاز بود که دارای تیپ رشد پاییزه است. بذرها با دست روی ردیف‌هایی به طول ۳ متر و فاصله ردیف ۲۵ سانتی‌متر در عمق ۵ سانتی‌متری خاک کشت شدند. تراکم نهایی مزرعه ۴۰۰ بوته در متر مربع در نظر گرفته شد. همچنین در تمام طول دوره رشد گیاه، مزرعه پایش گردید و کنترل علف‌های هرز بصورت دستی انجام شد. آبیاری مزرعه نیز بر اساس نیاز و به روش کرتی صورت گرفت. جهت جلوگیری از نفوذ آب و کود نیتروژن به کرت‌های مجاور فاصله بین کرت‌ها ۲ متر بود.

اندازه‌گیری‌ها شامل ثبت مراحل نمو فنولوژیک گندم برحسب روز پس از کشت و نمونه برداری‌های تخریبی از بوته‌های گندم بود. برای نمونه برداری‌های تخریبی از مرحله نمو ساقه رفتن تا رسیدگی کامل، نمونه‌های تصادفی با رعایت اصول حاشیه جهت اندازه‌گیری شاخص سطح برگ و وزن خشک کل با استفاده از کوادراتی به ابعاد 50×30 سانتی متر برداشت شدند. سپس نسبت به تفکیک اندام‌های گیاهی شامل برگ، ساقه و اندام‌های ذخیره‌ای اقدام گردید و هر کدام به تفکیک اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری وزن خشک، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفتند و سپس توزین شدند. به منظور اندازه‌گیری سطح برگ از دستگاه اندازه‌گیری سطح برگ (مدل LA-3000A) استفاده شد. در پایان دوره رشد و رسیدگی فیزیولوژیک محصول نیز یک متر مربع از هر کرت با رعایت اصول حاشیه برداشت گردید، نمونه‌ها به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار گرفته و سپس وزن خشک کل و عملکرد دانه اندازه‌گیری شد.

واسنجی مدل

به منظور واسنجی مدل CERES-Wheat لازم است که ضرایب ژنتیکی رقم پیش‌تاز در محل آزمایش تحت شرایط مطلوب رشد (عدم وجود تنش‌های زیستی و غیر زیستی) تعیین شوند (۲۳ و ۲۸). برای تخمین ضرایب ژنتیکی از بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal)

نتایج و بحث

واسنجی مدل

مدل CERES-Wheat دارای هفت ضریب ژنتیکی است که رشد و نمو گندم را تشریح می کند (جدول ۲). پس از تعیین و جایگزینی ضرایب ژنتیکی برای گندم رقم پیشتاز در ساختار مدل، از اطلاعات حاصل از یادداشت برداری مراحل نمو فنولوژیک، حداکثر سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه جهت فرایند واسنجی استفاده شد (جدول ۳).

نتایج واسنجی نشان داد که مراحل نمو فنولوژیک شبیه سازی شده و مشاهده شده زمان کاشت تا گلدهی گندم به ترتیب، ۱۸۲ و ۱۷۸ روز پس از کاشت بود که نشان دهنده اختلاف ۴ روزه بین داده های شبیه سازی و اندازه گیری شده است. همچنین زمان رسیدگی فیزیولوژیک شبیه سازی شده و مشاهده شده به ترتیب، ۲۲۰ و ۲۲۱ روز پس از کاشت بود که نشان می دهد یک روز اختلاف وجود دارد (جدول ۳). مقدار جذر میانگین مربعات خطا برای مراحل نموی کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ۳/۸۸ بود. همچنین جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده برای مراحل نموی کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک ۷/۷۰ درصد میانگین مشاهدات بود. میانگین شاخص سطح برگ شبیه سازی شده و مشاهده شده گندم به ترتیب، ۳/۸۱ و ۳/۵۷ بود که نشان دهنده اختلاف بسیار ناچیزی بین داده های شبیه سازی و اندازه گیری شده بود (جدول ۳).

دقت عالی، خوب و متوسط شبیه سازی ها است و مقادیر بالاتر از ۳۰ درصد نیز نشان دهنده عدم دقت شبیه سازی های مدل است (۲۹). نزدیک بودن شاخص توافق ویلموت (d) به ۱ بیانگر نزدیکی مقادیر شبیه سازی شده به مشاهده شده و در حقیقت کارکرد بهتر مدل است (۱۳). مقادیر $d \geq 0.9$ ، بیانگر توافق عالی، $0.8 \leq d < 0.9$ ، بیانگر توافق خوب، $0.7 \leq d < 0.8$ ، بیانگر توافق متوسط و $d < 0.7$ ، بیانگر توافق ضعیف بین مقادیر مشاهده شده و شبیه سازی شده است (۲۳).

پس از انجام فرایند ارزیابی و کسب اطمینان از صحت شبیه سازی ها توسط مدل CERES-Wheat، برخی از مهمترین ویژگی های تغییرات نیتروژن خاک نظیر آبشویی نیتروژن، یون نترات، یون آمونیوم و نیتروژن مصرف شده و همچنین برخی از مهمترین ویژگی های نیتروژن گیاه نظر میزان جذب نیتروژن، نیتروژن موجود در وزن خشک کل و نیتروژن دانه ها طی دوره رشد مورد بررسی قرار گرفت. سپس به منظور محاسبه کارایی جذب (NUpE)، کارایی تبدیل (NUE) و کارایی مصرف نیتروژن (NUE) شبیه سازی شده از معادلات زیر استفاده شد (۴۲):

$$NUpE = \frac{AN (kg \cdot ha^{-1})}{TN (kg \cdot ha^{-1})} \quad (4)$$

$$NUE = \frac{GY (kg \cdot ha^{-1})}{AN (kg \cdot ha^{-1})} \quad (5)$$

$$NUE = NUpE \times NI \quad (6)$$

در این معادلات، AN، نیتروژن شبیه سازی جذب شده توسط گیاه، TN، کل نیتروژن شبیه سازی فراهم خاک و مصرف شده و GY، عملکرد دانه شبیه سازی است.

جدول ۲- ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای رقم گندم مورد استفاده در این آزمایش

P1V (°C day)	P1D (days)	P5 (°C day)	G1	G2 (mg.day ⁻¹)	G3 (g)	PHINT (°C day)
54.45	90.75	720	25	30	2	95

جدول ۳- نتایج واسنجی مدل برای مراحل نمو فنولوژیک و روندهای شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه گندم and grain yield of wheat Table 3- Calibration results for development stages, leaf area index, total dry weight

تیمار	روز تا گلدهی		روز تا رسیدگی فیزیولوژیک		شاخص سطح برگ		وزن خشک کل		عملکرد دانه	
	Anthesis day	شبیه سازی شده	Maturity day	شبیه سازی شده	Leaf area index	شبیه سازی شده	Total dry weight (kg ha ⁻¹)	شبیه سازی شده	Grain yield (kg ha ⁻¹)	شبیه سازی شده
Treatment	Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated	Measured	Simulated
کود نیتروژن N fertilizer	182	178	220	221	3.57	3.81	8019.31	8059.81	3899.5	3613.3

در شرایط شبیه سازی این مرحله، ۱۷۸ روز پس از کاشت تخمین زده شد. همچنین طول دوره روز تا رسیدگی فیزیولوژیک در شرایط مزرعه ۲۲۰ روز و مدل این مرحله را ۲۲۱ روز پس از کاشت شبیه سازی نمود. برای تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار میزان جذر میانگین مربعات خطای روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک به ترتیب حدود، ۳/۹۹، ۳/۹۲، ۳/۸۸ و ۳/۸۷ روز بود. میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک برای تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب حدود، ۷/۹۳، ۷/۷۹، ۷/۷۰ و ۷/۷۰ درصد میانگین مشاهده شده بود. ضریب توافق و یلموت برای طول دوره نموی روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن حدود ۰/۹۹ بود.

همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا بیش از ۹۸ درصد از تغییرات مشاهده شده مراحل نمو فنولوژیک گیاه را شبیه‌سازی کند (شکل ۱). بطور کلی نتایج شاخص‌های ارزیابی حاکی از دقت بسیار زیاد مدل CERES-Wheat در شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک گندم در شرایط کاربرد سطوح مختلف کود اوره داشت. در مدل‌های رشد گیاهان زراعی دقت شبیه‌سازی مراحل نمو فنولوژیک گیاه از اهمیت بسزایی برخوردار است، زیرا تمام فرایندهای تولید مواد فتوسنتزی و تخصیص آنها بین اندام‌های ریشه، ساقه، برگ و دانه و همچنین سایر فرایندهای رشدی گیاه تابعی از مراحل نموی است (۲۹). هندال و کور (۱۹) با استفاده از مدل CERES-Wheat مراحل فنولوژیک گندم را شبیه‌سازی کردند و بیان داشتند که مقادیر شبیه‌سازی شده روز تا گلدهی از ۹- تا ۶+ روز و مقادیر شبیه‌سازی شده برای روز تا رسیدگی فیزیولوژیک از ۶- تا ۳+ با داده‌های اندازه‌گیری شده اختلاف داشت.

شناختن شاخص سطح برگ

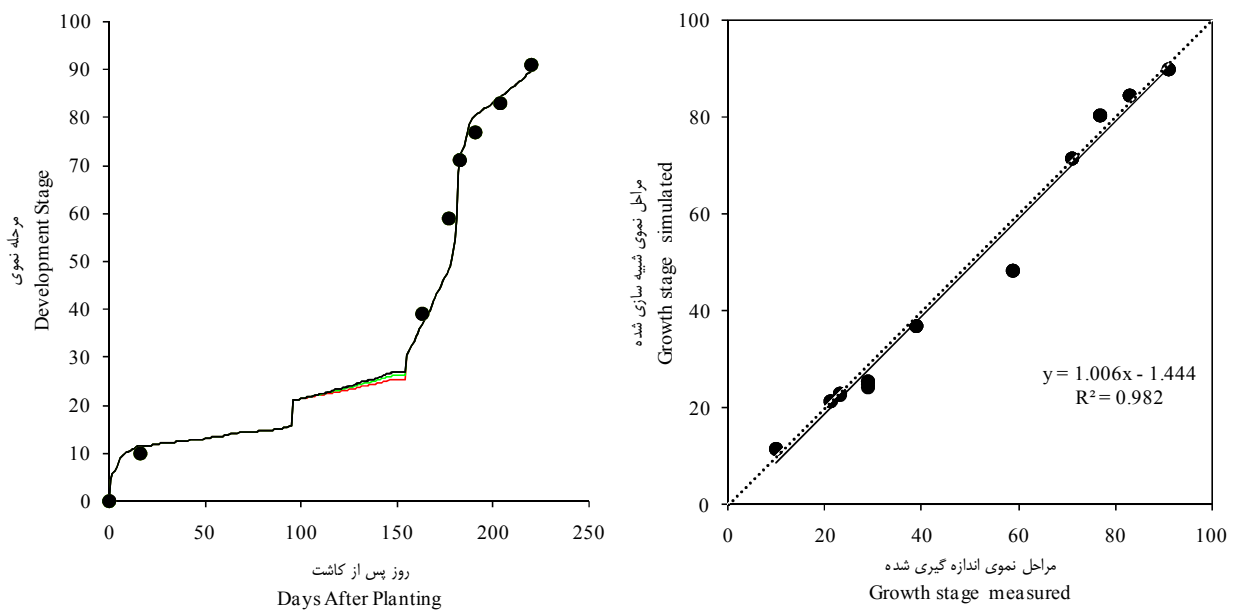
صرفنظر از نوع تیمار اعمال شده شاخص سطح برگ گندم دارای روند تقریباً مشابه‌ای بود (شکل ۲). هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه‌سازی‌ها در ابتدای فصل رشد روند افزایش شاخص سطح برگ به کندی طی شد و بعد از حدود ۱۰۵ روز پس از کاشت وارد مرحله رشد خطی گردید و در مرحله گلدهی به بیشترین مقدار خود رسید. پس از آن به دلیل پیری و ریزش برگ‌های پایین کانوپی در تمامی تیمارها شاخص سطح برگ روند نزولی پیدا کرد.

مقدار جذر میانگین مربعات خطای شاخص سطح برگ معادل ۰/۶۵ و مقدار جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده نیز ۱۸/۱۳ درصد میانگین مشاهدات شاخص سطح برگ بود. میانگین وزن خشک کل شبیه‌سازی شده و مشاهده شده به ترتیب، ۸۰۱۹/۳۱ و ۸۰۵۹/۸۱ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۳). اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده میانگین وزن خشک کل ۴۰/۵ کیلوگرم در هکتار بود. میزان جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل برابر ۵۰۳/۹۷ کیلوگرم در هکتار و میزان جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده نیز ۶/۲۸ درصد میانگین مشاهدات بود. نتایج این بررسی همچنین نشان داد که میانگین عملکرد دانه شبیه‌سازی شده و مشاهده شده به ترتیب، ۳۶۱۳/۳ و ۳۸۹۹/۵ کیلوگرم در هکتار بود. اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه ۲۸۶/۲ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۳). همچنین میزان جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه برابر ۴۴۸/۸ کیلوگرم در هکتار و میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده نیز ۱۱/۵ درصد میانگین مشاهدات بود. همانگونه که نتایج واسنجی ضرایب ژنتیکی محاسبه شده برای ویژگی‌های شبیه‌سازی شده مورد نظر و مقایسه آنها با نتایج داده‌های اندازه‌گیری شده برای تیمار ۳۰۰ کیلوگرم اوره در هکتار (شرایط مطلوب نیاز غذایی گندم به کود نیتروژن) نشان داد، مدل CERES-Wheat توانست با حداقل اختلاف، ویژگی‌های رشد و نمو را برای گندم رقم پیش‌تاز شبیه‌سازی کند که این مطلب بیانگر دقت بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده بود. مقایسه مقادیر جذر میانگین مربعات خطا و جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در این تحقیق با نتایج سایر تحقیقات نشان دهنده دقت بسیار بالای ضرایب ژنتیکی محاسبه شده توسط بخش محاسبه ضرایب ژنتیکی (GenCal) بسته نرم‌افزاری مدل DSSAT است (۱۸ و ۲۸).

ارزیابی مدل

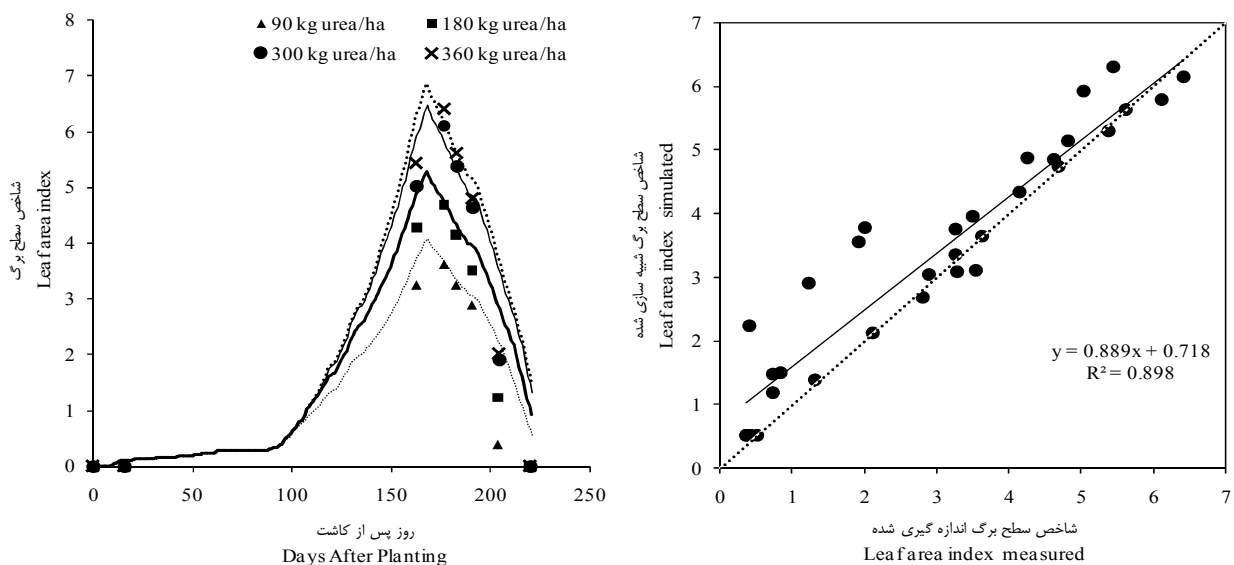
مراحل نمو فنولوژیک

نتایج این بررسی نشان داد که طول دوره روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در شرایط مزرعه و شبیه‌سازی تحت تاثیر مقادیر مختلف کود نیتروژنه قرار نگرفت (شکل ۱). طی شدن مراحل نمو فنولوژیک گیاه وابسته به سرعت نمو می‌باشد که خود تابعی از درجه حرارت محیط است (۳۱)، از این رو عدم تاثیر تیمارهای مختلف کاربرد کود اوره بر طول دوره روز از کاشت تا گلدهی و روز از کاشت تا رسیدگی فیزیولوژیک در شرایط مزرعه و شبیه‌سازی دور از ذهن نبود. در تمام تیمارهای به کار برده شده زمان گلدهی گندم در شرایط مزرعه ۱۸۲ روز پس از کاشت بود در حالی که



شکل ۱- گراف سمت چپ نشان دهنده اثر کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن بر مراحل نمو گندم، اندازه گیری شده (نقاط) و شبیه سازی شده (خط) و گراف سمت راست نشان دهنده آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده مراحل نمو گندم در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 1- Left figure shows effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of development stages and right figure shows the regression analysis between the simulated and the measured wheat development stages in nitrogen fertilizer application treatments for model validation



شکل ۲- گراف سمت چپ نشان دهنده اثر کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن بر شاخص سطح برگ گندم، اندازه گیری شده (نقاط) و شبیه سازی شده (خط) و گراف سمت راست نشان دهنده آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده شاخص سطح برگ گندم در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 2- Left figure shows effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of wheat

بیشترین شاخص سطح برگ در شرایط مزرعه و شرایط شبیه سازی مربوط به تیمار ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب

مقادیر جذر میانگین مربعات خطای شاخص سطح برگ در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب، ۰/۷۰، ۰/۶۵، ۰/۷۳ و ۰/۷۶ بود (جدول ۴). میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب، ۳۳/۷۱، ۳۳/۲۹، ۲۱/۴۶ و ۲۰/۹۸ درصد میانگین مشاهده‌ها بود. ضریب توافق ویلموت در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب، ۰/۹۲، ۰/۹۵، ۰/۹۷ و ۰/۹۷ بود (جدول ۴).

معادل، ۶/۴ و ۶/۴۳ و کمترین آن در تیمار ۹۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب معادل، ۳/۶۲ و ۳/۸۲ مشاهده شد. بطور کلی در تیمارهای آزمایش طی دوره رشد گندم مقادیر شبیه سازی شده شاخص سطح برگ بیشتر از مقادیر مشاهده شده آن بود (شکل ۲). همچنین حداکثر شاخص سطح برگ مشاهده شده صرفنظر از تیمارهای آزمایش در ۱۷۸ روز پس از کشت حادث شد این در حالی بود که مدل CERES-Wheat حداکثر شاخص سطح برگ را ۱۶۴ روز پس از کشت شبیه سازی کرد.

جدول ۴- نتایج واسنجی مدل برای شاخص سطح برگ، وزن خشک کل و عملکرد دانه گندم
Table 4- Validation results for leaf area index, total dry weight and grain yield of wheat

کود اوره (کیلوگرم در هکتار) Nitrogen fertilizer (kg ha ⁻¹)	شاخص سطح برگ Leaf area index			وزن خشک کل (کیلوگرم در هکتار) Total Dry Weight (kg ha ⁻¹)			عملکرد دانه (کیلوگرم در هکتار) Grain Yield (kg ha ⁻¹)		
	RMSE	NRMS	d	RMS E	NRMS	d	RMS E	NRMS E	d
	90	0.70	33.71	0.92	361.48	6.59	0.99	304.13	12.58
180	0.65	23.29	0.95	546.76	7.83	0.97	491.36	15.05	0.98
300	0.73	21.46	0.97	456.00	5.60	0.99	626.93	15.62	0.98
360	0.76	20.98	0.97	721.79	8.47	0.94	488.95	11.92	0.99

وزن خشک کل

نتایج این بررسی نشان داد که هم در شرایط مزرعه و هم در شرایط شبیه سازی‌ها صرفنظر از تیمارهای اعمال شده، تغییرات وزن خشک کل گندم در طی دوره رشد دارای روند تقریباً یکسانی بود (شکل ۳). بطوری که در ابتدای دوره رشد به دلیل کوچک بودن بوته‌ها تفاوت چندانی بین تیمارهای اعمال شده مشاهده نشد ولی از حدود ۱۰۵ روز پس از کاشت، وزن خشک کل وارد مرحله رشد خطی شده و به سرعت شروع به افزایش نمود و در حدود ۲۱۶ روز پس از کشت به حداکثر میزان خود رسید و سپس روند تقریباً ثابتی را در پیش گرفت. هم در شرایط مزرعه و هم در شبیه‌سازی با افزایش میزان کود اوره کاربردی وزن خشک کل گندم نیز افزایش یافت (شکل ۳). بیشترین وزن خشک کل اندازه‌گیری شده در مزرعه و شبیه‌سازی شده توسط مدل در شرایط کاربرد ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب به میزان، ۱۷۵۸۹ و ۱۷۰۱۴ کیلوگرم در هکتار و کمترین آن در شرایط کاربرد ۹۰ کیلوگرم کود اوره به ترتیب به میزان، ۱۰۹۵۸ و ۱۱۱۸۸ کیلوگرم در هکتار بود.

مقدار جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل برای شرایط کاربرد مقادیر ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب، ۳۶۱/۴۸، ۵۴۶/۷۶، ۴۵۶/۰۰ و ۷۲۱/۷۹ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). مقدار جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده برای شرایط کاربرد مقادیر ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار نیز به ترتیب، ۶/۵۹، ۷/۸۳، ۵/۶۰ و ۸/۴۷ درصد میانگین

همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا حدود ۹۰ درصد تغییرات مشاهده شده شاخص سطح برگ را پیش‌بینی کند (شکل ۲). بطور کلی دقت مدل CERES-Wheat در شبیه‌سازی روند تغییرات شاخص سطح برگ متوسط بود. از طرفی نتایج ارزیابی مدل CERES-Wheat در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ گندم نشان داد که مدل در اکثر تیمارهای مورد بررسی میزان شاخص سطح برگ را در مراحل بعد از گلدهی تا رسیدگی فیزیولوژیک گیاه بیشتر از داده‌های مزرعه تخمین زد (شکل ۲) که این موضوع باعث افزایش مقادیر جذر میانگین خطای نرمال شده و در نتیجه کاهش نسبی دقت مدل گردید. ارورا و همکاران (۴) توانایی مدل CERES-Wheat در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ گندم را ضعیف‌تر از توانایی آن در شبیه‌سازی عملکرد وزن خشک کل بیان کردند. اما بطور کلی برآیند نتایج شاخص‌های ارزیابی نشان داد که مدل CERES-Maize از دقت نسبتاً خوبی برای پیش‌بینی تغییرات شاخص سطح برگ ارقام ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن برخوردار بود. در مطالعه‌های دیگر مقادیر جذر میانگین خطا و ضریب توافق ویلموت در شبیه‌سازی شاخص سطح برگ ذرت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل CERES-Maize به ترتیب، ۱/۳۴ و ۰/۵۴ گزارش شد (۷).

رسیدگی فیزیولوژیک به حداکثر مقدار خود رسید (شکل ۴). کود نیتروژن منجر به بهبود عملکرد دانه گندم شد. این نتایج با داده‌های مشاهده شده در شرایط مزرعه همخوانی بسیار بالایی داشت. بیشترین عملکرد دانه مشاهده شده و شبیه‌سازی شده در تیمار ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب، ۷۸۷۴ و ۷۰۴۸ کیلوگرم در هکتار و کمترین آن در تیمار ۹۰ کیلوگرم کود اوره به ترتیب، ۴۲۱۷ و ۴۰۰۶ کیلوگرم در هکتار بود. وانگ و همکاران (۴۴) در مطالعه‌ای روی گیاه گندم گزارش کردند با افزایش نیتروژن خاک سطح برگ توسعه یافت که این عامل باعث افزایش سرعت رشد محصول، افزایش شاخص سطح برگ و افزایش دوام شاخص سطح برگ گردید و در نهایت منجر به بهبود عملکرد دانه شد.

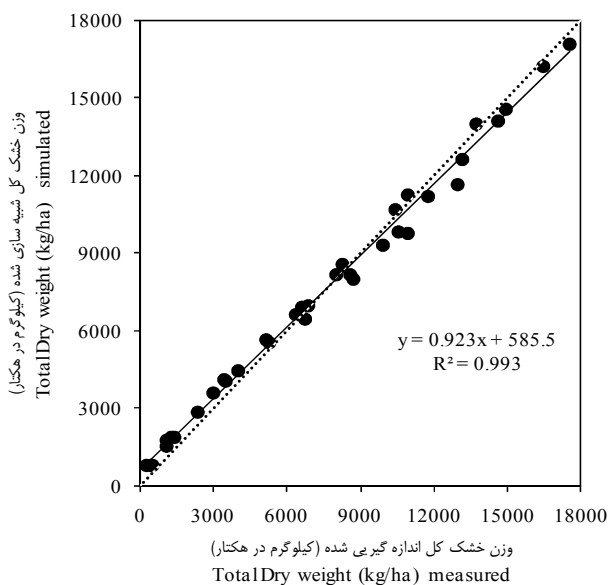
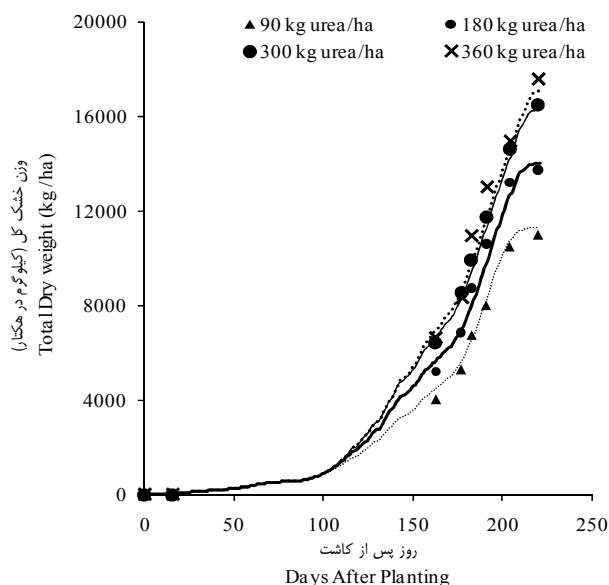
در شرایط کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار مقدار جذر میانگین مربعات خطای عملکرد دانه به ترتیب برابر ۳۰۴/۱۳، ۴۹۱/۳۶، ۶۲۶/۹۳ و ۴۸۸/۹۵ کیلوگرم در هکتار بود (جدول ۴). جذر میانگین مربعات خطا نرمال شده در شرایط کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب برابر ۱۲/۵۸، ۱۵/۰۵، ۱۵/۶۲ و ۱۱/۹۲ درصد میانگین مشاهده‌ها بود. همچنین ضریب توافق ویلموت در شرایط کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب برابر ۰/۹۸، ۰/۹۸، ۰/۹۸ و ۰/۹۹ بود که نشان از توانایی بسیار بالای مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در تیمارهای مختلف داشت (جدول ۴).

مشاهده‌ها بود. ضریب توافق ویلموت در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار به ترتیب، ۰/۹۹، ۰/۹۷، ۰/۹۹ و ۰/۹۴ بود که حاکی از دقت بسیار بالای مدل در شبیه‌سازی وزن خشک کل گندم دارد (جدول ۴). همچنین نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی‌داری وجود نداشت و مدل توانست تا بیش از ۹۹ درصد تغییرات مشاهده شده وزن خشک کل را پیش‌بینی کند که نشان دهنده دقت بسیار بالای مدل در پیش‌بینی این صفت در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن است (شکل ۴).

در مطالعه‌ای دیگر که توسط فرید و همکاران (۱۲) در فیصل آباد پاکستان انجام شده بود، میزان جذر میانگین مربعات خطای وزن خشک کل شبیه‌سازی شده گندم تحت شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن توسط مدل CERES-Wheat ۳۴۷/۸۱ تا ۸۷۳/۶۵ کیلوگرم در هکتار گزارش شد. علاوه‌براین، دقت مدل CERES-Maize در پیش‌بینی وزن خشک ذرت تحت شرایط اقلیمی کرمانشاه توسط مندنی (۲۸) مورد قبول گزارش شد.

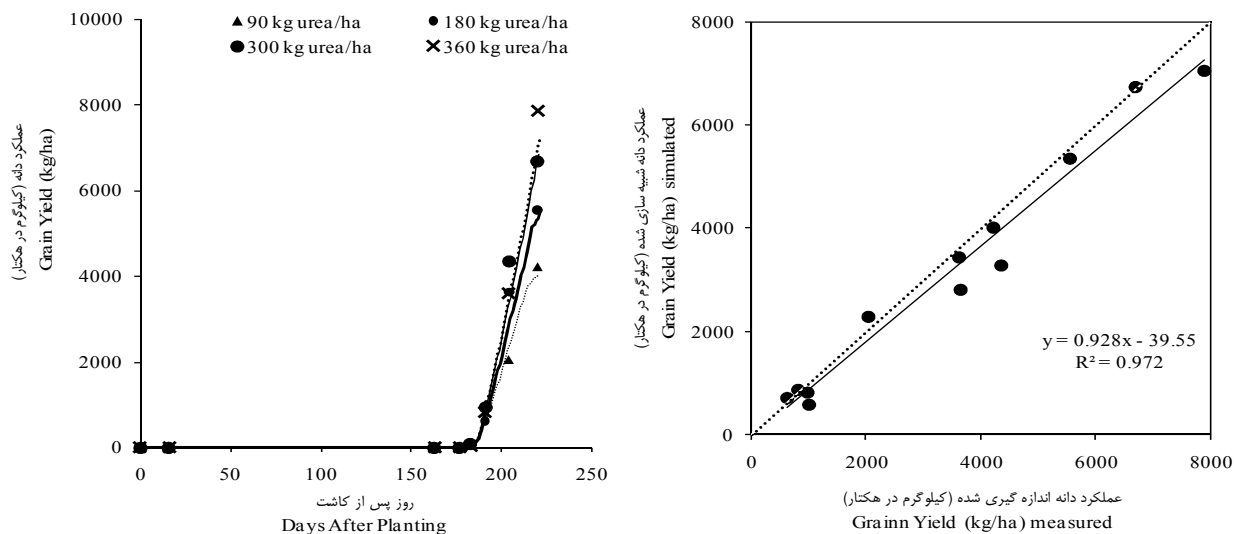
عملکرد دانه

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد پس از شروع گلدهی در تمام تیمارها عملکرد دانه گندم با سرعت افزایش یافت و تا انتهای مرحله



شکل ۳- گراف سمت چپ نشان دهنده اثر کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن بر وزن خشک کل گندم، اندازه‌گیری شده (نقاط) و شبیه‌سازی شده (خط) و گراف سمت راست نشان دهنده آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وزن خشک کل گندم در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 3- Left figure shows effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of wheat total dry weight and right figure shows the regression analysis between the simulated and the measured wheat total dry weight in nitrogen fertilizer application treatments for model validation



شکل ۴- گراف سمت چپ نشان دهنده اثر کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن بر عملکرد دانه گندم، اندازه گیری شده (نقاط) و شبیه سازی شده (خط) و گراف سمت راست نشان دهنده آنالیز رگرسیون بین مقادیر شبیه سازی شده و اندازه گیری شده عملکرد دانه گندم در تیمارهای کاربرد کود نیتروژن برای ارزیابی مدل

Figure 1- Left figure shows effect of nitrogen fertilizer application on measured (points) and simulated (lines) of wheat grain yield and right figure shows the regression analysis between the simulated and the measured wheat grain yield in nitrogen fertilizer application treatments for model validation

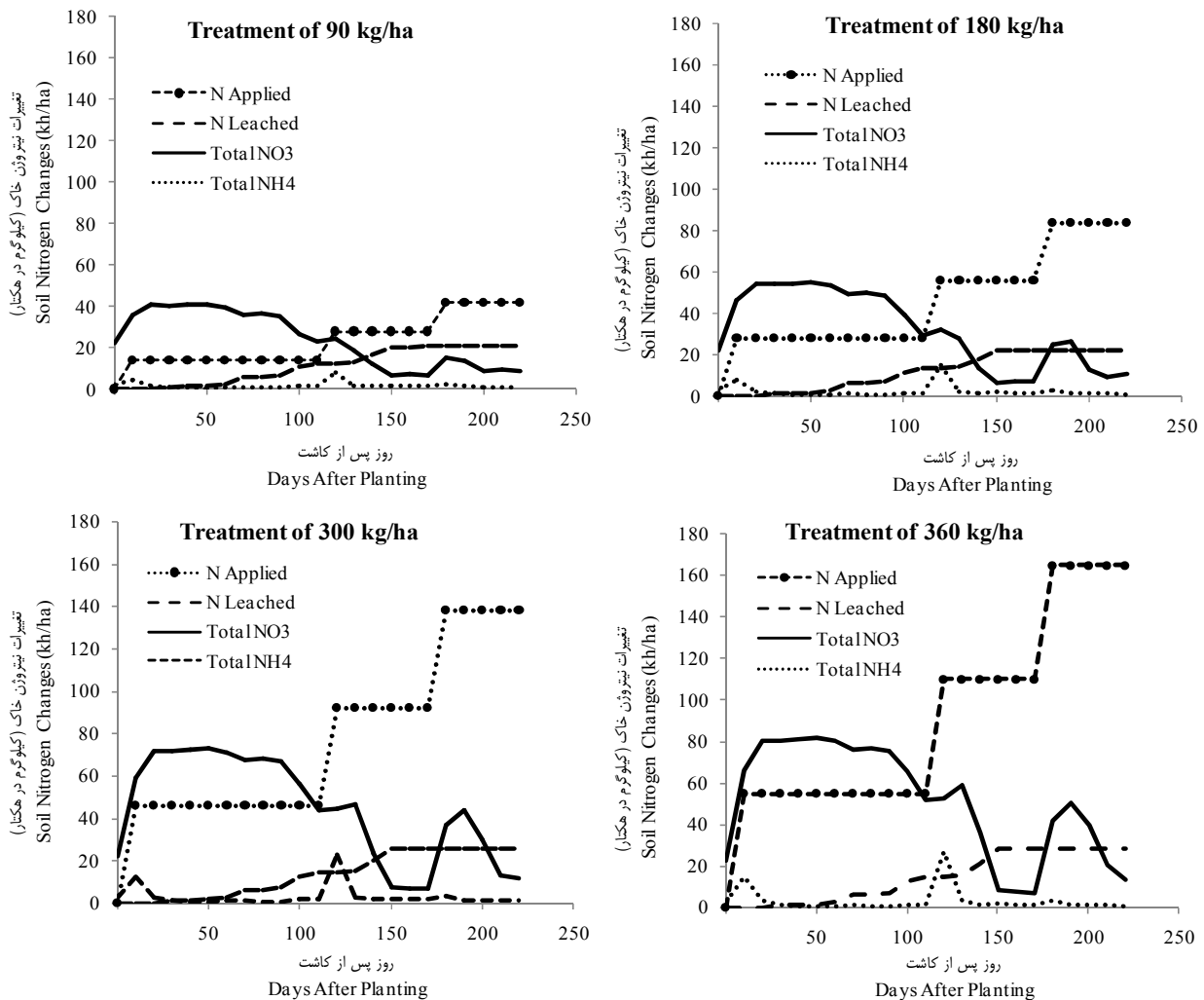
خاک افزایش قابل توجهی داشت (شکل ۵). همچنین بخش دوم و سوم کود اوره به ترتیب در مرحله انتهای پنجه زنی و انتهای ساقه رفتن به خاک مزرعه اضافه گردید که منجر به افزایش یون های نترات و آمونیم خاک شد (شکل ۵). بیشترین میزان یون نترات خاک در شرایط تیمارهای ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۴۱/۳، ۵۴/۵، ۷۲/۱ و ۸۰/۹ کیلوگرم در هکتار بود که درست بعد از مرحله ۲ تا ۴ برگی گیاه ایجاد شد این در حالی بود که تقسیم کود اوره در مراحل بعد منجر به این میزان افزایش در محتوای یون های نترات و آمونیم خاک نگردید (شکل ۵). به نظر می رسد با طی شدن مراحل رشد گیاه و توسعه هر چه بیشتر سیستم ریشه، جذب یون های نترات و آمونیم توسط گیاه نیز افزایش یافت که این موضوع منجر به کاهش غلظت آن ها در خاک به ویژه در مراحل انتهای پنجه زنی و ساقه رفتن گندم در مقایسه با مرحله ۲ تا ۴ برگی شد (شکل ۴).

همانگونه که نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد پس از هر بار اضافه شدن کود اوره به خاک، ابتدا غلظت یون آمونیوم و پس از حدود ۱۰ الی ۱۴ روز غلظت یون نترات به حداکثر میزان خود افزایش یافت. به نظر می رسد این موضوع به علت مدت زمان لازم برای انجام فعالیت نیتریفیکاسیون و تبدیل کود اوره به یون نترات باشد. نتایج شبیه سازی ها همچنین نشان داد با افزایش سطح نیتروژن مصرفی، مقدار آبشویی نیتروژن نیز افزایش یافت (شکل ۵).

علاوه بر این، نتایج برازش رگرسیون خطی بین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده و مقایسه آن با شیب خط ۱:۱ نیز نشان داد که در تیمارهای مورد بررسی از نظر آماری تفاوت معنی داری وجود نداشت و مدل CERES-Wheat قادر بود تا بیش از ۹۷ درصد از تغییرات عملکرد دانه مشاهده شده را پیش بینی کند که نشان از توانایی بسیار خوب این مدل در شبیه سازی عملکرد دانه در شرایط کاربرد مقادیر مختلف کود نیتروژن داشت (شکل ۴). میزان جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده برای پیش بینی عملکرد دانه گندم توسط مدل CERES-Wheat حدود ۴ تا ۵ گزارش شده است (۴۳). محققین دیگر نیز مقدار جذر میانگین مربعات خطای نرمال شده برای شبیه سازی عملکرد دانه گندم توسط مدل CERES-Wheat را مطلوب گزارش کردند (۵ و ۲۵).

تغییرات نیتروژن خاک و گیاه

نتایج شبیه سازی ها نشان داد که صرف نظر از تیمارها، همزمان با کاربرد کود اوره در خاک محل اجرای آزمایش، محتوای یون های نترات و آمونیوم افزایش یافت (شکل ۵). در تمام کرت های آزمایشی در زمان کاشت، مقداری نیتروژن به شکل یون های نترات و آمونیوم که احتمالاً حاصل از تجزیه بقایای گیاهی و یا باقی مانده کودهای نیتروژنه سال قبل بود، در خاک محل آزمایش وجود داشت (جدول ۱). همانگونه که در بخش مواد و روش ها اشاره شد اولین مرحله مصرف کود اوره در مرحله ۲ تا ۴ برگی گندم صورت گرفت که به دنبال آن نتایج شبیه سازی ها نشان داد که میزان یون های نترات و آمونیوم در



شکل ۵- تغییرات میزان نیتروژن مصرف شده، آبشویی نیتروژن، کل نیترات و کل آمونیوم خاک طی فصل رشد گندم
 Figure 5- Changes in nitrogen applied, nitrogen leached, total NO3 and total NH4 during wheat growing season

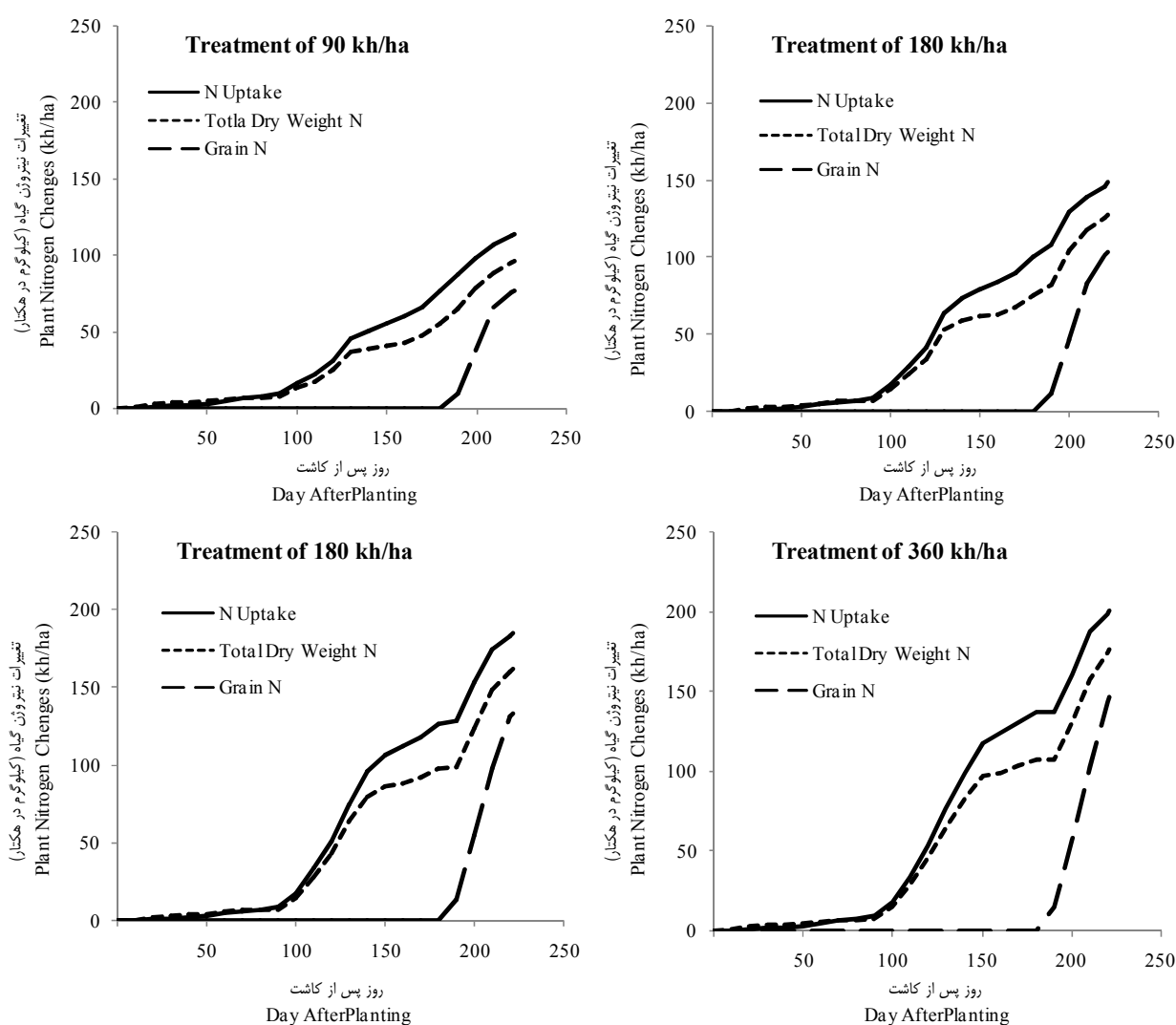
و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار در انتهای دوره رشد گیاه به ترتیب حدود ۱۷/۸، ۱۸/۹، ۲۱/۹ و ۲۳/۸ کیلوگرم در هکتار در روز بود (شکل ۴). همچنین نتایج شبیه سازی‌ها نشان داد که کل هدر رفت نیتروژن از طریق آبشویی یون نیترات در تیمارهای ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۲۷۶/۲، ۳۱۰/۴ و ۳۳۵/۵ کیلوگرم در هکتار بود. سرنوشت نیتروژن در مجموعه گیاه- خاک بستگی به عوامل مختلفی از قبیل شرایط اقلیمی، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، میزان کاربرد کود و همچنین مدیریت آبیاری دارد (۲۴). فانگ و همکاران (۱۱) نیز نشان دادند با افزایش میزان کاربرد کود نیتروژن غلظت یون نیترات در عمق یک متری خاک افزایش یافت در حالی که غلظت یون آمونیوم به وسیله میزان

با افزایش سطح کود اوره کاربردی تجمع بیشتری از یون نیترات در خاک حاصل می‌شود که با توجه به بار منفی نیترات، تحرک زیاد و عدم نگهداری آن توسط ذرات خاک، یون نیترات همراه با آب به لایه‌های پایین‌تر خاک حرکت و از منطقه توسعه ریشه خارج می‌شود که در نهایت باعث افزایش غلظت آن در زه‌آب می‌گردد (۲۶). عنصر نیتروژن زمانی که توسط گیاه جذب نشود در معرض هدر رفت از طریق نیترات زدایی، رواناب، تصعید و آبشویی قرار می‌گیرد. چنین هدر رفتی نگرانی درباره آلودگی آب و انتشار گازهای گلخانه‌ای را افزایش می‌دهد (۶). میزان آبشویی نیتروژن از مرحله گلدهی گندم به بعد به علت قطع رشد و توسعه ریشه و همچنین کاهش جذب عناصر غذایی از خاک افزایش یافت، بطوری که در تیمارهای ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰

انتقال نیتروژن به دانه‌ها آغاز و تا انتهای دوره رشد گیاه ادامه یافت (شکل ۶). میزان نیتروژن جذب شده توسط دانه به میزان کاربرد کود اوره بستگی داشت، به طوری که در شرایط کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۷۴/۸، ۹۹/۵، ۱۲۸/۲ و ۱۴۱/۸ کیلوگرم در هکتار بود. میزان انتقال نیتروژن به دانه در شرایط کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب حدود ۶۸/۵۶، ۷۰/۶۱، ۷۲/۸۴ و ۷۳/۷۷ درصد از کل نیتروژن جذب شده توسط گیاه بود. نیتروژن مورد نیاز برای رشد دانه در دوره زایشی از طریق انتقال مجدد این عنصر از اندام‌های رویشی و یا جذب مستقیم آن از خاک تامین می‌شود (۲۷).

کود تحت تاثیر قرار نگرفت. نواکوا و ناگل (۳۴) گزارش کردند که حرکت یون نیترات در یک خاک لومی رسی با هدایت الکتریکی پایین تحت تاثیر مقادیر متفاوت کود نیتروژن و آب آبیاری قرار گرفت، بطوریکه با افزایش میزان مصرف نیتروژن و آب آبیاری میزان آبشویی یون نیترات افزایش یافت.

نتایج شبیه سازی‌ها همچنین نشان داد با افزایش میزان کاربرد کود اوره میزان نیتروژن در اندام‌های هوایی گندم افزایش یافت (شکل ۶). در شرایط کاربرد کود اوره به میزان ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم در هکتار میزان نیتروژن جذب شده در اندام‌های گیاهی در دوره رویشی به ترتیب برابر ۱۰۹/۱، ۱۴۰/۹، ۱۷۶ و ۱۹۲/۲ کیلوگرم در هکتار بود. همچنین پس از گرده افشانی و همزمان با پر شدن دانه



شکل ۶- تغییرات میزان نیتروژن جذب شده توسط گندم و محتوی نیتروژن وزن خشک کل و دانه طی فصل رشد
 Figure 5- Changes in nitrogen uptake by wheat and amount of total dry weight and grain during growing season

نتیجه‌گیری

نتایج واسنجی مدل CERES-Wheat نشان داد که ضرایب ژنتیکی مورد نظر برای گندم رقم پیشاز در شرایط اقلیمی کرمانشاه به‌خوبی توسط بخش محاسبه ضرایب زنتیکی بسته نرم افزاری DSSAT محاسبه شده بود. در تیمار ۳۰۰ کیلوگرم کود اوره در هکتار (شرایط تامین مطلوب نیتروژن برای گندم در این آزمایش) نتایج واسنجی مدل و مقایسه داده‌های حاصل از شبیه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری شده نشان داد که مدل می‌تواند مراحل نمو، شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه گندم را به‌خوبی پیش بینی کند. نتایج ارزیابی‌های مدل نیز نشان داد که هم در شرایط مزرعه و هم در شبیه‌سازی با افزایش میزان کود اوره شاخص سطح برگ، عملکرد وزن خشک کل و عملکرد دانه افزایش یافت، اما طول دوره نمو گندم تحت تاثیر میزان کاربرد کود اوره قرار نگرفت. پایین‌ترین دقت ارزیابی در بین صفات مورد بررسی مربوط به شبیه‌سازی روند شاخص سطح برگ بود، در حالی که مدل CERES-Wheat توانست با دقت بالایی سایر صفات مورد بررسی را پیش‌بینی کند. نتایج شبیه‌سازی مدل همچنین بیانگر افزایش میزان آبشویی نیتروژن در اثر افزایش مصرف کود اوره کاربردی در شرایط مزرعه بود. با افزایش میزان نیتروژن در هر بار مصرف، محتوای یون‌های نترات و آمونیم خاک نیز افزایش یافت. بیشترین میزان افزایش در محتوای یون نترات در مراحل اولیه رشد و بعد از مصرف کود نیتروژن حادث گردید، این در حالی بود که در مراحل بعدی به‌علت فعالیت سیستم ریشه گیاه و جذب کارآمد نیتروژن توسط گندم، با اضافه شدن نیتروژن افزایش کمتری در میزان این یون‌ها در خاک محل آزمایش مشاهده شد. نتایج این بررسی همچنین نشان داد که مدل CERES-Wheat توانست به‌خوبی میزان نیتروژن جذب شده، نیتروژن اندام‌های هوایی و نیتروژن دانه را شبیه‌سازی کند. مصرف بیش از حد کودهای نیتروژنه باعث آبشویی نترات و در نتیجه آلودگی آب‌های زیرزمینی می‌شود که تهدید جدی برای سلامت انسان و محیط زیست محسوب شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده توزیع شکل‌های مختلف نیتروژن و چگونگی حرکت آن‌ها در خاک بیشتر مورد بررسی قرار گیرد.

در غلات زمستانه حدود ۷۵ تا ۹۰ درصد از کل نیتروژن دانه از طریق نیتروژن جذب شده توسط اندام‌های رویشی به ویژه برگ‌ها در مرحله قبل از گرده افشانی تامین می‌شود (۱۷). افزایش میزان پروتئین دانه در اثر مصرف نیتروژن می‌تواند به علت تثبیت نیتروژن در ساختارهای گیاه به خصوص اسید آمینه باشد (۳). درصد پروتئین در اثر افزایش مصرف نیتروژن هنگامی افزایش می‌یابد که نیتروژن مورد نیاز گیاه در خاک فراهم باشد (۳۸). کوکس و چمی (۸) نیز نشان دادند که مقدار نیتروژن در ذرت سیلویی با افزایش سطوح نیتروژن افزایش یافته است. افزایش میزان نیتروژن زیست توده در نتیجه افزایش مصرف کود نیتروژن توسط احمدی و همکاران (۳) نیز گزارش شده است.

کارایی جذب نیتروژن شبیه‌سازی شده در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب برابر با ۱۸/۹، ۱۸/۴، ۱۶/۸ و ۱۵/۸ درصد بود. کارایی تبدیل نیتروژن شبیه‌سازی شده نیز در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب برابر با ۳۵/۵، ۳۶/۸، ۳۶/۵ و ۳۵/۵ کیلوگرم دانه به کیلوگرم نیتروژن جذب شده بود. کارایی مصرف نیتروژن شبیه‌سازی شده در تیمارهای کاربرد ۹۰، ۱۸۰، ۳۰۰ و ۳۶۰ کیلوگرم اوره در هکتار به ترتیب برابر با ۶/۷، ۶/۷، ۶/۲ و ۵/۶ کیلوگرم دانه به کیلوگرم نیتروژن قابل جذب خاک بود. نحوه جذب، کارایی مصرف و نحوه تخصیص نیتروژن در گیاهان می‌تواند تحت تاثیر عواملی همچون رطوبت و حاصلخیزی خاک قرار گیرد. همچنین افزایش کارایی جذب و استفاده از نیتروژن در تولید دانه نیازمند انجام موثر فرایندهای مربوط به جذب، انتقال، آسیمیلاسیون و توزیع مجدد نیتروژن است. به نظر می‌رسد یکی از دلایل کاهش کارایی مصرف نیتروژن در مقادیر بالای کود نیتروژن فزونی سرعت از دست رفتن این عنصر از طریق آبشویی و تصعید و یا به علت عدم استفاده موثر از آن توسط گیاه باشد. حداکثر کارایی نیتروژن در شرایط حداقل کاربرد ممکن، در مرحله‌ای از نمو گیاه که جذب سریعتر انجام می‌شود، بدست می‌آید. در این صورت از رشد رویشی غیر ضروری که ممکن است خوابیدگی گیاه و کاهش عملکرد را در پی داشته باشد جلوگیری می‌شود. از آنجایی که در این حالت یک سیستم ریشه‌ای فعال برای جذب نیتروژن مصرف شده وجود دارد، هدر روی نیتروژن از طریق آبشویی، دنیتروفیکاسیون، تبخیر و رواناب کاهش می‌یابد (۳۰).

منابع

- 1- Abeledo G.L., Savin R., and Slafer G.A. 2008. Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *European Journal of Agronomy*, 28: 541-550.
- 2- Akiyama H., Tsuruta H., and Watanabe T. 2000. N₂O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers. *Chemosphere - Global Change Science*, 2: 313-320.
- 3- Ahmadi M., Mondani F., Khoramivafa M., Mohammadi G.R., and Shirkhani A. 2018. Evaluation of Nitrogen Uptake and Productivity of Maize Cultivars (*Zea mays* L.) under Kermanshah Climate Conditions. *Journal of Agroecology*,

- 10: 234-247. (In Persian with English Summary).
- 4- Arora V.K., Singh H., and Singh B. 2007. Analyzing wheat productivity responses to climatic, irrigation and fertilizer-nitrogen regimes in a semi-arid sub-tropical environment using the CERES-Wheat model. *Agricultural water management*, 94: 22–30.
 - 5- Bannayan M., Crout M.J., and Hoogenboom G. 2003. Application of the CERES-Wheat Model for Within-Season Prediction of Winter Wheat Yield in the United Kingdom. *Agronomy Journal*, 95: 114–125.
 - 6- Blaylock A.D., Kaufmann J., and Dowbenko R.D., 2005. Nitrogen Fertilizer Technologies. Western Nutrient Management Conference. Salt Lake City, UT.
 - 7- Chisanga C.B., Phiri E., Shepande C., and Sichingabula H., 2015. Evaluating CERES-Maize Model Using Planting Dates and Nitrogen Fertilizer in Zambia. *Journal of Agricultural Science*, 7: 79-97.
 - 8-Cox, W.J., and Cherney, D.J. 2001. Row spacing, plant density and nitrogen effects on corn silage. *Agronomy Journal*, 93: 597- 607.
 - 9- Delghandi M., Andarzian B., Broomandnasab S., Massah-Bovani A., and Javaheri E. 2014. Evaluation of DSSAT 4.5-CSM-CERES-Wheat to Simulate Growth and Development, Yield and Phenology Stages of Wheat under Water Deficit Condition (Case Study: Ahvaz Region). *Journal of Water and Soil*, 28: 82-91. (In Persian with English abstract).
 - 10- Dettori M., Cesaraccio C., Motroni A., Spano D., and Duce P. 2011. Using CERES-Wheat to simulate durum wheat production and phenology in Southern Sardinia, Italy, *Field Crops Research*. 120: 179-188.
 - 11- Fang Q., Yu Q., Wang E., Chen, Y., Zhang G., Wang J., and Li, L. 2006. Soil nitrate accumulation and crop nitrogen use influenced by fertilization and irrigation in an intensive wheat-maize double cropping system in the North China Plain. *Journal of Plant and Soil*, 284: 335-350.
 - 12- Farid, H.U., Bakhsh A., Mahmood-Khan Z., Ahmad N., and Ahmad A., 2015. Calibration and Validation of CERES-Wheat (*Triticum aestivum*) Model for Simulating Fertilizer Application Rates in Management Zones. *Journal of Agricultural Science*, 7: 115-127.
 - 13- Ghamari M., Andarzian B., Bakhshandeh A.M., Gharineh M.H., and Fathi G.H. 2011. Simulating Effects of Drought and Nitrogen Stress on Yield, Water and Nitrogen use Efficiency of Corn Using CERES-Maize Simulating Model. *Crop Physiology Journal*, 3: 21-31.
 - 14- Gheysari M., Mirlatifi S.M., Homaei M., and Asadi M.E. 2007. Nitrate Nitrogen Leaching in a Corn Silage Field Fertigated Via a Sprinkler Irrigation System. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 7: 101-108.
 - 15- Guo R., Lin Z., Mo X., and Yang, C. 2010. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain. *Agricultural Water Management*. 97: 1185-1194.
 - 16- Hassegawa R.H., Fonseca H., Luiz-Fancelli A., Da-Silva V.N., Schammas E.A., Reis T.A., and Correa, B. 2008. Influence of macro- and micronutrient fertilization on fungal contamination and fumonisin production in corn grains. *Food Control*, 19: 36–43.
 - 17- Heitholt J.J., Croy L.I., Maness N.O., and Nguyen H.T. 1990. Nitrogen Partitioning in Genotypes of Winter Wheat Differing in Grain N Concentration. *Field Crops Research*, 23: 133-144.
 - 18- Hoogenboom G., Jones J.W.P., Wilkens W., Porter C.H., Boote K.J., Hunt L.A., Singh U., Lizaso J.I., White J.W., Uryasev O., Ogoshi R., Koo J., Shelia V., and Tsuji G.Y., 2015. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.6 (<http://dssat.net>). DSSAT Foundation, Prosser, Washington.
 - 19- Hundal, S.S., and Kaur P. 1997. Application of the CERES–Wheat model to yield predictions in the irrigated plains of the Indian Punjab. *Journal of Agricultural Science*, 129: 13-18.
 - 20- 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.T. 2003. DSSAT Cropping System Model. *European Journal of Agronomy*, 18, 235-265.
 - 21- Kiani A., Koocheki A.R., Banaeyan M., and Nassiri-Mahalati M. 2003. CERES-Wheat Model Evaluation at two Different Climatic Location in Khorasan Province: I-Yield Prediction. *Biaban Journal* 8: 264-275. (In Persian with English abstract).
 - 22- Lemon J. 2007. Nitrogen management for wheat protein and yield in the Esperance port zone. Department of Agriculture and Food. *Bulletin*. 4707: 1-27.
 - 23- Liu H.L., Yang J.Y., Drury C.F., Reynolds W.D., Tan C.S., and Bai Y.L., et al., 2011. Using the DSSAT-CERES-Maize model to simulate crop yield and nitrogen cycling in fields under long-term continuous maize production. *Nutrient Cycling in Agro ecosystems*, 89: 313-328.
 - 24- Malhi S.S., Grant C.A., Johnston A.M., and Gill, K.S., 2001. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. *Soil & Tillage Research*, 60: 101–122.
 - 25- Mearns L.O., Rosenzweig C., and Goldberg R. 1992. Effect of changes in interannual climatic variability on CERES-wheat yields: sensitivity and 2×CO₂ general circulation model studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 62: 159-189.
 - 26- Mehrab N., and Chorom M. 2014. Leaching of Nitrogen in the Presence of Zeolite Enriched with Ammonium in

- Two Soil Textures under Wheat Cultivation. *Water and Soil Science*, 24: 159-170.
- 27- Mi G., Tang L., Zhang F., and Zhang J., 2000. Is nitrogen uptake after anthesis in wheat regulated by sink size? *Field Crops Research*, 68: 183-190.
- 28- Mondani F. 2018. Simulation of Nitrogen Fertilizer Effect on Maize (*Zea Maize*) Production by CERES-Maize Model under Kermanshah Climate Condition. *Journal of Water and Soil*. 31: 1665-1678. (In Persian with English abstract).
- 29- Mondani F., Nassiri-Mahallati M., Koocheki A., and Hajian-Shahri M. 2015. Simulation of wild oat (*Avena ludoviciana* L.) Competition on Winter Wheat (*Triticum aestivum*) Growth and Yield. I: Model Description and Validation. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 13: 218-231. (In Persian with English abstract).
- 30- Muurinen S., Kleemola J., and Peltonen-Sainio P. 2007. Accumulation and translocation of nitrogen in spring cereal cultivars differing in nitrogen use efficiency. *Agronomy Journal*, 99: 441-447.
- 31- Nassiri Mahallati, M. 2000. Modeling Potential Crop Growth Processes: textbook with Exercises. Jahad-e-Daneshgahi of Mashhad Press. (In Persian).
- 32- Nassiri-Mahallati M., and Koocheki A. 2010. Agroecological zoning of wheat in Khorasan provinces: Estimating yield potential and yield gap. *Iranian Journal of Field Crops Research*, 7: 695-709. (In Persian with English abstract).
- 33- Noshadi M., and Mehrabi F. 2014. Measuring and Simulation of Nitrate Leachate Using LEACHN Model. *Journal of Water and Soil*, 28: 430-439. (In Persian with English abstract)
- 34- Novakova K., and Nagel D. 2009. The Influence of Irrigation on Nitrates Movement in Soil and Risk of Subsoil Contamination. *Soil & Water Research*, 4: 131-136.
- 35- Popova Z., and Kercheva M. 2005. CERES model application for increasing preparedness to climate variability in agricultural planning—calibration and validation test. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30: 125–133.
- 36- Reynolds M.P., Hobbs P.R., and Braun H.J. 2007. Challenges to international wheat improvement. *Journal of Agricultural Science*, 145: 223-227.
- 37- Rinaldi M. 2004. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with the CERES-Wheat model. *Field Crops Research*, 89: 27–37.
- 38- Sadeghi, H., and Bahrani, M.J. 2002. Effects of plant density and N rates on morphological characteristics and protein contents of corn. *Iranian Journal of Agriculture Science*, 33: 403-412. (In Persian with English Summary).
- 39- Satorre E.H. and Slafer G.A. 1999. *Wheat Ecology and Physiology of Yield Determination*. Food Product Press, New York, P: 503.
- 40- Singh A.K., Tripathy R., and Chopra U.K. 2008. Evaluation of CERES-Wheat and Crop Syst models for water–nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural water management*, 95: 776–78.
- 41- Stickse E., Maida F.X., Retzer F., and Fischeck G. 1999. Nitrogen uptake and utilization in winter wheat under different fertilization regimes, with particular reference to main stems and tiller. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 183: 47-52.
- 42- Timsina T, Singh U., Badaruddin M., Meisner C., and Amin M.R. 2001. Cultivar, nitrogen, and water effects on productivity, and nitrogen-use efficiency and balance for rice–wheat sequences of Bangladesh. *Field Crop Research*, 72: 143-161.
- 43- Timsina J., and Humphreys E. 2006. Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat systems: A review. *Agricultural Systems*, 90: 5-31.
- 44- Wang D.J., Lin J.H., Sun R.J., Xia L.Z., and Lian, G. 2003. Optimum nitrogen rate for a high productive rice wheat system and its impact on the groundwater in the Taihu Lake area. *Acta Pedologica Sinica*, 40: 426-432.
- 45- Weligama C., Sale P.W.G., Conyers M.K., Liu D.L., and Tang C. 2010. Nitrate leaching stimulates subsurface root growth of wheat and increases rhizosphere alkalisation in a highly acidic soil. *Plant Soil*, 328: 119–132.
- 46- Yang J.M., Yang J.Y., Liu S., and Hoogenboom G. 2014. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems*, 127: 81-89.

Simulation of Changes in Soil and Plant Nitrogen by CERES-Wheat Model

F. Mondani^{1*} - B. Gholami² - A.R. Bagheri³ - Gh.R. Mohammadi⁴

Received: 31-01-2018

Accepted: 11-07-2018

Introduction: The DSSAT model is one of the most general and extensively used process-based crop growth simulation models. This model has been used worldwide to simulate crop biomass, yield, and soil nitrogen leaching under different management practices and various climatic conditions. Among management agronomic factors, nitrogen fertilizer has a major effect on crops production. However, nitrogen fertilizer limiting causes to decrease crops production, but, high application rates of nitrogen would led to strong environmental consequences. Thus, management of nitrogen fertilizer consumption causes to decrease environmental pollution in the agroecosystems. Therefore, the objectives of the present study were: (1) determination of genetic coefficients and calibration of the CERES-Wheat model of DSSAT-CSM, (2) evaluation the performances of model for simulating wheat growth, development and grain yield and (3) simulation of changes of soil and plant nitrogen in different fertilizer nitrogen application rates under Kermanshah climate condition.

Materials and Methods: Two experiments were established based on the randomized complete block design with three replications during 2015-2016. The treatments were included 4 levels of nitrogen fertilizer application (90, 180, 300 and 360 kg ha⁻¹ urea). The required model inputs describe field management, daily weather condition, soil profile characteristics, and cultivar characteristics. The cultivar coefficients calibrated under optimum conditions (i.e., minimum stress in weather and nutrients). The genetic coefficients (PIV, PID, P5, G1, G2, G3 and PHINT) of the Pishtaz wheat cultivar were derived using the GenCal software of DSSAT v 4.6 for 300 kg Urea ha⁻¹ treatment (optimum condition of nitrogen fertilizer based on the results of soil library). After model calibration process, the CERES-Wheat model validated by comparing simulated and measured values of wheat cultivars phenological development stages (DVS), leaf area index, total dry weight and grain yield for treatments of 90, 180, 300 and 360 kg Urea ha⁻¹ fertilizer by root mean square error (RMSE), normalized RMSE (nRMSE) and index of agreement (d) by results of an independent experiment from calibration experiment.

Results and Discussion: The results indicated that the coefficient PIV was 54.45 °C day, the coefficient PID was set 90.75 days hr⁻¹, the value for P5 was 720 °C day, the value for G1 was 25, the values for G2 was 30 mg day⁻¹, the value for G3 2 g, and the PHINT was 95 °C day. The calibration results showed that the CERES-Wheat model was able to simulate growth, development stages and yield correctly, which indicate high accuracy in calculated genetic coefficients derived using the GenCal software of DSSAT v 4.6. In the simulated and measured conditions, leaf area index, total dry weight and grain yield improved by increasing of nitrogen fertilizer application. In the simulated and observed conditions, the highest grain yields were 7048 and 7874 kg ha⁻¹ in the treatment of 360 kg_{nitrogen} ha⁻¹ and the lowest grain yields were 4006 and 4217 kg ha⁻¹ in the treatment of 90 kg_{nitrogen} ha⁻¹, respectively. The validation results also indicated that the CERES-Wheat model had high ability to predict growth, development stages and grain yield in the different fertilizer nitrogen application rates. So that, the RMSE for development stages were about 3 to 4 days and the nRMSE were about 7 to 8% of measured average, respectively. The index of agreement (d) for development stages was about 0.99. The RMSE for total dry weight were about 360 to 720 kg ha⁻¹ and the nRMSE were about 5% to 9% of measured average, respectively. The index of agreement (d) for total dry weight were about 0.94 to 0.99. The amount RMSE for grain yield were 304 to 630 kg ha⁻¹ and the nRMSE were 11% to 17% of measured average, respectively. The index of agreement (d) for grain yield ranged from 0.98 to 0.99. The simulation result also indicated that amount of soil NO₃ and NH₄ increased with nitrogen fertilizer application. The highest soil NO₃ were 41.3, 54.5, 72.1 and 80.9 kg ha⁻¹ in the treatments of 90, 180, 300 and 360 kg Urea ha⁻¹, respectively. The amount of nitrogen

1, 2 and 4- Assistant Professor in Crop Ecology, MSc Student in Agroecology and Associate Professor in Crop Ecology, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

3- Assistant Professor in Weed Science, Department of Plant Production and Genetics, Razi University, Kermanshah, Iran

(*-Corresponding Author Email: f.mondani@razi.ac.ir)

leaching increased with rising of nitrogen fertilizer. The nitrogen leaching were 259.3, 276.2, 310.4 and 335.5 kg ha⁻¹ in the treatments of 90, 180, 300 and 360 kg Urea ha⁻¹, respectively. The amount of nitrogen in the wheat biomass improved by increasing nitrogen fertilizer application.

Conclusion: The results indicated that the CERES-Wheat calibrated correctly that confirm calculated genetic coefficient for Pishtaz cultivar under Kermanshah climate conditions. The results of validation also showed that the CERES-Wheat model was able to simulate all studied traits wheat cultivars except leaf area index accurately in different fertilizer nitrogen application rates. Excessive nitrogen consumption led to nitrogen leaching and groundwater pollution. Therefore, it is important to know the distribution of various forms of nitrogen and how they move in the soil.

Keyword: Grain yield, Model calibration, Model validation, Nitrogen efficiency, Nitrogen leaching

