



بررسی اثر کود نیتروژن روی پارامترهای رشد محصول ذرت (سینگل کراس ۷۰۴) برای مدل آکواکراپ

امید میرزایی^۱، علی رحیمی خوب^۲ و مریم وراوی پور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آبیاری زهکشی، دانشگاه تهران.

۲- نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران akhob@ut.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران.

پذیرش: ۱۳۹۶/۴/۱۴

بازنگری: ۱۳۹۶/۴/۹

دریافت: ۱۳۹۶/۳/۵

چکیده

کود نیتروژن بر روی پارامترهای رشد و در نهایت عملکرد محصول اثر می‌گذارد. شناخت این اثر برای مدیریت مصرف کود مهم می‌باشد. فرضیه این پژوهش آن است که کود نیتروژن روی چهار پارامتر رشد محصول ذرت از قبیل بهره‌وری آب نرمال شده (WP[®])، حداکثر پوشش گیاه (CCx)، نرخ رشد پوشش گیاه (CGC) و نرخ کاهش پوشش گیاه (CDC) اثر می‌گذارد. این چهار پارامتر، ورودی‌های مدل آکواکراپ هستند. هدف نخست این پژوهش تعیین معادله‌ها بین کود نیتروژن و چهار پارامتر فوق و هدف دوم بررسی دقت مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی پاسخ محصول ذرت به کود نیتروژن با استفاده از پارامترهای به‌دست آمده از هدف نخست است. بدین منظور گیاه ذرت رقم اصلاح‌شده سینگل کراس ۷۰۴ طی دو سال زراعی ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ بدون تنش رطوبتی کشت شد. تیمارها با شش سطح کودی از صفر تا ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار اجرا شدند. داده‌های سال اول برای تدوین معادله‌ها و داده‌های سال دوم برای صحت‌سنجی استفاده شدند. نتایج نشان داد تغییرات چهار پارامتر فوق با مقدار کود مصرفی از معادله درجه دو با ضریب تعیین بالایی پیروی می‌کند. نتایج برآورد پارامترهای فوق برای تیمارهای کودی سال دوم در مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی زیست توده استفاده شد. نتایج نشان داد، معادله‌های بنیان شده می‌تواند برای برآورد اثر تنش کود ازت بر پارامترهای رشد ذرت در مدل آکواکراپ مورد استفاده قرار گیرد. ضریب تعیین و جذر میانگین مربعات خطا به ترتیب بالای ۰/۹۷ و کمتر از ۱۲ درصد بود.

کلید واژه‌ها: عملکرد محصول، شبیه‌سازی، بهره‌وری آب نرمال شده، حداکثر پوشش گیاه، نرخ رشد پوشش گیاه.

مقدمه

این عنصر را به اندازه لازم نداشته باشد، رشد آن کاهش یافته و به‌شدت بر روی عملکردش تأثیر می‌گذارد. معمولاً کمتر خاکی است که مقدار کافی نیتروژن به فرم قابل استفاده گیاه (نیترات یا آمونیوم) داشته باشد و لذا به‌صورت کود به زمین داده می‌شود. به دلیل اثر مثبت نیتروژن بر روی عملکرد گیاه، کودهای نیتروژن بی‌رویه مورد استفاده قرار می‌گیرد و با آلوده کردن آب‌های زیرزمینی به سلامت انسان‌ها لطمه وارد می‌شود. تحقیقات زیادی روی اثر متقابل آب و نیتروژن انجام شده و نشان داده است که تیمارهای آبیاری و نیتروژن بر روی عملکرد محصول اثر متقابل دارند. لذا شناخت اثر ترکیبی کم‌آبیاری و کاربرد نیتروژن روی رشد گیاه برای افزایش بهره‌وری آب و جلوگیری از آلودگی خاک و کاهش آبشویی نیترات مهم می‌باشد.

تاکنون مدل‌های زیادی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه در پاسخ به مقادیر مختلف آب و نیتروژن توسعه یافته است، مثل CERES- (Jones et al., 1986) Maize، (Stöckle et CROPSYST، Jones et al., 2003) DSSAT/CERES (Jones et al., 2003) و WOFOST (Boogaard et al., 2014). اما این مدل‌ها به

رشد روزافزون جمعیت و نیاز بیشتر به مواد غذایی موجب ضرورت توسعه تولیدات گیاهی در بخش کشاورزی شده است. آب و نیتروژن دو عامل اصلی تولیدات گیاهی هستند. کمبود آب از مهم‌ترین چالش‌های تولید محصولات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مثل اغلب مناطق ایران است. کاهش منابع آب در این مناطق در طی دهه اخیر منجر به استفاده از روش کم‌آبیاری به‌عنوان یک راهبرد برای افزایش بهره‌وری آب و حصول به کشاورزی پایدار شده است. پژوهش‌های زیادی نشان داده، راهبرد کم‌آبیاری باعث افزایش بهره‌وری آب برای تولید بیشتر عملکرد گیاه در واحد آب مصرفی شده است (Geerts and Raes, 2009; Geerts et al., 2008; Kang et al., 2000; Igbadun et al., 2008; Ali et al., 2007). علاوه بر افزایش بهره‌وری آب، توجه به نیتروژن خاک به‌عنوان یکی از مواد مغذی برای رشد گیاه ضرورت دارد. پژوهش‌های زیادی انجام شده و نشان داده است که نیتروژن تأثیر به‌سزایی در رشد گیاهان دارد (Angus, 2001; Eickhout et al., 2006; Liu et al., 2014). گیاهی که

ضریب کاهش رشد گیاه در مرحله آخر رشد محصول (CDC) اثر می‌گذارد (Van Gaelen et al., 2015). مقادیر این چهار پارامتر با افزایش تنش کودی کاهش می‌یابد. نمودارهایی در مدل آکواکراپ با استفاده از دو نقطه معلوم صفر و ۱۰۰ درصد تنش کودی برای هر یک از پارامترهای فوق رسم می‌شود و از روی این نمودارها ضریب کاهش هر پارامتر با توجه میزان تنش کود تعیین می‌شود. فرض این تحقیق آن است که بین چهار پارامتر فوق برای گیاه ذرت و مقدار کود نیتروژن روابطی برقرار است و از روی آنها می‌توان مقادیر چهار پارامتر را برای هر سطح کودی تعیین و آنها را در مدل آکواکراپ استفاده کرد. لذا هدف نخست این پژوهش تعیین معادله‌هایی بین کود نیتروژن و چهار پارامتر فوق می‌باشد. هدف دوم این پژوهش بررسی دقت مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی پاسخ محصول ذرت به کود نیتروژن با استفاده از پارامترهای به‌دست آمده از معادله‌های تعیین شده در هدف نخست است.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل آزمایش

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران روی گیاه ذرت رقم سینگل کراس-۷۰۴ در دو سال متوالی ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ انجام شد. این مزرعه در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۲۷ متر واقع است. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب محل آزمایش در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است. مزرعه پردیس ابوریحان مجهز به یک ایستگاه هواشناسی بوده که در آن پارامترهای روزانه هواشناسی شامل دمای بیشینه و کمینه هوا، رطوبت هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش، داده‌های این ایستگاه برای تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0) با استفاده از روش پنمن ماتنیت فائو (Allen et al., 1998) مورد استفاده قرار گرفت.

دانش زیادی از چگونگی پاسخ هر گیاه به آب، حاصل‌خیزی خاک و شرایط محیطی نیاز دارد و واسنجی آن‌ها به‌علت داشتن پارامترهای ورودی زیاد بسیار سخت است (Steduto et al., 2009). سازمان فائو مدل آکواکراپ (AquaCrop) که عملکرد محصول در پاسخ به آب مصرفی را شبیه‌سازی می‌کند، ارائه داد (Raes et al., 2009; Hsiao et al., 2009; Steduto et al., 2009; Araya et al., 2010). این مدل بر خلاف سایر مدل‌ها، ساده بوده و قابل فهم برای کاربران غیر پژوهشگر است (Mosavizade et al., 2016; Araya et al., 2010). مدل آکواکراپ در مقایسه با سایر مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد گیاه به داده‌های ورودی کمتری نیاز داشته و بیشتر آن‌ها به آسانی تهیه می‌شود (Hsiao et al., 2009; Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009; Mosavizade et al., 2016). بهره‌وری آب نرمال شده (Normalized Water Productivity) (WP^*) یکی از پارامترهای مهم مدل آکواکراپ برای محاسبه زیست‌توده و عملکرد محصول است (Farahani et al., 2009; Steduto et al., 2007). در این مدل، عملکرد زیست توده به‌طور روزانه با استفاده از تعرق گیاه (T_r)، تبخیر و تعرق مرجع روزانه (ET_0) و WP^* شبیه‌سازی می‌شود (Hsiao et al., 2009). پارامتر WP^* بدون هیچ کمبودی از نظر آب و نیتروژن برای هر گیاه ثابت فرض شده است (Steduto et al., 2007, 2009). در مدل آکواکراپ برای تعیین اثر کمبود آب بر روی عملکرد گیاه از ضریب تنش آبی (K_s) استفاده شده است. ضریب K_s از مقدار یک (بدون تنش آب) تا صفر (تنش آب کامل) تغییر می‌کند. بررسی اثر کمبود نیتروژن بر روی عملکرد محصول در آخرین نسخه‌های مدل آکواکراپ (نسخه‌های ۴ و ۵) با استفاده از روش نیمه کمی (Semi-quantitative) انجام می‌گیرد (Van Gaelen et al., 2015). در این روش فرض شده است که کمبود نیتروژن بر روی چهار پارامتر: ۱- بهره‌وری آب نرمال شده، ۲- ضریب رشد پوشش در مرحله توسعه (CGC)، ۳- حداکثر پوشش گیاه (CCx) و ۴-

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

Table 1- Physical and chemical properties of soil

Soil Depth (m)	Texture	Field capacity (cm^3/cm^3)	Permanent wilting point (cm^3/cm^3)	Bulk density ($gram/cm^3$)	Saturation Humidity (%)	EC (dS/m)
0.2	Silt loam	20.15	10.01	1.36	44.64	3.55
0.2	Sandy loam	20.45	10.22	1.23	43.58	4.69
0.2	Sandy loam	21.45	10.65	1.32	40.84	4.01
0.6	Sandy loam	18.82	9.60	1.33	48.57	1.55

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب

Table 2 - Chemical properties of water

Parameter	Ca+Mg (meq/lit)	Na (meq/lit)	pH	EC (dS/m)
Value	16	2.9	7.2	1.4

عمق توسعه ریشه کمتر از ۵۰ درصد کل رطوبت خاک نباشد. کل رطوبت قابل استفاده در خاک از رابطه زیر محاسبه شد:

$$TAW = (\sum_{i=1}^n (\theta_{fci} - \theta_{wpi}) \times D_i) \times 1000 \quad (1)$$

در رابطه (۱) TAW کل رطوبت خاک تا عمق توسعه ریشه برحسب میلی‌متر، n تعداد لایه خاک تا عمق توسعه ریشه، θ_{fci} رطوبت ظرفیت مزرعه در لایه i ام، θ_{wpi} رطوبت نقطه پژمردگی در لایه i ام و D_i ضخامت خاک در لایه i ام برحسب متر. در این تحقیق، عمق ریشه در مرحله اول رشد به میزان ۰/۲ متر و در مرحله میانی و رسیدگی ۱/۲ متر در نظر گرفته شد و برای مرحله توسعه، به صورت درون‌یابی خطی بین رشد اولیه و رشد کامل محاسبه گردید. حجم آب آبیاری بر اساس کمبود رطوبت خاک، عمق توسعه ریشه و مساحت کرت تعیین شد و آب لازم با استفاده از کنتور حجمی وارد کرت می‌شد. به‌علت کوچک و محصور بودن کرت‌های آبیاری، تلفات آبیاری ناچیز و لذا آب ذخیره شده در خاک، صرف تبخیر و تعرق گیاه (ET) شده است. جدول (۳) مقادیر آبیاری در طول دوره رشد محصول در دو سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ نشان می‌دهد.

عملیات مزرعه‌ای و آزمایشگاهی

به‌منظور انجام این پژوهش، گیاه ذرت (single cross 704) در ۲۱ کرت به مساحت هر کدام ۲۵ مترمربع با آبیاری کامل (بدون تنش آبی) در دو سال متوالی ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ کشت شد. در هر کرت، جوپچه‌ها به فواصل ۷۵ سانتی‌متر حفر شدند و فاصله بین هر گیاه در ردیف‌های کشت ۱۸ سانتی‌متر بود.

نیترژن مورد نیاز با استفاده از کود اوره (حاوی ۴۶٪ نیترژن) به صورت طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با ۳ تکرار در هفت تیمار شامل: بدون کود، ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار (در این پژوهش به‌ترتیب با نمادهای N0 تا N6 نام‌گذاری شدند) تأمین شد. شماتیک طرح آماری در شکل (۱) ارائه شده است.

به‌منظور تعیین زمان مناسب آبیاری، تغییرات رطوبت خاک در طول فصل کشت با استفاده از روش انعکاس‌سنجی زمانی (با دستگاه TDR) اندازه‌گیری شد. بعد از آماده‌سازی زمین، لوله مخصوص این دستگاه در سه کرت از کرت‌های آزمایشی نصب و رطوبت خاک در لایه‌های مختلف خاک به‌طور روزانه اندازه‌گیری می‌شد. زمان آبیاری به‌صورتی تعیین گردید که رطوبت خاک تا

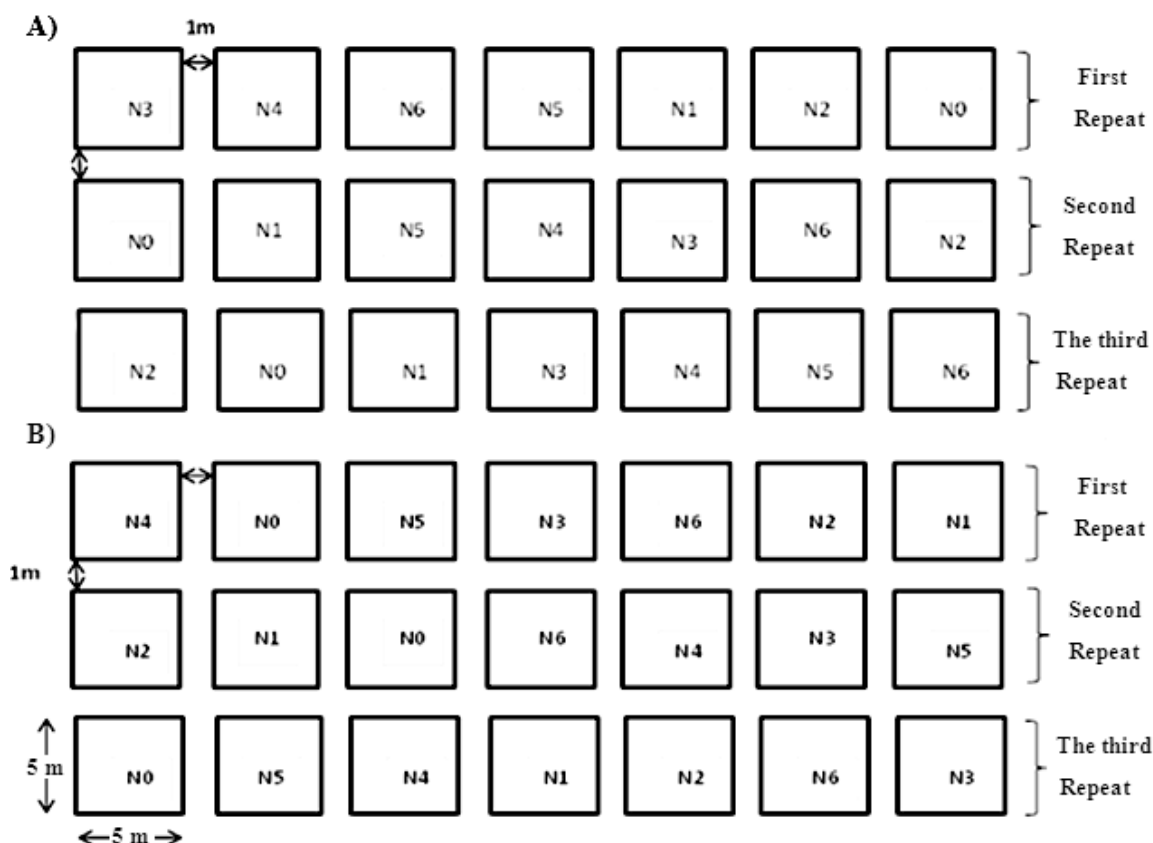


Fig. 1- Schematic of statistical design of different treatments and repetitions, A: 2015 crop year, B: 2016 crop year

شکل ۱ شماتیک طرح آماری موقعیت تیمارها و تکرارهای مختلف، الف: سال زراعی ۱۳۹۴، ب: سال زراعی ۱۳۹۵

جدول ۳- مقادیر آبیاری در طول دوره رشد محصول در دو سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵

Table 3- Irrigation quantities during the growing season for two years 2015 and 2016

Row	2015		2016	
	Days after planting	Irrigation depth (mm)	Days after planting	Irrigation depth (mm)
1	3	30	5	25
2	9	30	11	25
3	16	30	17	25
4	22	41	24	25
5	28	41	28	41
6	29	41	35	41
7	40	41	40	41
8	46	41	46	41
9	53	41	51	41
10	58	41	56	41
11	63	41	61	41
13	69	41	66	41
14	75	41	70	41
15	80	41	74	41
16	85	41	78	41
17	90	41	83	41
18	95	41	88	41
19	100	41	93	41
20	106	41	98	41
21	Sum	746	103	41
22			107	41
23			Sum	797

عملکرد ماده خشک (زیست توده) برای هر یک از تیمارها ثبت گردید.

تشریح مدل آکواکراپ

در این پژوهش از نسخه ۴ مدل AquaCrop استفاده شد. در این مدل، مقدار عملکرد محصول (زیست توده) تا i امین روز پس از کاشت از رابطه (۲) حساب می شود (Steduto et al., 2009):

$$B = WP * \sum \frac{T_{r,i}}{ET_{o,i}} \quad (2)$$

در رابطه فوق، B عملکرد محصول (زیست توده) قسمت هوایی گیاه تا i امین روز پس از کاشت (گرم بر متر مربع)، WP^* بهره‌وری نرمال شده (گرم بر متر مربع)، $T_{r,i}$ تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز) و $ET_{o,i}$ تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز) می‌باشند. پارامتر بهره‌وری آب (WP) عبارتست از عملکرد محصول به ازای واحد آب مصرفی گیاه است و مدل آکواکراپ از نرمال شده آن برای شبیه‌سازی زیست توده استفاده می‌کند. در تعریف پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) فرض شده که گیاه بدون تنش آبی و کمبود مواد غذایی رشد می‌کند و این پارامتر از تقسیم بهره‌وری آب بر تبخیر و تعرق مرجع حاصل می‌شود. از آنجا که تبخیر و تعرق مرجع یک پارامتر اقلیمی است، لذا بهره‌وری آب

مقدار سطوح کودی فوق براساس آزمون خاک قبل از کاشت، با استفاده از نمونه‌برداری در عمق‌های ۰-۲۰، ۲۰-۴۰ و ۴۰-۶۰ سانتی‌متری به گونه‌ای تعیین شدند که گیاه در معرض مقادیر بسیار کم (N_0) تا بسیار زیاد نیتروژن (N_6) قرار داشته باشد. کودهای فسفات، پتاسیم و دیگر عناصر مورد نیاز گیاه به خاک اضافه شد تا به جز در مقدار نیتروژن هیچ تفاوتی در بین تیمارها وجود نداشته باشد. عملیات کوددهی به صورت سرک و طی سه نوبت در زمان-های ۲۲، ۵۲ و ۶۵ روز بعد از کاشت در سال زراعی ۱۳۹۴ و ۲۸، ۴۰ و ۶۶ روز بعد از کاشت در سال زراعی ۱۳۹۵ انجام گرفت. زمان رسیدگی و برداشت محصول ذرت در سال اول ۱۱۹ روز پس از تاریخ کاشت (۵ مهر ماه سال ۱۳۹۴) و در سال دوم ۱۱۵ روز بعد از تاریخ کاشت (۱۵ شهریور ماه سال ۱۳۹۵) برداشت شد.

نمونه‌های گیاه به منظور اندازه‌گیری عملکرد ماده خشک (زیست توده) در طول فصل رشد از کرت‌های آزمایش برداشت شدند. تعداد نمونه برداری در سال‌های اول و دوم کشت (۱۳۹۴ و ۱۳۹۵) به ترتیب شش و هفت نوبت بود. عملیات نمونه‌برداری در هر نوبت به این صورت بود که شش گیاه از ردیف‌های میانی هر کرت انتخاب و از سطح خاک بریده شد. نمونه‌ها در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد برای خشک شدن قرار داده شدند و این فرایند تا ثابت شدن وزن نمونه‌ها ادامه داشت. وزن خشک نمونه‌ها به عنوان

$$CC = CC_x \times \left\{ 1 - 0.05 \times \left[e^{\left(\frac{CDC}{CC} \times t \right)} - 1 \right] \right\} \quad (7)$$

در روابط فوق، CDC نرخ کاهش پوشش گیاهی و t زمان بر حسب روز که از مرحله چهارم رویش (پیری) شروع می‌شود. داده‌های گیاهی لازم برای اجرای مدل آکواکراپ شامل درصد پوشش گیاهی در شروع مرحله جوانه‌زنی (CC_0)، نرخ رشد پوشش گیاهی در مرحله توسعه (CGC)، حداکثر پوشش گیاه (CC_x) و نرخ کاهش پوشش گیاه در مرحله پیری (CDC) می‌باشند که مقدار پوشش گیاه در شروع مرحله سبز شدن بر اساس راهنمای مدل ۰/۴۸ درصد استفاده گردید. درصد پوشش گیاهی با استفاده از روش Patrignani و Ochsner (2015) اندازه‌گیری شد. با استفاده از این روش، از سطح کرت عکس گرفته شد و با انتقال عکس به نرم‌افزار کانوپ (Canopeo)، درصد پوشش گیاه محاسبه گردید. برای گرفتن عکس‌ها، دوربین در ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر بالاتر از تاج پوشش گیاه و به‌طور موازی با سطح زمین قرار داده می‌شد. پارامترهای ورودی به مدل آکواکراپ دو گروهند، گروه اول پارامترهایی که مربوط به خانواده گیاه است مثل دماهای پایه و حداکثر و گروه دوم پارامترهایی که در مزرعه اندازه‌گیری شده و به مدل وارد می‌شود. پارامترهای گروه یک ثابتند (conservative) و مقادیر آن‌ها برای گیاه ذرت در جدول (۴) ارائه شده است.

در این پژوهش چهار پارامتر WP^* ، CGC، CC_x و CDC برای هر تیمار کودی با توجه به اندازه‌گیری‌های زیست‌توده و پوشش گیاهی در طول دوره رشد در دو سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ تعیین و به عنوان داده‌های واقعی در نظر گرفته شدند. داده‌های سال ۹۴ و ۹۵ به ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شدند. به‌طوریکه روابط بین کود مصرفی و چهار پارامتر WP^* ، CGC، CC_x و CDC با استفاده از داده‌های سال ۹۴ تعیین شدند. سپس با استفاده از این روابط، چهار پارامتر فوق برای تیمارهای کودی سال ۹۵ تعیین و با مقادیر واقعی مقایسه و صحت‌سنجی شد. در آخر مدل آکواکراپ با استفاده از داده‌های سال ۹۵ و پارامترهای برآوردشده فوق برای هر یک از تیمارهای کود اجرا و نتایج زیست‌توده برآورد شده از مدل با مقادیر اندازه‌گیری زیست‌توده مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفتند. مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده در تیمارهای مختلف به‌عنوان داده‌های واقعی و مقادیر شبیه‌سازی شده مدل به‌عنوان مقادیر برآورد شده در نظر گرفته شدند. به منظور ارزیابی مدل آکواکراپ، علاوه بر ترسیم نمودارهای اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر برآورد شده، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) استفاده شده است. هر دو شاخص RMSE و MBE برای سهولت مقایسه نرمال شده و بر حسب درصدی از میانگین داده‌های واقعی محاسبه شده است. معادله‌های این شاخص‌ها به شرح زیر می‌باشند:

نرمال شده برای هر گیاه در اقلیم‌های مختلف مقدار ثابت فرض شده است. بهره‌وری آب نرمال شده در مدل آکواکراپ با توجه به معادله (۱) به‌صورت زیر تعریف شده است (Steduto et al., 2009):

$$WP^* = \frac{B}{\left(\sum \frac{T_{r,i}}{ET_{o,i}} \right)} \quad (3)$$

مقدار پارامتر WP^* برای شرایط بدون کمبود مواد مغذی در خاک برابر ۳۳/۷ گرم بر مترمربع برای ذرت توصیه شده است (Raes et al., 2009) که در این پژوهش برای هر تیمار کودی مقدار آن برآورد شد. برای تعیین WP^* ، پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع ($\sum \frac{Tr}{ET_o}$) و زیست‌توده تجمعی (B) رسم شده و ضریب بهترین خطی که مبدا مختصات به نقاط برازش گردد، بهره‌وری آب نرمال شده خواهد بود (Steduto et al., 2009). در این پژوهش برای هر تیمار کودی مقدار $T_{r,i}$ با استفاده از مدل آکواکراپ تعیین شد. پارامتر $T_{r,i}$ در مدل آکواکراپ از رابطه زیر محاسبه می‌شود (Steduto et al., 2009):

$$T_r = K_s \times K_C \times CC \times ET_o \quad (4)$$

در رابطه فوق، K_s ضریب تنش آبی، K_C ضریب گیاهی، CC ضریب پوشش گیاهی و ET_o تبخیر و تعرق مرجع (mm) می‌باشند. در این پژوهش، برنامه آبیاری به‌صورتی بود که گیاه تحت تنش آبی قرار نگیرد، لذا ضریب K_s برابر با یک در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی K_C نسبت بین تبخیر و تعرق گیاه بدون تنش آبی به تبخیر و تعرق مرجع است. این ضریب در مدل آکواکراپ با استفاده از روش ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو در طول دوره رشد برآورد می‌شود (Allen et al., 1998). ضریب پوشش گیاهی در مدل آکواکراپ از زمان کاشت بذر تا پایان مرحله توسعه با استفاده از دو معادله زیر برآورد می‌شود (Steduto et al., 2009):

$$CC = CC_o \times e^{(CGC \times t)} \quad (5)$$

$$CC = CC_x - [CC_x - CC_o \times e^{(-CGC \times t)}] \quad (6)$$

معادله (۵) برای دوره زمانی کاشت بذر تا نیمه مرحله توسعه استفاده می‌شود و معادله (۶) برای دوره زمانی از نیمه مرحله توسعه تا آخر مرحله توسعه است. در معادله‌های فوق، CC پوشش گیاهی در t روز پس از کاشت، CC_x حداکثر پوشش گیاهی، CC_o پوشش اولیه گیاه در زمان t=0 و CGC نرخ رشد پوشش گیاه در روز است. پوشش گیاه در طول دوره مرحله آخر که در آن شیب پوشش گیاهی به‌صورت نزولی است، از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

کود ازت) ملاحظه می‌شود. عملکرد با افزایش مصرف کود افزایش می‌یابد ولی از تیمارهای N5 و N6 (تیمارهای ۲۵۰ و ۳۰۰ کیلوگرم کود ازت در هکتار) افزایش عملکرد قابل ملاحظه‌ای دیده نمی‌شود. شیب خط تیمارهای مختلف (مندرج در شکل ۲)، معرف بهره‌وری آب نرمال شده است. کمترین بهره‌وری مربوط به تیمار بدون کود است که بهره‌وری آب نرمال شده آن ۱۸/۷ گرم بر متر مربع است. تیمار N5 بیشترین بهره‌وری آب نرمال شده را با مقدار ۳۵/۸ گرم بر متر مربع دارد. بهره‌وری آب نرمال شده در تیمار N6 علی‌رغم مصرف ۵۰ کیلوگرم کود ازت بیشتر نسبت به تیمار N5، قدری کمتر شده است که نشان می‌دهد مصرف بیش از حد کود ازت، اثر معکوس در عملکرد دارد. پراکنش بین بهره‌وری آب نرمال شده در تیمارها که از شکل (۲) به دست آمدند و مقدار کود مصرفی در شکل (۳) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده نسبت به کود مصرفی از یک معادله درجه دو با ضریب تعیین بالایی پیروی می‌کند. این ضریب تعیین نشان‌دهنده آن است که معادله درجه دو مندرج در شکل (۳) حدود ۹۸ درصد تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده را در ارتباط با مصرف کود ازت شبیه‌سازی می‌کند. با مشتق‌گیری از معادله فوق، بیشترین مقدار پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده ذرت برابر ۳۴/۲ گرم بر مترمربع با مصرف کود ۲۲۲ کیلوگرم در هکتار به دست می‌آید. این مقدار حدود ۰/۵ گرم بر مترمربع از مقدار توصیه‌شده آن در پیوست راهنمای مدل آکواکراپ (۳۳/۷ گرم بر مترمربع) بیشتر می‌باشد (Raes et al., 2009). با توجه به معادله مندرج در شکل (۳)، معادله تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده ذرت در ارتباط با کود مصرفی (N) به عبارت زیر است:

$$WP^* = -0.0003 \times N^2 + 0.1332 \times N + 19.371 \quad (11)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \quad (8)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)}{NP} \times 100 \quad (9)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}}{\bar{P}} \times 100 \quad (10)$$

که در آن‌ها، P_i مقادیر برآورده شده مدل، \bar{P} متوسط مقادیر برآورده شده مدل، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{O} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و N تعداد مشاهدات می‌باشند. میانگین خطای اریب میزان خطا را با بیش‌برآورد و یا کم‌برآورد نشان می‌دهد. در صورتی که این شاخص مثبت باشد نشان می‌دهد که در مجموع نتایج مدل بیشتر از مقادیر واقعی است.

نتایج و بحث

شکل (۲) پراکنش بین عملکرد زیست توده و تعرق نرمال شده در تیمارهای مختلف این پژوهش در سال ۹۴ را نشان می‌دهد. در این شکل ضرایب تعیین و معادله‌های خطی که از مبدا مختصات به نقاط برازش شده، ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ضریب تعیین این داده‌ها بالا است و نشان‌دهنده این است که در هر سطح تیمار کود نیتروژن، رابطه خطی خوبی بین دو پارامتر برقرار است. کمترین عملکرد محصول در تیمار N0 (تیمار بدون

جدول ۴- پارامترهای ثابت (Conservative) ورودی به مدل آکواکراپ برای گیاه ذرت

Table 4- Conservative Inputs to the AquaCrop Model for Corn

Symbol	Description	Value
Tbase	Base temperature (°C)	8
Tupper	Upper temperature (°C)	30
CCo	Soil surface covered by an individual seedling at 90% emergence (cm ² /plant)	6.5
CGC	Canopy growth coefficient (% day ⁻¹)	19.9
Kc _{Tr,x}	Crop coefficient when canopy is complete but prior to senescence	1.05
-	Decline of crop coefficient as a result of ageing, nitrogen deficiency, etc. (% day ⁻¹)	0.3
CDC	Canopy decline coefficient	12.7
pexp,lower	Soil water depletion threshold for canopy expansion - Upper threshold	0.14
pexp,upper	Soil water depletion threshold for canopy expansion - Lower threshold	0.72
-	Shape factor for Water stress coefficient for canopy expansion	2.9
psto	Soil water depletion threshold for stomatal control - Upper threshold	0.69
-	Shape factor for Water stress coefficient for stomatal control	6
psen	Soil water depletion threshold for canopy senescence - Upper threshold	0.69
-	Shape factor for Water stress coefficient for canopy senescence	2.7
WP*	Water productivity normalized for ETo and CO2 (gram/m ²)	33.7

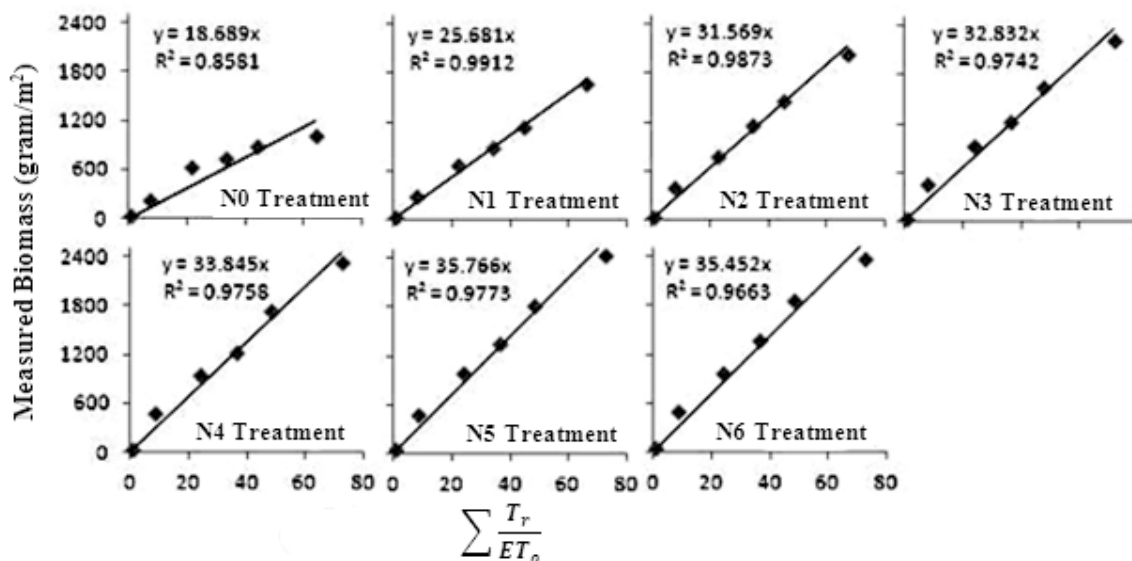


Fig. 2- The Relationship between yield biomass and Normalized Transpiration in various nitrogen treatments for calibration data (Year 2015)

شکل ۲- رابطه بین عملکرد زیست توده و تعرق نرمال شده در تیمارهای مختلف کود ازت برای داده‌های واسنجی (سال ۹۴)

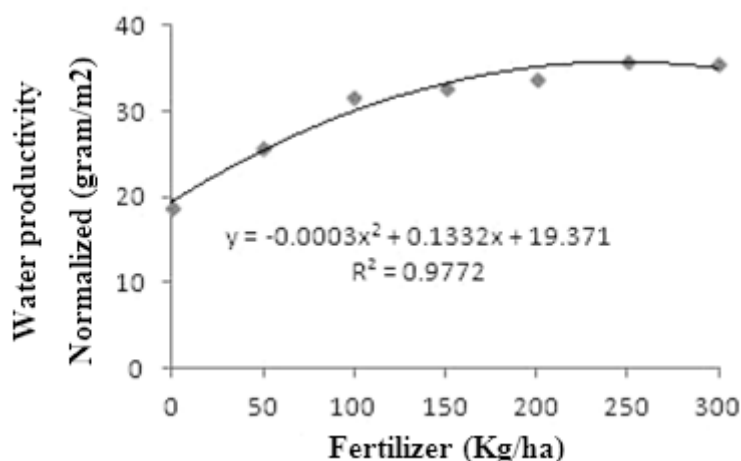


Fig. 3- Normalized Water Productivity changes curve compared to nitrogen fertilizer

شکل ۳- منحنی تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده نسبت به کود مصرفی نیتروژن

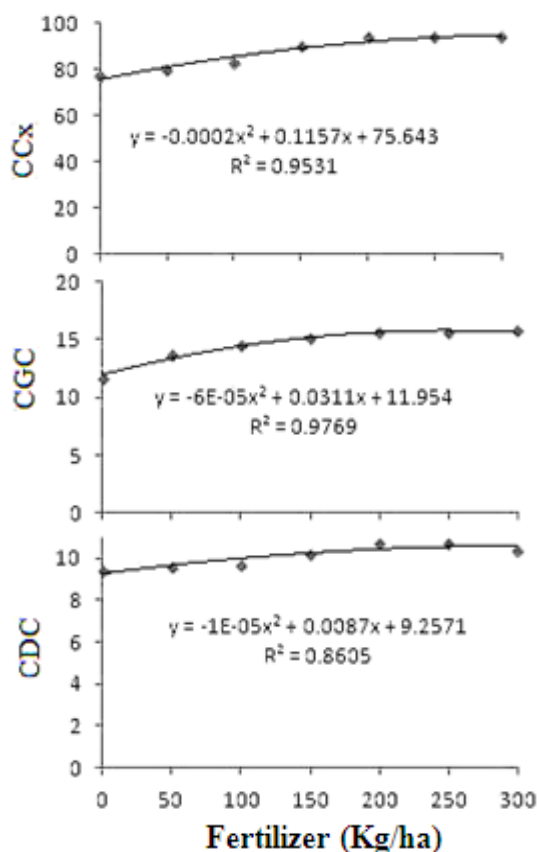
نشان‌دهنده این است که افزایش مصرف کود تا مقدار مشخصی باعث افزایش متغیر وابسته می‌شود ولی وقتی مصرف کود از آن بیشتر گردد، باعث کاهش متغیر وابسته می‌گردد. با توجه به معادله‌های مندرج در شکل (۴)، روابط تغییرات سه پارامتر CCx، DGC و CDC نسبت به کود مصرفی به قرار زیر می‌باشد:

$$CCx = -0.0002 \times N^2 + 0.1157 \times N + 75.641 \quad (۱۲)$$

$$CGC = -6 \times 10^{-5} \times N^2 + 0.0311 \times N + 11.95 \quad (۱۳)$$

$$CDC = -10^{-5} \times N^2 + 0.009 \times N + 9.25 \quad (۱۴)$$

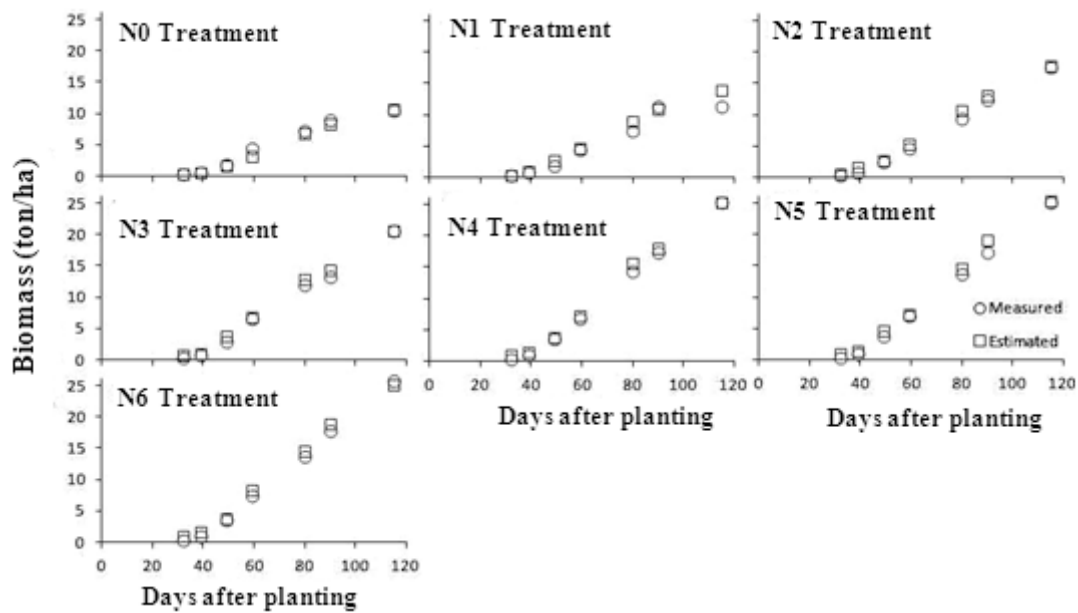
منحنی تغییرات مقادیر اندازه‌گیری شده پارامترهای حداکثر پوشش گیاهی (CCx)، ضریب رشد گیاهی (CGC) و ضریب کاهش پوشش گیاه (CDC) نسبت به کود مصرفی در شکل (۴) ارائه شده است. مشاهده می‌شود، هر سه پارامتر CCx، DGC و CDC با افزایش مصرف کود تا مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار افزایش می‌یابد و از این مقدار بیشتر هر سه پارامتر تقریباً ثابت می‌شود. لذا اثر تنش کود ازت روی پارامترهای رشد گیاه موثر است. مشاهده می‌شود دو پارامتر CCx و DGC از ضریب تعیین بالایی بیش از ۹۵ درصد برخوردارند ولی ضریب تعیین پارامتر CDC حدود ۸۶ درصد است و به نسبت مناسب می‌باشد. هر سه پارامتر مشابه بهره‌وری آب نرمال شده از معادلات درجه دو پیروی می‌کند و



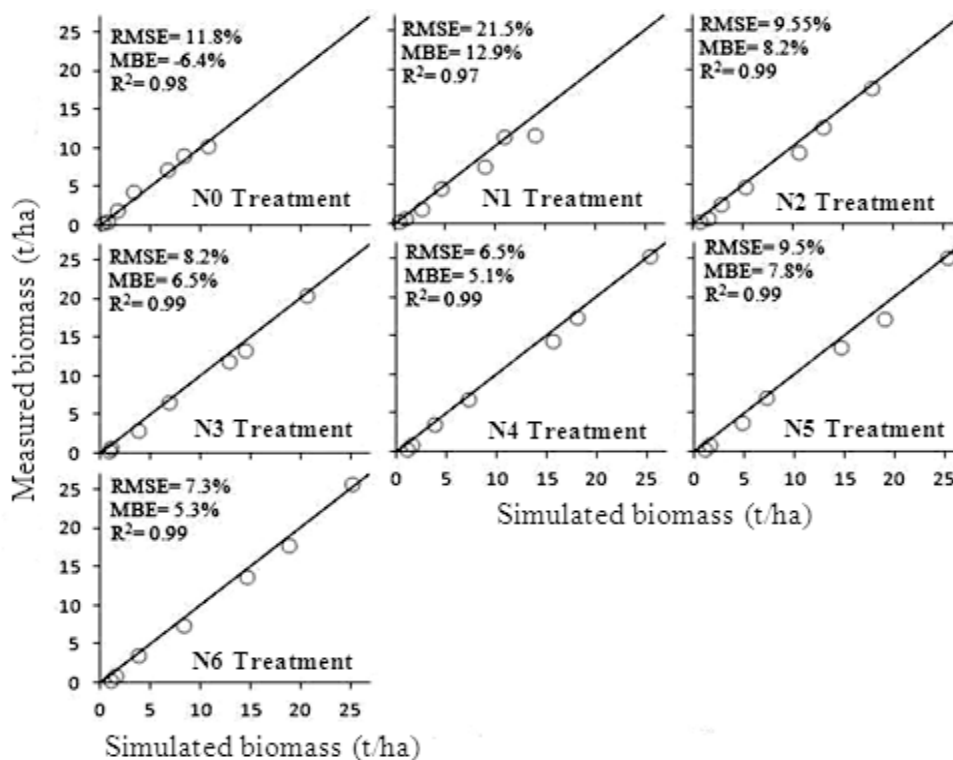
شکل ۴- منحنی تغییرات پارامترهای رشد ذرت CCx، CGC و CDC نسبت به مصرف کود
 Fig. 4- Curve of corn growth parameters CCx, CGC and CDC versus fertilizer

کیلوگرم ازت در هکتار) مشهود است و از تیمار N4 (۲۰۰ کیلوگرم ازت در هکتار) به بعد تغییرات قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد محصول دیده نمی‌شود. خلاصه نتایج آماری که در شکل (۶) درج شده است، نشان می‌دهد، ضریب تعیین بین نتایج مدل آکواکراپ و اندازه‌گیری شده بالای ۰/۹۵ است که این مطلب را می‌رساند که معادلات تعیین اثر کود بر روی پارامترهای رشد محصول ذرت که در سال ۹۴ بنیان شدند، در صورتی که نتایج آن در مدل آکواکراپ مورد استفاده قرار گیرد، بالای ۹۵ درصد تغییرات زیست توده را شبیه‌سازی می‌کند. به جز تیمار N1 که درصد میانگین خطای اریب آن ۱۲/۹ درصد است، در بقیه تیمارها بین ۶/۴- تا ۸/۲ درصد تغییر می‌کند که تقریباً ناچیز می‌باشد. علامت منفی نشان‌دهنده این است که به طور متوسط نتایج مدل کمتر از نتایج اندازه‌گیری شده است. درصد میانگین جذر مربعات خطا در تیمار N1 حدود ۲۱/۵ درصد است ولی در بقیه تیمارها بین ۶/۵ تا ۱۱/۸ درصد تغییر می‌کند که قابل ملاحظه نیست.

پارامترهای WP^* ، CCx ، DGC و CDC برای مصارف کود صفر تا ۳۰۰ کیلوگرم در هکتار با استفاده از روابط (۱۲) تا (۱۴) برآورد شد و نتایج آن‌ها با داده‌های سال ۹۵ به عنوان ورودی مدل آکواکراپ وارد و عملکرد زیست توده برای روزهای اندازه‌گیری شده شبیه‌سازی شد. تغییرات عملکرد زیست توده اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در طول دوره رشد برای تیمارهای مختلف در شکل (۵) ارائه شده است. مشاهده می‌شود، تنش کود ازت در هر دو نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی عملکرد زیست توده برای مقادیر کمتر از ۲۰۰ کیلوگرم ازت در هکتار مشهود می‌باشد و از تیمار N4 (۲۰۰ کیلوگرم کود ازت در هکتار) به بعد افزایش عملکرد قابل ملاحظه نیست. در هر دو نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده روند تغییرات زیست توده در طول فصل رشد یکسان است و اختلاف بین آن‌ها قابل ملاحظه نیست. پراکنش نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف در شکل (۶) ارائه شده است. مشاهده می‌شود، به جز تیمار N1 (۵۰ کیلوگرم ازت در هکتار) نقاط روی و یا در فاصله نزدیک به خط ۱:۱ قرار دارند و لذا اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده در بقیه تیمارها ناچیز می‌باشد. در تیمار N1 هم فقط در نتایج عملکرد نهایی بین شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده اختلاف دیده می‌شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اثر تنش کود بر عملکرد محصول تا تیمار N3 (۱۵۰



شکل ۵- مقایسه روند تغییرات عملکرد زیست توده اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در تیمارهای مختلف کود ازت
 Fig. 5- Comparison of change in biomass yield measured and simulated in different N fertilizer treatments



شکل ۶- پراکنش زیست توده اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و خلاصه نتایج آماری در تیمارهای کود ازت در سال ۹۵
 Fig. 6- The scatter plots of measured and simulated biomass and a summary of statistical results in N fertilizer treatments in year 2016

نتیجه گیری

مقادیر اندازه گیری شده و شبیه سازی شده زیست توده برقرار است. لذا چهار معادله بنیان شده در این پژوهش می تواند برای تأثیر مقدار کود ازت بر آورد روی پارامترهای رشد محصول ذرت برای منطقه مورد مطالعه مورد استفاده قرار گیرد و نتایج بر آورد این پارامترها در مدل آکواکراپ برای شبیه سازی عملکرد محصول مورد استفاده قرار گیرد. بدیهی است نتایج این پژوهش فقط برای محصول ذرت و برای شرایط منطقه چه از نظر آب و هوا و خاک معتبر می باشد و لذا با توجه به اهمیت مصرف بهینه کود ازت توصیه می شود مشابه این پژوهش برای سایر محصولات و مناطق مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

در این پژوهش اثر مقادیر مختلف کود ازت بر روی شاخص های رشد گیاه ذرت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، کود ازت به شکل تابع درجه دو بر روی پارامترهای *WP، CCx، و CGC و CDC اثر می گذارد. معادله های بنیان شده در این پژوهش برای بر آورد پارامترهای فوق از روی مقدار کود ازت مصرفی دارای ضریب تعیین بالایی است. این معادله ها برای بر آورد پارامترهای فوق برای داده های صحت سنجی استفاده شدند. پارامترهای بر آورد شده از معادلات بنیان شده به مدل آکواکراپ وارد و زیست توده برای مقادیر مختلف کود شبیه سازی شد. مقایسه نتایج نشان داد، دقت خوبی بین

References

- 1- Ali, M.H., Hoque, M.R., Hassan, A. and Khair, A., 2007. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity, and economic returns of wheat. *Agricultural Water Management*, 92(3), pp.151-161.
- 2- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. FAO, Rome.
- 3- Angus, J.F., 2001. Nitrogen supply and demand in Australian agriculture. *Animal Production Science*, 41(3), pp. 277-288.
- 4- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A. and Dejene, T., 2010. Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural Water Management*, 97(11), pp.1838-1846.
- 5- Boogaard, H.L., De Wit, A.J.W., Roller, J.A. and Van Diepen, C. A., 2014. WOFOST CONTROL CENTRE 2.1; User's guide for the WOFOST CONTROL CENTRE 2.1 and the crop growth simulation model WOFOST 7.1.7. *Wageningen (Netherlands), Alterra, Wageningen University & Research Centre*.
- 6- Eickhout, B., Bouwman, A.V. and Van Zeijts, H., 2006. The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 116(1), pp.4-14.
- 7- Farahani, H.J., Izzi, G. and Oweis, T.Y., 2009. Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*, 101(3), pp.469-476.
- 8- Geerts, S. and Raes, D., 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96(9), pp.1275-1284.
- 9- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Condori, O., Mamani, J., Miranda, R., Cusicanqui, J., Taboada, C., Yucra, E. and Vacher, J., 2008. Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano?. *Agricultural Water Management*, 95(8), pp.909-917.
- 10- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. and Fereres, E., 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), pp.448-459.
- 11- Igbadun, H.E., Salim, B.A., Tarimo, A.K. and H.F. Mahoo. 2008. Effects of deficit irrigation scheduling on yields and soil water balance of irrigated maize. *Irrigation Science*. 27(1):11-23.
- 12- Jones, C.A., Kiniry, J.R. and Dyke, P.T., 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development. *Texas A&M University Press*.

- 13- 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. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18(3), pp.235-265.
- 14- Kang, S., Shi, W. and Zhang, J., 2000. An improved water-use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation. *Field Crops Research*, 67(3), pp.207-214.
- 15- Liu, C.W., Sung, Y., Chen, B.C. and Lai, H.Y., 2014. Effects of nitrogen fertilizers on the growth and nitrate content of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(4), pp.4427-4440.
- 16- Mousavizadeh, S.F., Honar, T. and Ahmadi, S.H., 2016. Assessment of the AquaCrop Model for simulating Canola under different irrigation managements in a semiarid area. *International Journal of Plant Production*, 10(4), pp.425-446.
- 17- Patrignani, A. and Ochsner, T.E., 2015. Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal*, 107(6), pp.2312-2320.
- 18- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E., 2009. AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), pp.438-447.
- 19- Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E., 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25(3), pp.189-207.
- 20- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. and Fereres, E., 2009. AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), pp.426-437.
- 21 -Stöckle, C.O., Donatelli, M. and Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18(3), pp.289-307.
- 22- Van Gaelen, H., Tsegay, A., Delbecque, N., Shrestha, N., Garcia, M., Fajardo, H., Miranda, R., Vanuytrecht, E., Abrha, B., Diels, J. and Raes, D., 2015. A semi-quantitative approach for modelling crop response to soil fertility: evaluation of the AquaCrop procedure. *The Journal of Agricultural Science*, 153(07), pp.1218-1233.