

مقاله علمی-پژوهشی

برنامه‌ریزی آبیاری ذرت و تعیین توابع تولید آب و کود نیتروژن مصرفی با استفاده از مدل واسنجی شده آکواکراپ

کیومرث پژوهیده^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*}، فریبرز عباسی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۸

چکیده

ذرت یکی از مهم‌ترین گیاهان زراعی در جهان است. رشد و عملکرد این گیاه به‌طور مستقیم وابسته به آب و نیتروژن است. در این پژوهش، برای تعیین مقادیر مناسب آب و کود نیتروژن، از مدل واسنجی شده آکواکراپ، بر اساس داده‌های برداشت‌شده از طرح تحقیقاتی انجام‌شده در موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر کرج طی دو سال زراعی (۱۳۸۹-۱۳۸۷)، استفاده شد. همچنین برای کمی‌سازی نتایج، توابع تولید آب-عملکرد، کود-عملکرد و آب-کود-عملکرد تعیین شدند. بدین منظور، عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت دانه‌ای توسط مدل آکواکراپ تحت مقادیر مختلف آب آبیاری (در سطوح ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد تأمین نیاز آبی) و کود نیتروژن (در چهار سطح ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و صفر درصد نیاز کودی) مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با تأمین ۸۰ درصد آب آبیاری (W3)، عملکرد قابل قبول و کارایی مصرف آب بیش‌تری نسبت به سایر تیمارها حاصل شد. اگرچه با افزایش کود مصرفی، عملکرد و کارایی مصرف آب نیز بهبود یافت. به‌طوری‌که عملکرد دانه ذرت در تیمار W3 برای مقادیر ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز کودی به ترتیب برابر با ۱۱، ۱۰/۸ و ۱۰/۲ تن در هکتار و کارایی مصرف آب برای این تیمارها به ترتیب برابر با ۱/۴۵، ۱/۵۳ و ۱/۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب بود. همچنین صورت‌های ساده برای توابع آب-عملکرد و کود-عملکرد و صورت درجه دوم برای تابع آب-کود-عملکرد به‌عنوان توابع تولید مناسب انتخاب شدند.

واژه‌های کلیدی: آکواکراپ، تابع تولید، کم‌آبیاری، مدل‌سازی گیاهی

مقدمه

ذرت یکی از گیاهان قدیمی در جهان است که در حال حاضر در بسیاری از اقلیم‌ها کشت می‌شود. این گیاه زراعی یکی از غلات مهم و پر محصول در تغذیه انسان و حیوان بوده و در بین غلات، بعد از گندم بیش‌ترین سطح زیر کشت را دارد. با توجه به کشت این گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور ما، لازم است توجه ویژه‌ای به

میزان آب آبیاری آن شود زیرا تنش‌های آبی سبب کاهش عملکرد آن می‌گردد. از طرف دیگر، کود نیتروژن نیز یکی از عوامل مهم در رشد و افزایش عملکرد ذرت می‌باشد (Kumar et al., 2019; Guo et al., 2019). به‌طوری‌که برخی محققان پیشنهاد کرده‌اند در شرایط تنش آبی، نیاز کودی ذرت به‌صورت کامل تأمین شود تا عملکرد ذرت کاهش شدید نداشته باشد (افشون و همکاران، ۱۴۰۰).

با توجه به اهمیت تأمین آب و نیتروژن برای رشد ذرت، لازم است تغییرات عملکرد آن نسبت به مقادیر مختلف این دو پارامتر برای مناطق مختلف کشور تعیین شود. لذا این کار بسیار پر هزینه است و انجام آزمایش‌های متعدد زمان‌بر است (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷؛ احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). از این‌رو استفاده از روش‌های غیرمستقیم مانند شبیه‌سازی با مدل‌های گیاهی و توابع تولید گیاهی توسط محققان پیشنهاد شده است (شهیدی و احمدی، ۱۳۹۴؛ اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛ ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸).

مدل آکواکراپ یکی از مدل‌های گیاهی است که در سال‌های

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد

اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۳- استاد پژوهش، مؤسسه پژوهش‌های فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان پژوهش‌ها،

آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: a_eigder@ymail.com)

** مقاله مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته آبیاری و زهکشی

ارائه کند. برای بیان یک رابطه کمی نیاز است از توابع تولید استفاده کرد. توابع تولید گیاهی دارای ضرایب ثابتی هستند که پس از محاسبه آن‌ها، می‌توان بر اساس مقدار آب و کود نیتروژن مصرفی به تعیین عملکرد گیاه زراعی موردنظر پرداخت (شهیدی و احمدی، ۱۳۹۴). عیب عمده این روش این است که برای تعیین ضرایب ثابت تابع تولید در هر منطقه، می‌بایست آزمایش‌های مزرعه‌ای جداگانه‌ای انجام داد. به همین دلیل یکی از روش‌های مهم برای تبیین رابطه کمی بین نهاده‌ها و عملکرد محصول، تلفیق نتایج به‌دست‌آمده از مدل آکواکراپ و توابع تولید است. ارائه این رابطه ریاضی سبب دسترسی راحت‌تر محققان و مدیران به رابطه‌ی منطقی بین عوامل آب و کود نیتروژن و عملکرد می‌شود. همچنین می‌توان از این رابطه ریاضی برای مدیریت بهتر نهاده‌ها استفاده کرد. تاکنون محققان توجه کمتری نسبت به این موضوع داشته‌اند. از جمله محدود پژوهش‌ها انجام شده در این خصوص می‌توان به پژوهش انجام شده توسط اگدرنژاد و همکاران (۱۳۹۷) اشاره کرد. در این پژوهش با استفاده از نتایج شبیه‌سازی کلزا، توابع تولید آب-عملکرد تعیین گردید.

بر اساس مرور منابع، در صورت در اختیار داشتن توابع تولید برای گیاه ذرت، محققان و مدیران آبیاری و کشاورزی می‌توانند به‌سادگی به برنامه‌ریزی مصرف آب برای تولید نیاز غذایی به این محصول کشاورزی بپردازند. با توجه به اینکه تاکنون چنین پژوهشی روی گیاه ذرت انجام نشده است؛ در پژوهش حاضر با استفاده از مدل واسنجی شده آکواکراپ، ابتدا مقادیر بهینه عوامل آب و کود نیتروژن تعیین شد. سپس با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، توابع تولید آب-عملکرد، کود-عملکرد و آب-کود-عملکرد استخراج و تحلیل شدند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش از داده‌های برداشت‌شده از پروژه تحقیقاتی اجراشده در مزرعه تحقیقاتی ۴۰۰ هکتاری موسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر در کرج طی دو سال زراعی (۱۳۸۷-۱۳۸۹) استفاده شد (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۱؛ علیزاده و عباسی، ۱۳۹۶). این پژوهش در دو مرحله انجام گرفت. در مرحله نخست از داده‌های برداشت‌شده برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل آکواکراپ استفاده شد. سپس با استفاده از مدل واسنجی‌شده آکواکراپ، واکنش گیاه ذرت دانه‌ای به عمق‌های مختلف آب آبیاری بررسی شد. در مرحله دوم با استفاده از نتایج شبیه‌سازی توسط مدل آکواکراپ، توابع تولید مختلف، بر اساس رابطه‌ی بین عمق آب آبیاری، کود نیتروژن و عملکرد ذرت، تعیین شد.

مزرعه تحقیقاتی موردنظر در طول جغرافیایی ۵۰/۵۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵/۵۶ شمالی و ارتفاع ۱۳۱۲ متری از سطح دریا قرار دارد. تیمارهای مورد بررسی در این پژوهش شامل مقدار آب

اخیر بسیار مورد توجه محققان بوده است. این مدل گیاهی توسط سازمان خوار و بار کشاورزی (FAO) در سال ۲۰۰۹ ارائه شد (Raes et al., 2012). با توجه به اهمیت این مدل گیاهی، تاکنون محققان بسیاری از آن برای شبیه‌سازی ذرت استفاده نموده‌اند. به‌عنوان نمونه، در پژوهشی دقت مدل آکواکراپ در شرایط گوناگون تراکم بوته، تاریخ کاشت متفاوت و مقادیر مختلف نیاز آبی برای گیاه ذرت در ایالت کالیفرنیا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که دقت و کارایی این مدل گیاهی قابل قبول بود (Hsiao et al., 2009). در پژوهشی دیگر برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت از مدل گیاهی آکواکراپ استفاده شد و نتایج نشان داد که دقت مدل آکواکراپ برای شرایط تنش ملایم قابل قبول بود ولی در شرایط تنش شدید اندکی از دقت آن کاسته شد (Heng et al., 2009). همچنین با شبیه‌سازی سناریوهای مختلف کم‌آبیاری بر ذرت گزارش گردید که دقت مدل آکواکراپ برای این هدف قابل قبول بود (Katerji et al., 2013). در پژوهشی دیگر با استفاده از مدل آکواکراپ به شبیه‌سازی عملکرد ذرت در شرایط زراعی کشور زیمبابوه پرداخته شد. نتایج نشان داد که این مدل گیاهی دقت بالایی برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت داشت (Masanganise et al., 2013). از این مدل گیاهی همچنین برای برآورد روند عملکرد ذرت تحت تنش‌های شوری و کودی استفاده کردند. نتایج نشان داد که آماره RMSE برای شبیه‌سازی عملکرد ذرت برابر با ۰/۳۴ تن در هکتار بود که قابل قبول است (سعیدی و همکاران، ۱۴۰۰). فنگ و همکاران به شبیه‌سازی ذرت در کشور چین با استفاده از مدل AquaCrop تحت شرایط استفاده و عدم استفاده از مالچ پرداختند. این محققان برای واسنجی مدل از داده‌های برداشت‌شده از سال ۲۰۱۶ استفاده کردند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که آماره RMSE برای این مدل گیاهی بین ۰/۹-۲ تن در هکتار متغیر بود. افزایش خطای مدل AquaCrop به دلیل استفاده از مالچ گزارش شد (Feng et al., 2022). هی و همکاران با استفاده از داده‌های برداشت‌شده در سال ۲۰۱۴ به واسنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی ذرت پرداختند. سپس با استفاده از داده‌های برداشت‌شده منتهی به سال ۲۰۱۸ این مدل گیاهی تحت صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج نشان داد که خطای مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد برابر با ۴/۱۳ درصد بود (He et al., 2021). ولکا و همکاران به ارزیابی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی ذرت در کشور ایتالیایی تحت شرایط استفاده از سیل‌بند و عدم استفاده از آن پرداختند. این پژوهشگران گزارش کردند که دقت مدل AquaCrop برای هر دو شرایط قابل قبول بود و تفاوتی در دقت شبیه‌سازی بین شرایط مورد استفاده وجود نداشت (Wolka et al., 2021).

علی‌رغم قابلیت‌های مدل آکواکراپ، این مدل گیاهی نمی‌تواند یک رابطه ریاضی بین آب یا کود مصرفی با عملکرد ذرت به محققان

موردنظر از روش آبیاری جویچه‌ای استفاده شد. مقادیر آب آبیاری برای هر تیمار در جدول (۱) نشان داده شده است. بذر ذرت با تراکم ۸۵ هزار بوته در هکتار در اواخر خرداد کشت شد. مشخصات خاک آزمایش در جدول (۲) نشان داده شده است. کود نیتروژن مورد استفاده ابتدا به یک بشکه بزرگ ۲۲۰ لیتری تزریق سپس به بشکه ۲۰ لیتری منتقل می‌شد. این کار برای ثابت نگه‌داشتن دبی تزریق کود انجام شد. به دلیل اینکه تزریق کود در اواخر آبیاری یکنواختی توزیع بیشتری به همراه دارد، تزریق کود در ۲۰-۳۰ دقیقه انتهایی آبیاری انجام می‌شد.

آبیاری (در چهار سطح W1، W2، W3 و W4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی) و کود نیتروژن (در چهار سطح N1، N2، N3 و N4 به ترتیب نشان‌دهنده تأمین ۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و صفر درصد نیاز کودی) است. نیتروژن مورد نیاز بر اساس آزمایش کودی و برای تیمار ۱۰۰ درصد نیاز کودی به میزان ۴۰۰ کیلوگرم در هکتار از منبع اوره در نظر گرفته شد. آب آبیاری با استفاده از میزان تبخیر از تشت تبخیر کلاس A و با اعمال ضرایب تشت تبخیر (Kp) و ضریب گیاهی (Kc) تعیین شد (عباسی و همکاران، ۱۳۸۹؛ عباسی و همکاران، ۱۳۹۱؛ علیزاده و عباسی، ۱۳۹۶). برای آبیاری تیمارهای

جدول ۱- مقدار آب آبیاری برای تیمارهای مختلف

تاریخ آبیاری	W1	W2	W3	W4
۱ تیر	۸۹	۸۴	۷۹	۷۹
۶ تیر	۸۹	۸۴	۷۹	۷۳
۱۲ تیر	۶۰	۵۹	۵۰	۴۹
۱۸ تیر	۵۴	۴۹	۳۸	۲۹
۲۳ تیر	۷۴	۶۹	۴۷	۴۵
۳۱ تیر	۸۶	۵۶	۴۷	۴۱
۷ مرداد	۷۵	۵۶	۵۰	۳۶
۱۳ مرداد	۸۴	۵۶	۴۹	۳۷
۱۹ مرداد	۸۱	۷۴	۶۱	۳۸
۲۵ مرداد	۷۸	۷۸	۵۴	۴۰
۲ شهریور	۱۰۷	۹۹	۴۹	۲۶
۹ شهریور	۸۴	۶۵	۴۶	۴۱
۱۶ شهریور	۹۸	۶۶	۵۳	۴۱
۲۴ شهریور	۹۰	۷۵	۵۷	۴۱
۲ مهر	۸۴	۶۴	۴۷	۴۱
۱۵ مهر	۳۳	۲۵	۱۸	۱۳

جدول ۲- برخی ویژگی‌های خاک آزمایش

عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	درصد رطوبت حجمی در PWP	درصد رطوبت حجمی در FC	درصد رطوبت اشباع	EC (دسی زیمنس بر متر)	pH
۰-۲۰	لوم	۱/۳۴	۱۵	۲۹	۴۵	۱/۱۶	۷/۷۷
۲۰-۴۰	لوم	۱/۴۶	۱۵	۲۹	۴۴	-/۸۲	۷/۶۷
۴۰-۶۰	لوم	۱/۴۷	۱۶	۲۸	۴۴	-/۸۰	۷/۸۵
۶۰-۸۰	لوم	۱/۵۰	۱۶	۲۸	۴۳	-/۸۷	۷/۶۹

مدل آکواکراپ

این مدل برای تعیین عملکرد محصول بر اساس تبخیر- تعرق از رابطه (۱) استفاده می‌کند (Raes et al., 2012).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (1)$$

در این رابطه، Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد

محصول، ET_x و ET_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر- تعرق گیاه و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر- تعرق است. این مدل با تفکیک تبخیر- تعرق (ET) به دو جزء تبخیر از سطح خاک (E) و تعرق از سطح گیاه (Tr)، از مصرف غیرتولیدی آب از طریق تبخیر جلوگیری می‌کند. این عمل با شبیه‌سازی پوشش تاج گیاه به جای شاخص سطح برگ (LAI) انجام

مدیریت مزرعه نیز شامل الف) مدیریت مزرعه و حاصلخیزی و ب) آبیاری است. مدیریت مزرعه بدون محدودیت برای مدل آکواکراپ تعریف شد. آبیاری نیز بر اساس تیمارهای موردنظر در شکل (۱) به مدل معرفی گردید. پارامترهای گیاهی در مدل آکواکراپ برای گیاه ذرت توسط بسط دهندگان مدل تعریف شده است. با توجه به اینکه شرایط هر منطقه برای گیاه ذرت متفاوت است، لازم است برخی از این داده‌ها در محل آزمایش اندازه‌گیری شوند. سایر داده‌ها نیز یا به صورت پیش فرض باقی می‌مانند و یا بر اساس شرایط شبیه‌سازی تغییر می‌کنند. تغییر این داده‌ها حین دو فرایند واسنجی و صحت‌سنجی می‌بایست انجام شود.

برای واسنجی مدل آکواکراپ از داده‌های برداشت‌شده در سال اول استفاده شد. داده‌های ورودی برای مدل تعریف شد. سپس پارامترهای گیاهی به‌گونه‌ای تغییر داده شدند تا بهترین نتیجه به دست آید. برای حصول بهترین نتیجه، از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF)، شاخص توافق (d) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در روابط (۶) تا (۱۱) نشان داده شده‌اند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۵). آماره‌های RMSE و NEMSE به ترتیب برای تعیین خطا و دقت مدل است. مقدار آماره RMSE همواره مثبت بوده و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد بهتر است. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره NRMSE نشان‌دهنده دقت عالی مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه‌های ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف است. آماره MBE برای سنجش بیش برآوردی و کم برآوردی مدل است. مقدار مثبت آماره MBE نشان‌دهنده این است که مقدار شبیه‌سازی شده بیشتر از مقدار واقعی برآورد شده است و مقادیر منفی بیانگر این است که مدل آکواکراپ در برآورد عملکرد دانه ذرت عدد کوچکتری به دست داده است. مقادیر آماره‌های EF و d نشان‌دهنده کارایی مدل آکواکراپ است. این دو آماره هر چه به یک نزدیک‌تر باشند بهتر است. آماره R^2 نشان‌دهنده قدرت مدل برای شبیه‌سازی تغییرات به وجود آمده در مقدار واقعی است. این آماره از صفر تا یک تغییر می‌کند و هر چه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده برازش بهتر داده‌ها می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}}{O_i} \quad (7)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{n} \quad (8)$$

می‌شود. بدین ترتیب که توسعه پوشش تاج گیاه از زمان جوانه‌زنی تا مقدار بیشینه پوشش تاج از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Raes et al., 2012).

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (2)$$

در این رابطه، CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد)، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) می‌باشد. میزان تعرق گیاه بر اساس پوشش تاج از رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Raes et al., 2012).

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (3)$$

در این رابطه، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی هستند. بیوماس خشک نیز طبق رابطه (۴) برآورد می‌گردد (Raes et al., 2012).

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (4)$$

که در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب نرمال شده، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد وزن دانه (Y) نیز با استفاده از ماده‌ی خشک تولیدشده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Raes et al., 2012).

$$Y = B \times HI \quad (5)$$

شدت تنش آبی (K_s) مؤثر بر توسعه پوشش تاج (CC)، هدایت روزنه‌ای (شدت تعرق در واحد CC)، پیروی و کاهش پوشش تاج و شاخص برداشت به‌وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در واقع در صورت تنش آبی میزان تاج پوشش گیاهی کاهش یافته و به تبع آن میزان تعرق گیاه کاهش می‌یابد. این عمل سبب کاهش ماده خشک تولیدی و عملکرد دانه می‌شود.

ورود داده‌ها و واسنجی مدل

داده‌های ورودی مدل آکواکراپ شامل چهار گروه داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه است. داده‌های اقلیمی شامل بیشینه و کمینه دمای روزانه، بارندگی، تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) و میانگین غلظت CO_2 سالانه است. جهت تعیین تبخیر-تعرق از معادله فائو-پنمن-مانتیث و توسط نرم‌افزار ET-calculator استفاده شد و خروجی آن به مدل آکواکراپ معرفی گردید. غلظت CO_2 نیز بر اساس مقدار پیش فرض که در رصدخانه مائونالوای هاوایی اندازه‌گیری شده است، به مدل تعیین شد. داده‌های خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع، بافت خاک و رطوبت حجمی خاک در نقاط ظرفیت زراعی و پژمردگی دائم می‌باشد. این پارامترها بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش خاک به مدل معرفی گردید. داده‌های

$$Y(W) = a \cdot W^b \quad (17)$$

$$Y(W) = a + b \cdot W + c \cdot W^2 \quad (18)$$

$$Y(W) = a \cdot W^b \cdot \exp(c \cdot W) \quad (19)$$

$$Y(N) = a + b \cdot N \quad (20)$$

$$Y(N) = a \cdot N^b \quad (21)$$

$$Y(N) = a + b \cdot N + c \cdot N^2 \quad (22)$$

$$Y(N) = a \cdot N^b \cdot \exp(c \cdot N) \quad (23)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

در این روابط، P_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده، \bar{P} میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده، \bar{O} میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده و n برابر تعداد داده‌ها می‌باشد.

توابع تولید

با استفاده از مدل واسنجی شده‌ی آکواکراپ، مقادیر عملکرد در سطوح آبیاری I1: 110، I2: 90، I3: 70، I4: 50، I5: 40 و I6: 30 درصد نیاز آبی ذرت شبیه‌سازی شد. در شرایط مزرعه نیز در سال نخست چهار سطح آبیاری W1: 120، W2: 100، W3: 80 و W4: 60 به دست آمده بود. با استفاده از این 10 سطح آبیاری، توابع تولید گیاهی برای ذرت تعیین شدند. توابع تولید بر اساس شرایط حاکم بر آن‌ها عموماً به چهار صورت تابع ساده، تابع لگاریتمی (کاب داگلاس)، تابع درجه دوم و تابع متعالی مورد استفاده قرار می‌گیرند (شهیدی و احمدی، 1394). این توابع به ترتیب در رابطه‌های (12) تا (15) ارائه شده‌اند.

$$Y(W, N) = a + b \cdot W + c \cdot N \quad (12)$$

$$Y(W, N) = a \cdot W^b \cdot N^c \quad (13)$$

$$Y(W, N) = a + b \cdot N + c \cdot W + d \cdot N^2 + e \cdot W^2 + f \cdot N \cdot W + E \quad (14)$$

$$Y(W, N) = a \cdot W^b \cdot N^c \cdot \exp(d \cdot W + e \cdot N) \quad (15)$$

در این روابط، Y عملکرد ذرت (تن در هکتار)، N نیتروژن مصرفی (کیلوگرم در هکتار)، W عمق آب آبیاری (سانتی‌متر) و سایر عبارات ضرایب ثابت معادلات هستند. در این پژوهش، علاوه بر توابع آب-کود-عملکرد، توابع آب-عملکرد و کود-عملکرد نیز به صورت جداگانه تعیین شدند. این توابع به صورت روابط (16) الی (23) تعیین شدند. در روابط (16) تا (19) مقدار کود نیتروژن در شرایط تأمین 100 درصد در نظر گرفته شد. هم‌چنین روابط (20) تا (23) در شرایط تأمین 100 درصد نیاز آبی تعیین شدند.

$$Y(W) = a + b \cdot W \quad (16)$$

برای ارزیابی توابع تولید به‌دست‌آمده، از داده‌های برداشت شده در سال دوم استفاده شد. با توجه به اینکه تنها چهار سطح آبیاری W1، W2، W3 و W4 در سال دوم موجود بود، از مدل واسنجی شده آکواکراپ برای به دست آوردن عملکرد دانه ذرت برای تیمارهای آبیاری I1-I6 استفاده شد. بدین منظور داده‌های سال دوم کشت بدین منظور استفاده شد. هم‌چنین برای سنجش دقت، خطا و کارایی توابع تولید، از رابطه‌های (11-16) استفاده شد.

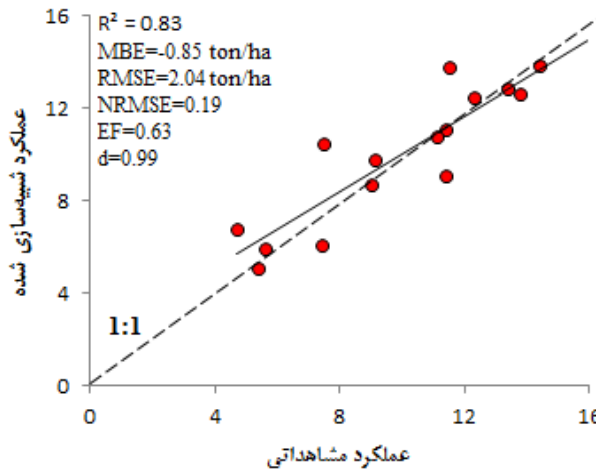
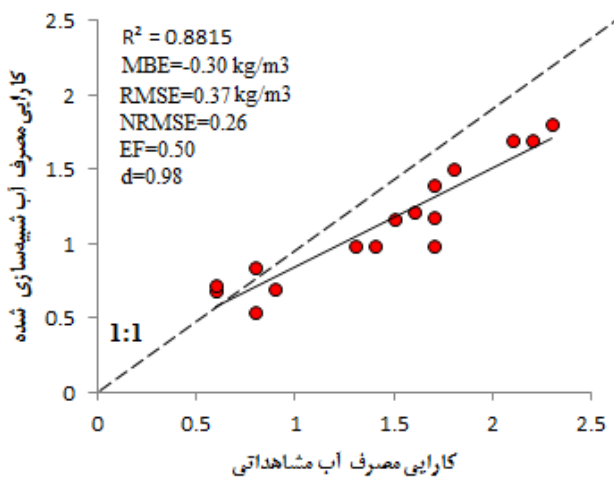
نتایج و بحث

نتایج واسنجی مدل آکواکراپ در جدول (3) نشان داده شده است. برخی از مقادیر ورودی به‌صورت پیش‌فرض در نظر گرفته شدند. این مقادیر برای ذرت دانه‌ای در شرایط اقلیمی و محیطی متفاوت می‌بایست یکسان باشد. برخی مقادیر ورودی نیز در شرایط مزرعه تعیین و به‌صورت پارامترهای اندازه‌گیری شده در مدل تعریف شدند. سایر پارامترها توسط داده‌های برداشت‌شده از مزرعه در سال اول واسنجی شدند.

مقایسه عملکرد و کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده در مزرعه با شبیه‌سازی شده توسط مدل آکواکراپ پس از واسنجی در شکل (1) نشان داده شده است. ضریب تبیین به‌دست‌آمده برای عملکرد و کارایی مصرف آب به ترتیب برابر با 0/83 و 0/88 بود. این نتایج با مشاهدات انجام‌شده برای گندم (احمدی و همکاران، 1400)، کلزا (اگدرنژاد و همکاران، 1397) و زعفران (ابراهیمی‌پاک و همکاران، 1397) مطابقت داشت؛ بنابراین مدل آکواکراپ توانایی بالایی برای پیش‌بینی تغییرات عملکرد ذرت دانه‌ای در شرایط واقعی داشت. آماره MBE برای هر دو پارامتر مذکور نشان داد که مدل آکواکراپ دچار خطای کم‌برآوردی شد. این نتایج را می‌توان از روی پراکنندگی داده‌ها در اطراف خط یک به یک نیز توجیه کرد. در ارتباط با گیاه گندم (احمدی و همکاران، 1400) و کلزا (اگدرنژاد و همکاران، 1397) نیز گزارش گردیده است که مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب در مرحله واسنجی دچار خطای کم‌برآوردی شد.

جدول ۳- پارامترهای ورودی مدل آکواکراپ

توضیح	واحد	مقدار	عامل
پیش فرض	درجه سانتی گراد	۸	دمای پایه
پیش فرض	درجه سانتی گراد	۳۰	دمای بالا
اندازه گیری	گیاه در هکتار	۸۵۰۰۰	تراکم کشت
واسنجی	درصد روز	۱۴/۵	ضریب رشد کانوپی
واسنجی	سانتی متر مربع	۰/۵۹	پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه زنی
اندازه گیری	درصد حجمی	۳۱	ظرفیت زراعی خاک
اندازه گیری	درصد حجمی	۱۵	نقطه پژمردگی دائم خاک
پیش فرض	درصد	۴۶	رطوبت اشباع خاک
اندازه گیری	روز	۵	مدت زمان کاشت تا جوانه زنی
اندازه گیری	روز	۶۰	مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی
اندازه گیری	روز	۱۱۰	مدت زمان کاشت تا دوره پیری
اندازه گیری	روز	۱۲۵	مدت زمان کاشت تا برداشت محصول
واسنجی	گرم بر مترمربع	۳۴/۷	بهره وری آب نرمال شده
پیش فرض	درصد	۹۶	بیشینه رشد کانوپی
پیش فرض	-	۰/۱۴	حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه
پیش فرض	-	۰/۷۲	حد پایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه
پیش فرض	درصد بر روز	۱/۰۵	حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق
واسنجی	-	۰/۶۵	ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه ها
واسنجی	-	۰/۶۵	ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری
واسنجی	۴۰	درصد	ضریب کاهش توسعه پوشش
واسنجی	۳۸	درصد	ضریب حداکثر پوشش
واسنجی	۰/۲۹	درصد بر روز	ضریب متوسط کاهش
واسنجی	۲۴	درصد	ضریب درصد کاهش بهره وری آب نرمال شده



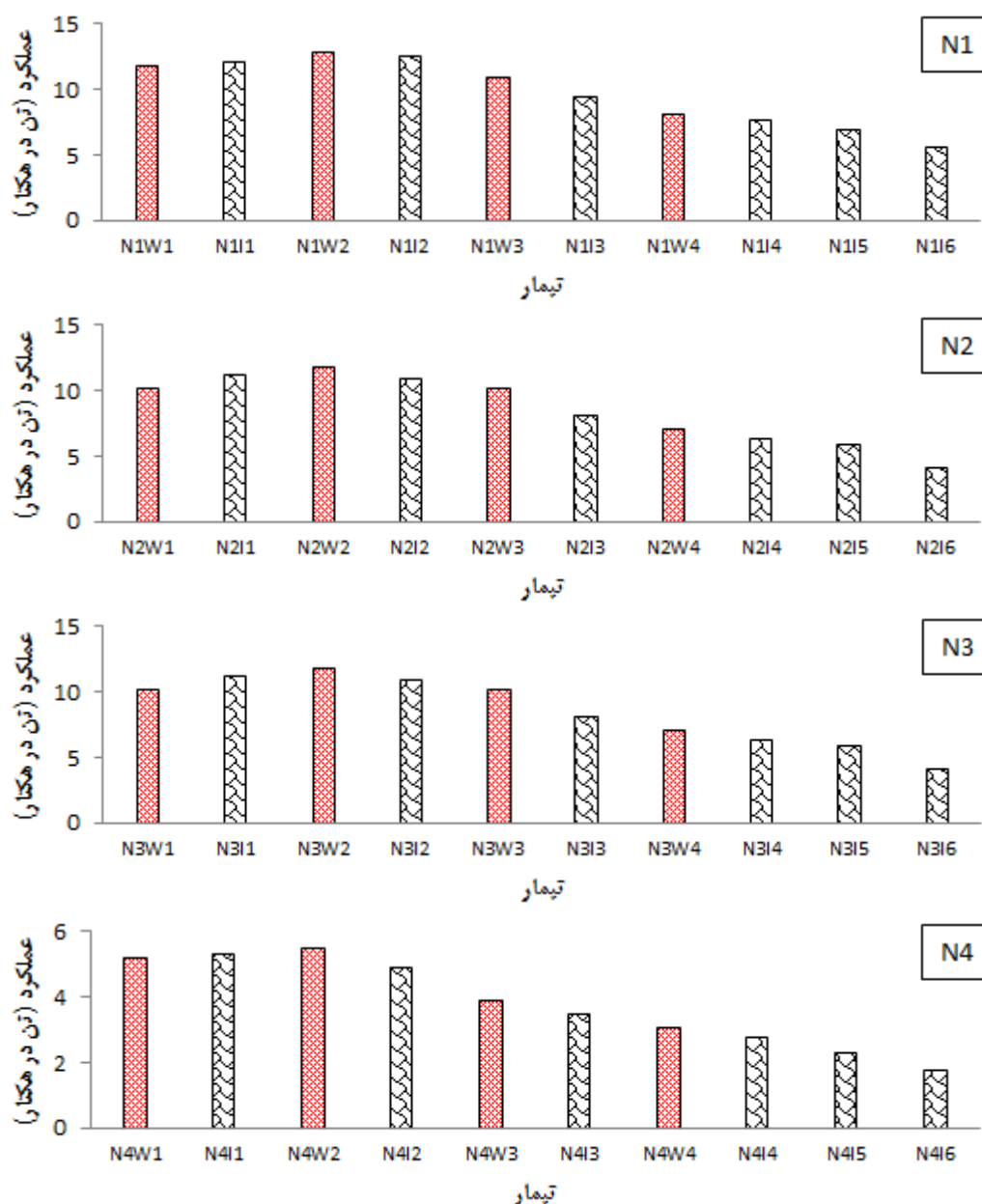
شکل ۱- مقایسه آماری عملکرد (تن بر هکتار) و کارایی مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب) مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل آکواکراپ در مرحله واسنجی

کارایی مدل آکواکراپ بر اساس دو آماره EF و d در دسته مطلوب بود؛ بنابراین می‌توان به نتایج به دست آمده از مدل آکواکراپ اعتماد

مقادیر دو آماره RMSE و NRMSE نشان داد که خطا و دقت این مدل قابل قبول است. دقت این مدل در دسته خوب قرار داشت.

اساس این نتایج، عملکرد دانه ذرت با کاهش تأمین مقدار آب آبیاری از ۱۲۰ به ۱۰۰ درصد، عملکرد دانه ذرت افزایش یافت. علت آن کاهش شستشوی کود، افزایش تهویه بیش‌تر در خاک و کاهش تنش ماندابی است. در صورتی که عملکرد ذرت رابطه‌ی نزدیکی با دسترسی به آب دارد و با کاهش میزان دسترسی به آب، در شرایط تنش آبی، عملکرد آن کاهش می‌یابد (Hao et al., 2015).

نمود. با توجه به این موضوع، عملکرد دانه ذرت و کارایی مصرف آب با استفاده از مدل واسنجی شده آکواکراپ برای مقادیر مختلف کود و آب مصرفی شبیه‌سازی شد. در شکل (۲)، مقادیر عملکرد دانه ذرت برای مقادیر مختلف کود مصرفی نشان داده شده است. در تیمار کودی N1، چهار تیمار آبیاری با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. مقادیر عملکرد این تیمارها در شرایط مزرعه تعیین شده است. برای سایر تیمارهای آبیاری، شبیه‌سازی توسط مدل آکواکراپ انجام شد. بر



شکل ۲- مقادیر عملکرد ذرت دانه‌ای برای تیمارهای مختلف

از این رو، عملکرد دانه ذرت با شروع تنش آبی روند نزولی داشت به طوری که در شرایط تأمین ۳۰ درصد نیاز آبی ذرت به ۵/۶ تن در هکتار رسید. این روند برای سایر تیمارهای کودی (N2، N3 و N4) نیز مشاهده شد. چون گیاه ذرت یک گیاه با بازده خوب از نظر مصرف آب است میزان عملکرد دانه‌ی قابل توجهی نسبت به آب مصرفی دارد (Doorenbos et al., 1979)؛ از این رو، کاهش مصرف آب در همه تیمار کودی اثر مشابهی بر کاهش عملکرد دانه ذرت داشت.

برای مقادیر آب آبیاری یکسان، افزایش تنش کودی سبب کاهش عملکرد دانه ذرت شد. به عنوان نمونه، در تیمار آب آبیاری I1، عملکرد دانه ذرت در تیمار کودی N4 نسبت به تیمارهای کودی N1، N2 و N3 به ترتیب ۱۲۰، ۵۳ و ۴۳ درصد کمتر بود. بسیاری از محققان عدم مصرف نیتروژن را عامل مهمی در کاهش عملکرد و رشد گیاهان زراعی بیان کرده‌اند (Doorenbos et al., 1979; Kumar et al., 2019; Guo et al., 2019). این روند به حدی بود که در شرایط عدم مصرف کود نیتروژن (N4)، حتی با اعمال ۱۰۰ درصد نیاز آبی، عملکرد دانه ذرت از تیمار N1I6 نیز کمتر بود. این نتایج با مشاهدات افشون و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت داشت. این محققان بر اساس پژوهش‌های خود پیشنهاد کردند که در شرایط تنش آبی، نیاز کودی ذرت به صورت کامل تأمین شود تا عملکرد ذرت کاهش شدید نداشته باشد. بنا بر نتایج، هم‌افزایی تأمین نیاز آبی و نیتروژن گیاه سبب افزایش عملکرد در سایر تیمار کودی نسبت به N4 شده است.

برای بررسی بهتر این نتایج، کارایی مصرف آب برای تیمارهای شبیه‌سازی شده بر اساس شکل (۳) به دست آمد. در تیمار کودی N1، بیشترین کارایی مصرف آب در تیمار N1I6 (۱/۷۶) کیلوگرم بر مترمکعب) به دست آمد. مقدار کارایی مصرف آب برای تیمارهای N1W1، N1I1 و N1W2 به ترتیب برابر با ۱/۱۵، ۱/۰۷ و ۱/۴۹ کیلوگرم بر مترمکعب بود. مقایسه این نتایج نشان داد که روند منظمی بین مقدار آب آبیاری و کارایی مصرف آب وجود نداشت. این موضوع تا میزان ۷۰ درصد تأمین نیاز آبی مشاهده شد. کارایی مصرف آب در این تیمار (N1I3) برابر با ۱/۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد که بسیار نزدیک به تیمار N1W2 بود. با کاهش مقدار آب مصرفی تا ۳۰ درصد تأمین آب آبیاری، روند صعودی در کارایی مصرف آب آبیاری مشاهده شد به طوری که مقدار آن از ۱/۲۶ به ۱/۷۶ کیلوگرم بر مترمکعب رسید. چون روند کاهش عملکرد نسبت به کاهش مصرف آب کمتر بود، کارایی مصرف آب روند صعودی داشت. با مقایسه عملکرد دانه ذرت برای این تیمارها در شکل (۲)، مشاهده شد که عملکرد دانه ذرت در تیمار N1I3 برابر با ۹/۴ تن بر هکتار بود. این مقدار حدود ۲۷/۱ درصد از تیمار N1W2 کمتر بود. در حالی که مقدار آب مصرفی در این تیمار حدود ۲۵/۱ درصد کمتر از N1W2 بود. در تیمار N1I6، عملکرد دانه ذرت برابر با ۵/۶ تن در هکتار به دست آمد

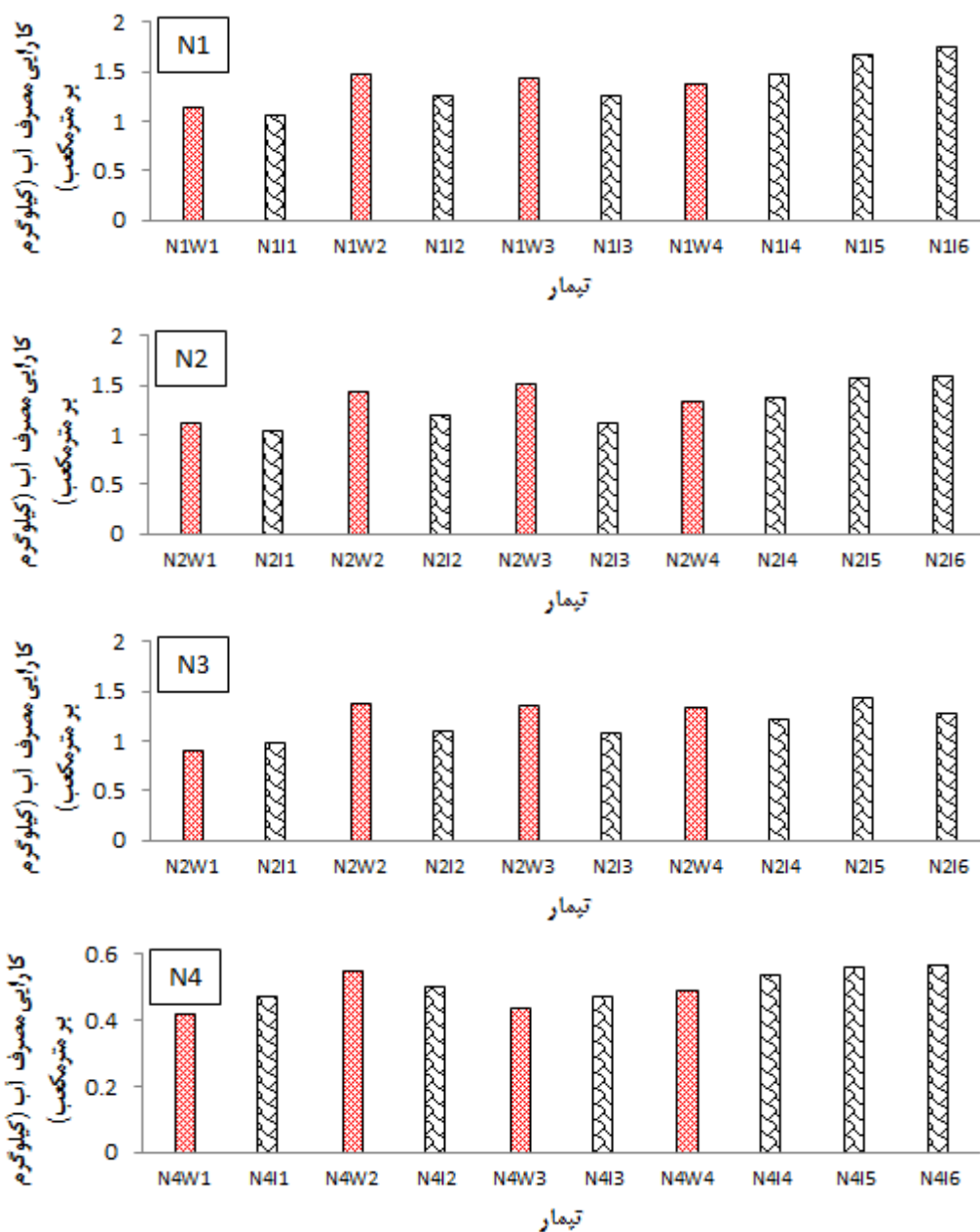
و مقدار آب آبیاری در این تیمار حدود ۶۸ درصد کمتر از تیمار N1W2 بود. بنابراین گرچه کارایی مصرف آن بالا بود لیکن عملکرد بسیار پایینی نسبت به سایر تیمارها نیز داشت. این روند برای سایر تیمارهای کودی (N2 تا N4) نیز مشاهده شد. با توجه به اینکه عملکرد دانه ذرت با افزایش تنش کودی کاهش یافت؛ کارایی مصرف آب نیز کاهش نشان داد. به عنوان مثال، کارایی مصرف آب در تیمارهای N2W2، N3W2 و N4W2 به ترتیب برابر با ۱/۳۸، ۱/۴۵ و ۰/۵۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود. نتایج به دست آمده برای تیمار کودی N4 قابل قبول نبود زیرا علاوه بر کاهش شدید عملکرد در همه تیمارها، حداکثر کارایی مصرف آب برابر با ۰/۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد که قابل قبول نیست.

برای تعیین توابع تولید، از مقادیر عملکرد شبیه‌سازی شده توسط مدل آکواکراپ در مرحله واسنجی استفاده شد. پس از تعیین این توابع، ضرایب آن‌ها به دست آمد (جدول ۴). هم‌چنین نمودار مربوط به هر رابطه توسط برازش نقاط تعیین شد (شکل‌های ۴ تا ۶).

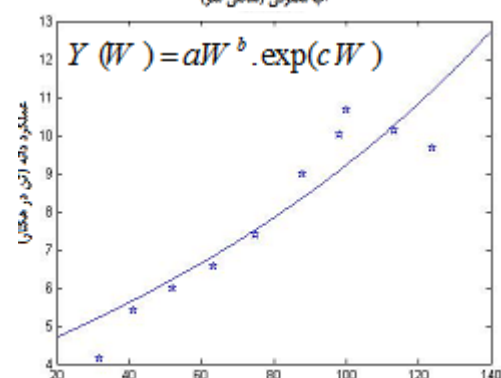
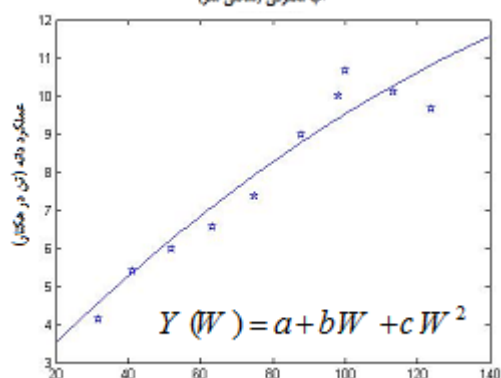
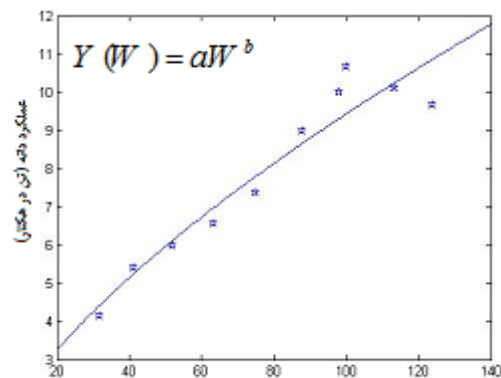
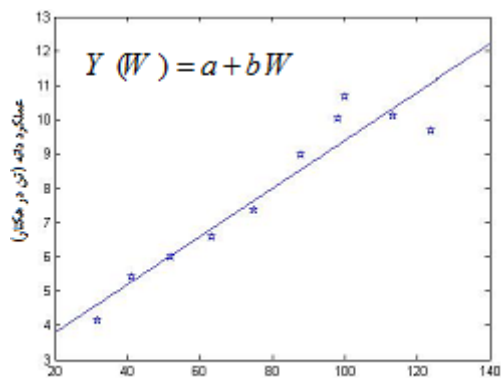
همان‌طور که در شکل‌های (۴) تا (۶) نیز مشاهده می‌شود؛ با افزایش هر کدام از این پارامترها، عملکرد نیز به صورت خطی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج به دست آمده در شکل (۳)، این رابطه تا تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی ذرت دانه‌ای صادق است و پس از آن عملکرد روند نزولی خواهد داشت. روند صعودی بین آب مصرفی و عملکرد دانه ذرت در صورت متعالی نیز مشاهده می‌شود. با این وجود دو صورت لگاریتمی و درجه دوم نشان می‌دهند که افزایش مقدار آب آبیاری همواره سبب افزایش عملکرد دانه ذرت نمی‌گردد. شیب افزایش عملکرد دانه ذرت در سه صورت لگاریتمی، درجه دوم و متعالی، پس از تأمین ۱۰۰ درصد نیاز کودی، منفی شد (شکل ۵). بنابراین در این سه صورت، افزایش عملکرد به صورت مداوم وابسته به افزایش کود نیتروژن نیست. در تابع آب - کود - عملکرد، مقادیر حداکثر عملکرد برای صورت‌های ساده، لگاریتمی، درجه دوم و متعالی به ترتیب برابر با ۱۴/۵، ۱۵/۱، ۱۵/۶ و ۱۳/۲ به دست آمد. برای ارزیابی هر کدام از این صورت‌ها، از آماره‌ها استفاده شد. نتایج آماره NRMSE نشان داد که برای تابع آب - عملکرد هر چهار تابع مورد استفاده دقت یکسانی داشتند (جدول ۵). دقت این چهار مدل در دسته ضعیف قرار گرفت. بر اساس دو آماره EF و d کارایی هر چهار تابع قابل قبول بود. با توجه به آماره RMSE، خطای چهار تابع مورد استفاده حدود ۲/۵ تن در هکتار بود. برای تابع کود - عملکرد، صورت‌های ساده و درجه دوم با مقادیر NRMSE حدود ۰/۲۹ بهتر از دو صورت دیگر بودند. دقت این دو صورت در دسته متوسط قرار داشت در حالی که دقت دو صورت دیگر در دسته ضعیف بود. کارایی صورت‌های ساده و درجه دوم نیز از دو صورت دیگر بهتر بود. با این وجود صورت ساده دچار خطای کم‌برآوردی و صورت درجه دوم دچار

قابل قبول است. این نتایج با مشاهدات شهیدی و احمدی (۱۳۹۳) مطابقت داشت. این محققان نیز در تحقیقات خود نشان دادند که انتخاب صورت درجه دوم تابع تولید برای گیاهان در مناطق خشک سبب نزدیکی نتایج به اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای می‌شود.

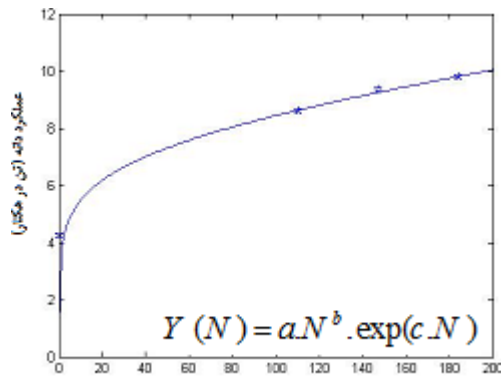
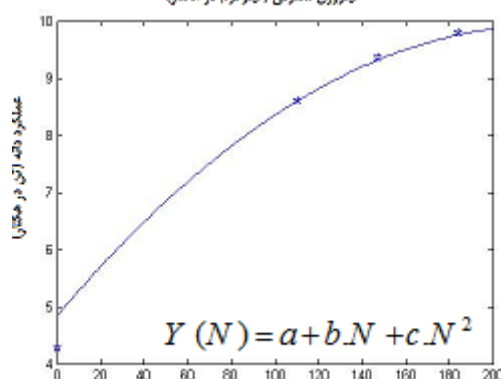
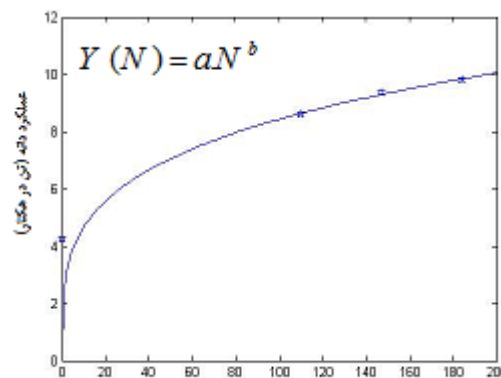
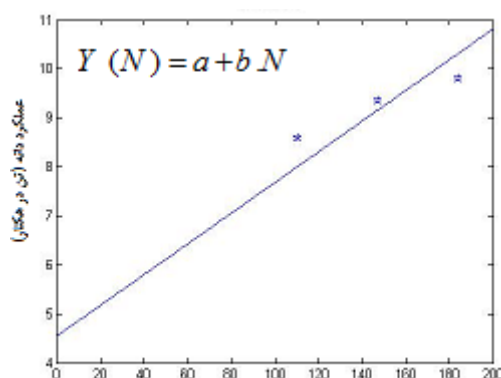
خطای بیش‌برآوردی شد. صورت‌های ساده و متعالی برای توابع آب-کود-عملکرد کمترین دقت و بیشترین خطا را نشان دادند. درحالی‌که دقت صورت درجه دوم در دسته خوب قرار داشت و کارایی آن نیز مطلوب بود. مقدار خطای این صورت حدود ۱/۴۵ تن در هکتار بود که



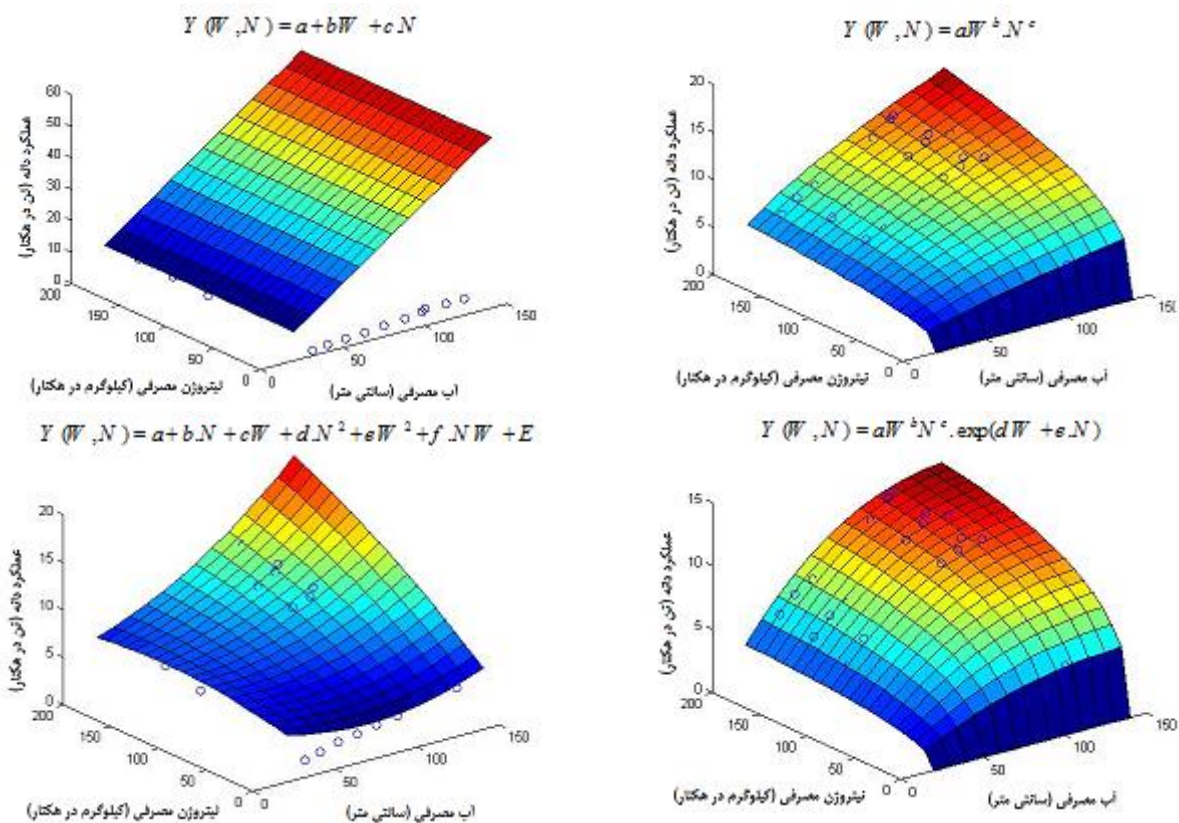
شکل ۳- مقادیر کارایی مصرف آب ذرت دانه‌ای برای تیمارهای مختلف



شکل ۴- نمودار توابع تولید برای عملکرد نسبت به مقدار آب مصرفی ذرت



شکل ۵- نمودار توابع تولید ارائه شده برای عملکرد نسبت به مقدار نیترژن مصرفی ذرت



شکل ۶- نمودار توابع تولید ارائه شده برای عملکرد نسبت به مقدار آب و نیتروژن مصرفی ذرت

جدول ۴- مقادیر ضرایب برای توابع تولید مورد بررسی در این پژوهش

تابع	صورت	a	B	C	D	e	f	G	t-value
آب-عملکرد	ساده	۲/۴	۰/۰۷۹	-	-	-	-	-	۱/۱۲ ^{ns}
	لگاریتمی	۰/۴۵	۰/۶۶	-	-	-	-	-	-۰/۲۴ ^{ns}
	درجه دوم	۱/۶	۰/۰۹	-۰/۰۰۰۲	-	-	-	-	-۱/۰۶ ^{ns}
کود-عملکرد	متعالی	۳/۶	۰/۰۳	۰/۰۰۷۸	-	-	-	-	-۰/۲۲ ^{ns}
	ساده	۴/۵۵	۰/۰۳	-	-	-	-	-	-۰/۰۵ ^{ns}
	لگاریتمی	۲/۶	۰/۲۵	-	-	-	-	-	-۱/۳۸ ^{ns}
آب-کود-عملکرد	درجه دوم	۴/۸	۰/۰۴۵	-۰/۰۰۰۱	-	-	-	-	۰/۲۹ ^{ns}
	متعالی	۳/۷۳	۰/۱۶	۰/۰۰۰۶	-	-	-	-	-۱/۳۶ ^{ns}
	ساده	۱/۸	۰/۳۷	-۰/۰۳۵	-	-	-	-	۱۴/۳۸ ^{**}
آب-کود-عملکرد	لگاریتمی	۰/۱۱۷	۰/۶۴۷	۰/۳۱۵	-	-	-	-	-۳/۷۸ ^{**}
	درجه دوم	۵/۶۶	۰/۰۱	-۰/۰۶	-	-	-	-	۱/۱۳ ^{ns}
	متعالی	۰/۰۱۵	۱/۲۲	۰/۳۷	-۰/۰۰۸	-۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۵	۰/۵۲	-۳/۹۳ ^{**}

ns به معنی عدم معنی داری و ** به معنی معنی داری در سطح ۱ درصد است.

نتیجه گیری

کاهش کود مصرفی، عملکرد دانه ذرت کاهش یافت. کاهش آب آبیاری نیز سبب کاهش عملکرد دانه ذرت شد. اثر عدم مصرف کود نیتروژن سبب کاهش شدید عملکرد دانه ذرت شد؛ به طوری که حتی با تأمین کامل نیاز آبی این گیاه، در شرایط عدم مصرف کود نیتروژن،

در این پژوهش با استفاده از مدل واسنجی شده آکواکراپ به بررسی مدیریت‌های مختلف آبیاری و کود نیتروژن بر عملکرد و کارایی مصرف آب ذرت دانه‌ای پرداخته شد. نتایج نشان داد که با

شرایط عدم اعمال کود (N4)، نیز به دلیل پایین بودن عملکرد و کارایی مصرف آب در نظر گرفته نشد.

عملکرد آن حتی از تیماری که دارای تنش آبی و تأمین کامل نیاز کودی بود، کمتر شد. بر اساس نتایج، تأمین نیاز آبی کمتر از ۷۰ درصد در سه مقدار کودی N1، N2 و N3 قابل قبول نیست. هم‌چنین

جدول ۵- مقادیر آماره‌ها برای تعیین دقت و کارایی توابع مورد استفاده

تابع	صورت	MBE*	RMSE*	NRMSE	EF	D	R ²
آب- عملکرد	ساده	-۰/۷۲	۲/۶۶	۰/۳۳	-۰/۳۴	۰/۹۷	۰/۸۹
	لگاریتمی	-۰/۰۱	۲/۵۳	۰/۳۲	-۰/۴۰	۰/۹۷	۰/۹۰
	درجه دوم	-۰/۶۳	۲/۶۲	۰/۳۳	-۰/۳۵	۰/۹۷	۰/۹۳
کود- عملکرد	متعالی	-۰/۱۳	۲/۵۹	۰/۳۲	-۰/۳۷	۰/۹۷	۰/۹۲
	ساده	-۰/۰۳	۲/۳۲	۰/۲۹	-۰/۴۹	۰/۹۸	۰/۹۳
	لگاریتمی	-۱/۱۳	۲/۹۶	۰/۳۷	-۰/۱۸	۰/۹۶	۰/۹۰
آب- کود- عملکرد	درجه دوم	-۰/۱۷	۲/۳۰	۰/۲۹	-۰/۵۰	۰/۹۸	۰/۹۹
	متعالی	-۱/۱۲	۲/۹۶	۰/۳۷	-۰/۱۸	۰/۹۶	۰/۹۵
	ساده	-	-	۱	-۰/۷۳	۰/۶۰	۰/۹۱
آب- کود- عملکرد	لگاریتمی	-۲/۳۶	۲/۹۸	۰/۳۷	-۰/۱۶	۰/۹۵	۰/۹۰
	درجه دوم	-۰/۸۴	۱/۴۵	۰/۱۸	-۰/۸۰	۰/۹۹	۰/۹۴
	متعالی	-	-	۱	-۷۱	۰/۵۷	۰/۸۸

*واحد این آماره‌ها تن بر هکتار است.

احمدی، م.، قنبرپوری، م. ع. و آگدرنژاد، ا. ۱۴۰۰. مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۸(۱): ۱۵-۳۰.

افشون، ا.، مقدم، ح.، جهانسوز، م. ر. و اویسی، م. ۱۴۰۰. تأثیر خاک ورزی، تنش کمبود آب و کود نیتروژن بر عملکرد ذرت علوفه‌ای. نشریه تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۱۴(۳): ۶۹۱-۷۰۲.

آگدرنژاد، ا.، ابراهیمی پاک، ن. ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۵(۲): ۵۳-۶۴.

سعیدی، ر.، رضانی اعتدالی، ه.، ستوده نیا، ع.، نظری، ب. و کاویانی، ع. ۱۴۰۰. ارزیابی مدل AquaCrop در برآورد روند تغییرات رطوبت خاک، تبخیر- تعرق و عملکرد ذرت، تحت تنش‌های شوری و حاصلخیزی. نشریه تنش‌های محیطی در علوم زراعی. ۱۴(۱): ۱۹۵-۲۱۰.

شهیدی، ع. و احمدی، م. ۱۳۹۴. توابع تولید گیاهی در مناطق خشک. انتشارات دانشگاه بیرجند. ۱۱۸ صفحه.

عباسی، ف.، چوگان، ر.، علیزاده، ح. ع. و لیاقت، ع. م. ۱۳۹۱. بررسی اثر کودآبیاری جویچه‌ای بر کارایی مصرف کود و آب، عملکرد و برخی صفات ذرت دانه‌ای. مجله تحقیقات آب و خاک ایران.

با توجه به این موضوع، در تیمار کودی N1، مقدار آبیاری W3 با عملکرد و کارایی مصرف آب به ترتیب ۱۱ تن در هکتار و ۱/۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب به‌عنوان تیمار برتر انتخاب شد. مقادیر عملکرد و کارایی مصرف آب بهینه برای تیمار کودی N2 به ترتیب برابر با ۱۰/۸ تن در هکتار و ۱/۵۳ کیلوگرم بر مترمکعب (N2W3) و برای تیمار کودی N3 به ترتیب برابر با ۱۰/۲ تن در هکتار و ۱/۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب بود (N3W3). صورت‌های ساده برای توابع آب-عملکرد و کود-عملکرد و صورت درجه دوم برای تابع آب-کود-عملکرد به‌عنوان توابع تولید مناسب انتخاب شدند؛ بنابراین در شرایطی که پارامترهای کافی برای اجرای مدل آکواکراپ در دسترس نبود، استفاده از این توابع برای شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت، بر اساس مقدار آب و کود مصرفی، پیشنهاد می‌شود.

منابع

ابراهیمی پاک، ن. ع.، احمدی، م.، آگدرنژاد، ا. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۸(۱): ۱۱۷-۱۳۲.

احمدی، م.، خاشعی سیوکی، ع.، و سیاری، م. ح. ۱۳۹۵. بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. بوم‌شناسی کشاورزی. ۸(۴): ۵۲۰-۵۰۵.

- Heng, L.k., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T. and Steduto, P. 2009. Validating the FAO AquaCrop model for Irrigated and Water Deficient field maize. *Agronomy Journal*. 101(3): 488-498.
- Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop-Model parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101: 448-459.
- Katerji, N., Campi, P. and Mastrorilli, M. 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*. 130: 14-26.
- Kumar, P., Lai, L., Battaglia, M. L., Kumar, S., Owens, V., Fike, J., Galbraith, J., Hong, C. O., Faris, R. and Crawford, R. 2019. Impacts of nitrogen fertilization rate and landscape position on selects oil properties in switch grass field at four sites in the USA. *Catena*. 180:183-193.
- Masanganise, J., Basira, K., Chipindu, B., Mashonjowa, E. and Mhizha, T. 2013. Testing the utility of a crop growth simulation model in predicting maize yield in a changing climate in Zimbabwe. *International Journal of Agricultural and Food Science*. 3(4): 157-163.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C. and Freres, E. 2012. Reference manual AquaCrop. FAO, land and water division. Rome Italy.
- Wolka, K., Biazin, B., Martinsen, V. and Mulder, J. 2021. Soil and water conservation management on hill slopes in southwest Ethiopia. II. Modeling effects of soil bunds on surface runoff and maize yield using AquaCrop. *Journal of Environmental Management*. 296.
- عباسی، ف.، لیاقت، ع. م.، علیزاده، ح. ع.، عباسی، ی. و محسنی، ا. ۱۳۸۹. ارزیابی تلفات نیترات در کودآبیاری جویچه‌ای با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای و یک مدل ریاضی کودآبیاری. *مجله آب و خاک*. ۲۴(۴): ۷۹۱-۷۸۱.
- علیزاده، ح. ع. و عباسی، ف. ۱۳۹۶. بررسی واکنش عملکرد ذرت دانه‌ای به سطوح مختلف آب و کود مصرفی با استفاده از مدل AquaCrop. *مجله علوم و مهندسی آبیاری*. ۴۰(۲): ۱۱۹-۱۳۴.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., Bentvelsen, C.L.M., Branscheid, V. and Plusje, J.M.G.A. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper No. 33, FAO, Rome, Italy. 200 p.
- Feng, D., Li, G., Wang, D., Wulazibieke, M., Cai, M., Kang, J., Yuan, Z. and Xu, H. 2022. Evaluation of AquaCrop model performance under mulched drip irrigation for maize in Northeast China. *Agricultural Water Management*. 261.
- Guo, J., Jia, Y., Chen, H., Zhang, L., Yang, J., Zhang, J., Hu, X., Ye, X., Li, Y. and Zhou, Y. 2019. Growth, photosynthesis, and nutrient uptake in wheat area affected by differences in nitrogen levels and forms and potassium supply. *Science Report*. 9, 1248.
- Hao, B., Xue, Q., Marek, T.H., Jessup, K.E., Hou, X., Xu, W., Bynum, E.D. and Bean, B.W. 2015. Soil water extraction, water use, and grain yield by drought-tolerant maize on the Texas High Plains. *Agricultural Water Management*. 155: 11-21.
- He, Q., Li, S., Wang, Y. and Cong, X. 2021. Performance assessment of the AquaCrop model for film-mulched maize with full drip irrigation in Northwest China. *Irrigation Science*. 39: 277-292.

Corn Irrigation Scheduling and Determination of Water and Nitrogen Fertilizer Production Functions Using the Calibrated AquaCrop Model

S. K. Pazhoohideh¹, A. Egdernezhad^{2*}, F. Abbasi³

Received: Dec.20, 2021

Accepted: Feb.07, 2021

Abstract

Corn is one of the most important grain crops in the world. Corn yield and production is highly dependent on water and nitrogen availability. In this study, the calibrated AquaCrop model, using data collected from a research study in Seed and Plant Improvement Institute, Iran, was used to determine the appropriate irrigation amount and nitrogen fertilizer level under field conditions during 2008-2010. In addition, irrigation-yield, fertilizer-yield and irrigation-fertilizer-yield production functions were determined in order to quantify the results. Hence, yield and water use efficiency of corn were simulated by the AquaCrop model under different irrigation amounts (at levels of 30 to 120% of water requirement) and nitrogen fertilizer treatments (at four levels of 100, 80, 60 and zero percent of fertilizer requirement). The results showed that by providing 80% of the total crop irrigation requirement, acceptable amount of yield and water use efficiency will be achieved. However, crop yield and water use efficiency were improved by increasing fertilizer application rate. Results demonstrated that, corn grain yield in W3 treatment was equal to 11, 10.8 and 10.2 ton ha⁻³ under 100, 80 and 60% fertilizer treatments, respectively. Also, the obtained Water use efficiency of these treatments was equal to 1.45, 1.53 and 1.36 kg m⁻³, respectively. In addition, a simple form of production functions for both irrigation-yield and fertilizer-yield simulation models were recommended. However, for irrigation-fertilizer-yield production function, the quadratic form was the best suited model among others.

Key words: Crop growth model, Crop modeling, Irrigation-fertilizer-yield function, Quadratic model, Simple form

1- M.Sc. Student of Irrigation and drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering and Sciences, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

3- Professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

(*- Corresponding author Email: a_eigder@ymail.com)