

## شبیه‌سازی رشد ذرت و توزیع رطوبت خاک با استفاده از مدل AquaCrop و کاربرد کمپوست نیشکر

حسین بهداروندی<sup>۱</sup>، صائب خوش‌نواز<sup>۲\*</sup>، حسین قربانی‌زاده خرازی<sup>۲</sup> و سعید برومندنسب<sup>۳</sup>

### چکیده

توسعه روش‌هایی برای بهبود ظرفیت رطوبت خاک و افزایش عملکرد بیولوژیکی گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری است. این مطالعه برای ارزیابی تأثیر کمپوست نیشکر بر عملکرد ذرت در شرایط آب‌وهوایی دشت گتوند در استان خوزستان در جنوب غربی ایران انجام شد؛ بنابراین، یک آزمایش میدانی با سه تیمار کاربرد کمپوست نیشکر (۰، ۱۵ و ۳۰ تن در هکتار) و چهار سطح تأمین آب محصول (۵۰٪، ۷۵٪، ۱۰۰٪ و ۱۲۵٪ کل آب مورد نیاز) در سه تکرار انجام شد. این آزمایش‌ها برای دو فصل رشد (فصل رشد اول از فروردین تا تیرماه ۱۳۹۸ و فصل دوم رشد از مرداد تا آذرماه ۱۳۹۸) طراحی و اجرا شد. برنامه‌ریزی آبیاری، عملکرد بیولوژیکی، شاخص برداشت و پوشش تاج در دو فصل رشد اندازه‌گیری و برای شبیه‌سازی رشد ذرت در سناریوهای مختلف کاربرد آب و کمپوست نیشکر با استفاده از نرم‌افزار AquaCrop به کار رفت. نتایج نشان داد سطح پوشش سایه‌انداز و طول دوره بلوغ تا آغاز پیری سطح سایه‌انداز در کشت بهاره، بیشتر از کشت تابستانه بود. علاوه بر این، آزمون حداقل خطا نشان داد استفاده از کمپوست نیشکر، عملکرد محصول را در سطح اطمینان یک‌درصد افزایش داد. عملکرد بیولوژیکی ذرت در منطقه مورد مطالعه بین ۱۳۶۷۸ کیلوگرم در هکتار در تیمار کم‌آبیاری ۵۰ درصد با کاربرد ۳۰ تن در هکتار کمپوست تا ۱۷۳۴۴ کیلوگرم در هکتار در شرایط آبیاری کامل بدون کاربرد کمپوست در کشت تابستانه متغیر است. تحلیل اقتصادی کاربرد کمپوست، افزایش حداقل ۲۰ درصد درآمد خالص را نشان داد.

**واژه‌های کلیدی:** بهره‌وری آب، پوشش سایه‌انداز، شاخص برداشت، عملکرد محصول.

ارجاع: بهداروندی ح.، خوش‌نواز ص.، قربانی‌زاده خرازی ح. و برومندنسب س. ۱۴۰۰. شبیه‌سازی رشد ذرت و توزیع رطوبت خاک با استفاده از مدل AquaCrop و کاربرد کمپوست نیشکر. مجله پژوهش آب ایران. ۴۳: ۶۹-۸۲.

۱- گروه آبیاری و زهکشی، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

۲- گروه مهندسی عمران-مدیریت منابع آب، واحد شوشتر، دانشگاه آزاد اسلامی، شوشتر، ایران.

۳- گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

\* نویسنده مسئول: s.khosnavaz@iau-shoushtar.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۰/۳۰

## مقدمه

با توجه به محدودیت کیفی و کمی منابع آب در بیشتر نقاط خشک و نیمه‌خشک جهان، مدیریت و برنامه‌ریزی برای به حداکثر رساندن کارایی مصرف آب در کشاورزی در شرایط خشکسالی، چالش اساسی و مهم در اراضی زراعی محسوب می‌شود (ابراهیمی پاک و همکاران، ۱۳۹۸؛ لاله‌زاری و همکاران، ۲۰۲۰)؛ بنابراین، یکی از راه‌های بهبود عملکرد گیاه، توجه به مدیریت آب در خاک است که متأثر از مقدار آب مصرفی است؛ بنابراین، برنامه‌ریزی توزیع آب در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، مهم است (آچینگ، ۲۰۲۰). به ابزارهای متفاوتی برای یافتن بهترین برنامه نیاز است که از آن میان به معادلات خطی و غیرخطی، الگوریتم‌های برنامه‌ریزی و مدل‌های شبیه‌سازی می‌توان اشاره کرد (لاله‌زاری و همکاران، ۲۰۱۶). اهداف این پژوهش‌ها شامل جنبه‌های مختلف توزیع آب در کشاورزی، مانند استفاده تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی در کشاورزی، مدیریت بهره‌وری در اراضی دیم، کاربرد روش‌های هوشمند در تخمین آب مورد نیاز گیاه، تحلیل عدم قطعیت و اصلاح الگوهای کشت محصولات می‌شود (اندرزیان و همکاران، ۲۰۱۱).

در سال ۲۰۰۷، سازمان خواروبار جهانی، شیوه‌نامه جدیدی از توابع تولید را با تکیه بر نقش تنش آبی و کیفیت آب (FAO) ارائه کرد که نرم‌افزار AquaCrop نیز بر اساس آن تهیه شده است (استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۹؛ فائو، ۲۰۱۲). AquaCrop با تفکیک سهم مولد تولید، یعنی تعرق از تبخیر و تعرق و عملکرد بیولوژیکی و با شاخص برداشت، مقادیر شاخص بهره‌وری آب (تعرق) و عملکرد محصول را در یک گام زمانی روزانه برآورد می‌کند (توکلی و همکاران، ۲۰۱۴). در ایران، پژوهش‌های گوناگونی با این نرم‌افزار برای تدوین مدل شبیه‌سازی رشد گیاهان و تولید محصولات با اهداف و سازوکارهای مختلف انجام شده است (هنگ و همکاران، ۲۰۰۹؛ لاله‌زاری و همکاران، ۲۰۲۰).

مدل رشد گیاهی AquaCrop به‌علت سادگی، داده‌های ورودی کم، کاربرپسند بودن و دقت زیاد، به‌سرعت توجه بسیاری از پژوهشگران و کاربران را جلب کرد (ریس و همکاران، ۲۰۱۲). پژوهش‌های گوناگون، کاربرد روش جدید فائو را در شبیه‌سازی گیاهانی از جمله جو (توکلی و همکاران، ۲۰۱۴)، ذرت و چغندر قند (استریسویچ و

همکاران، ۲۰۱۱)، گندم (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۰)، آفتابگردان (حیدری‌نیا و همکاران، ۲۰۱۲) و کلزا (موسوی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۶) ارزیابی کردند. پژوهشگران نشان دادند مدل رشد گیاهی AquaCrop، کارایی قابل قبولی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان در شرایط کم‌آبیاری دارد (احمدی و همکاران، ۲۰۱۵).

ارائه و عباسی (۱۳۹۳) اظهار داشتند عملکرد محصول کلزا، تغییرات رطوبت خاک، عمق توسعه ریشه و وزن اندام هوایی با مدل AquaCrop با دقت زیادی شبیه‌سازی شده است. در این پژوهش، کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده در مزارع به‌ترتیب، ۰/۴۳ و ۰/۴۳ کیلوگرم بر مترمکعب و مقدار شبیه‌سازی شده با مدل ۰/۴۳ و ۰/۳۹ کیلوگرم بر مترمکعب بود که سازگاری و دقت زیاد مدل را نشان می‌دهد.

مونتویا و همکاران (۲۰۱۶) نرم‌افزار AquaCrop را برای شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی ارزیابی کردند. تیمارهای آبیاری اعمال شده عبارت بود از: ۱۲۰، ۱۰۰، ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی. نتایج نشان داد بیشترین کارایی مصرف آب در تیمار، ۶۰ درصد بوده است.

مالیک و همکاران (۲۰۱۷) گزینه‌های مختلف آبیاری به همراه مالچ در پاکستان را برای شبیه‌سازی عملکرد چغندر قند با استفاده از نرم‌افزار AquaCrop به کار بردند. نتایج نشان داد این نرم‌افزار در هر دو شرایط آبیاری کامل و کم‌آبیاری ملایم، دقت زیادی داشت. چنگ و همکاران (۲۰۱۷) براساس مدل‌سازی در ۲۴ خط مختلف ذرت گزارش کردند مراحل ریزش گرده و ابریشم، ظهور گل تاجی، متورم شدن دانه، مراحل اولیه پرشدن دانه، جوانه‌زنی، مراحل میانی پرشدن دانه و درنهایت، مرحله پایانی پرشدن دانه به‌ترتیب، حساس‌ترین مراحل تنش آبی است.

آکوماگا و همکاران (۲۰۱۷) توانایی نرم‌افزار AquaCrop را در شبیه‌سازی عملکرد دانه ذرت دیم در سطوح مختلف نیتروژن در منطقه‌ای واقع در نیجریه بررسی کردند. نتایج نشان داد مقدار ضریب تبیین، شاخص توافق و ریشه میانگین مربعات خطای نسبی به‌ترتیب، بین ۰/۸۲ تا ۰/۹۹، ۰/۶ تا ۰/۸۸ و ۸ تا ۱۷ درصد تغییر می‌کند.

کمیوست نیشکر از جمله مواد بازممانده صنایع نیشکر است که با توجه به ارزش اقتصادی و موجود بودن آن در محدوده استان خوزستان از گزینه‌های مناسب برای بهبود

به اجرا در آمد. تیمارهای استفاده شده در این پژوهش شامل تنش آبی در چهار سطح ۱۲۵، ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی (به عنوان عامل اصلی) و تیمارهای مدیریت زراعی در سه سطح بدون استفاده از کمپوست، استفاده از ۱۵ تن در هکتار کمپوست و کاربرد ۳۰ تن در هکتار کمپوست (به عنوان عامل فرعی) در سه تکرار برنامه ریزی و اجرا شد. تحلیل آماری طرح با استفاده از نرم افزار SPSS 26 انجام شد.

بنا بر تعداد و ماهیت تیمارهای مدیریت آبیاری و زراعی تعریف شده، مزرعه آزمایشی با مشخصات نشان داده شده در شکل ۱ طراحی شد. مزرعه آزمایشی به مساحت ۱۰۰۰ مترمربع در شهرستان گتوند در استان خوزستان با طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی با ۶۵ متر ارتفاع از سطح دریا قرار داشت. مطابق شکل، فاصله بین تیمارها و تکرارها ۲ متر در نظر گرفته شد.

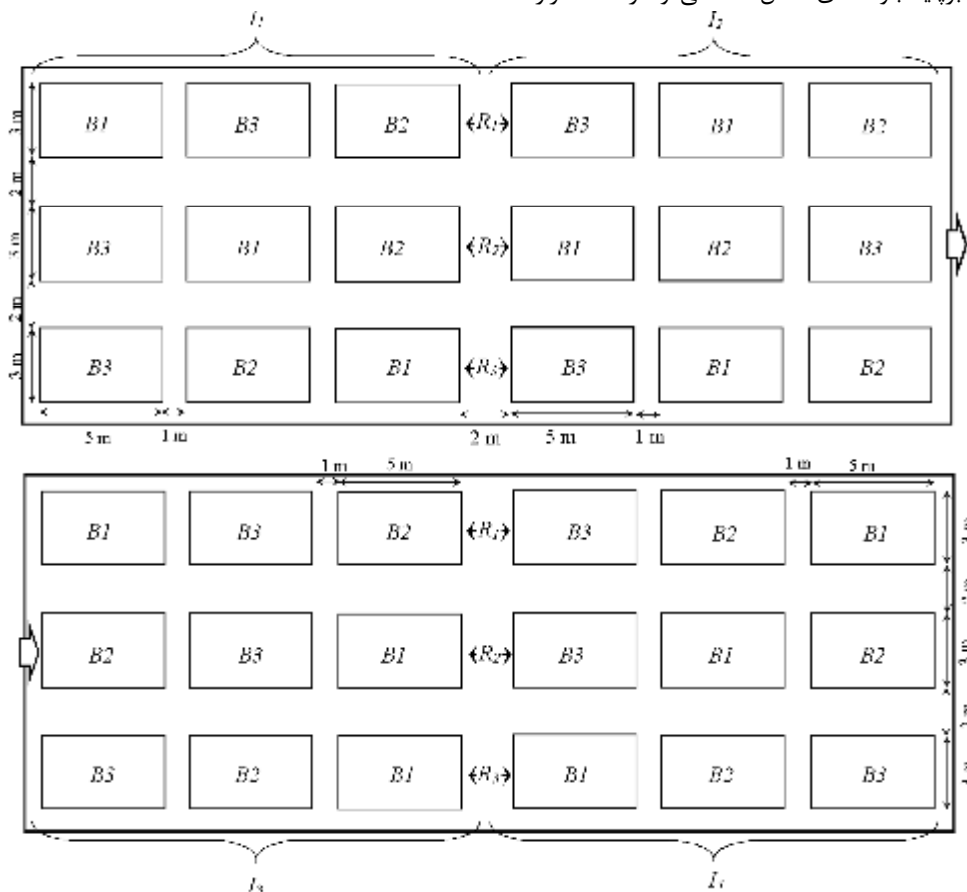
ساختمان خاک به شمار می رود. در پژوهش پیش رو، شبیه سازی رشد محصول ذرت متأثر از چهار سناریوی آبیاری و سه سطح کاربرد کمپوست نیشکر در دو فصل کشت در مزرعه آزمایشی واقع در محدوده گتوند استان خوزستان در سه تکرار آزمایش شد.

### مواد و روشها

فرایند پژوهش را در سه بخش کلی می توان تفکیک کرد. بخش اول به عملیات زراعی و ساختار آزمایش بازمی گردد. در بخش دوم، به ساختار طرح آماری و آزمایش مزرعه ای و اطلاعات برداشتی برای واسنجی و صحت سنجی نرم افزار AquaCrop و در نهایت، به مبحث بهینه سازی عملکرد گیاه با توجه به اطلاعات برداشتی توجه می شود.

### آزمایش های مزرعه ای

این آزمایش در قالب طرح آزمایشی کرت های نواری خرده شده بر پایه بلوک های کامل تصادفی و در سه تکرار



شکل ۱- ساختار مزرعه آزمایشی

### برنامه‌ریزی آبیاری

روش آبیاری به‌کاررفته در این طرح آبیاری قطره‌ای (تیپ) با قطر نوارهای آبیاری ۱۶/۵ میلی‌متر و فاصله بین قطره‌چکان‌ها برابر با ۱۰ سانتی‌متر و آبدهی ۳ لیتر در ساعت استفاده شد. کنترل فشار و اندازه‌گیری مقدار آب آبیاری در هر تیمار به‌ترتیب با شیر قابل تنظیم و کنترل حجمی انجام شد. منبع آب مورد استفاده، کانال اصلی کشت و صنعت کارون منشعب‌شده از سد تنظیمی گتوند بوده است. با گردآوری اطلاعات هواشناسی و کاربرد ضریب گیاهی (Kc) (جدول ۱) و روش دورنوس و پرویت نیاز آبی گیاه (ETc) در طول فصل رشد برای اعمال تیمارهای آبیاری محاسبه شد. معادلات مورد استفاده به این منظور به‌صورت ذیل است:

$$ET_c = K_c \times ET_o \quad (1)$$

$$d_n = \frac{ET_c \times (0.1 \times (P_d)^{0.3})}{0.9} \quad (2)$$

$$V = \frac{d_n}{1000} \times A \quad (3)$$

در معادلات مذکور،  $ET_o$  تبخیر و تعرق پتانسیل (میلی‌متر در روز)،  $P_d$  سطح سایه‌انداز گیاه (درصد)،  $d_n$  عمق ناخالص آب آبیاری که در هر دور به گیاه داده می‌شود (میلی‌متر)،  $A$  مساحت کرت (مترمربع) و  $V$  حجم آب مورد نیاز برای آبیاری (مترمکعب) است.

پژوهش در دو فصل زراعی برای ذرت دانه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ در دو فصل کشت بهاره و تابستانه در شهرستان گتوند واقع در شمال استان خوزستان انجام شد. دوره کشت محصول با توجه به فصل کشت مرسوم ذرت در محدوده‌ای شامل کشت بهاره از فروردین تا تیر ۹۸ و کشت تابستانه از مرداد تا آذر ۹۸ انتخاب شد. براساس تقویم زراعی منطقه، ذرت بهاره از اسفند تا اوایل فروردین کشت و در تیمار برداشت می‌شود. تاریخ کاشت ذرت تابستانه نیز از اواخر تیر تا اواسط مردادماه است و برداشت آن نیز در آذرماه انجام می‌شود. کشت به‌صورت تک‌ردیفی با فواصل پشته ۷۵ سانتی‌متر با طراحی جوی و پشته و در کف جوی انجام شد.

هر کرت شامل شش خط به فاصله ۷۵ سانتی‌متر بین پشته‌ها (درمجموع، ۵ متر است که طول کرت را تشکیل می‌دهد) و به طول سه متر (عرض کرت را تشکیل می‌دهد) بود. ذرت در عمق حدود ۳ تا ۴ سانتی‌متر و در هر گودال دو عدد بذر به‌صورت دستی و با فاصله ۱۶ سانتی‌متر کشت شد. وجین علف‌های هرز با دست و در مراحل ۴ تا ۶ برگگی و ۸ تا ۱۰ برگگی انجام شد. عمل تنک‌کردن نیز در مرحله ۴ تا ۶ برگگی انجام شد.

جدول ۱- ضرایب گیاهی برای محاسبه برنامه آبیاری

فصل کشت	پارامتر	مراحل رشد		
		ابتدایی	توسعه	میانی
پژ	دوره رشد (روز)	۲۵	۳۵	۳۵
	ضریب گیاهی	۰/۴۳ تا ۰/۵۵	۱ تا ۰/۵۵	۱ تا ۱/۱
پژ	دوره رشد (روز)	۲۵	۳۵	۴۰
	ضریب گیاهی	۰/۴۱ تا ۰/۶۸	۱/۰۵ تا ۰/۶۲	۱ تا ۱/۱۵

نیشکر بود که در سه تیمار بدون کمپوست (C1)، ۱۵ تن در هکتار (C2) و ۳۰ تن در هکتار (C3) از کشت و صنعت کارون تهیه و به مزرعه انتقال داده شد. انتخاب سطوح کاربرد کمپوست براساس مقادیر مصرفی کمپوست برای محصول نیشکر در مجتمع‌های کشت و صنعت نیشکر انتخاب شد که بین ۱۰ تا ۴۰ تن بر هکتار است. کمپوست پس از تعیین نسبت‌های وزنی یادشده تا عمق ۳۰ سانتی‌متری خاک مخلوط شد. به‌علت اهمیت تحلیل ترکیب فیزیکی و شیمیایی کمپوست، نمونه‌های آن پیش از کاربرد در مزرعه آزمایش شد.

برنامه آبیاری محصولات برای کشت بهاره و کشت تابستانه در جدول ۲ خلاصه شده است. گفتنی است در کشت بهاره به‌علت بارندگی در یک‌ماه اول، کشت آبیاری انجام نشده است. پس از آن، دو آبیاری به‌صورت یکسان به عمق ۲۵ و ۴۲ میلی‌متر برای همه تیمارها اعمال و سپس سناریوهای کم‌آبیاری اجرا شد. در کشت تابستانه نیز هفت آبیاری اول برای استقرار گیاه و مواجه‌نشدن با تنش قبل از جوانه‌زنی بذر به‌صورت یکسان و با توجه به نیاز آبی انجام و سپس، تیمارهای آبیاری در چهار سطح اعمال شد. مالچ مورد استفاده برای اصلاح خاک مزرعه، کمپوست

جدول ۲- سناریوهای آبیاری محصول در کشت بهاره

کشت دوم					کشت اول					شماره آبیاری
I4 mm	I3 mm	I2 Mm	I1 mm	شماره روز	I4 mm	I3 mm	I2 mm	I1 Mm	شماره روز	
۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۱	۲۰	۲۰	۲۰	۲۰	۳۲	۱
۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۲	۴۵	۴۵	۴۵	۴۵	۳۵	۲
۳۶	۳۶	۳۶	۳۶	۳	۸	۱۱	۱۵	۱۹	۳۷	۳
۳۸	۳۸	۳۸	۳۸	۸	۱۵	۲۲	۳۰	۳۷	۴۴	۴
۳۸	۳۸	۳۸	۳۸	۱۱	۱۶	۲۴	۳۲	۴۰	۵۰	۵
۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۱۳	۱۲	۱۹	۲۵	۳۱	۵۴	۶
۲۱	۲۱	۲۱	۲۱	۱۶	۱۲	۱۹	۲۵	۳۱	۵۷	۷
۱۲	۱۹	۲۵	۳۱	۱۹	۱۵	۲۳	۳۱	۳۸	۶۱	۸
۲۵	۳۷	۵۰	۶۳	۲۵	۱۰	۱۵	۱۹	۲۴	۶۶	۹
۲۸	۴۱	۵۵	۶۹	۳۱	۱۲	۱۹	۲۵	۳۱	۷۰	۱۰
۲۳	۳۴	۴۶	۵۸	۳۶	۱۸	۲۶	۳۵	۴۳	۷۴	۱۱
۳۰	۴۵	۶۰	۷۵	۴۱	۱۲	۱۸	۲۵	۳۱	۷۷	۱۲
۲۴	۳۶	۴۸	۶۰	۴۸	۱۲	۱۸	۲۵	۳۱	۸۰	۱۳
۱۹	۲۹	۳۸	۴۸	۵۷	۱۸	۲۶	۳۵	۴۳	۸۳	۱۴
۱۸	۲۷	۳۶	۴۵	۶۳	۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۸۵	۱۵
۱۰	۱۵	۲۰	۲۵	۶۷	۱۵	۲۲	۳۰	۳۷	۸۹	۱۶
۱۰	۱۵	۲۱	۲۶	۷۸	۲۳	۳۳	۴۵	۵۶	۹۵	۱۷
۶	۹	۱۲	۱۵	۸۷	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۹۹	۱۸
۶	۹	۱۲	۱۵	۹۷	۱۱/۵	۱۷	۲۳	۲۹	۱۰۳	۱۹
۴۳۷	۵۴۳	۶۴۸	۷۵۴		۳۰۵	۴۲۵	۵۴۵	۶۶۵		

آزمایش باید با شبیه‌سازی فرایندها و ایجاد رابطه‌ای با سطحی از خطای قابل قبول، الگویی ایجاد شود تا درباره ابعاد بیشتری از مسئله بتوان پژوهش کرد.

یکی از اصلی‌ترین مسائل مورد توجه در برنامه‌ریزی آبیاری، شبیه‌سازی عملکرد محصولات زراعی است که تاکنون، بیشتر براساس دستورالعمل نشریه شماره ۳۳ سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد بوده است (دورنبوس و کاسام، ۱۹۷۹). معادله دورنبوس و کاسام (۱۹۷۹) - که در آن، ET نسبی، اساس محاسبه عملکرد نسبی است - به صورت معادله ذیل است.

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (4)$$

در این معادله،  $Y_x$  عملکرد ماکزیمم،  $Y_a$  عملکرد واقعی،  $ET_x$  تبخیر و تعرق ماکزیمم،  $ET_a$  تبخیر و تعرق واقعی و  $K_y$  ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی تبخیر و تعرق است. مطالعات گوناگونی با استفاده از این رابطه انجام شده است که برپایه نسبت تبخیر و تعرق واقعی به پتانسیل و ضریب حساسیت گیاهی استوار است.

جدول ۳، تاریخ کاشت و زمان‌بندی ورود به مراحل مذکور را برحسب تعداد گام زمانی روزانه نسبت به تاریخ کاشت برای دو کشت بهاره و تابستانه نشان می‌دهد. عامل دیگر برآوردشده در مشاهدات میدانی، دو پارامتر سطح سایه‌انداز گیاه در مرحله جوانه‌زنی و بیشترین سطح سایه‌انداز گیاه است.

جدول ۳- دوره‌های رشد ذرت در کشت بهاره و تابستانه

نوبت کشت	جوانه‌زنی	حداکثر پوشش	تاریخ کاشت	تاریخ برداشت	روز	
					تابستانه	بهاره
تابستانه	۱۵	۵۴	۸۵	۱۲۳	۵۴	
بهاره	۲۰	۶۲	۸۰	۱۱۰	۶۲	

### شبیه‌سازی

کاربرد اطلاعات مزرعه‌ای به تعداد سناریوهای تعریف‌شده و تیمارهای اجراشده در بازه زمانی و محدوده مورد مطالعه محدود و نتایج حاصل از آن در ارائه راهکار کلی با مشکل مواجه می‌شود؛ از این‌رو، برای توسعه نتایج به‌دست‌آمده از

### نرم‌افزار AquaCrop

با گسترش درک روابط آب، خاک و گیاه پس از سال ۱۹۷۹ و همراه با تقاضای شدید برای افزایش بهره‌وری آب به‌عنوان ابزار کنترل کم‌آبی، سازمان خواروبار و کشاورزی ملل متحد (FAO) به بازسازی و ارزیابی مجدد گزارش ۳۳ وادار شد. این کار با مشورت با متخصصان سازمان‌های مهم علمی، دانشگاهی و دولتی جهان انجام شد که به توسعه نرم‌افزار AquaCrop برای شبیه‌سازی واکنش محصولات زراعی به مقدار آب مصرفی منجر شد. نرم‌افزار AquaCrop با حفظ قابلیت‌های گزارش ۳۳، توازنی منطقی بین سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده برقرار می‌کند. استخوان‌بندی فکری و اصول اساسی نرم‌افزار AquaCrop برای شبیه‌سازی پروسه‌ها را استدیوتو و همکاران (۲۰۰۹) و الگوریتم مورد استفاده و توصیف عملیات را رأس و همکاران (۲۰۰۹) ارائه کرده‌اند.

### اطلاعات مدل‌سازی

پایه اصلی مدل AquaCrop تعدادی فرایندهای بیوفیزیکی است که اطلاعاتی از جمله پارامترهای گیاهی، اطلاعات اقلیمی، ویژگی‌های خاک و مدیریت آبیاری را به یک خروجی به نام عملکرد تبدیل می‌کند. مهم‌ترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز مدل عبارت است از: داده‌های بیشینه و کمینه دمای روزانه، تبخیر و تعرق گیاه مرجع ( $ET_0$ ) و بارندگی. AquaCrop از داده‌های ماکزیمم و مینیمم دمای روزانه برای محاسبه درجه روز رشد (GDD) برای تعدیل عملکرد بیوماس بر اثر خسارت‌های ناشی از سرما استفاده می‌کند (رأس و همکاران، ۲۰۰۹). در بخش ویژگی‌های خاک به مواردی مانند هدایت هیدرولیکی و رطوبت حجمی اشباع، رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی و رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی می‌توان اشاره کرد.

داده‌های مربوط به گیاه و روابط آن با وضعیت آب در خاک و نیاز تبخیری اتمسفر با تأثیرات تنش آب، که با چهار عامل تأثیر تنش بر رشد تاج پوشش گیاهی، هدایت روزنه‌ای تعرق با باز یا بسته نگه‌داشتن روزنه‌ها، پیری تاج پوشش گیاهی و شاخص برداشت بیان می‌شود، متمایز است.

مقادیر پارامترهای گیاهی ثابت برای بیشتر گیاهان زراعی به‌عنوان پیش‌فرض در مدل وجود دارد. این پارامترها با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کند. این

پارامترها با استفاده از داده‌های رشد گیاه در شرایط مطلوب و بدون محدودیت واسنجی شده است و برای کاربرد آنها در شرایط وجود تنش آبی با تأثیر ضریب پاسخ به تنش تعدیل می‌شود. این پارامترها به‌عنوان پیش‌فرض در مدل و برای گونه‌های زراعی مهم (از جمله ذرت) وجود دارد.

اطلاعات لازم دیگر برای اجرای شبیه‌سازی، بیشتر به شیوه زراعت وابسته است و کاربرد آنها برای شرایط مختلف، مقادیر متفاوت دارد. این پارامترها عبارت است از: تراکم کاشت، دور و عمق آبیاری. علاوه بر این، AquaCrop با تفکیک آثار تنش آبی در سه بخش کلی جوانه‌زنی، رشد پوشش تاجی و پیری پوشش تاجی گیاه از اثر مصرف غیرتولیدی آب از طریق تبخیر به‌ویژه در شرایط پوشش گیاهی ناکامل جلوگیری می‌کند. معادله کلی تخمین عملکرد بیولوژیکی محصول (کیلوگرم) در این نرم‌افزار عبارت است از:

$$B_i = WP^* \left( \frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right) \quad (5)$$

که در این معادله،  $B_i$  مقدار عملکرد بیولوژیکی در روز  $i$  (کیلوگرم)،  $Tr$  تعرق روزانه (میلی‌متر در روز)،  $ET_0$  تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه (میلی‌متر در روز) و  $WP^*$  بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) است. گفتنی است بهره‌وری آب برای هر گونه گیاهی با استفاده از نیاز تبخیری و غلظت  $CO_2$  اتمسفری به بهره‌وری نرمال شده گیاه تبدیل می‌شود؛ بنابراین، در این معادله با نرمال کردن بهره‌وری آب، که مقدار آن در شرایط اقلیمی مشابه ثابت و برابر است (توکلی و همکاران، ۲۰۱۴)، برای شرایط اقلیمی متفاوت به یک پارامتر ثابت تبدیل می‌شود (استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۹). برتری دیگر معادله مورد استفاده در مدل AquaCrop این است که شبیه‌سازی فرایندهای رشد گیاه در آن با استفاده از گام‌های زمانی روزانه انجام می‌شود؛ در حالی که در معادله شبیه‌سازی به‌صورت ماهانه یا فصلی انجام می‌شود. در تمام دوره رشد گیاه، مقدار آب ذخیره‌شده در ناحیه ریشه با بودجه آبی جریان آب ورودی (آبیاری و بارندگی) و خروجی (رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر و تعرق) شبیه‌سازی می‌شود. شدت ضرایب تنش آبی ( $K_s$ ) مؤثر بر توسعه پوشش تاجی (CC)، هدایت روزنه‌ای تعرق (شدت تعرق در واحد CC)، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت با کسر تخلیه آب در

ناحیه ریشه تعیین می‌شود.

## نتایج و بحث

### آبیاری و عملکرد

جدول ۴، نتایج به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری عملکرد بیولوژیکی و تخمین شاخص برداشت را برای کشت بهاره و تابستانه به تفکیک سطوح مختلف آبیاری و کمپوست نشان می‌دهد. گفتنی است در تحلیل نتایج برای رعایت اختصار از نمادهای تعریف‌شده در جدول برای ترکیب تیمارهای مختلف استفاده می‌شود. مطابق نتایج جدول، بیشترین عملکرد بیولوژیکی محصول در شرایط آبیاری، ۱۰۰ درصد به دست آمده است. مقایسه کشت بهاره و تابستانه نیز نشان می‌دهد متوسط عملکرد بیولوژیکی در تیمارهای مشابه در کشت تابستانه، بیشتر از کشت بهاره است؛ بجز در تیمارهای با سطح آبیاری ۵۰ درصد که کشت تابستانه، تنش بیشتری را در تولید متحمل می‌شود و عملکرد آن، کمتر از بهاره است. عملکرد بیولوژیکی و شاخص برداشت با افزایش میزان کاربرد کمپوست در همه سناریوهای آبیاری افزایش یافته است. این دو پارامتر - که به‌طور مستقیم، میزان عملکرد دانه را تعیین می‌کند، با میزان آب در دسترس ریشه، رابطه مستقیم دارد.

اولین گام در تهیه مدل شبیه‌سازی، واسنجی آن با اطلاعات مزرعه‌ای است که پس از صحت‌سنجی، از آن برای پیش‌بینی عملکرد در سناریوهای مختلف کاربرد کمپوست نیشکر می‌توان استفاده کرد. ضرایب خطای مدل عبارت است از: مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص کارایی نش- ساتکلیف (۱۹۷۰) (NSE)، تابع هدف نرمال‌شده (NOF) (پنل و همکاران، ۱۹۹۰) و میانگین خطای کامل (MAE). معادلات مربوط به این چهار پارامتر در ذیل آمده است:

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

$$NOF = \frac{RMSE}{\bar{O}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 / n}}{\bar{O}} \quad (7)$$

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

در معادلات مذکور،  $O_i$  مقدار مشاهده‌شده در آزمایش  $i$ ،  $P_i$  مقدار پیش‌بینی‌شده در آزمایش  $i$ ،  $\bar{O}$  میانگین مقادیر مشاهده‌شده و  $n$  تعداد داده‌های مشاهداتی است. کمترین مقدار RMSE صفر است و با نزدیک شدن به صفر، خطای مدل کاهش می‌یابد. NSE بین یک تا منفی بی‌نهایت متغیر است (چو و همکاران، ۲۰۱۰).

جدول ۴- تعریف تیمارهای آبیاری و کمپوست در کشت بهاره و تابستانه

نماد	سطح آب	کشت بهاره				کشت تابستانه			
		کمپوست (تن در هکتار)	عملکرد بیولوژیک S <sub>h</sub>	HI (%)	آبیاری (میلی‌متر)	عملکرد بیولوژیک M	HI (%)	آبیاری (میلی‌متر)	کمپوست (تن در هکتار)
I1C1		۰	۱۴/۸	۲۶۵	۵۱	۱۵/۴	۴۹۳	۵۱	
I1C2	۱۲۵	۱۵	۱۵/۷	۱۰۰	۵۲	۱۵/۹	۵۶۹	۵۳	۷۵۴
I1C3		۳۰	۱۶/۵	۳۷۹	۵۴	۱۶/۹	۴۱۶	۵۶	
I2C1		۰	۱۵/۳	۱۵۳	۵۳	۱۵/۹	۳۷۹	۵۲	
I2C2	۱۰۰	۱۵	۱۶/۴	۲۸۹	۵۵	۱۷/۲	۷۷۷	۵۳	۶۴۸
I2C3		۳۰	۱۷/۶	۲۶۵	۵۷	۱۸/۸	۶۳۵	۵۶	
I3C1		۰	۱۵	۲۳۱	۵۲	۱۵/۴	۳۲۱	۵۲	
I3C2	۷۵	۱۵	۱۶	۲۶۵	۵۵	۱۶/۴	۲۳۱	۵۳	۵۴۳
I3C3		۳۰	۱۷/۱	۳۰۰	۵۷	۱۷/۶	۵۰۳	۵۵	
I4C1		۰	۱۳/۴	۳۵۱	۴۰	۱۳/۲	۲۶۵	۳۹	
I4C2	۵۰	۱۵	۱۴/۱	۲۶۵	۴۱	۱۳/۶	۳۷۹	۴۲	۴۳۷
I4C3		۳۰	۱۴/۶	۳۲۱	۴۴	۱۴/۱	۳۵۱	۴۵	

M، میانگین (تن در هکتار)، S<sub>h</sub>، انحراف از معیار (کیلوگرم در هکتار)، HI، شاخص برداشت

## واسنجی

یک تکرار برای صحت‌سنجی مدل استفاده شد. پارامترهای واسنجی‌شده عبارت است از: ضریب رشد پوشش، ضریب کاهش سطح پوشش و تعداد روزهایی که گیاه به مراحل

آزمایش مزرعه‌ای در سه تکرار برای ۱۲ تیمار برنامه‌ریزی شده بود؛ بنابراین، از اطلاعات ۲ تکرار برای واسنجی و از

می‌دهد؛ بنابراین، با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری، گفتنی است این مدل، دقت زیادی در شبیه‌سازی دارد.

### سطح پوشش سایه‌انداز

اولین نتیجه از مدل شبیه‌سازی، رشد محاسبه و ترسیم منحنی سطح سایه‌انداز گیاه است. شکل ۲، درصد سایه‌انداز گیاه را برای تیمار I2C3 در کشت بهاره (GS1) و کشت تابستانه (GS2) نشان می‌دهد.

۹۰ درصد جوانه‌زنی، بیشترین سطح سایه‌انداز، آغاز پیری تاج پوشش و برداشت رسیده بود (رأس و همکاران، ۲۰۰۹؛ آکوماگا و همکاران، ۲۰۱۷). جدول ۵، مقایسه خطای مدل واسنجی را در تیمارهای مختلف نشان می‌دهد. بیشترین مقدار خطا در سناریوی I3 از کشت دوم بود؛ زیرا مقادیر مشاهده‌شده عملکرد آن در تکرارهای مختلف، تفاوت زیادی با یکدیگر داشت. بهترین نتایج شبیه‌سازی زمانی به دست می‌آید که ضریب NOF با مقدار نزدیک به صفر، دقت مدل شبیه‌سازی را برای پیش‌بینی عملکرد محصول قابل قبول ارزیابی نشان

جدول ۵- مقایسه شاخص‌های خطا در تیمارهای مختلف

NOF		MAE		RMSE		کمپوست	آبیاری	فصل رشد
کشت	آبیاری	کشت	آبیاری	کشت	آبیاری			
		۰/۰۰۶		۴۰		۴۹	C1	
	۰/۰۰۱	۰/۰۱۳	۹	۱۰۰	۱۱	۱۰۸	C2	II
		۰/۰۴۱		۳۴۷		۳۶۶	C3	
		۰/۰۲۰		۱۳۳		۱۶۳	C1	
	۰/۰۰۱	۰/۰۵۰	۴	۳۹۷	۶	۴۵۵	C2	I2
		۰/۰۳۴		۳۱۰		۳۴۰	C3	
۰/۰۰۲		۰/۰۳۲	۱۱	۲۰۷	۱۸	۳۵۴	C1	کشت اول
	۰/۰۰۴	۰/۰۴۴	۲۹	۳۶۷	۳۳	۳۸۷	C2	I3
		۰/۰۳۵		۳۱۳		۳۴۰	C3	
		۰/۰۴۰		۲۰۰		۲۱۶	C1	
	۰/۰۰۱	۰/۰۴۳	۳	۲۲۰	۴	۲۵۰	C2	I4
		۰/۰۲۷		۱۵۷		۱۷۰	C3	
		۰/۰۳۲		۲۱۳		۲۵۱	C1	
	۰/۰۰۳	۰/۰۳۵	۲۱	۲۶۰	۲۲	۲۹۵	C2	II
		۰/۰۱۸		۱۵۰		۱۷۱	C3	
		۰/۰۳۰		۲۱۷		۲۵۰	C1	
	۰/۰۰۴	۰/۰۳۷	۳۶	۲۹۰	۴۱	۳۴۶	C2	I2
		۰/۰۲۴		۲۱۳		۲۵۱	C3	
۰/۰۰۷		۰/۰۲۶	۴۳	۱۹۳	۵۴	۲۰۴	C1	کشت دوم
	۰/۰۱۱	۰/۰۳۱	۹۰	۲۱۰	۹۳	۲۶۸	C2	I3
		۰/۰۳۱		۲۴۷		۳۰۰	C3	
		۰/۰۳۳		۱۴۷		۱۶۸	C1	
	۰/۰۰۵	۰/۰۲۲	۲۶	۱۲۰	۲۸	۱۲۸	C2	I4
		۰/۰۳۴		۲۰۳		۲۱۶	C3	

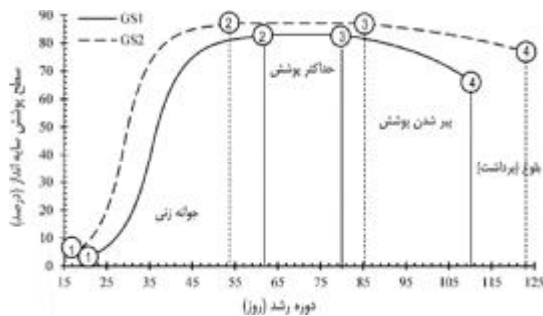
RMSE: root mean square error (kg); MAE: mean absolute error (kg); NOF: normalized objective function (kg).

تابستان دارد؛ بنابراین، جوانه‌زنی، رشد سبزینه‌ای گیاه و کامل‌شدن سطح پوشش با سرعت کمتری انجام می‌شود. براساس اطلاعات ثبت‌شده، زمان آغاز جوانه‌زنی، طول دوره جوانه‌زنی تا ظهور ۹۰ درصد جوانه‌ها و آغاز دوره

همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود و براساس مشاهدات میدانی، طول دوره رشد بهاره، حدود دو هفته از طول دوره رشد تابستانه، کمتر است. ذرت کشت‌شده در فروردین‌ماه در ابتدای فصل رشد، دمای کمتری نسبت به



کمپوست باید مقایسه شود. درباره تکرارهای هر آزمایش در کشت بهاره و کشت تابستانه، تفاوت وجود دارد. اثر تکرار در کشت بهاره، تفاوت معنی‌داری بر عملکرد نداشت؛ اما در کشت تابستانه بین عملکرد به‌دست‌آمده از تکرارهای هر تیمار، اختلاف معنی‌دار در سطح ۱ درصد وجود داشت.



شکل ۲- سطح پوشش سایه‌انداز گیاه (درصد) در دو کشت بهاره و تابستانه

حداکثر پوشش در کشت بهاره به‌ترتیب، ۹، ۱۱ و ۶۲ روز است؛ در حالی که این مقادیر برای کشت تابستانه به‌ترتیب، ۶، ۹ و ۵۴ روز ثبت شد. در مقابل، دوره پیری سطح سایه‌انداز گیاه تا زمان برداشت محصول در کشت تابستانه به‌علت قرارگرفتن در فصل سرما کندتر انجام می‌شود و حدود ۳۸ روز طول می‌کشد. در کشت بهاره، گرمای تابستان، به دوره پیری تاج پوشش و رسیدن به بلوغ سرعت می‌بخشد و پس از حدود ۳۰ روز از آغاز دوره کاهش سایه‌انداز، محصول را می‌توان برداشت کرد.

### مقایسه میانگین

گام نخست در مقایسه میانگین آماری تیمارهای آبیاری و کمپوست، تجزیه واریانس بین اثر تیمارها، تکرارها، آثار متقابل و خطای آنهاست. نتایج نشان داد اثر آبیاری، کمپوست و اثر متقابل آنها بر عملکرد ذرت در هر دو کشت در سطح ۱ درصد، معنی‌دار بوده است (جدول‌های ۶ و ۷)؛ بنابراین، میانگین برای مطالعه اثر تیمارها برای تعیین میزان اختلاف بین سطوح مختلف آبیاری و

جدول ۶- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر عملکرد کشت بهاره

عملکرد محصول			درجه آزادی	منابع تغییرات
F	میانگین مربعات	مجموع مربعات		
۲/۱۶ <sup>ns</sup>	۴۹۲۴۶۹	۹۸۴۹۳۸	۲	تکرار (R)
۸۴/۳ <sup>**</sup>	۱۹۱۸۵۹۵۱	۵۷۵۵۷۸۵۳	۳	آبیاری (I)
	۲۲۷۷۲۹	۱۳۶۶۳۷۲	۶	خطا I
۸۷ <sup>**</sup>	۷۰۶۹۳۸۶	۱۴۱۳۸۷۷۲	۲	کمپوست (C)
	۸۱۲۱۹	۳۲۴۸۷۸	۴	خطا C
۹/۷۷ <sup>**</sup>	۱۶۷۵۳۴	۱۰۰۵۲۰۶	۶	I × C
	۱۷۱۴۵	۲۰۵۷۴۴	۱۲	خطا IC
		۷۵۵۸۳۷۶۴	۳۵	کل

ns، \*\* و \* به‌ترتیب، غیرمعنی‌داری، معنی‌داری در سطوح ۱ و ۵ درصد

جدول ۷- تجزیه واریانس اثر تیمارها بر عملکرد کشت تابستانه

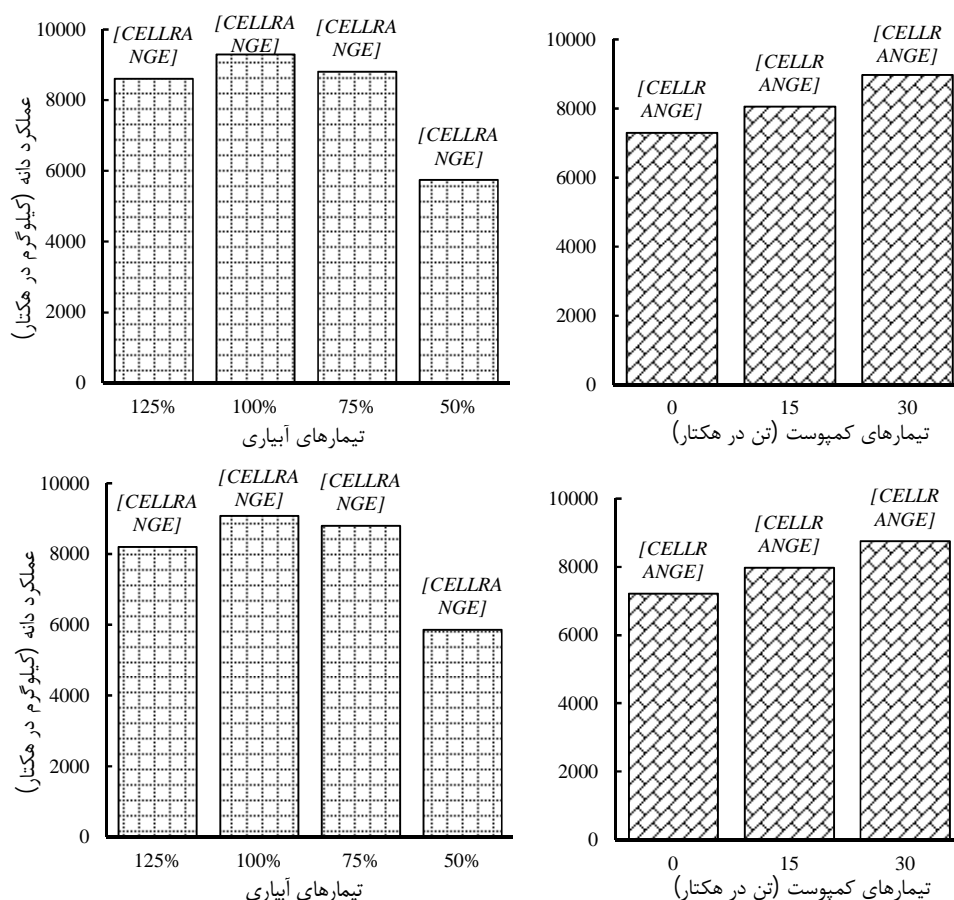
عملکرد محصول			درجه آزادی	منابع تغییرات
F	میانگین مربعات	مجموع مربعات		
۲۱/۲ <sup>**</sup>	۸۱۱۹۴۴	۱۶۲۳۸۸۹	۲	تکرار (R)
۶۰۵ <sup>**</sup>	۲۳۱۵۱۸۵۲	۶۹۴۵۵۵۵۶	۳	آبیاری (I)
	۳۸۲۴۱	۲۲۹۴۴۴	۶	خطا I
۴۹۸ <sup>**</sup>	۸۴۴۱۹۴۴	۱۶۸۱۳۸۸۹	۲	کمپوست (C)
	۱۶۹۴۴	۶۷۷۷۸	۴	خطا C
۷/۹۱ <sup>**</sup>	۸۷۱۳۰	۵۲۲۷۷۸	۶	I × C
	۱۱۰۱۹	۱۳۲۲۲۲	۱۲	خطا IC
		۸۸۹۱۵۵۵۶	۳۵	کل

ns، \*\* و \* به‌ترتیب، غیرمعنی‌داری، معنی‌داری در سطوح ۱ و ۵ درصد

## عملکرد دانه

در شرایط آب‌وهوایی یکسان، عملکرد گیاه، تابع میزان و کیفیت آب دریافتی است. آب در دسترس گیاه از طریق ارتفاع یا حجم آب آبیاری و میزان نگهداری رطوبت در خاک برای گیاه فراهم می‌شود. برآورد دقیق نیاز آبی موجب دستیابی به بیشترین عملکرد دانه می‌شود که تأثیر افزایش یا کاهش آن بر عملکرد در این پژوهش ارزیابی شده است. تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، حدود ۹۰۷۸ کیلوگرم در هکتار برای کشت بهاره و ۹۲۸۹ کیلوگرم در هکتار برای کشت تابستانه (شکل ۳) تولید در پی داشت. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، بجز تفاوت بین تیمارهای I2 و I3 (۱۰۰٪ و ۷۵٪ آبیاری) در کشت بهاره، اختلاف عملکرد سایر تیمارها در سطح ۱ درصد، معنی‌دار بود. با افزایش کمپوست نیشکر به خاک، ظرفیت نگهداری

و حرکت آب در خاک افزایش یافته و در نتیجه، عملکرد دانه بیشتر شد. همچنین، تخصیص آب بیشتر از حد مورد نیاز گیاه موجب آب‌گرفتگی و کاهش عملکرد آن شد. علاوه بر این، علل افزایش عملکرد دانه در کشت تابستانه نسبت به کشت بهاره را در مدیریت آبیاری (زمان و مقدار آبیاری) می‌توان ذکر کرد که با نتایج پژوهش اندرزیان و همکاران (۲۰۱۱) همخوانی دارد. آنها اظهار داشتند تأخیر در مراحل اولیه رشد گیاه با کاهش رشد برگ و تعداد پنجه، سبب کاهش توسعه سطح سایه‌انداز و سایر اجزای گیاه می‌شود و در نتیجه، بیوماس و در نهایت، عملکرد دانه کاهش می‌یابد. این پژوهشگران بر انجام‌دادن آبیاری در مراحل اولیه رشد به‌ویژه در سال‌های خشک در دشت خوزستان تأکید کرده‌اند؛ زیرا کشاورزان در این ایام به انتظار باران در انجام‌دادن آبیاری تعلق می‌کنند.



شکل ۳- مقایسه عملکرد دانه در تیمارهای مختلف در کشت بهاره (سمت راست) و تابستانه (سمت چپ)

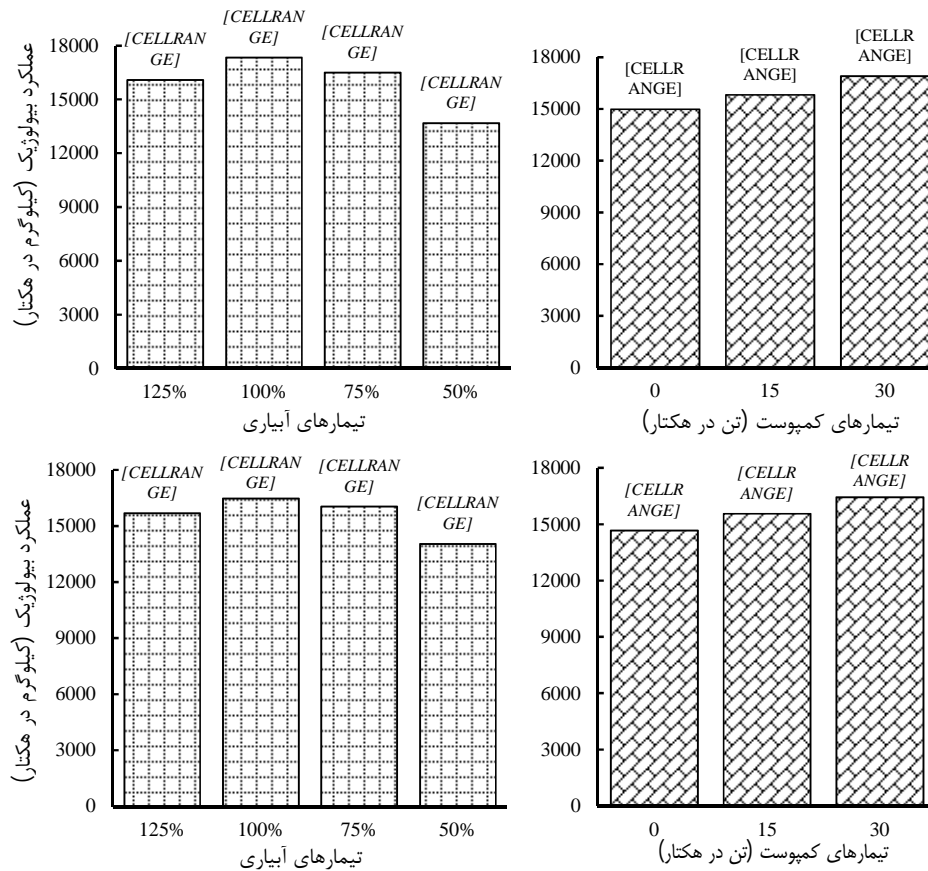
درصد، معنی‌دار بوده است. کاهش آب آبیاری از ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۷۵ درصد، تفاوت معنی‌داری را در

بخشی از این افزایش عملکرد بر اثر کاربرد کودهای مختلف برای اصلاح بافت خاک است که در سطح اطمینان ۱

### عملکرد بیولوژیک

عملکرد بیولوژیک به دست آمده در همه تیمارها (بجز I2 و I3) در سطح ۱ درصد، معنی دار بوده است (شکل ۴). در نهایت، عملکرد بیولوژیک ذرت در منطقه مورد مطالعه بین ۱۳۶۷۸ کیلوگرم در هکتار در تیمار I4C3 در کشت تابستانه تا ۱۷۳۴۴ کیلوگرم در هکتار در تیمار I1C1 در کشت تابستانه متغیر است. همانگونه که در مرور پژوهش‌های پیشین نیز اشاره شد، اثر تنش خشکی بر عملکرد بیولوژیکی گیاه، معنی دار گزارش شده است (رضایی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷). کاربرد کمپوست نیشکر، میزان تولید محصول را تا ۸/۲ درصد در کشت بهاره و ۷/۳ درصد در کشت تابستانه افزایش داد که معادل کاربرد حدود ۱۲ درصد آب آبیاری است.

عملکرد ذرت نشان نداده است. در مطالعه سورنسن و بوتس (۲۰۰۵)، کاهش آب آبیاری از ۱۰۰ درصد نیاز آبی به ۷۵ درصد، تفاوت معنی داری را در عملکرد ذرت نشان داد. این موضوع با مدیریت بهینه زمان و مقدار آبیاری به‌ویژه در سیستم آبیاری قطره‌ای قابل دستیابی است که کنترل بهتری نسبت به آبیاری سطحی دارد. مدیریت مشابه در این زمینه در سیستم آبیاری قطره‌ای برای افزایش عملکرد و بهره‌وری آب در کشت ذرت را شهسواری گوغری و همکاران (۱۳۹۷) نیز بررسی کرده‌اند. در پژوهش دیگری، کاهش عملکرد دانه ذرت در اثر تنش خشکی در مناطق گرمسیری به‌طور متوسط در حدود ۱۷ درصد به دست آمده است (زیبوت و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۴- مقایسه میانگین عملکرد بیولوژیک در کشت بهاره (سمت راست) و تابستانه (سمت چپ)

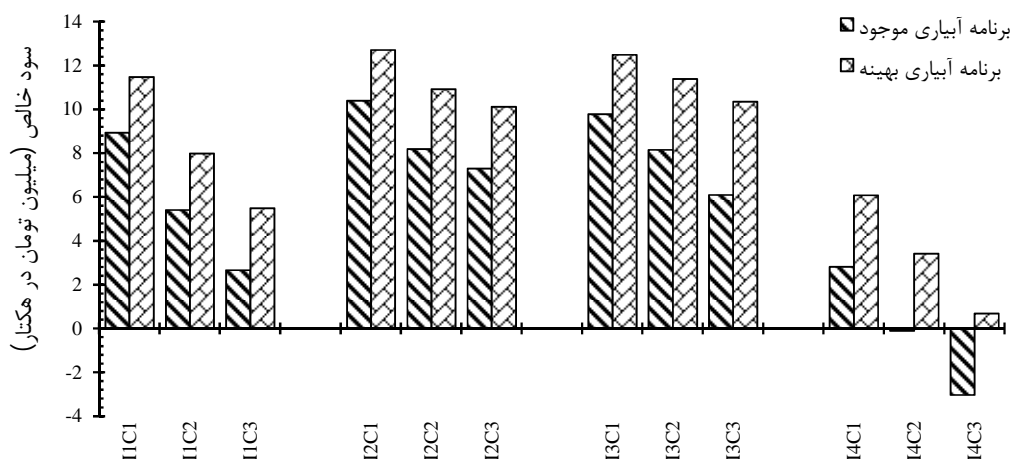
سناریوهای مختلف بررسی و ارزیابی شود (شکل ۵ و شکل ۶). هزینه‌های کشت، قیمت فروش ذرت و کمپوست در سال مورد مطالعه به‌ترتیب، ۱۲۶۲۵۰۰۰ تومان بر هکتار،

### درآمد خالص

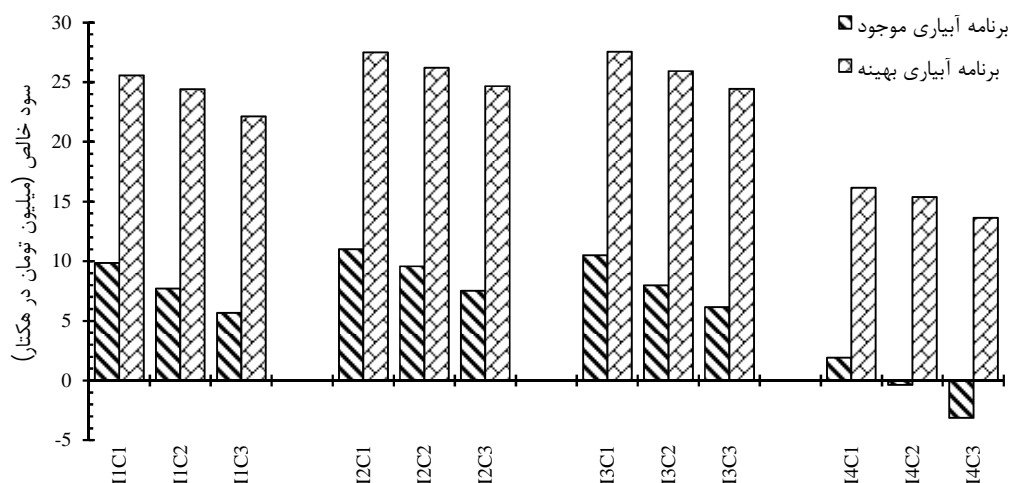
با توجه به قیمت خرید کمپوست و نقش آن در تحلیل اقتصادی تولید ذرت باید میزان درآمد خالص دریافتی در

منافذ خاک که توسط کمپوست ایجاد شده است، دستیابی به هدف بازگشت سرمایه اولیه نیز امکان‌پذیر نیست؛ اما کاربرد طرح بهینه آبیاری، درآمد خالص دریافتی از مزرعه را در این شرایط اقتصادی و حجم آب در دسترس موجود از ۲۰ درصد در شرایط آبیاری کامل تا بیشتر از ۵۵۰ درصد در شرایط کم‌آبی افزایش داده است.

۱۷۰۰ تومان بر کیلوگرم و ۵۰۰ تومان بر کیلوگرم تخمین زده شده است. با تحلیل اقتصادی انجام‌شده، استفاده از کمپوست در طرح آبیاری موجود موجب افزایش عملکرد و بهبود شرایط زراعی می‌شود؛ اما از نظر افزایش بهره‌وری اقتصادی در اولویت پیشنهادی قرار نمی‌گیرد. در شرایط کم‌آبی به‌علت کاهش عملکرد و کمبود آب برای تأمین آب



شکل ۵- مقایسه درآمد خالص حاصل از اعمال برنامه‌های آبیاری موجود و بهینه در کشت بهاره



شکل ۶- مقایسه درآمد خالص حاصل از اعمال برنامه‌های آبیاری موجود و بهینه در کشت تابستانه

افزایش عملکرد محصول در سطح اطمینان ۱ درصد شد. علاوه بر این، اثر تیمارهای آبیاری نیز در سطح اطمینان ۱ درصد بر عملکرد و اجزای عملکرد محصول، معنی‌دار بود. شبیه‌سازی رشد گیاه نشان داد کاربرد کمپوست، تولید محصول را نسبت به سناریوهای شاهد، حدود ۱۸ درصد در شرایط آبیاری کامل و تا بیشتر از ۲۷ درصد در شرایط کم‌آبیاری تغییر داده است. در حالت کلی، نتایج نشان داد

### نتیجه‌گیری

این پژوهش برای ارزیابی تأثیر کمپوست نیشکر بر عملکرد ذرت در شرایط آب‌وهوایی استان خوزستان در جنوب غربی ایران انجام شد. تأثیر کمپوست نیشکر بر عملکرد ذرت در دو فصل رشد با بهبود ظرفیت نگهداری آب در خاک قابل ارزیابی است. نتایج آزمون تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کاربرد کمپوست موجب

- models. *Comput. Geosci.* 133: 104320. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2019.104320>
7. Ahmadi S. H. Mosallaeepour E. Kamgar-Haghighi A. K. and Sepaskhah A. R. 2015. Modeling maize yield and soil water content with AquaCrop under full and deficit irrigation managements. *Water Resource Management.* 29: 2837-2853.
  8. Akumaga U. Tarhule A. and Yusuf A. A. 2017. Validation and testing of the FAO AquaCrop model under different levels of nitrogen fertilizer on rainfed maize in Nigeria, West Africa, *Agricultural and Forest Meteorology.* 232: 225-234.
  9. Andarzian B. Bannayanb M. Steduto P. Mazraeha H. Barati M. E. Barati M. A. and Rahnama A. 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agri. Water Manage.* 100: 1-8.
  10. Cheng S. Shao D. Tan X. Gu W. and Lei C. 2017. Nonstationary Stochastic Simulation-Based Water Allocation Method for Regional Water Management. *J Water Resour. Plan. Manage.* 145(3): 0014523. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001042](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001042)
  11. Cho J. Mostaghimi S. and Kang M.S. 2010. Development and application of a modeling approach for surface water and groundwater interaction. *Agri. Water Manage.* 97: 123-130.
  12. Doorenbos J. and Kassam A.H. 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage paper No. 33, FAO, Rome, Italy, pp 193.
  13. FAO. 2012. Crop yield response to water by P. Steduto, T.C. Hsiao, E. Fereres, and D. Raes. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66. Rome.
  14. Heidarinia M. Naseri A. Broumandnasab S. and Azari A. 2012. Assessing AquaCrop model application in irrigation management in north of Khosetan\_Safiabad. (CD) Proceeding of the 1<sup>st</sup> national water management in farm conference. May 30-31. Iran.
  15. 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.
  16. Lalehzari R. Boroomand Nasab S. Moazed H. Haghighi A. and Yaghoobzadeh M. 2020. Simulation-optimization modeling for water resources management using NSGAI-OIP and Modflow. *Irri. Drain.* DOI: 10.1002/ird.2424.
  17. Lalehzari R. Boroomand-Nasab S. Moazed H. and Haghighi A. 2016. Multi-objective که استفاده از مالچ‌های بهبوددهنده خاک با پایه طبیعی، مانند کمپوست نیشکر ضمن بهبود شرایط فیزیکی خاک موجب افزایش عملکرد به‌ویژه در شرایط خشکسالی می‌شود و مدل AquaCrop پوشش گیاهی، عملکرد و بیوماس گیاه ذرت را در طول فصل رشد برای تیمارهای مختلف با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کرد؛ بنابراین، استفاده از این مدل در طرح‌های پژوهشی برای پیش‌بینی میزان محصول، کارایی مصرف آب و بررسی تأثیر تنش آبی و کمپوست نیشکر بر میزان محصول توصیه و پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، استفاده از سایر مالچ‌های بهبوددهنده شرایط خاک، که هزینه کمتری داشته باشد و از نظر اقتصادی قابل توجیه باشد، بررسی شود.
- ### منابع
۱. ابراهیمی پاک ن. ع. اگدرنژاد ا. تافته آ. و احمدی م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های AquaCrop، Wofost و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۱۳): ۷۲۶-۷۱۵.
  ۲. اروئه ح. ف. 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): ۱۱۹-۳۴
  ۳. رضایی‌زاده ع. تیموری ب. و مهرابی ع. ۱۳۹۷. واکنش برخی هیبریدهای ذرت به تنش آبی، *مجله تنش‌های محیطی در علوم زراعی، دانشگاه بیرجند، دانشکده کشاورزی.* ۱۱(۲): ۳۰۱-۳۱۲.
  ۴. شهبواری گوغری م. رضایی استخرئیه ع. ایران‌دوست م. و نشاط ع. ۱۳۹۷. نشریه علوم آب و خاک (علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی). ۲۲(۱): ۵۴-۶۷.
  ۵. علیزاده ح. نظری ب. پارسی‌نژاد م. رضایی اعتدالی ه. و جانباز ح. ر. ۱۳۹۰. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج. *مجله آبیاری و زهکشی ایران* ۲(۴): ۲۷۳-۲۸۳.
  6. Achieng K. O. 2020. Modelling of soil moisture retention curve using machine learning techniques: Artificial and deep neural networks vs support vector regression

concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*. 101: 426-437.

29. Stricevic R. Cosic M. Djurovic N. Pejic B. and Maksimovic L. 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementary irrigated maize sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*. 98: 1615-1621.
18. Malik A. Shakir A. S. and Ajmal M. 2017. Assessment of AquaCrop Model in Simulating Sugar Beet Canopy Cover, Biomass and Root Yield under Different Irrigation and Field Management Practices in Semi-Arid Regions of Pakistan. *Water Resour Manage*. 31: 4275-4292.
19. Montoya F. Camargo D. Ortega J. F. Córcoles J. I. and Domínguez A. 2016. Evaluation of Aquacrop model for a potato crop under different irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 164: 267-280.
20. Mousavizadeh S. F. Honar T. and Ahmadi S. H. 2016. Assessment of the AquaCrop model for simulating canola under different irrigation management in a semiarid area, *International Journal of Plant Production*, 10(4): 1735-6814.
21. Nash J. E. and Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*. 10(3): 282-292.
22. Pennell K. D. Hornsby A. G. Jessup R. E. and Rao P. S. C. 1990. Evaluation of five simulation models for predicting aldicarb and bromide behavior under field conditions. *Water Resources Research*. 26(11): 2679-2693.
23. 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 J*. 101: 438-447.
24. Raes D. Steduto P. Hsiao T. C. and Freres E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, land and water division, Rome Italy.
25. Ribaut J.M. Betran J. Monneveux P. and Setter T. 2012. Drought tolerance in maize, In: Bennetzen, j.l., Hake, sac, handbook of maize, New York. pp 11-34.
26. Sorensen R. and Butts C. 2005. Cotton, corn and peanut yield under subsurface drip irrigation, Impact of global climate change, world water and environmental resources congress. pp 1-10
27. Tavakoli A. R. Liaghat A. and Alizadeh A. 2014. Soil water balance, sowing date and wheat yield using AquaCrop model under rainfed and limited irrigation. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 14(4): 41-56.
28. Steduto P. Hsiao T. C. Raes D. and Fereres E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water I.