

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کینوا در شرایط تنش شوری و کم‌آبی (در شرایط آب و هوایی اهواز)

سعید زندی^۱، منا گلایی^{۲*}، سعید برومندنسب^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸

چکیده

برای تعیین مدیریت بهینه آبیاری و عملکرد محصول، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی ابزار مناسب می‌باشند. مدل AquaCrop یکی از مدل‌های کاربردی بوده که به منظور شبیه‌سازی تغییرات عملکرد در مدیریت‌های مختلف آب‌و‌خاک به کار گرفته می‌شود. پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر متقابل تنش‌های شوری و کم‌آبی و استفاده از زه‌آب کشاورزی برای آب آبیاری گیاه کینوا و شبیه‌سازی عملکرد آن با مدل AquaCrop طی سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ در مزرعه آزمایشی دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز انجام شد. آزمایش در قالب طرح کرت‌های خردشده و با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمار اصلی تنش شوری شامل سطوح شوری ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر و تیمار فرعی تنش آبی شامل سطوح آبیاری کامل، آبیاری ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه بود. نتایج نشان داد بیشترین و کمترین میزان عملکرد دانه به ترتیب در فصل پاییز و ۵/۴۵ و ۱/۸ و در فصل بهار ۳/۸۷ و ۰/۷۳ تن در هکتار به‌طور مشابه در تیمار SIII (شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر و آبیاری کامل) و S4I3 (شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه) به دست آمد. بررسی نتایج آماری نشان داد که مدل AquaCrop در مرحله واسنجی با مقادیر NRMSE کمتر از ۰/۲ دارای دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد کینوا بود. شاخص‌های آماری EF ، R^2 و d در مرحله صحت‌سنجی ($0/70$ ، $0/88$ و $0/97$ در فصل پاییز و $0/74$ ، $0/85$ و $0/97$ در فصل بهار) مدل با مقادیر نزدیک به یک بیانگر دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی مقدار عملکرد دانه بود؛ اما دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در فصل پاییز در مرحله صحت‌سنجی با مقادیر EF ، R^2 و d به ترتیب برابر $0/18$ ، $0/75$ ، $0/74$ و $0/83$ کمتر از دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه در فصل بهار بود. به‌طور کلی می‌توان این‌چنین نتیجه گرفت که مدل AquaCrop دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در شرایط تنش شوری و تنش آبی دارد.

واژه‌های کلیدی: زه‌آب کشاورزی، شبیه‌سازی عملکرد، شورورزی، مدل‌سازی

مقدمه

افزایش جمعیت جهان، روند کاهش منابع آب شیرین و شور شدن زمین‌های زراعی، بررسی امکان به‌کارگیری و کشت گیاهان متحمل در شرایط نامناسب محیطی را ضروری ساخته است (سیلسپور، ۱۴۰۰). همچنین نیاز به مواد غذایی سبب شده سطح زیر کشت افزایش یافته و منابع آب شیرین سطحی و زیرزمینی بیش‌ازحد مصرف شده و در حالت بحرانی قرار گیرند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵). محدودیت منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک موجب گردیده تا امروزه

نگاه‌ها به سوی استفاده از منابع آب شور معطوف شود (حیدری‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶). یکی از مهم‌ترین چالش‌های اساسی کشاورزی در سراسر جهان، کاهش عملکرد گیاهان به دلیل شوری آب‌و‌خاک است (علی‌ار و همکاران، ۱۴۰۱).

در مناطق خشک و نیمه‌خشک در اغلب موارد، گیاهان هم‌زمان تحت تأثیر شوری و کم‌آبی قرار می‌گیرند (خرسند و همکاران، ۱۳۹۳). در مناطق خشک از آنجایی که تبخیر خاک بیشتر از بارندگی می‌باشد، تولید محصول بیشتر به آبیاری وابسته است و نسبت به شوری خاک آسیب‌پذیر است (Bouras et al., 2022)؛ بنابراین پیدا کردن گیاهی که بتوان در این شرایط نامطلوب عملکرد قابل قبولی داشته باشد بسیار مهم است (Razzaghi et al., 2011).

یک راهکار عملی برای افزایش عملکرد گیاه به‌منظور تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به رشد جهان استفاده از گیاهان مقاوم به شوری است (Mohammadi et al., 2022). کینوا گیاهی است که

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۲- دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
۳- استاد گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

*- نویسنده مسئول: (Mona_golabi@yahoo.com)

نیاز آبی) بود. نتایج نشان داد که تنش شوری و کم آبیاری بر عملکرد گیاه کینوا اثر منفی دارد. باین حال گیاه در بالاترین سطح شوری (۲۰ دسی زیمنس بر متر) و با آبیاری ۵۰ درصد نیاز آبیاری قادر به رشد و تولید محصول بود (Peyghan et al., 2020).

آزمایشی در منطقه جنوب مراکش به منظور بررسی واکنش گیاه کینوا به شوری و کود فسفر انجام گردید. بوراس و همکاران این آزمایش را در سه سطح شوری شامل (۵، ۱۲ و ۱۷ دسی زیمنس بر متر) و سه سطح کود فسفر (صفر، ۶۰ و ۷۰ کیلوگرم در هکتار) انجام دادند. نتایج نشان داد وزن زیست توده، عملکرد دانه، شاخص برداشت و کارایی مصرف آب گیاه به طور معناداری تحت تاثیر شوری کاهش پیدا کرد (Bouras et al., 2022).

امداد و همکاران (۱۴۰۱) پژوهشی باهدف تعیین کارایی مدل AquaCrop در شبیه سازی عملکرد گیاه کینوا با اعمال سه تیمار تنش ۵۰، ۳۰ و ۷۰ درصد مصرف آب قابل استفاده در سال های ۱۳۹۸ و ۱۳۹۹ در کرج انجام دادند. از نتایج سال اول به منظور واسنجی و از نتایج سال دوم به منظور اعتبارسنجی مدل استفاده گردید نتایج حاصل از واسنجی و اعتبار سنجی مدل بیانگر دقت و کارایی مناسب مدل در شبیه سازی عملکرد دانه، زیست توده و کارایی مصرف آب گیاه کینوا بوده است.

حیدری نیا و همکاران (۱۳۹۶) مدل AquaCrop تحت شرایط مدیریت مختلف زراعی و آبیاری با آب شور برای ذرت را در اهواز مورد ارزیابی قرار دادند. شوری آب آبیاری در سه سطح شامل شوری آب رودخانه کارون (به طور متوسط ۲ دسی زیمنس بر متر)، شوری ۵/۴ و ۷ دسی زیمنس بر متر بود. نتایج نشان داد که عملکرد دانه، زیست توده، شوری خاک و پوشش سایه انداز به خوبی شبیه سازی شدند. هرچند دقت مدل در تخمین شوری خاک و پوشش سایه انداز کمتر از سایر پارامترها بود و با افزایش شوری دقت مدل کاهش یافت.

در پژوهشی، مدل AquaCrop برای شبیه سازی عملکرد دانه و زیست توده گیاه سویا، تحت تاثیر سطوح مختلف شوری و کم آبیاری در سال های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ در شهرستان گرگان مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش شامل سه سطح آب آبیاری به میزان ۱۰۰، ۷۵ و ۵۵ درصد نیاز گیاه و سه سطح شوری ۷/۵، ۱۰ و ۱۰ دسی زیمنس بر متر بود. نتایج نشان داد که با کاهش مقدار آب آبیاری و افزایش سطح شوری، عملکرد گیاه سویا کاهش می یابد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵).

به منظور اعتبار سنجی مدل AquaCrop تحت تنش هم زمان شوری و کم آبی بر روی گندم تحقیقی توسط محمدی و همکاران (۱۳۹۴) در بیرجند انجام گردید. مقادیر متوسط ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، حداکثر خطای (ME)، شاخص سازگاری (d)، ضریب باقیمانده (CRM) و ضریب تعیین

در شرایط بسیار سخت محیطی کشت می شود (Geerts et al., 2009) و به تنش های خشکی (Vacher, 1998) سرما و گرما (Bois Jacobsen et al., 2005 et al., 2006) و شوری خاک (Jacobsen et al., 2003) متحمل بوده، گیاه کینوا یک گیاه شور پسند با تنوع زیاد در بین ژنوتیپ های مختلف است (Cai and Gao, 2020) و در بیشتر خاک ها از شنی تا رسی با اسیدیته ۴/۵ تا ۹ (Geerts et al., 2009) و شوری بیش از ۴۰ دسی زیمنس بر متر می تواند رشد نماید (Hariadi et al., 2011; Razzaghi et al., 2011). از جمله محدودیت های آزمایش های مزرعه ای، می توان به محدود شدن اعتبار آزمایش ها به شرایط فیزیکی، کوتاه بودن مدت زمان آزمایش و نیز محدودیت در تعداد سناریو هایی که توسط آزمایش بررسی می شوند، اشاره کرد (خرسند و همکاران، ۱۳۹۳). بر آورد بسیاری از پارامترها مستلزم صرف زمان و انرژی فراوان است. می توان با به کارگیری نرم افزارها، برخی از پدیده ها را شبیه سازی کرد و آن ها را در برنامه ریزی مدیریت زراعی به کار گرفت (توکلی و همکاران، ۱۳۹۲).

برای تعیین مدیریت بهینه آبیاری و تاثیر تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری بر عملکرد محصول، استفاده از مدل های شبیه سازی به عنوان یک ابزار مناسب تدوین شده اند (مهر آذر و همکاران، ۱۳۹۵). از آنجاکه مدل های شبیه سازی توان بر آورد عملکرد محصول و وضعیت خاک با توجه به تغییر در اقلیم، گیاه، عملیات مدیریتی و زراعی را دارند از این رو سبب صرفه جویی در وقت و هزینه می شوند (حیدری نیا و همکاران، ۱۳۹۶).

مدل AquaCrop که توسط فائو توسعه یافته، یکی از مدل های کاربردی بوده که به منظور شبیه سازی تغییرات عملکرد محصولات مختلف در مدیریت های مختلف آب و خاک استفاده می شود (امداد و همکاران، ۱۴۰۱). مدل مذکور ضمن استفاده از تعداد نسبتاً اندکی از پارامترهای معین که مستقیماً قابل اندازه گیری هستند، دارای توانایی بالا در شبیه سازی است (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2012).

در پژوهشی توسط بیرامی و همکاران (۱۴۰۳) در استان یزد اثر سطوح مختلف شوری و رطوبتی بر کینوا مورد بررسی قرار گرفت. دو سطح شوری ۵ و ۱۲ دسی زیمنس بر متر و چهار سطح آبیاری ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ درصد نیاز آبی به عنوان تیمارهای آزمایش اعمال شد. نتایج نشان داد سطوح شوری و سطوح رطوبتی موجب اختلاف معنی دار در ارتفاع بوته، قطر ساقه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد زیست توده شد در حالی که اثر متقابل معنی دار نبود.

پیغان و همکاران عملکرد گیاه کینوا را تحت تنش شوری و کم آبیاری در اهواز مورد مطالعه قرار دادند. تیمارهای آزمایش شامل سطوح شوری (آب رودخانه کارون به عنوان تیمار شاهد، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دسی زیمنس بر متر) و سه سطح آبیاری شامل (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد

محدودی بر روی اثر تنش شوری و کم‌آبی بر روی گیاه کینوا انجام شده است. همچنین بیشتر تحقیقات انجام گرفته اثر تنش شوری (Lang, 2016 ; Talebnejad and Sepaskhah, 2015) یا تنش آبی را بر روی گیاه کینوا بررسی کرده‌اند و تحقیقات محدودی به بررسی اثر تنش شوری و تنش آبی را به صورت توأم (Razzaghi et al., 2011 و Peyghan et al., 2020) بر کینوا پرداخته‌اند. در بررسی تحقیقات در خصوص ارزیابی مدل AquaCrop برای پیش‌بینی عملکرد گیاه کینوا تحقیقات محدودی در داخل کشور (امداد و همکاران، ۱۴۰۱ و گلابی و همکاران، ۱۴۰۲) و همچنین در جهان (Geerts et al., 2009 و Alvar-Beltrán et al., 2021) در رابطه با ارزیابی مدل AquaCrop برای پیش‌بینی عملکرد کینوا در شرایط تنش آبی گزارش شده است؛ بنابراین لزوم انجام پژوهشی به‌منظور بررسی اثر متقابل تنش شوری و خشکی و استفاده از زه‌آب کشاورزی برای آب آبیاری گیاه کینوا و شبیه‌سازی عملکرد آن با مدل AquaCrop بیش‌ازپیش اهمیت پیدا می‌کند که از اهداف اصلی این پژوهش می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در مزرعه تحقیقاتی دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز در سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ انجام گردید که از نظر موقعیت جغرافیایی در ۴۸ درجه و ۳۹ دقیقه و ۶۸ ثانیه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۱۸ دقیقه و ۱۸ ثانیه عرض شمالی واقع گردیده است. کشت پاییزه گیاه از آبان ماه ۱۴۰۱ آغاز و در اوایل اسفندماه ۱۴۰۱ به پایان رسید بعد از برداشت اول، کشت بهاره از اواخر اسفند ۱۴۰۱ آغاز و اوایل تیرماه ۱۴۰۲ برداشت انجام گردید. در این پژوهش از رقم Titicaca کینوا استفاده شد.

برای آماده‌سازی زمین قبل از کشت زمین محل آزمایش با استفاده از گاوآهن برگردان‌دار شخم زده شد. سپس عملیات دیسک زدن برای خرد کردن کلوخه‌ها و آماده‌سازی بستر بذر انجام گردید. در مرحله بعد کرت‌بندی انجام شد. طول و عرض کرت‌ها برابر ۱/۵ متر و فاصله بین کرت‌ها ۵/۵ متر در نظر گرفته شد. روش کاشت به صورت دستی و بر روی ردیف‌های کاشت درون هر کرت انجام گرفت. فاصله بین ردیف‌ها ۲۵ سانتی‌متر و فاصله بین بوته‌ها بر روی هر ردیف ۲۰ سانتی‌متر و مقدار بذر بر اساس تراکم ۲۰۰۰۰ بوته در هکتار استفاده شد (Cocozza et al., 2012 ; Pulvento et al., 2013). برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌ها قبل از کشت گیاه مورد آزمایش قرار گرفت و نتایج آن در جدول (۱) ارائه شده است.

(R2) برای رقم روشن به ترتیب ۷/۰۹ درصد، ۰/۹۷، ۰/۰۰۱ و ۰/۹ و برای رقم قدس به ترتیب ۸/۱۶ درصد، ۱۷/۴۶ درصد، ۰/۹۸، ۰/۰۰۴- و ۰/۸۷ به دست آمد. در یک مطالعه در منطقه‌ی بیرجند عملکرد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد محصول گندم زمستانه ارقام روشن و قدس تحت تنش‌های شوری و آبی ارزیابی شد. سطح شوری آب آبیاری به ترتیب ۱/۴، ۴/۵ و ۶/۹ دسی‌زیمنس بر متر و چهار سطح عمق آبیاری به ترتیب ۱۰۰، ۷۵، ۵۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه اعمال شد. بر اساس نتایج، مدل AquaCrop عملکرد دانه را برای هر دو رقم با دقت زیاد شبیه‌سازی کرد (خورسند و همکاران، ۱۳۹۳).

کومار و همکاران پس از ارزیابی مدل AquaCrop در شهر دهلی هندوستان برای چهار رقم گندم (سه رقم مقاوم به شوری یک رقم غیر مقاوم) و چهار سطح شوری آب آبیاری (۱/۷، ۴، ۸ و ۱۲ دسی‌زیمنس بر متر) گزارش کردند که مدل دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد محصول، زیست‌توده و بهره‌وری آب داشت؛ اما دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول بیشتر از زیست‌توده و بهره‌وری آب بود (Kumar et al., 2014).

به‌منظور ارزیابی مدل AquaCrop برای گندم زمستانه تحت شرایط کم‌آبیاری در چین، مدل مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفت و ریشه میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه و زیست‌توده در فرآیند اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۵۸ و ۰/۸۷ تن در هکتار به دست آمد و بر این اساس مدل به‌عنوان ابزاری معتبر جهت مدیریت آبیاری گندم در منطقه پیشنهاد شد (Iqbal et al., 2014).

گرتس و همکاران واکنش گیاه کینوا را به میزان آب قابل‌دسترس در جنوب بولیوی با استفاده از مدل AquaCrop شبیه‌سازی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد، این مدل کاهش ماده خشک اندام‌های هوایی، عملکرد دانه را تحت تیمارهای مختلف آبیاری (آبیاری کامل و کم‌آبیاری) را با دقت بالایی ($R^2 > 0.87$) شبیه‌سازی نمود. آنالیز حساسیت مدل نشان داد، اگرچه مدل با توانایی خوبی رشد و عملکرد این گیاه را نسبت به تنش خشکی شبیه‌سازی نمود، لیکن با توسعه مدل برای شبیه‌سازی تخلیه عناصر غذایی خاک، خسارت آفات و بیماری‌ها می‌توان توانایی آن را افزایش داد (Geerts et al., 2014).

بررسی تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد بیشتر تحقیقات در داخل کشور در زمینه‌ی بررسی اثر تنش شوری و تنش آبی بر روی گیاهانی همچون نخود (دره‌کی و همکاران، ۱۳۹۶)، سویا (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵)، گلرنگ (بهادرخواه و کاظمینی، ۱۳۹۳)، ذرت (حیدری‌نیا و همکاران، ۱۳۹۶)، گندم (محمدی و همکاران، ۱۳۹۴ و خورسند و همکاران، ۱۳۹۳) و غیره انجام شده است و تحقیقات

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مورد آزمایش

عمق (cm)	جرم مخصوص (gr/cm ³)	هدایت الکتریکی (dS/m)	pH	FC درصد حجمی	PWP درصد حجمی	درصد اندازه ذرات خاک			
						بافت خاک	شن	سیلت رس	
۳۰-۰	۱/۵۴	۴/۳۴	۷/۴۸	۳۰/۸	۱۵/۳	لومی-رسی	۳۱	۳۲	۳۷
۶۰-۳۰	۱/۵۲	۵/۳	۷/۲۷	۳۱	۱۵/۶	لومی-رسی	۳۰	۳۴	۳۶

این آزمایش در قالب طرح کرت‌های خرد شده و با طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با ۳ تکرار انجام شد. تیمارهای آزمایشی شامل تحقیق بر روی گیاه کینوا در چهار سطح شوری شامل آب رودخانه کارون (S1 به عنوان تیمار شاهد)، زه‌آب با شوری (S2) ۱۰، (S3) ۱۵ و (S4) ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر به عنوان عامل اصلی و سه سطح کم‌آبی شامل (I1) ۱۰۰، (I2) ۸۰ و (I3) ۶۰ درصد نیاز آبی

به عنوان فاکتور فرعی انجام شد. منبع آب مورد استفاده زه‌آب رقیق شده از شبکه‌های آبیاری و زهکشی زهره و جراحی بود. قبل از شروع آزمایش برخی از خصوصیات کیفی تیمارهای مختلف آب آبیاری اندازه‌گیری شد (جدول ۲). تیمارهای شوری و آبیاری از همان ابتدای کشت در هر دو فصل اعمال گردید

جدول ۲- مقادیر متوسط خصوصیات کیفی آب آبیاری در تیمارهای مختلف

تیمار	CL ⁻	HCO ³⁻	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	SAR	EC (dS/m)	کلاس کیفی آب
S1	۱۲/۰۲	۲/۲۰	۰/۱۵	۳/۶۵	۴/۵	۷	۷/۸۰	۱/۵۲	۲	C3-S1
S2	۸۲/۳۲	۲/۷۸	۰/۴۰	۴۲/۱۷	۱۱	۱۱/۲۰	۷/۴۰	۱۲/۶۶	۱۰	C4-S2
S3	۱۳۰/۵۰	۲/۶۴	۰/۴۸	۷۸/۲۶	۱۱/۴۰	۱۰/۶۰	۷/۴۰	۲۳/۶۰	۱۵	C4-S3
S4	۱۷۳/۵۰	۲/۵۴	۰/۶۳	۱۲۴/۳۵	۱۱	۱۰/۸۰	۷/۵۰	۳۷/۶۶	۲۰	C4-S4

عمق آب آبیاری بر اساس جبران کمبود رطوبت خاک تا حد ظرفیت زراعی در محدوده عمق توسعه ریشه گیاه، با استفاده از معادله (۱) تعیین گردید. بدین منظور قبل از هر نوبت آبیاری رطوبت خاک به روش وزنی در منطقه توسعه ریشه گیاه اندازه‌گیری شد. چهار کرت با خصوصیات تیمار شاهد (شوری آب کارون و نیاز آبی ۱۰۰ درصد) در کنار دیگر کرت‌ها به منظور اندازه‌گیری رطوبت خاک در نظر گرفته شد.

$$dn = (\theta_{fc} - \theta_i) \cdot \rho_b \cdot D \quad (1)$$

در این روابط θ_i رطوبت جرمی خاک قبل از آبیاری، θ_{fc} رطوبت جرمی خاک در نقطه ظرفیت زراعی، ρ_b جرم مخصوص ظاهری خاک (g/cm³) و D عمق ریشه (mm) می‌باشد. با توجه به مقدار آب برآورد شده برای هر تیمار در هر مرحله از آبیاری اختلاط آب با استفاده از معادله (۲) که در زیر آمده است و با توجه به EC زه‌آب مورد استفاده و EC آب شاهد، شوری‌های موردنظر تهیه شد.

$$EC_{adj} = \frac{(V_1 * EC_1) + (V_2 * EC_2)}{V_1 + V_2} \quad (2)$$

که در آن V_1 و V_2 به ترتیب حجم آب شاهد (آب کارون) و حجم زه‌آب، EC_1 و EC_2 به ترتیب شوری آب شاهد و شوری زه‌آب و EC_{adj} شوری تعادلی می‌باشد در نهایت اختلاط آب با شوری‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر انجام و مقدار آب موردنیاز با کنتور حجمی در اختیار گیاه قرار گرفت (جدول ۳ و ۴). در طی فصل کشت و جین علف‌های هرز به صورت دستی انجام شد همچنین برای مبارزه

با آفات از سم دیازینون با غلظت دو در هزار استفاده شد. برای کشت اول در تاریخ دوم و سوم اسفند ۱۴۰۱ و کشت دوم در تاریخ چهارم و پنجم تیر ۱۴۰۲ پس از رسیدن فیزیولوژیکی گیاه عملیات برداشت به صورت بریدن بوته از سطح خاک انجام گرفت و نمونه‌ها به منظور خشک کردن و توزین به آزمایشگاه منتقل شد. سنبله‌ها از شاخه جدا و پس از کوبیدن به منظور جداسازی کاه از دانه از الک شماره ۱۰ عبور داده شد. دانه‌ها در آون با دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۷۲ ساعت برای تعیین عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی، خشک گردید. جهت تجزیه واریانس و مقایسه میانگین داده‌های مربوط به عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کینوا و همچنین برآزش داده‌ها و رسم منحنی‌ها از نرم‌افزارهای SAS 9.4 و Excel استفاده گردید.

داده‌های ورودی موردنیاز مدل AqouCrop

داده‌های ورودی شامل مجموعه داده‌های آب و هوایی، گیاه (تاریخ کشت، زمان گلدهی و طول دوره گلدهی، زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاهی، شاخص برداشت، ماده خشک و...)، آبیاری، خاک و مدیریت است و بیانگر شرایط محیطی است که گیاه در آن رشد می‌کند. پس از واسنجی مدل و شبیه‌سازی، کاربر می‌تواند تغییرات رطوبت خاک، پوشش سبز گیاه، عملکرد، بیوماس، تبخیر و تعرق، بهره‌وری آب و غیره را بررسی کند. نتایج شبیه‌سازی، تحت عنوان فایل‌های خروجی قابل ذخیره است.

جدول ۳- تقویم آبیاری گیاه کینوا در فصل پاییز

نوبت آبیاری	تاریخ آبیاری	I ₁ (mm)	I ₂ (mm)	I ₃ (mm)
۱	۱۴۰۱/۰۸/۱۱	۵/۳۳	۵/۳۳	۵/۳۳
۲	۱۴۰۱/۰۸/۱۵	۶	۴/۸۰	۳/۶۰
۳	۱۴۰۱/۰۸/۱۸	۶/۵۳	۵/۲۳	۳/۹۲
۴	۱۴۰۱/۰۹/۰۲	۷/۸۴	۶/۲۷	۴/۷۰
۵	۱۴۰۱/۰۹/۰۹	۱۰/۸۳	۸/۶۶	۶/۵۰
۶	۱۴۰۱/۰۹/۱۶	۱۲/۹۳	۱۰/۳۵	۷/۷۶
۷	۱۴۰۱/۰۹/۲۳	۱۷/۸۰	۱۴/۲۴	۱۰/۶۸
۸	۱۴۰۱/۱۰/۱۴	۲۷/۵۲	۲۲/۰۱	۱۶/۵۱
۹	۱۴۰۱/۱۰/۲۸	۲۳/۱۰	۱۸/۴۸	۱۳/۸۶
۱۰	۱۴۰۱/۱۱/۰۵	۳۳/۸۶	۲۷/۰۹	۲۰/۳۲
۱۱	۱۴۰۱/۱۱/۱۲	۳۶/۵۰	۲۹/۲۰	۲۱/۹۰
۱۲	۱۴۰۱/۱۱/۱۹	۲۷/۷۲	۲۲/۱۸	۱۶/۶۳
۱۳	۱۴۰۱/۱۱/۲۶	۳۹/۲۰	۳۱/۳۶	۲۳/۵۲
مجموع	-	۲۵۵/۱۷	۲۰۵/۲۰	۱۵۵/۲۳

جدول ۴- تقویم آبیاری گیاه کینوا در فصل بهار

نوبت آبیاری	تاریخ آبیاری	I ₁ (mm)	I ₂ (mm)	I ₃ (mm)	نوبت آبیاری	تاریخ آبیاری	I ₁ (mm)	I ₂ (mm)	I ₃ (mm)
۱	۱۴۰۱/۱۲/۲۴	۱۰	۸	۶	۱۳	۱۴۰۲/۰۲/۲۰	۳۷/۲۴	۲۹/۷۹	۲۲/۳۴
۲	۱۴۰۱/۱۲/۲۸	۱۰	۸	۶	۱۴	۱۴۰۲/۰۲/۲۴	۳۷/۷۵	۳۰/۲۰	۲۲/۶۵
۳	۱۴۰۲/۰۱/۰۳	۱۰	۸	۶	۱۵	۱۴۰۲/۰۲/۲۸	۳۱/۵۱	۲۵/۲۱	۱۸/۹۱
۴	۱۴۰۲/۰۱/۱۱	۹/۱۵	۷/۳۲	۵/۴۹	۱۶	۱۴۰۲/۰۳/۰۱	۳۶/۰۴	۲۸/۸۳	۲۱/۶۲
۵	۱۴۰۲/۰۱/۱۵	۱۲/۵۴	۱۰/۰۳	۷/۵۳	۱۷	۱۴۰۲/۰۳/۰۵	۴۶/۲۵	۳۷	۲۷/۷۵
۶	۱۴۰۲/۰۱/۱۹	۱۰/۸۶	۸/۶۹	۶/۵۱	۱۸	۱۴۰۲/۰۳/۰۹	۳۶	۲۸/۸۰	۲۱/۶۰
۷	۱۴۰۲/۰۱/۲۷	۲۳/۳۰	۱۸/۶۴	۱۳/۹۸	۱۹	۱۴۰۲/۰۳/۱۳	۴۰/۵۶	۳۲/۴۵	۲۴/۳۴
۸	۱۴۰۲/۰۱/۳۱	۱۳/۸۸	۱۱/۱۰	۸/۳۳	۲۰	۱۴۰۲/۰۳/۱۷	۳۹/۴۱	۳۱/۵۳	۲۳/۶۵
۹	۱۴۰۲/۰۲/۰۴	۲۴/۷۹	۱۹/۸۴	۱۴/۸۸	۲۱	۱۴۰۲/۰۳/۲۱	۴۳/۸۴	۳۵/۰۸	۲۶/۳۱
۱۰	۱۴۰۲/۰۲/۰۸	۲۳/۷۲	۱۸/۹۷	۱۴/۲۳	۲۲	۱۴۰۲/۰۳/۲۵	۳۳/۰۳	۲۴/۴۳	۱۹/۸۲
۱۱	۱۴۰۲/۰۲/۱۲	۲۷/۹۵	۲۲/۳۶	۱۶/۷۷	۲۳	۱۴۰۲/۰۳/۲۹	۴۸/۱۴	۲۸/۵۱	۲۸/۸۸
۱۲	۱۴۰۲/۰۲/۱۶	۲۲/۰۴	۱۷/۶۳	۱۳/۲۲	مجموع	-	۶۲۸/۰۲	۵۰۲/۴۲	۳۷۶/۸۱

سنجی مدل AquaCrop با استفاده از تیمارهای S1I3، S2I1، S3I2 و S4I4 بدون تغییر در پارامترهای واسنجی شده انجام گرفت.

آنالیز حساسیت مدل

برای آنالیز حساسیت مدل AquaCrop از قدر مطلق اختلاف نسبی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی با استفاده از معادله (۷) استفاده گردید.

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \quad (7)$$

که در آن Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی بر اساس داده ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد شده عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی بر اساس

واسنجی مدل با استفاده از تغییر در ورودی‌های گیاهی در مدل برای هر فصل کشت به صورت مجزا و با استفاده از ۸ تیمار (دوسوم کل داده‌ها) شامل S1I1، S1I2، S2I2، S2I3، S3I1، S3I3، S4I1 و S4I2 انجام گرفت.

با اجرای مدل عملکرد شبیه‌سازی شده در شرایط مختلف مزرعه آزمایشی با استفاده از داده‌های ورودی گیاهی تعیین گردید. مقایسه عملکرد واقعی حاصل از آزمایش مزرعه‌ای با عملکرد شبیه‌سازی شده با استفاده از آماره‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گرفت. در صورت عدم تطابق عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد واقعی، با تغییر دادن ضرایب گیاهی، مراحل فوق تکرار شد تا نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده با دقت قابل قبولی بر عملکرد واقعی منطبق شود. مرحله صحت

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n |P_i| + |O_i|} \quad (11)$$

در فرمول‌های ارائه شده P_i مقادیر پیش‌بینی شده، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد نمونه‌ها و \bar{O} مقدار متوسط پارامتر مشاهده شده است. چنانچه تمام مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده باهم برابر شود، مقدار عددی مقدار R^2 ، EF و d برابر ۱ خواهد شد. مقادیر کمتر از ۰/۱ برای آماره $NRMSE$ نشان‌دهنده دقت عالی مدل است. همچنین مقادیر این آماره در بازه ۰/۲-۰/۱، ۰/۳-۰/۲ و بیشتر از ۰/۳ به ترتیب نشان‌دهنده دقت خوب، متوسط و ضعیف می‌باشد (ویلومت، ۱۹۸۲). مقدار EF نشان‌دهنده صحت برازش داده‌ها می‌باشد و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا یک در زمان برازش کامل داده‌ها متغیر است (Nash and Sutcliffe, 1970).

نتایج و بحث

بررسی اثر آبیاری با زه‌آب بر عملکرد گیاه کینوا در این تحقیق در سطح احتمال یک درصد و پنج درصد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نتایج آنالیز واریانس حاصل از آن ارائه شد (جدول ۵).

جدول ۵- نتایج تجزیه واریانس عملکرد و اجزای عملکرد گیاه کینوا

میانگین مربعات					
کشت پاییز			کشت بهار		
منابع تغییرات	درجه آزادی	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیکی	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیکی
بلوک	۲	۰/۳۶	۰/۰۸	۰/۱۱	۰/۲۷
تنش شوری (S)	۳	۱۰/۰۲**	۲۴۹/۹۲**	۸/۳۹**	۵۹/۸۹**
خطای (S)	۶	۰/۴۱	۰/۵۳	۰/۱۱	۰/۱۴
تنش کم‌آبی (I)	۲	۴/۶۸**	۴۷/۱۰**	۱/۹۷**	۲۳/۵۸**
S*I	۶	۰/۱۰ ^{ns}	۶/۷۱**	۰/۱۱ ^{ns}	۱/۰۱**
S*I	۱۶	۰/۱۵	۰/۴۴	۰/۰۶	۰/۰۴

* و ** به ترتیب معنی‌داری در سطح پنج و یک درصد و ns بدون اثر معنی‌دار

عملکرد دانه

مقایسه میانگین‌های عملکرد دانه در تیمارهای شوری مختلف، در شکل (۱) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در فصل پاییز با افزایش شوری آب عملکرد دانه کاهش یافت به طوری که بیشترین مقدار آن ۴/۹۴ تن در هکتار در تیمار شاهد (شوری برابر ۲ دسی‌زیمنس بر متر) و کمترین مقدار آن در تیمار S4 برابر ۲/۶ تن در هکتار و در تیمارهای S2 و S3 به ترتیب برابر ۴/۰۴ و ۳ تن در هکتار بود. کاهش عملکرد برای تیمارهای S2، S3 و S4 نسبت تیمار شاهد

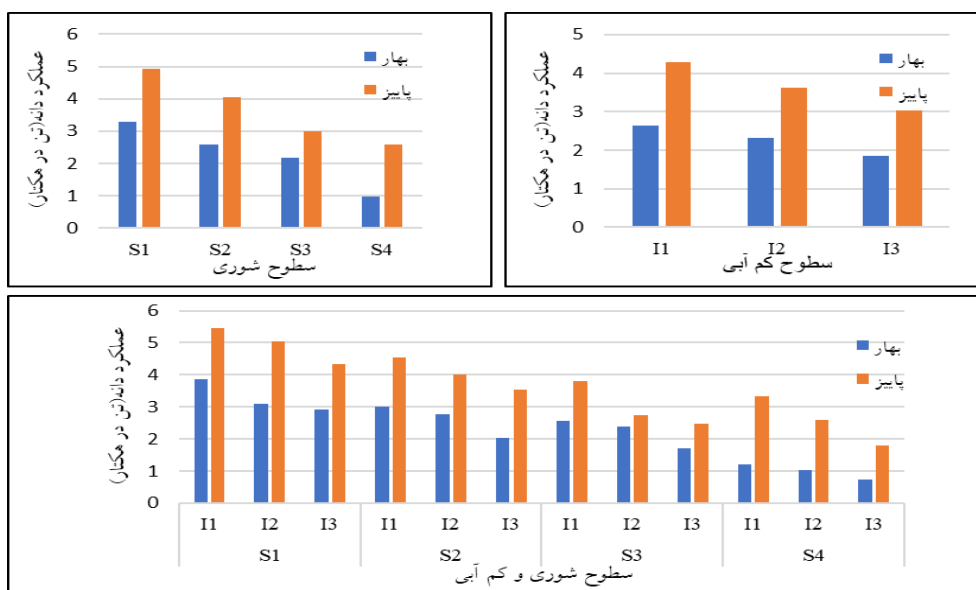
به ترتیب برابر ۱۸/۲۶، ۳۹/۲۱ و ۴۷/۳۸ درصد بود و بیانگر این است که میزان کاهش عملکرد به ازای هر واحد افزایش شوری (از شوری ۲ دسی‌زیمنس بر متر تا شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر) معادل ۲/۶۳ درصد بود. همچنین در فصل بهار بیشترین و کمترین مقدار عملکرد دانه به ترتیب برابر ۳/۲۹ و ۰/۹۸ تن در هکتار برای تیمارهای S1 و S4 به دست آمد. کاهش عملکرد دانه در فصل بهار به ازای هر واحد افزایش شوری ۳/۸۸ درصد مشاهده شد در تحقیق رزاقی و همکاران بیشترین مقدار عملکرد ۲/۳ تن در

آبی را بیان می‌کند.

تنش خشکی به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر فتوسنتز تأثیر گذاشته و در نهایت باعث کاهش عملکرد می‌شود. همچنین تنش خشکی از طریق کاهش اندازه یا توقف رشد برگ، سطح فتوسنتز کننده گیاه را کاهش داده و از این طریق باعث کاهش رشد و در نهایت عملکرد رویشی گیاه می‌شود. مسکینی ویشکایی و همکاران (۱۴۰۱) بیان داشتند با اعمال تنش آبی از شدت کم (۳۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی)، شدت متوسط (۵۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی) و شدت زیاد (۷۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی) مقدار عملکرد دانه کاهش پیدا کرده است. به طوری که بیشترین میزان آن در آبیاری کامل برابر ۳/۷ تن در هکتار و کمترین میزان آن برابر ۲/۱۱ تن در هکتار گزارش شد. تیلاهیجو و همکاران نیز گزارش کردند با افزایش تنش آبی در تیمارهای آبیاری کامل، آبیاری با ۶۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه و آبیاری ۳۰ درصد ظرفیت زراعی مزرعه بر روی پنج رقم کینوا، در هر رقم با افزایش تنش آبی عملکرد محصول کاهش پیدا کرده است (Telahigue et al., 2017).

تیمار شاهد و کمترین مقدار آن در شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر ۱/۵ تن در هکتار و میزان کاهش عملکرد دانه ۳۴/۷۸ درصد گزارش شده است (Razzaghi et al., 2011). همچنین نتایج تحقیق کوپرو و عیسی نشان داد که شوری اثر معنی‌داری بر عملکرد دانه داشت. تنش شوری باعث افزایش فشار اسمزی، اختلال در جذب آب توسط ریشه، کاهش فتوسنتز گیاه، کاهش مواد فتوسنتزی و در نتیجه کاهش عملکرد دانه می‌گردد (Koyro and Eisa, 2008).

مقایسه میانگین‌های عملکرد دانه در تیمارهای کم‌آبی در شکل (۱) نشان می‌دهد، بیشترین مقدار عملکرد دانه در فصل پاییز در تیمار I1 برابر ۴/۲۹ تن در هکتار بود؛ و پس از آن عملکرد دانه در تیمارهای I2 و I3 به ترتیب با مقادیر عملکرد برابر ۳/۶۱ و ۳/۰۴ تن در هکتار کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش ۱۵/۸ درصد برای تیمار I2 و ۲۹/۰۹ درصد برای تیمار I3 نسبت به تیمار شاهد می‌باشد. بر اساس نمودار شکل (۱) بیشترین مقدار عملکرد در فصل بهار در تیمار I1 برابر ۲/۶۴ و کمترین مقدار آن ۱/۸۴ تن در هکتار در تیمار I3 مشاهده گردید و کاهش ۳۰ درصد عملکرد دانه در اثر افزایش تنش



شکل ۱- تغییرات عملکرد دانه در سطوح شوری، سطوح کم‌آبی و سطوح شوری و کم‌آبی به صورت توأم

۰/۷۳ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان عملکرد دانه می‌باشند. پیغان و همکاران در بررسی اثر توأم تنش شوری و تنش آبی بیشترین مقدار عملکرد دانه کینوا را در تیمار با آبیاری کامل و شوری پنج دسی‌زیمنس بر متر برابر ۶/۷۹ تن در هکتار و کمترین مقدار آن در تیمار آبیاری ۵۰ در نیاز آبی گیاه و شوری ۲۰ دسی‌زیمنس بر متر برابر ۰/۸۶ تن در هکتار گزارش کردند (Peyghan et al., 2020).

عملکرد بیولوژیکی

عملکرد بیولوژیکی کینوا با افزایش شوری (از ۲ دسی‌زیمنس بر

بر اساس جدول (۵) اثر متقابل تنش‌های شوری و کم‌آبی بر عملکرد دانه کینوا به طور مشابه در فصل پاییز و فصل بهار معنی‌دار نبود. در بررسی تیمارهای شوری و کم‌آبی با یکدیگر در نمودار شکل (۱)، مشاهده می‌شود که تیمار SIII با ۵/۴۵ تن در هکتار بیش‌ترین عملکرد دانه و تیمار S4I3 در بیش‌ترین سطح شوری آب آبیاری و کم‌ترین سطح آبیاری، با ۱/۸ تن در هکتار کم‌ترین عملکرد دانه را در فصل پاییز داشتند. بررسی نمودار اثر متقابل تنش شوری و کم‌آبی در فصل بهار نشان می‌دهد تیمار SIII و تیمار S4I3 با مقادیر ۳/۸۷ و

2016). طالب نژاد و سپاسخواه در شیراز بیشترین و کمترین عملکرد بیولوژیکی کینوا را به ترتیب مقدار ۷/۹۳ و ۷/۳۸ تن در هکتار در سطوح شوری ۱۰ و ۴۰ دسی زیمنس بر متر گزارش کردند (Talebnejad and Sepaskhah, 2015).

تنش آبی منجر به کاهش عملکرد بیولوژیکی کینوا گردید. حداکثر عملکرد بیولوژیکی کینوا در تیمارهای مختلف آبیاری، تحت آبیاری کامل مشاهده گردید که معادل ۱۰/۲۱ تن در هکتار بود. با کاهش سطح آبیاری به ۸۰ و ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، عملکرد بیولوژیکی به ترتیب با ۹/۸ و ۳۷/۴۲ درصد کاهش، به ۹/۲۱ و ۶/۳۹ تن در هکتار کاهش یافت. همچنین به طور مشابه بیشترین مقدار عملکرد بیولوژیکی در فصل بهار تحت آبیاری کامل با مقدار ۷/۶۷ تن در هکتار و پس از آن به ترتیب ۶/۵۶ و ۴/۸۹ تن در هکتار برای تیمارهای I2 و I3 مشاهده شد. در پژوهش مسکینی و بیشکایی و همکاران (۱۴۰۱) کمترین میزان عملکرد بیولوژیکی کینوا را در تنش آبی با شدت زیاد (۷۰ درصد تخلیه مجاز رطوبتی) برابر ۴/۹ تن در هکتار به دست آمد.

با مقایسه تیمارهای شوری و کم آبی مشاهده می شود که تنش شوری نسبت به تنش آبی اثر بیش تری در کاهش عملکرد بیولوژیکی داشته است. در فصل پاییز و بهار اعمال تنش آبی در سطح ۶۰ درصد نیاز آبی منجر به کاهش ۳۷/۴۲ و ۳۶/۲ درصدی عملکرد بیولوژیکی کینوا در مقایسه با تیمار شاهد گردید اما آبیاری با شوری ۲۰ دسی- زیمنس بر متر، سبب کاهش ۵۳/۰۸ و ۶۷/۵۴ درصدی شد.

متر تا ۲۰ دسی زیمنس بر متر) کاهش یافت (شکل ۲). عملکرد بیولوژیکی در فصل پاییز از مقدار ۱۲/۱۷ تن در هکتار در تیمار شوری S1 به مقدار ۵/۷۱ تن در هکتار در تیمار شوری S4 رسیده و این کاهش حدود ۵۳/۰۸ درصد بود. میزان کاهش عملکرد بیولوژیکی به ازای هر واحد افزایش شوری حدود ۲/۹۴ درصد به دست آمد. کاهش عملکرد بیولوژیکی در شوری های S2 و S3 نسبت به شوری S1 به- ترتیب ۱۷/۴۱ و ۴۶/۸۳ درصد محاسبه شد. در فصل بهار بیشترین مقدار عملکرد بیولوژیکی ۹/۱۵ در تیمار S1 و کمترین مقدار آن ۲/۹۷ تن در هکتار به دست آمد با توجه به نتایج مقدار کاهش عملکرد بیولوژیکی به ازای هر واحد افزایش شوری در فصل بهار ۳/۷۵ درصد بود.

نتایج نشان داد که تنش شوری موجب کاهش معنی دار در میزان عملکرد بیولوژیکی گیاه کینوا شده است، زیرا در شرایط تنش شوری وزن خشک اندام هوایی هم از طریق کاهش میزان رشد رویشی و هم از طریق کاهش فتوسنتز کاهش می یابد. کاهش رشد رویشی و وزن خشک به دلیل کاهش آماس سلول ها در شرایط تنش شوری و متأثر از فرایندهای اسمزی است. از علل دیگر کاهش رشد عملکرد گیاه در اثر شوری، بالا رفتن مصرف انرژی در گیاه برای خروج یون های سدیم مهاجم است که در محیط به مقدار فراوان وجود دارند. در نتیجه مصرف مقدار زیادی از انرژی سلولی برای سازش و مقابله با تنش شوری است و در نهایت رشد و عملکرد گیاه کاهش می یابد. نتایج تحقیقات لانگ در دانشگاه ملی ویتنام نشان داد که تنش شوری موجب کاهش عملکرد بیولوژیکی کینوا گردید (Long,



شکل ۲- تغییرات عملکرد بیولوژیکی در سطوح شوری، سطوح کم آبی و سطوح شوری و کم آبی به صورت توأم

همکاران، ۱۳۹۵ و گلایی و همکاران، ۱۴۰۲) مطابقت داشت؛ بنابراین این پارامترها باید با دقت بیشتری اندازه‌گیری و واسنجی شوند در غیر این صورت خطای قابل توجهی در نتایج مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل به وجود می‌آید.

واسنجی مدل

مقدار داده‌های ورودی مورد استفاده در واسنجی مدل AquaCrop در جدول (۷) نشان داده شده است. نتایج واسنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی گیاه کینوا در نمودارهای شکل (۳) ارائه شده است. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی در دو فصل پاییز و بهار ملاحظه شد که بیشترین خطای پیش‌بینی مدل برای عملکرد دانه به ترتیب برای شبیه‌سازی تیمار S4I1 در فصل پاییز و تیمار S2I3 در فصل بهار بود. همچنین حداقل خطای مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه به ترتیب برای تیمار S1I1 در فصل پاییز و S2I2 در فصل بهار بود. همچنین با بررسی نمودارهای شکل (۳) مشاهده شد که مدل AquaCrop در برخی از تیمارها مقادیر بیش‌برآورد و در برخی تیمارها مقادیر کم‌برآورد را شبیه‌سازی کرد اما روند کلی کاهش عملکرد کینوا در اثر تنش شوری و تنش آبی را به خوبی نشان داد.

تأثیر توأم تنش‌های شوری و خشکی بر روی میانگین‌های عملکرد بیولوژیکی معنی‌دار بوده و در نمودار شکل (۲) نشان داده شده است. در هر سطح شوری با کاهش یافتن مقدار آب آبیاری مورد نیاز گیاه عملکرد بیولوژیکی آن کاهش یافته است؛ به طوری که در فصل پاییز بیشترین مقدار عملکرد بیولوژیکی در تیمار S1I2 برابر ۱۴/۴۳ تن در هکتار اما تیمار S4I3 با ۷۰ درصد کاهش نسبت به تیمار S1I2، عملکرد بیولوژیکی برابر ۴/۲ تن در هکتار داشت که در مقایسه با دیگر تیمارها، کم‌ترین بود. همچنین بیشترین و کمترین مقدار عملکرد بیولوژیکی با مقادیر ۱۰/۱۴ و ۱/۹۵ به ترتیب برای تیمارهای S1I1 و S4I3 در فصل بهار مشاهده گردید. در تحقیق پیغان و همکاران اثر متقابل تنش شوری و کم‌آبی بر عملکرد بیولوژیکی معنی‌دار نبود اما در هر سطح شوری با افزایش تنش آبی مقدار عملکرد بیولوژیکی کاهش پیدا کرد (Peyghan et al., 2020).

تحلیل حساسیت و داده‌های ورودی

قبل از واسنجی، تحلیل حساسیت مدل AquaCrop نسبت به پارامترهای ورودی انجام شد و نتایج در جدول (۶) ارائه شده است. حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ضریب رشد پوشش گیاهی، پوشش گیاهی حداکثر، ضریب کاهش پوشش گیاهی، بیشینه طول ریشه، بهره‌وری آب نرمال و تبخیر و تعرق پتانسیل بیشتر از سایر پارامترها می‌باشد این نتایج با نتایج سایر محققان (حسینی و

جدول ۶- ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل

پارامترهای ورودی	کشت پاییز		درجه حساسیت	کشت بهار	
	مقدار Sc در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪		مقدار Sc در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪
دمای پایه	<۱	<۱	کم	<۱	<۱
دمای بالا	<۱	<۱	کم	<۱	<۱
پوشش اولیه گیاه %	۱/۴۳	۱/۷۹	کم	۲/۱۰	متوسط
ضریب رشد پوشش گیاهی	۱۸/۳۹	۱۴/۲۹	زیاد	۱۱/۴۲	متوسط
پوشش گیاهی حداکثر	۲۵	۳۷/۵	زیاد	۱/۱۷	متوسط
ضریب کاهش پوشش گیاهی	۱۲/۵	۳۹/۲۹	زیاد	۸/۶۲	زیاد
بیشینه طول ریشه	۲۱/۴۳	۱۰/۷۱	زیاد	۳/۹۶	زیاد
بهره‌وری آب نرمال	۲۰/۵۴	۲۳/۲۱	زیاد	۲۳/۷۸	زیاد
شاخص برداشت	۲۳/۷۵	۲۶/۶۱	زیاد	۲۶/۸۱	زیاد
فاکتور تخلیه برای بسته شدن روزنه‌ها	<۱	<۱	کم	<۱	کم
فاکتور تنش برای پیری پوشش گیاهی	۱/۷۹	۱/۷۹	کم	<۱	کم
حداکثر دما	<۱	<۱	کم	<۱	کم
حداقل دما	<۱	<۱	کم	<۱	کم
تبخیر و تعرق پتانسیل	۴۱	۲۵	زیاد	۴/۷	زیاد

خوب مدل در شبیه‌سازی بود. کارایی مدل بر اساس آماره‌های EF و d با مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کینوا بود.

حسینی و همکاران در پژوهش خود برای ارزیابی عملکرد سویا با مدل AquaCrop در شرایط شوری و کم‌آبی، مقدار آماره EF و d را به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۹۸ برای عملکرد دانه و ۰/۸۱ و ۰/۹۴ برای عملکرد بیولوژیکی گزارش کردند. همچنین گلابی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهش خود در شرایط آبیاری کامل و تاریخ کشت‌های متفاوت بر روی ارقام مختلف کینوا مقادیر آماره EF و d را به‌طور مشابه برای عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی برابر با ۰/۹۹ گزارش کردند.

در شرایط آبیاری یکسان با افزایش شوری آب آبیاری فشار اسمزی نیز افزایش یافته و آب قابل جذب برای گیاه کاهش می‌یابد. بنابراین در این شرایط گیاه سریع‌تر تحت تنش آبی قرار می‌گیرد. طبق نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده عملکرد بیولوژیکی، حداقل و حداکثر خطای مدل مقدار به ترتیب برای تیمارهای S3I1 و S4I1 در فصل پاییز و برای تیمارهای S1I2 و S3I3 در فصل بهار بود.

شاخص‌های ارزیابی مدل برای مرحله واسنجی در جدول (۸) ارائه شد. بر اساس آماره NRMSE مدل در مرحله واسنجی با دقت عالی عملکرد بیولوژیکی در فصل بهار را پیش‌بینی کرد همچنین مقدار این پارامتر برای شبیه‌سازی عملکرد دانه در فصل پاییز، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی در فصل بهار با مقدار کمتر از ۰/۲ بیانگر دقت

جدول (۷) پارامترهای واسنجی شده مدل برای شبیه‌سازی عملکرد گیاه کینوا در دو فصل پاییز و بهار

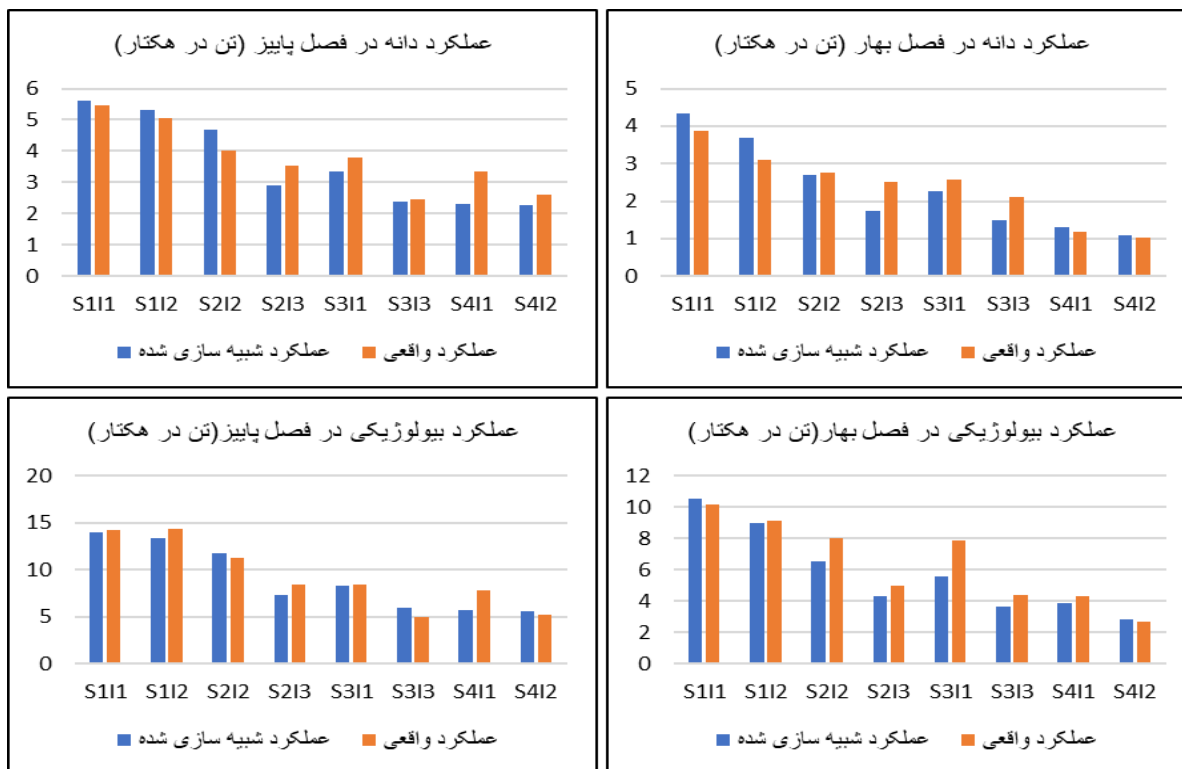
پارامترها	واحد	کشت پاییز	روشن واسنجی	کشت بهار	روشن واسنجی
دمای پایه	°C	۲	پیش فرض	۲	پیش فرض
دمای بالا	°C	۳۰	پیش فرض	۳۰	پیش فرض
پوشش اولیه گیاه	%	۱/۳	پیش فرض	۱/۳	پیش فرض
ضریب رشد پوشش گیاهی	%/day	۱۳/۷	اندازه‌گیری	۱۲	اندازه‌گیری
پوشش گیاهی حداکثر	%	۷۵	اندازه‌گیری	۶۱	اندازه‌گیری
ضریب کاهش پوشش گیاهی	%/day	۹/۹	اندازه‌گیری	۷/۳	اندازه‌گیری
بیشینه طول ریشه	m	۰/۳	اندازه‌گیری	۰/۳	اندازه‌گیری
بهره‌وری آب نرمال	g.m ²	۲۸	واسنجی	۲۴	واسنجی
شاخص برداشت	%	۵۰	پیش فرض	۴۲	واسنجی
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش پوشش گیاهی	-	۰/۳۵	واسنجی	۰/۵	پیش فرض
آستانه پایین ضریب تنش آبی خاک برای گسترش پوشش گیاهی	-	۰/۶	واسنجی	۰/۸	پیش فرض
آستانه بالای ضریب تنش برای بسته شدن روزنه‌ها	-	۰/۶	پیش فرض	۰/۷۲	واسنجی
آستانه بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش گیاهی	-	۰/۸	واسنجی	۰/۹۵	پیش فرض

مدل AquaCrop در این پژوهش تحت شرایط تنش شوری و تنش آبی دقت قابل قبولی از خود نشان داد بنابراین با استفاده از پارامترهای ورودی واسنجی شده، مرحله صحت‌سنجی مدل با استفاده از دیگر تیمارهای باقی‌مانده انجام گرفت.

در پژوهش الوار بلتران و همکاران مقادیر NRSME و R² در شرایط تنش آبی برای گیاه کینوا در مرحله واسنجی برای عملکرد دانه ۰/۱۸ و ۰/۸۴ و برای عملکرد بیولوژیکی ۰/۱۴ و ۰/۹۹ مشاهده شد (Alvar-Beltrán et al., 2021). با توجه به نتایج ارزیابی آماری،

جدول ۸- شاخص‌های آماری ارزیابی مرحله واسنجی مدل AquaCrop

شاخص آماری	فصل پاییز		فصل بهار	
	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیکی	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیکی
NRMSE	۰/۱۴	۰/۱۰	۰/۱۸	۰/۱۶
EF	۰/۷۰	۰/۹۱	۰/۷۴	۰/۸۲
R ²	۰/۸۸	۰/۹۲	۰/۸۵	۰/۹۰
d	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۶	۰/۹۶



شکل ۳- نتایج واسنجی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی تحت تیمارهای مختلف شوری و کم‌آبیاری

مناسبی از خود نشان داده است. در بررسی نمودار عملکرد بیولوژیکی در مرحله صحت‌سنجی مدل برای فصل پاییز و بهار مشاهده شد کمترین میزان اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده به‌طور مشابه مربوط به تیمار S1I3 به‌دست آمد. همچنین بیشترین اختلاف بین مقادیر ذکر شده در فصل پاییز برای تیمار S3I2 و در فصل بهار برای تیمار S4I3 مشاهده شد. نمودار مقایسه عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد مدل در شوری‌های پایین و بین تیمارهای کم‌آبی دقت مناسبی از خود نشان می‌دهد اما با افزایش شوری مدل در برآورد عملکردهای یادشده در برخی مواقع دچار خطای بیش‌برآورد و خطای کم‌برآورد می‌شود؛ که در این مورد مهر آذر و همکاران (۱۳۹۵) نیز مطالبی را بیان داشتند.

با افزایش شوری تمایل مدل برای بیش‌برآورد مقادیر شبیه‌سازی‌شده نسبت به اندازه‌گیری‌شده بیشتر می‌شود. با توجه به جدول (۸) آماره NRSME با مقادیر کمتر از ۰/۲ برای مرحله صحت‌سنجی در فصل پاییز و بهار در محدوده دقت خوب و مناسب ارزیابی شد. همچنین شاخص‌های آماری EF، R^2 و d با مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده دقت مناسب مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد بیولوژیکی در این پژوهش بود. در تحقیق الوار بلتران و همکاران در مرحله صحت‌سنجی آماره‌های NRMSE و

صحت‌سنجی مدل

با توجه به نمودار شکل (۴) کمترین و بیشترین اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده عملکرد دانه در فصل پاییز و بهار به‌طور مشابه به ترتیب برای S2I1 و S3I2 مشاهده شده است؛ و نشان‌دهنده این است که با افزایش شوری مدل دچار خطای شبیه‌سازی‌شده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop نشان داد با کاهش مقدار آب آبیاری و افزایش سطح شوری، رشد گیاه کاهش یافته و در نتیجه مقدار عملکرد دانه کاهش یافته است. خرسند و همکاران (۱۳۹۳) بیان داشتند که مدل AquaCrop در تخمین شوری خاک از دقت مناسبی برخوردار نیست. به نظر می‌رسد عدم توانایی مدل در شبیه‌سازی روند شوری خاک سبب شده است که در شوری‌های بالا مدل دچار خطای شبیه‌سازی از نوع کم‌برآورد شده باشد. شاخص‌های آماری ارزیابی مدل در جدول (۹) ارائه شده است. مقدار آماره NRMSE و EF در مرحله صحت‌سنجی مدل برای فصل پاییز برابر ۰/۱۸ و ۰/۷۵ آمد که بیانگر دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه بود؛ اما بر اساس شاخص‌های R^2 و d به ترتیب با مقادیر ۰/۷۴ و ۰/۹۱ مدل با دقت متوسط مقادیر عملکرد دانه را شبیه‌سازی کرده است. ارزیابی شاخص‌های آماری در عملکرد دانه فصل بهار نشان می‌دهد که مدل با مقادیر ۰/۱۵، ۰/۸۶، ۰/۹۴ و ۰/۹۶ به ترتیب برای آماره‌های NRMSE، EF، R^2 و d دقت

و همکاران (۱۳۹۵) برای عملکرد دانه ۰/۸۸ و ۰/۹۷ و برای عملکرد بیولوژیکی ۰/۷۷ و ۰/۹۵ مشاهده گردید.

R² به ترتیب برای عملکرد دانه ۹/۲ و ۰/۹۵ و برابری عملکرد بیولوژیکی به ترتیب برابر ۱۴/۸ و ۰/۸۴ گزارش گردید (Alvar-Beltrán et al., 2021). مقادیر آماره‌های EF و d در تحقیق حسینی



شکل ۴- نتایج صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی تحت تیمارهای مختلف شوری و کم‌آبایی

جدول ۹- شاخص‌های آماری ارزیابی مرحله صحت‌سنجی مدل AquaCrop

شاخص آماری	فصل پاییز		فصل بهار	
	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیکی	عملکرد دانه	عملکرد بیولوژیکی
NRMSE	۰/۱۸	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۹
EF	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۸۶	۰/۷۷
R ²	۰/۷۴	۰/۹۸	۰/۹۴	۰/۹۷
d	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۵

نتیجه‌گیری

۲۹/۰۹ و ۳۷/۴۲ درصد و در فصل بهار به ترتیب و ۳۰ و ۳۶ درصد کاهش داد. با بررسی نتایج به دست آمده می‌توان این چنین نتیجه گرفت که تنش شوری در مقایسه با تنش آبی تاثیر بیشتری بر کاهش عملکرد و اجزای عملکرد کینوا داشته است. مدل AquaCrop با استفاده از داده‌های حاصل از کشت گیاه کینوا در دو فصل پاییز و بهار به صورت مجزا واسنجی و صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی بر اساس شاخص‌های آماری؛ مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی دقت قابل قبولی از خود نشان داد؛ اما دقت مدل در صحت‌سنجی عملکرد دانه در فصل پاییز

در این پژوهش اثر آبیاری با زه‌آب کشاورزی در سطوح مختلف شوری و کم‌آبی بر روی گیاه کینوا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از تجزیه واریانس نشان داد که شوری و کم‌آبی بر روی عملکرد کینوا اثر کاهشی معنی‌داری داشته است. شوری آب میزان عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی را به میزان ۴۷/۳۸ و ۵۳/۰۸ درصد در فصل پاییز و ۵۹ و ۶۷ درصد در فصل بهار کاهش داد در صورتی که تنش آبی عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیکی در فصل پاییز را به ترتیب

بر عملکرد، اجزای عملکرد و درصد روغن دانه دو رقم گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L) بهاره. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران. ۱۲ (۲): ۲۶۴-۲۷۲.

بیرامی، ح.، پرویزی، ح.، پرنیان، ا. و حاتمی، ح. ۱۴۰۳. اثر سطوح مختلف رطوبتی و شوری بر برخی صفات مورفولوژیک و عملکرد کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd) در شرایط مزرعه‌ای. مهندسی زراعی ۴۷(۱): ۱۱۱-۱۲۷.

توکلی، ع.، لیاقت، ع. و علیزاده، ا. ۱۳۹۲. بررسی موازنه آب خاک، تاریخ کاشت و عملکرد گندم با استفاده از مدل AquaCrop در شرایط دیم و آبیاری محدود. تحقیقات مهندسی صنایع غذایی، ۱۴(۴): ۴۱-۵۶.

حسینی، س. ط.، خوش روش، م.، ضیاءتبار احمدی، م. و قدمی فیروزآبادی، ع. ۱۳۹۵. ارزیابی عملکرد سویا با مدل AquaCrop تحت تاثیر مدیریت شوری و کم‌آبیاری. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۰ (۳): ۳۶۱-۳۷۲.

حیدری‌نیا، م.، برومندنسب، س.، ناصری، ع. و الباجی، م. ۱۳۹۶. ارزیابی مدل AquaCrop در تخمین عملکرد ذرت و شوری خاک تحت شرایط مدیریت‌های مختلف زراعی و آبیاری با آب‌شور. تحقیقات آب‌و خاک ایران، ۴۸(۱): ۴۹-۶۱.

خرسند، ا.، وردی نژاد، و.ر. و شهیدی، ع. ۱۳۹۳. ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در پیش بینی عملکرد گندم، رطوبت و شوری نیمرخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم‌آبی. مدیریت آب و آبیاری، ۴(۱): ۸۹-۱۰۴.

دره‌کی، غ.، زمانی، غ. و سیاری، م. ۱۳۹۶. بررسی اثر تنش شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد نخود (*Cicer arietinum* L). رقم آزاد. پژوهش‌های حبوبات ایران، ۹(۱): ۶۸-۵۷.

سیلسپور، م. ۱۴۰۰. اثر سطوح مختلف شوری آب بر ویژگی‌های جوانه‌زنی دو رقم کینوا (*Chenopodium quinoa* Willd). پژوهش آب در کشاورزی. ۳۵(۳): ۳۰۱-۲۸۷. doi: 10.22092/jwra.2021.355073.877

علیار، س.، علی اصغرزاد، ن.، دباغ محمدی نسب، ع. و اوستان، ع. ۱۴۰۱. اثر قارچ اندوفیت سیرنیدیپیتا ایندیکا بر خصوصیات رشدی و تغذیه گیاه کینوا تحت تنش شوری. زیست‌شناسی خاک. ۱۰(۱): ۱-۲۰.

گلایبی، م.، لک، ش.، گیلانی، ع.، علوی فاضل، م. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی عملکرد و زیست توده کینوا تحت مدیریت‌های مختلف زراعی با استفاده از مدل AquaCrop. تحقیقات علوم زراعی در مناطق خشک، ۵(۲): ۴۴۷-۴۶۴.

کمر از دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه (در فصل بهار) و عملکرد بیولوژیکی (در هر دو فصل پاییز و بهار) بود. در استان خوزستان تولید زه‌آب حاصل از فعالیت‌های مختلف به‌ویژه کشاورزی یکی از مشکلات جدی است، در این استان در مجموع نزدیک به چهار میلیارد مترمکعب زه‌آب تولید می‌شود (مختاران و همکاران، ۱۳۹۹). نیاز فزاینده به غذا و افزایش محصولات کشاورزی و در نتیجه آن افزایش تقاضا برای آب از یک سو و اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی زه‌آب‌های کشاورزی بر زیست‌بوم‌های طبیعی و منابع پذیرنده آب از سوی دیگر، جستجوی روش‌ها و راه‌کارهای کاهش اثرات دفع زه‌آب به لحاظ مدیریتی و فناوری را سبب شده است. ارزش غذایی بسیار بالای دانه کینوا به‌عنوان پروتئین گیاهی یک جایگزین مناسب برای گندم محسوب می‌شود. پروتئین موجود در کینوا از معدود پروتئین‌های غیر حیوانی است که از نظر کمی و کیفی بهتر از دانه سایر غلات است. از طرفی با توجه به محدودیت منابع آب شیرین و وجود شبکه‌های زهکشی در استان خوزستان و نتایج حاصل از این تحقیق در شرایط محدودیت آب از لحاظ کمی و کیفی می‌توان از زه‌آب کشاورزی به‌عنوان یک منبع نامتعارف آب آبیاری استفاده کرد. با توجه به اینکه پژوهشی در زمینه‌ی ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه کینوا در شرایط تنش شوری و کم‌آبی و همچنین کشت بهاره گیاه کینوا در اهواز مشاهده نشده است، امکان مقایسه نتایج در شرایط مشابه با این تحقیق وجود نداشت؛ بنابراین به‌منظور تکمیل نتایج این پژوهش، نویسندگان این مقاله پیشنهاد می‌کنند کشت گیاه در طی چند فصل کشت بهاره تحت شرایط شوری و کم‌آبی با روش‌های آبیاری مختلف انجام گردد و عملکرد آن تعیین شود. همچنین پیشنهاد می‌شود واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد کینوا در شرایط مجزا تنش شوری، تنش آبی و شرایط تنش شوری و کم‌آبی توأم مورد بررسی قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این مقاله از پایان‌نامه دوره دکترای تخصصی در دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز استخراج شده است. بدینوسیله از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.WI1402.281) تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

امداد، م.، تافته، آ. و ابراهیمی پاک، ن. ۱۴۰۱. کارایی مدل آکوآکراپ در شبیه‌سازی عملکرد کینوا در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری. مجله آب و خاک، ۳۶(۳): ۳۱۹-۳۳۱.

بهادر خواه، ف. و کاظمینی، س. ع. ۱۳۹۳. اثر شوری و روش کاشت

- to water. Irrigation and Drainage. Paper, No. 33. FAO, Rome.
- Geerts. S. D., Raes. M., Gracia. R., Miranda. J. A., Cusicanqui, C., Taboada. J., Mendoza. R., Huanca. A., Mamani. O., Condori. J., Mamani. B., Morales, V. and Osco. P. 2009. Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*. 101(3): 499-508.
- Hariadi. Y., Marandon. K., Tian. Y., Jacobsen. S.E. and Shabala. S. 2011. Ionic and osmotic relations in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) plants grown at various salinity levels. *Journal of experimental botany*. 62(1): 185-193.
- Iqbal. M. A., Shen. Y., Stricevic. R., Pei. H., Sun. H., Amiri. E., Penas. A. and Rio. S. 2014. Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*. 135: 61-72.
- Jacobsen. S. E., Mujica. A. and Jensen. C. R. 2003. The Resistance of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to Adverse Abiotic Factors. *Food Reviews International*. 19(1-2): 99-109.
- Jacobsen. S. E., Monteros. C., Christiansen. J. L., Bravo. L. A., Corcuera. L. J. and Mujica. A. 2005. Plant responses of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to frost at various phenological stages. *European Journal of Agronomy*. 22(2): 131-139.
- Koyro. H. W. and Eisa. S. S. 2008. Effect of salinity on composition, viability and germination of seeds of *Chenopodium quinoa* Willd. *Plant and Soil*. 302: 79-90.
- Kumar. P., Sarangi. A., Singh. D. K. and Parihar. S. S. 2014. Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and productivity under irrigated saline regimes. *Irrigation and Drainage*. 63(4): 474-487.
- Long. N. V. 2016. Effects of salinity stress on growth and yield of quinoa. *Vietnam Journal of Agricultural Sciences*. 14 (3): 321-327.
- Mohammadi. H., Rahimpour. B., Pirasteh-Anosheh. H. and Race. M. 2022. Salicylic acid manipulates ion accumulation and distribution in favor of salinity tolerance in *Chenopodium quinoa*. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(3). 1576.
- Nash. J. E. and Sutcliffe. J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*. 10(3): 282-290.
- Peyghan. K., Golabi. M. and Albaji. M. 2020. Simulation of quinoa (*Chenopodium quinoa*) yield and soil salinity under salinity and water stress using the SALTMED model. *Communications in Soil*
- محمدی، م، قهرمان، ب، داوری، ک، انصاری، ح. و شهیدی، ع. ۱۳۹۴. اعتبار سنجی مدل AquaCrop به منظور شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب گندم زمستانه تحت شرایط همزمان تنش شوری و خشکی. نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۹(۱): ۶۷-۸۴.
- مختاران، ع، طاووسی، م، ورجاوند، پ، و سپهری صادقیان، س. ۱۳۹۹. بررسی اثرات استفاده از زهاب مزارع نیشکر جنوب خوزستان در کشت گیاه کینوا بر عملکرد محصول و تغییرات شوری و سدیمی خاک. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۳۴(۳): ۳۳۷-۳۵۴.
- مسکینی ویشکایی، ف، تافته، آ، جعفرنژادی، ع، و گوشه، م. ۱۴۰۱. بررسی اثر تنش کم‌آبی دوره ای بر عملکرد گیاه کینوا و تعیین تابع تولید آب مصرفی-عملکرد آن در خاک شور (مطالعه موردی: استان خوزستان). نشریه آبیاری و زهکشی ایران ۶(۱۶): ۱۲۵۵-۱۲۶۵.
- مهر آذر، آ، سلطانی، ج. و رحمتی، ا. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت (*Zea mays* L) تحت شرایط تنش شوری. آب‌و خاک، ۳۰(۵): ۱۴۲۶-۱۴۳۹.
- Alvar-Beltrán. J., Gobin. A., Orlandini. S. and Dalla Marta. A. 2021. AquaCrop parametrisation for quinoa in arid environments. *Italian Journal of Agronomy*. 16(1). <https://doi.org/10.4081/ija.2020.1749>.
- Bois. J.F., Winkel. T., Lhomme. J.P., Raffailac, J.P. and Rocheteau. A. 2006. Response of some Andean cultivars of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) to temperature effects on germination, phenology, growth and freezing. *European Journal of Agronomy*. 25(4): 299-308.
- Bouras. H., Choukr-Allah. R., Amouaouch. Y., Bouaziz. A., Devkota. K. P., El Mouttaqi. A. and Hirich. A. 2022. How Does Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Respond to Phosphorus Fertilization and Irrigation Water Salinity?. *Plants*, 11(2), 216.
- Cocozza. C., Pulvento, C., Lavini. A., Riccardi. M., d'Andria. R. and Tognetti. R. 2013. Effects of Increasing Salinity Stress and Decreasing Water Availability on Ecophysiological Traits of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) Grown in a Mediterranean Type Agroecosystem. *Journal of Agronomy and Crop Science* 199(4): 229-240.
- Cai. Z. Q. and Gao. Q. 2020. Comparative physiological and biochemical mechanisms of salt tolerance in five contrasting highland quinoa cultivars. *BMC Plant Biology*. 20(1): 1-15.
- Doorenbos. J. and Kassam. A. H. 1979. Yield response

2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Journal of Irrigation Science*. 25: 189-207.
- Talebnejad. R. and Sepaskhah. A. R. 2015. Effect of different saline groundwater depths and irrigation water salinities on yield and water use of quinoa in lysimeter. *Agricultural Water Management*. 148(Supplement C): 177-188.
- Telahigue. D.C., Yahia. L.B., Aljane. F., Belhouchett. K. and Toumi. L. 2017. Grain yield, biomass productivity and water use efficiency in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress. *Journal of scientific agriculture*. 1:222-232.
- Vacher. J. J. 1998. Responses of two main Andean crops, quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) and papa amarga (*Solanum juzepczukii* Buk.) to drought on the Bolivian Altiplano: significance of local adaptation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 68: 99-108.
- Wilmot. C.J. 1982. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Meteorological Society*. 64: 1309-1313.
- Science and Plant Analysis. 51(18): 2361-2376.
- Pulvento. C., Riccardi. M., Lavini. A., Iafelice. G., Marconi. E. and d'Andria. R. 2012. Yield and Quality Characteristics of Quinoa Grown in Open Field Under Different Saline and Non-Saline Irrigation Regimes. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 198(4): 254-263.
- Raes. D., Steduto. P., Hsiao. T. C. and Fereres. E. 2018. Reference manual AquaCrop. FAO. Land and Water Division. Rome. Italy.
- Raes. D., Steduto. P., Hsiao. T. C., and Fereres. E. 2012. Reference manual AquaCrop. FAO. Land and Water Division. Rome. Italy.
- Razzaghi. F., Ahmadi. S. H., Adolf. V. I., Jensen. C. R., Jacobsen. S. E. and Andersen. M. N. 2011. Water relations and transpiration of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under salinity and soil drying. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 197: 348-360
- Steduto. P., Hsiao. T. C., Raes. D. and Fereres. E. 2009. AquaCrop- The FAO crop model to simulate yield response to water: Concepts and underlying principles *Agronomy Journal*. 101:426-437.
- Steduto. P., Hsiao. T. C., Raes. D. and Fereres. E.

Evaluation of AquaCrop Model to Simulate Quinoa Crop Performance under Salinity and Water Stress Conditions (under Ahvaz Climatic Conditions)

S. Zandi¹, M. Golabi ^{*2}, S. Borumandnasab ³

Received: Jun.28, 2023

Accepted: Sep.18, 2023

Abstract

To determine optimal irrigation management and crop yield, the use of simulation models is an appropriate tool. AquaCrop is one of the practical models used for simulating yield variations under different water and soil management scenarios. This study investigates the interactive effects of salinity and water stress, as well as the utilization of drainage water irrigation, on the yield of quinoa and to simulate it using the AquaCrop model in an experimental field in the Faculty of Water and Environmental Engineering of Shahid Chamran University of Ahvaz in 2022-2023. This experiment was based on a system of split-plot experiment with a randomized, complete block design with three replications. The four salinity levels tested were 2, 10, 15, and 20 dS/m, and three irrigation regimes used were full irrigation, 80% of crop water requirement, and 60% of crop water requirement. The results indicated that the highest and lowest grain yields were 5.45 and 1.8 t/ha in autumn and 3.87 and 0.73 t/ha in spring, respectively, in treatments S1I1 and S4I3. Various statistical analysis showed that the AquaCrop model had an acceptable accuracy in simulating quinoa yield, with NRMSE values less than 0.2 during the calibration phase. The statistical indices EF, R², and d during the model validation phase (0.70, 0.88, and 0.97 in autumn and 0.74, 0.85, and 0.97 in spring) approached one, indicating adequate model accuracy in simulating grain yield. However, the model's accuracy in simulating grain yield during autumn in the validation phase with NRMSE, EF, R², and d values of 0.18, 0.75, 0.74, and 0.83, respectively, was lower than its accuracy in simulating grain yield during spring seasons. Overall, the AquaCrop model exhibited acceptable accuracy in simulating quinoa yield under salinity and water stress conditions.

Keywords: Agricultural drainage water, Modeling, Salinized agriculture, Yield simulation

1- PhD Candidate, Department of Irrigation and Drainage, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

3- Professor, Department of Irrigation and Drainage, Faculty of Water and Environmental Engineering, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: Mona_golabi@yahoo.com)