

واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره تحت

تنش همزمان شوری و خشکی

مسعود محمدی، کامران داوری^{۱*}، بیژن قهرمان، حسین انصاری و امیر حق‌وردی

دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

Mmohammadi_64@yahoo.com

دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

kamdav@um.ac.ir

استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

bijangh@um.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

ansari_hos@yahoo.com

استادیار مدیریت آب و آبیاری، مرکز تحقیقات و توسعه پین‌هندل، دانشگاه نبراسکا لینکلن.

ahaghverdi2@unl.edu

چکیده

مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه از جمله مدل AquaCrop برای پیش‌بینی اثرات آب و شوری بر روی عملکرد دانه، زیست توده و کارایی مصرف آب گیاهان مختلفی توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها برای مناطق مختلف با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در مزرعه واسنجی و صحت‌سنجی می‌شوند. این مطالعه به منظور اعتبار سنجی مدل AquaCrop تحت تنش همزمان شوری و کم‌آبی، در دو سال زراعی ۱۳۸۸-۸۹ و ۱۳۸۹-۹۰ بر روی گندم بهاره در مشهد اجرا گردید. از داده‌های زراعی سال اول برای واسنجی مدل و داده‌های زراعی سال دوم برای صحت‌سنجی مدل استفاده شدند. مقادیر متوسط ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، حداکثر خطای نرمال شده (NME)، شاخص سازگاری (d)، ضریب باقیمانده (CRM) و ضریب تعیین (R^2) در دو حالت واسنجی و صحت‌سنجی (در دو سال) برای عملکرد دانه به ترتیب ۱۳/۳ درصد، ۳۶/۱ درصد، ۰/۹۵، ۰/۷۲- و ۰/۸۷ و برای زیست توده به ترتیب ۱۲/۵۹ درصد، ۳۴/۴۶ درصد، ۰/۹۲، ۰/۵۷ و ۰/۷۷ بدست آمد. همچنین مقادیر متوسط NRMSE، d، ME، CRM برای رطوبت خاک به ترتیب ۱۱/۸۴ درصد، ۲۵/۷۲ درصد، ۰/۹۳ و ۰/۳۲ و برای شوری خاک به ترتیب ۲۶/۲۵ درصد، ۵۸/۵ درصد، ۰/۹۱ و ۰/۱۲- بدست آمد. نتایج نشان داد که عملکرد محصول، زیست توده، کارایی مصرف آب، شاخص برداشت، رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک برای گندم در شرایط شوری و کم‌آبی به خوبی شبیه‌سازی شدند هر چند که دقت مدل در شبیه‌سازی شاخص برداشت و شوری نیم‌رخ خاک کمتر از سایر پارامترها بود. تحلیل حساسیت نشان داد که مدل نسبت به ضریب گیاهی مربوط به تعرق (Kc-Tr)، بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*)، شاخص برداشت (HIo)، رطوبت در ظرفیت زراعی، شرایط اولیه رطوبت خاک و دمای هوا حساس‌تر از سایر پارامترهاست. هر چند دقت پیش‌بینی مدل با افزایش تنش‌های شوری و خشکی کمی کاهش یافت اما AquaCrop می‌تواند مدلی ارزشمند برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره و شبیه‌سازی رطوبت و شوری در منطقه مشهد باشد. زیرا مدل به پارامترهای ورودی کم نیاز دارد که به آسانی قابل دسترس هستند و یا قابل جمع‌آوری می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، تنش محیطی، زیست توده، مدل سازی گیاهی.

^۱- آدرس نویسنده مسؤل : مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی آب.

* - دریافت : مهر ۱۳۹۳ و پذیرش : مرداد ۱۳۹۴.

مقدمه

تولید غذای کافی برای تغذیه بهتر مردم و همچنین درآمد کافی برای کشاورزان یکی از مهمترین عوامل مصرف آب در ایران می‌باشند، بخصوص در سال ۲۰۳۰ که پیش‌بینی شده است جمعیت ایران به حدود ۱۰۰ میلیون نفر می‌رسد و با کمبود شدیدتر آب مواجه خواهیم شد (سالمی و همکاران، ۲۰۱۱). یکی از راه‌حل‌های مواجهه با مشکل کمبود آب مناسب افزایش بازده مصرف آب یا استفاده از آب‌های شور می‌باشد. گندم یکی از مهم‌ترین گیاهان در جهان است (بهره و پاندا، ۲۰۰۹) و از این رو مدیریت آب گندم توجه ویژه‌ای را به خود می‌طلبد. در ایران به واسطه فرهنگ غذایی در میان محصولات کشاورزی، گندم جایگاه بسیار مهمتری دارد. گندم بهاره در مواجهه با مشکلات مطرح شده در ارتباط با کمبود آب، مصرف آب را کاهش داده و بهره‌وری را افزایش می‌دهد. زیرا دوره رشد کوتاه‌تری نسبت به گندم زمستانه دارد (حق وردی و همکاران، ۲۰۱۴). مدل‌های شبیه‌سازی که اثر آب و شوری را روی عملکرد گیاه تخمین می‌زنند، ابزار مناسبی در مدیریت آبیاری می‌باشند. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، محدودیت‌های موجود در تحقیقات صحرایی را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داده و آن‌ها را تبدیل به ابزاری توانا در بررسی و تحلیل سناریوهای مختلف و انتخاب مدیریت مناسب آب کرده است (وندام و همکاران، ۲۰۰۸). دقت نتایج حاصل از مدل‌های شبیه‌سازی به دقت داده‌های مورد نیاز بستگی داشته و در صورت دسترسی به این داده‌ها و واسنجی صحیح، این مدل‌ها می‌توانند بدون محدودیت‌های مکانی و زمانی موجود در تحقیقات صحرایی و صرف هزینه و زمان کمتر جهت ارزیابی مدیریت‌های مختلف آبیاری و اثرات درازمدت این مدیریت‌ها به کار گرفته شوند (سینگ، ۲۰۰۴). بنابراین این مدل‌ها توصیه‌های عملی را برای کشاورزان و کسانی که به صورت گسترده بر روی برنامه‌ریزی کم‌آبیاری و استفاده از آب شور تحت شرایط مختلف تأمین آب و

شرایط مختلف مدیریت محصول کار می‌کنند، فراهم می‌نمایند (کائو و همکاران، ۲۰۰۶). در چند دهه گذشته مدل‌های زیادی برای مطالعه مدیریت آبیاری در سطح مزرعه معرفی و به کار برده شده‌اند از جمله می‌توان به مدل SWAP (کروس و وندام، ۲۰۰۸) اشاره نمود که بر اساس معادلات جریان آب و املاح در خاک (معادله ریچاردز) عمل می‌کند و از مدل‌های بسیار کاربردی می‌باشد که برای توازن آب و املاح در شرایط وجود پوشش گیاهی و همچنین برای مدیریت آبیاری استفاده می‌شود. مدل‌های زراعی مانند مدل SOYMOD (میر و همکاران، ۱۹۸۱)، CERES (جسونز و همکاران، ۱۹۸۶)، SOYGRO (اگلسی و برونینگ، ۱۹۹۲) و APSIM (مارینو و همکاران، ۲۰۰۵) و برخی دیگر از مدل‌ها مانند CropSyst (تودوریچ و همکاران، ۲۰۰۹) هم وجود دارند که به صورت تک گیاهی عمل می‌کنند.

در این مدل‌ها یکی از معیارهای اصلی، مطالعه میزان سطح شاخص برگ (LAI) می‌باشد. استفاده از بیشتر این مدل‌ها به دلیل نیاز به واسنجی و اعتبارسنجی بسیار پیچیده، نیاز به داده‌های ورودی زیاد و تغییرپذیری زیاد داده‌های ورودی، دشوار می‌باشد. این مدل‌ها همچنین برای دامنه وسیعی از گونه‌های زراعی و گیاهی و مکان‌های مختلف دنیا غیرقابل دسترسی هستند (تودوریچ و همکاران، ۲۰۰۹). یکی از مدل‌های زراعی کاربردی، مدل AquaCrop می‌باشد که از اصلاح و بازنگری نشریه شماره ۳۳ فائو توسط متخصصان برجسته از سرتاسر جهان به دست آمده است. اصول اساسی مدل برای شبیه‌سازی فرآیندها توسط استدیوتو و همکاران (۲۰۰۹) و الگوریتم مورد استفاده در نرم افزار مدل و توصیف عملیات توسط رائس و همکاران (۲۰۰۹) ارائه شده است. یکی از پارامترهای اصلی در رشد و نمو محصولات کشاورزی، تبخیر - تعرق است که خود به دو مؤلفه تبخیر از سطح خاک و تعرق از سطح گیاه تفکیک می‌شود. آنچه به عنوان بخش مولد محسوب می‌شود، تعرق

نمودند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل توانسته است رطوبت ناحیه ریشه، زیست توده و عملکرد دانه را با دقت مناسبی شبیه‌سازی نماید. شمس‌نیا و پیرمردیان (۲۰۱۳) عملکرد گندم دیم را با استفاده از مدل AquaCrop در شرایط تغییرات و نوسانات اقلیمی در شیراز شبیه‌سازی کردند. آنها گزارش کردند که نوسانات اقلیمی بر عملکرد گندم دیم تأثیر گذار بوده و مدل AquaCrop توانسته است با دقت مطلوبی عملکرد گندم دیم در منطقه مورد مطالعه شبیه‌سازی نماید. نتایج سالمی و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که مدل به خوبی می‌تواند در شرایط کم‌آبایی و آبیاری کامل عملکرد و زیست توده گندم را شبیه‌سازی نماید. کومار و همکاران (۲۰۱۴) پس از ارزیابی مدل AquaCrop در شهر دهلی هندوستان برای چهار رقم گندم (سه رقم مقاوم به شوری و یک رقم غیر مقاوم به شوری) و چهار سطح شوری آب آبیاری، گزارش کردند که مدل دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد محصول، زیست توده و کارایی مصرف آب دارد. اما دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول بیشتر از زیست توده و کارایی مصرف آب بود. علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) کارایی مدل AquaCrop را در منطقه کرج در کشت گندم برای تیمارهای مختلف آبیاری ارزیابی نمودند.

نتایج این تحقیق نشان داد که مدل در پیش‌بینی عملکرد دانه، تبخیر-تعرق و کارایی مصرف آب در دور آبیاری هفت روزه قابلیت خوبی داشته است، اما دقت پیش‌بینی این پارامترها در دور ۱۴ روزه کمتر بود. نتایج حسین و همکاران (۲۰۱۱) نشان داد که مدل AquaCrop در روزهای آبیاری و بین دو آبیاری با دقت مناسبی رطوبت نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی می‌نماید، اما به طور کلی مدل مقادیر رطوبت را بیش برآورد می‌کند. خابلا و بولاک (۲۰۱۲) پس از شبیه‌سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل AquaCrop در کانادا گزارش کردند که مقادیر ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، شاخص سازگاری (d) و حداکثر خطای مطلق

گیاه و بخش پوشش سبز محصول است (رائس و همکاران، ۲۰۰۹). از دیگر ویژگی‌های مدل AquaCrop این است که به جای شاخص سطح برگ از پوشش سبز سطح زمین استفاده می‌کند، که در آن شاخص درجه روز رشد اهمیتی ویژه داشته و به جای ضریب کاهش نسبی عملکرد محصول به بررسی شاخص بهره‌وری می‌پردازد. این مدل در دامنه‌ای وسیع از محصولات زراعی شامل: علوفه‌ای، سبزیجات، غلات، میوه‌ها، روغنی و غده‌ای قابل استفاده است (رائس و همکاران، ۲۰۰۹). مدل AquaCrop مدلی قدرتمند و ارزشمند برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب می‌باشد (رائس و همکاران، ۲۰۰۹). سادگی نیاز به کم‌ترین داده ورودی و دقت قابل قبول مدل از مزایای استفاده از آن می‌باشد.

مدل AquaCrop توازنی منطقی بین سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده برقرار می‌کند. این مدل تا به حال بر روی گیاهان متعدد به کار رفته است. از جمله نتایج مطالعه هسائو و همکاران (۲۰۰۹) نشان داد مدل AquaCrop به صورت مناسبی تاج پوشش، رشد وزنی زیست توده بخش هوایی و عملکرد دانه را برای چهار رقم ذرت در شش فصل رشد مختلف با تراکم، تاریخ کاشت و نیاز تعرقی مختلف با تیمارهای مختلف آبیاری شبیه‌سازی کرده است.

تودرویچ و همکاران (۲۰۰۹) دو مدل پایه‌ای قابل قبول CropSyst و WOFOST را با مدل AquaCrop در منطقه حاره‌ای مدیترانه در جنوب ایتالیا در کشت آفتابگردان تحت سه رژیم مختلف آبیاری مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop با داده‌های ورودی کمتر، زیست توده و عملکرد را در مرحله برداشت محصول مشابه با دو مدل دیگر شبیه‌سازی می‌کند. اندرزیان و همکاران (۲۰۱۱) مدل AquaCrop را در شهرستان اهواز برای محصول گندم تحت سناریوهای مختلف کم‌آبایی (در مراحل مختلف رشد گیاه و عمق آب کاربردی) ارزیابی

(MAE) به ترتیب ۰/۹، ۴۹ mm، ۰/۹۹ و ۴۰ mm بدست آمدند. همچنین عنوان کردند مدل AquaCrop ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی رطوبت خاک می‌باشد و ویژگی آن نیاز به پارامترهای ورودی کم و زودیافت می‌باشد. می‌بین و همکاران (۲۰۱۳) مدل AquaCrop را در منطقه پنسیلوانیا مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل توانسته است با دقت بالایی رطوبت نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی کند. به طوری که مقادیر RMSE برای برآورد رطوبت شش عمق خاک از ۱/۵ تا ۹/۸ درصد نوسان داشت. میزان پتانسیل منابع آب تجدید شونده استان (آب زیرزمینی و سطحی) حدود ۶۸۱۷ میلیون متر مکعب می‌باشد (آشکرک آب منطقه‌ای استان خراسان رضوی، ۱۳۹۴). در حال حاضر حدود یک میلیون هکتار از وسعت استان خراسان رضوی زیر کشت محصولات آبی و دیم قرار دارد که در این راستا خراسان رضوی از نظر سطح زیرکشت، جزء سه استان اول کشور است. شهرستان مشهد با سطح زراعی حدود ۹۰۰۰۰ هکتار که ۵۵٪ آن زیر کشت آبی و ۴۵٪ آن کشت دیم می‌باشد، جزء شهرستانهای برتر استان خراسان رضوی بدین لحاظ محسوب می‌شود. کل سطح زیر کشت گندم در شهرستان مشهد حدود ۱۵۵۰۰ هکتار آبی و ۳۱۰۰۰ هکتار به صورت دیم می‌باشد (سازمان جهاد کشاورزی استان خراسان رضوی، ۱۳۹۲).

در اکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله شهرستان مشهد، کمبود آب با کاهش کیفیت آب از نظر شوری همراه می‌باشد و در این مناطق گیاهان بر حسب کمیت و کیفیت آب، ممکن است تحت تأثیر همزمان تنش‌های شوری و خشکی قرار گیرند. بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که تاکنون مدل، تحت شرایط شرایط تنش شوری و خشکی برای گندم بهاره مورد ارزیابی قرار نگرفته است. با توجه به اهمیت گندم در شهرستان مشهد، نسخه چهار مدل AquaCrop ارزیابی گردید که در سال ۲۰۱۲ و برای کمی نمودن تأثیر تنش شوری (علاوه بر سایر تنش‌های محیطی که در نسخه‌های

قبلی در نظر گرفته شده بود) ارائه گردید (رائس و همکاران، ۲۰۱۲). بنابراین هدف از این تحقیق واسنجی و صحت‌سنجی آخرین نسخه مدل AquaCrop، تحت شرایط همزمان شوری و کم‌آبی گیاه گندم بهاره در منطقه مشهد می‌باشد.

مواد و روش‌ها

کلیات طرح

جهت انجام این مطالعه، آزمایشی در دو سال زراعی ۸۹-۱۳۸۸ و ۹۰-۱۳۸۹ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۸۵ متر از سطح دریا انجام شد. اقلیم منطقه خشک و نیمه خشک سرد، متوسط بارندگی سالیانه حدود ۲۷۹/۷ میلی‌متر، متوسط حداکثر درجه حرارت ۲۳/۲ و متوسط حداقل درجه حرارت شهرستان ۹/۵ سانتیگراد می‌باشد. خلاصه آمار هواشناسی برگرفته از تارنمای سازمان هواشناسی در جدول (۱) نشان داده شده است. برای اجرای مدل AquaCrop در هر سال زراعی، از آمار و اطلاعات هواشناسی روزانه همان سال زراعی استفاده گردید.

پیش از کشت، مراحل آماده سازی بستر به دقت انجام گرفت. مساحت هر کرت تقریباً چهار متر مربع (۲m×۱m) بود و کرتها در چهار ردیف نه تایی تهیه شدند. آرایش تیمارها به صورت تصادفی انتخاب شد و فاصله بین چهار ردیف به صورت راهروی با عرض دو متر برای عملیات آبیاری و برای حذف اثر احتمالی کرتها بر یکدیگر خالی گذاشته شد. تمامی واحدهای آزمایشی سال اول در تاریخ ۱۳۸۸/۱۲/۲۳ کشت و محصول به صورت دستی در تاریخ ۱۳۸۹/۴/۲ برداشت شد. همچنین تیمارهای سال دوم در تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۲۷ کشت و محصول به صورت دستی در تاریخ ۱۳۹۰/۴/۱۳ برداشت شد. گندم بهاره (*Triticum-aestivum*) مورد نظر، گندم نان و از رقم متحمل به شوری انتخاب شد. نه خط کشت

جدول (۴). تیمارها پس از سه برگی شدن گیاهان (۲۹ روز پس از کاشت در سال اول و ۲۲ روز پس از کاشت در سال دوم) اعمال شدند. پیش از آن، دو بار آبیاری برای تمامی واحدهای آزمایشی (در مجموع برابر با ۸۰ میلی متر) به صورت یکسان داده شد. میله‌های دستگاه TDR (مدل 6050x1) در کرت شاهد در اعماق ۲۰، ۴۰ و ۷۰ سانتیمتری و در انتهای فصل رشد در ۱۰۰ سانتی متری نصب و میزان قرائت TDR از کرت شاهد پیش از آبیاری ملاک تعیین نیاز آبی تمامی کرتها بود به عبارت دیگر اندازه‌گیری رطوبت با فواصل مساوی با دور آبیاری ۱۰ روزه صورت پذیرفت (دور آبیاری با توجه به دور آبیاری مرسوم در منطقه انتخاب شد).

میزان آب آبیاری در کرت شاهد بر اساس کمبود رطوبت تا ظرفیت زراعی و در عمق توسعه ریشه تعیین گردید. عمق توسعه ریشه در ابتدای اعمال تیمارهای کم آبی و شوری ۲۰ سانتی متر بود و عمق نهایی ریشه برابر با ۱۰۰ سانتی متر در نظر گرفته شد و تغییرات رشد ریشه با زمان خطی فرض شد. در مجموع هفت بار آبیاری در طول مدت رشد پس از سه برگی شدن و اعمال تیمارهای خشکی و کم آبی انجام شد. زمان بندی و مقادیر آب آبیاری برای کرت کامل و مراحل مختلف رشد گندم بهاره براساس طبقه بندی زادوک (زادوک و همکاران، ۱۹۷۴) در جدول (۵) ارائه شده است.

در هر کرت در نظر گرفته شد و میزان بذریه به صورت وزنی و بر اساس میزان ۲۵۰ کیلوگرم در هکتار (۴۰۰۰۰۰۰ بویه در هکتار) تهیه شد. طرح مذکور برای سال اول در ۳۶ کرت و برای سال دوم ۴۵ در کرت آزمایشی اجرا شد. طرح مورد مطالعه بر اساس روش رویه پاسخ و آزمایش‌های گزینشی انجام شده است (حق-وردی و همکاران، ۱۳۹۰). به این صورت که در سال اول حالت‌های مختلفی از تیمارها در قالب طرح فاکتوریل بدون تکرار به روش رویه پاسخ اجرا می‌شوند و در سال دوم طراحی آزمایش‌ها بر اساس نتایج سال اول انجام می‌شود. جزئیات تیمارهای آبیاری شوری در طرح پیاده شده در سال اول و دوم زراعی به ترتیب در جداول (۲) و (۳) آورده شده است.

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه پیش از کاشت گیاهان و شروع دوره زراعی از چهار گوشه و وسط زمین نمونه برداری از اعماق مختلف (۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۷۰-۴۰ و ۱۰۰-۷۰ سانتی متر) انجام شد که نتایج آن در جدول (۴) ارائه شده است. درصد رطوبت اشباع خاک (θ_{sat}) و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_{sat}) با استفاده از مدل RETC تخمین زده شدند. به طوری که مشخصات هر لایه خاک مانند درصد ذرات خاک، جرم مخصوص ظاهری به عنوان ورودی به مدل داده شد و θ_{sat} و K_{sat} به عنوان خروجی به دست آمد.

جدول ۱- خلاصه آمار هواشناسی در سال اول و دوم زراعی برگرفته از تارنمای سازمان هواشناسی (www.irimo.ir)

سال	ماه	متوسط حداقل دما (°C)	متوسط حداکثر دما (°C)	مجموع بارش (mm)	متوسط حداقل رطوبت (%)	متوسط حداکثر رطوبت (%)
سال اول	۱۳۸۸	۱۲	۶/۷۲	۵۱/۴۳	۴۵/۲۷	۸۹/۱۴
	۱۳۸۹	۱	۸/۰۶	۲۷/۶۴	۳۶/۵۲	۷۹/۰۹
	۱۳۸۹	۲	۱۳/۳۵	۳۶/۰۵	۳۲/۰۳	۷۳/۸۷
	۱۳۸۹	۳	۱۸/۲۶	۷/۲۱	۱۴/۷۰	۴۵/۶۰
سال دوم	۱۳۸۹	۴	۲۱/۴۸	۲/۳۱	۱۰/۵۲	۳۶/۰۶
	۱۳۸۹	۱۲	۰/۷۶	۲۳/۵۶	۵۰/۳۱	۸۵/۴۱
	۱۳۹۰	۱	۸/۰۳	۱۱/۱۲	۲۱/۱۶	۶۶/۰۳
	۱۳۹۰	۲	۱۵/۷۴	۱۵/۸۵	۲۴/۷۰	۶۵/۶۰
۱۳۹۰	۳	۱۹/۵۵	۳۴/۴۸	۶/۴۱	۱۴/۴۸	۴۶/۱۳
	۴	۲۰/۸۷	۳۶/۲۹	۰/۰۰	۱۱/۸۰	۳۶/۳۲

جدول ۲- تیمارهای آبیاری در کرت‌های مختلف در سال اول زراعی

شوری (dS/m)	نوبت آبیاری				کرت	شوری (dS/m)	نوبت آبیاری				کرت
	۷	۶ و ۵	۴ و ۳	۲ و ۱			۷	۶ و ۵	۴ و ۳	۲ و ۱	
۰/۵	f	f	f	0.2f	۱۹	۱۰	0.2f	f	0.2f	*f	۱
	f	f	f	f	۲۰		0.2f	0.2f	f	0.2f	۲
	0.2f	f	0.2f	0.2f	۲۱		f	0.2f	f	f	۳
	0.2f	f	f	0.2f	۲۲		0.6f	0.6f	0.6f	0.6f	۴
	0.6f	0.6f	0.6f	0.6f	۲۳		f	0.2f	0.2f	0.2f	۵
	f	0.2f	0.2f	0.2f	۲۴		0.2f	f	f	f	۶
	0.2f	0.2f	0.2f	0.2f	۲۵		f	f	0.2f	f	۷
	0.2f	f	0.2f	f	۲۶		f	f	f	0.2f	۸
	f	0.2f	f	0.2f	۲۷		0.6f	0.6f	0.6f	0.6f	۹
	f	0.2f	f	f	۲۸		0.2f	f	f	0.2f	۱۰
	0.2f	0.2f	f	f	۲۹		f	0.2f	f	0.2f	۱۱
	0.2f	f	f	f	۳۰		0.2f	0.2f	0.2f	f	۱۲
	0.6f	0.6f	0.6f	0.6f	۳۱		0.2f	f	0.2f	0.2f	۱۳
	0.2f	0.2f	f	0.2f	۳۲		0.2f	0.2f	f	f	۱۴
	f	f	0.2f	0.2f	۳۳		0.2f	0.2f	0.2f	0.2f	۱۵
	f	f	0.2f	f	۳۴		f	f	f	f	۱۶
	f	0.2f	0.2f	f	۳۵		f	0.2f	0.2f	f	۱۷
	0.2f	0.2f	0.2f	f	۳۶		f	f	0.2f	0.2f	۱۸

* حرف f نشان دهنده آبیاری کامل در کرت شاهد و ضریب آن کسری از میزان آبیاری در حالات کم آبیاری را نشان می‌دهد. به عنوان مثال 0.2f بیانگر میزان آب آبیاری برابر با ۲۰ درصد نیاز آبی کرت شاهد می‌باشد.

جدول ۳- جزئیات تیمارهای آبی و شوری را در کرت‌های آزمایشی سال دوم زراعی

شوری (dS/m)	نوبت آبیاری				شماره در شکل	کرت	شوری (dS/m)	نوبت آبیاری				شماره در شکل	کرت
	۷	۶ و ۵	۴ و ۳	۲ و ۱				۷	۶ و ۵	۴ و ۳	۲ و ۱		
۵/۲۵	0.65f	0.65f	0.65f	0.3f	۲۴	۳۷	۰/۵	f	f	f	f	۱	۳۱
۵/۲۵	0.3f	0.65f	0.65f	0.65f	۲۵	۲۱	۰/۵	0.65f	0.65f	0.65f	0.65f	۲	۲۷
۵/۲۵	0.65f	0.65f	0.3f	0.65f	۲۶	۱۳	۱/۹	0.9f	0.9f	0.9f	0.9f	۳	۲۵
۵/۲۵	0.65f	0.3f	0.65f	0.65f	۲۷	۱	۱/۹	0.4f	0.9f	0.9f	0.9f	۴	۲۸
۱/۶	0.9f	0.9f	0.9f	0.9f	۲۸	۲۶	۱/۹	0.9f	0.9f	0.9f	0.4f	۵	۸
۱/۶	0.9f	0.9f	0.9f	0.4f	۲۹	۴۲	۱/۹	0.9f	0.9f	0.4f	0.9f	۶	۵
۱/۶	0.4f	0.9f	0.9f	0.9f	۳۰	۴۴	۱/۹	0.4f	0.9f	0.9f	0.4f	۷	۶
۱/۶	0.9f	0.9f	0.4f	0.9f	۳۱	۲۲	۱/۹	0.9f	0.9f	0.4f	0.4f	۸	۳۲
۱/۶	0.4f	0.9f	0.9f	0.4f	۳۲	۴۱	۱/۹	0.9f	0.4f	0.9f	0.9f	۹	۳۵
۱/۶	0.4f	0.9f	0.4f	0.9f	۳۳	۳	۱/۹	0.4f	0.9f	0.4f	0.9f	۱۰	۴۵
۱/۶	0.9f	0.4f	0.9f	0.9f	۳۴	۴۰	۱/۹	0.4f	0.4f	0.9f	0.9f	۱۱	۹
۱/۶	0.9f	0.9f	0.4f	0.4f	۳۵	۱۵	۱/۹	0.9f	0.4f	0.9f	0.4f	۱۲	۲۴
۱/۶	0.4f	0.4f	0.9f	0.9f	۳۶	۱۴	۱/۹	0.4f	0.9f	0.4f	0.4f	۱۳	۲۹
۱/۶	0.9f	0.4f	0.9f	0.4f	۳۷	۲۸	۱/۹	0.9f	0.4f	0.4f	0.9f	۱۴	۲۰
۱/۶	0.9f	0.4f	0.4f	0.9f	۳۸	۱۷	۱/۹	0.4f	0.4f	0.9f	0.4f	۱۵	۲
۱/۶	0.4f	0.9f	0.4f	0.4f	۳۹	۱۸	۱/۹	0.4f	0.4f	0.4f	0.9f	۱۶	۱۲
۱/۶	0.4f	0.4f	0.9f	0.4f	۴۰	۱۹	۱/۹	0.9f	0.4f	0.4f	0.4f	۱۷	۳۶
۱/۶	0.4f	0.4f	0.4f	0.9f	۴۱	۲۳	۱/۹	0.4f	0.4f	0.4f	0.4f	۱۸	۳۹
۱/۶	0.9f	0.4f	0.4f	0.4f	۴۲	۳۴	۵/۲۵	0.65f	f	0.65f	0.65f	۱۹	۳۰
۱/۶	0.4f	0.4f	0.4f	0.4f	۴۳	۱۰	۵/۲۵	0.65f	0.65f	f	0.65f	۲۰	۴
۱۰	f	f	f	f	۴۴	۷	۵/۲۵	0.65f	0.65f	0.65f	f	۲۱	۳۳
۱۰	0.65f	0.65f	0.65f	0.65f	۴۵	۳۳	۵/۲۵	0.65f	0.65f	0.65f	0.65f	۲۲	۱۱
							۵/۲۵	f	0.65f	0.65f	0.65f	۲۳	۱۶

جدول ۴- خصوصیات فیزیکی خاک مزرعه مورد مطالعه

پارامتر	عمق خاک (cm)				پارامتر	عمق خاک (cm)			
	۱۰۰-۷۰	۴۰-۷۰	۲۰-۴۰	۰-۲۰		۱۰۰-۷۰	۴۰-۷۰	۲۰-۴۰	۰-۲۰
بافت خاک	۰/۱۶	۰/۱۶	۰/۱۵	۰/۱۴	θ_{pwp} (m ³ /m ³)	لوم رسی	لوم رسی	لوم	لوم سیلتی
EC (dS/m)	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۴	۰/۴۴	θ_s (m ³ /m ³)	۲/۱	۲/۱	۲	۲
جرم مخصوص ظاهری (g/m ³)	۸۱/۸	۸۱/۸	۱۲۰/۴	۱۸۲/۶	K_s (mm/day)	۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۴	۱/۳۵
θ_{fc} (m ³ /m ³)						۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳۲	۰/۳

جدول ۵- برنامه ریزی آبیاری کرت‌های گندم برای تیمار آبیاری کامل (f)

نوبت آبیاری	تاریخ آبیاری	میزان آبیاری (mm)	مراحل رشد	نوبت آبیاری	تاریخ آبیاری	میزان آبیاری (mm)	مراحل رشد
۱	۸۹/۱۲/۲۹	۴۰	قبل از اعمال تیمارها	۱	۸۸/۱۲/۲۵	۴۰	قبل از اعمال تیمارها
۲	۹۰/۱/۱۰	۴۰	رشد گیاهچه‌ای	۲	۸۹/۱/۱۲	۴۰	رشد گیاهچه‌ای
۳	۹۰/۱/۲۱	۳۶	پنجه زنی	۳	۸۹/۱/۲۴	۳۶	پنجه زنی
۴	۹۰/۲/۲	۵۴	ساقه‌دهی	۴	۸۹/۲/۳	۵۲	ساقه‌دهی
۵	۹۰/۲/۱۲	۶۰	ظهور و تورم برگ	۵	۸۹/۲/۱۲	۴۴	ظهور و تورم برگ
۶	۹۰/۲/۲۲	۹۰	سنبله‌دهی	۶	۸۹/۲/۲۳	۸۴	سنبله‌دهی
۷	۹۰/۳/۱	۹۶	گلدهی	۷	۸۹/۳/۲	۶۱/۵	گلدهی
۸	۹۰/۳/۱۱	۱۱۲	مرحله خمیری و رسیدگی	۸	۸۹/۳/۱۲	۱۱۲	مرحله خمیری و رسیدگی
۹	۹۰/۳/۲۱	۱۵۰	جمع (mm)	۹	۸۹/۳/۲۲	۱۴۸	جمع (mm)
		۶۷۸				۶۱۷/۵	

افزایش سطوح شوری در سال دوم زراعی از دو سطح به پنج سطح لزوم پایش شوری در خاک‌رخ را در این سال نشان می‌داد. بنابراین در طول دوره رشد گیاه از اعماق مختلف خاک (۳۰-۶۰ سانتی متری و ۰-۳۰ سانتی متری) در کرت‌های مختلف برای تعیین توزیع شوری در خاک‌رخ نمونه‌برداری شد. کرت‌های نمونه‌برداری شده به صورت نیمه تصادفی انتخاب شدند. یعنی اینکه ابتدا کرت‌های یکسان از لحاظ سابقه آبیاری در دسته‌های مشابه قرار گرفتند و سپس از هر دسته چند کرت به صورت تصادفی برای نمونه‌برداری انتخاب شد. این روش نمونه‌برداری بر اساس این فرض اولیه استوار بود که به علت یکسان بودن تمامی شرایط موثر بر توزیع شوری در خاک‌رخ از جمله بافت خاک و تراکم گیاه، اعمال تیمار یکسان شوری و آبی در چند کرت مختلف منجر به تفاوت معنی‌داری در شوری در خاک‌رخ نخواهد شد و لذا امکان تعمیم نتایج کرت‌های یکسان به یکدیگر وجود خواهد داشت.

تئوری مدل AquaCrop

مدل AquaCrop از معادله دورنیاس و کسام (۱۹۷۹) با تفکیک نمودن تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) به تبخیر از سطح خاک (E_s) و تعرق (T_a) و مجزا نمودن عملکرد نهایی (Y) به ماده خشک (B) و شاخص برداشت (HI) تهیه شده است معادله (۱):

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

که در آن:

Y_x عملکرد حداکثر، Y_a عملکرد واقعی، ET_x تبخیر-تعرق حداکثر و K_Y ضریب حساسیت به آب می‌باشد. مدل این توانایی را دارد که با تفکیک تبخیر-تعرق به تعرق از سطح گیاه و تبخیر از سطح خاک از اثر مصرف غیر تولیدی آب از طریق تبخیر از سطح خاک به ویژه در شرایط پوشش گیاهی ناکامل جلوگیری کند. تعرق روزانه با استفاده از تبخیر-تعرق روزانه معادله (۲) و بهره‌وری

شدن روزنه‌ها) را تغییر می‌دهد. در واقع با ضرب کردن ضریب تنش شوری ($K_{S_{sto,salt}}$) در حد بالا و پایین تخیله آب خاک (P_{upper} و P_{lower})، ضرایب $K_{S_{exp,w}}$ و $K_{S_{sen}}$ با ضرب کردن $K_{S_{sto,salt}}$ در $K_{S_{sto}}$ این ضرایب در شرایط همزمان تنش آبی و شوری اصلاح می‌شوند. مدل AquaCrop به چهار دسته داده ورودی شامل: داده‌های اقلیمی، گیاهی، خاک و مدیریت مزرعه‌ای نیاز دارد. داده‌های ورودی اقلیمی مورد نیاز عبارتند از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه، تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0)، بارندگی و میانگین سالیانه غلظت CO_2 می‌باشند. مدل از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبه درجه روز رشد (GDD) به منظور تعدیل عملکرد بیولوژیک بر اثر خسارات ناشی از سرما استفاده می‌کند (استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۹). مدل برای غلظت CO_2 مقدار ۳۶۹/۴۶ قسمت در میلیون حجمی را به عنوان مرجع در نظر می‌گیرد (اندازه‌گیری شده در رصدخانه مائونالوا در هاوایی).

داده‌های مورد نیاز خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (K_{sat})، رطوبت حجمی خاک در حد اشباع ($\theta_{v\ sat}$)، رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی ($\theta_{v\ fc}$)، رطوبت حجمی خاک در حد پژمردگی دائم ($\theta_{v\ pwp}$) و بافت خاک می‌باشد. داده‌های مربوط به گیاه و روابط آن با وضعیت آب در خاک و نیاز اتمسفری به دو گروه پارامترهای گیاهی ثابت و متغیر تقسیم می‌شوند. پارامترهای گیاهی ثابت برای بیشتر گیاهان زراعی (مانند گندم، جو، ذرت، پنبه و سویا) به صورت پیش-فرض در مدل وجود دارند. این پارامترها با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نکرده، مقدار آن‌ها با استفاده از داده‌های مربوط به رشد گیاه در شرایط مطلوب و بدون محدودیت واسنجی شده و در مدل مورد استفاده قرار می‌گیرند (گریتس و همکاران، ۲۰۰۹؛ هنگ و همکاران، ۲۰۰۹). با این حال در مدل AquaCrop این پارامترها در شرایط تنش آبی و شوری از طریق تأثیر ضرایب حساسیت گیاه به کم‌آبی و شوری ($K_{S_{sto}}$ ، $K_{S_{exp,w}}$ ، $K_{S_{sen}}$)

آب گیاهی که با استفاده از نیاز تبخیری و غلظت CO_2 اتمسفری نرمال شده، به عملکرد بیولوژیک روزانه گیاه تبدیل می‌شود و بر اساس معادله (۳) محاسبه می‌شود (استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۷؛ ۲۰۰۹):

$$T_r = (K_s \cdot K_{c_{Tr}}) ET_0 \quad (2)$$

$$B_i = WP^* \left(\frac{T_{r_i}}{ET_{0,i}} \right) \quad (3)$$

در این معادله‌ها B_i عملکرد بیولوژیک (kg/m^2)، WP^* بهره‌وری آب نرمال شده (kg/m^2) که مقدار آن برای شرایط اقلیمی متفاوت نرمال و به پارامتری ثابت تبدیل شده است (استدیوتو و همکاران، ۲۰۰۷)، T_{ri} و T_r تعرق روزانه (mm) $ET_{0,i}$ و ET_0 تبخیر-تعرق روزانه (mm)، K_s ضریب تنش آبی و $K_{c_{Tr}}$ ضریب تعرق گیاهی می‌باشند. برتری دیگر معادله (۳) به معادله (۱) این است که شبیه‌سازی فرآیندهای رشد گیاه در آن با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد، در حالی که در معادله (۱) شبیه‌سازی به صورت دوره رشد انجام می‌شود. در تمام دوره رشد گیاه، مقدار آب ذخیره شده در ناحیه ریشه از طریق بیلان آبی جریان آب ورودی (آبیاری و بارندگی) و خروجی (رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر - تعرق) در ناحیه ریشه شبیه‌سازی می‌شود.

شدت ضرایب تنش آبی (K_s) مؤثر بر پوشش تاجی (CC)، پیری و کاهش پوشش تاجی و شاخص برداشت (HI) به وسیله کسر تخلیه آب در ناحیه ریشه تعیین می‌شود. در نهایت مقدار عملکرد محصول با استفاده از جرم قسمت هوایی پوشش گیاهی و شاخص برداشت تعدیل شده محاسبه می‌گردد (رائس، ۲۰۰۲). در مدل AquaCrop فرض شده است هنگامی که علاوه بر تنش آبی، تنش شوری نیز وجود داشته باشد، فشار اسمزی افزایش و پتانسیل آب خاک کاهش می‌یابد. بنابراین آب کمتری برای گیاه در دسترس بوده و نیروی اسمزی مقادیر ضرایب $K_{S_{sen}}$ (ضریب تنش آبی برای پیری زودرس)، $K_{S_{exp,w}}$ (ضریب تنش آبی برای توسعه کانوپی) و $K_{S_{sto}}$ (ضریب تنش آبی بسته

شوری خاک، نیم‌رخ خاک را به ۱۲ لایه و هر لایه را به ۲ تا ۱۱ سلول تقسیم‌بندی می‌کند. تعداد سلول‌ها بستگی به نوع خاک لایه‌های افقی دارد. از آنجایی که نمک‌ها شدیداً به ذرات رس می‌چسبند لایه‌ی افقی رسی سلول-های بیشتری نسبت به لایه‌ی افقی شنی دارد. مدل با استفاده از روابط (۵) تا (۷) شوری اشباع خاک را در هر لایه محاسبه می‌کند (رائس و همکاران، ۲۰۰۹):

$$W_{cell} = 1000 \frac{\theta_{sat}}{n} \Delta z \quad (5)$$

$$Salt_{cell} = 0.64 W_{cell} EC_{cell} \quad (6)$$

$$EC_e = \frac{\sum_{j=1}^n Salt_{cell,j}}{0.64(1000\theta_{sat}\Delta z)} \quad (7)$$

که در آن:

W_{cell} حجم سلول (میلی‌متر آب)، θ_{sat} رطوبت اشباع خاک (m^3/m^3)، Δz ضخامت لایه‌های خاک (m)، n تعداد سلول‌ها، $Salt_{cell}$ مقدار نمک سلول (gr/m^2)، EC_{cell} هدایت هیدرولیکی هر سلول (dS/m) و EC_e هدایت هیدرولیکی اشباع عمق مشخصی از خاک (dS/m) می‌باشند.

و $K_{Ssto,salt}$ تعدیل می‌شوند. از طرف دیگر، پارامترهای گیاهی متغیر در شرایط مختلف مقادیری متفاوت داشته و مقادیر آن‌ها به مدیریت مزرعه بستگی دارند جداول (۶) و (۹). در جدول (۶)، سطح پوشش اولیه (CC_0) با استفاده از داده‌های تراکم کشت (4000000 بذر در هکتار) در مدل تعیین و بقیه پارامترها در مزرعه اندازه‌گیری شدند. در نسخه جدید مدل AquaCrop (نسخه ۴) همچنین می‌توان در بخش برنامه‌ریزی آبیاری، شوری‌های مختلف آب آبیاری را وارد کرد. برای نیم‌رخ خاک در منطقه ریشه، بیلان روزانه آب شامل آب‌های ورودی و خروجی (نفوذ، رواناب، نفوذ عمقی و تبخیر - تعرق) و تغییرات رطوبت خاک را از معادله (۴) محاسبه می‌شود (رائس و همکاران، ۲۰۰۹). توازن آبی خاک و جریان‌های ورودی و خروجی از مرزهای منطقه ریشه و آب ذخیره شده در خاک در فواصل زمانی روزانه شبیه‌سازی می‌شود. AquaCrop برای تخمین تبخیر از خاک، اثرات مالچ، پوشش گیاهی، نسبت خیس‌شدگی سطح خاک در آبیاری‌های موضعی و سایه‌اندازی پوشش گیاهی را در نظر می‌گیرد.

$$\Delta\theta = P + I + U - R - D - ET \quad (4)$$

که در آن:

$\Delta\theta$ تغییرات رطوبت خاک، P بارندگی، I آبیاری، U خیز مویینه‌ای به ناحیه ریشه، R رواناب، D نفوذ عمقی و ET تبخیر و تعرق می‌باشند. مدل AquaCrop برای محاسبه

جدول ۶- پارامترهای گیاهی متغیر مربوط به مراحل رشد گندم بهاره

پارامتر	سال اول	سال دوم	پارامتر	سال اول	سال دوم
سطح پوش اولیه (CC_0) (%)	۸	۸	شروع پیری پوشش گیاهی (day)	۹۰	۹۴
تراکم کشت (بوته در هکتار)	۴۰۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰۰	رسیدگی فیزیولوژیکی (day)	۱۰۲	۱۰۸
زمان سبز شدن (day)	۷	۷	طول دوره گل‌دهی (day)	۱۰	۱۰
زمان رسیدن به گل‌دهی (day)	۷۳	۷۴	شاخص برداشت مرجع (HI_0) (%)	۳۹	۳۹

آنالیز حساسیت

ورودی تعدیل شده و P_b مقدار برآورد عملکرد دانه، رطوبت و شوری خاک بر اساس داده ورودی پایه می‌باشد. برای تعیین آنالیز حساسیت مدل، در هر نوبت یکی از پارامترهای ورودی مدل به مقدار ± 25 تغییر داده شد (گیرتس و همکاران، ۲۰۰۹) و بقیه پارامترها ثابت نگه داشته شدند و مدل با استفاده از شرایط جدید اجرا گردید. در ادامه مقدار ضریب حساسیت در سه کلاس، $Sc > 15$ حساسیت بالا، $2 < Sc < 15$ حساسیت متوسط و $Sc < 2$ حساسیت پایین طبقه‌بندی شد (گیرتس

برای آنالیز حساسیت مدل AquaCrop از قدرمطلق اختلاف نسبی عملکرد دانه، رطوبت و شوری خاک معادله (۸) استفاده شد (گیرتس و همکاران، ۲۰۰۹):

$$Sc = \left| \frac{P_m - P_b}{P_b} \right| \times 100 \quad (8)$$

که در آن:

Sc ضریب حساسیت بدون بعد، P_m مقدار برآورد عملکرد دانه، رطوبت و شوری خاک بر اساس داده

و همکاران، ۲۰۰۹).

واسنجی و صحت‌سنجی

واسنجی پارامترهای گیاهی با استفاده از داده‌های گیاهی

و عملکرد محصول

ابتدا پارامترهای ورودی به مدل مربوط به تیمار شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر (تیمار شاهد) وارد مدل گردید و آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی انجام گردید. سپس مدل برای این تیمار با تغییر بعضی از پارامترهای حساس که در مزرعه اندازه‌گیری نشده بودند (ماکزیمم سطح پوشش (CCx)، بهره‌وری آب نرمال شده (WP*)، ضریب رشد پوشش (CGC)، حداکثر عمق ریشه (m) و ضریب رشد پوشش (CGC)، واسنجی گردید. به طوری که خطای نسبی بین عملکرد و بایومس اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حداقل شود. در ادامه مدل با توجه به مقدار زیست توده و سطح پوشش ماکزیمم، حد بالای آستانه شوری، حد پایین آستانه شوری و ضریب شکل نمودار تنش شوری، تیمار شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر واسنجی شد. سپس مدل با تغییر ضرایب تنش آبی موجود (یعنی K_{Sen} ، $K_{Exp,w}$ و K_{Sto}) به طور همزمان برای دو تیمار شوری و حالت‌های مختلف کم‌آبی واسنجی گردید جدول (۱۲). به طوری که ریشه دوم میانگین مربعات خطای (RMSE) مقادیر عملکرد و زیست توده اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حداقل شود. در ادامه مدل با استفاده از تیمارهای مختلف شوری و کم آبی سال دوم صحت‌سنجی گردید.

واسنجی پارامترهای خاک با استفاده از داده‌های رطوبت

خاک

برای واسنجی مدل از داده‌های رطوبت خاک در سال اول و برای صحت‌سنجی آن از داده‌های رطوبت خاک در سال دوم استفاده شد. پیش از واسنجی، ابتدا مدل نسبت به پارامترهای ورودی خاک آنالیز حساسیت گردید. سپس با تغییر پارامترهای حساس و پارامترهای تخمین‌زده شده با مدل RETC و با استفاده از داده‌های

رطوبتی سال اول، مدل برای شبیه‌سازی رطوبت نیم‌رخ خاک واسنجی گردید به طوری که خطای نسبی بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حداقل شود. همچنین کنترل می‌شد که خطای نسبی بین عملکرد و زیست توده اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حداقل باشد. در ادامه مدل با استفاده از داده‌های رطوبتی سال دوم صحت‌سنجی گردید. از آنجایی که شوری نیم‌رخ خاک فقط در سال دوم اندازه‌گیری شده بود. بنابراین با استفاده از این داده‌ها، مدل برای شبیه‌سازی شوری نیم‌رخ خاک فقط ارزیابی شد.

ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست توده، رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک از پارامترهای آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا نرمال‌شده (NRMSE، معادله ۹)، ضریب تعیین (R^2 ، معادله ۱۰)، شاخص سازگاری (d، معادله ۱۱)، حداکثر خطای نرمال شده (NME، معادله ۱۲) و ضریب باقیمانده (CRM، معادله ۱۳) استفاده شد.

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - Q_i)^2}{n} \right]^{0.5} \times \frac{100}{\bar{O}_i} \quad (9)$$

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

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

$$NME = \text{MAX} \left| \frac{P_i - Q_i}{O_i} \right| \times 100 \quad (12)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (13)$$

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت مدل AquaCrop

نتایج مربوط به آنالیز حساسیت مدل در شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک نشان داد که مدل

است. همان‌طور در جدول (۱۰) مشاهده می‌شود مدل توانسته است با دقت مناسبی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی نماید. مقادیری متوسط $NRMSE$ ، d ، NME و CRM برای رطوبت به ترتیب ۱۱/۸۴ درصد، ۲۵/۷۲ درصد، ۰/۹۳ و ۰/۳۲ و برای شوری به ترتیب ۲۶/۲۵ درصد، ۵۸/۵ درصد، ۰/۹۱ و ۰/۱۲ می‌باشند. با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری می‌توان گفت دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت بیشتر از شوری نیم‌رخ خاک بوده است. در همین رابطه خابلا و بولاک (۲۰۱۲) پس از شبیه‌سازی عملکرد رطوبت خاک با استفاده از مدل AquaCrop در کانادا گزارش کردند که مدل ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی رطوبت خاک می‌باشد.

به طوری که مقادیر R^2 ، ریشه دوم میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، d برای شبیه‌سازی رطوبت نیم-رخ خاک به ترتیب ۰/۹، ۴۹/۴mm و ۰/۹۹ بدست آمدند. نتایج می‌بین و همکاران (۲۰۱۳) نیز نشان داد که مدل توانسته است با دقت بالایی رطوبت نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی کند. به طوری که مقادیر $RMSE$ برای برآورد رطوبت شش عمق خاک از ۱/۵ تا ۹/۸ درصد نوسان داشت. در شکل (۱) نیز مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رطوبت (الف) و شوری خاک (ب) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) ملاحظه می‌گردد بالا بودن مقدار R^2 نشان دهنده نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده و پراکندگی ناچیز آنها حول خط یک به یک می‌باشد. با توجه به جدول (۱۰)، شاخص‌های آماری مربوط به مرحله واسنجی و صحت-سنجی مدل بسیار نزدیک به هم می‌باشند (مقدار $NRMSE$ برای رطوبت به ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ۱۲/۴۱ و ۱۱/۲۷ درصد می‌باشد) و همچنین با توجه به این که مدل فقط با استفاده از داده‌های رطوبتی واسنجی شده است، اما ملاحظه می‌گردد که مدل توانسته است با دقت نسبتاً خوبی شوری نیم‌رخ خاک را نیز شبیه‌سازی نماید و این نشان دهنده این نکته است که مدل به خوبی واسنجی شده است.

برای شبیه‌سازی رطوبت نسبت به θ_{FC} و θ_{PWP} حساسیت متوسط و نسبت به θ_{sat} و K_{sat} حساسیت کمی دارد جدول (۷). همچنین برای شبیه‌سازی شوری نسبت به θ_{sat} حساسیت متوسط و نسبت به θ_{FC} ، θ_{PWP} و K_{sat} حساسیت کمی دارد جدول (۷). نتایج آنالیز حساسیت مدل برای پارامترهای ورودی مدل AquaCrop به منظور شبیه‌سازی عملکرد محصول در جدول (۸) ارائه شده است. با توجه به این جدول، مدل نسبت به پارامترهای تراکم کشت، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، زمان سبز شدن بذرها، زمان رسدن به گلدهی، طول زمان گلدهی، حد آستانه بالای دما، θ_{PWP} ، K_{sat} ، θ_{sat} ، ضریب تنش آبی برای توسعه کانوپی ($K_{sexp,w}$)، شرایط اولیه شوری خاک و بارندگی حساسیت کمی دارد.

بنابراین خطای ناشی از اندازه‌گیری آنها قابل چشم پوشی خواهد بود. همچنین حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب گیاهی مربوط به تعرق (K_{C-Tr})، بهره-وری آب نرمال شده (WP^*)، شاخص برداشت (HI_O)، θ_{FC} ، زمان رسیدن به ماکزیمم پوشش، ضریب تنش آبی برای بسته شدن روزنه‌ها (KS_{sto})، ضریب تنش آبی برای پیری زودرس (KS_{sen})، شرایط اولیه رطوبت خاک و دمای ماکزیمم هوا بالا بیشتر از سایر پارامترهاست. بنابراین این پارامترها باید با دقت بیشتری اندازه‌گیری شوند، در غیر این صورت خطای قابل توجهی در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل به وجود می‌آید. به نظر می‌رسد که تشخیص پارامترهای حساس کاملاً محلی بوده و با منابع در شرایط مختلف دیگر همخوانی ندارد. برای مثال سالمی و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم زمستانه در اهواز نسبت به WP^* ، K_{C-Tr} و دمای هوا حساسیت متوسطی دارد.

رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک

پارامترهای واسنجی شده هیدرولیکی خاک و نتایج آنالیز آماری برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم-رخ خاک به ترتیب در جداول (۹) و (۱۰) آورده شده

جدول ۷- ضریب حساسیت پارامترهای هیدرولیکی خاک برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری خاک

پارامتر	پارامترهای ورودی مدل	مقدار Sc در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
شبیه‌سازی رطوبت خاک	θ_{FC}	۹/۸۲	۵/۶	متوسط
	θ_{PWP}	۱/۱۷	-۲/۰۱	کم-متوسط
	θ_{Sat}	۰/۵۳	۰/۹۲	کم
	K_{Sat}	۰/۶۱	۰/۴۳	کم
شبیه‌سازی شوری خاک	θ_{FC}	۱/۱	۱/۷۴	کم
	θ_{PWP}	-۰/۸۳	-۱/۴۲	کم
	θ_{Sat}	-۱۱/۳	۱۴/۹	متوسط
	K_{Sat}	۰/۹۲	۱/۵۴	کم

جدول ۸- ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی گندم بهاره در مشهد

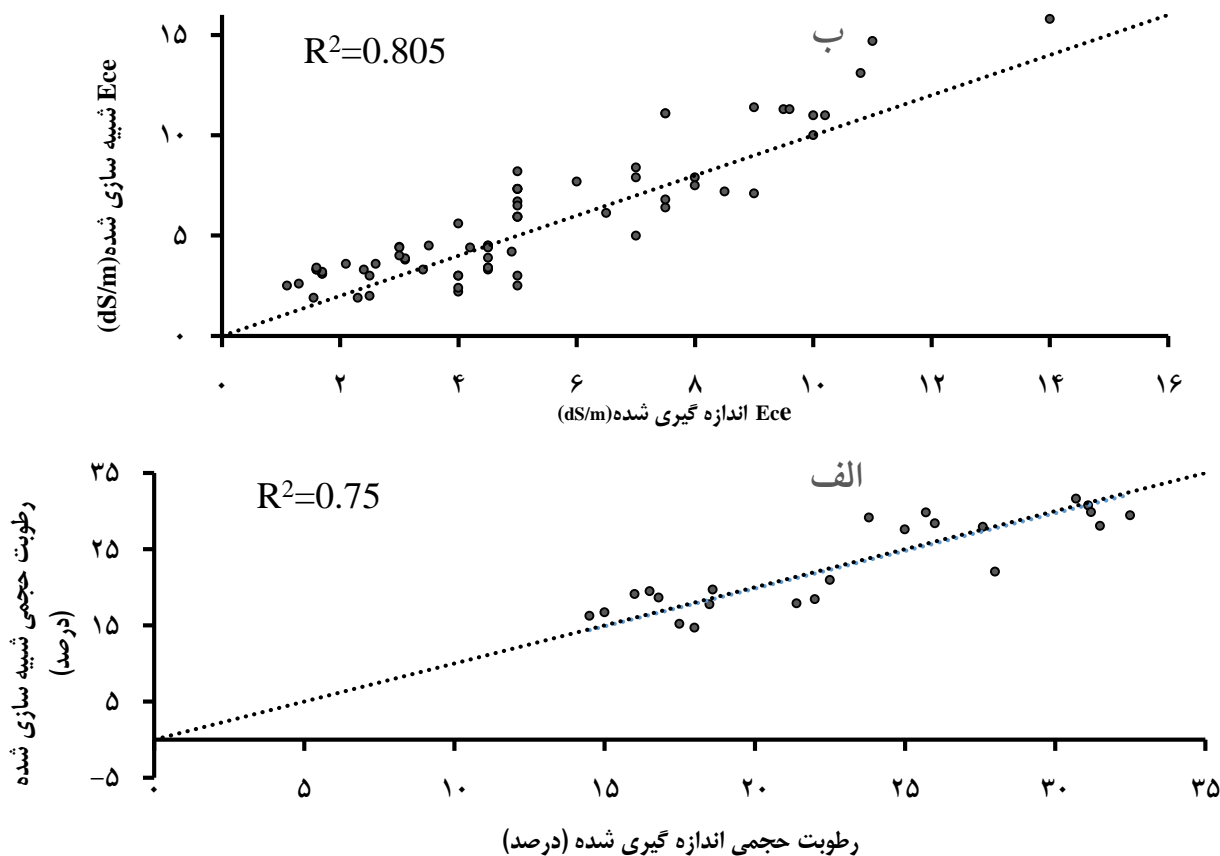
پارامترهای ورودی مدل	مقدار Sc در حالت +۲۵٪	مقدار Sc در حالت -۲۵٪	درجه حساسیت
پارامترهای زراعی			
ضریب گیاهی مربوط به تعرق (K_C-Tr)	۰/۲۹	۲۰/۳۳	کم-بالا
تراکم کشت	۱/۲۷	۱/۷	کم
ضریب رشد پوشش (CGC)	۱/۸	۱/۷۴	کم
بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*)	۲۳/۶۲	۲۵/۲۶	بالا
شاخص برداشت (HIo)	۲۰/۰۵	۲۵/۵۲	بالا
زمان سبز شدن بذرها	۱/۹۷	۱/۱۲	کم
زمان رسیدن به ماکزیمم پوشش	۳/۰۴	۷/۶۹	متوسط
زمان رسیدن به گلدهی	۹/۶	۱/۱	متوسط-کم
طول زمان گلدهی	۰/۱۱	۱/۰۷	کم
عمق ریشه	۰/۳۴	۱/۳۲	کم
حد آستانه بالای دما	۰	۰	ندارد
حد بالای تخیله آب خاک (P_{upper})	۰/۳۳	۰/۴۲	کم
ضریب تنش آبی برای توسعه کانوپی ($K_{Sexp,w}$)	۰/۸۹	۱/۶۷	کم
فاکتور شکل (f_{shape})	۰/۴	۰/۸۵	کم
حد بالای تخیله آب خاک (P_{upper})	۳/۷۱	۴/۴۳	متوسط
ضریب تنش آبی برای بسته شدن روزنه‌ها (K_{Ssto})	۲/۰۲	۱/۹۹	متوسط
فاکتور شکل (f_{shape})	۲/۷۴	۲/۱۲	متوسط
حد بالای تخیله آب خاک (P_{upper})	۲/۷۴	۲/۱۲	متوسط
ضریب تنش آبی برای پیری زودرس (K_{Sen})	۲/۰۱	۲/۲۳	متوسط
فاکتور شکل (f_{shape})	۲/۰۱	۲/۲۳	متوسط
پارامترهای خاک			
رطوبت در ظرفیت زراعی	۱۷/۸۸	۰/۶۳	بالا-کم
رطوبت در پژمردگی دائم	۱/۹	۱/۷۹	کم
رطوبت اشباع خاک	۰/۳۳	۱/۱۶	کم
هدایت هیدرولیکی اشباع	۰	۰	ندارد
شرایط اولیه			
رطوبت خاک	۰/۹۶	۱۴/۷۳	کم-متوسط
شوری خاک	۰	۰	ندارد
پارامترهای اقلیمی			
دمای ماکزیمم	۰/۷۵	۲/۳	کم-متوسط
بارندگی	۰/۶۳	۰/۷۸	کم

جدول ۹- پارامترهای واسنجی شده هیدرولیکی خاک برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک تحت شرایط همزمان تنش شوری و خشکی

عمق خاک (cm)	θ_{FC} (%)	θ_{PWP} (%)	θ_s (%)	K_s (mm/day)
۰-۲۰	۳۱	۱۳/۸	۴۵/۹	۱۸۵
۲۰-۴۰	۳۰/۴	۱۳/۴	۴۵/۶	۱۴۰
۴۰-۷۰	۳۲/۶	۱۵/۷	۴۶	۸۷
۷۰-۱۰۰	۳۲/۵	۱۵/۷	۴۵/۵	۸۶

جدول ۱۰- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک تحت شرایط همزمان تنش شوری و خشکی

پارامتر	روش	(%) NRMSE	(%) NME	d	CRM
رطوبت	واسنجی	۱۲/۴۱	۲۸/۴	۰/۹۳	۰/۰۶
صحت‌سنجی	صحت‌سنجی	۱۱/۲۷	۲۳/۰۴	۰/۹۴	۰/۰۰۲
شوری	صحت‌سنجی	۲۶/۲۵	۵۸/۵	۰/۹۱	۰/۱۲



شکل ۱- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رطوبت (الف) و شوری خاک (ب) تحت شرایط همزمان تنش شوری و خشکی عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف آب

بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) و حداکثر عمق ریشه از مقادیر پیش فرض مدل استفاده و سپس واسنجی شدند. مقدار ضریب گیاهی برای تعرق (K_C-Tr) همان مقدار ارائه شده در پیوست مدل در نظر گرفته شد. مقدار

پارامترهای گیاهی واسنجی شده برای گندم بهاره در جدول (۱۱) ارائه شده است. در جدول (۱۱)، محدوده مقادیر ماکزیمم سطح پوشش گیاهی (CC_X)، ضریب رشد پوشش (CGC)، ضریب کاهش پوشش (CDC)،

پارامترها در اثر تنش‌های شوری و آبی نیز به خوبی شبیه‌سازی شده است. اندرزیان و همکاران (۲۰۱۱) نیز پس از ارزیابی مدل AquaCrop گزارش کردند که مدل دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی عملکرد دانه، زیست توده و کارایی مصرف آب گندم دارد. غلیزاده و همکاران (۱۳۸۹) پس از ارزیابی مدل AquaCrop برای پارامترهای NRMSE و ME به ترتیب مقادیر کمتر از ۱۹/۲ و ۲۷/۵ درصد و برای پارامترهای d و EF به ترتیب مقادیر بیشتر از ۰/۹۶ و ۰/۷۶ را گزارش کردند.

حسین و همکاران (۲۰۱۱) نیز در ارزیابی مدل برای گیاه پنبه گزارش کردند که دقت مدل در شبیه‌سازی شاخص برداشت ($d = 0/66$) کمتر از شبیه‌سازی عملکرد ($d = 0/99$)، زیست توده ($d = 0/99$) و کارایی مصرف آب ($d = 0/99$) می‌باشد. به طور کلی شاخص‌های آماری در تحقیق حاضر بیشتر از تحقیقات دیگر بدست آمده است که یکی از دلایل آن را می‌توان به واسنجی کامل مدل (با استفاده از داده‌های رطوبت خاک و گیاهی) نسبت داد. همچنین نزدیک بودن شاخص‌های آماری مربوط به مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل جدول (۱۳) نشان دهنده این نکته است که مدل به خوبی واسنجی شده است.

$K_{sto,salt}$ (ضریب بسته شدن روزنه‌ها در شرایط شوری) پس از واسنجی مدل برای شرایط شوری بدست آمد. ضرایب تنش آبی و شاخص‌های آماری برای بهترین حالت واسنجی شده در شبیه‌سازی عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف آب به ترتیب در جداول (۱۲) و (۱۳) آورده شده است. همان‌طور در جدول (۱۳) ملاحظه می‌گردد، مقدار d بسیار نزدیک به یک می‌باشد که بیانگر این است روند کاهش عملکرد و زیست توده با کاهش میزان آب آبیاری و افزایش شوری در مدل مشابه با روند کاهش عملکرد و زیست توده اندازه‌گیری شده در مزرعه می‌باشد. نزدیک بودن مقدار R^2 به یک نشان دهنده نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده و پراکندگی ناچیز آنها حول خط یک به یک می‌باشد. مقدار NRMSE در بیش‌تر موارد کم‌تر از ۱۵ درصد می‌باشد که دقت بالای مدل را در شبیه‌سازی عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف آب نشان می‌دهد. مقدار CRM در همه موارد نزدیک به صفر است (بیش برآورد و کم برآورد ناچیز بودند). به طور کلی، دقت مدل در شبیه‌سازی زیست توده و عملکرد بیشتر از کارایی مصرف آب و شاخص برداشت بوده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل می‌توان اظهار داشت که مدل توانسته است روند کاهش این

جدول ۱۱- پارامترهای گیاهی واسنجی شده برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره در مشهد

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۰/۶	ضریب بسته شدن روزنه‌ها در شرایط شوری ($K_{sto,salt}$)	۱۹	بهره‌وری آب نرمال شده (WP^*) (g/m^2)
۹	ضریب کاهش پوشش (CDC) (%/day)	۱/۰۷	حداکثر عمق ریشه (m)
۱/۱	ضریب گیاهی برای تعرق (KC-Tr) (day)	۹۶	ماکزیمم سطح پوشش (CCx) (%)
		۸	ضریب رشد پوشش (CGC) (%/day)

جدول ۱۲- ضرایب تنش آبی واسنجی شده برای شبیه‌سازی عملکرد گندم بهاره در مشهد

ضریب تنش آبی برای پیری زودرس (K_{ssen})		ضریب تنش آبی برای بسته شدن روزنه‌ها (K_{sto})		ضریب تنش آبی برای توسعه کانوبی (K_{sex})		
f_{shape}	Pupper	f_{shape}	Pupper	f_{shape}^{***}	P_{lower}^{**}	P_{upper}^*
۲/۳	۰/۸۳	۱/۷	۰/۴۴	۵	۰/۶۵	۰/۲۰

*، ** و *** به ترتیب حد بالا و پایین تخیلیه آب خاک و فاکتور شکل می‌باشند. هنگامی که نمودار تنش آبی منحنی باشد نوع آن با فاکتور شکل مشخص می‌شود در غیر این صورت نمودار خطی است.

جدول ۱۳- مقادیر شاخص‌های آماری برای شبیه‌سازی عملکرد، زیست توده و

کارایی مصرف آب با استفاده از مدل AquaCrop						
پارامتر	تیمار شوری	RMSE (%)	ME (%)	d	CRM	R ²
عملکرد	واسنجی	۱۱/۸۲	۳۷/۷	۰/۹۸	-۰/۰۸	۰/۹۴
	صحت‌سنجی	۱۴/۷۹	۴۴/۵	۰/۹۲	-۰/۰۶۴	۰/۷۹
زیست توده	واسنجی	۱۳/۲۸	۲۷/۹	۰/۹۴	-۰/۰۷	۰/۸۴
	صحت‌سنجی	۱۱/۹۱	۴۱/۰۲	۰/۹۰	۰/۰۴۵	۰/۶۹
کارایی مصرف آب	واسنجی	۱۱/۹۳	۲۱/۷	۰/۹۱	-۰/۰۸	۰/۸۱
	صحت‌سنجی	۱۵/۷۷	۳۷/۱۱	۰/۸۲	-۰/۰۸۳	۰/۶۱
شاخص برداشت	واسنجی	۲۱/۲	۳۹/۴۱	۰/۷	-۰/۱۴۹	۰/۵۱
	صحت‌سنجی	۱۶/۷۷	۳۴/۳۶	۰/۶۹	-۰/۱۳۵	۰/۴۹

کاهش می‌یابد. همچنین در تنش‌های آبی شدید، دقت مدل در شبیه‌سازی زیست توده بیشتر از عملکرد دانه می‌باشد. اندرزیان و همکاران (۲۰۱۱) نیز پس از ارزیابی مدل AquaCrop گزارش کردند که در کم‌آبایی‌ها دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دانه و زیست توده کاهش می‌یابد و در کم‌آبایی‌ها دقت مدل در شبیه‌سازی زیست توده بیشتر از عملکرد دانه می‌باشد.

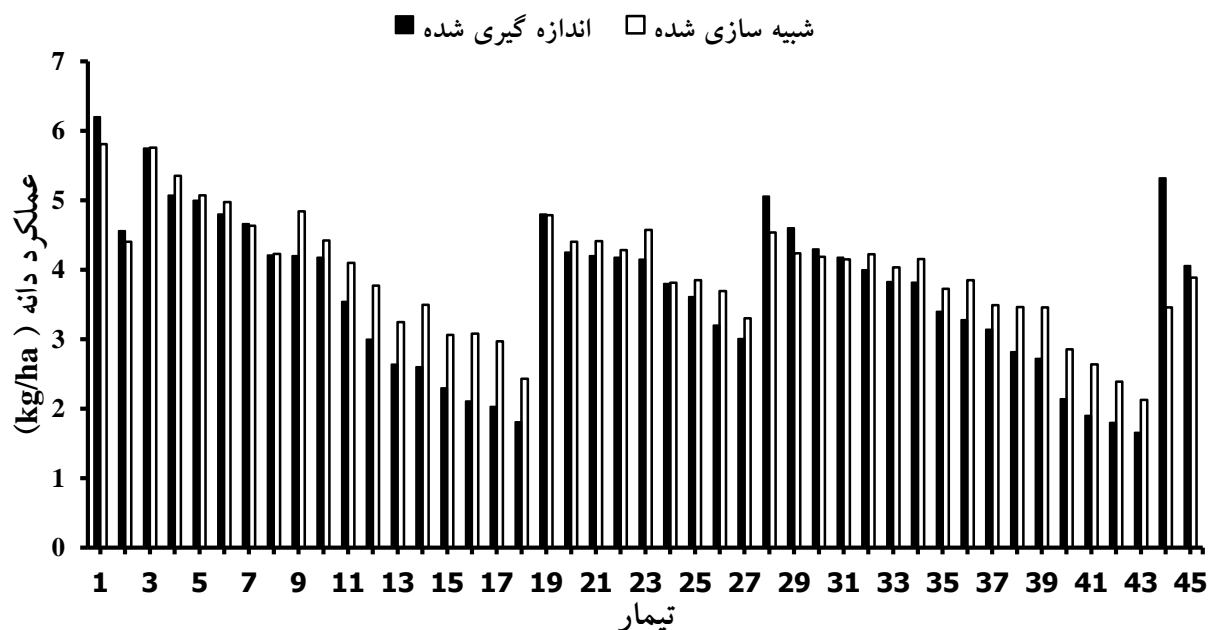
علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) پس از ارزیابی مدل AquaCrop برای گیاه گندم گزارش کردند که با افزایش شدت کم‌آبایی دقت مدل برای شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم کاهش می‌یابد. در خصوص کارایی مصرف آب با توجه به شکل (۴) دقت مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب با افزایش شوری و تنش آبی، کاهش می‌یابد و در اکثر تیمارها بخصوص تنش‌های آبی شدید، مقدار کارایی مصرف آب بیشتر برآورد شده است. گارسیا و همکاران (۲۰۰۹) گزارش کردند که مدل AquaCrop تمایل دارد مقدار کارایی مصرف آب را در تنش‌های آبی شدید بیشتر برآورد کند زیرا مدل برای بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) یک مقدار ثابتی را در نظر می‌گیرد. با توجه به شکل (۴)، برای یک تیمار شوری مشخص، بیشترین و کمترین مقادیر کارایی مصرف آب محاسبه شده و شبیه‌سازی شده تقریباً با هم مطابقت دارند اما اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد در بعضی از تیمارهای کم‌آبایی سبب اختلاف بیشتر در مقادیر محاسبه شده و شبیه‌سازی شده کارایی مصرف آب گردیده است. همچنین سبب برهم زدن روند

نتایج عملکرد دانه، زیست توده و کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به ترتیب در شکل‌های (۲) تا (۴) برای گندم بهاره ارائه شده است. در این شکل‌ها، تیمارها براساس افزایش شوری و کاهش آب آبیاری مرتب شده‌اند. به عبارتی تیمارهای یک و دو مربوط به شوری ۰/۵ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشند که میزان آب آبیاری تیمار دو کمتر از تیمار یک می‌باشد. همچنین تیمارهای ۳ تا ۱۸ مربوط به شوری ۱/۹ دسی‌زیمنس بر متر است که کمترین میزان آب آبیاری مربوط به تیمار ۱۸ می‌باشد، تیمارهای ۱۹ تا ۲۷ مربوط به شوری ۵/۲۵ دسی‌زیمنس بر متر است که کمترین میزان آب آبیاری مربوط به تیمار ۲۷ می‌باشد، تیمارهای ۲۸ تا ۴۳ مربوط به شوری ۸/۶ دسی‌زیمنس بر متر است که کمترین میزان آب آبیاری مربوط به تیمار ۴۳ می‌باشد و تیمارهای ۴۴ و ۴۵ مربوط به شوری ۱۰ دسی‌زیمنس بر متر است که کمترین میزان آب آبیاری مربوط به تیمار ۴۵ می‌باشد.

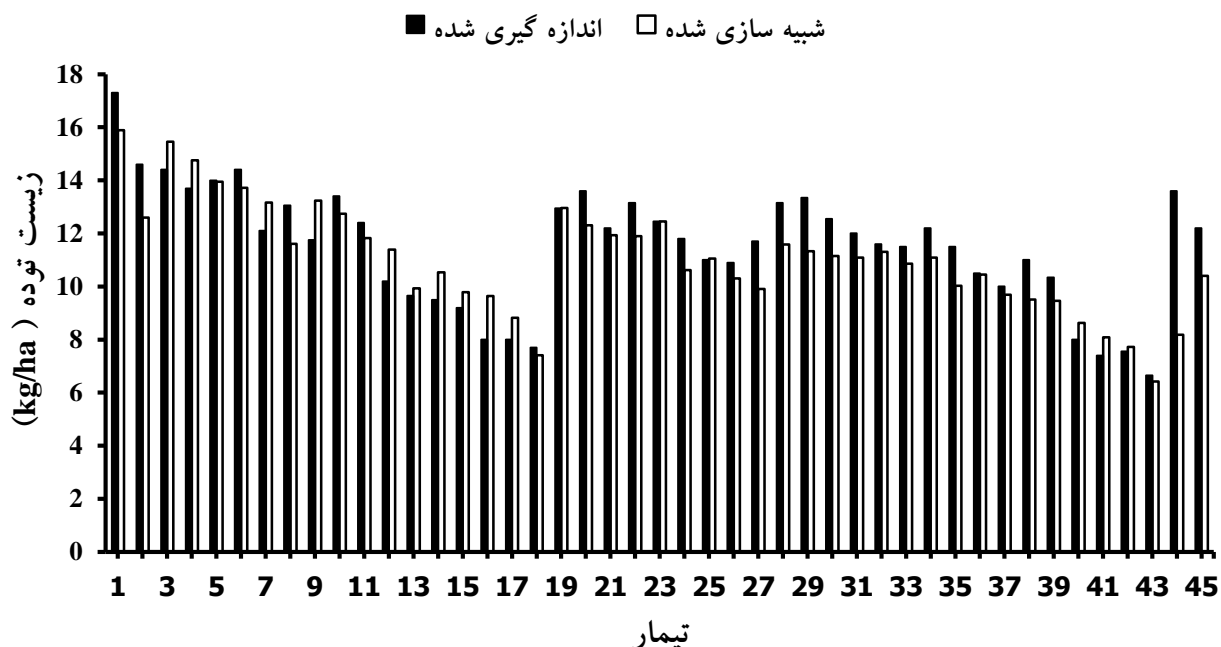
همان‌طور که در شکل‌های (۲) و (۳) مشاهده می‌شود عملکرد دانه و زیست توده اندازه‌گیری شده با افزایش شوری و کاهش آب آبیاری روند نزولی دارد که مدل توانسته است این روند را به خوبی شبیه‌سازی کند. با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌گردد که با افزایش شوری و کاهش آب آبیاری، اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده عملکرد دانه و زیست توده با مقادیر شبیه‌سازی شده بیشتر شده است. به عبارتی می‌توان گفت با افزایش تنش‌های شوری و خشکی دقت پیش‌بینی مدل

AquaCrop کارایی مصرف آب پنبه را با دقت کمتری نسبت به عملکرد و زیست توده شبیه‌سازی می‌نماید. همچنین مدل مقادیر کارایی مصرف آب را در تمام تیمارها بجز تیمار ۸۰ درصد آبیاری کامل، بیشتر برآورد می‌کند. که با نتایج این تحقیق تقریباً همخوانی دارد.

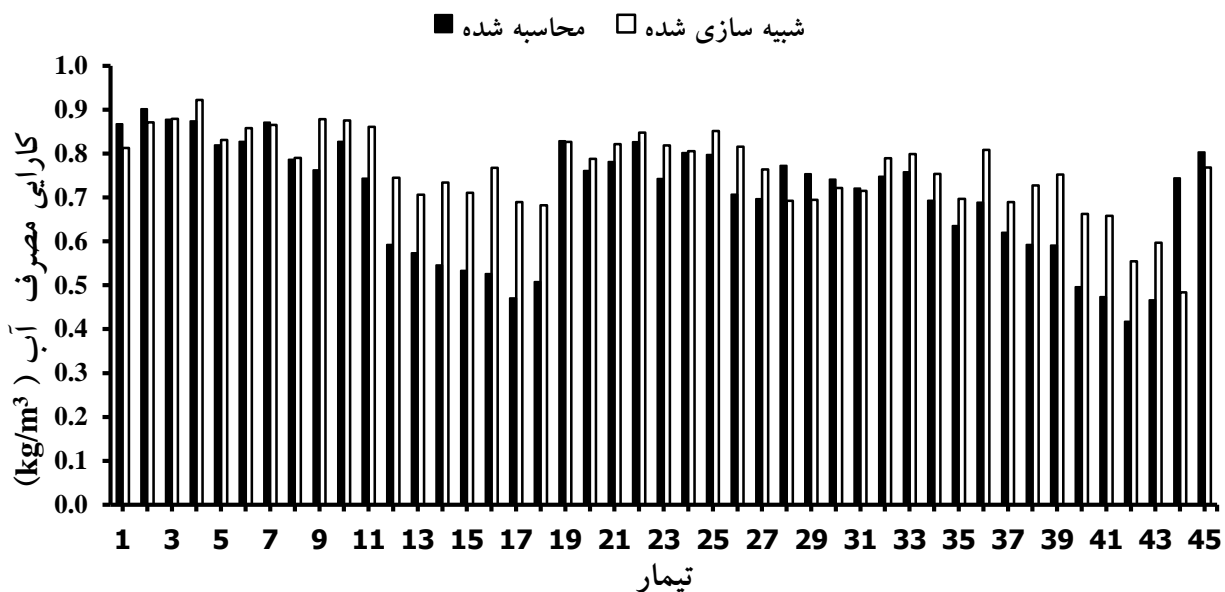
شبیه‌سازی کارایی مصرف آب در این تیمارها شده است. به همین دلیل دقت مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب کمی کمتر از شبیه‌سازی عملکرد دانه (حدود چهار درصد) و زیست توده (حدود نه درصد) می‌باشد. حسین و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که مدل



شکل ۲- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه گندم بهاره در مشهد



شکل ۳- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیست توده گندم بهاره در مشهد



شکل ۴- مقادیر محاسبه شده و شبیه سازی شده کارایی مصرف آب گندم بهاره در مشهد

نتیجه گیری

پارامترها بود. همچنین روند کاهش این پارامترها در اثر تنش های شوری و آبی به خوبی شبیه سازی شد. به طور کلی با افزایش تنش های شوری و خشکی دقت پیش بینی مدل کاهش یافت. مقادیر NRMSE برای شبیه سازی عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف آب در اکثر موارد کمتر از ۱۵ درصد، مقادیر d نزدیک به یک و مقادیر CRM نزدیک به صفر بود. نتایج شبیه سازی رطوبت و شوری نیم رخ خاک نشان داد که مدل می تواند با دقت بالایی روند تغییرات رطوبت و با کمی دقت کمتر نسبت به رطوبت، روند تغییرات شوری را شبیه سازی نماید. با توجه به سادگی و دقت بالای مدل AquaCrop و نیاز به حداقل داده های ورودی که به آسانی قابل اندازه گیری می باشند، می توان از این مدل توانمند برای ارزیابی سناریوهای مختلف آبیاری با کیفیت های مختلف از نظر شوری، به منظور بهینه سازی مصرف آب و مدیریت آبیاری برای گیاه گندم در منطقه مشهد استفاده نمود.

مدل AquaCrop اثر میزان آب و شوری را روی عملکرد گیاه، با استفاده از تعدادی پارامتر گیاهی معقول و داده های ورودی تخمین می زند. یکی از کاربردهای مهم مدل مقایسه عملکردهای واقعی در یک قطعه زراعی، مزرعه و یا یک منطقه می باشد. از این رو ارزیابی این مدل بویژه برای محصولات استراتژیک همچون گندم ضروری می باشد. در این تحقیق مدل AquaCrop تحت شرایط همزمان شوری و کم آبی برای دو سال زراعی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل برای گیاه گندم بهاره به خوبی واسنجی و صحت سنجی می شود. به طوری که مدل توانست مقادیر عملکرد، زیست توده، کارایی مصرف آب و شاخص برداشت را برای گندم تحت شرایط همزمان شوری و خشکی با دقت بالایی برآورد نماید اگرچه که دقت مدل در شبیه سازی شاخص برداشت کمی کمتر از بقیه

فهرست منابع

۱. حق وردی ا، قهرمان ب، کافی م. و داوری ک. ۱۳۹۰. تحلیل آزمایش های گزینش شوری-کم آبیاری برای گندم بهاره در منطقه مشهد. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، ۱۵ (۵۸): ۱۰-۱.

۲. علیزاده ح.، نظری ب.، پارسی‌نژاد م.، رضوانی اعتدالی ه. و جانباز ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل Aquacrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقه کرج. مجله آبیاری و زهکشی ایران، (۴): ۲۸۳-۲۷۳.
۳. گزارش عملکرد حفاظت و بهره‌برداری منابع آب و تعادل بخشی در سال ۹۳. شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی، دفتر حفاظت و بهره‌برداری منابع آب، اردیبهشت ۱۳۹۴.
۴. سیمای کشاورزی شهرستان مشهد در سال ۱۳۹۱. سازمان جهاد کشاورزی خراسان رضوی، اداره آمار و اطلاعات کشاورزی، ۱۳۹۲.
5. Andarziana, B., Bannayanb, M., Stedutoc, 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. *Agricultural Water Management*, 100:1-8.
6. Behera, S.K., and Panda, R.K. 2009. Integrated management of irrigation water and fertilizers for wheat crop using field experiments and simulation modeling. *Agricultural Water Management*, 96: 1532–1540.
7. Doorenbos, J., and Kassam, A.H. 1979. Yield Response to Water. *Irrigation and Drainage Paper No. 33*. FAO, Rome.
8. Egli, D.B., and Bruening, W. 1992. Planting date and soybean yield: Evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO, *Agricultural and Forest Meteorology Journal*, 62:19-29.
9. Garcia-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F., and Steduto, P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101: 477-487.
10. Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J.A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., and Steduto, P. 2009. Simulating yield response of quinoa to water availability with AquaCrop. *Agronomy Journal*, 101: 499–508.
11. Haghverdi, A., Ghahraman, B., Lei, B.G., Pulido-Calvo, I., Kafi M., Davary, K., Ashorun, B. 2014. Deriving data mining and regression based water-salinity production functions for spring wheat (*Triticum aestivum*). *Computers and Electronics in Agriculture*, 101: 68–75.
12. 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: 488–498.
13. Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., and Fereres, E. 2009. AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101, 448-459.
14. Hussein, F, Janat, M and Yakoub, A, 2011. Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4):1319-1330.
15. Jones, C.A., Kiniry, J.R., and Dyke, P.T. 1986. CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development, User's guide of CERES-Maize. Texas University Press College Station (USA).
16. Kroes, J.G and Van Dam, J.C. 2008. Reference manual SWAP version 3.2., Alterra Green World Research, Wageningen, Report 1649 (Available at: www.alterra.nl/models/swap).
17. Kumar P, Sarangi A, Singh DK, Parihar SS. 2014. Evaluation of AquaCrop model in predicting wheat yield and productivity under irrigated saline regimes. *Irrigation and Drainage*, 63: 474–487.

18. Kuo, S.F., Lin, B.J., and Shieh, H.J. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. *Agricultural Water Management*, 82:433-451.
19. Marinov, D., Querner, E., and Roelsma, J. 2005. Simulation of water flow and nitrogen transport for a Bulgarian experimental plot using SWAP and ANIMO models. *Journal of Contaminant Hydrology*, 77: 145-164.
20. Mebane, V. J., Day, R. L., Hamlett, J. M., Watson, J. E., and Roth, G. W. 2013. Validating the FAO AquaCrop model for rainfed maize in Pennsylvania. *Agronomy Journal*, 105(2):419-427.
21. Meyer, G.E., Curry, R.B., Streeter, J.G., and Baker, C.H. 1981. Simulation of reproductive processes and senescence in indeterminate soybeans. *Transactions of the ASABE*. 24 (2):421- 429.
22. Mkhabela, M. S., and Bullock, P. R. 2012. Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110:16–24.
23. Raes, D. 2002. Reference manual of Budget model. K. U. Leuven, Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, Institute for Land and Water Management, Leuven, Belgium.
24. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., and Fereres, E. 2009. AquaCrop-the FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101:438–447.
25. Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., and Fereres, E. 2012. Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.
26. Salemi, H., Mohd Soom, M.A., Lee, T.S., and Mousavi, S.F., Ganji, A., and KamilYusoff, M. 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of Winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*, 610: 2204-2215.
27. Shamsnia, S. A., and Pirmoradian, N. 2013. Simulation of rainfed wheat yield response to climatic fluctuations using AquaCrop model (case study: Shiraz region in southern of Iran). *International Journal of Engineering Science Invention*, 2(4):51-56.
28. Singh, R. 2004. Simulation on direct and cyclic use of saline waters for sustaining Cotton-Wheat in a semi-arid area of north-west India. *Agricultural Water Management*, 66: 153-162.
29. Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., and Fereres, E. 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*. 25:189–207.
30. Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., and Fereres, E. 2009. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101:426-437.
31. Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M., Stöckle, C., and Steduto, P. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Agronomy Journal*, 101: 509–521.
32. Van Dam, J.C., Groenendijk, P., Hendriks, R.F.A., and Kroes, J.G. 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, 7:640-653.
33. Zadoks J.C., Chang T.T., and Konzak C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14: 415-421.