

## اعتبار سنجی مدل AquaCrop به منظور شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب گندم زمستانه تحت شرایط هم‌زمان تنش شوری و خشکی

مسعود محمدی<sup>۱</sup> - بیژن قهرمان<sup>۲\*</sup> - کامران داوری<sup>۳</sup> - حسین انصاری<sup>۴</sup> - علی شهیدی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۰/۱۵

### چکیده

بهبود مدیریت آب در مزرعه و ارتقای کارایی مصرف آب تحت شرایط هم‌زمان تنش شوری و کم‌آبی از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل‌هایی که اثرات مقادیر و کیفیت‌های مختلف آب بر روی عملکرد محصول را به صورت کمی شبیه‌سازی می‌کنند، ابزارهایی مفید در مدیریت آب در مزرعه و بهبود کارایی مصرف آب می‌باشند. مدل AquaCrop عملکرد محصول، نیاز آبی و کارایی مصرف آب را تحت شرایط مختلف، از جمله کم‌آبیاری و کیفیت‌های مختلف آب آبیاری، شبیه‌سازی می‌کند. به منظور اعتبار سنجی مدل AquaCrop در منطقه بیرجند، آزمایشی در قالب طرح کرت‌های خرد شده به صورت فاکتوریل انجام شد، که در آن سه فاکتور شوری آب آبیاری در سه سطح ( $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  به ترتیب معادل ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر) به عنوان کرت‌های اصلی و دو رقم گندم (قدس و روشن) و مقدار آب آبیاری در ۴ سطح ( $I_1$ ،  $I_2$ ،  $I_3$  و  $I_4$  به ترتیب معادل ۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد نیاز آبی گیاه) به صورت فاکتوریل به عنوان کرت‌های فرعی اجرا گردید. در ابتدا مدل به طور جداگانه برای هر تیمار شوری و سپس به طور هم‌زمان برای تیمارهای شوری و اسنجی و صحت‌سنجی شد. عملکرد محصول، زیست توده و کارایی مصرف آب برای دو رقم گندم در شرایط شوری و کم‌آبی به خوبی شبیه‌سازی شد به طوری که آماره‌های  $RMSE$ ،  $d$ ،  $ME$ ،  $CRM$  و  $R^2$  در شبیه‌سازی عملکرد محصول برای رقم روشن به ترتیب ۷/۰۹ درصد، ۱۵/۶۱ درصد، ۰/۰۹۷، ۰/۰۰۱ و ۰/۹ و برای رقم قدس به ترتیب ۸/۱۶ درصد، ۱۷/۴۶ درصد، ۰/۹۸، ۰/۰۰۴ و ۰/۸۷ بدست آمد. آنالیز حساسیت نشان داد که مدل نسبت به ضریب گیاهی مربوط به تعرق ( $K_C-T_r$ )، بهره‌وری آب نرمال شده ( $WP^*$ )، شاخص برداشت ( $HI_0$ )، رطوبت در ظرفیت زراعی، رطوبت اشباع و دمای هوا حساس‌تر از سایر پارامترهاست.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، زیست توده، مدل‌سازی گیاهی

### مقدمه

امروزه در دنیا برای کاهش مصرف آب با کیفیت خوب در کشاورزی استفاده می‌شود، کم‌آبیاری و استفاده از آب شور می‌باشد. در شرایط کمبود آب با کیفیت خوب، بهبود کارایی مصرف آب که مبتنی بر تولید بیشتر به ازای هر واحد آب مصرفی است بسیار با اهمیت می‌باشد. برای دستیابی به این هدف، آگاهی دقیق از رابطه بین مصرف آب و عملکرد محصول ضروری است. گزینه‌های مدیریتی که به وسیله مطالعات صحرایی بررسی می‌شوند به دلیل زمان‌بر بودن و نبود منابع مالی و انسانی کافی محدود می‌گردند (۵). 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 (۳۲). 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

با تخصیص بیش از ۷۰ درصد از منابع آب به بخش کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک دنیا، کشاورزی فاریاب اصلی‌ترین مصرف کننده آب می‌باشد (۹). تاکید بر کشاورزی فاریاب به این علت است که آبیاری نقش بسیار مهمی در افزایش تولید مواد غذایی دارد. این امر برای تامین غذایی جمعیت جهان که به سرعت رو به گسترش است بسیار حیاتی می‌باشد. در نواحی نیمه خشک که بارش نامنظم و محدود است انجام آبیاری برای تولید محصول و دستیابی به بیش‌ترین پتانسیل آن ضروری است (۱۷). از راه‌کارهای موجود که

۱، ۲، ۳ و ۴- دانشجوی دکتری، استاد و دانشیاران آبیاری و زهکشی گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد  
\* - نویسنده مسئول: (Email: bijangh@um.ac.ir)

۵- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند

ورودی و دقت قابل قبول مدل از مزایای استفاده از آن می‌باشد. مدل Aquacrop توازن منطقی بین سادگی، دقت، توانمندی و سهولت استفاده برقرار می‌کند. این مدل تا به حال بر روی گیاهان متعددی به کار رفته است. از جمله نتایج مطالعه هسیانو و همکاران (۱۳) 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 (۳۱) 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 کمتر از دو مدل دیگر نیاز به داده‌های ورودی دارد و هم زیست توده و هم عملکرد را در مرحله برداشت محصول مشابه با دو مدل دیگر شبیه‌سازی می‌کند. اندرزیان و همکاران (۳) مدل AquaCrop را در شهرستان اهواز برای محصول گندم تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری (در مراحل مختلف رشد گیاه و عمق آب کاربردی) ارزیابی 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 (۲۷) 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 (۲۶) نشان داد که مدل به خوبی می‌تواند در شرایط کم‌آبیاری و آبیاری کامل عملکرد و بایومس گندم را شبیه‌سازی نماید. در ایران نیز علیزاده و همکاران (۲) 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 ۷ روزه قابلیت خوبی داشته است، اما دقت پیش‌بینی این پارامترها در دور ۱۴ روزه کمتر بود. بابازاده و سرائی تبریزی (۴) مدل Aquacrop را برای گیاه سویا در منطقه کرج مورد ارزیابی و آنالیز حساسیت قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول، تبخیر-تعرق و کارایی مصرف آب سویا عملکرد قابل قبولی دارد. همچنین مدل نسبت به شاخص برداشت، زمان گلدهی و پر شدن غلاف حساسیت بالایی دارد. در اکثر مناطق خشک و نیمه خشک، 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. لذا در این تحقیق، عملکرد مدل

و زمانی موجود در تحقیقات صحرائی و صرف هزینه و زمان کم‌تر جهت ارزیابی مدیریت‌های مختلف آبیاری و اثرات درازمدت این مدیریت‌ها به کار گرفته شوند (۲۸). بنابراین این مدل‌ها توصیه‌های عملی را برای کشاورزان و کسانی که به صورت گسترده روی برنامه‌ریزی کم‌آبیاری و استفاده از آب شور تحت شرایط مختلف تأمین آب و شرایط مختلف مدیریت محصول کار می‌کنند، فراهم می‌نمایند (۱۶). 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 (۱۵) 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 (۲۰)، CERES (۱۴)، SOYGRO (۷) و APSIM (۱۸) و برخی دیگر از مدل‌ها مانند CropSyst (۳۱) 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 (۳۱). یکی دیگر از مدل‌های زراعی پرکاربرد، مدل Aquacrop می‌باشد که از اصلاح و بازنگری نشریه ۳۳ فائو توسط متخصصان برجسته از سرتاسر جهان به دست آمده است. استخوان‌بندی فکری و اصول اساسی مدل برای شبیه‌سازی فرآیندها توسط استودیو و همکاران (۳۰) و الگوریتم مورد استفاده در نرم افزار مدل و توصیف عملیات توسط رانس و همکاران (۲۴) 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 که به عنوان بخش مولد محسوب می‌شود تعرق گیاه و بخش پوشش سبز محصول است که بررسی و نحوه بهبود بهره‌وری تعرق از طریق ارائه گزاره‌های مدیریتی از قابلیت مدل Aquacrop محسوب می‌شود. 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 اهمیت ویژه‌ای 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. مدل Aquacrop مدلی قدرتمند و ارزشمند برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب می‌باشد. سادگی، نیاز به کم‌ترین داده

آزمایشی مورد نظر، به صورت کرت‌های خرد شده که در آن سطوح مختلف شوری ( $S_1, S_2, S_3$ ) به ترتیب معادل  $1/4, 1/5, 1/6$  دسی زیمنس بر متر) به عنوان کرت‌های اصلی و دو رقم گندم (قدس و روشن) و چهار سطح آبیاری ( $I_1, I_2, I_3, I_4$ ) به ترتیب معادل ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه) به عنوان کرت‌های فرعی در سه تکرار اجرا گردید. روش کاشت به صورت دستی و در تاریخ ۲۳ آبانماه ۱۳۸۴ و برداشت محصول در تاریخ ۲۸ اردیبهشت ماه ۱۳۸۵ انجام شد. به منظور حصول یکنواختی در اعمال تنش شوری از روش آبیاری کرتی استفاده شد. ابعاد کرت‌ها  $3 \times 4$  (متر  $\times$  متر)، فاصله کرت‌های فرعی ۵۰ سانتی‌متر و فاصله کرت‌های اصلی  $4/5$  متر در نظر گرفته شد. فاصله بین ردیف‌های کاشت ۲۰ سانتی‌متر و تراکم کاشت ۴۰۰ بوته در متر مربع بود. مقادیر کود مورد نیاز بر اساس آنالیز خاک تعیین و به طور یکنواخت در سطح کرت‌ها توزیع گردید. جهت تجهیز سیستم آبیاری به گونه‌ای که بتوان سطوح مختلف شوری آب آبیاری را در کرت‌های آزمایشی اعمال کرد، ابتدا سه منبع فلزی هر یک با حجم ۲۸۰۰۰ لیتر بر روی سکوی به ارتفاع  $1/5$  متر نصب گردید و آب با شوری مورد نظر را از نهر بالادست مزرعه به داخل هر یک از مخازن آب پمپ نموده و سپس از طریق خط لوله به ابتدای قطعه زراعی انتقال داده و میزان آب مورد نیاز هر کرت از طریق کنتور حجمی به صورت دقیق اندازه‌گیری و به کرت منتقل شد. با استفاده از نمونه‌برداری به ازاء هر ۲۰ سانتی‌متر تا عمق ریشه (یک متر در نظر گرفته شد) در روزهای قبل از آبیاری درصد رطوبت وزنی خاک تعیین (با استفاده از داده‌های تشت تبخیر، هنگامی که ۷۰ میلی‌متر تبخیر صورت می‌گرفت (۱۱))، نمونه‌برداری از خاک برای تعیین مقدار آب آبیاری انجام می‌گردد) و براساس کمبود رطوبت خاک تا ظرفیت زراعی و معیار قرار دادن تیمار بدون تنش آبی و اعمال ضرایب هر تیمار، از معادله ۱ برنامه‌ریزی آبیاری انجام شد:

$$SMD = (W_{fc} - W_i) \cdot A_s \cdot D \cdot C \quad (1)$$

که در آن SMD کمبود رطوبت خاک ( $W_{fc}, W_i, \text{mm}$ ) به ترتیب درصد وزنی رطوبت وزنی رطوبت در ظرفیت زراعی و موجود در خاک،  $A_s$  جرم مخصوص ظاهری خاک ( $\text{g/cm}^3$ )،  $D$  عمق توسعه ریشه ( $1000 \text{ mm}$ ) و  $C$  ضریب هر تیمار آبیاری می‌باشند.

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه قبل از آماده سازی زمین، نمونه‌های مرکبی از ۴ نقطه محدوده کشت و از سه عمق ۰-۳۰، ۳۰-۶۰ و ۶۰-۹۰ سانتی‌متری خاک برداشت شد که نتایج آن در جدول ۱ و زمان‌بندی و مقادیر آب آبیاری در جدول ۲ ارائه شده است.

AquaCrop در شرایط هم‌زمان تنش‌های شوری و خشکی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. بررسی منابع مختلف نشان می‌دهد که تاکنون مدل، تحت این شرایط مورد ارزیابی قرار نگرفته است. برای این منظور از نسخه ۴ مدل AquaCrop استفاده 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 (۲۵). در شرایطی که داده‌های اندازه‌گیری شده برای چند سال زراعی به منظور واسنجی و صحت‌سنجی موجود نباشند می‌توان از چند تیمار برای واسنجی و از تیمارهای باقی‌مانده برای صحت‌سنجی مدل استفاده کرد. به عبارتی حالت‌های مختلفی از تیمارها، برای واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شوند. بنابراین نوآوری و اهداف این تحقیق: ۱- واسنجی آخرین نسخه مدل AquaCrop، تحت شرایط هم‌زمان شوری و کم‌آبی گیاه گندم با داده‌های گیاهی و داده‌های رطوبت و شوری خاک (در مطالعات قبلی مدل AquaCrop فقط با داده‌های گیاهی واسنجی شده است)، ۲- استفاده از حالت‌های مختلفی از تیمارها برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop، ۳- آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای گیاهی و هیدرولیکی خاک برای گیاه گندم در منطقه بیرجند می‌باشند.

## مواد و روش‌ها

### کلیات طرح

این مطالعه در سال زراعی ۸۵-۱۳۸۴ در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بیرجند که در فاصله ۵ کیلومتری غرب شهر بیرجند در مسیر جاده بیرجند-طیس، مجاور روستای امیرآباد با عرض جغرافیایی  $53^\circ$  درجه و  $32'$  دقیقه شمالی و طول جغرافیایی  $13^\circ$  درجه و  $55'$  دقیقه شرقی و با ارتفاع  $1480$  متر از سطح دریا انجام شد. شهر بیرجند در مرکز استان خراسان جنوبی واقع شده و از نظر اقلیمی جزء مناطق خشک دارای زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم است. برای دوره آماری ۳۰ ساله، میانگین بارندگی سالیانه  $171$  میلی‌متر (مقدار بارندگی برای سال ۸۵-۱۳۸۴ در طول فصل رشد گندم  $81$  میلی‌متر بوده است)، میانگین دمای سالیانه آن  $16/6$  درجه سانتی‌گراد، حداکثر درجه حرارت مطلق  $38/2$  درجه سانتی‌گراد، حداقل درجه حرارت مطلق  $5/1-$  درجه سانتی‌گراد و متوسط روزهای یخبندان سال به  $67$  روز می‌رسد. متوسط سرعت باد سالیانه  $9/7$  کیلومتر در ساعت برآورد شده است. با توجه به وجود ۳ حلقه چاه در این مزرعه با شوری‌های متفاوت ( $1/4, 1/5, 1/6$  دسی‌زیمنس بر متر)، امکان تأمین آب با شوری‌های متفاوت به صورت طبیعی وجود دارد. در نیمه دوم آبانماه ۱۳۸۴ آماده سازی زمین (شخم، دیسک و لولر) انجام شد. طرح

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه مورد مطالعه

Table 1- Soil physical and chemical properties of field studied

پارامتر Parameter	عمق خاک Depth of soil (cm)			پارامتر Parameter	عمق خاک Depth of soil (cm)		
	0-30	30-60	60-90		0-30	30-60	60-90
بافت خاک Texture	Clayloam	Silty clay loam	Silty clay loam	K (mg/kg)	261	278	195
$\theta_{fc}$ (%)		33.4		P (mg/kg)	9.2	11.5	10.3
$\theta_{pwp}$ (%)		19.7		کربن آلی Organic carbon (%)	0.53	0.42	-
$\theta_{sat}$ (%)	41.84	44.83	45.93	pH	7.61	7.72	7.78
هدایت الکتریکی اشباع $K_{sat}$ (mm/day)	58.4	65.3	95.2	EC (dS/m)	2.1	2.7	2.9
				جرم مخصوص ظاهری $A_s$ (g/m <sup>3</sup> )	1.5	1.45	1.39

جدول ۲- برنامه ریزی آبیاری کرت‌های گندم

Table 2- Irrigation scheduling of wheat basins

روز بعد از کاشت Day after sowing	تاریخ آبیاری Date of irrigation	نوبت آبیاری Number of irrigation	$I_4$ (mm)	$I_3$ (mm)	$I_2$ (mm)	$I_1$ (mm)
2	2005/16/11	1	30	30	30	30
103	2006/24/02	2	35	53	53	87
117	2006/10/03	3	38	57	57	95
131	2006/24/03	4	45	68	68	114
154	2006/16/04	5	49	73	73	121
165	2006/27/04	6	45	67	67	113
175	2006/07/05	7	40	60	60	100
	Sum (mm)		282	408	408	660

و به پارامتری ثابت تبدیل شده است (۲۹)،  $T_{ri}$  تعرق روزانه (mm) و  $ET_{o,i}$  تبخیر-تعرق روزانه (mm) می‌باشد. برتری دیگر معادله ۳ به معادله ۲ این است که شبیه‌سازی فرآیندهای رشد گیاه در آن با استفاده از گام‌های زمانی روزانه صورت می‌گیرد، در حالی که در معادله ۲ 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 (۲۳). 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 برای بسته شدن روزنه‌ها) را تغییر می‌دهد. در واقع با ضرب کردن ضریب تنش شوری ( $K_{S_{sto,salt}}$ ) در حد بالا و پایین تخلیه آب خاک ( $P_{lower}$  و  $P_{upper}$ ).

### تئوری مدل AquaCrop

مدل AquaCrop از معادله دورنباس و کسام (۶) با تفکیک نمودن  $ET_a$  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 ۲):

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_X}\right) = K_Y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_X}\right) \quad (2)$$

در این معادله،  $Y_X$  عملکرد حداکثر،  $Y_a$  عملکرد واقعی،  $ET_X$  تبخیر-تعرق حداکثر،  $ET_a$  تبخیر-تعرق واقعی و  $K_Y$  ضریب حساسیت به آب می‌باشد. با تفکیک تبخیر-تعرق به تعرق از سطح گیاه و تبخیر از سطح خاک می‌توان از اثر مصرف غیر تولیدی آب از طریق تبخیر از سطح خاک به ویژه در شرایط پوشش گیاهی ناکامل جلوگیری کرد. تعرق روزانه با استفاده از تبخیر-تعرق روزانه و بهره‌وری 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 (۲۹ و ۳۰):

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

در این معادله  $B_i$  عملکرد بیولوژیک ( $WP^*$ ,  $kg/m^2$ ) بهره‌وری آب نرمال شده ( $kg/m^2$ ) که مقدار آن برای شرایط اقلیمی متفاوت نرمال

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 سلول‌های بیشتری نسبت به لایه‌ی افقی شنی دارد. مدل با استفاده از روابط ۳ تا ۵ شوری اشباع خاک را در هر لایه محاسبه می‌کند (۲۴):

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

$$\text{Salt}_{\text{cell}} = 0.64 W_{\text{cell}} \text{EC}_{\text{cell}} \quad (6)$$

$$\text{EC}_e = \frac{\sum_{j=1}^n \text{Salt}_{\text{cell},j}}{0.64(1000\theta_{\text{sat}} \Delta z)} \quad (7)$$

که  $W_{\text{cell}}$  حجم سلول (میلی‌متر آب)،  $\theta_{\text{sat}}$  رطوبت اشباع خاک ( $\text{cm}^3/\text{m}^3$ )،  $\Delta z$  ضخامت لایه‌های خاک ( $n, \text{m}$ ) تعداد سلول‌ها،  $\text{Salt}_{\text{cell}}$  مقدار نمک سلول ( $\text{gr}/\text{m}^2$ )،  $\text{EC}_{\text{cell}}$  هدایت هیدرولیکی هر سلول ( $\text{dS}/\text{m}$ ) و  $\text{EC}_e$  هدایت هیدرولیکی اشباع عمق مشخصی از خاک ( $\text{dS}/\text{m}$ ) می‌باشند.

مقادیر رطوبت و شوری خاک قبل از کشت در اعماق ۰-۲۰، ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰، ۸۰-۱۰۰ سانتی‌متر به عنوان شرایط اولیه برای پیش‌بینی رطوبت و شوری خاک وارد مدل شدند.

### آنالیز حساسیت

با استفاده از رابطه ۴ آنالیز حساسیت مدل AquaCrop انجام شد:

$$S_c = \frac{\frac{\Delta W}{W}}{\frac{\Delta P}{P}} \quad (8)$$

که در آن  $S_c$  ضریب حساسیت بدون بعد،  $\Delta W$  اختلاف مقدار پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر پارامتر ورودی، متوسط پارامتر خروجی قبل و بعد از تغییر،  $\Delta P$  اختلاف مقادیر پارامتر ورودی و متوسط مقادیر ورودی یک پارامتر به مدل می‌باشد. برای تعیین آنالیز حساسیت مدل، از جدول ۴ استفاده شد (۴).

### واسنجی و صحت‌سنجی

#### واسنجی پارامترهای گیاهی با استفاده از داده‌های گیاهی و عملکرد محصول

ابتدا پارامترهای ورودی به مدل مربوط به تیمار شوری  $S_1$  و هر رقم به طور جداگانه وارد مدل گردید و آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ورودی انجام گردید. سپس مدل برای تیمار شوری  $S_1$  هر رقم با تغییر بعضی از پارامترهای حساس که در مزرعه اندازه‌گیری نشده بودند (پارامترهای گیاهی متغیر)، واسنجی گردید (جدول ۸). به طوری که خطای نسبی بین عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی

ضرایب  $K_{\text{Sexp},w}$  و  $K_{\text{Ssen}}$  و با ضرب کردن  $K_{\text{Ssto,salt}}$  در  $K_{\text{Ssto}}$ . 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  $\text{CO}_2$  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 (۳۰). مدل برای غلظت  $\text{CO}_2$  مقدار  $369/46$  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 ( $K_{\text{sat}}$ )، رطوبت حجمی خاک در حد اشباع ( $\theta_{\text{vsat}}$ )، رطوبت حجمی خاک در حد ظرفیت زراعی ( $\theta_{\text{vfc}}$ )، رطوبت حجمی خاک در حد پژمردگی دائم ( $\theta_{\text{vpwp}}$ ) 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 (۱۰ و ۱۲). با این حال در مدل AquaCrop این پارامترها در شرایط تنش آبی و شوری از طریق تأثیر ضرایب حساسیت گیاه به کم‌آبی و شوری ( $K_{\text{Sexp},w}$ ،  $K_{\text{Ssen}}$ ،  $K_{\text{Ssto,salt}}$  و  $K_{\text{Ssto}}$ ) تعدیل می‌شوند. از طرف دیگر، پارامترهای گیاهی متغیر در شرایط مختلف مقادیری متفاوت داشته و مقادیر آن‌ها به مدیریت مزرعه بستگی دارند (جدول ۳ و ۸). در جدول ۳، 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.

مدل 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 ۲ محاسبه می‌کند (۲۴). توازن آبی خاک و جریان‌های ورودی و خروجی از مرزهای منطقه ریشه و آب ذخیره شده در خاک در فواصل زمانی روزانه شبیه‌سازی می‌شود.

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

که  $\Delta \theta$  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 شوری خاک، نیم‌رخ خاک را به

(قبل آبیاری)، تخلیه رطوبت در حد متوسط (بین دو آبیاری) و بدون تخلیه رطوبت (۴۸ ساعت بعد از آبیاری) و اسنجی شود. مجموع داده های رطوبت (۲۴۰ داده) و شوری (۲۴۰ داده) همه تیمارها به دو دسته تقسیم شدند، دسته اول (اعماق ۲۰-۶۰، ۴۰-۶۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی متر) برای اسنجی و دسته دوم (اعماق ۲۰-۴۰، ۴۰-۶۰ و ۶۰-۸۰ سانتی متری) برای صحت‌سنجی مدل در نظر گرفته شد. با انتخاب رطوبت و شوری لایه های مختلف (۲۰-۶۰، ۴۰-۶۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی متر) سعی شد تا حد امکان محدوده مناسبی از عمق خاک برای مرحله اسنجی در نظر گرفته شود. ضخامت‌های مرحله‌ی صحت‌سنجی در درون ضخامت‌های مرحله‌ی اسنجی قرار داده شد تا از خطاهای احتمالی ناشی از برون‌یابی پرهیز شود. به عبارتی، هم توزیع مکانی رطوبت و شوری و هم توزیع زمانی آنها (۱۰۲، ۱۱۹، ۱۴۳، ۱۸۵ بعد از کاشت) برای مرحله اسنجی رعایت شد. پارامترهای هیدرولیکی خاک 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 درصد رطوبت اشباع خاک ( $\theta_{sat}$ )، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ( $K_{sat}$ ) به عنوان خروجی به دست آمد. با توجه به این که رطوبت در ظرفیت زراعی ( $\theta_{FC}$ ) و پژمردگی دائم ( $\theta_{PWP}$ ) با استفاده از نمونه‌ای مرکب از سه لایه خاک (۹۰-۰ سانتی متر) تعیین شده بود (جدول ۱)، بنابراین این مقادیر به عنوان  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  لایه میانی در نظر گرفته شد. برای محاسبه مقادیر  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  لایه‌ی اول و سوم ابتدا مقادیر  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  سه لایه خاک جداگانه با مدل RETC تخمین زده شد. سپس اختلاف مقادیر  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  (برآورد شده توسط مدل RETC) لایه‌های اول و سوم نسبت به لایه دوم محاسبه گردید. با استفاده از این اختلافات و مقدار  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  لایه دوم (اندازه‌گیری شده در مزرعه)، مقادیر  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{PWP}$  لایه‌های اول و سوم تعیین شدند و به عنوان مقادیر مینا در نظر گرفته شدند. پیش از اسنجی، ابتدا مدل نسبت به پارامترهای ورودی خاک آنالیز حساسیت گردید. سپس با تغییر پارامترهای حساس و پارامترهای تخمین زده شده با مدل RETC و با استفاده از دسته اول داده‌های رطوبتی و شوری خاک، مدل برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک و اسنجی و با استفاده از دسته دوم داده‌ها صحت‌سنجی گردید.

#### ارزیابی مدل

ارزیابی مدل با استفاده از پارامترهای آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین ( $R^2$ )، شاخص سازگاری (d)، حداکثر خطا (ME) و ضریب باقیمانده (CRM) انجام شد.

شده حداقل شود. در ادامه مدل برای هر رقم، نسبت به دو تیمار شوری دیگر نیز با توجه به مقدار زیست توده و سطح پوشش ماکزیم آنها به طور جداگانه و اسنجی شد (جدول ۸). با توجه به این که برای هر تیمار شوری ۴ تیمار آبیاری وجود داشت. بنابراین مدل با استفاده از دو تیمار آبیاری برای هر تیمار شوری و اسنجی و با استفاده از دو تیمار آبیاری دیگر صحت‌سنجی گردید. در واقع ۶ حالت مختلف اسنجی و صحت‌سنجی برای هر تیمار شوری وجود داشت ( $I_4$  و  $\{I_3, I_4\}$  و  $\{I_4, I_2\}$  و  $\{I_3, I_1\}$  و  $\{I_3, I_2\}$  و  $\{I_1, I_2\}$  و  $\{I_1, I_3\}$  و  $\{I_2, I_1\}$  و  $\{I_3, I_1\}$  و  $\{I_3, I_2\}$  و  $\{I_4, I_1\}$  و  $\{I_2, I_3\}$  و  $\{I_4, I_2\}$  و  $\{I_4, I_1\}$  و  $\{I_2, I_3\}$  و  $\{I_4, I_3\}$  برای صحت‌سنجی). اسنجی مدل در این ۶ حالت با تغییر ضرایب تنش آبی موجود در مدل (یعنی  $K_{S_{sen}}$ ،  $K_{S_{exp,w}}$  و  $K_{S_{sto}}$ ) انجام گردید (جدول ۹). به طوری که متوسط خطای نسبی مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای هر حالت اسنجی حداقل شود. با توجه به این که مدل نسبت به تغییرات حساسیت بسیار کمی داشت بنابراین برای این پارامتر مقادیر پیش فرض مدل در نظر گرفته شد. همچنین مدل با استفاده از این ۶ حالت به طور همزمان برای سه تیمار شوری و اسنجی و صحت‌سنجی گردید. کالیبره کردن مدل برای هر تیمار شوری به طور جداگانه به این دلیل انجام شد که: ۱- مشخص شود دقت مدل برای حالتی که به طور جداگانه برای هر تیمار شوری و به طور همزمان برای تمام تیمارهای شوری کالیبره می‌شود، چگونه است؟ ۲- آیا می‌توان در منطقه ای که یک منبع آب با شوری مشخص وجود دارد، بدون این که آزمایشی از حالت‌های مختلف کم آبیاری برای آن تیمار شوری، در مزرعه انجام شود، با انجام آزمایشی برای دو مقدار مختلف آب آبیاری (یکی از حالت‌های ذکر شده در بالا)، مدل را اسنجی کرد و در هزینه انجام آزمایش صرفه‌جویی نمود؟

#### واسنجی پارامترهای خاک با استفاده از داده‌های رطوبت و شوری خاک

در طول فصل رشد به منظور اندازه‌گیری رطوبت و شوری خاک برای هر تیمار در ۴ مقطع زمانی (روزهای ۱۰۲ (یک روز قبل از آبیاری دوم)، ۱۱۹ (دو روز پس از آبیاری سوم)، ۱۴۳ (در فاصله زمانی بین آبیاری چهارم و پنجم) و ۱۸۵ (مصادف با زمان برداشت گندم) بعد از کاشت) و ۵ عمق مختلف (۲۰-۶۰، ۴۰-۶۰، ۶۰-۸۰ و ۸۰-۱۰۰ سانتی متری از سطح خاک) از خاک مزرعه نمونه‌برداری شد و شوری عصاره اشباع و رطوبت وزنی (با استفاده از جرم مخصوص ظاهری خاک به رطوبت حجمی تبدیل شدند) در آزمایشگاه تعیین گردید. لازم به ذکر است که نمونه برداری‌ها از نظر زمانی به گونه ای انتخاب شد که بتوان هم قبل آبیاری، هم بعد آبیاری و هم در بین دو آبیاری تغییرات شوری و رطوبت خاک را بررسی کرد. با این روش نمونه‌برداری، مدل می‌تواند به خوبی تحت شرایط تخلیه رطوبت خاک

جدول ۳- پارامترهای گیاهی متغیر مربوط به مراحل رشد دو رقم گندم زمستانه

Table 3- Non-conservative crop parameters for growth periods of two winter wheat varieties

پارامتر Parameter	رقم قدس Ghods variety	رقم روشن Roshan variety	پارامتر Parameter	رقم قدس Ghods variety	رقم روشن Roshan variety
سطح پوش اولیه Initial canopy cover (CC <sub>0</sub> ,%)	6	6	شروع پیری پوشش گیاهی Start senescence (day)	155	161
تراکم کشت Plant density (plant/ha)	4000000	4000000	رسیدگی فیزیولوژیکی Maturity (day)	185	186
سبز شدن Emergence (day)	10	11	طول دوره گل‌دهی Length of flowering stage (day)	16	18
گل‌دهی Flowering (day)	120	121	شاخص برداشت مرجع Reference harvest index (HI <sub>0</sub> ,%)	36	40

آب آبیاری و بارندگی حساسیت کمی دارد. بنابراین خطای ناشی از اندازه‌گیری آنها قابل اغماض خواهد بود. همچنین حساسیت مدل نسبت به تغییرات ضریب گیاهی مربوط به تعرق (K<sub>C-Tr</sub>)، بهره‌وری آب نرمال شده (WP\*)، شاخص برداشت (θ<sub>sat</sub>, θ<sub>FC</sub>, HI<sub>0</sub>)، دمای ماکزیمم هوا بالا و 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. حساسیت مدل نسبت به عمق آبیاری در تیمارهای مختلف متفاوت می‌باشد و در کم‌آبیاری‌ها حساسیت مدل نسبت به تغییرات عمق آبیاری بیشتر می‌شود. سالمی و همکاران (۲۶) گزارش کردند مدل در شبیه‌سازی عملکرد گندم نسبت به WP\*، K<sub>C-Tr</sub> و دمای هوا حساسیت متوسطی دارد و مدل در کم‌آبیاری‌ها، نسبت به تغییرات عمق آب آبیاری حساس‌تر است. بابازاده و سرائی تبریزی (۴) گزارش کردند مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول گیاه سویا نسبت به پارامترهای WP\*، HI<sub>0</sub>، زمان گلدهی و پر شدن غلاف حساسیت بالایی دارد.

## نتایج و بحث

### آنالیز حساسیت مدل AquaCrop

نتایج مربوط به آنالیز حساسیت مدل در شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک نشان داد که مدل برای شبیه‌سازی رطوبت نسبت به θ<sub>FC</sub> حساسیت متوسط و نسبت به θ<sub>sat</sub>, θ<sub>PWP</sub> و K<sub>sat</sub> حساسیت کمی دارد. همچنین برای شبیه‌سازی شوری نسبت به θ<sub>sat</sub> حساسیت متوسط و نسبت به θ<sub>FC</sub>, θ<sub>PWP</sub> و K<sub>sat</sub> حساسیت کمی دارد. بنابراین θ<sub>sat</sub> و θ<sub>FC</sub> باید با دقت زیادی اندازه‌گیری شود. در غیر این صورت خطای قابل توجهی در نتایج حاصل از شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک به وجود می‌آید. نتایج آنالیز حساسیت مدل برای پارامترهای ورودی مدل AquaCrop به منظور شبیه‌سازی عملکرد محصول در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به جدول ۵، مدل نسبت به پارامترهای تراکم کشت، ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC)، زمان سبز شدن بذرها، زمان رسیدن به ماکزیمم پوشش، زمان رسیدن به گلدهی، طول زمان گلدهی، حد آستانه بالای دما، θ<sub>PWP</sub>, K<sub>sat</sub>، شوری

جدول ۴- طبقه‌بندی پیشنهاد شده برای دامنه تغییرات ضریب حساسیت (۴)

Table 4- Non-conservative crop parameters for growth periods of two winter wheat varieties

دامنه تغییرات Range of S <sub>c</sub>	1.5 < S <sub>c</sub>	0.3 < S <sub>c</sub> < 1.5	0 < S <sub>c</sub> < 0.3	S <sub>c</sub> = 0
شدت حساسیت Sensitivity level	حساسیت زیاد High sensitivity	حساسیت متوسط Moderate sensitivity	حساسیت کم Low sensitivity	بدون حساسیت unsensitive

جدول ۵- ضریب حساسیت برخی پارامترهای ورودی مدل AquaCrop  
Table 5- Sensitivity coefficient (Sc) of selected input parameters of AquaCrop model

پارامترهای ورودی مدل Input parameters of model	Sc (+25%)	Sc (-25%)	درجه حساسیت Sensitivity level	
	%			
ضریب گیاهی مربوط به تعرق Crop coefficient for transpiration ( $K_{cTr}$ )	1.03	1.04	Moderate	
تراکم کشت planting date	0.05	0.05	Low	
ضریب رشد پوشش Canopy growth coefficient (CGC)	-0.22	-0.1	Low	
بهره‌وری آب نرمال شده Water productivity normalized (WP*)	1	1.02	Moderate	
شاخص برداشت Reference harvest index ( $HI_0$ )	1.02	0.92	Moderate	
زمان سبز شدن بذر Time to reach emergence	-0.04	-0.03	Low	
زمان رسیدن به ماکزیمم پوشش Time to reach maximum canopy cover	-0.17	-0.05	Low	
زمان رسیدن به گلدهی Time to reach flowering	0.02	0.01	Low	
طول زمان گلدهی Length of flowering stage	0	0	Unresponsive	
حد آستانه بالای دما Upper temperature	0	0.01	Low- unresponsive	
پارامترهای خاک Soil parameters	$\theta_{FC}$	-1.16	0.54	Moderate
	$\theta_{sat}$	-0.04	0	Low- Unresponsive
	$\theta_{PWP}$	0	4.43	High- Unresponsive
	$K_{sat}$	0	0	Unresponsive
عمق آبیاری Depth of irrigation	$I_3$	0	-0.01	Low- Unresponsive
	$I_4$	0	0	Unresponsive
	$I_2$	0.06	0.11	Low
	$I_1$	0.22	0.36	Low-Moderate
شوری آب آبیاری Irrigation water salinity	$I_3$	-0.04	-0.07	Low
	$I_4$	-0.04	-0.06	Low
	$I_2$	-0.09	-0.16	Low
	$I_1$	-0.13	-0.21	Low
Climate parameters	دمای ماکزیمم Maximum temperature	0.02	0.56	Low-Moderate
	بارندگی Rainfall	0.01	0.12	Low

برای شبیه‌سازی عملکرد محصول، رطوبت و شوری خاک به  $\theta_{FC}$  و  $\theta_{sat}$  حساس است. بنابراین در قسمت واسنجی پارامترهای هیدرولیکی با تغییر این دو پارامتر، مقادیر عملکرد محصول، رطوبت و شوری خاک شبیه‌سازی شده همزمان تغییر می‌کردند. تغییر پارامترهای  $\theta_{sat}$  و  $\theta_{FC}$  تا زمانی که کمترین خطا بین مقادیر اندازه

### نتایج آماری واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک

پارامترهای واسنجی شده هیدرولیکی خاک و نتایج آنالیز آماری برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک به ترتیب در جداول ۶ و ۷ آورده شده است. با توجه به این که آنالیز حساسیت نشان داد مدل



واسنجی و صحت‌سنجی مدل، بسیار نزدیک به هم می‌باشند (مقدار RMSE برای رطوبت به ترتیب در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی ۱۱/۱۹ و ۱۲/۳۴ درصد و برای شوری به ترتیب ۲۳/۹۴ و ۲۴/۸۷ درصد می‌باشد) که نشان می‌دهد مدل به خوبی واسنجی شده است. در همین رابطه خابالا و بولاک (۲۱) 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  $R^2$ ، RMSE،  $d$  برای شبیه‌سازی رطوبت نیم‌رخ خاک به ترتیب ۰/۹، ۴۹/۴mm و ۰/۹۹ بدست آمدند. نتایج می‌بین و همکاران (۱۹) نیز نشان داد که مدل توانسته است با دقت بالایی رطوبت نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی کند. به طوری که مقادیر RMSE برای برآورد رطوبت ۶ عمق خاک از ۱/۵ تا ۹/۸ درصد نوسان داشت.

#### عملکرد گندم

پارامترهای گیاهی واسنجی شده برای دو رقم گندم در جدول ۸ ارائه شده است. در جدول ۸، محدوده مقادیر ماکزیمم سطح پوشش گیاهی (CCX)، ضریب رشد پوشش (CGC)، ضریب کاهش پوشش (CDC) و حداکثر عمق ریشه با استفاده از پیوست ارائه شده همراه مدل AquaCrop تعیین و سپس واسنجی شدند. مقدار ضریب گیاهی برای تعرق ( $K_C-Tr$ ) و بهره‌وری آب نرمال شده ( $WP^*$ ) همان مقدار ارائه شده در پیوست مدل در نظر گرفته شد.

گیری شده و شبیه‌سازی شده (عملکرد محصول، رطوبت و شوری خاک) بدست آید، ادامه داشت. سپس دو پارامتر  $\theta_{PWP}$  و  $K_{sat}$  (که مدل در شبیه‌سازی عملکرد به آنها حساس نبود اما در شبیه‌سازی رطوبت و شوری خاک نسبت به آنها حساسیت کم داشت) تغییر داده شدند تا خطای کمتری بین مقادیر رطوبت و شوری اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حاصل شود.

با توجه به این که رطوبت و شوری خاک، در اعماق ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵، ۴۵، ۵۵، ۶۹، ۸۲، ۹۷، ۱۱۳، ۱۲۷ و ۱۴۵ سانتی‌متر (تا عمق ریشه گیاه) شبیه‌سازی شده بودند (این اعماق در کنترل کاربر نیستند و مدل به طور پیش فرض با توجه به عمق ریشه رطوبت و شوری خاک را در ۱۲ عمق شبیه‌سازی می‌نماید). بنابراین در این تحقیق متوسط رطوبت و شوری شبیه‌سازی شده اعماق (۵ و ۱۵ سانتی‌متر)، (۲۵ و ۳۵ سانتی‌متر)، (۴۵ و ۵۵ سانتی‌متر)، (۶۹ سانتی‌متر) و (۸۲ و ۹۷ سانتی‌متر) به عنوان متوسط رطوبت و شوری اعماق ۲۰-۰، ۴۰-۲۰، ۶۰-۴۰، ۸۰-۶۰ و ۱۰۰-۸۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. همان‌طور در جدول ۷ مشاهده می‌شود مدل توانسته است با دقت مناسبی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک را شبیه‌سازی نماید. مقادیری متوسط RMSE، ME،  $d$  و  $R^2$  برای رطوبت به ترتیب ۱۱/۷۶ درصد، ۲۶/۸۴ درصد، ۰/۷۹ و ۰/۶۱ و برای شوری به ترتیب ۲۴/۴ درصد، ۵۲/۸۹ درصد، ۰/۷۲ و ۰/۵۷ می‌باشند. با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری می‌توان گفت دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت بیشتر از شوری نیم‌رخ خاک بوده است. همچنین با توجه به جدول ۶ شاخص‌های آماری مربوط به مرحله

جدول ۶- پارامترهای واسنجی شده هیدرولیکی خاک برای شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک

Table 6- The calibrated soil hydraulic parameters for simulation of soil water content and salinity

عمق خاک Depth of soil (cm)	$\theta_{FC}$ (%)	$\theta_{PWP}$ (%)	$\theta_{sat}$ (%)	$K_{sat}$ (mm/day)
0-30	30.7	16.5	35.6	42
30-60	31.0	17.0	36.0	60
60-90	31.0	18.0	42.0	79

جدول ۷- مقادیر شاخص‌های آماری برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی رطوبت و شوری نیم‌رخ خاک

Table 7- Statistical parameters for determination of model accuracy for simulation of soil water content and salinity

پارامتر Parameter	روش Method	NRMSE (%)	ME (%)	$d$	CRM	$R^2$
رطوبت خاک soil water content	واسنجی calibration	11.19	27.53	0.81	0.06	0.62
	صحت‌سنجی Validation	12.34	26.16	0.78	0.05	0.60
شوری خاک soil salinity	واسنجی calibration	23.94	51.15	0.74	0.18	0.58
	صحت‌سنجی Validation	24.87	54.63	0.71	0.21	0.55

I<sub>1</sub> و I<sub>4</sub> واسنجی و با استفاده از تیمارهای آبیاری I<sub>2</sub> و I<sub>3</sub> صحت سنجی شده است. برای رقم روشن در حالی که مدل به طور جداگانه برای هر تیمار شوری واسنجی و صحت‌سنجی شده است، میانگین RE برای تیمارهای شوری S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> به ترتیب ۵/۲، ۳/۷ و ۶/۶ درصد و برای حالتی که مدل همزمان برای سه تیمار شوری واسنجی و صحت‌سنجی شده است، این پارامتر برابر با ۶/۸ درصد می‌باشد. همچنین برای رقم قدس در حالی که مدل به طور جداگانه برای هر تیمار شوری واسنجی و صحت‌سنجی شده است، میانگین RE برای تیمارهای شوری S<sub>1</sub>، S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> به ترتیب ۲/۷، ۷/۵ و ۱۲/۹ درصد و برای حالتی که مدل همزمان برای سه تیمار شوری واسنجی و صحت سنجی شده است، این پارامتر برابر با ۱۰/۲ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت در صورتی که مدل برای حد بالا و پایین مقادیر آبیاری به خوبی واسنجی شود، می‌تواند عملکرد محصول را برای هر مقدار آبیاری که بین این دو حد قرار داشته باشد با دقت نسبتاً بالایی شبیه سازی نماید. با توجه به مقدار میانگین RE می‌توان اظهار داشت مدل قابلیت این را دارد که به طور همزمان تحت شرایط تنش شوری و کم آبی واسنجی شود و عملکرد محصول را با دقت نسبتاً بالایی برای هر دو رقم بخصوص رقم روشن، شبیه‌سازی نماید. اما در این حالت دقت مدل نسبت به شرایطی که به طور جداگانه برای هر تیمار شوری واسنجی شده است، کمی کاهش می‌یابد.

هر چند مدل نسبت به CGC حساسیت کمی داشت اما چون در این تحقیق، داده‌های مربوط به زمان رسیدن به ماکزیم پوشش گیاه موجود نبود و این پارامتر (CGC) رابطه مستقیمی با زمان رسیدن به ماکزیم پوشش گیاهی داشت، این پارامتر هم واسنجی شد. برای تیمارهای شوری S<sub>2</sub> و S<sub>3</sub> ضرایب CC<sub>X</sub>، CGC، CDC و K<sub>sto,salt</sub> (ضریب بسته شدن روزنه‌ها در شرایط شوری) پس از واسنجی مدل برای شرایط شوری بدست آمدند. پارامترهای CC<sub>X</sub>، CGC، CDC و K<sub>sto,salt</sub> برای حالتی که مدل به طور همزمان کالیبره شد، مشابه با مقادیر تیمار شوری S<sub>3</sub> در نظر گرفته شد (زیرا حد بالای تیمارهای شوری می‌باشد). ضرایب تنش آبی برای بهترین حالت واسنجی شده و میانگین قدر مطلق خطای نسبی (RE) همه حالت‌های واسنجی و صحت‌سنجی شده برای شبیه‌سازی عملکرد به ترتیب در جداول ۹ و ۱۰ آورده شده است. در جدول ۹ مشاهده می‌شود که با افزایش شوری آب آبیاری حد آستانه بالا و پایین نمودار تنش آبی کمتر می‌شود. به عبارتی با افزایش شوری آب آبیاری گیاه سریع‌تر تحت تنش آبی قرار می‌گیرد. در شرایط آبیاری یکسان با افزایش شوری آب آبیاری فشار اسمزی نیز افزایش یافته و آب قابل جذب برای گیاه کاهش می‌یابد. بنابراین تحت این شرایط گیاه سریع‌تر تحت تنش آبی قرار می‌گیرد. همان‌طور در جدول ۱۰ ملاحظه می‌گردد، بهترین میانگین RE در حالتی بدست آمده است که مدل با تیمارهای آبیاری

جدول ۸- پارامترهای گیاهی واسنجی شده برای شبیه‌سازی عملکرد دو رقم گندم زمستانه

Table 8- Calibrated crop parameters for simulation grain yield of two winter wheat varieties

Parameter	Roshan variety	Ghods variety	Parameter	Roshan variety	Ghods variety
بهره‌وری آب نرمال شده					
Water productivity normalized (WP <sup>n</sup> )	15	15	ضریب بسته شدن روزنه‌ها در شرایط شوری	S <sub>1</sub>	1
حداکثر عمق ریشه					
Maximum effective rooting depth (Z <sub>rx</sub> , m)	1.5	1.5	stress coefficient for stomatal closure in salinity conditions (K <sub>sto,salt</sub> )	S <sub>2</sub>	0.65
ماکزیمم سطح پوشش	S <sub>1</sub>	90		S <sub>3</sub>	0.55
Maximum canopy cover	S <sub>2</sub>	86		S <sub>1,S<sub>2</sub>,S<sub>3</sub></sub>	0.55
(CC <sub>X</sub> , %)	S <sub>3</sub>	83		S <sub>1</sub>	10.1
ضریب رشد پوشش	S <sub>1,S<sub>2</sub>,S<sub>3</sub></sub>	83	ضریب کاهش پوشش	S <sub>2</sub>	10.16
Canopy growth coefficient	S <sub>1</sub>	6.1	canopy decline coefficient (CDC, %)	S <sub>3</sub>	10.23
	S <sub>2</sub>	5.91		S <sub>1,S<sub>2</sub>,S<sub>3</sub></sub>	10.23
	S <sub>3</sub>	5.83	ضریب گیاهی برای تعرق		1.1
(CGC, %)	S <sub>1,S<sub>2</sub>,S<sub>3</sub></sub>	5.83	Crop coefficient for transpiration (K <sub>CTr</sub> )		1.1

جدول ۹- ضرایب تنش آبی واسنجی شده برای شبیه‌سازی عملکرد دو رقم گندم زمستانه

Table 9- Calibrated water stress coefficients for simulation of grain yield of two winter wheat varieties

رقم Variety	تیمار Treatment	تیمار آبیاری برای واسنجی Irrigation treatment for calibration	ضریب تنش آبی برای توسعه کانوپی stress coefficient for canopy expansion (K <sub>Sexp,w</sub> )			ضریب تنش آبی برای بسته شدن روزنه‌ها Water stress coefficient for stomatal closure (K <sub>Ssto</sub> )		ضریب تنش آبی برای پیری زودرس Soil water stress coefficient for canopy senescence (K <sub>Ssen</sub> )	
			P <sub>upper</sub> *	P <sub>lower</sub> *	f <sub>shape</sub> *	P <sub>upper</sub>	f <sub>shape</sub>	P <sub>upper</sub>	f <sub>shape</sub>
روشن Roshan	S <sub>1</sub>	I <sub>4</sub> , I <sub>1</sub>	0.2	0.65	5	0.42	1.8	0.50	1.9
	S <sub>2</sub>	I <sub>4</sub> , I <sub>1</sub>	0.2	0.65	5	0.40	1.2	0.49	1.7
	S <sub>3</sub>	I <sub>4</sub> , I <sub>1</sub>	0.2	0.65	5	0.40	0.7	0.49	Linear
قدس Ghods	S <sub>1,S<sub>2</sub>,S<sub>3</sub></sub>	I <sub>4</sub> , I <sub>1</sub>	0.2	0.65	5	0.41	1.5	0.46	2.7
	S <sub>1</sub>	I <sub>4</sub> , I <sub>1</sub>	0.2	0.65	5	0.39	1.1	0.48	1.9
	S <sub>2</sub>	I <sub>4</sub> , I <sub>1</sub>	0.2	0.65	5	0.38	0.7	0.42	Linear
	S <sub>3</sub>	I <sub>4</sub> , I <sub>1</sub>	0.2	0.65	5	0.33	0.2	0.42	Linear
	S <sub>1,S<sub>2</sub>,S<sub>3</sub></sub>	I <sub>4</sub> , I <sub>1</sub>	0.2	0.65	5	0.38	0.6	0.40	Linear

\*، \*\* و \*\*\* به ترتیب حد بالا و پایین تخلیه 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.

\*, \*\*, and \*\*\* are upper and lower soil water depletion threshold and shape factor. If water stress curve be convex, it will determine whit shape factor, otherwise water stress curve is linear.

$I_4 < I_3 < I_2 < I_1$  بوده و نتایج مدل نیز این ترتیب را تأیید می‌کند. میانگین مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده در تیمارهای  $I_4$  و  $I_3$  نسبت به تیمار  $I_2$  به ترتیب ۴۹/۱ و ۱۲/۴ درصد کاهش و در تیمار  $I_1$ ، ۲/۸ درصد افزایش داشته است. این مقادیر برای حالتی که مدل جداگانه و همزمان واسنجی و صحت‌سنجی شده به ترتیب ۴۴/۱ و ۲/۲ درصد کاهش و ۰/۱ درصد افزایش و ۴۵/۶ و ۱/۷ درصد کاهش و ۰/۱ افزایش می‌باشد. نتایج مدل نشان می‌دهد تیمارهای مربوط به آب آبیاری بیشتر از ۷۵ درصد نیاز آبی منجر به افزایش ناچیزی در عملکرد شده است. دلیل آن می‌تواند این باشد که در مدل نیاز آبی با استفاده از معادله فائو پنمن مانیتیت برآورد می‌شود در حالی که در عمل با نمونه‌برداری از خاک تعیین شده است بنابراین ممکن است نیاز آبی ۱۰۰ درصد گیاه در واقعیت با مدل یکسان نباشد. میانگین مقادیر زیست توده اندازه‌گیری شده در تیمارهای  $I_4$  و  $I_3$  نسبت به تیمار  $I_2$  به ترتیب ۳۲/۹ و ۱۸/۹ درصد کاهش و در تیمار  $I_1$ ، ۱۰/۴ درصد افزایش داشته است. این مقادیر برای حالتی که مدل جداگانه و همزمان واسنجی و صحت‌سنجی شده به ترتیب ۳۳/۶ و ۲/۲ درصد کاهش و ۰/۱ و ۳۰/۷ و ۱/۸ درصد کاهش و ۰/۱ افزایش می‌باشد. مقادیر اندازه‌گیری شده و نتایج مدل نشان می‌دهد که در تنش‌های آبی شدید کاهش عملکرد دانه بیشتر از زیست توده می‌باشد. در خصوص تأثیر رقم گندم بر عملکرد دانه و زیست توده نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که رقم روشن به دلیل مقاوم بودن به شوری و کم‌آبی عملکرد بیشتری نسبت به رقم قدس داشته است.

### نتایج شبیه‌سازی عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف آب

نتایج عملکرد دانه، زیست توده و کارایی مصرف آب اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده به ترتیب در شکل‌های ۱ تا ۳ برای دو رقم قدس و روشن ارائه شده است. در این شکل‌ها نتایج برای بهترین حالتی که مدل برای هر تیمار شوری به طور جداگانه و حالتی که همزمان برای سه تیمار شوری واسنجی و صحت‌سنجی گردیده (جدول ۱۰)، ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود عملکرد دانه و زیست توده اندازه‌گیری شده در همه تیمارها به جز تیمار  $S_3$  (رقم روشن) تا سطح آبیاری ۱۲۵ درصد ( $I_1$ ) روند صعودی دارد که این روند در مقادیر شبیه‌سازی نیز مشاهده می‌شود. ترتیب سطوح شوری در میانگین عملکرد دانه و زیست توده اندازه‌گیری شده دو رقم به صورت  $S_3 < S_2 < S_1$  می‌باشد و نتایج مدل این ترتیب را تأیید می‌کند. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده به ازاء هر واحد شوری، عملکرد دانه و زیست توده به ترتیب ۳/۰۶ و ۲/۷ درصد کاهش می‌یابد. این مقدار کاهش تا حدودی با منابع هم‌تایید می‌شود. زمانی (۳۳) به ازاء هر واحد افزایش شوری آب آبیاری کاهش عملکرد دانه ۳/۹ درصد گزارش کرده است. مدل AquaCrop پس از واسنجی و صحت‌سنجی به خوبی رفتار کاهش در عملکرد و زیست توده را شبیه‌سازی کرد. برای حالتی که مدل جداگانه و همزمان واسنجی و صحت‌سنجی شد، به ازاء هر واحد شوری عملکرد دانه به ترتیب ۳/۶۵ و ۲/۳۷ درصد و زیست توده به ترتیب ۳/۶۷ و ۲/۲۳ درصد کاهش یافت. ترتیب سطوح آب آبیاری در میانگین عملکرد دانه و زیست توده اندازه‌گیری شده دو رقم به صورت

جدول ۱۰- میانگین قدر مطلق خطای نسبی برای تعیین دقت مدل در شبیه‌سازی عملکرد دو رقم گندم زمستانه  
Table 10- Average of absolute relative error (RE) for simulation of grain yield for two winter wheat varieties

تیمار آبیاری Irrigation treatment	روش Method		S1, S2, S3** همزمان (Simultaneously)							
			S1*		S2		S3			
			RE (%)							
			روشن Roshan	قدس Ghods	روشن Roshan	قدس Ghods	روشن Roshan	قدس Ghods	روشن Roshan	قدس Ghods
I2, I4	واسنجی Calibration	میانگین	5.5	2.9	5.3	9.3	7.1	13.8	7.9	11.4
I1, I3	صحت‌سنجی Validation	Average								
I2, I3	واسنجی Calibration	میانگین	9.4	3.0	5.4	8.2	18.2	14.7	12.8	12.9
I1, I4	صحت‌سنجی Validation	Average								
I1, I2	واسنجی Calibration	میانگین	5.7	2.9	4.8	8.4	23.1	18.9	11.1	12.9
I3, I4	صحت‌سنجی Validation	Average								
I1, I4	واسنجی Calibration	میانگین	5.2	2.7	3.7	7.5	6.6	12.9	6.8	10.2
I2, I3	صحت‌سنجی Validation	Average								
I1, I3	واسنجی Calibration	میانگین	9.4	3.0	5.5	8.1	17.9	16.3	12.5	11.9
I2, I4	صحت‌سنجی Validation	Average								
I3, I4	واسنجی Calibration	میانگین	7.5	3.9	4.9	7.9	9.7	14.9	9.7	12.3
I1, I2	صحت‌سنجی Validation	Average								

\* مدل برای هر تیمار شوری با استفاده از تیمارهای آبیاری مربوطه، واسنجی و صحت‌سنجی گردید و سپس میانگین قدر مطلق خطای نسبی هر سه تیمار شوری همزمان با هم محاسبه شدند.

\*\* مدل همزمان برای سه تیمار شوری با استفاده از تیمار آبیاری مربوطه، واسنجی و صحت‌سنجی گردید و سپس میانگین قدر مطلق خطای نسبی محاسبه شدند.

\* The model was calibrated and validated separately for each salinity treatment using the adopted irrigation treatment (column 1) and then, the average of absolute relative error (RE) was calculated for two cases of calibration and validation.

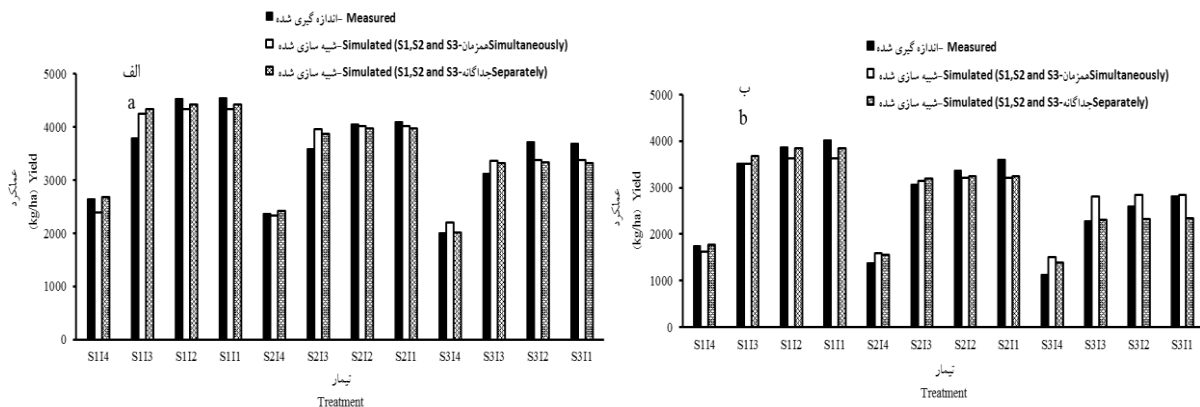
\*\* The model was calibrated and validated simultaneously for three salinity treatments using the irrigation treatment (column 1) and then, average of absolute relative error (RE) was calculated for two cases of calibration and validation and three salinity treatments.

کارایی مصرف آب را به میزان ۱۵ تا ۳۰ درصد افزایش داد. اختلاف در کارایی مصرف آب تیمار I4 نسبت به I3 احتمالاً به این دلیل است که تنش در این تیمار بقدری زیاد بوده که گیاه نتوانسته روند رشد طبیعی خود را طی کند (عملکرد نسبی در این دو تیمار به ترتیب ۴۹ و ۸۵ درصد بود) بنابراین کاهش محصول زیاد بوده و چون محصول در صورت کسر قرار می‌گیرد لذا سبب کاهش کارایی مصرف آب شده است. در کلیه سطوح تیمارهای مختلف، کارایی مصرف آب گندم برای رقم روشن، بیشتر از رقم قدس بود (شکل ۳) که مجدداً بیانگر برتری رقم روشن در شرایط محدودیت آب و شوری آب آبیاری می‌باشد. فیاض و همکاران (۸) نیز در بررسی ۱۱ رقم گندم تحت تنش آبی اعلام کردند که گندم روشن دارای حداکثر کارایی مصرف آب

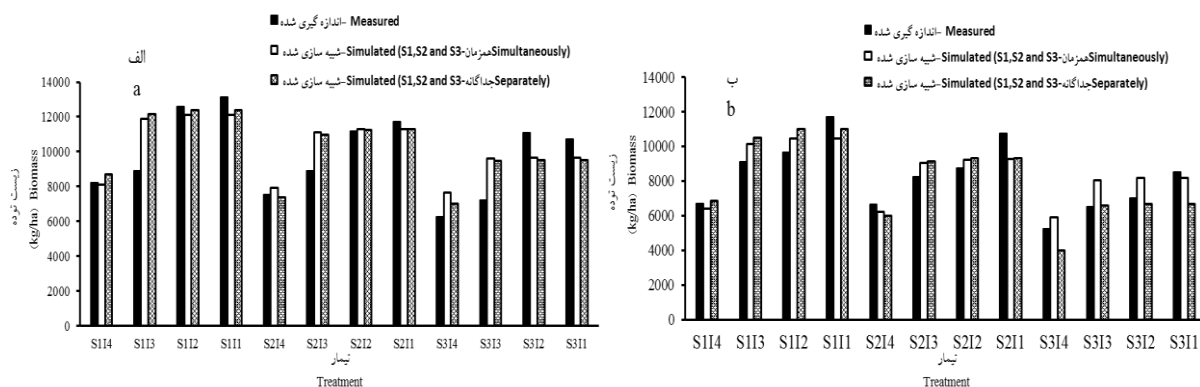
افیونی (۱) نیز با بررسی چند رقم گندم در شرایط شور، نشان داد که رقم روشن بیشترین عملکرد را دارد. کارایی مصرف آب (مقدار آب آبیاری تقسیم بر عملکرد) محاسبه شده و شبیه‌سازی شده در هر دو رقم گندم به طور کلی با افزایش شوری کاهش یافته است (شکل ۳). کم‌ترین مقدار کارایی مصرف آب در تیمار I4 (حداکثر تنش آبی؛ تامین تنها ۵۰ درصد نیاز آبی) و بیش‌ترین آن در تیمار I3 (تامین ۷۵ درصد نیاز آبی) به دست آمد. افزایش کارایی مصرف آب در تیمار I3 نسبت به تیمار I1 احتمالاً به دلیل کاهش نفوذ عمقی در آن تیمار می‌باشد (نفوذ عمقی در تیمار I1، ۵۳/۷ درصد بیشتر از تیمار I3 بود). اوپس و همکاران (۲۲) نیز گزارش کردند که می‌توان با کاهش آب مصرفی گیاه گندم در شرایط کم‌آبی تا حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد، میزان

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 عملکرد و کارایی مصرف آب بیشتر از زیست توده بوده است. با توجه به نتایج حاصل از مدل می‌توان اظهار داشت که مدل توانسته است با دقت نسبتاً بالایی عملکرد دانه، زیست توده و کارایی مصرف آب را برآورد نماید. همچنین روند کاهش این پارامترها در اثر تنش‌های شوری و آبی نیز به خوبی شبیه‌سازی شده است. اندرزیان و همکاران (۳) 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. علیزاده و همکاران (۲) نیز پس از ارزیابی مدل AquaCrop برای پارامترهای RMSE 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. 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، شوری و گیاهی) نسبت داد.

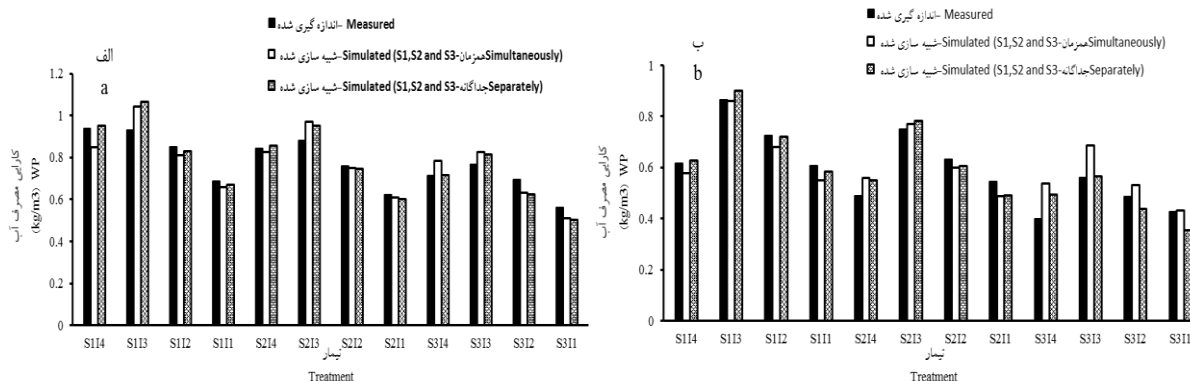
بوده است. با توجه به این که کارایی مصرف آب در تیمارهای کم آبیاری (I<sub>3</sub>) بیشتر از تیمارهایی است که مقدار آب کاربردی آنها بیشتر است بنابراین در مناطقی مثل بیرجند که کمبود منابع آب وجود دارد از نظر کارایی مصرف آب، منطقی‌تر است که به جای تأمین ۱۰۰ درصد نیاز آبی، ۷۵ درصد آن را تأمین کرده و ۲۵ درصد آب اضافی در زمین‌هایی استفاده شود که تحت تنش‌های شدید آبی هستند تا بدین طریق کارایی مصرف آب در سطح منطقه بهینه شود. شاخص‌های آماری عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف دو رقم گندم نشان می‌دهد (جدول ۱۱). مقدار d برای هر دو رقم 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<sub>2</sub> به یک نشان دهنده نزدیک بودن مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده و پراکندگی ناچیز آنها حول خط یک به یک می‌باشد. مقدار RMSE در بیش‌تر موارد کم‌تر از ۱۲ درصد می‌باشد که دقت بالای مدل را در شبیه‌سازی عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف



شکل ۱- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده عملکرد دانه رقم روشن (الف) و قدس (ب)  
Figure 1- Measured and simulated grain yield of Roshan (a) and Ghods (b) varieties



شکل ۲- مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده زیست توده رقم روشن (الف) و قدس (ب)  
Figure 2- Measured and simulated biomass of Roshan (a) and Ghods (b) varieties



شکل ۳- مقادیر محاسبه شده و شبیه سازی شده کارایی مصرف آب رقم روشن (الف) و قدس (ب)  
Figure 3- Measured and simulated WP of Roshan (a) and Ghods (b) varieties

جدول ۱۱- مقادیر شاخص های آماری برای شبیه سازی عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف آب با استفاده از مدل AquaCrop  
Table 11- Statistical parameters for simulation yield, biomass, and WP using AquaCrop model

Variety	Parameter	تیمار شوری Salinity treatment	NRMSE (%)	ME (%)	d	CRM	R <sup>2</sup>
Roshan	عملکرد Yield	S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> جداگانه (Separately)	7.09	15.61	0.97	0.001	0.90
		S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> همزمان (Simultaneously)	7.41	12.88	0.97	0.006	0.89
	زیست توده Biomass	S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> جداگانه (Separately)	14.89	32.94	0.86	-0.039	0.58
		S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> همزمان (Simultaneously)	15.00	30.19	0.84	-0.042	0.57
	کارایی مصرف آب WP	S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> جداگانه (Separately)	7.00	17.47	0.96	-0.009	0.89
		S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> همزمان (Simultaneously)	8.05	14.41	0.94	-0.002	0.82
Ghods	عملکرد Yield	S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> جداگانه (Separately)	8.16	17.46	0.98	0.021	0.94
		S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> همزمان (Simultaneously)	9.94	18.39	0.97	-0.004	0.87
	زیست توده Biomass	S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> جداگانه (Separately)	12.63	22.55	0.93	0.022	0.78
		S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> همزمان (Simultaneously)	11.55	18.66	0.91	-0.027	0.74
	کارایی مصرف آب WP	S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> جداگانه (Separately)	8.00	15.99	0.97	-0.001	0.90
		S <sub>1</sub> ,S <sub>2</sub> ,S <sub>3</sub> همزمان (Simultaneously)	11.27	23.11	0.93	-0.023	0.76

### نتیجه گیری کلی

گردید. نتایج نشان داد که مدل با این روش و داده های یک سال زراعی به خوبی واسنجی و صحت سنجی می شود. به طوری که مدل توانست مقادیر عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف آب را برای دو رقم گندم تحت شرایط همزمان شوری و خشکی با دقت بالایی برآورد نماید. همچنین روند کاهش این پارامترها را در اثر تنش های شوری و آبی به خوبی شبیه سازی کند. مقادیر متوسط RMSE، ME، d، CRM و R<sup>2</sup> در دو حالت واسنجی و صحت سنجی برای عملکرد دانه رقم روشن به ترتیب ۷/۰۹ درصد، ۱۵/۶۱ 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 بدست آمد. مقادیر RMSE برای شبیه سازی عملکرد، زیست توده و کارایی مصرف آب در اکثر موارد کمتر از ۱۲ درصد، مقادیر d نزدیک به یک و مقادیر CRM نزدیک به صفر بود. با توجه به نتایج، مدل قابلیت این را داشت که به طور همزمان تحت شرایط تنش شوری و کم آبی واسنجی شود و عملکرد، زیست توده و

با توجه به که این مدیریت بهینه آبیاری یکی از عوامل مهم در افزایش محصول می باشد، بنابراین سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی با تهیه ی مدل AquaCrop تلاش نموده است تا طراحان، کشاورزان و مدیران را در جهت انتخاب بهینه این امر مهم در سرتاسر جهان کمک نماید. از اینرو ارزیابی این مدل بویژه برای محصولات استراتژیک همچون گندم ضروری می باشد. در این تحقیق مدل AquaCrop تحت شرایط همزمان شوری و کم آبی مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به این که برای هر تیمار شوری ۴ تیمار آبیاری وجود داشت. بنابراین مدل با استفاده از دو تیمار آبیاری برای هر تیمار شوری واسنجی و با استفاده از دو تیمار آبیاری دیگر صحت سنجی گردید. در واقع ۶ حالت مختلف واسنجی و صحت سنجی برای هر تیمار شوری وجود داشت. همچنین مدل با استفاده از این ۶ حالت به طور همزمان برای سه تیمار شوری نیز واسنجی و صحت سنجی

با توجه به سادگی و دقت بالای مدل AquaCrop و نیاز به حداقل داده‌های ورودی که به آسانی قابل اندازه‌گیری می‌باشند، می‌توان از این مدل توانمند برای ارزیابی سناریوهای مختلف آبیاری با کیفیت‌های مختلف به منظور بهینه‌سازی مصرف آب و مدیریت آبیاری برای گیاه گندم به خصوص رقم روشن استفاده نمود.

کارایی مصرف آب را با دقت نسبتاً بالایی برای هر دو رقم بخصوص رقم قدس، شبیه‌سازی نماید. اما در این حالت، دقت مدل نسبت به شرایطی که به طور جداگانه برای هر تیمار شوری واسنجی شده بود، کمی کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد رقم روشن به دلیل مقاوم بودن به شوری و کم‌آبی عملکرد بیشتری نسبت به رقم قدس داشت.

## منابع

- 1- Afyooni D. 2005. The effect of seeding rate on wheat cultivars performance under salinity stress. *Journal of Agriculture*, 7(2): 7-16. (in Persian with English abstract)
- 2- Alizadeh H.A., Nazari B., Parsinejad M., Ramezani-Eetedali H., Janbaz H.R. 2010. Evaluation of AquaCrop model on wheat deficit irrigation in Karaj area. *Iranian Journal of Irrigation and drainage*, 2(4):273-283. (in Persian with English abstract)
- 3- 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.
- 4- Babazadeh H., and Sarai-Tabrizi M. 2012. Assessment of AquaCrop model under soybean deficit irrigation management conditions. *Journal of Water and Soil*, 26(2): 329-339, (in Persian with English abstract)
- 5- Bastiaanssen W.G.M., Allen R.G., Droogers P., D'Urso G., and Steduto P. 2007. Twenty five years modeling irrigated and drained soils: State of the art. *Agricultural Water Management*, 92(3), 111-125.
- 6- Doorenbos J., and Kassam A.H. 1979. Yield Response to Water. *Irrigation and Drainage Paper No. 33*. FAO, Rome.
- 7- 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.
- 8- Fayyaz F., Kheradnam M., Assad M.T. 2006. Evaluation of the morphophysiological traits heritability drought stress conditions in dread wheat genotypes (*Triticum aestivum L.*). *Agricultural Sciences and Technology Journal*, 20(5):35-46. (in Persian with English abstract)
- 9- Fereres E., and Soriano M.A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58, 147-159.
- 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- Hajiabadi M.R., Sadeghzadeh A., and Soltani H.R. 2003. Determination of irrigation suitable date of wheat using evaporation pan data in Birhand region. *Agriculture and Natural Resources Research Center of Khorasan*. n. 109-12-56854, pp. 85. (in Persian)
- 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- 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).
- 15- 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](http://www.alterra.nl/models/swap)).
- 16- 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.
- 17- Lopez-Urrea R., Montoro A., Gonza lez-Piqueras J., Lopez-Fuster P., and Fereres E. 2009. Water use of spring wheat to raise water productivity. *Agricultural Water Management*, 96:1305-1310.
- 18- 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.
- 19- 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.
- 20- 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.
- 21- 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.
- 22- Owies T., Zhang H., and Pala M. 2000. Water use efficiency of rainfed and irrigated bread wheat in Mediterranean Environment, *Agronomy Journal*, 92:231-238.

- 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- Zamani Gh.R. 2004. Ecophysiological aspects of wild oat competition with wheat under salinity stress. Ph.D. Thesis. Ferdowsi University of Mashhad.





## Validation of AquaCrop Model for Simulation of Winter Wheat Yield and Water Use Efficiency under Simultaneous Salinity and Water Stress

M. Mohammadi<sup>1</sup>- B. Ghahraman<sup>2\*</sup>- K. Davary<sup>3</sup>- H. Ansari<sup>4</sup>- A. Shahidi<sup>5</sup>

Received: 21-01-2014

Accepted: 05-01-2015

**Introduction:** FAO AquaCrop model (Raes et al., 2009a; Steduto et al., 2009) is a user-friendly and practitioner oriented type of model, because it maintains an optimal balance between accuracy, robustness, and simplicity; and it requires a relatively small number of model input parameters. The FAO AquaCrop model predicts crop productivity, water requirement, and water use efficiency under water-limiting and saline water conditions. This model has been tested and validated for different crops such as maize, sunflower and wheat (*T. aestivum* L.) under diverse environments. In most of arid and semi-arid regions water shortage is associated with reduction in water quality (i.e. increasing salinity). Plants in these regions in terms of water quality and quantity may be affected by simultaneous salinity and water stress. Therefore, in this study, the AquaCrop model was evaluated under simultaneous salinity and water stress. In this study, AquaCrop Model (v4.0) was used. This version was developed in 2012 to quantify the effects of salinity. Therefore, the objectives of this study were: i) evaluation of AquaCrop model (v4.0) to simulate wheat yield and water use efficiency under simultaneous salinity and water stress conditions in an arid region of Birjand, Iran and ii) Using different treatments for nested calibration and validation of AquaCrop model.

**Materials and Methods:** This study was carried out as split plot design (factorial form) in Birjand, east of Iran, in order to evaluate the AquaCrop model. Treatments consisted of three levels of irrigation water salinity ( $S_1, S_2, S_3$  corresponding to 1.4, 4.5, 9.6 dS  $m^{-1}$ ) as main plot, two wheat varieties (Ghods and Roshan), and four levels of irrigation water amount ( $I_1, I_2, I_3, I_4$  corresponding to 125, 100, 75, 50% water requirement) as sub plot. First, AquaCrop model was run with the corresponding data of  $S_1$  treatments (for all  $I_1, I_2, I_3$ , and  $I_4$ ) and the results (wheat grain yield, average of soil water content, and ECe) were considered as the "basic outputs". After that and in the next runs of the model, in each step, one of the inputs was changed while the other inputs were kept constant. The interval of variation of the inputs was chosen from -25 to +25% of its median value. After changing the values of input parameters, the model outputs were compared with the "basic outputs" using the sensitivity coefficient ( $Sc$ ) of McCuen, (1973). Since there are four irrigation treatments for each salinity treatment, the model was calibrated using two irrigation treatments for each salinity treatment and validated using the other two irrigation treatments. In fact, six different cases of calibration and validation for each salinity treatment were [( $I_3$  and  $I_4$ ), ( $I_2$  and  $I_4$ ), ( $I_1$  and  $I_4$ ), ( $I_2$  and  $I_3$ ), ( $I_1$  and  $I_3$ ), and ( $I_1$  and  $I_2$ ) for calibration and ( $I_1$  and  $I_2$ ), ( $I_1$  and  $I_3$ ), ( $I_2$  and  $I_3$ ), ( $I_1$  and  $I_4$ ), ( $I_2$  and  $I_4$ ), and ( $I_3$  and  $I_4$ ) for validation, respectively]. The model was calibrated by changing the coefficients of water stress (i.e. stomata conductance threshold ( $p_{upper}$ ) stomata stress coefficient curve shape, senescence stress coefficient ( $p_{upper}$ ), and senescence stress coefficient curve shape) for six different cases. Therefore, the average relative error of the measured and simulated grain yield was minimized for each case of calibration. After calibrating the model for each salinity treatment, the model was simultaneously calibrated using six different cases for three salinity treatments as a whole.

**Results and Discussion:** Results showed that the sensitivity of the model to crop coefficient for transpiration ( $K_{Cr}$ ), normalized water productivity ( $WP^*$ ), reference harvest index ( $HI_0$ ),  $\theta_{FC}$ ,  $\theta_{sat}$ , and maximum temperature was moderate. The average value of NRMSE, CRM,  $d$ , and  $R^2$  for soil water content were 11.76, 0.055, 0.79, and 0.61, respectively and for soil salinity were 24.4, 0.195, 0.72, and 0.57, respectively. The model accuracy for simulation of soil water content was more than for simulation of soil salinity. In general, the model accuracy for simulation yield and WP was better than simulation of biomass. The  $d$  (index of agreement) values were very close to one for both varieties, which means that simulated reduction in grain yield and biomass was similar to those of measured ones. In most cases the  $R^2$  values were about one, confirming a good correlation between simulated and measured values. The NRMSE values in most cases were lower than 10% which seems to be good. The CRM values were close to zero (under- and over-estimation were negligible). Based on higher WP under deficit irrigation treatments (e.g.  $I_3$ ) compared to full irrigation treatments (e.g.  $I_1$  and  $I_2$ ), it seems logical

1, 2, 3, 4 - Ph.D Student of Irrigation and Drainage, Professor and Associate Professors of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Respsctively

(\*- Corresponding Author Email: bijangh@um.ac.ir)

5- Assistant Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, University of Birjand

to adopt I3 treatment, especially in Birjand as a water-short region, assigning the remaining 25% to another piece of land. By such strategy, WP would be optimized at the regional scale.

**Conclusion:** The AquaCrop was separately and simultaneously nested calibrated and validated for all salinity treatments. The model accuracy under simultaneous case was slightly lower than that for separate case. According to the results, if the model is well calibrated for minimum and maximum irrigation treatments (full irrigation and maximum deficit irrigation), it could simulate grain yield for any other irrigation treatment in between these two limits. Adopting this approach may reduce the cost of field studies for calibrating the model, since only two irrigation treatments should be conducted in the field. AquaCrop model can be a valuable tool for modelling winter wheat grain yield, WP and biomass. The simplicity of AquaCrop, as it is less data dependent, made it to be user-friendly. Nevertheless, the performance of the model has to be evaluated, validated and fine-tuned under a wider range of conditions and crops.

**Keywords:** Biomass, Plant modeling, Sensitivity analysis