مدیریت آب و آبیاری
دوره ۴ ■ شماره ۱ ■ بهار و تابستان ۱۳۹۳
صفحه‌های ۱۰۴-۸۹

# ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد گندم، رطوبت و شوری نیمرخ خاک تحت تنش‌های شوری و کم‌آبی

افشین خرسند[۱]، وحید رضاوردی‌نژاد* [۲]، علی شهیدی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران
۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکدهٔ کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۲/۱۰/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۲/۳

## چکیده

در این مطالعه عملکرد مدل AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد محصول گندم زمستانه (ارقام روشن و قدس)، رطوبت و شوری نیمرخ خاک، تحت تنش‌های شوری و آبی ارزیابی شد. آزمایش مزرعه‌ای با سه سطح شوری آب آبیاری شامل $S_1$، $S_2$ و $S_3$، به‌ترتیب ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر و چهار سطح عمق آبیاری شامل $I_1$، $I_2$، $I_3$ و $I_4$ به‌ترتیب ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه با سه تکرار، طی سال زراعی ۱۳۸۴-۸۵ در منطقهٔ بیرجند اجرا شد. براساس نتایج، مدل AquaCrop عملکرد دانه را برای هر دو رقم با دقت زیاد شبیه‌سازی کرد. متوسط خطای نسبی تخمین عملکرد دانه در مرحلهٔ واسنجی، برای ارقام روشن و قدس به‌ترتیب ۲/۹۸ و ۴/۸۲ درصد محاسبه شد. متوسط ریشهٔ میانگین مربعات خطای نرمال‌شدهٔ پیش‌بینی رطوبت خاک در رقم روشن در مرحلهٔ واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۱۴/۵۸و ۱۵/۱ درصد و در رقم قدس در مرحلهٔ واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۱۴/۶ و ۱۵/۳ درصد محاسبه شد. متوسط ریشهٔ میانگین مربعات خطای نرمال‌شدهٔ پیش‌بینی شوری عصارهٔ اشباع خاک در رقم روشن برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۳۴/۶ و ۳۶/۸ درصد و در رقم قدس به‌ترتیب ۳۴/۵ و ۳۶/۸ درصد محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل AquaCrop در پیش‌بینی شوری عصارهٔ اشباع در مقایسه با رطوبت خاک و عملکرد دانه دچار خطای بیشتری است.

**کلیدواژه‌ها:** بیرجند، بیلان آب، بیلان املاح، مدل شبیه‌سازی.

* نویسنده مسئول Email: verdinejad@gmail.com

**مقدمه**

از جمله محدودیت‌های آزمایش‌های مزرعه‌ای، می‌توان به محدود شدن اعتبار آزمایش‌ها به شرایط فیزیکی، کوتاه بودن مدت زمان آزمایش و نیز محدودیت در تعداد سناریوهایی که توسط آزمایش بررسی می‌شوند، اشاره کرد [۱۱]. در مناطق خشک و نیمه‌خشک در اغلب موارد، گیاهان همزمان تحت تأثیر شوری و کم‌آبی قرار می‌گیرند. تأثیر توأم تنش شوری و کم‌آبی بر جذب آب و به‌تبع آن بر عملکرد محصولات در یک مکان خاص به نوع گیاه، تناوب آبیاری، خصوصیات شیمیایی و فیزیکی خاک و اقلیم و کیفیت آب آبیاری بستگی دارد [۲]. محققان در چند دهۀ اخیر مدل‌های مختلفی را به‌منظور شبیه‌سازی رشد گیاه، حرکت و انتقال آب و املاح در خاک معرفی کرده‌اند. از جملۀ این مدل‌ها، می‌توان به SWAP، WOFOST، CropSyst، CERES، CROPWAT، Budget و CRPSM اشاره کرد که هر کدام ممکن است به جهاتی مزیت‌هایی بر دیگر مدل‌ها داشته باشد [۷، ۱۲، ۱۵]. SWAP یکی از مدل‌های جامع و اگروهیدرولوژیکی در این زمینه است و برای بررسی و شبیه‌سازی عملکرد، انتقال آب، املاح و گرما در محیط اشباع و غیراشباع خاک به‌کار می‌رود [۷ ، ۱۶]. CropSyst یک مدل جامع دیگر به‌منظور مدلسازی آب، خاک، گیاه و اتمسفر و با در نظر گرفتن گزینه‌های مختلف مدیریت زراعی و واکنش محصول به کودهای مصرفی و تنش‌های محیطی شوری و آبی است [۱۵]. یکی از مدل‌های تخمین عملکرد محصول، AquaCrop است که توسط فائو توسعه یافته است. AquaCrop مدلی فراگیر است، به این معنا که برای محدودۀ وسیعی از محصولات زراعی شامل محصولات علوفه‌ای، سبزیجات، غلات، میوه‌ها و محصولات روغنی و غده‌ای می‌تواند به‌کار گرفته شود [۱۰]. نسخۀ اولیۀ مدل در سال ۲۰۰۷ و برای شبیه‌سازی عملکرد محصول و حرکت آب در خاک، معرفی شد که در آن تأثیر تنش شوری، بر عملکرد محصول در نظر نگرفته شد [۱۰]. در نسخۀ ۴ که در سال ۲۰۱۲ معرفی شد، مدل اصلاح و تأثیر تنش شوری و شبیه‌سازی انتقال املاح در نیمرخ خاک نیز مدنظر قرار گرفت [۱۰]. بیشتر تحقیقات در زمینۀ مدل AquaCrop، در وضعیت بدون شوری منابع آب و خاک و عمدتاً برای شبیه‌سازی کم‌آبیاری و عملکرد محصول صورت گرفته است [۸]. به‌منظور ارزیابی کارایی مدل AquaCrop در مورد محصول گندم، مطالعه‌ای در منطقۀ کرج انجام گرفت و نتایج نشان داد که برای دور آبیاری ۷ روز، مدل در پیش‌بینی مقدار عملکرد دانه، تبخیر و تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب قابلیت خوبی داشت، درحالی‌که کارایی مدل در پیش‌بینی این عوامل در دور آبیاری ۱۴ روز کمتر بود [۳]. به‌منظور بررسی عملکرد مدل AquaCrop برای گندم زمستانه، مطالعه‌ای در دشت شمالی چین انجام گرفت و آزمایش‌های مزرعه‌ای در ایستگاه لانچنگ در سال‌های ۱۹۹۸-۲۰۰۱ تحت کم‌آبیاری اجرا شد و مدل AquaCrop با بخشی از تیمارها، واسنجی و با دستۀ دیگر اعتبارسنجی شد. مدل AquaCrop با داده‌های اندازه‌گیری‌شدۀ عملکرد دانه و با در نظر گرفتن شرایط واقعی مزرعه در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰ مورد اعتبارسنجی مجدد قرار گرفت. به‌طور کلی در اعتبارسنجی مدل، ریشۀ میانگین مربعات خطا برای عملکرد دانه ۰/۵۸ تن در هکتار، بیوماس ۰/۸۷ تن در هکتار، تبخیر و تعرق واقعی ۳۳/۲ میلی‌متر و رطوبت حجمی خاک ۲۴/۵-۳۷/۶ میلی‌متر بود. نتایج کلی براساس اعتبارسنجی و اعتبارسنجی مجدد نشان داد که AquaCrop، مدلی معتبر است و می‌توان با درجۀ قابل اطمینان از دقت و صحت مدل برای بهینه‌سازی تولید عملکرد دانۀ گندم زمستانه و نیاز آبی در دشت شمالی چین استفاده کرد [۵]. در تحقیقی دیگر به‌منظور بررسی عملکرد مدل AquaCrop بر روی محصول گندم زمستانه در شرایط دیم، مطالعه‌ای

در فلات جنوبی چین انجام گرفت و داده‌های آزمایش مزرعه‌ای چندساله برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی بیوماس، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و عملکرد دانه استفاده شد. براساس نتایج، محدودهٔ خطا (ریشهٔ میانگین مربعات) از ۰/۱۶ تا ۰/۳۸ تن در هکتار برای شبیه‌سازی بیوماس، ۱/۸۷ تا ۴/۱۵ درصد برای پوشش گیاهی، ۰/۵ تا ۱/۴۴ تن در هکتار برای عملکرد دانه و ۵/۷-۲۲/۵۶ میلی‌متر برای رطوبت حجمی خاک به‌دست آمد. به‌طور کلی، عملکرد مدل برای شبیه‌سازی پوشش گیاهی و عملکرد از بیوماس و رطوبت حجمی خاک دقیق‌تر بود و مدل AquaCrop قادر به شبیه‌سازی عملکرد گندم زمستانه در شرایط دیم است و برای بهبود این مدل ممکن است تغییر شیوه‌های مدیریتی مختلف از جمله سطح باروری خاک و آبیاری در این منطقه لازم باشد [۱۸].

هدف اصلی مدل‌های گیاهی، کاربرد آن به‌عنوان ابزاری تحلیلی برای مطالعهٔ اثر مدیریت سیستم‌های کشت بر عملکرد محصول است. برای این منظور، اغلب مدل‌های گیاهی به شبیه‌سازی بیلان آب خاک، بیلان نیتروژن گیاه‌خاک، فنولوژی گیاه، تولید بیوماس، عملکرد محصول، فرسایش خاک و سرنوشت آفت‌کش‌ها می‌پردازند. مدل رشد گیاهی AquaCrop، در حال حاضر از جدیدترین و پرکاربردترین مدل‌های رشد گیاهی است که در این تحقیق نیز مدنظر قرار گرفت. با توجه به اینکه در اکثر مناطق خشک و نیمه‌خشک، کمبود آب با کاهش کیفیت آب از نظر شوری همراه است و در این مناطق گیاهان بر حسب کمیت و کیفیت آب، ممکن است تحت تأثیر همزمان تنش‌های شوری و خشکی قرار گیرند. در این تحقیق، عملکرد مدل AquaCrop در شرایط همزمان تنش‌های شوری و خشکی و نیز انتقال املاح در نیمرخ خاک، بررسی و ارزیابی شد. برای این منظور از نسخهٔ ۴ مدل AquaCrop استفاده شد که در سال ۲۰۱۲ و برای کمّی کردن تأثیر تنش شوری (علاوه بر سایر تنش‌های محیطی که در نسخه‌های قبلی در نظر گرفته شده بود) معرفی شد [۱۰]. اهداف این مطالعه، ارزیابی عملکرد مدل AquaCrop در شبیه‌سازی واکنش عملکرد گندم زمستانه تحت تنش‌های شوری و کم‌آبی، شبیه‌سازی رطوبت نیمرخ خاک و شبیه‌سازی انتقال املاح در نیمرخ خاک در اقلیم بیرجند بود.

## مواد و روش‌ها

### تشریح مدل AquaCrop

هستهٔ اصلی تخمین عملکرد محصول در AquaCrop، رابطهٔ دورنباس و کاسام (رابطهٔ ۱) است که با اعمال اصلاحاتی در آن از جمله تفکیک تبخیر و تعرق واقعی (ET) به تبخیر از سطح خاک ($E_s$) و تعرق ($T_c$) و نیز عملکرد (Y) به بیوماس (B) و شاخص برداشت (HI) استنتاج شده است [۱۰]:

$$\left(1-\frac{Y}{Y_X}\right)=K_y\left(1-\frac{ET}{ET_X}\right) \qquad (۱)$$

که در آن $Y_x$: حداکثر عملکرد؛ $Y$: عملکرد واقعی؛ $ET_X$: حداکثر تبخیر و تعرق؛ $ET$: تبخیر و تعرق واقعی و $K_y$ فاکتور تناسب بین افت نسبی عملکرد و کاهش نسبی تبخیر و تعرق است. برای محاسبهٔ عملکرد از بیوماس، مدل AquaCrop از رابطهٔ زیر استفاده می‌کند [۱۰]:

$$Y=f_{HI}\times HI_O\times B \qquad (۲)$$

که در آن: $HI_o$ : شاخص برداشت مرجع (طی مرحلهٔ بلوغ فیزیولوژیک)؛ $Y$: عملکرد دانه؛ و $f_{HI}$: ضریبی است که شاخص برداشت مرجع را تنظیم می‌کند و به کمبود آب، درجهٔ حرارت هوا، زمان و شدت تنش در طول چرخهٔ رشد محصول بستگی دارد. در AquaCrop برای شبیه‌سازی رشد گیاهان زراعی آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز مدنظر قرار نمی‌گیرند [۱۴]. ورودی‌های مدل شامل چهار دسته اطلاعات: اقلیمی، گیاه، مدیریت و خاک

است. داده‌های اقلیمی حداقل و حداکثر دما، بارش و تبخیر و تعرق مرجع به‌صورت روزانه است. مدل از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبهٔ درجهٔ روز رشد (GDD) به‌منظور تعدیل عملکرد زیست‌توده به‌دلیل تنش سرما استفاده می‌کند [۹]. سیستم اطلاعات گیاه از چهار بخش فنولوژی و کانوپی گیاه، تعرق گیاه، بیوماس و عملکرد قابل برداشت و تنش‌ها تشکیل شده است. تنش‌های مدل شامل تنش آبی، تنش حاصلخیزی، تنش دمای هوا و تنش شوری است. اجزای مدیریت شامل دو قسمت مدیریت آبیاری (در زمینهٔ کشاورزی دیم و آبی) و مدیریت زراعی (در زمینهٔ سطوح مختلف حاصلخیزی خاک) است. اطلاعات خاک خصوصیات هیدرولیکی خاک است که برای هر لایه از نیمرخ خاک وارد مدل می‌شود [۱۰].

رابطهٔ حاکم بر حرکت آب در خاک، معادلهٔ بیلان است که مدل برای بخشی از پروفیل خاک که سیستم ریشه در آن واقع شده است، انجام می‌دهد. در این فرایند، مدل با استفاده از مقدار آب وارد و خارج‌شده، بیلان آب خاک را محاسبه و اجزای بیلان را برای مدت زمان مشخص تعیین می‌کند. شرایط مرزی بالادست مدل در تخمین بیلان آب، توسط آبیاری، بارندگی و تبخیر و تعرق واقعی مشخص می‌شود. برای شرط مرزی پایین نیز وجود سطح ایستابی و شرایط زهکشی آزاد در نظر گرفته شده است که در این مطالعه به‌علت عمق زیاد سطح ایستابی (عمق ۱۱۰ متری)، شرایط زهکشی آزاد حاکم است. مقدار رطوبت نیمرخ خاک قبل از کشت با فواصل هر ۲۰ سانتی‌متر و تا عمق یک متری، به‌عنوان شرایط اولیه وارد مدل شد [۱۰]. مدل AquaCrop به‌منظور بررسی و شبیه‌سازی بیلان املاح، دو فرایند انتقال توده‌ای و پخشیدگی را در یک بعد به‌کار می‌گیرد که انتقال توده‌ای املاح توسط منافذ ماکرو و فرایند پخشیدگی املاح، توسط منافذ میکرو انجام می‌گیرد. مدل برای بررسی بیلان املاح، نیمرخ خاک را به چند افق و چندین بخش (پیش‌فرض ۱۲ بخش) با ضخامت $\Delta z$ برابر ۲۰ سانتی‌متر تقسیم می‌کند. به‌منظور شبیه‌سازی پخشیدگی و انتقال توده‌ای املاح، هر بخش (سطر) به چندین سلول یا المان تقسیم می‌شود. تعداد سلول‌های هر بخش (n) بین ۲ تا ۱۱ است که تابعی از هدایت آبی اشباع است [۱۰]. در تخمین بیلان املاح، شرایط مرزی بالای مدل، توسط شوری آب آبیاری تعیین می‌شود (شوری آب باران صفر لحاظ می‌شود). مرز پایین نیز در شرایط حضور سطح ایستابی با شوری آب زیرزمینی مشخص می‌شود. شوری عصارهٔ اشباع خاک نیز قبل از کشت شرط اولیهٔ مدل در پیش‌بینی شوری خاک است.

## آزمایش مزرعه‌ای

آزمایش مزرعه‌ای بر روی دو رقم گندم زمستانه به‌منظور بررسی تأثیر برهمکنش شوری و کم آبیاری بر عملکرد و اجزای عملکرد محصول، در مزرعهٔ تحقیقاتی دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه بیرجند، با عرض و طول جغرافیایی ۳۲/۸۸ درجهٔ شمالی و ۵۵/۲۲ درجهٔ شرقی و ارتفاع ۱۴۸۰ متر، در سال زراعی ۱۳۸۴–۸۵ اجرا شد. قبل از کاشت محصول، به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، از اعماق مختلف خاک مزرعه نمونه‌گیری انجام گرفت. بافت سطحی از نوع لوم رسی و در اعماق پایین (۲۰ تا ۶۰ سانتی‌متر) از نوع لوم رسی سیلتی است. سایر پارامترهای فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۱ ارائه شده است. [۲]. برای دست یافتن به چگونگی توزیع شوری و رطوبت در اثر اعمال تیمارهای آبیاری و مشخص کردن تأثیر هر یک از تنش‌های خشکی و شوری در خاک طی سال زراعی، از ۷۲ کرت آزمایشی و در چند مرحلهٔ زمانی، ازجمله قبل از آبیاری و ۴۸ ساعت بعد از آبیاری، نمونه‌های خاک برداشت شد و سپس در آزمایشگاه، شوری

عصارهٔ اشباع و رطوبت آنها اندازه‌گیری شد. از کلیهٔ کرت-ها تا عمق یک متری و به‌ازای هر ۲۰ سانتی‌متر یک نمونه برداشت شد. از نمونه‌های خاک برای توزیع رطوبت و شوری خاک در مکان و زمان استفاده شد. نمونه‌های خاک پس از خشک شدن در هوا، کوبیده و از الک۲ میلی‌متری گذرانده شدند. سپس از این نمونه‌ها گل اشباع ساخته و پس از ۲۴ ساعت عصارهٔ آنها گرفته شد. مقدار رطوبت خاک نیز به‌روش وزنی تعیین شد. توزیع مکانی نسبت به عمق، برای هر ۲۰ سانتی‌متر، و توزیع زمانی به‌ازای تعداد روزهای پس از کاشت شامل: ۱. ۱۰۲ روز پس از کاشت (یک روز قبل از آبیاری دوم)، ۲. ۱۱۹ روز پس از کاشت (۴۸ ساعت پس از آبیاری)، ۳. ۱۴۳ روز پس از کاشت (در فاصلهٔ زمانی بین دو آبیاری چهارم و پنجم)، ۴. ۱۶۴ روز پس از کاشت (یک روز قبل از آبیاری ششم)، ۵. ۱۸۵ روز پس از کاشت (مصادف با زمان برداشت گندم) است. منبع آب قابل استفاده سه حلقه چاه با شوری مختلف در مزرعهٔ آزمایشی بود که امکان تأمین آب با شوری‌های مختلف در مزرعه را به‌وجود آورد. نتایج تجزیهٔ شیمیایی آب چاه‌ها در جدول ۲ ارائه شده که دارای شوری ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر است. مساحت مزرعهٔ دانشکدهٔ کشاورزی دانشگاه بیرجند ۱۰۰ هکتار است که دارای سه حلقه چاه و یک قنات است. شوری آب سه حلقه چاه، کاملاً متفاوت است که برای اجرای طرح، آب چاه‌ها به‌طور جداگانه منتقل و ذخیره می‌شود [۱]. رطوبت نیمرخ خاک، طی پنج نوبت در طول دورهٔ رشد گندم در تمام تیمارهای آزمایش و هر دو رقم روشن و قدس، اندازه‌گیری شد. نمونه‌برداری شوری عصارهٔ اشباع نیز مانند رطوبت، از پنج عمق (به‌ازای هر ۲۰ سانتی‌متر تا عمق یک متری) نیمرخ خاک و برای تمام تیمارها اجرا شد. برای شرایط مرزی بالا، غلظت املاح باران صفر و برای شرایط اولیه، غلظت املاح خاک به‌عنوان تابعی از عمق نیمرخ خاک، در مدل منظور شد. فرایند حاکم بر انتقال املاح، انتقال توده‌ای و پخشیدگی است و پارامترهای انتقال املاح خاک شامل فاکتور پخشیدگی نمک[1] و حلالیت نمک[2] به‌ترتیب ۲۵ درصد و ۱۰۰ گرم در لیتر تنظیم شد. برای اطلاعات اقلیمی مورد نیاز از داده‌های روزانهٔ ایستگاه سینوپتیک بیرجند استفاده و تبخیر و تعرق مرجع نیز براساس روش فائو پنمن مانتیث و با استفاده از برنامهٔ ETCalculator محاسبه شد [۴]. طرح آزمایشی کرت‌های خردشده به‌صورت فاکتوریل با سه سطح شوری آب آبیاری شامل: $S_1$، $S_2$ و $S_3$، به‌ترتیب ۱/۴، ۴/۵ و ۹/۶ دسی‌زیمنس بر متر و چهار سطح عمق آبیاری شامل: $I_1$، $I_2$، $I_3$ و $I_4$، به‌ترتیب ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ درصد نیاز آبی گیاه، با سه تکرار، طی سال زراعی ۱۳۸۴-۸۵ انجام گرفت. آبیاری به‌روش سطحی (کرتی) با ابعاد کرت ۴ × ۳ (متر در متر) انجام گرفت و در هر کرت ۱۰ ردیف کشت با فاصلهٔ ۲۰ سانتی‌متر و طول ۳ متر طوری کاشته شد که تراکم معمول ۴۰۰ بوته در متر مربع حاصل شود [۲]. برنامهٔ آبیاری طرح برای تیمارهای مختلف، مطابق جدول ۳ است. برخی از پارامترهای گیاهی (نرخ توسعه ریشه، حداکثر دمای رشد) ثابت است و برای اکثر گیاهان زراعی به‌عنوان پیش‌فرض در مدل وجود دارد که با گذشت زمان یا موقعیت جغرافیایی تغییر نمی‌کنند [۳]. پارامترهای مربوط به مکان و ویژهٔ گیاه در طرح از جمله تاریخ جوانه‌زنی و تاریخ ظهور پوشش تاجی (تاریخی که در آن ۹۰ درصد بذرها سبز می‌شوند)، پارامترهای مخصوص کاربر هستند [۶]. پارامترهای گیاهی ویژه طرح در جدول ۴ و واسنجی پارامترهای گیاهی در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

1. Salt Diffusion Factor
2. Salt Solubility

**جدول۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعهٔ آزمایشی**

| عمق (cm) | بافت خاک | رطوبت اولیه ($cm^3cm^{-3}$) | شوری عصارهٔ اشباع اولیه (dS/m) | چگالی ظاهری ($gcm^{-3}$) | FC ($cm^3cm^{-3}$) | PWP ($cm^3cm^{-3}$) | K (mm/day) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۰-۰ | C-L | ۰/۱۴ | ۲/۱ | ۱/۵ | ۳۵/۲ | ۱۹/۳ | ۵۸/۴ |
| ۴۰-۲۰ | Si-C-L | ۰/۱۵ | ۲/۴ | ۱/۴۵ | ۳۳/۸ | ۱۸/۸ | ۶۱/۹ |
| ۶۰-۴۰ | Si-C-L | ۰/۱۶ | ۲/۷ | ۱/۳۹ | ۳۲/۳ | ۱۸/۲ | ۶۵/۳ |

**جدول ۲. نتایج تجزیهٔ شیمیایی آب چاه‌های مزرعهٔ تحقیقاتی**

| شمارهٔ چاه | EC (dS/m) | PH | SAR ($meq^{0.5}lit^{-0.5}$) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۱/۴ | ۸ | ۷/۴ |
| ۲ | ۴/۵ | ۷/۸ | ۸/۶ |
| ۳ | ۹/۶ | ۷/۷ | ۹/۷ |

**جدول ۳. تاریخ و عمق آب مصرف‌شده در کل تیمارهای آبیاری (بر حسب میلی‌متر) و تیمارهای شوری (تاریخ کشت ۱۳۸۴/۸/۲۳)**

| روز بعد از کاشت | تاریخ آبیاری | نوبت آبیاری | $I_1$ | $I_2$ | $I_3$ | $I_4$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲ | ۸۴/۸/۲۵ | ۱ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ | ۳۰ |
| ۱۰۳ | ۸۴/۱۲/۵ | ۲ | ۳۵ | ۵۳ | ۷۰ | ۸۷ |
| ۱۱۷ | ۸۴/۱۲/۱۹ | ۳ | ۳۸ | ۵۷ | ۷۶ | ۹۵ |
| ۱۳۱ | ۸۵/۱/۴ | ۴ | ۴۵ | ۶۸ | ۹۱ | ۱۱۴ |
| ۱۵۴ | ۸۵/۱/۲۷ | ۵ | ۴۹ | ۷۳ | ۹۷ | ۱۲۱ |
| ۱۶۵ | ۸۵/۲/۷ | ۶ | ۴۵ | ۶۷ | ۹۰ | ۱۱۳ |
| ۱۷۵ | ۸۵/۲/۱۷ | ۷ | ۴۰ | ۶۰ | ۸۰ | ۱۰۰ |
| | مجموع | | ۲۸۲ | ۴۰۸ | ۵۳۴ | ۶۶۰ |

**جدول ۴. پارامترهای گیاهی مربوط به مراحل فنولوژیکی گندم**

| پارامتر | واحد | مقدار |
|---|---|---|
| تراکم کشت | بوته در هکتار | ۴۰۰۰۰۰۰ |
| زمان ظهور جوانه‌ها | روز بعد از کاشت | ۱۳ |
| زمان ماکزیمم پوشش گیاهی | روز بعد از کاشت | ۱۱۹ |
| زمان پیری | روز بعد از کاشت | ۱۵۸ |
| زمان بلوغ کامل | روز بعد از کاشت | ۱۸۵ |
| زمان شروع گلدهی | روز بعد از کاشت | ۱۲۷ |
| مدت گلدهی | روز | ۱۵ |
| حداکثر عمق ریشه | سانتی‌متر | ۹۳ |

**جدول ۵. واسنجی پارامترهای گیاهی مدل برای ارقام روشن و قدس محصول گندم**

| پارامترها | واحد | مقدار پارامتر | | روش واسنجی | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | رقم روشن | رقم قدس | رقم روشن | رقم قدس |
| دمای پایهٔ رشد | °C | ۰ | ۱/۷۵ | پیش‌فرض | تنظیم شد |
| دمای بالا | °C | ۲۶ | ۲۶ | پیش‌فرض | پیش‌فرض |
| ضریب رشد پوشش تاجی (CGC) | %/day | ۳/۸۸ | ۳/۹ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| ضریب کاهش پوشش تاجی (CDC) | %/day | ۹/۹۶ | ۹/۷۵ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| بهره‌وری آب نرمال‌شده ($WP^*$) | $g/m^2$ | ۱۵ | ۱۵ | پیش‌فرض | پیش‌فرض |
| حداکثر پوشش گیاهی | % | ۸۸/۸۳ | ۸۲/۵ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| کاهش پوشش تاجی | days | ۲۷/۹۲ | ۲۶/۲۵ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| شاخص برداشت (HI) | % | ۴۲/۹۲ | ۴۱/۱۷ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| ضریب تعرق گیاهی برای پوشش کامل ($Kc_{Tr,x}$) | (-) | ۱/۰۰۴ | ۱/۰۰۸ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| آستانهٔ بالای ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه | (-) | ۰/۲۲ | ۰/۲۲ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| آستانهٔ پایین ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه | (-) | ۰/۵۵ | ۰/۵۵ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| ضریب شکل منحنی ضریب تنش آبی خاک برای گسترش تاجی گیاه | (-) | ۴/۸ | ۴/۸ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| آستانهٔ بالای ضریب تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها | (-) | ۰/۶۳ | ۰/۶۳ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای بسته شدن روزنه‌ها | (-) | ۲/۳ | ۲/۳ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| آستانهٔ بالای ضریب تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه | (-) | ۰/۶۸ | ۰/۶۸ | تنظیم شد | تنظیم شد |
| ضریب شکل منحنی تنش آبی خاک برای پیری پوشش تاجی گیاه | (-) | ۲/۳ | ۲/۳ | تنظیم شد | تنظیم شد |

## ارزیابی مدل AquaCrop

برای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل در تخمین عملکرد محصول، رطوبت و شوری از شاخص‌های ریشهٔ میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، ضریب باقی‌مانده (CRM)، متوسط خطای نسبی (ARE)، ضریب تبیین ($R^2$) و معیار کارایی نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد [۱۳]:

$$ARE = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{|S_i - O_i|}{O_i}\right)\times 100}{n} \quad (۳)$$

$$NRMES = \frac{1}{\overline{O}} \times \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2} \times 100 \quad (۴)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۵)$$

$$CRM = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad (۶)$$

که در آن $S_i$: مقادیر پیش‌بینی‌شده؛ $O_i$ مقادیر اندازه‌گیری‌شده، $n$: تعداد مشاهدات؛ و $\overline{O}$: میانگین مقادیر اندازه‌گیری‌شده است. مقدار NRMSE ایده‌آل برای مدلسازی کمتر از ۱۰ درصد است. NRMSE در بازهٔ ۱۰ تا ۲۰ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد به‌ترتیب بیانگر وضعیت مناسب و متوسط مدل در پیش‌بینی و بیشتر از ۳۰ درصد نشان‌دهندهٔ عدم اطمینان از مدل است. آمارهٔ CRM نشان‌دهندهٔ تمایل مدل (در حالت کلی) برای بیش‌برآورد (مقادیر منفی) یا کم‌برآورد (مقادیر مثبت) در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. مقدار NSE بین $\infty-$ تا ۱ متغیر است که هر چه مقدار آن به یک نزدیک باشد، مدل کاراتر است (۱۳). $R^2$ معیار پراکنش بین مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری‌شده است.

## نتایج و بحث

### عملکرد محصول

هدف از واسنجی عملکرد، تنظیم ورودی‌های گیاهی مدل است. عملکرد حاصل از پیش‌بینی مدل باید با عملکرد مشاهده‌ای، در تیمارهای مختلف کمترین اختلاف را داشته باشند که با اجرای مدل و مقایسهٔ عملکرد حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر مشاهده‌ای میسر می‌شود. نتایج مقادیر واسنجی پارامترهای گیاهی گندم در جدول ۵ ارائه شده است.

برای اعتبارسنجی مدل سه تیمار ($S_3I_3$ ،$S_2I_2$ ،$S_1I_1$) انتخاب شد تا تنش شوری و تنش خشکی در سراسر دامنهٔ تنش‌های شوری و خشکی، اعمال شده باشد. سپس بدون تغییر در فایل‌های گیاهی واسنجی‌شدهٔ نهایی، برای هر یک از سه تیمار یادشده، مدل اجرا و مقادیر عملکرد حاصل از شبیه‌سازی، با مقادیر اندازه‌گیری‌شده براساس شاخص‌های آماری بررسی شد.

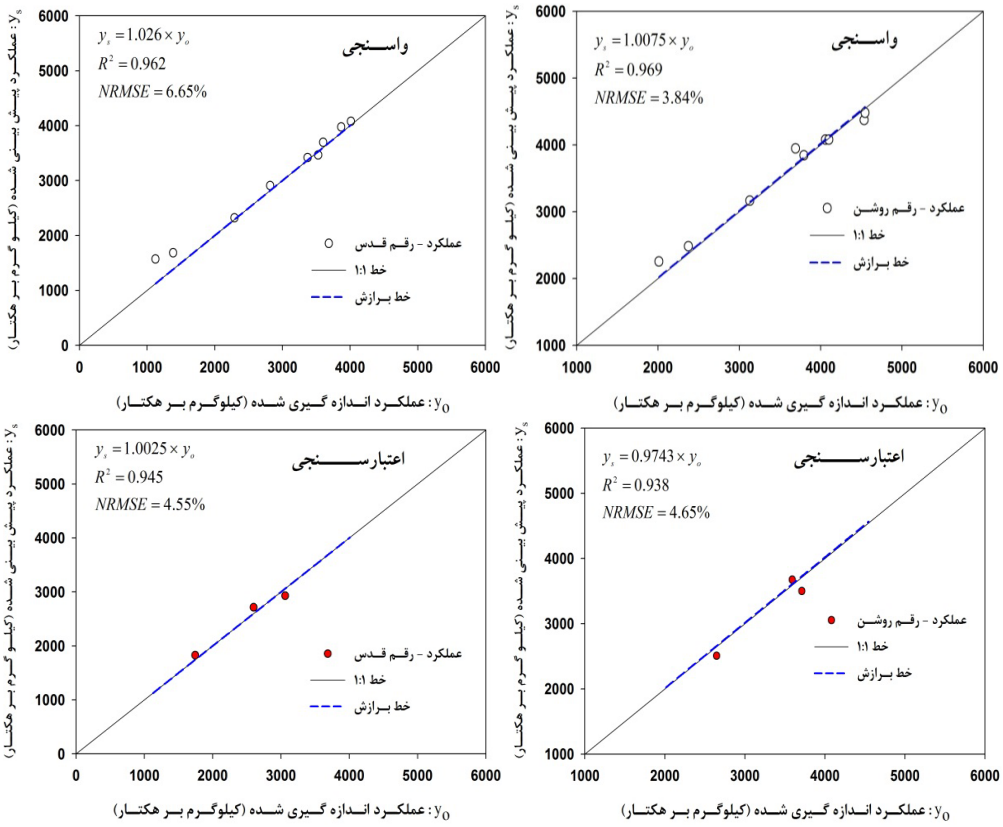
عملکرد اندازه‌گیری‌شده برای رقم قدس کمتر از عملکرد رقم روشن بود. مقایسهٔ مقادیر عملکرد محاسبه و پیش‌بینی‌شده توسط مدل AquaCrop در شکل ۱، برای ارقام روشن و قدس طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی مدل ارائه شده است. همچنین مقادیر کمی پارامترهای ارزیابی و سنجش اعتبار مدل در پیش‌بینی عملکرد محصول، در جدول ۶ آورده شده است. براساس نتایج جدول ۶، مدل AquaCrop، عملکرد محصول را برای هر دو رقم قدس و روشن با دقت مناسب، شبیه‌سازی کرد. مقدار NRMSE در هر دو رقم کمتر از ۱۰ درصد به‌دست آمد که براساس این آماره، مدلسازی عملکرد محصول، ایده‌آل است. مقادیر این آماره برای ارقام قدس و روشن به‌ترتیب ۶/۶۵ و ۳/۸۴ درصد به‌دست آمد. شاخص نش‌ساتکلیف برای ارقام قدس و روشن به‌ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۹۷ محاسبه شد که نزدیک به یک بوده و نشان‌دهندهٔ دقت مناسب مدل، در پیش‌بینی عملکرد است. مقدار آمارهٔ CRM در هر دو رقم قدس و روشن منفی و به‌ترتیب ۰/۰۴۳- و ۰/۰۱۴- حاصل شد که نشان داد در مجموع تمام تیمارهای آزمایش، مدل AquaCrop کمی تمایل به بیش‌برآورد دارد، ازاین‌رو می‌توان نتیجه گرفت که AquaCrop در پیش‌بینی عملکرد محصول گندم بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده، شبیه‌سازی می‌کند. به‌طور کلی و برای تمام تیمارهای آزمایش، متوسط خطای نسبی مدل در پیش‌بینی عملکرد، برای ارقام قدس و روشن به‌ترتیب ۴/۸۲ و ۲/۹۸ درصد محاسبه شد.

با مقایسهٔ عملکرد ارقام روشن و قدس محصول گندم با یکدیگر در شرایط توأم تنش شوری و کم‌آبی ($S_3I_1$)، مشخص شد که عملکرد رقم روشن بیشتر از رقم قدس است. با توجه به قدمت کاشت رقم روشن در منطقهٔ بیرجند، این رقم بومی محسوب می‌شود و با شرایط کم‌آبی و شوری سازگاری بهتری دارد. مدل AquaCrop تحت شرایط توأم تنش‌ها، در پیش‌بینی عملکرد رقم روشن، دقت بیشتری نسبت به رقم قدس نشان داد. با توجه به جدول ۷، مقدار NRMSE مرحلهٔ اعتبارسنجی، برای عملکرد دانه، در هر دو رقم روشن و قدس کمتر از ۵ درصد به‌دست آمد که نشان‌دهندهٔ قابلیت مناسب مدل و دقت مدلسازی در شرایط ایده‌آل است. همچنین برای تمام تیمارهای آزمایش، متوسط خطای نسبی تخمین عملکرد دانه، برای ارقام روشن و قدس کمتر از ۵ درصد محاسبه شد.

### رطوبت خاک

مقادیر رطوبت حجمی شبیه‌سازی و مشاهده‌شده برای تمام تیمارها و برای هر دو رقم طی مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، در شکل ۲ ارائه شده است. برای اعتبارسنجی

تخمین رطوبت توسط مدل نیز سه تیمار ($S_1I_1$، $S_2I_2$، $S_3I_3$) انتخاب شد تا تنش شوری و تنش خشکی در سراسر محدودهٔ تنش‌های شوری و خشکی، اعمال شده باشد. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که پراکنش مقادیر اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده نسبت به هم، نسبتاً زیاد است که نمایهٔ ضریب تبیین ($R^2$) آن را نشان می‌دهد. ضریب تبیین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی رطوبت برای دو رقم روشن و قدس در مرحلهٔ واسنجی به‌ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۴۷ محاسبه شد که نشان می‌دهد مدل AquaCrop، رطوبت را در برخی موارد بیش از مقادیر اندازه‌گیری‌شده و در برخی موارد، کمتر از مقادیر اندازه‌گیری برآورد کرد. همچنین مقادیر ضریب تبیین ارقام روشن و قدس در مرحلهٔ اعتبارسنجی به‌ترتیب ۰/۴۱ و ۰/۴۰ محاسبه شد. در مجموع، این مدل، رطوبت را کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی می‌کند که کوچک‌تر از یک شدن ضریب معادلهٔ خط برازش در هر دو رقم، این موضوع را مشخص می‌کند. دلایل احتمالی کم‌برآوردی مدل را می‌توان به نوع معادلهٔ حاکم بر بیلان آب نسبت داد که در آن برخی از عوامل مؤثر بر حرکت آب از قبیل جریانات ترجیحی و پدیدهٔ هیسترسیس در نظر گرفته نشده است. به‌منظور سنجش اعتبار مدل AquaCrop در تخمین رطوبت خاک، شاخص‌ها و پارامترهای ارزیابی، محاسبه و در جدول‌های ۸ و ۹ ارائه شده است.



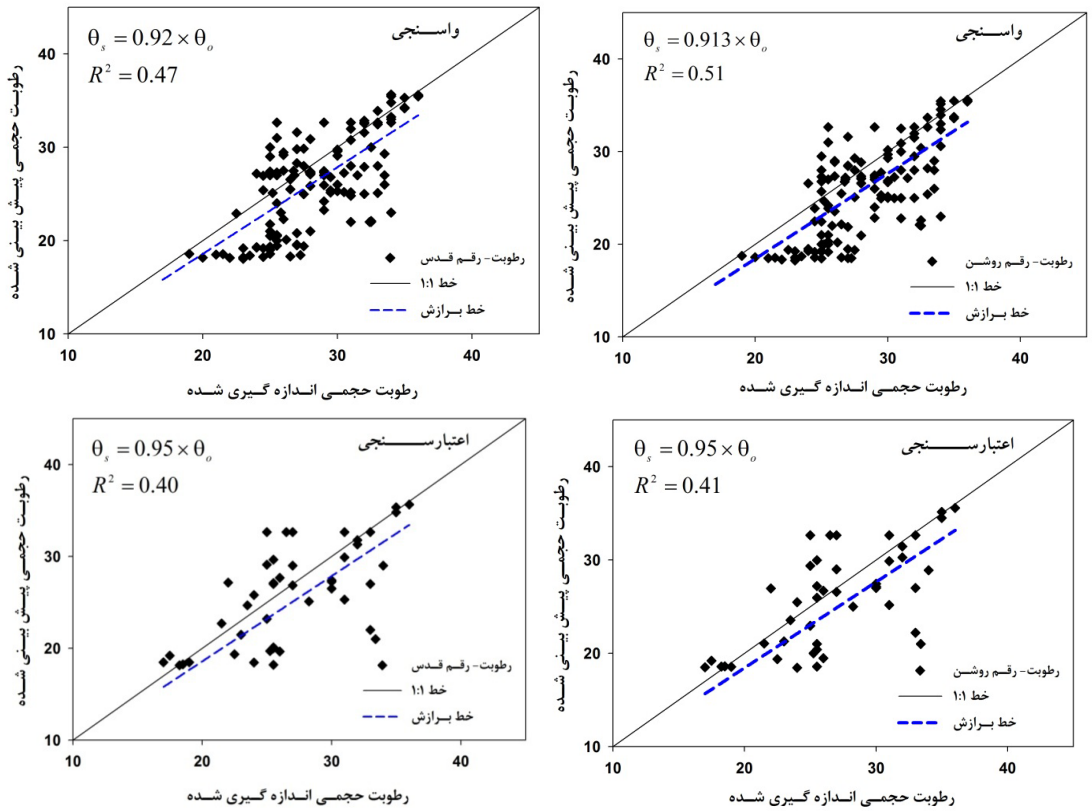

**شکل ۱. مقایسهٔ عملکرد اندازه‌گیری و پیش‌بینی‌شده توسط AquaCrop برای ارقام روشن و قدس گندم در مرحلهٔ واسنجی و اعتبارسنجی**

جدول ۶ . پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای عملکرد گندم (واسنجی)

| رقم | NSE (-) | CRM (-) | ARE (%) | NRMSE (%) | $R^2$ (-) |
|---|---|---|---|---|---|
| روشن | ۰/۹۷ | -۰/۰۱۴ | ۲/۹۸ | ۳/۸۴ | ۰/۹۷ |
| قدس | ۰/۹۶ | -۰/۰۴۳ | ۴/۸۲ | ۶/۶۵ | ۰/۹۶ |

جدول ۷. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای عملکرد گندم (اعتبارسنجی)

| رقم | NSE (-) | CRM (-) | ARE (%) | NRMSE (%) | $R^2$ (-) |
|---|---|---|---|---|---|
| روشن | ۰/۸۹ | ۰/۰۳ | ۴/۳۶ | ۴/۶۵ | ۰/۹۴ |
| قدس | ۰/۹۶ | -۰/۰۰۹ | ۴/۴۸ | ۴/۵۵ | ۰/۹۵ |




شکل ۲. مقایسهٔ رطوبت حجمی شبیه‌سازی ($\theta_s$) و اندازه‌گیری‌شدهٔ ($\theta_o$) تیمارها در ارقام روشن و قدس برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی

**جدول ۸. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای رطوبت رقم روشن گندم (واسنجی)**

| سطح شوری | سطح آبیاری | NRMSE% | CRM(-) | NSE (-) | ARE (%) (%) | $R^2$ (-) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $S_1$ | $I_2$ | ۱۵/۲ | ۰/۰۷ | ۰/۳۶ | ۲۰/۸۵ | ۰/۵۰۸ |
| | $I_3$ | ۱۳/۰ | ۰/۰۹ | ۰/۶۹ | | |
| | $I_4$ | ۱۱/۶ | ۰/۰۶ | ۰/۶۹ | | |
| $S_2$ | $I_1$ | ۱۵/۹ | ۰/۰۹ | −۰/۰۲ | ۲۶/۰۹ | |
| | $I_3$ | ۱۵/۵ | ۰/۱۰ | ۰/۶۰ | | |
| | $I_4$ | ۱۵/۴ | ۰/۱۱ | ۰/۵۷ | | |
| $S_3$ | $I_1$ | ۱۷/۴ | ۰/۱۰ | −۰/۲۱ | ۲۴/۸۷ | |
| | $I_2$ | ۱۴/۶ | ۰/۰۷ | ۰/۵۳ | | |
| | $I_4$ | ۱۲/۷ | ۰/۱۰ | ۰/۷۰ | | |

**جدول ۹. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای رطوبت رقم قدس گندم (واسنجی)**

| سطح شوری | سطح آبیاری | NRMSE% | CRM(-) | NSE (-) | ARE (%) (%) | $R^2$ (-) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $S_1$ | $I_2$ | ۱۳/۹ | ۰/۰۱ | ۰/۴۹ | ۲۱/۳۰ | ۰/۴۷۲ |
| | $I_3$ | ۱۲/۱ | ۰/۰۷ | ۰/۷۲ | | |
| | $I_4$ | ۱۱/۷ | ۰/۰۵ | ۰/۶۸ | | |
| $S_2$ | $I_1$ | ۱۷/۶ | ۰/۱۱ | −۰/۱۸ | ۲۵/۸۴ | |
| | $I_3$ | ۱۴/۸ | ۰/۰۸ | ۰/۶۳ | | |
| | $I_4$ | ۱۵/۶ | ۰/۱۱ | ۰/۵۵ | | |
| $S_3$ | $I_1$ | ۱۸/۰ | ۰/۱۱ | −۰/۲۹ | ۲۵/۱۱ | |
| | $I_2$ | ۱۵/۰ | ۰/۰۵ | ۰/۵۱ | | |
| | $I_4$ | ۱۳/۰ | ۰/۱۰ | ۰/۶۹ | | |

**جدول ۱۰. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای رطوبت ارقام روشن و قدس گندم (اعتبارسنجی)**

| رقم | سطح شوری | سطح آبیاری | NRMSE% | CRM(-) | NSE (-) | ARE (%) | $R^2$ (-) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| روشن | $S_1$ | $I_1$ | ۱۶/۴ | −۰/۰۱ | −۰/۲۳ | ۲۵/۹۵ | ۰/۴۰۷ |
| | $S_2$ | $I_2$ | ۱۵/۱ | ۰/۰۳ | ۰/۵۲ | | |
| | $S_3$ | $I_3$ | ۱۳/۸ | ۰/۰۹ | ۰/۶۶ | | |
| قدس | $S_1$ | $I_1$ | ۱۶/۶ | −۰/۰۱ | −۰/۲۶ | ۲۶/۰۶ | ۰/۳۹۹ |
| | $S_2$ | $I_2$ | ۱۵/۲ | ۰/۰۲ | ۰/۵۱ | | |
| | $S_3$ | $I_3$ | ۱۴/۱ | ۰/۰۹ | ۰/۶۵ | | |

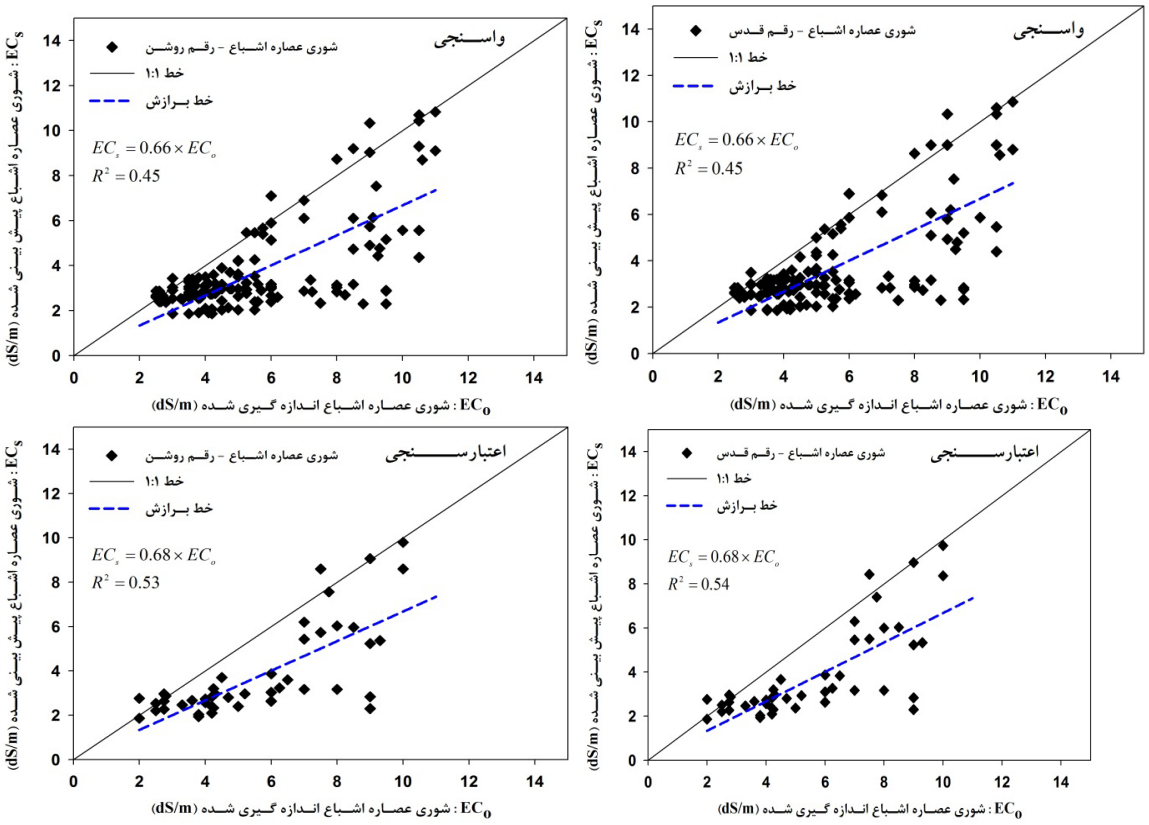
با توجه به این جدول‌ها، مثبت بودن مقادیر CRM نیز نشان می‌دهد که در مجموع مدل AquaCrop رطوبت را کمتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی کرد. شاخص NRMSE نیز برای ارقام روشن و قدس محاسبه شد که در دامنهٔ ۱۰ تا ۲۰ درصد است و نشان می‌دهد که مدل AquaCrop در پیش‌بینی رطوبت، در وضعیت مناسب قرار دارد و مانند عملکرد محصول که مقدار این آماره کمتر از ۱۰ درصد بود، رطوبت را با دقت زیاد پیش‌بینی نمی‌کند. حداکثر NRMSE در بین تیمارهای مختلف، در رقم روشن ۱۷/۴ (مربوط به $S_3I_1$) و در رقم قدس ۱۸ درصد (مربوط به $S_3I_1$) به‌دست آمد که نشان می‌دهد در تیمارهای تحت تنش آبی و شوری نسبت به سایر تیمارها، خطای تخمین رطوبت توسط مدل نسبتاً بیشتر است، و به‌طور کلی می‌توان گفت اعمال تیمارهای کم‌آبی و شوری سبب کاهش دقت مدل در تخمین رطوبت می‌شود. شاخص نش–ساتکلیف برای تیمارهای ارقام روشن و قدس، نزدیک به یک محاسبه شد که نشان‌دهندهٔ دقت مناسب مدل در پیش‌بینی رطوبت است. با توجه به جدول ۱۰، مقدار متوسط CRM برای ارقام روشن و قدس به‌ترتیب، ۰/۰۴ و ۰/۰۳۴ به‌دست آمد. مقدار متوسط NRMSE برای هر سه تیمار، در هر دو رقم روشن و قدس به‌ترتیب، ۱۵/۱ و ۱۵/۳ درصد به‌دست آمد که در دامنهٔ ۱۰ تا ۲۰ درصد است و نشان می‌دهد که مدل AquaCrop در پیش‌بینی رطوبت خاک در وضعیت مناسب قرار دارد.

## شوری خاک

با مقایسهٔ نتایج مدل AquaCrop در پیش‌بینی شوری عصارهٔ اشباع خاک با مقادیر نمونه‌برداری، نتایج متفاوت در تیمارهای مختلف به‌دست آمد. براساس کل داده‌های اندازه‌گیری‌شدهٔ شوری عصارهٔ اشباع و مقادیر پیش‌بینی‌شدهٔ شوری عصارهٔ اشباع، تطابق بین آنها تا حدی مناسب بود که در شکل ۳، برای هر دو رقم روشن و قدس و برای واسنجی و اعتبارسنجی ارائه شده است. با توجه به این شکل برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی، در بیشتر موارد، شوری عصارهٔ اشباع پیش‌بینی‌شده توسط AquaCrop، کمتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده حاصل شد. در شکل ۳، بیشتر مقادیر شوری عصارهٔ اشباع در زیر خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند که نشان از کم‌برآوردی AquaCrop در اکثر موارد است. شاخص‌ها و پارامترهای آماری ارزیابی مدل در پیش‌بینی شوری خاک برای هر یک از تیمارها محاسبه شد که نتایج آن برای هر دو رقم روشن و قدس به‌ترتیب، مطابق جدول‌های ۱۱ و ۱۲ است. با توجه به این جدول‌ها، مثبت بودن مقادیر CRM، نشان می‌دهد که مدل مقادیر شوری را کمتر از مقادیر اندازه‌گیری‌شده، پیش‌بینی می‌کند. کوچک‌تر از ۱ شدن ضرایب خط برازش (ضریب ۰/۶۶ برای رقم قدس و ۰/۶۶ برای رقم روشن) نیز این وضعیت را برای مرحلهٔ واسنجی مدل نشان می‌دهد. آمارهٔ NRMSE برای ارقام روشن و قدس محاسبه شد که در دامنهٔ ۲۰ تا ۶۰ درصد است (به‌جز تیمار $S_1I_3$) که در محدودهٔ نامناسب NRMSE قرار دارد. مقدار میانگین NRMSE ارقام روشن و قدس در سطح شوری $S_1$ به‌ترتیب، ۲۴/۶ و ۲۴/۵ درصد است که با توجه به دسته‌بندی NRMSE مدل در سطح متوسط قرار می‌گیرد. ولی مقدار میانگین خطای نرمال‌شده هر دو رقم، در سطح شوری $S_2$ و $S_3$ بیشتر از ۳۰ درصد است که نشان‌دهندهٔ عدم اطمینان از مدل در تخمین شوری عصارهٔ اشباع است. شاخص نش– ساتکلیف برای تیمارهای ارقام روشن و قدس مقادیر منفی محاسبه شد که نزدیک به یک نیست که نشان‌دهندهٔ دقت نامناسب مدل، در پیش‌بینی شوری است.

برای اعتبارسنجی مدل سه تیمار ($S_1I_1$، $S_2I_2$، $S_3I_3$) انتخاب شد و مقادیر شوری حاصل از شبیه‌سازی برای هر دو رقم روشن و قدس، با مقادیر اندازه‌گیری‌شده براساس شاخص‌های آماری بررسی شد. با توجه به جدول ۱۳، مقدار متوسط CRM برای ارقام روشن و قدس به‌ترتیب، ۰/۲۹۰ و ۰/۲۹۴ به‌دست آمد. مقدار متوسط NRMSE

برای هر سه تیمار، در هر دو رقم روشن و قدس به‌ترتیب، ۳۶/۸۷ و ۳۶/۸۷ درصد به‌دست آمد که در دامنهٔ بیش از ۳۰ درصد NRMSE است و نشان می‌دهد که مدل AquaCrop در وضعیت نامناسب قرار دارد.




**شکل ۳. مقایسهٔ شوری عصارهٔ اشباع شبیه‌سازی ($EC_s$) و اندازه‌گیری‌شدهٔ ($EC_o$) تیمارها برای ارقام روشن و قدس برای مراحل واسنجی و اعتبارسنجی**

**جدول ۱۱. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای شوری رقم روشن گندم (واسنجی)**

| سطح شوری | سطح آبیاری | NRMSE % | CRM(-) | NSE(-) | ARE (%) | $R^2$(-) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $S_1$ | $I_2$ | ۲۷/۵ | ۰/۲۲ | -۲/۵۸ | ۳۹/۱۶ | ۰/۴۴۷ |
| | $I_3$ | ۱۷/۱ | ۰/۱۳ | -۰/۸۰ | | |
| | $I_4$ | ۲۹/۲ | ۰/۲۳ | -۵/۱۹ | | |
| S2 | $I_1$ | ۴۴/۲ | ۰/۴۲ | -۵/۱۳ | ۴۹/۴۳ | |
| | I3 | ۲۲/۷ | ۰/۱۵ | -۲/۴۹ | | |
| | $I_4$ | ۳۱/۲ | ۰/۲۷ | -۵/۵۹ | | |
| $S_3$ | $I_1$ | ۵۶/۹ | ۰/۴۹ | -۵/۵۸ | ۶۹/۰۱ | |
| | $I_2$ | ۳۹/۷ | ۰/۳۴ | -۱/۶۹ | | |
| | $I_4$ | ۴۳/۷ | ۰/۳۶ | -۴/۲۵ | | |

**جدول ۱۲. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای شوری رقم قدس گندم (واسنجی)**

| سطح شوری | سطح آبیاری | NRMSE% | CRM(-) | NSE(-) | ARE (%) | $R^2$ (-) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $S_1$ | $I_2$ | ۲۶/۹ | ۰/۲۳ | -۲/۷۰ | ۳۹/۵۰ | ۰/۴۴۶ |
| | $I_3$ | ۱۷/۶ | ۰/۱۳ | -۰/۸۱ | | |
| | $I_4$ | ۲۹/۰ | ۰/۲۳ | -۵/۱۰ | | |
| $S_2$ | $I_1$ | ۴۴/۷ | ۰/۴۲ | -۵/۳۵ | ۴۹/۷۴ | |
| | $I_3$ | ۲۱/۹ | ۰/۱۵ | -۲/۳۳ | | |
| | $I_4$ | ۳۱/۳ | ۰/۲۶ | -۶/۵۵ | | |
| $S_3$ | $I_1$ | ۵۷/۰ | ۰/۴۹ | -۵/۶۰ | ۶۸/۵۵ | |
| | $I_2$ | ۳۹/۲ | ۰/۳۴ | -۱/۶۳ | | |
| | $I_4$ | ۴۳/۷ | ۰/۳۷ | -۴/۲۶ | | |

**جدول ۱۳. پارامترهای آماری ارزیابی مدل برای شوری ارقام روشن و قدس گندم (اعتبارسنجی)**

| رقم | سطح شوری | سطح آبیاری | NRMSE% | CRM(-) | NSE(-) | ARE (%) | $R^2$ (-) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| روشن | $S_1$ | $I_1$ | ۳۰/۵ | ۰/۲۱ | -۰/۸۱ | ۵۷/۴۶ | ۰/۵۳۳ |
| | $S_2$ | $I_2$ | ۳۶/۷ | ۰/۳۲ | -۱/۴۹ | | |
| | $S_3$ | $I_3$ | ۴۳/۴ | ۰/۳۴ | -۳/۳۳ | | |
| قدس | $S_1$ | $I_1$ | ۳۰/۸ | ۰/۲۱ | -۰/۸۴ | ۵۷/۴۱ | ۰/۵۳۷ |
| | $S_2$ | $I_2$ | ۳۶/۳ | ۰/۳۲ | -۱/۴۵ | | |
| | $S_3$ | $I_3$ | ۴۳/۵ | ۰/۳۵ | -۳/۳۴ | | |

## نتیجه‌گیری

مدل AquaCrop قادر به شبیه‌سازی چگونگی تعرق در طول فصل رشد، عملکرد، آب مورد نیاز گیاه و کارایی مصرف آب براساس اطلاعات آب، اقلیم، خاک و گیاه است. در مدل AquaCrop، مقدار خطای نرمال‌شدهٔ پیش‌بینی عملکرد، کمتر از ۱۰ درصد به‌دست آمد. AquaCrop مقدار رطوبت را با دقت نسبتاً مناسب پیش‌بینی کرد. آمارهٔ NRMSE برای ارقام روشن و قدس، در دامنهٔ ۱۰ تا ۲۰ درصد محاسبه شد که نشان می‌دهد مدل AquaCrop در پیش‌بینی رطوبت، نسبتاً دقیق است. خطای تخمین شوری عصارهٔ اشباع خاک در مقایسه با پیش‌بینی عملکرد محصول و رطوبت خاک، بیشتر بود. خطای مدل در تخمین شوری عصارهٔ اشباع از نوع کم‌برآورد بوده و براساس شاخص NRMSE، در تخمین شوری خاک، عدم اطمینان از مدل وجود دارد. با توجه به اینکه هنوز تحقیقی در زمینهٔ بررسی کارایی مدل AquaCrop در پیش‌بینی شوری عصارهٔ اشباع و بیلان املاح در خاک صورت نگرفته است، امکان مقایسهٔ نتایج این تحقیق با سایر تحقیقات در زمینهٔ انتقال املاح در نیمرخ خاک، وجود نداشت. نتایج تحقیقات در مورد انتقال املاح توسط سایر مدل‌ها از جمله مدل SWAP، حاکی از این است که این مدل در پیش‌بینی شوری نیمرخ خاک، دقیق است [۱۷]. براساس نتایج وردی‌نژاد و همکاران بر

روی گندم زمستانه در منطقهٔ اصفهان، مقادیر NRMSEپیش‌بینی شوری عصارهٔ اشباع خاک توسط SWAP، در اکثر تیمارها کمتر از ۱۰ درصد و در برخی از تیمارهای خاص بین ۱۰ تا ۲۰ درصد گزارش شد [۱۷]. یکی از دلایل نتیجه‌گیری ضعیف از مدل AquaCrop در شبیه‌سازی شوری را می‌توان به معادلات حاکم بر پدیدهٔ انتقال املاح نسبت داد. عوامل مختلف بر انتقال املاح در نیمرخ خاک مؤثرند؛ از جمله انتقال توده‌ای املاح، پخشیدگی، انتشار آبی، جذب املاح، تخریب املاح، رسوب و ... که در AquaCrop تنها فرایندهای انتقال توده‌ای و پخشیدگی در نظر گرفته شده است و براساس معادلهٔ CDE[1]، انتقال املاح بررسی می‌شود، درحالی‌که املاح تحت تأثیر فرایندهای دیگر نیز قرار دارند.

## منابع


۱. شهیدی، ع (۱۳۸۷). اثر بر هم کنش کم‌آبیاری و شوری بر عملکرد و اجزای عملکرد ارقام گندم با تعیین تابع تولید آب و شوری در منطقهٔ بیرجند. پایان‌نامهٔ دکتری، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲. شهیدی، ع؛ نحوی‌نیا، م؛ پارسی نژاد، م؛ لیاقت، ع (۱۳۸۹). تعیین مدل بهینه جذب آب در شرایط تنش همزمان شوری و خشکی توسط ارقام زراعی گندم در منطقهٔ بیرجند. نشریهٔ آب و خاک، ۳(۲۴): ۵۳۴-۵۴۴.

۳. علیزاده، ح؛ نظری، ب؛ پارسی نژاد، م؛ رمضانی اعتدالی، ه؛ جانباز، ح.ر (۱۳۸۹). ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم‌آبیاری گندم در منطقهٔ کرج. آبیاری و زهکشی ایران، ۲(۴): ۲۷۳-۲۸۳.

4. Allen RG, Preira LS, Raes D and Smith M (1998). Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirement. FAO Irrigation and Drainage Paper, NO.56, Rome, Italy.

5. Iqbal M, Shen Y, Stricevic R, Pei H, Sun H, Amiri E, Penas A and del Rio S (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. Agricultural Water Management, 135:61-72.

6. Heng LK, Evett SR, Howell TA and Hsiao TC (2009). Calibration and testing of FAO AquaCrop model for maize in several locations. Agronomy, 101:488–498.

7. Kroes JG and Van Dam JC (2008). Reference manual SWAP version 3.2., Alterra Green World Research, Wagenningen, Report 1649, Availabel at: http://www.swap.alterra.nl/

8. Patel N, Kumar P and Sign N (2008). Performance evaluation of AquaCrop in simulating Potato yield under varying water availability condition. Indian Agricultural Research Institute, New Delhi-110012.

9. Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E (2009). AquaCrop-The FAO crop model for predicting yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agronomy, 101:438–447.

10. Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E (2012). Reference manual AquaCrop, FAO, Land and Water Division, Rome, Italy.

11. Russo D and Bakker D (1986). Crop water production functions for sweet corn and cotton irrigated with saline water, Soil Science Society of America Journal, 51:1554-1562.


1. CDE: Convection-Diffusion Equation

12. Sepaskhah AR, Bazrafshan-Jahromi AR and Shirmohammadi-Aliakbarkhani Z (2006). Development and Evaluation of a Model for Yield Production of Wheat, Maize and Sugarbeet under Water and Salt Stresses. Biosystems Engineering, 93 (2): 139–152.

13. Singh AK, Tripathy R and Chopra UK (2008). Evaluation of CERESWheat and CropSyst models for water-Nitrogen interactions in wheat crop. Agricultural Water Management, 95:776–786.

14. Steduto P, Hsiao TC, Raes D and Fereres E (2009). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agronomy, 101:426–437.

15. Stockle CO, Martin SA and Campbell GS (1994). CropSyst, a Cropping System Simulation Model: Water/Nitrogen Budgets and Crop Yield. Agricultural Systems, 46: 335–359.

16. Vazifedoust M, van Dam JC, Feddes RA and Feizi M (2008). Increasing Water Productivity of Irrigated Crops under Limited Water Supply at Field Scale. Agricultural Water Management, 95: 89-102.

17. Verdinejad VR, Rezaie H, Ababaie B, Ahmadi H and Behmanesh J (2012). Application SWAP Agrohydrological Model to Predict Crop Yield, Soil Water and Solute Transport with shallow groundwater condition. 8th International Soil Science Congress Çeme- Izmir, Turkey.

18. Zhang W, Liu W, Xue Q, Pei H, Chen J and Han X (2013). Evaluation of the AquaCrop model for simulating yield response of winter wheat to water on the southern Loess Plateau of China. Water Science and Technology, 68.4:821-828.