

واسنجی و صحت سنجی مدل آکواکراپ برای جو در منطقه پاکدشت

حبیب کریمی اورگانی^۱، علی رحیمی خوب^{۲*}، محمدهادی نظری فرد^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. استاد، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. کارشناس پژوهشی گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۹/۱۴ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۱۲/۳)

چکیده

مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد گیاه برای مدیریت آب در مزرعه و بهینه‌سازی بهره‌وری آب کاربرد زیادی دارند. مدل آکواکراپ بر اساس پاسخ عملکرد محصول به آب توسط سازمان فائو توسعه یافته است. هدف از انجام این پژوهش واسنجی دو پارامتر متغیر درجه روزرشد تا رسیدن محصول و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای گیاه جو در منطقه پاکدشت بود. آزمایش‌ها در سال زراعی ۹۴-۱۳۹۳ در مزرعه پردیس ابوریحان انجام شد و تیمارهای آزمایش شامل سه تقویم زراعی زود هنگام، کاشت به موقع و دیر هنگام بودند. مقدار درجه روزرشد از شروع جوانه‌زنی تا رسیدن محصول و ضریب بهره‌وری نرمال شده با استفاده از داده‌های واسنجی و روش سعی و خطا به ترتیب ۱۲۶۰ درجه و ۱۴/۸ گرم بر مترمربع برآورد شد. نتایج با استفاده از داده‌های صحت سنجی نشان داد، مدل واسنجی شده با ضریب تعیین ۰/۹۹ و جذر میانگین مربعات خطای ۰/۵۹ تن در هکتار تطابق خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده دارد.

واژه‌های کلیدی: درجه روزرشد، تقویم زراعی، ضریب بهره‌وری نرمال شده، عملکرد محصول

مقدمه

متوسط بارندگی سالانه در کشور ۲۵۰ میلی‌متر است که یک‌سوم میانگین جهانی است و جزو مناطق کم باران و خشک جهان بشمار می‌رود. بخش کشاورزی با مصرف حدود ۹۰ درصد از منابع آب بزرگ‌ترین مصرف‌کننده است و در مقایسه با متوسط جهان که حدود ۷۰ درصد می‌باشد رقم قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد (Rahimikhoob et al., 2014). افزایش جمعیت و به دنبال آن مصرف آب بیشتر در سایر بخش‌ها مثل صنعت و شهر، ضرورت ارتقاء بهره‌وری آب در بخش کشاورزی را آشکار می‌کند. پیش‌بینی و برآورد عملکرد محصول تحت شرایط محدودیت منابع آب یکی از اهداف مهم برنامه‌ریزی آبیاری است. آزمایش‌های مزرعه‌ای برای تعیین عملکرد گیاه با مقادیر مختلف آب آبیاری کاری پرزحمت، زمان‌بر و پرهزینه است. مدل‌های پیش‌بینی عملکرد گیاه ابزارهای سودمندی برای بررسی سناریوهای مختلف و بهینه‌سازی برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشند (Geerts and Raes, 2009). با استفاده از این مدل‌ها، اثر سناریوهای مختلف کم آبیاری بر روی عملکرد محصول تعیین شده و با توجه به مقدار منابع آب، بهترین برنامه

کم آبیاری استنتاج می‌گردد (Liu et al., Pereira et al., 2002). تاکنون مدل‌های متعددی مثل کراپ‌سیست^۱ و و فوست^۲ برای شبیه‌سازی عملکرد محصول ارائه شده و اغلب آن‌ها از پارامترهای زیادی استفاده می‌کنند که علاوه بر اینکه کار کردن با این مدل‌ها را سخت و دشوار می‌کند، واسنجی آن‌ها برای هرگونه گیاهی بسیار پیچیده می‌شود. سازمان فائو مدلی به نام آکواکراپ^۳ عرضه نموده که عملکرد محصول را در پاسخ به مقدار آب کاربردی شبیه‌سازی می‌کند (Steduto et al., 2009). این مدل در مقایسه با دیگر مدل‌های شبیه‌سازی گیاه مثل کراپ‌سیست از پارامترهای کمتری استفاده می‌کند و در آن سعی شده که تعادلی بین دقت، سادگی و سهولت استفاده برای کاربران برقرار شود (Hsiao et al., 2009). به همین منظور این مدل برای مطالعه اثرات تغییر اقلیم و سازگاری گندم (Soddu et al. 2013) و مدل‌های سنجش از دور مورد بررسی و صحت سنجی قرار گرفت (Kim and Kaluarachi, 2015). نسخه ۴ مدل آکواکراپ توسط Vanuytrecht et al. (2014) توسعه داده شد و کاربردهای پاسخ گیاه به افزایش غلظت CO₂، حاصلخیزی و شوری خاک به قابلیت‌های مدل

1. CropSyst
2. WOFOST
3. AquaCrop

تعیین ۰/۹۹ و جذر میانگین خطا برابر ۱/۷۴ تن در هکتار برآورد شد.

مدل آکواکراپ برای تعدادی محصول و برخی از مناطق ایران مورد ارزیابی قرار گرفته است. این مدل در منطقه کرج برای پیش‌بینی عملکرد گندم و سویا در شرایط کم آبیاری نتایج قابل قبولی ارائه داد (Alizadeh *et al.*, 2010؛ Babazadeh and SaraiTabrizi, 2012). مدل آکواکراپ برای محصول آفتاب‌گردان در استان خوزستان مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد این مدل با دقت بالایی عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند (Haydarinia *et al.*, 2012). مدل فوق برای ذرت علوفه‌ای در منطقه قزوین توسط (Rahimikhoob *et al.*, 2014) مورد واسنجی قرار گرفت. بر اساس نتایج آن‌ها متوسط خطای مدل حدود ۱۰ درصد تعیین شد.

اثرات کمبود آب در مدل آکواکراپ با محاسبه کمبود رطوبت خاک نسبت به قابلیت نگهداری رطوبت خاک ناحیه ریشه و با استفاده از چهار تابع پاسخ گیاه به تنش آبی آشکار می‌گردد. این چهار تابع عبارت‌اند از: تابع رشد تاج پوشش و شاخ و برگ، تابع هدایت روزنه گیاهی، تابع شتاب پیری زودهنگام تاج پوشش و تابع تغییر شاخص برداشت محصول. اساس و ساختار الگوریتم این توابع در مقالات کارشناسان تدوین‌کننده مدل آکواکراپ (Steduto *et al.*, 2009؛ Raes *et al.*, 2009) ارائه شده‌اند. در توابع فوق از پارامترهایی استفاده می‌شود که باید مقادیر آن‌ها برای هر گیاه و گونه‌های آن واسنجی شود. پارامترهای گیاهی در این مدل به چهار گروه شامل ۱- پارامترهایی که مربوط به خانواده گیاه است مثل دماهای پایه و حداکثر، ۲- پارامترهایی که مربوط به گونه گیاهی می‌شود مثل پوشش سطح زمین برای هر بوته در زمانی که ۹۰ درصد جوانه‌ها سبز می‌شوند، ۳- پارامترهایی که مقادیر آن‌ها بستگی به مدیریت دارد مثل تعداد بوته‌ها در هکتار و ۴- پارامترهایی که مربوط به رقم خاصی از گیاه می‌شود مثل ضریب بهره‌وری نرمال شده. پارامترهای گروه‌های یک و دو ثابت‌اند (conservative) و نیاز به واسنجی ندارند. پارامترهای گروه سه که تعدادشان محدود است بستگی به مدیریت کشت در مزرعه دارد که مقادیر آن توسط کاربر به مدل وارد می‌شود و لذا این پارامترها نیز نیازی به واسنجی ندارد. پارامترهای گروه چهار بستگی به نوع رقم کشت‌شده از گیاه دارد و برای هر اقلیمی باید واسنجی شود. مقادیر ثابت پارامترهای گروه‌های یک و دو و حدود پارامترهای گروه‌های سه و چهار برای بسیاری از گیاهان زراعی توسط کارشناسان فائو ارائه شده‌اند (Raes *et al.*, 2009).

اضافه شد. با استفاده از مدل آکواکراپ، اثرات عمق ریشه، تراکم گیاه، تقویم گیاهی بر روی عملکرد ذرت، راندمان مصرف آب برای یکی از مناطق نیمه‌خشک زیمبابوه استفاده شد (Nyakudya and Stroosnijder, 2014).

تاکنون پژوهش‌های گوناگونی در رابطه با صحت سنجی و واسنجی برخی از پارامترهای مدل آکواکراپ برای محصولات مختلف در مناطق مختلف جهان انجام شده است. این مدل با استفاده از داده‌های تجربی شش فصل زراعی بر روی ذرت در دانشگاه کالیفرنیا مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد، زیست‌توده و عملکرد محصول در شرایط مختلف تراکم بوته، تاریخ کاشت و نیاز آبی با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌شود (Hsiao *et al.*, 2009). همچنین این مدل برای شبیه‌سازی زیست‌توده و عملکرد جو در شمال اتیوپی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج نشان داد که از دقت مناسبی برخوردار است (Araya *et al.*, 2010). مدل آکواکراپ با دیگر مدل‌های شبیه‌سازی عملکرد گیاه مورد مقایسه قرار گرفت. در سال ۲۰۰۹، مدل آکواکراپ را با مدل‌های کراپ‌سیست و مدل وفوست برای شبیه‌سازی محصول آفتاب‌گردان در شرایط کم آبیاری در جنوب ایتالیا مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که به دلیل سادگی و نیاز به داده‌های کمتر، استفاده از مدل آکواکراپ ترجیح دارد (Todorovic *et al.*, 2009). (Heng *et al.*, 2009) گزارش دادند، مدل آکواکراپ در شرایط تنش آبی شدید، از دقت مطلوبی برخوردار نیست. بر اساس پژوهش آن‌ها، عملکرد دانه، زیست‌توده و پوشش گیاهی محصول ذرت در شرایط آبیاری کامل و تنش آبی ملایم به‌طور رضایت بخشی شبیه‌سازی می‌شود، ولی در شرایط تنش آبی شدید بخصوص وقتی تنش در دوره پیری اعمال شود، مدل از دقت مطلوبی برخوردار نیست. (Farahani *et al.*, 2009) مدل آکواکراپ را در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری (۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آبیاری کامل) برای پنبه در منطقه گرم و خشک و بادخیز مدیترانه‌ای شمال سوریه مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند، مقدار خطای مقادیر پیش‌بینی‌شده، به‌استثنای کم آبیاری‌های ۶۰ و ۴۰ درصد با بیش از ۳۲ درصد خطا، در بقیه موارد در حدود ۱۰ درصد بوده است. (Iqbal *et al.*, 2014) مدل آکواکراپ نسخه ۳/۱ را برای محصول زمستانه گندم در دشت شمالی چین واسنجی و صحت سنجی کردند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد، عملکرد زیست‌توده در شرایط مختلف کم آبیاری با دقت مناسبی توسط مدل برآورد می‌شود. همچنین این مدل توسط (Mabhaudhi *et al.*, 2014) در منطقه نیمه‌خشک آفریقای جنوبی برای یکی از گیاهان گرمسیری آن بنام تارو ارزیابی قرار گرفت و زیست‌توده با ضریب

$$T_r = K_s \times K_C \times CC \times ET_0 \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه فوق، K_s ضریب تنش آبی، K_C ضریب گیاهی، CC ضریب پوشش گیاهی و ET_0 تبخیر و تعرق مرجع می‌باشند. با توجه به اینکه برنامه آبیاری در این پژوهش به صورتی بوده که گیاه تحت تنش کم‌آبی قرار نگیرد، لذا ضریب K_s برابر یک در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی K_C نسبت بین تبخیر و تعرق گیاه بدون تنش آبی به تبخیر و تعرق مرجع است. این ضریب در مدل آکواکراپ با استفاده از روش ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو (Allen *et al.*, 1998) در طول دوره رشد برآورد می‌شود. ضریب پوشش گیاهی در مدل آکواکراپ از زمان کاشت بذر تا پایان مرحله توسعه با استفاده از دو معادله زیر برآورد می‌شود (Steduto *et al.*, 2009):

$$CC = CC_0 \times e^{(CGC \times t)} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$CC = CC_x - [CC_x - CC_0 \times e^{(-CGC \times t)}] \quad (\text{رابطه ۴})$$

معادله ۳ برای دوره زمانی کاشت بذر تا نیمه مرحله توسعه استفاده می‌شود و معادله ۴ برای دوره زمانی از نیمه مرحله توسعه تا آخر مرحله توسعه است. در معادلات فوق، CC پوشش گیاهی در t روز پس از کاشت، CC_x حداکثر پوشش گیاهی، CC_0 پوشش اولیه گیاه در زمان $t=0$ و CGC نرخ رشد پوشش گیاه در روز است. پوشش گیاه در طول دوره مرحله آخر که در آن شیب پوشش گیاهی به صورت نزولی است، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$CC = CC_x \times \{1 - 0.05 \times [e^{(\frac{CDC}{CC_x} \times t)} - 1]\} \quad (\text{رابطه ۵})$$

در روابط فوق، CDC نرخ کاهش پوشش گیاهی و t زمان برحسب روز که از مرحله چهارم رویش (پیری) شروع می‌شود. مدل آکواکراپ از روش واحد گرمایی برحسب درجه روز رشد، برای توصیف رشد گیاه استفاده می‌کند. با استفاده از این روش، طول دوره‌های رشد گیاه یا زمان لازم برای رسیدن به یک مرحله از رشد گیاه برحسب درجه روز رشد به جای تعداد روزها بیان می‌شود. درجه روز رشد از تفاضل دمای پایه^۳ بر متوسط دمای روزانه هوا حساب می‌شود:

$$GDD = T_{avg} - T_{base} \quad (\text{رابطه ۶})$$

در رابطه فوق، T_{avg} متوسط دمای روزانه هوا ($^{\circ}C$)، T_{base} دمای پایه ($^{\circ}C$) و GDD درجه روز رشد ($^{\circ}C$) می‌باشند. دمای پایه، دمایی است که کمتر از آن برای محاسبه درجه روز رشد به حساب نمی‌آید و به عبارتی رشد گیاه به جریان نمی‌افتد. همچنین در آکواکراپ آستانه دمای بالا (T_{upper}) هم در نظر گرفته می‌شود. آستانه دمای بالا، دمایی است که بالاتر از آن

متغیرهای درجه روز رشد^۱ (GDD) تا رسیدن محصول و ضریب بهره‌وری نرمال شده^۲ (BWP) که برای هر گیاهی نیاز به واسنجی دارند. حدود تغییرات دو پارامتر فوق در مقالات مرجع مدل داده شده است. به‌طور مثال پارامتر GDD از کاشت بذر تا رسیدن محصول برای گونه‌های مختلف ذرت از ۱۲۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه روز متغیر است. این کمیت توسط Rahimikhoob *et al.* (2014) برای ذرت علوفه‌ای واریته سینگل کراس ۷۰۴ واسنجی شد و مقدار آن برابر ۱۲۰۰ درجه روز به دست آمد. در مدل آکواکراپ، تبخیر و تعرق به دو جزء تعرق گیاه و تبخیر از خاک تفکیک می‌گردد و زیست‌توده با استفاده از تعرق روزانه گیاه و پارامتر BWP برآورد می‌گردد (Hsiao *et al.*, 2009). لذا BWP یکی از پارامترهای مهم برای تعیین زیست‌توده گیاهی در مدل آکواکراپ است. بررسی منابع نشان می‌دهد، دو پارامتر مذکور برای محصول جو در ایران تعیین نشده است. پارامترهای GDD و BWP دارای یک مقدار مشخص و ثابتی نمی‌باشد و برای هر منطقه و نوع رقم گیاه متفاوت است. به‌طور مثال دامنه تغییرات توصیه‌شده GDD و BWP برای جو به ترتیب از حدود ۹۰۰ تا ۲۰۰۰ درجه روز و از حدود ۱۲ تا ۱۷ گرم بر مترمربع می‌باشد (Raes *et al.*, 2009) و لذا لازم است برای هر منطقه و نوع رقم گیاه تعیین شود. هدف از انجام این تحقیق واسنجی دو متغیر GDD و BWP برای گیاه جو در منطقه پاکدشت می‌باشد.

مواد و روش‌ها

تشریح مدل آکواکراپ

در این پژوهش از نسخه ۴ مدل آکواکراپ استفاده شد. در این مدل، مقدار عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت از رابطه (۱) حساب می‌شود (Steduto *et al.*, 2009):

$$B = BWP \left(\sum \frac{T_{r,i}}{ET_{0,i}} \right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

در رابطه فوق، B عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت (گرم بر مترمربع)، BWP ضریب بهره‌وری نرمال شده (گرم بر مترمربع)، $T_{r,i}$ تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز) و $ET_{0,i}$ تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز) می‌باشند. مقدار پارامتر BWP بین ۱۲ تا ۱۷ گرم بر مترمربع برای ارقام مختلف محصول جو توصیه‌شده است که در این پژوهش این پارامتر واسنجی می‌شود. در مدل آکواکراپ، پارامتر تعرق گیاه (T_r) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

1. Growing Degree Days
2. Normalized Biomass Water Productivity

3. Base temperature

مستعد کشاورزی آن کافی نیست. پاکدشت مطابق طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن جزو مناطق خشک محسوب می‌شود که در آن میانگین بارندگی سالانه ۱۴۱ میلی‌متر، دمای متوسط سالانه ۱۵/۶ سانتی‌گراد و تبخیر و تعرق سالانه ۱۳۹۰ میلی‌متر است (Amiratabar et al., 2014). پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در منطقه پاکدشت قرار گرفته و این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی آن بر روی گیاه جو رقم ریحان در سال زراعی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ انجام شد. این مزرعه در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۹ دقیقه شمالی و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۲۷ متر واقع است. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک و آب محل آزمایش در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است.

منجر به افزایش درجه روزرشد نمی‌شود. مقادیر دمای پایه و آستانه دمای بالا بر اساس مقادیر پیش‌فرض مدل به ترتیب برابر صفر و ۱۵ در نظر گرفته شد. در مدل آکواکراپ، دامنه تغییرات مقدار درجه روزرشد از شروع کاشت بذر تا شروع پیری برای ارقام مختلف محصول جو از ۹۰۰ تا ۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. یکی از اهداف این پژوهش تعیین این پارامتر برای رقم جو ریحان برای منطقه پاکدشت است.

مشخصات محل آزمایش

این پژوهش برای منطقه پاکدشت واقع در جنوب شرقی شهر تهران انجام شد. پاکدشت یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی استان است که محصولات مهم زراعی آن شامل گندم، جو، یونجه و ذرت می‌باشد. آب‌های زیرزمینی از منابع اصلی تأمین آب کشاورزی این منطقه است ولی برای ۳۳ هزار هکتار اراضی

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

EC (dS/m)	رطوبت اشباع (درصد حجمی)	جرم مخصوص ظاهری (gr/cm ³)	رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)	رطوبت مزرعه (درصد حجمی)	بافت خاک	ضخامت لایه (m)
۳/۵۵	۴۴/۶۴	۱/۳۶	۱۰/۰۱	۲۰/۱۵	Silt loam	۰/۲
۳/۶۹	۴۳/۵۸	۱/۲۳	۱۰/۲۲	۲۰/۴۵	Sandy loam	۰/۲
۴/۰۶	۴۰/۸۶	۱/۳۲	۱۰/۶۵	۲۱/۴۵	Sandy loam	۰/۲
۴/۵۵	۴۸/۵۷	۱/۳۳	۹/۶۰	۱۸/۸۲	Sandy loam	۰/۴

جدول ۲- خصوصیات شیمیایی آب

EC (dS/m)	PH	Na (meq/lit)	Ca+Mg (meq/lit)	پارامتر
۱/۴	۷/۲	۲/۹	۱۶	مقدار

توصیه‌های متخصصین کشاورزی انجام گرفت. بذر با دست به‌صورت یکنواخت در سطح کرت پخش شدند. مقدار ترکب بذر ۱۵۰ دانه در مترمربع بود و مقدار کود ازت و پتاسیم به ترتیب ۱۰۰ و ۷۰ کیلوگرم در هکتار مصرف شد. کل کود پتاسیم و نصف کود ازت در زمان کاشت و باقیمانده کود ازت قبل از مرحله گلدهی به زمین داده شد. تاریخ برداشت جو در تیمارهای زودهنگام، به‌موقع و دیرهنگام به ترتیب ۲۴ اردیبهشت (۱۹۶ روز پس از کاشت)، ۳۱ اردیبهشت (۱۹۳ روز پس از کاشت) و اول خرداد (۱۸۴ روز پس از کاشت) بود.

جهت تعیین رطوبت خاک و زمان آبیاری از دستگاه رطوبت‌سنج^۱ TDR که معادله واسنجی آن برای خاک محل

مشخصات تیمارها و اندازه‌گیری‌ها

تیمارهای آزمایش شامل سه تاریخ مختلف کشت گیاه جو با آبیاری کامل (بدون تنش آبی) در سال آبی ۹۴-۱۳۹۳ در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. تاریخ‌ها بر اساس تجربیات کشاورزان محلی به صورتی انتخاب شدند که سه نوع کشت زودهنگام، کشت به‌موقع و کشت دیرهنگام داشته باشیم. فرض آماری این بود که عملکرد این سه نوع کشت تفاوت معنی‌دار دارند. تیمارها عبارت بودند از: (۱) هشت آبان (زودهنگام)، (۲) ۱۸ آبان (به‌موقع) و (۳) ۲۸ آبان (دیرهنگام). کرت‌ها به ابعاد ۲/۸×۴ (متر×متر) بودند و به‌منظور مستقل بودن تیمارها نسبت به هم، یک متر بین کرت‌ها فاصله گذاشته شد. تمام عملیات کشاورزی در طول فصل کشت بر اساس

2. Time domain reflectometry

و درجه روزرشد با استفاده از معادله ۶ به‌طور روزانه در طی رشد محصول جو محاسبه شد.

چهار پارامتر مربوط به پوشش گیاهی شامل درصد پوشش گیاه در شروع مرحله جوانه‌زنی (CC_0)، نرخ رشد پوشش گیاه در مرحله توسعه (CGC)، حداکثر پوشش گیاه (CC_x) و نرخ کاهش پوشش گیاه در مرحله پیری (CDC) برای اجرای مدل آکوآکراپ لازم می‌باشند. مقدار پوشش گیاه در شروع مرحله سبز شدن بر اساس راهنمای مدل آکوآکراپ (Steduto *et al.*, 2009) برابر ۲/۲۵ درصد به مدل داده شد. برای تعیین سه پارامتر دیگر، درصد پوشش گیاه در طول دوره رشد اندازه‌گیری شد و بر پایه این اندازه‌گیری‌ها حداکثر پوشش گیاه و تغییرات پوشش گیاه بین دو اندازه‌گیری هم بر اساس شدت تغییرات بر روز و هم بر درجه روزرشد محاسبه گردید. برای تعیین پوشش گیاهی از روش (Patrignani and Ochsner, 2015) استفاده شد. با استفاده از این روش، از سطح کرت عکس گرفته می‌شد و با انتقال عکس به نرم‌افزار کانوی^۱، درصد پوشش گیاه محاسبه می‌گردید. برای گرفتن عکس‌ها، دوربین در ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر بالاتر از تاج‌پوشش گیاه و به‌طور موازی با سطح زمین قرار داده می‌شد. سه نمونه از عکس‌های قبل و بعد از پردازش در نرم‌افزار کانوی در شکل ۱ ارائه شده است. طول و شروع دوره‌های مختلف رشد محصول جو همراه با عملیات کشاورزی و آبیاری یادداشت‌برداری و ثبت می‌شد. مجموعه پارامترهای اندازه‌گیری شده و مشاهده‌شده از مراحل مختلف رشد که به‌عنوان ورودی به مدل آکوآکراپ وارد شدند در جدول ۴ ارائه شده است. مقدار زیست‌توده تولیدشده در طول دوره رشد قبل از رسیدن کامل محصول و همچنین در زمان برداشت محصول در مجموع پنج دفعه اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری زیست‌توده، کل قسمت اندام هوایی از سطح خاک به بالا از وسط هر کرت برداشت شد. نمونه‌ها به مدت ۳ روز در دستگاه آون با درجه حرارت ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند و سپس عملکرد کل محصول برای هر تیمار توزین شد. داده‌های اندازه‌گیری شده با استفاده از نرم‌افزار SAS تحلیل آماری شدند.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل آکوآکراپ

در این پژوهش مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده در طی دوره رشد در دو تیمار کشت زود هنگام و کشت به‌موقع به‌عنوان داده‌های واسنجی و مقادیر اندازه‌گیری شده تیمار کشت دیر هنگام برای صحت‌سنجی استفاده شدند. در مرحله واسنجی

آزمایش، قبلاً توسط کارشناسان گروه آبیاری تعیین‌شده بود، استفاده شد. بعد از آماده‌سازی زمین، لوله مخصوص این دستگاه در یکی از کرت‌ها نصب شد و رطوبت خاک در لایه‌های مختلف خاک به فواصل ۱۰ سانتی‌متر به‌طور روزانه اندازه‌گیری می‌شد. زمان آبیاری به صورتی تعیین می‌شد که کمبود رطوبت خاک تا عمق توسعه ریشه بیشتر از ۵۵ درصد کل رطوبت قابل‌استفاده در خاک نگردد. کل رطوبت قابل‌استفاده در خاک از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\text{TAW} = \left(\sum_{i=1}^n (\theta_{fci} - \theta_{wpi}) \times D_i \right) \times 1000 \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه فوق، TAW کل رطوبت خاک تا عمق توسعه ریشه برحسب میلی‌متر، n تعداد لایه خاک تا عمق توسعه ریشه، θ_{fci} رطوبت ظرفیت مزرعه در لایه i ام، θ_{wpi} رطوبت نقطه پژمردگی در لایه i ام و D_i ضخامت خاک در لایه i ام برحسب متر. در این تحقیق، عمق ریشه در مرحله اول رشد به میزان ۰/۳ متر و در مرحله میانی و رسیدگی ۰/۶ متر در نظر گرفته شد و برای مرحله توسعه، به‌صورت درون‌یابی خطی بین رشد اولیه و رشد کامل محاسبه گردید. حجم آب آبیاری بر اساس کمبود رطوبت خاک، عمق توسعه ریشه و مساحت کرت تعیین گردید و با استفاده از کنترلر آب وارد کرت شد. جدول ۳ ارتفاع آب داده‌شده به تیمارهای مختلف در طول دوره کشت ارائه شده است.

جدول ۳- عمق آبیاری در ماه‌های مختلف دوره رشد جو در تیمارهای مختلف (برحسب میلی‌متر)

ماه	کاشت زود هنگام	کاشت به‌موقع	کاشت دیر هنگام
آبان	۵۲	۵۲	۳۰
آذر	۲۹	۲۹	۲۲
دی	۲۹	۲۹	۳۲
بهمن	۰	۳۶	۳۲
اسفند	۷۹	۳۶	۳۶
فروردین	۸۷	۱۳۰	۸۷
اردیبهشت	۸۷	۴۳	۸۷
کل	۳۶۳	۳۵۵	۳۲۶

متغیرهای هواشناسی شامل دمای حداکثر و حداقل هوا، رطوبت نسبی هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد از ایستگاه پردیس ابوریحان مربوط به دوره رشد محصول جو از تاریخ اول آبان ۱۳۹۳ تا آخر خرداد ۱۳۹۴ جمع‌آوری شدند. تبخیر و تعرق مرجع با استفاده روش پنمن مانیتث فائو (Allen *et al.*, 1998)

1. Canopeo

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

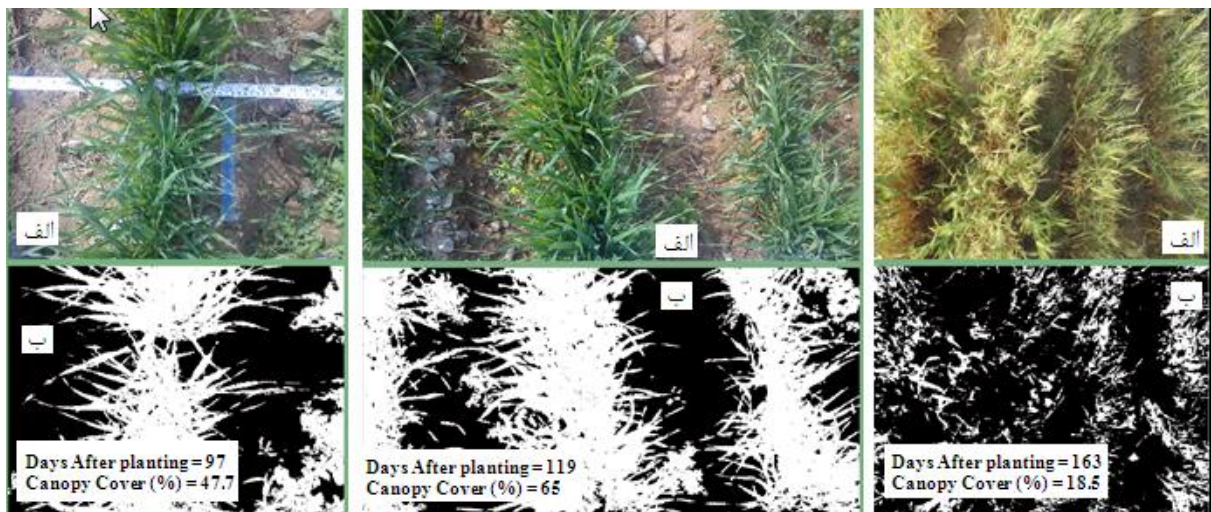
که در آن‌ها، P_i مقادیر برآورد شده مدل، \bar{P} متوسط مقادیر برآورد شده مدل، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{O} متوسط مقادیر اندازه‌گیری شده و N تعداد مشاهدات می‌باشند. میانگین خطای اریب میزان خطا را با بیش برآورد و یا کم برآورد نشان می‌دهد. در صورتی که این شاخص مثبت باشد نشان می‌دهد که در مجموع نتایج مدل بیشتر از مقادیر واقعی است.

برای تعیین پارامترهای BWP و GDD تا شروع پیری از روش سعی و خطا استفاده شد. بدین‌صورت که مدل آکواکراپ با مقادیر دامنه توصیه‌شده مدل اجرا شده و نتایج آن با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شدند. به‌منظور انتخاب بهترین مقدار پارامتر فوق، علاوه بر ترسیم نمودارهای اندازه‌گیری شده در مقابل مقادیر برآورد شده، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای اریب (MBE) استفاده شده است. معادلات این شاخص‌ها به شرح زیر می‌باشند (Emamifard et al., 2014):

$$R^2 = \frac{[\sum (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum (P_i - \bar{P})^2 \sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (\text{رابطه ۸})$$

جدول ۴ - مقادیر پارامترهای ورودی به مدل آکواکراپ

پارامتر			واحد	تیمار
				به‌موقع
				دیر هنگام
پوشش سطح اولیه (CC_0)	درصد	۲/۲۵	زود هنگام	۲/۲۵
حداکثر پوشش گیاه (CC_x)	درصد	۶۷		۸۷
زمان جوانه‌زنی	روز بعد از کاشت (درجه روز رشد)	۱۱ (۹۸)		۱۰ (۱۰۰)
نرخ توسعه پوشش گیاه (CGC)	درصد بر درجه روز (درصد بر روز)	۰/۶۷۳ (۵/۱)		۰/۶۷۵ (۵/۱)
نرخ کاهش پوشش گیاه (CDC)	درصد بر درجه روز (درصد بر روز)	۰/۶ (۸/۱)		۰/۵۷۵ (۷/۳۹)
زمان رسیدن به حداکثر پوشش	روز بعد از کاشت (درجه روز رشد)	۱۳۳ (۱۰۲۱)		۱۳۰ (۹۹۹)
مدت گلدهی	روز بعد از کاشت (درجه روز رشد)	۱۴ (۱۶۳)		۲۵ (۳۱۴)



شکل ۱ - تصاویر تاج پوشش محصول جو در سه تاریخ مختلف دوره رشد سال زراعی ۱۳۹۳-۱۳۹۴ مزرعه پردیس ابوریحان، الف- تصویر برداشت شده توسط دوربین و ب- تصویر پردازش شده توسط نرم‌افزار کانوپی.

ماده خشک و تیمار دیر هنگام کمترین عملکرد را دارد. مقادیر اندازه‌گیری شده زیست‌توده و عملکرد دانه جو با استفاده از طرح بلوک‌های کامل تصادفی و نرم‌افزار آماری SAS مورد تجزیه قرار گرفت. جداول تجزیه واریانس برای زیست‌توده و عملکرد دانه

نتایج و بحث

نتایج متوسط عملکرد زیست‌توده تیمارهای مختلف در روزهای پس از کاشت در جدول ۵ و تغییرات زمانی آن در شکل ۲ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، تیمار زود هنگام بیشترین عملکرد

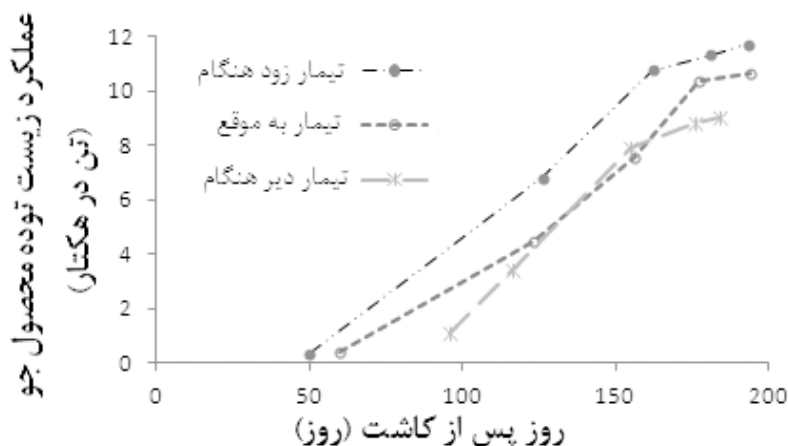
کریمی اورگانی و همکاران: واسنجی و صحت سنجی مدل آکوآکراپ... ۵۴۵

کاشت) برای زیست توده و عملکرد دانه در سطح ۱٪ معنی دار است؛ بنابراین تاریخ کاشت سبب اختلاف معنی دار در عملکرد زیست توده و عملکرد دانه جو شد.

جو در جداول ۶ و ۷ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می شود اثر بلوک غیر معنی دار می باشد و بنابراین نتایج اندازه گیری قابل اعتماد می باشند. همچنین اثر تیمار (تاریخ

جدول ۵ - متوسط عملکرد زیست توده محصول جو در روزهای مختلف پس از کاشت در تیمارهای مختلف

تیمار دیر هنگام		تیمار به موقع		تیمار زود هنگام	
عملکرد	روز پس از کاشت	عملکرد	روز پس از کاشت	عملکرد	روز پس از کاشت
(تن در هکتار)	(روز)	(تن در هکتار)	(روز)	(تن در هکتار)	(روز)
۱/۱	۹۶	۰/۳۶	۶۰	۰/۳۴	۵۰
۳/۴	۱۱۶	۴/۵	۱۲۳	۶/۸	۱۲۶
۷/۸	۱۵۵	۷/۶	۱۵۶	۱۰/۸	۱۶۲
۸/۸	۱۷۶	۱۰/۴	۱۷۷	۱۱/۳	۱۸۱
۹/۰	۱۸۴	۱۰/۶	۱۹۴	۱۱/۷	۱۹۳



شکل ۲- تغییرات زمانی عملکرد زیست توده واقعی جو در تیمارهای مختلف

جدول ۶- تجزیه واریانس زیست توده جو

F _t		F _s	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۱٪	۵٪					
۱۸	۶/۹۴	۱/۹۶ ^{ns}	۰/۱۲۶۵	۰/۲۵۹۹	۲	بلوک
۱۸	۶/۹۴	۸۵/۶۳**	۵/۵۳۰۲	۱۱/۰۶۰۵	۲	تیمار
			۰/۰۶۴۶	۰/۲۵۸۳	۴	خطای آزمایش
				۱۱/۵۷۱۸	۸	کل

ns غیر معنی دار ** معنی دار در سطح ۱ درصد * معنی دار در سطح ۵ درصد

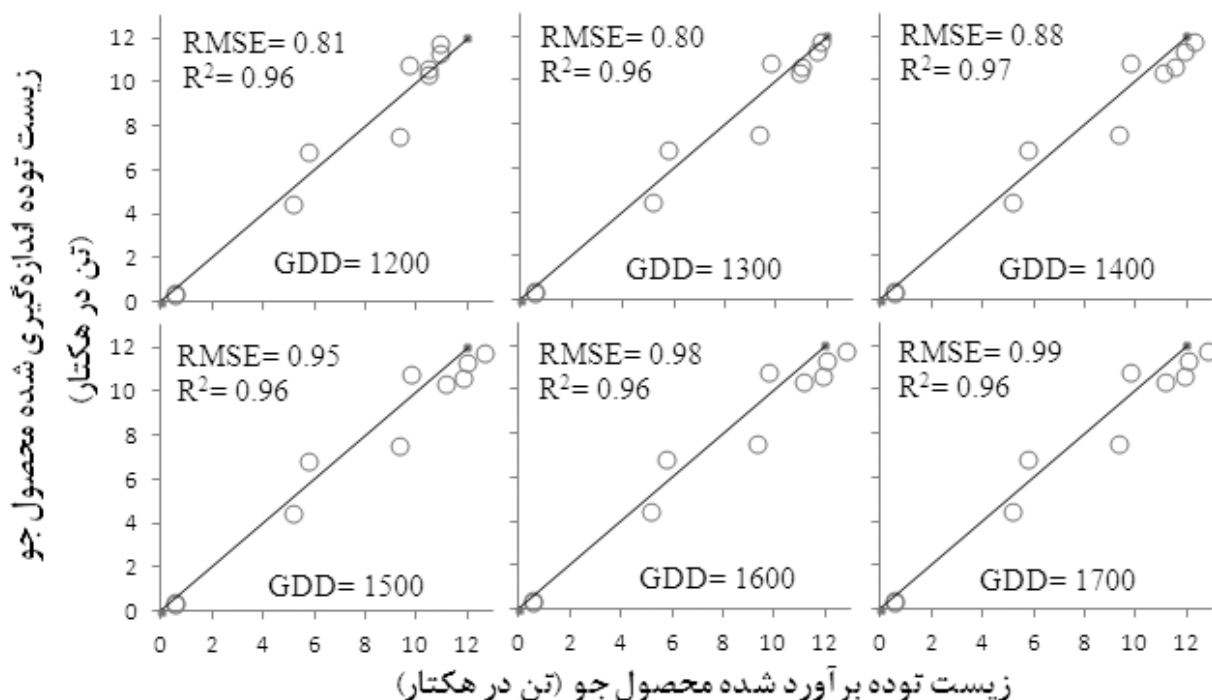
جدول ۷- تجزیه واریانس عملکرد دانه جو

F _t		F _s	میانگین مربعات	مجموع مربعات	درجه آزادی	منبع تغییر
۱٪	۵٪					
۱۸	۶/۹۴	۰/۱۲ ^{ns}	۰/۰۰۸۶۴	۰/۰۱۷۲۷	۲	بلوک
۱۸	۶/۹۴	۳۸/۰۸**	۲/۷۷۵۳۱	۵/۵۵۰۶۳	۲	تیمار
			۰/۰۷۲۸۹	۰/۲۹۱۵۶	۴	خطای آزمایشی
				۵/۸۵۹۴۶	۸	کل

ns غیر معنی دار ** معنی دار در سطح ۱ درصد * معنی دار در سطح ۵ درصد

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، علی‌رغم تغییرات درجه روزرشد از ۱۲۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه (۴۰ درصد تغییرات درجه روزرشد)، ضریب تعیین تقریباً ثابت مانده است و نشان می‌دهد که تغییرات عملکرد محصول تا حدود ۹۶ درصد با استفاده مدل آکواکراپ قابل پیش‌بینی است. جذر میانگین مربع خطا بین ۰/۸ تا ۰/۹۹ تن در هکتار تغییر می‌کند و کم‌ترین آن بین ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه می‌باشد. از این‌رو به روش سعی و خطا و تغییر درجه روزرشد از ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه روز، بهترین مقدار درجه روزرشد برابر ۱۲۶۰ درجه به دست آمد که در آن جذر میانگین مربع خطا ۰/۷۸ تن در هکتار برآورد شد.

مدل آکواکراپ در دو مرحله برای دو پارامتر درجه روزرشد از کاشت بذر تا شروع به پیری و پارامتر ضریب بهره‌وری نرمال شده مورد واسنجی قرار گرفت. در مرحله اول واسنجی، ضریب بهره‌وری نرمال شده برابر ۱۴ گرم بر مترمربع بر روز در نظر گرفته شد و مدل برای داده‌های دو تیمار زودهنگام و تیمار به‌موقع با مقادیر مختلف از ۱۲۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه روز از کاشت تا رسیدن محصول اجرا شد. نتایج مدل متناظر با روزهای اندازه‌گیری شده در دو تیمار فوق به‌عنوان داده‌های برآورد شده در نظر گرفته شد. شکل ۳ پراکنش نتایج عملکرد واقعی و برآورد شده برای مقادیر مختلف درجه روز نشان می‌دهد.



شکل ۳- پراکنش نتایج اندازه‌گیری و برآورد شده زیست‌توده محصول جو برای مقادیر مختلف درجه روز از کاشت تا رسیدن جو (۱۲۰۰ تا ۱۷۰۰)

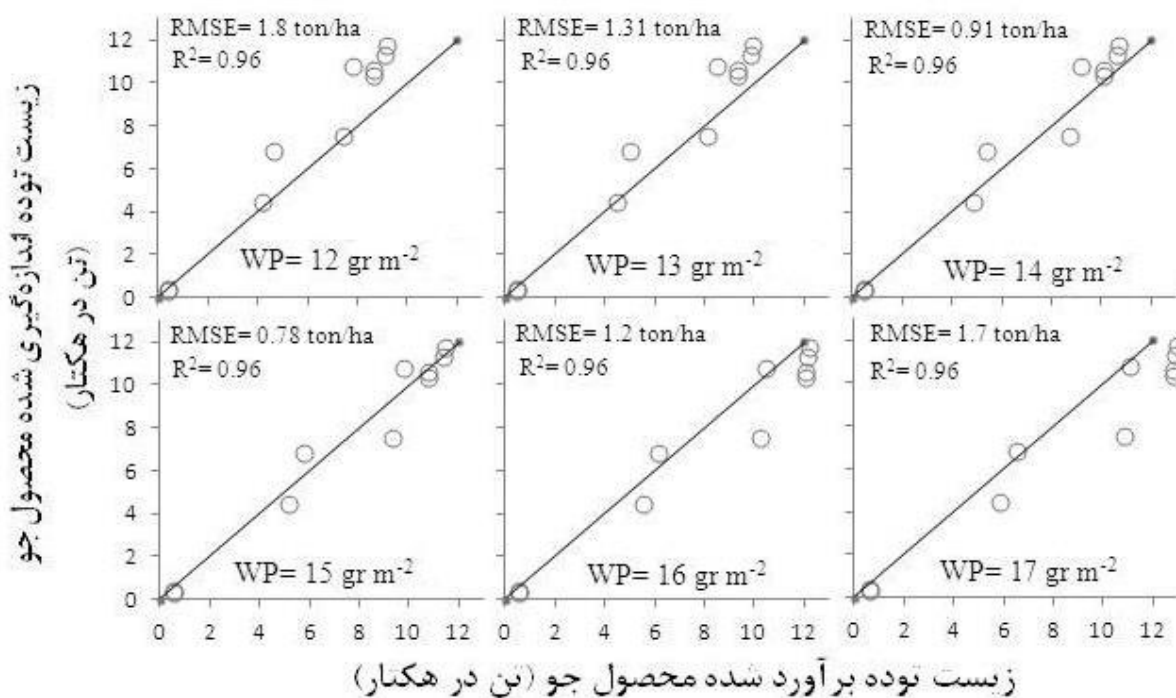
کمترین خطا بین دو ضریب بهره‌وری ۱۴ و ۱۵ گرم در مترمربع در روز به دست می‌آید. شکل ۵ اثرات تغییر ضریب بهره‌وری بر روی خطای مدل نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، بهترین ضریب بهره‌وری آب نرمال شده برابر با ۱۴/۸ گرم در مترمربع به دست آمده است.

مدل آکواکراپ با مقادیر واسنجی شده پارامترهای درجه روز از کاشت تا پیری برابر با ۱۲۶۰ درجه روزرشد و ضریب بهره‌وری نرمال شده برابر با ۱۴/۸ گرم بر مترمربع در روز برای داده‌های صحت سنجی (تیمار دیرهنگام) اجرا شد. شکل ۶، پراکنش نتایج اندازه‌گیری و برآورد شده زیست‌توده محصول جو را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود، به‌غیر از یکی از داده‌ها که

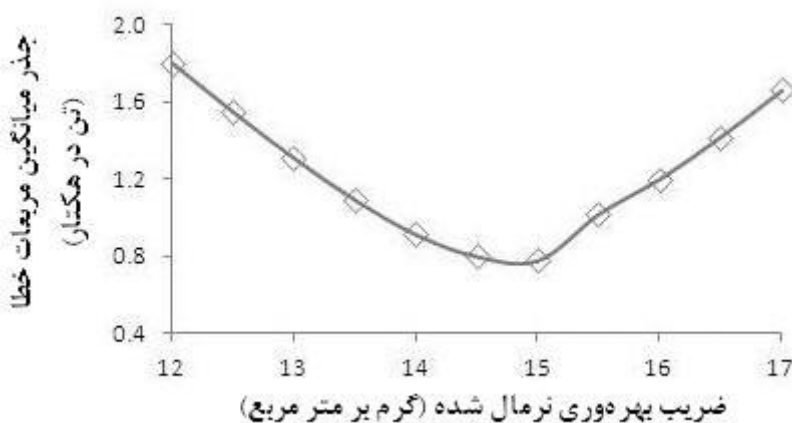
در مرحله دوم واسنجی، مقادیر مختلف ضریب بهره‌وری نرمال شده از ۱۲ تا ۱۷ گرم بر مترمربع در روز برای داده‌های دو تیمار زودهنگام و تیمار به‌موقع اجرا شد و در تمامی این اجراها، مقدار درجه روز از کاشت تا رسیدن محصول برابر با مقدار واسنجی شده آن در مرحله اول (۱۲۶۰ درجه) بود. پراکنش نتایج عملکرد واقعی و برآورد شده برای مقادیر مختلف ضریب بهره‌وری نرمال شده در شکل ۴ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، مقدار ضریب تعیین مشابه با مرحله اول واسنجی تغییری نکرده و برابر با ۰/۹۶ برآورد شده است. تغییرات جذر میانگین مربع خطا بین ۰/۷۸ تا ۱/۸ تن در هکتار است و نشان می‌دهد که مدل نسبت به این پارامتر حساسیت بیشتری دارد و

توجه به میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده (۶/۰۲ تن در هکتار) معادل ۱۰ درصد است. میانگین خطای اریب ۰/۴۷ تن در هکتار تعیین شده و نشان می‌دهد عملکرد محصول خشک به‌طور متوسط حدود ۷/۸ درصد در مدل آکواکراپ بیشتر از مقادیر واقعی برآورد می‌شود.

مربوط به ۹۶ روز پس از کاشت است، بقیه داده‌ها در فاصله نزدیکی نسبت به خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند. ضریب تعیین داده‌ها حدود ۰/۹۹ برآورد شده که نشان می‌دهد که مدل آکواکراپ در شرایط آبیاری کامل و بدون تنش آبی تا حدود ۹۹ درصد تغییرات عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند. جذر میانگین مربع خطا حدود ۰/۵۹ تن در هکتار برآورد شده است که با



شکل ۴- پراکنش نتایج اندازه‌گیری و برآورد شده زیست‌توده محصول جو برای مقادیر مختلف ضریب بهره‌وری نرمال شده از ۱۲ تا ۱۷ گرم بر مترمربع



شکل ۵- اثر تغییرات ضریب بهره‌وری نرمال شده بر روی خطای برآورد عملکرد محصول جو

تغییرات زمانی عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای داده‌های صحت سنجی در شکل ۷ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، عملکرد شبیه‌سازی شده محصول به‌جز اوایل دوره رویش، به داده‌های اندازه‌گیری شده نزدیک است.

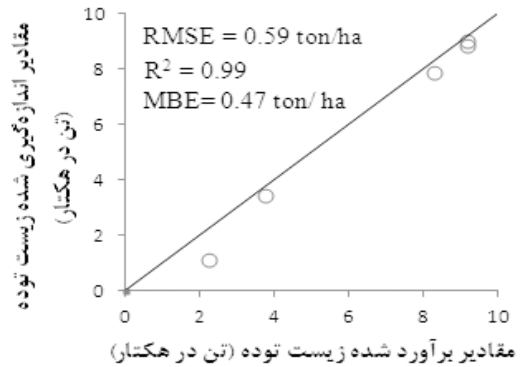
مدل آکواکراپ برای محصول جو در کشور اتیوپی مورد ارزیابی قرار گرفت (Araya et al., 2010) و جذر میانگین مربع خطا برای برآورد زیست‌توده بین ۰/۳۶ تا ۰/۹۰ تن در هکتار برآورد شد که با نتایج این پژوهش (۰/۵۹ تن در هکتار) مغایرتی نشان نمی‌دهد.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش مدل آکواکراپ برای دو متغیر درجه روزرشد از شروع کاشت تا رسیدن محصول و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای محصول جو واسنجی شد. برای تولید داده‌های لازم برای واسنجی و صحت سنجی، سه تیمار تقویم زراعی در مزرعه پردیس ابوریحان در یک فصل رشد اجرا شد. زیست‌توده محصول در طول و انتهای دوره رشد اندازه‌گیری و به‌عنوان داده‌های مشاهداتی استفاده شدند. نتایج آزمون آماری نشان داد، عملکرد زیست‌توده در تیمارهای تقویم آبیاری تفاوت معنی‌دار دارند. لذا داده‌های مشاهداتی برای واسنجی و صحت سنجی مدل آکواکراپ قابل‌استفاده بودند. دو متغیر GDD و BWP با استفاده از داده‌های واسنجی به ترتیب ۱۲۶۰ درجه روز و ۱۴/۸ گرم بر مترمربع به دست آمد. اجرای مدل با داده‌های صحت سنجی نشان داد که مدل با دقت مناسبی عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند. برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود، در سایر مناطق ایران نیز دو متغیر فوق برای این محصول و سایر محصولات واسنجی و نتایج مقایسه شوند.

REFERENCES

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome
- Alizadeh, H.A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani, H., Eetedali, H.R. and Janbaz, H.R. (2010). Evaluation of AquaCrop Model on Wheat Deficit Irrigation in Karaj area. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 4(2), 273-283. (In Farsi)
- Amiritabar, R., Rahimikhoob, A., Behbahani, M. R. (2014). Comparative study of temperature parameters and reference evapotranspiration at two weather stations located within the uncultivated and well-watered area- Case study in arid region of southeast of Tehran. *J. of Water and Soil Conservation*, 21(1), 253-270.
- 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 Farsi)
- Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A., Dejene, T. (2010). Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficit and irrigated barley. *Agricultural Water Management*, 97, 1838-1846.
- Emamifar, S., Rahimikhoob, A. and Noroozi, A. A. (2014). An Evaluation of M5 Model Tree vs. Artificial Neural Network for Estimating Mean Air Temperature as Based on Land Surface Temperature Data by MODIS-Terra Sensor. *Iranian, J. Soil and Water Research*, 45(4), 423-433.
- Farahani, H. J., Izzi, G., and Oweis, T.Y. (2009). Parameterization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy journal*, 101(3), 469-476.
- Geerts, S and Raes, D. (2009). Deficit irrigation as on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. *Agricultural Water Management*, 96, 1275-1284.
- Hsiao T.C., Steduto P., Raes D. & Fereres E. (2009) AquaCrop: the FAO crop water model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agricultural Journal*, 101, 448-459.
- Haydarinia, M., Naseri, A. A., and Broomabd-Nasab, S. (2012). Investigate the possibility of application of AquaCrop model for irrigation scheduling of sunflower in Ahwaz. *Journal of Water Resources*, 5(1), 39-41. (In Farsi)
- Heng, L.k., Hsiao, T.C., Evett, S., Howell, T and Steduto, P. (2009). Validating the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488-498.
- Iqbal, M.A., Shen, Y., Stricevic, R., Pei, H., Sun, H., Amiri, E., Penas, A. and Rio, S. (2014). Evaluation of the FAO AquaCrop model for winter wheat on the North China Plain under deficit irrigation from field experiment to regional yield simulation. *Agricultural Water Management*. 135, 61-72.
- Kim, D. and Kaluarachchi, J. (2015). Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. *Agricultural Water Management*, 149, 143-155.



شکل ۶- پراکنش نتایج اندازه‌گیری و برآورد شده عملکرد محصول جو برای داده‌های صحت سنجی



شکل ۷- تغییرات زمانی عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای داده‌های صحت سنجی

- Mabhaudhi, T., Modi, A. T. and Beletse, Y. G. (2014). Parameterisation and evaluation of the FAO-AquaCrop model for a South African taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) landrace. *Agricultural and Forest Meteorology*, 192–193, 132–139.
- Liu, J., Wiberg, D., Zehnder, A. and Yang, H. (2007). Modeling the role of irrigation in winter wheat yield, crop water productivity and production in China. *Irrigation Science*, 26, 21–23.
- Nyakudya, I. W. and Stroosnijder, L. (2014). Effect of rooting depth, plant density and planting date on maize (*Zea mays* L.) yield and water use efficiency in semi-arid Zimbabwe: Modelling with AquaCrop. *Agricultural Water Management*, 146, 280–296.
- Patrignani, A. and Ochsner, T.E. (2015). Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal*, 107(6), 2312–2320.
- Pereira, L.S., Oweis, T. and Zairi, A. (2002). Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management*, 57, 175–206.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. (2009). AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101, 438–447.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., and Fereres, E. (2009). AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: Reference Manual Annexes.
- Rahimikhoob, H., Sotoodehnia, A., and Massahbavani, A. R. (2014). Calibration and Evaluation of AquaCrop for Maize in Qazvin Region. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8(1), 108–115.
- 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.
- Soddu, A., Deidda, R., Marrocu, M., Meloni, R., Paniconi, C., Ludwig, R., Sodde, M., Mascaro, G., Perra, E. (2013). Climate variability and durum wheat adaptation using the AquaCrop model in southern Sardinia. *Procedia Environmental Sciences*, 19, 830–835.
- Todorovic, M., Albrizio, R., Zivotic, L., Saab, M.T.A., Stockle, C. and Steduto, P. (2009). Assessment of Aqua Crop, CropSyst, and WOFOST models in the simulation of sunflower growth under different water regimes. *Journal of Agronomy*, 101 (3), 509–521.
- Vanuytrecht, E., Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L. K. and Vila, M. G. (2014). AquaCrop: FAO's crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling & Software*, 62, 351–360.