تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۸، شمارهٔ ۵، بهمن و اسفند ۱۳۹۶ (ص ۱۰۷۱-۱۰۶۳) DOI: 10.22059/ijswr.2017.224807.667610

واسنجی پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده مدل آکواکراپ برای محصول ذرت در منطقه پاکدشت

محمدعلی عموپور[۱]، علی رحیمی خوب[۲*]، مریم وراوی پور[۳]

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

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

۳. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان– دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۱- تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۱۲/۲۴- تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱/۲۰)

چکیده

پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده یکی از ورودی‌های مدل آکواکراپ است که بر اساس آن عملکرد زیست‌توده محصول در مقیاس روزانه شبیه‌سازی می‌شود. مقدار پیش‌فرض مدل برای پارامتر گیاه ذرت ۳۳/۷ گرم بر مترمربع می‌باشد. مسئله این پژوهش آن است که تاکنون مقدار بهره‌وری آب نرمال شده برای گیاه ذرت رقم سینگل کراس- ۷۰۴ تعیین نشده است. محل آزمایش مزرعه کشاورزی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران واقع در منطقه پاکدشت بود. آزمایش‌ها در دو سال متوالی ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ در سه کرت به مساحت هر یک ۲۵ مترمربع با آبیاری کامل انجام گرفت. عملکرد زیست‌توده ذرت در شش و هفت نوبت در طول دوره رشد به‌ترتیب در سال اول و دوم اندازه‌گیری شد. داده‌های اندازه‌گیری شده در سال اول و دوم به‌ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شدند. واسنجی به دو روش سعی و خطا و روش Steduto *et al.* (2009) انجام گرفت. پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده با استفاده از روش اخیر با اندکی دقت بیشتر، واسنجی شد و مقدار آن برابر ۳۲/۳ گرم بر مترمربع و در روش سعی و خطا برابر ۳۱/۳ گرم بر مترمربع تعیین شد. ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب بین داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده با استفاده از مقدار واسنجی شده فوق به‌ترتیب ۰/۷۳ و ۰/۲۵ تن در هکتار برآورد شد. نتایج این پژوهش نشان داد، مقدار واسنجی شده حدود ۱/۴ گرم بر مترمربع از مقدار پیش‌فرض مدل کمتر بوده و با دقت بهتری نسبت به مقدار پیش‌فرض، عملکرد زیست‌توده را شبیه‌سازی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: عملکرد محصول، آبیاری کامل، شبیه‌سازی، منطقه خشک

مقدمه

بیش از ۸۰ درصد از مساحت ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته و این کشور یکی از خشک‌ترین مناطق جهان است. متوسط بارندگی سالانه کشور حدود ۲۵۰ میلی‌متر (یک‌سوم متوسط جهان) بوده که حدود ۷۰ درصد آن به دلیل پتانسیل بالای تبخیر بدون استفاده از دسترس خارج می‌شود. بخش کشاورزی با مصرف بیش از ۹۰ درصد منابع آب، بزرگ‌ترین و مهم‌ترین مصرف‌کننده آب در کشور به شمار می‌رود. کمبود آب یکی از محدودیت‌های اساسی تولید محصولات کشاورزی است و مدیریت مصرف در بخش کشاورزی با توجه به افزایش روزافزون جمعیت و محدودیت کمی منابع آب، بیش از پیش ضروری می‌نماید. امروزه کم‌آبیاری یکی از راه‌کارهای مدیریت مصرف آب در کشاورزی است. با اعمال کم‌آبیاری، مقداری کمتر از آب مورد نیاز در طی دوره رشد به گیاه داده می‌شود و لذا موجب تنش به گیاه شده و محصول کمتری برداشت خواهد شد. ولی در سطحی از کم‌آبیاری، بیشترین محصول به ازای آب مصرفی برداشت می‌شود و بهره‌وری آب در این سطح بیشترین مقدار را دارد (Blum, 2009; Geerts and Raes, 2009). برای تعیین بهترین سطح کم‌آبیاری نیاز به تابع پاسخ گیاه به آب مصرفی است. پیچیدگی پاسخ گیاه به کمبود آب منجر به این شد که سازمان فائو یک معادله تجربی برای پیش‌بینی عملکرد گیاه به آب مصرفی ارائه دهد (Steduto *et al.*, 2009). این معادله در نشریه آبیاری و زهکشی شماره ۳۳ سازمان فائو (Doorenbos and Kassam, 1979) منتشر شد. معادله ارائه شده در این نشریه برای چند دهه توسط مهندسان و طراحان به منظور برآورد عملکرد محصول در رابطه با اثر آب مورد استفاده قرار گرفته است (Steduto *et al.*, 2009). این معادله اثر تنش آبی بر عملکرد محصول را بر اساس نسبت تبخیر- تعرق واقعی به پتانسیل در پایان فصل رشد تعیین می‌نماید، ولی در واقع تنش آبی در طی مراحل مختلف رشد گیاه

* نویسنده مسئول : akhob@ut.ac.ir

اثر خود را می‌گذارد و لذا نیاز به روابطی است که اثر تنش را به‌صورت روزانه تعیین کرده و عملکرد نهایی محصول را به‌صورت تجمعی از زمان کاشت تا زمان برداشت محاسبه نماید. پیشرفت تئوری روابط آب و گیاه، همراه با تقاضا برای بهبود بهره‌وری آب به‌عنوان راه‌کار مهم برای غلبه بر کمبود آب، سازمان فائو را بر آن داشت که نشریه شماره ۳۳ بازنگری کند و مدل آکواکراپ را عرضه نماید. بر خلاف بسیاری از مدل‌ها، این مدل ساده بوده و قابل فهم برای کاربران غیر پژوهشگر است (Araya *et al*., 2010). علاوه بر این، مدل از دقت کافی برخوردار بوده و به داده‌های ورودی کمتری نسبت به سایر مدل‌ها مثل مدل‌های کراپ‌سیست[1] و وفوست[2] نیاز دارد (Steduto *et al*.,2009; Hsiao *et al*., 2009).

پژوهش‌های زیادی در رابطه با دقت مدل آکواکراپ برای محصولات گوناگون 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. Todorovic *et al*., (2009) مدل آکواکراپ را با مدل‌های کراپ‌سیست و وفوست برای شبیه‌سازی محصول آفتاب‌گردان در شرایط کم‌آبیاری در جنوب ایتالیا مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که به دلیل سادگی و نیاز به داده‌های کمتر، استفاده از مدل آکواکراپ ترجیح دارد. 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 کم‌آبیاری (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 پیش‌بینی شده، به‌استثنای کم‌آبیاری‌های 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 صحت‌سنجی کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد، عملکرد زیست‌توده در شرایط مختلف کم‌آبیاری 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 تعیین ۰/۹۹ و ریشه میانگین مربعات 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 کم‌آبیاری نتایج قابل قبولی ارائه داد (Alizadeh *et al*., 2010; Babazadeh and Sarai Tabrizi, 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.

بهره‌وری آب نرمال شده[3] (WP^*) یکی از پارامترهای مهم مدل آکواکراپ برای محاسبه زیست‌توده و عملکرد محصول است (Farahani *et al*.2009; Steduto *et al*., 2007, 2009). فرض شده که این پارامتر در مدل آکواکراپ برای گیاه و اقلیم مورد نظر ثابت است (Steduto *et al*., 2007, 2009). مقدار این پارامتر برای گیاهان کربن ۳ (C3) مثل جو بین ۱۳ تا ۱۵ گرم بر مترمربع در روز و برای گیاهان کربن ۴ (C4) مثل سورگوم بین ۲۶ تا ۳۵ گرم بر مترمربع در روز تغییر می‌کند (Steduto *et al*., 2007, 2009). مقدار توصیه شده WP^* برای گیاه ذرت در پیوست راهنمای مدل آکواکراپ ۳۳/۷ گرم بر مترمربع است (Raes *et al*., 2009). Hsiao *et al*. (2009) توصیه کردند برخی پارامترهای ثابت مدل آکواکراپ مثل WP^* نیاز به تصحیح دارند. این پارامتر برای محصول جو در منطقه پاکدشت ۱۴/۸ گرم بر مترمربع در روز به‌دست آمد (Karimi Avargani *et al*., 2016). تاکنون پارامتر WP^* برای ذرت علوفه‌ای در ایران مورد واسنجی قرار نگرفته است. بنابراین هدف از انجام این پژوهش واسنجی

1. CropSyst
2. WOFOST
3. Normalized Water Productivity

این پارامتر برای ذرت علوفه‌ای رقم سینگل کراس ۷۰۴ است که در منطقه پاکدشت کشت می‌شود.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل آزمایش

این پژوهش در منطقه پاکدشت واقع در جنوب شرقی شهر تهران انجام شد. پاکدشت یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی استان تهران 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 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- تعرق سالانه ۱۳۹۰ میلی‌متر است.

این پژوهش در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در منطقه پاکدشت بر روی گیاه ذرت رقم سینگل کراس- ۷۰۴ در دو سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ 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. مزرعه پردیس ابوریحان مجهز به یک ایستگاه هواشناسی بوده که در آن پارامترهای روزانه هواشناسی شامل دمای بیشینه و کمینه هوا، رطوبت هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش، داده‌های این ایستگاه برای تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع (ET_o) با استفاده از روش پنمن مانتیث فائو (Allen *et al.*, 1998) مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک

ضخامت لایه (m)	بافت خاک	رطوبت ظرفیت مزرعه (cm^3/cm^3)	رطوبت نقطه پژمردگی (cm^3/cm^3)	جرم مخصوص ظاهری خاک خشک (gr/cm^3)	رطوبت اشباع (درصد)	EC (ds/m)
۰/۲	Silt loam	۲۰/۱۵	۱۰/۰۱	۱/۳۶	۴۴/۶۴	۳/۵۵
۰/۲	Sandy loam	۲۰/۴۵	۱۰/۲۲	۱/۲۳	۴۳/۵۸	۴/۶۹
۰/۲	Sandy loam	۲۱/۴۵	۱۰/۶۵	۱/۳۲	۴۰/۸۶	۴/۰۰۶
۰/۶	Sandy loam	۱۸/۸۲	۹/۶۰	۱/۳۳	۴۸/۵۷	۱/۵۵

جدول ۲. خصوصیات شیمیایی آب

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

آزمایش مزرعه‌ای

به منظور انجام این تحقیق، گیاه ذرت (رقم سینگل کراس ۷۰۴) در سه کرت به مساحت هر کدام ۲۵ مترمربع با آبیاری کامل (بدون تنش آبی) در دو سال متوالی ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ کشت شد. ابعاد کرت‌ها ۵ متر در ۵ متر بود که در داخل هر یک، جویچه‌ها به فواصل ۷۵ سانتی‌متر حفر شدند و فاصله بین هر گیاه در ردیف‌های کشت ۱۸ سانتی‌متر بود. به‌منظور تعیین زمان مناسب آبیاری تغییرات رطوبت خاک در طول فصل کشت با استفاده از روش انعکاس سنجی زمانی[1] TDR (مدل دستگاه PR2, Delta-T Devices Ltd, UK) **به**طور روزانه اندازه‌گیری شد. بعد از آماده‌سازی زمین، لوله مخصوص این دستگاه در هر یک از کرت‌های آبیاری نصب و رطوبت خاک در لایه‌های مختلف خاک به‌طور روزانه اندازه‌گیری شد. زمان آبیاری به‌صورتی تعیین گردید که کمبود رطوبت خاک تا عمق توسعه ریشه بیشتر از ۵۰ درصد کل رطوبت خاک نگردد. کل رطوبت قابل استفاده در خاک از رابطه زیر محاسبه شد:

$$TAW = \left(\sum_{i-1}^{n}(\theta_{fci} - \theta_{wpi}) \times D_i\right) \times 1000 \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

در رابطه فوق، TAW کل رطوبت خاک تا عمق توسعه ریشه بر حسب میلی‌متر، n تعداد لایه خاک تا عمق توسعه ریشه، θ_{fci} رطوبت حجمی ظرفیت مزرعه در لایه i ام، θ_{wpi} رطوبت حجمی نقطه پژمردگی در لایه i ام و D_i ضخامت خاک در لایه i ام بر حسب متر. در این تحقیق، عمق ریشه در مرحله اول رشد به میزان ۰/۲ متر و در مرحله میانی و رسیدگی ۱/۲ متر در نظر گرفته شد و برای مرحله توسعه، به‌صورت درون‌یابی

1. Time-Domain Reflectometry

خطی بین رشد اولیه و رشد کامل محاسبه گردید. حجم آب آبیاری بر اساس کمبود رطوبت خاک، عمق توسعه ریشه و مساحت کرت تعیین و آب لازم با استفاده از کنتور حجمی وارد کرت شد. به علت کوچک و محصور بودن کرت‌های آبیاری، تلفات آبیاری ناچیز و لذا آب ذخیره شده در خاک، صرف تبخیر- تعرق گیاه (ET) شده است.

نیتروژن مورد نیاز با استفاده از کود اوره تأمین شد و مقدار و زمان کوددهی به‌قدر کفایت به مقدار ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار به کرت‌ها داده شد. عملیات کوددهی به‌صورت سرک و طی سه نوبت در زمان‌های ۲۲، ۵۲ و ۶۵ روز بعد از کشت در سال زراعی ۱۳۹۴ و ۲۸، ۴۰ و ۶۶ روز بعد از کشت در سال زراعی ۱۳۹۵ انجام شد. محصول ذرت در سال اول ۱۱۹ روز پس از تاریخ کاشت (۵ مهر ماه سال ۱۳۹۴) و در سال دوم ۱۱۵ روز پس از تاریخ کاشت (۱۵ شهریور ماه سال ۱۳۹۵) برداشت شد.

نمونه‌های گیاهی برای اندازه‌گیری عملکرد ماده خشک (زیست‌توده)، در فاصله کاشت بذر تا انتهای فصل کشت در سال اول و دوم به‌ترتیب طی شش و هفت نوبت برداشت شدند. شش گیاه در هر مرحله نمونه‌برداری از ردیف‌های میانی هر کرت انتخاب و از سطح خاک بریده شده و بعد از انتقال به آزمایشگاه در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. فرآیند خشک شدن در آون تا ثابت شدن وزن نمونه‌ها ادامه داشت.

مدل اکواکراپ

در این پژوهش از نسخه ۴ مدل اکواکراپ استفاده شد. در این مدل، مقدار عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت از رابطه (۲) حساب می‌شود (Steduto *et al*., 2009):

$$B = WP^{*}\left(\sum \frac{T_{r,i}}{ET_{o,i}}\right) \quad \text{(رابطه ۲)}$$

در رابطه فوق، B عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت (گرم بر مترمربع)، WP^{*} بهره‌وری آب نرمال شده (گرم بر مترمربع)، $T_{r,i}$ تعرق تجمعی گیاه تا i امین روز پس از کاشت (میلی‌متر) و $ET_{o,i}$ تبخیر و تعرق مرجع تا i امین روز پس از کاشت (میلی‌متر) می‌باشد. مقدار پارامتر WP^{*} برابر ۳۳/۷ گرم بر مترمربع برای ذرت توصیه شده است (Raes *et al*., 2009) که در این پژوهش مورد واسنجی قرار گرفت. تعرق گیاه (T_r) در مدل آکواکراپ از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$T_r = K_s \times K_C \times CC \times ET_o \quad \text{(رابطه ۳)}$$

در رابطه فوق، K_s ضریب تنش آبی، K_C ضریب گیاهی، CC ضریب پوشش گیاهی و ET_o تبخیر و تعرق مرجع (mm) می‌باشند. در این پژوهش، برنامه آبیاری به‌صورتی بوده که گیاه تحت تنش آبی قرار نگیرد، لذا ضریب K_s برابر با 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):

$$CC = CC_o \times e^{(CGC \times t)} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

$$CC = CC_x - [CC_x - CC_o \times e^{(-CGC \times t)}] \quad \text{(رابطه ۵)}$$

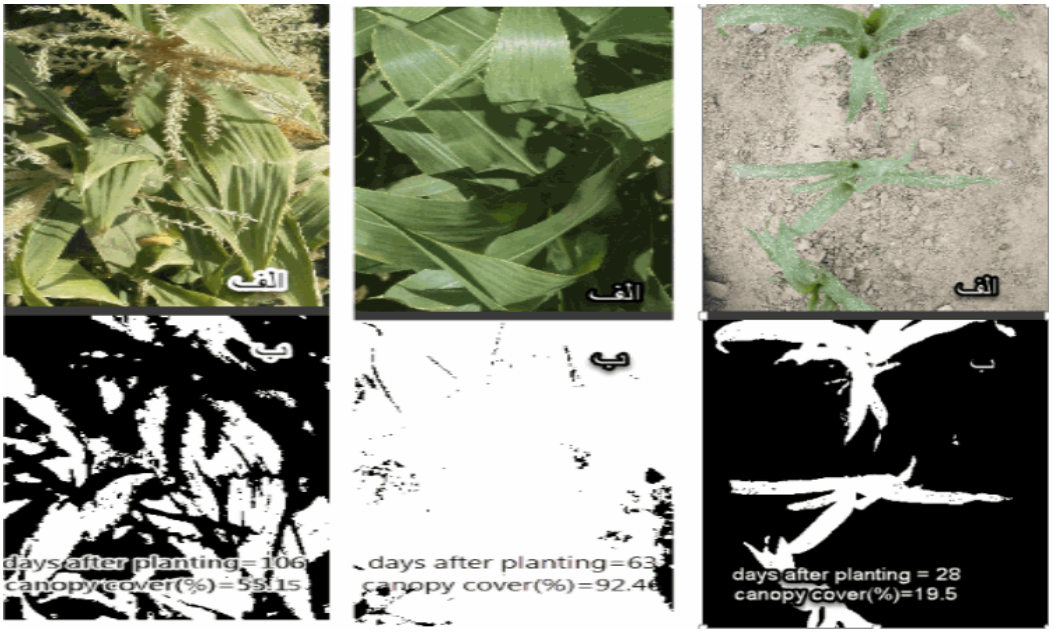
معادله (۴) برای دوره زمانی کاشت بذر تا نیمه مرحله توسعه استفاده می‌شود و معادله (۵) برای دوره زمانی از نیمه مرحله توسعه تا آخر مرحله توسعه است. در معادلات فوق، CC پوشش گیاهی در t روز پس از کاشت، CC_x حداکثر پوشش گیاهی، CC_o پوشش اولیه گیاه در زمان t=0 و CGC نرخ رشد پوشش گیاه در روز است. پوشش گیاه در طول دوره مرحله آخر که در آن شیب پوشش گیاهی به‌صورت نزولی است، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$CC = CC_x \times \{1 - 0.05 \times [e^{\left(\frac{CDC}{CC_x} \times t\right)} - 1]\} \quad \text{(رابطه ۶)}$$

در روابط فوق، CDC نرخ کاهش پوشش گیاهی و t زمان بر حسب روز که از مرحله چهارم رویش (پیری) شروع می‌شود. داده‌های گیاهی لازم برای اجرای مدل AquaCrop شامل درصد پوشش گیاهی در شروع مرحله جوانه‌زنی (CC_o)، نرخ رشد پوشش گیاهی در مرحله توسعه (CGC)، حداکثر پوشش گیاه (CC_x) و نرخ کاهش پوشش گیاه در مرحله پیری (CDC) می‌باشند که مقدار پوشش گیاه در شروع مرحله سبز شدن بر اساس راهنمای مدل ۰/۴۸ درصد استفاده گردید. برای تعیین سه پارامتر دیگر، درصد پوشش گیاه در طول دوره رشد با استفاده از روش Patrignani and Ochsner (2015) اندازه‌گیری شد. با استفاده از این روش، از سطح کرت عکس گرفته شد و با انتقال عکس به نرم‌افزار کانوپی[1]، درصد پوشش گیاه محاسبه گردید. 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 کانوپی در شکل (۱) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، درصد پوشش گیاهی زمین در روزهای ۲۸، ۶۳ و ۱۰۶ پس از کاشت به‌ترتیب ۱۹/۵، ۹۲/۵ و ۵۵/۲ درصد اندازه‌گیری

1. Canopeo

شده است. طول دوره‌های مختلف رشد محصول ذرت همراه با عملیات کشاورزی و آبیاری یادداشت‌برداری و ثبت گردید. مجموعه پارامترهای اندازه‌گیری شده و مشاهده شده از مراحل مختلف رشد که به‌عنوان ورودی به مدل آکواکراپ وارد شدند در جدول (۳) ارائه شده است.



شکل ۱. تصاویر تاج‌پوشش ذرت در سه تاریخ مختلف، الف- تصویر برداشت شده توسط دوربین ب- تصاویر پردازش شده توسط نرم‌افزار کانوپی

جدول ۳. مقادیر پارامترهای ورودی به مدل AcuaCrop

پارامتر	واحد	سال ۱۳۹۴	سال ۱۳۹۵
زمان جوانه‌زنی	روز پس از کاشت	۱۰	۸
پوشش سطح اولیه (CC_o)	درصد	۰/۴۸	۰/۴۸
حداکثر پوشش گیاه (CC_x)	درصد	۹۳	۹۴
نرخ رشد پوشش گیاهی (CGC)	درصد بر روز	۱۵/۶	۱۴/۴
نرخ کاهش پوشش گیاه (CDC)	درصد بر روز	۱۰/۹	۱۴/۲
زمان رسیدن به حداکثر پوشش گیاه	روز پس از کاشت	۶۰	۶۲
زمان گلدهی	روز پس از کاشت	۶۳	۶۵
زمان رسیدگی کامل (برداشت محصول)	روز پس از کاشت	۱۱۹	۱۱۵

واسنجی و صحت‌سنجی بهره‌وری آب نرمال شده

در این پژوهش برای به‌دست آوردن پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده از داده‌های سال اول (۱۳۹۴) برای واسنجی و داده‌های سال دوم (۱۳۹۵) برای صحت‌سنجی استفاده شد. برای واسنجی از دو روش سعی و خطا و Steduto *et al*. (2009) استفاده شد و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. در روش سعی و خطا، مدل آکواکراپ با مقادیر مختلف بهره‌وری آب نرمال شده از ۲۸ تا ۳۷ گرم بر مترمربع اجرا شد و بهترین مقدار این پارامتر با رسم شکل و برآورد شاخص‌های آماری بین داده‌های شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده تعیین شد. در روش Steduto *et al*. (2009)، پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع ($\sum \frac{Tr}{ETo}$) و زیست‌توده تجمعی رسم شده و بهره‌وری آب نرمال شده برابر با ضریب بهترین خطی بود که از مبداء مختصات به نقاط برازش گذشته است.

به‌منظور انتخاب بهترین مقدار بهره‌وری آب نرمال شده، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین[1] (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا[2] (RMSE) و میانگین خطای اریب[3] (MBE) استفاده شده است. معادلات این شاخص‌ها به شرح زیر می‌باشند:

1 Determination Coefficient
2 Root Mean Square Error
3 Mean Bias Error

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

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

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)}{N}$$ (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 بیش‌برآورد و یا کم‌برآورد نشان می‌دهد. درصورتی‌که این شاخص مثبت باشد نشان می‌دهد که در مجموع نتایج مدل بیشتر از مقادیر واقعی است.

نتایج و بحث

نتایج عملکرد زیست‌توده اندازه‌گیری شده در طی دو سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ در جدول (۴) ارائه شده است. این نتایج به عنوان مقادیر اندازه‌گیری شده (O_i) استفاده شدند. ملاحظه می‌شود، عملکرد در سال دوم حدود دو تن در هکتار بیش از سال اول شده و علت آن افزایش دما در دوره قبل از گلدهی در این سال و در نتیجه تبخیر و تعرق بیشتر بوده است.

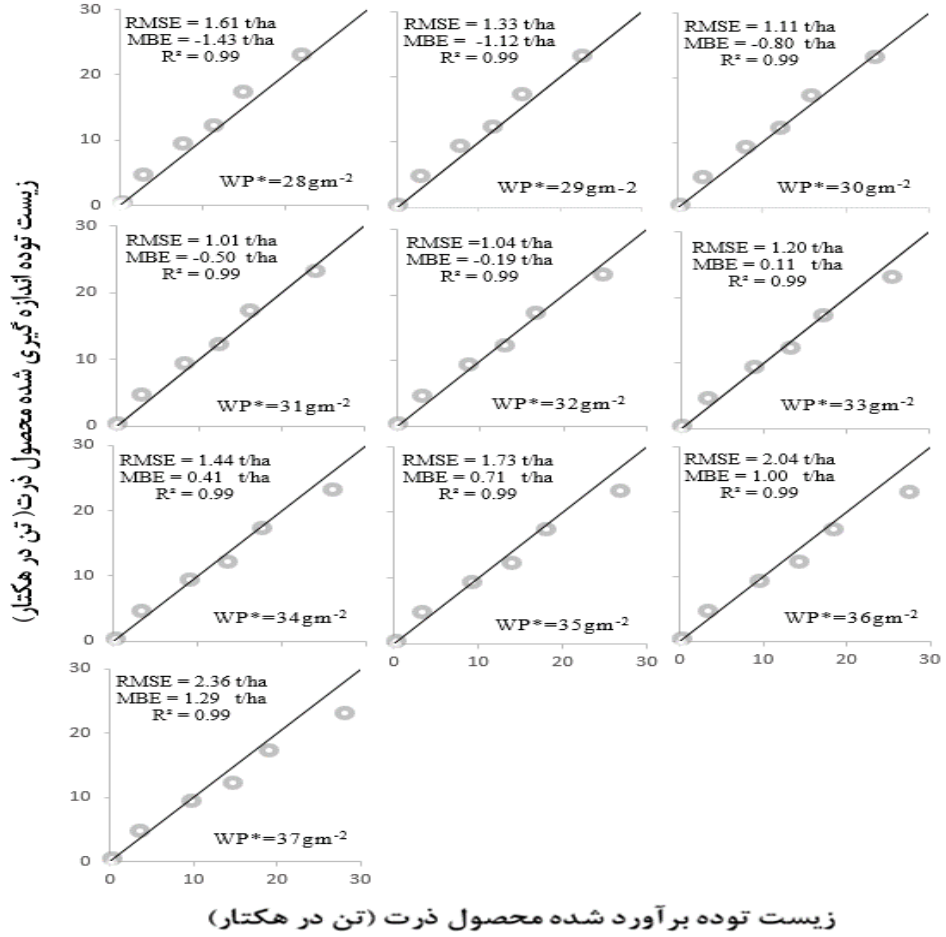
جدول ۴. نتایج اندازه‌گیری شده عملکرد زیست‌توده ذرت در دو سال ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵

سال ۱۳۹۴		*سال ۱۳۹۵*	
روز پس از کاشت	زیست‌توده (تن در هکتار)	روز پس از کاشت	زیست‌توده (تن در هکتار)
۲۶	۰/۴۲۵	۳۲	۰/۲۷۲
۴۵	۴/۷۴۳	۳۹	۰/۸۸۲
۶۲	۹/۳۹۶	۴۹	۳/۵۶۲
۷۵	۱۲/۲۹	۵۹	۶/۸۹۶
۸۷	۱۷/۳۳۸	۸۰	۱۴/۳۸۹
۱۱۹	۲۳/۱۸۲	۹۰	۱۷/۳۷۹
		۱۱۵	۲۵/۳۸۹

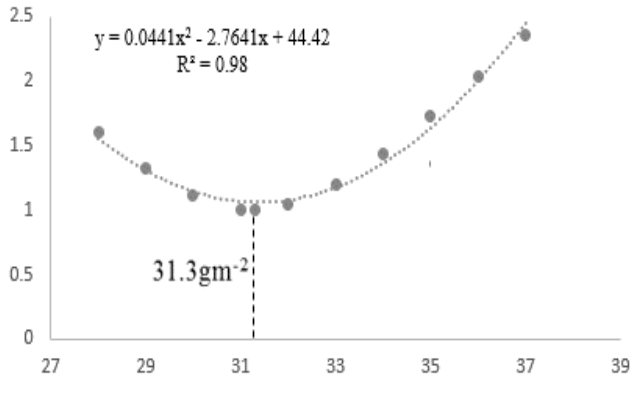
مقدار پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده برای گیاهان کربن ۴ بین ۲۶ تا ۳۵ گرم بر مترمربع تغییر می‌کند (Steduto *et al.*, 2007, 2009)، در این پژوهش برای واسنجی این پارامتر، مدل آکواکراپ برای مقادیر مختلف بهره‌وری آب نرمال شده از ۲۸ تا ۳۷ گرم بر مترمربع با استفاده از داده‌های سال ۱۳۹۴ اجرا شد. نتایج مدل (زیست‌توده شبیه‌سازی شده) برای روزهای پس از کاشت که مقادیر زیست‌توده آن اندازه‌گیری شده (ستون‌های اول و دوم جدول (۴)) از مدل آکواکراپ استخراج شدند و به‌عنوان مقادیر برآورد شده (P_i) مورد استفاده قرار گرفت. شاخص‌های آماری برای هر یک از مقادیر بهره‌وری آب نرمال (۲۸ تا ۳۷ گرم بر مترمربع) برآورد شد. شکل (۲) نشانگر پراکنش داده‌های اندازه‌گیری و شبیه‌سازی به‌همراه شاخص‌های آماری ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار بهره‌وری آب نرمال شده بر روی دقت نتایج مؤثر می‌باشد. میانگین خطای اریب با مقادیر بهره‌وری آب نرمال شده بین ۲۸ تا ۳۲ گرم بر مترمربع منفی برآورد شده که نشانگر این است که مدل در این دامنه کم‌برآورد است، ولی مدل برای مقادیر بهره‌وری آب نرمال شده بیش از ۳۲ گرم بر مترمربع بیش برآورد است. ضریب تبیین برای تمام مقادیر اجرا شده برابر ۰/۹۹ است که نشان می‌دهد تغییرات عملکرد زیست‌توده در شرایط آبیاری کامل تا ۹۹ درصد با استفاده از مدل آکواکراپ شبیه‌سازی می‌شود. بیشترین ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۲/۳۶ تن در هکتار با بهره‌وری آب نرمال شده ۳۷ گرم بر مترمربع و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۱/۰۱ تن در هکتار با بهره‌وری آب نرمال شده ۳۱ گرم بر مترمربع به‌دست آمده است.

برای یافتن بهره‌وری آب نرمال شده با کمترین خطا، پراکنش بهره‌وری آب نرمال شده و ریشه میانگین مربعات خطا ترسیم شد (شکل ۳). همان‌طور که ملاحظه می‌شود این پراکنش تابع یک معادله درجه ۲ با ضریب تبیین ۰/۹۸ می‌باشد و کمترین ریشه میانگین مربعات خطا برابر ۱/۰۰ تن بر هکتار با بهره‌وری آب نرمال شده ۳۱/۳ گرم بر مترمربع به‌دست آمد.

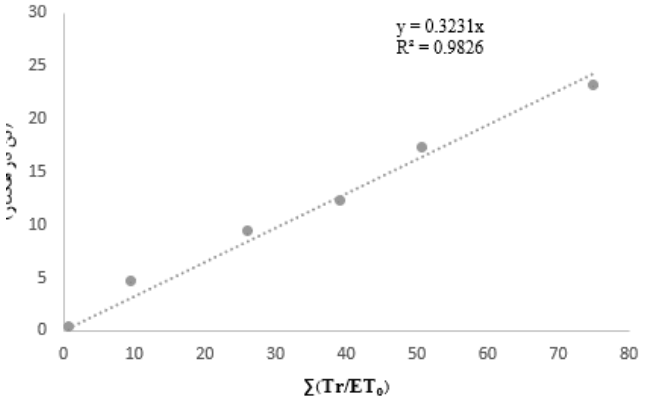
همان‌طور که در مواد و روش‌ها ذکر شد، برای تعیین پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده با استفاده از روش (Steduto *et al.* 2009)، پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع ($\sum\frac{Tr}{ETo}$) و زیست‌توده تجمعی رسم شده و این پارامتر برابر با ضریب بهترین خط برازش شده به نقاط است. لذا پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع و زیست‌توده تجمعی در شکل (۴) ارائه شده است. ضریب معادله خطی که از مبداء مختصات به این نقاط برازش شده برابر ۰/۳۲۳ تن در هکتار است و لذا بهره‌وری آب نرمال شده با استفاده از روش Steduto *et al.* (2009) برابر ۳۲/۳ گرم بر مترمربع است. بنابراین با توجه به نتایج فوق کمترین و بیشترین مقدار بهره‌وری نرمال شده از میان سه روش پیش‌فرض مدل، سعی و خطا و Steduto *et al.* (2009) به ترتیب مربوط به دو روش سعی و خطا و پیش‌فرض مدل می‌باشد.



شکل ۲. پراکنش نتایج زیست‌توده اندازه‌گیری شده و برآورد شده محصول ذرت برای مقادیر مختلف ضریب بهره‌وری آب نرمال شده از ۲۸ تا ۳۷ گرم بر مترمربع



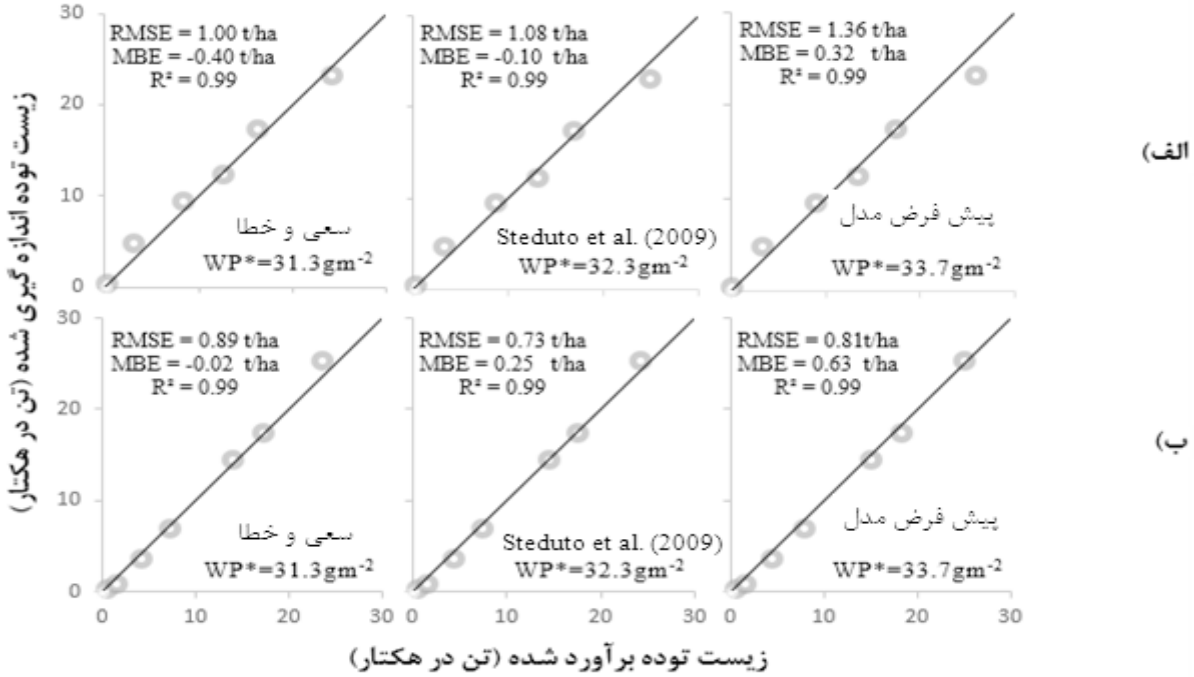
شکل ۳. اثر تغییرات ضریب بهره‌وری نرمال شده بر روی خطای برآورد عملکرد زیست‌توده ذرت



شکل ۴. رابطه بین عملکرد زیست‌توده و تعرق نرمال شده برای داده‌های واسنجی

مدل آکواکراپ با مقادیر واسنجی شده دو روش سعی و خطا و Steduto *et al.* (2009) و مقدار پیش‌فرض مدل با استفاده از داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی اجرا و پراکنش نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده به همراه شاخص‌های آماری در شکل (۵) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود، نقاط برای هر سه مقدار بهره‌وری آب نرمال شده و هر دو داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی، با دقت نسبتاً خوبی بر روی بهترین خط انطباق (۱:۱) قرار دارند و ضریب تبیین حدود ۰/۹۹ می‌باشد. برای داده‌های واسنجی کمترین دقت با مقدار پیش‌فرض مدل (WP^*=33.7 gr m^{-2}) اتفاق می‌افتد که ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب به‌ترتیب برابر ۱/۳۶ و ۰/۳۲ تن در هکتار است. بهترین دقت با بهره‌وری آب نرمال شده ۳۲/۳ گرم

بر مترمربع با استفاده از روش Steduto *et al*. (2009) به‌دست می‌آید که در آن ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطا به‌ترتیب برابر ۱/۰۸ و ۰/۱۰- تن در هکتار است. برای داده‌های واسنجی کمترین دقت با مقدار روش سعی و خطا (WP^{*}=31.37 $gr\ m^{-2}$) اتفاق می‌افتد که ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب به‌ترتیب برابر ۰/۸۹ و ۰/۰۲- تن در هکتار است. بهترین دقت با بهره‌وری آب نرمال شده ۳۲/۳ گرم بر مترمربع با استفاده از روش Steduto *et al*. (2009) به‌دست می‌آید که در آن ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب به‌ترتیب برابر ۰/۷۳ و ۰/۲۵ تن در هکتار است. لذا در مجموع بهترین روش برای تعیین واسنجی پارامتر بهره‌وری نرمال شده روش Steduto *et al*. (2009) می‌باشد که در آن مقدار این پارامتر ۳۲/۳ گرم بر مترمربع بدست آمده که از مقدار پیش‌فرض مدل ۱/۴ گرم بر مترمربع کمتر است.



شکل ۵. مقایسه نتایج مختلف پارامتر بهره‌وری نرمال شده برای داده‌های واسنجی و صحت سنجی: الف- واسنجی ب- صحت‌سنجی

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، بهره‌وری آب نرمال شده که یکی از پارامترهای مهم برای شبیه‌سازی عملکرد محصول در مدل آکواکراپ است، برای محصول ذرت رقم سینگل کراس- ۷۰۴ مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. مقدار این پارامتر ۳۳/۷ گرم بر مترمربع توسط کارشناسان فائو توصیه شده است. آزمایش‌ها با آبیاری کامل با دور متوالی انجام شد و دو روش سعی و خطا و Steduto *et al*. (2009) برای واسنجی استفاده شد. نتایج نشان داد، مدل آکواکراپ با ضریب تبیین بالایی (R^2 =۰/۹۹) تغییرات عملکرد محصول را در شرایط آبیاری کامل شبیه‌سازی می‌کند. روش Steduto *et al*. (2009) دقت اندک بهتری نسبت به روش سعی و خطا و پیش‌فرض مدل داشت. بهره‌وری آب نرمال شده با استفاده از روش Steduto *et al*. (2009) برابر ۳۲/۳ گرم بر مترمربع به‌دست آمد که ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین خطای اریب به‌ترتیب برابر ۰/۷۳ و ۰/۲۵ تن در هکتار برآورد شد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، حساسیت مدل آکواکراپ به متغیرهای ورودی و منابع خطا مورد بررسی قرار گیرد.

REFERENCES

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 and Drainage*, 4(2), 273-283. (In Farsi)

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

Araya, A., Habtu, S., Hadgu, K.M., Kebede, A., Dejene, T. (2010) Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (Hordeum vulgare). *Agricultural Water Management*, 97, 1838–1846.

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)

Blum, A. (2009). Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress. *Field Crops Res.* 112, 119–123.

Doorenbos, J., Kassam, A. H. (1979). Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No 33. FAO, Rome.

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.

Haydarinia, M., Naseri, A.A., 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). Validation the FAO AquaCrop Model for Irrigated and Water Deficient Field Maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 488-498.

Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. and Fereres, E. (2009) *AquaCrop*—the FAO crop model to simulate yield response to water III. Model parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal* 101, 448-459.

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.

Karimi Avargani, H.; Rahimikhoob, A. ; Nazarifar, M. H. (2016). Calibration and validation of AquaCrop model for Barley in Pakdasht region – Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Resaech.* 47(3), 539-549.

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.

Patrignani, A. and Ochsner, T.E. (2015). Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal*, 107(6), 2312-2320.

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(3), 426- 437.

Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. (2007). On the conservative behavior of biomass water productivity. *J. Irrig. Sci,* 25(3), 189–207.

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.