نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۸۸-۲۰۷۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2075-2088

مقاله پژوهشی

تعیین عملکرد، کارایی مصرف آب و شبیه‌سازی تاج‌پوشش گیاه کاهو در دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی با مدل AquaCrop

محمود سبزیان[۱*]، علی رحیمی خوب[۲]، محمود مشعل[۳]، ساسان علی نیایی فرد[۴]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۷/۳۰

چکیده

سال‌های اخیر توجه زیادی به کشت بدون خاک یا هیدروپونیک در آب و محلول غذایی در گلخانه‌ها شده است. هدف از انجام این تحقیق مقایسه پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده کاهو بین دو کشت خاکی و هیدروپونیک و همچنین ارزیابی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب گیاه کاهو در دو محیط کشت هیدروپونیک و کشت خاکی است. پارامتر بهره‌وری برای شبیه‌سازی رشد گیاه در مدل آکواکراپ استفاده می‌شود. آزمایش‌های دو کشت فوق به‌طور هم‌زمان طی دو دوره کشت در گلخانه تحقیقاتی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران انجام شد. داده‌های کشت اول برای واسنجی پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده و داده‌های کشت دوم برای صحت سنجی استفاده شدند. نتایج نشان داد که پارامتر فوق در دو کشت خاکی و هیدروپونیک متفاوت است و به ترتیب برابر ۱۴/۳ و ۱۵/۸ گرم بر مترمربع برای این دو نوع کشت می‌باشد. مدل آکواکراپ با استفاده از این مقادیر برای دوره دوم کشت اجرا شد و مقدار زیست‌توده در طی دوره رشد شبیه‌سازی شد و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه گردید. نتایج آماری نشان داد که مدل آکواکراپ با استفاده از مقادیر واسنجی شده بهره‌وری آب نرمال شده با دقت مناسبی عملکرد گیاه کاهو را طی دوره رشد شبیه‌سازی می‌کند. کارایی مصرف آب نیز در هر دو دوره کشت برای دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد کارایی مصرف آب در کشت هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی بیشتر می‌باشد و مدل نیز قابلیت خوبی در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب در هر دو محیط کشت دارد. همچنین مقدار تاج پوشش برای هر دو محیط کشت، در هر دو دوره کشت اندازه‌گیری و توسط مدل شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد که مدل برای هر دو محیط کشت، مقدار تاج‌پوشش را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق نتیجه گرفته شد، نوع محیط کشت بر عملکرد کاهو تأثیر دارد و عملکرد و کارایی مصرف آب در کشت هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی بیشتر است و مدل آکواکراپ نیز دارای دقت نسبتاً بالایی در شبیه‌سازی عملکرد ، کارایی مصرف آب و همچنین شبیه‌سازی تاج پوشش برای گیاه کاهو است.

واژه‌های کلیدی: کارایی مصرف آب، کاهو، کشت هیدروپونیک، کشت خاکی، عملکرد، مدل آکواکراپ، گلخانه

مقدمه

آب به‌عنوان محدودکننده‌ترین عامل در تولید محصولات کشاورزی نقش مهمی در تأمین غذای جمعیت کشور به عهده دارد. حجم آب مصرفی در بخش کشاورزی در مقایسه با حجم آب تجدیدپذیر برابر ۵۰ درصد است، که رقم قابل‌ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد (ناصری و همکاران، ۱۳۹۶). تلاش‌های پژوهشگران تاکنون عمدتاً برافزایش تولید در واحد سطح معطوف بوده، درصورتی‌که در شرایط محدودیت منابع آب (شرایط حاکم بر اکثر مناطق ایران) هدف اصلی بایستی بیشتر متمرکز بر بالا بردن تولید به ازای واحد آب مصرفی و استفاده بهینه از این منابع باشد (English et al., 1990). نیاز روزافزون به محصولات کشاورزی هم‌زمان با چالش‌هایی درزمینهٔ کمبود آب، انرژی و خاک حاصلخیز کشاورزی، لزوم توجه به اصلاح الگوی کشت را بیش‌ازپیش نمایان ساخته است. در این راستا، توجه به فن‌آوری نوین در کشاورزی که امکان تولید حداکثر محصول با حداقل مصرف آب، انرژی و سایر نهاده‌ها و با حداقل وابستگی به شرایط آب و هوایی فصلی و اقلیمی را فراهم آورد، بسیار حائز اهمیت است. توجه به روش‌های کشت متراکم مثل کشت گلخانه‌ای که سرآمد آن‌ها کشت به روش هیدروپونیک است، برای

۱- دانشجوی ارشد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
۳- دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی،پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
۴- استادیار گروه علوم باغبانی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، پاکدشت، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: sabzian73@ut.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.2021.14.6.23.4

نیل به این اهداف ضروری به نظر می‌رسد (ساعدی و همکاران، ۱۳۹۶). روش هیدروپونیک که اخیراً در کشت تجاری و صنعتی مورد استقبال قرارگرفته، به معنای کشت در محیط بدون خاک یا کشت در محیط دارای محلول‌های غذایی می‌باشد. از فواید سیستم‌های هیدروپونیک امکان تولید محصول بدون استفاده از آفت‌کش است. این محصولات عاری از باقیمانده سموم هستند و ازلحاظ کیفیت و سلامت در سطح بالایی قرار دارند (Verdonck and Demeyer, 2004). در سیستم هیدروپونیک امکان بررسی و کنترل دقیق بیماری‌ها و آفات وجود داشته و مشکل بیماری‌های خاکزاد به کمترین مقدار کاهش خواهد یافت. بنابراین با استفاده از سیستم کشت هیدروپونیک می‌توان از صرف هزینه و وقت زیاد برای ضدعفونی کردن خاک و فراهم کردن شرایط مناسب رشد، اجتناب نمود (Cantliffe et al., 2007). بررسی‌ها حاکی از آن است که در کشت‌های گلخانه‌ای با مصرف ۱۰ تا ۱۵ هزار مترمکعب آب در هکتار، عملکرد به چند صد تن می‌رسد درحالی‌که در شرایط مزرعه برای عملکرد برابر یک‌دهم آن حدود ۱۸ هزار مترمکعب آب نیاز است (شاکر و حسین نیا، ۱۳۹۵). این مسئله بیانگر کارایی بیشتر مصرف آب در شرایط کشت کنترل‌شده می‌باشد. هدف از افزایش کارایی مصرف آب در کشاورزی، افزایش عملکرد به ازای واحد حجم آب مصرفی است. بنابراین برای افزایش عملکرد علاوه بر تغییر الگوی کشت از محیط روباز به کشت‌های گلخانه‌ای به‌ویژه کشت هیدروپونیک، راهکار دیگر پیش‌بینی برآورد عملکرد طی سناریوهای مختلف آبیاری تحت شرایط محدودیت منابع آب با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عملکرد می‌باشد تا بتوان شرایطی را فراهم کرد که در کشت خاکی نیز حداکثر عملکرد را داشته باشیم. تعیین عملکرد گیاه به کمک آزمایش‌های مزرعه‌ای و تحت سناریوهای مختلف آبیاری کاری پرزحمت، زمان‌بر و پرهزینه است. از طرفی مدل‌های رشد و نمو گیاهان زراعی از ابزارهای بسیار مهم در مطالعه و طراحی روش‌های مدیریتی و نیز پیش‌بینی عملکرد گیاه هستند که می‌توانند اهداف ذکرشده را تحقق بخشند (وطن‌خواه و همکاران، ۱۳۹۴). مدل‌های شبیه‌ساز عملکرد محصول متعددی مانند SOYMOD، CERES، SOYGRO، APSIM و CROPSYST وجود دارند که در سطح جهان تحقیقاتی روی آن‌ها انجام‌شده‌اند (Jones et al., 2003; Keating et al., 2003, Stöckle et al., 2003). این مدل‌ها اغلب مستلزم مهارت زیاد کاربر در واسنجی آن‌ها است و نیاز به پارامترهای ورودی و تغییرپذیر زیادی دارند که بعضاً اندازه‌گیری آن‌ها سخت بوده و یا برای دامنه وسیعی از گونه‌های زراعی و مکان‌های مختلف دنیا، غیرقابل دسترسی هستند (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹).

سازمان خواروبار جهانی (فائو)، طی بازنگری نشریه شماره ۳۳، مدلی به نام آکواکراپ[1] را برای شبیه‌سازی عملکرد محصول نسبت به آب مصرفی ارائه کرد (Steduto et al., 2009). مدل آکواکراپ در مقایسه با دیگر مدل‌های شبیه‌سازی گیاه ذکرشده در بالا، از پارامترهای کمتری استفاده می‌کند و در آن سعی شده که تعادلی بین دقت، سادگی و سهولت برای کاربران برقرار شود (Hsiao et al., 2009). این مدل یک ابزار قدرتمند و باارزش برای بهبود مدیریت آب در مزرعه و محاسبه بهره‌وری آب است (Steduto et al., 2009). پژوهش‌های زیادی در داخل و خارج از کشور برای بررسی دقت مدل آکواکراپ انجام‌شده‌اند. مثلاً مطالعه‌ای جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل آکواکراپ برای محصول جو در منطقه پاکدشت انجام شد. در این پژوهش مدل آکواکراپ برای دو متغیر درجه-روز رشد از شروع کاشت تا رسیدن محصول و ضریب بهره‌وری نرمال شده برای محصول، واسنجی شد. برای تولید داده‌های لازم برای واسنجی و صحت‌سنجی، سه تیمار تقویم زراعی در مزرعه پردیس ابوریحان در یک فصل رشد اجرا شدند. اجرای مدل با داده‌های صحت‌سنجی نشان داد که مدل با دقت مناسبی عملکرد محصول را شبیه‌سازی می‌کند (اورگانی و همکاران، ۱۳۹۴). برای ارزیابی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد بیوماس و بلال ذرت علوفه‌ای در طول جویچه، آزمایشی در منطقه کرج انجام شد. در این تحقیق، مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی تغییرات مکانی ذرت علوفه‌ای بر اساس عمق آب نفوذ یافته در طول جویچه ارزیابی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که می‌توان از مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد بیوماس ذرت علوفه‌ای در طول جویچه استفاده نمود (وطن‌خواه و همکاران، ۱۳۹۴). طی مطالعه‌ای مدل آکواکراپ در منطقه جنوب فلات چین برای گندم زمستانه ارزیابی شد. داده‌های تجربی حاصل از تحقیقات میدانی سال ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۱ برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی زیست‌توده، سطح پوشش تاج (CC)، حجم آب خاک و عملکرد دانه در شرایط دیم استفاده شد. نتایج نشان داد که آکواکراپ قادر به شبیه‌سازی عملکرد گندم زمستانه در شرایط دیم است (Zhang et al., 2013). برای ارزیابی مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی رشد ذرت و مقدار بهره‌وری، تحت شرایط کم آبیاری در جنوب تایوان انجام شد. سه آزمایش برای ارزیابی عملکرد مدل در شبیه‌سازی پوشش تاج (CC)، زیست‌توده (B)، عملکرد (Y)، تبخیر و تعرق محصول (ET) و راندمان مصرف آب (WUE)، در مزرعه انجام شد. نتایج نشان داد که پیش‌بینی مدل در محیط بدون تنش خوب و مدل آکواکراپ می‌تواند مدلی قابل‌اعتماد برای ارزیابی اثربخشی آبیاری پیشنهادی و استفاده استراتژی‌های مدیریت برای ذرت باشد (Greaves et al., 2016).

در مدل آکواکراپ از پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده[2] (WP*)

1- AquaCrop
2- Normalized Water Productivity

برای تعیین زیست‌توده گیاهی استفاده‌شده است (Steduto et al., 2007). این پارامتر در نرم‌افزار آکواکراپ برای هر گیاه ثابت در نظر گرفته‌شده است (Steduto et al., 2009). تحقیقات نشان داده این پارامتر مقدار مشخص و ثابتی نیست و برای هر منطقه و نوع رقم گیاه متفاوت است. کارشناسان فائو مقدار این پارامتر را برای اکثر نباتات زراعی محاسبه و در پیوست راهنمای مدل آکواکراپ (Reference Manual, Annexes – AquaCrop, January 2010) ارائه داده‌اند. مقدار این پارامتر برای گیاهان کربن ۳ (C3) مثل جو بین ۱۳ تا ۱۵ و برای گیاهان کربن ۴ (C4) مثل سورگوم، بین ۲۶ تا ۳۵ گرم بر مترمربع در روز تغییر می‌کند (Steduto et al., 2009). بررسی‌ها نشان می‌دهد مقدار این پارامتر برای گیاه کاهو که جزء گیاهان C3 است، در ایران تعیین نشده است. هدف از انجام این پژوهش مقایسه بهره‌وری آب نرمال شده کاهو در دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی گلخانه‌ای است.

مواد و روش‌ها

مشخصات محل آزمایش

این پژوهش در گلخانه تحقیقاتی پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران در منطقه پاکدشت روی گیاه کاهو رقم پرطاووسی در سال زراعی ۱۳۹۶– ۱۳۹۷ انجام شد. مکان آزمایش در طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۴۸ دقیقه شرقی، عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی (E ′۴۸ °۵۱، N ′۲۸ °۳۵) و ارتفاع از سطح دریا ۱۰۲۱ متر واقع است. داده‌های موردنیاز برای اندازه‌گیری مقدار تبخیر– تعرق در طی دو دوره کشت، مانند ساعات آفتابی از ایستگاه هواشناسی واقع در مزرعه تحقیقاتی پردیس ابوریحان گرفته شد و همچنین داده‌های موردنیاز دیگر در گلخانه مانند دمای روزانه توسط دماسنج، رطوبت روزانه توسط رطوبت‌سنج اندازه‌گیری شد، و سرعت باد نیز به توصیه سازمان فائو برابر ۰/۵ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. در این پژوهش تبخیر– تعرق با استفاده از روش پنمن مانتیث فائو (Allen et al., 1998) تعیین گردید.

در مورد خاک تهیه‌شده برای انجام آزمایش کشت خاکی، مقدار خاک موردنیاز پس از مخلوط با کمپوست گیاهی در گلخانه تحقیقاتی انباشته شد، سپس گلدان‌ها از خاک پرشده و سه گلدان نیز به‌عنوان نمونه جهت انجام آزمایش و تعیین ویژگی‌های آن به آزمایشگاه منتقل شدند. برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک تهیه‌شده در جدول (۱) ارائه‌شده است. همچنین برخی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب محل آزمایش نیز در جدول (۲) ارائه‌شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های **خاک** مورد استفاده

بافت خاک	رطوبت مزرعه (درصد حجمی)	رطوبت پژمردگی (درصد حجمی)	جرم ویژهٔ ظاهری (gr/cm^3)	رطوبت اشباع (درصد حجمی)	EC (dS/m)
Silt loam	۲۰/۱۵	۱۰/۰۱	۱/۳۷	۴۴/۶۴	۳/۵۵

جدول ۲- ویژگی‌های **شیمیایی آب**

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

آزمایش گلخانه‌ای

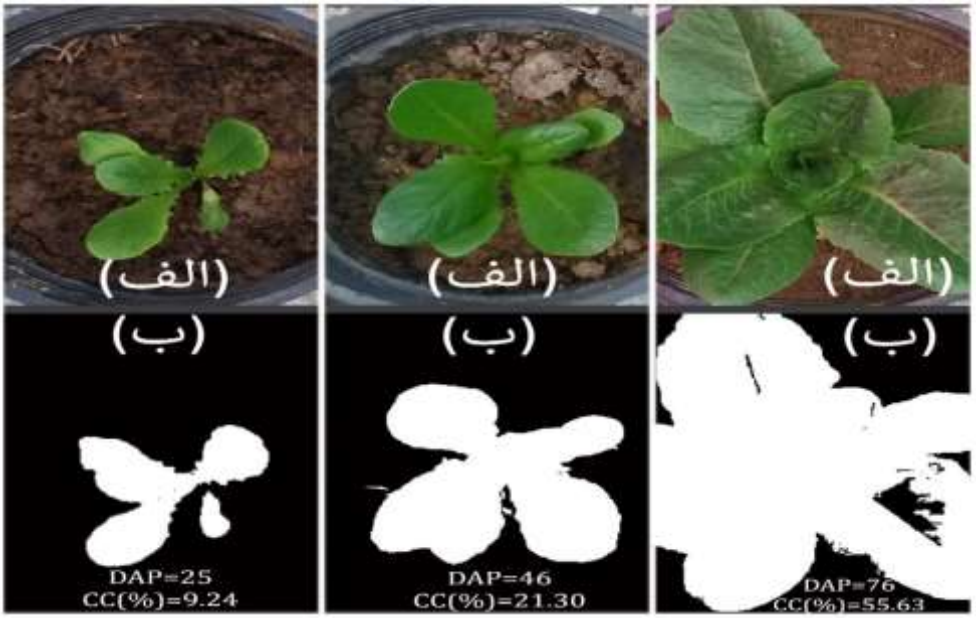
کشت در دو محیط کشت هیدروپونیک (شکل ۱) و خاکی (شکل ۲) انجام شد. در کشت هیدروپونیک تعداد ۴۸ عدد بوته جهت انجام آزمایش در نظر گرفته شدند. روش دوم کشت در محیط خاک بود که در ۴۸ گلدان مشابه با تراکم کشت هیدروپونیک انجام شد. در کشت هیدروپونیک با استفاده از چهار لوله به طول ۳ متر و با ایجاد حفره‌هایی به فاصله ۲۵ سانتی‌متر روی آن جهت قرار دادن گیاه درون آن‌ها اجرا شد. در این روش، آب و مواد غذایی لازم جهت رشد گیاه از طریق لوله از مخزن به کمک پمپ وارد سیستم می‌شد و محلول غذایی در اختیار گیاه قرار می‌گرفت. دلیل استفاده از پمپ و مخزن، هوادهی به محلول غذایی بود که هر ۱۵ دقیقه پمپ توسط تایمر روشن و خاموش می‌شد تا محلول وارد سیستم و در اختیار گیاه قرار گیرد. محلول غذایی در نظر گرفته‌شده کود هیدروپونیک با فرمول هوگلند و اشنایدر بود که در مرحله جوانه‌زنی مقدار ۸ میلی‌لیتر، در مرحله اول رشد مقدار ۱۰ میلی‌لیتر و در مرحله رشد تا انتهای برداشت به مقدار ۱۶ میلی‌لیتر در ۴ لیتر آب استفاده شد. pH مناسب برای کاهو بین ۵/۵–۶/۵ است. برای کنترل pH از رزین کنترل pH استفاده شد. هر ۵۰ گرم رزین می‌تواند بدون نیاز به تنظیم اولیه، pH محلول را به‌صورت خودکار به مدت دو هفته بین ۵/۵–۶/۵ نگه دارد. در این روش بخشی از ریشه‌ها در هوا و بخشی دیگر درون یک‌لایه نازک از محلول غذایی در جریان قرار داشت، و ریشه‌ها آزادانه با محلول غذایی در تماس بودند. در این سیستم به دلیل کاهش پایداری

عناصر در محلول غذایی هر دو هفته یک‌بار محلول تعویض می‌شد. برای اندازه‌گیری زیست‌توده در هر دو کشت، هر هفته ۳ گلدان از کشت خاکی و ۳ بوته از کشت هیدروپونیک به‌صورت جداگانه آزمایش شد. نمونه‌های گیاهی برای اندازه‌گیری عملکرد ماده خشک (زیست‌توده) بعد از کاشت بذر و انتقال نشاء تا انتهای فصل کشت هر هفته یک‌بار جهت تعیین زیست‌توده گیاهی (Biomass) اندازه‌گیری می‌شدند. برای این کار، نمونه‌ها در هر مرحله از نمونه‌برداری بعد از انتقال سریع به آزمایشگاه به مدت ۳ روز در دستگاه آون با درجه حرارت ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک می‌شدند. مقدار پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده این دو روش کشت مطابق با روش ارائه‌شده Steduto et al. (2009) برای این پژوهش تعیین و مقایسه شدند. پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده به دست آمده علاوه بر ترسیم نمودارها با استفاده از شاخص‌های آماری مقایسه و تحلیل شدند.

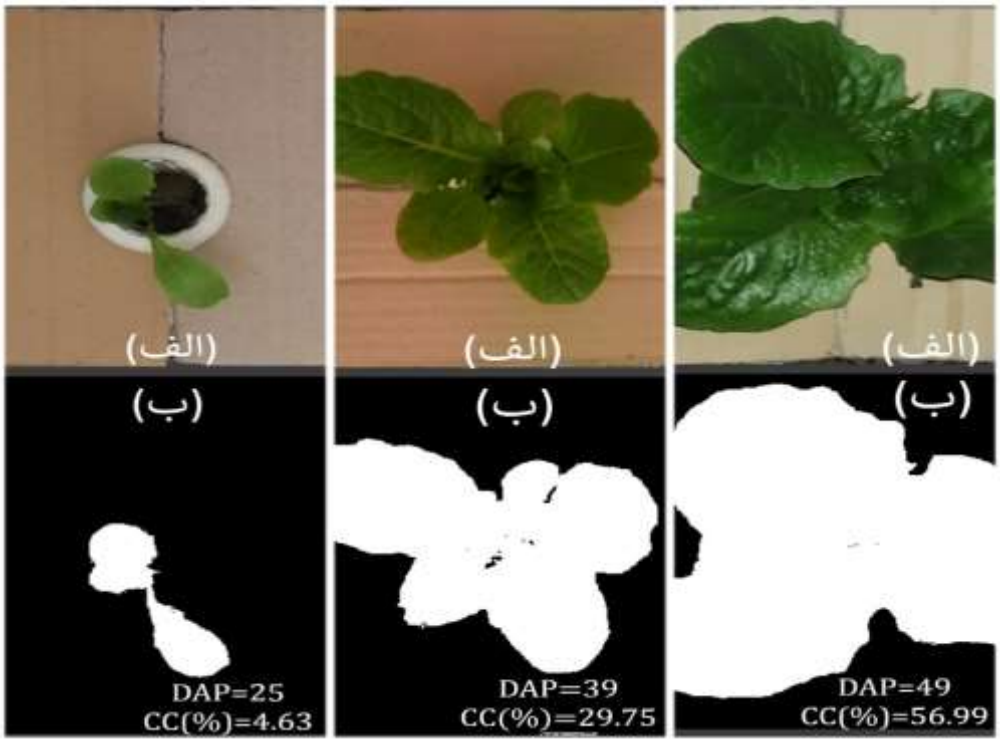
درکشت هیدروپونیک با توجه به این‌که آب و محلول غذایی همواره در اختیار گیاه قرار داشت تا گیاه دچار تنش آبی نشود، برای اندازه‌گیری مقدار آب مصرف‌شده طی تبخیر و تعرق در این کشت، به‌صورت روزانه مقدار کاهش سطح آب داخل مخزن اندازه‌گیری می‌شد.

شکل ۱- تصویر کشت در محیط هیدروپونیک

شکل ۲- تصویر کشت در محیط خاکی



شکل ۳- تصاویر تاج پوشش محصول کاهو (کشت خاکی) در سه تاریخ مختلف دوره رشد، الف- تصویر برداشت‌شده توسط دوربین و ب- تصویر پردازش‌شده توسط نرم‌افزار کانوپی



شکل ٤- تصاویر تاج پوشش محصول کاهو (کشت هیدروپونیک) در سه تاریخ مختلف دوره رشد، الف- تصویر برداشت‌شده توسط دوربین و ب- تصویر پردازش‌شده توسط نرم‌افزار کانوپی

درکشت خاکی نیز با توجه به این موضوع کـه پـارامتر بهـره‌وری نرمال شده برای آبیـاری کامـل و بـدون تـنش آبـی و تـنش کـودی تعریف‌شده، آبیاری در گلدان‌ها به‌صورتی انجام شد که تنش آبـی بـه گیاه وارد نشود. برای تعیین زمـان مناسـب و مقـدار آبیـاری در طـول فصل کشت، از روش لایسیمتری استفاده شد. بدین‌صـورت کـه وزن خاک خشک‌شده گلدان، وزن گلدان در وضعیت رطوبت زراعـی (FC)

و وزن گلدان در وضعیت (Wilting point) اندازه‌گیری شدند. حال با توجه به وزن‌های محاسبه‌شده، زمانی که ۳۰ درصد آب، از گلدان خارج می‌شد (آب سهل‌الوصول) با وزن کردن گلدان‌ها، این میزان را کنترل و زمانی که آبیاری لازم بود، آبیاری به میزانی که رطوبت خاک به ظرفیت زراعی می‌رسید، آبیاری صورت می‌گرفت، تا گیاه دچار تنش آبی نشود. همچنین برای ایجاد شرایط مطلوب ازلحاظ تأمین مواد غذایی موردنیاز درکشت خاکی نیز مقدار کود ازت و پتاسیم به ترتیب ۱۵۰ 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 گلدان‌ها داده شد. چهار پارامتر مربوط به پوشش گیاهی شامل درصد پوشش گیاه در شروع مرحله جوانه‌زنی (CCO) ، نرخ رشد پوشش گیاه در مرحله توسعه (CGC)، حداکثر پوشش گیاه (CCX)و نرخ کاهش پوشش گیاه در مرحله پیری (CDC) برای اجرای مدل آکواکراپ الزامی هستند. برای تعیین این پارامترها، درصد پوشش گیاه در طول دوره رشد اندازه‌گیری شد و بر پایه این اندازه‌گیری‌ها درصد پوشش گیاه در شروع جوانه‌زنی و حداکثر پوشش گیاه و تغییرات پوشش گیاه بین دو اندازه‌گیری بر اساس شدت تغییرات بر روز محاسبه گردید. برای تعیین پوشش گیاهی از روش Patrignani and Ochsner (2015) استفاده شد. با استفاده از این روش، از سطح هر گلدان درکشت خاکی و سطح مختص به هر گیاه روی خطوط لوله درکشت هیدروپونیک، عکس گرفته می‌شد و با انتقال عکس به نرم‌افزار کانوپی[1]، درصد پوشش گیاه محاسبه می‌گردید. برای گرفتن عکس‌ها، دوربین در ارتفاع ۶۰ سانتیمتر بالاتر از تاج‌پوشش گیاه و به‌طور موازی با سطح گلدان و لوله قرار داده می‌شد. سه نمونه از عکس‌های قبل و بعد از پردازش در نرم‌افزار کانوپی در شکل (۳) برای کشت خاکی و در شکل (۴) برای کشت هیدروپونیک ارائه‌شده‌اند.

تشریح و کاربرد نرم‌افزار آکواکراپ

در این پژوهش از نسخه ۵ مدل آکواکراپ استفاده شد. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی عملکرد درکشت هیدروپونیک توسط مدل آکواکراپ به این دلیل که در این کشت هیچ‌گونه تنش آبی و تنش کودی وجود ندارد و امکان تعریف این شرایط برای مدل وجود دارد، انجام شد. در این مدل، مقدار عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت، از رابطه (۱) حساب می‌شود (Steduto et al., 2009):

$$B = WP \times \left(\sum \frac{T_{r,i}}{ET_{o,i}}\right) \quad (۱)$$

در رابطه فوق، B عملکرد زیست‌توده تا i امین روز پس از کاشت (گرم بر مترمربع)، WP ضریب بهره‌وری نرمال شده (گرم بر مترمربع)، $T_{r,i}$ تعرق روزانه گیاه (میلی‌متر در روز) و ETo تبخیر و تعرق مرجع (میلی‌متر در روز) هستند. در مدل آکواکراپ، پارامتر تعرق گیاه (Tr) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$T_r = K_s \times K_c \times CC \times ET_o \quad (۲)$$

در رابطه فوق، Ks ضریب تنش آبی، Kc ضریب گیاهی، CC ضریب پوشش گیاهی و ETo تبخیر و تعرق مرجع هستند. با توجه به این‌که برنامه آبیاری در این پژوهش به‌صورتی بوده که گیاه تحت تنش کم‌آبی قرار نگیرد، لذا ضریب Ks برابر یک در نظر گرفته شد. ضریب گیاهی Kc نسبت بین تبخیر و تعرق گیاه بدون تنش آبی به تبخیر و تعرق مرجع است. این ضریب در مدل آکواکراپ با استفاده از روش ارائه‌شده 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):

$$CC = CC_O \times e^{(CGC \times t)} \quad (۳)$$

$$CC = CC_X - [CC_O \times e^{(-CGC \times t)}] \quad (۴)$$

رابطه ۳ برای دوره زمانی کاشت بذر تا نیمه مرحله توسعه استفاده می‌شود. رابطه ۴ نیز برای دوره زمانی از نیمه‌ی مرحله توسعه تا آخر مرحله توسعه است. در معادلات فوق, CC پوشش گیاهی در t روز پس از کاشت، CCx حداکثر پوشش گیاهی، CCo پوشش اولیه گیاه در زمان t=0 و CGC نرخ رشد پوشش گیاه در روز هستند. پوشش گیاه در طول دوره مرحله آخر که در آن شیب پوشش گیاهی به‌صورت نزولی است، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$CC = CC_X \times \{1 - 0.05 \times [e^{\left(\frac{CDC}{CC_X} \times t\right)} - 1] \quad (۵)$$

در روابط فوق، CDC نرخ کاهش پوشش گیاهی و t زمان برحسب روز است که از مرحله چهارم رویش (پیری) شروع می‌شود. طول دوره‌های مختلف رشد گیاه کاهو همراه با عملیات کشاورزی و آبیاری، یادداشت‌برداری و ثبت گردیدند. مجموعه پارامترهای اندازه‌گیری شده و مشاهده‌شده از مراحل مختلف رشد که به‌عنوان ورودی به مدل آکواکراپ وارد شدند، در جدول (۳) ارائه‌شده‌اند.

تجزیه‌وتحلیل داده‌ها

در این پژوهش برای ارزیابی کارایی مدل آکواکراپ از شاخص‌های آماری ضریب تبیین[2] (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا[3] (RMSE)، ضریب کارایی[4] (E) و ضریب باقی‌مانده[5] (CRM) که به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند، ارزیابی شد.

1- Canopeo

2- Determination Coefficient
3- Root Mean Square Error
4- Coefficient of efficiency
5- Coefficient of Residual Mass

جدول ۳- مقادیر پارامترهای ورودی به مدل آکواکراپ

پارامتر	کشت اول		کشت دوم	
	هیدروپونیک	خاک	هیدروپونیک	خاک
پوشش سبز اولیه (درصد)	۰/۴۷	۰/۷۷	۰/۵۷	۰/۶۷
زمان شروع جوانه‌زنی (روز پس از کاشت)	۸	۸	۷	۷
طول دوره جوانه‌زنی (روز)	۷	۷	۷	۷
زمان شروع گلدهی (روز پس از کاشت)	۳۲	۳۷	۲۸	۳۵
طول دوره گلدهی (روز)	۷	۹	۶	۸
زمان رسیدن به حداکثر پوشش سایه‌انداز (روز پس از کاشت)	۵۶	۷۷	۴۴	۴۴
زمان شروع دوره کاهش (روز پس از کاشت)	۵۶	۷۷	۴۴	۴۴
زمان برداشت (روز پس از کاشت)	۵۶	۷۷	۴۴	۴۴

$$R^2 = \frac{[\sum(S_i - \bar{S})(M_i - \bar{M})]^2}{\sum(S_i - \bar{S})^2 \sum_{N}(M_i - \bar{M})^2} \quad (۶)$$

$$RMSE = [N^{-1}\sum_{i=1}(M_i - S_i)^2]^{0.5} \quad (۷)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - M_i)}{\sum_{i=1}^{n}(M_i - \bar{M})^2} \quad (۸)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{n} M_i - \sum_{i=1}^{N} S_i}{\sum_{i=1}^{n} M_i} \quad (۹)$$

که در آن‌ها Si و Mi به ترتیب مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده، n تعداد مشاهدات و $\bar{M}$ میانگین مقادیر M_i هستند. RMSE مقادیر کلی یا میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نمایش‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل است. هرچه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. ضریب E بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی‌شده از اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین است. مقدار E بین ∞- تا ۱+ متغیر است هرچه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کاراتر است. شاخص CRM نشانگر تمایل مدل برای برآورد بیش‌ازحد و یا کمتر از حد در مقایسه با اندازه‌گیری‌ها است. چنانچه تمامی مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده باهم برابر شوند، مقدار عددی شاخص‌های RMSE، CRM برابر با صفر و مقدار E برابر با ۱ خواهد بود.

نتایج و بحث

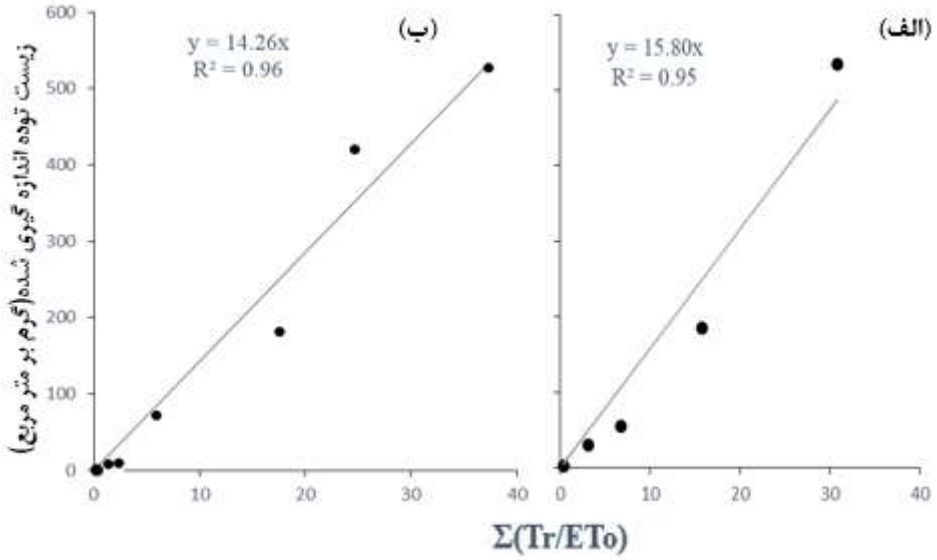
عملکرد:

همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، مدل آکواکراپ از پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده (WP*) برای تعیین عملکرد (زیست‌توده) استفاده‌شده است (Steduto et al., 2007). بررسی‌ها نشان می‌دهند مقدار این پارامتر برای گیاه کاهو که جزء گیاهان C3 است، در ایران تعیین نشده است. بنابراین یکی از اهداف این پژوهش مقایسه بهره‌وری آب نرمال شده کاهو در دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی است. این پارامتر در مدل آکواکراپ ابتدا به کمک داده‌های کشت اول واسنجی و سپس با داده‌های کشت دوم، صحت‌سنجی شد. در این پژوهش برای محاسبه پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده، از روش Steduto et al. (2009) استفاده‌شده است. در این روش، پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع ($\sum \frac{T_r}{ET_O}$) در مقابل زیست‌توده تجمعی رسم شده و بهره‌وری آب نرمال شده، برابر با ضریب بهترین خطی است که از مبدأ مختصات به نقاط برازش گذشته است. پراکنش داده‌های نسبت تجمعی تعرق گیاه به تبخیر- تعرق مرجع در مقابل زیست‌توده تجمعی برای هر دو روش هیدروپونیک و کشت خاکی و نیز معادله خط برازش داده‌شده، در شکل (۵) ارائه‌شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهند عملکرد زیست‌توده کشت هیدروپونیک بیشتر از کشت در محیط خاکی می‌باشد و مقادیر آن برای کشت هیدروپونیک برابر ۱۵/۸۰ گرم بر متر مربع و برای کشت خاکی برابر ۱۴/۲۶ گرم بر متر مربع است. پس از تعیین ضریب بهره‌وری، مدل آکواکراپ با داده‌های کشت اول واسنجی و با داده‌های کشت دوم، صحت‌سنجی شد. مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی طی دو دوره کشت، در جدول (۴) ارائه‌شده‌اند. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی توسط مدل در هر دو کشت نشان از بیشتر بودن مقدار عملکرد کشت هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی می‌باشد. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو دوره کشت، مدل قادر است مقدار عملکرد کاهو را با دقت نسبتاً بالایی شبیه‌سازی کند. برای اطمینان از صحت چنین ادعایی، نتایج با استفاده از شاخص‌های آماری یادشده مقایسه شدند (جدول ۵).

در مجموع همه شاخص‌های آماری نشان می‌دهند که مدل برای

هر دو محیط کشت عملکرد را با درصد خطای پایینی پیش‌بینی می‌کند. ضریب تبیین R^2 بین نتایج مدل و نتایج گلخانه‌ای در هر دو محیط کشت نزدیک به یک است و نشان می‌دهد مدل می‌تواند تغییرات عملکرد محصول را شبیه‌سازی کند. مقدار CRM در بیشتر موارد نزدیک به صفر است که نشان از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی واکنش عملکرد کاهو و نزدیکی مقادیر مدل با مقادیر اندازه‌گیری شده دارد. در همه موارد مقدار CRM منفی است که نشان می‌دهد مدل مقدار عملکرد را بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. همچنین، مقدار E در همه موارد نزدیک به یک است که نشان از کارایی مدل در شبیه‌سازی عملکرد می‌باشد.



شکل ۵- رابطه بین عملکرد زیست‌توده و تعرق نرمال شده برای داده‌های واسنجی : الف- کشت هیدروپونیک ب-کشت خاکی

جدول ٤- نتایج اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده زیست‌توده برای داده‌های واسنجی و صحت‌سنجی

دوره‌ی کشت		اندازه‌گیری شده		شبیه‌سازی‌شده	
		کشت هیدروپونیک	کشت خاکی	کشت هیدروپونیک	کشت خاکی
	روز پس از کاشت	زیست‌توده (تن بر هکتار)		زیست‌توده (تن بر هکتار)	
اولین دور کشت	۱۶	۰/۰۶۷	۰/۰۱۲	۰/۰۳	۰/۰۶
	۲۸	۰/۵۶۷	۰/۰۷۴	۰/۳۰	۰/۲۴
	۳۳	۱/۱۹۲	۰/۰۸۵	۰/۵۴	۰/۴۰
	۴۲	۲/۷۴۴	۰/۷۱۴	۱/۸۴	۰/۹۰
	۵۶	۵/۳۷۱	۱/۸۰۷	۵/۳۴	۲/۷۰
	۶۳	---	۴/۱۹۹	---	۳/۹۳
	۷۵	---	۵/۲۶۵	---	۵/۴۲
دومین دور کشت	۷	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۳
	۱۴	۰/۱۹	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۰۷
	۲۱	۰/۸۱	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۳۴
	۲۸	۲/۱۰	۰/۸۲	۱/۹۴	۱/۱۴
	۳۶	۳/۱۴	۱/۹۸	۳/۶۶	۲/۵۴
	۴۴	۴/۹۳	۳/۹۷	۵/۳۸	۴/۰۵

جدول ۵- مقدار شاخص‌های آماری برای ارزیابی صحت نتایج شبیه‌سازی‌شده توسط مدل

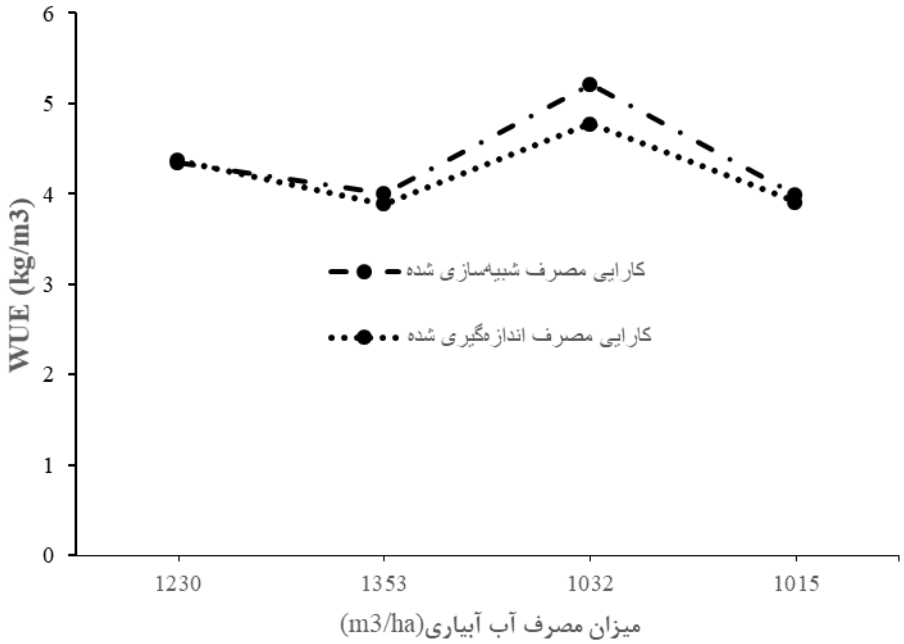
دوره‌ی کشت	محیط کشت	R^2	RMSE%	E	CRM
دور اول کشت	هیدروپونیک	۰/۹۴۹	۰/۳۰	۰/۹۷	-۰/۰۵
	خاکی	۰/۹۶۶	۰/۲۹	۰/۹۵	-۰/۰۸
دور دوم کشت	هیدروپونیک	۰/۹۸۸	۰/۵۱	۰/۹۰	-۰/۲۴
	خاکی	۰/۹۷	۰/۳۹	۰/۹۵	-۰/۱۲

کارایی مصرف آب

کارایی مصرف آب یکی از مهم‌ترین شاخص‌های تعیین مقدار محصول به ازای حجم آب مصرفی می‌باشد. کارایی مصرف آب (مقدار آبیاری/ عملکرد) برای دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی طی دو دوره کشت در جدول (۴) ارائه‌شده است. همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده کارایی مصرف آب نسبت به میزان مصرف آب آبیاری در شکل (۶) ارائه‌شده است. نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی کارایی مصرف آب توسط مدل آکواکراپ در هر دو دوره کشت نشان می‌دهند که کارایی مصرف آب در کشت هیدروپونیک بیشتر از کشت خاکی است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که مدل مقدار کارایی مصرف آب را در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده کمی بیشتر از مقدار واقعی، نشان می‌دهد. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، نتایج نشان می‌دهند که برای هر دو دوره کشت، مدل قادر است مقدار کارایی مصرف آب را با دقت نسبتاً بالایی شبیه‌سازی کند.

جدول ٦- کارایی مصرف آب گیاه کاهو در دو روش کشت هیدروپونیک و کشت خاکی

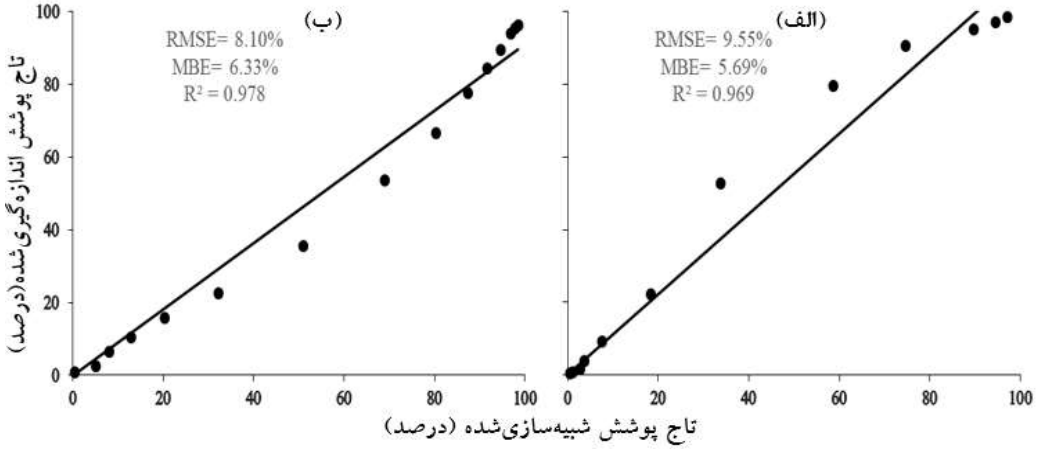
دوره‌ی کشت	محیط کشت	اندازه‌گیری شده		شبیه‌سازی‌شده	
		عملکرد (kg/ha)	کارایی مصرف آب آبیاری (kg/m^3)	عملکرد (kg/ha)	کارایی مصرف آب آبیاری (kg/m^3)
دور اول کشت	کشت هیدروپونیک	۵۳۷۱	۴/۳۶	۵۳۴۰	۴/۳۴
	کشت خاکی	۵۲۶۵	۳/۸۹	۵۴۲۰	۴/۰۱
دور دوم کشت	کشت هیدروپونیک	۴۹۳۰	۴/۷۷	۵۳۸۰	۵/۲۱
	کشت خاکی	۳۹۷۰	۳/۹۱	۴۰۵۰	۳/۹۹



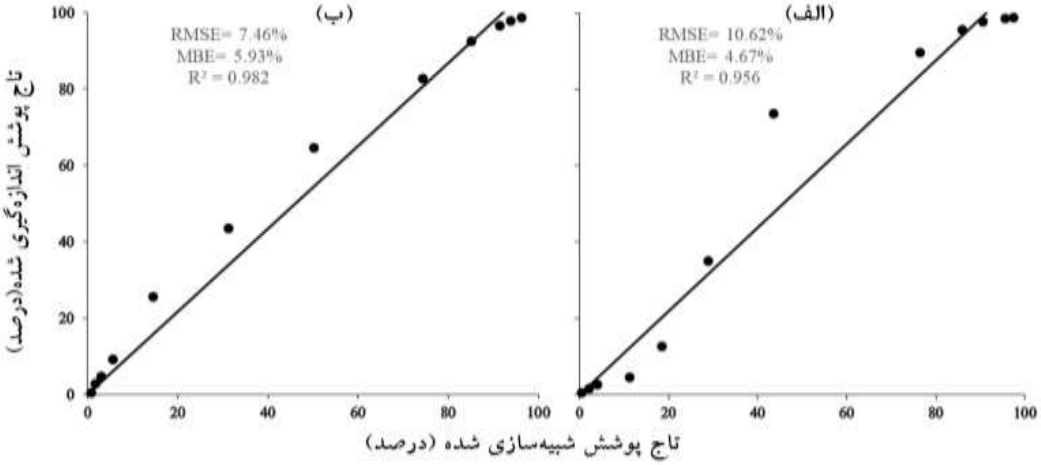
شکل ٦- رابطه بین کارایی مصرف آب و میزان مصرف آب آبیاری طی دو دوره کشت در کشت هیدروپونیک و کشت خاکی

شبیه‌سازی تاج‌پوشش

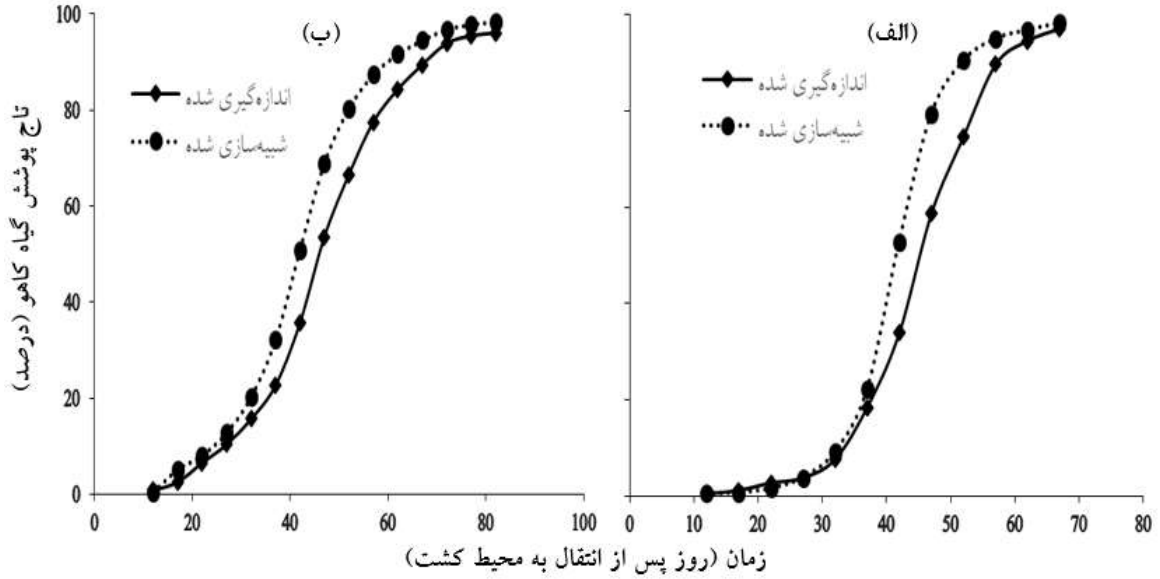
درصد تاج‌پوشش یکی از پارامترهایی است که توسط مدل قابل شبیه‌سازی و برآورد است. این پارامتر در هر دو دوره کشت برای کشت هیدروپونیک و کشت خاکی اندازه‌گیری و ثبت شد. چگونگی پراکنش نتایج اندازه‌گیری و برآورد شده درصد تاج‌پوشش گیاه کاهو برای هر دو محیط کشت هیدروپونیک و خاکی در هر دو دوره کشت، به ترتیب در شکل ۱ وشکل ۲(۸) ارائه‌شده‌اند. همچنین در شکل‌های (۹) و شکل ۴ نیز مقادیر اندازه‌گیری در مقابل مقادیر برآورد شده درصد تاج پوشش محصول کاهو نسبت به گذشت زمان به ترتیب برای اولین و دومین دور کشت ترسیم گردیده‌اند. همان‌طور که در این اشکال مشخص است، مدل در هر دو دوره‌ی رشد گیاه، درصد تاج‌پوشش را به‌غیراز مرحله‌ی ابتدای رشد در دور دوم کشت هیدروپونیک که کم برآورد نشان می‌دهد، در مابقی موارد بیش برآورد کرده است. به‌عنوان یک نتیجه‌گیری کلی، نتایج نشان می‌دهند که مدل برای هر دو محیط کشت، مقدار تاج‌پوشش را به‌خوبی شبیه‌سازی می‌کند.



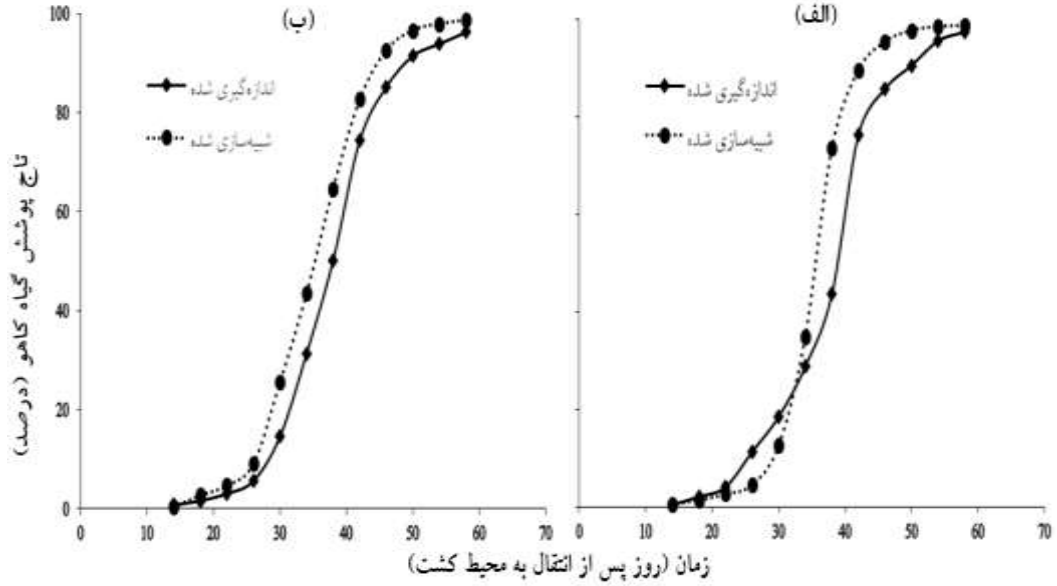
شکل ۱- پراکنش نتایج اندازه‌گیری و برآورد شده تاج‌پوشش محصول کاهو در اولین دور کشت: الف- کشت هیدروپونیک و ب-کشت خاکی



شکل ۲- پراکنش نتایج اندازه‌گیری و برآورد شده تاج‌پوشش محصول کاهو در دومین دور کشت: الف- کشت هیدروپونیک و ب-کشت خاکی



شکل ۳- تغییرات زمانی درصد تاج‌پوشش اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده اولین دور کشت: الف- کشت هیدروپونیک و ب-کشت خاکی



شکل ٤- تغییرات زمانی درصد تاج‌پوشش اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده دومین دور کشت: الف- کشت هیدروپونیک و ب-کشت خاکی

کمترین میزان اختلاف در برآورد یا به‌عبارت‌دیگر بهترین شبیه‌سازی تاج‌پوشش را مدل در دور دوم کشت خاکی از خود نشان می‌دهد. به‌طورکلی محدوده تغییرات پارامترهای آماری RMSE، MBE و R^2 برای درصد تاج‌پوشش اندازه‌گیری‌شده و برآورد شده به ترتیب برابر (۱۰/۶۲-۷/۴۶) ؛ (۴/۶۷-۶/۳۳) درصد و (۰/۹۸۲-۰/۹۵۶) به دست آمدند. نیاتی و همکاران (۲۰۱۸) مقادیر RMSE و R^2 را برای سبزیجات برگی برای درصد سبز تاج‌پوشش به ترتیب بین (۵/۴۴- ۰/۹۴) درصد و (۰/۹۹-۰/۶۰) درصد گزارش داده‌اند. همچنین مالیک و همکاران (۲۰۱۷) مدل آکواکراپ را تحت شرایط مختلف آبیاری برای چغندرقند مورد ارزیابی قراردادند و مقادیر RMSE و R^2 را برای درصد سبز تاج‌پوشش به ترتیب بین (۱۶/۸۹-۳) درصد و (۰/۹۹-۰/۷۶) درصد گزارش کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مقدار عملکرد کشت هیدروپونیک و پارامتر بهره‌وری آب نرمال شده کاهو در دو کشت هیدروپونیک و خاکی متفاوت است به‌طوری‌که مقدار این پارامتر در کشت هیدروپونیک اندکی بیش از کشت خاکی است. بیشتر بودن این پارامتر مؤید آن است که عملکرد نهایی محصول در کشت هیدروپونیک بیش

از کشت خاکی است. جهت مقایسه عملکرد و ارزیابی مدل آکواکراپ نتایج توسط مدل شبیه‌سازی شد، نتایج نشان‌دهندهٔ دقت بالای مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد و همچنین بیشتر بودن عملکرد کشت هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی بود. همچنین کارایی مصرف آب در دو کشت هیدروپونیک و کشت خاکی اندازه‌گیری و توسط مدل شبیه‌سازی شدند. نتایج نشان از بالا بودن دقت مدل در شبیه‌سازی کارایی مصرف آب و همچنین بیشتر بودن کارایی مصرف آب در کشت هیدروپونیک نسبت به کشت خاکی داشت. میزان تاج‌پوشش نیز در دو محیط و در دو دوره کشت، اندازه‌گیری و توسط مدل شبیه‌سازی شد، نتایج نشان داد مدل مقدار تاج‌پوشش را در هر دو محیط کشت با دقت مناسبی شبیه‌سازی می‌کند. برای تحقیقات آتی نیز پیشنهاد می‌شود برای سایر محصولات گلخانه‌ای، تحقیقات مشابه صورت گیرد.

منابع

رحیمی‌خوب، ح.، ستوده‌نیا، ع.، و مساح بوانی، ع. ۱۳۹۳. واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop برای ذرت علوفه‌ای منطقه قزوین. آبیاری و زهکشی ایران. ۱. ۱۰۸.

ساعدی، س.، علیمردانی، ر.، موسی‌زاده، ح.، و صالحی، ر. ۱۳۹۶. طراحی و پیاده‌سازی دستگاه کشت هیدروپونیک دوار خورشیدی مجهز به سامانه هوشمند آبیاری. ماشین‌های کشاورزی. ۸(۲), ۲۷۹-۲۹۴.

شاکر، د.، و حسین‌نیا، ه. ۱۳۹۵. بررسی عملکرد و کارایی مصرف آب در سیستم کشت هیدروپونیک محصولات گلخانه‌ای، دومین کنگره بین‌المللی زمین، فضا و انرژی‌های پاک با محوریت مدیریت منابع طبیعی، کشاورزی و توسعه پایدار، تهران، شرکت کیان طرح دانش.

علیزاده، ح.، نظری، ب.، پارسی‌نژاد، م.، اعتدالی، ه. و جانباز، ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل آکواکراپ در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۲، ۱۱.

کریمی‌اورگانی، ح.، رحیمی‌خوب، ع.، و نظری‌فرد، م. ۱۳۹۴. واسنجی و صحت سنجی مدل آکواکراپ برای جو در منطقه پاکدشت. تحقیقات آب‌وخاک ایران. ۷۴ (۳):۵۷۹-۵۳۹.

وطن‌خواه، ا.، و ابراهیمیان، ح. ۱۳۹۵. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد ذرت علوفه‌ای در طول جویچه. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۷(۳): ۴۹۵-۵۰۴.

ناصری، ا.، عباسی، ف. و اکبری، م. ۱۳۹۶. برآورد آب مصرفی در بخش کشاورزی به روش بیلان آب. مجله تحقیقات مهندسی سازه‌های آبیاری و زهکشی، جلد ۱۸ شماره ۶۸، صفحه‌های ۳۲-۱۷.

Allen, R.G., Pereira, L., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements. FAO Irrigation and Drainage 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.

Cantliffe, DJ., Funes, J., Jovicich, E., Parajpe, A., Rodriguez, J., and Shaw, N. 2007. Media and containers for greenhouse soil less grown cucumbers, melons peppers and strawberries. Acta Hort 614:199-203.

English, M.J.I.J., Musick, V.V., and Murty. 1990. Deficit irrigation. Journal of farm irrigation systems. 12(3):222-230.

Greaves, GE., and Wang, YM. 2016. Assessment of FAO AquaCrop Model for Simulating Maize Growth and Productivity under Deficit Irrigation in a Tropical Environment. Water 8(12):557.

Hsiao, TC., Steduto, P., Raes, D., and 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.

Jones, JW., Hoogenboom, G., Porter, CH., Boote, KJ., Batchelor, WD., Hunt, LA., and Ritchie, JT. 2003. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy 18(3):235-265.

Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., and McLean, G. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. European Journal of Agronomy 18(3): 267-288.

Malik, A., Shakir, AS., Ajmal, M., Khan, MJ., and Khan, TA. 2017. Assessment of AquaCrop model in simulating sugar beet canopy cover, biomass and root yield under different irrigation and field management practices in semi-arid regions of Pakistan. Water Resources Management. 31(13):4275-4292.

Nyathi., M.K., van Halsema, G.E., Annandale, J.G., and Struik, P.C. 2018. Calibration and validation of the AquaCrop model for repeatedly harvested leafy vegetables grown under different irrigation regimes. Agricultural Water Management 208: 107-119.

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

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

Steduto, P., Hsiao, T., Raes, D., and Fereres, E. 2009. AquaCrop The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying

growing media. 644:99-101.

Zhang, W., Liu, W., Xue, Q., 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.

principles. Agronomy Journal 101(3):426-437.

Stöckle, C.O., Donatelli, M., and Nelson, R. 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. European journal of agronomy 18(3):289-307.

Verdonck, O., and Demeyer, P. 2004. The influence of the particle size on the physical properties of

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 6, Vol. 14, Feb.-Mar. 2021, p. 2075-2088

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۶، جلد ۱۴، بهمن - اسفند ۱۳۹۹، ص. ۲۰۸۸-۲۰۷۵

In Determination of Performance, Water Use Efficiency and Simulation of Lettuce's Canopy Cover in Hydroponic Cultivation and Soil Cultivation by AquaCrop Model

M. Sabzian[1]*, A. Rahimikhoob[2], M. Mashal[3], S. Aliniaeifard[4]
Recived: Aug.31, 2020 Accepted: Oct.21, 2020

Abstract

In recent years, there has been high attention towards soilless cultivation or hydroponic for growing plants in greenhouses. In the current study we addressed normalized water productivity of lettuce (Lactuca sativa) between soil and hydroponic cultivations and also the assessment of AquaCrop model in simulation of yield and water use efficiency of lettuce cultivation methods. The Normalized Water Productivity is used for simulating plant growth in AquaCrop model. The experiments on two mentioned cultivations were conducted during two cultivation periods. The first cultivation's data were used for calibrating the productivity parameter of normalized water and the second's cultivation data were used for validation. The obtained results suggested that the productivity parameter of normalized water was different for soil and hydroponic cultivations.It was 14.3 and 15.8 g m-2 for the two cultivation types, respectively. AquaCrop model was performed using these amounts for second cultivation period and the value of biomass was simulated during growth period and then was compared to the measured values. The results indicated that AquaCrop model simulated the performance of lettuce with a suitable accuracy during growth period using the calibrated values of normalized water productivity. Water use efficiency (WUE) was also measured and simulated in both cultivation periods for hydroponic and soil cultivations. The results indicated that the water use efficiency (WUE) in hydroponic is higher than WUE in soil cultivation. Also, the amount of canopy cover was measured for both culture mediums in both cultivation periods and was simulated by the model. The results showed that the model simulates the amount of canopy cover well for both culture mediums. Also AquaCrop model has higher accuracy in the simulation of performance and WUE for lettuce. According to the obtained results, it was concluded that the culture medium influenced the performance of lettuce plant; and performance and WUE in hydroponic cultivation is higher than soil cultivation. Furthermore, AquaCrop model has relatively high accuracy in the simulation of performance, WUE, and also simulation of canopy cover for lettuce plant.

Keywords: AquaCrop model, Hydroponic cultivation, Greenhouse, Lettuce's, Soil cultivation, Yield, Water use efficiency

1- Master Science Student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran
2- Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran
3- Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Aburaihan Campus, University of Tehran
4- Assistance Professor, Department of Horticulture, Aburaihan Campus, University of Tehran
(*- Corresponding Author Email: sabzian73@ut.ac.ir)