عملکرد برنج تحت مدیریت‌های زهکشی سطحی و زیرزمینی و ارزیابی مدل آکواکراپ

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۲/۱۳

ابوالفضل ذبیحی[۱]، عبداله درزی نفت‌چالی[۲]، مجتبی خوش روش[۳]

چکیده

مدل‌هایی که اثرات مقادیر مختلف آب بر عملکرد محصول را به صورت کمی شبیه‌سازی می‌کنند، ابزارهایی مفیدی برای مدیریت آب در سطح مزرعه و بهینه‌سازی کارایی مصرف آب می‌باشند. در این پژوهش از مدل AquaCrop جهت شبیه‌سازی عملکرد برنج رقم طارم تحت مدیریت‌های مختلف زهکشی زیرزمینی و سطحی استفاده شد. داده‌های مورد نیاز از پایلوت زهکشی زیرزمینی اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی شده دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری در سال‌های زراعی ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ تهیه شد. برای کمی‌سازی و صحت‌سنجی اثرات مدیریت‌های مختلف آب بر عملکرد برنج، واسنجی، اعتبارسنجی و آنالیز حساسیت مدل براساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که مدل توانست پارامترهای مختلف را با دقت بالایی (d>۰/۹۱) شبیه‌سازی کند. در تیمارهای زهکشی زیرزمینی، دقت پیش‌بینی بسیار بالا بود. خطای شبیه‌سازی مدل در تیمار زهکشی سطحی بیشترین مقدار را داشت، به‌طوری که برای عملکرد، ۱۳ درصد و برای بیوماس ۲۷ درصد به‌دست آمد. متوسط مقدار ریشه میانگین مربعات خطا در شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج، ۱۹۱/۵ و برای بیوماس برابر ۷۴۵/۸ کیلوگرم بر هکتار به‌دست آمد. یافته‌های این پژوهش، کارایی مناسب مدل AquaCrop در شبیه‌سازی فرایند رشد و تاثیر زهکشی سطحی و زیرزمینی بر عملکرد برنج را تایید می‌کند و می‌توان از این مدل جهت بهبود مدیریت آبیاری و زهکشی در اراضی شالیزاری استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: زهکشی اراضی شالیزاری، عملکرد دانه، مدیریت آبیاری، مدل AquaCrop.

۱- کارشناس آبیاری و دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران، ساری، بلوار طالقانی. خیابان مهیار، تلفن تماس: ۰۹۱۱۳۵۲۸۷۸۰ پست الکترونیکی: zabihi.ab@gmail.com
۲- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، تلفن تماس: ۰۹۱۱۹۲۶۲۵۹۸
پست الکترونیکی abdullahdarzi@yahoo.com (مسئول مکاتبه)
۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، تلفن تماس: ۰۹۱۱۳۵۲۱۶۵۴
پست الکترونیکی: khoshravesh_m24@yahoo.com

مقدمه

برنج غذای اصلی نیمی از مردم جهان است و بعد از گندم، بیشترین سطح زیر کشت را در جهان داراست (جواهردشتی و اصفهانی، ۱۳۸۱). وسعت اراضی شالیزاری ایران نزدیک به ۶۴۰ هزار هکتار می‌باشد که بیش از ۷۵ درصد آن در دو استان شمالی گیلان و مازندران قرار دارد و بیش از ۸۰ درصد برنج تولیدی کشور، از این اراضی به‌دست می‌آید (جواهردشتی و اصفهانی، ۱۳۸۱). بیشترین سطح زیرکشت برنج کشور در استان مازندران قرار دارد، به‌طوری‌که نزدیک به ۲۱۰ هزار هکتار از ۴۷۰ هزار هکتار سطح زیر کشت این استان، به شالیزارهای برنج اختصاص دارد (بانک کشاورزی، ۱۳۸۸).

آب مهم‌ترین عامل برای تولید پایدار در مناطق برنج‌خیز است. تقریبا ۷۵ درصد برنج جهان (Carmelita et al, 2011) از شالیزارهای فاریاب تولید می‌شود که نزدیک به ۵۰ درصد کل شالیزارهای دنیا (Katoh et al, 2003) را تشکیل می‌دهند. نیاز آبی برنج از سایر غلات بیشتر می‌باشد و مقدار آن تابع رقم، مرحله رشد، طول دوره رشد، بافت خاک و حتی روش کاشت و شرایط آب و هوایی است. این در حالی است که کمبود منابع آبی و پایین بودن راندمان آبیاری در مزارع برنج، استفاده بهینه و افزایش بهره‌وری از منابع موجود را ضروری می‌نماید.

علی‌رغم اینکه برنج غالبا به‌صورت غرقاب کشت می‌شود، کنترل آب مهمترین عملیات مدیریتی است که نقش تعیین کننده‌ای در میزان سودمندی سایر نهاده‌های تولید (مواد غذایی، آفت‌کش، علف‌کش و ...) در کشت برنج دارد (ماسانه-سیزی، ۲۰۰۴؛ Masanneh-Ceesay, 2004). نتایج تحقیقات مختلف نشان داد که زهکشی میان‌فصل به‌عنوان یکی از روش‌های مدیریت آب در اراضی شالیزاری، نقش مهمی در افزایش عملکرد برنج (درزی و همکاران، ۱۳۹۱)، افزایش کارایی مصرف نیتروژن (درزی‌نفت‌چالی و شاهنظری، ۲۰۱۴؛ Darzi-Naftchali and Shahnazari, 2014) و کاهش انتشار گاز متان در طول فصل کشت برنج دارد. به‌طور معمول، این نوع زهکشی حدود ۲۵ روز پس از نشاکاری انجام می‌شود. با توجه به اهمیت فراوان مدیریت زهکشی در کشت برنج، در سال‌های اخیر تجهیز شالیزارهای یکپارچه‌سازی شده به زهکشی زیرزمینی مورد توجه سیاست‌گذاران قرار گرفته است تا ضمن افزایش کارایی سرمایه‌گذاری‌های انجام شده برای تجهیز و نوسازی اراضی شالیزاری، زمینه تولید پایدار در این اراضی فراهم شود.

اتخاذ تدابیر متناسب با این تغییرات ساختاری در اراضی شالیزاری، مستلزم تغییراتی در برنامه‌های بهره‌برداری موجود می‌باشد. برنامه‌ریزی بهینه آبیاری یا مدیریت مناسب آب صرفا بر اساس آزمایش‌های مزرعه‌ای دشوار، زمان‌بر و پر هزینه است. برای ارزیابی دقیق عملکرد گیاهان زراعی تحت مدیریت‌های مختلف آب، مدل‌های شبیه‌سازی رشد گیاه می‌توانند ابزارهای با ارزشی باشند. به تازگی مدل AquaCrop توسط فائو جهت تجزیه و تحلیل سناریوهای مختلف برنامه‌ریزی و به‌عنوان یک ابزار پشتیبانی در تصمیم‌گیری توسعه یافته است. این مدل برنامه‌ای ساده و دقیق است که نسبت به مدل‌های شبیه‌ساز دیگر، پارامترها و داده‌های ورودی کمتری برای شبیه‌سازی واکنش گیاه به آب احتیاج دارد و برای اغلب محصولات گیاهی و زراعی اصلی در سراسر جهان قابل استفاده است (Steduto et al, 2009). این مدل می‌تواند عملکرد محصول، نیاز آبی گیاه و کارآیی مصرف آب گیاه را تحت شرایط مختلف از جمله کم‌آبیاری شبیه‌سازی کند.

اندرزیان و همکاران (۲۰۱۱) گزارش کردند که این مدل توانست، میزان آب خاک ناحیه ریشه، عملکرد و ماده خشک گندم را با تفاوت ۱۰ درصد نسبت به مقادیر واقعی آن‌ها برآورد کند (Andarzian et al, 2011). علیزاده و همکاران (۱۳۸۹)، نشان دادند که برای دور آبیاری ۷ روزه، مدل در پیش‌بینی مقدار عملکرد دانه، تبخیر- تعرق گیاهی و کارایی مصرف آب، قابلیت خوبی داشت، اما کارایی مدل در پیش‌بینی این عوامل در دور آبیاری ۱۴ روزه کمتر بود. تودرویک و همکاران (۲۰۰۹) به مقایسه سه مدل AquaCrop، CropSyst و WOFOST در شبیه‌سازی رشد و توسعه آفتابگردان تحت رژیم‌های آبی متفاوت در جنوب ایتالیا پرداختند. نتایج این طرح، تفاوت

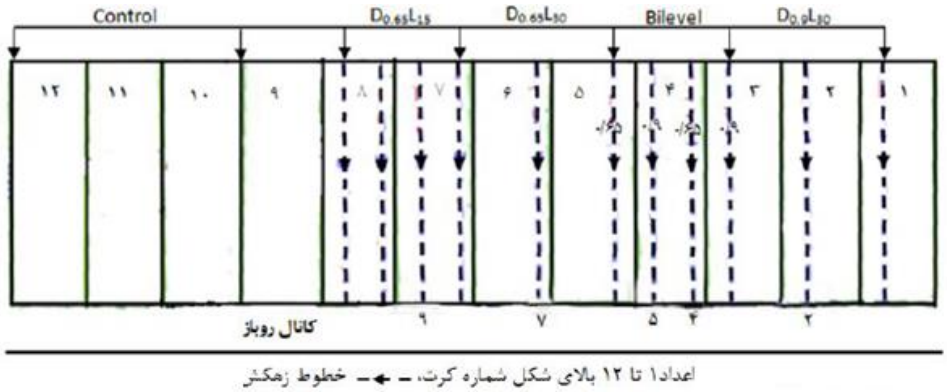
قابل توجهی بین نتایج شبیه‌سازی این سه مدل نشان داد. اما نهایتا مدل AquaCrop به‌دلیل پارامترهای ورودی کمتر، در شرایطی که اطلاعات کمتری در دسترس باشد و همچنین دقت بیشتر شبیه‌سازی نسبت به دو مدل دیگر، توصیه شد (Todorovic et al, 2009). پیرمرادیان و مینایی (۱۳۸۹) نشان دادند که مدل AquaCrop توانست مقدار عملکرد برنج را تحت مدیریت سنتی آبیاری با خطای چهار درصد شبیه‌سازی کند. با توجه به پژوهش‌های قبلی، تاکنون مطالعه‌ای در مورد شبیه‌سازی عملکرد گیاه برنج تحت مدیریت زهکشی میان‌فصل در شالیزارهای دارای زهکشی زیرزمینی با استفاده از مدل AquaCrop صورت نگرفته است. هدف از این پژوهش، مقایسه کارایی مدل AquaCrop برای پیش‌بینی عملکرد و بیوماس برنج تحت شرایط اعمال زهکشی میان‌فصل از طریق سیستم‌های مختلف زهکشی زیرزمینی و سطحی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

آزمایش‌های مزرعه‌ای در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ در پایلوت زهکشی زیرزمینی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری انجام شد. عرض و طول جغرافیایی منطقه به‌ترتیب ۳۶/۳۹ درجه شمالی و ۵۳/۰۴ درجه شرقی و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵- متر است. متوسط بارندگی و دمای هوای منطقه به‌ترتیب ۶۱۶ میلی‌متر و ۱۷/۳ درجه سانتی‌گراد است. اقلیم منطقه با روش دومارتن از نوع مرطوب تعیین شد.

در اراضی مورد مطالعه، سه سیستم زهکشی زیرزمینی معمولی متشکل از عمق ۰/۹ متر با فاصله ۳۰ متر ($D_{0.9}L_{30}$) با سه خط زهکش، عمق ۰/۶۵ متر با فاصله ۱۵ متر ($D_{0.65}L_{15}$) با چهار خط زهکش و عمق ۰/۶۵ متر با فاصله ۳۰ متر ($D_{0.65}L_{30}$) با سه خط زهکش و یک سیستم زهکشی زیرزمینی دوعمقی (Bilevel) متشکل از چهار خط زهکش به فاصله ۱۵ متر با اعماق ۰/۶۵ و ۰/۹ متر به‌صورت یک در میان نصب شد. فاصله زهکش‌ها با توجه به متوسط فواصل زهکش زیرزمینی محاسبه شده به‌وسیله روابط ماندگار و غیرماندگار زهکشی، تحقیقات انجام شده در برخی کشورها (اوگینو و اوتا، ۲۰۰۷؛ Ogino and Ota, 2007) و با توجه به ساختار کرت‌های شالیزارهای یکپارچه‌سازی شده، برابر ۱۵ و ۳۰ متر در نظر گرفته شد.

طول کلیه خطوط زهکش، ۱۰۰ متر و جنس لوله‌ها پی‌وی‌سی موجدار با قطر ۱۰۰ میلی‌متر بود که با شیب ۰/۲ درصد نصب شدند. از مواد معدنی (شن و ماسه دانه‌بندی شده) به‌عنوان پوشش اطراف لوله‌های زهکش استفاده شد. شماتیک مزرعه مورد مطالعه و سیستم‌های مختلف زهکشی در شکل (۱) قابل مشاهده است. زه‌آب کلیه خطوط زهکش به درون یک کانال روباز به عمق ۱/۲ متر تخلیه می‌شد. کانال مذکور تنها زهکش اراضی مورد مطالعه است که در زمان اجرای عملیات تجهیز و نوسازی، به‌عنوان زهکش سطحی حفر شد. برای تعیین تاثیر زهکش سطحی، یکی از کرت‌های فاقد زهکش زیرزمینی (کرت ۱۰) به‌عنوان کرت سطحی یا شاهد (Control) در نظر گرفته شد.



شکل (۱): آرایش سیستم‌های زهکشی در مزرعه آزمایشی و موقعیت نصب تجهیزات مختلف

در طول هر دو فصل کشت، دو بار زهکشی انجام شد. اولین بار، ۲۵ روز پس از نشاکاری برای انجام زهکشی میان‌فصل، آبیاری در کلیه تیمارها قطع و با برداشتن درپوش لوله‌های زهکش امکان تخلیه زه‌آب فراهم شد. این مرحله از زهکشی تا ظهور ترک‌های کوچک سطحی (به مدت یک هفته) ادامه یافت و به دنبال ظاهر شدن ترک‌های مذکور، مجددا عملیات آبیاری در کلیه تیمارها آغاز شد. برای انجام زهکشی پایان فصل، دو هفته قبل از برداشت، آبیاری در کلیه تیمارها قطع و زهکشی تا زمان برداشت ادامه یافت. در طول مدت زهکشی میان فصل، عمق سطح ایستابی در کلیه چاهک‌های مشاهده‌ای به‌صورت روزانه اندازه‌گیری شد. مصرف کود اوره تنها یک‌بار در ابتدای فصل کشت، به مقدار ۹۰ کیلوگرم در هکتار، به صورت سرک انجام شد.

مدل AquaCrop

AquaCrop مدلی است که جهت بررسی کارایی مصرف آب گیاه، توسط بخش آب و خاک سازمان خواروبار جهانی (FAO) با تجدید نظر در نشریه شماره ۳۳ سازمان FAO طراحی شد. این مدل از معادله پیشین دورنباس و همکاران (۱۹۷۹) با تفکیک نمودن ET_a به تبخیر از سطح خاک (E_s) و تعرق (T_a) و مجزا نمودن عملکرد نهایی (Y) به ماده خشک (B) و شاخص برداشت توسعه یافته است. جدا نمودن ET_a به E_s و T_a سبب می‌شود که بخش غیر موثر آب در تولید محصول (تبخیر) در نظر گرفته نشود (Doorenbos et al, 1979). این موضوع به‌ویژه زمانی که هنوز پوشش گیاهی تکمیل نشده، حایز اهمیت است. پیچیدگی پاسخ‌های گیاه به کمبود آب باعث شده تا کاربران جهت ارزیابی پاسخ محصول به استفاده از توابع تولید تجربی به عنوان کاربردی‌ترین گزینه روی آورند. در بین این روش‌های تجربی، نشریه ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو یک منبع مهم برای تعیین پاسخ عملکرد به آب در مزارع، سبزی‌کاری‌ها و درختان محسوب می‌شود. معادله ارایه شده توسط فائو به صورت زیر است:

$$\left(\frac{Y_m - Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(\frac{ET_m - ET_a}{ET_m}\right) \qquad (۱)$$

که در آن Y_m و Y_a، به‌ترتیب عملکرد حداکثر و واقعی محصول، ET_m و ET_a به‌ترتیب تبخیر-تعرق حداکثر و واقعی گیاه و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی در تبخیر- تعرق است. اگر چه مدل Aqua Crop مبتنی بر فرایندهای بیوفیزیکی پیچیده بنا نهاده شد، اما نیاز به پارامترهای ورودی کمی دارد (کیو و همکارا، ۲۰۰۶؛ Kuo et al, 2006). ورودی‌های مدل شامل موارد زیر می‌باشد.

داده‌های اقلیمی

متغیرهای ورودی هوا برای اجرای مدل عبارتند از: دمای حداکثر و حداقل روزانه، بارش روزانه، رطوبت نسبی حداکثر و حداقل، سرعت باد، ساعات آفتابی و میانگین سالانه غلظت CO_2 اتمسفر. به‌منظور تامین اطلاعات اقلیمی مدل، ابتدا داده‌های هواشناسی مربوط به دوره رشد برنج در سال‌های انجام آزمایش، دسته‌بندی و به نرم‌افزار EToCalculator که با مدل AquaCrop پیوند دارد، داده شد و تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش فائو پنمن مانتیث (آلن و همکاران، ۱۹۹۸؛ Allen et al, 1998) برآورد شد.

داده‌های خاک

خصوصیات هیدرولیکی خاک شامل هدایت هیدرولیکی اشباع (K_{sat})، و مقدار رطوبت حجمی خاک در نقطه اشباع (θ_{sat})، ظرفیت مزرعه (θ_{fc}) و پژمردگی دایم (θ_{wp}) می‌باشند. خلاصه‌ای از خواص فیزیکی خاک مزرعه مورد مطالعه در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

عمق (سانتی‌متر)	بافت خاک	θ_{fc} (%)	θ_{wp} (%)	K_{sat} (سانتی‌متر بر روز)
۰-۳۰	رسی سیلتی	۵۳/۹	۳۰	۲۵/۶
۳۰-۶۰	رسی سیلتی	۵۱/۷	۲۴/۲	۸/۱
۶۰-۹۰	رسی سیلتی	۵۱/۴	۲۱/۸	۲۰/۷
۹۰-۱۲۰	رسی سیلتی	۴۶/۵	۲۳/۱	۱۶/۳
۱۲۰-۱۵۰	رسی سیلتی	۴۷/۸	۲۵/۳	۱۰/۹
۱۵۰-۲۰۰	رسی	۴۷/۴	۱۷/۹	۸/۳

داده‌های گیاه

در مدل AquaCrop سیستم گیاهی از پنج جزء تشکیل می‌شود که شامل پاسخ‌های دینامیک فنولوژی، کانوپی، عمق ریشه‌زنی، تولید ماده خشک و عملکرد اقتصادی است. در این پژوهش، شبیه‌سازی مقدار عملکرد دانه و بیوماس برنج رقم طارم محلی در طول فصل کشت تحت تیمارهای مختلف زهکشی زیرزمینی و سطحی با استفاده از مدل AquaCrop بررسی شد.

آنالیز داده‌ها

واسنجی و صحت‌سنجی مدل با استفاده از شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب راندمان (E) و شاخص سازگاری (d) انجام شد.

در این روابط، RMSE مقادیر کلی یا میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل می‌باشد. هر چه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، عملکرد شبیه‌سازی مدل بهتر است. ضریب E بیانگر نسبت انحراف مقادیر شبیه‌سازی شده از مقادیر اندازه‌گیری شده به انحراف مقادیر اندازه‌گیری شده از مقادیر میانگین می‌باشد. هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، مدل کاراتر است. ضریب d نشان‌دهنده سازگاری روند شبیه‌سازی عملکرد است و هر چه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، دقت شبیه‌سازی بالاتر است.

نتایج و بحث

آنالیز حساسیت

به‌منظور آنالیز حساسیت مدل، دامنه تغییرات ضریب حساسیت به سه کلاس حساسیت زیاد، متوسط و کم طبقه‌بندی شد. اگر پاسخ مدل به تغییر در پارامترها بیشتر از ۱/۵ باشد، دارای حساسیت زیاد است. پاسخ مدل به تغییر در پارامترهای ورودی بین ۰/۳ تا ۱/۵ و یا کمتر از ۰/۳، به‌ترتیب نشان‌دهنده حساسیت متوسط و کم می‌باشد (Geerts et al, 2009). مقادیر حساسیت محاسبه شده برای تعدادی از پارامترهای ورودی مدل AquaCrop در جدول (۲) ارایه شد. حساسیت مدل AquaCrop نسبت به تغییرات بهره‌وری آب نرمال شده، زمان از کاشت تا پیری پوشش گیاهی، زمان تا رسیدن به ماکزیمم پوشش گیاهی و رطوبت اولیه خاک بیشتر از سایر پارامترها است. بنابراین بایستی این داده‌ها با دقت بیشتری اندازه‌گیری شوند زیرا در غیر این صورت، خطای قابل‌توجهی در نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل به‌وجود می‌آید. گیرتز و همکاران (۲۰۰۹) در شبیه‌سازی گیاه کوانیا در تیمارهای مختلف کم آبیاری به نتایج مشابهی دست یافتند (Geerts et al, 2009).

جدول (۲): ضریب حساسیت پارامترهای ورودی مدل AquaCrop

پارامترهای ورودی مدل	مقدار حساسیت در حالت ۵۰+٪	مقدار حساسیت در حالت ۵۰-٪	درجه حساسیت
ضریب گیاهی	۰/۶۶	۰/۹۹	متوسط
ضریب افزایش سطح سایه‌انداز	۰/۴۲	۰/۵۶	متوسط
بهره‌وری آب نرمال شده	۰/۹۴	۱/۰۱	زیاد
زمان از کاشت تا پیری پوشش گیاهی	-۲/۲۹	۰/۴۳	متوسط-زیاد
عمق ریشه	۰/۰۲	۰/۱۷	کم
فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها	۰/۰۱	۰/۰۰۶	کم
شاخص برداشت	۰/۹۹	۱/۰۰	متوسط
فاکتور شکل تابع تنش آب	۰/۰۱	۰/۰۰۹	کم
زمان تا رسیدن به ماکزیمم پوشش گیاهی	-۱/۷۲	-۰/۳۷	متوسط-زیاد
ماکزیمم پوشش گیاهی	۰/۵۶	۰/۶۶	متوسط
پوشش گیاهی اولیه	۰/۰۸	۰/۰۷	کم
فاکتور تخلیه آب خاک برای کنترل بسته شدن روزنه‌ها	۰/۰۱	۰/۰۲	کم
رطوبت اولیه خاک	-۷/۷۲	۲/۱۲	زیاد
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	۰/۰۱	۰/۰۲	کم

واسنجی مدل

برای واسنجی مدل AquaCrop از داده‌های سال ۱۳۹۰ استفاده شد. پارامترهای اندازه‌گیری شده گیاهی مربوط به این مزرعه در جدول (۳) آمده است. مقادیر پارامترهای واسنجی‌شده مدل AquaCrop برای گیاه برنج تحت مدیریت‌های مختلف زهکشی زیرزمینی و سطحی در جدول (۴) ارایه شد. مقادیر این پارامترها با سعی و خطا طوری تعیین شدند که نتایج شبیه‌سازی مدل، کمترین خطا یا بیشترین سازگاری را با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه داشته باشند.

جدول (۳): مقادیر پارامترهای گیاهی مورد استفاده برای واسنجی مدل

تاریخ نشاکاری	تراکم کشت (بوته در هکتار)	خوشه‌دهی (روز)	شروع پیری پوشش گیاهی (روز)	رسیدگی فیزیولوژیکی (روز)	حداکثر عمق ریشه (متر)
۳۰ تیر	۱۶۰۰۰۰	۵۸	۶۸	۸۲	۰/۳

جدول (۴): مقادیر ضرایب واسنجی شده مدل AquaCrop

عنوان پارامتر	مقدار پارامتر	واحد
دمای پایه	۱۰	°C
دمای ماکزیمم	۴۰	°C
پوشش گیاهی اولیه	۰/۹۶	%
ضریب افزایش پوشش گیاهی	۱۲/۳	%/day
پوشش گیاهی ماکزیمم	۹۵	%
ضریب کاهش پوشش گیاهی	۹/۳	%/day
فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها (حد بالا)	۰	-
فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها (حد پایین)	۰/۴	-
فاکتور شکل تابع تنش آب	۳	-
فاکتور تخلیه آب خاک برای کنترل بسته شدن روزنه‌ها	۰/۵	-
فاکتور تخلیه آب خاک برای کنترل شروع پیری پوشش گیاهی	۰/۵۵	-
شاخص بهره‌وری آب	۱۹	gr/m^2
شاخص برداشت	۳۸	%

میانگین عملکرد دانه اندازه‌گیری شده برابر ۳۴۵۷ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. بیشترین مقدار عملکرد دانه مربوط به تیمار Bilevel و کمترین مقدار آن مربوط به تیمار Control بود. همچنین عملکرد دانه در کلیه تیمارهای زهکشی زیرزمینی، اختلاف معنی‌داری با مقدار متناظر در تیمار Control داشت. به‌طور متوسط، عملکرد دانه در تیمارهای Bilevel، $D_{0.9}L_{30}$، $D_{065}L_{30}$ و $D_{0.65}L_{15}$ به ترتیب ۶۱، ۴۷، ۳۳ و ۱۴ درصد بیشتر از عملکرد دانه در تیمار Control بود.

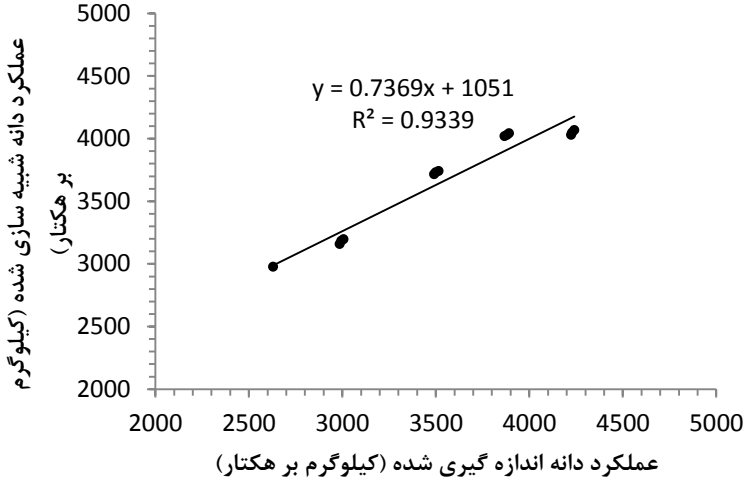
جدول (۵) نشان می‌دهد که خطای شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس به غیر از تیمار Control، برای بقیه تیمارها بسیار کم می‌باشد. خطای شبیه‌سازی برای تیمارهای زهکشی زیرزمینی، کمتر از ۷ درصد بود ولی برای تیمار زهکشی سطحی ۲۱ درصد به دست آمد. به نظر می‌رسد که بهتر بودن مقدار عملکرد دانه و بیوماس در تیمارهای زهکشی زیرزمینی نسبت به زهکشی سطحی در نتیجه شرایط تهویه بهتر در کرت‌های تحت پوشش سیستم‌های زهکشی زیرزمینی در زمان زهکشی میان فصل باشد. بررسی تغییرات عمق سطح ایستابی در چاهک‌های مشاهده‌ای واقع در نقطه میانی فاصله بین زهکش‌ها در زمان زهکشی میان فصل، نشان‌دهنده افت سریع‌تر سطح ایستابی در کرت‌های دارای زهکش زیرزمینی در مقایسه با کرت‌های متاثر از زهکش سطحی است. افت سطح ایستابی در تیمارهای زهکشی زیرزمینی ضمن کمک به دفع مواد سمی از قبیل سولفیدها و اسیدهای آلی از ناحیه ریشه گیاه، اکسیژن کافی را در اختیار ریشه برنج قرار داده و ریشه‌زنی و در نتیجه جذب مواد غذایی را بهبود خواهد داد.

شرایط بهتر رشد گیاه برنج در کرت‌های تحت پوشش سیستم‌های زهکشی زیرزمینی نسبت به زهکشی سطحی، باعث شد که مدل AquaCrop، پیش‌بینی دقیق‌تری از عملکرد برنج داشته باشد. کاهش شرایط تهویه‌ای در پروفیل خاک باعث افزایش خطای شبیه‌سازی در تیمارهایی شد که سطح ایستابی آن‌ها نزدیک به سطح زمین بود. به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس در حد معقول و مناسب بود به طوری‌که متوسط خطای شبیه‌سازی عملکرد و بیوماس به‌ترتیب ۶/۷ و ۶/۷۵ درصد به‌دست آمد. میرراشد و همکاران (۱۳۹۲) به شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج در تیمارهای مختلف آب آبیاری و نیتروژن پرداختند و متوسط خطای شبیه‌سازی را ۵ درصد گزارش کردند. استدوتو و همکاران (۲۰۰۹) ماکزیمم خطای عملکرد محصول شبیه‌سازی شده ذرت را در تیمارهای مختلف کم آبیاری، ۲۴ درصد برآورد کردند (Steduto et al, 2009). هسیا و همکاران (۲۰۰۹) ماکزیمم خطای شبیه‌سازی ۲۳ درصد را برای عملکرد ذرت در تیمارهای مختلف کم آبیاری گزارش کردند (Hsiao et al, 2009). فراهانی و همکاران (۲۰۰۹) به واسنجی مدل AquaCrop و سپس آزمایش مدل تحت آبیاری کامل و ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آبیاری کامل برای پنبه پرداختند. نتایج این طرح میزان خطای حداکثر ۱۰ درصد را بین مقادیر شبیه‌سازی شده و واقعی در حالت‌های آبیاری کامل و ۴۰ درصد نشان داد اما در ۶۰ و ۸۰ درصد کامل آبیاری، میزان خطا تا ۳۲ درصد افزایش یافت (Farahani et al, 2009). آرایا و همکاران (۲۰۱۰) خطای ۵ تا ۱۵ درصد را برای شبیه‌سازی عملکرد جو در تیمارهای مختلف کم آبیاری با استفاده از مدل AquaCrop گزارش کردند (Araya et al, 2010).

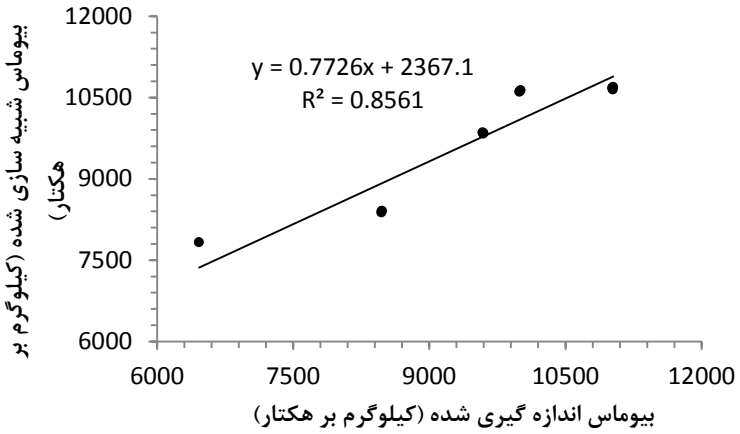
جدول (۵): مقادیر بیوماس و عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای مرحله واسنجی

تیمار	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)			بیوماس (کیلوگرم بر هکتار)		
	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	خطا (٪)	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	خطا (٪)
$D_{0.9}L_{30}$	۳۸۹۲	۴۰۴۰	۳/۸۰	۱۰۰۰۹/۴	۱۰۶۳۳	۶/۲۲
Bilevel	۴۲۴۱	۴۰۶۶	-۴/۱۲	۱۱۰۲۸/۸	۱۰۶۸۹	-۳/۰۸
$D_{0.65}L_{30}$	۳۵۱۶	۳۷۳۹	۶/۳۴	۹۶۰۰/۲۲	۹۸۴۰	۲/۴۹
$D_{0.65}L_{15}$	۳۰۰۸	۳۱۹۵	۶/۲۱	۸۴۸۳/۸۸	۸۴۰۷	-۰/۹۰
Control	۲۶۳۰	۲۹۷۴	۱۳/۰۷	۶۴۶۳/۳۳	۷۸۲۷	۲۱/۰۹

کل‌های ۱ و ۲ مقایسه مقادیر عملکرد دانه و بیوماس مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop را برای مرحله واسنجی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل توانست با همبستگی بالایی مقدار عملکرد دانه و بیوماس را شبیه‌سازی کند. میرراشد و همکاران (۱۳۹۲) متوسط ضریب همبستگی عملکرد دانه برنج شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل AquaCrop را برای تیمارهای مختلف آب آبیاری و نیتروژن، ۸۵ درصد گزارش کردند.



شکل (۱): مقایسه مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop برای مرحله واسنجی



شکل (۲): مقایسه مقادیر بیوماس اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop برای مرحله واسنجی

برای بررسی نتایج حاصل از مدل با نتایج مشاهده‌ای در سطح مزرعه و صحت‌یابی نتایج و ارزیابی قابل اعتماد بودن مدل، از یکسری شاخص‌های ارزیابی مزرعه‌ای استفاده شد. نتایج شاخص‌های آماری جهت ارزیابی مدل AquaCrop برای مرحله واسنجی در جدول (۶) ارایه شد. نتایج نشان داد که رابطه خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مقدار کم RMSE وجود دارد. مقدار شاخص سازگاری (d) بسیار به یک نزدیک است. بیشترین مقدار شاخص سازگاری برای عملکرد دانه به‌دست آمد. شاخص آماری E نیز برای پارامترهای اندازه‌گیری شده در حد معقول می‌باشد که نشان‌دهنده کارایی قابل قبول مدل در شبیه‌سازی پارامترهای قابل پیش‌بینی است. نتایج RMSE نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی پارامترهای عملکرد برنج است.

جدول (۶): ارزیابی کارایی مدل AquaCrop برای مرحله واسنجی

پارامتر	شاخص‌های ارزیابی		
	RMSE	E	d
عملکرد دانه	۲۲۵/۷	۰/۸۵	۰/۹۵
بیوماس	۶۹۳/۰	۰/۸۰	۰/۹۳

صحت‌سنجی مدل

صحت‌سنجی مدل AquaCrop با داده‌های اندازه‌گیری شده سال ۱۳۹۱ انجام شد (جدول ۷). برای این کار با پارامترهای واسنجی شده در مرحله قبل، مدل اجرا و نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد.

جدول (۷): مقادیر پارامترهای گیاهی مورد استفاده برای صحت‌سنجی مدل

تاریخ نشاکاری	تراکم کشت (بوته در هکتار)	خوشه‌دهی (روز)	شروع پیری پوشش گیاهی (روز)	رسیدگی فیزیولوژیکی (روز)	حداکثر عمق ریشه (متر)
۲۸ اردیبهشت	۱۶۰۰۰۰	۶۰	۷۱	۸۵	۰/۳

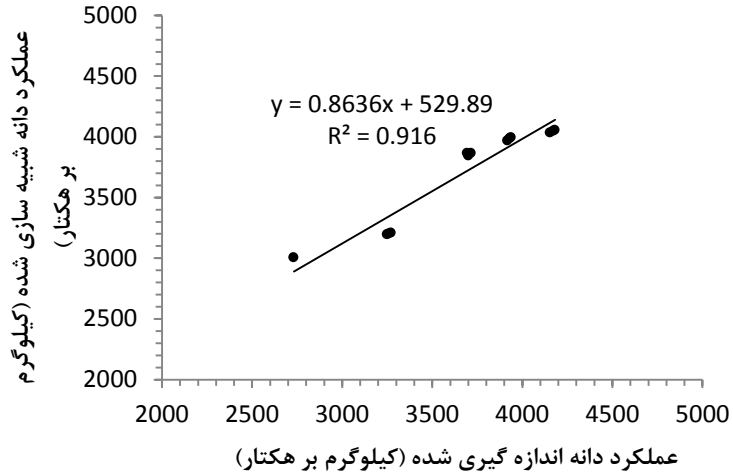
میانگین عملکرد اندازه‌گیری شده برابر ۳۵۶۷ کیلوگرم در هکتار به‌دست آمد. به‌طور متوسط، عملکرد دانه در تیمارهای Bilevel، $D_{0.9}L_{30}$، $D_{065}L_{30}$ و $D_{0.65}L_{15}$ به ترتیب ۵۳، ۴۴، ۳۵ و ۱۹ درصد بیشتر از عملکرد دانه در تیمار Control بود.

جدول (۸) نشان می‌دهد که خطای شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس به غیر از تیمار Control، برای بقیه تیمارها بسیار کم می‌باشد. خطای شبیه‌سازی برای تیمارهای زهکشی زیرزمینی، کمتر از ۵ درصد بود ولی برای تیمار زهکشی سطحی ۲۷ درصد به‌دست آمد. به‌طور کلی نتایج شبیه‌سازی عملکرد دانه و بیوماس در حد مناسب بود به طوری‌که متوسط خطای شبیه‌سازی عملکرد و بیوماس به‌ترتیب ۴/۰۸ و ۷/۳۲ درصد به‌دست آمد.

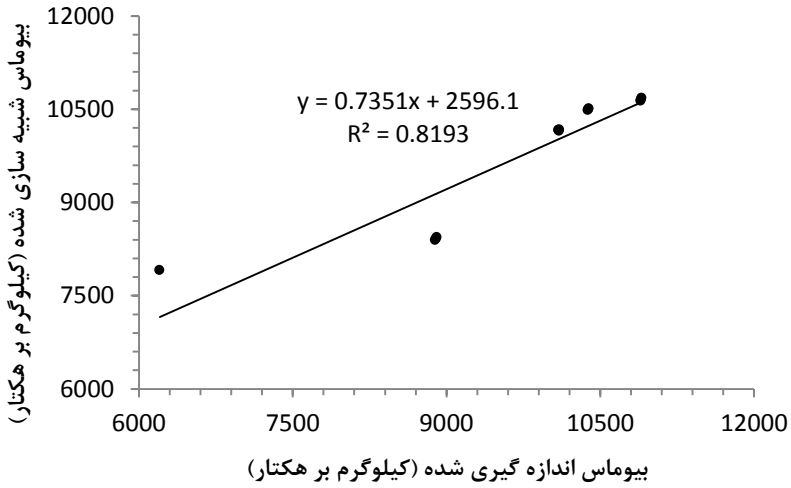
جدول (۸): مقادیر بیوماس و عملکرد اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای مرحله صحت‌سنجی

تیمار	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)			بیوماس (کیلوگرم بر هکتار)		
	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	خطا (٪)	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	خطا (٪)
$D_{0.9}L_{30}$	۳۹۳۸	۳۹۹۴	۱/۴۲	۱۰۳۸۷/۸	۱۰۵۱۱	۱/۱۸
Bilevel	۴۱۸۱	۴۰۵۵	-۳/۰۱	۱۰۹۰۲/۸	۱۰۶۸۰	-۲/۰۴
$D_{0.65}L_{30}$	۳۷۱۵	۳۸۶۵	۴/۰۳	۱۰۱۰۱/۵	۱۰۱۷۲	۰/۶۹
$D_{0.65}L_{15}$	۳۲۷۲	۳۲۰۸	-۱/۹۵	۸۹۰۴/۵	۸۴۴۱	-۵/۲۰
Control	۲۷۳۲	۳۰۰۶	۱۰/۰۲	۶۲۰۳	۷۹۱۱	۲۷/۵۳

شکل‌های ۳ و ۴ مقایسه مقادیر عملکرد دانه و بیوماس مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop را برای مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهند. مقدار ضریب همبستگی برای عملکرد دانه و بیوماس به‌ترتیب برابر ۰/۹۱ و ۰/۸۱ به‌دست آمد که نشان‌دهنده هم‌خوانی خوب با مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد.



شکل (۳): مقایسه مقادیر عملکرد دانه اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop برای مرحله صحت‌سنجی



شکل (۴): مقایسه مقادیر بیوماس اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل AquaCrop برای مرحله صحت‌سنجی

نتایج شاخص‌های آماری جهت ارزیابی مدل AquaCrop برای مرحله صحت‌سنجی در جدول (۹) ارایه شد. مقادیر شاخص‌های آماری پارامترهای عملکرد دانه و بیوماس، کارایی خوب مدل را نشان داد. به‌طور کلی نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل AquaCrop برای گیاه برنج حاکی از این است که این مدل عملکرد محصول را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌نماید. بدیهی است که عوامل مختلفی از جمله آفات و امراض و علف‌های هرز نیز بر عملکرد محصول تاثیر دارد، ولی مدل AquaCrop برای شبیه‌سازی، عامل‌های فوق را در نظر نمی‌گیرد. میرراشد و همکاران (۱۳۹۲) مقدار RMSE عملکرد برنج شبیه‌سازی شده مدل AquaCrop را برای تیمارهای مختلف آب آبیاری و نیتروژن، برای سال اول و دوم کشت به‌ترتیب ۳۵۶ و ۶۵۱ کیلوگرم در هکتار گزارش نمودند.

جدول (۹): ارزیابی کارایی مدل AquaCrop برای مرحله صحت‌سنجی

پارامتر	شاخص‌های ارزیابی		
	RMSE	E	d
عملکرد دانه	۱۵۷/۴	۰/۹۰	۰/۹۷
بیوماس	۷۹۸/۶	۰/۷۷	۰/۹۱

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر سه نوع سیستم زهکشی زیرزمینی معمولی متشکل از عمق ۰/۹ و فاصله ۳۰ متر، عمق ۰/۶۵ و فاصله ۱۵ متر و عمق ۰/۶۵ و فاصله ۳۰ متر و یک سیستم زهکشی زیرزمینی دوعمقی متشکل از ۴ خط زهکش به فاصله ۱۵ متر با اعماق ۰/۶۵ و ۰/۹ متر به‌صورت یک در میان، با اثر سیستم زهکشی سطحی بر عملکرد برنج در اراضی شالیزاری و شبیه‌سازی آن با استفاده از مدل AquaCrop مورد مقایسه قرار گرفت. هدف فائو از توسعه مدل AquaCrop، فراهم کردن ابزاری برای کمک به کشاورزان و مدیران جهت انتخاب مدیریت بهینه آبیاری و زهکشی در سیستم‌های مختلف کشاورزی موجود در سراسر جهان است. بنابراین ارزیابی و اعتبارسنجی مدل به‌ویژه برای محصولات استراتژیک ضروری است. بهبود وضعیت تهویه و تخلیه سریع‌تر آب اضافی خاک در زمان زهکشی میان‌فصل سبب افزایش قابل توجه عملکرد برنج در تیمارهای زهکشی زیرزمینی شد. نتایج شبیه‌سازی مدل AquaCrop نشان داد که این مدل قادر است مقدار عملکرد برنج را تحت مدیریت‌های مختلف زهکشی، با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. با کمک این مدل و شبیه‌سازی سناریوهای مدیریتی، می‌توان از تکرار آزمایش‌ها و افزایش هزینه‌ها جلوگیری کرد. با توجه به این‌که مدل AquaCrop نسبت به مدل‌های مشابه نیاز به پارامترهای ورودی کمتری دارد، استفاده از این مدل در طرح‌های پژوهشی جهت پیش‌بینی عملکرد و تاثیر مدیریت‌های مختلف زهکشی سطحی و زیرزمینی بر مقدار محصول، توصیه می‌شود.

منابع

بانک کشاورزی (اداره کل مطالعات و بررسی‌های اقتصادی). ۱۳۸۸. خلاصه سیمای آب و هوا، اقلیم و منابع آب استان مازندران، ۱۱ صفحه.

پیرمرادیان، ن. و س. مینایی. ۱۳۸۹. بهره‌گیری از مدل AquaCrop جهت اصلاح مدیریت آبیاری در اراضی شالیزاری. سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، ۱۰ تا ۱۲ اسفند، دانشگاه شهید چمران اهواز.

جواهردشتی، م. وم. اصفهانی. ۱۳۸۱. برنج دیم. نشر علوم کشاورزی، ۱۲۸ صفحه.

درزی، ع.، س. م. میرلطیفی، ع. شاهنظری، ف. اجلالی و م. ح. مهدیان. ۱۳۹۱. تاثیر زهکشی سطحی و زیرزمینی بر عملکرد و اجزای عملکرد برنج در اراضی شالیزاری. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲۶ (۱): ۷۰-۶۱.

علیزاده، ح.، ب. نظری، م. پارسی‌نژاد، ه. رمضانی اعتدالی و ح. ر. جانباز. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج. ۲(۴): ۲۷۳-۲۸۳.

کیاء، ع. ۱۳۸۴. زهکشی زیرزمینی در اراضی شالیزاری. مرکز توسعه منابع انسانی کشاورزی هراز، ۲۲ صفحه.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. ۱۳۸۸. نشریه شماره ۲-۴۷۱، مبانی و ضوابط طراحی، تجهیز و نوسازی اراضی شالیزاری، جلد دوم، آبیاری، ۲۰۶ صفحه.

میرراشد، س. س.، ا. امیری و م. عاشوری. ۱۳۹۲. شبیه‌سازی عملکرد دانه برنج رقم بهار با استفاده از مدل AquaCrop. دومین کنگره ملی کشاورزی ارگانیک و مرسوم، ۳۰ تا ۳۱ مرداد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage, Paper No.56, FAO, Rome, Italy, 300 pp.

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

Carmelita, M., R. Alberto, R. Wassmann, T. Hirano, A. Miyata, R. Hatano, A. Kumar, A. Padre and M. Amante. 2011. Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. Agricultural Water Management, (98): 1417–1430.

Carter, C. E. and C. R. Camp. 1994. Drain spacing effects on water table control and sugarcane yields. Transactions of the ASAE, 37(5): 1509-1513.

Darzi, A. and A. Shahnazari. 2014. Influence of subsurface drainage on the productivity of poorly drained paddy fields. European Journal of Agronomy, (56): 1-8.

Doorenbos, J., A. H. Kassam, C. L. M. Bentvelsen, V. Branscheid, J. M. G. A. Plusje, M. Smith, G. A. Uittenbogard and H. K. Vanderwal. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage. Paper No. 33. FAO, Rome, Italy, 200 pp.

Geerts, S., D. Raes, M. Garcia, R. Miranda, J. A. Cusicanqui, C. Taboada, J. Mendoza, R. Huanca, A. Mamani, O. Condori, J. Mamani, B. Morales, V. Osco and P. Steduto. 2009. Simulating Yield Response of Quinoa to Water Availability with AquaCrop. Agronomy Journal, 101(3): 499–508.

Hsiao, T. C., L. Heng, P. Steduto, B. Roja-Lara, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop- The FAO model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. Agronomy Journal, 101: 448-459.

Katoh, M., A. Iwata, I. Shaku, Y. Nakajima, K. Matsuya and M. Kimura. 2003. Impact of water percolation on nutrient leaching from an irrigated paddy field in Japan. Soil Use and Management, (19): 298-304.

Kuo, Sh. F., B. J. Lin and H. J. Shieh. 2006. Estimation irrigation water requirements with derived crop coefficients for upland and paddy crops in ChiaNan Irrigation Association, Taiwan. Agricultural Water Management, 82: 433-451.

Masanneh-Ceesay, M. 2004. Management of rice production systems to increase productivity in the Gambia, West Africa. A Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, Pp: 159.

Ogino, Y. and S. Ota. 2007. The evolution of Japan’s rice field drainage and development of technology.Irrigation and Drainage, 56: 69–80.

Patel, N., P. Kumar, N. Sing. 2008. Performance evaluation of AquaCrop in simulating Potato yield under varying water availability condition. Indian Agricultural Research Institute, New Dehli- 110012, India.

Steduto, P., T. C. Hsiao, D. Raes and E. Fereres. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I Concepts and Underlying Principles. Agronomy Journal, 101: 426-437.

Todorovic M., R. Albrizio, L. Zivotic, M. Abi Saab, C. Stöckle and P. Steduto. 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. Agronomy Journal, 101:509-521.

Rice yield under surface and subsurface drainage managements and evaluation of AquaCrop model

Abolfazl Zabihi[1], Abdullah Darzi-Nafchali[2], Mojtaba Khoshravesh[3]

Abstract

The simulation models that quantify the effects of different amounts of water on crop yield are useful tools for water management at the farm level and optimizing water use efficiency. In this study, the AquaCrop model was used for simulating rice yield under different surface and subsurface drainage managements. Required data were obtained from subsurface drainage pilot of consolidated paddy fields of Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University during 2011and 2012 growing seasons. The calibration, validation and sensitivity analysis of the model was utilized to quantify and verify the effects of different water managements on rice yield using the measurements from field experiments. The model satisfactory (d> 0.91) simulated different parameters. The prediction accuracy was very high in the subsurface drainage treatments. The errors for grain yield and biomass simulations were, respectively, 13 % and 27 % for surface drainage treatment indicating the highest error under different drainage treatments. The average root mean square error for simulated grain yield and biomass was found to be 191.5 and 745.8 kg ha^{-1}, respectively. The results demonstrated that the AquaCrop model is reliable in simulating growth and yield of rice under subsurface and surface drainage systems and can be used to improve irrigation and drainage management in paddy fields.

Key words: Irrigation management, Drainage of paddy fields, Grain yield, AquaCrop model.

[1] Irrigation expert and MS Student of Irrigation and Drainage Engineering, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: zabihi.ab@gmail.com.

[2] Assistant professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: abdullahdarzi@yahoo.com.

[3] Assistant professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. Email: khoshravesh_m24@yahoo.com.