



آنالیز تأثیر تنش خشکی بر عملکرد، کارایی مصرف آب و شوری ناحیه ریشه برنج

ابوالفضل ذبیحی^۱، عبدالله درزی نفت‌چالی^{۲*}، مجتبی خوش‌روش^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۳/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۹۴/۱۲/۱۶

چکیده

با توجه به هزینه زیاد و زمان‌بر بودن آزمایش‌های مزرعه‌ای، مدل‌های شبیه‌سازی ابزارهای جایگزین مناسبی برای آنالیز اثرات گزینه‌های مختلف مدیریت آب می‌باشند. در این پژوهش، اثر تنش خشکی در شالیزارهای دارای سیستم‌های زهکشی سطحی و زیرزمینی با استفاده از مدل AquaCrop ارزیابی شد. با استفاده از مدل واسنجی شده، اثر آبیاری کامل (II) و اعمال تنش خشکی در دوره‌های ۱۶-۲۲ (I2)، ۲۳-۲۹ (I3)، ۲۰-۲۶ (I4)، ۳۷-۴۳ (I5) و ۴۴-۵۰ (I6) روز بعد از نشاکاری، بر عملکرد و کارایی مصرف آب برنج و شوری ناحیه ریشه بررسی شد. اعمال تنش در دوره‌های I2، I5 و I6، سبب کاهش قابل توجه عملکرد و زیست‌توده برنج در مقایسه با I1 شد. با نزدیک شدن به مرحله خوشه‌دهی، تنش خشکی باعث کاهش بیشتر عملکرد برنج شد به طوری که متوسط کاهش عملکرد دانه برنج در اثر تنش در دوره‌های I2 تا I4، ۵ درصد ولی در مراحل I5 و I6، ۱۵ درصد بود. در منطقه دارای سیستم زهکشی زیرزمینی دو عمقی (فاصله زهکشی ۱۵ متر و اعماق زهکش ۰/۶۵ و ۰/۹ متر)، مقدار آب مصرفی و کارایی مصرف آب در شرایط آبیاری کامل به ترتیب ۶۲۰/۴ میلی‌متر و ۰/۶۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود ولی تحت تنش خشکی در هفته سوم پس از نشاکاری، مقدار آنها به ترتیب ۵۲۹ میلی‌متر و ۰/۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. تنش خشکی سبب افزایش بیشتر شوری ناحیه ریشه برنج در تیمار زهکشی سطحی در مقایسه با تیمارهای زهکشی زیرزمینی شد. بر اساس نتایج، می‌توان از مدل AquaCrop برای تعیین مناسب‌ترین سیستم مدیریت آب کشت برنج از نظر میزان عملکرد محصول، کارایی مصرف آب و شوری ناحیه ریشه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تنش خشکی، زهکشی زیرزمینی، زهکشی سطحی، مدل AquaCrop، مدیریت آب.

مقدمه

غرقاب دائم صورت می‌گیرد، زیرا تهیه سیستم‌های مناسب آبیاری و کنترل مصنوعی آب آبیاری، آسان و عملی نیست. به‌علاوه، غرقاب کردن شالیزار می‌تواند در کاهش رشد علف‌هرز، تنظیم درجه حرارت خاک و جلوگیری از اثرات شدید حرارت، تثبیت ازت هوا و ایجاد شرایط مناسب برای رشد جلبک‌های سبز-آبی، در دسترس قرار گرفتن مواد غذایی از قبیل P، Fe، Mn و Si در مراحل اولیه رشد و بهبود فتوسنتز در برگ‌های پایین به‌علت انعکاس نور از سطح آب نقش مهمی ایفا کند (Javaherdashti and Esfahani, 2002).

آب مهم‌ترین عامل برای تولید پایدار در مناطق برنج‌خیز است. تقریباً ۷۵ درصد برنج جهان (Carmelita et al., 2011) از شالیزارهای فاریاب تولید می‌شود که نزدیک به ۵۰ درصد کل شالیزارهای دنیا (Kato et al., 2003) را تشکیل می‌دهند. نیاز آبی برنج از سایر غلات بیشتر است و مقدار آن تابع رقم، مرحله رشد، طول دوره رشد، بافت خاک و حتی روش کاشت و شرایط آب و هوایی است. با توجه به تنوع زیاد شرایط محیطی و ارقام مختلف برنج، یک روش استاندارد برای آبیاری وجود ندارد. لذا سوء مدیریت و یا ترس از خطر خشکی در طول فصل رشد، موجب افراط در استفاده از آب می‌شود. در شالیزارها معمولاً آبیاری به‌صورت

گارسیاویلا و همکاران (Garcia-Vila et al., 2009) در مطالعه بهینه‌سازی کم‌آبیاری برای گیاه پنبه نتیجه گرفتند که با استفاده از مدل AquaCrop می‌توان عملکرد محصول، بهره‌وری آب، ماده خشک و رشد پوشش تاجی گیاه را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد. فراهانی و همکاران (Farahani et al., 2009) به واسنجی مدل AquaCrop تحت آبیاری کامل و ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد آبیاری کامل برای پنبه در سوریه 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 آبیاری کامل، میزان خطا تا ۳۲ درصد افزایش یافت. پتل و همکاران (Patel et al., 2008) عملکرد پنبه در تیمارهای مختلف آبیاری را با استفاده از مدل AquaCrop شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که این مدل قابلیت بالایی در شبیه‌سازی عملکرد، تحت شرایط آبیاری کامل و سناریوهای مختلف کم‌آبیاری دارد. سالمی و همکاران (Salemi et al., 2011) با اعمال کم‌آبیاری روی گندم زمستانه در حوضه رودخانه گاوخونی در اصفهان و مقایسه آن با نتایج مدل AquaCrop، نتیجه گرفتند که مدل در شبیه‌سازی سطح سایه‌انداز، مقدار دانه و بهره‌وری آب عملکرد مناسبی داشت. اندرزیان و همکاران (Andarzian et al., 2011) 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.

علیزاده و همکاران (Alizadeh et al., 2010) نشان دادند که مدل AquaCrop برای دور آبیاری ۷ روزه، مقدار عملکرد دانه، تبخیر-تعرق و کارایی مصرف آب را با دقت بیشتری نسبت به دور آبیاری ۱۴ روزه پیش‌بینی کرد. تودوروویچ و همکاران (Todorovic et al., 2009) کارایی سه مدل AquaCrop، CropSyst و WOFOST را برای گیاه آفتابگردان تحت رژیم‌های مختلف آبی مقایسه کردند در نهایت مدل AquaCrop را به دلیل پارامترهای ورودی کمتر و دقت بیشتر، توصیه کردند. پیرمادیان و مینایی (Pirmoradian et al., 2010) نشان دادند که مدل AquaCrop توانست مقدار عملکرد برنج را تحت مدیریت سنتی آبیاری با خطای ۴ درصد شبیه‌سازی کند. سعادت‌ی و همکاران (Saadati et al., 2011) جهت شبیه‌سازی عملکرد برنج تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری در اقلیم

آبیاری شالیزار مهم‌ترین عملیاتی است که باید در زراعت برنج به‌دقت انجام شود. مقدار آب موردنیاز برای برنج به عوامل متعددی نظیر روش کاشت، ابعاد کرت، تراکم بوته، مقدار مصرف کود، نوع و بافت خاک، شرایط زهکشی و اقلیمی و اکولوژیکی و رقم بستگی دارد. بحرانی‌ترین مرحله از نظر نیاز آبی، حدود ۱۰ روز قبل از گلدهی تا هنگام گلدهی برنج می‌باشد. تنش خشکی موجب افزایش درصد عقیمی به-علت عدم توانایی دانه‌های گرده در نفوذ به تخمدان و کاهش عملکرد دانه می‌شود. از آنجاکه عقیمی پدیده‌ای غیرقابل برگشت است، تأمین آب پس از مرحله بحرانی بی‌تأثیر خواهد بود. تنش آب در مرحله رویشی نیز موجب کاهش ارتفاع گیاه، تعداد پنجه‌ها و سطح برگ می‌شود؛ اما در صورت تأمین آب و وجود زمان کافی تا گلدهی، گیاه خود را ترمیم خواهد کرد (Esfahani, 1999). نحوه آبیاری در کشورهای به‌علت برخورداری از اقلیم‌ها و ارقام مختلف، تفاوت زیادی با هم دارد. زراعت برنج از نظر آبیاری را می‌توان به‌صورت‌های مختلف انجام داد. یکی از این روش‌ها، آبیاری بر اساس مراحل مختلف رشد می‌باشد (Razavipour, 2005).

با توجه به کاهش منابع آب، تغییرات اقلیم و کاهش سهم آب بخش کشاورزی، بهبود کارایی مصرف آب مبتنی بر تولید بیشتر به ازای آب مصرفی کمتر، بسیار بااهمیت است. برای این منظور، آگاهی دقیق‌تر از رابطه بین مصرف آب و عملکرد محصول، ضروری است. با توجه به اینکه اثرات کمبود آب بر اساس شدت، مدت و زمان کاربرد متفاوت است، مدل‌سازی واکنش محصول به کمبود آب بسیار سخت است (Alizadeh et al., 2010). مدل AquaCrop اخیراً توسط FAO معرفی شده و بر اساس رطوبت موجود در خاک، به‌خوبی اثر تنش آبی بر تولید ماده خشک و عملکرد دانه گیاه را در طول دوره رشد در نظر می‌گیرد. این مدل برنامه‌ای ساده و دقیق است که نسبت به مدل‌های شبیه‌سازی 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 کارایی مصرف آب گیاه را تحت شرایط مختلف از جمله کم‌آبیاری شبیه‌سازی کند (Salemi et al., 2011).

هوای منطقه به ترتیب ۶۱۶ میلی‌متر و ۱۷/۳ درجه سانتی-گراد است. اقلیم منطقه با روش دومارتن از نوع مرطوب تعیین شد (Darzi et al., 2012).

سیستم‌های زهکشی موجود در اراضی مورد مطالعه عبارت‌اند از 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 به صورت یک‌درمیان. مشخصات تیمارهای مختلف مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. زه‌آب کلیه خطوط زهکش به درون یک کانال روباز به عمق ۱/۲ متر تخلیه می‌شود. کانال مذکور تنها زهکش اراضی مورد مطالعه است که در زمان اجرای عملیات تجهیز و نوسازی، به‌عنوان زهکش سطحی حفر شد. برای تعیین تأثیر زهکش سطحی، یکی از کرت‌های فاقد زهکش زیرزمینی که فقط تحت تأثیر زهکش سطحی بود، به‌عنوان کرت شاهد (Control) در نظر گرفته شد.

نیمه‌خشک، از مدل AquaCrop استفاده کردند. بر اساس این تحقیق، با توجه به توانمندی این مدل در شبیه‌سازی روند توسعه پوشش گیاهی و عملکرد گیاه برنج تحت رژیم‌های مختلف آبیاری، می‌توان در تعیین استراتژی‌های بهینه مدیریت برای بهبود بهره‌وری آب در کشت برنج، مدل AquaCrop را بکار برد.

با توجه به پژوهش‌های قبلی، تاکنون مطالعه‌ای در مورد شبیه‌سازی عملکرد برنج تحت تأثیر تنش خشکی در شالیزارهای دارای زهکشی زیرزمینی با استفاده از مدل AquaCrop صورت نگرفت. هدف از این پژوهش، پیش‌بینی عملکرد دانه و کارایی مصرف آب برنج تحت تأثیر تنش خشکی در شالیزارهای دارای سیستم‌های زهکشی زیرزمینی و سطحی به‌وسیله مدل AquaCrop است.

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 به ترتیب ۳۶/۳۹ درجه شمالی و ۵۳/۰۴ درجه شرقی و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵- متر است. متوسط بارندگی و دمای

جدول ۱. مشخصات سیستم‌های مختلف زهکشی.

Table 1. The characteristics of the drainage systems.

فاصله زهکش (متر)	عمق زهکش (متر)	سیستم زهکشی
Drain spacing	Drain depth	Drainage system
30	0.9	$D_{0.9}L_{30}$
15	0.65	Bilevel
30	0.65	$D_{0.65}L_{30}$
15	0.65	$D_{0.65}L_{15}$
200	1.2	Control

$D_{0.9}L_{30}$: سیستم زهکشی با عمق ۰/۹ و فاصله ۳۰ متر؛ Bilevel: سیستم زهکشی دو عمقی با فاصله زهکش ۱۵ متر و اعماق زهکش ۰/۶۵ و ۰/۹ متر به‌صورت یک در میان؛ $D_{0.65}L_{30}$: سیستم زهکشی با عمق ۰/۶۵ و فاصله ۳۰ متر؛ $D_{0.65}L_{15}$: سیستم زهکشی با عمق ۰/۶۵ و فاصله ۱۵ متر؛ Control: سیستم زهکشی سطحی.

$D_{0.9}L_{30}$: Drainage system with 0.9 m depth and 30 m spacing; Bilevel: Bilevel Drainage system with 15 m drain spacing and drain depths of 0.65 and 0.9 m as alternate; $D_{0.65}L_{30}$: Drainage system with 0.65 m depth and 30 m spacing; $D_{0.65}L_{15}$: Drainage system with 0.65 m depth and 15 m spacing; Control: Surface drainage system.

زهکشی تا ظهور ترک‌های کوچک سطحی (به مدت یک هفته) ادامه یافت و به‌دنبال ظاهر شدن ترک‌های مذکور، مجدداً عملیات آبیاری در کلیه تیمارها آغاز شد. برای انجام زهکشی پایان فصل، دو هفته قبل از برداشت، آبیاری در

در طول هر دو فصل کشت، دو بار زهکشی انجام شد. اولین بار، ۲۵ روز پس از نشاکاری برای انجام زهکشی میان فصل، آبیاری در کلیه تیمارها قطع و با برداشتن درپوش لوله‌های زهکش امکان تخلیه زه‌آب فراهم شد. این مرحله از

$$WUE = \text{Yield}/ET_c \quad [2]$$

که عملکرد برحسب کیلوگرم در هکتار و آب مصرفی (ET_c) برحسب مترمکعب در هکتار در طی دوره رشد است. پس از جمع‌آوری داده‌های موردنیاز و با استفاده از آن‌ها تأثیر مقادیر مختلف آب آبیاری بر عملکرد و کارایی مصرف آب مورد تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل از داده‌های سال ۱۳۹۰ برای واسنجی و از داده‌های سال ۱۳۹۱ برای صحت-سنجی مدل AquaCrop استفاده شد. مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل AquaCrop برای گیاه برنج تحت مدیریت‌های مختلف زهکشی زیرزمینی و سطحی در جدول ۲ ارائه شد. مقادیر این پارامترها با سعی و خطا طوری تعیین شدند که نتایج شبیه‌سازی مدل، کمترین خطا یا بیشترین تطابق را با مقادیر اندازه‌گیری شده در مزرعه داشته باشند.

میانگین عملکرد دانه اندازه‌گیری شده برابر ۳۴۵۷ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. بیشترین مقدار عملکرد دانه مربوط به تیمار Bilevel و کمترین مقدار آن مربوط به تیمار شاهد بود. همچنین عملکرد دانه در کلیه تیمارهای زهکشی زیرزمینی، اختلاف معنی‌داری با مقدار متناظر در تیمار شاهد داشت. بهتر بودن مقدار عملکرد دانه و زیست‌توده در تیمارهای زهکشی زیرزمینی نسبت به زهکشی سطحی در نتیجه شرایط تهویه بهتر (Owusu- Sekyere, 2005; Katsura and Nakaiide, 2011) کرت‌های تحت پوشش سیستم‌های زهکشی زیرزمینی در زمان زهکشی میان فصل بود.

برای مقایسه نتایج مدل با نتایج مشاهده‌ای و صحت‌یابی نتایج و ارزیابی قابل‌اعتماد بودن مدل، از یکسری شاخص-های ارزیابی مزرعه‌ای استفاده شد. نتایج شاخص‌های آماری جهت ارزیابی مدل AquaCrop برای مرحله واسنجی در جدول (۳) ارائه شد. رابطه خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده با مقدار کم RMSE وجود داشت. مقدار شاخص سازگاری (d) بسیار به یک نزدیک بود. بیشترین مقدار شاخص سازگاری برای عملکرد دانه به دست آمد. شاخص آماری E نیز برای پارامترهای اندازه‌گیری شده در حد معقول بود که نشان‌دهنده کارایی قابل‌قبول مدل در

کلیه تیمارها قطع و زهکشی تا زمان برداشت ادامه یافت. در طول مدت زهکشی میان فصل، عمق سطح ایستابی در کلیه چاهک‌های مشاهده‌ای به صورت روزانه اندازه‌گیری شد. مصرف کود اوره تنها یک‌بار در ابتدای فصل کشت، به مقدار ۹۰ کیلوگرم در هکتار، به صورت سرک انجام شد.

علاوه بر آبیاری کامل (I_1)، شبیه‌سازی مقدار عملکرد دانه برنج تحت تنش خشکی در طول فصل کشت برای پنج هفته به طور جداگانه شامل دوره‌های ۱۶ تا ۲۲ روز پس از نشا (I_2)، ۲۳ تا ۲۹ روز پس از نشا (I_3)، ۳۰ تا ۳۶ روز پس از نشا (I_4)، ۳۷ تا ۴۳ روز پس از نشا (I_5) و ۴۴ تا ۵۰ روز پس از نشا (I_6) برای همه تیمارهای زهکشی سطحی و زیرزمینی توسط مدل AquaCrop انجام شد.

مدل AquaCrop مدلی

است که برای بررسی کارایی مصرف آب گیاه، توسط بخش آب و خاک سازمان خواروبار جهانی (FAO) با تجدیدنظر در نشریه شماره ۳۳ سازمان FAO طراحی شد. این مدل از معادله پیشین دورنباس و همکاران (Dorenbos and Kassam, 1979) با تفکیک 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 T_a و E_s سبب می‌شود که بخش غیر مؤثر آب در تولید محصول (تبخیر) در نظر گرفته نشود. این موضوع به‌ویژه زمانی که هنوز پوشش گیاهی تکمیل نشده، حائز اهمیت است. پیچیدگی پاسخ‌های گیاه به کمبود آب باعث شده تا کاربران جهت ارزیابی پاسخ محصول به استفاده از توابع تولید تجربی به‌عنوان 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 ارائه‌شده توسط فائو به صورت زیر است:

$$\left(\frac{Y_m - Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(\frac{ET_m - ET_a}{ET_m}\right) \quad [1]$$

که در آن Y_m و Y_a ، به ترتیب عملکرد حداکثر و واقعی محصول، ET_m و ET_a به ترتیب تبخیر-تعرق حداکثر و واقعی گیاه و K_y ضریب تناسب بین کاهش عملکرد نسبی و کاهش نسبی در تبخیر-تعرق است.

WUE (کارایی مصرف آب) از نسبت مقدار عملکرد در هر تیمار به ET_c همان تیمار به دست آمد:

کاهش عملکرد دانه برنج در هفته‌های سوم تا پنجم در تیمار Bilevel، به‌طور متوسط، ۵/۳ درصد ولی در مراحل نزدیک به خوشه‌دهی، ۱۴/۶ درصد بود. همچنین، کاهش عملکرد زیست‌توده این تیمار در هفته‌های سوم تا پنجم، به‌طور متوسط، ۲/۹ درصد ولی در مراحل نزدیک به خوشه‌دهی، ۱۱ درصد بود. در شرایط زهکشی $D_{0.9}L_{30}$ ، کاهش عملکرد دانه برنج در هفته‌های سوم تا پنجم، به‌طور متوسط، ۶/۵ درصد ولی در مراحل نزدیک به خوشه‌دهی، ۱۵/۶ درصد بود و کاهش عملکرد زیست‌توده در هفته‌های سوم تا پنجم، به‌طور متوسط، ۴/۶ درصد ولی در مراحل نزدیک به خوشه‌دهی، ۱۴/۹ درصد بود (شکل ۲).

شبیه‌سازی پارامترهای قابل پیش‌بینی است. نتایج RMSE نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی پارامترهای عملکرد برنج است.

میزان عملکرد دانه و زیست‌توده برنج تحت تأثیر اعمال تنش خشکی در مراحل مختلف رشد در تیمارهای مختلف زهکشی در شکل‌های ۱ تا ۵ ارائه شد. به‌طور کلی، اعمال تنش خشکی در هفته سوم پس از نشا (۱۶ تا ۲۲ روز پس از نشاکاری) در کلیه تیمارهای زهکشی زیرزمینی باعث کاهش عملکرد دانه و زیست‌توده شده و ادامه تنش خشکی تا هفته پنجم پس از نشا، منجر به افزایش عملکرد برنج شد (شکل ۱). با نزدیک شدن به مرحله خوشه‌دهی (هفته ششم و هفتم پس از نشاکاری)، تنش خشکی باعث کاهش عملکرد دانه برنج و زیست‌توده شد.

جدول ۲. مقادیر ضرایب واسنجی شده مدل AquaCrop

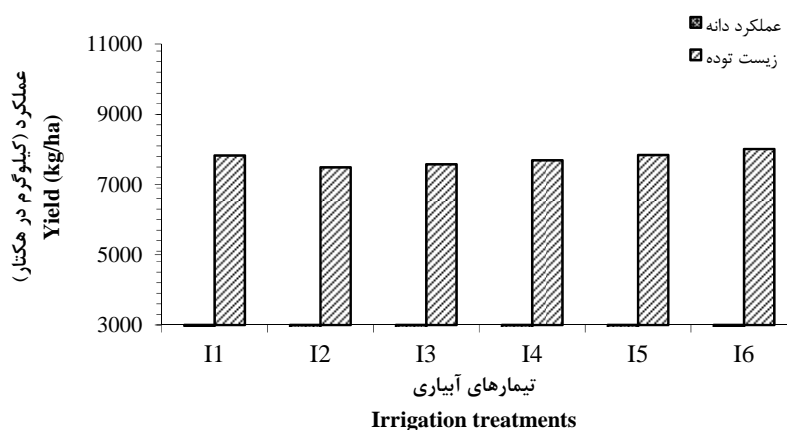
Table 2. The amount of calibration coefficients of AquaCrop model.

واحد Unit	مقدار پارامتر Amount of parameter	عنوان پارامتر Parameter Subject
°C	10	دمای پایه Base temperature
°C	40	دمای ماکزیمم Maximum temprature
%	0.96	پوشش گیاهی اولیه Initial canopy cover
%/day	12.3	ضریب افزایش پوشش گیاهی Canopy growth coefficient
%	95	پوشش گیاهی ماکزیمم Maximum canopy cover
%/day	9.3	ضریب کاهش پوشش گیاهی Canopy decline coefficient
-	0	فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها (حد بالا) Leaf growth threshold
-	0.4	فاکتور تخلیه آب خاک برای توسعه برگ‌ها (حد پایین) Leaf growth threshold
-	3	فاکتور شکل تابع تنش آب Leaf growth stress coefficient curve shape
-	0.5	فاکتور تخلیه آب خاک برای کنترل بسته شدن روزنه‌ها Stomatal conductance threshold
-	0.55	فاکتور تخلیه آب خاک برای کنترل شروع پیری پوشش گیاهی Senescence stress coefficient
gr/m ²	19	شاخص بهره‌وری آب Normalized water productivity
%	38	شاخص برداشت Reference harvest index

جدول ۳. ارزیابی کارایی مدل AquaCrop برای مرحله واسنجی

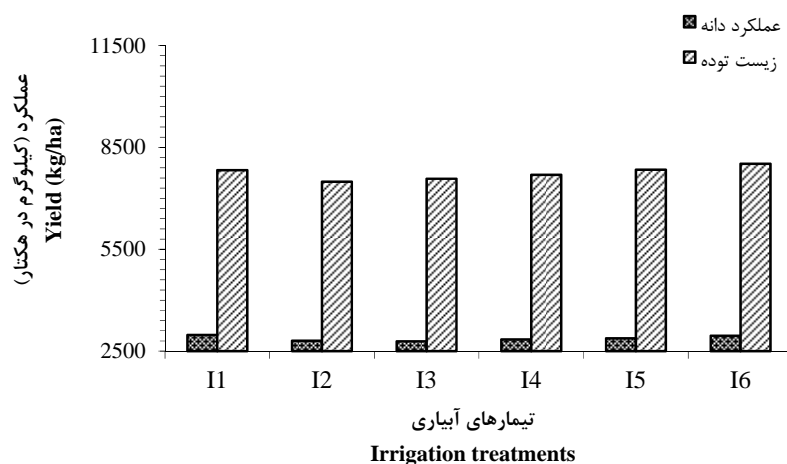
Table 3. Evaluation of AquaCrop model for calibration stage.

پارامتر Parameter	شاخص‌های ارزیابی Evaluation indexes		
	RMSE	E	d
عملکرد دانه Grain yield	225.7	0.85	0.95
زیست توده Biomass	693.0	0.80	0.93



شکل ۱. مقادیر عملکرد دانه برنج تحت تأثیر اعمال تنش رطوبتی در مراحل مختلف رشد در تیمار Bilevel

Fig. 1. The amounts of rice grain yield under moisture stress at different growth stages in Bilevel treatment.



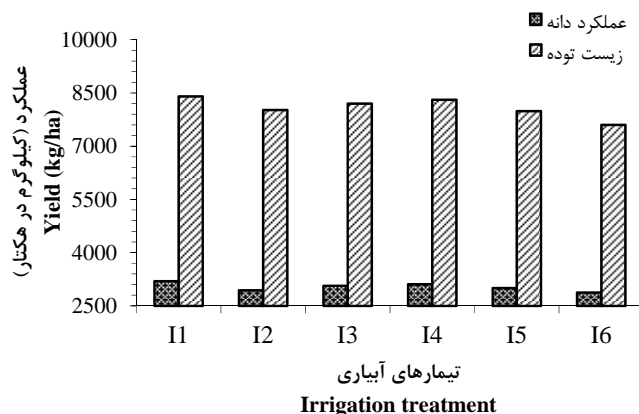
شکل ۲. مقادیر عملکرد دانه برنج تحت تأثیر اعمال تنش رطوبتی در مراحل مختلف رشد در تیمار D_{0.9}L₃₀

Fig. 2. The amounts of rice grain yield under moisture stress at different growth stages in D_{0.9}L₃₀ treatment.

که زارعین به‌طور سنتی، با اثرات منفی اعمال تنش قبل از استقرار کامل گیاه آگاه می‌باشند و تا حدود ۲۵ روز پس از نشاکاری اقدام به زهکشی نمی‌نمایند. اعمال زهکشی میان فصل از طریق زهکش‌های زیرزمینی سبب افت سریع‌تر سطح ایستابی در مقایسه با اعمال آن از طریق زهکشی سطحی خواهد شد (Darzi et al., 2012). در تیمارهای زهکشی زیرزمینی، علاوه بر افت بیشتر سطح ایستابی نسبت به تیمار زهکشی سطحی، تنش خشکی باعث کاهش بیش‌ازحد رطوبت در پروفیل خاک شده و در نتیجه باعث کاهش عملکرد محصول خواهد شد. تناوبی و قائم می‌تواند در آب با عمق کم، محصول بیشتری نسبت به شرایط غرقابی عمیق تولید کند. چون آبیاری با عمق کم باعث افزایش دمای آب در طی روز و کاهش آن در شب می‌شود که این امر سبب پنجه‌زنی بیشتر و رشد بهتر خواهد شد. گانی و همکاران (Gani et al., 2001) نشان دادند که آبیاری متناوب، تعداد پنجه، سطح برگ و زیست‌توده بیشتری نسبت به تیمار غرقاب دائم تولید نمود. همچنین مقدار زیست‌توده گیاهانی که تحت تیمار آبیاری متناوب بودند، به‌طور متوسط ۲۹ درصد بیشتر از گیاهانی بود که تحت تیمار آبیاری غرقابی رشد کردند. گزارش روست و همکاران (Roost et al., 2004) حاکی از آن است که با اعمال دور مناسبی از آبیاری، با درصد کمی کاهش در عملکرد، می‌توان در مصرف آب آبیاری به میزان زیادی صرفه‌جویی نمود.

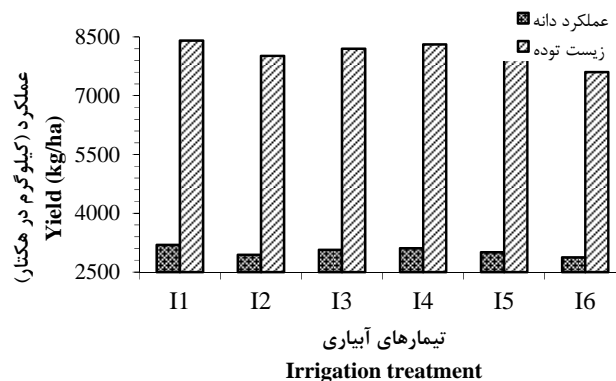
در تیمار $D_{0.65}L_{30}$ کاهش عملکرد دانه برنج در هفته‌های سوم تا پنجم، به‌طور متوسط، ۳/۶ درصد ولی در مراحل نزدیک به خوشه‌دهی، ۱۴/۱ درصد بود (شکل ۳). همچنین، کاهش عملکرد زیست‌توده در هفته‌های سوم تا پنجم، به‌طور متوسط، ۱/۹ درصد ولی در مراحل نزدیک به خوشه‌دهی، ۸/۵ درصد بود. در شرایط زهکشی $D_{0.65}L_{15}$ کاهش عملکرد دانه برنج در هفته‌های سوم تا پنجم، به‌طور متوسط، ۴/۹ درصد ولی در مراحل نزدیک به خوشه‌دهی، ۱۰ درصد بود و کاهش عملکرد زیست‌توده در هفته‌های سوم تا پنجم، به‌طور متوسط، ۲/۷ درصد ولی در مراحل نزدیک به خوشه‌دهی، ۹/۵ درصد بود (شکل ۴).

برای تیمار زهکشی سطحی نیز همانند تیمارهای زهکشی زیرزمینی، تنش خشکی در هفته سوم پس از نشاء باعث کاهش عملکرد دانه و زیست‌توده شده ولی در هفته‌های بعدی، باعث افزایش عملکرد شد (شکل ۵). به نظر می‌رسد که کاهش کمتر عملکرد دانه برنج و زیست‌توده در تیمار زهکشی سطحی نسبت به تیمارهای زهکشی زیرزمینی، به دلیل افت کمتر سطح ایستابی و در نتیجه خشکی کمتر خاک در هفته‌های مختلف پس از نشاکاری باشد. کاهش عملکرد دانه و زیست‌توده در اثر اعمال تنش خشکی در هفته سوم پس از نشاکاری، تطابق کاملی با الگوهای مرسوم در مدیریت اراضی شالیزاری منطقه مطالعه دارد. زهکشی میان فصل که از عملیات متداول در شالیزارهای شمال کشور می‌باشد، به‌طور معمول حدود ۲۵ روز پس از نشاکاری انجام می‌شود. این مهم نشان می‌دهد

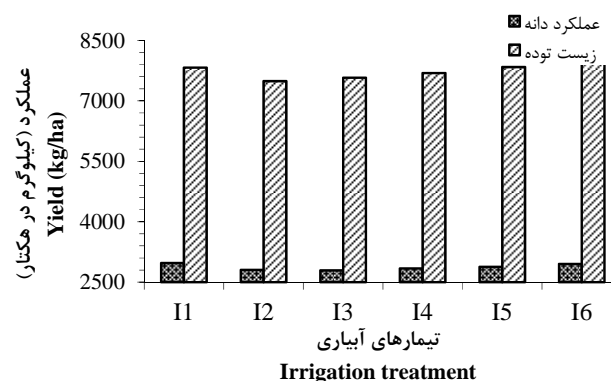


شکل ۳. مقادیر عملکرد دانه برنج تحت تاثیر اعمال تنش رطوبتی در مراحل مختلف رشد در تیمار $D_{0.65}L_{30}$

Fig. 3. The amounts of rice grain yield under moisture stress at different growth stages in $D_{0.65}L_{30}$ treatment.



شکل ۴. مقادیر عملکرد دانه برنج تحت تأثیر اعمال تنش رطوبتی در مراحل مختلف رشد در تیمار $D_{0.65}L_{15}$.
 Fig. 4. The amounts of rice grain yield under moisture stress at different growth stages in $D_{0.65}L_{15}$ treatment.



شکل ۵. مقادیر عملکرد دانه برنج تحت تأثیر اعمال تنش رطوبتی در مراحل مختلف رشد در شرایط زهکشی سطحی.
 Fig. 5. The amounts of rice grain yield under moisture stress at different growth stages in surface drainage.

سپس موجب کاهش تعداد دانه پر در خوشه و تعداد خوشه در بوته یعنی اجزای عملکرد می‌شود. پیردشتی و همکاران (Pirdashti et al., 2004) گزارش کردند که خسارت در مرحله خوشه‌دهی شدیدتر از مرحله ابتدایی رشد رویشی بوده و اثر بیشتری در کاهش عملکرد دارد.

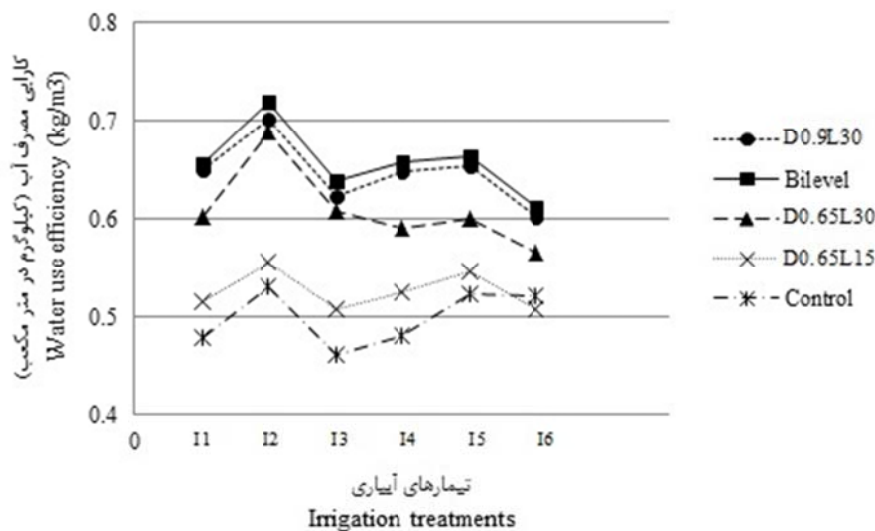
شکل (۶) مقدار کارایی مصرف آب برنج را در شرایط مختلف تنش خشکی نشان می‌دهد. برای تمامی تیمارهای زهکشی، تنش خشکی در هفته سوم پس از نشاکاری باعث افزایش کارایی مصرف آب شد. به طوری که در شرایط آبیاری کامل و زهکشی دوعمقی، مقدار آب کاربردی برابر $۶۲۰/۴$ میلی‌متر و کارایی مصرف آب برابر $۰/۶۵$ کیلوگرم بر

وینکل (Winkel, 1989) دریافت که در غلات، حساس‌ترین مرحله به خشکی، حدفصل به خوشه رفتن تا گلدهی است و واریته‌هایی که قبل از گلدهی بتوانند زیست‌توده بالایی تولید و ذخیره مواد پرورده در ساقه را افزایش دهند، جزء واریته‌های متحمل به خشکی محسوب می‌شوند. پیردشتی و همکاران (Pirdashti et al., 2004) نشان دادند که تنش آبی در مرحله گلدهی برنج، کاهش عملکرد دانه بیشتری را نسبت به بقیه مراحل نشان داد.

کاهش عملکرد دانه در نتیجه کاهش باروری سنبلچه‌ها و کاهش درصد پر شدن دانه‌ها بود. همچنین کاهش طول و عرض برگ پرچم در برنج باعث کاهش فتوسنتز شده و

آب صرفه‌جویی شده جهت افزایش سطح زیر کشت و همچنین افزایش تولید برنج اقدام نمود. برای تیمارهای مختلف زهکشی زیرزمینی، بیشترین کارایی مصرف آب در شرایط تنش خشکی در هفته سوم پس از نشا ولی کمترین مقدار آن در زمان خوشه‌دهی به دست آمد. برای تیمار زهکشی سطحی، تنش خشکی در هفته سوم پس از نشا باعث افزایش کارایی مصرف آب شده و در هفته چهارم باعث کاهش آن سپس به تدریج بر مقدار کارایی مصرف آب افزوده شد.

مترمکعب بود ولی در شرایط تنش خشکی در هفته سوم پس از نشا، مقدار آب کاربردی برابر ۵۲۹ میلی‌متر و کارایی مصرف آب برابر ۰/۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. در هفته سوم تنش، کاهش مقدار آب آبیاری برابر ۱۵ درصد بود. رضایی و نحوی (Rezaei and Nahvi, 2007) مقدار کارایی مصرف آب برنج را برای ۶۶۱ میلی‌متر آب مصرفی، برابر ۰/۴۶ کیلوگرم بر مترمکعب و برای ۳۴۴ میلی‌متر آب مصرفی برابر ۰/۸۸ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آوردند. نتایج نشان داد که تقریباً با نصف شدن مقدار آب کاربردی، کارایی مصرف آب به دو برابر رسید و در نتیجه می‌توان از



شکل ۶. کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف تنش خشکی.

Fig. 6. Water use efficiency in different treatments of drought stress.

به‌طورکلی خشک و تر کردن متناوب زمین می‌تواند بهره‌وری آب را افزایش دهد. از طریق کاربرد فناوری‌های آبیاری مبتنی بر صرفه‌جویی در آب، می‌توان روش کاشت غیر هوازی برنج را به نیمه هوازی تغییر داد. این تغییر روش، تغییرات چشمگیری در حفظ آب، موجودیت مواد آلی، بهره‌وری خاک و انتشار گازهای گلخانه‌ای به وجود می‌آورد. علاوه بر آثار مهم مدیریت آب بر عملکرد محصول و کارایی مصرف آب، تغییرات حاصله در ناحیه ریشه گیاه نیز باید ارزیابی شود. با استفاده از مدل واسنجی شده، روند تغییرات هدایت الکتریکی لایه ۰-۳۰ سانتی‌متری خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری شبیه‌سازی شد و میزان متوسط آن برای کل فصل کشت در جدول (۴) ارائه شد. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که اعمال تنش خشکی در مراحل مختلف رشد گیاه، اثر قابل‌توجهی بر میزان شوری ناحیه ریشه در هر یک از سیستم‌های زهکشی نداشت. با این‌وجود، متوسط میزان شوری ناحیه ریشه در سیستم زهکشی سطحی بیشتر از مقدار آن در سیستم‌های زهکشی زیرزمینی بود که دلیل آن، امکان آیشویی بیشتر در اثر زهکش‌های زیرزمینی است. افت بیشتر سطح ایستایی در اثر زهکشی، می‌تواند سبب بهبود آیشویی در آبیاری‌های بعدی و در نهایت کاهش تجمع نمک در ناحیه ریشه شود.

جدول ۴. متوسط هدایت الکتریکی لایه سطحی خاک تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری.

Table 4. Average electrical conductivity of the soil surface layer under different irrigation treatments

سیستم زهکشی Drainage system	تیمارهای آبیاری Irrigation Treatments					
	I1	I2	I3	I4	I5	I6
D _{0.9} L ₃₀	1.06	1.13	1.07	1.08	1.16	1.1
Bilevel	1	0.97	1	1.05	1.1	1.04
D _{0.65} L ₃₀	1	1.08	1.02	1.04	1.1	1.05
D _{0.65} L ₁₅	0.98	1.04	1.04	1	1.07	1.03
Control	1.23	1.26	1.23	1.24	1.25	1.24

نتیجه‌گیری

زهکشی میان فصل سبب افزایش قابل توجه عملکرد برنج در تیمارهای زهکشی زیرزمینی شد. برای تیمار زهکشی سطحی، تنش خشکی در هفته سوم پس از نشا باعث کاهش عملکرد برنج شده ولی در هفته‌های بعدی، باعث افزایش عملکرد برنج شد. به نظر می‌رسد کاهش کمتر عملکرد دانه برنج و زیست‌توده در تیمار زهکشی سطحی نسبت به زهکشی زیرزمینی، به دلیل کاهش کمتر سطح ایستابی و در نتیجه خشکی کمتر خاک در هفته‌های مختلف پس از نشاکاری باشد. نتایج نشان داد که از این مدل و شبیه‌سازی سناریوهای مختلف تنش خشکی، ضمن صرفه‌جویی در وقت و هزینه، می‌توان در طرح‌های پژوهشی جهت پیش‌بینی عملکرد و تأثیر مدیریت‌های مختلف زهکشی سطحی و زیرزمینی بهره جست.

به‌منظور برآورد نیاز غذایی جمعیت رو به رشد، لازم است که تولید برنج افزایش یابد. یافتن روش‌هایی برای تولید بیشتر برنج در ازای مصرف آب کمتر به‌منظور تأمین امنیت غذایی و حفظ سلامت محیط‌زیست ضروری است. در این پژوهش عملکرد برنج در تیمارهای مختلف تنش خشکی و در شرایط سیستم‌های مختلف زهکشی زیرزمینی معمولی، زیرزمینی دو عمقی و سیستم زهکشی سطحی در اراضی شالیزاری با استفاده از مدل AquaCrop شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی‌های مدل AquaCrop نشان داد که این مدل قادر است مقدار عملکرد برنج را تحت مدیریت‌های مختلف زهکشی، با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی کند. بهبود وضعیت تهویه و تخلیه سریع‌تر آب اضافی خاک در زمان

منابع

- Alizadeh, H.A., Nazari, B., Parsinejad, M., Ramezani Eetedali, H., Janbaz, H.R., 2010. Evaluation of AquaCrop model on wheat deficit irrigation in Karaj area. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2, 273-283. [In Persian with English Summary].
- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M.E., Barati, M.A., Rahnema, A., 2011. Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*. 100, 1-8.
- Carmelita, M., Alberto, R., Wassmann, R., Hirano, T., Miyata, A., Hatano, R., Kumar, A., Padre, A., Amante, M., 2011. Comparisons of energy balance and evapotranspiration between flooded and aerobic rice fields in the Philippines. *Agricultural Water Management*. 98, 1417-1430.
- Darzi- Naftchali, A., Mirlatifi, S.M., Shahnazari, A., Ejlali, F., 2012. Influence of surface and subsurface drainage systems on yield and yield components of rice in paddy fields. *Journal of Water Research in Agriculture*. 26, 61-70. [In Persian with English Summary].
- Esfahani, M., 1999. Introduction to the physiology and ecology of rice. Guilan University Press, 57 p.
- Farahani, H.J., Izzi, G., Oweis, T.Y., 2009. Parameterization and evaluation of the

- AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton. *Agronomy Journal*. 101, 469-476.
- Gani, A., Rahman, A., Dahono, R., Hengsdijk, H., 2001. Synopsis of water management experiments in Indonesia. Available on the Url: www.waterforfood.nl/docs/Water_less_rice/Gani_et_al.pdf
- Garcia-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F., Steduto, P., 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agronomy Journal*. 101, 477-487.
- Javaherdashti, M., Esfahani, M., 2002. Rainfed rice. *Agricultural Sciences Publication*, 128 pp. [In Persian].
- Katoh, M., Iwata, A., Shaku, I., Nakajima, Y., Matsuya, K., Kimura, M., 2003. Impact of water percolation on nutrient leaching from an irrigated paddy field in Japan. *Soil Use and Management*. 19, 298-304.
- Katsura, K., Nakaide, Y., 2011. Factors that determine grain weight in rice under high-yielding aerobic culture: The importance of husk size. *Field Crops Research*. 123, 266-272.
- Owusu-Sekyere, J.D., 2005. Water table control for rice production in Ghana. Cranfield University, Silsoe College, National Soil Resources Institute. Ph.D. Thesis, 225p.
- Patel, N., Kumar, P., Sing, N., 2008. Performance evaluation of AquaCrop in simulating Potato yield under varying water availability condition. *Indian Agricultural Research Institute*, New Delhi- 110012, India.
- Pirdashti, H., Sarvestani, Z.T., Nematzadeh, G., Ismail, A., 2004. Study of water stress effects in different growth stage on yield components of different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. New directions for a diverse planet: Proceeding of 4th International Crop Science Congress Brisbane, Australia. 26 Sep. – 1 Oct. 2004.
- Pirmoradian, N., Minaei, S. 2010. The use of AquaCrop model to improve the management of irrigation in paddy fields. The 3th National Conference of Irrigation and Drainage Networks, 29 February, Shahid Chamran University of Ahvaz. [In Persian].
- Razavipour, T., 2005. The effect of plant density and different irrigation depths on rice yield. *Rice Research Institute Publication*, 59p. [In Persian].
- Rezaei, M., Nahvi, M., 2007. The effect of irrigation frequency in clay soil on water use efficiency and some of the characteristics of local rice varieties in Gilan. *Journal of Agricultural Science*. 9, 15-25. [In Persian].
- Roost, N., Molden, D., Zhu, Z., Loeve, R., 2004. Identifying Water Saving Opportunities: Examples from Three Irrigation Districts in China's Yellow River and Yangtze Basins. *International Water Management Institute*, Colombo, Sri Lanka. Available on the Url: www.iwmi.cgiar.org/Assessment/files/proceedings/IWMI-PaperNRoost1.doc
- Salemi, H.R., Mohd Soom, M.A., Lee, T.S., Mousavi, S.F., Ganji, A., Yusoff, M.K., 2011. Application of AquaCrop model in deficit irrigation management of winter wheat in arid region. *African Journal of Agricultural Research*. 610, 2204-2215.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., Fereres, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and Underlying Principles. *Agronomy Journal*. 101, 426-437.
- Tantawi, B.A., Ghanem, S.A., 2001. Water use efficiency in rice culture. *Agricultural Research Center, Giza (Egypt). CIHM-Optin Mediterraneennes*. 40, 39-45.
- Todorovic M., Albrizio, R., Zivotic, L., Abi Saab, M., Stöckle, C., Steduto, P., 2009. Assessment of AquaCrop, CropSyst, and WOFOST Models in the Simulation of Sunflower Growth under Different Water Regimes. *Agronomy Journal*. 101, 509-521.
- Winkel, A., 1989. Breeding for drought tolerance in cereals. *Vertage for Pflanz Zenzuchtung*. 16, 357-368.