

بیان آب خاک و عملکرد محصول گندم با استفاده از مدل شبیه‌سازی AquaCrop (مطالعه موردی در شبکه آبیاری آبشار اصفهان)

مهدی اکبری**

* نگارنده مسئول، نشانی: کرج، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، صندوق پستی ۸۴۵-۳۱۵۸۵، تلفن: ۰۲۷۰۵۳۲۰

پیام نگار: akbari_m43@yahoo.com

** استادیار موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۰/۲۰

چکیده

محدودیت منابع آب، نبود برنامه‌ریزی آبیاری، و استفاده نامطلوب و غیر اقتصادی از آب عامل اصلی محدود کننده توسعه کشاورزی و افزایش تولیدات غذایی در ایران است. در استفاده بهینه از منابع آب موضوعاتی متفاوت وجود دارد که در میان آنها می‌توان به بهبود بهره‌وری آب با استفاده از برنامه‌ریزی آبیاری و بهبود مدیریت آب در مزرعه و افزایش سودمندی آب اشاره کرد. در این تحقیق ضمن بررسی وضعیت موجود بهره‌وری آب برای تولید گندم، راهکارهای افزایش بهره‌وری آب در شرایط مختلف کمی آب شبکه آبیاری آبشار اصفهان، تعیین و تجزیه و تحلیل می‌شود. بدین منظور با در نظر گرفتن وضعیت موجود بهره‌برداری از منابع آب از جمله توزیع گردشی آب بین حقایقه‌داران، کمیت‌های مختلف آب آبیاری و بهره‌گیری از تلفیق اطلاعات مزرعه‌ای و مدل شبیه‌سازی AquaCrop، برنامه آبیاری (زمان و عمق)، توابع تولید-آب کاربردی برای محصول گندم تعیین شد و عملکرد محصول، بهره‌وری مصرف آب در شرایط مدیریت زارع، راهکارهای پیشنهادی و آبیاری در زمان مناسب و به عمق بهینه به کمک مدل شبیه‌سازی مقایسه گردید. نتایج اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ در شبکه آبیاری مورد مطالعه نشان داد که در شرایط موجود میزان آب کاربردی برای گندم ۸۰۰ میلی‌متر و متوسط عملکرد حدود ۵۰۰۰ کیلوگرم در هکتار است و با حذف آبیاری‌های نوبت دوم، سوم، و هفتم در شرایط موجود (کاهش ۳۸ درصد آب آبیاری)، عملکرد محصول فقط ۴ درصد کاهش و کارایی مصرف آب بیش از ۴۵ درصد افزایش می‌یابد. با بهبود مدیریت زراعی و کاهش ۵۰ درصد عمق آب آبیاری اول، عملکرد محصول تغییر نمی‌کند. این نتایج حاکی از آن است که با برنامه‌ریزی صحیح آبیاری به کمک مدل AquaCrop همراه با بهبود مدیریت زراعی و کاهش عمق آب آبیاری اول به میزان ۵۰ درصد، می‌توان ضمن کاهش ۳۸ درصد آب آبیاری، عملکرد گندم و کارایی مصرف آب را به ترتیب ۱۶ و ۷۹ درصد افزایش داد.

واژه‌های کلیدی

برنامه‌ریزی آبیاری، شبکه آبیاری آبشار اصفهان، مدیریت آبیاری، مدیریت زراعی، AquaCrop

مقدمه

هستند و تولید محصول آنها به شدت کاهش یافته است. در استفاده بهینه از منابع آب در دهه‌های اخیر موضوعاتی متفاوت وجود دارد مانند برنامه‌ریزی آبیاری و بهبود مدیریت آب در مزرعه، افزایش کارایی مصرف آب، و سودمندی اقتصادی آب (Molden, 2007; Steduto et al., 2007). به منظور افزایش کارایی مصرف آب باید با در نظر

اکنون بیشتر مناطق جهان با کمبود آب و مسایل جدی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی رو به رو شده‌اند. حدود ۷۰ درصد منابع آب شیرین در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، اما بیشتر پروژه‌های آبیاری به علت کمبود آب و نبود برنامه‌ریزی مناسب آبیاری با مشکل رو به رو

تغییرات کمی و کیفی آب آبیاری بر عملکرد محصول، شوری خاک، تبخیر-تعرق، رواناب سطحی و نفوذ عمقی استفاده کرد (Steduto *et al.*, 2009; Droogers & Kite, 2001; Droogers *et al.*, 2001).

جهت افزایش راندمان آبیاری، یک شبکه آبیاری پنجاه ساله در اسپانیا با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی ارزیابی شد (Isidoro *et al.*, 2004). بدین منظور، کلیه منابع ورودی و خروجی آب شامل آب آبیاری، بارندگی، زهکشی سطحی، رواناب سطحی، تلفات آبیاری و تبخیر-تعرق اندازه‌گیری یا برآورد شدند. سپس حداکثر آب مورد نیاز گیاهان موجود در شبکه آبیاری، بر اساس ضریب گیاهی و تبخیر-تعرق مرجع تعیین و تبخیر-تعرق واقعی با استفاده از روش بیلان آب در خاک برآورد گردید. نتایج نشان داد که بخش‌هایی از شبکه با تنش آبی مواجه‌اند و میانگین تبخیر-تعرق واقعی ۱۶ درصد کمتر از حداکثر تبخیر-تعرق گیاه است.

برای ارزیابی پروژه‌های آبیاری، بیلان آب در منطقه فعال ریشه با استفاده از یک مدل شبیه‌سازی برآورد شد (Panigrahi & Sudhindra, 2003). محققان مذکور برای صحت‌یابی مدل شبیه‌سازی از داده‌های یک مزرعه آزمایشی در هند استفاده کردند و میزان رطوبت خاک در لایه‌های مختلف خاک را با استفاده از دستگاه نوترون‌متر به دست آوردند. با استفاده از اطلاعات خاکشناسی، داده‌های زراعی، و تاریخ‌های آبیاری مزرعه آزمایشی بیلان آب در خاک را شبیه‌سازی کردند. ضریب همبستگی و میزان خطای نسبی بین مقدار رطوبت اندازه‌گیری شده خاک و مقدار شبیه‌سازی شده را به ترتیب ۰/۹۸ و ۰/۵۱ به دست آوردند که در حد مطلوبی است و استفاده از مدل شبیه‌سازی را توصیه کردند.

در دهه گذشته، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی رونق تازه‌ای گرفت و مدل‌های متعددی جهت شبیه‌سازی جریان آب در خاک توسعه یافت که یکی از آنها مدل

گرفتن تأثیر تغییرات کمی آب آبیاری بر عملکرد محصول، مدیریت آبیاری در مزرعه را بهبود بخشید. بدین منظور از دو روش، آزمایش‌های مزرعه‌ای یا مدل‌های شبیه‌سازی، استفاده می‌شود.

در روش اول یعنی آزمایش‌های مزرعه‌ای برای برنامه‌ریزی آبیاری و تعیین تأثیر تغییرات کمی آب آبیاری لازم است آزمایش‌هایی با کمیت‌های مختلف آب برای محصولات زراعی اجرا شود. از این رو به آزمایش‌های مزرعه‌ای متعدد نیاز است. اما در این روش محدودیت‌هایی هم هست از جمله: محدود بودن مکان و شرایط مورد آزمایش، کوتاه بودن مدت زمان اجرای آزمایش، نبود امکان برای اجرای سناریوهای پیچیده مدیریت آبیاری، و غیره. در این گونه آزمایش‌های کوتاه مدت نمی‌توان تأثیرات دراز مدت مدیریت آبیاری را که اهمیت بالایی دارند بررسی کرد. روش دوم یعنی استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی، ابزاری است مناسب با قابلیت‌های مختلف برای ارزیابی و تعیین مدیریت بهینه آبیاری در سطوح مختلف (حوضه، شبکه آبیاری، و مزرعه) و بررسی تأثیرات کمی آب آبیاری بر عملکرد محصول. این مدل‌ها از بخش‌های مختلفی از جمله بیلان آب در خاک، برنامه‌ریزی آبیاری، مدیریت آبیاری و رشد محصول تشکیل شده‌اند و قادرند مؤلفه‌های مختلف مانند: تبخیر، تعرق، نفوذ عمقی، رواناب سطحی، بیلان آب خاک و عملکرد زراعی مورد انتظار را با دقت بالایی شبیه‌سازی کنند. دقت مدل‌های شبیه‌سازی تا حد زیادی به دقت بودن داده‌های مورد نیاز ورودی بستگی دارد. اگر این مدل‌های ساده به درستی واسنجی و صحت‌یابی شوند، بدون محدودیت‌های زمانی و مکانی موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای و بدون صرف وقت و هزینه زیاد می‌توانند جهت برآورد عملکرد مورد انتظار محصول، برنامه‌ریزی آبیاری، و ارزیابی سناریوهای مدیریت آبیاری به کار گرفته شوند. از این مدل‌ها نیز می‌توان برای بررسی تأثیرات دراز مدت

بیان آب خاک و عملکرد محصول گندم با استفاده...

حوضه، به علت پایین بودن سودمندی آب در بخش قابل توجهی از حوضه، کمتر از سطح شبکه آبیاری به دست آمد (Droogers & Kite, 2001).

هدف اصلی پژوهش حاضر عبارت است از: استفاده از داده‌ها و اطلاعات موجود جهت بررسی تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت زراعی بر عملکرد محصول، بهره‌وری آب و برآورد عملکرد و کارایی آب در شرایط گوناگون مدیریت آبیاری در سطح مزارع گندم شبکه آبیاری آبشار اصفهان، و ارائه راهکارهایی به منظور بهبود کارایی آب در آینده. از نتایج جنبی این پژوهش می‌توان به بررسی مدیریت آبیاری و تعیین کارایی آب برای وضعیت فعلی و سناریوهای مختلف کمی آب آبیاری اشاره کرد. در این تحقیق با توجه به مزیت‌های مدل‌های شبیه‌سازی و اینکه در روش آزمایش‌های مزرعه‌ای محدودیت‌هایی وجود دارد، از مدل شبیه‌سازی AquaCrop استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

شبکه آبیاری آبشار در طول جغرافیایی ۵۲ و عرض جغرافیایی ۳۲/۵ درجه در شرق اصفهان، در قسمت مرکزی ایران، با ارتفاع تقریبی ۱۵۰۰ متر بالاتر از سطح دریا واقع شده است. این منطقه از نظر اقلیمی، خشک است و دمای آن در تابستان و زمستان از ۳۰ تا ۳ درجه سلسیوس تغییر می‌کند. متوسط بارش سالانه آن ۱۲۰ میلی‌متر است. خاک منطقه شامل لایه‌های آبرفتی و ریزدانه است. کل سطح زیر پوشش شبکه آبیاری حدود ۳۴۰۰۰ هکتار و محصولات اصلی الگوی کشت آن گندم، جو، برنج، یونجه، ذرت علوفه‌ای، چغندر قند و صیفی جات است.

داده‌های ورودی مدل AquaCrop

داده‌های ورودی مدل عبارت‌اند از: داده‌های مربوط به آب و هوا، گیاه، خاک، مدیریت زراعی، و مدیریت آبیاری. در بخش آب و هوا نیاز به پنج متغیر ورودی است: دمای

AquaCrop است (Raes *et al.*, 2009). از این مدل برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک، برنامه‌ریزی آبیاری، بیان آب در خاک، و رشد محصول استفاده می‌شود. مدل AquaCrop در سال‌های اخیر مورد توجه زیادی قرار گرفته است و در مطالعات گوناگون در سطح جهان از جمله در پاکستان، هند، مالزی، مکزیک، سری لانکا، مصر، سوریه و ایران، صحت یابی شده است و به منظور برآورد عملکرد محصول، برنامه‌ریزی آبیاری و بهبود مدیریت آبیاری به کار رفته و نتایج رضایت بخش داشته است (Akbari & Dehghani Sanij, 2010; Farahani *et al.*, 2009; Garcia-Vila *et al.*, 2008, 2009; Geerts *et al.*, 2008, 2009; Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009). استدیوتو و همکاران (Steduto *et al.*, 2009). نتیجه گرفتند که استفاده از مدل AquaCrop در واقع تلاشی است برای توسعه مدلی ساده، همه کاره، و قوی که می‌تواند در تعیین کاربرد آب بهینه تحت شرایطی از مجموعه‌های متفاوت به کار رود. گارسیا و همکاران (Garcia-Vila *et al.*, 2009) نشان دادند که این مدل در سناریوهای متفاوت آب و هوایی قابلیت خوبی برای بهینه‌سازی مدیریت آبیاری دارد. گرت و همکاران (Geerts *et al.*, 2009) نیز از مدل مذکور برای شبیه‌سازی بیان خاک، عملکرد دانه، و ماده خشک کشت گیاه *Chenopodium qvinuu* استفاده کردند.

برای تعیین کارایی آب در سطوح مختلف حوضه و شبکه‌های آبیاری از نتایج شبیه‌سازی بیان آب در خاک و رشد محصول استفاده شده است (Akbari *et al.*, 2008). در مطالعه‌ای از مدل SWAP در سه مقیاس مزرعه، شبکه آبیاری، و حوضه برای تعیین و شبیه‌سازی اجزای معادله بیان آب و محاسبه کارایی آب استفاده شد. نتایج نشان داد که مقدار شاخص PWirrigated (نسبت عملکرد محصول به میزان آب آبیاری) در سطح شبکه به علت وجود اراضی بدون آبیاری، بیشتر از مقدار این شاخص در سطح مزرعه است. کارایی آب در سطح

بررسی اطلاعات موجود و اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای
در این تحقیق از داده‌ها و اطلاعات سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ استفاده شده است (Akbari et al., 2009: Anon, 2002) با توجه به متفاوت بودن تقویم زراعی و مدیریت آبیاری در شرایط متفاوت شوری، نوع محصول، و نوع خاک، با بررسی نقشه‌های طبقه بندی خاک، شبکه آبیاری آبشار به عنوان منطقه با بافت همگن انتخاب شد (شکل ۱). برای این منطقه، مشخصات بافت خاک و مشخصات هیدرولیکی مانند میزان رطوبت در ظرفیت زراعی (FC)، حد پژمردگی دائم (PWP)، درصد رطوبت اشباع (θ_{sat})، کل رطوبت قابل دسترس در خاک (TAW)، و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک (Ksat) که در مطالعات خاکشناسی منطقه تعیین شده بود، جمع‌آوری و در مدل AquaCrop به کار گرفته شد (جدول ۱). داده‌های روزانه هواشناسی شامل تابش خورشیدی، بارندگی، دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی و سرعت باد در ارتفاع دو متری، ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کبوترآباد (برای سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲) استفاده شد.

حداکثر، دمای حداقل روزانه هوا، بارندگی روزانه، تبخیر و تعرق مرجع (ET_o)، و میانگین غلظت دی اکسید کربن سالانه در جو. در بخش گیاه به اطلاعات جامعی در خصوص مراحل رشد گیاه، زمان و درصد پوشش سطح زمین، زمان و مدت گلدهی، عمق توسعه ریشه و زمان حداکثر مقدار آن، ضرایب مرتبط با ماده خشک تولیدی از جمله شاخص برداشت محصول، ضرایب مرتبط با تنش آبی و دمایی گیاه و تنش‌های کود گیاه نیاز است که عمدتاً در دسترس نیستند و عموماً از مقادیر اولیه استفاده می‌شود که در مدل قرار داده شده‌اند.

داده‌های ورودی در بخش خاک شامل ویژگی‌های هیدرولیکی خاک از جمله هدایت هیدرولیکی اشباع، درصد رطوبت حجمی در حالت اشباع، ظرفیت مزرعه، و نقطه پژمردگی هستند. در بخش مدیریت زراعی، مقدار کود، میزان استفاده از مالچ، و رونا ب سطحی مطرح هستند و در بخش مدیریت آبیاری، روش آبیاری، زمان آبیاری، و میزان آب آبیاری یا شاخص‌های برنامه‌ریزی آبیاری مشخص می‌شوند.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و خصوصیات هیدرولیکی لایه‌های خاک در منطقه مورد مطالعه

عمق	رس	شن	لای	FC	PWP	θ_{sat}	TAW	K _{sat}
سانتی‌متر	درصد	درصد	درصد	درصد	درصد حجمی	میلی‌متر بر متر	سانتی‌متر بر روز	سانتی‌متر بر روز
۰-۳۰	۳۵	۲۱	۴۴	۳۱	۱۵	۴۸	۱۶۰	۳۸/۳
۳۰-۵۵	۶۴	۱۰	۲۶	۳۴	۱۷	۵۱	۱۷۰	۲۶/۷
> ۵۵	۴۶	۵	۴۹	۳۰	۱۴	۴۹	۱۶۰	۷/۹

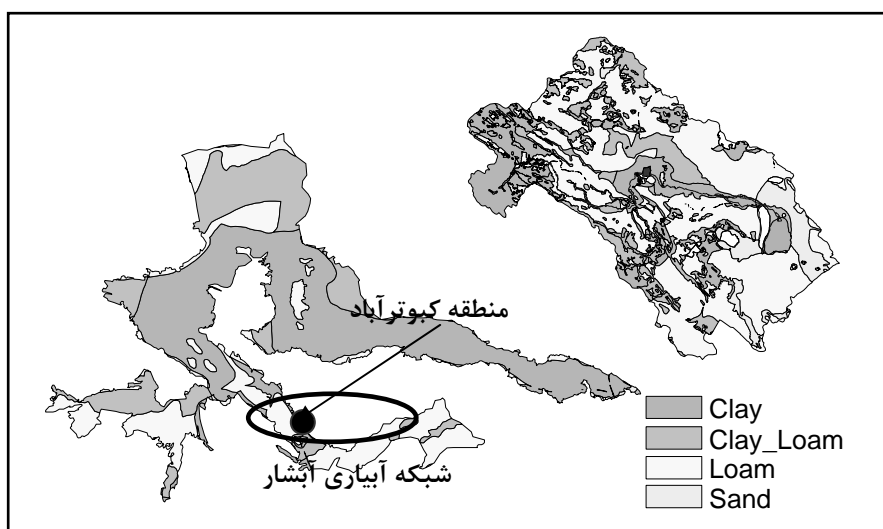
نیز تاریخ برداشت و میزان عملکرد محصول یادداشت شد. اگر چه همه آبیاری‌ها اندازه‌گیری و یادداشت برداری نشده بود، ولی با استفاده از اطلاعات دریافتی از کشاورزان و با توجه به توزیع گردشی آب بین حقباه‌داران، تاریخ‌های آبیاری تعیین گردید. برای اندازه‌گیری جریان ورودی آب به مزارع از فلوم نوع WSCF تیپ ۴ و ۵ واسنجی شده

به منظور تهیه اطلاعات زراعی مورد نیاز مدل، تاریخ آبیاری، میزان آب آبیاری و شوری آن، عمق توسعه ریشه، وضعیت ظاهری مزرعه از نظر شوری و تنش آبی، و ارتفاع گیاه گندم در دو تا سه نوبت در ۱۸ مزرعه همگن از نظر بافت و شوری خاک، در شبکه آبیاری آبشار یادداشت‌برداری یا اندازه‌گیری شد؛ در انتهای فصل رشد

بیان آب خاک و عملکرد محصول گندم با استفاده...

حفر گودال و اندازه‌گیری با خط‌کش به دست آمد. از این اطلاعات برای داده‌های ورودی مدل استفاده گردید.

استفاده شد. در هر نوبت آبیاری، مدت زمان آبیاری، مساحت کرت و میزان آب ورودی به مزرعه اندازه‌گیری و عمق آب آبیاری تعیین شد. عمق توسعه ریشه با



شکل ۱- بافت خاک شبکه‌های مختلف آبیاری در حوضه زاینده رود (طرح جامع کشاورزی، اقتباس از (Drooders & Torabi, 2002))

تهیه و واسنجی مدل AquaCrop مطابق با مراحل زیر

انجام گردید:

- اجرای مدل و مقایسه عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد اندازه‌گیری شده در شرایط مختلف مزرعه آزمایشی.

- در حالتی که عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد اندازه‌گیری شده تطبیق نداشت این شاخص‌های گیاهی تغییر داده شد: مراحل رشد گیاه، زمان و درصد پوشش سطح زمین، زمان و دوره گلدهی، عمق توسعه ریشه و دوره حداکثر مقدار آن، ضرایب مرتبط با ماده خشک تولیدی مانند شاخص برداشت محصول و ضرایب مرتبط با تنش آبی در دامنه مجاز بر اساس داده‌های اندازه‌گیری یا جمع‌آوری شد. این مراحل تا آنجا تکرار شد که نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده بر عملکرد اندازه‌گیری با دقت قابل قبولی منطبق شود.

واسنجی و صحت سنجی

در این تحقیق به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل AquaCrop، گندم انتخاب و از بخش‌های مربوط به رشد محصول و بیان آب و برنامه‌ریزی آبیاری، مدل استفاده شد. برای واسنجی مدل AquaCrop از داده‌های سال زراعی ۸۱-۱۳۸۰ یک مزرعه آزمایشی گندم (Oghdaie, 1382) ایستگاه تحقیقاتی کبوترآباد استفاده شد که مشتمل بود بر تاریخ‌های آبیاری، میزان آب آبیاری، ارتفاع بوته، و تاریخ برداشت محصول (داده‌های مزرعه‌ای که هم دقیق بودند و هم قابل دسترس). در این مزرعه آزمایشی گندم، دور آبیاری در چهار تیمار، بعد از ۵۰، ۶۵، ۸۰ و ۹۰ میلی‌متر تبخیرتجمعی از تشتک کلاس A در نظر گرفته شده بود و در هر نوبت به اندازه میزان تبخیرتجمعی از تشتک، آبیاری انجام گرفته بود. با استفاده از اطلاعات این مزرعه آزمایشی، داده‌های ورودی مورد نیاز

- به منظور صحت سنجی مدل، با استفاده از مدل واسنجی شده و به کارگیری اطلاعات اندازه‌گیری شده در مزارع کشاورزان در شرایط متفاوت مدیریتی (تاریخ آبیاری، عمق آب آبیاری)، عملکرد محصول در مزارع مختلف شبیه‌سازی و با عملکرد اندازه‌گیری شده مقایسه شد.

برنامه‌ریزی آبیاری

برای برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط مختلف مزرعه‌ای و تأثیر تغییرات کمی آب آبیاری بر عملکرد محصول، از مدل AquaCrop پس از واسنجی و صحت‌سنجی استفاده شد. کشاورزان در شرایط موجود برای گندم پاییزه حدود ۸۰۰ میلی‌متر آب استفاده می‌کنند: برای آبیاری اول حدود ۲۰۰ میلی‌متر و برای سایر آبیاری‌ها حدود ۱۰۰ میلی‌متر. شرایط موجود بهره‌برداری به عنوان سناریوی مبنا در نظر گرفته شد. در این پژوهش با توجه به توزیع گردشی آب بین حلقه‌داران، در بخش اول، فرض شد که تغییر تاریخ نوبت‌های آبیاری برای تعدادی از کشاورزان امکان‌پذیر نیست و از این‌رو این دسته از کشاورزان به منظور کاهش آب آبیاری و افزایش کارایی آب فقط می‌توانند نوبت‌هایی از آبیاری‌ها را حذف کنند که اهمیت کمتری دارند. در زمان کاشت گندم پاییزه در منطقه مورد مطالعه باران مناسب نمی‌بارد و از این‌رو آبیاری اول ضروری است. در بخش اول، علاوه بر سناریوی مبنا، هفت سناریو به شرح جدول ۲ تعریف گردید.

در بخش دوم فرض شد که ۲۰۰ میلی‌متر عمق آب که کشاورزان برای نوبت اول آبیاری استفاده می‌کنند، لازم است اما تعدادی از کشاورزان می‌توانند با بهبود مدیریت زراعی عمق آب را در سایر آبیاری‌ها کاهش دهند. لذا در بخش دوم برای این دسته از کشاورزان ۷ سناریو تعریف شد (جدول ۲). بررسی‌ها نشان می‌دهد که عمق آب آبیاری اول (۲۰۰ میلی‌متر) نیز بیش از حد مورد نیاز

است و کشاورزان می‌توانند با بهبود مدیریت زراعی عمق آب همه آبیاری‌ها را کاهش دهند. بر این مبنا، در بخش سوم، چهار سناریوی جدید تعریف شد (جدول ۲). در این بخش امکان تغییر نوبت‌های آبیاری برای آن دسته از کشاورزان فراهم است که آب را از چاه با پمپاژ تأمین می‌کنند. در بخش چهارم این پژوهش فرض شد که عمق آب آبیاری در شرایط موجود ثابت و بر اساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای برابر با ۱۰۰ میلی‌متر است. اما تاریخ نوبت‌های آبیاری قابل تغییر است. لذا با فرض ثابت بودن عمق آبیاری و استفاده از مدل AquaCrop مقادیر مختلف آب آبیاری بین ۲۰۰ تا ۷۰۰ میلی‌متر برنامه‌ریزی و با سناریوی مبنا مقایسه شد (جدول ۲).

نتایج و بحث

نتایج صحت‌سنجی مدل AquaCrop نشان می‌دهد که مدل دقت قابل قبولی دارد و می‌توان از آن به عنوان ابزاری برای بررسی بیلان آب در خاک، عملکرد محصول و برنامه‌ریزی آبیاری استفاده کرد. گارسیا و همکاران (Garcia-Vila et al., 2009) نیز نشان دادند که این مدل قابلیت خوبی برای بهینه‌سازی مدیریت آبیاری تحت سناریوهای متفاوت آب و هوایی دارد که با نتایج این تحقیق مطابق است. نتایج صحت‌سنجی مدل در شرایط متفاوت مدیریت آبیاری مزارع به شرح ارائه شده در بخش مواد و روش‌ها برای گندم در شکل ۲ نشان داده شده است.

نتایج صحت سنجی مدل AquaCrop برای گندم نشان می‌دهد که این مدل عملکرد محصول را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی می‌کند. شکل ۲ نشان می‌دهد که ضریب همبستگی مقادیر اندازه‌گیری و برآورد شده برای گندم ۶۷ درصد و ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE) ۰/۶۷ تن در هکتار است. همچنین شاخص میانگین خطای مطلق (MAE) و انحراف مدل (ME) مبین آن

بیان آب خاک و عملکرد محصول گندم با استفاده...

است که مدل باخطای ۲۳۸ کیلوگرم برهکتار عملکرد میزان کود، بروز آفات و بیماری‌ها، تراکم علف‌های هرز، و گندم را برآورد کرده است و ضریب همبستگی نسبتاً مدیریت آبیاری بستگی دارد، ولی در شبیه‌سازی‌ها از این بالایی دارد. بدیهی است عملکرد محصول به عواملی مانند محدودیت‌ها صرف نظر شده است.

جدول ۲- مشخصات سناریوهای مختلف آبیاری در شرایط موجود و بهبود مدیریت زراعی و آبی در منطقه مورد مطالعه

شرح سناریو	تعداد آبیاری‌ها میلی‌متر	آب‌ریزی اول میلی‌متر	تعداد دوره‌ها	فرض‌ها	
شرایط موجود آبیاری (سناریوی مبنا)	۱۰۰	۲۰۰	۱	حفظ تاریخ‌ها و میزان عمق آب آبیاری (امکان حذف نوبت‌های آبیاری)	بخش اول
حذف آبیاری دوم در شرایط موجود	۱۰۰	۲۰۰	۲		
حذف آبیاری دوم و سوم در شرایط موجود	۱۰۰	۲۰۰	۳		
حذف آبیاری دوم، سوم و هفتم در شرایط موجود	۱۰۰	۲۰۰	۴		
حذف آبیاری دوم، سوم، چهارم و هفتم در شرایط موجود	۱۰۰	۲۰۰	۵		
حذف آبیاری دوم، چهارم و هفتم در شرایط موجود	۱۰۰	۲۰۰	۶		
حذف آبیاری دوم، سوم، پنجم و هفتم در شرایط موجود	۱۰۰	۲۰۰	۷		
حذف آبیاری دوم، سوم، ششم و هفتم در شرایط موجود	۱۰۰	۲۰۰	۸		
کاهش عمق آب سایر آبیاری‌ها در سناریوی ۲	۸۰	۲۰۰	۹	کاهش عمق آب آبیاری‌ها به جز آبیاری اول	بخش دوم
کاهش عمق آب سایر آبیاری‌ها در سناریوی ۳	۸۰	۲۰۰	۱۰		
کاهش عمق آب سایر آبیاری‌ها در سناریوی ۴	۸۰	۲۰۰	۱۱		
کاهش عمق آب سایر آبیاری‌ها در سناریوی ۵	۸۰	۲۰۰	۱۲		
کاهش عمق آب سایر آبیاری‌ها در سناریوی ۶	۸۰	۲۰۰	۱۳		
کاهش عمق آب سایر آبیاری‌ها در سناریوی ۷	۸۰	۲۰۰	۱۴		
کاهش عمق آب سایر آبیاری‌ها در سناریوی ۸	۸۰	۲۰۰	۱۵		
کاهش عمق آب آبیاری اول در شرایط موجود	۱۰۰	۱۰۰	۱۶		
کاهش عمق آب آبیاری اول و حذف آبیاری دوم در شرایط موجود	۱۰۰	۱۰۰	۱۷		
کاهش عمق آب همه آبیاری‌ها و حذف آبیاری دوم در شرایط موجود	۸۰	۱۰۰	۱۸		
کاهش عمق آب همه آبیاری‌ها و حذف آبیاری دوم در شرایط موجود	۸۰	۸۰	۱۹		
خاک آب + انجام یک آبیاری (در تاریخ پیشنهادی مدل)	۱۰۰	۱۰۰	۲۰	عمق آبیاری ثابت و تاریخ‌های آبیاری قابل تغییر	بخش چهارم
خاک آب + انجام دو آبیاری (در تاریخ‌های پیشنهادی مدل)	۱۰۰	۱۰۰	۲۱		
خاک آب + انجام سه آبیاری (در تاریخ‌های پیشنهادی مدل)	۱۰۰	۱۰۰	۲۲		
خاک آب + انجام چهار آبیاری (در تاریخ‌های پیشنهادی مدل)	۱۰۰	۱۰۰	۲۳		
خاک آب + انجام پنج آبیاری (در تاریخ‌های پیشنهادی مدل)	۱۰۰	۱۰۰	۲۴		
خاک آب + انجام شش آبیاری (در تاریخ‌های پیشنهادی مدل)	۱۰۰	۱۰۰	۲۵		

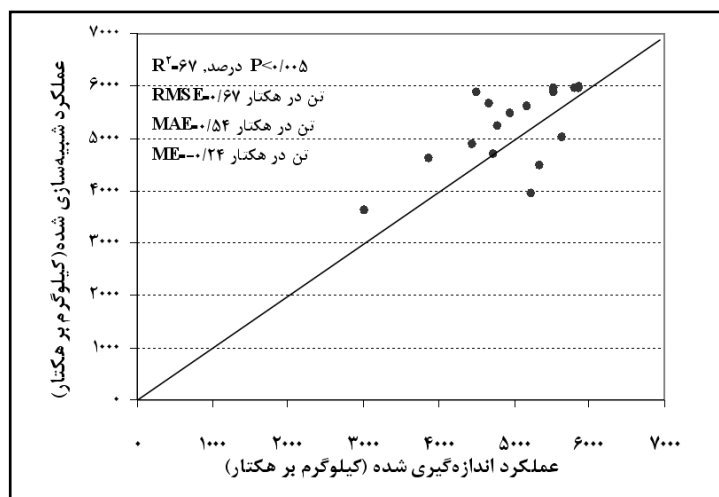
دیگر (تعریف شده در بخش مواد و روش‌ها) در جدول ۳ آورده شده است. برابر این جدول، در سناریوی مبنا از مجموع ۸۶۷/۱ میلی‌متر آب قابل دسترس (۶۷/۱ میلی‌متر بارندگی و ۸۰۰ میلی‌متر آب آبیاری) ۴۵۷/۲ میلی‌متر به

تأثیر تغییرات کمی آب آبیاری بر عملکرد محصول

سناریوی مبنا

نتایج بیان آب در خاک و پارامترهای مختلف بیان آب در خاک برای سناریوی مبنا و بیست و چهار سناریوی

مصرف واقعی گیاه رسیده (تعرق واقعی) و حدود ۵۰ جمله نفوذ عمقی (۱۹۳/۸ میلی‌متر) از دسترس خارج درصد آب قابل دسترس به شکل‌های مختلف از شده است.



شکل ۲- نتایج صحت سنجی مدل AquaCrop برای گندم در سال زراعی ۸۳-۱۳۸۲ در شبکه آبیاری آبشار

سناریوی مبنا وجود ندارد. در سناریوی ۲ و ۳ نفوذ عمقی به ترتیب ۴۸ و ۹۱ درصد نسبت به سناریوی مبنا کاهش یافته است، بدون اینکه عملکرد محصول تغییر چشمگیر داشته باشد. سناریوی ۴، (حذف آبیاری دوم، سوم و هفتم در سناریوی مبنا)، با مصرف ۵۰۰ میلی‌متر آب، بیشترین کاهش آب (۳۰۰ میلی‌متر) را داشته است و به عنوان سناریوی برتر انتخاب شد. در این سناریو بیش از ۷۷ درصد از آب قابل دسترس به مصرف واقعی گیاه می‌رسد (تعرق واقعی) و فقط ۳ درصد به صورت نفوذ عمقی از دسترس خارج می‌شود. از طرف دیگر، تبخیر از سطح خاک اجتناب ناپذیر است و اگر میزان تبخیر واقعی از سطح خاک نیز به عنوان آب مؤثر در تولید منظور شود، مصرف مفید به حدود ۹۰ درصد آب قابل دسترس خواهد رسید. در این سناریو اگر چه عملکرد محصول ۴ درصد کاهش یافته اما کارایی مصرف آب بیش از ۴۵ درصد افزایش داشته است. این سناریو یکی از سناریوهای کاملاً کاربردی برای سال‌های نرمال آبی است. در شرایط خشکسالی و سال‌هایی که آب قابل دسترس کم است،

جدول ۳ همچنین نشان می‌دهد که در شرایط موجود از آب قابل دسترس به شکل مناسبی بهره‌برداری نمی‌شود و نیاز است با روش‌های کاربردی برای بهبود بهره‌وری آب تلاش شود. دروگرز و همکاران (Droogers & Kite, 2001) نیز در تحقیقات خود در شبکه آبیاری رودشت اصفهان به نتایج مشابهی دست یافتند. بدیهی است که آبیاری به میزان مورد نیاز و در زمان مورد نیاز بهترین گزینه خواهد بود. اما این راهکار با شرایط واقعی کشاورزی مطابقت ندارد و لازم است که با توجه به شرایط واقعی استفاده از آب راهکاری نزدیک به شرایط بهینه انتخاب شود. در بخش اول از این پژوهش فرض شد که تغییر تاریخ نوبت‌های آبیاری برای تعدادی از کشاورزان امکان‌پذیر نیست. این افراد، به منظور کاهش آب آبیاری و افزایش سودمندی آب فقط می‌توانند تعدادی از دفعات آبیاری را که اهمیت کمتری دارند حذف کنند (سناریوی ۲ تا ۸ جدول ۲). نتایج تجزیه و تحلیل این سناریوها نشان داد (جدول ۳) که از نظر عملکرد محصول و عملکرد بیولوژیکی تفاوت معنی‌داری بین سناریوهای ۲، ۳، ۴ و

بیان آب خاک و عملکرد محصول گندم با استفاده...

از مدل شبیه‌سازی SWAP روی مدیریت مصرف آب در شبکه‌های آبیاری در حوضه زاینده رود، بهبود برنامه‌ریزی آبیاری را جهت افزایش عملکرد محصول و کارایی مصرف آب توصیه کردند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. این محققان همچنین کم‌آبیاری و کاهش سطح زیر کشت را در شرایط کم آبی و خشکسالی پیشنهاد کرده‌اند.

سناریوی ۷ یعنی حذف آبیاری دوم، سوم، پنجم و هفتم در شرایط موجود توصیه می‌شود. اگر چه در این سناریو عملاً کم‌آبیاری وجود داشته اما، با کاهش ۵۰ درصد آب آبیاری، عملکرد محصول ۲۶ درصد کاهش و کارایی مصرف آب ۳۷ درصد افزایش یافته است. دروگرز و ترابی (Drooders & Torabi, 2002) نیز در مطالعه‌ای با استفاده

جدول ۳- نتایج پارامترهای مختلف بیان آب در خاک برای سناریوهای مختلف آبیاری گندم با استفاده از مدل AquaCrop

کارایی مصرف آب	عملکرد بیولوژیکی	عملکرد	تبخیر پتانسیل	تغرق پتانسیل	تبخیر واقعی	تغرق واقعی	نفوذ عمقی	آبیاری	سناریوها	فرضیه‌ها	
کیلوگرم بر متر مکعب	کیلوگرم بر هکتار	کیلوگرم بر هکتار	میلی‌متر								
۰/۶۰۲	۱۴۱۹۹	۵۲۱۸	۱۹۸/۲	۵۱۶/۴	۹۵/۲	۴۵۷/۲	۱۹۳/۸	۸۰۰	مبنا	حفظ تاریخ‌ها و عمق آب آبیاری (امکان حذف نوبت‌های آبیاری)	بخش اول
۰/۶۸۰	۱۴۱۷۵	۵۲۱۴	۴۰۰/۴	۵۱۹/۱	۸۸/۸	۴۵۶/۴	۱۰۰/۹	۷۰۰	۲		
۰/۷۷۱	۱۳۷۳۸	۵۱۴۳	۲۱۰/۶	۵۰۵/۱	۸۵/۵	۴۴۲/۷	۱۸/۱	۶۰۰	۳		
۰/۸۸۳	۱۳۶۴۸	۵۰۰۹	۲۱۰/۶	۵۰۵/۱	۶۹/۲	۴۳۹/۳	۱۸/۱	۵۰۰	۴		
۰/۷۶۶	۹۸۴۴	۳۵۷۶	۳۰۷/۹	۳۹۰/۰	۷۹/۶	۳۱۳/۸	۱۸/۱	۴۰۰	۵		
۰/۸۲۰	۱۲۳۹۰	۴۶۵۱	۲۱۹/۷	۴۸۹/۵	۷۷/۲	۳۹۲/۷	۵۶/۲	۵۰۰	۶		
۰/۸۲۳	۱۰۷۵۴	۳۸۴۴	۲۴۸/۱	۴۳۸/۹	۷۰/۶	۳۳۰/۴	۱۸/۱	۴۰۰	۷		
۰/۶۵۹	۱۱۶۶۳	۳۰۷۶	۲۲۸/۸	۴۷۵/۴	۶۴	۳۵۴/۶	۱۸/۱	۴۰۰	۸		
۰/۷۱۶	۱۳۲۹۸	۴۷۷۶	۲۰۱/۳	۵۱۱/۰	۸۹/۴	۴۲۰/۴	۶۰/۹	۶۰۰	۹	کاهش عمق آب آبیاری‌ها به جز آبیاری اول	بخش دوم
۰/۷۷۳	۱۲۲۰۰	۴۵۳۷	۲۲۲/۴	۴۸۹/۶	۸۹/۱	۳۸۳/۴	۱۸/۱	۵۲۰	۱۰		
۰/۸۶۵	۱۲۱۱۱	۴۳۸۸	۲۲۲/۴	۴۸۹/۶	۷۲/۴	۳۸۰/۰	۱۸/۱	۴۴۰	۱۱		
۰/۷۴۴	۸۹۴۵	۳۱۷۷	۳۱۹/۳	۳۷۲/۲	۸۱/۴	۲۷۸/۳	۱۸/۱	۳۶۰	۱۲		
۰/۸۲۱	۱۱۴۳۸	۴۱۶۳	۲۲۶/۱	۴۷۷/۲	۷۸/۲	۳۵۵/۰	۳۶/۲	۴۴۰	۱۳		
۰/۵۶۸	۱۰۵۵۳	۲۴۲۵	۲۵۴/۹	۴۳۹/۱	۶۶	۳۱۳/۲	۱۸/۱	۳۶۰	۱۴		
۰/۷۷۲	۹۶۰۵	۳۲۹۶	۲۷۲/۹	۴۰۵/۷	۷۳/۶	۲۸۷/۶	۱۸/۱	۳۶۰	۱۵		
۰/۶۸۰	۱۴۱۹۹	۵۲۱۸	۱۹۸/۲	۵۱۶/۴	۹۵/۲	۴۵۷/۲	۹۳/۸	۷۰۰	۱۶	کاهش عمق آب در همه آبیاری‌ها	بخش سوم
۰/۷۸۱	۱۴۱۳۳	۵۲۰۹	۲۰۰/۴	۵۱۴/۳	۸۹/۲	۴۵۶/۴	۱/۶	۶۰۰	۱۷		
۰/۸۶۲	۱۳۰۵۳	۴۸۸۹	۲۰۵/۱	۵۰۶/۷	۹۰/۶	۴۱۲/۰	۰	۵۰۰	۱۸		
۰/۸۳۲	۱۲۲۴۱	۴۵۵۲	۲۲۲/۴	۴۸۹/۳	۹۰/۶	۳۸۵/۵	۰	۴۸۰	۱۹		
۱/۰۱۴	۷۴۸۸	۲۷۰۸	۳۶۴/۳	۳۰۸/۳	۷۶/۴	۲۲۳/۵	۹/۸	۲۰۰	۲۰	عمق آبیاری ثابت و تاریخ‌های آبیاری قابل تغییر	بخش چهارم
۱/۰۲۱	۱۰۵۶۳	۳۷۴۸	۲۷۳/۸	۴۴۶/۱	۷۵/۱	۳۳۵/۶	۹/۸	۳۰۰	۲۱		
۱/۰۳۹	۱۲۷۲۶	۴۸۵۲	۲۵۵/۰	۴۷۰/۱	۷۸/۲	۴۱۸/۷	۹/۸	۴۰۰	۲۲		
۱/۰۷۵	۱۵۱۱۹	۶۰۹۵	۲۱۴/۶	۵۰۵/۰	۷۱/۰	۵۰۲/۶	۹/۸	۵۰۰	۲۳		
۰/۹۲۰	۱۵۶۳۹	۶۱۳۵	۱۹۷/۵	۵۱۹/۳	۷۲/۹	۵۱۹/۳	۵۲/۹	۶۰۰	۲۴		
۰/۸۰۱	۱۵۶۹۹	۶۱۴۵	۱۹۵/۶	۵۲۰/۹	۷۸/۳	۵۲۰/۹	۱۱۹/۷	۷۰۰	۲۵		

بهبود مدیریت زراعی

حدود ۲۰۰ میلی‌متر آب در آبیاری اول و حدود ۱۰۰ میلی‌متر برای هر بار آبیاری‌های بعد، با توجه به خصوصیات خاک و عمق توسعه ریشه گندم، بیش از مقدار مورد نیاز است. اما به علت مشکلات در مدیریت زراعی، کاهش عمق آب آبیاری در شرایط موجود امکان‌پذیر نخواهد بود. از این‌رو یکی از راهکارهای استفاده بهینه از آب می‌تواند بهبود مدیریت زراعی و انتخاب پارامترهای فوق بر اساس اصول مهندسی آبیاری باشد که نتیجه آن کاهش تلفات نفوذ عمقی و رواناب سطحی است. بهبود مدیریت زراعی به منظور کاهش عمق آب آبیاری در شرایط موجود در دو بخش شبیه‌سازی و تجزیه تحلیل شد. در بخش اول فرض شد که عمق آب آبیاری اول با توجه به نفوذپذیری خاک، مناسب است اما با بهبود مدیریت زراعی در سطح مزرعه می‌توان عمق آب سایر آبیاری‌ها را به ۸۰ میلی‌متر کاهش داد (سناریوهای شماره ۹ تا ۱۵ جدول ۲). نتایج نشان داد که سناریوی ۱۱ (کاهش عمق آب سایر آبیاری‌ها در سناریوی ۴ به ۸۰ میلی‌متر) دارای بیشترین کارایی مصرف آب است. در این سناریو میزان آب آبیاری ۴۵ درصد کاهش یافت و موجب شد که عملکرد محصول ۱۶ درصد کاهش یابد در حالی که کارایی مصرف آب نزدیک ۴۵ درصد افزایش یافت (جدول ۳). نتایج عملکرد بیولوژیکی روندی مشابه با عملکرد محصول را نشان می‌دهد. در بخش دوم فرض شده است که می‌توان با بهبود مدیریت زراعی عمق آب آبیاری را در تمام دفعات آبیاری کاهش داد (سناریوهای ۱۶ تا ۱۹ جدول ۲). نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش عمق آب آبیاری اول به ۱۰۰ میلی‌متر (سناریوی ۱۶) به علت نیاز تبخیر-تعرق پایین گیاه، هیچگونه تأثیری

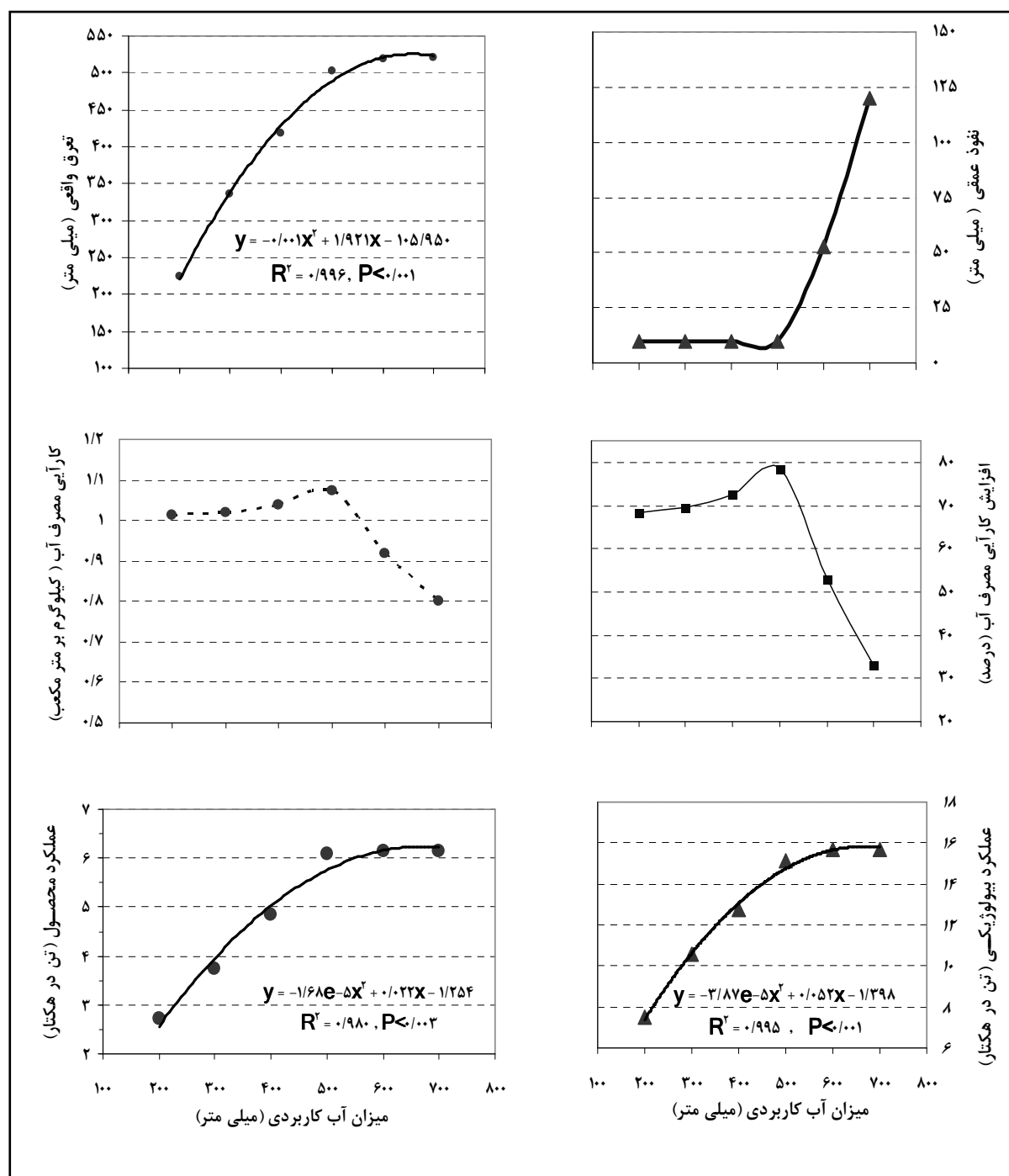
در عملکرد واقعی محصول و سایر پارامترهای بیلان آب در خاک (به جز نفوذ عمقی) ندارد. با این سناریو نفوذ عمقی بیش از ۵۰ درصد کاهش یافت یعنی از ۱۹۳/۸ میلی‌متر به ۹۳/۸ میلی‌متر رسید. کاهش عمق آب آبیاری اول به ۱۰۰ و سایر آبیاری‌ها به ۸۰ میلی‌متر، همراه با حذف نوبت دوم آبیاری (سناریوی ۱۸)، با بیشترین کارایی مصرف آب در بین سناریوهای تعریف شده در این بخش همراه بود. در این سناریو، میزان نفوذ عمقی ۱۰۰ درصد کاهش یافت و از ۱۹۳/۸ میلی‌متر به صفر رسید و با مصرف ۵۰۰ میلی‌متر آب، عملکرد محصول ۶ درصد کاهش یافت در حالی که کارایی مصرف آب ۴۳ درصد افزایش یافت. کاهش عمق آب آبیاری در سناریوهای ۱۷ تا ۱۹ موجب شد که نیاز آبی گیاه در مراحل مختلف رشد تأمین نشود و تعرق واقعی گیاه و در نتیجه عملکرد محصول کاهش یابد. این سناریوها هیچگونه نفوذ عمقی نداشتند اما کمبود آب موجود در خاک موجب ایجاد تنش برای گیاه و کاهش عملکرد بیولوژیکی شد. مقایسه نتایج سناریوهای بهبود مدیریت زراعی (سناریوهای ۹ تا ۱۹) با نتایج سناریوهای قطع نوبت‌های آبیاری (سناریوی ۲ تا ۸) نشان می‌دهد که سناریوهای ۴ و ۱۸ از نظر عملکرد محصول، کارایی مصرف آب، و میزان آب کاربردی تقریباً مشابه هستند و تفاوت معنی‌داری ندارند (جدول ۳). از این‌رو، سناریوی ۴ (قطع تعدادی از نوبت‌های آبیاری در شرایط موجود) که کاربردی‌تر و عملکرد محصول و کارایی مصرف آب در آن بالاتر است به عنوان سناریوی برتر در این بخش قابل توصیه است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که اگر مدل‌های شبیه‌سازی واسنجی و صحت‌یابی شوند می‌توانند بدون محدودیت‌های زمانی و مکانی موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای و صرف وقت و

استفاده از ۵۰۰ میلی‌متر آب و آبیاری در زمان مورد نیاز، عملکرد محصول ۱۶ درصد افزایش نشان می‌دهد ضمن اینکه ۳۸ درصد از آب آبیاری (نسبت به سناریوی مبنا) کاسته شده است (جدول ۳). در این سناریو تفرق واقعی و کارایی مصرف آب به ترتیب ۱۰ و ۷۹ درصد افزایش یافته است. لذا این سناریو به عنوان سناریوی برتر در کل سناریوهای مورد بررسی انتخاب و برای شرایطی که امکان آبیاری در زمان مناسب فراهم است قابل توصیه خواهد بود. از نتایج ارائه شده در جدول ۳ می‌توان جهت برآورد عملکرد محصول در شرایط مختلف کمی آب آبیاری استفاده کرد. جدول ۳ نشان می‌دهد در مواردی که میزان آب کاربردی کمتر از ۵۰۰ میلی‌متر در سال باشد، نفوذ عمقی حداقل و حدود ۱۰ میلی‌متر خواهد بود. افزایش میزان آب کاربردی بیش از ۵۰۰ میلی‌متر سبب می‌شود میزان نفوذ عمقی افزایش یابد و یک ارتباط خطی بین میزان آب کاربردی بیش از ۵۰۰ میلی‌متر و نفوذ عمقی مشاهده شود. با افزایش میزان آب آبیاری، پتانسیل تبخیر از سطح خاک نیز به دلیل رشد محصول کاهش می‌یابد اما تبخیر واقعی از سطح خاک تغییر قابل توجهی نخواهد کرد. حداکثر عملکرد از برنامه‌ریزی صحیح آبیاری به میزان ۵۰۰ میلی‌متر حاصل شده است و این میزان عمق آب آبیاری به عنوان عمق بهینه آبیاری محصول گندم در نظر گرفته شد.

هزینه زیاد به عنوان ابزارهای قدرتمند جهت برآورد عملکرد مورد انتظار محصول، برنامه‌ریزی آبیاری، و ارزیابی سناریوهای مدیریت آبیاری به کار گرفته شوند. این نتایج با یافته‌های سایر محققان از جمله استدیوتو و همکاران (Garcia-Vila *et al.*, 2009)، گارسیا و همکاران (Steduto *et al.*, 2009) و گرتس و همکاران (Geerts *et al.*, 2009) مطابقت دارد.

تغییرات کمی آب آبیاری

عملکرد محصول متأثر از عواملی از جمله تغییرات کمی آب آبیاری است. زمان کاربرد آب آبیاری و متناسب بودن آن با نیاز گیاه اهمیت زیادی دارد. تأثیر تغییرات کمی آب آبیاری بر عملکرد بیولوژیکی و عملکرد محصول گندم در شبکه آبشار اصفهان با استفاده از مدل AquaCrop تجزیه و تحلیل شد. نتایج و روند تغییرات پارامترهای بیان آب در خاک در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج تجزیه و تحلیل سناریوهای ۲۰ تا ۲۵ (جدول ۳) نشان می‌دهد که به طور کلی مصرف آب در سناریوی مبنا (۸۰۰ میلی‌متر آب آبیاری) بیش از مقدار آب مورد نیاز است و در این شرایط عملکرد گندم نیز کمتر از مقدار پتانسیل (بیش از ۶ تن در هکتار) است. نتایج بررسی این سناریوها نشان می‌دهد که آبیاری در زمان مورد نیاز بیشترین کارایی را دارد. در سناریوی ۲۳ با



شکل ۳- نتایج تغییرات کمی آب آبیاری (سناریوهای ۲۰ تا ۲۵) بر پارامترهای بیلان آب در خاک در آبیاری گندم با مدل AquaCrop

بررسی‌های سایر محققان از جمله گارسیا و همکاران (Droogers & Garcia-Vila *et al.*, 2009) و دروگرز و ترابی (Torabi, 2003) & مطابقت دارد. بیشترین مقدار این پارامترها با کاربرد ۶۰۰ میلی‌متر آب به دست آمده است

نتایج و روند تغییرات پارامترهای بیلان آب در خاک (شکل ۳) نشان می‌دهد که روند تغییرات میزان عملکرد بیولوژیکی، عملکرد محصول، و تعرق گیاه با میزان آب کاربردی از یک تابع درجه دوم تبعیت می‌کند که با نتایج

بهبود مدیریت آبیاری در مزارع از طریق کاربرد عمق مناسب آبیاری، برنامه‌ریزی صحیح آبیاری، و بهبود مدیریت زراعی در شرایط مختلف امکان پذیر است. استفاده از این راهکارها، ضمن افزایش ۱۶ درصد عملکرد محصول موجب کاهش ۳۸ درصد میزان آب مصرفی می‌شود و در نتیجه کارایی مصرف آب ۷۹ درصد افزایش می‌یابد نتایج همچنین نشان می‌دهد که می‌توان از مدل‌های شبیه‌سازی صحت سنجی شده به عنوان ابزارهای مناسب و با قابلیت‌های مختلف جهت بهبود مدیریت آبیاری استفاده برد.

میزان آب کاربردی کشاورزان به علل مختلف از جمله توزیع گردشی آب بین حقایبه‌داران، نفوذپذیری بالای خاک در آبیاری اول، و نا آگاهی آنها از میزان آب مورد نیاز، بیش از اندازه است، لذا توصیه می‌شود، شیوه‌های بهبود مدیریت آبیاری و مدیریت زراعی به کشاورزان آموزش داده شود تا آنها خود به توزیع آب، متناسب با نیاز واقعی گیاه و آبیاری در زمان مناسب و به میزان مورد نیاز روی آورند.

در مواردی که امکان آبیاری در زمان مناسب فراهم نیست قطع تعدادی از آبیاری‌ها (حذف آبیاری دوم، سوم و هفتم در سناریوی مبنا که اهمیت کمتری دارند) قابل توصیه است.

اما بیشترین کارایی مصرف آب و بیشترین درصد افزایش کارایی مصرف آب نسبت به شرایط موجود بهره‌برداری (سناریوی مبنا) مربوط به استفاده از کاربرد ۵۰۰ میلی‌متر آب آبیاری است. این شاخص‌ها برای مقادیر بیش از ۵۰۰ میلی‌متر آب کاربردی به شدت کاهش یافتند و نشان دادند که بیشترین مقادیر این شاخص‌ها در محدوده ۵۰۰ میلی‌متر آب کاربردی است. روند تغییرات نفوذ عمقی هم بیانگر آن است که در مقادیر کمتر از ۵۰۰ میلی‌متر آب کاربردی، میزان نفوذ عمقی تقریباً ثابت است اما با افزایش میزان آب کاربردی، نفوذ عمقی به صورت خطی و با شیب نسبتاً زیاد (حدود ۵۰ درصد) افزایش می‌یابد. از این رو میزان ۵۰۰ میلی‌متر آب کاربردی به عنوان عمق بهینه آبیاری محصول گندم در نظر گرفته شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که از مدل AquaCrop می‌توان برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک، برنامه‌ریزی آبیاری، بیان آب در خاک، و رشد محصول در شرایط متفاوت قابلیت دسترسی به آب بهره گرفت و نتایج رضایت بخش به دست آورد. این نتایج با نتایج تحقیقات سایر محققان از جمله فراهانی و همکاران (Farahani et al., 2009) رائر و همکاران (Raes et al., 2009)، و هنگ و همکاران (Heng et al., 2009) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

مراجع

- Anon, 2002. Agriculture Statistics Book. Agricultural Ministry Statistics and Information Bureau. (in Farsi)
- Aghdaei, M. 2002. Determination of potential water consumption in wheat and corn. Esfahan Agricultural Research Center. Research Report. 81/537. (in Farsi)
- Akbari, M, and DehghaniSanij, H. 2010. Impact of irrigation scheduling on water productivity using SWAP and AquaCrop simulation models, Workshop on Improving farm management strategies through AquaCrop: Worldwide collection of case studies. Oct.8-9. Yogyakarta. Indonesia.
- Akbari, M., Dehghanisanij, H. and Torabi, M. 2008. Evaluation of farm salinity using SWAP simulation model. Agric. Sci. Technol. J. Special Issue in Soil. Water and Air. 21(2):105-114. (in Farsi)

- Akbari, M., Dehghanisanij, H. and Mirlatifi, S.M. 2009. Impact of irrigation scheduling on agriculture water productivity. *Iranian J. Irrig. Drain.* 1, 69-79. (in Farsi)
- Droogers, P. and Kite, G. 2001. Simulation modelling at different scales to evaluate the productivity of water. *Physics and Chemistry of the Earth.* 26, 11-12; 877-880.
- Droogers, P. and Torabi, M. 2002. Field scale scenarios for water and salinity management by simulation modeling in the Zayandeh Rud basin. Esfahan Province. Iran. IAERI-IWMI Research Reports 12.
- Droogers, P., Torabi, M., Akbari, M. and Pazira, E. 2001, Field-scale modeling to explore salinity problems in irrigated agriculture. *Irrig. Drain.* 50, 77-90.
- Farahani, H.J., Izzi, G., Steduto, P. and Oweis, T.Y. 2009. Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. *Agron. J.* 101, 469-476.
- García-Vila, M., Fereres, E., Mateos, L., Orgaz, F. and Steduto, P. 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. *Agron. J.* 101, 477-487.
- García-Vila, M., Lorite, I.J., Soriano, M.A. and Fereres, E. 2008. Management trends and responses to water scarcity in an irrigation scheme of Southern Spain. *Agric. Water Manage.* 95, 458-468.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia Cardenas, M., Condori, O., Mamani, J., Miranda, R., Cusicanqui, J., Taboada, C., Yucra, E. and Vacher, J. 2008. Could deficit irrigation be a sustainable practice for quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in the Southern Bolivian Altiplano *Agric. Water Manage.* 95, 909-917.
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Miranda, R., Cusicanqui, J.A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V. and Steduto, P. 2009. Simulating yield response to water of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) with FAO-AquaCrop. *Agron. J.* 101, 499-508.
- Heng, L.K., Evett, S.R., Howell, T.A. and Hsiao, T.C. 2009. Calibration and testing of FAO aquacrop model for rainfed and irrigated maize. *Agron. J.* 101, 488-498.
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCrop. the FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agron. J.* 101, 448-459.
- Isidoro, D., Qulez., D. and Aragues, R. 2004. Water balance and irrigation performance analysis: La Violada irrigation district (Spain) as a case study. *Agric. Water Manage.* 64, 123-142.
- Molden, D. 2007. *Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture.* Earthscan. London.
- Panigrahi, B. and Sudhindra, N. P. 2003. Field test of a soil water balance simulation model. *Agricultural Water Manage.* 58, 223-240.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E. 2009. AquaCrop. the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agron. J.* 101, 438-447.

بیان آب خاک و عملکرد محصول گندم با استفاده...

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.C., Raes, D. and Fereres, E. 2009. AquaCropThe FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agron. J.* 101, 426-437.

Soil Water Balance and Crop Yield of Winter Wheat Using AquaCrop Simulation Model

M. Akbari*

* Corresponding Author: Assistant Professor of Agricultural Engineering Research Institute, Karaj, Iran, P.O. Box: 31585-845. E-Mail: akbari_m43@yahoo.com

Received: 10 January 2011, Accepted: 10 September 2011

The greatest limitations to agricultural development and production in Iran are scarcity of water resources, ineffective irrigation scheduling and wasteful water usage. Avenues discussed for optimum water use include improving water productivity by improving irrigation scheduling, farm water management and water profitability. The present study evaluated current water use and ways to improve winter wheat productivity by varying field scale water usage in the Abshar irrigation network in Esfahan province, Iran. Optimal irrigation depth and scheduling, and yield function for winter wheat using current water management tactics were determined. The availability of water, rotational water rights laws and field data were combined using the AquaCrop simulation model for field scale crop growth. Crop yield and winter wheat productivity were then simulated and compared to field results. Field research indicated that 800 mm of water is applied annually for winter wheat and crop yield averages 5000 kg per hectare. Improvements in water management and productivity based on different irrigation schedules (changes in depth and time) and water quantity schemes and the effect on water balance and crop yield were investigated. The baseline scheme used current conditions as a reference for other schemes. The results showed that eliminating the second, third and seventh irrigations from the schedule decreased the quantity of water applied by 38% and yield by 4%, which produced a 45% increase in water productivity over the baseline scheme. However, improving agronomic management and decreasing the first irrigation depth by 50% (from 200 to 100 mm) also produced a slight variation in crop yield. Increasing the water applied to the optimal depth increased water productivity, but increasing the water applied to greater than optimal levels had no significant effect on yield and decreased water productivity. The results showed that proper irrigation scheduling using the AquaCrop model in combination with improved agronomic management decreased the quantity of water applied during irrigation 38%, increased crop yield by 16% and water productivity by 79%.

Keywords: Agronomic management, AquaCrop model, Irrigation scheduling, Water productivity