تحلیل بهره‌وری آب گندم در مدیریت‌های آبیاری در برخی از مناطق ایران

محمد مهدی نخجوانی‌مقدم، بیژن قهرمان و قاسم زارعی [۱*]

استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
mehdin55@yahoo.com
استاد گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد.
bijangh@um.ac.ir
دانشیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
g.zarei@aeri.ir

چکیده

در شرایط حاضر مهمترین چالش بخش کشاورزی، افزایش بهره‌وری آب است. متأسفانه تاکنون در کشور ما تعیین و تحلیل شاخص بهره‌وری آب در کشاورزی مورد توجه جدی قرار نگرفته است و این امر موجب عدم اطمینان از مصرف صحیح آب در بخش کشاورزی شده‌است. این پژوهش با هدف بررسی بهره‌وری آب گندم تحت مدیریت‌های متفاوت آبیاری در ایستگاه‌های تحقیقاتی هشت استان کشور و تعیین عمق مناسب آبیاری گندم (در شرایط محدودیت منابع آبی) طی سال‌های ۹۰-۱۳۷۷ انجام شد. دامنهٔ تغییرات بهره‌وری آب کاربردی گندم در آزمایش‌های انجام شده برابر با ۱/۵-۰/۳ کیلوگرم بر مترمکعب بود که نسبت به دامنهٔ گزارش شده توسط سازمان خواربار جهانی برای کل جهان (۱-۰/۸ کیلوگرم بر مترمکعب) بالاتر، لیکن تقریباً در محدودهٔ دامنهٔ گزارش شده توسط زوارت و بستیانسن (۱/۷-۰/۶کیلوگرم بر مترمکعب) است. دامنهٔ وسیع بهره‌وری آب گندم، نشان‌دهندهٔ پتانسیل بالا برای افزایش تولید این محصول به‌ازای مصرف آب کمتر است. حداکثر مقادیر بهره‌وری آب آبیاری و آب کاربردی (آب آبیاری +بارندگی مؤثر) قابل حصول گندم در ایستگاه کرج به‌ترتیب ۲/۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب با آبیاری قطره‌ای و اعمال کم‌آبیاری نتیجه گردید. همچنین در ایستگاه کرمان، کمترین مقادیر بهره‌وری آب آبیاری و آب کاربردی گندم به‌ترتیب ۰/۴ و ۰/۳۶ کیلوگرم بر متر مکعب، در آبیاری سطحی مشاهده شد. حداکثر مقادیر بهره‌وری آب آبیاری و آب کاربردی گندم در ایستگاه مشهد، به‌ترتیب ۱/۹ و ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب در شرایط کاربرد کم‌آبیاری به‌دست آمد. نتایج نشان داد برای دسترسی به مقادیر بهینهٔ بهره‌وری آب آبیاری در منطقه مشهد و در شرایط محدودیت منابع آب، اولویت کشت گندم با مزارعی است که با اعمال مدیریت کم‌آبیاری کنترل‌شده و با مصرف آب آبیاری به میزان ۳۰۰ میلی‌متر، بهره‌وری آب این گیاه در حدود ۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب شود. همچنین با در نظر گرفتن میزان بارندگی مؤثر این منطقه، بایستی با بکارگیری کل آب کاربردی به اندازهٔ ۴۲۰ میلی‌متر و با اعمال مدیریت کم‌آبیاری، مقدار بهره‌وری آب کاربردی گندم برابر ۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل گردد.

واژه های کلیدی: بارندگی مؤثر، عمق مناسب آبیاری، کم‌آبیاری، کارآئی مصرف آب.

۱- آدرس نویسنده مسئول: کرج، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

* - دریافت: اسفند ۱۳۹٤ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۵

مقدمه

کشور ایران در محدوده‌ای از کرهٔ زمین واقع شده‌است که بیشتر مناطق آن خشک و یا نیمه‌خشک است. رشد فزایندهٔ جمعیت و نیاز روزافزون آنها به محصولات کشاورزی و از طرف دیگر، محدودیت منابع آب به‌عنوان نهادهٔ اصلی و محدودکنندهٔ تولیدات کشاورزی، مسالهٔ کم‌آبی و بحران آب را به‌گونه‌ای بسیار جدی فراروی کشور قرار داده‌است.

یکی از شاخص‌هایی که اهمیت نهاده آب را تبیین می‌کند، کارآیی مصرف آب[1] (WUE) است که نسبت عملکرد محصول به تبخیر – تعرق واقعی را نشان می‌دهد. دوایت (۱۹۵۸) اولین کسی بود که WUE را به‌صورت نسبت عملکرد گیاه (برحسب کیلوگرم) به میزان تعرق گیاه (برحسب مترمکعب) بیان نمود. وایتس (۱۹٦۲) WUE را برای نشان‌دادن نسبت عملکرد گیاه به مقدار آب مصرفی گیاه بکار برد. مولدن (۱۹۹۷) تعریفی جامع از WUE برای تحلیل آب مورد استفاده در سطوح مختلف زراعی ارائه کرد. این شاخص سبب شد تا چگونگی تعیین تبخیر – تعرق پتانسیل محصولات، ضرایب گیاهی، راندمان آبیاری، آبشویی، تبخیر – تعرق واقعی و نیز مباحث مربوط به بیلان آب در خاک، از جنبهٔ نظری مورد توجه بیشتری قرار گیرند. با این حال این مفاهیم خصوصاً تبخیر – تعرق واقعی هر چند در سطوح پژوهشی و علمی تعریف‌شده و قابل فهم هستند، اما در سطح بهره‌برداران و کشاورزان، این واژه‌ها غریب و نامأنوس بوده و هیچگاه در سطح مدیریت زراعی حاکم بر کشاورزی، جاری و قابل‌فهم نبوده‌اند. علاوه بر سختی، تنوع و تفرق روش‌ها در تعیین تبخیر – تعرق واقعی گیاهان، ساختار کشاورزی سنتی کشور (تنوع زراعی، قطعات کوچک، کم‌بها بودن آب و ....) نیز بر این مشکل افزوده است. برای رفع این معضل، پارامتر مفهومی دیگری با شکلی ساده‌تر و کاربردی‌تر تعریف شد که توانست با سرعتی چشم‌گیر در بین رده‌های مختلف جامعه توسعه یابد و این شاخص بهره‌وری بود که نه تنها در کشاورزی بلکه در رشته‌های دیگر چون انرژی، سرمایه، ساختارهای انسانی و اجتماعی، بهداشت، فرهنگ و ... نمود پیدا کرد (توکلی و همکاران، ۱۳۸۹).

واژهٔ بهره‌وری آب گیاه[2] (CWP) که برخی منابع آن را معادل کارائی مصرف آب (WUE) بیان نموده‌اند (زوارت و بستیانسن، ۲۰۰٤)، در واقع شاخصی متمایز از WUE است. در واقع این دو واژه غالباً در دو زمینهٔ متفاوت زراعت و مهندسی آبیاری تعریف می‌شوند. یک متخصص زراعت تمرکز بیشتری روی کارائی مصرف آب در منطقهٔ توسعهٔ ریشه برای تعرق گیاه و همچنین تبدیل آن به عملکرد قابل قبول دارد. در عوض یک مهندس آبیاری، تمرکز بیشتری روی بهره‌وری آب تحویل داده شده به خاک دارد (اسچمیت، ۲۰۰۱).

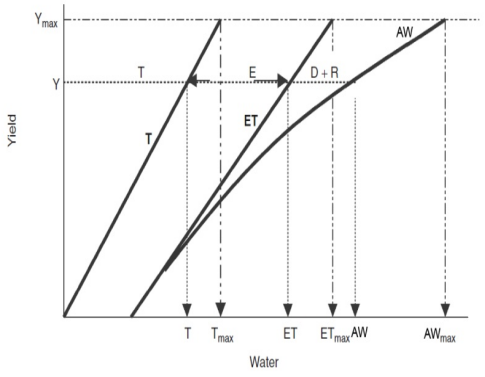
اصولاً شاخص CWP به طُرق مختلف قابل‌تعریف است (شکل ۱). چنانچه رابطهٔ خطی عملکرد با تعرق گیاهی سنجیده شود، مبنای بهره‌وری آب مقدار تعرق گیاه است ($WP_T = Y/T$). چنانچه رابطهٔ خطی عملکرد با تبخیر – تعرق گیاهی سنجیده شود، مبنای بهره‌وری آب میزان تبخیر – تعرق گیاه است ($WP_{ET} = Y/(E+T)$). لیکن اگر رابطهٔ غیرخطی عملکرد با آب مصرف شده برای تولید گیاه سنجیده شود، بهره‌وری آب به‌کار رفته مبنای محاسبه و تحلیل است ($WP_I = Y/AW$). در این روابط Y عملکرد گیاه و T، ET و AW به‌ترتیب مقادیر تعرق، تبخیر – تعرق و آب مصرف شده برای تولید محصول هستند (اویس و هاشم، ۲۰۰۳).

مهمترین پارامترهای مؤثر بر شاخص CWP در سطح مزرعه عبارتند از: مدیریت آبیاری (ژانگ، ۲۰۰۳ و حیدری، ۲۰۱٤)، تغییرات زمانی و مکانی بارندگی (ژانگ و اویس، ۱۹۹۹)، بروز و طغیان آفات و بیماری‌ها، مدیریت مصرف کود از نظر مقدار، زمان و منبع کود (زوارت و بستیانسن، ۲۰۰٤ و توکلی و اویس، ۲۰۰٤)،

[1]- Water Use Efficiency

[2]- Crop Water Productivity

مدیریت کاشت شامل آماده‌سازی زمین، نوع شخم و ادوات آن و آرایش کاشت (توکلی و همکاران، ۲۰۱۲) و مدیریت زراعی نظیر نوع رقم، تراکم و کیفیت بذر، زمان کاشت، خصوصیات فیزیولوژیکی گیاه و پتانسیل تولید (توکلی و همکاران، ۲۰۱۲).



شکل ۱- روش‌های متفاوت پیشنهاد شده برای تعیین شاخص بهره‌وری آب (CWP) براساس مقدار تعرق، تبخیر - تعرق و آب مصرف شده برای تولید محصول (اویس و هاشم، ۲۰۰۳)

کیجنه و همکاران (۲۰۰۳) پژوهش‌های انجام شدهٔ مرتبط با CWP از زمان معرفی این مفهوم را مورد بررسی و بازبینی قرار داده و راهکارهایی را به‌منظور افزایش این شاخص از طریق بهبود مدیریت آب در سطوح گیاه، کرت، مزرعه و حوضهٔ‌آبریز، ارائه کرده‌اند. برخی از راهکارهای ارائه شده توسط آنها عبارتند از: ۱- در سطح گیاه؛ افزایش تحمّل گیاهان به تنش خشکی و شوری از طریق بکارگیری شیوه‌های اصلاح نژاد گیاهان، ۲- در سطح کرت و مزرعه؛ افزایش شاخص‌های برداشت محصول [1] (HI) و نسبت برداشت [2] (HR)، کاربرد کم-آبیاری کنترل‌شده، اصلاح تاریخ کشت و خاک‌ورزی حفاظتی به‌منظور کاهش تبخیر - تعرق و افزایش نفوذ آب در خاک و ۳- در سطح حوضه آبریز؛ استفاده مجدّد از آب و بهبود الگوی‌کشت به‌منظور حداکثر کردن محصول و حداقل کردن تبخیر - تعرق.

در طی سال‌های اخیر تحقیقات مفید و کاربردی با هدف بازبینی و بررسی مقادیر CWP در نقاط مختلف دنیا انجام شده‌است. نتایج این بررسی‌ها نشان داده‌اند که بهبود شیوه‌های مدیریتی آب و خاک باعث افزایش شاخص CWP شده‌است (زوارت و بستیانسن، ۲۰۰۴). بهبود مدیریت آبیاری در مزرعه از طریق کاربرد روش‌های جدید آبیاری (آبیاری بارانی و قطره‌ای) این شاخص را به میزان قابل توجهی افزایش داده‌است (دهقانی و همکاران، ۲۰۰۶).

افزایش در بهره‌وری آب از سه طریق سیستم بیولوژیکی، محیطی و مدیریتی امکان‌پذیر است و لذا افزایش در بهره‌وری آب حاصل ارتباط و اثرات متقابل این سه سیستم است. به‌همین دلیل است که رابطهٔ آب و خاک گذشته بعدها به رابطهٔ آب، خاک و گیاه و اخیراً به رابطهٔ آب، خاک، گیاه و اتمسفر تبدیل شده‌اند. اگرچه در کشور فعالیت‌هایی در زمینهٔ بهبود بهره‌وری آب به انجام رسیده است، لیکن فاصلهٔ زیادی بین نتایج به‌دست آمده از تحقیقات و کاربرد آنها در بخش اجراء وجود دارد. این امر به‌طور عمده ناشی از تعامل محدود بین محققان، مروجان و کشاورزان برای انتقال و ترویج یافته‌های تحقیقاتی و دانش فنی جدید و مناسب این کار است (کشاورز و دهقانی‌سانیج، ۱۳۹۱).

چشم‌اندازهای وسیعی برای بهبود بهره‌وری آب وجود دارند که بسته به مناطق مختلف، متفاوت هستند. در مناطقی که در حال حاضر بهره‌وری آب بالایی دارند (کشورهای توسعه‌یافته)، نرخ بهبود بسیار محدود است. لیکن در بسیاری از مناطق تحت آبیاری و اراضی دیم دنیا (کشورهای در حال‌توسعه)، پتانسیل زیادی برای بهبود بهره‌وری آب وجود دارد. به‌همین دلیل بسیاری از کشاورزان در کشورهای در حال‌توسعه، می‌توانند با آموزش و بکارگیری روش‌های مدیریت آب و به‌زراعی توصیه شده، بهره‌وری آب را به‌طور قابل‌توجهی بهبود دهند (احسانی و خالدی، ۱۳۸۲).

راه‌های اثربخش زیادی برای بهبود بهره‌وری آب در اراضی آبی و دیم توصیه شده‌اند. تعدادی از این راهکارها عبارتند از: برنامه‌ریزی آبیاری یا آبیاری‌دقیق

[1]- Harvest Index
[2]- Harvest Ratio

(تعیین و اعمال دقیق نیاز آبی، عمق و دور آبیاری)، تحویل حجمی آب به کشاورزان براساس تعیین نیاز آبی واقعی گیاهان کشت‌شده، ارزش‌گذاری عادلانه و اقتصادی آب آبیاری، کم‌آبیاری کنترل شده، آبیاری تکمیلی، بکارگیری روش‌های نوین آبیاری شامل سامانه‌های آبیاری تحت فشار (بارانی، قطره‌ای سطحی و زیرسطحی)، ایجاد بازارها و تشکل‌های خرید و فروش آب با قیمت‌های واقعی، انتخاب ابعاد مناسب برای مزارع و تسطیح آنها در صورت آبیاری سطحی، مدیریت ذخیرهٔ آب در سطوح کوچک، مدیریت بهسازی و حاصلخیزی خاک، مدیریت زراعی خاک شامل کم‌خاک‌ورزی و بی‌خاک‌ورزی و استفاده توأم آب آبیاری و کود (کودآبیاری). همچنین با اصلاح ارقام و کاربرد بیوتکنولوژی کشاورزی نیز می‌توان به‌طور غیرمستقیم با تولید ارقام پرمحصول و مقاوم و کاهش میزان افت عملکرد در نتیجهٔ آفات و بیماری‌ها، بهبود رشد اولیه، کاستن از دورهٔ رشد گیاهان، کاهش حساسیت به خشکی و سایر تنش‌های محیطی، بهره‌وری آب را بهبود بخشید. پوشاندن سطح خاک (استفاده از مالچ‌های طبیعی و مصنوعی)، بکارگیری بازدارنده‌های تعرق روی سطوح خارجی برگ گیاهان، انتخاب آرایش کاشت بهینه برای گیاهان جهت کاهش تبخیر از سطح خاک، کشت نشائی گیاهان ردیفی برای حذف آبیاری‌های اول و توسعهٔ کشت‌های متراکم (کشت‌های گلخانه‌ای، احداث باغات نوین متراکم) نیز از دیگر راهکارهای افزایش بهره‌وری آب کشاورزی هستند (مولدن و همکاران، ۲۰۱۰؛ چاکالا و همکاران، ۲۰۱۵).

محصول گندم از دیرباز به‌طور مستقیم و غیرمستقیم، با زندگی روزانهٔ مردم عجین بوده‌است. نان، غذای اصلی مردم جهان از جمله ایرانیان است و تأمین آن در زمرهٔ اولین اولویت‌های جوامع بشری به‌شمار می‌آید. بنابراین، برنامه‌ریزی و اعمال مدیریت به‌منظور افزایش تولید این محصول اجتناب‌ناپذیر است. براساس آمار سال زراعی ۱۳۹۱، سطح زیرکشت گندم در کشور حدود ٦/٦ میلیون هکتار برآورد شده که ۳۷ درصد آن آبی و ٦۳ درصد بقیه دیم بوده‌است (بی‌نام، ۱۳۹۱). براساس آمار نامه وزارت جهاد کشاورزی در سال ۱۳۸۸، استان خراسان رضوی با ۹/۲۱ درصد، بیشترین سطح اراضی زیرکشت گندم ایران را به‌خود اختصاص داده‌است. میزان تولید گندم کشور حدود ۱۳/۵ میلیون تن برآورد شده که ٦٦/۵ درصد آن از کشت آبی و مابقی از کشت دیم بدست می‌آید. همچنین متوسط عملکرد گندم آبی کشور حدود ۳٦۷۲ کیلوگرم برآورد شده است (بی‌نام، ۱۳۸۸). علیزاده و همکاران (۱۳۸۹) کارآئی مصرف آب آبیاری گندم و کارآئی مصرف آب کل گندم (آب آبیاری و بارندگی) را در شهرستان کرج با اعمال سطوح مختلف کم‌آبیاری در دور آبیاری هفت روز، به‌ترتیب Kg/m^3 ۲/۵ – ۱/۹ و Kg/m^3 ۱/۱– ۰/۹ و با دور آبیاری ١٤ روز، به‌ترتیب Kg/m^3 ۱/۷–۲/۳ و Kg/m^3 ۱/۰ – ۰/۸ تعیین و گزارش کرده‌اند. عنابی‌میلانی و زمانی (۱۳۹۳) کارائی مصرف آب گندم رقم الوند را در آذربایجان‌شرقی Kg/m^3 ۰/۹۳ تعیین و گزارش کرده‌اند. حیدری (۲۰۱٤) مقدار شاخص CWPگندم را برای ایران به‌طور میانگین برابر ۰/۷۵کیلوگرم بر مترمکعب گزارش نموده‌است. ترک‌نژاد و همکاران (۱۳۸۵) گزارش نمودند که در منطقهٔ اسلام‌آباد کرمانشاه با تغییر روش آبیاری از سطحی به قطره‌ای، عملکرد دانهٔ گندم به میزان ۱۳ درصد (به‌ترتیب ۷٤۸۰ و ۸٤٤۵ کیلوگرم در هکتار) و بهره‌وری آب گندم به میزان ۸٦ درصد، افزایش یافت (به‌ترتیب ۱/۳۸ و ۲/۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب). عزیزی‌زهان و همکاران (۱۳۹۳) با تحلیل آزمایش‌های مزرعه‌ای انجام شده در موسسه تحقیقات خاک و آب (طی بیست سال اخیر) در نقاط مختلف کشور، دامنه تغییرات مقادیر بهره‌وری آب گندم را بین ۰/۳ تا ۲/٤ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش نمودند. آنها همچنین گزارش نمودند که بالاترین بهره‌وری آب این محصول در محدودهٔ آب مصرفی بین ۲۰۰ تا ٤۰۰ میلی‌متر، حاصل گردیده‌است.

فنگ‌مین و همکاران (۲۰۰۱) نتیجه گرفتند که با انجام آبیاری در زمانی که ٦۰–۵۰ درصد کل آب قابل-

استفاده خاک منطقهٔ توسعهٔ ریشه مصرف شده باشد، حداکثر CWP برای گندم بدست می‌آید. ژانگ و پی (۱۹۹۹) طی هشت سال تحقیق در زمینهٔ مدیریت آبیاری ارقام بومی گندم در دشت‌های شمالی چین، دریافتند که با افزایش میزان آب آبیاری از ۴۵۰ میلی‌متر، عملکرد گندم کاهش یافت و در سال‌های خشک، عمق آبیاری برابر ۳۷۷ میلی‌متر، بالاترین CWP را به میزان ۱/۹۳ کیلوگرم بر مترمکعب، به‌همراه داشت. علی و همکاران (۲۰۰۷) طی سه سال آزمایش روی بهره‌وری آب در کشت گندم در بنگلادش، گزارش کرده‌اند بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری کل آب (آبیاری و بارندگی) این محصول به‌ترتیب ۱/۱۳ و ۱/۰۶ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. آنها با اعمال کم‌آبیاری اعلام کرده‌اند که این روش مدیریت آب در مزرعه می‌تواند باعث افزایش بهره‌وری آب به‌ترتیب تا ۲/۳۸ و ۱/۳۷ کیلوگرم بر مترمکعب گردد. همچنین، مقدار بهره‌وری آب گندم در حوضه‌های آبریز مختلف هندوستان، ایالت پنجاب پاکستان، نقاط مختلف ترکیه و مصر به‌ترتیب ۲/۷۰-۰/۴۷، ۱/۶۰-۰/۷۶، ۱/۲۰-۰/۴۳ و ۱/۳۵ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شده‌اند (به‌نقل از کشاورز و دهقانی‌سانیج،۱۳۹۱).

تعیین شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب و تحلیل روند تغییرات زمانی و مکانی آنها در بسیاری از کشورهای جهان در حال گسترش است. این مسئله با عنایت به بحران آب در ایران اهمیتی دو چندان پیدا می‌کند. همچنین با توجه به گستردگی و تنوع مصرف‌کنندگان آب، امروزه استفاده از روش‌هایی نظیر استفاده از سنجش از راه دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، موجب شده است که متخصصان بتوانند سریع‌تر، راحت‌تر و دقیق‌تر به تحلیل و ارزیابی بهره‌وری آب بپردازند (احسانی و خالدی، ۱۳۸۲). براساس بررسی‌های صورت گرفته، حدود ۱۲ درصد آب مصرفی در بخش کشاورزی کشور صرف تولید گندم می‌شود (عربی‌یزدی و همکاران، ۱۳۸۸). این امر بیانگر آن‌است که بهبود مدیریت آبیاری این محصول اساسی کشور، عاملی مهمی در افزایش بهره‌وری آب کشاورزی است. در طول سالیان اخیر، تحقیقات متعدد ولی پراکنده در زمینه مدیریت‌های مختلف آبیاری گندم در مناطق مختلف کشور و توسط مراکز دانشگاهی و موسسات پژوهشی به انجام رسیده است، لیکن تاکنون به جمع‌بندی و تحلیل یافته‌های حاصل از این تحقیقات درخصوص مقدار بهره‌وری آب گندم در مناطق مختلف ایران و مقایسهٔ آن با سایر نقاط مشابه و میانگین جهانی، چندان پرداخته نشده است. به‌همین دلیل در این مقاله، نتایج طرح‌های تحقیقاتی که با موضوع مدیریت آبیاری گندم (به‌ویژه کم‌آبیاری) در موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی انجام شده، مورد مطالعه قرار گرفته و هدف از انجام آن نیز بررسی دامنهٔ تغییرات بهره‌وری آب گندم در مناطق مختلف ایران و تعیین عمق مناسب آبیاری گندم در شرایط محدودیت منابع آبی است.

مواد و روش‌ها

داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در این پژوهش حاصل نتایج ۱۸ فقره طرح تحقیقاتی است که طی سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۰ در هشت ایستگاه تحقیقاتی موسسه تحقیقاتی فنی و مهندسی کشاورزی (مطابق جدول ۱) تحت مدیریت‌های آبیاری مختلف به انجام رسیده‌اند (افشار و همکاران، ۱۳۸۷؛ اکبری و نجفیان، ۱۳۸۸؛ باغانی و همکاران، ۱۳۸۲؛ باغانی و قدسی، ۱۳۸۳؛ جلینی، ۱۳۸۸؛ دهقانیان، ۱۳۸۸؛ سیاهپوش و دهقانیان، ۱۳۸۴؛ زارعی و سالمی، ۱۳۸۸؛ سالمی، ۱۳۸۴؛ صدرقائن و زارع فیض‌آبادی، ۱۳۸۱؛ طایفه‌رضایی و عیوضی، ۱۳۸۲؛ مهرور و عباسی، ۱۳۸۲؛ کیخایی، ۱۳۸۸؛ معیری، ۱۳۹۰الف؛ معیری، ۱۳۹۰ب).

در اکثر این پژوهش‌ها، مبنای محاسبهٔ نیاز آبی گیاه، معادلهٔ پنمن مانتیث (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) و مقدار آب آبیاری براساس درصدهای متفاوتی از نیاز آبی گیاه تعیین و اعمال گردیده‌اند. مقدار کود بکار برده شده براساس نتایج آزمون خاک و سطوح کودی توصیه شده توسط مؤسسه تحقیقات خاک و آب بوده‌است. سامانه‌های

آبیاری مورد استفاده، در ۱۰ طرح تحقیقاتی از نوع سطحی، در پنج طرح از نوع بارانی و در سه طرح از نوع قطره‌ای بودند. اطلاعات مورد استفاده از این پژوهش‌ها، مقدار آب داده شده (آب آبیاری و بارندگی مؤثر) و عملکرد گندم هستند. محل انجام تمامی آزمایشات، ایستگاه‌های تحقیقاتی بوده که از لحاظ شرایط محیطی، اقلیمی، نوع خاک و آبیاری با یکدیگر متفاوت بودند.

جدول ۱- طرح‌های تحقیقاتی مرتبط با مدیریت آبیاری گندم انجام شده در مناطق مختلف کشور

استان	تعداد طرح	توضیحات
خراسان رضوی (۲، ۴، ۵، ۱۰و ۱۵)	۵	در کلیهٔ طرح‌های تحقیقاتی مدیریت آبیاری از نوع کم آبیاری
فارس (۲، ۱۱ و۱۴)	۳	دو طرح از نوع کم آبیاری و یک طرح مقایسه سیستم‌های آبیاری
البرز (۳، ۱۲ و ۲۵)	۳	دو طرح مدیریت آبیاری از نوع کم آبیاری و یک طرح برنامه‌ریزی آبیاری
آذربایجان غربی (۱۶)	۱	مدیریت آبیاری از نوع کم آبیاری
اصفهان (۱۲ و ۱۳)	۲	یک طرح مدیریت آبیاری از نوع کم آبیاری و یک طرح برنامه‌ریزی آبیاری
خوزستان (۲۳ و ۲۴)	۲	هر دو طرح از نوع مقایسه سیستم‌های آبیاری
کرمان (۲)	۱	مدیریت آبیاری از نوع کم آبیاری
سیستان و بلوچستان (۲۲)	۱	مدیریت آبیاری از نوع کم آبیاری

از آنجائی که هدف این پژوهش تعیین دامنهٔ مقادیر بهره‌وری آب گیاه (CWP) بود، لذا تمامی مقادیر آب آبیاری (I) و بارندگی مؤثر (Re) تعیین‌شده و نیز عملکرد (Y) اندازه‌گیری شده در آزمایشات، بدون متوسط‌گیری در محاسبات مدنظر قرار گرفتند. در بعضی از پژوهش‌های ذکر شده، ۷۵ درصد بارندگی به‌عنوان باران مؤثر و در برخی دیگر از آنها، میزان بارندگی مؤثر به روش ادارهٔ حفاظت خاک امریکا (SCS) برآورد و در محاسبات استفاده شده‌است. یکی از عوامل مؤثر بر بهره‌وری آب، نوع سیستم آبیاری است. تنوع سیستم‌های آبیاری مورد استفاده (سیستم‌های آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای) و به تبع آن اختلاف در راندمان آبیاری و همچنین تفاوت شرایط اقلیمی، سبب شده است که در اکثر این مناطق، نتایج تحقیقات از پراکندگی زیادی برخوردار باشند.

بهره‌وری آب گیاه

در این پژوهش برای تعیین شاخص بهره‌وری آب (CWP) گندم از روابط ذیل استفاده شده‌است:

$$CWP_I = \frac{Ya}{I} \qquad (۱)$$

$$CWP_{I+Re} = \frac{Ya}{I + Re} \qquad (۲)$$

که در آن:

Ya بیانگر عملکرد واقعی گیاه (برحسب کیلوگرم)، I بیانگر حجم آبیاری با درنظر گرفتن راندمان آبیاری[۱] (برحسب مترمکعب) و Re نشانگر بارندگی مؤثر (برحسب مترمکعب) بوده و نیز CWP_I و CWP_{I+Re} به‌ترتیب بهره‌وری آب آبیاری و بهره‌وری آب کاربردی (مجموع آب آبیاری و بارندگی مؤثر) برحسب کیلوگرم بر مترمکعب هستند.

علاوه بر تعیین شاخص‌های CWP_I و CWP_{I+Re} گندم برای کل مناطق، شاخص‌های مذکور برای هر منطقه به‌طور جداگانه نیز مورد بررسی قرار گرفت. همچنین با تعیین رابطهٔ CWP با میزان آب آبیاری و آب کاربردی، امکان تعیین عمق آبیاری مناسب گندم برای مناطق مختلف بررسی شد.

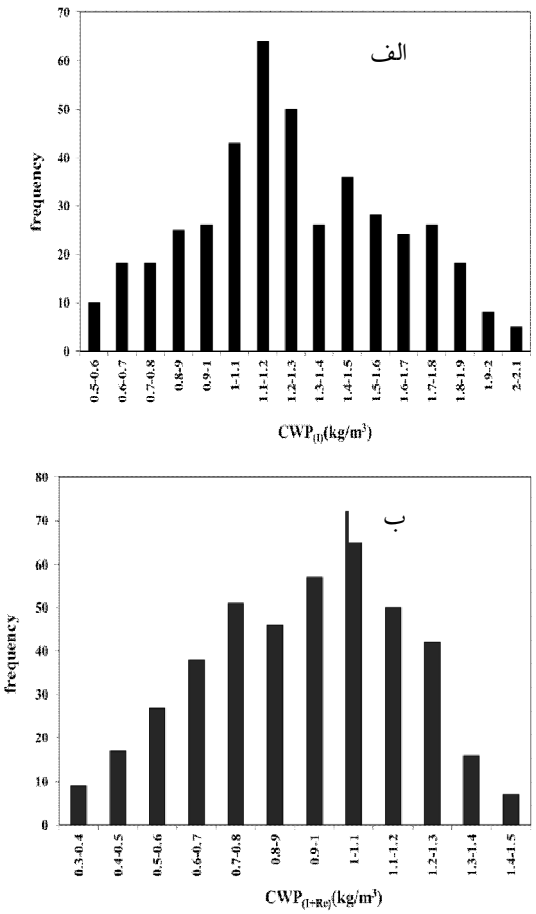
نتایج و بحث

بهره‌وری آب

توزیع فراوانی بهره‌وری آب گندم، در شکل ۲ (الف و ب) ارائه شده‌است. برای حذف داده‌های بهره‌وری

[۱]- در پژوهش‌های مورد بررسی راندمان آبیاری بسته به نوع روش آبیاری متفاوت و با توجه به مساحت کرت‌های آزمایشی بطور میانگین برای روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای به‌ترتیب برابر ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درصد در نظر گرفته شده‌اند.

آب با حداقل فراوانی از پایگاه داده‌ها، داده‌هایی که در محدودهٔ ۵ تا ۹۵ درصد توزیع فراوانی تجمعی کل داده‌ها قرار داشتند، به عنوان CWP گندم در نظر گرفته شدند. دامنهٔ تغییرات CWP_I برای گندم بین ۰/۵ تا ۲/۱ کیلوگرم بر مترمکعب و برای CWP_{I+Re} بین ۰/۳ تا ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب بوده‌است.



شکل ۲- توزیع فراوانی بهره‌وری آب آبیاری گندم (الف) و بهره‌وری آب کاربردی (مجموع آبیاری و بارندگی مؤثر) گندم (ب)

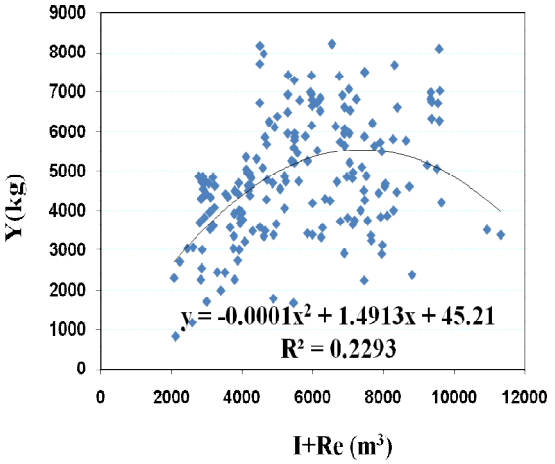
دورنباس و کاسام (۱۹۷۹) دامنهٔ تغییرات محدودی را برای CWP گندم (۰/۸ تا ۱ کیلوگرم بر مترمکعب) در جهان گزارش کرده‌اند، لیکن زوارت و بستیانسن (۲۰۰۴) دامنهٔ تغییرات بیشتری را (۰/۶ تا ۱/۷ کیلوگرم بر مترمکعب) برای گندم در مناطق مختلف دنیا ارائه نموده‌اند. عزیزی زهان و همکاران (۱۳۹۳) در تحقیقی مشابه، دامنهٔ تغییرات بهره‌وری آب گندم را بین ۰/۳ تا ۲/۴ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش نمودند که غالب تکرارهای آن در دامنهٔ ۰/۶ تا ۱/۸ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. همچنین براساس گزارش یانگ و همکاران (۲۰۰۶)، بهره‌وری آب در تولید گندم در نقاط مختلف جهان در دامنهٔ وسیع‌تر ۰/۱۵ تا ۲/۴ کیلوگرم بر مترمکعب متغییر بوده است. دامنهٔ ارائه شده توسط زوارت و بستیانسن (۲۰۰۴) تقریباً در محدوده دامنهٔ تغییرات مقادیر این تحقیق است. این دامنهٔ وسیع مقادیر CWP گندم در بین مناطق مختلف ناشی از تفاوت در اقلیم و تأثیر آن در تغییرات تبخیر - تعرق (میزان آب مصرفی) و طول دوره فصل رشد گندم، نوع رقم گندم به کار رفته، کیفیت منابع آب و خاک و نیز در یک منطقه، ناشی از تأثیر تفاوت در اعمال تیمارهای آبیاری، مدیریت آبیاری و تغییرات آب و هوایی سال‌های مختلف است.

در بین مناطق مختلف تحت بررسی، حداکثر مقادیر CWP_I و CWP_{I+Re} گندم در منطقهٔ کرج به‌ترتیب به میزان ۲/۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب در شرایط کاربرد سیستم آبیاری قطره‌ای و کم‌آبیاری نتیجه گردید. همچنین کمترین مقادیر CWP_I و CWP_{I+Re} در منطقه کرمان به‌ترتیب به میزان ۰/۴ و ۰/۳۶ کیلوگرم بر مترمکعب با کاربرد سیستم آبیاری سطحی مشاهده شد. بیشترین فراوانی مشاهده شده نیز برای CWP_I بین ۱/۱ تا ۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب و نیز برای CWP_{I+Re} بین ۱ تا ۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب بوده‌اند.

برخلاف آن که در اغلب مطالعات منطقه‌ای (ژانگ و اویس، ۱۹۹۹؛ ژآنگ و همکاران، ۱۹۹۹؛ انگلیش و ناکامورا، ۱۹۸۹) تابع همبستگی درجهٔ دومی[1] با ضریب همبستگی قابل‌قبولی بین عملکرد و مقدار آب آبیاری مصرفی گندم گزارش شده‌اند (افزایش غیرخطی عملکرد گیاه با افزایش میزان آب مصرفی)، در این مطالعه مطابق شکل ۳، ضریب همبستگی تابع درجهٔ دوم بین عملکرد و میزان آب کاربردی برای گندم در مناطق مختلف ایران، پایین بوده است ($R^2 = 0.23$). همان‌گونه که قبلا اشاره

[1]- Quadratic production function

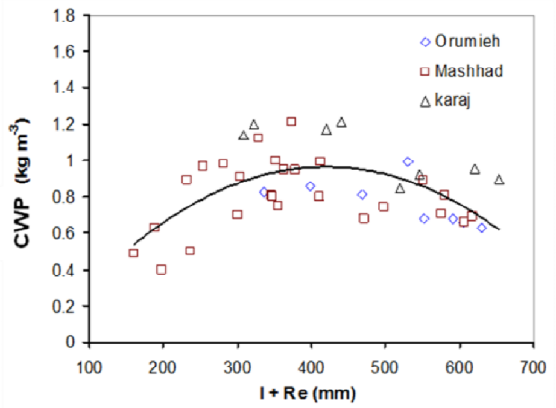
شد، اصولاً افزایش عملکرد تولید یک محصول علاوه بر عملیات آبیاری و اعمال مدیریت صحیح آبیاری در مزرعه، به عوامل متعدد دیگری نظیر اقلیم، خاک و توپوگرافی زمین، تغذیه گیاهی، آفات و بیماری‌ها و دیگر پارامترهای زراعی، بستگی دارد و می‌تواند سبب کاهش و یا افزایش تولید واقعی نسبت به تولید پتانسیل گردد. به نظر می‌رسد با توجه به تفاوت‌هائی که این عوامل ذکر شده در هشت ایستگاه تحقیقاتی تحت مطالعه داشته‌اند، این همبستگی ضعیف بوده است. چنین همبستگی ضعیفی را زوارت و بستیانسن (۲۰۰٤) و عزیزی زهان و همکاران (۱۳۹۳) نیز گزارش کرده‌اند.



شکل ۳ - رابطهٔ متقابل بین عملکرد گندم (Ya) و حجم آب کاربردی (I + Re) در مناطق مختلف ایران

اثر مدیریت آب آبیاری بر بهره‌وری آب در تولید گندم از جنبه‌های متفاوت شامل؛ کم‌آبیاری (انگلیش و ناکامورا، ۱۹۸۹؛ ژانگ، ۲۰۰۳ و علی و همکاران، ۲۰۰۷)، برنامه‌ریزی آبیاری (ژانگ و اویس، ۱۹۹۹ و زوارت و بستیانسن، ۲۰۰٤) و آبیاری تکمیلی (ژانگ و همکاران، ۱۹۹۹؛ اویس و هاچمن، ۲۰۰٦ و توکلی و همکاران، ۲۰۱۲) در مقالات متعددی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند.

در این پژوهش به‌سبب دامنهٔ وسیع تغییرات مقادیر آب آبیاری و عملکرد دانهٔ گندم در مناطق مختلف که ناشی از تأثیر تفاوت اقلیم، نوع رقم گندم بکار رفته، تفاوت در مدیریت زراعی (از جمله برنامه‌ریزی آبیاری) است، رابطه‌ای مشخص بین دو پارامتر آب آبیاری و بهره‌وری آب گندم برای کلّیهٔ مناطق مورد مطالعه حاصل نگردید. لیکن بررسی مقادیر بهره‌وری آب گندم و میزان آب آبیاری در مناطق کرج، مشهد و ارومیه نشان داد که در این مناطق بین مقادیر آب آبیاری و بهره‌وری آب گیاه، رابطه‌ای مشابه شکل ٤ برقرار است.



شکل ۴- رابطهٔ بین بهره‌وری آب گیاه (CWP) گندم و عمق آب کاربردی (I+Re) در ایستگاه‌های ارومیه، مشهد و کرج

این شکل نشان می‌دهد که همزمان با افزایش آب کاربردی به بیش از یک مقدار معین، مقادیر CWP در سه منطقهٔ مذکور کاهش یافته است. انگلیش و ناکامورا (۱۹۸۹)، ژانگ و اویس (۱۹۹۹) و اویس و هاشم (۲۰۰٦)، ژانگ و همکاران (۱۹۹۹) و عزیزی‌زهان و همکاران (۱۳۹۳) نیز الگوی مشابهی را برای گندم تحت رژیم‌های آبیاری متفاوت به‌ترتیب در ایالت اورگون امریکا، شمال سوریه، دشت شمالی چین و ایران، گزارش کرده‌اند.

براساس نتایج، با افزایش میزان کل آب کاربردی به بیش از ٤۰۰ میلیمتر (با درنظر گرفتن میانگین راندمان آبیاری برابر ۷۵ درصد[1])، مقدار CWP_{I+Re} گندم کاهش نشان داد (شکل ٤). مطابق سند ملی آب، نیاز آبی گندم در مناطق مشهد، کرج و ارومیه به ترتیب برابر ٤۲۰، ٤۷۰ و

[1]- میانگین سه روش آبیاری سطحی، بارانی و قطره‌ای (به‌ترتیب برابر ٦۰، ۷۵ و ۹۰ درصد) بوده‌اند.

۳۷۶ میلی‌متر است. چنانچه میانگین راندمان آبیاری را برابر ۷۵ درصد در نظر بگیریم، نیاز آبیاری در سه منطقهٔ مذکور به‌ترتیب برابر ۵۶۰، ۶۲۵ و ۵۰۰ میلی‌متر می‌گردد. این امر نشان دهنده آن است که در هر سه منطقه، بالاترین بهره‌وری آب با کاربرد میزان آب کمتری نسبت به عمق آبیاری کامل گندم حاصل می‌گردد (اعمال کم‌آبیاری). به‌عبارتی دیگر، در سه منطقهٔ مذکور در شرایط محدودیت منابع آبی، عمق آب کاربردی بهینه (عمق آبیاری + بارندگی مؤثر) برای دستیابی به بالاترین بهره‌وری آب گندم، تقریباً برابر ۴۰۰ میلی‌متر قابل‌توصیه است. عزیزی-زهان و همکاران (۱۳۹۳) نیز در تحقیقی مشابه، عمق مناسب آبیاری برای دستیابی به بالاترین بهره‌وری آب گندم در کشور را بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر تعیین و گزارش نموده‌اند.

جدول ۲ عمق آب بکار رفته، عمق آب آبیاری و حداکثر بهره‌وری آب گندم را در چند منطقه از جهان نشان می‌دهد. این جدول نشانگر استفادهٔ بیشتر از آب سبز (مزیت نسبی بالاتر) در نواحی شمالی سوریه و چین به‌ترتیب نسبت به نواحی شمالی امریکا و مناطق تحت مطالعهٔ پژوهش حاضر در ایران (کرج، مشهد و ارومیه) در فرآیند تولید گندم آبی است. همچنین ملاحظه می‌گردد در این نواحی، حداکثر بهره‌وری آب در تولید گندم ۱/۲۰–۰/۸۰ کیلوگرم به ازای مصرف هر مترمکعب آب بوده‌است.

جدول ۲- عمق آب بکار رفته، عمق آب آبیاری و حداکثر بهره‌وری آب در تولید گندم در نقاط مختلف جهان

منطقه تحت بررسی	عمق آب کاربردی (mm)	عمق آب آبیاری (mm)	حداکثر بهره‌وری آب (kg/m^3)
شمال سوریه (۴۵)	۴۵۰–۵۰۰	۱۴۰–۱۸۰	۱/۰۵–۱/۱۰
دشت شمالی چین (۴۶)	۴۰۰	۱۲۰–۱۶۰	۱/۱۵
ایالت اورگون امریکا (۳۱)	۷۵۰–۸۵۰	۳۵۰–۴۵۰	۱/۰۰
پژوهش‌های قبلی در ایران (۱۹، ۲۰، ۲۱ و ۳۴)	۲۵۰–۴۰۰	۱۲۰–۱۸۰	۰/۷۵–۲/۵۰
عزیزی و همکاران (۱۸)	۲۰۰–۴۰۰	–	۰/۶–۱/۸
مطالعه حاضر (مناطق کرج، مشهد و ارومیه)	۴۰۰	۲۸۰–۳۰۰	۰/۸۰–۱/۲۰

نتایج ایستگاه مشهد

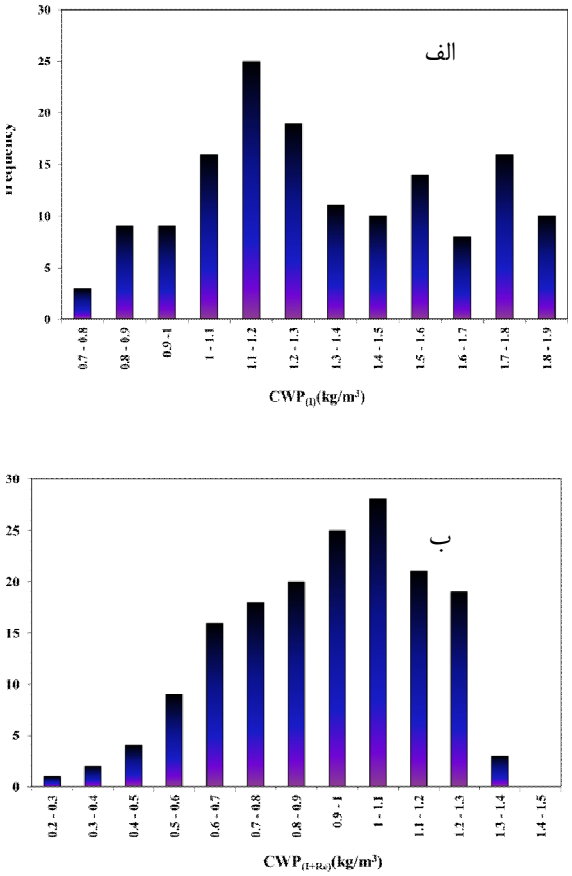
زراعت گندم

تاریخ کاشت گندم در دشت مشهد، اول آبان ماه است. طول دورهٔ رشد گندم در منطقه در حدود ۲۰۰ روز است که البته بسته به نوع رقم، تغییر می‌کند. دامنهٔ تغییرات بارندگی مؤثر در بازهٔ زمانی هشت سال انجام پنج طرح تحقیقاتی مورد نظر در دشت مشهد، بین ۱۱۰ تا ۱۴۶ میلی‌متر (به‌طور متوسط ۱۲۸ میلی‌متر) بوده است. همچنین متوسط میزان بارندگی مؤثر براساس سند ملی آب برای گندم در این منطقه، ۱۲۱ میلی‌متر گزارش شده‌است.

بهره‌وری آب در ایستگاه مشهد

توزیع فراوانی بهره‌وری آب گندم در شهرستان مشهد در شکل ۵ ارائه شده است (صدرقائن و زارع فیض‌آبادی، ۱۳۸۱؛ باغانی و همکاران، ۱۳۸۲؛ باغانی و قدسی، ۱۳۸۳؛ افشار و همکاران، ۱۳۸۷و جلینی، ۱۳۸۸). برای حذف داده‌های با حداقل فراوانی از پایگاه داده‌ها، داده‌هایی که در محدودهٔ ۵ تا ۹۵ درصد توزیع فراوانی تجمعی کل داده‌ها قرار داشتند، به عنوان CWP گندم در نظر گرفته شدند. حداکثر مقادیر CWP_I و CWP_{I+Re} گندم در منطقهٔ مشهد به ترتیب ۱/۹ و ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب در شرایط کاربرد کم آبیاری به‌دست آمد.

بیشترین فراوانی مشاهدات برای CWP_I بین ۱/۱ تا ۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب (شکل ۵ الف) و برای CWP_{I+Re} بین ۱ تا ۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب بود (شکل ۵ ب). دامنهٔ تغییرات CWP_I برای گندم بین ۰/۷ تا ۱/۹ کیلوگرم بر مترمکعب و برای CWP_{I+Re} بین ۰/۲ تا ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب بود.

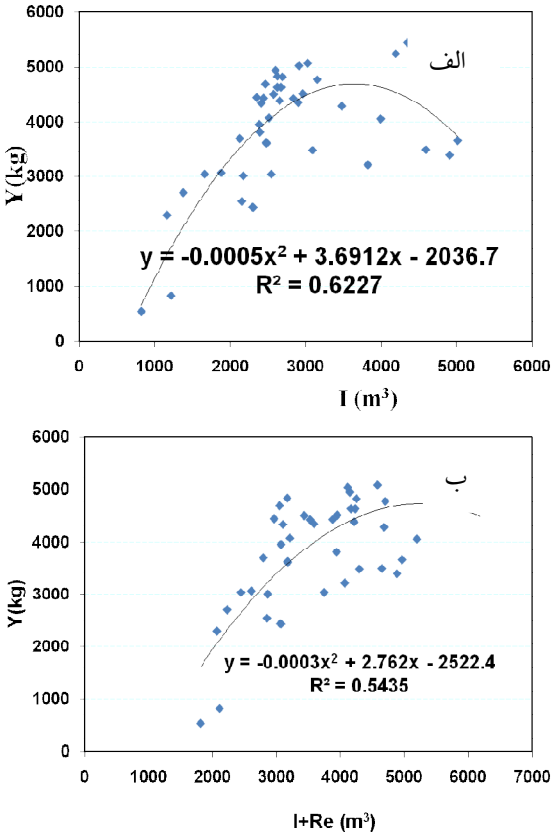


شکل ۵ - توزیع فراوانی بهره‌وری آب آبیاری (الف) و بهره‌وری آب کاربردی (آبیاری + بارندگی مؤثر) (ب) گندم در ایستگاه مشهد

دامنهٔ جهانی مقادیر CWP ارائه شده توسط دورنباس و کاسام (۱۹۷۹) در ایستگاه مشهد در شرایطی که عملکرد گندم بین ۳۰۰۰ و ۴۰۰۰ کیلوگرم در هکتار بود، مشاهده گردید (۰/۸ تا ۱ کیلوگرم بر مترمکعب). حداکثر مقداری که زوارت و بستیانسن (۲۰۰۴) برای CWP گندم گزارش نموده‌اند (۱/۷ کیلوگرم بر مترمکعب)، در ایستگاه مشهد مشاهده نگردید. لیکن حداقل دامنهٔ مذکور (۰/۶ کیلوگرم بر مترمکعب) در مقادیر عملکرد دانهٔ گندم کمتر از ۲۵۰۰ کیلوگرم در هکتار مشاهده شد.

تابع آب- عملکرد در ایستگاه مشهد

بررسی رابطهٔ بین عملکرد با میزان آب آبیاری و میزان کل آب کاربردی (آبیاری + بارندگی مؤثر) در ایستگاه مشهد، نشان داد که همبستگی درجه دومّ قابل قبولی بین عملکرد و آب مصرفی وجود دارد به‌طوری که با افزایش میزان آب آبیاری و همچنین عمق آب کاربردی، عملکرد گیاه افزایش می‌یابد (شکل ٦).

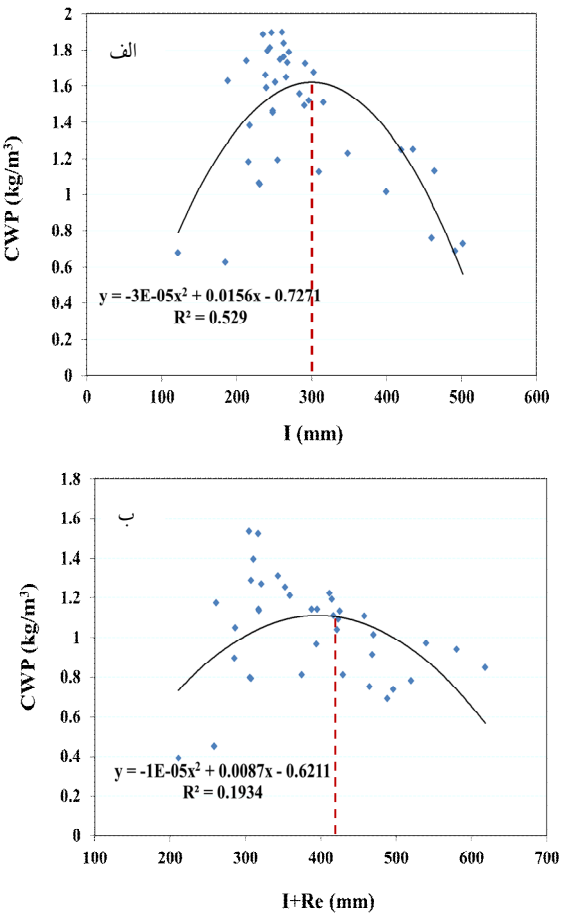


شکل ۶ - رابطهٔ عملکرد گندم (Ya) با عمق آبیاری (I) (الف) و عمق آب کاربردی (I+Re) (ب) در ایستگاه مشهد

شکل ٦ بیانگر آن است که همزمان با افزایش عمق آب آبیاری و عمق آب کاربردی، عملکرد دانهٔ گندم به صورت یک رابطه غیرخطی افزایش یافته است. نتایج گزارش شده توسط سایر محققین نیز دلالت بر غیرخطی بودن رابطهٔ بین مصرف آب و عملکرد دانهٔ گندم دارد. در این خصوص می‌توان به مطالعات ژانگ و اویس (۱۹۹۹) و ژانگ (۲۰۰۳) اشاره کرد.

در شکل ۷ (الف و ب) به‌ترتیب مقادیر CWP_I و CWP_{I+Re} گندم در مقابل عمق آب آبیاری و عمق آب کاربردی (مجموع مقادیر بارندگی مؤثر و آبیاری) برای منطقهٔ مشهد رسم شده‌اند. این شکل نشان می‌دهد که همزمان با افزایش عمق آب آبیاری و همچنین عمق آب

کاربردی به بیش از یک مقدار معین، مقادیر CWP گندم در منطقهٔ مشهد کاهش یافته است. مطابق شکل ۷، با افزایش عمق آب آبیاری به بیش از ۳۰۰ میلی‌متر و عمق کل آب کاربردی به بیش از ۴۲۰ میلی‌متر در دورهٔ کشت، به‌ترتیب مقادیر CWP_I و CWP_{I+Re} گندم کاهش یافته‌است.



شکل ۷- رابطهٔ بین بهره‌وری آب گیاه (CWP) گندم و عمق آب آبیاری (I) (الف) و عمق آب کاربردی (I+Re) (ب) در ایستگاه مشهد

بر این اساس، در شرایط محدودیت منابع آبی برای دسترسی به مقادیر بهینهٔ CWP_I در منطقهٔ مشهد، اولویت کاشت گندم بایستی در مزارعی باشد که با اعمال مدیریت کم‌آبیاری کنترل شده و با مصرف آب آبیاری به میزان ۳۰۰ میلی‌متر، بهره‌وری آب گیاه گندم در حدود ۱/۶ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل شود. در این شرایط با در نظر گرفتن میزان بارندگی مؤثر به میزان ۱۲۰ میلی‌متر برای دشت مشهد (براساس سند ملی آب)، عمق آب کاربردی برای دستیابی به بالاترین میزان بهره‌وری آب گندم (CWP_{I+Re}= 1.1 kg/m^3) به اندازهٔ ۴۲۰ میلی‌متر در دورهٔ کشت خواهد بود. عزیزی‌زهان و همکاران (۱۳۹۳) نیز در تحقیقی مشابه نتیجه گرفتند که در ایران بالاترین میزان بهره‌وری آب گندم در محدوده آب مصرفی بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر، قابل حصول است.

نتیجه‌گیری

در حال حاضر شاخص بهره‌وری آب محصولات زراعی مناطق مختلف در کشور، چندان مشخص نبوده و اندازه‌گیری‌های دقیق و معتبر انجام‌گرفته در این زمینه در سطح مزارع و باغات کشور، کافی نیستند. به همین دلیل، تعیین مقدار این شاخص و تحلیل آن از نظر برنامه‌ریزی الگوی کشت، مدیریت جامع منابع آب و اقتصاد کشاورزی در مناطق مختلف و نیز مقایسه با میانگین جهانی، اهمیت دارد. با تعیین شاخص بهره‌وری آب می‌توان به اندازهٔ این شاخص و دلایل پایین بودن آن از لحاظ مسائل و مشکلات مدیریت آبیاری و به‌زراعی محصولات مختلف در مناطق کشور پی‌برد و متناسب با آنها راهکارهای لازم برای ارتقای آن را ارائه کرد.

در پژوهش حاضر دامنهٔ تغییرات مقادیر بهره‌وری آب گندم در پژوهش‌های مختلف به اندازه‌ای وسیع بود که شاخص آماری ضریب تغییرات، بسیار زیاد به دست آمد (CV=40%). این امر می‌تواند رابطه‌ای منطقی با همبستگی پایین بین آب آبیاری و عملکرد گیاه گندم در مناطق مختلف ایران داشته باشد. این تغییرپذیری بالا در مقادیر بهره‌وری آب گندم، عمدتاً ناشی از عوامل: ۱) نوع اقلیم، ۲) مدیریت آب آبیاری، ۳) مدیریت (حاصلخیزی) خاک و ٤) مدیریت زراعی (رقم و ....) است. در بین مناطق مختلف، حداکثر مقادیر CWP_I و CWP_{I+Re} گندم در منطقه کرج به‌ترتیب به میزان ۲/۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب در شرایط کاربرد سیستم آبیاری قطره‌ای و اعمال کم‌آبیاری نتیجه گردید (مهرور و عباسی، ۱۳۸۲؛

اکبری و نجفیان، ۱۳۸٦؛ دهقانیان، ۱۳۸۸؛ زارعی و سالمی، ۱۳۸۸). همچنین در منطقهٔ کرمان به‌دلیل شرایط خشکی حاکم و عدم برخورداری از میزان باران مناسب در طول فصل رشد (آب سبز) و به تبع آن افزایش قابل توجه میزان آب آبیاری کاربردی در طول فصل رشد نسبت به سایر مناطق مورد مطالعه و نیز استفاده از روش آبیاری سنتی، کمترین مقادیر بهره‌وری آب گندم مشاهده شد. همچنین نتایج نشان داد در سه ایستگاه تحقیقاتی ارومیه، کرج و مشهد در شرایط محدودیت منابع آبی، عمق آب کاربردی بهینه (عمق آبیاری + بارندگی مؤثر) برای دستیابی به بالاترین بهره‌وری آب گندم، تقریباً برابر ٤۲۰ میلی‌متر است. حداکثر مقادیر CWP_I و CWP_{I+Re} گندم در منطقهٔ مشهد به‌ترتیب ۱/۹ و ۱/۵ کیلوگرم بر مترمکعب در شرایط کاربرد کم‌آبیاری نتیجه گردید.

نتایج نشان داد که در شرایط محدودیت منابع آبی برای دسترسی به مقادیر بهینهٔ CWP_I در منطقهٔ مشهد، اولویت کاشت گندم بایستی در مناطقی باشد که با اعمال مدیریت بهینه کم‌آبیاری و با مصرف آب آبیاری به میزان ۳۰۰ میلی‌متر، بهره‌وری آب گیاه گندم در حدود ۱/٦ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل شود. همچنین با در نظر گرفتن میزان بارندگی مؤثر، بایستی با اعمال مدیریت بهینهٔ کم‌آبیاری و بکارگیری میزان کل آب کاربردی به اندازه ٤۲۰ میلی‌متر، مقدار CWP_{I+Re} برابر ۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب حاصل گردد.

فهرست منابع

۱. احسانی، م. و ه. خالدی. ۱۳۸۲. بهره‌وری آب کشاورزی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۱۱۵ص.

۲. افشار، ه.، ا. اسلامی و ا. دهقانیان. ۱۳۸۷. کاهش مصرف آب و افزایش کارایی مصرف آب گندم با روش آبیاری شیاری یک در میان. گزارش پژوهشی شماره ٦۰۲، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۳. اکبری، م. و گ. نجفیان. ۱۳۸۸. تعیین کارایی مصرف آب در لاین‌های امیدبخش گندم نان متحمل به خشکی آخر فصل با کاربرد روش آبیاری قطره‌ای. گزارش پژوهشی شماره ٦۲۵، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

٤. باغانی، ج. و م. قدسی. ۱۳۸۳. اثر رژیم‌های مختلف آبیاری بر ارقام گندم. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. جلد ۵، شماره ۱۹: ۱٤-۱.

۵. باغانی، ج.، هاشمی، ح. و قدسی، م. ۱۳۸۲. بررسی اثرات کم آبیاری روی خصوصیات کمی و کیفی گندم و تعیین تابع تولید در روش آبیاری بارانی. گزارش پژوهشی شماره ۲۹۰، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

٦. بی‌نام. ۱۳۸۸. نتایج طرح آمارگیری نمونه‌ای گندم و جو سال زراعی ۱۳۸۸-۱۳۸۷. دفتر آمار و فناوری اطلاعات وزارت جهاد کشاورزی.

۷. بی‌نام. ۱۳۹۱. آمار تولید گندم در ایران. دفتر محصولات اساسی غلات، حبوبات و نباتات علوفه‌ای وزارت جهاد کشاورزی.

۸. ترک‌نژاد، ا.، آقایی سربزه، م.، جعفری، ح.، شیروانی، ع.ر.، روئین‌تن، ر.، نعمتی، ع. و شهبازی، خ. ۱۳۸۵. ارزیابی فنی و اقتصادی روش آبیاری قطره‌ای در گندم و مقایسه آن با روش آبیاری سطحی، مجله پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی. شماره ۷۲ :۳٦-٤٤.

۹. توکلی، ع.ر.، ع.م. لیاقت، ا. علیزاده، ذ. اویس و م. پارسی‌نژاد. ۱۳۸۹. بهبود بهره‌وری آب با بکارگیری مدیریت تلفیقی آبیاری محدود و عملیات زراعی برتر در زراعت گندم دیم. رساله دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشکده آب و خاک پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

۱۰. جلینی، م. ۱۳۸۸. بررسی کم آبیاری با استفاده از روش آبیاری بارانی از نظر مقادیر کاهش مصرف آب و تعیین زمان کاهش آب آبیاری در طول مراحل مختلف رشد گندم. گزارش پژوهشی شماره ٦٧٤، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۱۱. دهقانیان، ا. ۱۳۸۸. تعیین پتانسیل کارآیی مصرف آب ارقام گندم در روش‌های مختلف آبیاری (بارانی، قطره‌ای و سطحی) در شرایط اقلیمی مختلف کشور. گزارش پژوهشی شماره ٦٧٣، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۱۲. زارعی، ق. و ح.ر. سالمی. ۱۳۸۸. تاثیر سیستم آبیاری بارانی بر بهینه‌سازی کودآبیاری نیتروژن و تراکم بذر در ارقام مختلف گندم. گزارش پژوهشی شماره ٦٢٤، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۱۳. سالمی، ح.ر. ۱۳۸٤. بررسی اثرات کم آبیاری بر عملکرد دانه، اجزای عملکرد و خصوصیات کیفی ارقام جدید گندم. گزارش پژوهشی شماره ۳۹۷، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۱٤. سیاهپوش، م.ر. و ا. دهقانیان. ۱۳۸٤. ارزیابی بازدهی مصرف آب و اجزاء آن بعنوان معیارهای انتخاب در تولید ارقام متحمل به خشکی در برنامه‌های اصلاحی گندم. گزارش پژوهشی شماره ٤٥٥، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۱۵. صدرقاین، ح. و زارع فیض‌آبادی، ا. ۱۳۸۱. بررسی مقاومت به خشکی لاین‌ها و ارقام گندم مناطق سرد کشور. گزارش پژوهشی شماره ۲۷۱، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۱٦. طایفه‌رضایی، ح. و عیوضی، ع. ۱۳۸۲. کارایی مصرف آب در ارقام گندم، گزارش پژوهشی شماره ٢٦٤، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۱۷. عربی‌یزدی، ا.، علیزاده، ا. و محمدیان، ف. ۱۳۸۸. بررسی ردپای اکولوژیک آب در بخش کشاورزی ایران. نشریه آب و خاک (علوم کشاورزی و صنایع غذائی) دانشگاه فردوسی مشهد. ۲۳. ٤: ۱۵-۱.

۱۸. عزیزی‌زهان، ع.ا.، شهابی‌فر، م.، ابراهیمی‌پاک، ن.ع.، رضوی ر.، غالبی، س.، سرایی‌تبریزی، م.، طلوعی، ر. و پیری، ر. ۱۳۹۳. ارزیابی کارایی مصرف آب گندم در ایران و جهان. اولین همایش ملی مدیریت خاک و آب در تولید گندم. موسسه تحقیقات خاک و آب.

۱۹. علیزاده، ح.ع.، ب. نظری، م. پارسی نژاد، ه. رمضانی‌اعتدالی و ح.ر. جانباز. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AquaCrop در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. شماره ۲، جلد ٤، ۲۸۳-۲۷۳.

۲۰. عنابی‌میلانی، ا. و ص.ع. زمانی. ۱۳۹۳. تاثیر روش‌های برنامه‌ریزی آبیاری بر عملکرد و کارآئی مصرف آب گندم. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، جلد ۲۸، شماره ۳، ۵۰۲-٤۸۹.

۲۱. کشاورز، ع. و ح. دهقانی‌سانیج. ۱۳۹۱. شاخص بهره‌وری آب و راهکار آتیه کشاورزی. فصلنامه راهبرد اقتصادی، سال اول، شماره اول، ۲۳۳-۱۹۹.

۲۲. کیخایی، ف. ۱۳۸۸. مقایسه کارایی مصرف آب و عملکرد در دو روش آبیاری شیاری و کرتی در مزارع گندم سیستان. گزارش پژوهشی شماره ٦٨١، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۲۳. معیری، م. ۱۳۹۰الف. تعیین کارایی مصرف آب و ارزیابی فاکتورهای موثر در کارایی مصرف آب آبیاری گندم و ذرت در سایت انتخابی جنوب حوزه کرخه (دشت سرخه). گزارش پژوهشی شماره ۸۲٤، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۲٤. معیری، م. ۱۳۹۰ب. تعیین حد بهینه بذر مصرفی و کارایی مصرف آب آبیاری در روش‌های مختلف آبیاری سطحی (فاروئی، شیاری و نواری) گندم. گزارش پژوهشی شماره ۸٦۰، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

۲۵. مهرور، م. و ن. عباسی. ۱۳۸۲. بررسی اثرات تنش آبی بر خواص فیزیولوژیک ارقام امیدبخش گندم نان، گزارش پژوهشی شماره ۳۵۰، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی.

26. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, 300pp.
27. Ali, M.H., M.R. Hoque, A.A. Hassan and A. Khair. 2007. Effects of deficit irrigation on yield, water productivity and economic returns of wheat. Agric. Water Manage. 92:151–161.
28. Chukalla, A.D., Krol, M.S. and Hoekstra A.Y. 2015. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: Effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching. Hydrol. Earth Syst. Sci. 19:4877–4891.
29. De Wit, C.T. 1958. Transpiration and crop yields. Verslag. Landbouwk. Onderz. 64.6. Inst. of Biol. and Chem. Res. on Field Crops and Herbage. Wageningen, the Netherlands, pp. 1–88.
30. Dehghanisanij H., Oweis T. and Qureshi A.S. 2006. Agricultural water use and management in arid and semi-arid areas: Current situation and measures for improvement. Annals of Arid Zone. 45(3-4):355-378.
31. Doorenbos, J. and Kassam A.H. 1979. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy
32. English, M.J. and Nakamura B.C. 1989. Effects of deficit irrigation and irrigation frequency on wheat yields. Journal of American Society of Civil Engineering 115(IR2):172–184.
33. Feng-Min L., Yan X., Feng-Rui L. and An-Hong G. 2001. Effects of different water supply regimes on water use and yield performance of spring wheat in a simulated semiarid environment. Agric. Water Manage. 47(1):25-35.
34. Kijne, J.W., Tuong T.P., Bennett J., Bouman B. and Oweis T. 2003. Ensuring food security via improvement in crop water productivity. In: Challenge Program on Water and Food: Background Papers to the Full Proposal. The Challenge Program on Water and Food Consortium, Colombo, Sri Lanka.
35. Heydari, N. 2014. Water productivity in agriculture: Challenges in concepts, terms and values. Irrigation and Drainage 63(1): 22–28.
36. Molden, D. 1997. Accounting for water use and productivity. SWIM Paper 1. International Irrigation Management Institute, Colombo, Sri Lanka. 16 pp.
37. Molden, D., Oweis T., Steduto P., Bindraban P., Munir A., Hanjra M.A. and Kijne J. 2010. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. Agricultural Water Management 97:528-535.
38. Oweis, T. and Hachum A. 2003. Improving water productivity in the dry areas of West Asia and North Africa. In: Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement. Kijne J.W., Barker R., Molden D. (Eds.). Comprehensive assessment of water management in agriculture series 1. CABI/IWMI, Wallingford/Colombo: 179-198.

39. Oweis, T. and Hachum A. 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. Agric. Water Manage. 80(1-3): 57-73.
40. Schmidt E. 2001. Water use efficiency: An overview and economic perspective. Agronomists' Association Annual General Meeting, November 2001.
41. Tavakkoli, A.R. and Oweis, T. 2004. The role of supplemental irrigation and nitrogen in producing bread wheat in the highlands of Iran. Agric. Water Manag. 65:225-236.
42. Tavakoli, A., A. Liaghat, T. Oweis and A. Alizadeh. 2012. The role of limited irrigation and advanced management on improving water productivity of rainfed wheat at semi-cold region of upper Karkheh River Basin, Iran. International Journal of Agriculture and Crop Sciences. Available online at www.ijagcs.com .IJACS/2012/4-14/939-948.
43. Viets, F.G. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. Adv. Agron. 14:223–264.
44. Yang, H., L. Wang, K.C. Abbaspour and A.J.B. Zehnder. 2006. Virtual water trade: An assessment of water use efficiency in the international food trade. Hydrology and Earth System Sciences 10:443-454.
45. Zhang, H. 2003. Improving water productivity through deficit irrigation: Examples from Syria, the North China Plain and Oregon, USA. In: Water productivity in agriculture: Limits and opportunities for improvement. Kijne J.W., Barker R., Molden D. (Eds.). Comprehensive assessment of water management in agriculture series 1. CABI/IWMI, Wallingford/Colombo: 301-309.
46. Zhang, H. and T. Oweis. 1999. Water–yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. Agric. Water Manage. 38:195-211.
47. Zhang, H., Wang, X., You, M. and Liu, C. 1999. Water-yield relations and water-use efficiency of winter wheat in the North China Plain. Irrigation Science 19:37–45.
48. Zhang, X. and D. Pei. 1999. Management of supplemental irrigation of winter wheat for maximum profit. P. 57-65. In C. Kirda, P. Moutonnet, C. Hera and D.R. Nielsen (Eds). Crop yield response to deficit irrigation. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, the Netherlands.
49. Zwart, S.J. and Bastiaanssen, G.M. 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. Agric. Water Manage. 69:115-133.