

افزایش بهره‌وری آب کشاورزی در مزارع تحت آبیاری منطقه بر خوار اصفهان

مجید وظیفه دوست* - امین علیزاده - غلامعلی کمالی - محمد فیضی^۱

تاریخ دریافت: ۸/۵/۸۷

تاریخ پذیرش: ۲۰/۸/۸۷

چکیده

به منظور کاوش راهکارهایی که منجر به افزایش بهره‌وری آب می‌گردد، یک مدل آگروهیدرولوژی (SWAP) با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در ۸ مزرعه کشاورز برای محصولات گندم، ذرت علوفه‌ای، آفتاب‌گردان و چغندر قند در منطقه بر خوار اصفهان و در طی سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ اعتبار سنجی گردید. میزان بهره‌وری آب (WP) برای این گیاهان با استفاده از اجزای بیلان آب و عملکرد قابل فروش که توسط مدل SWAP شبیه‌سازی شده بود تحت عبارات $Y_M T^{-1}$ ، $Y_M ET^{-1}$ و $Y_M I^{-1}$ محاسبه گردید. متوسط WP تحت عبارت $Y_M T^{-1}$ ($kg m^{-3}$) برای گندم، ۳/۳۸ برای ذرت علوفه‌ای، ۰/۳۳ برای آفتاب-گردان و ۱/۷۲ برای چغندر قند محاسبه گردید که این نشان دهنده سود اقتصادی بالاتر در کشت ذرت علوفه‌ای در منطقه آبیاری بر خوار بود. تبخیر مستقیم از خاک موجب کاهش ۱۱ تا ۲۷ درصدی WP تحت عنوان $Y_M ET^{-1}$ در مقایسه با WP تحت عنوان $Y_M T^{-1}$ گردید. علاوه بر این، به دلیل هدر رفتن آب از منطقه توسعه ریشه‌ها به صورت نفوذ عمقی، مقادیر متوسط WP تحت عنوان $Y_M ET^{-1}$ به اندازه ۲۴ تا ۴۲ درصد کمتر از مقادیر متوسط WP تحت عنوان $Y_M I^{-1}$ ($kg m^{-3}$) بود. کاهش دور آبیاری و کم آبیاری به میزان چشمگیری کارایی مصرف آب WP_1 را افزایش داد اما تاثیر چندانی بر WP_{ET} نداشت.

واژه‌های کلیدی: بهره‌وری آب، گندم، ذرت علوفه‌ای، عملیات آبیاری، آفتاب‌گردان، چغندر قند

مقدمه

مدیریت آب در شبکه‌های اصلی تحت آبیاری در این حوضه را به خوبی تشریح می‌کند اما در مقیاس مزرعه‌ای نتوانسته راهکار مناسبی در افزایش بهره‌وری آب ارائه نماید.

تحت شرایط اخیر بحران آب، آب‌های قابل دسترس محدود باید با کارایی بسیار بالا مورد استفاده قرار بگیرد. با در نظر گرفتن این نکته که فتوسنتز (و بنابراین وزن خشک اندام‌های گیاه) و میزان تعرق از طریق فرایند پخشیدگی آب و دی اکسید کربن با هم در ارتباط هستند، راندمان مصرف آب^۲ توسط گیاه به صورت زیر تعریف می‌شود:

در سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۳۸۳ موسسه تحقیقات مهندسی کشاورزی (IAERI) با همکاری مرکز بین‌المللی مدیریت آب چندین مطالعه در زمینه منابع آب و بخش‌های تحت آبیاری در حوضه آبریز زاینده رود انجام دادند (۶، ۱۲، ۱۳). اگرچه این مطالعات به خوبی وضعیت هیدرولوژی و

۱- به ترتیب استادیار مهندسی آب دانشگاه گیلان و پژوهشکده هواشناسی و علوم جو، استاد آبیاری و زهکشی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، دانشیار پژوهشی هواشناسی کشاورزی، پژوهشکده هواشناسی تهران و مربی موسسه تحقیقات خاک و آب اصفهان

* - نویسنده مسئول: Email: majidvazifedoust@asmerc.ac.ir

حالتی که میزان تجمعی تغییرات ماده خشک و مقدار تعرق را در طول یک دوره مشخص در نظر بگیریم، به طور مثال

$$\text{میزان تعرق} = \frac{\text{میزان رشد ماده خشک}}{\text{میزان تعرق}} = \frac{Y \text{ (kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1})}{T \text{ (mm d}^{-1})} \quad (1)$$

که I مقدار تجمعی آبیاری در فصل و P بارش فصلی می‌باشد.

تحت شرایط کم آبی که میزان بارش بسیار اندک است WP_{I+P} ممکن است به WP_I تبدیل گردد:

$$WP_I = \frac{Y \text{ (kg ha}^{-1})}{I \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1})} \rightarrow \text{kg m}^{-3} \quad (5)$$

اما از آنجایی که کشاورزان عمدتاً به عملکرد اقتصادی گیاهان توجه دارند WP به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$WP_{\$} = \frac{(\$ \text{ kg}^{-1}) \text{ (kg ha}^{-1})}{ET \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1})} \rightarrow \$ \text{ m}^{-3} \quad (7)$$

که در آن \$ معادل یک ریال در نظر گرفته شده است. شاخص‌های WP بیان‌کننده سود بدست آمده از مصرف آب می‌باشند و می‌توانند برای ارزیابی راهکارهای مزرعه‌ای تحت شرایط کم آبی مورد استفاده قرار گیرند. این شاخص‌ها در واقع یک دید مناسب از اینکه در چه زمان‌هایی و در کجاها آب می‌تواند صرفه‌جویی گردد به ما می‌دهد. شاخص‌های WP همچنین برای یافتن پتانسیل افزایش در عملکرد گیاه که ممکن است با افزایش آب قابل دسترس بدست آید، مفید هستند (۱۴).

در این مقاله روشی برای ارزیابی راهکارهای مزرعه‌ای تحت شرایط کم آبی ارائه می‌گردد. مدل $SWAP^3$ برای گیاهان عمده در منطقه برخوار اصفهان با استفاده از اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای واسنجی می‌گردد. اغلب

در عملیات روزانه آبیاری، کارایی مصرف آب^۱ (WP) عبارتی است که معنی آن به کاربرد آن بستگی دارد. در

در طول یک فصل، پارامترهای Y و T به صورت Y و T تعریف می‌شوند و راندمان آب مورد استفاده توسط گیاه سپس تحت عنوان کارایی مصرف آب^۲ (WP_T) تعریف می‌شود:

$$WP_T = \frac{Y \text{ (kg ha}^{-1})}{T \text{ (mm)}} \rightarrow \frac{Y \text{ (kg ha}^{-1})}{T \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1})} \rightarrow \text{kg m}^{-3} \quad (2)$$

که یک میلی‌متر معادل با $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ می‌باشد. در زمانی که آبیاری انجام می‌شود، در مقیاس مزرعه‌ای جدا سازی تعرق (mm) T از تبخیر (mm) E عموماً بسیار مشکل بوده و در نتیجه به جای عبارت WP_T ممکن است از عبارت WP_{ET} استفاده گردد که در این صورت کارایی مصرف آب به صورت زیر تعریف می‌گردد (۹، ۱۱):

$$WP_{ET} = \frac{Y \text{ (kg ha}^{-1})}{ET \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1})} \rightarrow \text{kg m}^{-3} \quad (3)$$

که ET تبخیر و تعرق از "گیاه + خاک" می‌باشد. در این رابطه وزن خشک اندام‌های هوایی گیاه (Y) ممکن است به صورت عملکرد قابل فروش Y_M تعریف گردد. اگر مقدار آبیاری و بارش به عنوان آب مورد استفاده گیاه در نظر گرفته شود، سپس کارایی مصرف آب با WP_{I+P} نشان داده شده و به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$WP_{I+P} = \frac{Y \text{ (kg ha}^{-1})}{[I + P] \text{ (m}^3 \text{ ha}^{-1})} \rightarrow \text{kg m}^{-3} \quad (4)$$

3- Soil Water Atmosphere Plant (SWAP)

1- Water productivity
2- Water Productivity

جمع آوری داده از مزارع کشاورزان در منطقه آبیاری برخوار

اندازه گیری‌های مزرعه‌ای برای چهار گیاه عمده: گندم در طول فصل زمستان، ذرت علوفه‌ای، آفتاب گردان و چغندر قند در طول فصل تابستان در منطقه برخوار اصفهان انجام گردید. در طول سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ پارامترهای آب، خاک و گیاه از مزارع کشاورزان جمع آوری گردید.

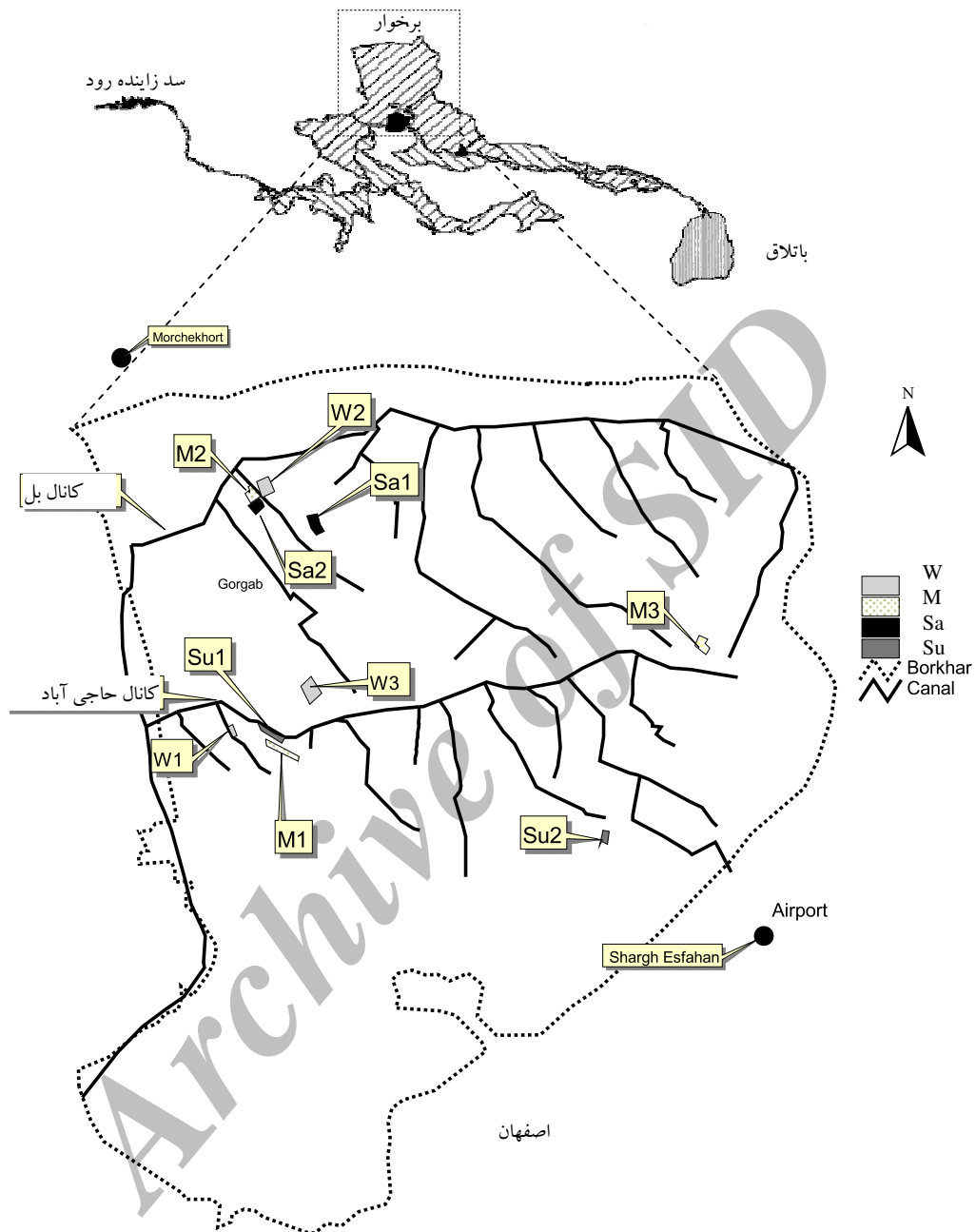
در کل، تعداد ۸ مزرعه با نام‌های W1 و W2 (گندم)، M1 و M2 (ذرت)، Sa1 و Sa2 (آفتاب گردان) و Su1 و Su2 (چغندر قند) به صورت متراکم پایش گردید (شکل ۱). W1 و Su1 و M1 در کانال بالادست حاجی آباد و در غرب برخوار واقع شده‌اند. در این منطقه، مدیریت صحیح آب و گیاه، بافت خاک ریز، (رس لومی تا لوم سیلتی رسی) و دستیابی به آب‌های سطحی و زیرزمینی با کیفیت خوب شرایط بسیار مناسبی را برای رشد گندم، ذرت و چغندر قند فراهم آورده است. مزارع W2 و Su2 و M2 در امتداد کانال اصلی بل در شمال برخوار قرار گرفته است. مزارع تحت کشت در این منطقه به آب کانال بستگی دارند. مدیریت سنتی و کمبود آب از جمله عوامل محدودیت در فراهم آوردن بستر مناسب توسعه در این بخش از برخوار می‌باشد. مزرعه Su2 نیز در امتداد کانال حاجی آباد قرار گرفته و مهمترین منبع آبیاری آن آب‌های زیرزمینی با کیفیت نسبتاً پایین می‌باشد. بافت خاک اغلب رس سیلتی بوده و دارای یک لایه سخت در پایین منطقه توسعه ریشه می‌باشد. اغلب خاک‌ها در این منطقه دارای مواد آلی و ارگانیک کمی می‌باشند. چگالی ظاهری خاک‌ها از ۱/۳۵ تا ۱/۴۶ گرم بر سانتی متر مکعب در خاک‌های با بافت سنگین و از ۱/۴۸ تا ۱/۷ گرم بر سانتی متر مکعب در خاک‌های سبک متغیر است. آب زیرزمینی بسیار عمیق و سطح شوری آن در مزارع انتخابی (به جز Su2) نسبتاً کم می‌باشد، (2 dS m^{-1}).

پارامترهای ورودی گردآوری شده از این مزارع مستقیماً در مراحل واسنجی استفاده می‌گردند. پارامترهای نامعلوم خصوصیات هیدرولیکی خاک، عمق‌های آبیاری و پارامترهای گیاهی به صورت غیرمستقیم و با استفاده از تکنیک مدل‌سازی معکوس به دست می‌آید (۷). سپس مدل واسنجی شده در محاسبه شاخص‌های کارایی مصرف آب در شرایط فعلی و همچنین راهکارهای افزایش کارایی مصرف آب مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شبکه آبیاری برخوار که در شمال شهر اصفهان و در حوضه آبریز زاینده‌رود واقع است به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید (شکل ۱). منطقه دارای اقلیم خشک تا نیمه خشک می‌باشد. منطقه برخوار اصفهان در مساحتی بالغ بر ۸۳۳۰۰ هکتار قرار گرفته و ۲۴ درصد این منطقه تحت کشت است. مساحت تحت کانال‌های آبیاری در حدود ۳۶۰۰۰ هکتار است که به دلیل کمبود آب در حدود ۱۸۰۰۰ هکتار به صورت دیم رها می‌شود. الگوی کشت منطقه در طول زمستان شامل اغلب گندم و جو و در طول تابستان شامل ذرت دانه‌ای و علوفه‌ای، آفتاب گردان و چغندر قند می‌باشد. بافت خاک غالب منطقه از رسی در بخش‌های مرکزی تا رس شنی در اطراف منطقه متغیر است. مهمترین منبع آبی آب زیرزمینی است و از آنجایی که تغذیه آب‌های زیرزمینی برای تامین آب مورد نیاز گیاهان ناکافی است سطح آب زیرزمینی به شدت افت کرده است. بنابراین آب سطحی به طور افزایشی برای آبیاری مورد استفاده قرار گرفته است. آب‌های سطحی از رودخانه زاینده‌رود به داخل کانال‌های عمده آبیاری در منطقه انتقال می‌یابد (۳).



(شکل ۱) - موقعیت شبکه آبیاری برخوار و مزارع انتخابی در این منطقه

بسیار جامع برای انتقال آب، گرما و محلول در محیط اشباع و غیراشباع می‌باشد. SWAP شامل مدل‌های فیزیکی برای شبیه‌سازی عملیات آبیاری و رشد گیاه می‌باشد. حرکت آب

مدل شبیه‌سازی SWAP

بیلان آب و آنالیز رشد گیاه توسط مدل SWAP شبیه‌سازی گردید (۱۰). SWAP یک مدل آگروهیدرولوژیک

عملیات آبیاری و خصوصیات هیدرولیکی خاک

اجزای محاسبه شده بیلان آب با استفاده از مدل‌های شبیه سازی بسیار حساس به میزان آب آبیاری بکار گرفته شده و خصوصیات هیدرولیکی خاک‌ها می‌باشند (۷). در طول اندازه‌گیری‌ها در مزارع انتخابی کیفیت آب و تاریخ‌های آبیاری ثبت شدند. عمق‌های آبیاری در منطقه برخوردار بسیار متغیر بودند و بنابراین اندازه‌گیری آنها بسیار دشوار بود. عمق آبیاری به کار گرفته شده برای یک‌بار با استفاده از حاصل‌ضرب دبی آب و زمان آبیاری و تقسیم آنها بر مساحت مزرعه محاسبه گردید. هر چند که به دلیل مشکلات در اندازه‌گیری حجم آب به کار رفته، عمق تخمینی آب آبیاری نمی‌تواند معرف عمق آب آبیاری باشد، بنابراین عمق آب آبیاری نیز با استفاده از تکنیک مدل سازی معکوس محاسبه گردید. از پارامترهای مربوط به خصوصیات هیدرولیکی خاک، درصد رطوبت اشباع خاک θ_{sat} ($cm^3 cm^{-3}$) و هدایت هیدرولیکی اشباع K_{sat} ($cm d^{-1}$) دارای معنی فیزیکی هستند و بنابراین در مزارع انتخابی اندازه‌گیری شدند. متغیرهای رطوبت باقیمانده θ_{res} ($cm^3 cm^{-3}$) و پارامتر λ حساسیت کمی به تغییرات مکش خاک‌ها نشان می‌دهند و بنابراین از pedotransfer functions تخمین زده شدند (۱۶). دو پارامتر هیدرولیکی α (cm^{-1}) و n مبهم ماندند و بنابراین این دو پارامتر با استفاده از روش بهینه سازی به دست آمدند.

برای به دست آوردن پارامترهای هیدرولیکی خاک و عمق آبیاری یک روش غیر خطی تخمین پارامتر به نام PEST^۱ به مدل SWAP لینک گردید (۵). بسته نرم افزاری PEST شامل برنامه PEST و شش برنامه کاربردی برای ساختن و کنترل فایل‌های ورودی PEST و همچنین یک

بر اساس معادله ریچاردز صورت می‌گیرد که برای حل این معادله از روش عددی تفاضل‌های محدود و اعمال شرایط مرزی و استفاده از توابع هیدرولیکی خاک استفاده می‌گردد.

توابع هیدرولیکی خاک به عنوان روابط بین هدایت هیدرولیکی K ، رطوبت خاک و بار فشاری آب خاک تعریف می‌شوند. در SWAP توابع تحلیلی ارائه شده توسط ون گنوختن برای تعریف منحنی مشخصه استفاده می‌شوند (۱۵).

شرایط مرزی لایه سطحی نیز با استفاده از شار تبخیر و تعرق ET_p ($mm d^{-1}$)، میزان آبیاری I ($mm d^{-1}$) و بارش P ($mm d^{-1}$) تعیین می‌شود. ET_p با استفاده از معادله پنمن-مانتیت و با استفاده از داده‌های روزانه هواشناسی تشعشع، دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد و همچنین مشخصات گیاهی از قبیل حداقل مقاومت گیاه، آلیدوی سطحی و ارتفاع گیاه محاسبه می‌شود (۱).

داده‌های ورودی در مدل SWAP

مرز بالایی

داده‌های آب و هوایی شامل (حداقل و حداکثر دمای هوا، رطوبت نسبی و فشار بخار هوا، ساعات آفتابی و سرعت باد و میزان بارندگی از سه ایستگاه سینوپتیک در اطراف و داخل منطقه برخوردار: شرق اصفهان (lat. 32°40'N, lon. 51°52'E) مورچه خورت (lat. 33° 05'N, lon. 51°29'E) و میمه (lat. 33° 26'N, lon. 51° 10'E) استفاده شد.

از آنجایی که داده‌های جمع‌آوری شده از ایستگاه‌های غیر کشاورزی بود، داده‌های دما و رطوبت با استفاده از ضرایب ۰/۹۵ و ۱/۰۵ اصلاح گردید. مقادیر تشعشع نیز با استفاده از آمار ساعات آفتابی ثبت شده و معادله آنگستروم محاسبه گردید (۲).

1- Parameter ESTmation (PEST)

برای واسنجی مدل و دسته دوم برای اعتبار سنجی پارامترهای بهینه شده است.

پارامترهای گیاهی

پارامترهای گیاهی در مدل پیشرفته SWAP به گروه‌های زیر تقسیم بندی می‌گردند: ارتفاع گیاه، عمق ریشه، شاخص سطح برگ، همانند سازی دی اکسید کربن^۱، تقسیم بندی وزن خشک به اجزای گیاهی و میزان آب مصرفی گیاه. بخشی از پارامترهای گیاهی می‌تواند تعدیل شوند و با استفاده از بررسی منابع تعیین گردند (۴). در طول فصل زراعی ۸۴-۱۳۸۳ پارامترهای گیاهی از قبیل تعداد بوته در واحد سطح، شاخص سطح برگ، وزن خشک اندام‌های گیاهی و عمق ریشه در مزارع انتخابی اندازه‌گیری گردید. برای پارامترهایی که قابل اندازه‌گیری نبودند طیفی از مقادیر قابل قبول بر اساس تجربه و بررسی منابع در نظر گرفته شد.

شبهه سازی میزان تولید ماده خشک در SWAP نسبتاً حساس به پارامترهای گیاهی از قبیل حداکثر میزان همانند سازی دی اکسید کربن (A_{max})، راندمان مصرف نور خورشید (ϵ) و سطح ویژه برگ (S_{la}) می‌باشند (۴). این پارامترها پس از واسنجی خصوصیات هیدرولیکی خاک و عمق آبیاری به صورت دستی تخمین زده شدند. پارامترهای گیاهی مورد استفاده در شبهه سازی محصولات گندم، ذرت علوفه‌ای، آفتاب گردان و چغندر قند در جدول ۱ آورده شده است.

نتایج و بحث

کارایی مصرف آب در شرایط فعلی

شاخص‌های کارایی مصرف آب با استفاده از شبهه سازی اجزای بیلان آب از قبیل میزان آبیاری (I)، تعرق (T)، تبخیر و تعرق (ET)، نفوذ عمقی (Q_{bot})، رطوبت ذخیره

برنامه آنالیز حساسیت (SENSAN^۱) برای اجرای مدل با استفاده از مقادیر مختلف پارامترهای ورودی می‌باشد. این مدل شامل دو گزینه تخمین پارامتر و پیش‌بینی می‌باشد. در این مطالعه مدل با یک تخمین اولیه از پارامترها اجرا گردید و نتایج مدل با مشاهدات مقایسه گردید. PEST پارامترهای انتخابی را تصحیح کرده و دوباره مدل را اجرا می‌کند. مراحل اصلاح پارامترها تا زمانی که تفاوت بین نتایج مدل و مشاهدات و یا کل تکرارها به یک حد خاصی برسد ادامه می‌یابد. یک تابع هدف برای کمی کردن تفاوت‌ها بین مدل و مشاهدات به صورت زیر تعریف گردید:

$$O(b) = \sum_{i=1}^N (\theta_{obs}(t_i) - \theta_{sim}(b, t_i))^2 \quad (7)$$

که $\theta_{obs}(t_i)$ رطوبت خاک مشاهده شده در زمان t_i ، N تعداد کل مشاهدات و $\theta_{sim}(b, t_i)$ مقادیر شبیه سازی شده با استفاده از آرایه با پارامترهای b است.

نقش معادله معکوس پیدا کردن یک ترکیب بهینه از پارامترهایی است که تابع هدف را به حداقل می‌رساند.

به منظور کاهش تعداد پارامترها عمق آبیاری‌ها ثابت در نظر گرفته شد. این فرض یک فرض قابل قبولی در منطقه برخوار بود چرا که در منطقه آبیاری‌های سنگین و سنتی صورت می‌گیرد. بنابراین با در نظرگیری دو لایه خاک تعداد کل پارامترهایی که باید بهینه شوند به ۵ پارامتر محدود گردید. رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در مزارع انتخابی و در عمق‌های مختلف به عنوان داده‌های مشاهداتی رطوبت مورد استفاده قرار گرفتند. رطوبت خاک به صورت مستقیم و به صورت هفتگی از اعماق ۰-۱۵، ۱۵-۳۰، ۳۰-۶۰، ۶۰-۹۰ و ۹۰-۱۲۰ سانتیمتر اندازه‌گیری شدند. داده‌های مشاهداتی رطوبت خاک به دو دسته تقسیم شدند: دسته اول

2 - Assimilation

1- SENSitivity Analysis (SENSAN)

(جدول ۱) - پارامترهای گیاهی مورد استفاده در شبیه سازی محصولات گندم، ذرت علوفه‌ای، آفتاب گردان و چغندر قند

پارامتر	چغندر قند	آفتابگردان	ذرت علوفه‌ای	گندم زمستانه
دمای تجمعی از مرحله سبزی‌نگی تا گلدهی (°C) TSUMEA	۵۰۰	۱۱۰۰	۸۷۰	۱۳۰۰
دمای تجمعی از مرحله گلدهی تا رسیدگی (°C) TSUMAM	۲۲۵۰	۱۰۰۰	۹۵۰	۷۵۰
سطح ویژه برگ S_{la}	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۳۵	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۱۷
حداکثر افزایش نسبی در سطح برگ (m ² m ⁻² d ⁻¹) RGRLAI	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹	۰/۰۰۰۸
ضریب جذب نور K_{gr}	۰/۳۴	۰/۶۷	۰/۴	۰/۳۷
راندمان مصرف نور (kg ha ⁻¹ hr ⁻¹ / J m ² s ⁻¹) ϵ	۰/۵	۰/۵	۰/۶	۰/۴
حداکثر میزان همانند سازی دی اکسید کربن (kg ha ⁻¹ hr ⁻¹) A_{max}	۴۵	۴۵	۷۳	۴۳

شده در منطقه توسعه ریشه (ΔW) و عملکرد قابل عرضه به بازار (Y_M) و قیمت محصولات کشاورزی محاسبه گردید. یک تحلیل اقتصادی ساده بر اساس ۳ فاکتور قیمت هر کیلوگرم محصول، هزینه هر کیلوگرم محصول و هزینه محصول بر هکتار محاسبه گردید. قیمت آب نیز در هزینه‌های ثابت در نظر گرفته شده است. قیمت محصولات از داده‌های آماری استخراج گردید اما هزینه‌ها به صورت تخمینی بود (جدول ۲)

(جدول ۲) - قیمت محصولات و هزینه‌های تولید به ریال برای گیاهان عمده در منطقه آبیاری برخوار (ریال= \$)

چغندر قند	آفتابگردان	ذرت علوفه‌ای	گندم زمستانه	قیمت‌ها و هزینه‌ها
(شکر)	(دانه)	(ماده خشک)	(دانه)	
۲۵۰۰	۳۸۰۰	۱۶۰۰	۲۳۰۰	قیمت محصول (kg ⁻¹ \$)
۳۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	هزینه‌های ثابت (ha ⁻¹ \$)
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	هزینه‌های متغیر (kg ⁻¹ \$)

تحت عبارت (m³ \$) T⁻¹ \$ ۱۹۰۰ برای گندم، ۵۰۰۰ برای ذرت علوفه‌ای، ۶۰۰ برای آفتاب گردان و ۳۸۰۰ برای چغندر قند محاسبه گردید. این نشان می‌دهد که ذرت علوفه‌ای بالاترین بهره اقتصادی را در منطقه آبیاری برخوار فراهم می‌کند. این ممکن است جوابگوی این واقعیت باشد که چرا در دوره ۱۳۷۰ تا ۱۳۸۴ منطقه تحت کشت ذرت علوفه‌ای از ۵۸۰ به ۱۶۰۰ هکتار افزایش یافته است. میزان بالای تبخیر و

(جدول ۳) مقادیر WP در مزارع مختلف کشاورزان در منطقه آبیاری برخوار را نشان می‌دهد. تفاوتها در مقادیر WP برای گیاهان مختلف در طول فصل به دلیل تفاوت در ترکیب شیمیایی، شاخص برداشت و میزان تعرق می‌باشد (۱۴). متوسط WP تحت عبارت (kg m⁻³) T⁻¹ ۱/۱۸ Y_M برای گندم، ۳/۳۸ برای ذرت علوفه‌ای، ۰/۳۳ برای آفتاب گردان و ۱/۷۲ برای چغندر قند محاسبه گردید. متوسط WP

همچنین روش‌های آبیاری سیلابی در منطقه برخوردار باعث گردیده تا مقادیر WP تحت عبارت $Y_M T^{-1}$ به WP_{ET} تحت عبارت $Y_M ET^{-1}$ کاهش یابد. مقادیر متوسط WP تحت عنوان $Y_M ET^{-1}$ برای گندم، ۰/۸۷ برای ذرت علوفه‌ای، ۰/۲۹ برای آفتاب‌گردان و ۱/۴۱ برای چغندر قند محاسبه گردید.

(جدول ۳) - شاخص‌های کارایی مصرف آب WP_T ، WP_{ET} و WP_I

مزارع								شاخص‌های کارایی مصرف آب	
W1	W2	M1	M2	Sa1	Sa2	Su1	Su2		
گندم		ذرت علوفه‌ای		آفتاب‌گردان		چغندر قند			
۱/۲۶	۱/۱۱	۳/۴۷	۳/۳۰	۰/۳۳	۳۳۰	۱/۶۹	۱/۷۵	kg m ⁻³	WP _T
۲۲۰۰	۱۶۰۰	۵۰۰۰	۴۸۰۰	۷۰۰	۵۰۰	۳۷۰۰	۳۹۰۰	\$ m ⁻³	
۰/۹۸	۰/۷۶	۳/۰۵	۳/۰۱	۰/۳۰	۰/۲۸	۱/۳۹	۱/۴۳	kg m ⁻³	WP _{ET}
۱۷۰۰	۱۱۰۰	۴۴۰۰	۴۳۰۰	۷۰۰	۵۰۰	۳۱۰۰	۳۲۰۰	\$ m ⁻³	
۰/۵۳	۰/۴۴	۱/۳۹	۲/۱۲	۰/۲۴	۰/۲۰	۱/۰۴	۰/۹۵	kg m ⁻³	WP _{Irr}
۱۰۰۰	۷۰۰	۲۰۰۰	۳۱۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۲۳۰۰	۲۱۰۰	\$ m ⁻³	

ندارد تا فاصله بین بارندگی و نیاز آبی گیاه را پر کند به صورت جدی شروع به کم آبیاری کرده تا به حداکثر سود با همین مقدار آب قابل دسترس برسد. علاوه بر آن به دلیل اینکه در منطقه برخوردار سطح آب زیر زمینی بسیار عمیق می‌باشد (>100 متر) مشارکت Q_{bot} در تغذیه آب‌های زیرزمینی ممکن است سال‌ها طول بکشد. علاوه بر آن ΔW به مقدار رطوبت اولیه در پروفیل خاک بستگی دارد و به علت تغییر مزارع در آغاز هر فصل رشد در منطقه برخوردار آب ذخیره شده در خاک مورد استفاده مجدد قرار نگرفته و بنابراین به عنوان افت در نظر گرفته می‌شود.

افزایش کارایی مصرف آب

حداکثر کارایی مصرف آب با استفاده از به کارگیری

تبخیر خاک باعث کاهش ۱۱ تا ۲۷ درصدی در مقادیر WP گردید. علاوه بر آن نفوذ عمقی آب خاک Q_{bot} و رطوبت ذخیره شده در پروفیل خاک ΔW باعث کاهش WP در مقیاس مزرعه‌ای گردید. به طوری که مقادیر WP تحت عبارت $(kg m^{-3}) Y_M I^{-1}$ ۰/۵ برای گندم، ۱/۷۶ برای ذرت علوفه‌ای، ۰/۲۲ برای آفتاب‌گردان و ۱ برای چغندر قند محاسبه گردید که نشان دهنده کاهش ۲۴ تا ۴۲ درصدی مقادیر WP در مقایسه با WP_{ET} می‌باشد. تحت شرایط خشکسالی و از نقطه نظر کشاورز Q_{bot} و ΔW عموماً به عنوان افت در نظر گرفته می‌شوند. این به‌ویژه در زمانی که عدم قطعیت در وقوع باران و یا آب آبیاری وجود دارد فرض درستی است که باعث می‌شود کشاورز به کم آبیاری سوق پیدا کند. وقتی کشاورز آب آبیاری کافی در اختیار

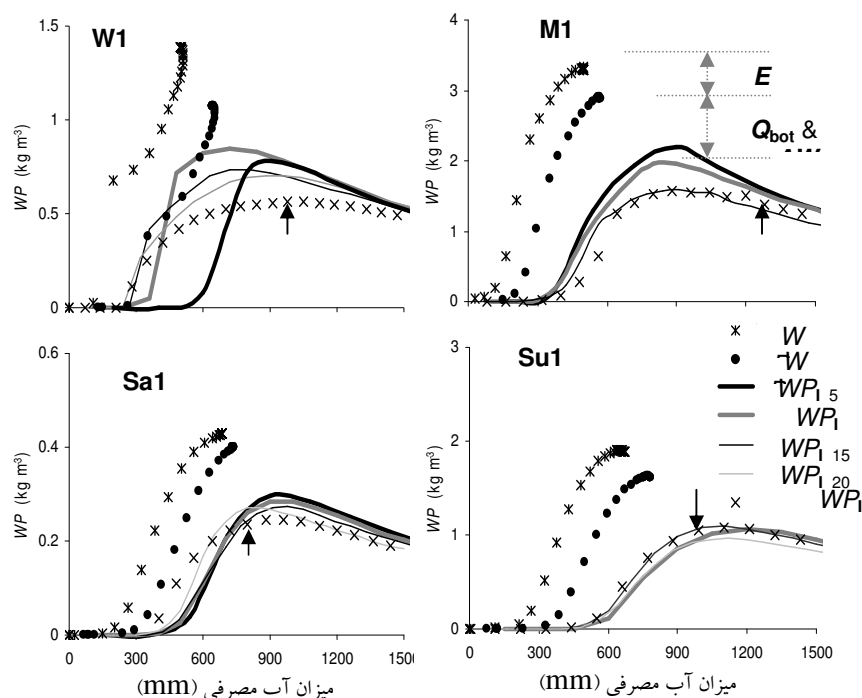
تقویم بهینه آبیاری صورت می‌گیرد (۶). اما به دلیل آشنا نبودن کشاورزان با اصول فنی آبیاری سطحی، به کارگیری تقویم بهینه آبیاری از طریق آبیاری سطحی در منطقه برخوار اصفهان چندان رایج نبوده و در عوض آبیاری با عمق ثابت و دور زمانی ثابت شایع‌ترین شکل آبیاری سطحی در این منطقه می‌باشد (۳).

به منظور به حداکثر رسانی کارایی مصرف آب و کاهش راهکارهای مزرعه‌ای که منجر به بهره اقتصادی بالاتر می‌گردد، مدل واسنجی شده SWAP در مزارع W1, MI, Sa1, Su1 استفاده گردید. به عنوان راهکار مزرعه‌ای کم آبیاری، تغییر دور آبیاری مورد تحلیل قرار گرفت. تمامی پارامترها در مدل ثابت فرض شد و تنها زمان و عمق آبیاری‌ها تغییر کرد. زمان آبیاری به عنوان دوره ثابت ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ روز تعریف شد. عمق آبیاری نیز در محدوده ۱ تا ۲۰ سانتیمتر متغیر بود. به منظور اجرای مدل SWAP و تغییر خودکار عمق و تاریخ‌های آبیاری در فایل‌های ورودی، این مدل به برنامه SENSAN لینک شد. شاخص‌های کارایی مصرف با استفاده از اجزای شبیه سازی شده بیان آب و عملکرد واقعی قابل عرضه به بازار محاسبه گردید. (شکل ۲) روابط بین شاخص‌های کارایی مصرف آب در عبارات $Y_M I^{-1}$ ، $Y_M ET^{-1}$ و T^{-1} را با آب مصرفی نشان می‌دهد. منحنی WP در عبارت $Y_M I^{-1}$ برای سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ و بر اساس دوره‌های آبیاری ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ روز و همچنین تقویم آبیاری به کار گرفته شده توسط کشاورز در مزارع W1 (گندم)، MI (ذرت)، Sa1 (آفتابگردان) و Su1 (چغندر قند) محاسبه گردید. پیکان‌ها نشان دهنده مقادیر WP در عبارت $Y_M I^{-1}$ تحت عملیات آبیاری به کار گرفته شده توسط کشاورز می‌باشد. علائم E، Q_{bot} و ΔW اشاره به شار تبخیر، نفوذ عمقی و رطوبت خاک ذخیره شده در پروفیل خاک دارند. این سه پارامتر به عنوان افت در نظر

گرفته می‌شوند و مهمترین دلایل کاهش مقادیر WP از WP_T به WP_{ET} و WP_{ET} به WP_I می‌باشند. روابط بین $WP_{(E)T}$ و مقدار آب مورد استفاده برای (E)T نشان می‌دهد که افزایش در آب مصرفی با یک نسبتی از افزایش کارایی مصرف آب $WP_{(E)T}$ همراه است. هرچند که روابط بین $WP_{(E)T}$ و (E)T بستگی به عوامل گوناگون از قبیل پایداری شاخص برداشت (HI) و تراکم بوته در واحد سطح، به کارگیری کود و مواد آلی و واریته گیاهی دارد (۸). در زمانی که آب آبیاری به اندازه کافی نبوده تا بتواند توازن بین میزان تعرق واقعی گیاه با مقدار پتانسیل آن را نگه دارد، روزه‌ها در برگ‌ها به صورت جزئی بسته خواهند شد که این منجر به کاهش عملکرد می‌شود. همانگونه که در (شکل ۲) نشان داده شده کارایی مصرف آب $WP_{(E)T}$ مستقل از تقویم آبیاری به کار گرفته شده می‌باشد. این نتیجه گیری توسط محققین دیگر (از جمله بسم بایندر، (۴)) نیز تأیید گردیده است. همانطور که در (شکل ۲) نشان داده شده مقادیر WP_I کم آبیاری و تغییر دور سنتی آبیاری به دور کوتاه‌تر آبیاری به صورت چشم‌گیری بهبود می‌یابد. به طور مثال در مقایسه با حداکثر WP_I ممکن در آبیاری سنتی در مزرعه گندم (مزرعه W1)، با استفاده از دور کوتاه آبیاری (۱۰ روز) و اعمال کم آبیاری (۶۵۰ میلی‌متر) WP_I تا ۶۰ درصد افزایش می‌یابد. در مثالی دیگر به کارگیری دور آبیاری کوتاه مدت (۵ روز) منجر به افزایش ۲۰ و ۲۶ درصدی در حداکثر WP_I ممکن در مزارع MI و Sa1 می‌گردد. با وجود امکان افزایش در WP_I حرکت از عملیات آبیاری سنتی به مدرن کار چندان ساده‌ای نمی‌باشد. یک دلیل عمده این است که به حداکثر رسانی کارایی مصرف آب اغلب با علاقه کشاورزان که هدفشان به حداکثر رسانی کارایی زمین یا بهره اقتصادی بالاتر می‌باشد همراه نیست. حداکثر کردن WP_I نیاز به تغییر در مدیریت آب آبیاری و

یک علاقه مشترک بین کشاورزان و مدیران آب نمی‌باشد
(۱۷)

سرمایه گذاری مالی دارد تا بتوانیم از سیاست " حداکثر آبیاری - حداکثر عملکرد" به سیاست " آبیاری کمتر حداکثر WP" حرکت کنیم که سیاست دومی اغلب



(شکل ۲) - روابط بین شاخص‌های کارایی مصرف آب در عبارات $Y_M I^{-1}$ و $Y_M ET^{-1} Y_M T^{-1}$ با آب مصرفی

شاخص‌های WP بیان کننده در آمد به دست آمده از آب مصرفی در بخش‌های هیدرولوژیکی از قبیل تعرق، تبخیر و نفوذ عمقی می‌باشد. مقدار متوسط WP_T تحت عبارت $\$ T^{-1}$ ($\$ m^{-3}$)^۱ نشان داد که ذرت علوفه‌ای دارای بالاترین بهره اقتصادی است. تبخیر خاک موجب ۱۱ تا ۲۷ درصد کاهش در مقادیر WP_{ET} در مقایسه با مقادیر WP_T گردید. علاوه بر آن به علت نفوذ عمقی و رطوبت ذخیره شده در پروفیل خاک یک کاهش ۲۴ تا ۴۲ درصدی در مقادیر WP_I در مقایسه با WP_{ET} مشاهده گردید. کاهش دور آبیاری و کم آبیاری به میزان چشمگیری کارایی مصرف آب WP_I را افزایش داد اما تاثیر چندانی بر روی WP_{ET} نداشت.

نتیجه

به منظور کاوش راهکارهایی که منجر به بهره اقتصادی بالاتر و کارایی بالاتر مصرف آب می‌گردد یک مدل آگروهیدرولوژی با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در هشت مزرعه کشاورزان (گندم، ذرت علوفه‌ای، آفتاب گردان و چغندر قند) در منطقه آبیاری برخوار و در سال زراعی ۸۴-۱۳۸۳ واسنجی و اعتبارسنجی گردید. مدل واسنجی شده برای تعیین اجزای بیلان آب و متغیرهای گیاهی از قبیل وزن ماده خشک و عملکرد قابل عرضه به بازار که در محاسبات شاخص‌های کارایی مصرف آب کاربرد دارند، استفاده گردید. مهمترین نتایج حاصل شده از این تحقیق عبارتند از:

منابع

- 1- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome, Italy, 300pp.
- 2- Angstrom, A., 1924. Solar and atmospheric radiation. Q. J. R. Meteorol. Soc. 50: 122-125.
- 3- APERI, 2001. General studies of agricultural development in Borkhar district. Agricultural Planning and Economic Research Institute, Iran (In Persian).
- 4- Bessembinder, J.J.E., Leffelaar, P.A., Dhindwal, A.S. and Ponsioen, T.C., 2005. Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity. Agric. Water Manag. 73(2): 113-130.
- 5- Doherty, J., Brebber, L. and Whyte, P., 1995. PEST: Model independent parameter estimation. Australian Centre for Tropical Freshwater Research, James Cooke University, Townsville, Australia, 140 pp.
- 6- Droogers, P., Bastiaanssen, W.G.M., Gieske, A., Toomanian, N. and Akbari, M., 2001. Assessment of irrigation performance using NOAA satellite imagery. IAERI-IWMI, Iran.
- 7- Jhorar, R.K., 2002. Estimation of effective soil hydraulic parameters for water management studies in semi-arid zones. PhD Thesis, ISBN 90-5808-644-5, Wageningen University and Research Centre, Wageningen, The Netherlands, 157pp.
- 8- Keller, A. and Seckler, D., 2005. Limits to the Productivity of Water in Crop Production. California Water Plan Update, Volume 4.
- 9- Kijne, J., Barker, R. and Molden, D. (Eds.) 2003. Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement. Comprehensive assessment of Water Management in Agriculture, Series No. 1, CABI Press, Wallingford, UK, 352 p.
- 10- Kroes, J.G. and Van Dam, J.C. (Eds) 2003. Reference Manual SWAP version 3.03. Alterra Green World Research, Alterra report 773, ISSN 1566-7197. Wageningen University and Research Centre, Wageningen, The Netherlands, 211 p.
- 11- Molden, D., Murray-Rust, H., Sakthivadivel, R. and Makin, I., 2001. A water productivity framework for understanding and action. Workshop on Water Productivity. Wadduwa, Sri Lanka, November 12 and 13, 2001.
- 12- Salemi H.R., Mamanpoush, A., Miranzadeh, M., Akbari, M., Torabi, M., Toomanian, N., Murray-Rust, H., Droogers, P., Sally and H., Gieske, A., 2000. Water Management for Sustainable Irrigated Agriculture in the Zayandeh Rud Basin, Esfahan Province, Iran. IWMI-IAERI, Iran.
- 13- Sally H., Murray-Rust, H., Mamanpoush, A. and Akbari, M., 2001. Water supply and demand in four major irrigation systems in the Zayandeh Rud Basin, Iran. IAERI-IWMI, Iran.
- 14- Singh, R., van Dam, J.C. and Feddes, R.A., 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. Agric. Water Manag. 82: 253-278.
- 15- Van Genuchten, M.Th., 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.
- 16- Wösten, J.H.M., Lilly, A., Nemes, A. and Bas, C. Le., 1998. Using existing soil data to derive hydraulic parameters for simulation models in environmental studies and in land use planning. Report 156. The Netherlands, DLO Winand Staring Centre.
- 17- Zwart, S.J. and Bastiaanssen, W.G.M., 2004. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. Agric. Water Manage. 69(2): 115-133.

Increasing water productivity of irrigated crops in Borkhar irrigation district, Isfahan

M. VAzifedoust* - A. Alizadeh – Gh. Kamali – M. Feyzi¹

Abstract

To explore the on-farm strategies which result in higher economic gains and water productivity (WP), a physically based agro-hydrological model, Soil Water Atmosphere Plant (SWAP), was calibrated and validated using intensive measured data at 8 selected farmer fields (wheat, fodder maize, sunflower and sugar beet) in the Borkhar district, Isfahan during the growing seasons of 2004-05. The WP values for the main crops were computed using the SWAP simulated water balance components i.e. transpiration (T), evapotranspiration (ET), irrigation (I), and the marketable yield (Y_M) in terms of $Y_M T^{-1}$, $Y_M ET^{-1}$ and $Y_M I^{-1}$. The average WP, expressed as $Y_M T^{-1}$ (kg m^{-3}) was 1.18 for wheat, 3.38 for fodder maize, 0.33 for sunflower and 1.72 for sugar beet. This indicated that fodder maize provided the highest economic benefit in the Borkhar irrigation district. Soil evaporation caused the average WP values, expressed as $Y_M ET^{-1}$ (kg m^{-3}), to be at least 11 to 27% lower than the average WP, expressed as $Y_M T^{-1}$. Furthermore, due to percolation from root zone and stored moisture content in the root zone, the average WP values expressed as $Y_M I^{-1}$ (kg m^{-3}), had a 24 to 42 % reduction as compared with WP expressed as $Y_M ET^{-1}$. Improved irrigation practices in terms of irrigation timing and amount, increased WP in terms of $Y_M I^{-1}$ (kg m^{-3}) by a factor of 1.5 for wheat and maize, 1.3 for sunflower and 1.1 for sugar beet.

Key words: Water productivity, Irrigation practices, Wheat, Fodder maize, Sunflower, Sugar beet

* - Corresponding author Email: majid.vazifedoust@asmerc.ac.ir

¹ - Contribution from College of Agriculture, Guilan University and Research Institute, Tehran & Ferdowsi University & Research Institute & Soil and water Research Institute Isfahan