

تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری بر شاخص‌های بهره‌وری آب، مطالعه موردی: دشت نیشابور

سید ابوالقاسم حقایقی مقدم^{۱*} و مسعود فرزام نیا

دانشجوی دکتری مهندسی آب و مربی پژوهشی بخش فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی؛

sahm51@yahoo.com

مربی پژوهشی بخش فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی اصفهان؛

masoud_farzamnia@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش، اثر مدیریت رایج آبیاری بر اجزای بیلان آب و شاخص‌های مختلف بهره‌وری آب در مزارع گندم، جو، چغندرقد، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی در دشت نیشابور با استفاده از مدل SWAP بررسی گردید و تأثیر اعمال سناریوی برنامه‌ریزی آبیاری بر کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی تخمین زده شد. نتایج نشان داد که در شرایط مدیریت آبیاری فعلی زارعین، تبخیر از سطح خاک موجب کاهش بهره‌وری آب از WP_T (عملکرد به تعرق) به WP_{ET} (عملکرد به تبخیر و تعرق) گردید. کاهش بهره‌وری آب به دلیل تبخیر برای مزارع گندم، جو، چغندرقد، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی به ترتیب به اندازه ۲۴، ۲۶، ۲۷، ۲۱، ۸ و ۱۶ درصد بود. کاهش بهره‌وری آب به دلیل نفوذ عمقی، از WP_{ETQ} (عملکرد به تبخیر و تعرق و نفوذ عمقی) در مقایسه با WP_{ET} شدیدتر بود به طوری که مقدار WP_{ETQ} به اندازه ۵۰، ۴۴، ۳۳، ۳۷، ۱۴ و ۵۶ درصد به ترتیب برای مزارع فوق در مقایسه با WP_{ET} کاهش نشان داد. نتایج شبیه‌سازی با مدل در حالت آبیاری برنامه‌ریزی شده نشان داد که مقدار آبیاری در طول فصل رشد برای دست یافتن به حداکثر عملکرد گندم، جو، چغندرقد، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی به ترتیب معادل ۵۲۰، ۴۴۰، ۱۰۱۰، ۹۳۰، ۸۷۰ و ۱۰۵۰ میلی‌متر است. انجام آبیاری برنامه‌ریزی شده می‌تواند موجب ۲۶٪ کاهش در مقدار آبیاری در مقایسه با شرایط رایج زارعین گردیده و مقدار بهره‌وری آب (WP_1) را به میزان ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب برای گندم، ۰/۷ برای جو، ۱/۶ برای چغندرقد، ۶/۷ برای ذرت علوفه‌ای و ۸/۳ برای گوجه‌فرنگی افزایش دهد. با توجه به سطح زیر کشت شش محصول عمده دشت نیشابور (هشتاد هزار هکتار)، مقدار کاهش در برداشت از منابع آب زیرزمینی به دلیل اجرای برنامه بهینه آبیاری حدود ۱۶۵ میلیون متر مکعب تخمین زده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر از سطح خاک، نفوذ عمقی، مصرف بهینه آب، شبیه‌سازی با مدل SWAP

مقدمه

آبیاری برنامه‌ریزی شده به این مفهوم است که کشاورز در زمان مناسب و به مقدار لازم آبیاری نماید. با توجه به شرایط بحرانی آب زیرزمینی در استان خراسان رضوی، زیرحوضه نیشابور از حوضه آبریز رودخانه کالشور، در

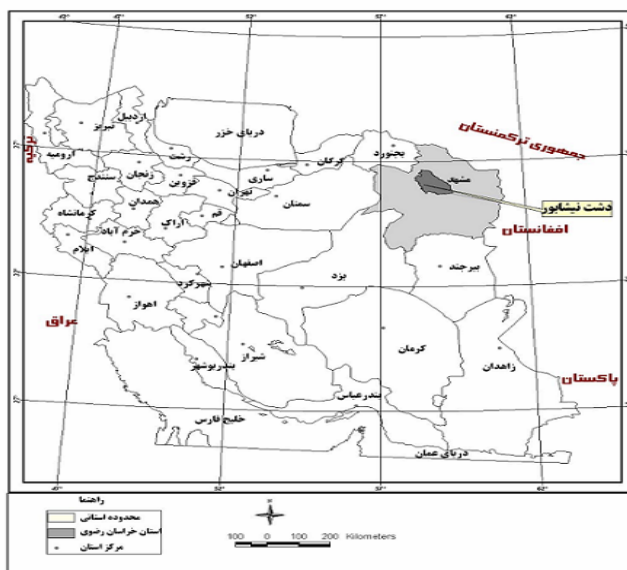
در این پژوهش، موضوع مدیریت بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی با انجام برنامه‌ریزی مناسب آبیاری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۱. آدرس نویسنده مسؤول: مشهد، مقابل پلیس راه طرق، صندوق پستی ۴۸۸

* دریافت: مرداد، ۱۳۹۰ و پذیرش: شهریور، ۱۳۹۱

خاک توسعه یافته‌اند. یکی از این مدل‌ها، مدل SWAP (خاک، آب، اتمسفر و گیاه) می‌باشد که برای شبیه‌سازی توازن آب و مواد محلول در یک خاک کشت شده با انواع مختلف شرایط مرزی شامل امکان زهکشی و مدیریت‌های مختلف آبیاری به کار برده می‌شود. دلیل استفاده از مدل SWAP در این تحقیق، قابلیت مناسب مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول و نحوه حرکت آب و املاح در پروفیل خاک، تحت شرایط مختلف اقلیمی و مدیریت‌های متفاوت آبیاری است که در بسیاری از مناطق دنیا مورد استفاده قرار گرفته و عملکرد مناسب آن به اثبات رسیده است.

این استان برای انجام این تحقیق انتخاب گردید (شکل ۱). دشت نیشابور از جمله دشت‌های وسیع حوضه آبریز کالشور می‌باشد که بیشترین زمین‌های آبی را در خود جای داده است. کل مساحت واحد هیدرولوژیک نیشابور ۶۹۶۲ کیلومتر مربع است که از این مقدار ۴۴۲۰ کیلومتر مربع دشت و مابقی ارتفاعات می‌باشد. کسری مخزن و افت سطح آب زیرزمینی (سالانه بیش از ۲۰۰ میلیون متر مکعب معادل حدود ۸۲ سانتیمتر متوسط افت سطح آب زیرزمینی) از چالش‌های اساسی این دشت است. امروزه مدل‌های شبیه‌سازی زیادی برای پاسخگویی به مسائل مربوط به حرکت آب و املاح در



شکل ۱- موقعیت دشت نیشابور در کشور و استان خراسان رضوی

ما و همکاران (۲۰۱۱) از مدل SWAP برای ارزیابی برنامه بهینه آبیاری در الگوی کشت گندم زمستانه- ذرت تابستانه در منطقه پکن در کشور چین استفاده کردند. از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده برای برنامه‌ریزی بهینه آبیاری در سه سال معرف منطقه با شرایط هیدرولوژیک ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد کمبود بارش نسبت به طول دوره آماری بلندمدت استفاده گردید. نتایج نشان داد که برنامه بهینه آبیاری با بیشترین کارایی مصرف آب در شرایط

اکبری و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از مدل SWAP تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری بر بهره‌وری آب را در شبکه آبشار اصفهان بررسی نمودند. نتایج نشان داد که با اصلاح برنامه آبیاری، عملکرد محصول جو و گندم به مقدار ۱۵٪ افزایش می‌یابد. با بهبود مدیریت زراعی و کاهش ۲۰ درصدی عمق آب آبیاری، عملکرد محصول تغییر معنی‌داری نشان نداد.

مشکلات قانونی دیگر را می‌توان از عوامل زمینه‌ساز در بروز بحران آب در دشت نیشابور محسوب نمود.

وضعیت بیلان آب و املاح در اراضی رودشت اصفهان با استفاده از مدل SWAP توسط دروگرز و همکاران (۲۰۰۰) و مورای‌راست و همکاران (۲۰۰۴) شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که عملیات رایج آبیاری برای گیاه پنبه در منطقه یعنی آبیاری به اندازه ۹۰۰ میلی‌متر در طول فصل رشد با شوری آب ۴ دسی‌زیمنس بر متر می‌تواند عملکردی به میزان ۶۶٪ عملکرد پتانسیل را تولید نماید. چنانچه با کیفیت آب موجود از میزان حجم آب آبیاری کاسته شود، درصد کاهش عملکرد افزایش یافته و توصیه نمی‌گردد. اما چنانچه کیفیت آب بخاطر تغییر در مدیریت آبیاری اراضی بالادست رودشت ارتقاء یابد و به اندازه ۱-۲ دسی‌زیمنس بر متر برسد، می‌توان انتظار داشت که عملکرد برابر با ۷۳-۷۷ درصد پتانسیل تولید گردد.

دروگرز و ترابی (۲۰۰۲) از مدل SWAP برای پیش‌بینی عملکرد چهار محصول عمده تحت کشت در حوضه آبریز زاینده‌رود اصفهان استفاده نمودند. در این پژوهش تأثیر مقادیر مختلف آب مصرفی، شوری آب آبیاری و بافت خاک بر عملکرد نسبی و کارایی مصرف آب محصولات برنج، یونجه، گندم و چغندر قند بررسی گردید. نتایج نشان داد کشت برنج بیشترین درآمد در واحد سطح را برای کشاورزان منطقه دربر دارد. بهره‌وری آب برنج برابر ۰/۳۵ دلار بر متر مکعب است و حال آنکه برای چغندر قند، گندم و یونجه به ترتیب ۰/۰۶، ۰/۰۲ و ۰/۰۲ دلار بر متر مکعب برآورد گردید.

دروگرز و همکاران (۲۰۰۰)، چهار موضوع مهم بیلان کلی آب، بهره‌وری آب، امنیت غذایی و سطوح مختلف آبیاری در غرب ترکیه را با کاربرد مدل SWAP مورد بررسی قرار دادند. در این ناحیه پنبه و انگور دو محصول عمده تحت کشت هستند. از نقطه‌نظر میزان آبیاری در منطقه، پنبه بایستی به اندازه ۱۰۰۰ میلی‌متر و انگور به اندازه ۸۰۰ میلی‌متر آبیاری شود. اما از دیدگاه

کمبود بارش ۷۵٪ عبارت از ۳ نوبت آبیاری گندم و ۲ نوبت آبیاری ذرت و هر نوبت آبیاری به میزان ۷۵ میلی‌متر می‌باشد. در سال با شرایط رطوبتی ۵۰٪، برنامه بهینه آبیاری همانند سال ۷۵٪ است، با این تفاوت که یک نوبت آبیاری ذرت در زمان قبل از کاشت کفایت می‌کند. در سال با کمبود بارش ۲۵٪ برنامه بهینه آبیاری گندم عبارت از دو نوبت آبیاری در زمان خواب و پر شدن دانه خواهد بود و ذرت نیازی به آبیاری ندارد. این نوع برنامه‌ریزی آبیاری در سال‌های ۷۵، ۵۰ و ۲۵ درصد به ترتیب ۵/۱، ۱۹/۸ و ۲۳/۴ میلی‌متر تغذیه سفره آب زیرزمینی را در پی خواهد داشت.

سینگ و همکاران (۲۰۰۶) در منطقه سیرسا در هند مدل SWAP را در تجزیه و تحلیل شاخص‌های بهره‌وری آب ارزیابی و واسنجی کردند. نتایج نشان داد تغییرات قابل توجهی در مقدار بهره‌وری آب برای گیاهان گندم، برنج و پنبه مشاهده نمی‌شود. دلیل اصلی کاهش مقادیر بهره‌وری آب میزان بالای تبخیر، به ویژه برای برنج، و نفوذ عمقی در مزارع تحت آبیاری عنوان شده است.

فرج‌زاده و همکاران (۱۳۸۴) در پژوهشی به تحلیل بحران آب در دشت نیشابور پرداختند. در این پژوهش چهار فرضیه برای ایجاد بحران در این دشت عنوان گردیده است: ۱- وقوع خشکسالی: در بررسی این فرضیه تأثیر بارزی از خشکسالی بر منابع آب مشاهده نگردید، ۲- کشت گیاهان با نیاز آبی زیاد: تأثیر مسلم نوع کشت بر منابع آب دشت معلوم گردید، ۳- اضافه برداشت: مهمترین عامل در شکل گرفتن و تشدید بحران آب در دشت نیشابور می‌باشد به طوری که از سال ۱۳۴۷ به بعد میزان بهره‌برداری سه برابر افزایش یافته است و ۴- نارسایی قوانین و مقررات مربوط به آب: عدم تدوین به موقع آیین‌نامه مصرف بهینه آب کشاورزی، وجود توافقات شخصی در قوانین و مقررات آبی و وجود

هزار هکتار (آمار سال زراعی ۸۶-۱۳۸۵ برابر با ۱۱۱۵۰۰ هکتار) زیرکشت محصولات مختلف زراعی و باغی آبی قرار می‌گیرد و حجم زیادی از منابع آب زیرزمینی (بیش از ۹۶٪) در بخش کشاورزی به مصرف می‌رسد.

داده‌های جمع‌آوری شده برای اجرای مدل SWAP عبارت از پروفیل رطوبتی خاک مزرعه تا عمق توسعه ریشه گیاهان در طی دوره رشد هر گیاه، داده‌های گیاهی (شامل تاریخ کاشت و برداشت، عمق توسعه ریشه گیاه در طول زمان رشد، شاخص سطح برگ برای هر گیاه، ارتفاع گیاه طی دوره رشد)، داده‌های خاک برای لایه‌های مختلف (شامل بافت، درصد رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم، وزن مخصوص ظاهری، شدت نفوذپذیری آب در خاک، پارامترهای هیدرولیکی موردنیاز مدل)، داده‌های آبیاری (شامل تاریخ، زمان و مقدار همه نوبت‌های آبیاری، شوری آب آبیاری، تعداد آبیاری برای هر گیاه در طول دوره رشد شامل آبیاری قبل از کاشت) و داده‌های هواشناسی بودند.

در سال زراعی ۸۸-۱۳۸۷ تعداد ۶ مزرعه در نقاط مختلف دشت به منظور جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز برای واسنجی مدل SWAP با مشورت کارشناسان خبره محلی انتخاب گردید. در جدول ۱ نوع کشت، مساحت مزرعه و روش آبیاری در مزارع ذکر شده‌اند. شش محصول گندم، جو، چغندر قند، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی به ترتیب ۳۸، ۲۳/۳، ۸/۲، ۷/۷، ۳/۸ و ۱/۸ درصد سطح زیر کشت شهرستان نیشابور در سال زراعی ۸۵-۸۶ را شامل گردیده و در مجموع با ۷۹۲۰۰ هکتار ۷۱٪ سطح زیر کشت در سال مذکور را به خود اختصاص دادند.

بهره‌وری آب، کارایی مصرف آب انگور در حالت بدون آبیاری حداکثر است و برای پنبه در میزان آبیاری ۶۰۰ میلی‌متر حداکثر می‌باشد.

سوابق تحقیق نشان می‌دهد که مدل SWAP قابلیت مناسبی در ارزیابی و شبیه‌سازی مواردی مانند اجزای بیلان آب، رطوبت خاک، برنامه‌ریزی آبیاری، انتقال املاح، رشد محصول و بهره‌وری آب در مقیاس‌های مختلف مانند مزرعه، شبکه آبیاری و حوضه آبریز را دارا می‌باشد. هدف این تحقیق عبارت از ارزیابی آثار بلندمدت عملیات رایج آبیاری روی تولید محصولات و کیفیت خاک و بررسی تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری بر بهره‌وری آب محصولات تولیدی و ایجاد پایداری در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تأثیر بلندمدت عملیات آبیاری با استفاده از مدل شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک (SWAP, 2.07) ارزیابی گردید. بدین منظور در کل محدوده مطالعاتی، اطلاعاتی راجع به عملیات رایج آبیاری و تأثیر آن روی محصولات و داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل SWAP در طی بررسی و پیمایش‌های مزرعه‌ای جمع‌آوری شد. مجموع حجم برداشت سالانه از منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی در دشت نیشابور برابر با ۱۱۰۳/۶ میلیون متر مکعب است. از این مقدار، ۹۵۲/۳ میلیون متر مکعب (۸۶٪) توسط چاه‌ها، ۱۱۶/۷ میلیون متر مکعب (۱۰/۶٪) توسط قنوات و ۳۴/۶۲ میلیون متر مکعب (۳/۴٪) توسط چشمه‌ها برداشت می‌گردد. سهم بخش شرب و صنعت از آب زیرزمینی در این دشت به ترتیب ۳۳ و ۲/۴ میلیون متر مکعب می‌باشد (حسینی، ۱۳۸۳). در این زیرحوضه، سالانه بیش از ۱۱۰

جدول ۱- نوع کشت، روش آبیاری و مساحت مزارع منتخب در سطح دشت نیشابور

نام مزرعه	کشت بهاره	کشت پاییزه	سطح زیر کشت (هکتار)	روش آبیاری	شوری آب (dS/m)
گلستان	ذرت علوفه‌ای	جو	۳۵	ستریپوت	۰/۶۶
فاروب رومان	ذرت علوفه‌ای	گندم	۱۰	جویچه‌ای	۰/۶۰
فیض آباد	ذرت علوفه‌ای	جو	۲۲	جویچه‌ای	۵/۱۳
معمدیه	چغندر قند	جو	۳/۵	جویچه‌ای	۲/۱۵
سلیمانی	پنبه	گندم	۱	کرتی	۳/۸۹
حاجی آباد	گوجه فرنگی	گندم	۰/۴	جوی و پشته	۰/۹۰

نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک نشان داد مدل نسبت به پارامترهای شکل (n, α) و رطوبت اشباع (θ_{sat}) از حساسیت با درجه متوسط و نسبت به سایر پارامترهای ورودی از حساسیت کم برخوردار است (اکبری، ۱۳۸۳ و دهقان، ۱۳۸۹). از میان پارامترهای با حساسیت متوسط α و n حساس‌ترین پارامترها می‌باشند.

در واسنجی مدل با داده‌های رطوبت خاک، مقدار پارامترهای α و n لایه‌های خاک آنقدر تغییر داده شدند (به میزان ۵۰ درصد در جهت مثبت و منفی) تا بهترین تطابق بین رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حاصل گردد. شاخص‌های آماری متفاوتی برای سنجش اعتبار و درستی داده‌های خروجی مدل‌ها وجود دارد. از جمله می‌توان به ضریب تعیین (R^2) ، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و میانگین انحراف (ME) به شرح زیر اشاره کرد (اکبری، ۱۳۸۳):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (1)$$

در این رابطه، y_i مقادیر اندازه‌گیری شده، \bar{y}_i میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، \hat{y}_i مقادیر برآورد شده توسط مدل و N تعداد کل مشاهدات می‌باشند.

وزن مخصوص ظاهری خاک از روش گرفتن نمونه دست نخورده از خاک در رینگ به دست آمد. در کلیه مزارع آزمایشی، رطوبت خاک با استفاده از دستگاه رطوبت سنج از نوع TRIME-FM در فاصله زمانی یک تا دو هفته اندازه‌گیری شد. از روش حلقه‌های مضاعف برای به دست آوردن معادله نفوذ آب در خاک استفاده به عمل آمد. از داده‌های روزانه سال‌های ۸۷ و ۸۸ ایستگاه هواشناسی نیشابور (طول جغرافیایی 58° و $48'$ عرض جغرافیایی 36° و $12'$) به عنوان معرف دشت استفاده به عمل آمد.

مدل SWAP توانایی محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_{ref}) با پنج روش مختلف را دارد. در این تحقیق از روش پنمن-مانتیس به دلیل انطباق بیشتر آن با شرایط اقلیمی نیمه‌خشک منطقه استفاده شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۴). مدل SWAP در تعریف روابط بین پتانسیل فشاری آب خاک، مقدار رطوبت و ضریب هدایت هیدرولیکی غیر اشباع از فرمول معلم- ونگنوختن استفاده می‌کند (هایگن و همکاران، ۲۰۰۰). برای تخمین پارامترهای معادله معلم- ونگنوختن از نسخه ۶ مدل نرم‌افزاری RETC تهیه شده در آزمایشگاه شوری آمریکا استفاده گردید.

برای واسنجی مدل SWAP از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت در لایه‌های ۱۰ سانتیمتری خاک تا عمق ۸۰ سانتیمتر استفاده شد. آنالیز حساسیت مدل

داده) برای واسنجی مدل و بخش دوم (فروردین تا خرداد ۱۳۸۸ در مجموع ۱۲ داده) برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۳ مقایسه بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت شبیه‌سازی شده توسط مدل در لایه های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتیمتری خاک مزرعه فیض‌آباد را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که لایه بالای خاک تغییرات رطوبتی سریع‌تر و بیشتری در هنگام آبیاری یا بارندگی دارد. تغییرات رطوبتی در لایه‌های پایینی خاک تدریجی‌تر است.

شاخص‌های ارزیابی مدل

نتایج ارزیابی رطوبت‌های خاک برآورد شده توسط مدل در مزرعه فیض‌آباد، ضریب تعیین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را ۰/۸۷ و ریشه میانگین مربعات خطاها را ۰/۰۳۷ نشان می‌دهد (شکل ۳). مقدار نزدیک به یک R^2 و مقدار کم RMSE نشان می‌دهد که مدل با دقت مناسبی قادر به شبیه‌سازی رطوبت خاک می‌باشد. همچنین شاخص میانگین خطای مطلق و میانگین انحراف مبین آن است که مدل با خطای ۳ و انحراف ۰/۲ درصد رطوبت خاک را برآورد نموده و از دقت قابل قبولی برخوردار است. اختلاف مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را می‌توان به ناهماهنگی خاک در اعماق مختلف و خطا در اندازه‌گیری نسبت داد که وقوع آنها در شرایط مزرعه اجتناب‌ناپذیر می‌باشد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|}{N} \quad (3)$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)}{N} \quad (4)$$

برای نگهداری سطح آب زیرزمینی در عمق قابل قبول و مجاز، مدیریت‌ها و سناریوهای مختلفی قابل بررسی است. در این تحقیق، بعد از واسنجی مدل، سناریوی برنامه‌ریزی آبیاری برای محصولات دشت جایگزین شرایط رایج گردید و آثار آن بر عملکرد و آب مصرفی گیاهان و شوری خاک توسط مدل، شبیه‌سازی و مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

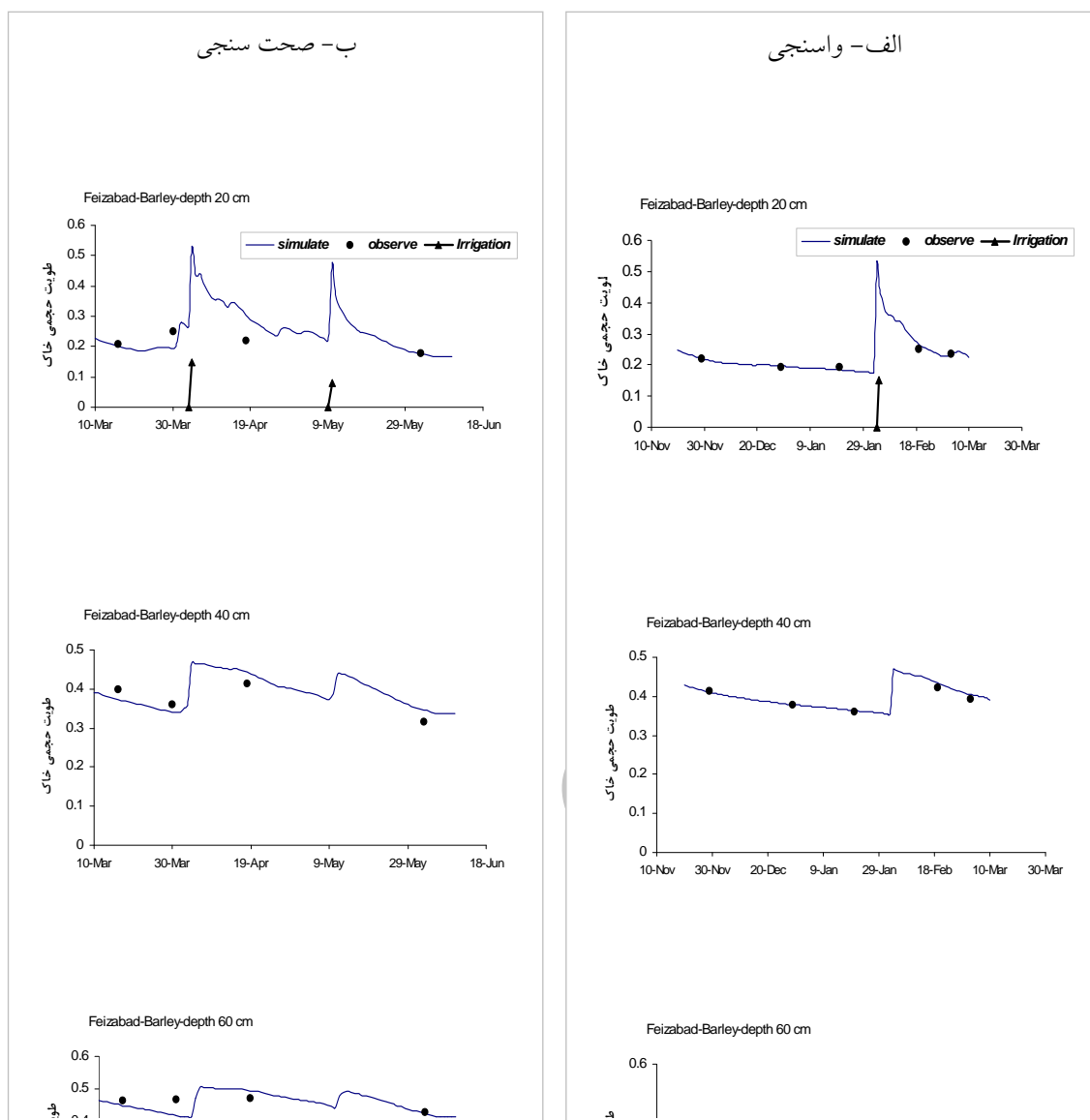
نتایج و بحث

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

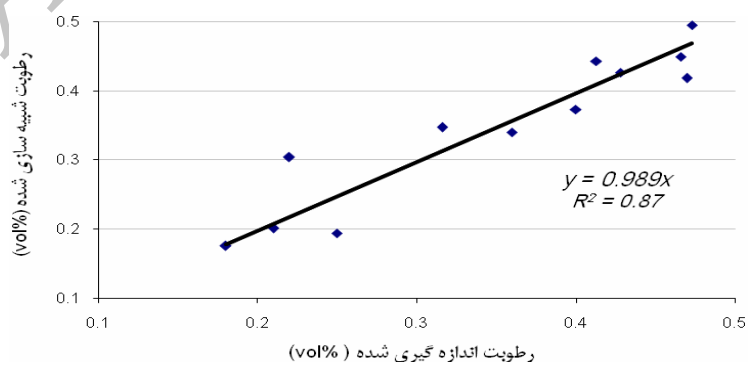
مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک مزارع منتخب - با بافت سیلت‌لوم، لوم و لوم‌شنی در لایه‌های مختلف - پس از واسنجی در جدول ۲ نشان داده شده است. برای واسنجی مدل در مزرعه فیض‌آباد، داده‌های رطوبت خاک طی دوره رشد گیاه جو به دو بخش تقسیم شد. بخش اول داده‌ها (آذر تا اسفند ۱۳۸۷ در مجموع ۱۵

جدول ۲- خصوصیات هیدرولیکی لایه های مختلف خاک مزارع آزمایشی

مزارع	عمق خاک (سانتیمتر)	θ_{res} ($cm^3 cm^{-3}$)	θ_{sat} ($cm^3 cm^{-3}$)	K_{sat} (cmd^{-1})	α (cm^{-1})	λ (-)	n (-)
جو	۰-۳۰	۰/۱۵۰	۰/۵۳۲	۷/۰۴	۰/۰۱۷	-۰/۳۸	۱/۷۰
فیض آباد	۳۰-۶۰	۰/۱۱۶	۰/۴۷۲	۵/۹۲	۰/۰۰۲	-۰/۴۵	۱/۲۰
	۶۰-۹۰	۰/۱۷۱	۰/۵۰۷	۳/۵۰	۰/۰۰۱	-۰/۱۸	۱/۲۲
گندم	۰-۳۰	۰/۰۵۷	۰/۳۸۴	۱۱/۳۱	۰/۰۰۵	-۱/۵۸	۱/۲۶
فاروب رومان	۳۰-۶۰	۰/۰۷۵	۰/۳۶۸	۸/۶۰	۰/۰۱۲	-۰/۷۷	۱/۳۸
	۶۰-۹۰	۰/۰۷۸	۰/۳۵۵	۲/۹۴	۰/۰۱۵	-۱/۶۲	۱/۲۲
گوجه فرنگی	۰-۳۰	۰/۰۳۸	۰/۲۱۸	۱۱/۷۳	۰/۰۱۳	-۰/۴۱	۱/۴۶
حاجی آباد	۳۰-۶۰	۰/۰۳۶	۰/۲۱۷	۱۴/۳۵	۰/۰۲۶	-۰/۱۷	۱/۲۲
	۶۰-۹۰	۰/۰۳۵	۰/۲۱۴	۱۲/۸۴	۰/۰۱۱	-۰/۷۹	۱/۷۸
چغندر قند	۰-۳۰	۰/۰۳۳	۰/۴۲۳	۱۵/۷۹	۰/۰۰۵	۰/۵	۱/۴۹
معمدیه	۳۰-۶۰	۰/۰۳۴	۰/۴۲۹	۱۶/۱۴	۰/۰۰۵	۰/۵	۱/۲۵
	۶۰-۹۰	۰/۰۳۴	۰/۴۳۶	۱۶/۷۳	۰/۰۰۵	۰/۵	۱/۳۳
پنبه	۰-۳۰	۰/۰۶۱	۰/۴۱۸	۱۴/۶۰	۰/۰۰۵	-۰/۳۹	۱/۷۳
سلیمانی	۳۰-۶۰	۰/۰۶۳	۰/۴۲۹	۱۱/۵۴	۰/۰۰۳	-۰/۲۰	۱/۲۶
	۶۰-۹۰	۰/۰۶۲	۰/۴۲۵	۱۱/۰۹	۰/۰۰۲	-۰/۹۸	۱/۱۶
ذرت علوفه ای	۰-۳۰	۰/۰۶۰	۰/۲۹۰	۱۲/۴۰	۰/۰۰۵	۰/۵	۱/۶۰
فاروب رومان	۳۰-۶۰	۰/۰۵۵	۰/۳۳۰	۱۰/۹۰	۰/۰۱۲	۰/۵	۱/۲۵
	۶۰-۹۰	۰/۰۵۰	۰/۲۶۰	۳/۷۳	۰/۰۱۵	۰/۵	۱/۰۲



شکل ۲- واسنجی و صحت سنجی مدل با داده های رطوبت خاک در مزرعه فیض آباد



شکل ۳- نتایج صحت سنجی مدل SWAP با داده‌های رطوبت خاک در مزرعه فیض آباد

اجزاء بیلان آب محصولات در مزارع دشت

نیشابور

اجزای بیلان آب مدل برای ۶ محصول شبیه‌سازی گردیده در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار نفوذ عمقی از ۴۶٪ مربوط به گوجه‌فرنگی تا ۱۳٪ متعلق به ذرت علوفه‌ای متغیر است. مقادیر نفوذ عمقی بالا نشان از مدیریت ضعیف آبیاری در سطح این مزارع دارد.

نسبت تبخیر از سطح خاک به تبخیر و تعرق واقعی در مزارع از ۸ تا ۲۷ درصد متغیر بوده است. کمترین مقدار مربوط به مزرعه ذرت علوفه‌ای است که در آن طول دوره رشد کوتاه بوده و به دلیل سرعت رشد بوته‌ها سطح خاک در مدت کوتاهی با پوشش گیاهی سایه‌انداز می‌شود. تبخیر زیاد در مزرعه گوجه‌فرنگی به دلیل کشت روی پشته‌ها و جوی‌های عریض یک متری بوده است. در مزرعه پنبه، تراکم بوته‌ها در کرت کم بود به طوری که بخش زیادی از سطح خاک در معرض تابش مستقیم آفتاب قرار می‌گرفت و موجب افزایش نسبت تبخیر می‌شد. برای افزایش کارایی مصرف آب گیاهان، بایستی با انجام عملیات مناسب زراعی و آبیاری بتوان مقدار تبخیر را به حداقل رساند.

انواع بهره‌وری آب در مزارع دشت نیشابور

بهره‌وری آب به صورت "مقدار محصول تولید شده به ازای واحد آب مصرف شده" تعریف شده است (مولدن و همکاران، ۲۰۰۱) و با واحد کیلوگرم بر متر مکعب سنجیده می‌شود. از آنجا که مقدار آب مصرفی از جنبه‌های مختلفی قابل تعریف است، لذا بهره‌وری آب نیز به روش‌های متفاوتی قابل محاسبه می‌باشد. چنانچه تعرق واقعی - که نقش اصلی در تولید ماده خشک را دارد - به عنوان آب مصرفی در نظر گرفته شود، آن‌گاه بهره‌وری آب (WP_T) از تقسیم عملکرد محصول بر تعرق واقعی محاسبه می‌گردد.

چنانچه تبخیر و تعرق واقعی، آب آبیاری یا تبخیر و تعرق به اضافه نفوذ عمقی به عنوان آب مصرفی در محاسبه بهره‌وری آب در نظر گرفته شوند، به ترتیب مقادیر WP_{ET} ، WP_I و WP_{ETQ} بدست می‌آیند. در جدول ۴ انواع بهره‌وری آب حاصل از شبیه‌سازی مدل SWAP برای ۶ محصول زراعی دشت نیشابور نشان داده شده است.

بهره‌وری آب بر مبنای تعرق واقعی (WP_T) از ۱۳/۲۱ برای گوجه‌فرنگی تا ۰/۶۳ برای پنبه متغیر بود. تبخیر از سطح خاک به دلیل آبیاری غرقابی موجب کاهش بهره‌وری آب از WP_T به WP_{ET} می‌گردد.

جدول ۳- جزئیات بیلان آبی شبیه‌سازی شده در شرایط مدیریت آبیاری زراع

گوجه فرنگی	ذرت علوفه‌ای	چغندر قند	پنبه	جو	گندم	جزء بیلان آبی
۱۶	۱	۳۵	۴۶	۲۵۱	۲۵۲	بارندگی، P (mm)
۲۲۸۰	۹۶۰	۱۰۵۰	۹۵۰	۶۸۰	۹۲۰	آبیاری، I (mm)
۶۶۳	۶۵۳	۵۴۱	۴۷۸	۲۸۹	۴۰۲	تعرق واقعی، T_{act} (mm)
۱۲۳	۵۷	۱۴۴	۱۷۷	۱۰۳	۱۲۹	تبخیر واقعی، E_{act} (mm)
۸۷۵۰۰	۵۸۰۰۰	۱۵۰۰۰	۳۰۰۰	۲۸۵۰	۶۰۰۰	عملکرد محصول، Y_{act} (kg/ha)
۹۹۹	۱۲۰	۴۱۲	۳۲۱	۳۰۲	۳۲۵	نفوذ عمقی، Q_{bot} (mm)
۷۸۶	۷۱۰	۶۸۵	۶۵۵	۳۹۲	۵۳۱	تبخیر و تعرق واقعی، ET_{act} (mm)
+۸۲	-۶	-۱۲	+۱۹	-۹	-۱۵	ذخیره آب در خاک، ΔW (mm)
+۰/۰۵	+۲/۶	-۱۲	-۷/۲	-۲/۱	-۰/۰۷	ذخیره نمک در خاک، ΔS (ton/ha)
۷۲۹	۸۷۸	۶۱۲	۵۵۶	۳۵۰	۵۵۶	تعرق پتانسیل، T_{pot} (mm)
۲۸۲	۲۶۷	۳۶۸	۶۱۷	۱۸۶	۲۲۹	تبخیر پتانسیل، E_{pot} (mm)
۱۴	۹	۱۱	۹	۴	۸	تعداد دفعات آبیاری

جدول ۴- انواع بهره‌وری آب حاصل از شبیه‌سازی مدل در شرایط مدیریت آبیاری زارع

نوع بهره‌وری آب (kg/m^3)	گندم	جو	پنبه	چغندر قند	ذرت علوفه‌ای	گوجه‌فرنگی
$RT = T_{act} / T_{pot}$	۰/۷۲	۰/۸۳	۰/۸۶	۰/۸۸	۰/۷۴	۰/۹۱
$WP_T = Y_{act} / T_{act}$	۱/۴۹	۰/۹۹	۰/۶۳	۲/۷۷	۸/۸۸	۱۳/۲۱
$WP_{ET} = Y_{act} / ET_{act}$	۱/۱۳	۰/۷۳	۰/۴۶	۲/۱۹	۸/۱۷	۱۱/۱۳
$WP_I = Y_{act} / Irrig.$	۰/۶۵	۰/۴۲	۰/۳۲	۱/۴۳	۶/۰۴	۳/۸۴
$WP_{ETQ} = Y_{act} / (ET_{act} + Q_{bot})$	۰/۵۷	۰/۴۱	۰/۳۱	۱/۳۷	۶/۹۹	۴/۹۰

برداشت آب از چاهها را حداقل ۲۰٪ کاهش داد. از طرفی مصرف‌کننده اصلی منابع آب زیرزمینی (حدود ۹۶٪) بخش کشاورزی است. لذا بایستی با روش‌های مختلف و به طور عمده با افزایش راندمان کاربرد آب در اراضی زراعی و باغ‌های دشت، سالانه حدود ۲۰۰ میلیون متر مکعب حجم آب مصرفی در این بخش را کاهش داد. برای دست‌یابی به مدیریت پایدار بهره‌برداری از آبهای زیرزمینی دشت نیشابور، سناریوهای مختلفی قابل طرح و اعمال با استفاده از مدل شبیه‌سازی SWAP می‌باشند.

سناریوی آبیاری برنامه‌ریزی شده

آبیاری برنامه‌ریزی شده به این مفهوم است که کشاورز در زمان مناسب و به مقدار لازم آبیاری نماید. از آنجا که زارعین ابزار لازم برای به کار بردن عمق‌های آبیاری متفاوت، به ویژه در روش‌های آبیاری سطحی را ندارند، لذا در برنامه‌ریزی آبیاری برای ۶ مزرعه منتخب در دشت نیشابور، عمق آبیاری ثابت در نظر گرفته شد. در تمام مزارع بسته به ارتفاع آب آبیاری مورد استفاده توسط کشاورز، عمق ثابت آبیاری به اندازه ۷۰ تا ۹۰ میلیمتر به کار رفت. زارعین عمق آبیاری نوبت اول (خاکاب) را برای اطمینان از سبز شدن مناسب بذرها بیشتر از معمول در نظر می‌گیرند. در برنامه‌ریزی آبیاری معرفی شده به مدل SWAP نیز عمق آبیاری خاکاب حدود ۱/۵ برابر عمق معمول بین ۱۰۰ تا ۱۴۰ میلیمتر اعمال گردید. برای فراهم شدن شرایط رطوبتی مشابه شرایط زارعین، نسبت تعرق واقعی به پتانسیل (T_{act} / T_{pot}) به میزان ۰/۷۵ تا ۰/۹ همانند شرایط هر مزرعه به مدل معرفی شد.

کاهش بهره‌وری آب به دلیل تبخیر برای مزارع گندم، جو، چغندر قند، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی به ترتیب به اندازه ۲۴، ۲۶، ۲۷، ۲۱، ۸ و ۱۶ درصد بود. این میزان کاهش در بهره‌وری آب به خاطر تبخیر از سطح خاک، نشان‌دهنده ضرورت استفاده از شیوه‌های کاهش تبخیر برای ارتقای بهره‌وری آب در مقیاس مزرعه می‌باشد. بهره‌وری آب بر مبنای آب آبیاری (WP_I) از ۶/۰۴ کیلوگرم بر متر مکعب برای ذرت علوفه‌ای تا ۰/۳۲ برای پنبه متغیر بود. ملاحظه می‌شود که به دلیل مصرف زیاد آب آبیاری در مزرعه گوجه‌فرنگی، مقدار WP_I در این مزرعه نسبت به مزرعه ذرت علوفه‌ای کاهش یافته است.

تأثیر نفوذ عمقی آب آبیاری (Q_{bot}) در کاهش بهره‌وری آب، از کاهش WP_{ETQ} در مقایسه با WP_{ET} مشخص می‌شود. مقدار WP_{ETQ} به اندازه ۴۴، ۳۳، ۳۷، ۱۴ و ۵۶ درصد به ترتیب برای مزارع گندم، جو، چغندر قند، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی در مقایسه با WP_{ET} کاهش نشان داده است. این مطلب اثر معنی‌دار مقدار نفوذ عمقی بر بهره‌وری آب را نشان می‌دهد.

مدیریت پایدار آب زیرزمینی

مقدار کسری آبخوان دشت نیشابور در حال حاضر حدود ۲۰۰ میلیون متر مکعب در سال تخمین زده شده است (زراعتی نیشابوری، ۱۳۸۵). میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی توسط چاهها حدود یک میلیارد متر مکعب است. با عنایت به اینکه بیلان منفی دشت به طور عمده به دلیل اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی توسط چاهها می‌باشد، لذا برای رسیدن به پایداری در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی دشت نیشابور بایستی بتوان حجم

در جدول ۶ تأثیر اعمال آبیاری برنامه‌ریزی شده بر کاهش برداشت آب توسط چاهها نشان داده شده است. در این جدول حجم آب مصرفی در شرایط موجود برابر با متوسط حجم آب برآورد شده فوق‌الذکر برای محصولات در نقاط مختلف دشت در نظر گرفته شده است. نتایج جدول نشان می‌دهد که انجام آبیاری برنامه‌ریزی شده برای ۶ محصول عمده در دشت نیشابور می‌تواند موجب ۲۶ درصد کاهش در برداشت از سفره آب زیرزمینی بدون کاسته شدن از عملکرد محصولات گردد. این مقدار برداشت کمتر در مقیاس حوضه مطالعاتی نیشابور معادل ۱۶۵ میلیون متر مکعب (MCM) تخلیه کمتر مخزن آب زیرزمینی دشت است. محصولات گندم، جو، پنبه، چغندر قند، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی حدود ۷۰٪ سطح زیر کشت شهرستان نیشابور را به خود اختصاص می‌دهند. بدیهی است در صورت اعمال آبیاری برنامه‌ریزی شده برای سایر گیاهان الگوی کشت دشت نیشابور، می‌توان انتظار داشت که تمامی کسری مخزن ۲۰۰ میلیون متر مکعبی دشت تنها با انجام همین سناریو قابل جبران باشد.

نتایج جزئیات بیلان آبی و بهره‌وری آب در حالت برنامه‌ریزی آبیاری حاصل از شبیه‌سازی مدل برای محصولات مختلف دشت در جدول ۵ نشان داده شده است. تغییر شرایط از آبیاری رایج به آبیاری برنامه‌ریزی شده موجب کاهش مقدار آب آبیاری (۲ تا ۵۴ درصد)، کاهش نفوذ عمقی (۱۵ تا ۸۹ درصد) و افزایش بهره‌وری آب بر مبنای آبیاری، WP_1 (صفر تا ۵۴ درصد) گردید. عملکرد محصولات تفاوت معنی‌داری نداشته و در اغلب موارد اندکی افزایش نیز نشان داده است. از طرفی، به علت کاهش نفوذ عمقی، آبیاری برنامه‌ریزی شده باعث افزایش تجمع نمک در عمق توسعه ریشه (۰/۵ تا ۹ برابر) شد که برای حفظ پایداری در تولید، انجام عملیات آبخویی در خارج از فصل زراعی ضروری می‌باشد. بررسی حجم آب آبیاری مصرف شده در نقاط مختلف دشت نیشابور نشان می‌دهد که حجم آب مصرفی برای گندم و جو ۳۰۰۰-۱۲۰۰۰، پنبه ۷۰۰۰-۱۴۰۰۰، چغندر قند ۷۰۰۰-۱۶۰۰۰، ذرت علوفه‌ای ۶۰۰۰-۱۳۰۰۰ و گوجه فرنگی ۶۰۰۰-۲۴۰۰۰ متر مکعب در هکتار تغییر می‌نماید (حقایقی، ۱۳۸۹).

جدول ۵- جزئیات بیلان آبی و بهره‌وری آب در شرایط آبیاری برنامه‌ریزی شده

جزء بیلان آبی / بهره‌وری آب	گندم	جو	پنبه	چغندر قند	ذرت علوفه‌ای	گوجه فرنگی
بارندگی، P (mm)	۲۵۱	۲۶۵	۴۶	۳۵	۱	۱۶
آبیاری، I (mm)	۵۲۰	۴۴۰	۹۳۰	۱۰۱۰	۸۷۰	۱۰۵۰
تعرق واقعی، T_{act} (mm)	۴۲۷	۳۰۹	۴۶۵	۵۵۹	۷۱۴	۶۶۰
تبخیر واقعی، E_{act} (mm)	۱۳۵	۱۱۲	۱۹۳	۱۴۷	۵۱	۱۱۵
عملکرد شبیه‌سازی، Y_{sim} (kg/ha)	۶۱۵۰	۳۰۴۰	۲۹۰۰	۱۶۴۰۰	۵۸۵۰۰	۸۷۰۰۰
نفوذ عمقی، Q_{bot} (mm)	۳۷	۲۲۴	۲۷۳	۳۳۷	۲۲	۲۲۷
تبخیر و تعرق واقعی، ET_{act} (mm)	۵۶۲	۴۳۱	۶۵۸	۷۰۶	۷۶۶	۷۷۵
ذخیره آب در خاک، ΔW (mm)	۱۷۰	۵۴	۴۵	۲	۸۳	۴۸
ذخیره نمک در خاک، ΔS (ton/ha)	+۰/۸۰	-۳/۶	-۱۳/۵	-۱۲/۸	+۲/۹	+۱/۶
تعرق پتانسیل، T_{pot} (mm)	۵۵۶	۳۶۰	۵۶۷	۶۳۲	۹۱۰	۷۳۳
تبخیر پتانسیل، E_{pot} (mm)	۲۳۱	۱۸۸	۶۰۸	۳۴۸	۲۵۵	۲۷۸
تعداد دفعات آبیاری	۶	۵	۱۵	۱۵	۱۱	۱۱
$WP_T = Y_{sim} / T_{act}$	۱/۴۴	۰/۹۸	۰/۶۲	۲/۹۳	۸/۱۹	۱۳/۱۸
$WP_{ET} = Y_{sim} / ET_{act}$	۱/۱۰	۰/۷۲	۰/۴۴	۲/۳۲	۷/۶۴	۱۱/۲۲
$WP_1 = Y_{sim} / Irrig.$	۱/۱۸	۰/۶۹	۰/۳۱	۱/۶۲	۶/۷۲	۸/۲۹
$WP_{ETQ} = Y_{sim} / (ET_{act} + Q_{bot})$	۱/۰۳	۰/۴۶	۰/۳۰	۱/۵۷	۷/۴۲	۸/۶۸

جدول ۶- مقایسه حجم آب مصرف شده در شرایط موجود و آبیاری برنامه‌ریزی شده

گیاه	مساحت (ha)	آب آبیاری مصرفی (m ³ /ha)		آب زیرزمینی برداشت شده (MCM)	
		موجود	سناریوی یک	موجود	سناریوی یک
گندم	۳۶۰۰۰	۶۹۹۰	۵۲۰۰	۲۵۱/۶	۱۸۷/۲
جو	۲۲۰۰۰	۵۸۸۰	۴۴۰۰	۱۲۹/۴	۹۶/۸
پنبه	۷۴۰۰	۱۲۲۶۰	۹۳۰۰	۹۰/۷	۶۸/۸
چغندرقد	۷۸۰۰	۱۳۲۵۰	۱۰۱۰۰	۱۰۳/۴	۷۸/۸
ذرت علوفه ای	۳۶۰۰	۱۰۶۰۰	۸۷۰۰	۳۸/۲	۳۱/۳
گوجه فرنگی	۱۷۵۰	۱۹۱۲۰	۱۰۵۰۰	۳۳/۵	۱۸/۴
جمع	۷۸۵۵۰	۶۸۱۰۰	۴۸۲۰۰	۶۴۶/۸	۴۸۱/۳

جمع‌بندی

مقادیر نفوذ عمقی ۳۴، ۳۵، ۳۹، ۴۶ و ۳۴ درصد به ترتیب مربوط به گوجه‌فرنگی، چغندرقد، گندم، پنبه و جو نشان از مدیریت ضعیف آبیاری و تلفات زیاد آب در سطح این مزارع دارد. نسبت تبخیر از سطح خاک به تبخیر و تعرق واقعی در مزارع از ۸ تا ۲۷ درصد متغیر بوده است. در دشت نیشابور که متوسط سطح آب زیرزمینی در عمق بیش از ۶۵ متری از سطح خاک است، نفوذ عمقی آب آبیاری نمی‌تواند در دوره زمانی کوتاه به آب زیرزمینی بیبوند و موجب تغذیه آن شود. لذا نفوذ عمقی به عنوان تلفات آب به حساب می‌آید و به هر مقدار و هر روشی که کاهش یابد، بر مقدار بهره‌وری آب در مزرعه افزوده می‌گردد.

نسبت تعرق واقعی به تعرق پتانسیل (T_{act} / T_{pot}) نشان دهنده میزان تنش وارده به گیاه در طول مراحل رشد می‌باشد. این نسبت در شش مزرعه مورد بررسی بین ۰/۷۲ تا ۰/۹۱ تغییر داشت. یعنی در حال حاضر کشاورزان در دشت نیشابور بین ۱۰ تا ۳۰ درصد به صورت ناخواسته و برنامه‌ریزی نشده کم‌آبیاری انجام می‌دهند. لیکن چنانچه کم‌آبیاری به شکل برنامه‌ریزی شده و متناسب برای هر گیاه از ابتدا تا انتهای دوره رشد اعمال گردد، تحقیقات انجام شده در کشور حاکی از کارآمد بودن آن به منظور استفاده صحیح‌تر از آب و کسب سود

بیشتر است. براساس جامعه آماری مستندات تحقیقاتی کشور، به استثنای برخی از محصولات حساس به کمبود آب، کاهش ۲۰-۳۰ درصد آب مصرفی اکثر محصولات کشاورزی، بدون بروز هیچ گونه مشکلی قابل توصیه و کاربرد است (سپاسخواه و همکاران، ۱۳۸۵).

تبخیر از سطح خاک به دلیل آبیاری سطحی و سنتی غالب در منطقه موجب کاهش بهره‌وری آب می‌گردد. مقدار کاهش از WP_T به WP_{ET} به دلیل اثر تبخیر برای مزارع گندم، جو، چغندرقد، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی به ترتیب به اندازه ۲۴، ۲۶، ۲۷، ۲۱، ۸ و ۱۶ درصد برآورد گردیده است. این میزان کاهش در بهره‌وری آب به خاطر تبخیر از سطح خاک، ضرورت استفاده از شیوه‌های کاهش تبخیر همچون کاربرد انواع مالچ در سطح خاک و آبیاری با انواع روش‌های زیرسطحی را نمایان‌تر می‌کند.

اعمال سناریوی آبیاری برنامه‌ریزی شده در دشت نیشابور با استفاده از مدل SWAP نشان داد که قابلیت جبران تمامی کسری مخزن آب زیرزمینی را هم دارد. آبیاری برنامه‌ریزی شده در صورت تأسیس بازارهای محلی و منطقه‌ای عرضه و تقاضای آب قابلیت اجرا خواهد یافت. در این صورت بهره‌برداران قادر خواهند بود مزارع خود را در زمان مناسب و به اندازه موردنیاز آبیاری نمایند. بنگاه‌های خرید و فروش آب می‌تواند به صورت خصوصی مجوز تأسیس بگیرند و از طریق یک اتحادیه

زیر نظر مجامع امور صنفی بر عملکرد آنها نظارت لازم به عمل آید. همچنین اجرایی شدن این سناریو نیاز به برگزاری آموزش‌های کوتاه و میان‌مدت برای بهره‌برداران، انجام تحقیقات کاربردی و ترویج یافته‌های تحقیقاتی در یک بازه زمانی ۱۰ تا ۱۵ سال دارد.

منابع مورد استفاده

۱. اکبری، م.، ۱۳۸۳. بهبود مدیریت آبیاری مزارع با استفاده از تلفیق اطلاعات ماهواره‌ای، مزرعه‌ای و مدل شبیه‌سازی SWAP. رساله دکتری در رشته آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس.
۲. اکبری، م.، دهقانی‌سانبج، ح. و میرلطیفی، س. م. ۱۳۸۸. تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری بر بهره‌وری آب در کشاورزی (مطالعه موردی در شبکه آبشار اصفهان). مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱ (۳): ۶۹-۷۹.
۳. حسینی، س. م. ۱۳۸۳. سیمای منابع آب استان و چشم‌انداز آن. گزارش فنی شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی.
۴. حقایقی مقدم، س. ا. و ر. بهراملو. ۱۳۸۹. مدیریت پایدار آب زیرزمینی با نگرش مصرف بهینه آب کشاورزی در استان‌های خراسان رضوی و همدان- مطالعه موردی حوضه‌های آبریز نیشابور و اسدآباد. شماره ثبت ۸۹/۹۹۵. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج.
۵. حیدری، ن. ۱۳۸۸. مسائل، چالش‌ها و راهبردهای ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی در ایران. مجموعه مقالات دوازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۵ و ۶ اسفند ۱۳۸۸، تهران.
۶. دهقان، ه.، حقایقی، ا.، علیزاده، ا. و انصاری، ح. ۱۳۸۹. پیش‌بینی رطوبت نیم‌رخ خاک در سه مزرعه گندم با استفاده از مدل SWAP. مجله آب و خاک، ۲۴ (۵)، ص. ۱۰۱۸-۱۰۰۸.
۷. زراعتی نیشابوری، ح. ۱۳۸۵. تلفیق آب‌های سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز نیشابور. پایان‌نامه دوره کارشناسی آب‌های زیرزمینی، مؤسسه آموزشی علمی- کاربردی صنعت آب و برق مشهد.
۸. سپاسخواه، ع.، توکلی، ع. و موسوی، س. ف. ۱۳۸۵. اصول و کاربرد کم آبیاری. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران.
۹. فرج‌زاده، م.، ولایتی، س. و حسینی، آ. ۱۳۸۴. تحلیل بحران آب در نیشابور با رویکرد برنامه‌ریزی محیطی. کمیته تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان، ۱۴۳ صفحه.
۱۰. کاوه، ف. و حسینی ابری، س. ع. ۱۳۸۸. افزایش بهره‌وری آب در کشاورزی آبی. مجموعه مقالات دوازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۵ و ۶ اسفند، تهران.
۱۱. کشاورز، ع. و دهقانی‌سانبج، ح. ۱۳۸۸. اصلاح سیاست و ساختار آب و خاک هنری امکان‌پذیر. دوازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۵ و ۶ اسفند، تهران.
12. Allen, R. G., M. Smith, A. Perier and L. S. Pereira. 1994. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin, 43(2): 1-34.
13. Ashrafi, Sh., Qureshi, A. S. and F. Gichuki. 2004. Karkheh basin profile: strategic research for enhancing agricultural water productivity. Challenge Program on Water and Food, Colombo, Sri Lanka. 48 pp.
14. Droogers, P., Akbari, M., Torabi, M., and Pazira, E. 2000. Exploring field scale salinity using simulation modeling, example for Rudasht area, Esfahan province, Iran. IAERI-IWMI Research Report 2.

15. Droogers, P., Kite, G., and Murray-Rust, H. 2000. Use of simulation to evaluate irrigation performance including water productivity, risk and system analyses. *Irrigation Science*, 19:139-145.
16. Droogers, P., and Torabi, M. 2002. Field scale scenarios for water and salinity management by simulation modeling. IAERI-IWMI Research Report 12.
17. Huygen, J., VanDam, J. C., and Kroen, J. G. 2000. SWAP, graphical user interface. Wageningen University, Department of Environmental Sciences.
18. Ma, Y., Feng, S., Huo, Z. and Song, X. 2011. Application of the SWAP model to simulate the field water cycle under deficit irrigation in Beijing, China. *Mathematical and Computer Modelling*, 54: 1044-1052.
19. Molden, D. J., Satkhtivadival, R. and Habib, Z. 2001. Basin level water use and productivity of water. Report 49. International Water Management Institute, Sri Lanka.
20. Murray-Rust, H., Droogers, P., and Heydari, N. (Eds). 2004. *Water for future: Linking irrigation and water allocation in the Zayandeh Rud Basin, Iran*. IWMI, Sri Lanka.
21. Singh, R., Van Dam, J. C., and Feddes, R. A. 2006. Water productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. *Agricultural Water Management*, 82: 253-278.

Archive of SID