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

سید ابوالقاسم حقایقی مقدم[1]* 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 بهره وری آب در مزارع گندم، جو، چغندرقند، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه فرنگی 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، چغندرقند، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه فرنگی به ترتیب به اندازه 24، 26، 27، 21، 8 و 16 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 50، 44، 33، 37، 14 و 56 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، چغندرقند، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه فرنگی به ترتیب معادل 520، 440، 1010، 930، 870 و 1050 میلیمتر است. انجام آبیاری برنامه‌ریزی شده می‌تواند موجب 26% کاهش در مقدار آبیاری در مقایسه با شرایط رایج زارعین گردیده و مقدار بهره‌وری آب (WP_I) را به میزان 1/2 کیلوگرم بر متر مکعب برای گندم، 0/7 برای جو، 1/6 برای چغندرقند، 6/7 برای ذرت علوفه‌ای و 8/3 برای گوجه فرنگی 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 165 میلیون متر مکعب تخمین زده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر از سطح خاک، نفوذ عمقی، مصرف بهینه آب، شبیه سازی با مدلSWAP

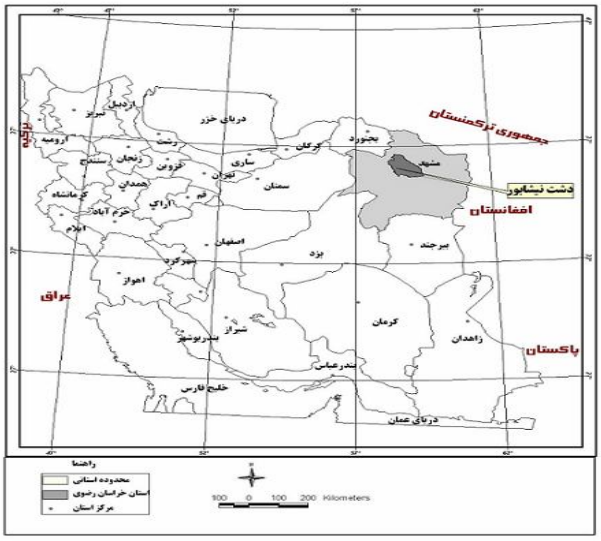
مقدمه

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

1. آدرس نویسنده مسؤول: مشهد، مقابل پلیس راه طرق، صندوق پستی 488
* دریافت: مرداد، 1390 و پذیرش: شهریور، 1391

ایـن اسـتان بـرای انجـام ایـن تحقیـق انتخـاب گردیـد (شکل 1). دشت نیشابور از جمله دشت‌های وسیع حوضه آبریز کالشور می‌باشد که بیشترین زمـین‌هـای آبـی را در خود جای داده است. کل مـساحت واحـد هیـدرولوژیک نیشابور 6962 کیلومتر مربع است که از این مقـدار 4420 کیلومتر مربع دشت و مابقی ارتفاعات مـی‌باشـد. کـسری مخزن و افت سطح آب زیرزمینـی (سـالانه بـیش از 200 میلیون متر مکعب معادل حـدود 82 سـانتیمتر متوسط افـت سـطح آب زیرزمینـی) از چـالش‌هـای اساسی این دشت است.

امـروزه مـدل‌هـای شـبیه‌سـازی زیـادی بـرای پاسخگویی به مسائل مربوط بـه حرکـت آب و امـلاح در خاک توسعه یافته‌اند. یکی از این مـدل‌هـا، مـدل SWAP (خاک، آب، اتمسفر و گیاه) می‌باشد که برای شبیه‌سـازی توازن آب و مواد محلول در یک خاک کشت شده با انواع مختلـف شـرایط مـرزی شـامل امکـان زهکـشی و مدیریت‌های مختلف آبیاری به کار بـرده مـی‌شـود. دلیـل استفاده از مدل SWAP در این تحقیـق، قابلیـت مناسـب مدل در شبیه‌سازی عملکرد محصول و نحوه حرکـت آب و املاح در پروفیل خاک، تحت شرایط مختلف اقلیمـی و مدیریت‌های متفاوت آبیاری است که در بسیاری از مناطق دنیا مورد استفاده قـرار گرفتـه و عملکـرد مناسـب آن بـه اثبات رسیده است.



شکل1- موقعیت دشت نیشابور در کشور و استان خراسان رضوی

اکبری و همکـاران (1388) بـا اسـتفاده از مـدل SWAP تأثیر برنامه‌ریزی آبیـاری بـر بهـره‌وری آب را در شبکه آبشار اصفهان بررسی نمودند. نتایج نشان داد که بـا اصلاح برنامه آبیاری، عملکرد محـصول جـو و گنـدم بـه مقدار 15% افزایش می‌یابد. بـا بهبـود مـدیریت زراعـی و کاهش 20 درصدی عمق آب آبیـاری، عملکـرد محـصول تغییر معنی‌داری نشان نداد.

مـا و همکـاران (2011) از مـدل SWAP بـرای ارزیـابی برنامه بهینه آبیاری در الگوی کشت گندم زمـستانه- ذرت تابستانه در منطقه پکن در کشور چین اسـتفاده کردنـد. از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده برای برنامه‌ریزی بهینه آبیاری در سه سال معرف منطقه با شـرایط هیـدرولوژیک 75، 50 و 25 درصد کمبود بـارش نـسبت بـه طـول دوره آماری بلندمدت استفاده گردید. نتایج نشان داد که برنامـه بهینه آبیاری با بیـشترین کـارایی مـصرف آب در شـرایط

کمبود بارش 75% عبارت از 3 نوبت آبیاری گندم و 2 نوبت آبیاری ذرت و هر نوبت آبیاری به میزان 75 میلیمتر می‌باشد. در سال با شرایط رطوبتی 50% ، برنامه بهینه آبیاری همانند سال 75% است، با این تفاوت که یک نوبت آبیاری ذرت در زمان قبل از کاشت کفایت می‌کند. در سال با کمبود بارش 25% 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 75، 50 و 25 درصد به ترتیب 5/1، 19/8 و 23/4 میلیمتر تغذیه سفره آب زیرزمینی را در پی خواهد داشت.

سینگ و همکاران (2006) در منطقه سیرسا در هند مدلSWAP را در تجزیه وتحلیل 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 (1384) در پژوهشی به تحلیل بحران آب در دشت نیشابور پرداختند. در این پژوهش چهار فرضیه برای ایجاد بحران در این دشت عنوان گردیده است: 1- وقوع خشکسالی: در بررسی این فرضیه تأثیر بارزی از خشکسالی بر منابع آب مشاهده نگردید، 2- کشت گیاهان با نیاز آبی زیاد: تأثیر مسلم نوع کشت بر منابع آب دشت معلوم گردید، 3- اضافه برداشت: مهمترین عامل در شکل گرفتن و تشدید بحران آب در دشت نیشابور می‌باشد به طوری که از سال 1347 به بعد میزان بهره‌برداری سه برابر افزایش یافته است و 4- 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 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 (2000) و موری‌راست و همکاران (2004) شبیه‌سازی گردید. نتایج نشان داد که عملیات رایج آبیاری برای گیاه پنبه در منطقه یعنی آبیاری به اندازه 900 میلیمتر در طول فصل رشد با شوری آب 4 دسی‌زیمنس‌برمتر می‌تواند عملکردی به‌میزان 66% 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 اندازه1-2 دسی‌زیمنس‌برمتر برسد، می‌توان انتظار داشت که عملکرد برابر با 73-77 درصد پتانسیل تولید گردد.

دروگرز و ترابی (2002) 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 چغندرقند بررسی گردید. نتایج نشان داد کشت برنج بیشترین درآمد در واحد سطح را برای کشاورزان منطقه دربر دارد. بهره‌وری آب برنج برابر 0/35 دلار بر متر مکعب است و حال آنکه برای چغندرقند، گندم و یونجه بترتیب 0/06، 0/02 و 0/02 دلار بر متر مکعب برآورد گردید.

دروگرز و همکاران (2000)، 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 1000 میلیمتر و انگور به اندازه 800 میلیمتر آبیاری شود. اما از دیدگاه

بهره‌وری آب، کارایی مصرف آب انگور در حالت بدون آبیاری حداکثر است و برای پنبه در میزان آبیاری 600 میلیمتر حداکثر می‌باشد.

سوابق تحقیق نشان می دهد که مدل SWAP قابلیت مناسبی در ارزیابی و شبیه‌سازی مواردی مانند اجزای بیلان آب، رطوبت خاک، برنامه‌ریزی آبیاری، انتقال املاح، رشد محصول و بهره وری 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 داده های 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 1103/6 میلیون متر مکعب است. از این مقدار، 952/3 میلیون متر مکعب (86%) توسط چاهها، 116/7 میلیون متر مکعب (10/6%) توسط قنوات و 34/62 میلیون متر مکعب (3/4%) توسط چشمه‌ها برداشت می‌گردد. سهم بخش شرب و صنعت از آب زیرزمینی در این دشت به ترتیب 33 و 2/4 میلیون متر مکعب می‌باشد (حسینی، 1383). در این زیرحوضه، سالانه بیش از 110 هزار هکتار (آمار سال زراعی 86-1385 برابر با 111500 هکتار) زیرکشت محصولات مختلف زراعی و باغی آبی قرار می‌گیرد و حجم زیادی از منابع آب زیرزمینی (بیش از 96%) 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)، داده های 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 88-1387 تعداد 6 مزرعه در نقاط مختلف دشت به منظور جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز برای واسنجی مدل SWAP با مشورت کارشناسان خبره محلی انتخاب گردید. در جدول 1 نوع کشت، مساحت مزرعه و روش آبیاری در مزارع ذکر شده‌اند. شش محصول گندم، جو، چغندرقند، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی به ترتیب 38 ، 23/3 ، 8/2 ، 7/7، 3/8 و 1/8 درصد سطح زیر کشت شهرستان نیشابور در سال زراعی 85-86 را شامل گردیده و در مجموع با 79200 هکتار 71% سطح زیر کشت در سال مذکور را به خود اختصاص دادند.

جدول1- نوع کشت، روش آبیاری و مساحت مزارع منتخب در سطح دشت نیشابور

نام مزرعه	کشت بهاره	کشت پاییزه	سطح زیرکشت (هکتار)	روش آبیاری	شوری آب (dS/m)
گلستان	ذرت علوفه‌ای	جو	35	سنترپیوت	0/66
فاروب رومان	ذرت علوفه‌ای	گندم	10	جویچه‌ای	0/60
فیض آباد	ذرت علوفه‌ای	جو	22	جویچه‌ای	5/13
معتمدیه	چغندرقند	جو	3/5	جویچه‌ای	2/15
سلیمانی	پنبه	گندم	1	کرتی	3/89
حاجی آباد	گوجه فرنگی	گندم	0/4	جوی و پشته	0/90

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 87 و 88 ایستگاه هواشناسی نیشابور (طول جغرافیایی °58 و '48 و 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، 1994). 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، 2000). برای تخمین پارامترهای معادله معلم- ونگنوختن از نسخه 6 مدل نرم‌افزاری RETC تهیه شده در آزمایشگاه شوری آمریکا استفاده گردید.

برای واسنجی مدل SWAP از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت در لایه‌های 10 سانتیمتری خاک تا عمق 80 سانتیمتر استفاده شد. آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای هیدرولیکی خاک نشان داد مدل نسبت به پارامترهای شکل (α ، n) و رطوبت اشباع (θ_{sat}) از حساسیت با درجه متوسط و نسبت به سایر پارامترهای ورودی از حساسیت کم برخوردار است (اکبری، 1383 و دهقان، 1389). 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 50 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، 1383):

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

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.

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

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

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

برای نگهداری سطح آب زیرزمینی در عمق قابل‌قبول 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 صحت سنجی مدل

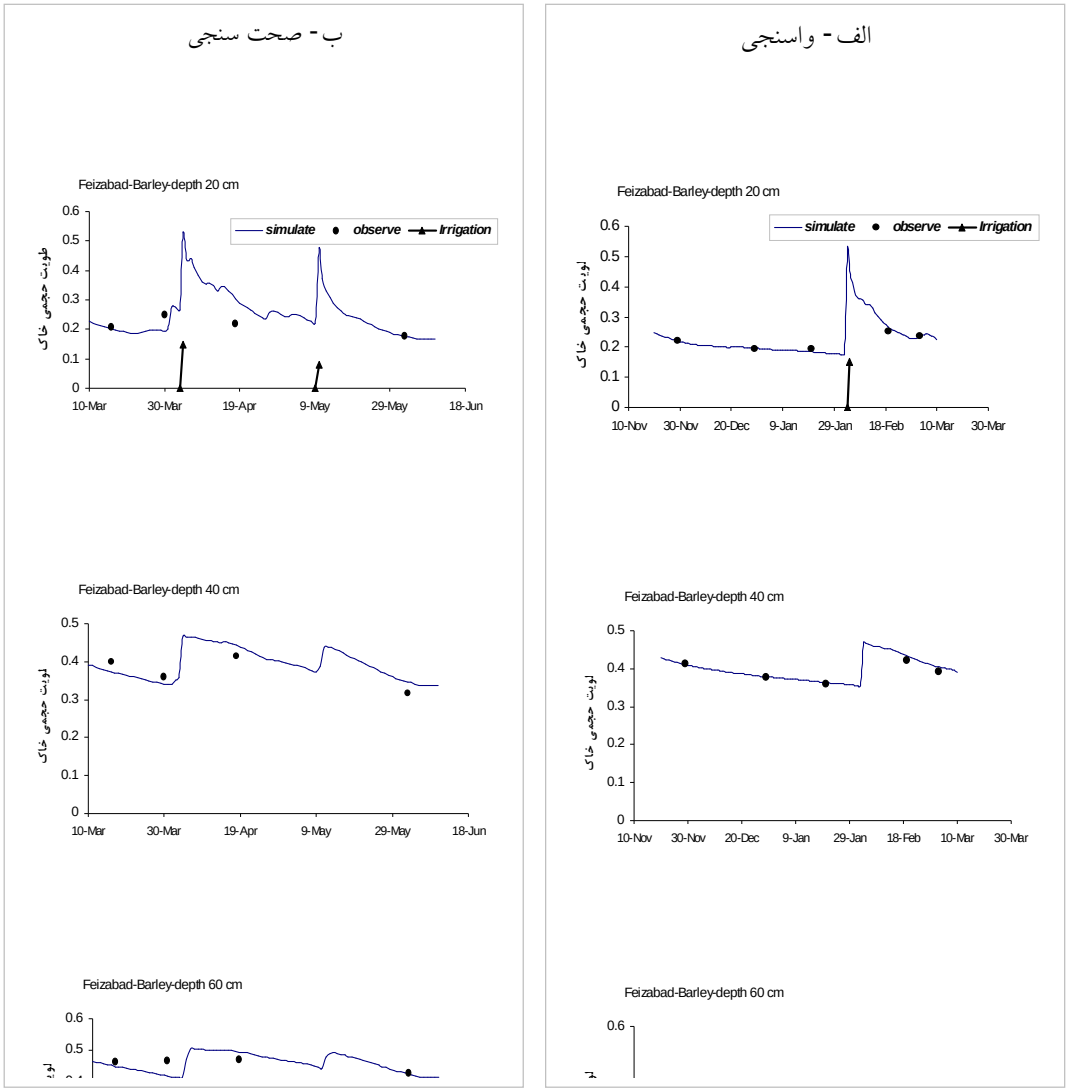
مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک مزارع منتخب - با بافت سیلت‌لوم، لوم و لوم‌شنی در لایه‌های مختلف- پس از واسنجی در جدول 2 نشان داده شده است. برای واسنجی مدل در مزرعه فیض‌آباد، داده‌های رطوبت خاک طی دوره رشد گیاه جو به دو بخش تقسیم شد. بخش اول داده‌ها (آذر تا اسفند 1387در مجموع 15 داده) برای واسنجی مدل و بخش دوم (فروردین تا خرداد 1388 در مجموع 12 داده) برای صحت‌سنجی مورد استفاده قرار گرفتند. شکل 3 مقایسه بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری شده و رطوبت شبیه‌سازی شده توسط مدل در لایه های 20، 40 و 60 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.

شاخص های ارزیابی مدل

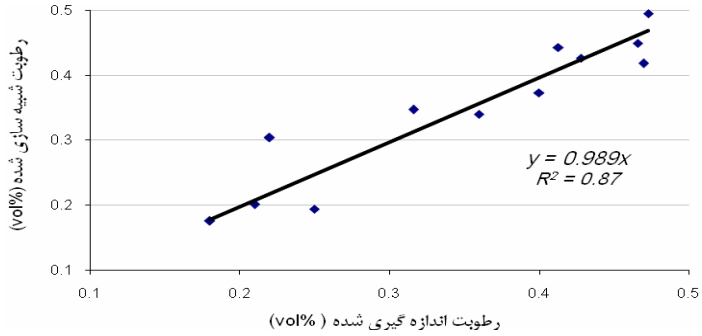
نتایج ارزیابی رطوبت‌های خاک برآورد شده توسط مدل در مزرعه فیض‌آباد، ضریب تعیین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را 0/87 و ریشه میانگین مربعات خطاها را 0/037 نشان می‌دهد (شکل 3). مقدار نزدیک به یک R^2 و مقدار کم RMSE نشان می‌دهد که مدل با دقت مناسبی قادر به شبیه‌سازی رطوبت خاک می‌باشد. همچنین شاخص میانگین خطای مطلق و میانگین انحراف مبین آن است که مدل با خطای 3 و انحراف 0/2 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.

جدول2- خصوصیات هیدرولیکی لایه های مختلف خاک مزارع آزمایشی

مزارع	عمق خاک (سانتیمتر)	θ_{res} (cm^3cm^{-3})	θ_{sat} (cm^3cm^{-3})	K_{sat} (cmd^{-1})	α (cm^{-1})	λ (–)	n (–)
جو	0-30	0/150	0/532	7/04	0/017	-0/38	1/70
فیض‌آباد	30-60	0/116	0/472	5/92	0/002	-0/45	1/20
	60-90	0/171	0/507	3/50	0/001	-0/18	1/22
گندم	0-30	0/057	0/384	11/31	0/005	-1/58	1/26
فاروب‌رومان	30-60	0/075	0/368	8/60	0/012	-0/77	1/38
	60-90	0/078	0/355	2/94	0/015	-1/62	1/22
گوجه‌فرنگی	0-30	0/038	0/218	11/73	0/013	-0/41	1/46
حاجی‌آباد	30-60	0/036	0/217	14/35	0/026	-0/17	1/22
	60-90	0/035	0/214	12/84	0/011	-0/79	1/78
چغندرقند	0-30	0/033	0/423	15/79	0/005	0/5	1/49
معتمدیه	30-60	0/034	0/429	16/14	0/005	0/5	1/25
	60-90	0/034	0/436	16/73	0/005	0/5	1/33
پنبه	0-30	0/061	0/418	14/60	0/005	-0/39	1/73
سلیمانی	30-60	0/063	0/429	11/54	0/003	-0/20	1/26
	60-90	0/062	0/425	11/09	0/002	-0/98	1/16
ذرت علوفه‌ای	0-30	0/060	0/290	12/40	0/005	0/5	1/60
فاروب‌رومان	30-60	0/055	0/330	10/90	0/012	0/5	1/25
	60-90	0/050	0/260	3/73	0/015	0/5	1/02



شکل 2- واسنجی و صحت سنجی مدل با داده های رطوبت خاک در مزرعه فیض‌آباد



شکل 3- نتایج صحت‌سنجی مدل SWAP با داده‌های رطوبت خاک در مزرعه فیض‌آباد

اجزاء بیلان آب محصولات در مزارع دشت نیشابور

اجزای بیلان آب مدل برای 6 محصول شبیه‌سازی گردیده در جدول 3 نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقدار نفوذ عمقی از 46% مربوط به گوجه‌فرنگی تا 13% 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 8 تا 27 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 می شود.

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 ، 2001) 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 4 انواع بهره‌وری آب حاصل از شبیه‌سازی مدل SWAP برای 6 محصول زراعی دشت نیشابور نشان داده شده است.

بهره‌وری آب بر مبنای تعرق واقعی(WP_T) از 13/21 برای گوجه فرنگی تا 0/63 برای پنبه متغیر بود. تبخیر از سطح خاک به دلیل آبیاری غرقابی موجب کاهش بهره‌وری آب از WP_T به WP_{ET} می‌گردد.

جدول3- جزئیات بیلان آبی شبیه سازی شده در شرایط مدیریت آبیاری زارع

جزء بیلان آبی	گندم	جو	پنبه	چغندرقند	ذرت علوفه‌ای	گوجه فرنگی
بارندگی، P (mm)	252	251	46	35	1	16
آبیاری، I (mm)	920	680	950	1050	960	2280
تعرق واقعی، T_{act} (mm)	402	289	478	541	653	663
تبخیر واقعی، E_{act} (mm)	129	103	177	144	57	123
عملکرد محصول، Y_{act} (kg/ha)	6000	2850	3000	15000	58000	87500
نفوذ عمقی، Q_{bot} (mm)	325	302	321	412	120	999
تبخیر و تعرق واقعی، ET_{act} (mm)	531	392	655	685	710	786
ذخیره آب در خاک، ΔW (mm)	-15	-9	+19	-12	-6	+82
ذخیره نمک در خاک، ΔS (ton/ha)	-0/07	-2/1	-7/2	-12	+2/6	+0/05
تعرق پتانسیل، T_{pot} (mm)	556	350	556	612	878	729
تبخیر پتانسیل، E_{pot} (mm)	229	186	617	368	267	282
تعداد دفعات آبیاری	8	4	9	11	9	14

جدول4- انواع بهره وری آب حاصل از شبیه سازی مدل در شرایط مدیریت آبیاری زارع

نوع بهره‌وری آب (kg/m^3)	گندم	جو	پنبه	چغندرقند	ذرت علوفه‌ای	گوجه فرنگی
$RT = T_{act} / T_{pot}$	0/72	0/83	0/86	0/88	0/74	0/91
$WP_T = Y_{act} / T_{act}$	1/49	0/99	0/63	2/77	8/88	13/21
$WP_{ET} = Y_{act} / ET_{act}$	1/13	0/73	0/46	2/19	8/17	11/13
$WP_I = Y_{act} / Irrig.$	0/65	0/42	0/32	1/43	6/04	3/84
$WP_{ETQ} = Y_{act} / (ET_{act} + Q_{bot})$	0/57	0/41	0/31	1/37	6/99	4/90

کاهش بهره وری آب به دلیل تبخیر برای مزارع گندم، جو، چغندرقند، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی به ترتیب به اندازه 24، 26، 27، 21، 8 و 16 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. بهره وری آب بر مبنای آب آبیاری (WP_I) از 6/04 کیلوگرم بر متر مکعب برای ذرت علوفه‌ای تا 0/32 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 50، 44، 33، 37، 14 و 56 درصد به ترتیب برای مزارع گندم، جو، چغندرقند، 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 200 میلیون متر مکعب در سال تخمین زده شده است (زراعتی نیشابوری، 1385). 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 برداشت آب از چاهها را حداقل 20% کاهش داد. از طرفی مصرف‌کننده اصلی منابع آب زیرزمینی (حدود 96 %) 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 200 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 برنامه ریزی 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 عمق های آبیاری متفاوت، به ویژه در روش‌های آبیاری سطحی را ندارند، لذا در برنامه‌ریزی آبیاری برای 6 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 70 تا 90 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 1/5 برابر عمق معمول بین 100 تا 140 میلیمتر اعمال گردید. برای فراهم شدن شرایط رطوبتی مشابه شرایط زارعین، نسبت تعرق واقعی به پتانسیل (T_{act} / T_{pot}) به میزان 0/75 تا 0/9 همانند شرایط هر مزرعه به مدل معرفی شد.

نتایج جزئیات بیلان آبی و بهره‌وری آب در حالت برنامه‌ریزی آبیاری حاصل از شبیه‌سازی مدل برای محصولات مختلف دشت در جدول 5 نشان داده شده است. تغییر شرایط از آبیاری رایج به آبیاری برنامه‌ریزی شده موجب کاهش مقدار آب آبیاری (2 تا 54 درصد)، کاهش نفوذ عمقی (15 تا 89 درصد) و افزایش بهره‌وری آب بر مبنای آبیاری، WP_I (صفر تا 54 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 (0/5 تا 9 برابر) شد که برای حفظ پایداری در تولید، انجام عملیات آبشویی 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 3000- 12000، پنبه 7000- 14000، چغندرقند 7000- 16000، ذرت علوفه‌ای 6000- 13000 و گوجه فرنگی 6000- 24000 متر مکعب در هکتار تغییر می‌نماید (حقایقی، 1389).

در جدول 6 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 6 محصول عمده در دشت نیشابور می‌تواند موجب 26 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 165 میلیون متر مکعب (MCM) تخلیه کمتر مخزن آب زیرزمینی دشت است. محصولات گندم ، جو ، پنبه ، چغندرقند ، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی حدود 70% 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 200 میلیون متر مکعبی دشت تنها با انجام همین سناریو قابل جبران باشد.

جدول5- جزئیات بیلان آبی و بهره وری آب در شرایط آبیاری برنامه‌ریزی شده

جزء بیلان آبی / بهره وری آب	گندم	جو	پنبه	چغندرقند	ذرت علوفه‌ای	گوجه فرنگی
بارندگی، P (mm)	251	265	46	35	1	16
آبیاری، I (mm)	520	440	930	1010	870	1050
تعرق واقعی، T_{act} (mm)	427	309	465	559	714	660
تبخیر واقعی، E_{act} (mm)	135	112	193	147	51	115
عملکرد شبیه سازی، Y_{sim} (kg/ha)	6150	3040	2900	16400	58500	87000
نفوذ عمقی، Q_{bot} (mm)	37	224	273	337	22	227
تبخیر و تعرق واقعی، ET_{act} (mm)	562	431	658	706	766	775
ذخیره آب در خاک، ΔW (mm)	170	54	45	2	83	48
ذخیره نمک در خاک، ΔS (ton/ha)	+0/80	-3/6	-13/5	-12/8	+2/9	+1/6
تعرق پتانسیل، T_{pot} (mm)	556	360	567	632	910	733
تبخیر پتانسیل، E_{pot} (mm)	231	188	608	348	255	278
تعداد دفعات آبیاری	6	5	15	15	11	11
$WP_T = Y_{sim} / T_{act}$	1/44	0/98	0/62	2/93	8/19	13/18
$WP_{ET} = Y_{sim} / ET_{act}$	1/10	0/72	0/44	2/32	7/64	11/22
$WP_I = Y_{sim} / Irrig.$	1/18	0/69	0/31	1/62	6/72	8/29
$WP_{ETQ} = Y_{sim}/(ET_{act}+ Q_{bot})$	1/03	0/46	0/30	1/57	7/42	8/68

جدول6- 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	36000	6990	5200	251/6	187/2
جو	22000	5880	4400	129/4	96/8
پنبه	7400	12260	9300	90/7	68/8
چغندرقند	7800	13250	10100	103/4	78/8
ذرت علوفه ای	3600	10600	8700	38/2	31/3
گوجه فرنگی	1750	19120	10500	33/5	18/4
جمع	78550	68100	48200	646/8	481/3

جمع‌بندی

مقادیر نفوذ عمقی 46 ، 39 ، 35 ، 34 و 34 درصد به ترتیب مربوط به گوجه‌فرنگی، چغندرقند، 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 8 تا 27 درصد متغیر بوده است. در دشت نیشابور که متوسط سطح آب زیرزمینی در عمق بیش از 65 متری از سطح خاک است، نفوذ عمقی آب آبیاری نمی‌تواند در دوره زمانی کوتاه به آب زیرزمینی بپیوندد 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 0/72 تا 0/91 تغییر داشت. یعنی در حال حاضر کشاورزان در دشت نیشابور بین 10 تا 30 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 30-20 درصد آب مصرفی اکثر محصولات کشاورزی، بدون بروز هیچ گونه مشکلی قابل توصیه و کاربرد است (سپاسخواه و همکاران، 1385).

تبخیر از سطح خاک به دلیل آبیاری سطحی و سنتی غالب در منطقه موجب کاهش بهره وری آب می‌گردد. مقدار کاهش از WP_T به WP_{ET} به دلیل اثر تبخیر برای مزارع گندم، جو، چغندرقند، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی به ترتیب به اندازه 24، 26، 27، 21، 8 و 16 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 می‌توانند 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 10 تا 15 سال دارد.

منابع مورد استفاده

1. اکبری، م.، 1383. 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.
2. اکبری، م.، دهقانی‌سانیچ، ح. و میرلطیفی، س. م. 1388. تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری بر بهره‌وری آب در کشاورزی (مطالعه موردی در شبکه آبشار اصفهان). مجله آبیاری و زهکشی ایران، 1 (3). ص: 69-79.
3. حسینی، س. م. 1383. سیمای منابع آب استان و چشم‌انداز آن. گزارش فنی شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی.
4. حقایقی مقدم، س. ا. و ر. بهراملو. 1389. 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 89/995. مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج.
5. حیدری، ن. 1388. مسائل، چالش‌ها و راهبردهای ارتقای بهره‌وری آب کشاورزی در ایران. مجموعه مقالات دوازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، 5 و 6 اسفند 1388، تهران.
6. دهقان، ه.، حقایقی، ا.، علیزاده، ا. و انصاری، ح. 1389. پیش‌بینی رطوبت نیمرخ خاک در سه مزرعه گندم با استفاده از مدل SWAP. مجله آب و خاک، 24 (5)، ص. 1018-1008.
7. زراعتی نیشابوری، ح. 1385. تلفیق آبهای سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز نیشابور. پایان‌نامه دوره کارشناسی آبهای زیرزمینی، مؤسسه آموزشی علمی- کاربردی صنعت آب و برق مشهد.
8. سپاسخواه، ع. ، توکلی، ع. و موسوی، س. ف. 1385. اصول و کاربرد کم آبیاری. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران .
9. فرج‌زاده، م.، ولایتی، س. و حسینی، آ. 1384. تحلیل بحران آب در نیشابور با رویکرد برنامه‌ریزی محیطی. کمیته تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان، 143 صفحه.
10. کاوه، ف. و حسینی ابری، س. ع. 1388. افزایش بهره وری آب در کشاورزی آبی. مجموعه مقالات دوازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، 5 و 6 اسفند، تهران.
11. کشاورز، ع. و دهقانی سانیچ، ح. 1388. اصلاح سیاست و ساختار آب و خاک هنری امکان‌پذیر. دوازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، 5 و 6 اسفند، تهران.
12. Allen, R. G., M. Smith, A. Perier and L. S. Pereira. 1994. An update for the definition of reference evapotrenspiration. 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 evalute 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 Enviromental 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.