

بررسی آثار تغییر روش‌های آبیاری از سنتی به مدرن بر جبران کسری مخزن آب زیرزمینی در دشت نیشابور با مدل SWAP

سید ابوالقاسم حقایقی مقدم^{۱*}، مهدی اکبری^۲ و سید حسین صدقائیان^۳

چکیده

افت سطح آب زیرزمینی و کسری مخزن سالانه بیش از ۲۰۰ میلیون مترمکعب از چالش‌های اساسی دشت نیشابور در استان خراسان رضوی است. این پژوهش با هدف بررسی نقش توسعه روش‌های مدرن آبیاری در مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی انجام شد. تأثیر عملیات آبیاری رایج با مدل شبیه‌سازی SWAP ارزیابی شد. بعد از واسنجی مدل، سناریوی توسعه روش‌های آبیاری تحت فشار برای ایجاد تعادل در تغذیه و برداشت از منابع آب زیرزمینی دشت مطالعه شد. نتایج نشان داد تغییر شرایط از آبیاری سطحی به آبیاری تحت فشار موجب کاهش مقدار آب آبیاری مصرفی (صفر تا ۶۰ درصد)، کاهش نفوذ عمقی (۲ تا ۹۰ درصد) و افزایش بهره‌وری آب (صفر تا ۱۴۰ درصد) می‌شود. تجهیز ۳۰٪ از اراضی به سامانه‌های نوین آبیاری برای ۶ محصول عمده در دشت نیشابور می‌تواند موجب ۲۲٪ کاهش در برداشت از سفره آب زیرزمینی بدون کم شدن از میزان تولید محصولات شود. این مقدار برداشت کمتر در مقیاس دشت نیشابور معادل ۴۳ میلیون مترمکعب تخلیه سالانه کمتر سفره آب زیرزمینی است. در صورت گسترش نتایج به سایر محصولات، انتظار می‌رود که سناریوی توسعه سامانه‌های آبیاری تحت فشار-به شرط عدم افزایش سطح زیرکشت اراضی- بتواند تا ۳۰٪ کسری مخزن دشت نیشابور را جبران کند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، تعادل بخشی، دشت نیشابور، روش آبیاری، SWAP.

ارجاع: حقایقی مقدم س. ا. اکبری م. و صدقائیان س. ح. ۱۳۹۳. بررسی آثار تغییر روش‌های آبیاری از سنتی به مدرن بر جبران کسری مخزن آب زیرزمینی در دشت نیشابور با مدل SWAP. مجله پژوهش آب ایران. ۸(۱۵): ۱۳۳-۱۳۵.

۱- مربی پژوهشی بخش فنی و مهندسی مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی خراسان رضوی.

۲- استادیار پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج.

۳- مربی پژوهشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی کرج.

* نویسنده مسئول: sahm51@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۲/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۶/۱۸

مقدمه

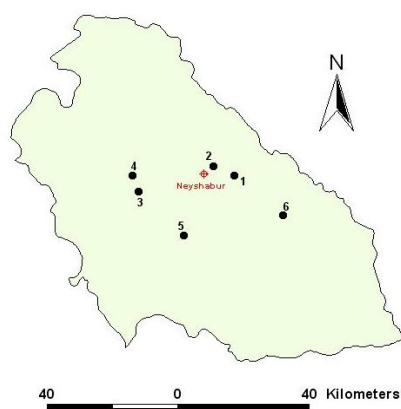
آب زیرزمینی نقش مهمی در رونق کشاورزی فاریاب در ایران دارد. به طوری که بیشتر از ۶۰٪ تولید غلات در کشور از این بخش است (اشرفی و همکاران، ۲۰۰۴). با توجه به وضعیت بحرانی آب زیرزمینی در استان خراسان رضوی، زیرحوضه نیشابور از حوضه آبریز رودخانه کالشور در این استان برای انجام این پژوهش انتخاب شد. کسری مخزن و افت سطح آب زیرزمینی (سالانه بیش از ۲۰۰ میلیون مترمکعب 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 خاک توسعه یافته‌اند. یکی از این مدل‌ها، مدل SWAP (خاک، آب، جو و گیاه) است. دلیل استفاده از مدل SWAP در این پژوهش، 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 استفاده شده و عملکرد مناسب آن به اثبات رسیده است.

مدیریت منابع آب زیرزمینی در آسیا نیاز به حداقل چهار اقدام زیر دارد: ۱- جمع‌آوری اطلاعات و ایجاد سامانه‌های مناسب برای پایش آب زیرزمینی، ۲- پایه‌گذاری مدیریت تقاضا، ۳- پایه‌گذاری مدیریت عرضه و ۴- مدیریت آب زیرزمینی در مقیاس حوضه آبریز (شاه و همکاران، ۲۰۰۳). در تحلیل بحران آب در دشت نیشابور چهار فرضیه: وقوع خشکسالی، کشت گیاهان با نیاز آبی زیاد، اضافه برداشت و نارسایی قوانین و مقررات مربوط به آب برای ایجاد بحران در این دشت عنوان شده است (فرج‌زاده و همکاران، ۱۳۸۴). بررسی وضعیت بیلان آب و املاح در اراضی رودست اصفهان با مدل SWAP (دروگرز و همکاران، ۲۰۰۰a و موری‌راست و همکاران، ۲۰۰۴) 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 کند. چنانچه از میزان حجم آب آبیاری کاسته شود، درصد کاهش عملکرد افزایش یافته و توصیه نمی‌شود. پیش‌بینی عملکرد چهار محصول عمده برنج، یونجه، گندم و چغندر قند در حوضه آبریز زاینده‌رود اصفهان با مدل SWAP نشان داد کشت

برنج بیشترین درآمد در واحد سطح را برای کشاورزان منطقه دربردارد و به‌همین دلیل کشاورزان منطقه از کشت این محصول استقبال می‌کنند (دروگرز و ترابی، ۲۰۰۲). کاربرد مدل SWAP در ناحیه غرب ترکیه با محصولات غالب پنبه و انگور نشان داد از نقطه نظر میزان آبیاری در منطقه، پنبه باید به اندازه ۱۰۰۰ میلی‌متر و انگور به اندازه ۸۰۰ میلی‌متر آبیاری شود. اما از دیدگاه بهره‌وری آب، کارایی مصرف آب انگور در حالت بدون آبیاری و برای پنبه در میزان آبیاری ۶۰۰ میلی‌متر حداکثر است (دروگرز و همکاران، ۲۰۰۰b).

آب مصرفی بخش کشاورزی کشور در سال ۱۳۸۶ حدود ۹۰/۹ میلیارد مترمکعب (کشاورز و دهقانی سانج، ۱۳۸۸) و سطح زیرکشت اراضی آبی کشور حدود ۹ میلیون هکتار (کاوه و حسینی ابری، ۱۳۸۸) برآورد شده است. به دلیل محدودیت منابع آب قابل بهره‌برداری در کشور، افزایش سطح زیرکشت با الگوی فعلی مصرف آب امکان ندارد و باید با پژوهش، به سمت روش‌های آبیاری برویم که ضمن حفظ پایدار منابع آب، خاک و محیط‌زیست، بتوان ۸ میلیون اراضی فاریاب موجود را با بهره‌وری بالاتر آبیاری کرد (ولی‌زاده و همکاران، ۱۳۸۸). برآوردها نشان از آن دارد که تا سال ۱۳۵۷ (سال‌های قبل از انقلاب) حدود ۵۰ هزار هکتار از اراضی و باغ‌های کشور مجهز به سیستم‌های آبیاری تحت‌فشار شده‌اند. در حال حاضر (سال ۱۳۹۱) سطح اجرا شده روش‌های آبیاری تحت‌فشار حدود یک میلیون و دویست هزار هکتار است که حدود ۱۵ درصد اراضی آبی کشور را شامل می‌شود (سایت معاونت آب و خاک وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۱). نتایج پژوهش‌ها در مزرعه‌های کشاورزی استان خراسان رضوی (باغانی، ۱۳۸۷) نشان داد که تغییر روش آبیاری سطحی به آبیاری قطره‌ای موجب افزایش عملکرد محصول (۹ تا ۲۱ درصد)، کاهش آب مصرفی در هکتار (۳۴ تا ۴۹ درصد) و افزایش کارایی مصرف آب (۸۳ تا ۱۱۶ درصد) می‌شود. مقایسه روش آبیاری قطره‌ای با آبیاری سطحی در کرمانشاه نشان داد بهره‌وری مصرف آب گندم بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب در آبیاری قطره‌ای (۲/۵۷) حدود دو برابر روش سطحی (۱/۳۸) بود (ترک‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۵). آهیر و همکاران (۲۰۰۰) و شارماسارکار و همکاران (۲۰۰۱) به ترتیب در کشت سیب‌زمینی و چغندر قند، در روش آبیاری قطره‌ای افزایش عملکرد غده، صرفه‌جویی در مصرف آب

آبیاری در مزرعه‌ها ذکر شده‌اند. جرم مخصوص ظاهری خاک از روش گرفتن نمونه دست نخورده از خاک به دست آمد.



شکل ۱- موقعیت مزرعه‌های مورد مطالعه در سطح دشت نیشابور

جدول ۱- مشخصات مزرعه‌های مورد مطالعه در دشت نیشابور

نام مزرعه	کشت بهاره	کشت پاییزه	سطح زیرکشت (هکتار)	شوری آب (dS/m)
گلستان	ذرت	جو	۳۵	۰/۶۶
فاروب	ذرت	گندم	۱۰	۰/۶۰
فیض آباد	ذرت	جو	۲۲	۵/۱۳
معمدیه	چغندرقد	جو	۳/۵	۲/۱۵
سلیمانی	پنبه	گندم	۱	۳/۸۹
حاجی آباد	گوچه	گندم	۰/۴	۰/۹۰

در کلیه مزرعه‌های آزمایشی رطوبت خاک با دستگاه رطوبت‌سنج 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. مقادیر روزانه حداکثر و حداقل دما، سرعت باد، رطوبت متوسط (یا فشار بخار) و تابش خورشیدی داده‌های لازم برای ورود به فایل هواشناسی مدل است. از داده‌های روزانه ایستگاه هواشناسی نیشابور به‌عنوان معرف دشت استفاده شد. مدل توانایی محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_{ref}) با پنج روش مختلف را دارد. در این پژوهش از روش پنمن-مانتیت به دلیل هماهنگی بیشتر آن با شرایط اقلیمی نیمه‌خشک منطقه استفاده شد. برای هر لایه مشخص شده در شرح پروفیل خاک، باید رابطه‌های بین پتانسیل فشاری آب خاک، مقدار رطوبت و

آبیاری و افزایش بهره‌وری آب را در مقایسه با روش آبیاری سطحی گزارش کردند.

در این مقاله موضوع مدیریت بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی با توسعه روش‌های مدرن آبیاری بحث و بررسی شده است. هدف این پژوهش عبارت از ارزیابی اثرات بلندمدت عملیات رایج آبیاری روی تولید محصولات و کیفیت خاک و بررسی تأثیر تغییر روش‌های آبیاری از سنتی به مدرن بر بهره‌وری آب محصولات تولیدی و ایجاد پایداری در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی دشت نیشابور است.

مواد و روش‌ها

مجموع حجم برداشت از منابع آب زیرزمینی در بخش کشاورزی در دشت نیشابور برابر با ۱۱۰۳/۶ میلیون مترمکعب بوده است (حسینی، ۱۳۸۳). در این زیرحوضه سالانه بیش از ۱۱۰ هزار 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. در این پژوهش تأثیر عملیات آبیاری با مدل شبیه‌سازی حرکت آب و املاح در خاک (SWAP, 2.07) ارزیابی شد. 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 در طی دوره رشد)، داده‌های خاک برای لایه‌های مختلف (شامل بافت، درصد رطوبت در نقطه ظرفیت مزرعه و پژمردگی دائم، جرم مخصوص ظاهری، شدت نفوذپذیری آب در خاک و پارامترهای هیدرولیکی موردنیاز مدل)، داده‌های آبیاری (شامل تاریخ، زمان، نوع و مقدار همه نوبت‌های آبیاری، شوری آب آبیاری، تعداد آبیاری برای هر گیاه در طول دوره رشد) و داده‌های هواشناسی بودند. بیشتر این اطلاعات از مزرعه‌ها در طی دوره آزمایش جمع‌آوری شدند. برخی پارامترهایی که اندازه‌گیری یا نظر کارشناسی در مورد آن‌ها مشکل بود، از منابع موجود تهیه شدند. در سال زراعی ۸۸-۱۳۸۷ تعداد ۶ مزرعه در نقاط مختلف دشت با مشورت کارشناسان خبره محلی انتخاب گردید (شکل ۱). در جدول ۱ نوع کشت، مساحت مزرعه و روش

بهره‌برداری پایدار از منابع آب زیرزمینی دشت را فراهم آورد، مدیریت‌ها و سناریوهای مختلفی قابل بررسی است. در این پژوهش بعد از واسنجی مدل، سناریوی توسعه سامانه‌های نوین آبیاری برای محصولات دشت جایگزین شرایط رایج شد و اثرات آن با مدل شبیه‌سازی و تحلیل شد.

نتایج و بحث

واسنجی، صحت‌سنجی و ارزیابی مدل

مقادیر پارامترهای هیدرولیکی خاک مزرعه‌های مورد مطالعه پس از واسنجی اصلاح شدند. به‌عنوان نمونه 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) برای واسنجی مدل و بخش دوم (فروردین تا خرداد ۱۳۸۸) برای صحت‌سنجی استفاده شدند. شکل ۲ مقایسه بین مقادیر رطوبت اندازه‌گیری (الف) و شبیه‌سازی شده (ب) با مدل در لایه‌های ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری خاک مزرعه فیض‌آباد را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که لایه بالای خاک تغییرات رطوبتی سریع‌تر و بیشتری در هنگام آبیاری یا بارندگی دارد. تغییرات رطوبتی در لایه‌های پایینی خاک تدریجی‌تر است. نتایج ارزیابی رطوبت‌های خاک مزرعه فیض‌آباد برآورد شده با مدل، ضریب تعیین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را ۰/۸۷ و ریشه میانگین مربعات خطاها را ۰/۳۷ نشان می‌دهد. مقدار نزدیک به یک R^2 و مقدار کم RMSE نشان می‌دهد که مدل با دقت مناسبی قادر به شبیه‌سازی رطوبت خاک است. 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 کرده و دارای دقت خوبی است. اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده رطوبت خاک را می‌توان به ناهم‌انگهی خاک در عمق‌های مختلف و خطا در اندازه‌گیری نسبت داد که وقوع آن‌ها در شرایط مزرعه اجتناب‌ناپذیر است.

ضریب هدایت هیدرولیکی غیراشباع تعیین شوند. مدل SWAP در تعریف این رابطه‌های از فرمول معلم-وان‌گنوختن استفاده می‌کند. برای تخمین پارامترهای معادله معلم-وان‌گنوختن از نسخه ۶ مدل نرم‌افزاری RETC تهیه شده در آزمایشگاه شوری آمریکا استفاده شد. برای واسنجی مدل SWAP از داده‌های اندازه‌گیری شده رطوبت در لایه‌های ۱۰ سانتی‌متری خاک تا عمق ۸۰ 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 دارای حساسیت کمی 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 آن قدر تغییر داده شدند (به میزان ۵۰ درصد در جهت مثبت و منفی) تا بهترین هماهنگی بین رطوبت اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده حاصل شود. 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):

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

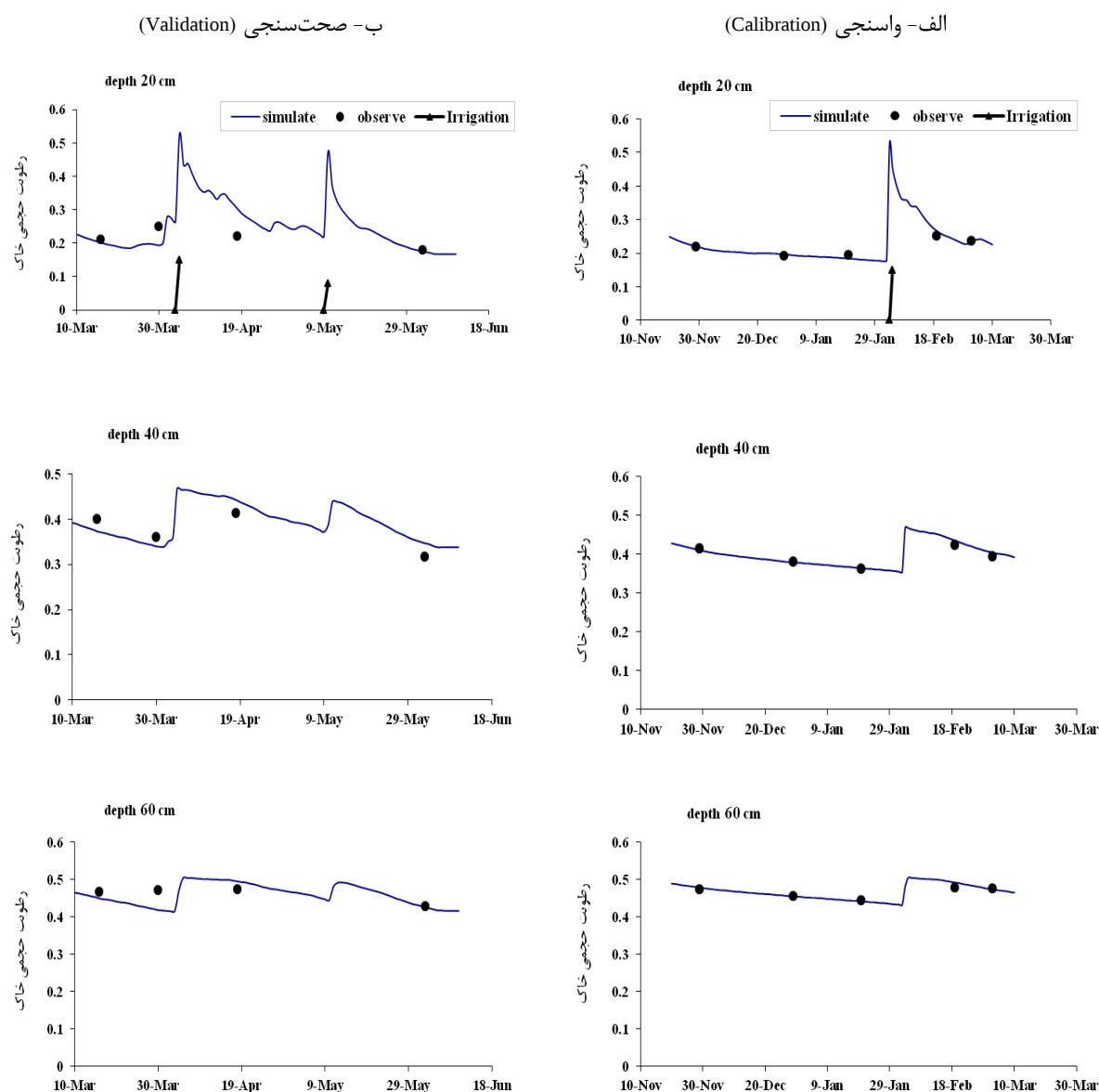
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (2)$$

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

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

که در آن y_i مقادیر اندازه‌گیری شده، $\bar{y}$ میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده، $\hat{y}_i$ مقادیر برآورد شده با مدل و N تعداد کل مشاهد‌ها هستند.

برای نگهداری سطح آب زیرزمینی در عمقی که باعث ایجاد تعادل در تغذیه و برداشت از سفره شود و



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

مدیریت ضعیف آبیاری در سطح این مزرعه‌ها دارد. 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 پیوسته و موجب تغذیه آن شود. پس نفوذ عمقی به‌عنوان هدررفت آب به حساب می‌آید و به هر مقدار و هر روشی که کاهش یابد، بر مقدار بهره‌وری آب در مزرعه افزوده می‌شود.

بیان آب محصولات در مزرعه‌های دشت نیشابور

داده‌های مربوط به ۶ محصول گندم، جو، چغندرقد، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی در ۶ مزرعه مورد مطالعه در سطح دشت نیشابور وارد مدل شبیه‌سازی SWAP شد. اجزای بیان آب شامل تبخیر و تعرق واقعی، تعرق گیاهی، تبخیر از سطح خاک، تغییرات رطوبت خاک و میزان نفوذ عمقی آب در خاک که با مدل برای ۶ محصول شبیه‌سازی شده در جدول ۲ نشان داده شده است. مقادیر نفوذ عمقی ۴۴، ۳۹، ۳۵، ۳۴ و ۳۴ درصد به ترتیب مربوط به گوجه‌فرنگی، چغندرقد، گندم، پنبه و جو نشان از

جدول ۲- بیان آبی شبیه سازی شده در شرایط مدیریت آبیاری زارع

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

انواع بهره‌وری آب در مزرعه‌های دشت نیشابور

بهره‌وری آب به صورت "مقدار محصول تولید شده به ازای واحد آب مصرف شده" تعریف شده است (مولدن و همکاران، ۲۰۰۱). از آنجا که مقدار آب مصرفی از جنبه‌های مختلفی قابل تعریف است، پس بهره‌وری آب نیز به روش‌های متفاوتی قابل محاسبه است. چنانچه تعرق واقعی به عنوان آب مصرفی در نظر گرفته شود، آن‌گاه بهره‌وری آب (WP_T) از تقسیم عملکرد محصول بر تعرق واقعی محاسبه می‌شود. چنانچه تبخیر و تعرق واقعی، آب آبیاری و 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} به دست می‌آیند. در جدول ۳ انواع بهره‌وری آب حاصل از شبیه‌سازی مدل SWAP برای ۶ محصول زراعی دشت نیشابور نشان داده شده است. تبخیر از سطح خاک به دلیل آبیاری غرقابی موجب کاهش بهره‌وری آب از WP_T به WP_{ET} می‌شود.

کاهش بهره‌وری آب به دلیل تبخیر برای مزرعه‌ها 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، ضرورت استفاده از شیوه‌های کاهش تبخیر هم‌چون کاربرد انواع مالچ در سطح خاک و آبیاری با انواع روش‌های زیرسطحی را نمایان‌تر می‌کند. بهره‌وری آب بر مبنای آب آبیاری (WP_I) از ۶/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب برای ذرت علوفه‌ای تا ۰/۳۲ برای پنبه متغیر بود. 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 ۵۰، ۴۴، ۳۳، ۳۷، ۱۴ و ۵۳ درصد به ترتیب برای مزرعه‌ها گندم، جو، چغندر قند، پنبه، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی در مقایسه با WP_{ET} کاهش نشان داده است.

جدول ۳- انواع بهره‌وری آب حاصل از شبیه‌سازی مدل در شرایط مدیریت آبیاری توسط کشاورزان

نوع بهره‌وری آب (kg/m^3)	گندم	جو	پنبه	چغندر قند	ذرت علوفه‌ای	گوجه فرنگی
$RT = T_{act} / T_{pot}$	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

سناریو توسعه سامانه‌های مدرن آبیاری

مقدار کسری آبخوان دشت نیشابور در حال حاضر حدود ۲۰۰ میلیون مترمکعب در سال تخمین زده شده است (زراعتی نیشابوری، ۱۳۸۵). برای دستیابی به مدیریت پایدار بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی دشت نیشابور و جبران کسری مخزن، سناریوهای مختلفی قابل اعمال با مدل شبیه‌سازی SWAP هستند که از جمله آن‌ها توسعه روش‌های مدرن آبیاری در منطقه است. تاکنون (۱۳۹۱) حدود ۱۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی در شهرستان نیشابور زیر پوشش سامانه‌های نوین آبیاری

قرار گرفته‌اند. براساس مطالعات به عمل آمده در ۳۵٪ از زمین‌های کشاورزی شهرستان (حدود ۴۰۰۰۰ هکتار)، امکان اجرای سامانه‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی وجود دارد (واحد آب و خاک مدیریت جهاد کشاورزی نیشابور، ۱۳۸۸).

نتایج جزییات بیلان آبی و بهره‌وری آب در شرایط اجرای سامانه‌های نوین آبیاری در ۳۰٪ اراضی کشاورزی دشت (علاوه بر سطح اجرا شده فعلی) حاصل از شبیه‌سازی مدل برای ۶ محصول اصلی در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- بیلان آبی شبیه‌سازی شده در سناریوی توسعه سامانه‌های نوین آبیاری

جزء بیلان آبی/ بهره‌وری آب	گندم	جو	پنبه	چغندر	ذرت علوفه‌ای	گوجه فرنگی
بارندگی، P (mm)	۲۵۳	۲۶۷	۴۶	۳۵	۰	۲۱
آبیاری، I (mm)	۵۵۰	۴۸۵	۹۴۰	۱۰۵۰	۹۴۵	۹۱۰
تعرق واقعی، T _{act} (mm)	۴۲۱	۳۱۲	۳۹۵	۵۱۲	۶۲۷	۶۲۲
تبخیر واقعی، E _{act} (mm)	۱۵۳	۱۲۵	۲۹۳	۱۸۴	۱۷۵	۲۶۳
عملکرد شبیه‌سازی، Y _{sim} (kg/ha)	۶۱۵۰	۳۰۳۵	۲۵۰۰	۱۴۴۰۰	۵۵۴۸۵	۸۴۶۰۰
نفوذ عمقی، Q _{bot} (mm)	۱۴۸	۲۷۹	۱۹۱	۳۵۳	۱۱۸	۱۰۳
تبخیر و تعرق واقعی، ET _{act} (mm)	۵۷۴	۴۳۷	۶۸۸	۶۹۶	۸۰۲	۸۸۵
ذخیره آب در خاک، ΔW (mm)	+۶۷	+۲۹	+۹۳	+۱۴	+۹۶	+۵۹
ذخیره نمک در خاک، ΔS (ton/ha)	-۰/۳	-۵/۹	-۳/۲	-۱۴/۲	+۱/۱	-۰/۰۴
$WP_T = Y_{sim} / T_{act}$	۱/۴۶	۰/۶۳	۰/۶۳	۲/۸۲	۸/۸۵	۱۳/۶۰
$WP_{ET} = Y_{sim} / ET_{act}$	۱/۰۷	۰/۶۹	۰/۳۶	۲/۰۷	۶/۹۲	۹/۵۶
$WP_I = Y_{sim} / Irrig.$	۱/۱۲	۰/۶۳	۰/۲۷	۱/۳۷	۵/۸۷	۹/۳۰
$WP_{ETQ} = Y_{sim} / (ET_{act} + Q_{bot})$	۰/۸۵	۰/۴۲	۰/۲۸	۱/۳۷	۶/۰۳	۸/۵۶

براساس نتایج، تغییر شرایط از آبیاری سطحی به آبیاری تحت فشار موجب کاهش مقدار آب آبیاری (صفر تا ۶۰ درصد)، کاهش نفوذ عمقی (۲ تا ۹۰ درصد) و افزایش بهره‌وری آب بر مبنای آبیاری، WP_I (صفر تا ۱۴۰ درصد) می‌شود. همچنین عملکرد محصولات تفاوت معنی‌داری نداشته و در مواردی کمی افزایش یا کاهش نشان داده است.

در جدول ۵ تأثیر اعمال برنامه توسعه سامانه‌های آبیاری تحت‌فشار بر کاهش برداشت آب از سفره آب زیرزمینی به وسیله چاه‌ها نشان داده شده است. در این جدول حجم آب مصرفی در شرایط موجود برابر با متوسط حجم آب برآورد شده (حقیقی، ۱۳۸۹) برای محصولات در نقاط

مختلف دشت در نظر گرفته شده است. همچنین سطح زیرکشت محصولات که تحت پوشش قرار خواهند گرفت، معادل ۳۰٪ سطح زیرکشت فعلی محاسبه شده است. نتایج جدول نشان می‌دهد که تجهیز ۳۰٪ از اراضی به سامانه‌های نوین آبیاری برای ۶ محصول عمده در دشت نیشابور می‌تواند موجب ۲۲٪ کاهش در برداشت از سفره آب زیرزمینی بدون کم شدن از میزان تولید محصولات شود. این مقدار برداشت کمتر در مقیاس دشت نیشابور معادل ۴۳ میلیون مترمکعب تخلیه کمتر سفره آب زیرزمینی است که می‌تواند حدود ۲۲٪ کسری مخزن را جبران کند.

جدول ۵- مقایسه حجم آب مصرف شده در شرایط موجود و توسعه سامانه‌های نوین آبیاری

گیاه	مساحت (ha)	آب آبیاری مصرفی (m ³ /ha)		آب زیرزمینی برداشت شده (MCM)	
		موجود	سناریو دو	موجود	سناریو دو
گندم	۱۱۰۰۰	۶۹۹۰	۵۵۰۰	۷۶/۹	۶۰/۵
جو	۶۶۰۰	۵۸۸۰	۴۸۵۰	۳۸/۸	۳۲/۰
پنبه	۲۲۰۰	۱۲۲۶۰	۹۴۰۰	۲۷/۰	۲۰/۷
چغندر قند	۲۴۰۰	۱۳۲۵۰	۱۰۵۰۰	۳۱/۸	۲۵/۲
ذرت علوفه‌ای	۱۱۰۰	۱۰۶۰۰	۹۴۵۰	۱۱/۷	۱۰/۴
گوجه فرنگی	۵۵۰	۱۹۱۲۰	۹۱۰۰	۱۰/۵	۵/۰
جمع	۲۳۸۵۰	۶۸۱۰۰	۴۴۷۲۰	۱۹۶/۷	۱۵۳/۸

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش تاثیر مثبت اجرای سامانه‌های آبیاری تحت فشار بر کاهش آب مصرفی گیاهان و افزایش بهره‌وری آب را نشان داد که با بسیاری از نتایج پژوهش‌های مشابه انجام شده از جمله باغانی (۱۳۸۷)، ترک‌نژاد (۱۳۸۵)، آهیر و همکاران (۲۰۰۰) و شارماسارکار و همکاران (۲۰۰۱) هماهنگی دارد. در این پژوهش‌ها همچنین افزایش عملکرد گیاهان به دلیل تغییر روش آبیاری از سطحی به تحت فشار گزارش شده که در این پژوهش، استفاده از مدل SWAP نتوانست افزایش عملکرد گیاهان را به خوبی در شرایط کاربرد روش‌های مدرن آبیاری شبیه‌سازی نماید. چنانچه سطح تجهیز اراضی به سامانه‌های نوین آبیاری در شهرستان نیشابور ۳۰۰۰ هکتار در سال باشد، می‌توان انتظار داشت طی یک برنامه ۱۰ ساله حدود ۳۰ هزار هکتار (پیشنهاد شده در سناریوی توسعه سامانه‌های نوین آبیاری) تحت پوشش سامانه‌های آبیاری تحت فشار قرار بگیرند و تا ۳۰٪ کسری مخزن دشت نیشابور جبران شود. این سناریو با قیمت سال ۱۳۹۱ برای استان خراسان رضوی (۴۰ میلیون ریال هزینه طراحی و اجرای هر هکتار) نیاز به سرمایه‌گذاری بالغ بر ۱۲۰۰ میلیارد ریال دارد. ذکر این نکته لازم است که اجرای این سناریو در صورتی باعث جبران بخشی از کسری مخزن دشت نیشابور می‌شود که تجهیز مزرعه‌ها به سامانه‌های آبیاری تحت فشار موجب افزایش سطح زیرکشت اراضی توسط بهره‌برداران نشود.

منابع

۱. اکبری م. ۱۳۸۳. بهبود مدیریت آبیاری مزرعه‌ها با استفاده از تلفیق اطلاعات ماهواره‌ای، مزرعه‌ای و مدل شبیه‌سازی SWAP. رساله دکتری در رشته آبیاری و زهکشی، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۹۳ ص.
۲. باغانی ج. ۱۳۸۷. مقایسه اثرات تغییر روش آبیاری شیاری به قطره‌ای بر میزان و کارایی مصرف آب و عملکرد محصول در زراعت‌های ردیفی. مجله آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۲): ۹-۱۱.
۳. ترک‌نژاد ا. آقایی م. جعفری ج. 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. ۷۲: ۴۴-۳۶.
۴. حسینی س. م. ۱۳۸۳. سیمای منابع آب استان و چشم‌انداز آن. گزارش فنی شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان. ۳۵ ص.
۵. حقایقی مقدم س. ا. ۱۳۸۹. مدیریت پایدار آب زیرزمینی در استان خراسان رضوی- مطالعه موردی دشت نیشابور. کمیته تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی. ۱۱۹ ص.
۶. دهقان ه. حقایقی س. ا. عزیزاده ا. و انصاری ج. ۱۳۸۹. پیش‌بینی رطوبت نیمرخ خاک در مزرعه‌ها گندم دشت نیشابور با استفاده از مدل SWAP. مجله آب و خاک دانشگاه فردوسی. ۲۴(۶): ۱۰۰۸-۱۰۱۸.
۷. زراعتی نیشابوری ج. ۱۳۸۵. تلفیق آب‌های سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز نیشابور. پایان‌نامه دوره کارشناسی آب‌های زیرزمینی، موسسه آموزشی علمی-

- overview of issues and evidence. *Natural Resources Forum*. 27:130-141.
20. Sharmasarkar F. C. Sharmasarkar S. Miller S. D. Vance G. F. and Zhang R. 2001. Assessment of drip and flood irrigation on water and Fertilizeer use efficiencies for sugarbeet. *Journal of Agricultural Water Management*. 46:241-25.
 21. Homepage of Ministry of Jihad-e- Agriculture of Iran. URL: <http://www.maj.ir>
 22. Homepage of Khorasan-e- Razavi province. URL: <http://www.neyshabur.khorasan.ir>.
- کاربردی مشهد. ۲۸۹ ص.
۸. فرج‌زاده م. ولایتی س. و حسینی آ. ۱۳۸۴. تحلیل بحران آب در نیشابور با رویکرد برنامه‌ریزی محیطی. کمیته تحقیقات شرکت سهامی آب منطقه‌ای خراسان رضوی. ۱۴۳ ص.
 ۹. 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 ۱۳۸۸، تهران. ۱۱۱-۱۲۲.
 ۱۰. کشاورز ع. و دهقانی سانچ ح. ۱۳۸۸. اصلاح سیاست و ساختار آب و خاک هنری امکان‌پذیر. دوازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۵ و ۶ اسفند ۱۳۸۸، تهران. ۱۷-۲۸.
 ۱۱. ولی‌زاده ن. دهقانی سانچ ح. زارعی ق. و گرجی ع. ۱۳۸۸. چشم‌انداز توسعه روش‌های آبیاری تحت فشار در ایران. مجموعه مقالات دوازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۵ و ۶ اسفند ۱۳۸۸، تهران. ۲۷۷-۲۹۹.
 12. Ahire N. R. Bhoi P. G. and Solanke A. V. 2000. Effect of row spacing and planting system on growth and yield of potato under surface and drip irrigation. *Journal of the Indian Potato Association*. 27(1-2):59- 60.
 13. Ashrafi Sh. Qureshi A. S. and Gichuki F. 2004. Karkheh basin profile: strategic research for enhancing agricultural water productivity. Challenge Program on Water and Food, Colombo, Sri Lanka. 48 p.
 14. Droogers P. Akbari M. Torabi M. and Pazira E. 2000a. Exploring field scale salinity using simulation modeling, example for Rudasht area, Esfahan province, Iran. AERI-IWMI Research Report. 2. 19 p.
 15. Droogers P. Kite G. and Murray-Rust H. 2000b. Use of simulation to evaluate irrigation performance including water productivity, risk and system analysis. *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. 28 p.
 17. Molden D. J. Satkhtivadival R. and Habib Z. 2001. Basin level water use and productivity of water. Report 49. IWMI, Sri Lanka. 34 p.
 18. Murray-Rust H. Droogers P. (Eds). 2004. Water for future: Linking irrigation and water allocation in the Zayandeh Rud Basin, Iran. IWMI, Sri Lanka. 168 p.
 19. Shah T. Ded Roy A. Qureshi A. S. and Wang J. 2003. Sustaining Asia's groundwater boom: An

