ارزیابی وضعیت مدیریت آبیاری و امکان بهبود آن در مزارع گندم در شبکه آبیاری سد سیستان با استفاده از مدل SWAP

محمدامین خندان بارانی، پیمان افراسیاب[۱]، مهدی اکبری و معصومه دلبری

دانشجو دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل، زابل، ایران.

aminbarani2008@gmail.com

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل، زابل، ایران.

peyman.afrasiab@uoz.ac.ir

دانشیار بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی، کرج، ایران.

akbari_m43@yahoo.com

دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل، زابل، ایران.

masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

دریافت: آبان ۱۳۹۹ و پذیرش: اسفند ۱۳۹۹

چکیده

در این تحقیق وضعیت موجود بهره‌وری آب برای تولید گندم و امکان بکارگیری راهکارهای افـــزایش بهـــره‌وری آب در شـرایط مختلف دسترسی به آب در شبکه آبیاری سد سیستان، تعیین و تجزیه و تحلیل شد. بدین منظور با در نظـر گـرفتن وضـعیت موجـود بهره‌برداری از منابع آب، مقادیر مختلف آب آبیاری و بهره‌گیری از اطلاعـات مزرعه‌ای، مدل شبیه‌سازی SWAP، واسنجی و صحت سنجی شد. برای تعیین برنامه آبیاری (زمان و عمق)، از توابع تولید آب کاربردی برای محصول گندم استفاده شد. نتایج اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای در سال زراعی ۱۳۹۶-۱۳۹۵ در شبکه آبیاری مطالعه شده نشان داد که در شرایط موجود، کشاورزان منطقه به‌طور میانگین محصول گندم را در چهار نوبت آبیاری می‌کنند و متوسط عملکـــرد محصول حـــدود ۱۴۵۰ کیلـــوگرم در هکتار و بهره‌وری آب حدود ۰/۴۱ کیلوگرم بر مترمکعب است. این نتایج نشان می‌دهد که از آب قابل دسترس به شـــکل مناســـبی بهـــره‌بـــرداری نمـــی‌شود و باید با راهکارهای کاربردی برای بهبود بهره‌وری آب اقدام شود. نتایج صحت‌سنجی و واسنجی مدل SWAP نیز نشان‌دهنده صحت بالای مدل در منطقه مطالعه بود. نتایج ســناریوهای مختلف مدیریتی حذف تعدادی از نوبت‌های آبیاری نسـبت به شـرایط موجود نشـان داد که اگرچه در بهره‌وری آب تفاوت فاحشی مشاهده نشد اما عملکرد محصول حدود ۳۷ ٪ کاهش یافت. نتایج ارزیابی سناریوهای کاهش عمق و دور آبیاری (استفاده از ۶۴۰ میلی‌متر آب در کل فصل و آبیاری به میزان ۴۰ میلی‌متر در هر نوبت)، نشان داد که در صورت تأمین مطمئن و به موقع آب و اجرای آبیاری در نوبت‌های بیشتر می‌توان بهره‌وری آب را نسبت به سناریوی مبنا به مقدار ۳۰ ٪ و عملکرد محصول را تا دو برابر شرایط موجود افزایش داد. در این سناریوها وجود رطوبت مناسب در عمق ریشـه گیاه باعث افزایش محصـول شـده و مقدار نفوذ عمقی به شـدت کاهش یافت چون میزان آب کاربردی کشـاورزان به‌علل مختلف بیش از اندازه است، از این‌رو، توصیه می‌شود شـیوه‌هـای بهبـود مدیریت آبیاری و مدیریت زراعی با توجه به آب قابل دسترس در شبکه آبیاری به کشاورزان آموزش داده شود تا آن‌ها خود به توزیع آب، متناسب با نیاز واقعی گیاه و آبیـــاری در زمـــان مناســـب و بـــه میـــزان کفایت روی آورند.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی آبیاری، بهره‌وری آب، عمق و دور آبیاری

---

[۱] - آدرس نویسنده مسئول: زابل، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک دانشگاه زابل

مقاله برگرفته از پایان‌نامه مقطع دکتری (کد گرنت: Uoz-GR2330)

مقدمه

غلات نقش زیادی در تأمین امنیت غذایی دنیا دارند. در بین غلات، گندم، ذرت و برنج با بالاترین مقدار تولید بیشترین سهم را در تأمین غذا به خود اختصاص داده‌اند. گندم به‌دلیل سازگاری گسترده با شرایط آب و هوایی مختلف، سهولت کاشت، امکان نگهداری طولانی مدت، ارزش غذایی زیاد و قابلیت مصرف در اشکال مختلف از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (احمدوند و نجف‌پور، ۲۰۱۰). افزون بر این گندم غذای اصلی بسیاری از مردم را تشکیل داده و حدود ۴۰ درصد کالری مصرفی مردم از این محصول تأمین می‌شود. از این رو استفاده از زمینه‌های تحقیقاتی برای افزایش تولید گندم به‌عنوان مهم‌ترین محصول زراعی کشور ضروری به نظر می‌رسد (امیری، ۲۰۱۶).

با توجه به محدودیت منابع آب و سهم زیاد مصرف آب در بخش کشاورزی باید به‌دنبال راهکارهایی برای بهبود مدیریت آبیاری در مزارع و ارتقاء بهره‌وری آب کشاورزی بود (ملدن، ۲۰۰۷؛ استدوتو و همکاران، ۲۰۰۷). از این‌رو بایستی برای افزایش بهره‌وری آب در شرایط مختلف دسترسی به آب، دور و عمق بهینه آبیاری را تعیین شود. برای بررسی گزینه‌های مختلف می‌توان از آزمایش‌های مزرعه‌ای و یا مدل‌های شبیه‌سازی استفاده کرد. اجرای آزمایش‌های مزرعه‌ای با محدودیت‌هایی از قبیل هزینه‌بر و زمان‌بر بودن، عدم امکان اجرای گزینه‌های متعدد و پیچیده مدیریت آبیاری و محدود بودن صحت نتایج به دست آمده به یک منطقه خاص و شرایط آزمایش، همراه است (اکبری، ۱۳۹۰).

مدل‌های شبیه‌سازی رشد یکی از ابزارهای کارآمد برای پایش رشد محصولات کشاورزی و بررسی محدودیت‌های ممکن و مدیریت‌های مختلف در مزرعه است (احمدی و همکاران، ۲۰۱۵). از طرفی صحت مدل‌های شبیه‌سازی عمدتاً به دقت داده‌های ورودی بستگی دارد و درصورتی‌که به‌درستی واسنجی شوند، بدون محدودیت زمانی و مکانی موجود در آزمایش‌های مزرعه‌ای و نیز صرف زمان و هزینه زیاد، می‌توانند برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریت آبیاری به کارگرفته شوند (مصطفی‌زاده فرد و همکاران، ۲۰۰۹). واسنجی مدل‌های شبیه‌سازی نیز نیاز به داده‌های آزمایشگاهی و مزرعه‌ای دارد که در برخی موارد در دسترس نبوده و یا از نظر زمانی متفاوت هستند (استدوتو و همکاران، ۲۰۰۹؛ دروگرز و همکاران، ۲۰۰۱).

برآورد عملکرد محصول در مدیریت کشاورزی و اتخاذ تصمیم‌های به‌موقع برای تأمین غذا اهمیت بسیار دارد. ایران دارای سطوح و سیع کشت محصولات مختلف است و برآورد عملکرد محصول گیاهان در زمان مناسب و با دقت مطلوب ضروری است. مدل‌های شبیه سازی رشد گیاه، در مقیاس کوچک، ابزار تحقیقاتی قدرتمندی است که در پیش‌بینی عملکرد گیاه در سامانه‌های زراعی مختلف استفاده می‌شود (مختاری، ۱۳۹۰). از این مدل‌ها می‌توان به مدل Wofost (داپین و همکاران، ۱۹۸۹)، CERES (گادوین و جونز، ۱۹۹۱)، WTGROWS (اگارول و همکاران، ۱۹۹۴)، SVAT (مو و لیو، ۲۰۰۱) و SWAP (کروس و ون دم، ۲۰۰۳) اشاره کرد.

مدل SWAP[1] برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی عملکرد، زهکشی، مدیریت آبیاری در کشت آبی و بیلان آب در سیستم‌های هیدرولوژیکی و جریان آب و املاح در سیستم‌های هیدرولوژیکی کشاورزی در کشورهای مختلف و همچنین ایران مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج خوبی در مقایسه با اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای داشته است. اساس مدل ارتباط فیزیکی پارامترهای خاک، آب، اتمسفر و گیاه است و از متغیرهای مختلف اقلیمی، آب، خاک و گیاه به‌عنوان ورودی استفاده می‌کند (وظیفه دوست و همکاران، ۲۰۰۸؛ سینگ و همکاران، ۲۰۰۶؛ هامادا و همکاران، ۲۰۲۰). همچنین محققان زیادی در کشورهای

[1] Soil Water Atmosphere Plant

مختلف از مدل SWAP برای مدیریت آبیاری و برآورد عملکرد گیاهان زراعی و باغی استفاده کرده‌اند که از آن‌ها می‌توان به تحقیق در مزارع نیشکر کوبا (روئیز و آتست، ۲۰۰۳)، در زاراکوزای اسپانیا (آتست و همکاران، ۲۰۰۷) و در مزارع گندم و جو و پنبه هند (سینگ و همکاران، ۲۰۰۶) اشاره کرد. بررسی مطالعات انجام شده در برآورد عملکرد محصول با استفاده از مدل SWAP نشان می‌دهد که دقت این مدل به صحت داده‌های ورودی بستگی زیادی دارد (بادیه‌نشین و همکاران، ۱۳۹۳).

کومار و همکاران (۲۰۱۵)، در تحقیقی مدل SWAP را برای شبیه‌سازی حرکت نمک در لایه‌های مختلف نیم‌رخ خاک و بررسی عملکرد نسبی چهار رقم گندم تحت رژیم‌های مختلف آبیاری شور را مورد ارزیابی قرار دادند و به نتایج قابل قبولی دست یافتند. در تحقیقی دیگر سه مدل شناخته شده SWAP، CropSyst و MACRO در شبیه سازی رطوبت نیم‌رخ خاک در مزارع تحت کشت ذرت در مناطق شمالی ایتالیا مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر سه مدل عملکرد مشابهی دارند. در مجموع مدل SWAP به‌دلیل بهره‌گیری از روش‌های متفاوت حل عددی معادله ریچاردز با توجه به در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب در بالا و پایین نمونه خاک عملکرد بهتری نشان داد (بنفانت و همکاران، ۲۰۱۰). همچنین حرکت آب در خاک و اجزای بیلان آب با استفاده از مدل SWAP و سنجش از دور در مزارع تحت کشت گندم در شمال غربی چین شبیه سازی شد. نتایج نشان داد از مدل SWAP می‌توان به عنوان ابزاری مفید برای شبیه سازی حرکت و توزیع رطوبت در خاک و محاسبه اجزای بیلان آب استفاده کرد (سینگ و همکاران، ۲۰۱۰). مدل SWAP نیز قابلیت شبیه سازی رشد گیاه در شرایط تنش‌های خشکی و شوری را دارد. ولی شرایط محیطی رشد گیاه را از نظر مواد غذایی، آفات و بیماری‌ها بهینه و نامحدودکننده فرض می‌کند و این امر باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شود (کروس و ون دم، ۲۰۰۳).

سینگ و همکاران (۲۰۰۶) نیز برای بررسی شاخص بهره‌وری مصرف آب در منطقه Sirsa هند از مدل SWAP استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در مزارع گندم با بهبود مدیریت‌های گیاهی می‌توان میزان بهره‌وری مصرف آب را ۱/۵ برابر افزایش داد. اکبری و همکاران (۱۳۸۷) نیز با استفاده از مدل SWAP نشان دادند که در صورت اصلاح تقویم آبیاری محصول گندم در شبکه آبیاری آبشار، عملکرد محصول ۱۵ درصد و بهره‌وری مصرف آب ۴۰ درصد افزایش خواهد یافت. وردی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۹) از مدل SWAP برای تعیین عمق بهینه آبیاری و مدیریت های مختلف آبیاری با آب شور بر عملکرد محصولات زراعی در رودشت اصفهان استفاده کردند. این محصولات شامل گندم، جو، پنبه، چغندرقند، پیاز، آفتابگردان و ذرت علوفه‌ای بود. نتایج نشان داد در شرایط محدودیت کمی آب و برای ۱۰۰۰۰ مترمکعب در هکتار آب در دسترس، حداکثر سود خالص از کشت پیاز حاصل شد. دهقان و همکاران (۱۳۹۰) شاخص‌های بهره‌وری مصرف آب در مزارع گندم دشت نیشابور را با استفاده از مدل SWAP مورد بررسی قرار دادند و اظهار داشتند که در صورت برنامه‌ریزی صحیح آبیاری ضمن کاهش آب مصرفی، شاخص‌های WP_{ETQ} . و WP_{Irr} به ترتیب ۴۸ و ۶۱ درصد افزایش می‌یابد. حسن‌لی و همکاران (۲۰۱۶) برای برآورد عملکرد علوفه ذرت سه مدل AquaCrop، SALTMED و SWAP را بررسی کردند. نتایج نشان داد مدل‌های SALTMED و SWAP در برآورد عملکرد ذرت تحت تنش شوری عملکرد بهتری نسبت به مدل AquaCrop داشتند.

در مطالعه‌ای برای تعیین بهره‌وری آب در سطوح مختلف حوضه و شبکه‌های آبیاری از نتایج شبیه سازی بیلان آب در خاک و رشد محصول استفاده شده است (اکبری، ۱۳۹۰). در مطالعه‌ای دیگری از مدل SWAP در شرایط کم آبیاری راهبردهای مختلفی بر روی کشت برنج آزمایش شد. هدف از این آزمایش

انتخاب بهترین روش مدیریت آبیاری برای افزایش بهره‌وری آب برنج در مناطق کم آب با حداقل اثر سو بر رشد و پتانسیل تولید محصول است (جنوبای و همکاران، ۲۰۱۸). در تحقیقی دیگر از مدلSWAP برای شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برنامه آبیاری ذرت استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل در شبیه سازی رطوبت خاک، شوری خاک و عملکرد گیاه ذرت با مقادیر اندازه‌گیری شده مطابقت خوبی دارد. همچنین برنامه آبیاری مناسبی برای آبیاری ذرت شبیه‌سازی شد (پن و همکاران، ۲۰۲۰). در تحقیقی از مدل SWAP برای برآورد عملکرد برنج استفاده شد. مقایسه متغیرهای آماری نشان داد که میانگین مقادیر ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی مدل (EF) در برآورد عملکرد اجزای برنج در مراحل مختلف رشد با مدل SWAPبه ترتیب بیش از ۰/۷۰ و ۰/۹۰ و با یک خطای ۱/۹۳ تا ۶/۵۴ درصد معادل ۱۳۴/۲۱ تا ۴۷۰/۴۳ کیلوگرم در هکتار بود؛ بنابراین نتایج آن‌ها نشان داد مدل SWAP عملکرد برنج را در منطقه مورد مطالعه با صحت مناسب تخمین می‌زند (پاندی و همکاران، ۲۰۲۰).

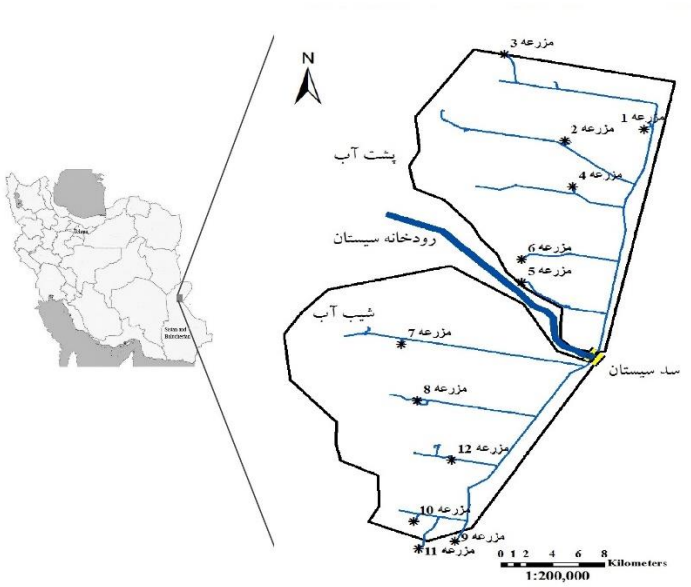
با توجه به موارد فوق و نتایج رضایت‌بخش کاربرد مدل‌های شبیه سازی در بررسی وضعیت موجود و بهبود مدیریت آبیاری در سطح جهان، در پژوهش حا ضر از مدل شبیه‌سازی SWAP و داده‌ها و اطلاعات موجود برای بررسی تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت زراعی بر عملکرد محصول، بهره‌وری آب در شرایط گوناگون مدیریت آبیاری در سطح مزارع گندم شبکه آبیاری سد سیستان و ارائه گزینه‌هایی برای بهبود کارایی آب در آینده استفاده شد. از نتایج جنبی این پژوهش می‌توان به بررسی مدیریت آبیاری و تعیین کارایی آب در وضعیت فعلی آب آبیاری اشاره کرد.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعه شده اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری سد سیستان در استان سیستان و بلوچستان در جنوب شرقی ایران است (شکل ۱). ارتفاع متوسط دشت از سطح دریای آزاد ۴۸۰ متر است و بر اساس شاخص دومارتن (DAI[1]) دارای آب و هوای فراخشک است (طاوسی و همکاران، ۱۳۹۸). میانگین بارندگی سالانه ۵۸ میلی‌متر و میزان تبخیر پتانسیل نزدیک به ۵۰۰۰ میلی‌متر در سال است. تنها منبع تأمین آب دشت سیستان رودخانه سیستان است. رودخانه سیستان ضمن عبور از دشت سیستان آب مورد نیاز اراضی تحت پوشش سد سیستان (شیب‌آب و پشت‌آب) را تأمین می‌کند و در خارج از فصول آبیاری، مخازن چاه نیمه را نیز آبگیری می‌کند. مساحت اراضی تحت پوشش شبکه آبیاری سد سیستان ۶۰۰۰۰ هکتار است که وسعتی معادل ۴۷۳۰۰ هکتار اراضی خالص زراعی را در برمی‌گیرد. بافت خاک غالب این اراضی متوسط است و معمولاً در تمامی این اراضی کشت‌های زراعی ازجمله گندم، جو و هندوانه کشت می شود و آبیاری اراضی به روش سطحی انجام می شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۹).

[1] De Martonne Aridity Index



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعه شده در دشت سیستان

مدل SWAP

مدل SWAP یک مدل شبیه‌سازی خاک، آب، اتمسفر و گیاه است که بر اساس قوانین فیزیکی و قطعی حاکم بر فرایندهای آب‌شناختی و شیمیایی موجود در زنجیر پیوست آب، خاک، گیاه و اتمسفر تدوین و توسعه یافته است (کروس و ون دم، ۲۰۰۳). این مدل جریان عمودی حرکت آب و نمک را در خاک همراه رشد گیاه شبیه‌سازی می‌کند. مدل SWAP با استفاده از معادله دیفرانسیلی یک بعدی ریچاردز که ترکیبی از دو معادله دار سی و پیو ستگی ا ست، انتقال آب در خاک را شبیه‌سازی می‌کند (سینگ و همکاران، ۲۰۱۰):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(h)\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(K(h)\frac{\partial h}{\partial z} - K(h) \right) - S_w \quad (1)$$

که در آن:

θ رطوبت حجمی خاک [L^3L^{-3}]، $C(h)$ ظرفیت دیفرانسیلی آب خاک ($d\theta/dh$) [L^{-1}]، h مکش ماتریک [L]، K هدایت هیدرولیکی غیراشباع [LT^{-1}]، t زمان [T]، Z عمق خاک [L] و $S_w(z,t)$ آب جذب شده توسط ریشه [L^3 $(L^3.T)^{-1}$] است (فدس و همکاران ۱۹۷۸).

مدل SWAP می‌تواند مؤلفه‌های مختلف را در یک واحد شبیه‌سازی همگن از نظر نوع خاک، زهکشی، شرایط آب زیرزمینی، شرایط آب و هوایی و بارش، گیاه یا ترکیب گیاهی و آبیاری (روش، عمق، شوری) برآورد کند. شبیه‌سازی رشد گیاه و محاسبه عملکرد مح صول بر ا ساس مدول ر شد گیاه در مدل شبیه‌سازی SWAP انجام می‌شود. این مدل بر اساس مدل WOFOST است و عملکرد پتانسیل را بر اساس شرایط محیطی و ویژگی‌های گیاهی برآورد می‌کند.

داده‌های ورودی به مدل

داده های ورودی مدل عبارتا ند از: داده های مربوط به هواشناسی، داده‌های خاک، داده‌های گیاهی و مدیریت آبیاری. داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل: حداکثر و حداقل دمای هوا، رطوبت هوا، میزان تشعشع، سرعت باد و بارندگی روزانه از ایستگاه هواشناسی زابل که ایستگاه هواشناسی سینوپتیک واقع در منطقه مورد مطالعه است، جمع‌آوری گردید. بر اساس بافت خاک مزارع پایش، تعداد لایه‌های نیمرخ خاک مشخص و به مدل معرفی گردید. از بین پارامترهای هیدرولیکی خاک حساس‌ترین

پارامترهـــا (n,θ_{sat},K_{sat}) شناسایی و سپس بر اساس بافت خاک با اســـتفاده از توابع انتقالی موجود در مدل SWAP برای هر لا یه خاک یک تخمین اولیه برای پارامتر های هیدرولیکی خـــاک صورت گرفت (وردی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۹). برای شـبیه‌سـازی رشـد محصـول از مدل گیاهی ساده موجـود در مـدل SWAP اسـتفاده شـد. روش‌های ا ندازه‌گیری متغیر های خاک و گ یاه نیز ت عداد دف عات اندازه‌گیری آن‌ها در طول فصل ر شد در جدول یک نشان داده شدند.

جدول ۱- پارامترهای اندازه‌گیری یا جمع‌آوری شده مورد نیاز مدل

پارامتر	روش اندازه‌گیری یا جمع‌آوری	تعداد دفعات نمونه‌گیری
بافت خاک	روش USDA	یکبار
چگالی ظاهری خاک	نمونه‌گیری دست نخورده	یکبار
هدایت هیدرولیکی اشباع خاک	روش بار افتان	یکبار
رطوبت خاک	روش وزنی	پیش از هر آبیاری
شوری عصاره اشباع	هدایت الکتریکی سنج	۲ بار
رطوبت FC و PWP	صفحات فشاری	یکبار
حجم (عمق) آب	کنتور حجمی	هر آبیاری
ارتفاع گیاه	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	۴ بار
شاخص سطح برگ	LAI متر	۴ بار
عمق توسعه ریشه	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	۴ بار
عملکردانه‌ای	اندازه‌گیری مزرعه‌ای	یکبار

جمع‌آوری پارامترهای اندازه‌گیری

با تو جه به ا هداف و فرضـــیات تحقیق، برای بررسی تـــأثیر برنامـــه‌ریـــزی آبیاری و مدیریت زراعی بر عملکرد گیاه گندم لازم ا ست اطلاعات مورد نیاز از سطح مزارع منتخب اندازه‌گیری شـــود. در این تحقیق ۱۲ مزرعه گندم به‌صـــورت تصـــادفی در شـــبکه آبیاری شـــیب‌آب و پشـــت‌آب (منطقه مرود مطالعه) انتخاب شـــد (شـــکل ۱). مزارع انتخابی از مزارع غالب منطقه مورد مطالعه بودند که در این تحقیق از آن‌هـا بـه‌عنوان مزارع پـایش نـام برده می‌شـــود. این مزارع غالباً از نظر اقلیم، نوع کشـــت، بافت خاک، منبع تأمین آب و شـــیوه آبیاری مشـــابه هســـتند. متغیرهای اندازه‌گیری در مزارع شـامل بافت خاک، سـطح زیر کشـــت، شـــوری خاک، عملکرد، حجم و دبی آب ورودی به مزرعه بودند. دبی ورودی به مزارع با استفاده از پارشال فلوم و مولینه در هر نوبت آبیاری اندازه‌گیری شد.

تفاوت برخی از متغیرهای اندازه‌گیری شـــده در مزارع با اندازه‌گیری مدت زمان آبیاری، دبی آبیاری، حجم آب ورودی به مزرعه تعیین و ســـرانجام عمق آب آبیاری در هر نوبت آبیاری در هر یک از مزارع منتخب تعیین و به‌عنوان داده ورودی به مدل داده شـــد. پس از پایان دوره ر شد، مقدار بهره‌وری آب بر ا ساس مقادیر عملکرد و کل آب ورودی به مزارع منتخب با استفاده از رابطه دو محاسبه شد:

$$CWP_i = \frac{Y_i}{I_i} \qquad (۲)$$

که در آن:

CWP_i بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)، Y_i عملکرد (کیلوگرم بر هکتـار)، I_i حجم آب ورودی بـه مزرعـه منتخب و اندیس i شـــماره مزرعه منتخب اســـت. مقدار برخی از متغیرهای اندازه‌گیری شـــده در مزارع پایش در جدول دو ارائه شد.

متغیرهای گیاهی مورد نیاز مـدل SWAP که در فصـــل رشـــد اندازه‌گیری شـــدند عبارت بودند از: تاریخ کشـــت، تاریخ جوانه‌زنی، تاریخ برداشـــت، عمق ریشـــه، ارتفاع بوته و شـــاخص ســـطح برگ که در چهار نوبت در فواصل زمانی مشخص اندازه‌گیری شدند (جدول ۳).

جدول ۲- مقدار متغیرهای اندازه‌گیری شده در مزارع منتخب

نام مزرعه	تعداد دفعات آبیاری	کل آب ورودی به مزرعه (مترمکعب در هکتار)	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	هدایت الکتریکی خاک (دسی‌زیمنس بر متر)	بافت خاک
Fi		W	Y	CWP	EC	
F_1	۴	۳۹۸۰	۱۱۷۶	۰/۳۰	۲/۷	loam
F_2	۴	۳۱۱۳	۱۱۱۱	۰/۳۶	۲/۸	loam
F_3	۴	۳۰۸۷	۱۲۵۰	۰/۴۰	۳/۵	silty clay loam
F_4	۴	۳۹۶۷	۱۵۳۸	۰/۳۹	۲/۵	sand
F_5	۴	۲۷۵۰	۱۱۷۲	۰/۴۳	۲/۵	sandy loam
F_6	۴	۴۲۰۰	۱۴۸۲	۰/۳۵	۳/۵	loam
F_7	۴	۳۹۹۰	۱۶۰۰	۰/۴۰	۵/۳	silt loam
F_8	۴	۳۹۰۸	۱۵۶۲	۰/۴۰	۳	sand
F_9	۴	۲۹۵۰	۱۴۷۸	۰/۵۰	۳/۵	sandy loam
F_{10}	۴	۳۵۰۷	۱۵۵۶	۰/۴۴	۳/۵	sandy loam
F_{11}	۴	۳۱۳۳	۱۵۷۵	۰/۵۰	۳/۴	silt loam
F_{12}	۴	۳۸۵۶	۱۹۱۶	۰/۵۰	۴	loam

جدول ۳- مقدار متغیرهای گیاهی اندازه‌گیری شده در مزارع منتخب

شماره مزرعه	مرحله اول			مرحله دوم			مرحله سوم			مرحله چهارم		
Fi	طول ریشه	ارتفاع ساقه	شاخص سطح برگ	طول ریشه	ارتفاع ساقه	شاخص سطح برگ	طول ریشه	ارتفاع ساقه	شاخص سطح برگ	طول ریشه	ارتفاع ساقه	شاخص سطح برگ
F_1	۴/۲	۶/۲	۰/۱	۱۸	۳۸/۶	۱/۷	۲۲	۶۵/۳	۲	۲۷/۶	۹۸	۰/۹
F_2	۳/۶	۵/۸	۰/۲	۱۷/۵	۳۶/۶	۱/۳	۲۴	۶۲/۷	۲/۲	۲۸	۱۰۰	۰/۹
F_3	۳/۵	۵/۵	۰/۱	۱۸	۳۷/۳	۱/۵	۲۰	۶۵/۶	۲/۳	۲۸/۵	۹۷	۰/۹
F_4	۳/۹	۳/۹	۰/۲	۱۶/۵	۴۲/۵	۱/۷	۲۱	۶۷/۲	۲/۲	۲۹	۱۰۲	۱/۲
F_5	۴	۳/۶	۰/۱	۱۸	۳۸/۶	۲	۲۴	۶۵/۶	۲	۲۸	۱۰۸	۱
F_6	¾	۴/۹	۰/۱	۱۸/۵	۳۲/۵	۲/۲	۲۴	۶۰/۵	۲/۴	۲۹	۱۰۰	۱
F_7	۳/۱	۶/۱	۰/۲	۱۶	۴۰	۱/۷	۲۵	۶۳/۶	۲	۳۰	۱۰۰	۱/۱
F_8	۳/۳	۵/۸	۰/۱	۱۷/۵	۳۳/۴	۱/۵	۲۱	۷۲	۲/۳	۲۸/۶	۹۹	۱
F_9	۳	۵/۴	۰/۲	۱۶	۴۴	۱/۷	۲۳	۶۶	۲	۳۱	۱۰۰	۱
F_{10}	۳/۸	۶	۰/۱	۱۹	۳۲	۱/۷	۲۴	۶۳/۴	۲	۳۱	۱۰۱	۱
F_{11}	۲/۳	۵/۹	۰/۱	۱۸	۳۳	۱/۵	۲۵	۶۰/۷	۲/۱	۳۰	۹۵	۱
F_{12}	۴/۴	۴/۳	۰/۲	۱۸	۳۸/۳	۱/۷	۲۳	۷۰	۲	۳۰	۹۸	۱/۲

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

در این تحقیق برای واسنجی مدل SWAP، ۵۰ درصد مزارع پایش انتخاب شد و با استفاده از اطلاعات این مزارع مدل اجرا و عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد اندازه‌گیری شده مقایسه شد. در حالتی که عملکرد شبیه‌سازی شده با عملکرد اندازه‌گیری شده تطبیق نداشت شاخص‌های مورد نظر در دامنه مجاز بر اساس داده‌های اندازه‌گیری یا جمع‌آوری شده تغییر داده شدند. این مراحل تا آنجا تکرار شد که نتایج عملکرد شبیه‌سازی شده بر عملکرد اندازه‌گیری با دقت قابل قبولی منطبق شود. برای صحت‌سنجی مدل، با استفاده از مدل واسنجی و به کارگیری اطلاعات اندازه‌گیری شده در ۵۰ درصد باقی‌مانده مزارع پایش شبیه‌سازی و با عملکرد اندازه‌گیری شده مقایسه شدند.

بررسی صحت برآورد و ارزیابی مدل

برای بررسی کارایی مدل، از شاخص‌های ارزیابی ازجمله ضریب تعیین (R^2[1])، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE[2]) و ضریب مقدار باقیمانده (CRM[3]) استفاده شد. ضریب R^2 نشان‌دهنده چگونگی برازش مدل و RMSE نشان‌دهنده صحت مدل هستند. هر اندازه مقدار RMSE کمتر و میزان R^2 بیشتر باشد، مدل اعمال شده دارای صحت برآورد بیشتری خواهد بود. شاخص CRM نشان‌دهنده مقادیر شبیه سازی شده خیلی بزرگ یا خیلی کوچک نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده است. در حالت ایده‌آل چنانچه تمامی مقادیر پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده با هم برابر شوند مقدار این شاخص برابر صفر می‌شود. روابط محاسبه آن‌ها به‌شرح زیر است (چای و دراکسلر، ۲۰۱۴؛ مینزنی و مک برتنی، ۲۰۰۷):

$$R^2 = \frac{(O_i \cdot P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} {O_i}^2 \cdot \sum_{i=1}^{n} {P_i}^2} \quad (۳)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{n}} \quad (۴)$$

$$CRM = \frac{(\sum_{i=1}^{n} O_i - \sum_{i=1}^{n} P_i)}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad (۵)$$

در روابط بالا O_i مقدار اندازه‌گیری شده، P_i مقدار تخمین‌زده شده و n تعداد نقاط اندازه‌گیری شده است.

گزینه‌های برنامه‌ریزی آبیاری

برای ارزیابی مدیریت آبیاری موجود در منطقه و برنامه‌ریزی مناسب آبیاری در شرایط مختلف مزرعه‌ای و بررسی تأثیر تغییرات کمی آب آبیاری بر بهره‌وری مصرف آب از مدل واسنجی شده SWAP استفاده شد. به‌طورکلی پنج گزینه بررسی شدند (جدول ۴):

بخش اول: تاریخ‌ها و عمق آبیاری بر اساس برنامه آبیاری موجود در منطقه به مدل داده و به‌عنوان گزینه مبنا در نظر گرفته شد. بر اساس اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای بهره‌برداران برای آبیاری گندم چهار نوبت آبیاری انجام می‌دهند و در هر نوبت ۱۰۰ میلی‌متر آب آبیاری بکار برده می‌شود.

بخش دوم: فرض شد که امکان تغییر تاریخ و عمق آب آبیاری در منطقه وجود ندارد و زارع فقط می‌تواند تعدادی از نوبت‌های آبیاری را حذف کند و یا امکان دارد به علت محدودیت منابع آب، امکان آبیاری در یک یا دو نوبت از آبیاری فراهم نشده باشد. گزینه‌های حذف ترکیب‌های مختلف نوبت‌های آبیاری مورد بررسی قرارگرفت و بهترین گزینه حذف نوبت آبیاری بر اساس عملکرد محصول و میزان بهره‌وری مصرف آب برای منطقه مورد مطالعه در این بخش پیشنهاد شد.

بخش سوم: فرض شد که امکان تغییر تاریخ آبیاری‌ها در منطقه وجود ندارد و آب کافی در دسترس نیست ولی زارع می تواند با مدیریت زراعی مناسب عمق آب آبیاری را به میزان ۲۰ درصد کاهش دهد؛ به عبارت دیگر در تمام گزینه های بخش اول و دوم کاهش ۲۰ درصدی عمق آب آبیاری بررسی و بهترین گزینه پیشنهاد شد.

بخش چهارم: در این گزینه فرض شد که آب کافی در دسترس و قابلیت انعطاف در مدیریت توزیع آب از طریق امکان تغییر تاریخ آبیاری ها برای بهره‌برداران فراهم بوده و عمق آب آبیاری ثابت در نظر گرفته شد. با توجه به مقدار حداکثر تخلیه مجاز گیاه گندم (۰/۶۵) از گزینه مدیریتی تخلیه مجاز از کل آب در دسترس (TAW) برای ارائه تقویم آبیاری توسط مدل استفاده شد (اکبری و همکاران، ۱۳۹۰).

بخش پنجم: با فرض اینکه عمق و تاریخ های آبیاری در منطقه مورد مطالعه قابل تغییر است، برنامه آبیاری برای دو عمق آب آبیاری ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر (عمق آبیاری مرسوم در منطقه) بر اساس مقادیر تنش مجاز روزانه (Tre) (۰/۴ تا ۰/۹۹) توسط مدل SWAP تعیین شد و بهترین برنامه آبیاری برای منطقه مطالعاتی از بین گزینه‌های پیشنهادی مدل انتخاب شد.

[1] correlation coefficient
[2] Root Mean Square Error
[3] Coefficient of Residual Mass

جدول ۴- مشخصات گزینه‌های مختلف آبیاری در شرایط موجود و بهبود مدیریت زراعی و آبی در منطقه مورد مطالعه

	فرض‌ها		سناریوها	آبیاری اول (میلی‌متر)	سایر آبیاری‌ها (میلی‌متر)	شرح سناریو
بخش اول	تاریخ و عمق آب آبیاری ثابت		۱	۱۰۰	۱۰۰	سناریوی مبنا
بخش دوم	حفظ تاریخ‌ها و میزان عمق آب آبیاری		۲	۱۰۰	۱۰۰	حذف آبیاری دوم در شرایط موجود
			۳	۱۰۰	۱۰۰	حذف آبیاری سوم در شرایط موجود
			۴	۱۰۰	۱۰۰	حذف آبیاری دوم و چهارم در شرایط موجود
بخش سوم	کاهش عمق آب آبیاری‌ها به‌جز آبیاری اول		۵	۱۰۰	۸۰	کاهش ۲۰ درصدی عمق آب سایرها آبیاری در سناریوی ۱
			۶	۱۰۰	۸۰	کاهش ۲۰ درصدی عمق آب سایرها آبیاری در سناریوی ۲
			۷	۱۰۰	۸۰	کاهش ۲۰ درصدی عمق آب سایرها آبیاری در سناریوی ۳
			۸	۱۰۰	۸۰	کاهش ۲۰ درصدی عمق آب سایرها آبیاری در سناریوی ۴
بخش چهارم	عمق آبیاری، تعداد و تاریخ های آبیاری قابل تغییر		۹	۱۰۰	۱۰۰	خاک آب + انجام ده آبیاری (در تاریخ پیشنهادی مدل)
			۱۰	۹۰	۹۰	خاک آب + انجام ده آبیاری (در تاریخ پیشنهادی مدل)
			۱۱	۸۰	۸۰	خاک آب + انجام ده آبیاری (در تاریخ پیشنهادی مدل)
			۱۲	۷۰	۷۰	خاک آب + انجام یازده آبیاری (در تاریخ پیشنهادی مدل)
			۱۳	۶۰	۶۰	خاک آب + انجام دوازده آبیاری (در تاریخ پیشنهادی مدل)
			۱۴	۴۰	۴۰	خاک آب + انجام پانزده آبیاری (در تاریخ پیشنهادی مدل)
بخش پنجم	عمق آبیاری ثابت، تعداد و تاریخ آبیاری بر اساس پیشنهاد مدل		۱۵	۱۰۰	۱۰۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۵۰ درصد
			۱۶	۱۰۰	۱۰۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۶۰ درصد
			۱۷	۱۰۰	۱۰۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۷۰ درصد
			۱۸	۱۰۰	۱۰۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۸۰ درصد
			۱۹	۱۰۰	۱۰۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۹۰ درصد
			۲۰	۱۰۰	۱۰۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۹۵ درصد
			۲۱	۸۰	۸۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۵۰ درصد
			۲۲	۸۰	۸۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۶۰ درصد
			۲۳	۸۰	۸۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۷۰ درصد
			۲۴	۸۰	۸۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۸۰ درصد
			۲۵	۸۰	۸۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۹۰ درصد
			۲۶	۸۰	۸۰	نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۹۵ درصد

نتایج و بحث

پس از انتخاب مزارع، داده های مورد نیاز این تحقیق در مزارع منتخب اندازه‌گیری و یادداشت‌برداری شد (جدول ۲). بافت خاک غالب در مزارع پایش از سبک (شنی) تا به نسبت سنگین (سیلتی رسی لوم) بود؛ بنابراین بر اساس نتایج بافت خاک مزارع پایش، بافت خاک منطقه به‌طورکلی لومی در نظر گرفته شد. تغییرات هدایت الکتریکی خاک های مطالعه شده، برابر ۲/۵ تا ۵/۳ دسی‌زیمنس بر متر (جدول ۲)، کل آب ورودی به مزرعه، ۲۷۵۰ تا ۴۷۰۰ مترمکعب بر هکتار، عملکرد محصول ۱۱۱۱ تا ۱۹۱۶ کیلوگرم بر هکتار و بهره‌وری آب ۰/۳۰ تا ۰/۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود (جدول ۵).

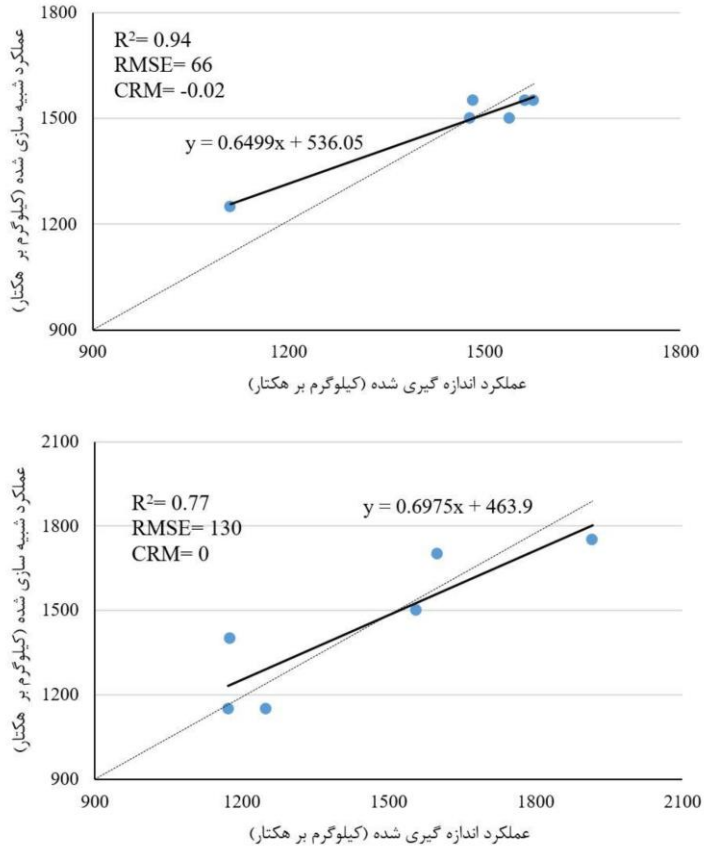
جدول ۵- خلاصه آمار توصیفی متغیرهای اندازه‌گیری شده در مزارع منتخب

پارامتر	کل آب ورودی به مزرعه (مترمکعب در هکتار) W	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار) Y	بهره‌وری آب (کیلوگرم بر مترمکعب) CWP	هدایت الکتریکی خاک (دسی‌زیمنس بر متر) EC
میانگین	۳۵۳۶	۱۴۵۱	۰/۴۱	۳/۳
حداقل	۲۷۵۰	۱۱۱۱	۰/۳۰	۲/۵
حداکثر	۴۲۰۰	۱۹۱۶	۰/۵۰	۵/۳
انحراف معیار	۵۰۲	۲۳۲	۰/۰۶	۰/۷۷

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل، مزارع به دو قسمت تقسیم شدند. از ۵۰ درصد مزارع (۶ مزرعه منتخب) برای واسنجی و ۵۰ درصد دیگر (۶ مزرعه) برای صحت‌سنجی استفاده شد (جدول ۶). شکل ۲-الف نتایج حاصل از واسنجی مدل در پیش‌بینی عملکرد را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل در شکل ۲-ب آورده شده است. نتایج شاخص‌های آماری واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAP ارائه شده در شکل دو نشان داد مدل صحت قابل قبولی دارد و می‌توان از آن به‌عنوان ابزاری برای بررسی عملکرد محصول و برنامه‌ریزی آبیاری استفاده کرد. مقایسه شاخص‌های ارزیابی مدل نشان داد که مقدار ضریب تعیین داده‌ها (R^2) برای واسنجی و صحت سنجی مدل به ترتیب ۰/۹۴ و ۰/۷۷ تعیین شد که بیانگر همبستگی بالا بین مقادیر عملکرد اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAP است. همچنین ریشه میانگین مربعات خطاها (RMSE) برای واسنجی و صحت سنجی مدل به ترتیب ۶۶ و ۱۳۰ کیلوگرم بر هکتار به دست آمد. روشن است عملکرد گیاه به عواملی مانند میزان کود، اثر آفات و بیماری‌ها، تراکم علف‌های هرز و مدیریت آبیاری بستگی دارد، ولی در شبیه سازی‌ها از این محدودیت‌ها صرف‌نظر شده است. مقدار منفی CRM نیز نشان می‌دهد مدل SWAP مقدار عملکرد را حدود دو درصد بیشتر از مقادیر اندازه‌گیری شده برآورد می‌کند؛ بنابراین می‌توان گفت مدل SWAP توانایی دارد مقادیر عملکرد را با صحت قابل قبولی برآورد کند. اکبری و همکاران (۱۳۸۷) نیز نشان دادند که این مدل قابلیت خوبی برای پیش‌بینی و مدیریت آبیاری در شرایط متفاوت آب و هوایی دارد که با نتایج این تحقیق مطابق است.

جدول ۶- مقایسه متغیرهای واسنجی و صحت سنجی شده مدل SWAP

واسنجی			صحت سنجی		
شماره مزرعه	ضریب Ky	عملکرد اندازه‌گیری شده (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد شبیه‌سازی شده (کیلوگرم در هکتار)	شماره مزرعه	ضریب Ky	عملکرد اندازه‌گیری شده (کیلوگرم در هکتار)	عملکرد شبیه‌سازی شده (کیلوگرم در هکتار)
F_2	۰/۲۵	۱۱۱۱	۱۲۵۰	F_1	۰/۲۴	۱۱۷۶	۱۴۰۰
F_4	۰/۳۱	۱۵۳۸	۱۵۰۰	F_3	۰/۲۵	۱۲۵۰	۱۱۵۰
F_6	۰/۳۰	۱۴۸۲	۱۵۵۰	F_5	۰/۳۲	۱۶۰۰	۱۷۰۰
F_8	۰/۳۱	۱۵۶۲	۱۵۵۰	F_7	۰/۳۸	۱۹۱۶	۱۷۵۰
F_9	۰/۳۰	۱۴۷۸	۱۵۰۰	F_{10}	۰/۲۳	۱۱۷۲	۱۱۵۰
F_{11}	۰/۳۲	۱۵۷۵	۱۵۵۰	F_{12}	۰/۳۱	۱۵۵۶	۱۵۰۰



شکل ۲- نتایج واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) مدل SWAP در پیش‌بینی عملکرد

تأثیر تغییرات کمی آب آبیاری بر عملکرد محصول

نتایج بیلان آب در خاک و پارامترهای مختلف آن برای تمامی گزینه‌های تعریف شده در بخش مواد و روش‌ها (جدول ۴) برای هر گزینه در جدول هفت نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد گزینه مبنا از مجموع ۴۰۰ میلی‌متر آب قابل دسترس، ۱۸۱ میلی‌متر به مصرف واقعی گیاه (تعرق واقعی) و حدود ۵۴ درصد آب قابل دسترس به شکل‌های مختلف ازجمله نفوذ عمقی (۱۱۰ میلی‌متر) از دسترس خارج شده است.

جدول هفت همچنین نشان می‌دهد که در شرایط موجود از آب قابل دسترس به شکل مناسبی بهره‌برداری نمی‌شود و نیاز است با راهکارهای کاربردی برای بهبود بهره‌وری آب اقدام شود. محمدی و همکاران (۱۳۹۹) نیز در تحقیق خود در شبکه آبیاری سد سیستان به نتایج مشابهی دست یافتند. روشن است که آبیاری به میزان کفایت و در زمان مورد نیاز بهترین گزینه خواهد بود. اما این راهکار با شرایط واقعی کشاورزی موجود در منطقه مطابقت ندارد و لازم است که با توجه به شرایط واقعی موجود از راهکاری نزدیک به شرایط بهینه انتخاب شود. در بخش دوم از این پژوهش فرض شد که کشاورز امکان حذف تعدادی از نوبت های آبیاری را دارد. این افراد، برای کاهش آب آبیاری و افزایش سودمندی آب فقط می‌توانند تعدادی از دفعات آبیاری را که اهمیت کمتری دارند را حذف کنند (گزینه‌های ۲ تا ۴). نتایج تجزیه و تحلیل‌ها نشان داد که از نظر بهره‌وری آب تفاوت فاحشی بین گزینه‌ها وجود ندارد اما با کاهش ۵۰ درصد آب آبیاری، عملکرد گیاه حدود ۴۰ در صد کاهش نشان داد. این یافته‌ها نشان داد که در شرایط تنش خشکی و بسته به زمان وقوع آن و بسته به میزان آب قابل دسترس امکان دستیابی به محصول مناسب با تنش آبی وجود دارد.

در بخش سوم امکان دارد به علت خشکسالی یا محدودیت منابع آب، عمق آبیاری کاهش و بعضی از نوبت های آبیاری برای کشاورزان حذف شده باشد (گزینه ۵ تا ۸). همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد گزینه ۵ (کاهش ۲۰ درصدی عمق آب آبیاری در گزینه مبنا) در این بخش بیشترین بهره‌وری آب را داشته (۰/۴۶) هرچند میزان محصول نسبت به گزینه یک ۹۰ کیلوگرم در هکتار کاهش نشان داد اما بهره‌وری آب افزایش نشان داد. همچنین میزان نفوذ عمقی در این گزینه حدود ۵۰ درصد نسبت به گزینه مبنا کاهش داشت از این‌رو از گزینه‌های ارائه شده در این بخش می‌توان بسته به میزان آب قابل دسترس برای شرایط کم آبی و سال‌های خشک‌سالی به‌عنوان یک راهنمای آبیاری با بهره‌وری آب مناسب استفاده کرد. هرچند در گزینه ۵ در عمل کم‌آبیاری وجود داشته است اما با کاهش ۱۵ درصد آب آبیاری، عملکرد محصول ۵ درصد کاهش و کارایی مصرف آب ۱۲ درصد افزایش یافته است. دروگرز و ترابی (۲۰۰۲) نیز در مطالعه‌ای با استفاده از مدل شبیه سازی SWAP روی مدیریت مصرف آب در شبکه‌های آبیاری در حوضه زاینده‌رود، بهبود برنامه‌ریزی آبیاری را برای افزایش عملکرد محصول و کارایی مصرف آب توصیه کردند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد. این محققان همچنین کم‌آبیاری و کاهش سطح زیر کشت را در شرایط کم‌آبی و خشک‌سالی پیشنهاد کرده‌اند.

روشن است که عملکرد محصول متأثر از عواملی ازجمله تغییرات کمی آب آبیاری است. زمان کاربرد آب آبیاری و متناسب بودن آن با نیاز گیاه اهمیت زیادی دارد. در ادامه تأثیر تغییرات کمی آب آبیاری بر عملکرد محصول گندم در شبکه آبیاری سیستان توسط مدل SWAP مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در بخش چهارم گزینه‌های این پژوهش عمق آبیاری‌ها در هر گزینه ثابت و تاریخ‌های آبیاری قابل تغییر و برابر تاریخ پیشنهادی مدل در نظر گرفته شد (گزینه ۹ تا ۱۴). در این گزینه‌ها به ترتیب عمق آبیاری کم شد تا شرایطی که امکان آبیاری با عمق کم وجود داشته باشد و در صورت امکان نتیجه مطلوب به کشاورزان توصیه شود. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد در این بخش هرچه عمق آبیاری کاهش می‌یابد و دور آبیاری کوتاه‌تر می‌شود بهره‌وری آب افزایش می‌یابد.

نتایج بررسی این گزینه‌ها نشان می‌دهد که آبیاری در زمان مورد نیاز بیشترین بهره‌وری را دارد. در گزینه ۱۴ با استفاده از ۶۴۰ میلی‌متر آب و آبیاری به میزان ۴۰ میلی‌متر در هر نوبت، عملکرد محصول دو برابر بیشتر شد. ضمن اینکه کارایی مصرف آب (۰/۵۳) نسبت به گزینه مبنا حدود ۳۰ درصد افزایش نشان داد و مقدار نفوذ عمقی به شدت کاهش یافته و نزدیک به صفر شد، در نتیجه به‌عنوان گزینه برتر در کل گزینه‌های مورد بررسی انتخاب و برای شرایطی که امکان آبیاری با عمق کم (۴۰ میلی‌متر در هر نوبت) در زمان مناسب فراهم باشد و در شرایط نرمال آبی قابل توصیه است. اگرچه برای فراهم نمودن امکان آبیاری با عمق کم (حدود ۴۰ میلی‌متر در هر نوبت آبیاری) به مدیریت زراعی بالایی نیاز است و بدون انجام تسطیح مناسب و اقدامات به زراعی قابل انجام نخواهد بود ولی با اندک اصلاحات به زراعی دستیابی به استفاده از سناریوهای ۱۱ و ۱۲ به‌سادگی امکان‌پذیر است.

در بخش پنجم گزینه های این پژوهش زمان آبیاری بر اساس درصدی از نسبت تعرق واقعی به تعرق پتانسیل مشخص شد (گزینه ۱۵ تا ۲۶). در این گزینه‌ها مقدار آب مصرفی و به دنبال آن مقدار نفوذ عمقی نسبت به گزینه مبنا به شدت افزایش پیدا کرد. اگرچه عملکرد محصول نزدیک به سه برابر افزایش داشت (گزینه ۲۱) ولی مقدار بهره‌وری آب حدود ۵۰ درصد کاهش یافت. این گزینه ها به‌ویژه گزینه ۲۱ (نسبت تعرق واقعی به پتانسیل ۵۰ درصد و عمق آب آبیاری ۸۰ میلی‌متر) را می‌توان برای سال‌های پرآبی به کشاورزان منطقه معرفی کرد.

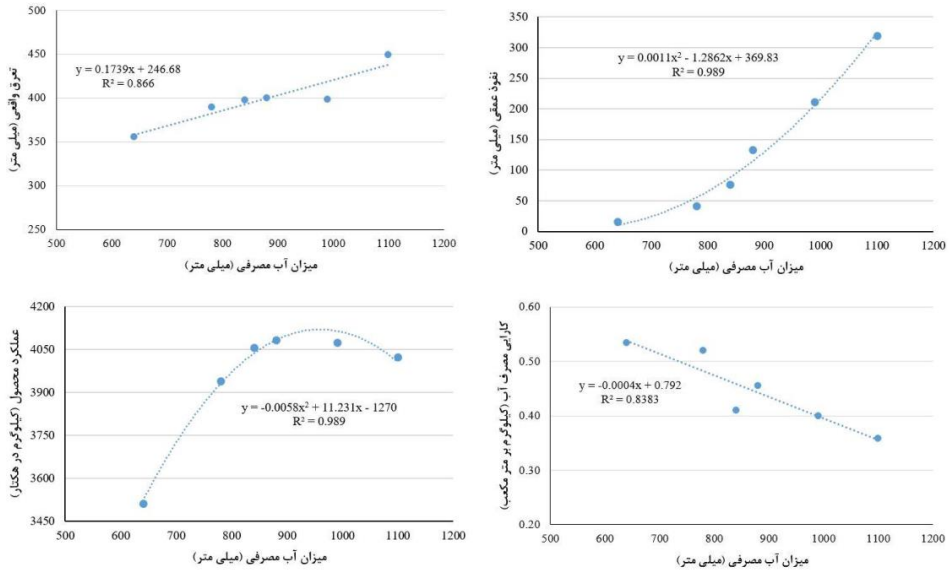
جدول ۷- نتایج متغیرهای مختلف بیلان آب برای گزینه‌های مختلف آبیاری گندم با استفاده از مدلSWAP

	فرض‌ها	گزینه‌ها	آبیاری	نفوذ عمقی	تعرق واقعی	تعرق پتانسیل	تبخیر واقعی	تبخیر پتانسیل	عملکرد	بهره‌وری آب
					میلی‌متر				کیلوگرم بر هکتار	کیلوگرم بر مترمکعب
بخش اول	تاریخ و عمق آب آبیاری ثابت	۱	۴۰۰	۱۱۰	۱۸۱	۴۶۵	۱۶۹	۱۰۸۳	۱۶۴۰	۰/۴۱
بخش دوم	حفظ تاریخ‌ها و میزان عمق آب آبیاری (امکان حذف نوبت‌های آبیاری)	۲	۳۰۰	۹۵	۱۱۲	۴۶۵	۱۱۶	۱۰۸۳	۱۲۰۴	۰/۴۴
		۳	۳۰۰	۱۱۴	۹۶	۴۶۵	۱۳۰	۱۰۸۳	۹۲۱	۰/۳۲
		۴	۲۰۰	۹۷	۸۵	۴۶۵	۱۰۹	۱۰۸۳	۹۷۵	۰/۴۲
بخش سوم	کاهش عمق آب آبیاری‌ها به‌جز آبیاری اول	۵	۳۴۰	۶۸	۱۷۲	۴۶۵	۱۵۹	۱۰۸۳	۱۵۵۰	۰/۴۶
		۶	۲۶۰	۹۱	۱۰۵	۴۶۵	۱۱۲	۱۰۸۳	۱۱۴۶	۰/۴۶
		۷	۲۶۰	۹۸	۸۹	۴۶۵	۱۲۷	۱۰۸۳	۸۷۵	۰/۳۵
		۸	۱۸۰	۹۰	۸۰	۴۶۵	۱۰۴	۱۰۸۳	۹۳۸	۰/۴۴
بخش چهارم	عمق آبیاری ثابت و تاریخ‌های آبیاری قابل تغییر	۹	۱۱۰۰	۳۲۰	۴۴۹	۴۶۰	۳۷۲	۱۰۱۲	۴۰۲۵	۰/۳۶
		۱۰	۹۹۰	۲۱۲	۳۹۹	۴۶۵	۴۰۲	۱۰۳۶	۴۰۷۰	۰/۴۰
		۱۱	۸۸۰	۱۳۳	۴۰۰	۴۶۵	۳۹۰	۱۰۶۷	۴۰۸۳	۰/۴۵
		۱۲	۸۴۰	۷۷	۳۹۷	۴۶۵	۳۷۵	۱۰۳۶	۴۰۶۰	۰/۴۱
		۱۳	۷۸۰	۴۲	۳۸۹	۴۶۵	۳۶۱	۱۰۴۲	۳۹۴۰	۰/۵۲
		۱۴	۶۴۰	۱۶	۳۵۵	۴۶۵	۳۳۱	۱۰۳۶	۳۵۲۰	۰/۵۳
بخش پنجم		۱۵	۱۰۰۰	۳۹۳	۳۸۱	۴۶۵	۳۹۰	۱۱۰۹	۳۸۲۰	۰/۳۷
		۱۶	۱۳۰۰	۴۱۰	۳۹۷	۴۶۵	۴۸۳	۱۱۰۹	۴۰۲۰	۰/۳۲
		۱۷	۱۶۰۰	۵۶۶	۴۰۹	۴۶۵	۵۹۰	۱۱۱۰	۴۱۹۰	۰/۲۷
		۱۸	۱۹۰۰	۷۷۵	۴۲۰	۴۶۵	۷۰۶	۱۱۱۰	۴۳۳۰	۰/۲۳
		۱۹	۲۳۰۰	۹۳۴	۴۲۸	۴۶۵	۸۳۳	۱۱۱۰	۴۴۶۰	۰/۱۹
		۲۰	۲۷۰۰	۱۳۵۰	۴۲۹	۴۶۵	۹۱۵	۱۱۱۰	۴۴۷۰	۰/۱۷
		۲۱	۲۱۶۰	۱۲۱	۴۴۵	۴۶۵	۹۱۲	۱۱۰۹	۴۷۰۰	۰/۲۲
		۲۲	۱۰۴۰	۱۹۳	۴۰۲	۴۶۵	۴۷۴	۱۱۰۹	۴۱۰۰	۰/۳۹
		۲۳	۱۲۰۰	۲۸۱	۴۱۷	۴۶۵	۵۸۵	۱۱۱۰	۴۲۹۰	۰/۳۴
		۲۴	۱۵۲۰	۴۲۴	۴۲۹	۴۶۵	۷۰۳	۱۱۱۰	۴۴۸۰	۰/۲۹
		۲۵	۱۸۴۰	۶۳۰	۴۴۲	۴۶۵	۸۳۱	۱۱۱۰	۴۶۵۰	۰/۲۵
		۲۶	۲۱۶۰	۷۹۷	۴۴۵	۴۶۵	۹۱۳	۱۱۱۰	۴۷۰۰	۰/۲۲

به‌طورکلی بهترین نتایج مدل ازنظر بهره‌وری آب در گزینه‌های بخش چهارم (گزینه ۹ تا ۱۴) دیده می‌شود و به‌خوبی می‌توان تغییرات کمی آب آبیاری بر پارامترهای بیلان آب در خاک را مشاهده کرد (شکل ۳). نتایج و روند تغییرات پارامترهای بیلان آب در خاک نشان می‌دهد که روند تغییرات میزان عملکرد محصول و نفوذ عمقی با میزان آب کاربردی از یک تابع درجه دوم تبعیت می‌کند و روند تغییرات تعرق واقعی و بهره‌وری آب با میزان آب مصرفی از یک تابع درجه اول تبعیت می‌کند که با نتایج بررسی‌های دیگر محققان ازجمله گارسیا و همکاران (۲۰۰۹)، دروگرز و ترابی (۲۰۰۳) و اکبری (۱۳۹۰) مطابقت دارد. نتایج بررسی گزینه‌های مختلف نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد با کاربرد ۸۸۰ میلی‌متر آب به دست آمده است اما بیشترین بهره‌وری آب و بیشترین درصد افزایش کارایی مصرف آب نسبت به شرایط موجود بهره‌برداری (گزینه مبنا)، مربوط

به استفاده از ۶۴۰ میلی‌متر آب آبیاری است (گزینه ۱۴). این شاخص با مقادیر آب مصرفی نسبت عکس دارد با افزایش آب مصرفی به شدت کاهش می‌یابد.

روند تغییرات نفوذ عمقی هم بیانگر آن است که در مقادیر کمتر از ۶۴۰ میلی‌متر آب کاربردی، میزان نفوذ عمقی کم (۱۶ میلی‌متر) است؛ اما با افزایش میزان آب مصرفی، نفوذ عمقی به‌صورت خطی و با شیب نسبتاً زیاد افزایش می‌یابد. از این رو میزان ۶۴۰ میلی‌متر آب مصرفی به‌عنوان عمق فعالیت آبیاری محصول گندم برای منطقه مطالعه شده در نظر گرفته شد. ولی در شرایط که هیچگونه محدودیت آب در منطقه وجود نداشته باشد، می‌توان از دیگر گزینه‌های ارائه شده در جدول شش به عنوان راهنما استفاده کرد.



شکل ۳- نتایج تغییرات کمی آب آبیاری (سناریوهای ۹ تا ۱۴) بر پارامترهای بیلان آب در خاک در آبیاری گندم با مدل SWAP

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که از مدل SWAP می‌توان برای شبیه‌سازی جریان آب در خاک، برنامه‌ریزی آبیاری، بیلان آب در خاک و رشد محصول در شرایط متفاوت قابلیت دسترسی به آب بهره گرفت و نتایج رضایت‌بخش به دست آورد. این نتایج با نتایج تحقیقات سایر محققیان ازجمله فراهانی و همکاران (۲۰۰۹)، رائز و همکاران (۲۰۰۹)، حسن‌لی و همکاران (۲۰۱۵) و اکبری (۱۳۹۰) مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

بهبود مدیریت آبیاری در مزارع از طریق کاربرد عمق مناسب آبیاری، برنامه‌ریزی صحیح آبیاری و بهبود مدیریت زراعی در شرایط مختلف امکان‌پذیر است. برای این منظور در تحقیق حاضر گزینه های مختلفی با کمک مدل SWAP برای آبیاری مزارع گندم اراضی دشت سیستان تعریف شد و نتایج آن‌ها در رابطه با عملکرد محصول تولیدی و بهره‌وری آب مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد مقدار آب مصرفی و تعداد دفعات آبیاری فعلی مزارع کافی نبوده و باعث کاهش بهره‌وری و عملکرد محصول شده است. بررسی نتایج نشان داد که آبیاری در زمان مورد نیاز بیشترین بهره وری را در پی خواهد داشت. به‌عنوان نمونه انتظار می‌رود آبیاری به میزان ۶۴۰ میلیتر و مقدار ۴۰ میلی‌متر در هر نوبت در زمان مورد نیاز، عملکرد محصول را تا دو برابر افزایش داده و بهره وری آب نیز ۳۰ درصد افزایش یابد. همچنین در این گزینه مقدار نفوذ عمقی به

شدت کاهش یافته و نزدیک به صفر شده است از این‌رو برای شرایطی که امکان آبیاری با عمق کم (۴۰ میلی‌متر در هر نوبت) در زمان مناسب فراهم است، در شرایط نرمال آبی قابل توصیه است. از آنجا که منابع آب در دشت سیستان محدود، میزان آب کاربردی کشاورزان به‌علل مختلف ازجمله توزیع گردشی آب بین حقابه‌داران، نفوذپذیری بالای خاک در آبیاری اول و ناآگاهی زارعین از میزان آب مورد نیاز گیاه، بیش از اندازه است، توصیه می‌شود شیوه‌های بهبود مدیریت آبیاری و مدیریت زراعی با توجه به آب قابل دسترس در شبکه آبیاری به کشاورزان آموزش داده شود تا آن‌ها خود به توزیع آب، متناسب با نیاز واقعی گیاه و آبیاری در زمان مناسب و به میزان کفایت روی آورند.

فهرست منابع

۱. اکبری م، دهقانی سانیچ ح و میرلطیفی م، ۱۳۸۷. تأثیر اصلاح تقویم آبیاری در بهره‌وری آب در کشاورزی. صفحه‌های ۲۳ تا ۲۵. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب در ایران. مهرماه، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز.

۲. اکبری م، ۱۳۹۰. بیلان آب خاک و عملکرد محصول گندم با استفاده از مدل شبیه سازی AquaCrop (مطالعه موردی در شبکه آبیاری آبشار اصفهان). مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی، ۱۲ (۴): ۳۴-۱۹.

۳. بادیه‌نشین ع ر، نوری ح و وظیفه‌دوست م، ۱۳۹۳. بهبود برآورد عملکرد محصول در مدل شبیه‌سازی SWAP با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۵(۴): ۳۷۹-۳۸۸.

۴. دهقان ه، علیزاده ا، انصاری ح و نادریان‌فر م، ۱۳۹۰. ارزیابی روش‌های افزایش عملکرد و بهره‌وری آب گندم با استفاده از گزینه‌های مدل SWAP(مطالعه موردی: منطقه نیشابور). چهارم کنفرانس مدیریت منابع آب ایران، ۱۳-۱۴ اردیبهشت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

۵. طاوسی ت، شجاع ف و عسگری ا، ۱۳۹۸. بازنگری پهنه‌های اقلیمی شمال شرق ایران بر پایهٔ کاربرد تلفیقی تغییر شاخص خشکی. نشریه مدیریت بیابان، ۱۳: ۱۱۷-۱۳۴.

۶. محمدی ا، دلبری م، ابول‌پور ب، افراسیاب پ و محمدرضاپور ا، ۱۳۹۹. بررسی عوامل مبهم در تخصیص آب شبکه آبیاری سد سیستان. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰ (۳۹): ۱۷۴-۱۵۹.

۷. مختاری، شیدا، ۱۳۹۰. توسعه و کاربرد یک مدل ساده (VSM) جهت تخمین منطقه‌ای عملکرد برنج با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه گیلان.

۸. وردی‌نژاد و، سهرابی ت، حیدری ن، عراقی‌نژاد ش و فیضی م، ۱۳۸۹. تعیین عمق بهینه آبیاری محصولات زراعی در شرایط شوری با استفاده از مدل SWAP. نشریه آب و خاک، ۲۴ (۳): ۴۶۳-۴۷۵.

۹. وردی‌نژاد و، سهرابی ت، فیضی م، حیدری ن و عراقی‌نژاد ش، ۱۳۸۹. الگوبندی عملکرد محصولات مختلف در شرایط شوری آب آبیاری با استفاده از مدل SWAP. مجله دانش آب و خاک، ۲۰ (۴): ۹۷-۱۱۱.

10. Ahmadi A, Moridi A and Han D, 2015. Uncertainty assessment in environmental risk through Bayesian networks. Journal of Environmental Informatics, 25(1): 46–59.

11. Ahmadvand, MR and Najafpur ZA, 2010. Investigation of cultivation surface, production and supportive policies of wheat during the first to fourth development plans. 2Quarterly Journal of Economic Research and Policies, 18(53): 59-76.

12. Aggarwal PK, Kalra N, Singh AK and Sinha SK, 1994. Analyzing the limitations set by climatic factors, geotype, and water and nitrogen availability on productivity of wheat I. The model description, parameterization and validation, Field Crops Research. 38(12), 73-91.

13. Amiri E, 2016. Assessment of CERES-Wheat Model in simulation of varieties of wheat yield under different irrigation treatments. Journal of Soil and Water Resources Conservation, 5(3): 73-85
14. Bonfante A, Basile A, Acutis M, De Mascellis R, Manna P, Perego A and Terribile F, 2010. SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in Northern Italy. Agricultural Water Management. 97, 1051–1062.
15. Chai T and Draxler RR, 2014. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) Arguments against avoiding RMSE in the literature. Geosci. Model Dev. 7 (3), 1247–1250.
16. Diepen CA, Van Wolf J and van Keulen H, 1989. WOFOST: a simulation model of crop production. Soil Use Manage. 5(1), 16–24.
17. Droogers P, Torabi M, Akbari M and Pazira E, 2001, Field-scale modeling to explore salinity problems in irrigated agriculture. Irrig. Drain. 50, 77-90
18. Droogers P and Torabi M, 2002. Field scale scenarios for water and salinity management by simulation modeling in the Zayandeh Rud basin. Esfahan Province. Iran. IAERI-IWMI Research Reports 12
19. Farahani HJ, Izzi G, Steduto P and Oweis TY, 2009. Parameterization and evaluation of AquaCrop for full and deficit irrigated cotton. Agron. J. 101, 469-476.
20. Feddes RA, Kowalik PJ and Zarandy H, 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield. Pudoc, Wageningen.
21. Garcia-Vila M, Fereres E, Mateos L, Orgaz F and Steduto P, 2009. Deficit irrigation optimization of cotton with AquaCrop. Agron. J. 101, 477-487.
22. Godwin DC and Jones CA, 1991. Nitrogen dynamics in soil–plant systems, In: R. J. Hanks, J. T. Ritchie (Eds.). Modelling plant and soil systems, Agron. Monog. 31, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA.
23. Hamada K, Inoue H, Mochizuki H, Asakura M, Shimizu Y and Takemura T, 2020. Evaluating Maize Drought and Wet Stress in a Converted Japanese Paddy Field Using a SWAP Model. Water, 12(5): 1-15.
24. Hassanli M, Ebrahimian H, Mohammadi E, Rahimi A and Shokouhi A, 2016. Simulating maize yields when irrigating with saline water, using the AquaCrop, SALTMED, and SWAP models. Agric. Water Manage, 176:91-99.
25. Jonubi R, Rezaverdinejad V and Salemi H, 2018. Enhancing field scale water productivity for several rice cultivars under limited water supply. Paddy and water environment, 16(1):125-141.
26. Kroes J G and Van Dam JC, 2003. Reference Manual SWAP version 3.03. (Ed). Alterra-report: Alterra Green WorldResearch (Vol. 773). (pp.1-211).MI: Wageningen University and Research Centre.
27. Kumar P, Sarangi A, Singh DK, Parihar SS and Sahoo RN, 2015. Simulation of salt dynamics in the root zone and yield of wheat crop under irrigated saline regimes using SWAP model. Agric. Water Manage. 148, 72–83
28. Minasny B, McBratney AB, 2007. Spatial prediction of soil properties using EBLUP with the Matérn covariance function. Geoderma 140, 324–336.
29. Mo X and Liu S, 2001. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season. Agricultural and Forest Meteorology, 109(10), 203–222.
30. Molden D, 2007. Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture. Earthscan. London.
31. Mostafazadeh-fard B, Mansouri H, Mousavi SF and Feyzi M, 2009. Effects of different levels of irrigation water salinity and leaching on yield and yield components of wheat in an arid region. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 135(1):32-38.
32. Pan Y, Yuan C and Jing S, 2020. Simulation and optimization of irrigation schedule for summer maize based on SWAP model in saline region. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 13(3):117-122.

33. Pandi H, Asadi Kapourchal S, Vazifedoust M and Rezaei M, 2020. Simulation of Rice Yield and its Components Using SWAP Model and Remote Sensing Technology for Optimal Use of Water and Soil. Environment and Water Engineering, 6(4):374-387.
34. Raes D, Steduto P, Hsiao TC and Fereres E, 2009. AquaCrop. The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. Agron. J. 101, 438-447.
35. Ruiz ME and Utset A, 2003. Models for predicting water use and crop yields. Report of college on soil Physics. 323-328.
36. Singh R, Van Dam JC and Feddes RA, 2006. Water Productivity analysis of irrigated crops in Sirsa district, India. Agriculture Water Management. 82:253-278.
37. Singh UK, Ren L and Kang S, 2010. Simulation of soil water in space and time using an agro hydrological model and remote sensing techniques, Agricultural Water Management, 97 (8): 1210- 1220.
38. Steduto P, Hsiao TC and Fereres E, 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. Irrig. Sci. 25, 189-207.
39. Steduto P, Hsiao TC, Raes D and Fereres E, 2009. AquaCropThe FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. Agron. J. 101, 426-437.
40. Utset A, Velicia H, Delrio B, Morillo R, Centenio JA and Martinez JC, 2007. Calibrating and validating an agrohidlogical model to simulate sugar beet water use under Mediterranean conditions. Agricultural Water Management, 94(3): 11-21.
41. Vazifedoust M, van Dam JC, Feddes RA and Feizi M, 2008. Increasing water productivity of irrigated crops under limited water supply at field scale. Agricultural Water Management, 95(2): 89-102.

Evaluation of Irrigation Management and the Possibility of Improving It in Wheat Fields in Sistan Dam Irrigation District Using SWAP Model

M.A. Khandan Barani, P. Afrasiab[1], M. Akbari, and M. Delbari

PhD student, Department of Water Engineering, Water and Soil Group, University of Zabol, Zabol, Iran.
aminbarani2008@gmail.com
Associate Professor, Department of Water Engineering, Water and Soil Group, University of Zabol, Zabol, Iran.
peyman.afrasiab@uoz.ac.ir
Associate Professor, Department of Agricultural Technical and Engineering Research, Technical and Engineering Research Institute, Karaj, Iran.
akbari_m43@yahoo.com
Associate Professor, Department of Water Engineering, Water and Soil Group, University of Zabol, Zabol, Iran.
masoomeh.delbari@uoz.ac.ir

Received: October 2020, and Accepted: March 2021

Abstract

In this research, the status of water productivity for wheat production and strategies to increase water productivity in different quantitative conditions of water was determined and analyzed in the irrigation district of Sistan Dam. In this regard, the SWAP simulation model was calibrated and validated by considering the current water resources operation, various quantities of irrigation water, and use of field information. Water production functions were used to determine the irrigation schedule (time and depth) for wheat crop. The results of field measurements in the crop year 2016-2017 in the irrigation district showed that farmers irrigate wheat on average four times in the current conditions. Farmers' average crop yield and water productivity were about 1450 kg/ha and 0.41 kg/m^3, respectively. These results show that available water is not appropriately used and should be addressed with practical solutions to improve water productivity. The validation and calibration results of the SWAP model also showed the high accuracy of the model in the case study. The results of different management scenarios of eliminating some irrigation shifts compared to the existing conditions indicated that, although there was no significant difference in water productivity, crop yield decreases about 37%. The results of evaluating the scenarios of reducing the depth and frequency of irrigation (using 640 mm per season and applying 40 mm at each shift) showed that, with reliable and timely water supply and more frequent irrigation, water productivity could be increased by 30% compared to the baseline scenario; and crop yield can be doubled. In these scenarios, the presence of adequate moisture in the plant's root zone increases the yield, and the amount of deep percolation is greatly reduced. The amount of water used by farmers is excessive for various reasons. Therefore, it is recommended to train farmers on how to improve irrigation and crop management according to the water available in the irrigation district, so that they can distribute water according to the real needs of the plant and irrigate at the right time and sufficient quantity.

Keywords: Irrigation planning, Water productivity, Depth and frequency of irrigation

[1]- Corresponding author: Department of Water Engineering, Water and Soil Group, University of Zabol, Zabol, Iran