نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۷، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۲، ص. ۴۱-۲۵

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.1, Vol. 17, Apr.-May. 2023, p. 25-41

مقاله علمی-پژوهشی

تعیین مقدار مناسب آب آبیاری برای گندم، جو، سیب‌زمینی و چغندرقند در استان چهارمحال و بختیاری با استفاده از مدل AquaCrop و مفهوم آب مجازی

سید محمد موسوی[۱]، اصلان اگدرنژاد[۲*]، سالومه سپهری صادقیان[۳]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۶

چکیده

مفهوم آب مجازی به‌عنوان میزان آب مصرف شده برای تولید هر کیلوگرم از محصولات کشاورزی، یکی از راهکارهای کاهش فشار به منابع آب است. بر این اساس لازم است تولید محصولات کشاورزی در تعادل با مقدار مصرف آب و با سیاست کاهش مصرف آب باشد. از این رو، در پژوهش حاضر به‌بررسی سناریوهای مختلف آبیاری در تولید چهار محصول استراتژیک استان چهار محال و بختیاری (گندم، جو، سیب‌زمینی و چغندرقند) براساس مفهوم آب مجازی پرداخته‌شد. بدین منظور ابتدا با استفاده از سند بهره‌وری آب این استان، مقدار آب مجازی در شرایط فعلی و آینده (۱۴۰۵ و ۱۴۱۰) تعیین شد. در ادامه با استفاده از مدل واسنجی‌شده آکواکراپ به‌شبیه‌سازی عملکرد گیاهان تحت بررسی براساس مقادیر مختلف آب آبیاری پرداخته‌شد. نتایج نشان داد که مقدار آب آبیاری بهینه، که از مدل آکواکراپ تعیین شد، برای تولید گندم، جو، سیب‌زمینی و چغندرقند به‌ترتیب ۳۴۲۰، ۱۵۳۰، ۴۳۰۰ و ۵۰۲۰ مترمکعب در هکتار بود. این مقادیر نسبت به‌شرایط فعلی آبیاری در این استان به‌ترتیب ۳۹، ۷۰، ۵۷ و ۹۰ درصد کاهش داشت. میزان آب مجازی مصرف شده در مقادیر آب آبیاری پیشنهاد شده به‌ترتیب ۰/۱۹، ۰/۰۳، ۶/۰ و ۰/۱۲ میلیون متر مکعب است. میزان آب مجازی در مقدار پیشنهادی برای تولید این محصولات به‌ترتیب ۲۸، ۶۱، ۳۳ و ۱۲ درصد کاهش نشان داد. با انتخاب این مقادیر، به‌ترتیب حدود ۷، ۱۲، ۵ و ۱۰ درصد از فشار وارد شده به‌منابع آب این استان کاسته می‌شود. بنابراین پیشنهاد می‌شود که مقادیر آب آبیاری به‌دست آمده برای زراعت گندم، جو، سیب‌زمینی و چغندرقند در مزارع این استان به‌کار گرفته شود.

واژه‌های کلیدی: آب مجازی مصرف شده، شدت مصرف آب، سناریوهای آبیاری، مدل‌سازی گیاهی

مقدمه

بخش کشاورزی حدود ۲۷ درصد تولید ناخالص داخلی و ۲۲ درصد نیروی کار کشور را به خود اختصاص می‌دهد و نقش اساسی در امنیت غذایی کشور دارد. با این وجود، کشاورزی بزرگترین مصرف کننده آب در ایران است و با توجه به روند رو به افزایش جمعیت کشور میزان مصرف آب در این بخش نیز در حال افزایش است. این موضوع با توجه به وضعیت اقلیمی کشور در حال حاضر و تغییرات اقلیمی در سال‌های آتی اهمیت بیشتری دارد. برخی آمار نشان می‌دهد که در ده سال آینده سبد آبی کشور برای تأمین غذای جمعیت در حال رشد به حد بحرانی می‌رسد. از این رو، لازم است مصرف آب در بخش کشاورزی مورد توجه قرار گیرد.

برای دستابی به این موضوع، لازم است مفهوم آب مجازی در سناریوهای مختلف آبیاری مد نظر قرار گیرد. مفهوم آب مجازی ابتدا توسط آلن در دهه ۹۰ میلادی معرفی شد (Chapagain and Hoekstra, 2004). آب مجازی برای هر محصول نشان دهنده میزان آب مصرف شده برای تولید آن است بنابراین برای تولید محصولات کشاورزی باید مقدار آب مجازی مصرف شده کاهش یابد. اهمیت این موضوع سبب شده است تا دانش آب مجازی و تجارب حاصل از آن مورد توجه مجامع علمی قرار گیرد. در بسیاری از کشورها، میزان تولید محصولات کشاورزی با توجه به میزان آب

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
۳- استادیار پژوهش، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران
(* نویسنده مسئول: (Email: a_eigder@ymail.com
** مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش مدیریت منابع آب

DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.1.3.7

مجازی انجام می‌شود تا از این طریق بتوانند منابع آبی خود را حفظ کنند (علیزاده و خلیلی، ۱۳۸۸).

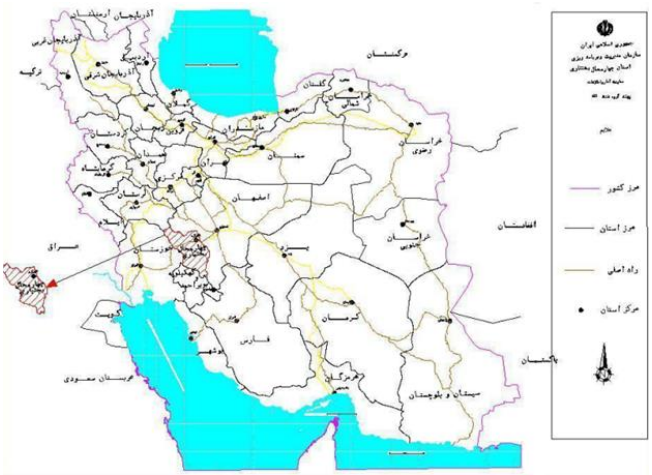
مطالعات انجام شده در سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۹۵ نشان داد که گندم به تنهایی حدود ۳۰ درصد حجم آب مجازی مصرف شده در بین کشورهای صادرکننده را به خود اختصاص داد. این نتایج برای سویا و برنج به ترتیب ۱۷ و ۱۵ درصد بود (موسوی و همکاران، ۱۳۸۸). مطالعات انجام شده در کشور مصر در سال ۱۹۹۵ نشان داد که برای جبران نیاز غذایی خود به تولید ۷/۵ میلیون تن غلات نیاز بود. از این رو، این کشور به واردات این محصولات اقدام کرد و از این طریق حدود ۹/۹ میلیارد مترمکعب آب ذخیره کرد (Fraiture et al., 2004). از طرف دیگر، حجم آب مجازی در برخی گیاهان مانند ذرت در مصر دو برابر از کشور فرانسه بود. بنابراین واردات هر کیلوگرم ذرت از فرانسه به مصر سبب صرفه‌جویی ۰/۵۲ مترمکعب آب شد (Renault, 2003). در همین سال، ایران با وارد کردن برخی مواد غذایی آب‌بر، توانست حدود ۲۹/۱ میلیارد مترمکعب از منابع آب خود را ذخیره کند (Chapagain and Hoekstra, 2004). گرچه ایران طی سال‌های ۲۰۰۲-۱۹۹۷ با صادر کردن مواد غذایی خود به سایر کشورها حدود ۵ میلیارد متر مکعب آب مجازی نیز به کشورهای دیگر ارسال کرد (احسانی و همکاران، ۱۳۸۸). در پژوهشی که روی میزان آب مجازی گندم تولید شده در ایالت آلبرتای کانادا در طول ۱۰ سال انجام شد، مشاهده شد که این عمل سبب وارد آمدن فشار پنج میلیارد مترمکعبی به منابع آب این منطقه شد. با توجه به اینکه تمامی گندم تولیدی به سایر کشورها صادر شده بود، این مقدار آب نیز به صورت تجارت آب مجازی به کشورهای مقصد ارسال شد (Masud et al., 2019). کشور چین با دو نقش واردکننده آب مجازی از مناطق پرآب آمریکا و صادرکننده آب مجازی به برخی مناطق کم‌آب اروپا، آسیا و آفریقا سهم زیادی در توزیع آب مجازی در جهان به خصوص در گروه غلات دارد (Shi et al., 2014). کل مقدار آب مجازی غلات بین ۳۱ استان چین حدود ۱۱۳/۸ گیگامترمکعب در سال است. فزونی آب مجازی دریافتی بخش‌های شرقی نسبت به مناطق غربی نشان می‌دهد که انتقال آب مجازی از مناطق با فقر آبی به سمت مناطق با غنای آبی جریان دارد (Wang et al., 2015). مطالعه تجارت محصولات کشاورزی بین دو کشور آلمان و چین نشان داد که دولت آلمان با اتخاذ تولید محصولات کشاورزی کم‌آب‌بر و واردات محصولات پر آب از کشور چین، توانست حدود ۶۹ میلیون مترمکعب آب مجازی به کشور خود وارد کند. در واقع همین مقدار از منابع آب کشور آلمان ذخیره و بر منابع آب کشور چین فشار وارد شد (Jiang and Marggraf, 2015). تحقیقات مشابه توسط چن و لی در منطقه ماکائو و نوو و همکاران در اسپانیا انجام شده است (Chen and Li, 2015; El-Sadek, 2010). این محققان نیز به بررسی آب مجازی تولید شده توسط محصولات مختلف و شدت فشار وارد آمده به منابع آب این مناطق پرداختند. این محققان گزارش کردند که تولید محصولات کشاورزی فشاری بر منابع آب این مناطق وارد نکرده است. برخی پژوهشگران تأکید کرده‌اند که تجارت اقتصادی با تکیه بر مفهوم آب مجازی کمبود منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند خاورمیانه و آفریقا را کاهش داده است. بنابراین، آب مجازی به عنوان یک شاخص ارزیابی در زنجیره‌ی تولیدِ "ورودی منابع آب – تجارت کالا – خروجی اقتصادی" مورد استفاده قرار گرفته و نقش مهمی در بررسی فرایند جریان منابع آب در زمینه تجارت نیز ایفا می‌کند (Akoto-Danso et al., 2019). بررسی میزان آب مجازی گندم در جهان نشان داد که به طور متوسط برای تولید گندم ۱۸۷۶ مترمکعب آب مصرف می‌شود. بنابراین کل آب مصرفی جهان برای تولید گندم بیش از ۸ میلیارد مترمکعب در سال است. از این رو، کشور عراق در سال ۲۰۱۹ با واردات گندم، بیش از ۴۶ میلیون مترمکعب در مصرف منابع آب خود صرفه‌جویی کرد (Ewaid et al., 2020). بذرافشان و همکاران به بررسی میانگین و سهم اجزای ردپای آب در محصول زعفران طی بازه‌ی زمانی (۲۰۱۴-۲۰۰۸) در سطح استانی و ملی پرداخته و نشان دادند که بیشترین میزان آب مصرفی برای تولید زعفران در استان‌های چهارمحال و بختیاری، سمنان و فارس وجود داشت. کمترین مقدار آب مصرفی برای تولید زعفران در استان‌های لرستان، آذربایجان شرقی و اصفهان تعیین شد (Bazrafshan et al., 2019). در پژوهش دیگری به بررسی آب مجازی با استفاده از نرم‌افزار کراپ‌وات در استان مازندران پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که محصولات برنج، گندم، جو و مرکبات بیشترین مقدار آب مصرفی را به خود اختصاص دادند. در نتیجه محققان پیشنهاد کردند که الگوی کشت این استان به سمت گیاهان با نیاز آبی کمتر تغییر نماید (مکارمی و همکاران، ۱۴۰۱). در پژوهشی دیگر، تجارت آب مجازی در تولید پنبه فاریاب در ایران مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن نشان داد که ردپای آب در تولید پنبه ۴۰۱۹ مترمکعب بر تن است و سهم آب آبیاری ۸۷/۶ درصد است. همچنین بیشترین و کمترین آب مجازی در تولید پنبه به ترتیب در استان‌های خراسان جنوبی (۵۷۱۶ مترمکعب بر تن) و البرز (۲۲۳۵/۵ مترمکعب بر تن) تعیین گردید (یحیی‌زاده برنطین و بذرافشان، ۱۴۰۰). بررسی آب مجازی برای چغندرقند در شهرستان تربت حیدریه نشان داد که طی دوره‌ی ۱۳۹۸-۱۳۹۰ سالانه بیش از ۳۳ مترمکعب به آب مصرفی این گیاه زراعی افزوده شده و همین مقدار آب به خارج از استان صادر شده است (رستگاری‌پور و همکاران، ۱۴۰۰). ارزیابی تجارت آب مجازی خرما نیز نشان داد که متوسط برداشت سالیانه برای تولید خرما در ایران ۳/۴۸۶ میلیارد مترمکعب می‌باشد. از این رو، بین سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۰۱ بیش از ۶۹/۷۵۲ میلیارد مترمکعب آب برای تولید خرما مصرف شده است. بنابراین آب مجازی خرما در ایران ۳/۴۰۵ مترمکعب بر کیلوگرم برآورد گردید (صفدری و همکاران، ۱۴۰۲).

بسیاری از محققان پیشنهاد نموده‌اند که برای کاهش میزان آب مجازی در تولید محصولات کشاورزی، سیاست‌های کاهش تولید محصولات غذایی، تولید محصولات کم‌آب‌بر یا واردات آن‌ها از سایر مناطق مد نظر قرار گیرد (محمدی و بنی‌حبیب، ۱۳۹۹). با توجه به اهمیت امنیت غذایی کشور، این راهکارهای می‌بایست با در نظر گرفتن تأمین کافی غذا صورت گیرد. بنابراین در هر منطقه باید اثر مقدار مصرف آب بر تولید محصولات کشاورزی براساس مفهوم آب مجازی مورد آزمایش قرار گیرد. با توجه به هزینه‌بر و زمان‌بر بودن آزمایش‌های مزرعه‌ای، بسیاری از پژوهشگران پیشنهاد کرده‌اند که از مدل‌سازی گیاهی بدین منظور استفاده شود (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸). مدل‌های گیاهی توانایی شبیه‌سازی رشد گیاهان براساس مقدار آب مصرفی را دارند و تاکنون مدل‌های بسیاری بدین منظور بسط داده شده است (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰). علی‌رغم مزیت‌ها و محدودیت‌ها تمامی این مدل‌ها، سازمان خوار و بار کشاورزی (فائو)، مدل اکواکراپ را به‌منظور نزدیکی قابل‌قبول شرایط مدل‌سازی با شرایط واقعی مزرعه ارائه داد. این مدل به دلیل سادگی، داده‌های ورودی کم، کاربرپسند بودن و دقت بالا مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته و از آن به‌منظور شبیه‌سازی بسیاری از محصولات کشاورزی از جمله زعفران (ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۷)، ذرت و چغندرقند (Stricevic et al., 2011)، گندم (احمدی و همکاران، ۱۴۰۰)، کلزا (اگدرنژاد و همکاران، ۱۳۹۷؛ ابراهیمی‌پاک و همکاران، ۱۳۹۸)، ذرت (Katerji et al., 2013) و سیب‌زمینی (نیسی و همکاران، ۱۴۰۰) استفاده شده است.

استان چهارمحال و بختیاری یکی از استان‌های با پتانسیل قابل‌قبول برای تولید محصولات کشاورزی در کشور است. این استان حدود ۱۰ درصد از منابع آب سطحی کشور را به‌خود اختصاص می‌دهد (بی‌نام، ۱۳۹۹). لیکن مشکلات به‌وجود آمده در دهه اخیر در خصوص کمبود منابع آب در دسترس، توجه بسیاری از مدیران و محققان را به‌کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی و تقلیل فشار بر منابع آب موجود در این استان معطوف کرده است. براساس مرور منابع، توجه به‌مفهوم آب مجازی می‌تواند به‌توسعه پایدار بخش کشاورزی در کنار حفاظت از منابع آب این استان کمک شایانی نماید. لذا هدف این پژوهش تعیین مقدار مناسب آب آبیاری برای تولید محصولات کشاورزی در استان چهارمحال و بختیاری از دیدگاه آب مجازی است. نوآوری این تحقیق استفاده از مدل واسنجی‌شده آکواکراپ برای دستیابی به این هدف است. زیرا تاکنون انجام این مهم کمتر مورد توجه سایر محققان بوده است. از این رو، در پژوهش حاضر به‌بررسی مقدار آب آبیاری مناسب برای تولید چهار محصول کشاورزی غالب (گندم، جو، سیب‌زمینی و چغندرقند) با استفاده از مدل اکواکراپ و دیدگاه آب مجازی پرداخته شد.

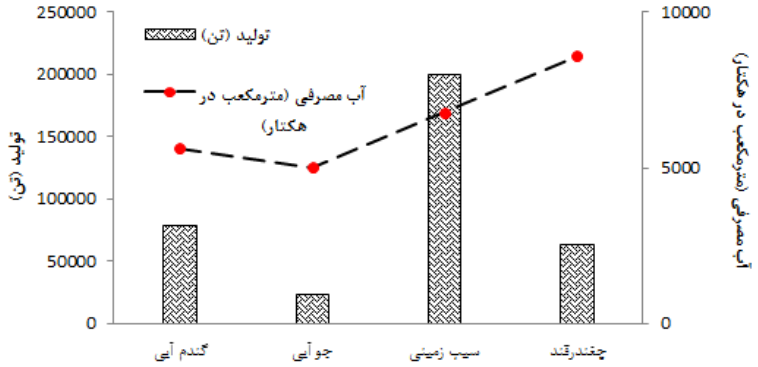
مواد و روش‌ها

این پژوهش در استان چهار محال و بختیاری واقع در در عرض شمالی ۳۱ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۷ دقیقه و در طول شرقی ۴۹ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۴ دقیقه انجام شد. این استان دارای ۱۰ شهرستان و مساحت ۱۶۴۱۱ کیلومتر مربع است و در جنوب غربی کشور و در محدوده رشته کوه‌های زاگرس قرار گرفته است. نواحی غربی استان را ارتفاعات متعددی فراگرفته که مرتفع ترین آن زردکوه با ارتفاع ۴۴۲۱ متر از سطح دریا می‌باشد. این استان از طرف شمال شرق با مرزی به طول ۳۸۹/۵ کیلومتر به استان اصفهان، از طرف غرب با مرزی به طول ۱۶۰/۵۹ کیلومتر مربع به استان خوزستان، از سمت جنوب با مرزی به طول ۱۵۱/۱۴ کیلومتر به استان کهگیلویه و بویر احمد و از سمت شمال غرب به مرزی به طول ۴۹/۵۸ کیلومتر به استان لرستان محدود می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت استان چهارمحال و بختیاری در کشور

چهار گیاه گندم، جو، سیب‌زمینی و چغندرقند از محصولات غالب زراعی در استان چهارمحال و بختیاری که در مجموع حدود ۳۸ هزار هکتار از اراضی کشاورزی را به خود اختصاص داده‌اند (بی‌نام، ۱۳۹۹). براساس سند بهره‌وری آب چهار محال و بختیاری، میزان تولید سیب‌زمینی نسبت به سایر محصولات زراعی بیشتر است ولی چغندرقند بیشترین میزان آب مصرفی در هکتار را به خود اختصاص می‌دهد. وضعیت سایر محصولات در شکل (۲) نشان داده شده است. در این پژوهش آمار و اطلاعات مربوط به منابع آب به کار گرفته شده در بخش کشاورزی، میزان تولید محصولات کشاورزی، سطح زیر کشت آن‌ها، نیاز آبی هر محصول و منابع آب موجود در استان چهار محال و بختیاری طی سال‌های قبل (۱۳۹۶-۱۳۹۳) و برنامه ۵ سال (۱۴۰۵) و ۱۰ سال (۱۴۱۰) آینده با مراجعه به سند بهره‌وری آب این استان (بی‌نام، ۱۳۹۹) تعیین شد. این سند توسط مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری و با هدف بررسی نیاز آبی و عملکرد گیاهان زراعی و باغی این استان تدوین شده است. در این سند، وضعیت منابع آب و تخصیص آن در بخش کشاورزی در شرایط فعلی بررسی شده است.



شکل ۲- وضعیت تولید محصولات مورد بررسی و آب مصرفی آن‌ها

شاخص‌های آب مجازی

مقدار آب مجازی برای هر محصول کشاورزی به صورت نسبتی از متوسط نیاز آبی به متوسط عملکرد محصول و عکس بهره‌وری مصرف آب است. این شاخص براساس رابطه (۱) محاسبه شد.

$$VWCc = \frac{CWRc}{Tpc} \quad (۱)$$

در این رابطه، VWCc میزان آب مجازی محصول کشاورزی (مترمکعب بر کیلوگرم)، CWRc میزان نیاز آبی گیاه زراعی مورد مطالعه (مترمکعب) و TPc متوسط عملکرد گیاه زراعی (کیلوگرم در سال) است. آب مجازی مصرف شده برای هر محصول، از حاصل ضرب مقدار کمی آن محصول در میزان آب مجازی آن به صورت زیر محاسبه شد.

$$NVWI = M \times VWCc \times \frac{1}{1000000} \quad (۲)$$

که در این رابطه، NVWI میزان آب مجازی مصرف شده (میلیون مترمکعب)، M مقدار محصول تولید شده در استان (کیلوگرم) و VWCc مقدار آب مجازی محصول کشاورزی مورد نظر (مترمکعب بر کیلوگرم) است. شاخص شدت مصرف آب در بخش کشاورزی به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$WI = \frac{AWU}{TWU} \quad (۳)$$

در این رابطه، WI شاخص شدت مصرف آب (-)، AWU مصرف آب در بخش کشاورزی (مترمکعب) و TWU کل منابع آب موجود در استان البرز (مترمکعب) است.

مدل AquaCrop

مدل آکواکراپ از تبخیر-تعرق (ET) محاسبه شده (رابطه ۴) با فرض تفکیک آن استفاده می‌کند. تفکیک این مولفه به دو جز تبخیر (E) و تعرق (T_r) سبب می‌شود تا مصرف غیر تولیدی آب از معادلات حذف شود (رابطه ۵).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y\left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (۴)$$

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (۵)$$

در این روابط، Y_x و Y_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی عملکرد محصول، ET_x و ET_a به ترتیب مقدار بیشینه و واقعی تبخیر-تعرق گیاه، و K_y ضریب نسبی میزان کاهش محصول نسبت به کاهش تبخیر-تعرق، که در آن، K_s و K_c به ترتیب ضرایب تنش آبی و گیاهی و CC پوشش تاج در مرحله توسعه گیاه (درصد) که توسط رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$CC = CC_0 \times e^{CGC.t} \quad (۶)$$

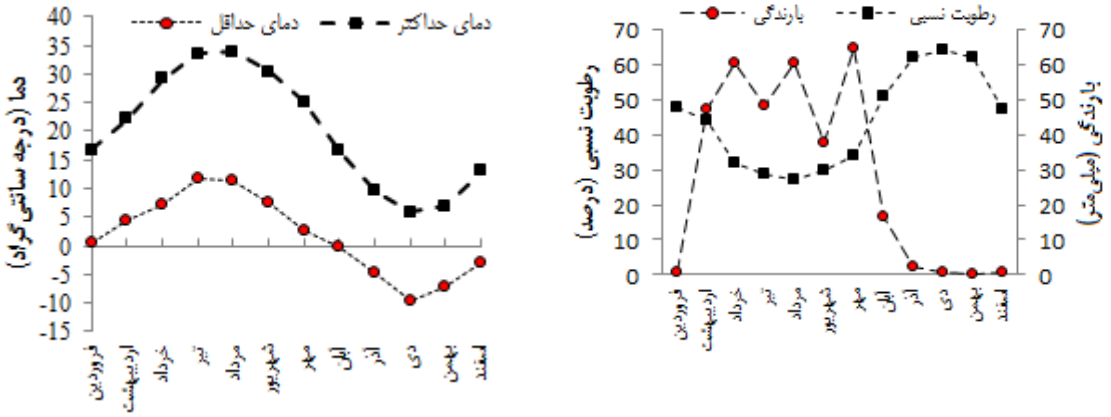
در این رابطه، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) می‌باشد. با تعیین تعرق و تبخیر–تعرق، بیوماس خشک نیز طبق رابطه (۷) برآورد می‌گردد.

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (۷)$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_0 تبخیر–تعرق گیاه مرجع و B عملکرد بیوماس خشک است. مقدار عملکرد (Y) نیز با استفاده از ماده خشک تولید شده و شاخص برداشت (HI) طبق رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$Y = B \times HI \quad (۸)$$

در این رابطه، Y عملکرد، HI شاخص برداشت و B بیوماس خشک است. پیش از استفاده از این مدل گیاهی، ابتدا با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای برای هر چهار گیاه زراعی مورد مطالعه، واسنجی انجام شد. این داده‌ها از مزارع نمونه در سطح استان چهارمحال و بختیاری برداشت شد. این استان اقلیم نیمه مرطوب با تابستان معتدل و زمستان بسیار سرد دارد. متوسط مشخصات هواشناسی منطقه در شکل (۳) نشان داده شده است. علاوه بر خصوصیات اقلیمی، متوسط خصوصیات خاک مزارع (جدول ۱) به مدل آکواکراپ معرفی گردید. مدیریت آبیاری و مزرعه نیز به صورت عرف رایج در استان تعیین شد. با توجه به مساحت کم این استان، شرایط مزرعه‌ای در نقاط مختلف تقریباً مشابه بود. بنابراین، شرایط واسنجی براساس مقایسه نتایج برداشت شده از مزرعه و نتایج شبیه‌سازی با مدل آکواکراپ و با استفاده از آماره‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، جذر میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، کارایی مدل (EF) و ضریب توافق (d) انجام شد. سپس مدل آکواکراپ برای هر گیاه زراعی به صورت مجزا برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب تحت سناریوهای مختلف آبیاری مورد استفاده قرار گرفت. مقدار بهینه آب آبیاری براساس مقایسه تمامی نتایج به دست آمده برای آب مجازی (رابطه ۱) تعیین شد. زیرا زمانی که مقدار آب مجازی در کمترین مقدار خود قرار گیرد بیشترین بهره‌وری حاصل می‌شود. لذا، با توجه به اینکه مقدار عملکرد محصول مورد نظر می‌بایست قابل‌قبول و اقتصادی باشد؛ آب مجازی کمتری برای زراعت آن باید به کار گرفته شود. در ادامه، براساس مقدار قابل‌قبول برای آب مجازی، آب مجازی مصرف شده و شدت مصرف آب نیز به ترتیب مطابق رابطه‌های (۲) و (۳) محاسبه شدند.



شکل ۳- متوسط خصوصیات هواشناسی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی وشیمیایی خاک

عمق خاک (سانتی‌متر)	بافت خاک	هدایت الکتریکی (میکروموس بر سانتی‌متر)	جرم مخصوص ظاهری (گرم بر سانتی-مترمکعب)	ظرفیت زراعی (درصد حجمی)	نقطه پژمردگی (درصد حجمی)
۰–۳۰	لوم	۱/۳	۱/۳	۲۳/۸	۹
۳۰–۶۰	لوم‌سیلتی	۰/۹	۱/۴	۲۵/۲	۸/۳

یافته ها

تحلیل حساسیت مدل AquaCrop

تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی مدل آکواکراپ برای گیاهان مورد بررسی در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد که این مدل نسبت به تغییرات اکثر پارامترهای ورودی برای گیاه گندم حساسیت متوسط داشت. در گیاه گندم، تغییرات برخی پارامترها

مانند ضریب گیاهی برای تعرق بر خروجی مدل آکواکراپ حساسیت تقریباً بالایی داشت. مدل آکواکراپ نسبت به شبیه‌سازی پارامترهای رطوبت در نقطه پژمردگی دایم، ضریب زوال پوشش گیاهی و پوشش گیاهی اولیه برای گیاه جو دارای حساسیت کم بود. این نتایج با مشاهدات احمدی و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت داشت. این مدل نسبت به‌شبیه‌سازی اکثر پارامترها برای گیاه جو دارای حساسیت متوسط بود. لیکن در برخی موارد مانند بهره‌وری آب نرمال شده حساسیت زیادی داشت. این مدل به تغییرات اکثر پارامترهای ورودی برای گیاه سیب‌زمینی نیز حساسیت متوسطی داشت. مشاهده می‌شود که مدل آکواکراپ نسبت به تغییرات برخی پارامترهای مشاهداتی مانند "مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی" و "مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی" در گیاه سیب‌زمینی حساسیت متوسط داشت. گرچه این پارامترها می‌بایست در مزرعه تعیین شوند لیکن دقت اندازه‌گیری آن‌ها بالا نیست و بعضاً به صورت حدودی در مزارع آزمایشی ثبت می‌شوند. تغییرات رطوبت ظرفیت زراعی در هر دو حالت افزایش و کاهش ۲۵ درصد بر خروجی مدل اثر زیادی داشت به همین دلیل حساسیت این مدل در گیاه سیب‌زمینی به این پارامتر زیاد بود. همین شرایط برای پارامترهای "مدت زمان کاشت تا برداشت محصول" و "مدت زمان کاشت تا دوره پیری" در شرایط افزایش مقادیر آن‌ها نیز مشاهده شد. از طرف دیگر، کاهش پارامترهای "رطوبت در حالت اشباع" و "عمق موثر ریشه" بر خروجی مدل اثر بسیار اندکی داشتند به‌همین دلیل حساسیت این مدل نسبت به‌کاهش مقادیر این پارامترها در گیاه سیب‌زمینی کم بود. شرایط مشابه برای افزایش پارامتر "ضریب گیاهی برای تعرق" نیز مشاهده شد. برای گیاه چغندرقند، پارامتر رطوبت در نقطه پژمردگی و دمای حداقل حساسیت نسبتاً کمی با کاهش مقدار عامل ورودی نشان دادند. این نتایج با مشاهدات نیسی و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت داشت. در گیاه چغندرقند، حساسیت این مدل به افزایش عامل ضریب گیاهی برای تعرق بالا بود. نتایج تحقیقات نیسی و همکاران (۱۴۰۰) نیز نشان داد که مدل آکواکراپ نسبت به‌تغییرات این پارامتر حساسیت زیادی داشت. حساسیت مدل آکواکراپ به‌تغییرات سایر پارامترها برای چغندرقند متوسط بود.

واسنجی و ارزیابی مدل AquaCrop

پس از تحلیل حساسیت، پارامترهایی که دارای حساسیت بیشتری بودند، مورد واسنجی قرار گرفتند. نتایج نیز در جدول (۳) ارائه شده است. برخی پارامترها در این جدول برابر با مقدار پیش‌فرض در نظر گرفته شد. این پارامترها برای گیاهان زراعی مورد مطالعه در هر منطقه ثابت است. برخی پارامترها مانند مدت زمان کاشت تا دوره‌های مختلف گیاهی برای گیاه گندم نیز با اندازه‌گیری مزرعه‌ای تعیین شدند. به عنوان مثال، در گیاه سیب‌زمینی، پارامترهای "مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی" و "مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی" که مقادیر S_c برای آن‌ها بیشتر از ۶/۲ بود؛ مورد واسنجی قرار گرفتند.

نتایج آماری مرحله واسنجی در جدول (۴) آورده شده است. براساس این نتایج، مدل آکواکراپ در مرحله واسنجی دچار خطای بیش‌برآوردی برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گندم شد. مقادیر این خطا براساس آماره RMSE به ترتیب برابر با ۰/۴ تن در هکتار و ۰/۰۳ کیلوگرم بر مترمکعب آب بود. این نتایج به همراه مقادیر به‌دست آمده برای آماره NRMSE در گیاه گندم نشان داد که دقت این مدل برای شبیه‌سازی این دو پارامتر عالی بود. کارایی این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری مصرف آب گندم، براساس دو آماره EF و d، نیز قابل‌قبول بود. این نتایج با مشاهدات احمدی و همکاران (۱۴۰۰) مطابقت داشت. مدل آکواکراپ دقت مناسبی برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب جو داشت. این نتایج با توجه به مقادیر دو آماره RMSE و NRMSE قابل استناد است. نتایج دو آماره EF و d نیز نشان داد که کارایی این مدل برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب گیاه جو مطلوب بود.

براساس مقادیر RMSE، خطای مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب سیب‌زمینی قابل‌قبول بود. مقدار به‌دست آمده برای NRMSE نیز نشان داد که دقت این مدل برای سیب‌زمینی در این مرحله عالی بود. نتایج آماره MBE برای این مدل نشان داد که این مدل دچار خطای کم‌برآوردی در شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی شد. با این وجود کارایی این مدل با توجه به دو آماره EF و d قابل‌قبول بود. نتایج به‌دست آمده برای بهره‌وری مصرف آب سیب‌زمینی با توجه به دو آماره RMSE و MBE نیز قابل‌قبول بود. گرچه مدل آکواکراپ در شبیه‌سازی این پارامتر دچار خطای بیش برآوردی شد. این نتایج با مشاهدات کاترجی و همکاران (۲۰۱۳) مطابقت داشت. مقدار آماره NRMSE برای این پارامتر نشان داد که دقت این مدل در شبیه‌سازی این پارامتر مطلوب است. آماره‌های EF و d نیز بیانگر قابل‌قبول بودن کارایی این مدل بودند.

مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند دچار خطای بیش‌برآوردی شد. براساس آماره RMSE، دقت مدل آکواکراپ برای گیاه چغندرقند قابل‌قبول بود. به‌همین دلیل بیش‌برآوردی این مدل گیاهی با خطای کمی همراه است. مقادیر آماره NRMSE نشان داد دقت مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی پارامترهای عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند به ترتیب در دسته‌های خوب و عالی قرار داشت. با توجه به‌مقادیر دو آماره EF و d، کارایی مدل آکواکراپ برای شبیه‌سازی عملکرد و بهره‌وری آب چغندرقند مطلوب بود. این نتایج با مشاهدات سیاحی و همکاران (۱۳۹۹) و ابراهیمی‌پاک و اگدرنژاد (۱۳۹۶) مطابقت داشت.

جدول ۲- ضریب حساسیت برخی پارامتر ورودی مدل رشد گیاهی آکواکراپ برای محصولات مورد بررسی

پارامتر	مقدارSc در حالت ۲۵٪+	مقدارSc در حالت ۲۵٪-	درجه حساسیت
گندم			
رطوبت در ظرفیت زراعی	۱/۵	۴/۶	کم-متوسط
رطوبت در نقطه پژمردگی	۱/۳	۱/۵	کم-کم
رطوبت در حالت اشباع	۱/۸	۲/۴	کم-متوسط
ضریب گیاهی برای تعرق	۹/۶	۸/۸	متوسط-متوسط
عمق مؤثر ریشه	۳/۷	۵/۶	متوسط-متوسط
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۷/۲	۳/۳	متوسط-متوسط
حدپایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۳/۹	۶/۷	متوسط-متوسط
جو			
رطوبت در ظرفیت زراعی	۱/۰	۳/۲	کم-متوسط
رطوبت در نقطه پژمردگی	۱/۸	۱/۲	کم-کم
رطوبت در حالت اشباع	۰/۴	۳/۱	کم-متوسط
ضریب گیاهی برای تعرق	۱۱/۴	۶/۹	متوسط-متوسط
عمق مؤثر ریشه	۲/۲	۳/۹	متوسط-متوسط
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۵/۵	۷/۲	متوسط-متوسط
حدپایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۲/۰	۲/۴	متوسط-متوسط
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۵/۶	۱۴/۸	زیاد-متوسط
ضریب رشد پوشش گیاهی	۹/۸	۷/۳	متوسط-متوسط
ضریب زوال پوشش گیاهی	۰/۲	۰/۸	کم-کم
پوشش گیاهی اولیه	۱/۹	۰/۶	کم-کم
سیب‌زمینی			
رطوبت در ظرفیت زراعی	۱۵/۷	۱۵/۲	زیاد-زیاد
رطوبت در نقطه پژمردگی	۷/۵	۱۰/۵	متوسط-متوسط
رطوبت در حالت اشباع	۲/۶	۱/۴	متوسط-کم
ضریب گیاهی برای تعرق	۰/۲۳	۲/۶	کم-متوسط
عمق مؤثر ریشه	۲/۶	۱/۴	متوسط-کم
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۶/۹	۶/۲	متوسط-متوسط
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۸/۱	۱۰/۹	متوسط-متوسط
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۲۰/۵	½	زیاد-متوسط
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۲۲/۱	۴/۵	زیاد-متوسط
چغندرقند			
رطوبت در ظرفیت زراعی	۱۴/۷	۹/۶	متوسط
رطوبت در نقطه پژمردگی	۵/۰	۱/۳	متوسط-کم
رطوبت اشباع	۲/۵	۸/۱	متوسط
دمای حداقل	۱۲	۰/۹	متوسط-کم
دمای حداکثر	۷/۴	۶/۹	متوسط
بارندگی	۷/۱	۱۰/۷	متوسط
ضریب گیاهی برای تعرق	۱۹/۴	۱۳/۹	زیاد-متوسط
عمق مؤثر ریشه	۵/۱	۱۱/۰	متوسط
مدت زمان کاشت تا سیب‌زمینیانه‌زنی	۱۰/۱	۷/۳	متوسط
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۸/۶	۲/۵	متوسط
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۴/۲	۹/۷	متوسط
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۱۶/۲	۱۴/۴	متوسط
حد آستانه بالای دما	۵/۹	۱۲/۶	متوسط

جدول ۳- مقادیر پارامتر گیاهی مورد استفاده در مدل رشد گیاهی آکواکراپ برای محصولات مورد بررسی

توضیح عامل	مقدار	واحد	توضیح
گندم			
دمای پایه	۰	درجه‌سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	۲۶	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
ضریب رشد کانوپی	۴/۹	درصد روز	پیش‌فرض
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۱/۵	سانتی‌متر مربع	پیش‌فرض
عمق مؤثر ریشه	۰/۳۵	متر	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱۴	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۱۰۵	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۱۴۵	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۶۵	روز	اندازه‌گیری
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۴	گرم بر متر مربع	واسنجی
بیشینه رشد کانوپی	۹۲	درصد	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۲۳	–	واسنجی
حدپایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۶۷	–	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۵/۷	درصد روز	پیش‌فرض
ضریب کاهش پوشش	۸/۱	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۰۵	درصد بر روز	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۲/۲	–	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۲/۸	–	واسنجی
جو			
دمای پایه	۰	درجه‌سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	۱۵	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۲/۲۵	سانتی‌متر مربع	پیش‌فرض
عمق مؤثر ریشه	۱/۰	متر	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱۰	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۶۰	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۷۰	روز	اندازه‌گیری
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۰۵	روز	اندازه‌گیری
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۵	گرم بر متر مربع	پیش‌فرض
بیشینه رشد کانوپی	۸۵	درصد	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۲۲	–	واسنجی
حدپایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۶۰	–	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۱۲/۴	درصد روز	پیش‌فرض
ضریب کاهش پوشش	۷/۰	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۰۵	درصد بر روز	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	خطی	–	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	خطی	–	واسنجی
سیب‌زمینی			
دمای پایه	۲	درجه‌سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	۲۶	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
ضریب رشد کانوپی	۵	درصد روز	پیش‌فرض
پوشش گیاهی هر نهال هنگام جوانه‌زنی	۵	سانتی‌متر مربع	پیش‌فرض
عمق مؤثر ریشه	۰/۳	متر	پیش‌فرض
مدت زمان کاشت تا جوانه‌زنی	۱۵	روز	واسنجی

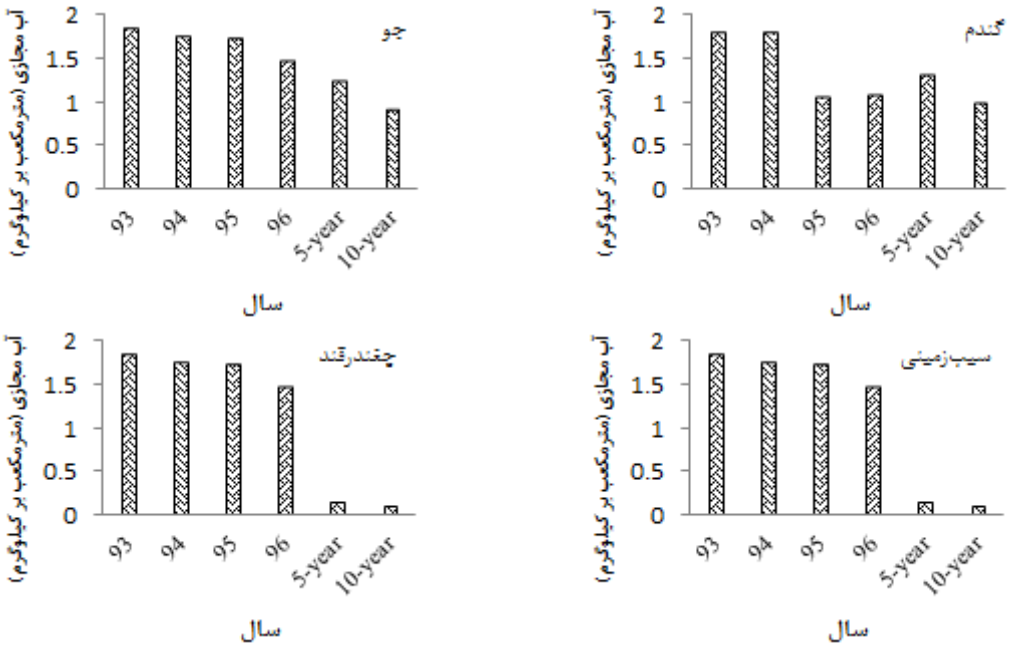
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۵۰	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۹۰	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۵۰	روز	واسنجی
بهره‌وری آب نرمال شده	۲۰	گرم بر متر مربع	واسنجی
بیشینه رشد کانوپی	۹۲	درصد	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۲	–	واسنجی
حدپایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۸	–	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۱۵/۵	درصد روز	واسنجی
ضریب کاهش پوشش	۱/۹	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۴	درصد بر روز	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۰/۵۷	–	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۰/۷۲	–	واسنجی
چغندرقند			
دمای پایه	۵	درجه‌سانتی‌گراد	پیش‌فرض
دمای بالا	۳۰	درجه سانتی‌گراد	پیش‌فرض
تراکم کشت	۱۰۰۰۰۰	گیاه در هکتار	اندازه‌گیری
ضریب رشد کانوپی	۱۳/۶	درصد روز	پیش‌فرض
پوشش گیاهی هر نهال هنگام سیب‌زمینیانه‌زنی	۵	سانتی‌متر مربع	پیش‌فرض
مدت زمان کاشت تا سیب‌زمینیانه‌زنی	۶	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا بیشینه رشد کانوپی	۷۰	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا دوره پیری	۱۴۵	روز	واسنجی
مدت زمان کاشت تا برداشت محصول	۱۱۳	روز	واسنجی
عمق مؤثر ریشه	۱/۵	متر	واسنجی
بهره‌وری آب نرمال شده	۱۴/۳	گرم بر متر مربع	واسنجی
پوشش گیاهی اولیه	۳/۲	درصد	واسنجی
بیشینه رشد کانوپی	۸۲	درصد	واسنجی
حد بالا ضریب تخلیه آب خاک برای توسعه گیاه	۰/۱۵	–	واسنجی
حدپایین ضریب تخلیه آب برای توسعه گیاه	۰/۵۵	–	واسنجی
ضریب رشد پوشش	۱۲/۰	درصد روز	واسنجی
ضریب کاهش پوشش	۵/۳	درصد روز	واسنجی
حداکثر ضریب گیاهی برای تعرق	۱/۱	درصد بر روز	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی جهت بسته شدن روزنه‌ها	۵	–	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای توسعه پوشش تاجی گیاه	۰/۶	–	واسنجی
ضریب شکل برای ضریب تنش آبی برای مرحله پیری	۰/۶	–	واسنجی

جدول ٤- نتایج آماره‌های مختلف برای عملکرد و بهره‌وری مصرف آب

گیاه	پارامتر	MBE	RMSE	NRMSE	EF	d
گندم	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)	۹	۴۰	۰/۰۴	۰/۶۰	۰/۹۹
	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۸	۰/۹۹
جو	عملکرد (کیلوگرم بر هکتار)	−۱۲	۷۵	۰/۰۸	۰/۳۲	۰/۹۹
	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	−۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۲۵	۰/۹۸
سیب‌زمینی	عملکرد (تن بر هکتار)	½	−۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۹۹	۰/۹۹
	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۲۷	۰/۹۹	۰/۹۹
چغندرقند	عملکرد (تن در هکتار)	۰/۵۷	۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۶۲	۰/۹۹
	بهره‌وری مصرف آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	۰/۰۶	۰/۰۳	۰/۰۹	۰/۳۹	۰/۹۹

وضعیت آب مجازی موجود

در شرایط فعلی، آب مجازی گندم در چهار سال تحت مطالعه تقریباً یکسان بود که نشان دهنده بهره‌وری آب مشابه (۰/۵۹ کیلوگرم بر مترمکعب) برای این سال‌ها است (شکل ۴). در برنامه‌های بهبود بهره‌وری آب برای سال‌های ۱۴۰۵ (برنامه ۵ ساله) و ۱۴۱۰ (برنامه ۱۰ ساله)، بهره‌وری آب گندم می‌بایست به ترتیب تا ۰/۷۶ و ۱ کیلوگرم بر مترمکعب افزایش یابد. در شرایط فعلی، براساس نتایج آب مجازی، برای تولید هر کیلوگرم گندم می‌بایست ۱/۸ مترمکعب آب مصرف شود. این مقدار بسیار بالا است و برای برنامه‌های ۵ و ۱۰ ساله می‌بایست به‌ترتیب به ۱/۳ و ۱ مترمکعب بر کیلوگرم کاهش یابد. این شرایط با توجه به تغییر اقلیم و کاهش دسترسی به منابع آب از اهمیت بیشتری برخوردار است. متوسط بهره‌وری آب جو برابر با ۰/۵۷ کیلوگرم بر مترمکعب است. در برنامه‌های ۵ و ۱۰ ساله لازم است این مقدار به ترتیب به ۰/۸ و ۱/۰۷ کیلوگرم بر مترمکعب برسد. بنابراین در شرایط فعلی، آب مجازی برای تولید هر کیلوگرم جو برابر با ۱/۸ مترمکعب است و در برنامه‌های ۵ و ۱۰ ساله این مقدار باید به ترتیب به ۱/۲۵ و ۰/۹۳ مترمکعب بر کیلوگرم برسد. متوسط بهره‌وری آب سیب‌زمینی در شرایط فعلی به طور متوسط برابر با ۴/۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. در برنامه‌های ۵ و ۱۰ ساله مقادیر بهره‌وری آب سیب‌زمینی باید به ترتیب به ۶/۲ و ۸/۱ کیلوگرم بر مترمکعب برسد. از این رو، مقادیر آب مجازی برای سیب‌زمینی در شرایط فعلی به صورت متوسط برابر با ۱/۷ مترمکعب بر کیلوگرم است و در برنامه‌های ۵ و ۱۰ ساله باید به ترتیب به ۰/۱۶ و ۰/۱۲ مترمکعب بر کیلوگرم برسد. متوسط بهره‌وری آب چغندرقند در شرایط فعلی برابر با ۴/۷ کیلوگرم بر مترمکعب است و در برنامه‌های ۵ و ۱۰ ساله باید به ترتیب به ۶/۴ و ۸ کیلوگرم بر مترمکعب برسد. بنابراین مقدار آب مجازی چغندرقند برای برای سال‌های مورد مطالعه برابر با ۱/۷ مترمکعب بر کیلوگرم و برای برنامه‌های ۵ و ۱۰ ساله به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۱۲ مترمکعب بر کیلوگرم است.



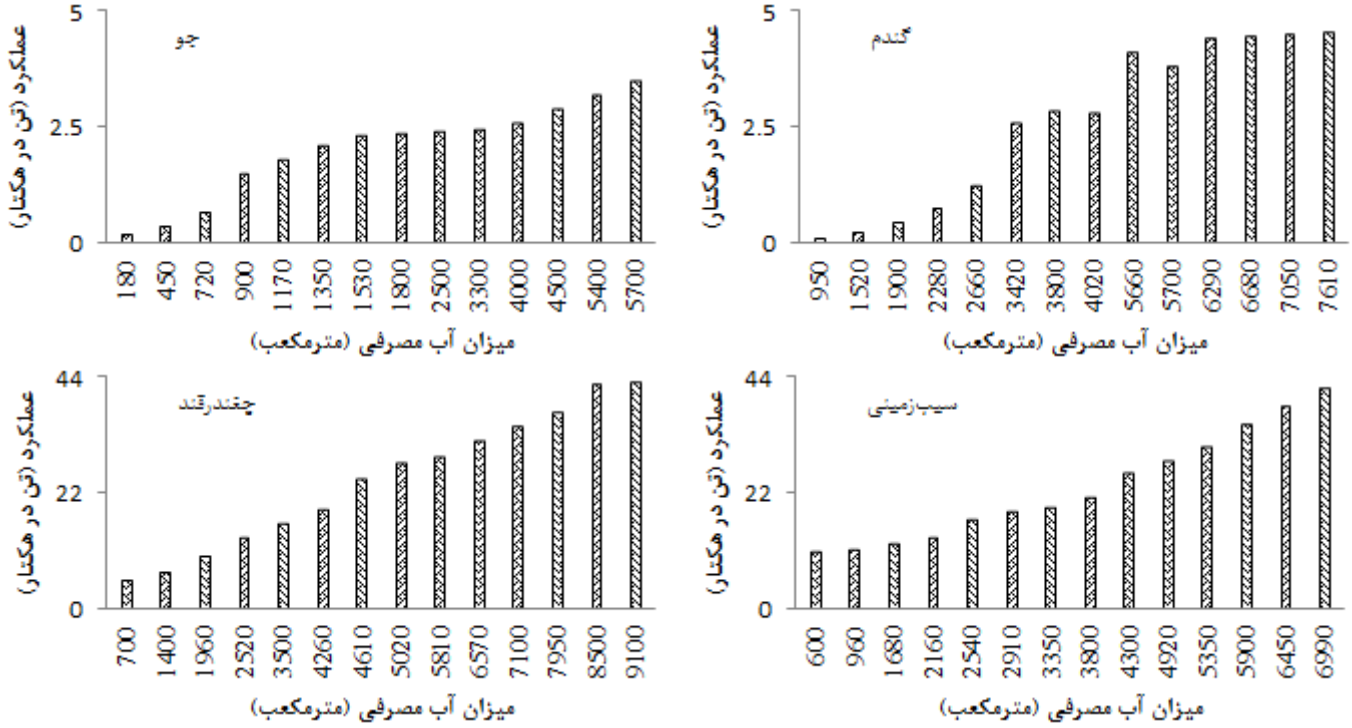
شکل ٤- وضعیت آب مجازی محصولات مورد بررسی

شبیه‌سازی سناریوها

سناریوهای مختلف تأمین آب آبیاری برای شبیه‌سازی عملکرد محصولات تحت مطالعه توسط آکواکراپ به دست آمد (شکل ۵). براساس این نتایج، با افزایش مقدار آب آبیاری میزان عملکرد گندم نیز به صورت صعودی افزایش یافت. علت آن تأمین بیشتر آب برای رشد گندم بوده است که در شرایط مزرعه نیز منطقی به نظر می‌رسد. لیکن روند افزایش عملکرد برای مقادیر مختلف تأمین آب آبیاری یکسان نبود. با تأمین ۹۵۰ مترمکعب در هکتار آب آبیاری، عملکرد گندم برابر با ۰/۱۳ تن در هکتار بود که بسیار پایین است. به همین دلیل در سناریوی بعدی، عمق آب آبیاری افزایش یافت. با تأمین ۱۵۲۰ میلی‌متر آب آبیاری، مقدار عملکرد گندم به ۰/۲۶ تن در هکتار رسید. بنابراین با تغییر ۵۷۰ مترمکعب آب آبیاری، مقدار عملکرد ۱۰۰

درصد افزایش یافت. تغییر آب آبیاری به ۱۹۰۰ میلی‌متر آب آبیاری سبب تغییر عملکرد به میزان ۸۳ درصد شد. مقایسه بین دو مقدار ۷۰۵۰ و ۷۶۱۰ مترمکعب آب آبیاری نشان داد که افزایش ۵۶۰ میلی‌متر آب آبیاری سبب افزایش عملکرد گندم به میزان ۰/۹ درصد شد. با توجه به این نتایج، در مقادیر پایین تأمین آب آبیاری، تغییرات عملکرد گندم بسیار شدیدتر از مقادیر بالای آب آبیاری است.

همانند گندم، با تخصیص بیشتر آب آبیاری، عملکرد جو افزایش یافت. روند افزایش عملکرد تا مقدار ۱۳۵۰ مترمکعب شدید بود و پس از آن بسیار اندک بود. این روند در مقادیر آبیاری بیشتر از ۴۰۰۰ مترمکعب نیز دوباره مشاهده شد. میزان آب مصرفی جو در شرایط فعلی برابر با ۵۰۰۰ مترمکعب است. روند منطقی بین افزایش آب آبیاری و عملکرد سیب‌زمینی نیز مشاهده می‌شود. شدت افزایش عملکرد برای این محصول تقریباً با افزایش آب آبیاری ثابت بود و این نشان می‌دهد که خلاف گندم و جو، رابطه تنگاتنگی بین مقدار آب آبیاری و عملکرد سیب‌زمینی وجود دارد. عملکرد چغندرقند نیز همانند سیب‌زمینی تحت تأثیر افزایش آب آبیاری قرار گرفت و روندی خطی بین این دو پارامتر مشاهده شد.



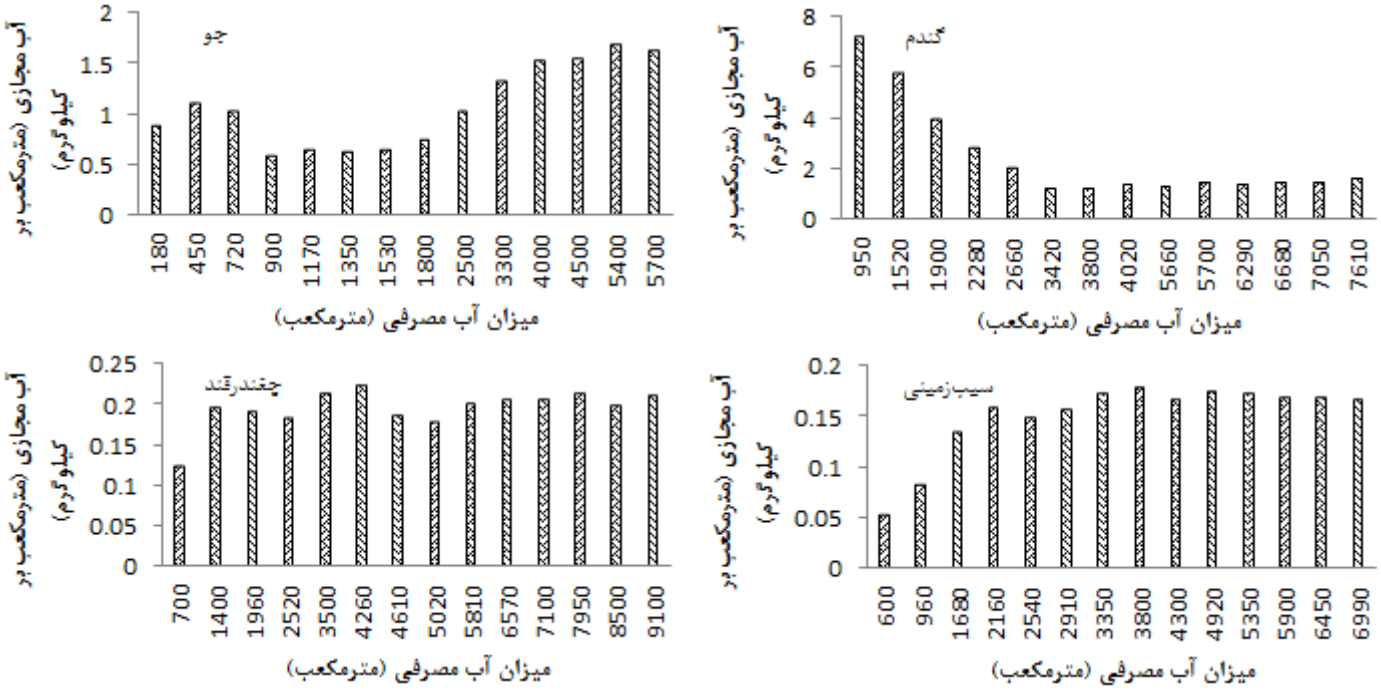
شکل ۵- عملکرد شبیه‌سازی شده محصولات مورد بررسی تحت مقادیر مختلف آب مصرفی

آب مجازی

با افزایش مقدار آب آبیاری، آب مجازی برای تولید هر کیلوگرم گندم کاهش یافت (شکل ۶). این روند تا مقدار ۳۴۲۰ مترمکعب ادامه یافت و پس از آن با سرعت کمتری افزایش نشان داد. بنابراین در صورت آبیاری کمتر از ۳۴۲۰ مترمکعب در هکتار میزان آب مجازی مورد استفاده برای تولید هر کیلوگرم گندم نسبت به شرایط فعلی بالا است. برای دستیابی به اهداف ۵ و ۱۰ ساله (در سال‌های ۱۴۰۵ و ۱۴۱۰) باید مقدار آب آبیاری در محدوده ۳۴۲۰ مترمکعب تثبیت شود. در غیر این صورت علاوه بر هدر رفت آب در مقادیر بیشتر آبیاری، میزان آب مجازی نیز در مقادیر کمتر آبیاری بسیار بالا خواهد بود. با توجه به شکل ۴، عملکرد گندم در مقدار ۳۴۲۰ مترمکعب در هکتار برابر با ۲/۶ تن در هکتار است و ۲۶ درصد کمتر از شرایط فعلی است. بنابراین می‌توان کاهش ۲۶ درصدی عملکرد گندم را پذیرفت ولی آب مجازی نسبت به شرایط فعلی ۲۸ درصد کاهش یابد. کمترین آب مجازی جو در محدوده ۱۵۳۰–۹۰۰ مترمکعب آب آبیاری مشاهده شد. مقایسه این نتایج با شرایط فعلی نشان داد که با تغییر آب آبیاری در محدوده ۱۵۳۰–۹۰۰ مترمکعب می‌توان آب مجازی را حدود یک مترمکعب بر کیلوگرم افزایش داد. با توجه به اینکه آب مجازی تنها معیار برای انتخاب مقدار بهینه آب آبیاری نیست، عملکرد جو در شکل (۵) نیز مد نظر قرار گرفت. با تغییر مقدار آب آبیاری تا محدوده ۱۵۳۰–۹۰۰ مترمکعب، عملکرد جو نسبت به شرایط فعلی ۶۰–۱۷ درصد کاهش یافت. از طرفی، تفاوت چندانی بین مقادیر آب مجازی

برای سناریوهای ۱۵۳۰–۹۰۰ مترمکعب آب آبیاری وجود نداشت. بنابراین پیشنهاد می‌شود ۱۵۳۰ مترمکعب آب آبیاری به عنوان مقدار بهینه پذیرفته شود.

کمترین آب مجازی سیب‌زمینی در دو مقدار ۲۵۴۰ و ۲۹۱۰ مترمکعب و به ترتیب برابر با ۰/۱۴ و ۰/۱۵ مترمکعب بر کیلوگرم به دست آمد. این مقادیر نسبت به شرایط فعلی به ترتیب ۴۸ و ۴۰ درصد کمتر بود. عملکرد سیب‌زمینی در این دو سناریو به ترتیب ۱۷/۱ و ۱۸/۱ تن در هکتار بود که نسبت به شرایط فعلی به ترتیب ۵۵ و ۵۲ درصد کمتر است. با توجه به پایین بودن عملکرد سیب‌زمینی در این دو سناریو، مقدار ۴۳۰۰ مترمکعب آب آبیاری به عنوان سناریوی جایگزین در نظر گرفته شد. آب مجازی و عملکرد سیب‌زمینی در این سناریو به ترتیب برابر با ۰/۱۶ مترمکعب بر کیلوگرم و ۲۵/۸ تن در هکتار بود. این مقادیر نسبت به شرایط فعلی به ترتیب ۳۳ و ۳۲ درصد کاهش داشت. کمترین مقدار آب مجازی در مقدار ۷۰۰ میلی‌متر آب آبیاری مشاهده شد ولی عملکرد این سناریو به قدری پایین است که نمی‌تواند به عنوان یک سناریوی بهینه در نظر گرفته شود. دو سناریوی ۴۶۱۰ و ۵۰۲۰ به ترتیب با مقادیر آب مجازی ۰/۱۸ و ۰/۱۹ کیلوگرم بر مترمکعب نسبت به سایرسناریوها وضعیت بهتری داشتند. عملکرد چغندرقند برای این دو تیمار به ترتیب برابر با ۲۴/۸ و ۲۷/۹ تن در هکتار بود. این مقادیر نسبت به شرایط فعلی به ترتیب ۳۸ و ۳۰ درصد کاهش داشت. از طرف دیگر، آب مجازی در این دو سناریو به ترتیب ۱۲ و ۱۷ درصد نسبت به شرایط فعلی کمتر بود. از این رو به دلیل حصول عملکرد بالاتر، سناریوی ۵۰۲۰ به عنوان سناریوی بهینه انتخاب می‌شود.

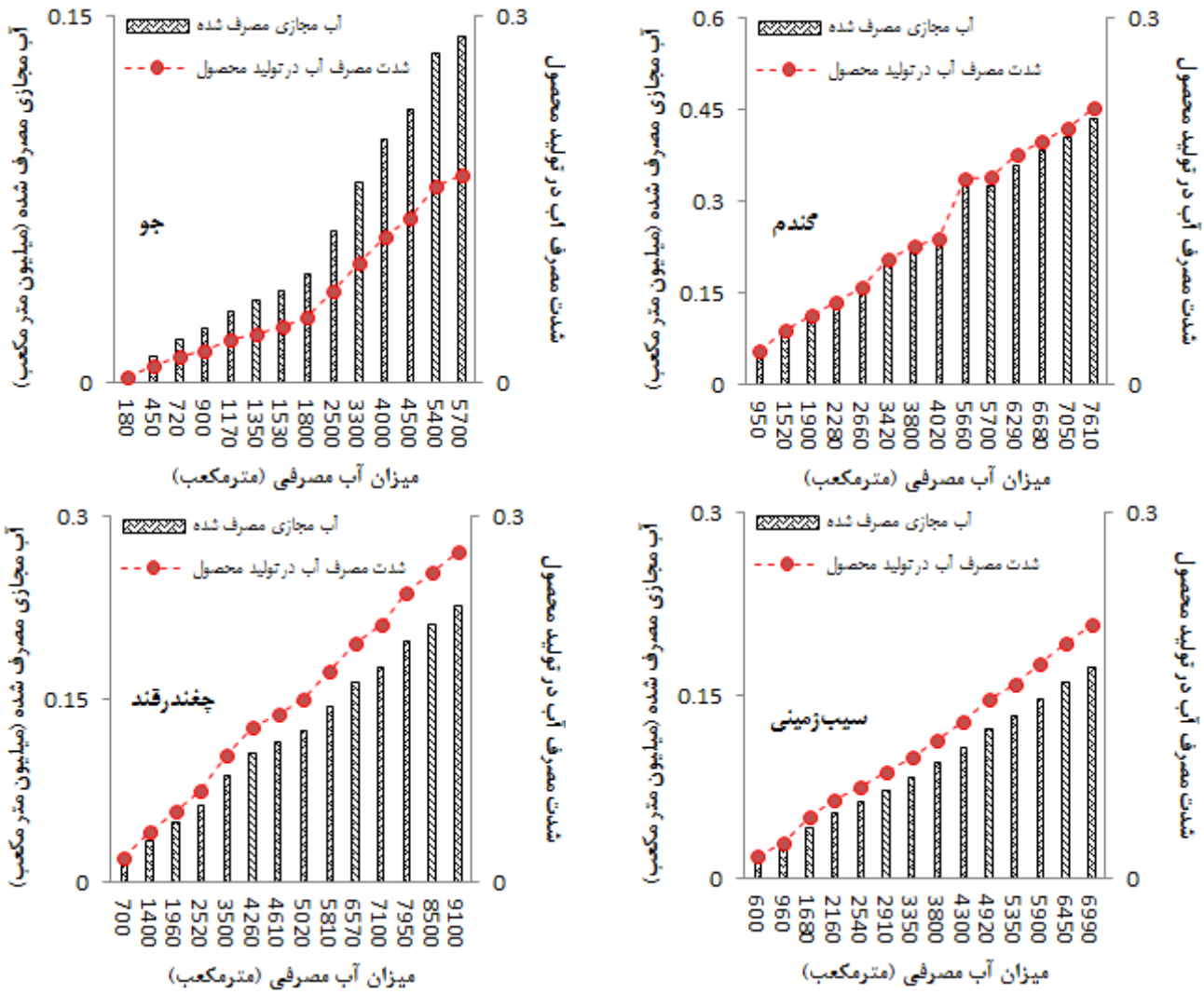


شکل ٦- آب مجازی شبیه‌سازی شده برای محصولات مورد بررسی تحت مقادیر مختلف آب مصرفی

آب مجازی مصرف شده برای تولید محصولات مورد مطالعه در شکل (۷) نشان داده شده است. این منطقی است که با افزایش میزان آب مصرفی مقدار آب مجازی در سطح مزارع استان نیز افزایش یابد. لیکن روند رشد آب مجازی مصرف شده در مقادیر پایین آب مصرفی بسیار بیشتر از مقادیر بالای آب مصرفی است. با فرض اینکه آبیاری مزارع گندم در این شهرستان با مقدار ۳۴۲۰ مترمکعب در هر هکتار انجام شود، کل آب مجازی مصرف شده برای تولید گندم در این شهرستان برابر با ۰/۱۹ میلیون مترمکعب خواهد بود. کل آب مجازی مصرف شده در مقادیر ۲۶۶۰ و ۳۸۰۰ مترمکعب به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۲۱ مترمکعب است که نسبت به شرایط بهینه (۳۴۲۰ مترمکعب) به ترتیب ۲۱ و ۱۰ درصد تغییرات دارد. در شرایط فعلی حدود ۰/۳۶ میلیون مترمکعب آب مجازی برای تولید گندم در سطح این استان مصرف می‌شود که نسبت به شرایط بهینه حدود ۸۹ درصد بیشتر است. اختلاف بین مقدار آب آبیاری در شرایط بهینه و فعلی برابر با ۲۲۰۰ مترمکعب است.

براساس شکل (۷)، مقدار آب مجازی مصرف شده گیاه جو برای شرایط بهینه (۱۵۳۰ مترمکعب در هکتار) برابر با ۰/۰۳۸ میلیون مترمکعب است که نسبت به سناریوهای قبل و بعد از آن مقداری قابل

قبول است. مقدار آب مجازی مصرف شده برای شرایط فعلی برابر با ۰/۱۳ میلیون مترمکعب است که بسیار بیشتر از شرایط بهینه است. روند خطی بین مقادیر آب آبیاری و آب مجازی مصرف شده سیب‌زمینی مشاهده شد. در شرایط فعلی میزان آب مجازی مصرف شده برابر با ۰/۱۶ میلیون مترمکعب است. در شرایط بهینه، براساس شکل ۴، میزان آب مجازی مصرف شده برابر با ۰/۱۰ میلیون مترمکعب است. اختلاف آب مجازی مصرف شده برای این دو سناریو برابر با ۰/۰۶ میلیون مترمکعب است. اختلاف بین آب مجازی مصرف شده برای چغندرقند در دو سناریوی ۴۶۱۰ و ۵۰۲۰ مترمکعب به ترتیب برابر با ۰/۰۱ میلیون مترمکعب است. برای سایر سناریوها نیز مشاهده می‌شود که روند خطی بین آب مجازی مصرف شده و میزان آب مصرفی وجود دارد. آب مجازی مصرف شده در سناریوی بهینه و شرایط فعلی به ترتیب برابر با ۰/۱۲ و ۰/۲۱ میلیون مترمکعب است.



شکل ۷- آب مجازی مصرف شده و شدت مصرف آب شبیه‌سازی شده در تولید محصولات مورد بررسی تحت مقادیر مختلف آب مصرفی

شدت مصرف آب

نتایج شدت مصرف آب در تولید محصول گندم در شکل (۷) نشان داده شده است. این نتایج ارتباط مستقیمی با مقادیر آب مجازی مصرف شده دارد. با افزایش مقدار آب مجازی مصرف شده در این استان، شدت مصرف آب در تولید محصول نیز افزایش می‌یابد. لیکن روند رشد آن در شرایط کاهش مصرف آب، کمتر است. شدت مصرف آب در تولید محصول در شرایط فعلی برابر با ۰/۱۸ و در شرایط بهینه برابر با ۰/۱۰ است. بنابراین با تغییر مقدار آب آبیاری به حالت بهینه، حدود ۸ درصد از شدت وارده به منابع آب در این استان کاسته می‌شود. کاهش مقدار آب آبیاری برای محصول جو تا ۱۵۳۰ مترمکعب در هکتار، سبب کاهش ۱۰ درصدی شدت مصرف بر منابع

آب این شهرستان خواهد شد. شدت مصرف آب در تولید سیب‌زمینی برای شرایط فعلی و بهینه به ترتیب برابر با ۰/۱۹ و ۰/۱۲ است. بنابراین با تغییر مقدار آب آبیاری به ۴۳۰۰ مترمکعب برای هر هکتار، حدود ۷ درصد از شدت مصرف آب در تولید این محصول کاهش خواهد یافت. شدت مصرف آب برای سناریوی بهینه و شرایط فعلی به ترتیب برابر با ۰/۱۵ و ۰/۲۵ است. در نتیجه با تغییر مقدار آب آبیاری به ۵۰۲۰ مترمکعب در هر هکتار، حدود ۱۰ درصد از شدت مصرف آب برای تولید چغندرقند کاهش خواهد یافت.

سناریوهای تخصیص آب

در صورت عدم محدودیت زمین زراعی برای توسعه سطح زیر کشت هر محصول، دو سناریو برای آبیاری همان محصول مورد بررسی در نظر گرفته شد. در سناریوی نخست، مازاد آب آبیاری شرایط فعلی نسبت به شرایط بهینه، برای آبیاری سایر زمین‌های زراعی تحت آن کشت اختصاص می‌یابد. در سناریوی دوم، مقدار آب آبیاری تخصیص آب به صورت مساوی بین مزارع در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال، در سناریوی نخست برای محصول گندم، با مقدار ۲۲۰۰ مترمکعب آب می‌توان عملکردی برابر با ۰/۷۸ تن در هکتار با بهره‌وری آب ۰/۳۴ کیلوگرم بر مترمکعب داشت (شکل ۵). مجموع عملکرد در شرایط بهینه (۲/۶ تن در هکتار) و مازاد آب (۰/۷۸ تن در هکتار) برابر با ۳/۳۸ تن در هکتار خواهد بود که تقریباً با شرایط فعلی مشابه است. از طرف دیگر، مجموع آب مجازی مصرف شده برای این سناریو برابر با ۰/۳۲ میلیون مترمکعب خواهد بود که حدود ۰/۰۴ میلیون مترمکعب از شرایط فعلی کمتر است. در سناریوی دوم برای محصول گندم، ۲۹۰۰ مترمکعب آب آبیاری می‌بایست برای هر هکتار زمین تحت کشت گندم مصرف شود. در این صورت، عملکرد و بهره‌وری آب گندم به ترتیب برابر با ۱/۳ تن در هکتار و ۰/۵ کیلوگرم بر مترمکعب خواهد بود (شکل ۵). میزان آب مجازی مصرف شده در این صورت برابر با ۰/۳۲ میلیون متر مکعب است. با این وجود، چون سطح کشت گندم دو برابر شده است، میزان عملکرد نهایی در سطح شهرستان نیز دو برابر افزایش یافته است؛ آب مجازی مصرف شده نیز دو برابر شده است. در نتیجه، در صورت نیاز به تخصیص آب مازاد از شرایط بهینه (۲۲۰۰ مترمکعب) برای توسعه سطح زیر کشت گندم، بهتر است سناریوی نخست اجرا شود و مازاد آب برای سایر زمین‌های کشاورزی تخصیص یابد. مشابه آنچه برای گندم به دست آمد، در صورت عدم محدودیت سطح کشت، توزیع آب مازاد نسبت به شرایط فعلی برای توسعه سطح زیر کشت می‌تواند به تولید عملکرد سایر محصولات منجر شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که بهترین مقدار آب آبیاری برای گندم برابر با ۳۴۲۰ مترمکعب است. این مقدار نسبت به شرایط فعلی ۳۹ درصد کمتر بود. در نتیجه با اجرای این مقدار برای آبیاری، میزان آب مجازی نسبت به‌شرایط فعلی ۲۸ درصد کاهش خواهد یافت که برابر با مقدار پیش‌بینی شده برای سال ۱۴۰۵ است. با انتخاب این سناریو برای آبیاری، حدود ۷ درصد از شدت بر مصرف منابع آب این استان کاسته خواهد شد. بهینه‌ترین مقدار آب آبیاری برای جو برابر با ۱۵۳۰ مترمکعب تعیین شد. این مقدار نسبت به‌شرایط فعلی حدود ۷۰ درصد کاهش داشت. مقدار آب مجازی در این سناریو برابر با ۰/۶۵ مترمکعب بر کیلوگرم است که نسبت به‌شرایط فعلی، برنامه پنج ساله و برنامه ۱۰ ساله به‌ترتیب ۶۱، ۴۸ و ۳۰ درصد کاهش نشان داد. با انتخاب این سناریو حدود ۱۲ درصد از شدت مصرف منابع آب کاسته خواهد شد. مقدار ۴۳۰۰ مترمکعب آب آبیاری به‌عنوان سناریوی بهینه برای سیب‌زمینی به‌دست آمد. این مقدار ۵۷ درصد نسبت به‌شرایط فعلی کمتر بود. مقدار آب مجازی در این سناریو برابر با ۰/۱۶ مترمکعب بر کیلوگرم بود که نسبت به‌شرایط فعلی کمتر است ولی نتوانست به‌میزان پیش‌بینی شده برای ۱۰ سال آینده دست یابد. با اجرای این سناریو، حدود ۵ درصد از شدت مصرف منابع آب کاسته خواهد شد. مقدار ۵۰۲۰ مترمکعب آب آبیاری به‌عنوان سناریوی بهینه برای زراعت چغندرقند تعیین شد. مقدار آب مجازی برای این سناریو برابر با ۰/۱۷ مترمکعب بر کیلوگرم آب بود. این مقدار نسبت به شرایط فعلی حدود ۹۰ درصد کاهش داشت. لیکن نتوانست به‌هدف برنامه ۵ و ۱۰ ساله برای کاهش آب مجازی در تولید چغندرقند برسد. با انتخاب این سناریو حدود ۱۰ درصد از شدت مصرف منابع آب کاهش خواهد یافت.

منابع

ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، احمدی، م.، اگدرنژاد، ا. و خاشعی سیوکی، ع. ۱۳۹۷. ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد زعفران تحت سناریوهای مختلف کم‌آبیاری و مصرف زئولیت. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۸ (۱): ۱۳۲-۱۱۷.

ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، اگدرنژاد، ا.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های WOFOST، AquaCrop و CropSyst در شبیه‌سازی عملکرد کلزا در منطقه قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳ (۳-۷۵): ۷۲۶-۷۱۵.

ابراهیمی‌پاک، ن. و اگدرنژاد، ا. ۱۳۹۶. ارزیابی و تحلیل حساسیت مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد چغندرقند تحت تنش‌های آبی در شهرکرد. نشریه مدیریت آب و آبیاری. ۷ (۲): ۳۳۱-۳۱۹.

احسانی، م.، خالدی، ه. و برقی، ی. ۱۳۸۸. مقدمه‌ای بر آب مجازی. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

احمدی، م.، قنبرپوری، م. و اگدرنژاد، ا. ۱۴۰۰. مقدار آب کاربردی گندم با استفاده از تحلیل حساسیت و ارزیابی مدل AquaCrop. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۸ (۱): ۳۰-۱۵.

اگدرنژاد، ا.، ابراهیمی‌پاک، ن. ع.، تافته، آ. و احمدی، م. ۱۳۹۷. برنامه‌ریزی آبیاری کلزا با استفاده از مدل AquaCrop در دشت قزوین. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. ۵ (۲-۱۰): ۶۴-۵۳.

بی‌نام، ۱۳۹۹. برنامه ارتقاء بهره‌وری آب کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری. ۲۵ صفحه.

رستگاری‌پور، ف.، سالاری، ا. و عزیززاده، ف. ۱۴۰۰. تعیین شاخص‌های آب مجازی و ردپای اکولوژیک آب چغندرقند (مطالعه موردی: شهرستان تربت حیدریه)، راهبردهای توسعه روستایی. ۸ (۲-۳۰): ۲۴۳-۲۳۳.

سیاحی، ح.، اگدرنژاد، ا. و ابراهیمی‌پاک، ن. ۱۳۹۹. مقایسه دو مدل AquaCrop و SWAP در شبیه‌سازی عملکرد و کارایی مصرف آب چغندرقند تحت دوره‌های مختلف آبیاری. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۴ (۴): ۱۳۱۱-۱۳۲۱.

صفدری، م.، حسینی، س. م.، حکمت‌نیا، م. و دادرس‌مقدم، ا. ۱۴۰۲. ردپای مصرف آب و تجارت آب مجازی خرما در ایران. دانش آب و خاک. انتشار آنلاین. دسترسی در https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_12338.html?lang=fa .

علیزاده، ا. و خلیلی، ن. ۱۳۸۸. بررسی بهره‌وری آب-انرژی در زراعت چغندرقند (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). نشریه آبیاری و زهکشی. ۳ (۲): ۱۳۶-۱۲۳.

محمدی، ع. و بنی‌حبیب، م. ا. ۱۳۹۹. مدل مدیریت راهبردی تبادل آب مجازی محصولات کشاورزی و دامی ایران. نشریه مدیریت آب و آبیاری. ۱۰ (۱): ۲۹-۱۵.

مکارمی، م.، قمی‌آویلی، ف. و مرادی‌راد، ع. ا. ۱۴۰۱. بررسی آب مجازی با رویکرد مدیریت منابع آب با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT، علوم و مهندسی آب و فاضلاب. ۷ (۱): ۳۳-۲۳.

موسوی، س. ن.، اکبری، س. م.، سلطانی، غ. و زارع مهرجردی، م. ۱۳۸۸. آب مجازی؛ راهکاری نوین در جهت مقابله با بحران آب. همایش ملی مدیریت بحران آب. دانشگاه آزاد اسلامی.

نیسی، ح.، اگدرنژاد، ا. و سپهری، س. ۱۴۰۰. تحلیل حساسیت پارامترهای رشد گیاهی برای ارزیابی مدل AquaCrop در شبیه‌سازی عملکرد گیاه سیب‌زمینی در مدیریت‌های مختلف کم‌آبیاری در کرمانشاه. نشریه مدیریت آب در کشاورزی. انتشار آنلاین.

یحیی‌زاده برنطین، م. و بذرافشان، ا. ۱۴۰۰. ارزیابی تجارت آب مجازی و ارزش اقتصادی آب در پنبه فاریاب در ایران. نشریه پژوهش‌های پنبه ایران. ۹ (۱): ۱۴۲-۱۲۵.

Akoto-Danso, E. K., Karag, H., Drechsel, P., Nyarko, G. and Buerkert, A. 2019. Virtual water flow in food trade systems of two West African cities. Agricultural Water Management. 213: 760-772.

Bazrafshan. O., Zamani, H., Ramezanietedli, H., Gerkani Nezhad Moshizi, Z., Shamili, M., Ismaelpour, Y., and Gholami, H. 2020. Improving water management in date palms using economic value of water footprint and virtual water trade concepts in Iran. Agricultural Water Management. 229: 105-941.

Chapagain, A.K. and Hoekstra, A.Y. 2004. Water footprints of nations, Unesco-IHE Institute for Water Education.

Chen, G. Q. and Li, J. S. 2015. Virtual water assessment for Macao, China: highlighting the role of external trade. Journal of Cleaner Production. 93: 308-317.

El-Sadek, A. 2010. Virtual Water Trade as a Solution for Water Scarcity in Egypt, Water Resources Management. 2437-2448.

Ewaid, S. H., Ali Abed, S., Abbas, A. J., Al-Ansari, N. 2020. Estimation the virtual water content and the virtual water transfer for Iraqi wheat. 1st International Virtual Conference on Pure Science. doi:10.1088/1742-6596/1664/1/012143.

Fraiture, C. de, Cai, X., Amarasinghe, U., Rosegrant, M. and Molden, D. 2004. Does International Cereal rade Save Water? The Impact of Virtual Water Trade on Global Water Use. Comprehensive Assessment Research Report 4, Colombo, Sri Lanka, Comprehensive Assessment Secretariat.

Jiang, W. and Marggraf, R. 2015. Bilateral virtual water trade in agricultural products: a case study of Germany and China. Water International. 40 (3): 483-498.

Katerji N., Campi P and Mastrorilli M, 2013. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. Agricultural Water Management. 130: 14-26.

Masud, M. B., Wada, Y., Goss, G. and Faramarzi, M. 2019. Global implications of regional grain production through virtual water trade. Science of the Total Environment. 659: 807-820.

Renault, D. 2003. Value of virtual water in food: Principles and virtues. In: Virtual water trade:

Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Value of Water Research Report Series No. 12, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.

Shi, J., Liu, J. and Pinter, AL. 2014. Recent evolution of China's virtual water trade: analysis of selected crops and considerations for policy, Hydrology and Earth System Sciences. 18: 1349- 1357.

Stricevic R., Cosic M., Djurovic N., Pejic B and Maksimovic L, 2011. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. Agricultural Water Management. 98: 1615-1621.

Wang, YD., Leeb, JS., Adbemabiesea, L., Zamea, K. and Kang, S. 2015. Virtual water management and water energy nexus: A case study of three mid Atlantic. Resources, Conservation and Recycling. 98(3): 76-84.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.1, Vol. 17, Apr.-May. 2023, p. 25-41

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۷، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۲، ص. ۴۱-۲۵

Determining the Appropriate Amount of Irrigation Water for Wheat, Barley, Potatoes and Sugar Beet in Chaharmahal-and-Bakhtiari Province Using Aquacrop and the Concept of Virtual Water

S. M. Mousavi[1], A. Egdernezhad[2*], S. Sepehri Sadeghiyan[3]
Recived: May.17, 2022 Accepted: Aug.07, 2022

Abstract

The concept of virtual water as the amount of water consumed to produce each kilogram of agricultural products is one of the ways to reduce the pressure on water resources. According to this concept, it is necessary to produce agricultural products in balance with the amount of water consumption and with the policy of reducing water consumption. Therefore, in the present study, different irrigation scenarios in the production of four strategic crops (wheat, barley, potato and sugar beet) in Chaharmahal-and-Bakhtiari province based on the concept of virtual water were investigated. For this purpose, first, using the water productivity outlook of this province, the amount of virtual water in the current and future conditions (2025 and 2030) was determined. Then, the calibrated AquaCrop was used to simulate the yield of plants under study based on different amounts of irrigation water. The results showed that the amount of irrigation water suitable for wheat, barley, potato, and sugar beet production was 3420, 1530, 4300 and 5020 cubic meters per hectare, respectively. These values decreased by 39, 70, 57 and 90%, respectively, compared to the current irrigation conditions in this province. The amount of virtual water consumed in the proposed amounts of irrigation water is 0.19, 0.03, 0.6 and 0.12 million cubic meters, respectively. The amounts of virtual water for the production of these crops were decreased by 28, 61, 33 and 12%, respectively. By selecting these values, about 7, 12, 5 and 10 percent of the pressure applied to the water resources of this province will be reduced, respectively. Therefore, it is suggested that the aforementioned amount for irrigation water be used for the cultivation of wheat, barley, potatoes and sugar beet in the farms of this province.

Keywords: Irrigation scenarios, plant modeling, Virtual water used, water consumption intensity

1- M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
2- Assistant Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
3- Assistant professor of Irrigation and Drainage Engineering, Agricultural Engineering Research Institute (AERI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran
(*-Corresponding Author Email: a_eigder@ymail.com)