

تولید محصولات زراعی استان البرز بر اساس مفهوم آب مجازی و مدیریت آن با استفاده از مدل AquaCrop

محمد شیرالی^۱، اصلان اگدرنژاد^{۲*}، سالومه سپهری صادقان^۳

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

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱؛ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰)

چکیده

استان البرز به عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی در کشور محسوب می‌شود که سالیانه بخش اعظمی از منابع آب موجود در این استان به بخش کشاورزی اختصاص می‌یابد. مفهوم آب مجازی به عنوان ابزاری برای بررسی وضعیت تولید محصولات کشاورزی در هر منطقه براساس میزان مصرف آب به حساب می‌آید. به همین دلیل، در پژوهش حاضر، با استفاده از داده‌های برداشت شده طی ده سال اخیر (۱۳۸۹-۱۳۹۹) میزان تجارت آب مجازی در استان البرز بررسی شد. نتایج نشان داد شاخص کم‌آبی استان البرز ۰/۶ است. شاخص خودکفایی این استان نسبت به واردات آب مجازی ۱۰۰ است. بنابراین، در این استان بیشتر محصولات کشاورزی صادر می‌شود و استان البرز نسبت به تولید محصولات کشاورزی و واردات آب مجازی خودکفا است. برای بهبود وضعیت آب استان البرز، سناریوهای مختلفی با استفاده از مدل AquaCrop بررسی شد و مقدار بهینه آب برای آبیاری هر محصول زراعی تعیین شد. با اصلاح وضعیت آبیاری موجود، آب مجازی صادر شده برای بیشتر گیاهان زراعی کاهش یافت. بیشترین کاهش صادرات آب مجازی برای جو، کاهو و کرفس، سیب‌زمینی و کلم به ترتیب با مقادیر ۱/۶، ۰/۹۷، ۰/۱۶ و ۰/۱۳ میلیون مترمکعب در سال به دست آمد. همچنین، با اعمال سناریوهای بهینه آبیاری، شاخص کم‌آبی استان البرز به ۰/۵۴ کاهش یافت که نسبت به وضعیت فعلی ۰/۰۶ کمتر بود.

واژه‌های کلیدی: آب مجازی، شاخص کم‌آبی، شاخص وابستگی به آب، شاخص خودکفایی آب، مدل AquaCrop.

مقدمه

کشاورزی نقش اساسی و حیاتی در اقتصاد ملی و تولید مواد غذایی در ایران دارد، به طوری که حدود ۲۷ درصد تولید ناخالص ملی و ۲۲ درصد نیروی کار کشور با این بخش مرتبط است [۱]. در این مورد نقش منابع آب به عنوان مهم‌ترین عامل محدودکننده در توسعه بخش کشاورزی، اهمیت اقتصادی آب را بسیار بارز کرده است. کشور ایران هم که جزء کشورهای نیمه‌خشک به شمار می‌رود، از این قاعده جدا نیست. به واسطه موقعیت خاص اقلیمی و پراکنش نامناسب زمانی و مکانی بارندگی، کشت آبی محور اصلی در تولید مواد غذایی است، به طوری که حدود ۹۰ درصد کل محصولات کشاورزی ایران از اراضی فاریاب حاصل می‌شود [۲ و ۳].

بخش کشاورزی به عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در کشور ایران محسوب می‌شود و به دلیل افزایش تأمین غذا برای جمعیت در حال رشد، مصرف آب در این بخش در حال افزایش است [۲]. پیش‌بینی شده است که جمعیت ایران تا سال ۱۴۱۰ به مرز ۱۰۰ میلیون نفر خواهد رسید. در این صورت، برای تأمین نیازهای غذایی این جمعیت، بر مبنای حدود ۲۶۰۰ کیلوکالری انرژی روزانه، به بیش از ۱۵۰ میلیارد مترمکعب آب سالانه نیاز خواهد بود. این مقدار آب در سبد آبی کشور موجود نیست [۱]. به همین دلیل، مدیریت بهینه مصرف آب در بخش کشاورزی بسیار مهم است [۲]. برای این منظور، مفهوم آب مجازی برای تعیین میزان مصرف آب برای تولید محصولات کشاورزی و جابه‌جایی پنهان آب در سطح یک منطقه یا جهان توسط آئن در دهه ۱۹۹۰ میلادی شکل گرفت [۴]. در واقع، کل مقدار آب مصرفی در زنجیره تولید برای پدید آوردن هر محصول نهایی را آب مجازی می‌نامند. قبل از سال ۱۹۹۳، واژه آب جاسازی شده برای رساندن این مفهوم به کار می‌رفت. اما نتوانست توجه مدیران منابع آب را به خود جلب کند [۱]. واژه آب مجازی، آب، غذا و تجارت را با به یکدیگر پیوند می‌زند. این مفهوم عکس بهره‌وری آب است.

پس از گذشت چندین سال از مطرح شدن مفهوم آب مجازی، امروزه دانش آب مجازی و تجارت آن مورد توجه مجامع علمی قرار گرفته و در سیاست‌گذاری‌های ملی و بین‌المللی جوامع و توسعه منابع آبی وارد شده است [۵].

تجارت آب مجازی طی دهه‌های گذشته به طور دائم در حال افزایش بوده است. چون در کشاورزی میزان آب زیادی مصرف می‌شود، بنابراین تجارت محصولات کشاورزی نشان‌دهنده بخش عمده‌ای از تجارت آب مجازی است. به عنوان مثال، طی سال‌های ۱۹۹۵-۱۹۹۹ گندم به‌تنهایی ۳۰ درصد حجم تجارت آب مجازی بین کشورها را به خود اختصاص داد. پس از آن، سویا و برنج با تراز ۱۷ و ۱۵ درصد قرار دارند [۶].

به رغم محدودیت ظرفیت تجدیدپذیری منابع آبی، برخی کشورهای جهان و بعضی استان‌های ایران به پمپاژ بیش از حد آب‌های زیرزمینی و اجرای پروژه‌های بزرگ انتقال آب اقدام می‌کنند. در چنین شرایطی، تولید محصولات چندین برابر گران‌تر تمام می‌شود. در حالی که می‌توان با وارد کردن مقوله تجارت آب مجازی در سیاست آبی هر منطقه، میزان دسترسی به منابع آب را افزایش داد و به همان میزان از افزایش فشار بر منابع محدود آب کاست [۷ و ۸]. بسیاری از کشورهای خشک و نیمه‌خشک با واردات کالاهای آب‌بر، آبی را که برای تولید آن نیاز است برای استفاده در سایر بخش‌ها حفظ می‌کند [۵]. در نظر داشتن سیاست توسعه تولید و صادرات محصولات کشاورزی به همراه مفهوم آب مجازی باعث می‌شود به تولید محصولات کشاورزی و هزینه فرصت و منافع حاصل از تولید به صورت واقع‌بینانه توجه شود. از این‌رو، باید سعی شود تولید محصولات کشاورزی به گونه‌ای باشد که بیشترین منافع بلندمدت از نظر کارایی تولید و مصرف منافع ملی حاصل شود [۹]. در سال ۱۹۹۵ کشور مصر حدود ۷/۵ میلیون تن انواع غلات وارد کرد، به طوری که تولید این مقدار غلات در مصر به حدود ۹/۹ میلیارد مترمکعب آب نیاز داشت [۱۰]. رینالت [۱۱] نشان داد چون حجم آب مجازی ذرت در مصر ۱/۱۲ مترمکعب بر کیلوگرم و حجم آب مجازی ذرت در فرانسه ۰/۶ مترمکعب بر کیلوگرم است، بنابراین واردات یک کیلوگرم ذرت فرانسه به مصر، باعث صرفه‌جویی در مصرف ۰/۵۲ مترمکعب آب می‌شود. براساس نتایج پژوهش چا‌پاگین و هوکسترا [۴] ایران طی سال‌های ۱۹۹۵-۱۹۹۹ با واردات ۲۹/۱ میلیارد مترمکعب آب مجازی در رتبه نوزدهم واردکنندگان آب مجازی در سطح جهانی قرار گرفته است. همچنین، ایران با صادرات ۵ میلیارد متر مکعب آب مجازی در رتبه ۵۵ جهان طی سال‌های ۱۹۹۷-۱۹۹۹.

محصولات کشاورزی و بهره‌وری آب گیاهان مختلف می‌پردازند. کاربرد مدل‌های گیاهی برای شبیه‌سازی واکنش گیاهان به مقدار آب مصرفی سابقه نسبتاً طولانی دارد. این مدل‌ها از حدود پنجاه سال پیش با بسط برنامه‌های رایانه‌ای به محققان معرفی شد [۱۹]. به‌رغم مزیت‌ها و محدودیت‌های کلیه این مدل‌ها، سازمان خواروبار کشاورزی (فائو) مدل AquaCrop را به منظور نزدیکی قابل قبول شرایط مدل‌سازی با شرایط واقعی مزرعه ارائه داد. این مدل به دلیل سادگی، داده‌های ورودی کم، کاربرپسند بودن و دقت زیاد محبوبیت بسیاری بین محققان پیدا کرده است [۲].

استان البرز به عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی در کشور محسوب می‌شود که سالیانه بخش اعظمی از منابع آب موجود در این استان به بخش کشاورزی اختصاص می‌یابد. بنابراین، ارزیابی تجارت آب مجازی در این استان و بهبود وضعیت منابع آب در آن بسیار بااهمیت است. با توجه به اینکه تا کنون توجه کمتری نسبت به این مفهوم در استان البرز شده است، در این پژوهش ابتدا وضعیت آب مجازی برای تولید محصولات مختلف کشاورزی در این استان تعیین شده و سپس، وضعیت تجارت آب مجازی برای این استان بررسی می‌شود. همچنین، کاربرد مدل AquaCrop برای بررسی تغییرات وضعیت تجارت آب مجازی در یک استان تا کنون مورد توجه محققان نبوده است. به همین دلیل، در ادامه، با استفاده از مدل گیاهی AquaCrop، اثر سناریوهای مختلف مصرف آب در بخش کشاورزی بر میزان تجارت آب مجازی استان البرز بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

محل پژوهش

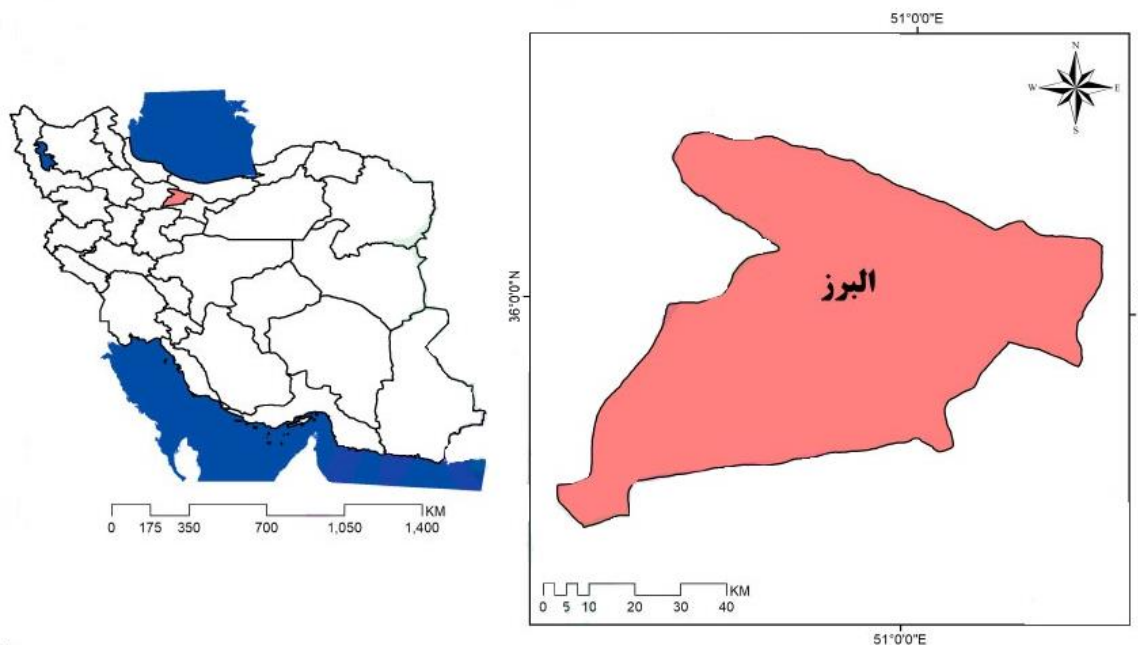
این پژوهش در استان البرز واقع در ۳۵ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۹ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی انجام شد. این استان از شمال به استان مازندران، از غرب به استان قزوین، از شرق به استان تهران و از جنوب به استان مرکزی محدود می‌شود. استان البرز در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه‌های البرز قرار گرفته‌است. استان البرز در فصل‌های سرد سال متأثر از سیستم‌های شمالی، شمال‌غربی و غربی است و ریزش‌های جوی آن از فعالیت

۲۰۰۲ قرار داشت [۱۲]. ماسود و همکاران [۱۳] به بررسی حجم صادرات گندم از آبرتای کانادا پرداختند و نشان دادند طی ۱۰ سال تقریباً پنج میلیارد مترمکعب از منابع آب این منطقه برداشت شده است. این محققان گزارش کردند که صادرات گندم به کشورهای مقصد سبب شده است فشار کمتری به منابع آب این کشورها وارد شود. جیانگ و مارگرف [۱۴] به مطالعه تجارت آب مجازی بین دو کشور چین و آلمان پرداختند. این محققان نشان دادند آلمان با اتخاذ سیاست کالاهای آبر توانسته است حدود ۶۹ میلیون مترمکعب آب ذخیره کند، در حالی که همین مقدار آب از منابع آب چین کاسته شده و فشار بر منابع آب این کشور وارد شود. تحقیقات مشابه توسط چن و لی [۱۵] در منطقه ماکائو و نوو و همکاران [۱۶] در اسپانیا انجام شده است. این محققان نیز به بررسی تجارت آب مجازی در این مناطق پرداختند و گزارش کردند که صادرات آب مجازی فشاری بر منابع آب این مناطق وارد نکرده است. محمدی و بنی‌حبيب [۱۷] از مدل‌های راهبردی برای بررسی تبادل آب مجازی محصولات کشاورزی و دامی استفاده کردند. این محققان برای کاهش صادرات آب مجازی پیشنهاد کردند که محصولات با آب مجازی کمتر کاشته شده و صادرات فقط به این محصولات محدود شود.

استفاده از ابزار آب مجازی در انجام تحلیل‌ها، این امکان را فراهم می‌آورد که منبع آب در ارتباط با سایر منابع تولید بخش کشاورزی به ارزیابی گذاشته شود. همچنین، می‌توان میان داده‌های کلان مصارف آبی و داده‌های خرد، ارتباطات منطقی ایجاد کرده و به ارزیابی آن‌ها پرداخت. این مزیت سبب می‌شود که با شناخت کامل‌تری نسبت به سیستم منابع و مصارف یک حوضه آبریز یا یک استان، نقاط آسیب‌پذیر را شناسایی کرد و به دنبال راهکارهای کاهش آن بود [۵]. بنابراین، تعیین مقدار آب مجازی در هر منطقه و بررسی سناریوهای مختلف آبیاری بر تغییرات آن اهمیت زیادی دارد. با توجه به اینکه بررسی سناریوهای مختلف مصرف آب در بخش کشاورزی نیازمند صرف هزینه و وقت بسیار زیاد است، محققان با مطالعات فراوان در خصوص فیزیولوژی رشد گیاهان زراعی، مدل‌های رشد گیاهی مختلفی بسط داده‌اند [۳] و [۱۸]. این مدل‌ها با شبیه‌سازی شرایط مزرعه و مقدار آب مصرفی برای رشد گیاهان زراعی به تعیین عملکرد

می‌شود و تا اقلیم‌های نیمه‌مرطوب و مرطوب در قسمت‌های شمالی ادامه پیدا می‌کند. در شکل ۱ موقعیت این استان در کشور نشان داده شده‌است.

این سیستم‌ها نشئت می‌گیرد. بارندگی‌های این منطقه از ماه آبان آغاز می‌شود و تا اواسط اردیبهشت ادامه می‌یابد. استان البرز از نظر اقلیمی دارای تنوع زیادی است، به گونه‌ای که از اقلیم بیابانی در قسمت‌های جنوبی شروع



شکل ۱. موقعیت استان البرز در کشور

$$WPc = \frac{1}{VWCc} \quad (2)$$

مبادلات آب مجازی استان البرز به ازای صادرات و واردات هر محصول، از حاصل ضرب مقدار کمی واردات یا صادرات آن محصول در میزان آب مجازی آن به صورت رابطه ۳ محاسبه شد [۲۰].

$$NVWI = M \times VWCc \quad (3)$$

که در این رابطه، NVWI میزان واردات یا صادرات آب مجازی (مترمکعب)، M مقدار محصول وارد یا صادر شده به استان (کیلوگرم) و VWCc مقدار آب مجازی محصول کشاورزی مورد نظر (مترمکعب بر کیلوگرم) است. میزان شاخص کم‌آبی استان با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد [۲۰].

$$WS = \frac{WU}{TWU} \quad (4)$$

در این رابطه، WS شاخص کم‌آبی استان (-)، WU کل آب مصرفی استان البرز در بخش کشاورزی (مترمکعب در سال) و TWU کل منابع آب موجود در استان (مترمکعب

شاخص‌های آب مجازی

در این پژوهش آمار و اطلاعات مربوط به منابع آب به‌کارگرفته‌شده در بخش کشاورزی، میزان تولید محصولات کشاورزی، سطح زیر کشت آن‌ها و نیاز آبی هر محصول در استان البرز طی ده سال اخیر (۱۳۸۹-۱۳۹۹) با مطالعات میدانی توسط این محققان جمع‌آوری شد. سپس، مقدار آب مجازی برای هر محصول کشاورزی به صورت نسبتی از متوسط نیاز آبی به متوسط عملکرد محصول براساس رابطه ۱ محاسبه شد [۲۰].

$$VWCc = \frac{CWRc}{Tpc} \quad (1)$$

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. بهره‌وری آب برای محصولات کشاورزی (WPc) با میزان آب مجازی رابطه معکوس دارد و براساس رابطه ۲ محاسبه شد [۲۰].

مدل AquaCrop

دقت و صحت نتایج مدل AquaCrop توسط محققان در اغلب مناطق کشور مورد تأیید بوده و به همین دلیل، از آن به عنوان ابزاری برای تعیین مقادیر عملکرد محصولات زراعی در استان البرز نسبت به مقادیر مختلف آب آبیاری استفاده شد [۲، ۳، ۱۵، ۱۸، ۲۱]. پیش از استفاده از این مدل گیاهی، با استفاده از داده‌های مزرعه‌ای و تحقیقاتی برای هر گیاه زراعی مورد واسنجی قرار گرفت. سپس، مدل AquaCrop برای هر گیاه زراعی به صورت مجزا برای شبیه‌سازی استفاده شد. مدل AquaCrop از تبخیر-تعرق (ET) محاسبه شده (رابطه ۸) با فرض تفکیک آن استفاده می‌کند [۳ و ۱۸]. تفکیک این مؤلفه به دو جزء تبخیر (E) و تعرق (Tr) سبب می‌شود تا مصرف غیر تولیدی آب از معادلات حذف شود (رابطه ۹).

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(\frac{ET_x - ET_a}{ET_x}\right) \quad (8)$$

$$T_r = K_s \times CC \times K_c \times ET_0 \quad (9)$$

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 ۱۰ محاسبه می‌شود [۳ و ۱۸].

$$CC = CC_0 \times e^{CGC \cdot t} \quad (10)$$

در این رابطه، CC_0 پوشش تاج اولیه (درصد)، CGC ضریب رشد پوشش تاج (عکس روز) و t زمان (روز) است. با تعیین تعرق و تبخیر-تعرق، بیوماس خشک نیز طبق رابطه ۱۱ برآورد می‌شود [۳ و ۱۸].

$$B = WP^* \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (11)$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه طی 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 ۱۲ محاسبه می‌شود [۳ و ۱۸].

در سال) است. مقدار WS بین صفر تا یک متغیر است. هر چه میزان این شاخص به سمت یک میل کند، به این معناست که شدت مصرف آب این استان در بخش کشاورزی زیاد است. شاخص وابستگی به واردات آب مجازی نشان‌دهنده نسبت واردات خالص آب مجازی به کل آب تخصیص یافته در بخش‌های مختلف این استان است. برای محاسبه این شاخص، از رابطه ۵ استفاده شد [۲۰].

$$\begin{cases} \text{if } NVWI \geq 0 & WD = \frac{NVWI}{TWU + NVWI} \times 100 \\ \text{if } NVWI < 0 & WD = 0 \end{cases} \quad (5)$$

در این رابطه، $NVWI$ خالص واردات آب مجازی (مترمکعب)، TWU کل منابع آب موجود در استان (مترمکعب در سال) و WD شاخص وابستگی به آب مجازی (درصد) است. مقدار این شاخص بین صفر تا ۱۰۰ متغیر است. اگر WD برابر با صفر باشد، به این معناست که میزان واردات برابر یا کمتر از میزان صادرات آب مجازی است. به این ترتیب، این استان صادرکننده آب مجازی است. در صورتی که وابستگی به آب برای این استان به عدد ۱۰۰ نزدیک شود، این استان به واردات آب مجازی بسیار وابسته است. شاخص خودکفایی آب براساس رابطه ۶ محاسبه می‌شود [۲۰].

$$WSS = 100 - WD \quad (6)$$

در این رابطه، WSS شاخص خودکفایی آب است. این شاخص نشان می‌دهد استان البرز تا چه حد می‌تواند نیازهای جمعیت خود را در رابطه با تولید محصولات کشاورزی تأمین کند. اگر WSS برابر با ۱۰۰ باشد، این استان کل منابع آبی مورد نیاز برای تولید محصولات کشاورزی را دارد. اگر مقدار WSS برابر با صفر باشد، یعنی استان البرز به شدت به واردات منابع آبی به شکل مجازی وابسته است. شاخص شدت مصرف آب در بخش کشاورزی به صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود [۲۰].

$$WI = \frac{AWU}{TWU} \quad (7)$$

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.

نتایج نشان داد بیشترین آب مجازی به حبوبات، یونجه، جو، پنبه و گندم اختصاص داشت. کمترین میزان آب مجازی نیز برای کاهو و کرفس، کلم، ذرت علوفه‌ای، لوبیا سبز و گوجه‌فرنگی به دست آمد. با توجه به مفهوم بهره‌وری آب، بیشترین بهره‌وری برای گیاهانی به دست می‌آید که کمترین میزان آب مجازی را در تولید محصول داشته باشند. به این ترتیب، در بین گیاهان زراعی بیشترین بهره‌وری آب به کاهو و کرفس اختصاص داشت. بیشترین آب مجازی صادر شده به کاهو و کرفس، گندم و یونجه اختصاص داشت. علت آن سطح زیر کشت زیاد این محصولات نسبت به نیاز استان البرز بود. این عامل سبب شد حجم زیادی از محصول تولید شده به بیرون از این استان صادر شود. پایین بودن سطح آب مجازی صادر شده برای گیاهانی مانند جو به دلیل مصرف بیشتر محصول تولید شده در استان البرز است. با توجه به رابطه ۴ و براساس نتایج به دست آمده، شاخص کم‌آبی استان البرز برابر با ۰/۶ است. در واقع، حدود ۶۰ درصد از منابع آب موجود در این استان صرف فعالیت‌های کشاورزی می‌شود. این مقدار براساس متوسط مصرف آب در کشور در بخش کشاورزی (۹۰ درصد) کمتر است. بنابراین، استان البرز در جایگاه بهتری نسبت به استان‌های دیگر قرار دارد. همچنین، با مقایسه این استان با برخی استان‌های کویری مانند سیستان و بلوچستان (با شاخص کم‌آبی ۰/۹۲)، مشاهده می‌شود که جایگاه استان البرز به مراتب بهتر است [۲۰]. همچنین، با توجه به مازاد بودن میزان تولید محصولات کشاورزی در این استان و صادرات بیشتر محصولات کشاورزی از این استان، وابستگی به واردات آب مجازی در این استان برابر با صفر است. در نتیجه در وضعیت فعلی، استان البرز تقریباً از نظر وضعیت آبی و تولید این محصولات کشاورزی خودکفا است. بنابراین، براساس رابطه ۵، شاخص خودکفایی برای این استان نیز برابر با ۱۰۰ درصد تعیین شد. براساس کلیه نتایج، شدت مصرف آب برای گیاهان زراعی در این استان به دست آمد. براساس این نتایج، میزان شدت مصرف آب برای گندم، جو، کاهو و کرفس و یونجه از سایر گیاهان بیشتر بود.

(۱۲)

$$Y = B \times HI$$

در این رابطه، Y عملکرد، HI شاخص برداشت و B بیوماس خشک است.

نتایج و بحث

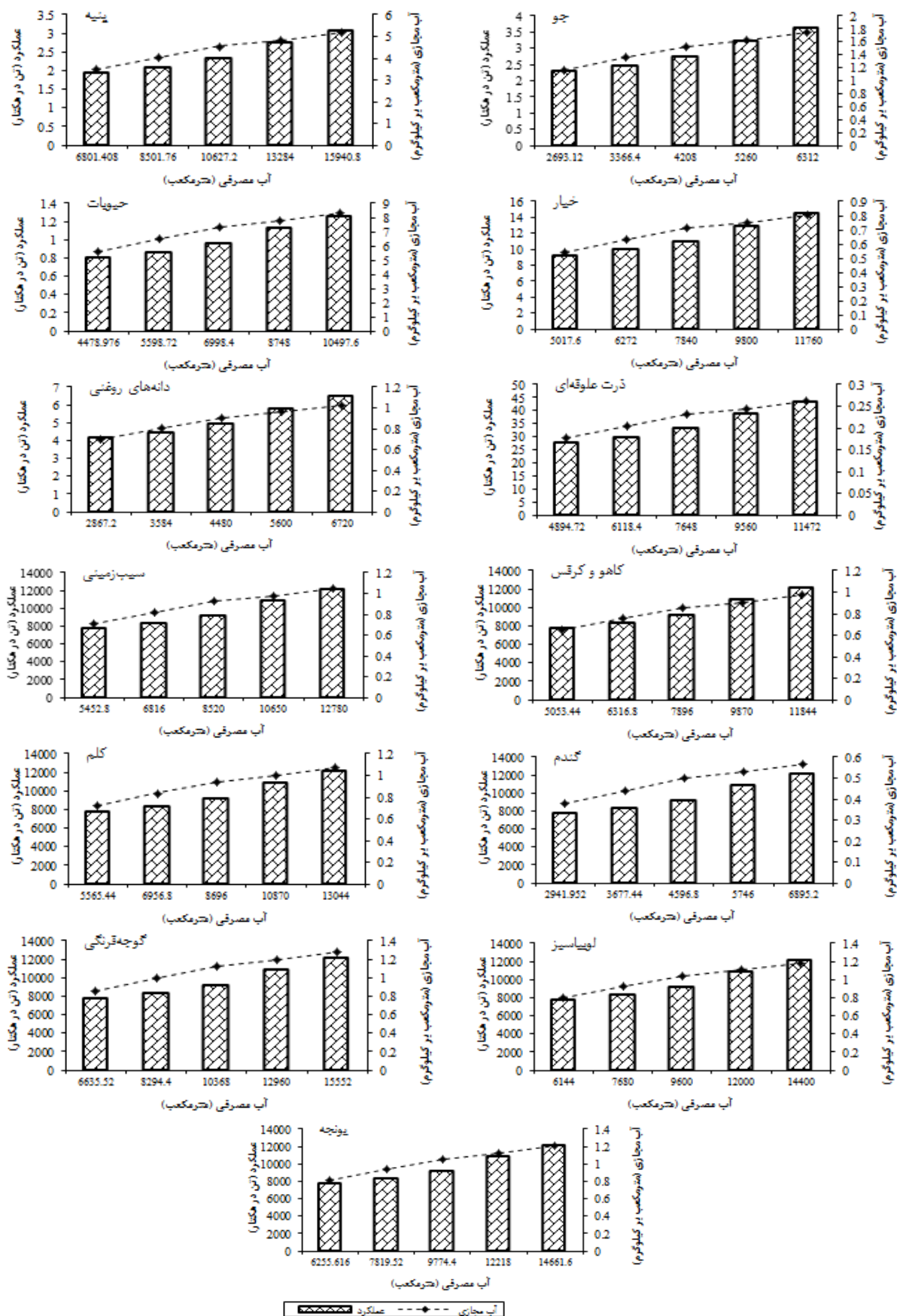
نیاز آبی گیاهان زراعی استان البرز در جدول ۱ نشان داده شده است. بیشترین نیاز آبی برای گیاهان پنبه، گوجه‌فرنگی، لوبیا سبز و یونجه مشاهده شد. کمترین نیاز آبی نیز به گندم، دانه‌های روغنی و جو اختصاص داشت. در بین گیاهان مورد مطالعه، بیشترین میزان تولید در استان البرز برای کاهو و کرفس (به طور متوسط ۲۳۵۶۶۸ تن در استان) مشاهده شد که در مقایسه با سایر گیاهان زراعی مقدار قابل توجهی است. کمترین میزان تولید محصول نیز به خیار (۷۴ تن در استان) و حبوبات (۴۶/۶ تن در استان) اختصاص داشت. مساحت تحت کشت گیاهان زراعی در استان البرز در جدول ۱ نشان داده شده است. بیشترین مساحت تحت کشت به گیاهان گندم (۹۸۰۸ هکتار)، جو (۸۰۲۴ هکتار) و کاهو و کرفس (۳۲۱۶ هکتار) اختصاص داشت. کمترین مساحت تحت کشت نیز به خیار (۴/۴ هکتار) اختصاص داشت. با توجه به سطح زیر کشت محصولات زراعی مورد مطالعه و نیاز آبی آن‌ها، میزان مصرف آب برای گیاهان مورد مطالعه در سطح استان البرز محاسبه شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود؛ به‌رغم نیاز آبی کم جو و گندم، بیشترین مصرف آب در این استان به این دو گیاه زراعی اختصاص داشت. علت آن بالا بودن سطح زیر کشت این دو محصول زراعی است. در بیشتر تحقیقات به بالا بودن آب مصرفی توسط این گیاهان اشاره شده است [۱۰ و ۱۳]. به عنوان مثال کشور مصر برای تولید غلات مورد نیاز خود به حدود ۹/۹ میلیارد مترمکعب آب نیاز دارد. به همین دلیل، سیاست‌های اقتصادی این کشور بر این اساس تبیین شده است که این میزان غلات از کشورهای دیگر تأمین شود [۱۰]. از طرف دیگر، به‌رغم نیاز آبی زیاد پنبه، میزان مصرف آب برای تولید آن در استان البرز کم بود. با توجه به عملکرد و نیاز آبی گیاهان زراعی، مقادیر آب مجازی برای هر محصول محاسبه شد.

جدول ۱. مشخصات گیاهان زراعی از نظر نیاز آبی، سطح زیر کشت و آب مجازی

نام محصول	نیاز آبی (مترمکعب در سال)	سطح زیر کشت (هکتار)	مصرف آب (میلیون مترمکعب)	آب مجازی (مترمکعب بر کیلوگرم)	آب مجازی صادر شده (میلیون مترمکعب)	شدت مصرف آب در تولید محصول
پنبه	۱۳۲۸۴	۷۳۵	۹/۷	۴/۸	۱۰۱۴۵۴	۰/۰۱۶
جو	۵۲۶۰	۹۳۶۸	۴۹/۲	۱/۶	۸۱۴۲۳۱	۰/۰۸۲
حبوبات	۸۷۴۸	۴۰	۰/۳	۷/۷	۶۲۲۰۸	۰/۰۰۱
خیار	۹۸۰۰	۵	۰/۰۵	۰/۷	۱۴۳۲۳	۰/۰۰۰۰۸
دانه‌های روغنی	۵۶۰۰	۳۵	۰/۲	۰/۹	۱۷۲۹۴	۰/۰۰۰۳
ذرت علوفه‌ای	۹۵۶۰	۱۳۳	۱/۲	۰/۲	۱۷۱۵۸	۰/۰۰۲
سیب‌زمینی	۱۰۶۵۰	۱۴۵	۱/۵	۰/۷	۲۲۵۰۰۰۰	۰/۰۰۲
کاهو و کرفس	۹۸۷۰	۳۵۰۰	۳۴/۵	۰/۱۳	۱۳۷۰۸۳۳۳	۰/۰۵۷
کلم	۱۰۸۷۰	۳۳۷	۳/۶	۰/۱۸	۱۸۷۴۱۳۷	۰/۰۰۶
گندم	۵۷۴۶	۱۱۰۵۰	۶۳/۴	۱/۲	۱۲۷۴۰۴۴۸	۰/۱۰۵
گوجه‌فرنگی	۱۲۹۶۰	۴۲۰	۵/۴	۰/۳۵	۳۵۰۲۰۷	۰/۰۰۹
لوبیا سبز	۱۲۰۰۰	۴۲۲	۵/۰	۰/۲۸	۱۴۲۸۵۷۱	۰/۰۰۸
یونجه	۱۲۲۱۸	۱۵۴۸	۱۸/۹	۱/۷	۳۴۹۰۸۵۷	۰/۰۳۱

قبول در مزارع، مقدار آب آبیاری ۱۰۶۲۷ مترمکعب به عنوان آب آبیاری بهینه برای پنبه انتخاب شد. برای گیاه زراعی جو نیز نتایج تقریباً مشابه با پنبه به دست آمد. برای جو، مقدار آب آبیاری ۴۲۰۸ مترمکعب وضعیت بهتری بر عملکرد و آب مجازی نسبت به سایر مقادیر آب آبیاری داشت. به همین دلیل، این مقدار به عنوان مقدار آب آبیاری بهینه برای جو تعیین شد. شیب تقریباً ثابتی در عملکرد و آب مجازی برای حبوبات با افزایش مقدار آب آبیاری مشاهده شد. با توجه به اینکه تفاوت بین عملکرد بسیار کمتر از آب مجازی بود، مقدار ۴۴۷۸ مترمکعب به عنوان سناریوی بهتر برای آبیاری حبوبات در نظر گرفته شد. شرایط عکس برای گیاه خیار مشاهده شد. این نتایج به دلیل تغییرات عملکرد بالای خیار و تغییرات آب مجازی پایین آن است. به همین دلیل، برای خیار مقدار ۱۱۷۶۰ مترمکعب به عنوان مقدار بهینه در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه تغییرات آب مجازی برای دانه‌های روغنی و ذرت علوفه‌ای نسبت به تغییرات عملکرد آن‌ها بسیار کمتر بود؛ مقادیر ۵۶۰۰ و ۱۱۴۷۲ به ترتیب برای این گیاهان زراعی به عنوان مقادیر بهینه آبیاری انتخاب شد.

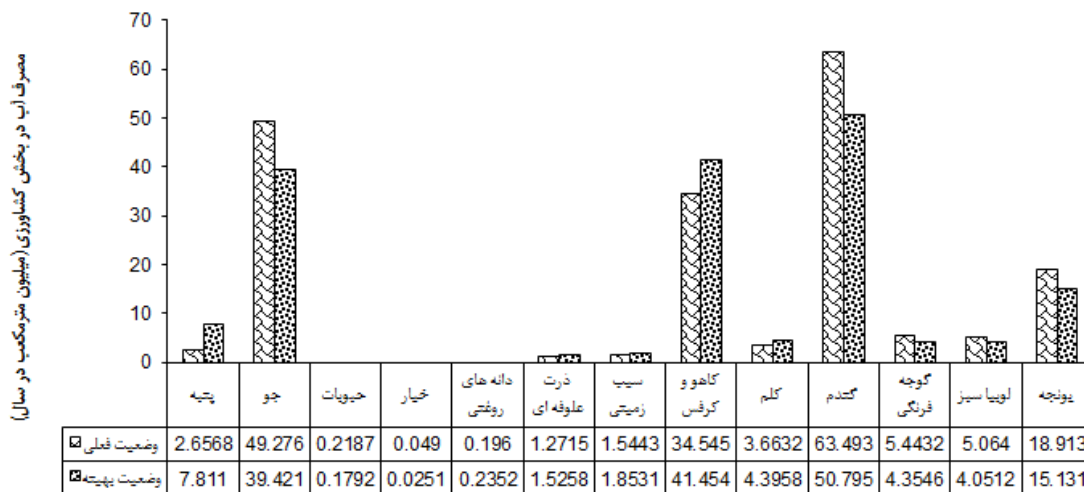
با استفاده از مدل گیاهی AquaCrop اثر مقادیر مختلف آب آبیاری بر عملکرد و آب مجازی گیاهان زراعی در استان البرز شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده در شکل ۲ نشان داده شده است. براساس این نتایج، با افزایش مقدار آب آبیاری، عملکرد گیاهان زراعی نیز به صورت صعودی افزایش یافت که امری منطقی به شمار می‌رود. با توجه به افزایش مقدار آب مصرفی، آب مجازی نیز به صورت صعودی افزایش یافت. در گیاه پنبه، شیب افزایش عملکرد و آب مجازی پس از مقدار ۱۰۶۲۷ مترمکعب آب آبیاری کاهش یافت، زیرا آبیاری بیشتر از این مقدار اثر کمتری بر تولید محصول پنبه دارد. به این ترتیب این مقدار آب آبیاری به عنوان نقطه عطفی برای آبیاری این گیاه زراعی در نظر گرفته شد. تفاوت بین عملکرد در دو مقدار آبیاری ۸۵۰۱ و ۱۰۶۲۷ مترمکعب برای پنبه برابر با ۱۱ درصد و بین دو مقدار آبیاری ۱۰۶۲۷ و ۱۳۲۸۴ برابر با ۱۷ درصد بود. در حالی که تفاوت آب مجازی بین مقادیر آب آبیاری اشاره شده به ترتیب برابر با ۰/۵ و ۰/۲ مترمکعب بر کیلوگرم (برابر با ۲۵ درصد برای هر دو مقدار آب آبیاری) به دست آمد. بنابراین، با توجه به این نتایج و برای حصول عملکرد قابل



شکل ۲. تغییرات عملکرد (نمودار میله‌ای) و آب مجازی (نمودار خطی) در سناریوهای مختلف آبیاری برای محصولات مورد بررسی

دستیابی به بیشترین عملکرد مقدار آب آبیاری را افزایش داد، زیرا تفاوت آب مجازی بین سناریوهای آب آبیاری چندان زیاد نیست. در گیاه زراعی گندم، تغییرات مقدار آب آبیاری اثر بسیار زیادی بر عملکرد و آب مجازی داشت. واکنش این گیاه زراعی مشابه جو بود. به همین دلیل، مقدار آب آبیاری ۴۵۹۶ به عنوان گزینه بهینه برای آبیاری گندم انتخاب شد. برای این گیاهان زراعی گوجه‌فرنگی، لوبیا سبز و یونجه به‌ترتیب مقادیر ۱۵۵۵۲، ۱۴۴۰۰ و ۹۷۷۴ مترمکعب به عنوان مقادیر بهینه انتخاب شدند. مقایسه مصرف آب در بخش کشاورزی برای گیاهان زراعی در دو وضعیت فعلی و بهینه در شکل ۳ نشان داده شده است. گرچه سناریوهای انتخاب‌شده برای بیشتر گیاهان به طوری بود که مصرف آب در بخش کشاورزی کاهش یابد؛ ولی برای برخی از گیاهان زراعی مصرف آب افزایش یافت. به عنوان مثال، برای دانه‌های روغنی ۰/۱ میلیون مترمکعب آب در وضعیت بهینه افزایش یافت که علت آن تولید بیشتر این محصولات است. میزان مصرف آب برای گیاهان ذرت علوفه‌ای، سیب‌زمینی، کاهو و کرفس و کلم نیز افزایش یافت.

تفاوت عملکرد بین مقادیر مختلف آب آبیاری سیب‌زمینی بسیار زیاد بود، به طوری که با افزایش مقدار آب آبیاری از ۵۴۵۲ به ۱۲۷۸۰ مترمکعب میزان عملکرد یک تن در هکتار افزایش یافت. در حالی که اختلاف آب مجازی بین دو مقدار آب آبیاری ۵۴۵۲ و ۱۲۷۸۰ فقط ۰/۳ مترمکعب بر کیلوگرم بود. بنابراین، برای افزایش تولید سیب‌زمینی مقدار ۱۲۷۸۰ مترمکعب به عنوان مقدار بهینه انتخاب شد. این شرایط برای گیاهان زراعی کاهو و کرفس نیز مشاهده شد. اختلاف بین مقادیر عملکرد در دو مقدار آبیاری ۵۰۵۳ و ۱۱۸۴۴ مترمکعب برابر با ۸/۶ تن بر هکتار بود. در حالی که اختلاف آب مجازی بین این دو آب آبیاری فقط ۰/۰۹ کیلوگرم بر مترمکعب بود. بنابراین، مانند گیاه سیب‌زمینی کاهش مصرف آب کمکی به کاهش آب مجازی نخواهد کرد. بنابراین، افزایش عملکرد به عنوان راهکار بهتر برای افزایش تولید این محصولات در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل، سناریوی ۱۱۸۴۴ مترمکعب آب آبیاری به عنوان گزینه بهتر انتخاب شد. این نتایج برای کلم نیز مشاهده شد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای گیاهان زراعی که در دسته سبزیجات قرار دارند، بهتر است برای



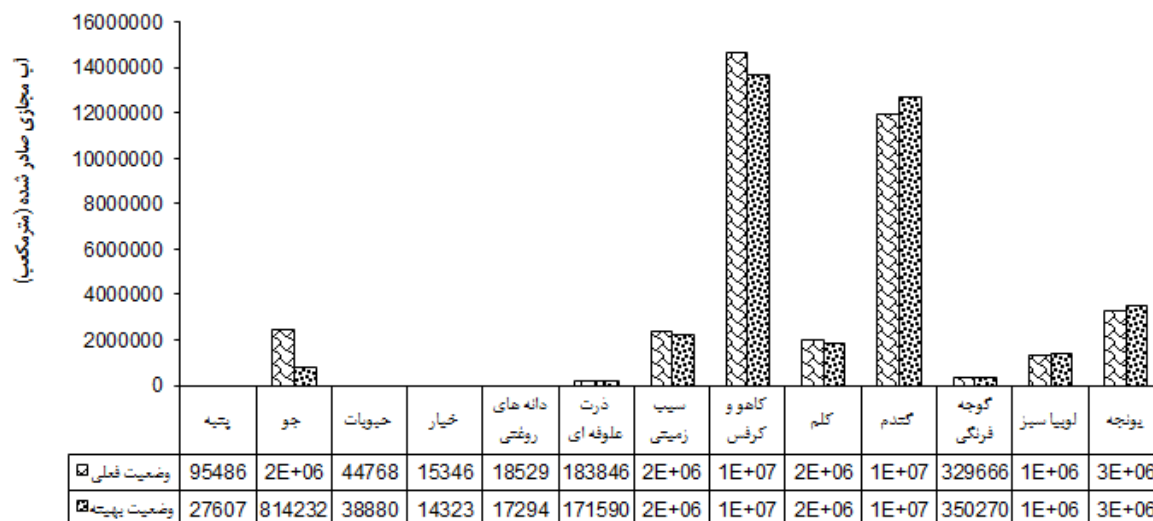
شکل ۳. مقایسه مصرف آب در بخش کشاورزی برای دو وضعیت فعلی و بهینه در گیاهان زراعی

تحقیق حاضر، اعمال مقادیر بهینه آبیاری اثر بهتری بر کاهش صادرات آب مجازی داشت. این عمل علاوه بر کاهش فشار بر منابع آب، سبب عدم وابستگی به تولیدات در مناطق دیگر نیز می‌شود. بیشترین کاهش آب مجازی صادرشده برای جو، کاهو و کرفس، سیب‌زمینی و کلم به‌ترتیب با مقادیر ۱/۶، ۰/۹۷، ۰/۱۶ و ۰/۱۳ میلیون

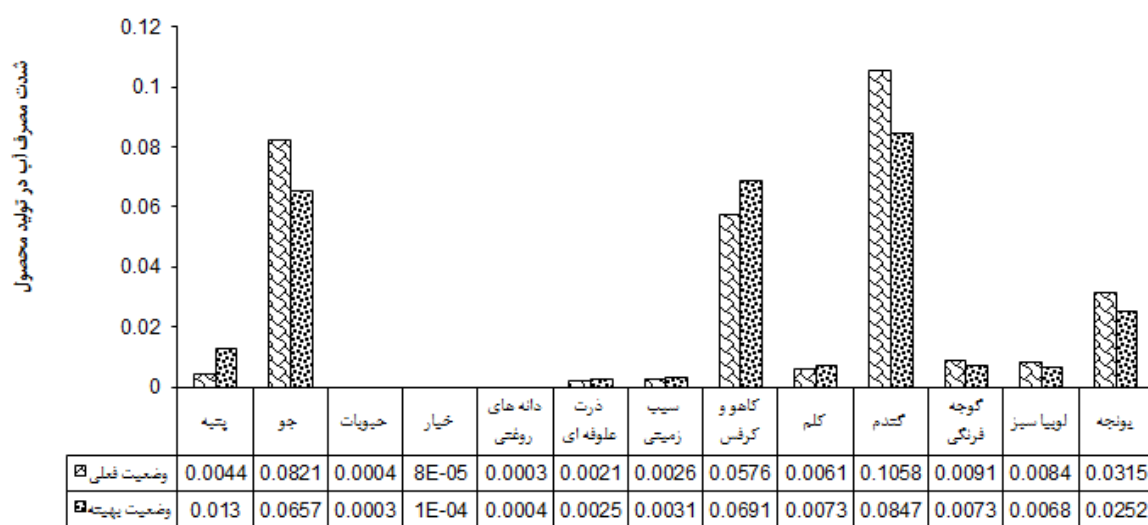
مقایسه آب مجازی صادرشده برای گیاهان زراعی در دو وضعیت فعلی و بهینه در شکل ۴ نشان داده شده است. با اصلاح مقدار آبیاری موجود، آب مجازی صادرشده برای بیشتر گیاهان زراعی کاهش یافت. بیشتر محققان برای کاهش آب مجازی راهکار واردات محصولات را ارائه کرده‌اند [۱۰، ۱۳، ۱۴ و ۱۷]. در حالی که براساس نتایج

بیشتر گیاهان زراعی کاهش یافت (شکل ۵) و این شاخص فقط برای گیاهان پنبه، ذرت علوفه‌ای، سیب‌زمینی، کاهو و کرفس و کلم افزایش یافت. در حالت کلی، شاخص کم‌آبی در وضعیت بهینه به ۰/۵۴ کاهش یافت که نسبت به وضعیت فعلی ۰/۰۶ کمتر است.

مترمکعب به دست آمد. آب مجازی صادر شده فقط برای گندم، گوجه‌فرنگی، لوبیا سبز و حبوبات کاهش به ترتیب به میزان ۰/۷۴، ۰/۰۲، ۰/۰۸ و ۰/۲۰ میلیون مترمکعب افزایش یافت. با توجه به اصلاح میزان آب آبیاری برای محصولات زراعی در استان البرز، شدت مصرف آب در



شکل ۴. مقایسه آب مجازی صادر شده برای دو وضعیت فعلی و بهینه برای گیاهان زراعی



شکل ۵. مقایسه شدت مصرف آب برای دو وضعیت فعلی و بهینه در گیاهان زراعی

محصول، میزان شدت مصرف آب محاسبه شد که براساس نتایج، میزان شدت مصرف آب برای گندم (۰/۱۰)، جو (۰/۰۸)، کاهو و کرفس (۰/۰۵) و یونجه (۰/۰۳) از سایر گیاهان بیشتر بود. برای بهبود این وضعیت، از مدل AquaCrop برای تغییر میزان مصرف آب گیاهان زراعی استفاده شد. نتایج نشان داد که با اصلاح وضعیت آبیاری، آب مجازی برای بیشتر گیاهان زراعی کاهش یافت. در

نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده نشان داد میزان آب مجازی در استان البرز بین ۰/۱۳ - ۴/۸۶ مترمکعب بر کیلوگرم متغیر بود. بیشترین مقدار آب مجازی به محصولات زراعی مانند حبوبات، یونجه، جو، پنبه و گندم اختصاص داشت، در حالی که محصولاتی مانند کاهو و کرفس و کلم مقدار آب مجازی کمتری داشتند. براساس سطح تحت کشت هر

Environmental Change and Human Security in Africa and the Middle East, PP. 199-217 2017.

- [8]. El-Sadek A. Virtual Water Trade as a Solution for Water Scarcity in Egypt, Water Resources Management, PP. 2437-2448. 2010.
- [9]. Sadidi J, Ziaeiان Firoozabadi, P, Darvari Z. Presenting a model for optimizing land use allocation for virtual water storage using meta-heuristic algorithms. Remote Sensing and Iran GIS. 2017: 9(3): 32-15. [Persian]
- [10]. Fraiture C de, Cai X, Amarasinghe U, Rosegrant M, Molden D. Does International Cereal Trade Save Water? The Impact of Virtual Water Trade on Global Water Use. Comprehensive Assessment Research Report 4, Colombo, Sri Lanka, Comprehensive Assessment Secretariat. 2004.
- [11]. Renault D. 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. 2003.
- [12]. Ehsani M, Khaledi H, Barqi Y. Introduction to Virtual Water. Publications of the National Irrigation and Drainage Committee of Iran. Tehran. 2008. [Persian]
- [13]. Masud MB, Wada Y, Goss G, Faramarzi M. Global implications of regional grain production through virtual water trade. Science of the Total Environment. 2019: 659, 807-820.
- [14]. Jiang W, Marggraf R. Bilateral virtual water trade in agricultural products: a case study of Germany and China. Water International. 2015: 40 (3), 483-498.
- [15]. Chen GQ, Li JS. Virtual water assessment for Macao, China: highlighting the role of external trade. Journal of Cleaner Production. 2015: 93, 308-317.
- [16]. Novo P, Garrido A, Varela-Ortega C. Are virtual water "flows" in Spanish grain trade consistent with relative water scarcity?. Ecological Economics. 2009: 68 (5), 1454-1464.
- [17]. Mohammadi A, Banihabib ME. Strategic Management Model for Virtual Water Exchange of Iranian Agricultural and Animal Productions. Journal of Water and Irrigation Management. 2020: 10(1): 15-29. [Persian]
- [18]. Ebrahimipak N, Egdernezhad A, Tafteh A, Ahmadee M. Evaluation of AquaCrop, WOFOST, and CropSyst to Simulate Rapeseed Yield. Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 2019: 13(3-75): 715-726. [Persian]

نتیجه، میزان صادرات آب مجازی نیز کمتر شد. بیشترین کاهش آب مجازی صادرشده برای جو، کاهو و کرفس، سیبزمینی و کلم به دست آمد. به طوری که کاربرد مناسب آب آبیاری برای این محصولات به تنهایی سبب کاهش ۱/۴۲ میلیون متر مکعب آب در بخش کشاورزی در سال می‌شود. براساس کلیه نتایج، شاخص کم‌آبی استان البرز در وضعیت فعلی برابر با ۰/۶ است و با بهبود وضعیت آبیاری می‌تواند تا ۰/۵۴ کاهش یابد. گرچه می‌توان با اعمال سیاست‌های کاشت محصولات کم‌آبر و کاهش سطح زیر کشت محصولات با نیاز آبی زیاد، در کنار اعمال روش‌های آبیاری بهینه، شاخص کم‌آبی استان البرز را بهبود بخشید.

منابع

- [1]. Babazadeh H, Saraei Tabrizi M. Assessing the agricultural situation of Hormozgan province from the perspective of virtual water. Water research in agriculture. 2012: 26(4): 499-485. [Persian]
- [2]. Ahmadee M, Ghanbarpouri M, Egdernezhad A. Determining Applied Irrigation Water of Wheat using Sensitivity Analysis and Evaluation of Aqua Crop. Journal of Water Management in Agriculture. 2021: 8(1): 15-30. [Persian]
- [3]. Ebrahimipak N, Ahmadee M, Egdernezhad A, Khashei Siuki A. Evaluation of AquaCrop to simulate saffron (crocus sativus L.) yield under different water management scenarios and zeolite amount. Journal of Water and Soil Resources Conservation. 2018: 8(1): 117-132. [Persian]
- [4]. Chapagain AK, Hoekstra AY. Water footprints of nations, Unesco-IHE Institute for Water Education. 2004.
- [5]. Alizadeh A, Khalili N. Investigation of water-energy productivity in sugar beet cultivation (Case study: Khorasan Razavi province). Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 2009: 2 (3): 136-132. [Persian]
- [6]. Mousavi SN, Akbari S, Soltani Gh, Zare Mehrjerdi M. Virtual water, a new solution to deal with the water crisis. National Conference on Water Crisis Management. Islamic Azad University, Marvdasht Branch. 2009. [Persian]
- [7]. Antonelli M, Laio F, Tamea S. Water Resources, Food Security and the Role of Virtual Water Trade in the MENA Region, In

- [19]. Egdernezhad A, Ebrahimipak N, Tafteh A, Ahmadee M. Canola Irrigation Scheduling using AquaCrop Model in Qazvin Plain. *Water Management in Agriculture*. 2019; 5(2): 53-64. [Persian]
- [20]. Salari S. Quantifying the amount of the virtual water of the important horticultural and agricultural productions of Sistan and Blouchestan Province. MSc Thesis. University of Zabol. 2015. [Persian]
- [21]. Ansari MA, Egdernezhad A, Ebrahimipak NA. Evaluation of AquaCrop and WOFOST to Simulate Potato Yield under Different Water Stress Conditions. *Journal of Water Management in Agriculture*. 2021; 7(2): 1-14. [Persian]