مقاله کامل علمی- پژوهشی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و هفتم، شماره ششم، ۱۳۹۹
۱۰۳-۱۲۰
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2021.18398.3399

بررسی ردپای آب و بهره‌وری مصرف آب محصولات سیب‌زمینی، چغندرقند، گوجه‌فرنگی و ذرت علوفه‌ای در اقلیم‌های مختلف ایران

***حلیمه پیری[۱] و مجتبی مبارکی[۲]**

[۱]استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل،
[۲]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰٤؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲٤

چکیده

سابقه و هدف: یکی از راهکارهای عملی مدیریت منابع آب، برآورد نیاز آبی گیاه و تعیین مقدار حجم آب مصرفی در مراحل مختلف تولید محصول است. به‌منظور محاسبه میزان حجم آب مصرف‌شده توسط محصولات کشاورزی در مراحل رشد، از شاخص آب مجازی و ردپای آب استفاده می‌شود. ردپای آب در یک محصول به‌صورت حجمی از آب شیرین که در تولید آن محصول مصرف شده است، تعریف می‌شود. ردپای آب به‌عنوان شاخصی برای تخصیص منابع آب شیرین تعریف شده است که بینش ارزشمندی درباره آثار محیط زیستی تولید یک محصول ارائه می‌کند. ردّپای آب نشان‌دهنده آب مصرفی واقعی محصولات در سه جزء آبی، سبز و خاکستری است، که امروزه در راستای مدیریت نوین منابع آب با رویکرد یکپارچه موردتوجه قرارگرفته است. به‌منظور ارزیابی مناسب آب مصرفی در بخش کشاورزی، لازم است که شاخص ردّپای آب در اقلیم‌های مختلف موردبررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها: برای انجام پژوهش ابتدا داده‌های هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. سپس نیاز آبی گیاهان چغندرقند، سیب‌زمینی، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی در اقلیم‌های همدان، اهواز، شهرکرد، مشهد و اصفهان با استفاده از نرم‌افزار CropWat محاسبه شد. مقدار عملکرد محصول و مقدار کود ازته مصرفی از جهاد کشاورزی هر استان اخذ شد. سپس میانگین حجم آب مصرفی، آب مجازی، ردپای آب و بهره‌وری مصرف آب این محصولات برای دوره آماری ۱۳۹٦-۱۳۹۰ محاسبه شد. برای محاسبه ردپای آب از روش چاپاگین و همکاران (۲۰۰٦) استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج پژوهش نشان داد در بین محصولات موردمطالعه گیاه سیب‌زمینی با ۲۹٤۵/٤ مترمکعب بر تن در شهر اهواز با اقلیم گرم و مرطوب بالاترین ردپای آب و چغندرقند با ۹۰٦/۱ مترمکعب بر تن در اقلیم سرد و خشک مشهد کم‌ترین ردپای آب را دارا بود. بیش‌ترین مقدار آب مجازی مصرف‌شده برای گیاهان موردمطالعه سیب‌زمینی (۰/۸٤

* مسئول مکاتبه: h_piri2880@uoz.ac.ir

مترمکعب بر کیلوگرم)، گوجه‌فرنگی (۰/۵۱ مترمکعب بر کیلوگرم)، چغندرقند (۰/٤٦ مترمکعب بر کیلوگرم) و ذرت علوفه‌ای (۰/۳۹ مترمکعب بر کیلوگرم) به‌ترتیب مربوط به اقلیم اهواز، شهرکرد، اهواز و اصفهان بود. کم‌ترین مقدار بهره‌وری مصرف آب (۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب در هکتار) نیز متعلق به سیب‌زمینی در اقلیم اهواز بود. کم‌ترین آب مجازی و بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب برای گیاهان موردمطالعه در اقلیم همدان به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: در پژوهش حاضر مصرف آب برای محصولات کشاورزی موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد حجم آب مصرفی در محصولات موردمطالعه در اقلیم‌های مختلف متفاوت است. با توجه نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت اقلیم همدان با توجه به پایین بودن مقادیر آب مجازی (۰/۲۹، ۰/۳، ۰/۱۹ و ۰/۱٤ مترمکعب بر کیلوگرم) و بالا بودن بهره‌وری مصرف آب (۳/٤۳، ۳/۳، ۵/۱۹ و ۷/٤٦ کیلوگرم بر مترمکعب) به‌ترتیب برای سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، چغندرقند و ذرت علوفه‌ای، نسبت به سایر اقلیم‌های موردمطالعه برای کشت هر چهار محصول مناسب‌تر است. هم‌چنین با توجه به خشک‌سالی‌های اخیر و کمبود آب باید از منابع آب موجود به بهترین نحو استفاده نمود و کشت محصولات با نیاز آبی کم‌تر و عملکرد بالاتر مورد برنامه‌ریزی قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: آب آبی، آب خاکستری، آب سبز، آب سفید، نیاز آبی

مقدمه

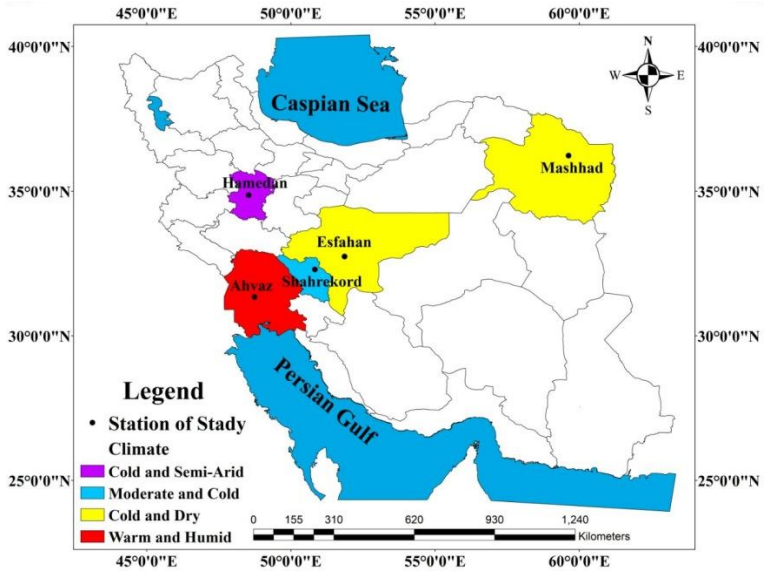
یکی از عواملی که در بخش کشاورزی موجب کاهش کارایی راندمان آب شده عدم توجه به میزان مصرف آب در انتخاب محصولات کشاورزی و اعمال الگوی کشت نامناسب بر مبنای ارزش آب است. در بسیاری از مناطق کشور، کشت محصولات زراعی، بیلان منفی آب دشت‌ها و نیاز به پایداری تولید محصولات، منجر می‌شود تا در جهت روش‌های کمک به بهبود سفره‌های زیرزمینی آب و افزایش راندمان مصرف آب اقدام شود. هم‌چنین باید نسبت تخصیص زمین‌های کشاورزی و برنامه کشت یک منطقه به انواع محصولات زراعی همان منطقه توسط محققان بخش کشاورزی تعیین و در اختیار سازمان‌های مربوطه قرار گیرد تا با برنامه‌ریزی مناسب اقدامات لازم انجام گیرد (۵). از آن‌جایی‌که میزان آب مصرفی واقعی هر محصول تحت‌تأثیر بر اقلیم منطقه، میزان تولیدات، الگوی مصرفی، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب متغیر است، بنابراین نیاز به شاخصی است که بتوان با آن نیاز واقعی هر محصول را مورد ارزیابی قرار داد. در این راستا توسعه روش‌های مدیریتی کارآمد و جدید که بتوان با آن مقدار آب واقعی مصرفی را بر اساس الگوی مصرفی مردم، شرایط اقلیمی، راندمان کاربرد آب و عملکرد محصول، محاسبه کرد، امری لازم و ضروری است. یکی از راهکارها برای مدیریت استفاده از منابع در تولیدات محصولات کشاورزی، تعیین مقدار حجم آبی است که در فرایند تولید این محصول مصرف شده است. مقدار آبی که در کل مراحل رشد و تولید محصولات کشاورزی مورداستفاده قرار می‌گیرد را آب مجازی می‌گویند (۲۵). در مبانی نظری مربوط به آب مجازی، اصطلاح ردپای آب مطرح شده است و نشان‌دهنده میزان حجم آب مصرفی به تفکیک منابع آب سطحی، زیرزمینی و آب باران می‌باشد (٤). مفهوم آب مجازی و ردپای آب ارتباط نزدیکی به هم دارند.

شاخص ردپای آب به‌عنوان یک شاخص جامع نشان‌دهنده مقدار واقعی آب مصرفی بر اساس شرایط و اقلیم هر منطقه می‌باشد. ردپای آب شاخصی چندبعدی برای استفاده از آب شیرین است که تنها به مصرف مستقیم آب توسط مصرف‌کننده یا تولیدکننده محصور نمی‌شود بلکه در این شاخص استفاده غیرمستقیم از آب نیز در نظر گرفته می‌شود. درواقع ردپای آب قادر است ارتباط بین مصارف انسانی از آب شیرین و میزان استفاده از آب در ساخت نوع خاصی از کالا را مورد تجزیه‌وتحلیل قرار دهد (١٤). این شاخص در تدوین استراتژی‌هایی جهت تخصیص منابع آب یک منطقه یا حوضه قابلیت استفاده دارد (١٢). آب مجازی یک محصول حجم آبی است که در کل فرایند رشد و تولید محصول مصرف می‌شود. در واقع کل ردپای آب یک محصول، با عنوان محتوای آب مجازی آن محصول شناخته می‌شود (١٧). ردپای آب شامل سه مؤلفه می‌باشد. ردپای آب آبی و ردپای آب سبز که دربرگیرنده مصارف آب از منابع آب آبی و سبز می‌باشد و ردپای آب خاکستری (٢٢). تاکنون مطالعات زیادی در خصوص آب مجازی و ردپای آب در حوزه‌های مختلف انجام شده است. در ابتدا بیش‌تر مطالعات برای تخمین هر سه جزء ردپای آب (ردپای آب آبی، سبز و خاکستری) در مقیاس کل جهان صورت گرفت ولی سپس با توجه به اهمیت روزافزون مدیریت منابع آب در مقیاس کوچک‌تر، ارزیابی این شاخص به‌صورت محلی دارای اهمیت شد. ردپای آب برای محصول گندم در اقلیم‌های مختلف ایران مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد، بیش‌ترین مقادیر ردّپای آب آبی در قسمت‌های مرکزی و جنوبی، بیش‌ترین مقدار ردّپای آب سبز در قسمت‌های شمالی و غربی و بیش‌ترین مقدار ردّپای آب خاکستری در قسمت‌های جنوبی دیده می‌شود. میانگین ردّپای آب سبز، آبی و خاکستری به‌ترتیب ٥٠٣/٣، ١٣٩٢/١ و ٢٨٦/٢ مترمکعب بر تن به‌دست آمد. هم‌چنین نتایج پژوهش نشان داد که کشت محصول گندم در همه اقلیم‌ها مناسب نبوده و در اقلیم‌های A-C-W و A-C-VW (طبقه‌بندی یونسکو) ایران توصیه نمی‌گردد (٣). ردپای آب کشت سیب‌زمینی در انگلستان موردمطالعه قرار گرفت. در این پژوهش تنها به بررسی ردپای آب آبی پرداخته شد. نتایج نشان داد که به‌طور متوسط تنها ٦١ میلیون مترمکعب آب برای تولید این محصول کشاورزی، در انگلستان مصرف می‌شود. با استفاده از نقشه‌های موجود در رابطه با کمبود آب مشخص شد که شرق انگلستان به‌عنوان نقطه‌ای نامناسب جهت تولید این محصول می‌باشد (١١). در پژوهشی استان‌های کشور چین به هشت منطقه تقسیم شد و ردپای آب محصولات کشاورزی در کنار سایر محصولات در هر منطقه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج محاسبات نشان داد که فعالیت کشاورزی در اکثر مناطق سهم بیش‌تری از ردپای آب را به خود اختصاص داده است. ایشان بیان داشتند که با اقداماتی مثل افزایش بهره‌وری مصرف آب و اصلاح الگوی صادرات محصولات می‌توانند سهم زیادی از ردپای آب محصولات تولیدی مناطق را کنترل و کاهش دهند (٨). خلیلی و همکاران (٢٠٢٠) در پژوهشی مدیریت منابع آب استان قم را بر اساس ردپای آب موردبررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد سهم ردپای آب آبی در استان بیش‌تر از ردپای آب سبز و خاکستری بود. در بررسی ردپای آب تولید سیب‌زمینی در آرژانتین، کل ردپای آب سیب‌زمینی را ٢٢٤ مترمکعب بر تن بیان کردند که از این مقدار سهم ردپای آب آبی

و آب سبز به‌ترتیب ٥٦/٤ و ٢٤/١ درصد می‌باشد. آن‌ها به‌منظور کاهش ردپای آب این محصول عوامل مختلف مانند استفاده از تکنولوژی‌های جدید و پیشرفته در آبیاری، افزایش دانش کشاورزان و اصلاح قیمت آب و قانون استفاده از آب‌های زیرزمینی را پیشنهاد کردند (۱۵). بذرافشان و همکاران (۲۰۲۰) توزیع زمانی و مکانی آب مجازی را برای گردو در ایران انجام دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد متوسط حجم کل ردپای آب در محصول گردوی فاریاب ۱٤۹۳ میلیون مترمکعب در سال است که حدود ۹٤ درصد از کل حجم ردپای آب در تولید گردوی کشور یعنی معادل ۱٤۰۳ میلیون مترمکعب در سال به‌صورت تجارت آب مجازی از کشور صادر می‌شود. برآورد آب مجازی غلات در چین انجام شد. نتیجه نشان داد جهت تولید غلات در چین ۱/۲۹۳ مترمکعب بر کیلوگرم آب مجازی مصرف می‌شود (۱۰). تأثیرات اقدامات مدیریت مختلف کشاورزی ازجمله راندمان آبیاری، بهره‌وری مصرف آب و ردپای آب آبی و سبز را برای محصول گندم زمستانه موردبررسی قرار دادند. نتایج نشان داد کم‌آبیاری بیش‌ترین تأثیر را در افزایش راندمان مصرف آب آبی داشته است، بدین‌ترتیب که راندمان آبیاری ۵ درصد افزایش و ردپای آب آبی ۳۸ درصد کاهش یافته است (٢٦). با توجه به اهمیت شاخص ردپای آب در بحث مدیریت منابع آب به‌خصوص در بخش کشاورزی، از این روش برای تعیین اولویت کاشت بر محور اختصاص آب استفاده شد. بررسی اجزای مختلف ردپای آب و تعیین سهم هریک از اجزای آن در میزان تجارت آب مجازی در بخش کشاورزی، کمک شایانی به درک شرایط کنونی و بهبود مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی به‌خصوص در مناطقی که با بحران آب مواجه هستند، می‌نماید. با توجه به این‌که محصولات سیب‌زمینی، چغندرقند، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی تقریباً در تمام استان‌های کشور با شرایط آب‌وهوایی متفاوت کشت می‌شود و پژوهشی راجع به تعیین مناطق مناسب برای کشت این محصولات بر اساس ردپای آب انجام نشده است، بنابراین در این پژوهش به بررسی اجزای ردپای آب، مقدار آب مجازی و بهره‌وری مصرف آب در محصولات پاییزه سیب‌زمینی و چغندرقند و محصولات بهاره ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی در چهار اقلیم مختلف ایران پرداخته شد تا اقلیم‌های مناسب برای کشت این محصولات مشخص گردد.

مواد و روش‌ها

برای انجام پژوهش از بین محصولات زراعی پاییزه سیب‌زمینی و چغندرقند و از بین محصولات بهاره ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی انتخاب شد. هم‌چنین با توجه به موقعیت جغرافیایی و اقلیم‌های مختلف پنج شهر اصفهان، اهواز، شهرکرد، مشهد و همدان به‌ترتیب با اقلیم‌های سرد و خشک، گرم و مرطوب، سرد و معتدل، سرد و خشک و سرد و نیمه‌خشک موردبررسی قرار گرفت. شکل ۱ مناطق موردمطالعه را نشان می‌دهد. اطلاعات هواشناسی در دوره مطالعاتی (۱۳۹٦-۱۳۹۰) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. اطلاعات مربوط به کود مصرفی و عملکرد هر محصول از سازمان جهاد کشاورزی هر استان اخذ گردید.



شکل ۱- مناطق مورد مطالعه.

Figure 1. Study areas.

برای محاسبه ردپای آب و آب مجازی لازم بود نیاز آبی گیاهان[1] (CWR) در هر اقلیم محاسبه شود. برای این کار ابتدا تبخیروتعرق گیاهان از روش فائوپنمن‌مانتیث و با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT محاسبه شد (رابطه‌های ۱ و ۲).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn-G)+\gamma\frac{C_n}{T+273}U2(es-ea)}{\Delta+\gamma(1+C_d\,U2)} \qquad (۱)$$

$$ET_C = K_C \times ET_0 \qquad (۲)$$

که در آن، ET_0 تبخیروتعرق مرجع ($mm\ day^{-1}$)، ET_C تبخیروتعرق گیاه ($mm\ day^{-1}$)، K_C ضریب گیاهی، Rn تابش خالص ورودی به سطح گیاه ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$)، G شار گرمای خاک ($MJ\ m^{-2}$ day^{-1})، T_{mean} میانگین دمای هوای روزانه (^0C)، U_2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دومتری از سطح زمین ($m\ s^{-1}$)، e_s فشار بخار اشباع (KP_a)، ea فشار بخار واقعی (KP_a)، es-ea کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع (KPa^0C^{-1})، γ ضریب سایکرومتری (KPa^0C^{-1})، C_n ضریبی برای گیاه مرجع که مقدار آن ۹۰۰ می‌باشد ($Kg^0KKj^{-1}day^{-1}$)، Cd ضریب باد برای گیاه مرجع که مقدار آن ۰/۳٤ ($s\ m^{-1}$) می‌باشد.

پس از محاسبه تبخیروتعرق مقدار نیاز آبی گیاهان از رابطه ۳ محاسبه شد (١٦):

$$CWR = ET_C \times A \qquad (۳)$$

که در آن، A مساحت زیرکشت (ha) و CWR (m^3) نیاز آبی است.

اجزای ردپای آب در این پژوهش شامل ردپای آب سبز[2]، ردپای آب آبی[3]، ردپای آب خاکستری[4] و رد پای آب سفید[5] است. ردپای آب آبی، به حجم آب آبیاری مصرفی (آب‌های سطحی و زیرزمینی) که جهت تولید محصول به گیاه داده می‌شود، اشاره دارد. ردپای آب سبز، به سهم آب حاصل از بارندگی مؤثر

1- Crop Water Requirement

2- Green Water Footprint
3- Blue Water Footprint
4- Gray Water Footprint
5- White Water Footprint

مرتبط است و به حجم آبی اطلاق می‌شود که در مناطق غیراشباع خاک به‌صورت رطوبت خاک ذخیره می‌شود و گیاه از آن استفاده می‌کند. ردپای آب خاکستری، به حجمی از آب شیرین اطلاق می‌شود که برای از بین بردن آلودگی‌های ایجادشده ناشی از کشت گیاه و تولید محصول در محیط استفاده شده‌اند، مورد نیاز است. پژوهشگران مفهوم آب سفید را ارائه دادند که در واقع حجم تلفات آب آبیاری را بیان می‌نماید (۱). بنابراین ردپای آب کل [1] به‌صورت رابطه ٤ بیان می‌گردد.

$$WF_t = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{gray} + WF_{white} \quad (٤)$$

که در آن، WF_t ردپای کل، WF_{green} ردپای آب سبز، WF_{blue} ردپای آب آبی، WF_{gray} ردپای آب خاکستری و WF_{white} ردپای آب سفید می‌باشد.

هر کدام از اجزای ردپای آب به شرح زیر محاسبه گردید:

مصرف آب در این دوره با توجه به محاسبه تبخیروتعرق گیاه در طول دوره رشد، موردبررسی قرار می‌گیرد که در نهایت به صورت عددی با واحد مترمکعب بر تن بیان می‌شود. ردپای آب سبز محصول از رابطه ۵ محاسبه شد (١٤):

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (٥)$$

که در آن، WF_{green} ردپای آب سبز(مترمکعب بر تن)، Y عملکرد گیاه(تن در هکتار) و CWU_{green} مقدار مصرف آب سبز گیاه (مترمکعب در هکتار) است.

مقدار مصرف آب سبز گیاه از مجموع تبخیروتعرق روزانه در طی فصل رشد گیاه به‌دست می‌آید:

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^{T} ET_{green} \quad (٦)$$

که در آن، T طول دوره رشد گیاه (روز)، ET_{green} تبخیروتعرق آب سبز (میلی‌متر در سال)، عدد ۱۰ تبخیروتعرق را از میلی‌متر (ارتفاع) به حجم آب در سطح زمین (مترمکعب در هکتار) تبدیل می‌کند.

در این رابطه فرض شده است تنها وقتی آب سبز موجود در خاک برای استفاده گیاه کافی نباشد، گیاه از آب آبی موجود استفاده می‌کند (۱۰). ازاین‌رو، تبخیروتعرق سبز گیاه از رابطه ۷ به‌دست آمد (١٤):

$$ET_{green} = \min(ET_c , P_e) \quad (٧)$$

که در آن، ET_c مقدار تبخیروتعرق گیاه و P_e مقدار باران مؤثر است.

ردپای آب آبی نیز به‌طور مشابه ردپای آب سبز محاسبه می‌شود و از رابطه‌های ۸، ۹ و ۱۰ به‌دست آمد (۱):

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (٨)$$

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{T} ET_{blue} \quad (٩)$$

$$ET_{blue} = \max(0 , ET_c - P_e) \quad (١٠)$$

که در آن، CWU_{blue} مقدار مصرف ردپای آب آبی گیاه (مترمکعب در هکتار) و ET_{blue} تبخیروتعرق آب آبی(میلی‌متر در سال) است.

یکی دیگر از اجزای ردپای آب در تولید محصول، حجم آب موردنیاز برای رقیق‌سازی کودهای کشاورزی با استفاده از رواناب یا نفوذ عمقی است که به آن آب خاکستری گفته می‌شود (۱۳). در این پژوهش، ردپای آب خاکستری تنها برای کودهای

1- Total Water Footprint

نیتروژن به‌عنوان منبع آلودگی آب (نیتروژن با آبشویی، بیش‌تر از دسترس خارج می‌شود و با ورود به آب‌های زیرزمینی، باعث آلودگی آن‌ها می‌گردد) از رابطه ۱۱ محاسبه شد. بدین‌منظور تنها استفاده از کود ازته به‌عنوان منبع ایجاد آلودگی موردمطالعه قرار گرفت. اطلاعات مربوط به میانگین میزان کود ازته از جهاد کشاورزی استان گرفته شد. محاسبه بر اساس روش ارائه شده توسط چاپاگین و همکاران (۲۰۰۶) و هوکسترا و همکاران (۲۰۱۱) می‌باشد (۷ و ۱۳). آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا با توجه به پژوهش چاپاگین و همکاران (۲۰۰۶) حداکثر غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی را ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر توصیه کرده است. این استاندارد از زمانی اتخاذ شد که آب‌های ناشی از فعالیت کشاورزی دوباره جمع‌آوری می‌شدند و بعد از انتقال به منابع اولیه خود، در مصارف شهری مورداستفاده قرار می‌گرفتند. بنابراین لازم بود تا غلظت این عامل کم‌تر از یک آستانه قرار گیرد. از آن‌جایی که هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد غلظت طبیعی نیتروژن در آب و محیط در دسترس نبود، مقدار آن در این مطالعه صفر در نظر گرفته شد (۲۰).

$$WF_{gray} = \frac{\alpha \times NAR}{C_{Max} - C_{Nat}} \times \frac{1}{Y} \qquad (۱۱)$$

که در آن، α درصد تلفات کودهای نیتروژن، NAR مقدار مصرف کود نیتروژن برای گیاه (کیلوگرم بر هکتار)، C_{Max} غلظت بحرانی نیتروژن (کیلوگرم بر هکتار) و C_{Nat} غلظت نیتروژن در آب دریافت‌کننده است.

جزء دیگری از مجموع ردپای آب را تشریح شد که تحت عنوان آب سفید نام‌گذاری شده است. این جزء، حجم تلفات آب آبیاری (مترمکعب بر هکتار) را موردتوجه قرار می دهد و با رابطه ۱۲ محاسبه شد (۱):

$$WF_{white} = \frac{10 \times (GI - CWU_{blue})}{Y} \qquad (۱۲)$$

که در آن، GI نیاز ناخالص آب آبیاری (مترمکعب بر هکتار) است.

برای محاسبه حجم آب مجازی مصرف شده[1] از رابطه ۱۳ استفاده شد (۱۳):

$$VWC = \frac{CWR}{Y} \qquad (۱۳)$$

که در آن، CWR نیاز آبی محصول (مترمکعب در هکتار)، Y مقدار محصول تولید شده (کیلوگرم در هکتار) و VWC حجم آب مجازی مصرف شده (مترمکعب بر کیلوگرم در هکتار) می‌باشد.

اگر حجم آب مجازی محاسبه شده برای هر محصول بیش‌تر از یک مترمکعب بر کیلوگرم باشد، آن محصول در رده محصولات پرمصرف قرار می‌گیرد و اگر کم‌تر از یک مترمکعب بر کیلوگرم باشد، جزء محصولات کم‌مصرف می‌باشد (۱).

یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها برای تجزیه و تحلیل میزان استفاده از آب، بهره‌وری مصرف آب می‌باشد. شاخص بهره‌وری مصرف آب کشاورزی[2] (کیلوگرم بر مترمکعب بر هکتار) میزان محصول تولید شده به‌ازای مصرف هر مترمکعب آب را نشان می‌دهد. برای محاسبه بهره‌وری مصرف آب محصولات از رابطه ۱٤ استفاده شد (۱۸):

$$CWP = \frac{Y}{CWR} \qquad (۱٤)$$

که در آن، Y مقدار عملکرد (کیلوگرم در هکتار) و CWR نیاز آبی گیاه (مترمکعب) می‌باشد.

1- Virtual Water Content
2- Crop Water Productivity

نتایج و بحث

متوسط ردپای آب در چهار بخش آب سبز، آب آبی، آب خاکستری و آب سفید در جدول ۱ آورده شده است. آمار مربوط به عملکرد و سایر اطلاعات محصولات موردمطالعه متوسط دوره ۱۳۹٦-۱۳۸۹ می‌باشد.

جدول ۱- مقادیر ردپای آب سبز، آب آبی، آب خاکستری و آب سفید محصولات در شهرهای موردمطالعه.

Table 1. Green Water Footprint, blue water, gray water and white water products in the studied cities.

شهر city	محصول product	ردپای آب سبز Green Water Footprint	ردپای آب آبی Blue Water Footprint	ردپای آب خاکستری Gray Water Footprint	ردپای آب سفید White Water Footprint	مجموع ردپای آب Total Water Footprint
		M^3/ton				
اصفهان Esfahan	سیب‌زمینی Potato	13.93	30.95	50.31	2006.7	2101.91
	گوجه‌فرنگی Tomato	10.24	29.96	38.07	1791.72	1870.01
	چغندرقند Sugar beet	12.49	28.09	20.21	1033.83	1094.68
	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	6.14	12.48	18.79	1657.85	1695.28
اهواز Ahvaz	سیب‌زمینی Potato	24.61	87.29	72.13	2761.8	2945.4
	گوجه‌فرنگی Tomato	12.42	43.75	39.94	1727.5	1823.6
	چغندرقند Sugar beet	22.91	27.96	12.57	595.8	1659.3
	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	11.99	20.47	23.79	1881.7	1937.4
شهرکرد Sahrkord	سیب‌زمینی Potato	21.95	27.91	62.11	2294.88	2406.86
	گوجه‌فرنگی Tomato	14.73	30.75	44.15	2092.1	2182
	چغندرقند Sugar beet	20.4	26.07	17.78	1013.03	1077.31
	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	10.99	12.28	23.07	1847.2	1893.35
مشهد Mashhad	سیب‌زمینی Potato	29.02	27.34	65.18	2402.12	2523.67
	گوجه‌فرنگی Tomato	13.48	21.34	27.92	1503.88	1566.44
	چغندرقند Sugar beet	21.48	20.13	14.83	849.65	906.1
	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	14.91	12.21	25.07	2074.12	2126.32
همدان Hamedan	سیب‌زمینی Potato	13.72	15.07	50.04	1684.12	1763.76
	گوجه‌فرنگی Tomato	11.6	14.71	31.58	1549.04	1602.95
	چغندرقند Sugar beet	14.93	15.99	17.21	1014.37	1062.29
	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	9.05	9.01	24.83	2035.2	2077.89

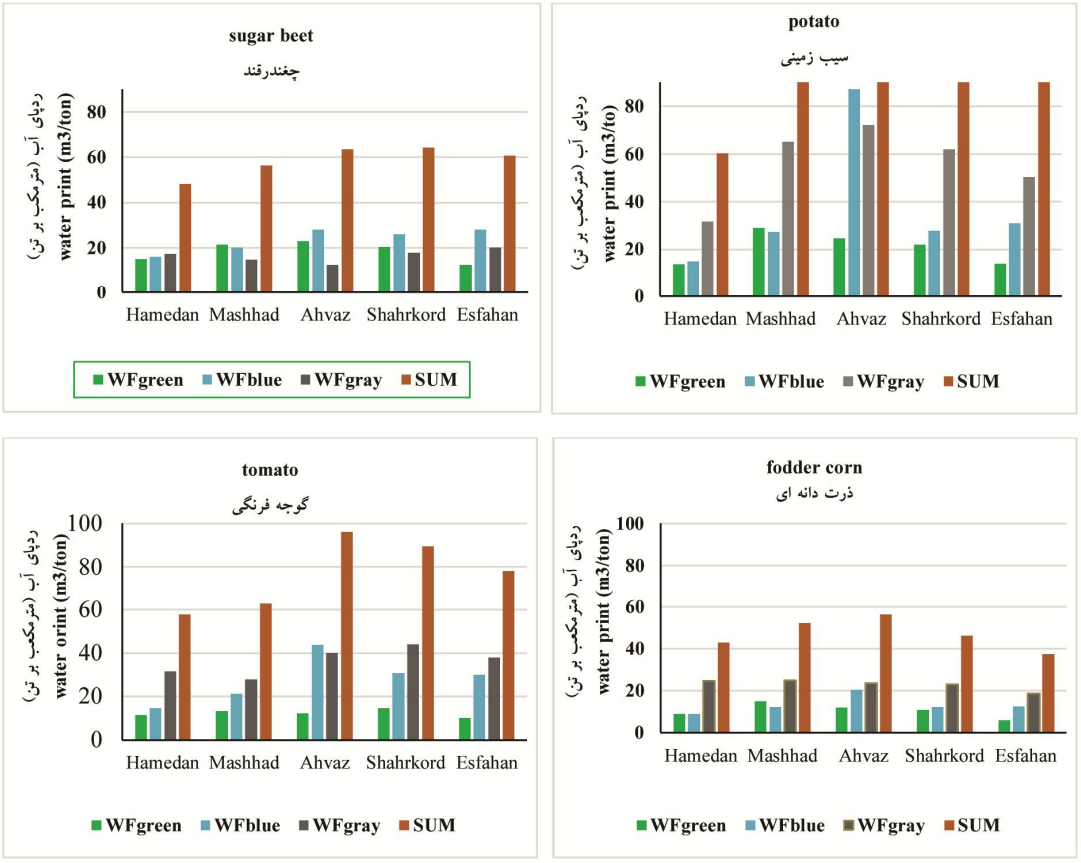
همان‌گونه که از جدول ۱ مشاهده می‌گردد سهم آب سبز در تولید محصولات پایین بود. سهم آب سبز در محصولات پاییزه بیش‌تر از محصولات بهاره بود. که علت آن بیش‌تر بودن میزان بارندگی‌ها در فصل پاییز و زمستان می‌باشد. بیش‌ترین ردپای آب سبز برای گیاه پاییزه سیب‌زمینی (۲٤/٦۱ مترمکعب بر تن) در اقلیم گرم و مرطوب اهواز و کم‌ترین آن برای محصول ذرت علوفه‌ای (۹/۰۵ مترمکعب بر تن) در اقلیم سرد و نیمه‌خشک همدان بود. ازنظر ردپای آب خاکستری نیز سیب‌زمینی در اقلیم گرم و مرطوب اهواز بالاترین ردپای آب (۷۲/۱۳ تن بر مترمکعب) را داشت. در مجموع بیش‌ترین ردپای آب (۲۹٤۵/٤ مترمکعب بر تن) از بین محصولات موردبررسی مربوط به گیاه سیب‌زمینی و شهر اهواز با اقلیم گرم و مرطوب است. بالاتر بودن ردپای آب در سیب‌زمینی به‌علت بالاتر بودن ردپای آب سفید و آبی در این محصول می‌باشد. سایر پژوهشگران نیز در پژوهش خود بالا بودن ردپای آب را به‌علت بالاتر بودن ردپای آب سفید بیان کردند (۱). یکی از دلایل افزایش ردپای آب سفید، پایین بودن راندمان آبیاری و تلفات زیاد آب در این مناطق و مدیریت ضعیف آبیاری می‌باشد. چغندرقند با ۹۰٦/۱ مترمکعب بر تن در اقلیم سرد و خشک مشهد کم‌ترین ردپای آب را دارا بود. نکته قابل‌توجه در بررسی بین هر دو جزء ردّپای آب آبی و سبز تقریباً در تمامی ایستگاه‌ها، بالا بودن مقدار ردّپای آب آبی نسبت به ردّپای آب سبز می‌باشد که این نشان‌دهنده کم بودن نرخ بارش‌ها و بیانگر پایداری اقلیم خشک و نیمه‌خشک در کشور از نظر کشاورزی می‌باشد. بنابراین، انتظار می‌رود که برای افزایش بهره‌وری محصول و هم‌چنین کاهش اثرات اقلیمی بر عملکرد محصول، استفاده از کودهای شیمیایی کاری رایج در بین کشاورزان باشد. بنابراین ردّپای آب خاکستری نیز باید به‌تبع آن رقم بیش‌تری باشد. علیقلی‌نیا و همکاران (۲۰۱۷) نیز در پژوهش خود راجع به بررسی ردپای آب برای گیاه گندم در اقلیم‌های مختلف ایران به نتایج مشابه دست یافتند (۳). این روند تقریباً برای همه ایستگاه‌های موردمطالعه این‌گونه بود اما برای محصول چغندرقند ردپای آب آبی بیش‌تر از ردپای آب خاکستری بود. علت آن مصرف کم‌تر کود در دوره رشد این گیاه است.

با توجه به جدول ۱ در اصفهان، مقایسه ردپای آب دو محصول پاییزه سیب‌زمینی و چغندرقند نشان داد علی‌رغم کوتاه‌تر بودن طول دوره رشد سیب‌زمینی نسبت به چغندرقند، مشاهده می‌گردد ردپای آب سیب‌زمینی ۱/۹۱ برابر ردپای آب چغندرقند است. علت آن را می‌توان به عملکرد کم‌تر سیب‌زمینی در یک هکتار زمین (متوسط ٤۰ تن) نسبت به عملکرد چغندرقند (متوسط ٦۰ تن) دانست. ازنظر ردپای آب سبز باید گفت چغندرقند با دارا بودن مقدار بیش‌تر ردپای آب سبز (۱۲/٤۹ مترمکعب بر تن) سهم بیش‌تری از بارندگی‌ها دریافت می‌کند. علت آن زمان کشت چغندرقند می‌باشد. چغندرقند در پاییز که بارندگی‌ها بیش‌تر است، کشت می‌شود به‌همین دلیل آب بیش‌تری از بارندگی‌ها دریافت می‌کند. سهم ردپای آبی در سیب‌زمینی بیش‌تر از چغندرقند می‌باشد و علت آن پایین بودن سهم آب سبز و حساسیت بیش‌تر سیب‌زمینی به کم‌آبی می‌باشد. سیب‌زمینی به‌واسطه سیستم ریشه‌ای نسبتا کم‌عمق، کم تراکم و ضعیف آن به‌عنوان یک گونه نسبتاً حساس به خشکی شناخته می‌شود. ردپای آب خاکستری همان‌گونه که در مواد و روش‌ها توضیح داده شد نشان‌دهنده آلودگی توسط مصرف مواد کودی می‌باشد. سهم آب خاکستری برای سیب‌زمینی ۲/٤۸ برابر چغندرقند می‌باشد که نشان‌دهنده ایجاد آلودگی بیش‌تر توسط این محصول می‌باشد. تمایل زیاد کشاورزان به استفاده

از کود جهت رشد و محصول بیش‌تر عامل بالا رفتن ردپای آب خاکستری می‌باشد. حجم تلفات آب آبیاری با استفاده از ردپای آب سفید بیان می‌شود. ردپای آب سفید نیز در سیب‌زمینی ۱/۹٤ برابر بیش‌تر از چغندرقند می‌باشد. علت پایین بودن ردپای آب سفید در چغندرقند نسبت به سیب‌زمینی مقاوم بودن آن نسبت به تنش آبی می‌باشد. به‌دلیل این‌که سیب‌زمینی حساس به کم‌آبی می‌باشد، کشاورزان آب بیش‌تری برای آبیاری آن به‌کار می‌برند. این امر باعث افزایش تلفات، کاهش راندمان آبیاری و بالارفتن ردپای آب سفید می‌شود. زاهدی و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهش خود در خصوص مقایسه بهره‌وری و کارایی انرژی سیب‌زمینی و چغندرقند در اصفهان بیان داشتند کل انرژی مصرفی در مزارع چغندرقند نسبت به سیب‌زمینی پایین‌تر بود، این موضوع سبب شد که فشردگی انرژی در مزارع سیب‌زمینی بالاتر از چغندرقند باشد که بیانگر مصرف نهاده‌های بیش‌تر از جمله مصرف آب در تولید محصول سیب‌زمینی است (۲٤).

با توجه به جدول ۱ در اقلیم گرم و مرطوب اهواز سیب‌زمینی با ۲٤/٦۱ مترمکعب بر تن بیش‌ترین و ذرت علوفه‌ای با ۱۱/۹۹ مترمکعب بر تن کم‌ترین ردپای آب سبز را دارا بودند. ردپای آب آبی، سفید و خاکستری نیز در چغندرقند از سایر محصولات بیش‌تر بود که علت آن را شاید به حساس بودن گیاه سیب‌زمینی به شرایط تنش و مصرف کود نسبت به سایر محصولات دانست. در اقلیم سرد و معتدل شهرکرد نیز سیب‌زمینی دارای بیش‌ترین ردپای آب سبز بود. اما ازنظر ردپای آب آبی گوجه‌فرنگی با ۳۰/۷۵ تن بر مترمکعب بالاترین ردپا را داشت. علت پایین بودن ردپای آب آبی در سیب‌زمینی در این شرایط اقلیمی را شاید بتوان به بارش برف در این اقلیم نسبت داد. ذوب شدن برف‌ها باعث تأمین آب موردنیاز گیاه می‌شود که مصرف آب آبیاری را پایین می‌آورد. با توجه به جدول ۱ در اقلیم سرد و خشک مشهد و سرد و نیمه‌خشک همدان نیز روند ردپای آب سبز در محصولات به همین ترتیب (سیب‌زمینی بالاترین و ذرت علوفه‌ای کم‌ترین) بود. روند ردپای آب آبی در اقلیم‌های مختلف در بین محصولات متفاوت بود و علت آن پراکندگی و تفاوت بارش‌ها در این مناطق است. در مشهد سیب‌زمینی و در همدان چغندرقند بالاترین ردپای آب آبی را داشت.

ردپای کل آب بر اجزای مصرف آب شامل آب سبز، آبی و خاکستری دلالت دارد که شامل فرایند مصرف آب از زمان کاشت تا برداشت است. علاوه بر آن کل مصرف آب یک محصول شامل آب آبی و آب سبز است که هر یک اثرات و هزینه‌های متفاوتی بر آب در دسترس دارند. مصرف آب سبز در تولید محصولات کشاورزی از آب باران است که بر روی محیط‌زیست اثر سویی ندارد و در مقابل آب آبی از آب‌های سطحی و زیرزمینی است که اثرات سو آن بر محیط‌زیست مشهود است (۲۰). بنابراین ردپای کل به مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب در تولیدات کشاورزی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از آن دارد که کاربرد آن می‌تواند ارزیابی جامع‌تری از بهره‌وری آب زراعی و توزیع زمانی و مکانی آن داشته باشد (۱۹). بنابراین در ادامه برای مقایسه محصولات و این‌که کشت محصول در کدام اقلیم بهتر است، نمودار ردپای آب برای محصولات موردمطالعه رسم شد (شکل ۲). به‌دلیل بیش‌تر بودن ردپای آب سفید نسبت به سایر ردپاهای آب و این‌که این جزء آب نشان‌دهنده حجم آب مصرفی داده شده به مزرعه توسط کشاورز می‌باشد، این جزء در نمودار آورده نشده است.



شکل ۲- مقایسه رد پای آب محصولات موردمطالعه در شهرها.

Figure 2. Comparison of water footprint of studied products in cities.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود از بین محصولات پاییزه سیب‌زمینی و چغندرقند، مجموع ردپای آب چغندرقند در تمامی شهرها کم‌تر از سیب‌زمینی بود. هم‌چنین از بین شهرهای موردمطالعه همدان کم‌ترین مقادیر ردپای آب را برای چغندرقند دارا بود. شهرهای اهواز، مشهد و شهرکرد مقادیر بالاتری از ردپای آب سبز را داشتند. مقایسه ردپای آب محصولات بهاره گوجه‌فرنگی و ذرت علوفه‌ای نشان داد در همه شهرها مجموع ردپای آب ذرت علوفه‌ای کم‌تر از گوجه‌فرنگی بود. که علت آن مقاومت بیش‌تر ذرت علوفه‌ای به کم‌آبی نسبت به گوجه‌فرنگی است. مقادیر ردپای آب خاکستری برای گیاه سیب‌زمینی از سایر محصولات بیش‌تر بود. هم‌چنین مطابق شکل ۲ بیش‌ترین مقدار ردپای آب خاکستری برای سیب‌زمینی در شهر اهواز و مشهد مشاهده شد. علیقلی‌نیا و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهش خود بیان داشتند ردپای آب خاکستری در شهرهای جنوبی ایران بیش‌تر می‌باشد و علت آن را شور بودن اراضی این مناطق و نیاز بالای آبشویی بیان داشتند که با نتایج این پژوهش همخوانی دارد (۳). بنابراین با توجه به شکل ۲ می‌توان گفت از بین محصولات پاییزه چغندرقند و محصولات بهاره ذرت علوفه‌ای به‌دلیل کم‌تر بودن ردپای آب برای کشت مناسب‌تر می‌باشند. شاخص ردپای آب را برای محصولات استان کرمانشاه محاسبه کردند و براساس آن الگوی کشت برای منطقه تعیین نمودند. نتایج پژوهش نشان

داد از بین محصولات زراعی با توجه به پایین بودن شاخص ردپای آب محصول هندوانه، ذرت علوفه‌ای و چغندرقند برای کشت مناسب می‌باشند و کنجد، لوبیا و آفتابگردان از این نظر نامناسب‌ترین محصولات هستند (۹).

مقادیر آب مجازی و بهره‌وری برای محصولات و شهرهای موردمطالعه محاسبه شد. نتایج در جدول ۲ مشاهده می‌گردد. همان‌طور که از جدول ۲ مشاهده می‌گردد مقدار آب مجازی محصولات مورد مطالعه در تمامی اقلیم‌ها کم‌تر از یک است که نشان می‌دهد این محصولات جزء محصولات کم‌مصرف می‌باشند. نتایج پژوهش با نتایج روحانی و همکاران (۲۰۰۸) مطابقت دارد (۲۱). ایشان در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که سبزی‌ها، میوه‌ها و محصولات صنعتی در گروه محصولات کم‌مصرف و حبوبات، غلات، دانه‌های روغنی، خشکبار و خرما در گروه محصولات پرمصرف قرار دارند. از دیدگاه بهره‌وری آب کشاورزی، هرچه میزان تولید محصول به‌ازای آب مصرفی بیش‌تر باشد، بهره‌وری بالاتر است. آب مجازی محصولات کشاورزی متأثر از نیاز آبی و عملکرد محصول می‌باشد که به شرایط اقلیمی محل کشت بستگی دارد. مقدار بهره‌وری محصولات مورد مطالعه از ۱/۲ تا ۷/٤٦ تن بر مترمکعب در اقلیم‌های مختلف متغیر بود. با توجه به این‌که رابطه معکوسی بین بهره‌وری مصرف آب و آب مجازی وجود دارد، محصولاتی که دارای مقادیر بالای آب مجازی هستند، بهره‌وری مصرف آب پایینی دارند. ذرت علوفه‌ای در اقلیم همدان با کم‌ترین مقدار آب مجازی (۰/۱٤ مترمکعب بر کیلوگرم در هکتار) بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب (۷/٤٦ کیلوگرم بر مترمکعب در هکتار) را دارا بود. کم‌ترین مقدار بهره‌وری مصرف آب (۱/۲ کیلوگرم بر مترمکعب در هکتار) نیز متعلق به سیب‌زمینی در اقلیم اهواز بود.

بذرافشان و گرکانی‌نژادمشیزی (۲۰۱۹) در پژوهش خود راجع به ردپای آب زعفران به نتایج مشابه دست یافتند که بهره‌وری مصرف آب با ردپای آب و آب مجازی رابطه عکس دارد و افزایش آن‌ها موجب کاهش بهره‌وری مصرف آب می‌شود (۵). بیش‌ترین مقدار آب مجازی مصرف‌شده برای گیاهان موردمطالعه سیب‌زمینی (۰/۸٤ مترمکعب بر کیلوگرم)، گوجه‌فرنگی (۰/۵۱ مترمکعب بر کیلوگرم)، چغندرقند (۰/٤٦ مترمکعب بر کیلوگرم) و ذرت علوفه‌ای (۰/۳۹ مترمکعب بر کیلوگرم) به‌ترتیب مربوط به اقلیم اهواز، شهرکرد، اهواز و اصفهان است که علت آن پایین بودن عملکرد این محصولات در این اقلیم‌ها باشد. هم‌چنین با توجه نتایج مشاهده شده در جدول ۲ می‌توان گفت اقلیم همدان با توجه به پایین بودن مقادیر آب مجازی (۰/۲۹، ۰/۳، ۰/۱۹ و ۰/۱٤ مترمکعب بر کیلوگرم) و بالا بودن بهره‌وری مصرف آب (۳/٤۳، ۳/۳، ۵/۱۹ و ۷/٤٦ کیلوگرم بر مترمکعب) به‌ترتیب برای سیب‌زمینی، گوجه‌فرنگی، چغندرقند و ذرت علوفه‌ای، نسبت به سایر اقلیم‌های موردمطالعه برای کشت هر چهار محصول مناسب‌تر است. نتایج به‌دست آمده از محاسبات ردپای آب نیز بیانگر این مطلب می‌باشد. اقلیم‌های مشهد، شهرکرد، اصفهان و اهواز به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. محمدی و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی انتخاب بهترین استان در تولید سیب‌زمینی با استفاده از شاخص ردپای آب پرداختند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد استان همدان مناسب‌ترین و بهترین استان برای کشت سیب‌زمینی می‌باشد (۱۸).

جدول ۲- میانگین نیاز آبی، عملکرد، آب مجازی و بهره‌وری مصرف آب محصولات.

Table 2. Average requierment, yield, virtual water and water use productivity.

شهر	محصول	نیاز آبی Water Requirement (مترمکعب در هکتار) M^3/ha	عملکرد yield (کیلوگرم در هکتار) Kg/ha	بهره‌وری مصرف آب Water use productivity (کیلوگرم بر مترمکعب) Kg/m^3	آب مجازی Virtual water (مترمکعب بر کیلوگرم) M^3/Kg
اصفهان Esfahan	سیب‌زمینی Potato	141.72	38000	2.68	0.37
	گوجه‌فرنگی Tomato	138.17	35000	5.17	0.19
	چغندرقند Sugar beet	141.72	40000	2.82	0.35
	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	106.29	55000	2.53	0.39
اهواز Ahvaz	سیب‌زمینی Potato	214.92	25700	1.2	0.84
	گوجه‌فرنگی Tomato	209.55	42100	2.1	0.49
	چغندرقند Sugar beet	214.92	46600	2.17	0.46
	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	161.19	63300	3.92	0.25
شهرکرد Sahrkord	سیب‌زمینی Potato	172.04	36567	2.12	0.47
	گوجه‌فرنگی Tomato	167.74	32500	1.93	0.51
	چغندرقند Sugar beet	172.04	39029	2.26	0.44
	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	129.03	61130	4.73	0.21
مشهد Mashhad	سیب‌زمینی Potato	177.41	32000	1.8	0.55
	گوجه‌فرنگی Tomato	172.97	46000	2.65	.37
	چغندرقند Sugar beet	177.41	51667	2.91	0.34
	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	133.05	61000	4.58	0.22
همدان Hamedan	سیب‌زمینی Potato	123.18	42325	3.43	0.29
	گوجه‌فرنگی Tomato	120.1	39722	3.3	0.3
	چغندرقند Sugar beet	123.18	64583	5.19	0.19
	ذرت علوفه‌ای Fodder corn	92.38	69103	7.46	0.14

نتیجه‌گیری کلی

در بین منابع و نهاده‌های تولیدی، آب همیشه جایگاه مهمی داشته است. کشاورزی به‌عنوان مهم‌ترین بخش مصرف‌کننده آب در جهان سبب استفاده فشرده از منابع آب و تأثیر مستقیم بر کیفیت و کمیت آب شده است. ازاین‌رو شاخصی برای مدیریت پایدار منابع آب با عنوان ردپای آب و آب مجازی ارائه شده است. در این پژوهش به بررسی ردپای آب محصولات سیب‌زمینی، چغندرقند، گوجه‌فرنگی و ذرت علوفه‌ای در مراکز چند استان مختلف ایران پرداخته شد. نتایج نشان داد که مقدار آب مصرفی واقعی این محصولات در چهار جزء آب آبی، آب سبز، آب خاکستری و آب سفید در مناطق و اقلیم‌های مختلف ایران یکسان نبوده و بسته به نوع اقلیم، وضعیت آب و هوایی و نحوه کشت و زرع این محصولات متفاوت است. بنابراین لزوم مدیریت کشت این محصولات در اقلیم‌های مختلف ایران امری لازم و ضروری بوده که همواره باید مدنظر مسئولین و مدیران امر قرار گیرد. نتایج پژوهش نشان داد در اصفهان و شهرکرد در محصولات پاییزه چغندرقند و محصولات بهاره ذرت علوفه‌ای کم‌ترین ردپای آب را داشت، بنابراین کشت این دو محصول نسبت به سیب‌زمینی و گوجه‌فرنگی در این مناطق بهتر است. در اهواز، مشهد و همدان چغندرقند و گوجه‌فرنگی کم‌ترین ردپای آب را دارا بودند. علیقلی‌نیا و همکاران (۲۰۱۷) در بررسی ردپای آب آبی و سبز محصولات عمده مورد کشت در حوضه دریاچه ارومیه بیان داشتند از بین محصولات یونجه، گندم، ذرت علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی و چغندرقند، نسبت آب آبی به سبز در محصولات ذرت علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی و چغندرقند بیش‌تر از یونجه و گندم بود و کشت این محصولات در منطقه ارومیه توصیه نمی‌شود (۲)، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت کشت همه محصولات در هر اقلیمی مناسب نیست و باید برای اقلیم‌های مختلف محصولات مناسب آن اقلیم را کشت نمود. هم‌چنین نتایج نشان داد در بین محصولات موردمطالعه گیاه سیب‌زمینی با ۲۹٤٥/٤ مترمکعب بر تن در شهر اهواز با اقلیم گرم و مرطوب بالاترین ردپای آب و چغندرقند با ۹۰٦/۱ مترمکعب بر تن در اقلیم سرد و خشک مشهد کم‌ترین ردپای آب را دارا بود. نتایج پژوهش در خصوص نسبت اجزای ردپای آب با نتایج پژوهش محمدی (۲۰۱۷)، یوسفی و همکاران (۲۰۱٦) و موکنن و هوکسترا (۲۰۱۰) همخوانی دارد (۱۹، ۱۸ و ۲۳). از نظر آب مجازی ذرت علوفه‌ای در اقلیم همدان کم‌ترین مقدار آب مجازی (۰/۱٤ مترمکعب بر کیلوگرم در هکتار) را داشت. هم‌چنین در این پژوهش مفهوم دیگری از ردپای آب با نام ردپای آب سفید مورد بررسی قرار گرفت که نشان‌دهنده میزان تلفات آب کشاورزی می‌باشد. از نظر ردپای آب سفید سیب‌زمینی بیش‌ترین ردپای آب سفید را داشت. از نظر بهره‌وری مصرف آب چغندرقند و ذرت علوفه‌ای در اقلیم همدان بیش‌ترین بهره‌وری مصرف آب را داشتند. محمدی و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهش خود راجع به بررسی منطقه مناسب برای کشت سیب‌زمینی بر اساس ردپای آب به این نتیجه رسید که استان همدان بهترین منطقه برای کاشت سیب‌زمینی می‌باشد. ایشان مجموع ردپای آب سبز، آبی و خاکستری را برای سیب‌زمینی در استان همدان ۳٤٦ تن بر مترمکعب برآورد کردند (۱۸). تفاوت در مقادیر ردپای آب یک محصول به‌سبب تفاوت در اقلیم، نوع خاک و مدیریت به‌کار گرفته شده در مزرعه می‌باشد. علیقلی‌نیا و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش خود راجع به ارزیابی ردپای آب گندم در اقلیم‌های مختلف ایران به این نتیجه رسیدند که کشت گندم برای تمام اقلیم‌های ایران مناسب نبوده و در اقلیم‌های خشک خنک گرم و خشک خنک خیلی گرم توصیه نمی‌شود

(۳). در پژوهش حاضر نیز مشاهده شد کشت محصولات موردمطالعه بر اساس ردپای آب در تمام اقلیم‌ها مناسب نبوده است و کشت این محصولات با توجه به پایین بودن ردپای آب، آب مجازی و بالاتربودن بهره‌وری مصرف آب در همدان نسبت به بقیه شهرها توصیه می‌شود. با توجه به کمبود آب در کشور و اقلیم گرم و خشک ایران لزوم توجه به افزایش بهره‌وری آب امری ضروری است. هم‌چنین با مدیریت صحیح تولید، راندمان آبیاری، مدیریت صحیح مصرف آب در بخش کشاورزی، کم‌آبیاری و افزایش بهره‌وری مصرف آب می‌توان اثر تغییرات فاکتورهای اقلیمی و کاهش بارندگی در کشور را جبران نمود و با تغییر و تعدیل الگوهای کشت می‌توان به حفظ محیط زیست، توسعه پایدار کشاورزی، خودکفایی و حفظ امنیت غذایی رسید. ردپای آب را نیز می‌توان با افزایش بازده محصول، استفاده از سیستم‌های آبیاری کارآمد، کاهش تبخیر و تعرق، کاهش هدررفت کود، استفاده موثر از بارش، بهینه‌سازی کاشت محصول و انتخاب محصولات زراعی با عملکرد بیش‌تر کاهش داد. هم‌چنین می‌توان بر اساس مطالعات آب مجازی و ارزش‌گذاری اقتصادی آب، محصولات دارای آب مجازی زیاد را به هر منطقه وارد و محصولات با آب مجازی کم را صادر کرد و سطح زیر کشت محصولات پرآب را کاهش داد تا به مدیریت بهتر منابع آب کمک شود.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه زابل کد پژوهانه UOZ-GR-9719-30 انجام شده است.

داده‌ها و اطلاعات

اطلاعات و داده‌های مورد نیاز در این مقاله از سازمان هواشناسی کشور و سازمان جهاد کشاورزی هر استان اخذ گردید.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

منابع

1.Ababai, B., and Etedali Ramazani, H. 2014. Estimation of Water Footprint Components in Wheat Production in Iran. Water and Soil, 29: 6. 1458-1468. (In Persian)
2.Aligholina, T., Rezaei, H., Bahmanesh, J., and Montasseri, J. 2017. Study of water footprint index for dominant crops in the Lake Urmia Catchment and its relationship with irrigation management. Soil Science, 27: 4. 37-48. (In Persian)
3.Alighalnia, T., Sheibani, H., Mohammadi, A., and Hesam, M. 2019. Comparison and evaluation of water, green and gray water footprints in different climates of Iran. Iranian Water Resources Research, 15: 3. 235-245. (In Persian)
4.Arabi Yazdi, A., Nik nia, N., Majidi, N., and Emami, H. 2014. Water Security Assessment in Arid Climates Based on Water Footprint Concept (case study; south khorasan province). Iran. J. Irrig. Drain. 8: 4. 735-746. (In Persian)
5.Bazrafshan, A., and Garkani Nezhad Mashizi, Z. 2019. Evaluation of water consumption efficiency and water footprint of saffron product in Iran. Saffron Agriculture and Technology, 7: 4. 505-519. (In Persian)
6.Bazrafshan, Z., Ramezani Etedali, H., and Bazrafshan, A. 2020. Temporal and spatial distribution of water footprint components and virtual water trade in walnut products in Iran. Echo Hydrology. 7: 3. 583-593. (In Persian)

7.Chapagain, A.K., Hoekstra, A.Y., Savenije, H.H.G., and Gautam, R. 2006. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. Ecological Economics, 60: 1. 186-203.
8.Deng, G., Ma, Y., and Li, X. 2016. Regional water footprint evaluation and trend analysis of China - based on interregional input–output model. J. Clean. Prod. 112: 4682-4674.
9.Farzi, S., Golabi, M.R., and Radmanesh, F. 2019. Determining the optimal cultivation pattern based on water footprint index (Case study: Kermanshah province). Irrigation and Drainage of Iran, 39: 13. 588-602.
10.Fu, Y., Zhao, J., Wang, C., Peng, W., Wang, Q., and Zhang, C. 2018. The virtual Water flow of crops between intraregional and interregional in mainland China. Agricultural water management, 208: 204-213.
11.Hess, T.M., Lennard, A.T., and Daccache, A. 2015. Comparing local and global water scarcity information in determining the water scarcity footprint of potato cultivation in Great Britain. J. Clean. Prod. 87: 666-674.
12.Hoekstra, A.Y. 2013. The Water Footprint of Modern Consumer Society. Routledge, London, UK, 208p.
13.Hoekstra, A.Y., and Chapagain, A.K. 2011. Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources. John Wiley and Sons. 203p.
14.Hoekstra, A.Y., and Chapagain, A.K. 2007. Water footprint of nations :water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resource Management, 21: 1. 35-48.
15.Khalili, T., Mahdisarai, T., Babazadeh, H., and Ramezani Ettedali, H. 2020.Water resources management of Qom Province by using the concept of water Footprint. Ecohydrology. 6: 4. 1109-1119. (In Persian)
16.Lu, Y., Zhang, X., Chen, S., Shao, L., and Sun, H. 2016. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: a case study in the North China Plain. J. Clean. Prod. 116: 71-79.
17.Mekonnen, M.M., and Hoekstra, A.Y. 2010. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat. Hydrology and Earth System Sciences, 14: 1259-1276.
18.Mohammadi, A., Yousefi, H., Noorullahi, Y., and Sadati-Nejad, S.J. 2017. Selecting the best province in potato production through the water footprint index. Ecohydrology, 2: 4. 523-532.
19.Ridoutt, B.G., and Pfister, S. 2010 .A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. Global Environmental Change. 20: 113-120.
20.Rodriguez, C.I., de Galarreta, V.R., and Kruse, E.E. 2015. Analysis of water footprint of potato production in the pampean region of Argentina. Cleaner Production. 90: 91-96.
21.Rouhani, N., Yang, H., Amin Sichani, S., Afyouni, M., Mousavi, F., and Kamgar Haghighi, A. 2008. Evaluating the exchange of food and water based on available water resources in Iran. J. Agric. Sci. Technol. 12: 46. 417-432. (In Persian)
22.Van oel, P.R., Mekonnen, M.M., and Hoekstra, A.A. 2008. The external water footprint of the Netherlands: Quantification and impact assessment. Value of Water Research Report Series No. 33, UNESCOIHE, Delft, the Netherlands.
23.Yousefi, H., Mohammadi, A., Nourollahi, Y., and Sadatinejad, J. 2016. Evaluation of water footprint index of Tehran province crops. Soil Conservation, 24: 6. 67-85. (In Persian)
24.Zahedi, M., Eshghizadeh, H.R., and Mandani, F. 2015. Energy efficiency and productivity in potato and sugar beet production systems in Isfahan province. Production and processing of agricultural and horticultural products, 5: 17. 181-189. (In Persian)

25.Zhuo, L., and Hoekstra, A.Y. 2017. The effect of different agricultural management practices on irrigation efficiency, water use efficiency and green and blue water footprint. Frontiers of Agricultural Science and Engineering. 4: 185-194.

26.Zhuo, L., Mekonnen, M.M., and Hoekstra, A.Y. 2016. Consumptive water footprint and virtual water trade scenarios for China With a focus on crop production, consumption and trade. Environment international, 94: 211-223.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Research Full Paper

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 27(6), 2021
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2021.18398.3399

Investigating water footprints and water consumption efficiency of crops of potatoes, sugar beets, tomatoes and forage corn in different climates of Iran

***H. Piri[1] and M. Mobarki[2]**

[1]Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran,
[2]M.Sc. Graduate, Dept. of Water Engineering, College of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran
Received: 09.25.2020; Accepted: 01.13.2021

Abstract

Background and Objectives: One of the practical strategies for managing water resources is to estimate the plant's water needs and determine the amount of water used in the various stages of crop production. In order to calculate the amount of water consumed by agricultural products in the growth stages, the virtual water index and water footprint are used. Water footprint in a product is defined as the volume of fresh water used in the production of that product. Water footprint is defined as an indicator for the allocation of fresh water resources that provides valuable insights into the environmental impact of producing a product. Water footprint index shows actual consumption of water in three components: blue, green and gray, which is now considered in the direction of modern management of water resources with an integrated approach. In order to properly assess water consumption in the agricultural sector, it is necessary to study the water footprint index in different climates.

Materials and Methods: To conduct the research, meteorological data were first obtained from the Meteorological Organization.Then the water needs of sugar beet, potato, forage corn and tomato plants in Hamedan, Ahvaz, Shahrekord, Mashhad and Isfahan climates were calculated from the CropWat software. The yield of the crop and the amount of nitrogen fertilizer used were obtained from the agricultural jihad of each province. Then, the average volume of water consumption, virtual water, water footprint and water use efficiency of these products were calculated for the statistical period of 2011-2017. Chapagin et al. (2006) Method was used to calculate water footprint.

Results: The results showed that among the studied products, the potato plant with 2945.4 m^3/ton in Ahvaz city with hot and humid climate has the highest water footprint and sugar beet with 906.1 m^3/ton in climate cold and dry of Mashhad has the least water footprint. The highest amount of virtual water used for the studied plants is potato (0.84 m^3/kg), tomato (0.51 m^3/kg), sugar beet (0.46 m^3/kg) and forage corn (0.39 m^3/kg) was respectively to the climate of Ahwaz, Shahrekord, Ahwaz and Isfahan. The lowest amount of water consumption efficiency (1.2 kg/m^3) also belonged to the potato in Ahvaz climate. The lowest virtual water and the highest water consumption efficiency for the studied plants were obtained in Hamedan climate.

Conclusion: In the present study, water consumption for agricultural products was investigated. The results showed that the volume of water consumed in the studied products varies in different climates. According to the obtained results, it can be said that the climate of Hamedan due to the low amount of virtual water (0.29, 0.3, 0.19 and 0.14 m^3/kg) and high water consumption efficiency (3.43, 3.3, 5.19 and 7.46 kg/m^3) for potatoes, tomatoes, sugar beets and fodder corn, respectively, is more suitable for cultivation of all four product compared to other climates studied. Hence, according to recent droughts and water shortage, available water resources should be used accurately and decision must be made for cultivating the products with less water requirement and better performance.

Keywords: Blue water, Gray water, Green water, Water Requirement, White water

* Corresponding Author; Email: h_piri2880@uoz.ac.ir