نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۵، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۱۷۶-۱۶۴

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 1, Vol. 15, Apr.-May. 2021, p. 164-176

مقاله علمی-پژوهشی

توزیع زمانی و مکانی ردپای آب و کارایی مصرف آب جو در مناطق مختلف ایران

حلیمه پیری[۱*]، مجتبی مبارکی[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۶

چکیده

تحقیق حاضر به‌منظور ارائه راهکارهای پایدار در مدیریت منابع آب با استفاده از مفهوم ردپای آب و کارایی مصرف آب جو در سطح ملی انجام شد. در ابتدا استان‌های مختلف کشور مطابق اقلیم‌نمای دومارتن طبقه‌بندی شدند. سپس ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید در تولید جو و کارایی مصرف آب در اقلیم‌های مختلف و مراکز استان‌ها طی دوره آماری ۱۳۹۶-۱۳۸۷ محاسبه شد. همچنین پهنه‌بندی مکانی و زمانی ردپای آب و کارایی مصرف آب انجام شد. نتایج نشان داد بیشترین ردپای آب سبز در اقلیم مرطوب و مدیترانه‌ای شمال کشور ایستگاه‌های رشت (۵۹۲/۵۳ مترمکعب بر تن)، گرگان (۵۷۰/۸۶ مترمکعب بر تن) و ساری (۵۴۳/۳۶ مترمکعب برتن) و کمترین آن در اقلیم فراخشک، ایستگاه یزد با ۱۲۴/۲۱ مترمکعب بر تن به‌دست آمد. ایستگاه زاهدان با اقلیم فراخشک بیشترین ردپای آب آبی (۷۸۷/۰۱ مترمکعب بر تن) و رشت با اقلیم مرطوب کمترین آن (۸۶/۷۳ مترمکعب بر تن) را دارا بود. بیشترین مقدار ردپای آب خاکستری مربوط به ایستگاه‌های زاهدان (۳۹۰/۴ متر مکعب بر تن) و بوشهر (۳۹۰/۱۱ متر مکعب بر تن) و کمترین مقدار آن در ایستگاه همدان (۲۳۹/۶۷ متر مکعب بر تن) بود. از نظر ردپای آب سفید بیشترین آن در ایستگاه زاهدان (۱۹۵۶/۲ مترمکعب بر تن) و کمترین آن مربوط به ایستگاه رشت (۵۱۵/۹۹ مترمکعب بر تن) بود. توزیع مکانی کل ردپای آب نشان داد بیشترین ردپای کل آب در جنوب‌شرقی کشور و اقلیم فراخشک بود و کمترین آن در نواحی شمالی و غربی کشور مشاهده شد. نتایج پهنه‌بندی کارایی مصرف آب نشان داد بیشترین کارایی مصرف آب در مناطق غربی کشور مشاهده شد و هرچه به سمت مرکز و شرق کشور برویم، مقدار آن کاهش یافت. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان گفت مناطق شمال و غرب کشور برای کاشت جو مناسب‌تر می‌باشد. همچنین با توجه به کمبود آب در مناطق با اقلیم فراخشک و بالابودن ردپای آب در این مناطق از کشت جو در این مناطق خودداری شود. کشت جو در این مناطق به‌علت تحمل بالای جو به شوری و حاصل‌خیزی کم اراضی می‌باشد. بنابراین لازم است مسئولان در این مناطق کشت محصولات با نیاز آبی کمتر و عملکرد بالاتر و متحمل به شوری را برای جایگزینی جو مورد برنامه‌ریزی قرار دهند.

واژه‌های کلیدی: اقلیم، آب سبز، آب سفید، آب آبی، شاخص تأمین نسبی آب

مقدمه

ایران کمتر از یک درصد از منابع تجدید شونده آب در دنیا را در اختیار دارد و طبق پیش‌بینی‌های انجام شده جمعیت ایران تا سال ۱۴۰۰ به بیش از ۱۰۰ میلیون نفر خواهد رسید که تولید غذا برای تأمین نیاز غذایی این جمعیت در سال به بیش از ۱۵۰ میلیارد مترمکعب آب نیاز دارد که این حجم از منابع آب در ایران موجود نمی‌باشد (Arabi Yazdi et al., 2014). توزیع زمانی نزولات جوی در کشور نیز به‌دلیل ناهماهنگی با فصول آبیاری وضعیت مناسبی ندارد و میزان آن در سال‌های مختلف و حتی فصول مختلف متغیر بوده و این مسئله مشکلات گوناگونی را در چند سال اخیر برای بخش‌های مختلف، به‌ویژه بخش کشاورزی به همراه داشته و زیان‌های زیادی را به این بخش تحمیل کرده است (Razavi and Davari, 2013). از این‌رو با توجه به عدم توزیع زمانی و مکانی مناسب بارش، مدیریت کشاورزی جهت افزایش کارایی مصرف آب، بسیار دشوارتر از کشورهایی با شرایط آبی مطلوب است. الگوی کشت یکی از عوامل مهم در مدیریت کشاورزی جهت افزایش کارایی مصرف آب است. با توجه به گستردگی پهنه‌ی جغرافیایی کشور و تنوع اقلیمی مناطق گوناگون آن، رسیدن به الگوی کشت مناسبی که

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران
۲ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: H_piri2880@uoz.ac.ir)
DOR: 20.1001.1.20087942.1400.15.1.14.4

از آن بتوان حداکثر بهره‌برداری را از عوامل و نهاده‌های تولید به‌ویژه عامل محدودکننده‌ی آب به‌دست آورد، ضرورتی انکارناپذیر است. در بسیاری از مناطق کشور، کشت محصولات زراعی، بیلان منفی آب دشت‌ها و نیاز به پایداری تولید محصولات، ما را ملزم می‌کند که در جهت بهبود سفره‌های زیرزمینی آب و افزایش راندمان مصرف آب حرکت کنیم. همچنین باید نسبت تخصیص زمین‌های کشاورزی و برنامه‌ی 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. از سوی دیگر میزان کشت محصولات کشاورزی در یک منطقه باید با توجه به منابع آب موجود، عملکرد محصول، نیاز کشور و سیاست‌های درست انجام شود و تصمیم‌گیری در انتخاب گیاهان زراعی مناطق مختلف بر اساس مشخصات اقلیم منطقه باشد (Rouhani et al., 2008).

بررسی وضعیت موجود کشاورزی بیانگر آن است که با وجود پتانسیل افزایش تولید محصولات کشاورزی، به‌دلیل فقدان سیستم مدیریتی صحیح، امکان استفاده بهینه از منابع موجود آب و خاک میسر نشده است. در این راستا بررسی راهکارهای استفاده بهینه آب از طریق بازنگری در تخصیص منابع آب و مدیریت آن امری لازم و ضروری است. اما از آنجایی‌که میزان آب مصرفی واقعی هر محصول تحت تأثیر اقلیم منطقه، میزان تولیدات، الگوی مصرفی، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب متغیر است، لذا 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 (Rasooli Majd et al., 2015). در سال‌های اخیر با با ظهور شاخص ردپای آب که نشان‌دهنده‌ی مقدار واقعی آب مصرفی بر اساس شرایط و اقلیم هر منطقه می‌باشد، دریچه‌ای برای انجام پژوهش در راستای مدیریت نوین منابع آب با رویکرد یکپارچه باز شده است (علیقلی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۵). 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 (Van Oel et al, 2008). 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 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 برای از بین بردن آلودگی‌های ایجاد شده ناشی از کشت گیاه و تولید محصول در محیط استفاده شده اند، مورد نیاز است (Hoekstra et al, 2011). رمضانی‌اعتدالی و آبابایی مفهوم آب سفید را ارائه دادند که در واقع حجم تلفات آب آبیاری را بیان می‌نماید (Ababai and Ramezani Etedali, 2014). تاکنون مطالعات زیادی برای ارزیابی این شاخص در حوزه‌های مختلف انجام شده است. محمدی و همکاران (۱۳۹۵) برای تعیین مناطق مناسب کشت سیب‌زمینی در کشور از شاخص ردپای آب استفاده کردند. با توجه به ردپای آب محاسبه شده استان همدان با داشتن کمترین ردپای آب مناسب‌ترین منطقه و استان سمنان با داشتن بیش‌ترین ردپای آب نامناسب‌ترین منطقه برای کشت سیب‌زمینی بودند. فرزی و همکاران (۱۳۹۸) الگوی کشت بهینه برای کرمانشاه را بر اساس ردپای آب تعیین کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد در بین محصولات مورد مطالعه در بخش زراعی هندوانه، ذرت علوفه‌ای و چغندرقند به‌عنوان محصولات برتر از نظر شاخص ردپای آب و در مقابل کنجد، لوبیا و آفتابگردان به‌عنوان نامناسب‌ترین محصولات از این نظر شناخته شدند. چاپاگین و هوکسترا به بررسی جهانی ردپای آب برنج با استفاده از داده‌های محلی و آبیاری واقعی پرداختند و بیان کردند در اندونزی، هند، ویتنام، تایلند، میانمار و فیلیپین بخش آب سبز به نسبت قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر از آب آبی است. در حالی‌که در ایالات متحده آمریکا و پاکستان بخش آب آبی بیشتر از چهار برابر آب سبز می‌باشد (Chapagain and Hoekstra, 2011). هی‌سو و همکاران ردپای آب پنج محصول ذرت، سیب‌زمینی، نیشکر، ذرت خوشه‌ای و برنج منطقه نیمه گرمسیر تایوان را بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که کمترین ردپای آب مربوط به سیب‌زمینی بوده است. برای مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری نیشکر به‌علت استفاده بیشتر از آب باران و برای مناطق معتدل ذرت بهتر می‌باشد (HuiSu et al,.2015). علیقلی‌نیا و همکاران ردپای آب را برای محصول گندم در اقلیم‌های مختلف ایران مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مطالعه آن‌ها 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 ۵۰۳/۳، ۱۳۹۲/۸ و ۲۸۶/۲ مترمکعب بر تن برای گندم به‌دست آمد. همچنین نتایج تحقیق نشان داد که کشت محصول گندم در همه اقلیم‌ها مناسب نبوده است (Aligholina et al,. 2019).

با توجه به بررسی تحقیقات انجام شده، در بیشتر مطالعات، بخش کشاورزی و تولید محصولات زراعی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده‌ی آب می‌باشد. بنابراین بررسی ردپای آب در این بخش اهمیت ویژه‌ای دارد. زیرا نیاز است تا اطلاعاتی در زمینه‌ی مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب و مقدار آلودگی ایجاد شده توسط محصولات کشت شده جمع‌آوری شود تا مدیریت منابع آب موجود به بهترین شکل

عملی شود. در ایران، محصول جو جزء محصولات استراتژیک قلمداد شده و از سطح زیرکشت قابل‌توجهی نیز برخوردار است. جو یکی از چهار غله مهم در دنیا بوده و در کنار گندم، برنج و ذرت قرار می‌گیرد (Tuttolomondo and Labell, 2008). جو با تولید سالیانه ۱۵۷ میلیون تن در سال و با سطح زیرکشت ۵۶ میلیون هکتار جزء یکی از مهمترین غلات دنیا است. طبق آمار فائو ایران با تولید سالیانه ۳ میلیون تن و سطح زیرکشت ۱/۷ میلیون هکتار در رده چهاردهم طبقه‌بندی کشورهای تولید کننده‌ی این محصول قرار می‌گیرد. جو گیاهی است که دامنه انتشار و سازش اقلیمی وسیعی داشته و اغلب برای کشت در مناطق خشک و نیمه‌خشک سازگار است. کاه جو در تغذیه دام از ارزش علوفه بالاتری نسبت به کاه گندم برخوردار است به‌طوری که قابل مقایسه با گندم مقاومت بیشتری نسبت به خشکی و بیماری نشان می‌دهد و در شرایط نامساعد عملکرد آن بیش از گندم است (نورمحمدی و همکاران، ۱۳۸۳). با توجه به اهمیت آگاهی از سهم اجزاء مختلف ردپای آب در مدیریت منابع آبی و تولید محصولات غذایی در سطح کشور، در این تحقیق به برآورد اجزاء ردپای آب آبی، سبز، خاکستری و سفید در تولید جو در اقلیم‌های مختلف ایران پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه مراکز استان‌های کشور ایران می‌باشد. کشور ایران به‌عنوان دومین کشور بزرگ خاورمیانه است که از یک سو به‌دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان و از سوی دیگر به دلایل ضعف‌های مدیریتی در تخصیص و مصرف آب به‌ویژه در بخش کشاورزی، در سال‌های اخیر با مشکل حاد کمبود آب مواجه شده است. ایران از دیدگاه طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای پنج اقلیم فراخشک، خشک، نیمه‌خشک، مرطوب و مدیترانه‌ای بوده و نواحی خشک و نیمه‌خشک بیش‌ترین سهم را در خشکی ایران دارند (Karandish and Hoekstra, 2017). برای انجام تحقیق ابتدا اطلاعات مربوط به عملکرد محصول جو در مراکز استان‌های کشور از آمار جهاد کشاورزی طی سال‌های ۱۳۹۷-۱۳۸۷ به‌دست آمد. با استفاده از داده‌های هواشناسی مراکز استان‌ها، اقلیم هر کدام از شهرهای مورد مطالعه بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن تعیین شد. شکل ۱ مناطق مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

برای برآورد حجم ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید در تولید جو از روش هوکسترا و چاپاگین در دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۷ استفاده شد (Hoekstra and Chapagain, 2008). برای انجام کار ابتدا تبخیر و تعرق گیاه در هر شهر با استفاده از نرم‌افزار Cropwat و به روش فائوپنمن‌مانتیث به‌صورت روزانه برای هر ده سال محاسبه شد.

شکل ۱- اقلیم و مناطق مورد مطالعه

محاسبات ردپای آب

اجزای ردپای آب در این تحقیق شامل ردپای آب سبز[1]، ردپای آب آبی[2]، ردپای آب خاکستری[3] و رد پای آب سفید[4] می‌باشد. 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 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 برای از بین بردن آلودگی‌های ایجاد شده ناشی از کشت گیاه و تولید محصول در محیط استفاده شده اند، مورد نیاز است. آبابایی و اعتدال رمضانی مفهوم آب سفید را ارائه دادند که در واقع حجم تلفات آب آبیاری را بیان می‌نماید (Ababai and Etedali Ramazani, 2014). بنابراین ردپای آب کل[5] به صورت رابطه ۱ بیان می‌گردد.

$$WF_t = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{gray} + WF_{white} \quad (۱)$$

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:

ردپای آب سبز

مصرف آب در این دوره با توجه به محاسبه تبخیر و تعرق گیاه در طول دوره رشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد که در نهایت به صورت

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

عددی با واحد مترمکعب بر تن بیان می‌شود. ردپای آب سبز محصول از رابطه ۲ محاسبه شد:

$$WF_{green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (۲)$$

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

مقدار مصرف آب سبز گیاه از مجموع تبخیر و تعرق روزانه در طی فصل رشد گیاه به‌دست می‌آید:

$$CWU_{green} = 10 \times \sum_{d=1}^{T} ET_{green} \quad (۳)$$

در رابطه ۳، T طول دوره رشد گیاه(روز)، ET_{green} تبخیر و تعرق آب سبز(میلی‌متر در سال)، عدد ۱۰ تبخیر و تعرق 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 می کند (Yousefi et ali, 2016). از این رو، تبخیر و تعرق سبز گیاه از روش ارائه شده توسط هوکسترا و همکاران به‌دست می‌آید (Hoekstra et al, 2011):

$$ET_{green} = \min(ET_c , P_e) \quad (۴)$$

که در آن: ET_c مقدار تبخیر و تعرق گیاه و P_e مقدار باران مؤثر می باشد.

ردپای آب آبی

ردپای آب آبی نیز به طور مشابه ردپای آب سبز محاسبه می‌شود و به صورت رابطه ۵ ارائه می‌گردد:

$$WF_{blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (۵)$$

$$CWU_{blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{T} ET_{blue} \quad (۶)$$

$$ET_{blue} = \max(0 , ET_c - P_e) \quad (۷)$$

که در آن: CWU_{blue} مقدار مصرف ردپای آب آبی گیاه(مترمکعب در هکتار) و ET_{blue} تبخیر و تعرق آب آبی(میلی‌متر در سال) می‌باشد.

ردپای آب خاکستری

یکی دیگر از اجزای ردپای آب در تولید محصول، حجم آب مورد نیاز برای رقیق سازی کودهای کشاورزی با استفاده از رواناب یا نفوذ عمقی است که به آن آب خاکستری گفته می‌شود (Hoekstra et al, 2011). در این پژوهش، ردپای آب خاکستری تنها برای کودهای نیتروژن به‌عنوان منبع آلودگی آب محاسبه شده است. بدین منظور تنها استفاده از کود ازته به عنوان منبع ایجاد آلودگی مورد مطالعه قرار گرفت. اطلاعات مربوط به میانگین میزان کود ازته ۲۵ از جهاد کشاورزی کشور گرفته شد. محاسبه بر اساس روش ارائه شده توسط چاپاگین و همکاران و هوکسترا و همکاران می‌باشد (Chapagain and Hoekstra, 2006; Hoekstra et al., 2011). آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا با توجه به پژوهش چاپاگین و همکاران حداکثر غلظت مجاز نیتروژن در منابع آب سطحی و زیرزمینی را ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر توصیه کرده است (Chapagain et al., 2006). 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 مورد استفاده قرار می‌گرفتند. لذا 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 (Mekonnen and Hoekstra, 2010).

$$WF_{gray} = \frac{\alpha \times NAR}{C_{Max} - C_{Nat}} \times \frac{1}{Y} \quad (۸)$$

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.

ردپای آب سفید

آبابایی و رمضانی‌اعتدالی جزء دیگری از مجموع ردپای آب را تشریح نمودند که تحت عنوان آب سفید نام‌گذاری شده است. این جزء، حجم تلفات آب آبیاری (مترمکعب بر هکتار) را مورد توجه قرار می‌دهد و به شرح زیر محاسبه می‌شود (Ababai and Etedali Ramazani, 2014):

$$WF_{white} = \frac{10 \times (GI - CWU_{blue})}{Y} \quad (۹)$$

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

شاخص تأمین نسبی آب آبیاری

شاخص تأمین نسبی آب آبیاری[1] مفهومی است که به‌منظور ارزیابی مدیریت آبیاری استفاده می‌گردد و نشان‌دهنده وضعیت تأمین آب در مقابل نیاز آبی گیاه می‌باشد. این شاخص توسط مؤسسه بین‌المللی فناوری و پژوهش در آبیاری و زهکشی[2] (IPTRID) معرفی گردید و در سال‌های اخیر به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در ارزیابی مدیریت آبیاری در نقاط مختلف دنیا و در مناطق فاریاب و اراضی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است (Rodríguez-Díaz et al., 2008). مقدار این شاخص از رابطه ۱۰ محاسبه گردید:

$$RIS = \frac{WA_g}{10 \times (ET_c - P_e)} \quad (۱۰)$$

1- Relative irrigation supply

2- International Programmer for Technology and Research in Irrigation and Drainage

که در آن WAg: حجم آب آبیاری است که برای تولید محصول در مزرعه مورد استفاده قرار گرفته است (متر مکعب در هکتار)، ETc تبخیر و تعرق (میلی‌متر در سال)، Pe باران موثر (میلی‌متر در سال)، عدد ۱۰ برای تبدیل عمق آب از میلی‌متر (ارتفاع) به حجم آب در سطح زمین (مترمکعب در هکتار) به‌کار رفته است. در صورت تأمین آب مورد نیاز گیاه مقدار این شاخص برابر ۱ می‌باشد. مقادیر بیشتر از یک این شاخص نشان‌دهنده بیش‌آبیاری و مقادیر کمتر از یک آن نشان می‌دهد کم‌آبیاری اتفاق افتاده است.

کارایی مصرف آب

کارایی مصرف آب یکی از شاخص‌های مطرح درخصوص سنجش بهره‌وری آب کشاورزی است. این شاخص درواقع نسبت مقدار محصول تولید شده به ازای مقدار آب مصرفی (تبخیر و تعرق گیاه است). مقدار این شاخص از رابطه ۱۱ به‌دست آمد (Lu et al., 2016):

$$WUE = \frac{Y}{V_w} \quad (11)$$

جدول ۱- مقادیر عملکرد، اجزای ردپای آب و کارآیی مصرف آب جو در مراکز استان‌ها

شهر	ردپای آب سبز	ردپای آب آبی	ردپای آب خاکستری	ردپای آب سفید	مجموع ردپای آب	حجم آب مصرف شده	عملکرد	کارایی مصرف آب
	متر مکعب بر تن					مترمکعب در هکتار	تن در هکتار	کیلوگرم بر مترمکعب
اراک	۲۴۶/۲۳	۲۲۵/۸۱	۲۴۵/۲۶	۹۰۲/۵۷	۱۶۱۹/۸۷	۶۵۰۰	۳/۴۳	۲/۳۴
ایلام	۳۱۸/۲۷	۳۱۰/۳۱	۲۶۱/۶	۱۵۵۶/۱۷	۲۴۴۶/۳۵	۷۸۶۷	۲/۶۲	۱/۹۴
خرم‌آباد	۳۳۶/۶۳	۲۷۶/۷۸	۲۵۹/۱۱	۱۵۰۵/۱۸	۲۳۷۷/۷	۷۱۵۳	۲/۷	۲/۴۵
شیراز	۲۲۷/۳۱	۳۴۱/۳۱	۲۵۲/۶۸	۱۲۴۸/۸۷	۲۰۷۰/۱۷	۶۸۲۵	۳/۷۶	۱/۹۶
کرمانشاه	۳۵۳/۳۸	۳۴۲/۷۹	۲۷۹/۶۱	۹۹۳/۱۷	۱۹۶۸/۹۵	۶۴۸۳	۳/۲	۲/۹۵
گرگان	۵۷۰/۸۶	۱۷۲/۰۹	۳۴۴/۶۸	۷۶۰/۴۳	۱۸۴۸/۰۶	۴۷۶۰	۲/۹۸	۱/۸
مشهد	۲۹۸/۱۹	۳۰۴/۸	۲۵۸/۹۸	۱۱۸۹/۱۹	۲۰۵۱/۱۶	۶۸۹۷	۳/۲۶	۱/۸
یاسوج	۳۰۲/۴۶	۳۳۷/۲۴	۲۶۷/۶۵	۱۰۱۳/۳۵	۱۹۲۰/۷	۵۲۳۵	۲/۸۷	۲/۱۱
اردبیل	۴۰۷/۸۲	۱۹۳/۷۶	۲۶۰/۳۸	۱۴۳۶/۷۵	۲۲۹۸/۷۱	۶۴۶۰	۲/۲۶	۱/۸۹
ارومیه	۳۴۷/۹۳	۲۳۳/۴	۲۶۷/۵۱	۱۴۷۴/۳۳	۲۳۲۳/۱۷	۶۱۰۰	۲/۷۶	۲/۲۴
تبریز	۳۹۷/۴۵	۲۲۲/۰۱	۲۵۸/۷۴	۱۳۵۸/۲۲	۲۲۳۶/۴۲	۵۸۶۰	۲/۴۳	۱/۶۲
بجنورد	۴۳۸/۷۷	۲۳۶/۷۶	۲۶۲/۱۲	۱۶۴۶/۹۸	۱۶۴۶/۶۳	۵۷۸۰	۳/۱۲	۱/۸۴
سنندج	۲۶۶/۵۶	۲۴۱/۷۱	۲۵۲/۶۷	۱۲۷۵/۲۶	۲۰۳۶/۲	۶۱۵۴	۳/۵۱	۲/۲۴
شهرکرد	۲۵۴/۷۲	۳۰۸/۹۴	۲۵۷/۶۹	۱۴۳۹/۵۴	۲۲۶۰/۸۹	۶۴۳۰	۳/۵	۱/۹۶
قزوین	۲۷۰/۷۶	۲۰۵/۳۱	۲۴۴/۹۳	۵۸۷/۵۲	۱۳۰۸/۵۲	۵۱۲۰	۳/۲۵	۲/۳۴
همدان	۲۱۷/۳۱	۱۷۷/۷۸	۲۳۹/۶۷	۱۰۲۴/۲۱	۱۶۵۸/۹۷	۵۷۸۱	۳/۸۵	۳/۰۴
اصفهان	۱۴۴/۷۲	۳۲۳/۷۴	۲۴۱/۶۲	۹۳۵/۶۷	۱۶۴۵/۷۵	۶۲۰۰	۳/۲۵	۲/۲
بیرجند	۲۷۲/۵۷	۴۶۱/۷۲	۲۶۷/۲	۱۶۷۵/۵۶	۲۶۷۷/۰۵	۷۲۴۰	۲/۹۵	۱/۵۸
تهران	۲۱۵/۸۱	۲۵۶/۷۶	۲۴۱/۵۷	۱۰۰۴/۹۴	۱۷۱۹/۰۸	۶۳۴۷	۳/۱۳	۲/۲۷
زاهدان	۲۵۳/۱۹	۷۸۷/۰۱	۳۹۰/۴	۱۹۵۶/۲	۳۳۸۶/۸	۸۷۶۰	۱/۷۶	۱/۰۱
زنجان	۳۳۵/۳۷	۱۹۸/۷	۲۵۱/۵۲	۱۳۶۲/۲۵	۲۱۴۷/۸۴	۶۹۵۴	۳/۶۴	۲/۳۶
سمنان	۲۵۸/۵۳	۳۷۱/۴۱	۲۵۴/۲۲	۱۲۷۲/۱۱	۲۱۵۶/۲۷	۷۵۲۳	۳/۷۵	۲/۰۴
کرج	۲۵۵/۵	۲۰۱/۸۶	۲۴۲/۰۹	۱۰۷۴/۹	۱۷۷۴/۳۵	۶۷۱۳	۳/۵۶	۱/۹۷
کرمان	۲۰۶/۲۵	۴۳۳/۴۴	۲۵۷/۶۹	۱۳۰۵/۱۳	۲۲۰۳/۵۱	۷۴۳۰	۳/۱۲	۱/۷۲
اهواز	۳۳۶/۰۱	۷۳۰/۵۵	۳۸۴/۷۳	۱۳۵۳/۹۷	۲۸۰۵/۲۶	۷۵۸۴	۲/۸۵	۱/۲۴
بندرعباس	۱۹۷/۸۷	۷۸۴/۱۹	۳۷۳/۸۲	۱۴۵۷/۶۶	۲۸۱۳/۵۴	۷۸۶۴	۳/۰۱	۱/۴۷
بوشهر	۴۷۰/۲۴	۶۷۵/۸۵	۳۹۰/۱۱	۱۰۵۴/۸۱	۲۵۹۱/۰۱	۷۲۳۰	۲/۲۷	۱/۱۵
ساری	۵۴۳/۳۶	۱۲۷/۱۲	۲۲۳/۶	۶۶۸/۵۵	۱۵۶۲/۶۳	۴۲۱۰	۳/۱۲	۲/۰۸
رشت	۵۹۲/۵۳	۸۶/۷۳	۲۷۵/۳۷	۵۱۵/۹۹	۱۴۷۰/۶۲	۳۸۵۰	۳/۸۱	۲/۸۷
یزد	۱۲۴/۲۱	۵۱۶/۹۸	۲۵۳/۳۷	۱۱۰۰/۲۱	۱۹۹۴/۷۷	۷۴۶۸	۲/۸۷	۱/۶۸
قم	۲۹۸/۴۱	۳۶۷/۰۶	۲۶۰/۰۲	۱۲۴۲/۵۲	۲۱۶۸/۰۱	۶۲۳۵	۲/۷۶	۲/۱۳

در این رابطه Y: مقدار محصول تولید شده (کیلوگرم در هکتار)، Vw: آب مصرف شده توسط گیاه (تبخیر و تعرق واقعی گیاه) متر مکعب در هکتار.

در پایان محاسبات، توزیع مکانی اجزای ردپای آب و کارایی مصرف آب با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS مشخص شد. همچنین تغییرات زمانی اجزای ردپای آب طی دوره آماری ۱۳۹۶-۱۳۸۷ مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

جدول ۱ نتایج میانگین حاصل از عملکرد، آب مصرفی و محاسبه ردپای آب سبز، آبی، خاکستری، سفید کارایی مصرف آب مناطق مورد مطالعه را در دوره آماری ۱۳۹۷-۱۳۸۷ نشان می‌دهد.

تفاوت در شرایط آب و هوایی، میزان بارش و شرایط متفاوت خاک منجر به تنوع در مقدار ردپای آب سبز شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد بیشترین ردپای آب سبز مربوط به ایستگاه‌های رشت (۵۹۲/۵۳ مترمکعب بر تن)، گرگان (۵۷۰/۸۶ مترمکعب بر تن) و ساری (۵۴۳/۳۶ مترمکعب برتن) یعنی نوار شمالی کشور می‌باشد که علت آن بارندگی‌های زیاد در این مناطق است. کمترین ردپای آب سبز مربوط به ایستگاه یزد با ۱۲۴/۲۱ مترمکعب بر تن بود که نشان‌دهنده کمبود بارندگی در این منطقه می‌باشد. بیشترین مقدار آب آبی در ایستگاه زاهدان با ۷۸۷/۰۱ مترمکعب بر تن به‌دست آمد که نشان‌دهنده کاهش بارندگی و بالابودن نیاز آبی گیاه جو در این منطقه می‌باشد. همچنین نشان می‌دهد سهم زیادی از آب در این استان از طریق آبیاری مصرف می‌شود. برای کاهش سهم این جزء ردپای آب می‌توان به راهکارهایی مثل تنظیم دور آبیاری و استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری اشاره کرد. کمترین مقدار ردپای آب آبی مربوط به ایستگاه رشت با ۸۶/۷۳ متر مکعب بر تن بود که علت آن بالا بودن مقدار رطوبت و بارندگی و همچنین بالا بودن عملکرد محصول در این ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌ها می‌باشد. همچنین از جدول مشاهده می‌گردد در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه ردپای آب آبی از ردپای آب سبز بیشتر بود که نشان‌دهنده‌ی کمبود بارندگی در کشور و حاکم بودن اقلیم خشک و نیمه‌خشک در تمامی استان‌ها کشور از نظر کشاورزی می‌باشد. علیقلی‌نیا و همکاران در تحقیق خود راجع به ردپای گندم در اقلیم‌های مختلف ایران به نتایج مشابه دست یافتند (Aligholina et al,. 2019).

وجود اقلیم خشک و نیمه‌خشک در کشور باعث شده است، کشاورزان برای افزایش بهره‌وری محصول و کاهش اثرات اقلیمی بر عملکرد، از کودهای شیمیایی رایج استفاده نمایند. این امر باعث بالا رفتن ردپای آب خاکستری می‌شود (علیقلی‌نیا و همکاران ۱۳۹۸). بیشترین مقدار ردپای آب خاکستری مربوط به ایستگاه‌های زاهدان (۳۹۰/۴ متر مکعب بر تن) و بوشهر (۳۹۰/۱۱ متر مکعب بر تن) و کمترین مقدار آن در ایستگاه همدان (۲۳۹/۶۷ متر مکعب بر تن) بود. علت بالا بودن ردپای آب خاکستری در این مناطق، استفاده بیشتر از کود شیمیایی می‌باشد. در این مناطق به‌علت بالا بودن مقدار آب آبی، آبشویی در اراضی بالا می‌باشد و این امر باعث شسته شدن مواد غذایی خاک شده و نیاز به استفاده از کود بیشتر می‌شود. لذا آلودگی ناشی از مصرف کود شیمیایی در این مناطق بالاتر است. در مجموع با توجه به این‌که در برخی ایستگاه‌ها، ردپای آب خاکستری نسبت به ردپای آب سبز و آبی بیشتر است، می‌توان گفت برای تولید محصول جو مقداری آب از طریق مصرف کودهای شیمیایی آلوده می‌شود. برای کاهش این جزء نیز می‌توان کودهای زیستی و آلی را جایگزین کودهای شیمیایی نمود. همچنین با مصرف بهینه‌ی کودهای شیمیایی، امکان کاهش سهم آب خاکستری وجود دارد. از نظر ردپای آب سفید، بیشترین ردپای آب سفید در ایستگاه زاهدان (۱۹۵۶/۲ مترمکعب بر تن) مشاهده شد. بنابراین لازم است در کنترل تلفات آبیاری و مدیریت مؤثرتر آب آبیاری در این منطقه اهتمام بیشتری صورت گیرد. کمترین مقدار ردپای آب سفید مربوط به ایستگاه رشت (۵۱۵/۹۹ مترمکعب بر تن) بود. توزیع آب سبز در سه استان شمالی کشور نشان می‌دهد به‌دلیل بارش‌های فراوان در این مناطق، بخش زیادی از نیاز آبی گیاه توسط رطوبت موجود در پروفیل خاک تأمین می‌شود. بنابراین در این استان‌ها با افزایش راندمان آبیاری می‌توان ردپای آب سفید را کاهش داد.

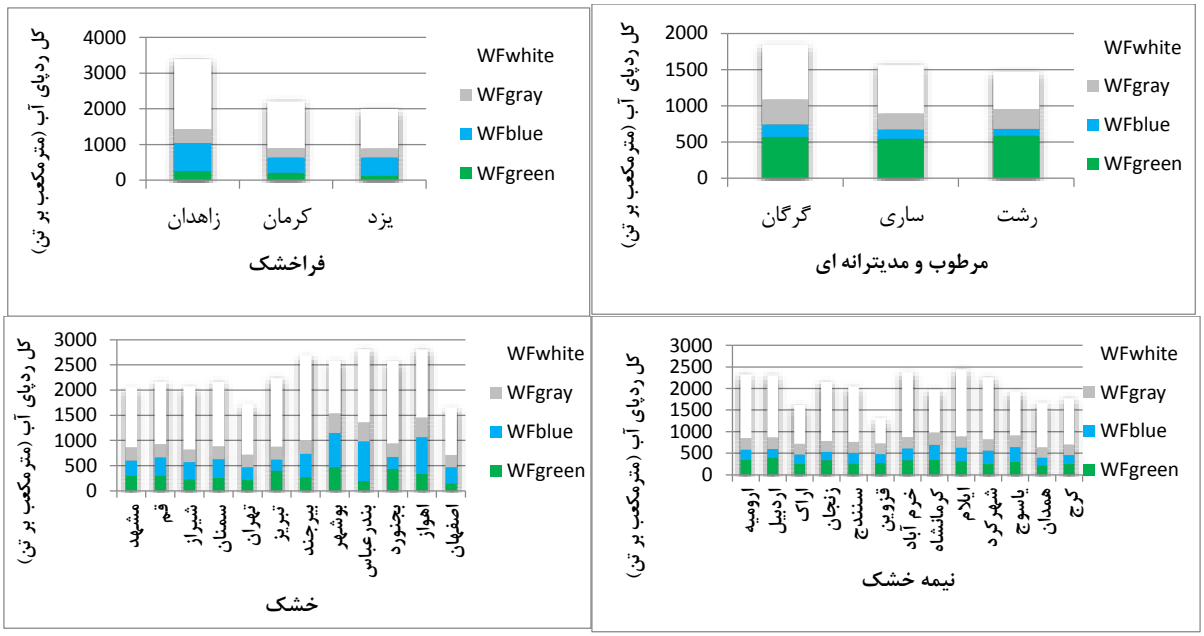
نکته قابل توجه در سطح کشور، سهم بالای ردپای آب سفید در تولید جو آبی است، هرچند که این حجم آب به چرخه آبی کشور باز می‌گردد و امکان استفاده از آن در سال‌های بعد وجود دارد، اما با اعمال مدیریت مؤثر و کاهش این سهم، می‌توان از آن در سایر فرآیندهای تولیدی استفاده کرد. رمضانی اعتدالی و آبابایی (۱۳۹۴) ردپای آب مجازی برای جو را در ۱۵ استان کشور مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان در دوره آماری ۱۳۹۰-۱۳۸۵ نشان داد ۴۴ درصد از مجموع ردپای آب در تولید جو در این ۱۵ استان سهم ردپای آب سفید و خاکستری می‌باشد.

ردپای کل آب شامل فرایند مصرف آب از زمان کاشت تا برداشت است و از مجموع ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید به‌دست می‌آید. مصرف آب سبز در تولید محصولات کشاورزی از آب باران است که بر روی محیط زیست اثرات سویی ندارد. در مقابل آب آبی از آب‌های سطحی یا زیرزمینی است که اثرات آن بر محیط زیست مشهود است (Ridutt and Pfister, 2010). بنابراین ردپای کل آب به مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب در تولید محصولات کشاورزی و اثرات زیست‌محیطی ناشی از آن دلالت دارد که کاربرد آن می‌تواند

ارزیابی جامع‌تری از بهره‌وری آب زراعی، تحلیل توزیع زمانی و مکانی کشت داد (Lue et al., 2016). مجموع کل ردپای آب در شهرهای زاهدان، اهواز و بندرعباس نسبت با سایر شهرهای مورد مطالعه بیشتر بود. که علت آن‌را می‌توان بالا بودن ردپای آب آبی و سفید در این مناطق بیان نمود. چگونگی مدیریت کشاورزی در زمان کاشت، داشت و برداشت، تفاوت در حاصل‌خیزی اراضی و مصرف کود، شرایط آب و هوایی و تفاوت در نیاز آبی از مهم‌ترین دلایل در تفاوت ردپای آب در نواحی مختلف است (Bazrafshan et al., 2020).

برای مقایسه ردپای آب در هر یک از اقلیم‌های مورد مطالعه و تعیین مناطق مناسب کشت جو در هر اقلیم، شکل ۲ ترسیم شد. با توجه به این‌که ردپای آب سفید حجم تلفات آب آبیاری را نشان می‌دهد که ناشی از مدیریت آبیاری در مزرعه می‌باشد، لذا برای تعیین مناطق مناسب برای کشت از جزء ردپای آب سبز، آبی و خاکستری استفاده شد. بر این اساس مناطقی که دارای ردپای آب سبز بالاتر و ردپای آب آبی کمتری می‌باشند، برای کشت مناسب‌تر می‌باشد. در اقلیم مدیترانه‌ای و مرطوب شمال کشور، سه ایستگاه رشت، ساری و گرگان به‌دلیل داشتن ردپای آب سبز بالا و ردپای آب آبی پایین مناسب برای کشت جو می‌باشد. در اقلیم فراخشک، ایستگاه کرمان نسبت به زاهدان ردپای آب سبز کمتری داشت اما به‌دلیل داشتن ردپای آب آبی و خاکستری کمتر، مناسب‌تر برای کشت جو معرفی می‌گردد. در اقلیم خشک، بوشهر دارای بیشترین ردپای آب سبز بود اما به‌دلیل بالابودن ردپای آب آبی و خاکستری مناسب کشت جو نمی‌باشد. در این اقلیم ایستگاه تبریز و بجنورد مناسب‌تر برای کشت می‌باشند. در اقلیم نیمه‌خشک، اردبیل، خرم‌آباد و کرمانشاه به‌دلیل بالاتر بودن ردپای آب سبز و کمتر بودن آب آبی مناسب‌تر برای کاشت جو می‌باشند. فرزی و همکاران (۱۳۹۸) به تعیین الگوی کشت بهینه استان کرمانشاه بر اساس ردپای آب پرداختند. نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد از بین غلات، گیاه جو کمترین ردپای آب را دارا بود و این منطقه مناسب برای کشت این محصول می‌باشد.

همچنین از شکل ۲ مشاهده می‌گردد بیشترین جزء ردپای آب در همه ایستگاه‌ها مربوط به جزء آب سفید می‌باشد. همان‌طور که قبلا گفته شد این جزء آب، حجم تلفات آبیاری در مزرعه را نشان می‌دهد. بالا بودن این جزء در تمامی اقلیم‌ها نشان می‌دهد، مدیریت خوب و مناسبی برای آبیاری مزارع جو در کل کشور انجام نمی‌گیرد. عدم مدیریت صحیح و نامناسب در نحوه آبیاری، تعداد دفعات آبیاری بیش از حد نیاز آبی گیاه، تاریخ و زمان نامناسب آبیاری باعث پایین آمدن عملکرد و بالارفتن ردپای آب سفید می‌شود. بنابراین ضروری است، کنترل تلفات آبیاری و پایین آوردن ردپای آب سفید از طریق افزایش راندمان، استفاده از سامانه‌های نوین آبیاری و تاریخ مناسب کاشت صورت گیرد.



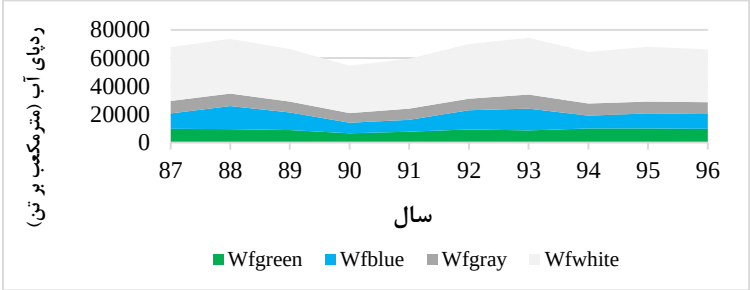
شکل ۲- مقایسه ردپای آب در اقلیم‌های مختلف

توزیع زمانی و مکانی ردپای آب

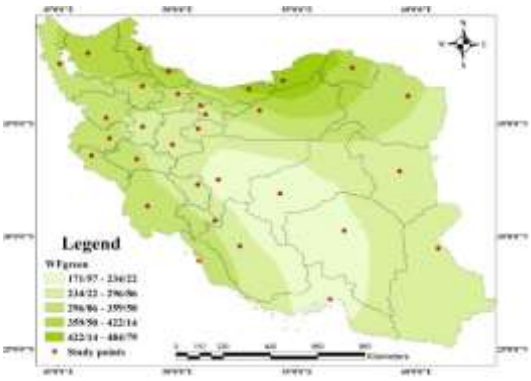
متوسط تغییرات زمانی ردپای آب (شکل ۳) نشان داد ردپای آب در سال‌های مختلف متفاوت بوده است. بیشترین مقدار آن در سال‌های ۱۳۸۸، ۱۳۹۲ و ۱۳۹۳ مشاهده شد. علت این افزایش می‌تواند به‌دلیل وجود خشکسالی‌های شدید در این سال‌ها باشد که باعث بالا رفتن ردپای آب آبی شده است. محققان از جمله آبابایی و رمضانی-

اعتدالی و بذرافشان و گرکانی‌نژادمشیزی در تحقیقات خود وقوع خشکسالی در این سال‌ها را گزارش نموده‌اند (Ababai and Ramazani Etedali, 2019 & Bazrafshan and Gerkani Nezhad Moshizi, 2018).

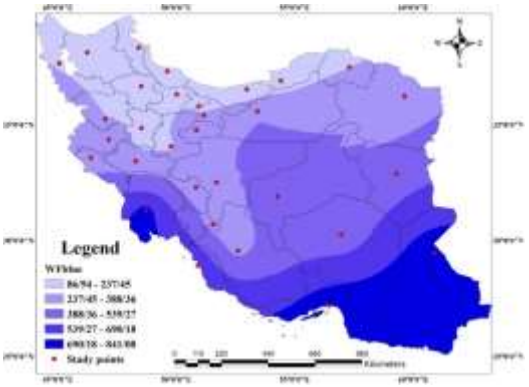
به‌منظور بررسی تغییرات مکانی ردّپای آب، نقشه‌های پهنه‌بندی شده در هر چهار جزء ردپای آب ترسیم شد و روند تغییرات ردپای آب برای جو مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل‌های۴ تا ۸ تغییرات مکانی ردّپای آب سبز، آبی، خاکستری، سفید و مجموع کل ردپای آب را نشان می‌دهند.



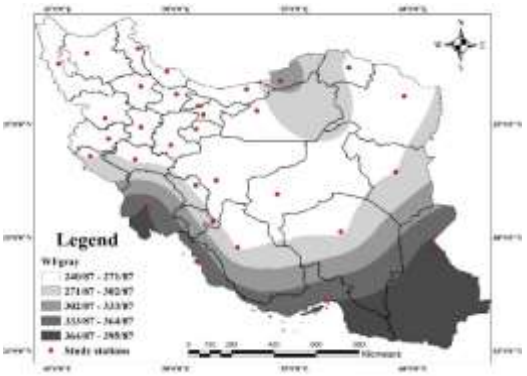
شکل ۳- توزیع زمانی اجزای ردپای آب در دوره مورد مطالعه (۱۳۹۶-۱۳۸۷)



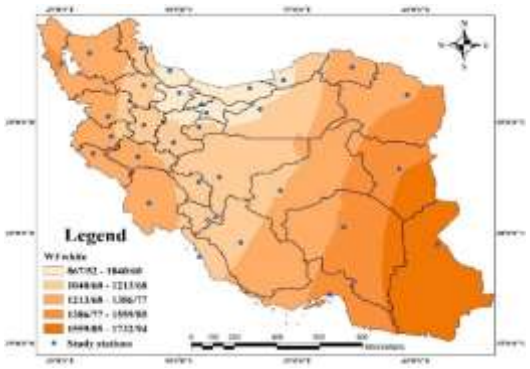
شکل ٤- تغییرات مکانی ردپای آب سبز



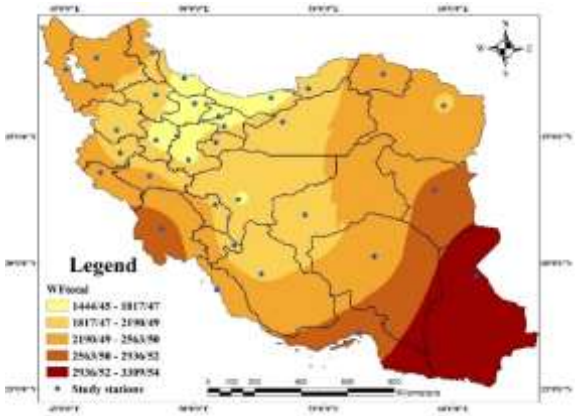
شکل ٥- تغییرات مکانی ردپای آب آبی



شکل ٦- تغییرات مکانی ردپای آب خاکستری



شکل ۷- تغییرات مکانی ردپای آب سفید



شکل ۸- تغییرات مکانی کل ردپای آب

همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییرات ردّپای آب آبی و آب سبز کاملاً برعکس است. به‌طوری‌که در جاهایی که ردّپای آب آبی بیشتر است، ردّپای آب سبز کمتر می‌باشد و برعکس مناطقی که دارای ردپای آب آبی کمتری هستند، ردپای آب سبز بیشتری دارند. علت این امر تبعیت الگوهای ردّپای آب آبی و آب سبز از نزولات جوی می‌باشد. مطابق شکل‌های فوق، بیشترین مقادیر ردّپای آب آبی در قسمت‌های مرکزی و جنوبی ایران دیده می‌شود. قسمت‌های فوق مناطق بیابانی و اقلیم‌های گرم و خشک ایران را تشکیل می‌دهند که از نظر بارندگی حجم بارش کمتری را نسبت به سایر نقاط کشور دارند. این در حالی است که در بررسی ردّپای آب سبز، وضعیت کاملاً برعکس بوده و بیشترین مقدار ردّپای آب سبز در قسمت‌های شمالی و غربی کشور دیده می‌شود که علت آن بارش‌های فراوان در این مناطق می‌باشد.

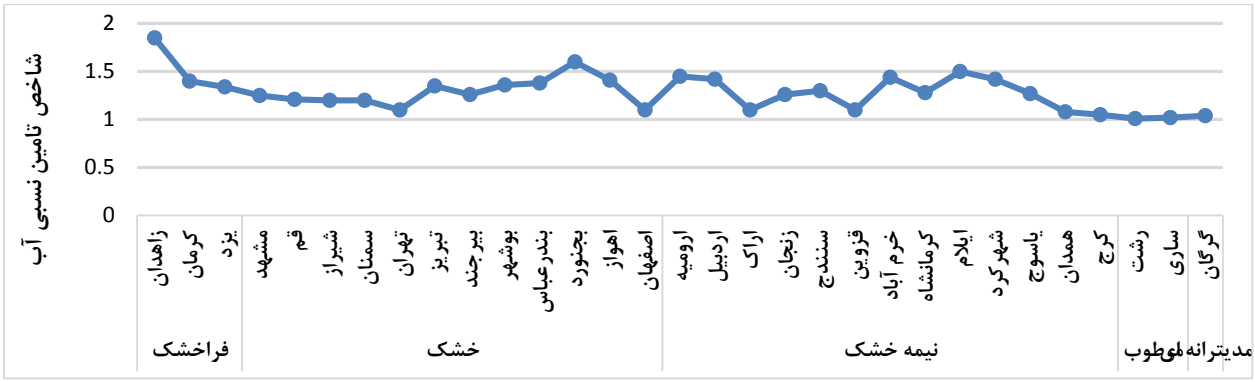
پهنه‌بندی ردپای آب خاکستری (شکل ۶) نشان داد، ردپای آب خاکستری در مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی و غربی بیشتر از سایر نقاط دیگر کشور بود. مشابه ردّپای آب سبز، ردّپای آب خاکستری نیز در مناطق مرکزی ایران کمتر بود که به‌دلیل کمبود بارندگی، کشت کمتر و در نتیجه، مصرف کمتر از سموم و کود می‌باشد.

پهنه‌بندی ردپای آب سفید (شکل ۷) نشان داد بیشترین مقدار آب سفید در مناطق شرق و جنوب‌شرقی کشور مشاهده شد. که نشان‌دهنده مصرف بیش از اندازه آب در این مناطق و مدیریت ضعیف آبیاری می‌باشد. کمترین مقدار رد پای آب سفید نیز در نوار شمالی کشور مشاهده شد. در این مناطق به‌دلیل بالا بودن ریزش‌های جوی، کشاورزان کمتر آبیاری انجام می‌دهند که باعث پایین آمدن ردپای آب سفید در این مناطق می‌شود.

همان‌طور که گفته شد کل ردپای آب شامل ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید می‌باشد. شکل ۸ پهنه‌بندی کل ردپای آب را نشان می‌دهد. مقدار کل ردپای آب در جنوب‌شرقی ایران (اقلیم فرا خشک) بیشتر از سایر نقاط می‌باشد. هرچه از جنوب‌شرق به سمت مرکز و غرب کشور برویم، مقدار ردپای کل آب کاهش می‌یابد. در نقاط مرکزی کشور به‌دلیل عدم کشت ردپای آب از همه‌جا کمتر می‌باشد. مطابق شکل ۸ از بین تمامی اقلیم‌ها، نوار شمالی کشور (اقلیم مدیترانه‌ای و مرطوب) کمترین ردپای کل آب را داشت.

ارزیابی شاخص تأمین نسبی آب آبیاری

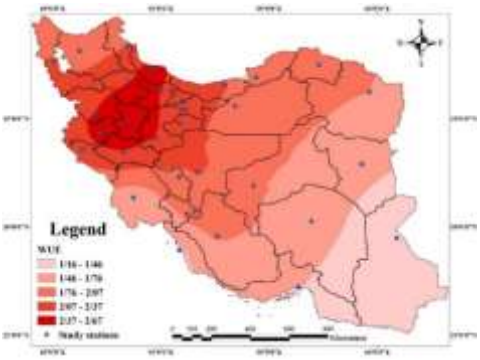
شاخص ردپای آب، روش مناسبی برای ارزیابی ارتباط بین آب مورد استفاده و عملکرد محصول می‌باشد. اما این شاخص نمی‌تواند اطلاعاتی در مورد مدیریت آبیاری، کمبود آبیاری، بیش آبیاری و یا آب مورد نیاز محصول در حین فرآیند رشد را در اختیار بگذارد (علیقلی‌نیا و همکاران، ۱۳۹۵). بنابراین به‌منظور ارزیابی هرچه بهتر وضعیت آبیاری و آب مصرفی در بخش کشاورزی، از شاخص تأمین نسبی آب آبیاری استفاده شد. مقادیر این شاخص برای استان‌های مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه، مقادیر شاخص نسبی آبیاری بیشتر از یک بود که نشان می‌دهد، آبیاری بیش از اندازه در این مزارع انجام شده است. در اقلیم‌های مختلف شاخص تأمین نسبی آب متفاوت بود. بیشترین مقدار آن در ایستگاه زاهدان مشاهده شد. پیش‌تر توضیح داده شد که در این ایستگاه ردپای آب سفید از دیگر ایستگاه‌ها بیشتر بود که این امر باعث بالارفتن شاخص تأمین نسبی آب آبیاری شد. در ایستگاه‌های رشت، ساری و گرگان مقدار این شاخص تقریبا یک بود که نشان می‌دهد که آبیاری در این مناطق به‌اندازه نیاز آبی گیاه انجام شده است. علت آن هم ریزش باران‌های زیاد در این مناطق می‌باشد که باعث شده است کشاورزان از دادن آب اضافی به مزارع خودداری کنند. موریلو و همکاران زمان کشت محصول، راندمان آبیاری و سیستم تکنولوژی آبیاری را به‌عنوان عوامل اصلی در تفاوت شاخص نسبی آبیاری بیان نمودند (Morillo et al,. 2015). بالا بردن راندمان استفاده از آب در سیستم‌های آبیاری باعث کم شدن مقدار شاخص تأمین نسبی آب آبیاری، افزایش عملکرد محصول و کاهش ردپای آب می‌گردد.



شکل ۹- شاخص تأمین نسبی آب برای مناطق مورد مطالعه

ارزیابی کارایی مصرف آب

مطابق جدول ۱ کارایی مصرف آب از ۱/۰۱ کیلوگرم بر مترمکعب در ایستگاه زاهدان تا ۳/۰۴ کیلوگرم بر مترمکعب در همدان متغیر بود. پایین بودن کارایی مصرف آب در زاهدان به‌دلیل بالا بودن ردپای آب در این منطقه می‌باشد که آن هم ناشی از بالا بودن ردپای آب سفید و آبی می‌باشد. بنابراین در این منطقه باید مدیریت بیشتری از نظر توزیع و تحویل آب در مزارع انجام گیرد. مسائل اقلیمی و شرایط خاک حاکم بر مناطق غربی کشور به‌خصوص همدان بر پایین بودن ردپای آب در این منطقه موثر است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۶). دلایل متفاوت بودن کارایی مصرف آب جو در اقلیم‌ها و مناطق مختلف، قطعا به عوامل و پارامترهای زیادی از جمله شرایط اقلیمی، کیفیت آب و خاک، نوع منبع آب و سیستم آبیاری، مسائل مدیریتی به‌زراعی و به‌نژادی، ارقام گیاهی، نوع عملیات و نهاده‌ها کشاورزی دارد (Morell et al., 2011). همچنین کارایی مصرف آب به عواملی همچون عملکرد در واحد سطح، راندمان آبیاری، میزان تبخیر و تعرق، استفاده از روش‌های کاهش تبخیر مانند مالچ‌پاشی و استفاده از گیاهان مقاوم به تبخیر، تغییر زمان کاشت و ژنوتیپ گیاهی دارد (LU et al., 2016). لذا توجه به این مسئله می‌تواند باعث افزایش کارایی مصرف آب به‌خصوص در مناطق فراخشک و خشک شود. شکل ۱۰ توزیع مکانی کارایی مصرف آب را نشان می‌دهد. بالاترین کارایی مصرف آب در ایستگاه‌های همدان، زنجان، رشت و کرمانشاه مشاهده شد. هرچه از سمت غرب به مرکز و شرق کشور برویم، مقدار کارایی مصرف آب کاهش می‌یابد. یکی از دلایل کاهش کارایی مصرف آب در مناطقی مرکزی و شرقی کشور، بالابودن تبخیر و تعرق در این مناطق و بالا بودن ردپای آب سفید می‌باشد. همچنین عملکرد جو در این مناطق نسبت به سایر نقاط کشور پایین‌تر بود. این مناطق کویری و خشک و بعضا زمین‌ها شور می باشند که باعث پایین آمدن عملکرد گیاه می شود.



شکل ۱۰- پهنه‌بندی کارایی مصرف آب

نتیجه‌گیری

مفهوم ردپای آب در تولید محصولات کشاورزی به مدیریت و مکان‌یابی مناسب مصرف آب کشاورزی کمک فراوانی می‌کند. همچنین آگاهی از مقدار دقیق کل آب مصرفی و کارایی آب مصرفی در جهت مدیریت منابع آب با توجه به بحران‌های آبی اخیر می‌تواند در جهت دستیابی به معیشت پایدار برای کشاورز و سیاستگذاران مفید باشد. در این راستا بررسی ردّپای آب محصول جو در مراکز استان‌های مختلف ایران نشان داد که مقدار آب مصرفی واقعی این محصول در چهار جزء آب سبز، آب آبی، آب خاکستری و سفید در مناطق و اقلیم-های مختلف ایران یکسان نبوده و بسته به نوع اقلیم، وضعیت آب و هوایی و نحوه کشت و زرع این محصول متفاوت است. بنابراین لزوم مدیریت کشت این محصول در اقلیم‌های مختلف ایران امری لازم و ضروری بوده که همواره باید مدنظر مسئولین و مدیران امر قرار گیرد. چراکه مطابق با نتایج این تحقیق کشت محصول جو در همه نقاط و در همه اقلیم‌ها مناسب نبوده است و کاشت آن برای همه مناطق توصیه نمی‌شود. از نظر شاخص ردپای آب بیشترین مقدار کل ردپای آب در ایستگاه زاهدان و کمترین آن در ایستگاه رشت مشاهده شد. سهم ردپای آب خاکستری و سفید در کل ردپای آب بیشتر از ردپای

آب سبز و آبی بود. اگرچه این میزان آب به چرخه آبی کشور برمی‌گردد اما کاهش کیفیت آن و گاه از دسترس خارج شدن آن موضوعی است که بایستی مورد توجه مسئولین قرار گیرد. از نظر ردپای آب سبز مراکز استان‌های شمالی کشور (رشت، ساری و گرگان) بیشترین ردپای آب سبز را داشتند. از نظر ردپای آب آبی رشت کمترین و زاهدان بیشترین ردپای آب آبی را دارا بودند. ردپای آب خاکستری در استان‌های جنوبی و جنوب‌شرقی از سایر مناطق بیشتر بود. شاخص تأمین نسبی آب آبیاری در تمام ایستگاه‌ها بیشتر از یک بود که نشان می‌دهد در کل کشور آب بیش از اندازه به گیاه جو داده می‌شود. کارایی مصرف آب در غرب و مناطقی از شمال کشور (رشت) بیشتر از سایر مناطق بود. کمترین کارایی مصرف آب در مرکز و جنوب‌شرق کشور دیده شد. جو از دیرباز جایگاه ویژه‌ای در سبد تغذیه دام به‌صورت دانه و علوفه سبز داشته است. مردم مراکز جنوب‌شرق و خصوصا زاهدان دامپرور هستند و برای مصرف دام‌های خود جو کشت می‌کنند. با توجه به بالابودن ردپای آب جو در این مناطق لازم است جهاد کشاورزی با آگاه‌سازی کشاورزان سطح زیرکشت این محصول را کاهش دهند و کشاورزان را به کشت محصولات جایگزین با عملکرد بالاتر و مصرف آب کمتر مانند سورگوم و ذرت علوفه‌ای تشویق نمایند. همچنین با توجه به نتایج به‌دست آمده لازم است مسئولین در جهت حفظ خودکفایی این محصول در کشور، الگوی کشت بهینه این محصول را متناسب با اقلیم مناطق و با در نظر گرفتن آب واقعی مصرفی و مقادیر ردّپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید برنامه‌ریزی نمایند.

سپاسگزاری

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

منابع

بذرافشان، ز.، رمضانی‌اعتدالی، ه. و بذرافشان، ا. ۱۳۹۹. توزع زمانی و مکانی اجزای ردپای آب و تجارت آب مجازی محصول گردو در ایران. اکوهیدرولوژی. ۷(۳):۵۹۳-۵۸۳.

رمضانی‌اعتدالی، ه. و آبابایی، ب. ۱۳۹۵. برآورد اجزاء ردپای آب مجازی در تولید جو در مقیاس ملی و استانی. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۰(۳):۴۴۳-۴۳۲.

علیقلی‌نیا، ت.، شیبانی، ح.، محمدی، ا.، وحسام، م. ۱۳۹۸. مقایسه و ارزیابی ردّپای آب آبی، سبز و خاکستری گندم در اقلیم‌های مختلف ایران. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵(۳): ۲۴۵-۲۳۴.

فرزی، س.، گلابی، م. و رادمنش ف. ۱۳۹۸. تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر شاخص ردپای آب (مطالعه موردی: استان کرمانشاه). آبیاری و زهکشی ایران، ۳(۱۳): ۶۰۲-۵۸۸.

محمدی، ع.، یوسفی، ح.، نوراللهی، ی. و ساداتی‌نژاد، س.ج. ۱۳۹۶. انتخاب بهترین استان در تولید سیب‌زمینی از طریق شاخص ارزیابی ردپای آب. اکوهیدرولوژی، ۴(۲):۵۳۲-۵۲۳.

نورمحمدی، ق.، سیادت، آ. و کاشانی، ع. ۱۳۸۴. کاشت گیاهان. انتشارات دانشگاه شهید چمران اهواز، ۴۴۶ صفحه.

Ababaei, B. and Ramezani Etedali, H. 2019. Investigating climate change over 1957–2016 in an arid environment with three drought indexes. Theoretical and Applied Climatology. 137: 2977–2992.

Ababai, B. and Ramazani Etedali, H. 2014. Estimation of Water Footprint Components in Wheat Production in Iran. Water and Soil. 2 (6): 1458-1468.

Aligholina, T., Rezaei, H., Bahmanesh, J. and Montasseri, J. 2017.Study of water footprint index for dominant crops in Lake Urmia catchment and its relationship with irrigation management. Soil Science. 27 (4): 37-48.

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). Iranian Journal of Irrigation and Drainage. 8(4):735-746.

Bazrafshan, O. and Gerkani Nezhad Moshizi, Z. 2018. The impacts of climate variability on spatiotemporal water footprint of Tomato production in The Hormozgan. Journal of Water and Soil. 32(1):29-43.

Chapagain, A. K. and Hoekstra, A.Y. 2011. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. Ecological Economics. 70(4): 749-758.

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: 186- 203.

Farzi, S., Golabi, M., Radmanesh F. 2019. Determining the optimal cultivation pattern based on water footprint index (Case study: Kermanshah province). Irrigation and Drainage of Iran. 3 (13), 602-588. Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. 2008. Globalization of Water: Sharing the Planet’S Freshwater Resources, Blackwell, Oxford, UK.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M.M. 2011. The Water Footprint

Research in Agriculture. 30 (3), 443-432.

Rasooli Majd, N., Montaseri, M., Bahmanesh, J. and Rezaei, H. 2015. Identification and evaluation of the water footprint index, broken down by water, green water and gray water, by applying climate change. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University.

Razavi, SS. and Davari K 2013. The role of virtual water in managing water resources. Journal of Water and Sustainable Development. 1: 9-18.

Rodríguez-Díaz, J.A., Camacho-Poyato, E., Lopez-Luque, R. and Perez-Urrestarazu, L. 2008. Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts (an application in Spain). Agricultural Systems. 96: 250-259

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. Journal of Agricultural Science and Technology. 12(46):417-432.

Seyedan, S. and Ghadami Firouzabadi, A. 2018. Estimation of virtual water in major crop products (Case Study Hamedan province). Irrigation and Water Engineering. 9(1): 102-111.

Tuttolomondo, T. and Labell. S., 2008. Simulation of the effects of climate change on barely yield inrural Italy. F.A.O.website. www.FAO.Org.

Yousefi, H., Mohammadi, A., Nourollahi, Y. and Sadatinejad, J. 2016. Evaluation of water footprint index of Tehran province crops. Soil Conservation. 24 (6):85-67.

Zare Abyaneh, H., Bayat varkeshi, M., Sabzi Parvar, A.K., Maroufi, S. and Ghasemi, A. 2010. Estimation of estimation methods of evapotranspiration of the reference plant and its zoning in Iran. Natural Geographic Research. 74:110-95.

Assessment Manual: Setting the Global Standard. Earthscan, London, UK, 203p.

Hoekstra, A.Y and Chapagain A.K. 2006. Water footprint of nations: water use by people as a function of their consumption pattern. Water Resource Management. 21(1): 35-48.

HuiSu, M., HuiHuang, C. YangLi, W., ToTso, C. and ShengLur, H. 2015. Water footprint analysis of bioethanol energy crops in Taiwan.Journal of Cleaner Production. 88: 132-138.

Karandish, F. and Hoekstra, A.Y. 2017. Informing national food and water security policy through water footprint assessment: the case of Iran. Water. 9(11): 1-25.

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. Journal of Cleaner Production. 116:71–79.

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.

Mohammadi, A., Yousefi, H., Noorollahi, Y. and Sadatinejad, S.J. 2017. Selecting the best province in potato production through water footprint evaluation index. Echo Hydrology. 4 (2): 532-523.

Morell, F.J., Lampurlan_es, J., Alvaro-Fuentes, J. and Cantero-Martínez, C. 2011. Yield and water use efficiency of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: long-term effects of tillage and N fertilization. Soil and Tillage Research. 117: 76-84.

Morillo, JG., Díaz, JAR, Camacho, E. and Montesinos, P. 2015. Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. Cleaner Production, 87: 594–602.

Ramezani Etadali, H. and Ababai, B. 2016. Estimation of virtual water footprint components in barley production on national and provincial scale. Water

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 1, Vol. 15, Apr.-May. 2021, p. 164-176

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۱، جلد ۱۵، فروردین - اردیبهشت ۱۴۰۰، ص. ۱۷۶-۱۶۴

Temporal and Spatial Distribution of Water Footprint and Water Use Efficiency of Barely in Different Regions of Iran

H. Piri*[1], M. Mobaraki[2]

Recived: Nov.01, 2020 Accepted: Dec.06, 2020

Abstract

The present study was conducted to provide sustainable solutions in water resources management using the concept of water footprint and water use efficiency of barley at the national level. At the beginning of the study, the provinces of the country were classified according to the Dumartin climate. Then, green, blue, gray and white water footprints in barley production and water use efficiency in different climates and provincial centers were calculated during the statistical period of 2008-2017. Also, spatial and temporal zoning of water footprint and water use efficiency were performed. The results showed that the highest water footprint of green water in the humid and Mediterranean climate of the north of the country were Rasht stations (592.553 m^3/ton), Gorgan (570.86 m^3/ton) and Sari (543.53 m^3/ton) and the lowest In ultra-dry climate, Yazd station was obtained with 124.21 m^3/ton. Zahedan station with ultra-dry climate had the highest water footprint of blue (787.01 m^3/ton) and Rasht with humid climate had the lowest (86.73 m^3/ton). The highest amount of gray water footprint was related to Zahedan stations (390.4 m^3/ton) and Bushehr (390.11 m^3/ton) and the lowest amount was in Hamedan station (239.67 m^3/ton). In terms of white water footprint, the highest was in Zahedan station (1956.2 m^3/ton) and the lowest was in Rasht station (515.599 m^3/ton). Spatial distribution of total water footprint showed that the highest total water footprint was in the southeast of the country and the arid climate and the lowest was observed in the northern and western parts of the country. The results of water use efficiency zoning showed that the highest water use efficiency was observed in the western regions of the country and the lowest was observed in the northern and western parts of the country. Therefore, according to the obtained results, it can be said that the northern and western regions of the country are more suitable for planting barley. Also, due to the lack of water in areas with dry climate and high water footprint in these areas, barley cultivation in these areas should be avoided. In these areas, cultivation of crops with less water requirements and higher yields should be planned. Barley cultivation in these areas is due to the high tolerance of barley to salinity and low soil fertility. Therefore, it is necessary for the authorities in these areas to plan the cultivation of crops with lower water requirements and higher yields and tolerance to salinity to replace barley.

Keywords: Climate, Green water, Relative water supply index, White water

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran
2 - M.Sc. Graduate, Department of Water Engineering, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Iran
(*- Corresponding Author Email: H_piri2880@uoz.ac.ir)