استفاده کارآمد و پایدار از منابع آبی خوزستان با تدوین بنچ‌مارک‌های ردپای آب

سمیرا سالاری[۱]، فاطمه کاراندیش[۲*]، پرویز حقیقت‌جو[۳] و مایت آلدایا[۴]

۱) دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۲) دانشیار، گروه آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۳) دانشیار، گروه آب، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۴) استاد، گروه آب، دانشگاه فنی مادرید، مادرید، اسپانیا.
* ایمیل نویسنده مسئول: f.Karandish@uoz.ac.ir & karandish_h@yahoo.com

شاپا چاپی: ۷۴۸۰-۲۲۵۱
شاپا الکترونیکی: ۷۴۰۰-۲۲۵۰

نشریه حفاظت منابع آب و خاک

آدرس تارنما:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

پست الکترونیک:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

سال دوازدهم
شماره یک (۴۵)
پائیز ۱۴۰۱

تاریخ دریافت:
۱۴۰/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش:
۱۴۰۱/۰۴/۲۱

صفحات: ۴۹-۳۵

چکیده:

زمینه و هدف: بحران آب انسان نهاد، یکی از چالش‌های جهانی است که پایداری جهان در آینده را تهدید می‌کند. برداشت بی‌رویه از منابع آب آبی برای تأمین نیاز غذایی در حال رشد بشر، مهم‌ترین دلیل این بحران است. بنچ‌مارکینگ ردپای آب که هنوز در ابتدای مسیر خود قرار دارد، روش مناسبی برای تعیین مؤلفه ناکارآمد ردپای آب می‌باشد. لذا، در این پژوهش، امکان محدود نمودن ردپای آب در بخش کشاورزی به سطح پایدارش در استان خوزستان بررسی شد.

روش پژوهش: این تحقیق، شامل سه مرحله محاسبه ردپای آب، تحلیل پایداری و تحلیل کارآمدی می‌باشد. ابتدا، ردپای آب مصرفی و تخریب‌کننده برای ۳۲ گیاه در شهرستان‌های استان خوزستان در طول دوره ۲۰۱۶-۱۹۸۶ محاسبه شد. ردپای آب سبز و آبی، به ترتیب، از تقسیم تبخیر-تعرق سبز و آبی بر عملکرد گیاه به دست آمد. برای تخمین مقادیر روزانه تبخیر-تعرق، از مدل AquaCrop استفاده و سپس، از حاصل جمع مقادیر روزانه، مقادیر فصلی محاسبه شد. ردپای آب خاکستری برای کود نیتروژن مصرفی محاسبه شد. در گام بعدی، وضعیت پایداری ردپای آب آبی، با مقایسه مقادیر مطلق ردپای آب آبی با آب آبی موجود، که از کسر نیاز زیست‌محیطی از رواناب طبیعی به دست آمد، تعیین شد. سپس، مقادیر بنچ‌مارک ردپای آب برای سطوح تولید ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد تعیین شد و بر اساس آن‌ها، مقادیر ناکارآمد ردپای آب برای هر گیاه به دست آمد. در انتها، مقادیر ردپای آب ناکارآمد و ناپایدار با هم مقایسه شدند تا معلوم شود که آیا دستیابی به سطوح بنچ‌مارک می‌تواند آب مصرفی را به سقف پایدارش در محدوده پژوهش محدود نماید. یک تحلیل همبستگی برای تعیین ریشه‌های اصلی ناکارآمدی در استان خوزستان نیز انجام شد.

یافته‌ها: همگام با ۶۳ درصد افزایش در تولید و ۵۳ درصد افزایش ردپای آب آبی واحد، مقدار مطلق ردپای آب آبی در طول دوره پژوهش ۸۰ درصد افزایش یافت. این روند، منتج به افزایش شدت برداشت آب‌های زیرزمینی با شدت ۱۲ میلیون مترمکعب در سال شد.. سهم آب سبز در ردپای آب مصرفی، از ۶۰ درصد در سال ۱۹۸۶ به ۴۸ درصد در سال ۲۰۱۶ کاهش یافت. لکن، مجموع ردپای آب خاکستری، روندی کاهشی را با شیب متوسط ۱۴۰ مترمکعب در هکتار در سال طی نمود که این کاهش، بیش‌تر به دلیل کاهش ردپای آب خاکستری گیاهان اقتصادی بود.در سال ۲۰۱۶، ۰/۹۸ میلیارد مترمکعب از مجموع آب آبی مصرفی ناپایدار بود که این مقدار، ۸۵ درصد بیش‌تر از سال ۱۹۸۶ بود. تعداد شهرستان‌ها با مصارف ناپایدار نیز از ۲ شهرستان در سال ۱۹۸۶ به ۹ شهرستان در سال ۲۰۱۶ رسید. گیاهان غذایی بیش-ترین سهم را در ردپای آب آبی ناپایدار داشتند. بر اساس تحلیل کارآمدی، و با لحاظ سطوح بنچ‌مارک در سطح ۲۵ درصد از کل تولید، ردپای آب آبی ناکارآمد در سال ۲۰۱۶، بین ۰/۲۶ تا ۶۶۰ میلیون مترمکعب در شهرستان‌های مختلف متغیر بود. در مقایسه با سال ۱۹۸۶، میزان ناکارآمدی در ۱۶ شهرستان بین ۱۰ تا ۳۸۶۰ مترمکعب در هکتار افزایش یافت. اگرچه در مقیاس استانی، دستیابی به سطوح بنچ-مارک می‌تواند ردپای آب را به حدود پایدارش برساند؛ لکن در دو شهرستان اندیمشک و رامشیر، مقادیر ردپای آب ناپایدار، به ترتیب، ۶/۸ و ۳۴۰/۹ میلیون مترمکعب بیش‌تر از مقادیر ردپای آب آبی ناکارآمد بودند و سیستم تولید آنها نیازمند بازنگری اساسی است. آنالیز همبستگی نشان داد که افزایش در ارزش افزوده بخش کشاورزی و یا صادرات محصولاتش، کشت محصولات آب‌بر، افزایش شدت کمبود آبی و دسترسی به منابع آب زیرزمینی می‌تواند میزان ناکارآمدی را افزایش دهد. در مقابل، افزایش تعداد بهره‌برداران در واحد سطح، عملکرد محصول، و سطح زیر کشت گیاهان اقتصادی، می‌تواند از میزان ناکارآمدی بکاهد.

نتایج: ارزیابی ردپای آب نشان داد که تولید گیاه در استان خوزستان در ازای تعدی به حریم محیط‌زیست صورت می‌گیرد که خطری برای پایداری کشاورزی در آینده نزدیک است. اگرچه دستیابی به سطوح بنچ‌مارک ردپای آب می‌تواند با حذف مؤلفه ناکارآمد ردپای آب، شرایط محدود نمودن مجموع ردپای آب به سطوح پایدارش را فراهم کند، لکن خطر ناپایداری، هنوز در برخی مناطق وجود دارد که این مساله، اهمیت تحلیل در مقیاس‌های ریز را نشان می‌دهد. بنابراین، برای تدوین برنامه‌های توسعه پایدار، انجام پژوهش‌های بعدی برای تعیین ماه-های بحرانی نیز ضروری است.

کلمات کلیدی: ارزیابی ردپای آب، تدوین بنچ‌مارک ردپای آب، تحلیل کارایی و پایداری، کمبود آب آبی، ایران

10.30495/WSRCJ.2022.20329

مقدمه

تولید محصولات کشاورزی، ازجمله آب‌برترین فرآیندها محسوب می‌شود. بر اساس آمار ارائه شده توسط سازمان خواروبار جهانی، فائو، سالانه بین ۷۰ تا ۹۰ درصد از آب‌های برداشتی از منابع آب سطحی و زیرزمینی جهان، به بخش کشاورزی اختصاص داده می‌شود (Karandish et al., 2018). در کشورهای در حال توسعه، به‌ویژه کشورهایی که تولید ناخالص ملی آن‌ها، بیش‌تر مبتنی بر کشاورزی بوده و یا تلاش در جهت کاهش وابستگی به واردات غذا دارند، این سهم بیش‌تر از کشورهای صنعتی می‌باشد. ایران نیز از جمله کشورهایی است که پس از وقوع انقلاب اسلامی، با تدوین سیاست-های جدید در بخش کشاورزی با هدف افزایش خودکفایی در تولید، بخش زیادی از منابع آب خود را صرف تأمین غذای مورد نیاز مردم در کشور نموده است.

در طول دهه‌های گذشته، تقاضای آب به دلایل متعددی همچون افزایش جمعیت، بهبود استانداردهای زندگی، تغییر الگوی مصرف و همچنین توسعه اراضی تحت کشت آبی، در حد قابل توجه افزایش یافته است (Vörösmarty et al., 2003; Ercin and Hoekstra, 2014) به همین دلیل، برداشت‌های بی‌رویه از منابع آب آبی محدود و نادیده انگاشتن سهم محیط‌زیست، پایداری کشاورزی را به خطر انداخته است. در حال حاضر، بیش از ۴ میلیارد نفر از مردم جهان، دست‌کم در یک ماه از سال، با کم‌آبی شدید مواجه هستند (Mekonnen and Hoesktra, 2016). یافته‌های پژوهشی برای ایران نشان می‌دهد که بر اساس تحلیل‌های سالانه در مقیاس کشوری، ایران در شرایط کم‌آبی متوسط قرار گرفته و سالانه، ۴۶ درصد از مصارف آب در بخش کشاورزی، ناپایدار محسوب می‌شود. این در حالی است که تحلیل در مقیاس‌های زمانی و مکانی ریزتر، وجود تنش‌های آبی متوسط تا شدید در بخش وسیعی از کشور و به‌ویژه در حدفاصل ماه‌های اردیبهشت تا شهریور را نشان می‌دهد (Karandish, 2020).

ایران، علاوه بر کمبود فیزیکی آب آبی که به دلایلی همچون واقع شدن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، پایین بودن ظرفیت کارایی تکنیکی به دلیل تحریم‌های سیاسی و اقتصادی و تغییر اقلیم و خشکسالی‌ها به وجود آمده است، از تنش‌های مدیریتی آب در بخش کشاورزی نیز رنج می‌برد (Karandish, 2021). عدم انطباق روند توسعه با پتانسیل‌های واقعی مناطق، باعث پیشی گرفتن تقاضا از موجودیت آب شده و با مصارفی فراتر از حد مجاز، زمینه تعدی به نیازهای زیست‌محیطی و ناپایداری مصرف آب در بخش کشاورزی را فراهم آورده است (Madani et al., 2016). در چنین شرایطی، ارتقای کارآمدی ردپای آب آبی از طریق تدوین بنچ‌مارک‌های ردپای آب و تلاش برای رسیدن به آن‌ها با اصلاح فعالیت‌های تکنیکی و مدیریتی، می‌تواند ابزار مؤثری برای کاهش اختلاف بین مصرف واقعی و سطوح پایدار آن شود. از مجموع آب آبی که در بخش کشاورزی کشور مصرف می‌شود، حدود ۱۵/۵ میلیارد مترمکعب ناکارآمد بوده و فراتر از سطوح استاندارد بنچ‌مارک برای ردپای آب آبی است (Karandish, 2021). میزان صرفه‌جویی در مصرف آب زیرزمینی، در صورت کاهش ردپای آب محصولات کشاورزی به سطوح بنچ‌مارک، حدود ۲ میلیارد مترمکعب گزارش شده است (Karandish et al., 2018). همچنین، تلاش برای دستیابی به سطوح بنچ‌مارک با اصلاح فعالیت‌های مزرعه‌ای، همچون تبدیل سیستم‌های سنتی به تحت فشار در صورت امکان، مالچ‌پاشی، اعمال روش‌های آبیاری صرفه‌جو و رفع خلأ عملکرد، می‌تواند تا ۱۳ میلیارد مترمکعب از مجموع آب آبی مصرفی در بخش کشاورزی بکاهد (Karandish, 2021).

با این وجود، پژوهش‌های مربوط به بنچ‌مارکینگ هنوز در ابتدای راه خود قرار گرفته و تاکنون توجه چندانی بدان نشده است. اولین بار، (Hoekstra and Mekonnen 2014)، سطوح بنچ‌مارک برای محصولات عمده جهان را استخراج نمودند. لکن، در این پژوهش، به دلیل وسعت کار، به تأثیر عوامل اقلیمی و محیطی که می‌توانست مقادیر

ردپای آب را تحت تأثیر قرار دهد توجه نشد (Mekonnen and Hoekstra, 2014). به دنبال ایشان، پژوهشی با لحاظ اثر اقلیم و بافت خاک، برای چهار ناحیه اقلیمی خشک، نیمه‌خشک، مرطوب و فرا مرطوب انجام شده و در آن، سطوح استاندارد بنچ‌مارک ردپای آب در سطح مزرعه تدوین شد. بدین منظور، تأثیر روش‌های آبیاری تحت فشار، مالچ‌پاشی و کم‌آبیاری معمولی روی ردپای آب سه محصول ذرت، سیب‌زمینی و گوجه‌فرنگی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که کاهش ردپای آب محصولات به سطوح بنچ‌مارکی که با اصلاح فعالیت‌های مدیریتی به دست می‌آید، می‌تواند میزان آب مصرفی در فرآیند تولید این محصولات را تا ۲۹ درصد کاهش دهد (Chukalla et al., 2015). به‌منظور تعیین اثرگذارترین عوامل، حین تدوین سطوح بنچ‌مارک، پژوهشی برای کشور چین انجام شد و در آن، اثرات نوع کشت (دیم یا آبی)، میزان آورد آبی (سال خشک یا تر)، دمای هوا (سال سرد یا گرم)، بافت خاک و ناحیه اقلیمی بر سطوح بنچ‌مارک برای گندم بررسی شد. پژوهش ایشان نشان داد که ناحیه اقلیمی، بیش‌ترین تأثیر را در استخراج سطوح بنچ‌مارک داشته و نادیده گرفتن آن، ۳۱-۲۶ درصد اختلاف بین سطح بنچ‌مارک واقعی و تدوین شده، ایجاد خواهد نمود (Zhuo et al., 2016).

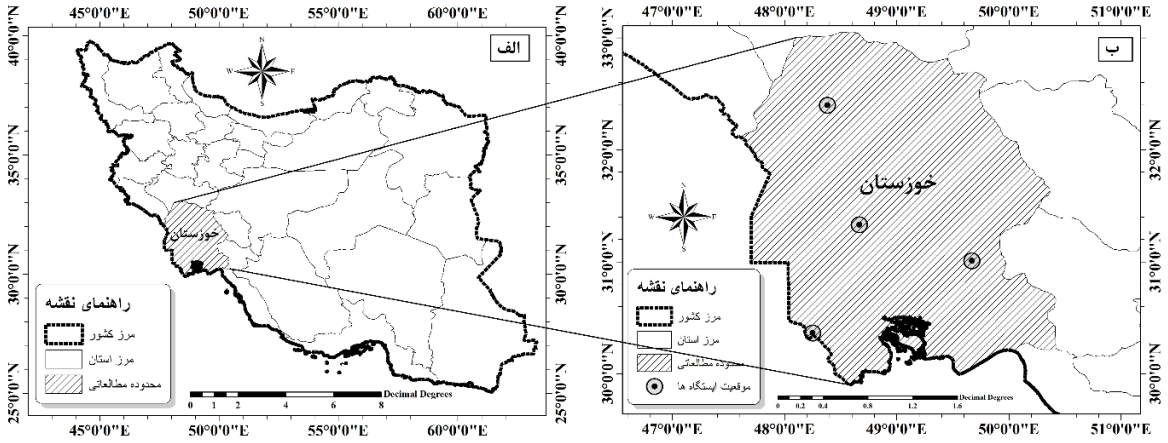
نگاه به پژوهش‌های پیشین در ایران و جهان نشان می‌دهد که در اغلب آنها، سطوح بنچ‌مارک تنها برای تعداد محدودی از گیاهان تدوین شد و غالباً، مقیاس‌های مکانی بزرگ در محاسبات ایشان در نظر گرفته شد. به همین دلیل، علاوه بر در نظر گرفتن طیف گسترده‌ای از محصولات غذایی و اقتصادی در این پژوهش، تمامی محاسبات و تحلیل‌ها در تدوین بنچ‌مارک‌ها در ریزترین مقیاس ممکن که داده‌های مورد نیاز موجود بود، صورت گرفت. از دیگر نوآوری‌های پژوهش آن است که با اتخاذ رویکرد تحلیل تغییر متقابل، عوامل مؤثر بر میزان ناکارآمدی ردپای آب شناخته شد و سپس، اثر میزان کاهش ردپای آب آبی ناکارآمد و ناپایدار در صورت اتخاذ سطوح بنچ‌مارک ردپای آب در محدوده پژوهش محاسبه شد. از آنجایی که استان خوزستان، به‌عنوان قطب کشاورزی ایران شناخته شده و سهم مهمی در تأمین نیاز غذایی کشور دارد، این استان در پژوهش حاضر به‌عنوان محدوده مطالعاتی انتخاب شد.

مواد و روش‌ها

۱. محدوده پژوهش

استان خوزستان، با وسعتی برابر با ۶۲۸۱۸ کیلومترمربع و اقلیم غالب خشک بر اساس طبقه‌بندی دومارتن (Karandish and Hoekstra, 2017) در جنوب شرقی ایران، در محدوده عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۳۳ درجه شمالی و طول جغرافیایی ٤٧ درجه و ٤٠ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۳ دقیقه طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). حدود ۲۰ درصد از مجموع شاغلان استان، به کشاورزی مشغول بوده (SCI, 2016) و سهمی برابر با ۷ درصد در مجموع ارزش افزوده به دست آمده در استان دارند. این استان، با تمرکز بر فعالیت‌های صنعتی، ۱۰ درصد از مجموع تولید ناخالص ملی را تأمین می‌کند (Takapu, 2016). بر اساس آمار سازمان جهاد کشاورزی، مجموع سطوح زیر کشت در سال ۱۳۹۸، برابر با ۱/۳ میلیون مترمکعب بود که از این میزان، حدود ۸۱ درصد به کشت آبی اختصاص داشت. مجموع تولید از این اراضی در سال مذکور، برابر با ۱۳/۷ میلیون تن بود که حدود ۹۷ درصد از آن از اراضی آبی به دست آمد (MAJ, 2019).

در این پژوهش، ۳۲ گیاه غالب در استان انتخاب شد و درنهایت، مطابق با طبقه‌بندی‌های ارائه شده توسط سازمان خوار و بار جهانی، فائو، به ده گروه غلات، سبزیجات و صیفی‌جات، گیاهان علوفه‌ای، گیاهان فیبری، میوه‌های گرمسیری و نیمه گرمسیری، آجیل و خشکبار، سایر میوه‌ها، دانه‌های روغنی موقت، دانه‌های روغنی دائمی و گیاهان قندی تقسیم‌بندی شد. جدول ۱، گیاهان ذیل هر گروه و میانگین ۳۱ ساله سهم این گروه‌های محصول در مجموع سطح زیر کشت و تولید در استان خوزستان در



شکل ۱. موقعیت محدوده پژوهش در ایران (چپ) و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب در محدوده پژوهش

حدفاصل سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶ را نشان می‌دهد. درنهایت، برای انجام تحلیل‌های نهایی، دو گروه عمده گیاهان غذایی و اقتصادی در نظر گرفته شد؛ محصولات غذایی، گروه از محصولات کشاورزی در نظر گرفته شد که با هدف تأمین نیاز غذایی داخلی (در استان خوزستان و دیگر استان‌های کشور) کشت می‌شوند و غالباً ارزش اقتصادی پایینی دارند. محصولات اقتصادی، گروه از محصولات هستند که بیشتر با هدف ارتقای ارزش افزوده بخش کشاورزی، به‌ویژه از طریق صادرات درون یا برون کشوری، تولید می‌شوند. بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده در سازمان خواروبار جهانی، فائو، گروه‌بندی محصولات مختلف و قرار دادن آن‌ها در طبقه‌های غذایی و اقتصادی در جدول ۱ ارائه شد.

۲. محاسبات ردپای آب

ردپای آب واحد در فرآیند تولید گیاه. تمام محاسبه‌ها در این بخش، به تفکیک هریک از گیاهان، در هر شهرستان و هر سال صورت گرفت. دوره پژوهش در این مطالعه، ۳۱ سال و در محدوده سال‌های ۱۳۶۵ تا ۱۳۹۶ (معادل سالهای ۲۰۱۶-۱۹۸۶ میلادی) بود. ردپای آب مصرفی در فرآیند تولید یک گیاه، از دو مؤلفه سبز و آبی تشکیل شده است. ردپای آب سبز و ردپای آب آبی

جدول ۱. گیاهان منتخب در گروه‌های مختلف محصول بر اساس طبقه‌بندی فائو و میانگین ۳۱ ساله سهم آن‌ها در مجموع سطوح آبی تحت کشت و تولیدات حاصل از آن در محدوده پژوهش

گروه محصول	گیاهان منتخب	تقسیم‌بندی غذایی/اقتصادی	سهم در کل سطح زیر کشت آبی	سهم در کل تولیدات آبی
غلات	گندم، برنج، جو، ذرت	غذایی	۷۳/۸٤	۱۵/۰٤
سبزیجات و صیفی‌جات	گوجه‌فرنگی، خیار، پیاز،	غذایی	٦/٥٤	۱٦/۳۳
گیاهان علوفه‌ای	ذرت علوفه‌ای و یونجه	اقتصادی	۳/۹۳	۱۳/٦۷
گیاهان فیبری	سیب‌زمینی	غذایی	۰/۳۰	۰/٤۰
میوه‌های گرمسیری و نیمه گرمسیری گرمسیری	خرما، انجیر، کنار	اقتصادی	۰/۱٦	۰/۰٦
آجیل و خشکبار	گردو	اقتصادی	۳/٤۸	۱/۱۵
سایر میوه ها	سیب، زردآلو، هلو، انگور،	اقتصادی	۰/۰۱	< ۰/۰۱
دانه های روغنی موقت	کلزا، کنجد	اقتصادی	۰/۵٦	۰/۰۳
دانه های روغنی دایمی	زیتون	اقتصادی	۰/۰۱	< ۰/۰۱
گیاهان قندی	نیشکر، چغندرقند	اقتصادی	۱۱/۱۷	۵۳/۳۱

(Allen et al., 1998)

واحد ($m^3\ t^{-1}$)، به ترتیب، از تقسیم مجموع آب سبز و آبی مصرفی در طول دوره رشد گیاه ($m^3\ ha^{-1}$) بر عملکرد گیاه ($t\ ha^{-1}$) به دست می‌آیند. برای محاسبه مقادیر آب سبز و آبی مصرفی در طول دوره رشد گیاه، از مدل AquaCrop استفاده شد. در این مدل، اجزای بیلان آب، به‌صورت روزانه شبیه‌سازی می‌شود. با در دست داشتن این مؤلفه‌ها و بر اساس رابطه ذیل، می‌توان مقادیر رطوبت سبز و آبی خاک را با استفاده از رابطه ذیل تعیین نموده و سپس، مقادیر روزانه تبخیر–تعرق سبز و آبی را بر اساس آنها محاسبه نمود محاسبه نمود.

$$S_{[t]}=S_{[t-1]}+P_{[t]}+I_{[t]}+CR_{[t]}-ET_{[t]}-RO_{[t]}-DP_{[t]} \quad (۱)$$

که در آن، $S[t]$ میزان رطوبت خاک در روز t ام، $S[t-1]$میزان رطوبت خاک در روز t-1 ام، $P[t]$ میزان بارش، $I[t]$ میزان بارندگی،$CR[t]$ میزان صعود موئینگی، $ET[t]$میزان تبخیر-تعرق، $RO[t]$ میزان رواناب و $DP[t]$ میزان نفوذ عمقی می‌باشد. پس از محاسبه مقادیر روزانه تبخیر–تعرق سبز و آبی، مقادیر فصلی آن‌ها از حاصل-جمع مقادیر روزانه محاسبه شده و سپس، ردپای آب سبز و آبی واحد با استفاده از روابط ذیل تعیین شد.

$$\begin{cases} green\ WF_{unit} = \frac{ET_{green}}{Y} \\ blue\ WF_{unit} = \frac{ET_{blue}}{Y} \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن، $green\ WF_{unit}$ردپای آب سبز ($m^3\ t^{-1}$)، WF_{blue}ردپای آب آبی($m^3\ t^{-1}$)، ET_{green} ردپای آب سبز mm، ET_{blue}ردپای آب آبی mm، و Y میزان عملکرد محصول ($Kg\ ha^{-1}$) می‌باشد.

لازم به ذکر است که در این پژوهش، مدل AquaCrop پس از انجام آنالیز حساسیت برای شناختن پارامترهای حساس و اثرگذار در خروجی‌های مدل، به تفکیک محصول و شهرستان و بر اساس داده‌های عملکرد محصول، واسنجی و صحت‌سنجی شد.

ردپای آب مطلق گروه‌های محصول. با در دست داشتن مقادیر ردپای آب واحد، برای هر محصول در هر شهرستان و هر سال، میزان ردپای آب مطلق با استفاده از رابطه ذیل تعیین شد:

$$\begin{cases} (green\ WF_{abs})_{i,j,k} = \sum_{i=1}^{n} (green\ WF_{unit})_{i,j,k} \times TP_{i,j,k} \\ (blue\ WF_{abs})_{i,j,k,y} = \sum_{i=1}^{n} (blue\ WF_{unit})_{i,j,k} \times TP_{i,j,k} \end{cases} \quad (۳)$$

که در آن، $green\ WF_{unit}$ و $blue\ WF_{unit}$به ترتیب، مقادیر مطلق ردپای آب سبز و آبی ($m^3\ y^{-1}$)، $TP_{i,j,k}$ مقدار محصول تولیدی ($t\ y^{-1}$)، i گیاه مورد نظر در گروه محصول منتخب، j گروه محصول، و k و y به ترتیب شهرستان و سال منتخب می‌باشد. مقادیر مطلق ردپای آب سبز و آبی برای کل محصولات نیز با روندی مشابه، از حاصل جمع مقادیر متناظر به دست آمده برای گروه‌های مختلف محصول محاسبه شد.

۳. تحلیل کارآمدی و پایداری ردپای آب

تعیین بنچ‌مارک و مؤلفه ناکارآمد ردپای آب: بنچ‌مارک ردپای آب، برای هر یک از گیاهان منتخب به دست آمد. بدین منظور، ابتدا مقادیر ردپای آب در فرآیند تولید محصول منتخب، به‌صورت صعودی مرتب شد. سپس، مقادیر بنچ‌مارک در سطوح ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد، به‌گونه‌ای تدوین شد که به ترتیب، ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد از تولیدات مربوط به آن گیاه در طول دوره پژوهش، با مقادیری برابر و یا کم‌تر از ردپای آب منتخب به دست آمده باشند. این مقادیر، به تفکیک، برای تمامی محصولات منتخب و به تفکیک شهرستان تعیین شد تا اثر تغییرات مکانی اقلیم نیز در محاسبات لحاظ شود. سپس، این بنچ‌مارک‌ها برای گروه‌های مختلف محصول، به‌صورت میانگین‌های وزنی بر حسب سهم تولید هر گیاه در آن گروه به دست آمد. در نهایت، بر اساس مقادیر بنچ‌مارک به دست آمده، مقادیر ردپای آب آبی کارآمد و ناکارآمد به دست آمد پتانسیل بنچ‌مارکینگ در کاهش مؤلفه ناکارآمد ردپای آب ارزیابی شد.

تحلیل پایداری ردپای آب. با توجه به این‌که هدف اصلی ما از انجام این پژوهش، ارائه راهکاری برای کاهش فشار بر منابع آب آبی موجود در استان خوزستان است،

لذا پس از انجام محاسبات ردپای آب واحد، شدت ناپایداری در مصرف آب در بخش کشاورزی محاسبه شد. برای تعیین مقادیر ردپای آب ناپایدار، ابتدا نسبت مجموع ردپای آب آبی در فرآیند تولید گیاهان به مقدار آب آبی موجود به دست آمد. اگر این مقدار، بیش‌تر از یک باشد، بدین معنی است که ردپای آب، دارای مؤلفه ناپایدار می‌باشد که این مؤلفه، با استفاده از رابطه ذیل به دست آمد (Hoekstra et al., 2011):

$$(US\ blue\ WF_{abs})_y = (blue\ WF_{abs})_y - BWA_y \quad (۴)$$

که در آن، $US_{blue}\ WF_{abs}$، مقدار ردپای آب آبی ناپایدار ($m^3\ y^{-1}$)، BWA میزان آب آبی موجود پس از کسر نیازهای زیست‌محیطی ($m^3\ y^{-1}$) و Y نماینده سال می‌باشد. سهم هر گروه محصول در میزان ردپای آب ناپایدار، به سهم آن در مجموع ردپای آب آبی مطلق در فرآیند تولید گیاهان در محدوده پژوهش بستگی دارد؛ هرچه این سهم بیش‌تر باشد، مجموع ردپای آب در فرآیند تولید آن گروه از محصولات نیز بیش‌تر خواهد بود. BWA از کسر رواناب طبیعی از نیازهای زیست‌محیطی به دست می‌آید. مقادیر رواناب طبیعی از شرکت مدیریت منابع آب ایران (IWRMC, 2021) و سازمان آب و برق خوزستان (KWPAC, 2021) به دست آمد. مقادیر نیازهای زیست‌محیطی نیز بر اساس روش ریتچر محاسبه شد (Ritcher et al., 2012). در این روش، با هدف بقای محیط‌زیست، ۸۰ درصد از مجموع آب‌های تجدید پذیر به طبیعت اختصاص داده شده و برای منافع بشری برداشت نمی‌شود.

نتایج و بحث

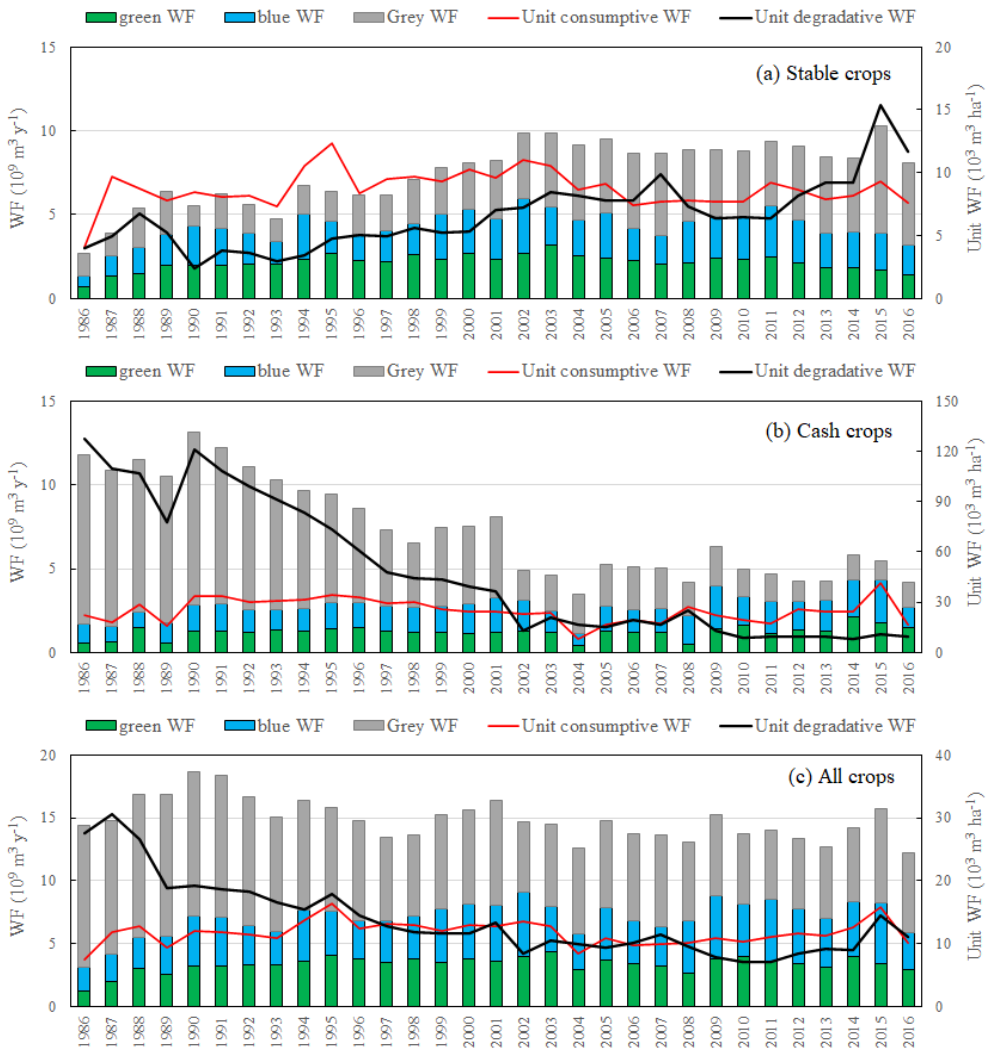
۱. ردپای آب در فرآیند تولید گیاهان

شکل ۳، روند تغییرات زمانی مقادیر مطلق (میلیارد مترمکعب) و واحد (مترمکعب بر هکتار) ردپای آب سبز، آبی و خاکستری را به تفکیک گیاهانی که ارزش غذایی یا اقتصادی دارند و برای کل گیاهان در طول دوره پژوهش (۲۰۱۶-۱۹۸۶) نشان می‌دهد. همگام با افزایش ۶۳ درصدی در مجموع تولیدات زراعی و باغی در استان خوزستان در این دوره زمانی، مجموع ردپای آب آبی این گیاهان، از ۱/۸۲ میلیارد مترمکعب در سال ۱۹۸۶ به ۳/۲۷ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۶ رسید. این افزایش، ردپای آب آبی واحد را نیز از ۳۷۰۰ مترمکعب در سال ۱۹۸۶، به ۵۶۶۰ مترمکعب در هکتار در سال ۲۰۱۶ رساند. شکل ۳ همچنین این افزایش را برای هر دو گروه گیاهانی با ارزش غذایی و اقتصادی، با میانگین رشد سالانه ۸۱۰ و ۳۰۲ مترمکعب در هکتار نشان می‌دهد. افزایش ردپای آب آبی در استان خوزستان، علاوه بر برداشت بی‌رویه آب‌های سطحی، با تخلیه ناپایدار منابع آب زیرزمینی همراه بوده است؛ به نحوی که مجموع برداشت آب از منابع زیرزمینی از ۰/۱۳ میلیارد مترمکعب در سال ۱۹۸۶ به ۱/۱۶ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۶ رسید و سهم آن در مجموع ردپای آب آبی نیز ۲۲ درصد افزایش یافت. ردپای آب سبز در فرآیند تولید مجموع گیاهان منتخب در استان خوزستان نیز افزایشی ۱۲ درصدی داشته و از ۲/۷۸ میلیارد مترمکعب در سال ۱۹۸۶ به ۳/۱۴ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۶ رسید؛ لکن، سهم آب سبز در مجموع ردپای آب مصرفی (سبز+آبی)، از ۶۰ درصد در ابتدای دوره مطالعاتی به ۴۸ درصد در انتهای این دوره رسید. همگام با این کاهش، ردپای آب سبز واحد نیز به‌طور متوسط، ۱۸۰ مترمکعب در سال کاهش یافت. علاوه بر تغییرات اقلیمی، مهمترین دلیل این مساله را می‌توان تغییر الگوی کشت و جایگزینی اراضی دیم با آبی دانست.

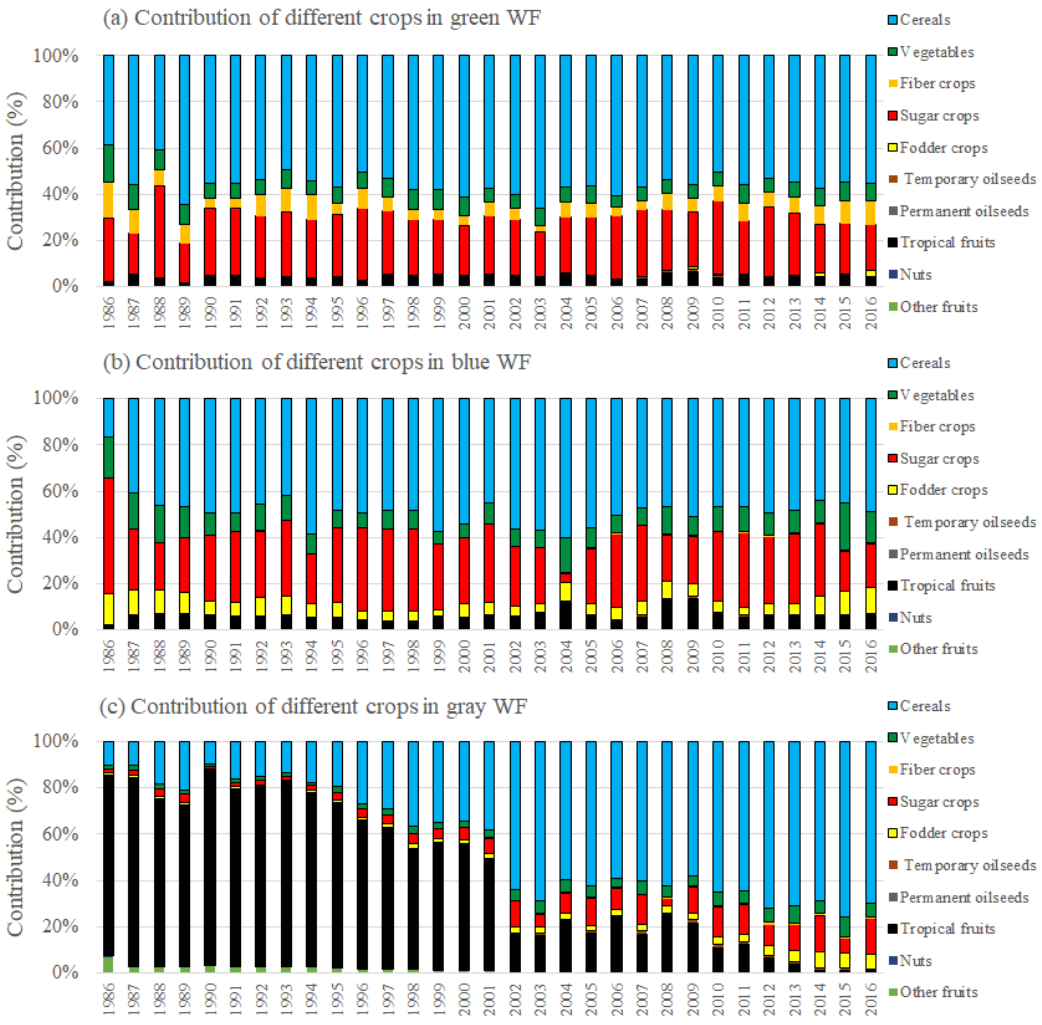
بر خلاف ردپای آب مصرفی، مقدار مطلق و واحد ردپای آب خاکستری در فرآیند تولید گیاهان منتخب، روندی کاهشی را با شیب میانگین به ترتیب، ۰/۱۷ میلیارد مترمکعب در سال و ۱۴۰ مترمکعب در هکتار در سال طی نمود. این کاهش، به‌ویژه برای گیاهان اقتصادی مشهود بود. مجموع ردپای آب خاکستری برای گیاهان اقتصادی، با کاهشی ۹۹ درصدی از ۹/۷ میلیارد مترمکعب در سال ۱۹۸۶، به ۰/۱ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۶ رسید؛ این کاهش، همگام با متوسط کاهش سالانه ردپای آب

خاکستری به میزان ۳۹۴۰ مترمکعب در هکتار بود. با این وجود، نگاه به شکل ۳ نشان می‌دهد که ردپای آب محصولات غذایی، روندی افزایشی داشته و با ۲۹۳ درصد افزایش، از ۱/۶ میلیارد مترمکعب در سال ۱۹۸۶ به ۶/۳ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۶ رسید. ردپای آب خاکستری واحد برای این گروه گیاهان نیز سالانه ۲۶۰ مترمکعب در هکتار افزایش یافت.

تغییر الگوی کشت، یکی از مهمترین عواملی است که می‌تواند ردپای آب مطلق و واحد در یک محدوده پژوهش را متأثر سازد. افزایش سهم محصولات آب‌بر در الگوی کشت، با مصرف آب آبی بیشتر، می‌تواند در نهایت، فشار بر منابع آب آبی را افزایش داده و خطری برای پایداری سرزمین محسوب شود. از این رو، سهم گروه‌های مختلف محصول در مقادیر مطلق ردپای آب سبز، آبی و خاکستری تعیین و نتایج آن در شکل ۴ نمایش داده شد. به استثنای سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۱۵، در باقی سال‌ها، غلات همواره بیش‌ترین سهم را در مجموع ردپای آب آبی داشته و این سهم در سال‌های مختلف، بین ۳۹ تا ۸۷ درصد متغیر بود. این افزایش سهم، به دلیل افزایش سطح زیر کشت غلات، به‌ویژه گندم و ذرت در طول دوره پژوهش بود. شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که با گذشت زمان، سهم گیاهان اقتصادی در مجموع ردپای آب آبی، به دلیل توسعه سطح زیر کشت آن‌ها و توجه به گیاهان آب‌بری همچون نیشکر، افزایش یافته است. این مساله را می‌توان به حمایت اقتصادی دولت از توسعه صنایع کشت نیشکر و توسعه باغات در برنامه‌های توسعه



شکل ۳. تغییرات زمانی ردپای آب سبز، آبی و خاکستری مطلق، و ردپای آب مصرفی و تخریبی واحد در فرآیند تولید گیاهان غذایی و اقتصادی در استان خوزستان، در طول دوره پژوهش (۱۳۹۶-۱۳۶۵)



شکل ۴. تغییرات زمانی سهم گروه‌های مختلف محصول در مقادیر مطلق ردپای آب سبز، آبی و خاکستری در استان خوزستان، در طول دوره پژوهش (۱۳۹۶-۱۳۶۵)

کشور منسوب نمود. علی‌رغم روند افزایشی سهم گیاهان اقتصادی در مجموع ردپای آب آبی در محدوده پژوهش، سهم آن‌ها در ردپای آب خاکستری از ۸۸ درصد در سال ۱۹۸۶ به ۲۴ درصد در سال ۲۰۱۶ رسید. این مساله، به دلیل استفاده بیش‌تر از کودهای دامی به‌جای کودهای صنعتی در سال‌های آتی، به‌ویژه در باغات تحت کشت میوه‌های گرمسیری می‌باشد. این در حالی است که افزایش تولید در اراضی تحت کشت گیاهانی که در گروه محصولات غذایی وجود دارند، اغلب با افزایش آب خاکستری همراه بوده که دلیل آن را می‌توان به استفاده فراتر از حد مجاز از نهاده‌های شیمیایی منسوب نمود. این یافته با نتایج کاراندیش (Karandish, 2019) مطابقت دارد.

۲. تحلیل پایداری ردپای آب

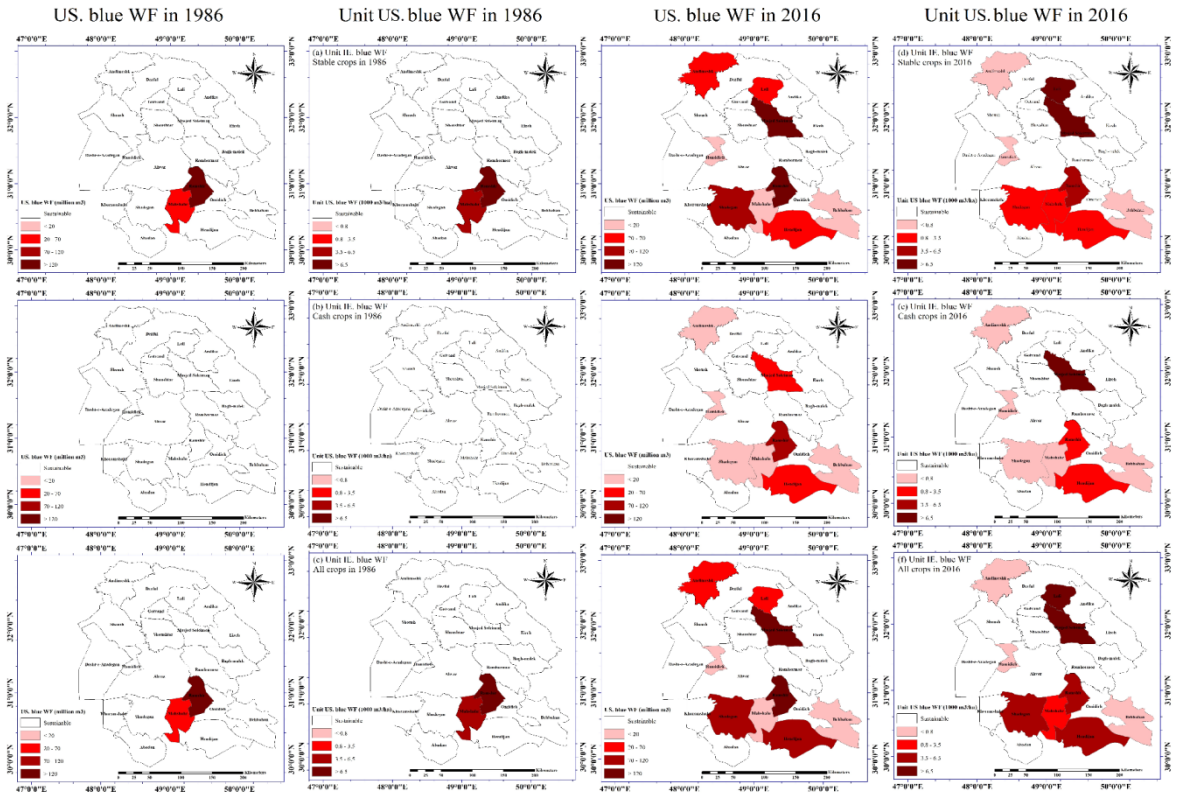
شکل ۵، پراکنش مکانی ردپای آب ناپایدار در شهرستان‌های مختلف استان خوزستان در سال‌های ۱۹۸۶ (ابتدای دوره پژوهش) و ۲۰۱۶ (انتهای دوره پژوهش) را نشان می‌دهد. این مقادیر، به‌صورت مطلق (میلیارد مترمکعب) و واحد (مترمکعب در هکتار) ارائه شد. در ابتدای دوره مطالعاتی، تنها ۰/۵۳ میلیارد مترمکعب آب در ازای تعدی به حریم زیست مصرف شد که این تعدی، در دو شهرستان رامشیر (۹۰ درصد) و ماهشهر (۱۰ درصد) به‌واسطه تولید گیاهان غذایی رخ داد. در سال ۲۰۱۶، مجموع ردپای آب ناپایدار به ۰/۹۸ میلیارد مترمکعب رسید که این مجموع، در ۹ شهرستان رخ داد. بخش

زیادی از این ناپایداری، مربوط به تولید گیاهانی با ارزش غذایی بوده و گیاهان اقتصادی، به دلیل سهم کمترشان در مجموع تولید و آب مصرفی، سهم کمتری در ردپای آب ناپایدار دارند.

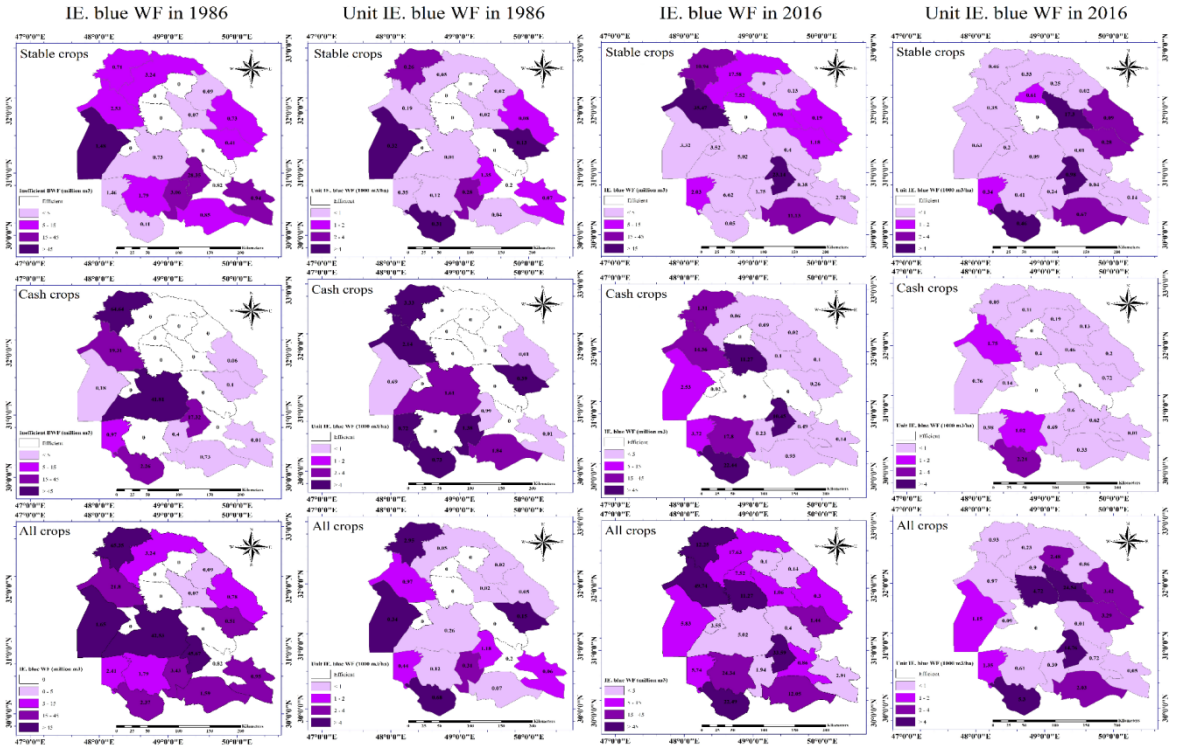
۳. تحلیل کارآمدی ردپای آب

بررسی مقادیر ردپای آب ناکارآمد نشان می‌دهد که چه بخشی از مصارف آب ناپایدار را می‌توان با اصلاح مدیریت در اراضی حذف نمود. بر این اساس، در سال ۱۹۸۶، مجموع ردپای آب ناکارآمد در ازای دستیابی به بنچ‌مارک ردپای آب در سطح تولید ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد به ترتیب ۱/۱، ۰/۶۲ و ۰/۹۰ میلیارد مترمکعب بود (شکل ۶). این مقدار در سطح بنچ‌مارک ۲۵ درصد، ۰/۰۹ میلیارد مترمکعب بیش‌تر از مجموع ردپای آب ناپایدار در سال ۱۹۸۶ بود که نشان می‌دهد در صورت اصلاح مدیریت در آن سال، می‌شد به تولید پایدار رسید. در سال ۲۰۱۶، مجموع ردپای آب ناکارآمد در سطوح تولید ۱۰، ۲۵ و ۵۰ درصد، به ترتیب به ۱/۵۰، ۱/۲۷ و ۰/۹۸ میلیارد مترمکعب رسید که مقدار این ناکارآمدی در سطح تولید ۲۵ درصد، ۰/۲۹ میلیارد مترمکعب بیش‌تر از مجموع ردپای آب ناپایدار در استان خوزستان است. با این وجود، مقایسه پراکنش مکانی ردپای آب ناکارآمد در سطح تولید ۲۵ درصد و ردپای آب ناپایدار در محدوده پژوهش نشان می‌دهد که در دو شهرستان اندیمشک و رامشیر، مقادیر ردپای آب ناپایدار، به ترتیب ۶/۸ و ۳۴۰/۹ میلیون مترمکعب بیش‌تر از مقادیر ردپای آب ناکارآمد در این دو شهرستان می‌باشد؛ این یافته بدان معناست که سیستم تولید در این دو شهرستان نیازمند بازنگری اساسی بوده و تنها با اصلاح مدیریت در شرایط فعلی، نمی‌توان به پایداری دست یافت (شکل ۷). به عبارتی دیگر، باید کشت برخی گیاهان آب‌بر، مانند برنج، که علاوه بر بالا بودن ردپای آب مصرفی آن‌ها، درصد آب آبی مصرف شده در تولید آن‌ها و در نهایت، درصد ناکارآمدی ردپای آن‌ها نیز زیاد بوده و باعث ناپایداری تولید می‌شوند، از الگوی کشت حذف شده و در عوض، گیاهانی همچون محصولات فیبری، که ردپای آب واحد کمتری دارند، جایگزین شوند. مساله ناکارآمدی در طول دهه اخیر، به‌ویژه برای گیاهان اقتصادی بارزتر است. بر اساس شکل ۵، میزان ناکارآمدی در فرآیند تولید گیاهان اقتصادی و در سطح بنچ‌مارک ۲۵ درصد، از ۰/۶۹ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۰۷ به ۳/۳ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۶ افزایش یافت؛ این در حالی است که میزان ردپای آب ناکارآمد برای گیاهان زراعی در این دوره کاهشی بوده و از ۰/۱۸ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۰۷ به ۰/۱۱ میلیارد مترمکعب در سال ۲۰۱۶ رسید.

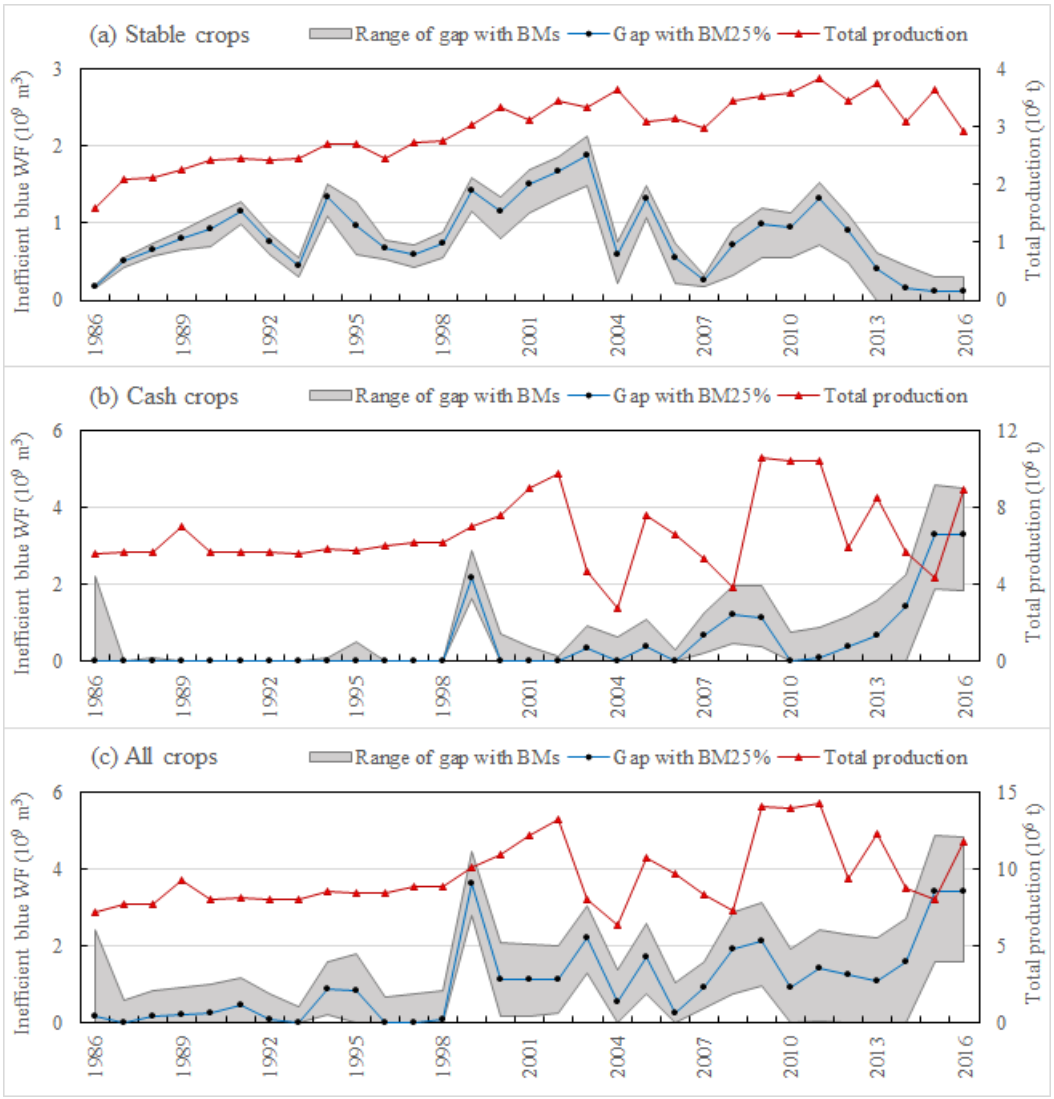
شکل ۷، پراکنش مکانی مقادیر مطلق (میلیون مترمکعب) و واحد (مترمکعب در هکتار) ردپای آب ناکارآمد را به تفکیک برای محصولاتی که در گروه گیاهانی با ارزش غذایی و اقتصادی قرار دارند، و برای کل محصولات در سال‌های ۱۹۸۶ و ۲۰۱۶ نشان می‌دهد. در سال ۱۹۸۶، مجموع ردپای آب ناکارآمد در سطح بنچ-مارک ۲۵ درصد در شهرستان‌های مختلف، بین صفر تا ۵۱۱ میلیون مترمکعب متغیر بوده و شش شهرستان گتوند، حمیدیه، لالی، امیدیه، رامهرمز و شوشتر، فاقد ردپای آب ناکارآمد بودند. در سال ۲۰۱۶، دامنه تغییرات ردپای آب ناکارآمد به ۰/۲۶ تا ۶۰۶ میلیون مترمکعب رسید و هیچ شهرستانی فاقد ناکارآمدی مصرف نبود. همگام با این افزایش، مقادیر ردپای آب ناکارآمد واحد در شهرستان‌های مختلف نیز در ۱۶ شهرستان، بین ۱۰ تا ۳۸۶۰ مترمکعب در هکتار افزایش یافت. با این وجود، تغییر الگوی کشت باعث شد تا در مقایسه با سال ۱۹۸۶، میزان ردپای آب ناکارآمد واحد در سال ۲۰۱۶ در شش شهرستان اهواز، اندیمشک، ماهشهر، امیدیه، رامشیر و شوش، بین ۵۰ تا ۲۷۰۰ مترمکعب در هکتار کاهش یابد که کم‌ترین و بیش‌ترین کاهش، به ترتیب در شهرستان‌های ماهشهر و اندیمشک مشاهده شد.



شکل ۵. پراکنش مکانی مقادیر مطلق و ناکارآمد ردپای آب آبی در استان خوزستان در ابتدا (۱۳۶۵) و انتهای (۱۳۹۶) دوره پژوهش



شکل ۶. پراکنش مکانی مقادیر مطلق و ناکارآمد ردپای آب آبی در استان خوزستان در ابتدا (۱۳۶۵) و انتهای (۱۳۹۶) دوره پژوهش



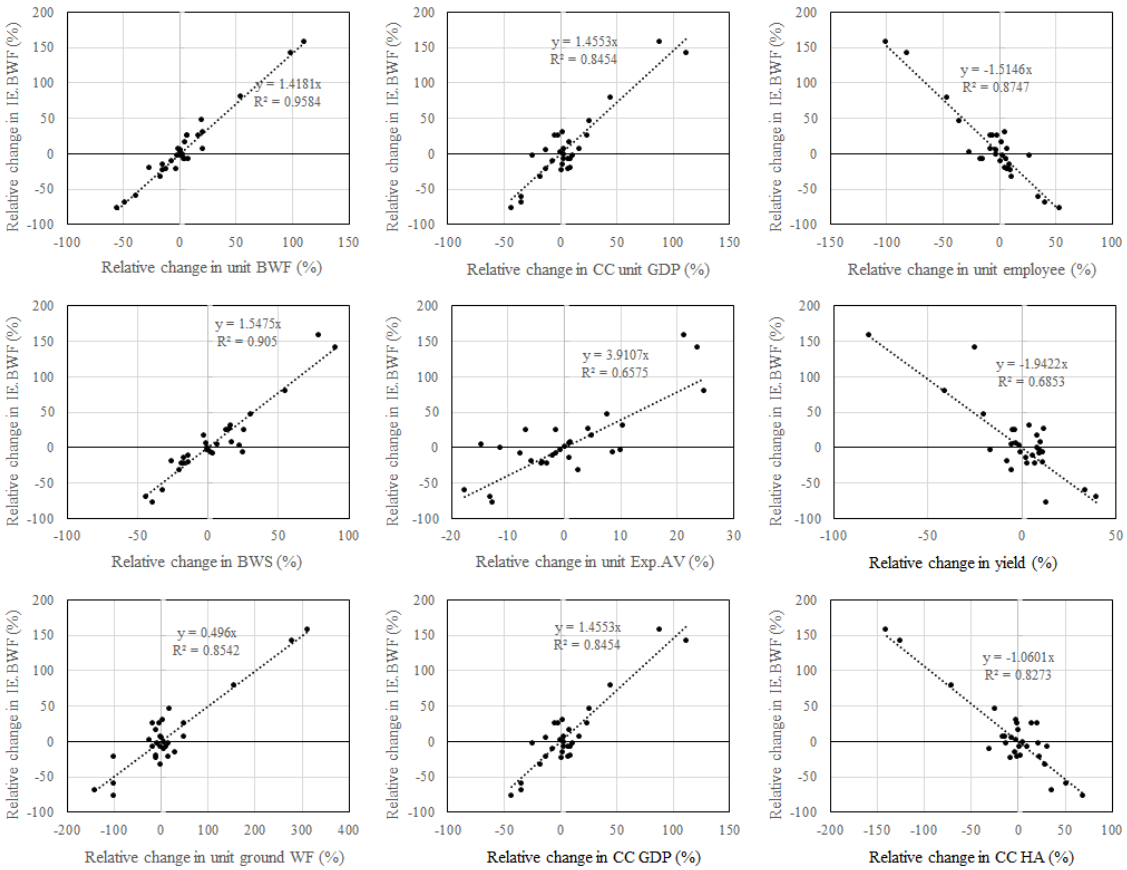
شکل ۷. تغییرات زمانی مقادیر میانگین و محدوده تغییرات ردپای آب ناکارآمد و مجموع تولید برای گروه گیاهان غذایی، اقتصادی و کل گیاهان در استان خوزستان، در طول دوره پژوهش (۱۳۹۶-۱۳۶۵)

۴. تحلیل عوامل مؤثر بر ناکارآمدی ردپای آب

با هدف تعیین ریشه‌های افزایش ناکارآمدی در محدوده پژوهش، ارتباط بین مقادیر ردپای آب آبی ناکارآمد واحد با لحاظ مقادیر بنچ‌مارک در سطح تولید ۲۵ درصد، با برخی عوامل محیطی، اقتصادی، اجتماعی و کشاورزی بررسی و نتایج آن در شکل ۸ به تصویر کشیده شد. همبستگی مثبت بین میزان ردپای آب آبی با ردپای آب آبی ناکارآمد نشان می‌دهد که کشت گیاهان آب‌بر در استان خوزستان، یکی از مهمترین دلایل ناکارآمدی آب مصرفی در بخش کشاورزی می‌باشد. به ازای یک درصد افزایش در مصرف آب آبی در واحد سطح، میزان ناکارآمدی ردپای آب آبی حدود ۱/۴۲ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، ارتباط مستقیمی بین شاخص کمبود آب آبی و میزان ناکارآمدی با ضریب همبستگی ۹۱ درصد به دست آمد؛ به نحوی که هر درصد افزایش در میزان این شاخص، مقدار ردپای آب آبی ناکارآمد واحد را ۱/۵۵ درصد افزایش می‌دهد. این یافته، با اصل توسعه پایدار، که به لزوم افزایش کارایی مصرف آب در شرایط بحران آبی اعتقاد دارد (Long et al., 2017)، در تناقض است. به اعتقاد (Richards, 2002)، عدم اصلاح قیمت آب متناسب با وضعیت کم‌آبی و ناچیز بودن هزینه آب مصرفی توسط کشاورز، مهم‌ترین دلیلی است که انگیزه کافی برای حفظ

منابع آبی محدود را از وی گرفته و باعث کاهش کارایی مصرف آب می‌شود. در ایران نیز، سیاست‌های حمایتی دولت از آب و برق مصرفی در بخش کشاورزی، باعث فاصله هنگفتی بین قیمت واقعی آب و میزان پرداختی توسط کشاورزان شده که به نوبه خود، منتج به پایین بودن کارایی مصرف حتی در شرایط بحران آبی شدید شده است.

یکی دیگر از عواملی که باعث ناکارآمدی ردپای آب آبی می‌شود، اتکا به استفاده از منابع آب زیرزمینی برای تولید گیاهان است. اگرچه بخش زیادی از آب آبی مصرفی در استان خوزستان از آب‌های سطحی تأمین می‌شود، لکن یافته‌های این پژوهش نشان داد که یک درصد افزایش در میزان آب زیرزمینی مصرفی در واحد سطح، میزان ردپای آب آبی ناکارآمد در واحد سطح را ۰/۵ درصد افزایش خواهد داد. پژوهشگران بسیاری، دسترسی غیرمجاز به منابع آب زیرزمینی و برداشت بی‌رویه از آن را عامل ناپایداری و ناکارآمدی مصرف آب در بخش کشاورزی عنوان داشتند (Lei et al., 2020; Karandish et al., 2018; Fishman et al., 2015). توسعه چاه‌های غیرمجاز و ارزش‌گذاری ناصحیح منابع آب زیرزمینی، مهم‌ترین عامل بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در ایران محسوب می‌شود (Noori et al., 2021). علاوه بر آن، نبود قوانین شفاف در بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی و پایش مستمر آن، از یک‌سو و محدودیت در برداشت و تخصیص این منابع به بخش‌هایی با بهره‌وری فیزیکی و اقتصادی و کارایی مصرف آب پایین، منتج به افت شدیدی در سطح منابع آب زیرزمینی در نقاط بسیاری از کشور شده است. تحلیل اثرات عوامل اقتصادی بر وضعیت آب آبی مصرفی در استان خوزستان نشان داد که تمرکز بر تولید با هدف افزایش ارزش افزوده بخش کشاورزی از یک‌سو و افزایش درآمد حاصل از صادرات آن‌ها از سویی دیگر، می‌تواند میزان ردپای آب ناکارآمد در واحد سطح در استان خوزستان را افزایش دهد. ارتباط مثبت بین میزان آب آبی مصرفی و ارزش افزوده حاصل از بخش کشاورزی توسط برخی پژوهشگران دیگر نیز گزارش شده است (Huang et al., 2021; Gua et al., 2021). (Gua et al., 2021) نیز بیان داشتند که با افزایش درآمد سرانه ناخالص در یک منطقه، میزان بهره‌وری اقتصادی آب کاهش می‌یابد؛ هرچند این رابطه، خطی نبوده و به شکل منحنی S است. با این وجود، نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد که زمانی که سهم گیاهان اقتصادی نسبت به گیاهان غذایی در مجموع ارزش افزوده حاصل از تولید و صادرات بیش‌تر می‌شود، میزان ردپای آب آبی ناکارآمد در واحد سطح کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان داشت که اغلب گیاهان اقتصادی، توسط بهره‌برداران دولتی و یا نهادهای بزرگ خصوصی اداره شده و نظارت بر بهره‌برداری از این مجموعه‌ها، دقیق‌تر و کارآمدتر از اراضی خرده‌مالکی است. از آنجایی که خرده‌مالکان، سهم بالایی در تأمین امنیت غذایی کشور داشته و اغلب غذای کشور، در اراضی ایشان تولید می‌شوند (Karandish et al., 2021)، ارتقای بهره‌وری آب در این اراضی می‌تواند تا حد زیادی از میزان ردپای آب ناکارآمد در محدوده پژوهش بکاهد. با این وجود، افزایش ارزش افزوده حاصل از صادرات محصولات کشاورزی، همواره از زمان تدوین برنامه توسعه اول تاکنون، مورد توجه دولت بوده و همواره، سیاست‌های تشویقی متعددی همچون مستثنی نمودن صادرات بخش کشاورزی از مالیات و یا تأمین یارانه‌ای نهاده‌های دولتی برای افزایش سهم محصولات کشاورزی در صادرات تدوین نموده است. شکل ۸ همچنین نشان می‌دهد که افزایش تعداد بهره‌برداران در واحد سطح، میزان ناکارآمدی ردپای آب آبی را کاهش می‌دهد. با گذشت زمان و در مقایسه با سال ۱۹۸۶، مجموع بهره‌برداران در اراضی کشاورزی استان خوزستان، ۵۲ درصد افزایش یافته و تعداد بهره‌برداران در واحد سطح، از ۰/۲۳ نفر در هکتار به ۰/۳۰ نفر در هکتار رسیده است. این افزایش می‌تواند به دلیل توسعه صنایع کشت و صنعت نیشکر در استان باشد. این در حالی است که کوچک شدن وسعت اراضی، به‌ویژه در شهرستان‌هایی که فاقد واحدهای کشت و صنعت بوده و



شکل ۸. ارتباط بین عوامل محیطی، اقتصادی-اجتماعی و کشاورزی با مقادیر واحد ردپای آب آبی ناکارآمد در محدوده پژوهش

سهم بیش‌تری در تأمین محصولات گروه غذایی دارند، میزان کارآمدی آب آبی مصرفی را کاهش داده است (Karandish et al., 2021).

یکی دیگر از عوامل مؤثر بر میزان ردپای آب آبی ناکارآمد، میزان عملکرد محصول بود. شکل ۸ نشان می‌دهد که به ازای هر درصد افزایش در عملکرد مجموع محصولاتی که در استان خوزستان کشت می‌شود، میزان ردپای آب آبی ناکارآمد در واحد سطح، ۱/۹۴ درصد کاهش می‌یابد. به این ترتیب، اصلاح الگوی کشت و مدیریت نهاده‌ها با هدف ارتقای عملکرد محصول، می‌تواند کارآمدی آب مصرفی در بخش کشاورزی را افزایش داده و راه رسیدن به پایداری در فرآیند تولید را تسهیل کند. علاوه بر آن، هر یک درصد افزایش در سطح زیر کشت گیاهانی با ارزش اقتصادی بالا، میزان ردپای آب ناکارآمد در واحد سطح را ۱/۱ درصد کاهش خواهد داد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از ابزار ارزیابی ردپای آب برای تحلیل وضعیت کارآمدی و پایداری آب مصرفی در بخش کشاورزی در استان خوزستان استفاده شد. نتایج این پژوهش، الگوی ناپایدار و ناکارآمد مصرف آب در استان و روند رو به رشد آن را نشان می‌دهد. اگرچه دستیابی به سطوح بنچ‌مارک ردپای آب می‌تواند با حذف مؤلفه ناکارآمد ردپای آب، شرایط محدود نمودن مجموع ردپای آب به سطوح پایدارش را فراهم کند، لکن خطر ناپایداری، هنوز در برخی مناطق وجود دارد که این مساله، اهمیت تحلیل در مقیاس‌های زمانی و مکانی ریزتر را نشان می‌دهد. عواملی همچون تمرکز بر کشت محصولات آب‌بر و گسترش کمبود آب آبی، دسترسی بیش‌تر به منابع آب زیرزمینی، تمرکز بر افزایش ارزش افزوده تولید و صادرات بخش کشاورزی با تمرکز بر کشت گیاهان با ارزش غذایی و کاهش سطح زیر کشت محصولات

اقتصادی در سیستم‌هایی با تعداد بهره‌برداران بالا و خلأ عملکرد، می‌توانند شدت ناکارآمدی آب مصرفی در بخش کشاورزی را افزایش دهند. ارتباط بالای بین شاخص کمبود آب آبی و میزان ناکارآمدی در محدوده پژوهش از یک‌سو و تمرکز بر ارتقای ارزش افزوده بخش کشاورزی بدون ارتقای مطلوب بهره‌وری، در تناقض با اصل مهم توسعه پایدار است که بیان می‌دارد ارتقای کارایی مصرف آب، باید به‌صورت توأمان، با کاهش مصرف آب و ارتقای بهره‌وری در بخش‌های مختلف همراه باشد. این مساله به‌خوبی نشان می‌دهد که اقتصاد محدوده پژوهش، به‌شدت به آب وابسته است؛ بنابراین، آب عاملی محدود کننده برای رشد اقتصادی ایران بوده و اثبات این وابستگی، پایداری ساختار اقتصادی کشور در بلندمدت تا افق ۲۰۵۰ را تهدید می‌کند؛ به همین دلیل، برای تدوین برنامه‌های توسعه پایدار، ضمن بهبود این عوامل، باید پژوهش‌هایی با دقت زمانی بالاتر انجام داد تا با تعیین دقیق زمان‌ها و مکان‌های بحرانی، نقشه راه دقیق‌تری را تدوین نمود.

Reference:

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration guide Lines for computing crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy. p 300.

Ercin, A.E., Hoekstra, A.Y. (2014). Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. Environ. Int. 64, 71–82.

Fishman, R., Devineni, N., & Raman, S. (2015). Can improved agricultural water use efficiency save India's groundwater?. Environmental Research Letters, 10(8), 084022. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/10/8/084022/pdf

Guo, L., Li, X., Wang, L. (2021). Economic size and water use efficiency: an empirical analysis of trends across China. Water policy, https://doi.org/10.2166/wp.2021.189.

Hoekstra, A.Y., A.K. Chapagain, M.M. Aldaya, and M.M. Mekonnen. (2011). The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. London, UK: Earthscan.

Hyang, Y., Huang, X., Xie, M., Cheng, W., Shu, Q. (2021). A study on the effects of regional differences on agricultural water resource utilization efficiency using super-efficiency SBM model. Scientific Report. https://doi.org/10.1038/s41598-021-89293-2

IWRMC. (2021). Iran's Water Resource Management Company. http:// www.wrm.ir/.

Karandish, F. (2021). Socioeconomic benefits of conserving Iran's water resources through modifying agricultural practices and water management strategies. Ambio. doi.org/10.1007/s13280-021-01534-w.

Karandish, F., Hoekstra, A.Y., Hogeboom, R.J. (2018). Groundwater saving and quality improvement by reducing water footprints of crops to benchmarks levels. Advances in Water Resources. 121, 480-491.

Karandish, F. (2019). Applying grey water footprint assessment to achieve environmental sustainability within a nation under intensive agriculture: a high-resolution assessment for common agrochemicals and crops. Environmental Earth Sciences. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8199-y

KWPAC. (2021). Khuzestan Water and Power Authority Company. https://www.kwpa.ir/?l=EN#gsc.tab=0

Lei, W., Changbin, L., Xuhong, X., Zhibin, H., Wanrui, W., Yuan, Z., Jianmei, W., Jianan, L. (2020). The impact of increasing land productivity on groundwater dynamics: a case study of an oasis located at the edge of the Gobi Desert. Carbon Balance and Management. 15(7). https://doi.org/10.1186/s13021-020-00142-7

Long, K., Pijanowski, B.C. (2017). Is there a relationship between water scarcity and water use efficiency in China? A national decadal assessment across spatial scales. Land Use Policy. 69, 502-511.

Madani, K., A. AghaKouchak, and A. Mirchi. (2016). Iran's socioeconomic Drought: Challenges of a water-bankrupt nation. Iranian Studies 49: 997–1016.

Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity, Science Advances, 2(2): e1500323.

Richards, A. (2002). Coping with Water Scarcity: The Governance Challenge. Institute on Global Conflict and Cooperation. Policy Paper 54. 34p

Print ISSN: 2251-7480
Online ISSN: 2251-7400

Journal of
Water and Soil Resources Conservation (WSRCJ)

Web site:
https://wsrcj.srbiau.ac.ir

Email:
iauwsrcj@srbiau.ac.ir
iauwsrcj@gmail.com

Vol. 11
No. 4
Summer 2022

Received:
2022-03-10

Accepted:
2022-05-20

Pages: 35-49

Efficient and Sustainable Use of Water Resources in Khuzestan through Water Footprint Benchmarking

Samira Salari[1], Fatemeh Karandish[2*], Parviz Haghighatjou[3] and Maite Aldaya[4]

1) PhD student in Water Engineering Department, University of Zabol, Zabol, Iran.
2) Associate professor in Water Engineering Department, University of Zabol, Zabol, Iran.
3) Associate professor in Water Engineering Department, University of Zabol, Zabol, Iran.
4) Institute for Innovation & Sustainable Development in Food Chain (IS-FOOD), Public University of Navarra, Jerónimo de Ayanz Centre, Arrosadia Campus, 31006 Pamplona, Spain
*Corresponding author email: karandish_h@yahoo.com

Abstract:

Background and aim: Anthropogenic water scarcity is among global concerns which threats the sustainability of the world in future. Overexploiting limited blue water resources for supplying human's growing food demand is the main root of such a scarcity. Being still in its infancy, water footprint (WF) benchmarking is a proper method to determine the inefficient fraction of water consumption. Hence, we assessed if achieving benchmark levels can limit agricultural WF to its sustainable cap in Khuzestan province, which is the agricultural backbone of Iran.

Method: The research consists of three stages including WF accounting, and sustainability and efficiency assessment. First, consumptive and degradative WFs were accounted for 32 in counties of Khuzestan province over the period 1986-2016. Green and blue WFs were accounted by dividing green and blue evapotranspiration by crop's yield, respectively. The AquaCrop model was used to simulate daily evapotranspiration, and then, seasonal values were estimated by aggregating daily values. Grey WF was estimated for the applied nitrogen fertilizer in croplands. In the next stage, the sustainability status of water consumption pattern was assessed by dividing overall blue WF by blue water availability. The latter was estimated by subtracting environmental flow requirements from natural runoff. Thereafter, WF benchmarks were extracted for 10^{th}, 25^{th}, and 50^{th} level of crop production, and based on which, the inefficient fractions of blue WFs were estimated for individual crops. Finally, inefficient blue WFs were compared with unsustainable ones to know if achieving benchmark levels can limit agricultural blue water consumption to its sustainable caps in the study area. A correlation assessment was also done to determine the main roots of inefficiency in Khuzestan province.

Results: Along with a 63% increase in crop production and 53 increase in unit blue WF, the overall blue WF increased by 80% over the study period. Such an increasing pattern caused groundwater overexploitation with an annual average rate of 12 million m^3 y^{-1}. The contribution of green WF in consumptive WF decreased from 60% in 1986 to 48% in 2016. Overall grey WF, however, followed a decreasing trend, with an average annual decreasing slope of 140 m^3 ha^{-1} y^{-1}, which mainly occurred by a considerable reduction in cash crop's grey WF. In 2016, a total of 0.98 billion m^3 of blue water was consumed unsustainably, which was roughly 85% higher than one in 1986. The number of countries with unsustainable water consumption also increased from 2 counties in 1986, to 9 counties in 2016. Stable crops had the largest contribution in unsustainable WF. Based on the results of efficiency assessment, and considering WF benchmarks developed at 25^{th} of crop production level, inefficient blue WF varies in the range of 0.26 to 606 million m^3 y^{-1} in different counties in 2016. Compared with 1986, the inefficiency increased by 10-3860 m^3 ha^{-1} in 16 counties in 2016. While achieving benchmark levels can reduce blue WF to its sustainable level at provincial scale, unsustainable blue WFs in Andimeshk and Ramshir counties are still 6.8 and 340.9 million m^3 higher than the inefficient blue WFs, respectively. The correlation assessment showed that inefficiency increase along with any increase in added value by agricultural production and/or export, unit blue WF, blue water scarcity level, and access to groundwater consumption; while it decreases with any increase in the number of employees per ha, crop yield, and cash crop's harvested area.

Conclusion: WF assessment showed that crop production in Khuzestan province is done at the cost of deteriorating environment, which threats the stability of agricultural system in near future. While achieving benchmark levels helps with being limited to sustainable WF caps through removing inefficient blue WF fractions, there are still the risk of unsustainability in some regions, which indicates the importance of high-resolution assessments for determining hotspots. Hence, further research is required to determine temporal hotspots as well, in order to implement a proper sustainable development plans.

Key words: Blue water scarcity, efficiency and sustainability assessment, WF assessment, WF benchmarking

10.30495/WSRCJ.2022.20329