

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی تأثیر دقت‌های مکانی و زمانی در ارزیابی ردپای آب بر شاخص کمبود آب آبی در ایران

فاطمه کاراندیش^۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۴/۲۴

چکیده

ایران، از جمله نواحی واقع شده در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان است که از کمبود آب آبی رنج می‌برد. به این ترتیب، توسعه پایدار ایران، مستلزم تصحیح الگوی مصرف منابع آب آبی بوده و از سویی دیگر، هرگونه برنامه‌ریزی در زمینه مدیریت مصرف منابع آب، نیازمند شناخت صحیح وضعیت کم‌آبی در نواحی مختلف کشور می‌باشد. در این پژوهش، برای نخستین بار، وضعیت کم‌آبی بر اساس شاخص کمبود آب آبی (BWS) تحت دقت‌های زمانی مختلف، شامل مقیاس‌های سالانه و ماهانه، و دقت‌های مکانی مختلف، شامل مقیاس‌های کشوری، نواحی اقلیمی و استانی بررسی شد. بدین منظور، بر اساس ارزیابی جامع ردپای آب، ابتدا مجموع آب آبی مصرفی در مقیاس روزانه در استان‌های مختلف کشور و در حداقل سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۱۵ بدست آمد و سپس، با تقسیم آن بر موجودیت آب آبی، مقدار شاخص BWS محاسبه شد. مقادیر $BWS < 1$ ، نشان‌دهنده فقدان کم‌آبی، و مقادیر $1 \leq BWS < 1.5$ ، $1.5 \leq BWS < 2$ ، و $BWS > 2$ ، به ترتیب نشان‌دهنده کم‌آبی اندک، متوسط، و شدید می‌باشد. هرگونه مکان یا زمانی با $BWS > 1$ ، نقطه‌ی بحرانی نامیده می‌شود. بر اساس تحلیل‌های سالانه برای کل کشور، ۴۶ درصد از مجموع آب آبی مصرفی در بخش کشاورزی ناپایدار بوده و در ازای تعدی به نیازهای محیط‌زیستی مصرف شده است؛ در این حالت، شاخص BWS برابر با ۱/۹ بوده و کل کشور در شرایط کمبود آب متوسط قرار دارد. با این وجود، بر اساس تحلیل سالانه در مقیاس‌های مکانی ریزتر، ناحیه‌ی اقلیمی مرطوب و ۷ استان کشور، فاقد کم‌آبی هستند. در تحلیل‌های ماهانه نیز، تحت تمامی مقیاس‌های مکانی، نقاط غیربحرانی وجود خواهد داشت. بر اساس یافته‌های این پژوهش، تغییر دقت بررسی‌های BWS، علاوه بر تغییر تعداد نقاط بحرانی بین یک تا ۳۷ مورد، وضعیت کیفی کم‌آبی در این نقاط را نیز تغییر خواهد داد. به این ترتیب، شناسایی صحیح نقاط بحرانی واقعی، که در آن‌ها نیازهای محیط‌زیستی به دلیل مصارف ناپایدار آب آبی تامین نشده است، نیازمند تحلیل در ریزترین مقیاس زمانی و مکانی ممکن خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: ایران، ردپای آب آبی ناپایدار، طبقه‌بندی وضعیت کم‌آبی، موجودیت آب آبی، نیازهای زیست‌محیطی

مقدمه

(WEF, 2015). بنابراین، توسعه پایدار در زندگی بشری، مستلزم بازنگری سیاست‌های فعلی تخصیص و مصرف آب و تدوین و پایه‌گذاری سیاست‌های جامع و نوین، با هدف برقراری توازن بین موجودیت و مصرف آب آبی خواهد بود؛ این مهم در گام نخست، نیازمند شناخت نواحی بحرانی، که در آن‌ها، مصارف آب آبی، به ازای تعدی به حریم محیط‌زیست صورت می‌گیرد، می‌باشد. در چنین نواحی‌ای، مصارف آب آبی به اصطلاح ناپایدار خواهد بود و ادامه‌ی این روند، قابلیت تولید منطقه را از حیث انتفاع خارج خواهد نمود. تعیین نواحی بحرانی، با توجه به پیامدهای حاصله، هم از منظر فیزیکی، و هم از منظر اقتصادی و اجتماعی، امکان‌پذیر است. از دیدگاه فیزیکی، دو شاخص تنش آب (WSI) و کمبود آب آبی (BWS) برای تحلیل بحران آب وجود دارد. شاخص WSI توسط

مصرف فزاینده‌ی آب آبی در طول چند دهه‌ی گذشته، که از یک‌سو، بواسطه‌ی افزایش جمعیت، و از سویی دیگر، به دلیل بهبود سبک زندگی بشر، تغییر الگوی مصرف، و توسعه‌ی اراضی کشاورزی آبی، به وجود آمده است (Ercin et al., 2014; Vorosmarty et al., 2000)، مساله‌ی کمبود آب آبی را به یک چالش جهانی تبدیل نموده است. از این رو، بحران آب، از حیث عواقبی که می‌تواند بر چرخه‌ی طبیعی زمین به جای بگذارد، به عنوان بزرگ‌ترین خطر جهانی در آخرین گزارش مجمع جهانی اقتصاد ذکر شده است

^۱ - دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل

انتخاب مقیاس مکانی و زمانی صحیح در برآورد مقادیر شاخص BWS، تاثیر مهمی در به تصویر کشیدن واقعیت‌های مربوط به کمبود آب دارد. به عنوان نمونه، نتایج بسیاری از پژوهش‌های صورت گرفته در مقیاس سالانه نشان می‌دهد که در جهان، همچنان آب کافی برای مصارف پایدار بشر وجود داشته و ادامه‌ی این روند، خطری از منظر محیط‌زیستی به همراه نخواهد داشت (Mekonnen and Hoekstra, 2016). این در حالی است که یافته‌های یک پژوهش جهانی، که در سطح سلول‌هایی با ابعاد 30×30 دقیقه و در مقیاس ماهانه صورت گرفت، نشان داد که چهار میلیون از کل جمعیت جهان، حداقل یک ماه از سال، با کم‌آبی شدید مواجه بوده و حدود نیمی از این جمعیت، در کشورهای هند و چین زندگی می‌کنند؛ همچنین، نتایج این پژوهش نشان داد که حدود نیم میلیارد از جمعیت جهان نیز در کل سال، با چالش کم‌آبی شدید مواجه هستند (Mekonnen and Hoekstra, 2016). دو برابر بودن جمعیت درگیر با کم‌آبی شدید در یک ماه از سال بر اساس یافته‌های این پژوهش در مقایسه با نتایج بدست آمده از پژوهش هوکسترا و همکاران، که در مقیاس حوضه‌ای صورت گرفت، اهمیت انتخاب مقیاس‌های مکانی ریزتر در تحلیل پراکنش مکانی مقادیر BWS و تعیین نواحی بحرانی واقعی را نشان می‌دهد (Hoekstra et al., 2012).

به این ترتیب، آشکارسازی تغییرات مکانی و زمانی شاخص BWS نیازمند انجام تحلیل‌های جامع در مقیاس‌های مکانی و زمانی صحیح بوده و نقش مهمی در سیاست‌گذاری‌های خرد و کلان در زمینه‌ی چگونگی تخصیص و مصارف آب خواهد داشت. در حقیقت، یافتن مکان‌ها و زمان‌های غیربحرانی واقعی، امکان توسعه‌ی پایدار کشاورزی را فراهم نموده و با کاهش تولید در مناطق بحرانی، از میزان فشار بر منابع آب آبی و تعدی به محیط‌زیست خواهد کاست. با این وجود، در کل جهان، پژوهش‌های اندکی به تعیین چنین مناطقی، به ویژه بر اساس داده‌های محلی پرداخته‌اند. کاراندیش و همکاران، در مقیاس سالانه، و برای کشور ایران در سال ۲۰۱۰، دریافتند که به استثنای یک استان، دیگر مناطق کشور دچار کم‌آبی اندک تا متوسط هستند (Karandish et al., 2018). با این وجود، تحلیل ایشان در مقیاس سالانه صورت گرفته و تغییرات زمانی این شاخص در طول یک سال بررسی نشده است. در پژوهش حاضر، و برای نخستین بار، ضمن انجام ارزیابی جامع ردپای آب، نواحی بحرانی در مقیاس‌های مکانی استانی، نواحی اقلیمی و کشوری، و در مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه، در کشور ایران بر اساس شاخص BWS تعیین شده و وضعیت بحران فیزیکی آب تحت مقیاس‌های مختلف با هم مقایسه می‌شود. یافته‌های این پژوهش، علاوه بر آشکارسازی تمایز نتایج بدست آمده تحت تحلیل‌های صورت گرفته با مقیاس‌های مختلف، مکان‌ها و زمان‌های بحرانی در ایران را به تصویر کشیده و می‌تواند به عنوان نقشه‌ی راه، در گام‌های بعدی

فیستر و همکاران (Pfister et al., 2009) ارائه شد که میزان پایداری آب مصرفی را از تلفیق مصارف صورت گرفته از منابع آب و پیامدهای محیط‌زیستی‌شان تعیین می‌کند؛ این شاخص، در محدوده‌ی صفر تا یک تغییر نموده و عدد حاصله، در حقیقت کسری از آب آبی مصرفی توسط یک مصرف‌کننده‌ی خاص، که به ازای تعدی به حریم دیگر مصرف‌کنندگان، صورت گرفته است را نشان می‌دهد. کارآیی این شاخص برای اولین بار، در پژوهشی جهانی برای ارزیابی چرخه‌ی حیات کتان به اثبات رسید (Pfister et al., 2009). شاخص کمبود آب آبی (BWS) که برای اولین بار توسط هوکسترا و همکاران ارائه شد (Hoekstra et al., 2011)، یکی دیگر از شاخص‌های جامع در تحلیل فیزیکی کمبود آب است که مقدار آب آبی ناپایدار و وضعیت فیزیکی کم‌آبی راه، از مقایسه‌ی مجموع مصارف آب با منابع آب موجود تعیین می‌کند. این شاخص برای اولین بار، در ارزیابی وضعیت بحران آب در ۴۰۵ حوضه‌ی آبریز جهان در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۵-۱۹۹۶ به کار برده شد و بر اساس تحلیلی ماهانه، معلوم شد که $2/67$ میلیارد نفر از جمعیت جهان، که در ۲۰۱ حوضه از این مناطق زندگی می‌کنند، حداقل در یک ماه از کل سال، با کمبود آب شدید مواجه هستند (Hoekstra et al., 2012). از آنجایی که شاخص BWS، به طور مطلق، و نه به صورت وزنی، مقادیر ردپای آب پایدار و ناپایدار را تعیین می‌کند، در تحلیل‌های مربوط به بحران فیزیکی آب آبی، از مزیت نسبی برخوردار است (Hoekstra, 2016). از این‌رو، پژوهش‌گران بسیاری در جهان، تحقیق‌های خود را مبتنی بر این شاخص انجام داده‌اند (e.g. Karandish et al., 2020; Hogeboom et al., 2020; Nouri et al., 2020; Nouri et al., 2019; Zhuo et al., 2019; Mekonnen and Hoekstra, 2016; Hoekstra et al., 2012). بسیاری از این محققان در پژوهش‌های خود، به وجود نقاط بحرانی ($BWS > 1$) در نقاط مختلف جهان، به ویژه در ماه‌های گرم، اشاره داشته، و لزوم تعیین حد برای برداشت منابع آب آبی، با هدف حفظ پایداری محیط‌زیست را خاطر نشان ساختند (Hogeboom et al., 2020). کاراندیش و همکاران، وضعیت تنش منابع آب زیرزمینی را از دیدگاه ردپای آب آبی در پروسه‌ی تولید محصولات کشاورزی بررسی نموده و به این مهم دست یافتند که به جز نواحی اقلیمی فرامرطوب، که در آن‌ها کشاورزی اغلب متکی بر مصرف آب سطحی است، منابع آب زیرزمینی در دیگر نواحی اقلیمی، تحت فشارهای متوسط تا شدید قرار دارند (Karandish et al., 2018). ایشان همچنین در پژوهشی دیگر، اصلاح الگوی کشت و کاهش تلفات مواد غذایی را گامی موثر برای کاهش مصرف منابع آب آبی، و کاهش شدت کمبود آب آبی بیان داشتند (Karandish et al., 2020). با این وجود، تحلیل‌های ایشان در مقیاس سالانه و با تمرکز بر منابع آب زیرزمینی بوده و نتایج بدست آمده، نمی‌تواند واقعیت‌های پنهان کمبود آب آبی در کشور را آشکار نماید.

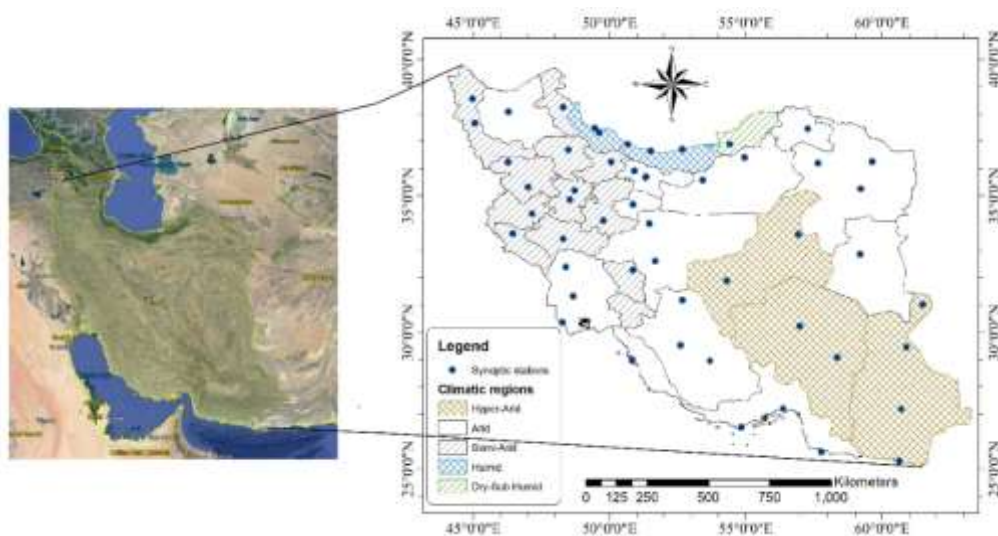
تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار بگیرد.

مواد و روش‌ها

محدوده‌ی پژوهش

کشاورزی، ۲۸ گیاه عمده که بیش‌ترین سهم را در مجموع سطح زیرکشت و تولید در کشور را داشتند، انتخاب و بر اساس سیستم طبقه‌بندی سازمان خواروبار جهانی فائو (Allen et al., 1998)، در ۸ گروه طبقه‌بندی شدند. این گروه‌ها مشتمل بر غلات (گندم، جو، برنج، ذرت دانه‌ای)، سبزیجات (پیاز و گوجه‌فرنگی)، حبوبات (لوبیا، نخود، عدس)، محصولات ریشه‌ای و فیبر (سیب‌زمینی)، رنده‌های روغنی (کتان، سویا، کلزا)، خشکبار (پسته، گردو، بادام، فندق)، گیاهان قندی (نیشکر و چغندر قند)، و میوه‌ها (سیب، موز، خرما، انگور، لیموترش، لیمو شیرین، نارنگی، پرتقال، و گریپ‌فروت) بودند.

محدوده‌ی پژوهش کشور ایران، با وسعتی معادل ۱/۶۴ میلیون کیلومتر مربع، مشتمل بر ۳۰ استان اصلی است که بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن، دارای پنج کلاس اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای و مرطوب می‌باشد (Karandish et al., 2020) (شکل ۱). طول دوره‌ی پژوهش، حداثی سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۰۵ انتخاب شد. برای تعیین مصارف آب در بخش



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده‌ی پژوهش (چپ)، و پراکنش مکانی نواحی اقلیمی و ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب در کشور (راست)

تشکیل شده است که به ترتیب، از تقسیم مجموع آب سبز و آب آبی مصرفی در طول دوره‌ی منتخب ($m^3 ha^{-1}$) بر مجموع عملکرد گیاه ($t ha^{-1}$) بدست می‌آید. برای تخمین مقادیر روزانه‌ی آب سبز و آب آبی در طول دوره‌ی رشد هر گیاه، از مدل آکوآکراپ^۱ استفاده شد. این مدل، بر پایه‌ی یک معادله‌ی بیلان آب روزانه، قادر به محاسبه‌ی هریک از مولفه‌های بیلان آب، از جمله آب آبی و آب سبز مصرفی در طول فصل رشد محصول، به شکل ذیل می‌باشد:

$$S_t = S_{t-1} + P_t + I_t + CR_t - RO_t - ET_t - DP_t \quad (1)$$

که در آن، S_t و S_{t-1} به ترتیب، رطوبت خاک در انتهای روزهای t و $t-1$ ام، P_t مقدار بارش، I_t مقدار آب آبیاری، CR_t میزان ارتفاع موئینگی، RO_t مقدار رواناب سطحی، ET_t مجموع نیاز آبی گیاه و DP_t میزان نفوذ عمقی از انتهای ریشه می‌باشد. تمامی ترم‌ها در این

بر اساس آمار منتشر شده از سوی سازمان جهاد کشاورزی، در طول دوره‌ی پژوهش، ۴۶/۷ میلیون تن محصول در ۷/۹ میلیون هکتار اراضی آبی تحت کشت این گیاهان تولید شد (IMAJ, 2020)؛ نواحی اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، به ترتیب سهمی معادل ۵۱ و ۲۹ درصد در مجموع این اراضی آبی، و ۶۲ و ۲۳ درصد در مجموع گیاهان تولید شده در اراضی منتخب در کشور را داشتند. گیاهان قندی، با سهمی معادل ۳۰ درصد در مجموع تولید آبی در نواحی خشک، و غلات با سهمی معادل ۴۱ درصد، در مجموع تولید آبی در نواحی نیمه‌خشک، به عنوان گیاهان غالب در این نواحی اقلیمی بودند (IMAJ, 2020).

محاسبات ردپای آب آبی

محاسبه‌های مربوط به ردپای آب گیاهان منتخب، به تفکیک برای هر گیاه، در هر استان در هر یک از سال‌ها صورت گرفت. ردپای آب مصرفی هر گیاه، از دو بخش ردپای آب سبز و ردپای آب آبی

بر اساس طبقه‌بندی مکونن و هوکسترا، $BWS < 1$ نشان می‌دهد که در مکان و زمان موردنظر، کمبود آب آبی وجود نداشته و بدون تخریب محیط‌زیست، آب آبی موجود پاسخگوی نیاز آب آبی خواهد بود (Mekonnen and Hoekstra, 2016). فراتر رفتن مقدار BWS از یک بدان معنی است که مصرف آب آبی، در ازای تعدی به نیازهای محیط‌زیستی صورت گرفته و به همین دلیل، مصارف آب آبی، دارای مولفه‌ی ناپایدار خواهد بود و مقدار این ناپایداری، هرگونه مصرف فراتر از BWA می‌باشد. در این صورت، به ازای $1.5 < BWS < 1$ ، کمبود آب اندک، به ازای $2 < BWS < 1.5$ کمبود آب متوسط، و به ازای $BWS > 2$ کمبود آب شدید وجود خواهد داشت (Mekonnen and Hoekstra, 2016).

نتایج و بحث

تمامی نتایج گزارش شده در این بخش، یافته‌های حاصل از پژوهش فعلی بوده و بر اساس دستورالعمل‌های معرفی شده در بخش مواد و روش‌ها بدست آمده است. این یافته‌ها، از دو حیث از دیگر پژوهش‌های صورت گرفته برای تعیین وضعیت کم‌آبی در ایران متمایز است: اول آن‌که، محاسبه‌های مربوط به آب آبی مصرفی، بر اساس دستورالعمل استاندارد ارزیابی ردپای آب بدست آمده و به جای آب برداشتی، آب آبی مصرفی را نشان می‌دهد، در حالی که دیگر پژوهش‌ها و آمار، اغلب به میزان برداشت و تخصیص آب به بخش‌های مختلف اکتفا نموده‌اند؛ دوم آن‌که، وضعیت کم‌آبی، بر اساس شاخص BWS ، که توسط هوکسترا و همکاران ارائه شده، بررسی شده است (Hoekstra et al., 2011). یکی دیگر از نقاط قوت این پژوهش، که امکان مقایسه‌ی یافته‌های آن را با دیگر پژوهش‌ها ناممکن می‌سازد، تحلیل‌های صورت گرفته در مقیاس‌های مکانی و زمانی ریز می‌باشد؛ این در حالی است که اغلب پژوهش‌ها، به محاسبات در سطح کشوری و در مقیاس سالانه اکتفا نموده‌اند. لکن، یافته‌های این پژوهش، به خوبی نشان می‌دهد که دقت ارزیابی، می‌تواند به شدت نتایج را متاثر سازد. در ادامه، نتایج بدست آمده در سطوح مختلف ارزیابی ارائه می‌شود.

تحلیل‌های سالانه در مقیاس کشوری، نواحی اقلیمی و استانی
جدول ۱، مقادیر ردپای آب آبی ناپایدار و شاخص کمبود آب آبی سالانه را در مقیاس‌های کشوری و نواحی اقلیمی نشان می‌دهد. بر اساس یافته‌های بدست آمده از محاسبات ردپای آب در پژوهش حاضر، از مجموع ۴۵/۵ میلیارد متر مکعب آب آبی مصرفی در بخش کشاورزی، ۲۰/۹ میلیارد متر مکعب (۴۶ درصد) از آن ناپایدار می‌باشد، شاخص BWS در کل کشور و در مقیاس سالانه، برابر با ۱/۹ بوده و از این حیث، ایران در شرایط کمبود آب متوسط قرار دارد.

معادله بر حسب میلی‌متر بر روز بیان شده است. سهم آب سبز و آبی در تمامی این ترم‌ها با لحاظ نسبت بارش به عمق آب آبیاری لحاظ شد (Hoekstra, 2017). سپس، نیاز آبی گیاه به صورت نیاز آبی سبز (ET_{green}, mm) و نیاز آبی آبی (ET_{blue}, mm) محاسبه شده و در نهایت، ردپای آب سبز ($WF_{green.prod}$) و آبی ($WF_{blue.prod}$) در پروسه‌ی تولید محصول به صورت ذیل محاسبه شد:

$$\begin{cases} WF_{green} = \frac{ET_{green}}{Y} \\ WF_{blue} = \frac{ET_{blue}}{Y} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن، Y میزان عملکرد محصول ($kg\ ha^{-1}$) می‌باشد. داده‌های ورودی مورد نیاز در سه بخش به مدل آکوگراپ وارد شد: داده‌های اقلیمی، داده‌های گیاهی و داده‌های محیطی و مدیریتی. با استفاده از آمار هواشناسی روزانه در ۵۲ ایستگاه سینوپتیک در سطح کشور (شکل ۱)، داده‌های بارش، دمای حداقل و حداکثر به مدل وارد شد. همچنین، بر اساس آمار گزارش شده در این ایستگاه‌ها، مقادیر روزانه‌ی تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از رابطه‌ی فائو پنمن-مانتیت در طول دوره‌ی مطالعه محاسبه و سپس به مدل وارد شد. برای هر یک از استان‌های کشور و هر یک از محصول‌های منتخب، مقادیر عملکرد و سطح زیرکشت، تقویم زراعی، شیوه‌ی مدیریت آبیاری و مصرف نهاده‌های کشاورزی، از سازمان جهاد کشاورزی کشور تهیه شد. سایر داده‌های مورد نیاز نیز بر اساس نتایج پژوهش‌های صورت گرفته برای این محصولات در ایران بدست آمد.

با در دست داشتن مقادیر روزانه‌ی ردپای آب آبی برای هر یک از گیاهان مورد نظر در هر سال، ابتدا میانگین وزنی ۱۰ ساله‌ی مقادیر ردپای آب آبی روزانه برای هر گیاه در طول دوره‌ی ۲۰۱۵-۲۰۰۵، و بر اساس مجموع تولید سالانه‌ی آن گیاه در استان منتخب بدست آمد. سپس، مقادیر ماهانه و سالانه‌ی ردپای آب آبی برای تمامی گیاهان تولیدی، در مقیاس استانی، ناحیه‌ی اقلیمی، و کشوری بر حسب میلیون متر مکعب در سال محاسبه شد.

تحلیل پایداری و شاخص کمبود آب آبی

به منظور تحلیل پایداری ردپای آب در یک مقیاس مکانی و زمانی منتخب، ابتدا مقادیر شاخص کمبود آب آبی ($BWS, m^3\ m^{-3}$) از تقسیم مجموع مصارف آب آبی بر میزان آب آبی موجود در آن مکان و زمان بدست آمد (Hoekstra et al., 2011):

$$\begin{cases} BWS_{i,j} = \frac{BWF_{i,j}}{BWA_{i,j}} \\ BWA_{i,j} = NR_{i,j} - EFR_{i,j} \end{cases} \quad (3)$$

که در آن، $BWF_{i,j}$ مقادیر مطلق ردپای آب آبی (m^3) موجودیت آب آبی (m^3)، $NR_{i,j}$ آب آبی تجدیدپذیر (m^3)، و $EFR_{i,j}$ نیاز محیط‌زیستی (m^3) بوده و i و j به ترتیب مبین مقیاس مکانی (استان، ناحیه‌ی اقلیمی، یا کشور) و زمان (ماهانه یا سالانه) می‌باشد.

فراخشک، خشک و مدیترانه‌ای، در وضعیت کمبود آب شدید، و ناحیه اقلیمی نیمه‌خشک در وضعیت کمبود آب اندک قرار داشته و ناحیه اقلیمی مرطوب، فاقد کمبود آب است؛ با بیانی دیگر، موجودیت آب آبی در این ناحیه اقلیمی، پس از کسر نیازهای محیط‌زیستی، بیش‌تر از مصارف سالانه‌ی آب آبی در آن می‌باشد.

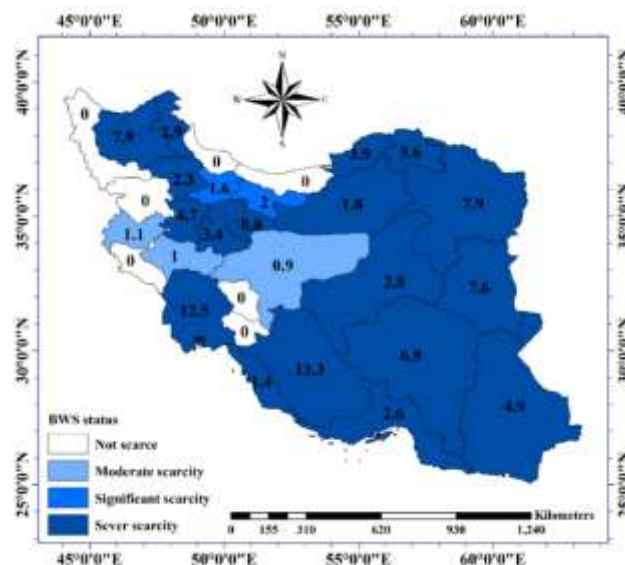
بررسی مقادیر سالانه‌ی BWS در نواحی مختلف اقلیمی ایران نشان می‌دهد که این شاخص، برای نواحی اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای و مرطوب، به ترتیب ۲/۶، ۲/۷، ۱/۲، ۴/۱ و ۰/۷ می‌باشد؛ از نظر طبقه‌بندی صورت گرفته توسط مکونن و هوکسترا (Mekonnen and Hoekstra, 2016)، سه ناحیه اقلیمی

جدول ۱- مقادیر سالانه‌ی آب آبی ناپایدار و شاخص کمبود آب آبی در مقیاس کشوری

مقیاس مکانی	مقادیر آب آبی ناپایدار (میلیارد مترمکعب)	BWS	وضعیت کم‌آبی
کل کشور	20.9	1.9	متوسط
ناحیه اقلیمی فراخشک	3.5	2.6	شدید
ناحیه اقلیمی خشک	15.4	2.7	شدید
ناحیه اقلیمی نیمه خشک	1.7	1.2	کم
ناحیه اقلیمی مدیترانه ای	0.9	4.1	شدید
ناحیه اقلیمی مرطوب	0.0	0.7	فاقد کم‌آبی

مقیاس‌های کشوری و نواحی اقلیمی در دیگر استان‌های کشور نیز مشهود است؛ در ۲۳ استان کشور، مصارف آب آبی بیش‌تر از موجودیت آن پس از کسر نیازهای محیط‌زیستی بوده و مقادیر سالانه‌ی BWS، در محدوده‌ی ۱/۱-۹/۱ تغییر می‌کند. استان‌های اصفهان (اقلیم خشک)، لرستان و کرمانشان (اقلیم نیمه‌خشک) دارای کمبود آب اندک، استان قزوین (اقلیم نیمه‌خشک) دارای کمبود آب متوسط، و سایر استان‌ها دارای کمبود آب شدید هستند. این نتایج، مبین آن است که ریزتر نمودن مقیاس‌های مکانی، واقعیت‌های کمبود آب را با وضوح بیش‌تری به تصویر کشیده و در نتیجه، عدم قطعیت در سیاست‌گذاری‌های صورت گرفته در چگونگی مصرف پایدار آب در بخش کشاورزی را کاهش می‌دهد.

تحلیل مقادیر سالانه‌ی BWS در مقیاس استانی نشان می‌دهد که از مجموع ۳۰ استان کشور، استان‌های مازندران و گیلان (در ناحیه اقلیمی مرطوب)، و استان‌های آذربایجان غربی، چهارمحال و بختیاری، ایلام، کهگیلویه و بویراحمد، و کردستان (جملگی در ناحیه اقلیمی نیمه‌خشک)، فاقد کمبود آب آبی بوده و مقادیر BWS در سایر استان‌های کشور بیشتر از واحد است. علی‌رغم اینکه نتایج تحلیل در مقیاس ناحیه اقلیمی، حاکی از کمبود آب اندک در ناحیه اقلیمی نیمه‌خشک بود، تحلیل در مقیاس استانی نشان می‌دهد که ۵ استان از مجموع ۱۲ استان واقع در این اقلیم، فاقد کمبود آب بوده و مجموع مصارف سالانه‌ی آب آبی در بخش کشاورزی آن‌ها، کم‌تر از آب آبی موجودشان می‌باشد. عدم انطباق یافته‌های حاصل در تحلیل‌های استانی با مقادیر بدست آمده در

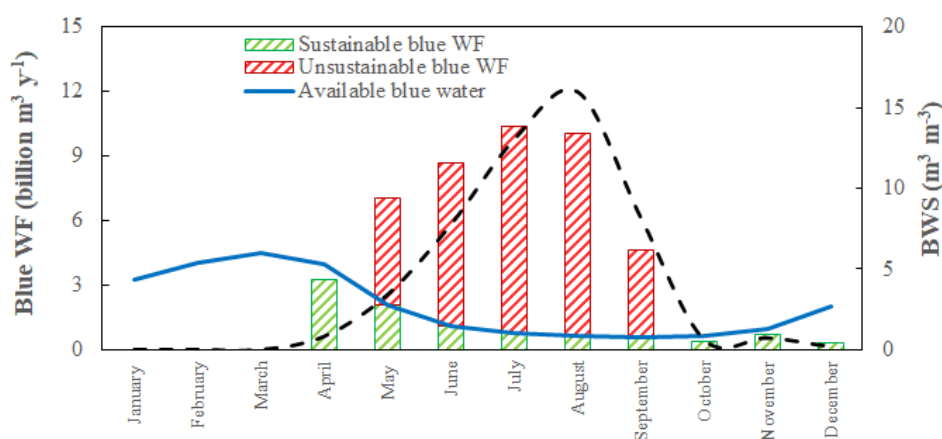


شکل ۲- مقادیر سالانه‌ی شاخص کمبود آبی و سهم در مجموع آب آبی ناپایدار در مقیاس استانی

مصرفی در بخش کشاورزی ناپایدار می‌باشد؛ مقادیر مطلق ردپای آب ناپایدار در این بازه‌ی زمانی، بین ۴/۱ میلیارد مترمکعب (در ماه می) تا ۹/۶ میلیارد متر مکعب (در ماه جولای) متغیر است. بر اساس مقادیر ماهانه‌ی شاخص BWS، ایران در طول این ماه‌ها، همواره با کمبود آب شدید مواجه بوده ($BWS > 2$) که دلیل عمده‌ی آن، انطباق ماه‌های مذکور با فصل کشت بخش عمده‌ای از گیاهان زراعی و باغی در کشور از یک سو (Karandish and Hoekstra, 2017)، و بالاتر بودن مقادیر نیاز آبی این گیاهان در این بازه‌ی زمانی از سوی دیگر (Karandish and Mousavi, 2018) می‌باشد.

تحلیل‌های ماهانه در مقیاس‌های کشوری، نواحی اقلیمی و استانی

شکل ۳، مقادیر ماهانه‌ی ردپای آب آبی پایدار و ناپایدار و شاخص BWS در مقیاس کشوری را نشان می‌دهد. برخلاف تحلیل‌های سالانه، که وضعیت کم‌آبی در کل کشور را متوسط بیان می‌دارد، تحلیل در مقیاس ماهانه حاکی از وجود ماه‌هایی بدون کم‌آبی و ماه‌هایی با کم‌آبی شدید می‌باشد. بر اساس شکل ۳، مصارف آب آبی در ماه‌های ژانویه تا آپریل، و اکتبر تا دسامبر، کمتر از آب آبی موجود بوده و تمامی ردپای آب آبی در این ماه‌ها، پایدار می‌باشد ($BWS < 1$). در بازه‌ی ماه‌های می تا سپتامبر، ۷۰ تا ۹۳ درصد از مجموع آب



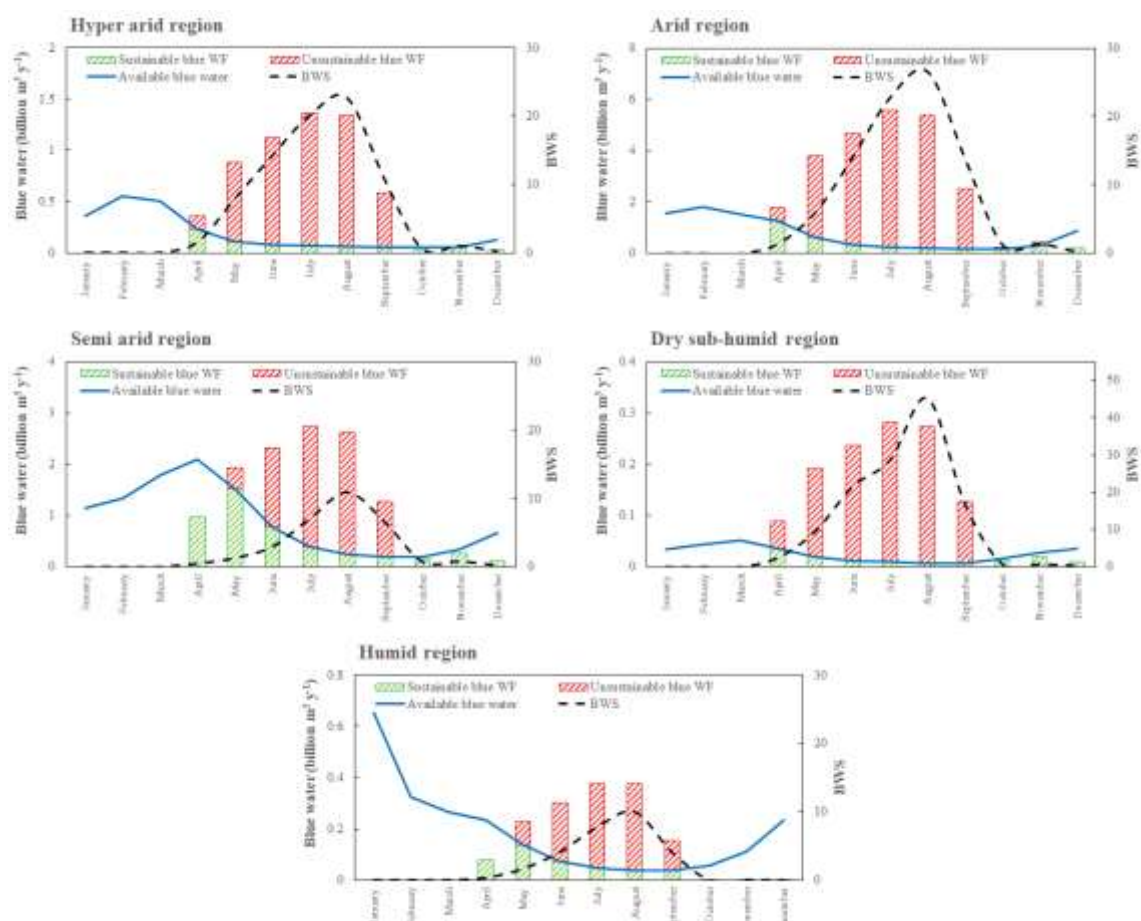
شکل ۳- مقادیر ماهانه‌ی ردپای آب آبی پایدار و ناپایدار و شاخص کمبود آب آبی در مقیاس کشوری

می‌شود. شکل ۴ همچنین نشان می‌دهد که در تمامی نواحی اقلیمی، دامنه‌ی تغییرات مقادیر ماهانه‌ی شاخص BWS در نواحی اقلیمی مختلف، بسیار فراتر از مقادیر سالانه‌ی آن بوده و بین ماه‌های مختلف، از نظر سهم‌شان در مجموع ردپای آب آبی ناپایدار سالانه، اختلاف بارزی وجود دارد. همچنین، دامنه‌ی نوسانات مقادیر ماهانه‌ی BWS در کل کشور بین ۱۶-۰ بود؛ لکن این شاخص در نواحی اقلیمی مختلف، در محدوده‌ی ۴۵-۰ تغییر می‌کند. این یافته‌ها، اهمیت تحلیل‌های کم‌آبی در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر را مشهود می‌سازد. شکل ۵ پراکنش مکانی مقادیر ماهانه‌ی شاخص BWS در سطح کشور و سهم هر استان در مجموع ردپای آب آبی ماهانه در کشور را نشان می‌دهد. از جمله مهم‌ترین یافته‌های حاصل در تحلیل ماهانه‌ی شاخص BWS در سطح استانی آن است که حتی در ماه‌های آپریل (۱۵ استان)، اکتبر (۱۳ استان) و نوامبر (۱۴ استان)، که در سایر تحلیل‌ها به عنوان ماه‌های غیربحرانی شناخته شده‌اند ($BWS < 1$), نیز بخش‌هایی از کشور با مشکل کم‌آبی اندک تا شدید مواجه هستند. بر اساس یافته‌های این بخش، ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست را

شکل ۴، مقادیر ماهانه‌ی ردپای آب آبی پایدار و ناپایدار و شاخص BWS در مقیاس ناحیه‌ی اقلیمی را به تصویر می‌کشد. بر اساس این شکل، مقادیر ماهانه‌ی ردپای آب آبی ناپایدار در نواحی اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه‌خشک، مدیترانه‌ای و مرطوب، به ترتیب در محدوده‌های ۱/۳ - ۰/۱۳، ۵/۳۲ - ۰/۰۵، ۲/۳۹ - ۰/۴۲، ۰/۲۷ - ۰/۰۵ و ۰/۳۴ - ۰/۰۹ میلیارد مترمکعب در ماه قرار دارد؛ ماه‌های بحرانی در ناحیه‌ی اقلیمی فراخشک، در بازه‌ی زمانی آپریل تا سپتامبر، در اقلیم خشک در محدوده‌ی آپریل تا نوامبر، و در سایر نواحی اقلیمی، در حدفاصل ماه‌های می تا سپتامبر واقع شده است. شکل ۴ به خوبی نشان می‌دهد که اگرچه در مقیاس زمانی سالانه، ناحیه‌ی اقلیمی مرطوب، فاقد کمبود آب به نظر می‌رسد، لکن بر اساس تحلیل‌های ماهانه، این ناحیه در حدفاصل ماه‌های ژوئن تا سپتامبر از کمبود آب آبی شدید رنج می‌برد که دلیل عمده‌ی آن، کشت برنج در سطحی وسیع می‌باشد. همچنین، در ناحیه‌ی اقلیمی خشک، که مقدار سالانه‌ی BWS در طبقه‌ی کمبود آبی اندک قرار داشت، در ماه‌های آپریل تا سپتامبر، کمبود آبی شدید مشاهده

ماه‌های ژانویه تا مارچ و ماه دسامبر، شاخص BWS کم‌تر از یک بوده و کم‌آبی وجود ندارد.

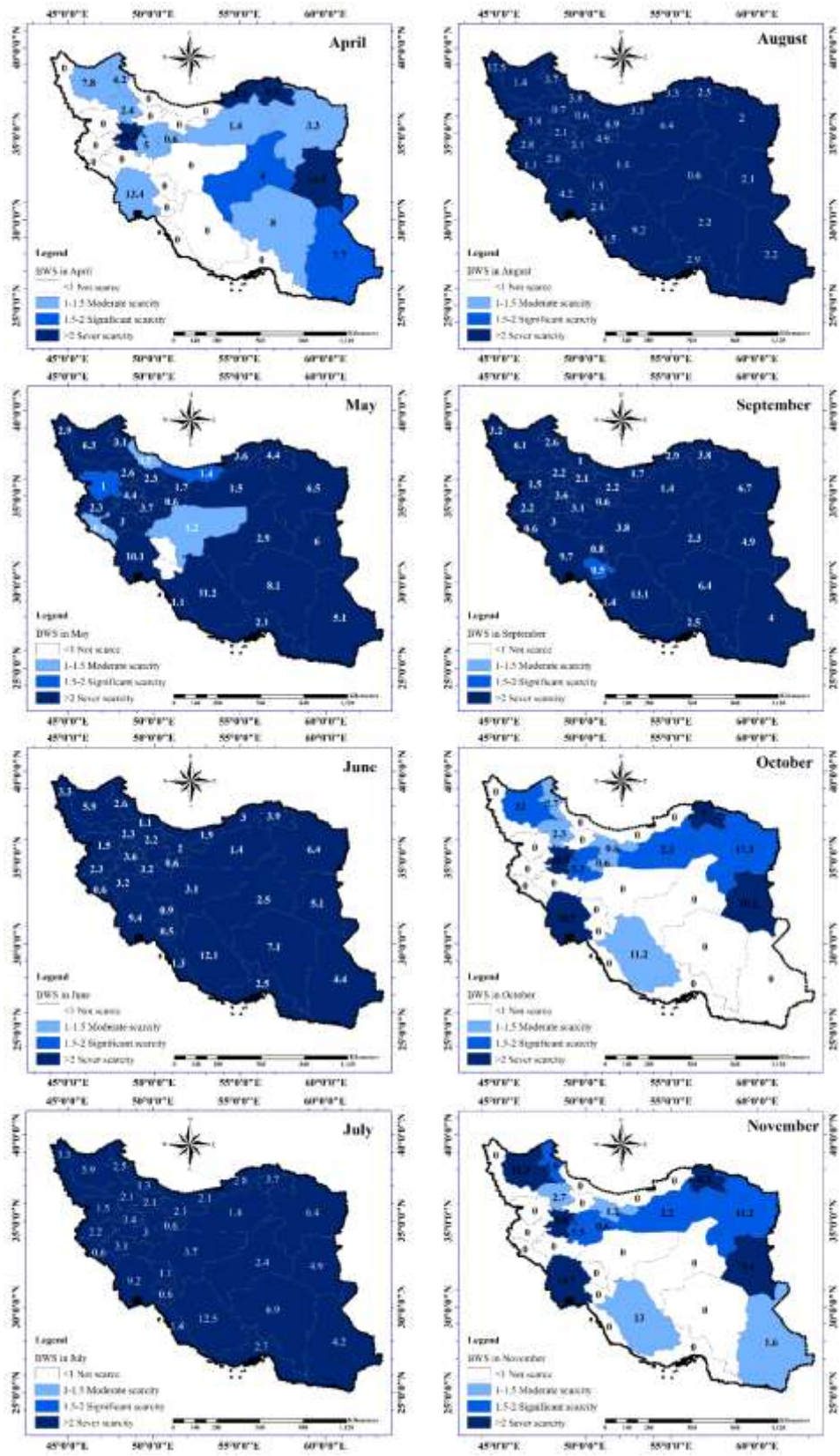
می‌توان از جمله بحرانی‌ترین ماه‌های سال برشمرد که طی آن‌ها، تمامی کشور دستخوش کم‌آبی شدید هستند. این در حالی است که در



شکل ۴- مقادیر ماهانه‌ی ردپای آب آبی پایدار و ناپایدار و شاخص کمبود آب آبی در مقیاس ناحیه‌ی اقلیمی

و دارای پتانسیل کافی برای توسعه‌ی کشت دیم می‌باشند، لکن، تمرکز کشاورزان در این مناطق، اغلب به دلیل منافع اقتصادی، بر روی تولید محصولات آب‌بری همچون برنج بوده که در نهایت، باعث بروز کم‌آبی‌های شدید در فصل تابستان شده است. در بسیاری دیگر از استان‌های کشور نیز فراتر رفتن میزان تقاضا برای آب آبی از میزان موجودیت آب آبی، به دلیل وجود الگوی کشت ناصحیح بوده و نیازمند بازنگری‌های اساسی برای توسعه‌ی پایدار می‌باشد. این نتیجه با یافته‌های کاراندیش و هوکسترا، که به اهمیت تدوین الگوی کشت بهینه متناسب با منابع آب موجود کشور اشاره داشته‌اند، همخوانی دارد (Karandish and Hoekstra, 2017).

مهم‌ترین عوامل موثر بر BWS، یکی موجودیت آب آبی، و دیگری، مصارف آب آبی می‌باشد. اگرچه ماهیت برخی استان‌ها، همچون استان‌های واقع در ناحیه‌ی اقلیمی فراهشک، کم‌آب است، لکن فراتر رفتن شاخص BWS از یک و ایجاد کم‌آبی در بسیاری از استان‌های ایران، به دلیل مصارف ناصحیح از منابع آب آبی می‌باشد. توسعه‌ی کشاورزی آبی، و کشت گیاهان با ردپای آب بالا، از جمله مهم‌ترین دلایل افزایش مصرف آب آبی در کشاورزی محسوب می‌شود. به عنوان نمونه، توسعه‌ی کشت برنج در استان‌های شمالی کشور، به ویژه در استان گلستان، مهم‌ترین دلیل ایجاد کم‌آبی شدید در این نواحی، علی‌رغم داشتن سهمی قابل توجه در مجموع منابع آب تجدیدپذیر کشور، می‌باشد. اگرچه این استان‌ها در نواحی پربارش واقع



شکل ۵- پراکنش مکانی مقادیر ماهانه‌ی شاخص BWS در سطح کشور و سهم هر استان در مجموع ردهای آب آبی ماهانه در کشور

مقایسه‌ی تعداد نقاط بحرانی تحت مقیاس‌های بررسی شده‌ی مختلف

جدول ۲، تعداد نقاط بحرانی تحت مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف بررسی شده را نشان می‌دهد. یک نقطه‌ی بحرانی، یک مکان و یا زمان معینی است که در آن، مجموع مصارف آب آبی، بیش‌تر از موجودیت آب آبی بوده و در نتیجه، شاخص BWS فراتر از یک خواهد بود (Hoekstra et al., 2011). در مقیاس سالانه، تعداد نقاط بحرانی تحت مقیاس‌های مکانی کشوری، ناحیه‌ی اقلیمی و استانی، به ترتیب، ۱، ۴ و ۲۳ مورد خواهد بود؛ در مقیاس ماهانه، تعداد این نقاط تحت مقیاس‌های مکانی کشوری، ناحیه‌ی اقلیمی و استانی، به ترتیب، ۵، ۳۱ و ۳۷ مورد خواهد بود. همچنین، وضعیت کم‌آبی نیز تحت بررسی‌های مختلف با یکدیگر فرق خواهد داشت. در بررسی صورت گرفته در مقیاس سالانه و در کل کشور، شاهد کم‌آبی متوسط در سرتاسر سال خواهیم بود؛ این در حالی است که بررسی‌های صورت گرفته در مقیاس‌های ریزتر، عدم وجود کم‌آبی در برخی مکان‌ها و زمان‌ها از یک‌سو، و تنوع وضعیت کم‌آبی در نقاط بحرانی از سویی دیگر را نشان می‌دهد. به این ترتیب، هرگونه ارزیابی صورت گرفته در مقیاس‌های مکانی و زمانی ریزتر، متضمن کاهش احتمال شکست در برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آب، و تطابق بیش‌تر آن با وضعیت واقعی حاکم در کشور خواهد بود.

چنین بازنگری‌هایی بدون شک، نیازمند تحلیل‌های جامع از وضعیت منابع آب در کشور می‌باشد. در چنین تحلیل‌هایی، انتخاب مقیاس بدون شک نقش مهمی خواهد داشت؛ نتایج این پژوهش نیز حاکی از وجود اختلاف‌های قابل توجه در تخمین شاخص BWS در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف می‌باشد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های تحلیل‌های شاخص BWS در مقیاس‌های مکانی و زمانی ریزتر، یافتن نقاط بحرانی واقعی از یک‌سو، و یافتن نواحی بی‌خطر برای تدوین برنامه‌های توسعه می‌باشد. در حقیقت، همانگونه که در نواحی بحرانی، باید با محدود مصارف آب آبی و تامین نیازهای محیط‌زیستی، زمینه‌های توسعه‌ی پایدار را فراهم نمود، می‌توان در نواحی ایمن، که مقدار BWS در آن‌ها کم‌تر از یک بوده و آب آبی کافی برای مصارف فعلی وجود دارد، برنامه‌ریزی‌های توسعه متناسب با پتانسیل منطقه را پایه‌ریزی نمود. یافته‌های این پژوهش نیز به خوبی نشان می‌دهد که در تخمین‌های صورت گرفته بر اساس ارزیابی‌های بزرگ مقیاس، به دلیل پنهان شدن تغییرات زمانی و مکانی BWS در محدوده‌ی پژوهش و در طول دوره‌ی بررسی، دامنه‌ی عدم قطعیت برنامه‌های توسعه افزایش یافته و احتمال شکست در آن‌ها افزایش خواهد یافت؛ این در حالی است که در تخمین‌های صورت گرفته بر اساس ارزیابی‌های کوچک مقیاس، امکان برنامه‌ریزی‌های بهتر متناسب با ماهیت واقعی‌تر کم‌آبی فراهم خواهد شد.

جدول ۲- تعداد نقاط بحرانی و وضعیت کم‌آبی تحت مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف

وضعیت کم‌آبی				تعداد نقاط بحرانی (BWS>1)	تعداد نقاط بررسی شده	مقیاس مکانی	مقیاس زمانی
کم‌آبی شدید BWS≥2	کم‌آبی متوسط 1.5≤BWS<2	کم‌آبی اندک 1≤BWS<1.5	بدون کم‌آبی BWS<1				
0	1	0	0	1	1	کشوری	سالانه
3	0	1	1	4	5	ناحیه اقلیمی	سالانه
18	2	3	7	23	30	استانی	سالانه
5	0	0	7	5	12	کشوری	ماهانه
24	2	5	29	31	60	ناحیه اقلیمی	ماهانه
154	15	22	169	37	360	استانی	ماهانه

نتیجه‌گیری

سالانه در کل کشور، مقدار شاخص در محدوده‌ی کم‌آبی متوسط قرار دارد، در بررسی‌های ریزمقیاس، بخش‌هایی از کشور فاقد کم‌آبی بوده و همچنین، وضعیت کم‌آبی در نقاط بحرانی از اندک تا شدید متغیر است. بر اساس یافته‌های این پژوهش، داشتن درک صحیح از وضعیت مصرف آب آبی و شرایط کم‌آبی، نیازمند بررسی شاخص BWS در مقیاس‌های مکانی و زمانی کوچک بوده و هرگونه افزایش در دقت‌های مکانی و زمانی، خطر شکست برنامه‌ریزی‌های کوتاه و بلندمدت منابع آب را کاهش خواهد داد.

در این پژوهش، وضعیت پایداری و ناپایداری ردپای آب آبی، و کم‌آبی در ایران، بر اساس ارزیابی ردپای آب و شاخص BWS در مقیاس‌های مکانی مختلف (کشوری، ناحیه‌ی اقلیمی و استانی) و زمانی (سالانه و ماهانه) بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که تغییر مقیاس‌های منتخب، می‌تواند تعداد نقاط بحرانی را بین ۱ تا ۳۷ مورد تغییر دهد همچنین، علی‌رغم این‌که بر اساس بررسی‌های

- patterns to reduce water consumption and pollution in cereal production in Iran. *J hydrology*. 586, 124881. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124881.
- Karandish, F., and Mousavi, S.S. 2018. Climate change uncertainty and risk assessment in Iran during twenty-first century: evapotranspiration and green water deficit analysis. *Theor Appl Climatol*. 131: 777-791.
- Mekonnen, M.M., and Hoekstra, A.Y. 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), doi.org/10.1126/sciadv.1500323
- Nouri, H., Borujeni, S.C., and Hoekstra, A.Y. 2019. The blue water footprint of urban green spaces: An example for Adelaide, Australia. *Landscape Urban Plann*. 190. doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103613.
- Nouri, H., Stokvis, B., Chavoshi, S., and Hoekstra, A.Y. 2020. Reduce blue water scarcity and increase nutritional and economic water productivity through changing the cropping pattern in a catchment. *J. Hydrol*. 588, doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125086
- Pfister, S., Koehler, A., and Hellweg, S. 2009. Assessing the Environmental Impacts of Freshwater Consumption in LCA. *Environ. Sci. Technol*. 43: 4098-4104.
- Vorosmarty, C.J., Fekete, B.M., Meybeck, M., Lammers, R.B., 2000. Geomorphometric attributes of the global system of rivers at 30-minute spatial resolution. *J. Hydrol*. 237: 17-39.
- WEF. 2015. World Economic Forum, Global Risks 2015, 10th Edition (World Economic Forum, Geneva, Switzerland, 2015)
- Zhuo, L., Hoekstra, A.Y., Wu, P.T., and Zhao, X.N. 2019. Monthly blue water footprint caps in a river basin to achieve sustainable water consumption: The role of reservoirs. *Sci. Total Environ*. 650: 891-899.
- 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.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M. 2011. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. Earthscan, London, UK.
- Hoekstra, A.Y. 2016. A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecol. Indicators* 66: 564-573.
- Hoekstra, A.Y. 2017. Water Footprint Assessment: Evolvement of a New Research Field. *Water Resour. Manage*. 31, 3061-3081.
- Hoekstra, A.Y., Mekonnen, M.M., Chapagain, A.K., Mathews, R.E., and Richter, B.D. 2012. Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprints versus Blue Water Availability. *PLoS ONE*, 7.
- Hogeboom, R.J., de Bruin, D., Schyns, J.F., Krol, M.S., and Hoekstra, A.Y. 2020. Capping Human Water Footprints in the World's River Basins. *Earths Future*. doi.org/10.1029/2019EF001363.
- IMAJ. 2020. Iran's Ministry of Agriculture Jihad, Tehran, Iran, www.maj.ir.
- 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): 831. doi.org/10.3390/w9110831.
- Karandish, F., Hoekstra, A.Y., and Hogeboom, R.J. 2020. Reducing food waste and changing cropping

Investigating the Influence of Spatial and Temporal Resolutions in Water Footprint Assessment on Blue Water Scarcity Index in Iran

F. Karandish¹

Received: Jun.25, 2020

Accepted: Jul.14, 2020

Abstract

Iran, is amongst the arid and semi-arid regions of the world, suffering from blue water scarcity. Hence, sustainable development in Iran requires modifying blue water consumption pattern, and on the other hand, all water resources consumption planning requires a proper knowledge about the water scarcity status in different regions of the country. In this study, for the first time, water scarcity status is assessed based on the blue water scarcity index (BWS) under different temporal resolutions, including annual and monthly scales, and different spatial resolutions, including national, climate-regions, and provincial scales. In this regard, total blue water consumption was first estimated on a daily basis for different provinces over the period 2005-2015, and then was divided by blue water availability to estimate BWS. A $BWS < 1$ indicates non-scarcity status, and $1 \leq BWS < 1.5$, $1.5 \leq BWS < 2$, and $BWS > 2$ indicate, low, moderate, and severe water scarcity, respectively. Every place or any time scale with $BWS > 2$ is called a hotspot. Based on the annual assessment for the entire country 46% of total blue water consumption in the agricultural sector is unsustainable, and is consumed at the cost of violating environmental flow requirements; under such conditions, the BWS is 1.9 and the entire country is under moderate water scarcity. However, based on the annual assessments at finer spatial resolutions, the humid climatic region and 7 provinces do not experience blue water scarcity. Besides, there are non-hotspots for all considered spatial scales under monthly assessments. Based on the findings of this study, changing the resolution of the BWS assessments will change the number of hotspots in the range of 1 to 37, and will change the status of these hotspots as well. Hence, properly diagnosing the actual hotspots, in which environmental flow requirements are not satisfied due to unsustainable blue water consumption, requires assessments at the possible finest spatial and temporal scales.

Keywords: Iran, Classifying water scarcity status, Blue water availability, Environmental flow requirements, Unsustainable blue water footprint

1- Associate Professor in Water Engineering Department, University of Zabol, Zabol
Email: Karandish_h@yahoo.com