نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۲، مهر - آبان ۱۳۹۷، ص. ۹۶۹-۹۵۴

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 12, Oct.-Nov. 2018, p. 954-969

تحلیل سناریوهای مدیریتی در تولید و مصرف صحیح گندم در ایران از دیدگاه ردپای آب: چالش‌ها و فرصت‌ها

فاطمه کاراندیش[۱]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۴/۱۰

چکیده

الگوی ناصحیح تولید و مصرف گندم، مهم‌ترین محصول در سبد غذایی جهانیان، سهم بسزایی در وقوع چالش‌های فعلی آب، به ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشک دارد. در پژوهش حاضر، ضمن شناسایی و تحلیل چالش‌های فعلی در پروسه‌ی تولید و مصرف گندم در ایران از دیدگاه ردپای آب، به معرفی فرصت‌ها و تحلیل کمی سناریوهای مدیریتی با هدف تعدیل حد وخامت فعلی پرداخته شد. در یک بازه‌ی ۳۱ ساله در حدفاصل سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۶۰، مقادیر ردپای آب آبی، سبز و خاکستری در هر دو پروسه‌ی تولید و مصرف گندم، و متعاقبا، بیلان آب مجازی در نتیجه‌ی مبادله‌های ملی و بین‌المللی گندم محاسبه شد. تمامی محاسبه‌ها در سطح استانی، و بر اساس آمار رسمی منتشر شده توسط سازمان‌های درون و برون کشوری انجام شد. بر اساس میانگین کشوری، همگام با ۴۳ درصد کاهش در سهم آب سبز در پروسه‌ی تولید گندم در طول دوره‌ی مطالعه، سهم آب آبی ۷۳/۴ درصد افزایش یافت. به ازای استعمال کودهای نیتروژنه برای تولید هر تن گندم در کشور، ۱۷۲۷ مترمکعب آب نیاز خواهد بود تا نیتروژن مازاد در منابع آب آبی را به کم‌تر از حد استاندارد ۳/۱ میلی‌گرم بر لیتر برساند، که این مقدار، ۱/۲ برابر بیش‌تر از زمانی است که کاهش بار فسفر در منابع آب مدنظر باشد. علی‌رغم کاهش ردپای آب کل در پروسه‌ی مصرف گندم در سال ۱۳۹۰، سهم آب آبی ۲۱ درصد افزایش یافت. با ۱۴۲ درصد افزایش، مجموع مبادله‌های درون کشوری آب مجازی گندم به ۹/۶۴ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۹۰ رسید که سهم آب آبی در آن با ۲۱ درصد افزایش در مقایسه با سال ۱۳۶۰، ۳/۹۲ میلیارد مترمکعب بود. در شرایط فعلی، در هشت استان کشور، ظرفیت کافی برای حمل بار آلودگی ورودی از مزارع تحت کشت گندم وجود ندارد. هم‌چنین، در پنج استان کشور از دیدگاه مصرف، و سه استان از دیدگاه تولید، ردپای آب گندم فراتر از حجم منابع آبی تجدیدپذیر است. بر اساس هر دو شاخص حد آلودگی و کمبود آب آبی، نواحی خشک و نیمه‌خشک باید هنگام تدوین سناریوهای سازگاری، در اولویت قرار بگیرند. علاوه تاثیر بسزای روش‌های مدیریتی در اصلاح الگوی تولید گندم، با هدف ارتقای بهره‌وری آب و محصول، اصلاح الگوی مصرف نیز تاثیر قابل توجهی در تعدیل وخامت فعلی داشت. پسماندهای غذایی گندم در سال‌های ۱۳۶۰ و ۱۳۹۰، به‌ترتیب ۰/۸۷ و ۱/۶ میلیارد مترمکعب از منابع آبی را تلف نمود. در این سال‌ها، بار آلودگی مضاعف ورودی به منابع آبی در نتیجه‌ی تلفات گندم به‌ترتیب، ۰/۷۵ و ۱/۶۳ میلیارد مترمکعب بود. هم‌چنین، اصلاح الگوی مبادله‌های درون کشوری بر اساس شاخص ردپای آب، با هدف افزایش صادرات گندم از مناطق پرآب به مناطق کم‌آب می‌تواند تا ۴/۳۶ میلیارد مترمکعب کاهش در مصرف آب آبی ایجاد نماید. علاوه بر آن، گسترش دامنه‌ی بین‌المللی تجاری گندم و انتخاب شرکای تجاری از میان کشورهایی با ردپای آب کم‌تر در پروسه‌ی تولید گندم می‌تواند ۲۱/۴-۰/۱ برابر کاهش در میزان فشار بر منابع آب آبی جهان به ازای هر تن واردات گندم ایجاد نماید. بر اساس یافته‌ها می‌توان دریافت که با پایه‌گذاری سیاست‌های صحیح، امکان دست‌یابی به محیط زیست پایدار در مناطق تولید کننده و مصرف کننده‌ی گندم وجود خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: الگوی تولید و مصرف گندم، تجارت آب مجازی، ردپای آب آبی، ردپای آب خاکستری، ردپای آب سبز

مقدمه

کاهش سرانه‌ی مصرف منابع آب شیرین به دلایل متعدد طبیعی و مدیریتی، به یکی از مهم‌ترین معضل‌های جهانی در دهه‌های اخیر تبدیل شده و این مهم، پیآمدهای ناگوار قابل توجهی در بخش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در بسیاری از مناطق جهان، به ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک به همراه داشته است (Zhang et al., 2014; Van Oel and Hoekstra., 2012; Ridoutt and Pfister., 2010). نگاهی به روند مصرف منابع طبیعی در سال‌های گذشته نشان می‌دهد که مداخله‌ی بشر در چرخه‌ی طبیعی آب، پروسه‌ی تخریب زیست‌بوم جهان را تسریع بخشیده و با استحصال منابعی فراتر از قابلیت زمین، آثار مخربی فراتر از حدانتظار بر محیط زیست گذاشته است (Galli et al., 2012). بسیاری از محققان بر این

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه زابل
Email: Karandish_h@yahoo.com

باورند که بخش اعظم چالش‌های کنونی آب در دنیا، اغلب ناشی از مصرف فزاینده‌ی منابع آب شیرین و گاهی مصرفی فراتر از حد مجاز از این منابع توسط بشر در پروسه‌ی تولید و مصرف محصولات کشاورزی می‌باشد (Karandish and Hoekstra., 2017; Lovarelli et al., 2016; Ridoutt and Pfister., 2010). بر اساس آمارهای جهانی، بین ۷۰ درصد از کل منابع آب استحصال شده در کشورهای توسعه یافته و صنعتی تا بیش‌از ۹۰ درصد از آن در کشورهای در حال توسعه به بخش کشاورزی اختصاص داده می‌شود (FAO., 2012). در این میان، غلات و فرآورده‌های آن، به دلیل داشتن جایگاه نخست در سبد غذایی مردم، سهم بیش‌تری در مجموع مصارف منابع آب شیرین داراست. بر اساس گزارش‌های منتشر شده از سوی سازمان خواروبار جهانی در سال ۲۰۱۰، بیش از ۵۰ درصد از مجموع غذای مصرفی در جهان از غلات و فرآورده‌های آن بدست آمد. هم‌چنین، کاراندیش و هوکسترا بیان داشتند که از میان ۲۶ محصول غالب مصرفی توسط ایرانیان، غلات بیش‌ترین سهم را در رژیم غذایی افراد این جامعه داشت (Karandish and Hoekstra., 2017). به همین دلیل، تدوین و اتخاذ هرگونه سناریوی مدیریتی بهینه در تخصیص و مصرف منابع آبی در پروسه‌ی تولید و مصرف غلات می‌تواند راهکار موثر و کارآمدی در صرفه‌جویی منابع آب شیرین در بخش کشاورزی محسوب شده و با اختصاص آن به بخش صنعتی، توسعه‌ی قابل‌توجهی در این بخش را به همراه داشته باشد.

اگرچه در پی وقوع چنین بحران‌هایی، دغدغه‌ی اصلی محققان، سیاست‌مداران و تصمیم‌گیرندگان در بخش‌های دولتی و خصوصی، همواره تحلیل چالش‌ها و ارایه‌ی دیدگاه‌های کارآمد در راستای دست‌یابی به توسعه‌ی پایدار منابع آبی بوده، اما این دیدگاه‌ها در بخش کشاورزی اغلب معطوف به بخش تولید بوده و مدیریت توامان عرضه و تقاضای آب در این بخش کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. از میان شاخص‌ها و روش‌های متعددی هم‌چون ارزیابی چرخه‌ی حیات، ردپای آب کربن و ردپای اکولوژیکی آب، که با هدف تحلیل چالش‌ها و ارایه راهبردها توسعه داده شده است، شاخص ردپای آب، یکی از شاخص‌های نوین و جامعی است که پس از بیان نظریه‌ی آب مجازی در سال ۱۹۹۸ (Allan., 1998)، توسط هوکسترا در سال ۲۰۱۳ ارایه شد (Hoekstra., 2013). این شاخص، علاوه بر داشتن بعدهای زمانی و مکانی، قادر است زنجیره‌ی تولید و مصرف را در فرآیندهای متعدد بشری به صورت جامع درنظر گرفته و پایداری منابع آب را از دیدگاه‌های مختلفی هم‌چون دیدگاه‌های اقتصادی، زیست-محیطی، عدالت اجتماعی و کارآمدی سیستم عرضه و مصرف منابع آبی ارزیابی نماید.

ردپای آب، اغلب به صورت مجموع آب مصرفی در پروسه‌ی تولید یک کالا ($m^3\ t^{-1}$) و یا به صورت حجم آب مصرفی در طول یک سال توسط افراد یک جامعه‌ی معین ($m^3\ y^{-1}$) بیان می‌شود. این جامعه، متناسب با هدف ارزیابی، می‌تواند سطوح مختلفی از خرد تا کلان را شامل شود. بیان ردپای آب به صورت مترمکعب بر سال بیانگر آن است که علاوه بر لحاظ مجموع آب مصرفی در پروسه تولید کالاها در داخل جامعه‌ی منتخب، سهم مبادلات داخلی و بین‌المللی آب مجازی در فرآیند مصرف منابع آبی جهان توسط افراد این جامعه نیز در نظر گرفته می‌شود. به همین دلیل این شاخص، معیار بهتری از میزان سرانه‌ی فشار واقعی اعمال شده توسط هر یک از افراد جهان بر مجموع منابع آب شیرین در سطح دنیا می‌باشد.

ردپای آب در فرآیند تولید، مصرف و یا خدمات، با سه مولفه‌ی ردپای آب سبز، ردپای آب آبی و ردپای آب خاکستری توصیف می‌شود. ردپای آب سبز، میزان آبی است که بدون صرف انرژی، از طریق بارندگی مصرف می‌شود، و ردپای آب آبی، میزان آبی است که با صرف انرژی، از طریق منابع آب سطحی و یا زیرزمینی در فرآیند تولید و مصرف یک کالا و یا خدمات مصرف می‌شود. آب خاکستری، که به صورت حجم آب مورد نیاز در حذف آلودگی‌های وارد شده به منابع آب شیرین و رساندن غلظت آلودگی‌ها به حد مجاز تعریف شده است، اهمیت زیادی از دیدگاه زیست‌محیطی داشته و امکان ارزیابی بقای پایدار یک اکوسیستم را در نتیجه‌ی مداخله‌ی بشر تعیین می‌کند. این تعریف‌ها نشان می‌دهد که استفاده از شاخص ردپای آب در تحلیل منابع آبی یک جامعه، امکان تحلیل وضعیت پایداری منابع آب سبز، منابع آب آبی و پایداری زیست‌محیطی منابع آب قابل استحصال را میسر ساخته و علاوه بر مشهود ساختن چالش‌های فعلی به صورت کمی، می‌تواند پتانسیل‌های بهبود را تعیین نموده و امکان ارزیابی کمی آثار محتمل اتخاذ راهکارهای پیشنهادی بر وضعیت منابع آبی کشور را فرآهم آورد. به همین منظور، در طول سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی مبتنی بر کاربرد شاخص ردپای آب در تدوین الگوی پایدار مصرف منابع آب شیرین در بخش‌ها تولید و مصرف کالاها و خدمات در یک جامعه‌ی معین صورت گرفته است. اولین پژوهش بر اساس این شاخص، توسط هوکسترا و هونگ در سال ۲۰۰۲ و با هدف تخمین مجموع آب مصرفی در پروسه‌ی تولید محصولات مهم برای مصارف انسانی و تعیین حجم مبادلات آب مجازی در بین کشورهای مختلف جهان صورت گرفت. در این پژوهش، تمرکز اصلی تنها بر محاسبه‌ی ردپای آب کل بوده و تفکیک آن به اجزای اصلی‌اش صورت نگرفت. بر اساس نتایج ایشان، ۶۹۵ میلیارد مترمکعب آب مجازی در بازه‌ی سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۹۵ در نتیجه‌ی مبادلات غذایی بین کشورها جابجا شد. با بیانی دیگر، ۱۳ درصد از مجموع آب مصرفی در پروسه‌ی تولید محصولات کشاورزی، توسط جوامع بشری در خارج از مراکز تولید این محصول‌ها مصرف شد. پس از آن، پژوهش‌های وسیع‌تری صورت گرفت و محققان بسیاری تلاش نمودند که با بکارگیری شاخص ردپای آب، ضمن تحلیل وضعیت فعلی مصرف در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعتی

و شهری، راهکارهای مدیریتی برای دست‌یابی به توسعه‌ی پایدار از دیدگاه‌های مختلف در جوامع بشری ارایه دهند (eg. Chukalla et al., 2018, Karandish and Hoekstra., 2017; Zhuo et al., 2016; Chukalla et al., 2015; Mekonnen and Hoekstra., 2014; Hoekstra., 2013).

نگاهی به تحقیق‌های گذشته نشان می‌دهد که انجام پژوهشی جامع از دیدگاه ردپای آب در ایران و ارایه‌ی راهکارهای مدیریتی در تعدیل مصارف آبی در پروسه‌ی تولید و مصارف محصولات کشاورزی، به ویژه بر اساس داده‌های واقعی در سطح کشور، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. به همین دلیل، در پژوهش حاضر، ضمن تحلیل شرایط فعلی در پروسه‌ی تولید و مصرف گندم، به عنوان محصول غالب در رژیم غذایی ایرانیان، بر اساس ارزیابی‌های زمانی و مکانی، به شناسایی چالش‌ها و ارایه‌ی دیدگاه‌های نوین در تولید و مصرف پایدار غلات از دیدگاه ردپای آب پرداخته شد.

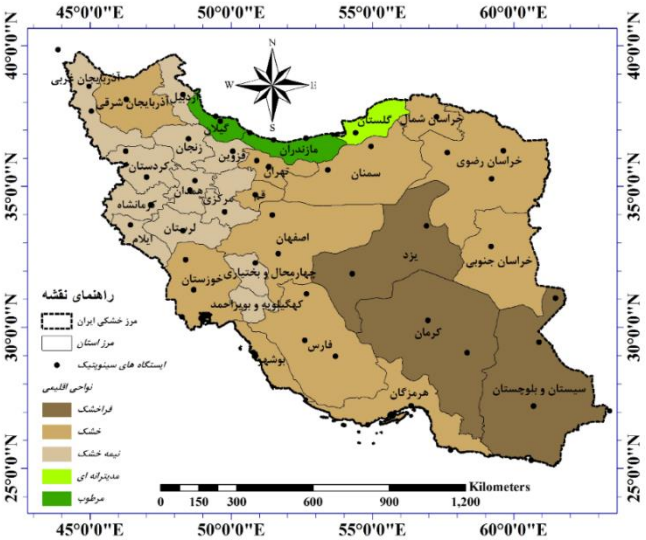
مواد و روش‌ها

قلمروی زمانی و مکانی پژوهش

کشور ایران، به عنوان دومین کشور بزرگ خاورمیانه است (شکل ۱)، که از یک سو، به دلیل واقع شدن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، و از سویی دیگر به دلایل ضعف‌های مدیریتی در تخصیص و مصرف آب به ویژه در بخش کشاورزی، با مشکل‌های حاد کمبود آب در سال‌های اخیر مواجه شده است. ایران از دیدگاه طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای پنج ناحیه‌ی اقلیمی فراخشک، خشک، نیمه‌خشک، مرطوب و مدیترانه‌ای بوده و نواحی اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، بیش‌ترین سهم را در خشکی‌های ایران دارد. بر اساس آمار منتشر شده از سوی سازمان جهاد کشاورزی، غلات، مشتمل بر گندم، برنج، ذرت و جو، سهم غالب در مجموع سطوح زیرکشت و تولید در کشور داشته و بخش اعظم آن در نواحی خشک و کم‌آب کشور تولید می‌شود (Karandish and Hoekstra., 2017). هم‌چنین، گندم، سهمی فراتر از ۷۰ درصد در مجموع تولید غلات داشته و مهم‌ترین منبع غذایی ایرانیان محسوب می‌شود.

محاسبه‌ی ردپای آب و مبادلات آب مجازی

ردپای آب در پروسه‌ی تولید گندم. تمام محاسبه‌های ردپای آب، برای هریک از سال‌ها در طول دوره‌ی مطالعه، و به تفکیک هر یک از استان‌ها در محدوده‌ی پژوهش برای گندم انجام شد. ردپای آب در پروسه‌ی تولید، در سه بخش ردپای آب سبز، ردپای آب آبی و ردپای آب خاکستری محاسبه شد. ردپای آب سبز و آبی ($m^3\ t^{-1}$)، به ترتیب از تقسیم مجموع آب سبز و آب آبی مصرفی در پروسه‌ی تولید محصول در واحد هکتار ($m^3\ ha^{-1}$) بر مقادیر عملکرد محصول ($Y, t\ ha^{-1}$) بدست آمد.



شکل ۱- محدوده‌ی پژوهش، ایستگاه‌های هواشناسی منتخب و نواحی اقلیمی پنج‌گانه‌ی کشور بر اساس طبقه‌بندی دومارتن

مقادیر آب سبز و آب آبی در طول دوره‌ی رشد، با استفاده از مدل آکوآکراپ[1] محاسبه شد. این مدل، بر پایه‌ی 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 رابطه ۱ می‌باشد.

$$S_t = S_{t-1} + P_t + I_t + CR_t - RO_t - ET_t - DP_t \qquad (۱)$$

1- AquaCrop

که در آن، S_t و S_{t-1} به‌ترتیب، رطوبت خاک در انتهای روزهای t و t-1 ام، مقدار بارش، مقدار آب آبیاری، میزان ارتفاع موییینگی، مقدار رواناب سطحی، مجموع نیاز آبی گیاه و میزان نفوذ عمقی از انتهای ریشه می‌باشد. تمامی ترم‌ها در این معادله بر حسب $mm\ d^{-1}$ بیان شده است. سهم آب سبز و آبی در تمامی این ترم‌ها با لحاظ نسبت بارش به عمق آب آبیاری لحاظ شد. سپس، نیاز آبی گیاه به صورت نیاز آبی سبز ($ET_{green}\ , mm$) و نیاز آبی آبی ($ET_{blue}\ , mm$) محاسبه شده و در نهایت، رپای آب سبز ($WF_{green.prod}$) و آبی ($WF_{blue.prod}$) در پروسه‌ی تولید محصول به صورت معادله ۲ محاسبه شد:

$$\begin{cases} WF_{green.prod}(m^3 m^{-1}) = \frac{ET_{green}}{Y} \\ WF_{blue.prod}(m^3 m^{-1}) = \frac{ET_{blue}}{Y} \end{cases} \quad (۲)$$

که در آن، Y میزان عملکرد محصول ($kg\ ha^{-1}$) می‌باشد. داده‌های ورودی مورد نیاز در سه بخش به مدل آکوکراپ 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 – مانتیث در طول دوره‌ی مطالعه محاسبه و سپس به مدل وارد شد. برای هریک از استان‌های کشور و هر یک از محصول‌های منتخب، مقادیر عملکرد و سطح زیرکشت، به تفکیک کشت‌های آبی و دیم، 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 گندم در ایران بدست آمد.

مقادیر آب خاکستری، برای کودهای نیتروژنه و فسفره با استفاده از دستور عمل فرانکی و همکاران (Franke et al., 2013) و بر اساس رابطه‌ی ۳ محاسبه شد.

$$GreyWF\ (m^3\ t^{-1}) = \frac{\alpha AR}{(C_{max}-C_{nat})Y} \quad (۳)$$

که در آن، α ضریب رواناب–آبشویی، AR شدت اعمال نهاده‌ی مصرفی در اراضی کشاورزی ($kg\ ha^{-1}\ y^{-1}$)، و C_{max} و C_{nat} به ترتیب، مقادیر حداکثر مجاز و مقادیر اولیه‌ی آلاینده‌ی مورد نیاز در منابع آب ($kg\ ha^{-1}$) می‌باشد. در محاسبه‌ی رپای آب کودهای نیتروژنه، ضریب بر اساس توصیه‌ی ارایه شده در دستور عمل محاسبه‌ی رپای آب خاکستری، برابر با ۱۰ درصد درنظر گرفته شد (Franke et al., 2013). مقدار اولیه‌ی نیتروژن در آب، همانند بسیاری از پژوهش‌های پیشین، مقدار اولیه‌ی نیتروژن در آب برابر با ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر لحاظ شد (Mekonnen and Hoekstra., 2015).در تعیین حد مجاز نیتروژن در منابع آبی، سطح تغذیه‌گرایی[1] در نتیجه‌ی ورود عناصر غذایی به منابع آب سطحی معیار قرار گرفت و بر اساس آن، مقدار C_{max} برابر با ۳ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد (Liu et al., 2012). برای کودهای فسفره، نیز به دلیل تاثیر فزاینده‌ی آن‌ها بر پدیده‌ی تغذیه‌گرایی در منابع آب سطحی، مقادیر C_{nat} و C_{max} به‌ترتیب ۰/۵۲ و ۰/۹۵ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد (Mekonnen and Hoekstra., 2016, Mekonnen and Hoekstra., 2018). هم‌چنین، ضریب α در محاسبه‌ی آب خاکستری در پروسه‌ی تولید گندم برابر با ۳ درصد لحاظ شد.

برای تعیین مناطق بحرانی از دیدگاه تخریب زیست‌محیطی در اراضی تحت کشت گندم، مقدار سطح آلودگی آب (WPL) با استفاده از رابطه‌ی ۴ محاسبه شد.

$$WPL = \frac{Grey\ WF}{R_{act}} \quad (۴)$$

که در آن، R_{act} مجموع سالانه‌ی رواناب واقعی در هریک از مناطق می‌باشد. این مقادیر، بر اساس گزارش بیلان آب کشور، از سازمان مدیریت منابع آب ایران به دست آمد. مقادیر WPL>1 نشان می‌دهد که مجموع رواناب موجود در محدوده‌ی مطالعه، کم‌تر از آب مورد نیاز در پالایش آلودگی‌ها از منابع آب و رساندن کیفیت آن به حد استاندارد می‌باشد. این نواحی، نواحی بحرانی بوده و باید از دیدگاه سیاست‌مداران و تصمیم‌گیرندگان در اولویت برای اصلاح شرایط فعلی قرار بگیرد. هم‌چنین، شاخص حد فشار بر منابع آب آبی (BWS)، به صورت نسبت ردپای آب در پروسه‌ی تولید و یا مصرف گندم محاسبه شد. مقادیر بزرگ‌تر این شاخص نشان‌دهنده‌ی اعمال فشار بیش‌تر بر منابع آبی محدود در یک منطقه می‌باشند.

محاسبه‌ی ردپای آب در پروسه‌ی مصرف گندم: به منظور تعیین مهم‌ترین مناطق از دیدگاه فشار بر منابع آب، مقادیر ردپای آب سبز و آب آبی در پروسه‌ی مصرف هریک از محصول‌های منتخب در استان‌های ۳۰ گانه‌ی کشور با استفاده از رابطه ۵ محاسبه شد:

$$WF_{Prov}[P] = \frac{P_{Prov}[P]\times WF_{prod,Prov}[P]+\sum_e (I_e[P]\times WF_{prod,e}[P])}{P_{Prov}[P]+\sum_e I_e[P]} \quad (۵)$$

که در آن، $P_{Prov}[P]$ میزان تولید محصول مورد نظر ($t\ y^{-1}$)، $I_e[P]$ میزان واردات داخلی و یا بین‌المللی محصول p از منطقه‌ی e، $WF_{prod,Prov}[P]$ میزان ردپای آب محصول در پروسه‌ی تولید داخلی ($m^3\ t^{-1}$)، و $WF_{prod,e}[P]$ میزان ردپای آب محصول منتخب وارداتی در منطقه‌ی صادرکننده ($m^3\ t^{-1}$) می‌باشد.

مبادلات ملی و بین‌المللی آب مجازی: با داشتن مجموع تولید هر یک از محصولات منتخب در استان‌های مختلف، مجموع جمعیت و

1- Eutrophication

همچنین سرانه‌ی مصرف، نواحی واردکننده و صادرکننده‌ی داخلی تعیین شد. هم‌چین، بر اساس مجموع تولید مازاد بر نیاز و یا کسری تولید در هر یک از استان‌های کشور، سهم آن‌ها در مجموع واردات و صادرات بین‌المللی تعیین شد. در نهایت با داشتن مجموع مبادلات ملی و بین‌المللی، مقادیر مبادلات درون و برون کشوری آب مجازی محاسبه شد.

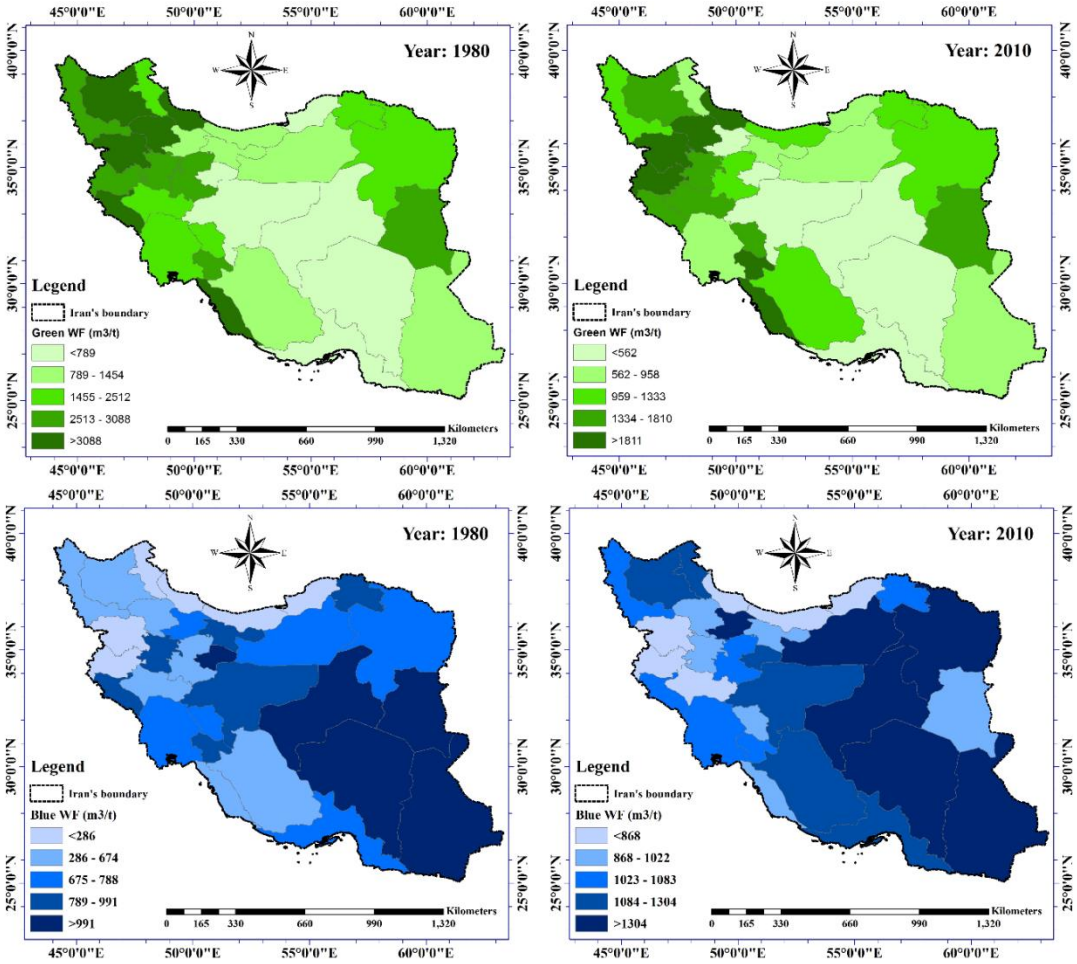
تحلیل آثار سناریوهای مدیریتی

پس از انجام محاسبه‌های اولیه و تعیین نواحی بحرانی از دیدگاه شاخص‌های WPL و BWS، راهکارهای مدیریتی با هدف تعدیل ردپای آب ایران در پروسه‌ی تولید و مصرف گندم به صورت کمی تحلیل شد. بدین منظور، راهکارهای محتمل برای تعدیل الگوی تولید، مصرف و مبادله‌های ملی و بین‌المللی گندم مورد توجه قرار گرفت. در نهایت، سناریوهایی که منتج به کم‌ترین مقادیرِ WPL و BWS می‌شوند، به عنوان سناریوهای برتر در نظر گرفته شدند.

نتایج و بحث

محاسبات ردپای آب در پروسه‌ی تولید و مصرف گندم

ردپای آب در پروسه‌ی تولید گندم: بر اساس مقادیرِ میانگین کشوری، تولید هر تن گندم داخلی در سال ۱۹۸۰ نیازمند ۲۷۹۹ مترمکعب آب بود که ۶۰۹ مترمکعب آن از منابع آب آبی تامین شد. گرم شدن تدریجی هوا در طول دوره‌ی مطالعاتی، سهم آب سبز در پروسه‌ی تولید گندم در سال ۱۳۹۰ را ۴۳ درصد کاهش داده و میانگین ردپای آب آبی به ۱۰۵۶ مترمکعب بر تن رسید. نتایج محاسبه‌های استانی، دامنه‌ی وسیع تغییرات مکانی ردپای آب سبز و آب آبی در پروسه‌ی تولید گندم را نشان داد (شکل ۲). استان‌های واقع در نواحی اقلیمی مرطوب و فراخشک، به‌ترتیب کم‌ترین و بیش‌ترین ردپای آب آبی در پروسه‌ی تولید گندم را داشتند. این در حالی است که آب سبز، سهم قابل توجهی در مجموع آب مصرفی در تولید هر واحد گندم در نواحی شمالی کشور داشت.



شکل ۲- ردپای آب سبز (بالا) و آب آبی (پایی) در پروسه‌ی تولید گندم در استان‌های مختلف کشور در سال‌های ۱۳۶۰ و ۱۳۹۰

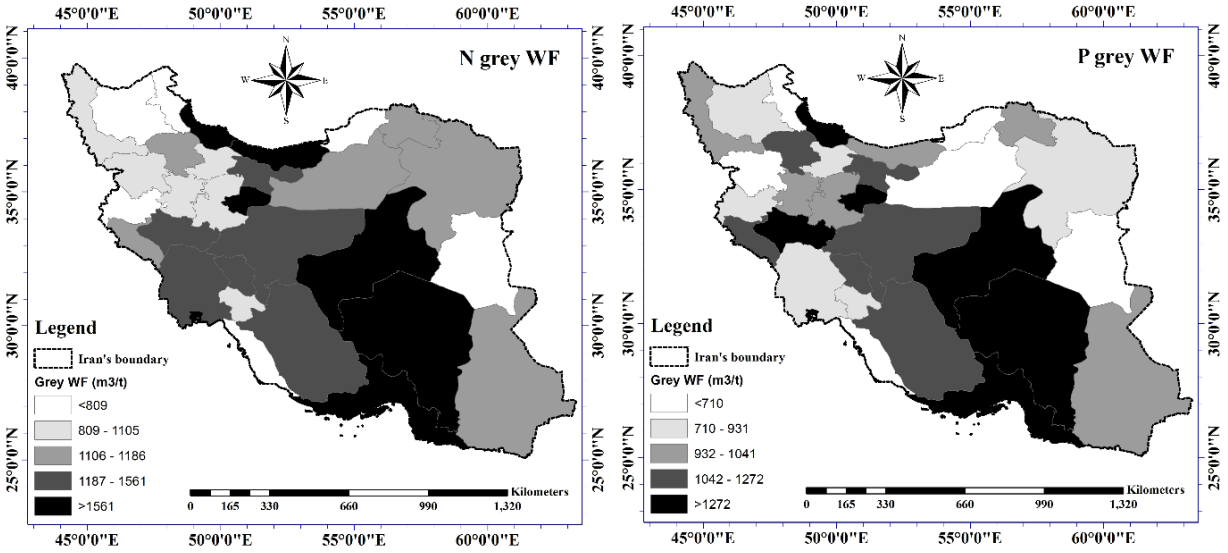
یکی از استان‌های حایز توجه از دیدگاه سهم آب آبی در پروسه‌ی تولید گندم، استان سیستان و بلوچستان بود. کاهش محسوس آب سبز در طول دوره‌ی مطالعاتی در این استان باعث شد که آب آبی، ۲۴۹۵ مترمکعب از مجموع آب مصرفی در تولید هر تن گندم را شامل شود. استان سیستان و بلوچستان، با داشتن خاک‌های حاصل‌خیز در اقلیم پرآب گذشته، به عنوان انبار غله‌ی ایران معروف بود (Karandish et al., 2015). وقوع خشک‌سالی‌های پی در پی از یک سو و کاهش حق‌آبه‌ی رودخانه‌ی هیرمند از سوی کشور افغانستان از سویی دیگر، مشکلات عدیده‌ای را در بخش کشاورزی استان در سال‌های اخیر ایجاد نمود که متعاقب آن، با کاهش حاصل‌خیزی خاک و خشک شدن تالاب‌های طبیعی در این استان، خسارت‌های زیست محیطی جبران‌ناپذیری بوجود آورد. نتایج پژوهش حاضر، همگام با یافته‌های پژوهشگران پیشین نشان می‌دهد کشت گندم با شرایط فعلی منطقه سازگار نبوده و علاوه بر کاهش سطح امنیت آب آبی، از توجیه اقتصادی نیز برخوردار نیست (Karandish et al., 2015). این در حالی است که کشاورزان محلی، به دلیل عدم آگاهی از آثار محتمل کشت گندم بر کاهش سطح پایداری کشاورزی در این استان، هم‌چنان گندم را در اولویت اول کشت خود قرار داده‌اند.

شکل ۲ نشان می‌دهد که استان‌های گیلان و مازندران، واقع در نواحی مرطوب کشور، علی‌رغم دارا بودن پتانسیلی بالا در کشت دیم گندم، سهم اندکی در مجموع تولید گندم دیم کشور دارند. هم‌چنین، آب سبز، سهم قابل توجهی در پروسه‌ی تولید گندم آبی در این استان‌ها داشته و در سال ۱۳۹۰، آب آبی، تنها ۳۲–۲۵ مترمکعب از مجموع آب مصرفی در پروسه تامین نمود. این در حالی است که زارعان محلی، طبق عادات سنتی و باورهای پیشین، بیش‌ترین توجه را به کشت برنج در استان داشته‌اند و با این باور که برنج مطلوب‌ترین محصول برای کشت در استان بوده است، فشار قابل توجهی را در طول دوره‌ی مطالعاتی بر منابع آبی استان وارد نموده‌اند.

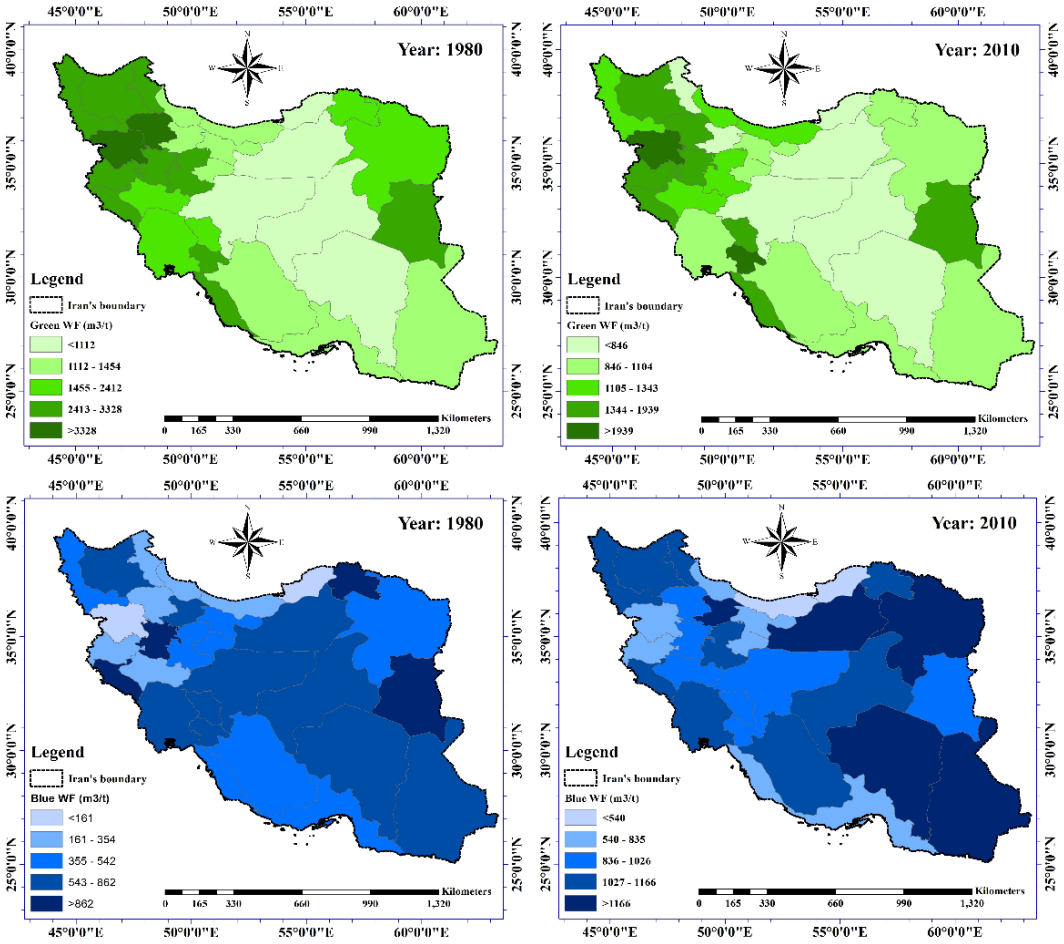
علاوه بر بخش مصرفی، ردپای آب در پروسه‌ی تولید یک محصول از جزو دیگری با نام ردپای آب خاکستری نیز تشکیل شده است که می‌تواند به عنوان شاخصی مناسب در تحلیل آثار محتمل استعمال کودهای شیمیایی و آلاینده‌ها بر سلامت زیست‌بوم یک منطقه استفاده شده و حد فشار کشاورزی بر محیط‌زیست را به صورت کمی ارزیابی نماید (Hoekstra., 2017; Hoekstra and Chapagain., 2008). کودهای شیمیایی، به ویژه کودهای نیتروژنه، فسفاته و سموم کشاورزی از جمله مهم‌ترین موادی است که با هدف افزایش سطح بهره‌وری محصول در مزارع استفاده می‌شود. اگرچه استفاده از این مواد می‌تواند میزان تولید در واحد سطح را افزایش دهد، اما استعمال بی‌رویه و بدون مدیریت آن‌ها، عواقب ناگوار زیست‌محیطی هم‌چون افزایش سطح تغذیه‌گرایی در منابع آب سطحی و تجاوز آلاینده‌ها از حد استاندارد شرب را به همراه خواهد داشت (Mekonnen and Hoekstra., 2015, 2016 and 2017; Karandish and Simunek., 2017; Karandish and Hoekstra., 2017; Karandish et al., 2017). به همین دلیل در پژوهش حاضر، مقادیر ردپای آب خاکستری برای کودهای فسفره و نیتروژنه، از دیدگاه تاثیر آن‌ها بر سطح تغذیه‌گرایی در منابعِ آب آبی در پروسه‌ی تولید گندم در ایران محاسبه شد. شکل ۳ نشان می‌دهد که در سال ۱۳۹۰، مقادیر ردپای آب خاکستری برای استعمال کودهای نیتروژنه و کودهای فسفره به‌ترتیب در محدوده‌های ۱۴۱۰۰–۵۶۴ و ۱۲۲۱۹–۶۴۱ به ازای هر تن تولید گندم می‌باشد. بر اساس مقادیر میانگین کشوری، به ازای استعمال کود نیتروژنه برای تولید هر تن گندم در کشور، ۱۷۲۷ مترمکعب آب نیاز خواهد بود تا نیتروژن مازاد در منابع آب آبی را به کم‌تر از حد استاندارد ۳/۱ میلی‌گرم بر لیتر برساند، که این مقدار، ۱/۲ برابر بیش‌تر از زمانی است که کاهش بار فسفر در منابع آب مدنظر باشد.

ردپای آب در پروسه‌ی مصرف گندم. با لحاظ نمودن مبادله‌های ملی و بین‌المللی، ردپای آب سبز و آبی مصرف گندم و فرآورده‌های آن در سطح هر یک از استان‌های کشور در طول دوره‌ی ۱۳۹۰–۱۳۶۰ محاسبه و نتایج آن برای سال‌های ۱۳۶۰ و ۱۳۹۰ در شکل ۴ به تصویر کشیده شد. بر اساس میانگین محاسبه شده در سطح کشور، مصرف هر تن گندم در سال ۱۳۶۰، نیازمند ۲۶۷۲ مترمکعب آب بود که حدود ۲۲ درصد آن از آب آبی تامین می‌شد. اگرچه در سال ۱۳۹۰، میانگین کشوری ردپای آب مصرف گندم به ۲۲۸۳ درصد کاهش یافت، در حالی‌که سهم آب آبی با ۲۱ درصد افزایش، به ۴۳ درصد رسید. کاهش ردپای آب کل در فرآیند مصرف گندم را می‌توان به دلایلی هم‌چون افزایش بهره‌وری محصول به دلیل بهبود مدیریت کشت در سطح مزارع و افزایش دانش محلی زارعان نسبت داد (Karandish and Hoekstra., 2017; Zhuo et al., 2016).

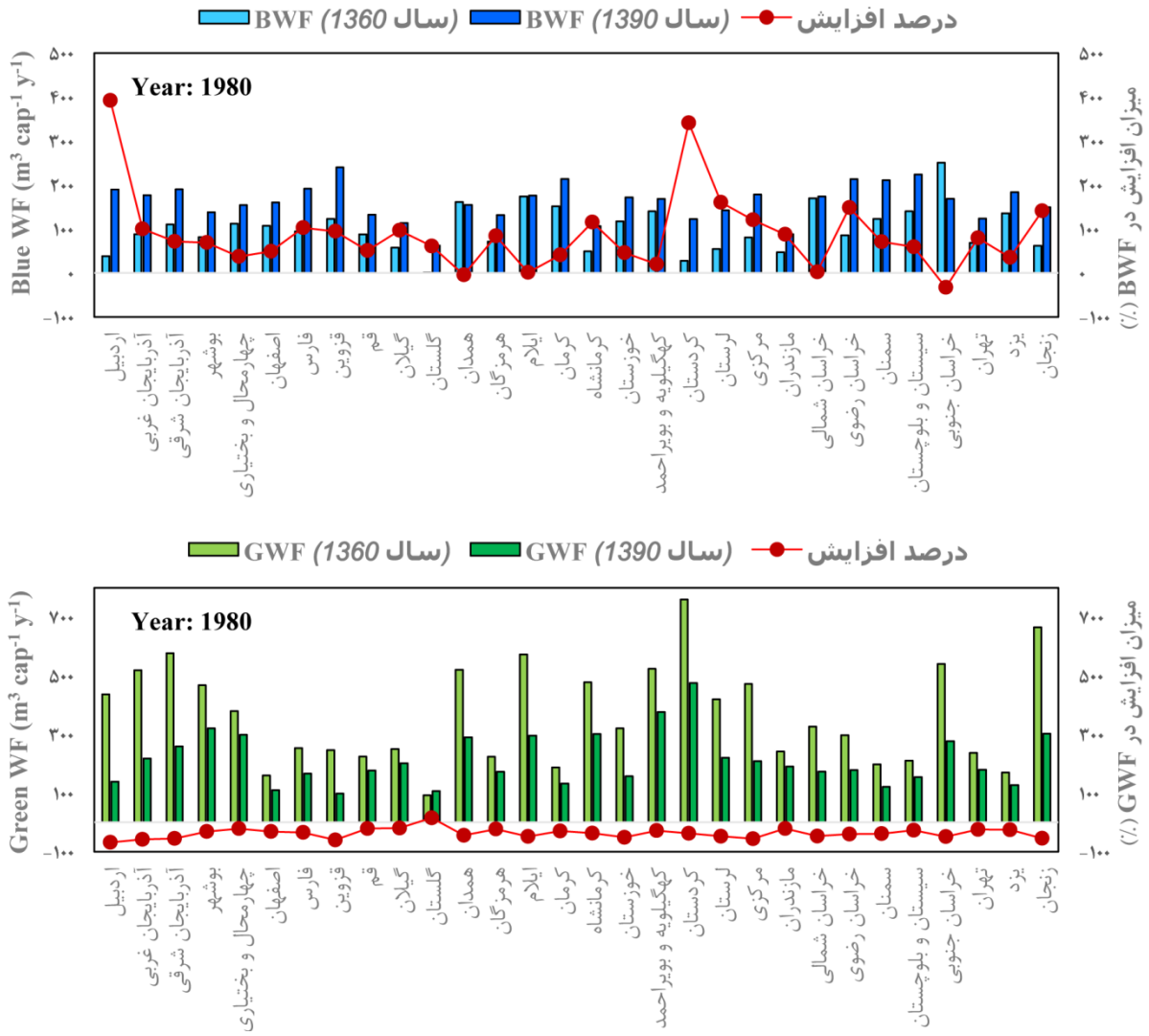
نگاهی به سرانه‌ی ردپای آب در پروسه‌ی مصرف گندم کشور در شکل ۵ نشان می‌دهد که استان خراسان‌جنوبی با مصرف ۷۹۰ مترمکعب آب در پروسه‌ی مصرف هر تن گندم در سال ۱۳۶۰ و استان کردستان با مصرف ۵۹۸ مترمکعب آب در این پروسه در سال ۱۳۹۰، بیش‌ترین مقادیر ردپای آب مصرف گندم در کشور را داشتند. این در حالی است که سه استان گلستان، اصفهان و مازندران، با داشتن ردپای آب کل برابر با ۲۸۸–۹۳ مترمکعب بر تن، همواره کم‌ترین مقادیر ردپای آب کل را در فرآیند مصرف گندم داشتند. میانگین ردپای آب سبز در فرآیند مصرف گندم در ایران در سال ۱۳۹۰، ۴۲ درصد کم‌تر از مقدار معادل آن در سال ۱۳۶۰ بوده و همگام با این کاهش، ردپای آب آبی در فرآیند مصرف گندم در این بازه ۷۵ درصد افزایش یافت.



شکل ۳- ردپای آب خاکستری در فرآیند تولید گندم در ایران به ازای مصرف کودهای نیتروژنه، و فسفره در سال ۱۳۹۰



شکل ٤- ردپای آب سبز (بالا) و آب آبی (پایی در فرآیند مصرف گندم در استان‌های مختلف کشور در سال‌های ۱۳٦۰ و ۱۳۹۰

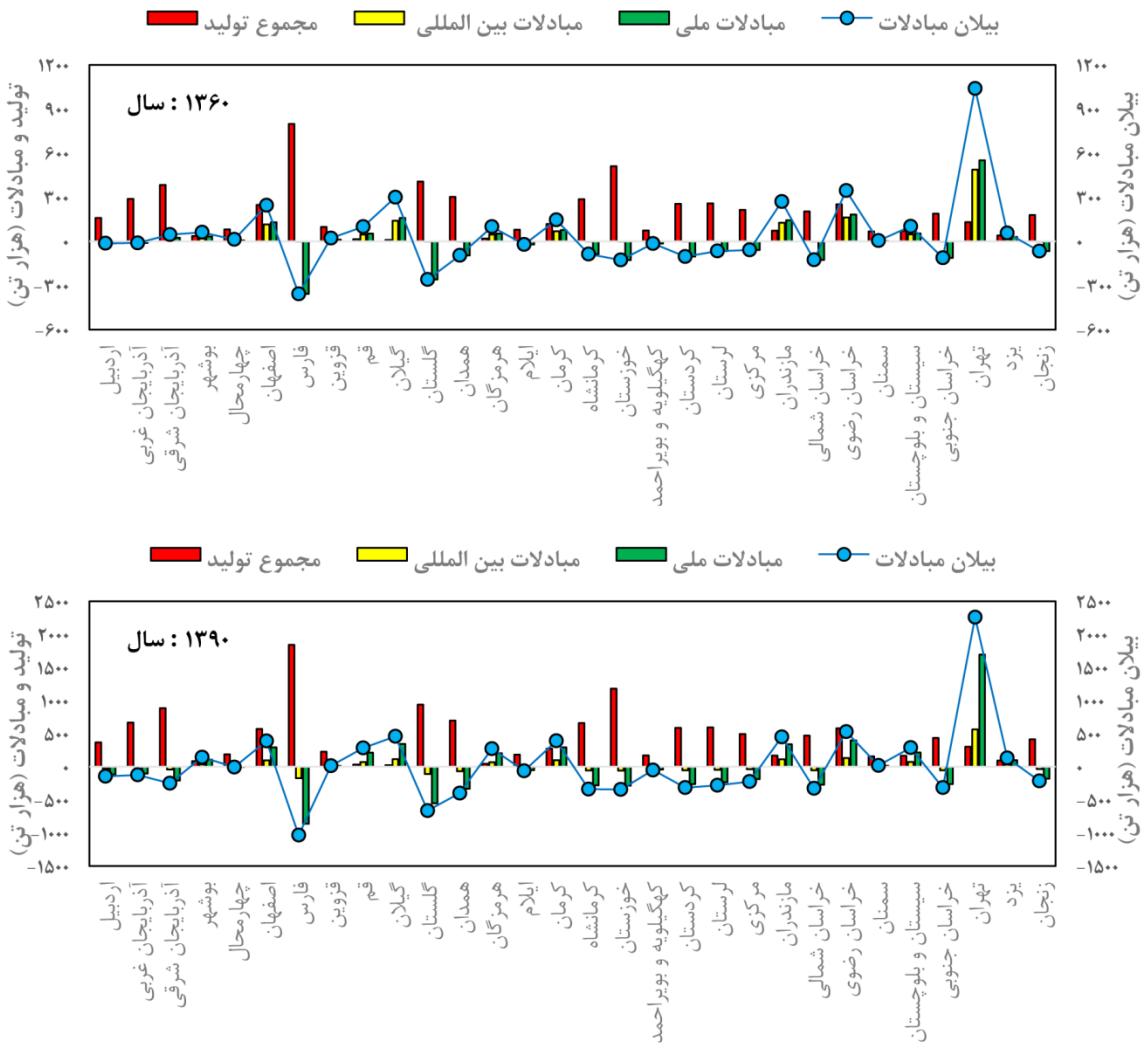


شکل ۵- سرانه‌ی ردپای آب آبی (بالا) و آب سبز (پایی) در فرآیند مصرف گندم در استان‌های مختلف کشور در سال‌های ۱۳۶۰ و ۱۳۹۰

مبادله‌های ملی و بین‌المللی آب مجازی در پروسه‌ی تولید و مصرف گندم

مبادلات استانی و بین‌المللی گندم در ایران: شکل ۶، سهم استان‌های ۳۰ گانه‌ی کشور در مجموع تولید، مبادلات ملی و بین‌المللی و بیلان مبادله‌های گندم و فرآورده‌های آن را در سال‌های ۱۳۶۰ و ۱۳۹۰ نشان می‌دهد. مجموع تولید گندم در سال ۱۳۶۰ برابر با ۵/۸۵ میلیون تن بوده که با ۲/۳ برابر افزایش، به ۱۳/۵ میلیون تن در سال ۱۳۹۰ رسید. مهم‌ترین دلیل افزایش تولید گندم را می‌توان به برنامه‌های بلندمدتی که با هدف افزایش سطح خودکفایی گندم در طی سال‌های اخیر تدوین شده است، منسوب نمود. در سال ۱۳۷۸، دولت ایران، استراتژی‌های ملی برای کشت گندم بنا نهاد که با اعمال آن‌ها، ایران در سال ۱۳۹۰ به جایگاه دوازدهم در بین بزرگ‌ترین کشورهای تولید کننده‌ی گندم دست یافت (FAOSTAT., 2014).

این افزایش، منتج به افزایش مجموع صادرات گندم از هزار تن در سال ۱۳۶۰ به ۸۵۰ هزار تن در سال ۱۳۹۰ شد. اگرچه بر اساس بیلان مبادلات گندم و فرآورده‌های آن، حدود ۱۵ استان در سال ۱۳۶۰ و ۱۷ استان در سال ۱۳۹۰، صادرکننده‌ی منطقه‌ای گندم بودند، اما تقریبا یک سوم از مجموع گندم در سه استان فارس، خوزستان و گلستان تولید شده و این استان‌ها سهمی فراتر از ۴۰ درصد در مجموع صادرات ملی و بین‌المللی در طول دوره‌ی مطالعه داشتند. هم‌چنین، استان‌های گیلان، قم و هرمزگان، با سهمی کم‌تر از یک درصد در مجموع گندم تولیدی، بزرگ‌ترین استان‌های واردکننده‌ی گندم بودند.

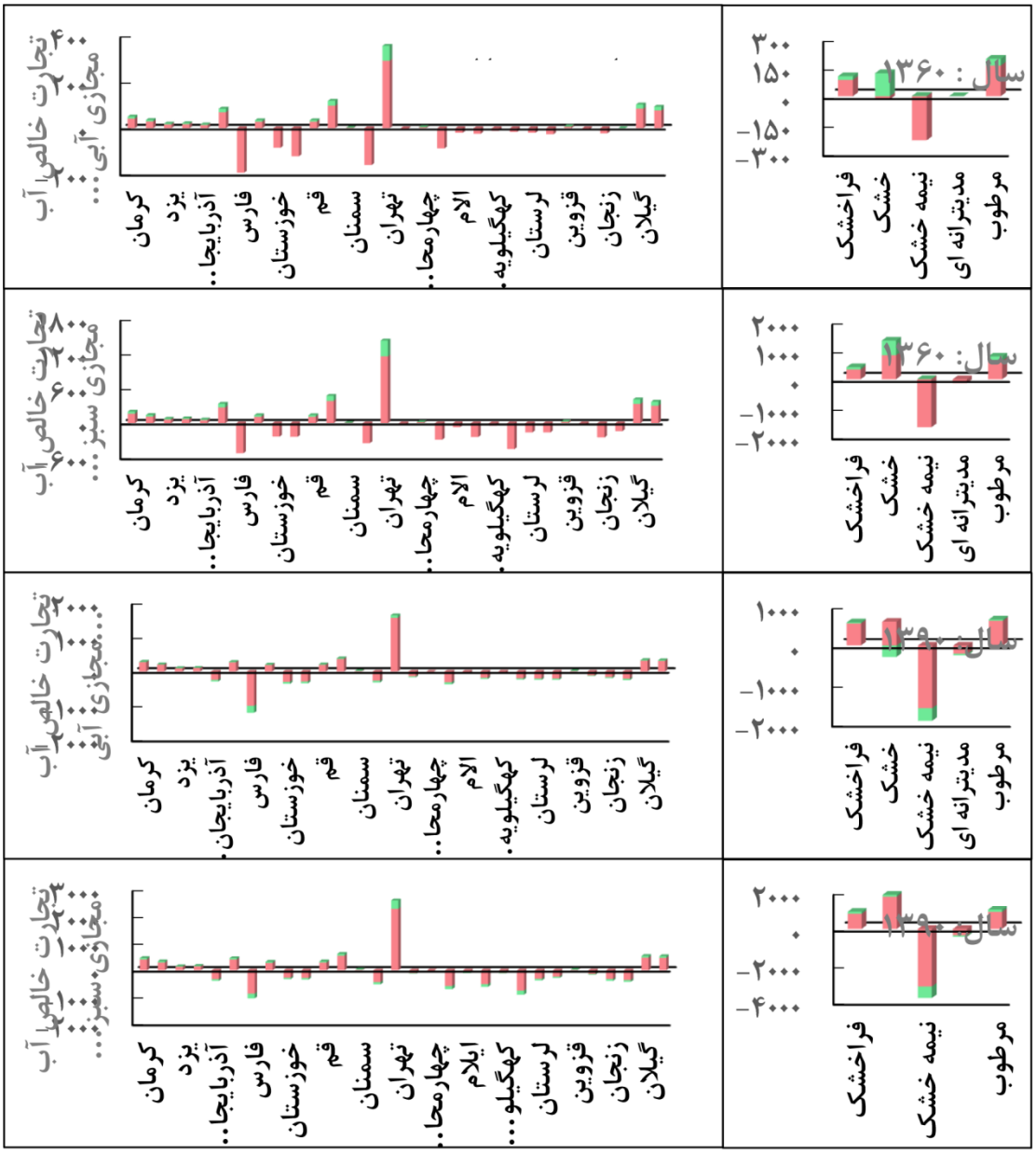


شکل ٦- مجموع تولید، مبادلات ملی و بین‌المللی و بیلان مبادلات گندم در سال‌های ۱۳٦۰ و ۱۳۹۰

مبادلات استانی و بین‌المللی آب مجازی گندم در ایران: شکل ۷ مقادیر بین استانی و بین‌المللی تجارت آب مجازی در نتیجه‌ی مبادله‌های درون و برون کشوری گندم را نشان می‌دهد. مبادلات درون استانی گندم در سال ۱۳۶۰ منتج به تجارت آب مجازی به میزان ۳/۹۸ میلیارد مترمکعب شد که آب آبی، سهمی معادل ۲۰ درصد در این تجارت داشت. با ۱۴۲ درصد افزایش، مجموع مبادله‌های درون کشوری آب مجازی به ۹/۶۴ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۹۰ رسید که ۳/۹۲ میلیارد مترمکعب آن مربوط به تجارت آب مجازی آبی بود. ۲۱ درصد افزایش در سهم آب آبی در تجارت آب مجازی گندم را می‌توان به عوامل متعددی هم‌چون تغییر وضعیت جوی کشور، گسترش اراضی تحت کشت آبی و هم‌چنین، تغییر الگوهای حاکم در مسیر مبادله‌های درون استانی غذا نسبت داد. الگوی ناصحیح جریان آب مجازی را می‌توان از مسیر مبادله‌های بین استانی آب مجازی تشخیص داد. نگاهی به شکل ۷ نشان می‌دهد که در حدفاصل سال‌های ۱۳۹۰-۱۳۶۰، بیش‌ترین صادرات استانی آب مجازی، در نتیجه‌ی صادرات گندم از استان‌های واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک اتفاق افتاد. این در حالی است که استان‌های گیلان و مازندران، علی‌رغم واقع شدن در نواحی اقلیمی مرطوب ایران و با داشتن بیش‌ترین سهم از منابع آب تجدیدپذیر ایران، همواره در زمره‌ی استان‌های واردکننده‌ی آب مجازی در فرآیند مبادله‌های درون کشوری گندم قرار داشتند.

تولید ۱/۳۴ میلیون تن گندم مازاد در کشورهای همسایه برای تامین نیاز ایرانیان در سال ۱۳۶۰، منتج به صرف ۰/۹۳ میلیارد مترمکعب (۲۴ درصد آب آبی) از منابع آبی این کشورها شد. در سال ۱۳۹۰، واردات بین‌المللی گندم به ایران، ۰/۱۹ میلیارد مترمکعب از آب آبی و ۰/۸۰ میلیارد مترمکعب از منابع آب سبز کشورهای همسایه را

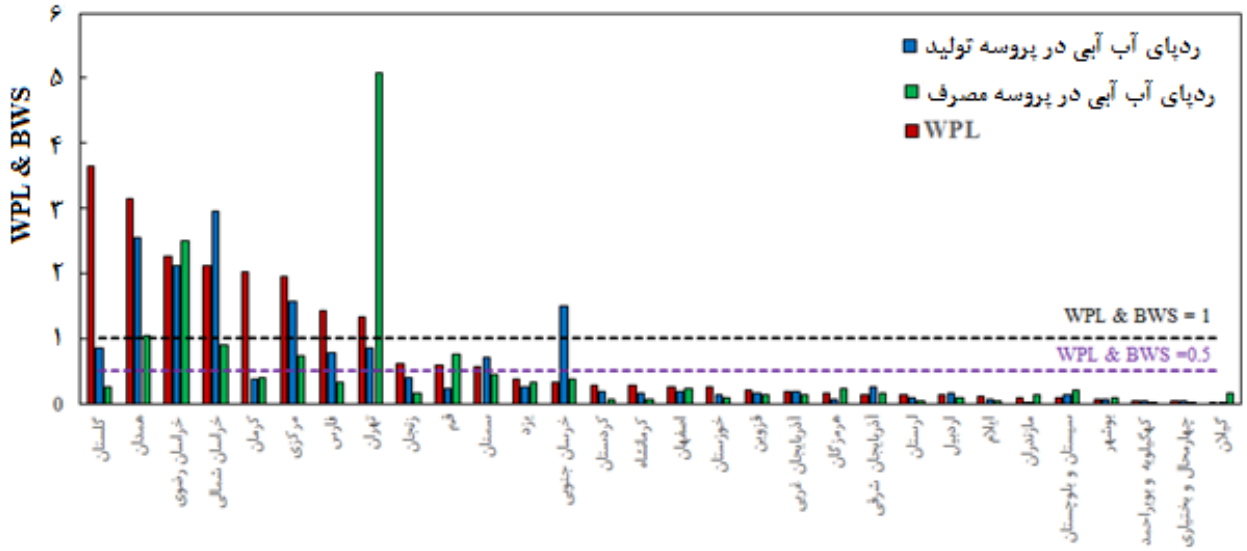
به صورت مجازی وارد کشور نمود. با افزایش سهم ایران در صادرات بین‌المللی گندم در نتیجه‌ی افزایش تولید گندم منطبق با اهداف کلان کشوری، مجموع صادرات آب مجازی گندم، از ۲/۶ میلیون مترمکعب در سال ۱۳۶۰ (۱۹ درصد آب آبی)، به ۱/۹۳ میلیاردمترمکعب در سال ۱۳۹۰ (۴۱ درصد آب آبی) رسید. همگام به این افزایش، بیلان خالص آب مجازی گندم در پروسه‌ی مبادله‌های درون و برون کشوری، از ۰/۹۳ میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۶۰ به ۰/۹۵- میلیارد مترمکعب در سال ۱۳۹۰ رسید. علامت منفی در این اعداد نشان دهنده‌ی صادرات خالص آب مجازی می‌باشد. اگرچه ایران از دیدگاه بین‌المللی، همواره یک واردکننده‌ی خالص گندم در طول دوره‌ی مطالعاتی باقی ماند، لکن افزایش سهم کشور در مجموع گندم صادراتی از یک سو و بالاتر بودن ردپای آب گندم تولیدی در ایران در مقایسه با مقدار آن در کشورهایی که در زمره‌ی شرکای تجاری کشور قرار دارند ازسویی دیگر، باعث شد تا ایران به یک صادرکننده‌ی خالص آب مجازی آبی در سال ۱۳۹۰ تبدیل شود. این مساله، لزوم توجه به اصلاح الگوی تولید، مصرف مبادلات ملی و بین‌المللی گندم، با هدف ذخایر منابع آبی محدود ایران و جهان را به اثبات می‌رساند.



شکل ۷- مبادله‌های استانی و بین‌المللی و تراز آب مجازی در استان‌ها، نواحی اقلیمی و کل کشور در نتیجه‌ی مبادله‌های گندم در سال‌های ۱۳۶۰ و ۱۳۹۰

نواحی بحرانی از دیدگاه شاخص‌های WPL و BWS

شکل ۸، مقادیر استانی شاخص WPL در نتیجه‌ی مصرف کودهای شیمیایی نیتروژنه و فسفره در اراضی تحت کشت گندم را در سال ۱۳۹۰ نشان می‌دهد. مقدار این شاخص در ۸ استان کشور، شامل کرمان در اقلیم فراخشک، خراسان رضوی، خراسان شمالی، فارس و تهران در اقلیم خشک، مرکزی و همدان در اقلیم نیمه‌خشک و گلستان در اقلیم مدیترانه‌ای، فراتر از واحد است. این یافته، مبین آن است که در این استان‌ها، ظرفیت کافی در منابع آب آبی برای پذیرش آلاینده‌ها وجود ندارد. بر اساس مقادیر میانگین وزنی شاخص WPL در نواحی اقلیمی مختلف، استعمال کودهای شیمیایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک بیش‌ترین خطر را متوجه منابع آب آبی نموده است. استان گیلان، واقع در اقلیم مرطوب ایران، با داشتن کم-ترین سهم در تولید سالانه‌ی گندم از یک سو، و داشتن بیش‌ترین حجمِ منابع آب تجدیدپذیر، امن‌ترین نواحی از دیدگاه شاخص WPL می‌باشند. به استثنای استان‌های اردبیل، آذربایجان شرقی، ایلام، لرستان، آذربایجان غربی و زنجان، استعمال کودهای نیتروژنه در سایر استان‌ها تاثیر بیش‌تری بر آلودگی منابع آب آبی در مقایسه با کودهای فسفره داشت.



شکل ۸- مقادیر استانی WPL به ازای استعمال کودهای نیتروژنه و فسفاته، و BWS در فرآیند تولید و مصرف گندم در سال ۱۳۹۵

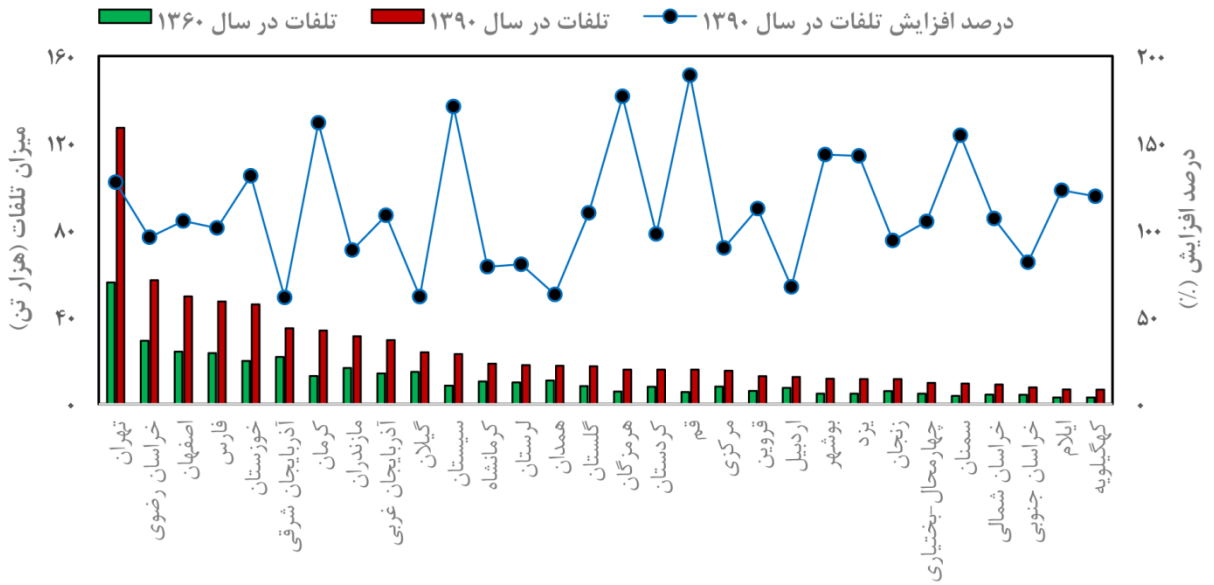
در پروسه‌ی تولید گندم، استان‌های خراسان شمالی (BWS=2.97)، همدان (۲/۵۵)، خراسان رضوی (۲/۱۱)، مرکزی (۱/۵۷) و خراسان جنوبی (۱/۴۹)، بیش‌ترین فشار را بر منابع آب آبی وارد نموده و ادامه‌ی روند فعلی، تولید پایدار گندم در منطقه را تهدید می‌کند. با تغییر در محدوده‌ی ۵/۰۹-۰/۰۳، شاخص BWS در پروسه‌ی مصرف گندم، بیش‌ترین مقادیرخود را در استان‌های تهران (۵/۰۹)، خراسان رضوی (۲/۵۱) و همدان (۱/۰۴) داشت. با مبنا قرار دادن مصرف بیش‌تر از ۵۰ درصد از منابع آبی کشور در پروسه‌ی تولید و یا مصرف گندم (BWS>0.5)، ۹ استان در پروسه‌ی تولید، و ۶ استان در پروسه‌ی مصرف گندم، دست‌خوش چالش کم‌آبی خواهند بود.

تعدیل بیلان آب مجازی در پروسه‌ی تولید و مصرف گندم در ایران

سناریوهای مدیریتی از دیدگاه ردپای آب را می‌توان در سطوح مختلف تعریف نمود. مهم‌ترین این سناریوها را می‌توان در سه گروه عمده طبقه‌بندی نمود: (الف) دیدگاه‌های معطوف به اصلاح ردپای آب در پروسه‌ی تولید، (ب) دیدگاه‌های معطوف به اصلاح ردپای آب در پروسه‌ی مصرف، (ج) دیدگاه‌های معطوف به اصلاح ردپای آب در پروسه‌ی مبادله‌های ملی و بین‌المللی آب و غذا. افزایش بهره‌وری محصول و آب در گروه نخست، کنترل آفات و رژیم غذایی در گروه دوم، و اصلاح مسیر مبادله‌های آب و غذا در گروه سوم را می‌توان از جمله مهم‌ترین راهکارهای مدیریتی کارآمد در راستای نیل به یک پایداری نسبی محسوب نمود. اگرچه گروه اول این سناریوها اغلب در پژوهش‌های پیشین مورد توجه قرار گرفته است (Karandish and Hoekstra., 2017)، گروه‌های دوم و سوم کم‌تر مورد توجه محققان بوده است. بنابراین در ادامه، به تحلیل کمی این سناریوها پرداخته شد.

کنترل پسماندهای غذایی در پروسه‌ی تولید و مصرف گندم: از مهم‌ترین منابع تلفات آب آبی در هر دو سطح ملی و بین‌المللی، تولید پسماندهای غذایی می‌باشد. تولید و یا واردات بیش از نیاز و عادات

غذایی ناصحیح مردم جهان، علاوه بر کاهش سرانه‌ی منابع آب تجدیدپذیر کشور خود، تاثیر قابل‌توجهی بر کاهش منابع آب قابل استحصال در سطح جهان خواهد داشت؛ زیرا بخش زیادی از این تلفات از کالاهایی است که از کشورهای همسایه وارد می‌شود. با ۱۰۸ درصد افزایش، از ۳۵۹ هزار تن در سال ۱۳۶۰، به ۷۴۵ هزار تن در سال ۱۳۹۰ رسید (شکل ۹). بیش از نیمی از این ضایعات، در نواحی خشک کشور، به ویژه در استان‌های پرجمعیتی مانند تهران، خراسان رضوی و اصفهان، تولید شد. هم‌چنین، تمرکز کم‌تر جمعیت در استان‌های کهکیلویه و بویراحمد و ایلام از یک سو، و سبک متفاوت زندگی مردم در این استان‌ها از سویی دیگر، باعث شد تا هریک از این استان‌ها، سهمی کم‌تر از یک درصد در مجموع پسماندهای تولید شده از گندم داشته باشند. نگاهی به نرخ افزایش تولید پسماندهای گندم در طول دوره‌ی مطالعاتی نیز نشان داد که استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان و سمنان، به‌ترتیب با داشتن افزایشی معادل ۱۷۱، ۱۶۱ و ۱۵۴ درصد در مجموع ضایعات غذایی گندم، در رتبه‌های اول تا سوم از این منظر قرار داشتند.



شکل ۹- مقادیر تلفات گندم و فرآورده‌های آن در سال‌های ۱۳۶۰ و ۱۳۹۰ و درصد افزایش تلفات در انتهای دوره‌ی مطالعاتی

در سال ۱۳۶۰، ۰/۸۷ میلیارد مترمکعب از منابع آبی جهان (۲۱/۵ درصد آب آبی) در نتیجه‌ی الگوی غذایی ناصحیح ایرانیان تلف شد (جدول ۱). همگام با افزایش جمعیت و سرانه‌ی پسماندهای غذایی، این مقدار در سال ۱۳۹۰ به ۱/۶ میلیارد مترمکعب (۴۵/۱ درصد آب آبی) رسید. استان‌های واقع از نواحی خشک و نیمه‌خشک، بیش‌ترین سهم را در تلفات آب آبی از طریق تولید پسماندهای غذایی داشتند. علاوه بر افزایش فشار مضاعف بر منابع آب آبی، پسماندهای غذایی گندم، میزان آلودگی در منابع آبی کشور را نیز متاثر می‌سازد. تلفات گندم از طریق پسماندهای غذایی در سال‌های ۱۳۶۰ و ۱۳۹۰، به‌ترتیب، نیازمند صرف ۰/۷۵ و ۱/۶۳ میلیارد مترمکعب آب، برای حذف آلاینده‌های ناشی از ورود نیتروژن مازاد به منابع آب سطحی و رساندن کیفیت آن به کم‌تر از حد استاندارد تغذیه‌گرایی به ترتیب نیازمند ۰/۵۹ و ۱/۳ میلیارد مترمکعب آب برای حذف آلاینده‌های ناشی از ورود نیتروژن مازاد به منابع آب سطحی و رساندن کیفیت آن به کم‌تر از حد استاندارد تغذیه‌گرایی، می‌باشد. جدول ۱ نشان می‌دهد که حذف پسماندهای غذایی در سال‌های ۱۳۶۰ و ۱۳۹۰ می‌توانست میانگین کشوری شاخص BWS را به‌ترتیب، ۵/۳ و ۶/۱ درصد، و میانگین کشوری شاخص WPL را به‌ترتیب، ۶/۰ و ۶/۵ درصد، کاهش دهد. با این وجود، تاثیر اتخاذ این سناریو بر افزایش سطح پایداری در کشاورزی در نواحی خشک و نیمه‌خشک کشور، به دلیل داشتن سهمی بالاتر در تلفات آب آبی و تولید آلودگی در پروسه‌ی تلفات غذا، بیش‌تر خواهد بود.

اصلاح مسیر تجارت آب مجازی گندم در سطوح درون و برون کشوری: الگوی تجارت کالا، از مهم‌ترین عوامل تعیین کننده‌ی مسیر جریان آب مجازی می‌باشد. تولید مازاد بر نیاز کالا در یک منطقه‌ی کم‌آب، با ردپای آب بالا و سهم قابل توجه آب آبی، و صادر نمودن آن به مناطق پرآب، جایی که همان کالا با صرف آب کم‌تر و سهم بالاتر آب سبز قابل تولید می‌باشد، از بارزترین راه‌های تلفات منابع آبی، در هر دو سطح کشوری و جهانی محسوب می‌شود.

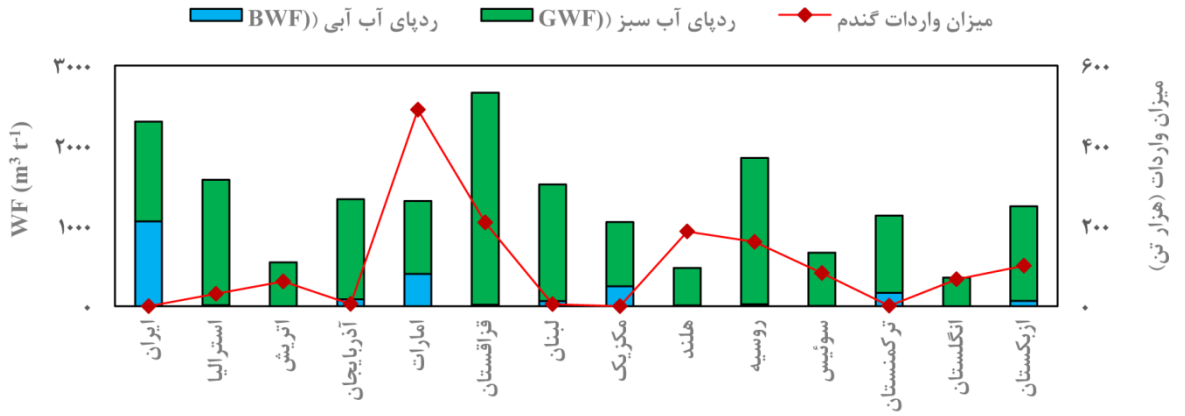
جدول ۱- مجموع پسماندهای غذایی و ردپای آب کل، آبی و خاکستری در ازای تلفات گندم در سطوح منطقه‌ای و کشوری در سال‌های ۱۳۶۰ و ۱۳۹۰، و تاثیر کمی حذف پسماندهای گندم بر تعدیل شاخص‌های BWS و WPL

سال	پارامتر	ناحیه‌ی اقلیمی					
		فراخشک	خشک	نیمه‌خشک	مرطوب	مدیترانه‌ای	کل کشور
۱۳۶۰	تلفات گندم (هزار تن)	۲۶/۱	۲۰۲/۰	۹۱/۳	۳۱/۲	۸/۳	۳۵۹/۰
	تلفات آب سبز (میلیون مترمکعب در سال)	۲۸/۷	۳۴۳/۶	۲۶۲/۲	۴۴/۲	۴/۴	۶۸۳/۱
	تلفات آب آبی (میلیون مترمکعب در سال)	۲۱/۶	۱۱۰/۹	۴۴/۷	۹/۴	۰/۰	۱۸۶/۵
	مجموع تلفات آب (میلیون مترمکعب در سال)	۵۰/۴	۴۵۴/۵	۳۰۶/۹	۵۳/۶	۴/۴	۸۶۹/۷
	آب خاکستری نیتروژن (میلیون مترمکعب)	۱۹۴/۰	۳۵۹/۱	۱۲۴/۷	۵۷/۹	۱۰/۵	۷۴۶/۳
	آب خاکستری فسفر (میلیون مترمکعب)	۱۶۹/۸	۲۶۴/۴	۱۱۹/۴	۳۲/۸	۵/۸	۵۹۲/۲
	در صد کاهش WPL با حذف پسماند	۶/۳	۶/۰	۶/۰	۵/۹	۶/۰	۶/۰
	در صد کاهش BWS با حذف پسماند	۵/۵	۵/۳	۵/۳	۵/۲	-	۵/۳
۱۳۹۰	تلفات گندم (هزار تن)	۶۸/۲	۴۳۰/۳	۱۷۴/۲	۵۴/۹	۱۷/۴	۷۴۵/۰
	تلفات آب سبز (میلیون مترمکعب در سال)	۵۸/۰	۴۶۸/۰	۲۷۶/۳	۶۵/۵	۱۱/۳	۸۷۹/۱
	تلفات آب آبی (میلیون مترمکعب در سال)	۸۸/۳	۴۲۳/۶	۱۷۰/۳	۳۳/۴	۶/۶	۷۲۲/۲
	مجموع تلفات آب (میلیون مترمکعب در سال)	۱۴۶/۳	۸۹۱/۷	۴۴۶/۶	۹۸/۹	۱۷/۹	۱۶۰۱/۳
	آب خاکستری نیتروژن (میلیون مترمکعب)	۵۰۶/۸	۷۶۴/۸	۲۳۷/۸	۱۰۱/۹	۲۲/۱	۱۶۳۳/۴
	آب خاکستری فسفر (میلیون مترمکعب)	۴۴۳/۵	۵۶۳/۱	۲۲۷/۷	۵۷/۷	۱۲/۱	۱۳۰۴/۲
	در صد کاهش WPL با حذف پسماند	۶/۹	۶/۴	۶/۷	۶/۵	۶/۴	۶/۵
	در صد کاهش BWS با حذف پسماند	۶/۴	۶/۰	۶/۳	۶/۱	۶/۰	۶/۱

نگاهی به الگوی تجارت استانی گندم در ایران نشان می‌دهد که روند فعلی حاکم بر تولید و صادرات درون کشوری گندم، فشار زیادی را به منابع آبی محدود کشور وارد می‌نماید. به عنوان مثال، استان‌های گیلان و مازندران، با اختصاص دادن بخش وسیعی از اراضی کشاورزی خود به کشت برنج، از جمله مهم‌ترین استان‌های وارد کننده‌ی گندم محسوب می‌شوند. وارد نمودن ۰/۶۵ میلیون تن گندم به استان‌های مذکور در سال ۱۳۹۰، باعث صرف ۰/۶۳ میلیارد مترمکعب آب آبی در نواحی خشک کشور شد. این در حالی است که تولید همین مقدار گندم در استان‌های گیلان و مازندران، تنها نیازمند ۰/۰۲ میلیارد مترمکعب آب آبی بود. هم‌چنین، نتایج پژوهشی نشان داد که در همین سال، کشت برنج در استان‌های گیلان و مازندران، به‌ترتیب ۰/۴۹ و ۰/۶۱ میلیارد مترمکعب آب آبی مصرف نمود که ۰/۹۲ از مجموع آب آبی مصرف شده در پروسه‌ی تولید برنج در استان‌های مذکور، در نتیجه‌ی صادرات استانی، به صورت مجازی به دیگر مناطق کشور وارد شد (Karandish and Hoekstra, 2017). بنابراین، به نظر می‌رسد که جایگزینی برنج با گندم در سبد غذایی ایرانیان از یک‌سو (اصلاح الگوی مصرف)، و تولید گندم در مناطقی با ردپای آب آبی کم‌تر (اصلاح الگوی تولید)، می‌تواند از راهکارهای موثر در ایجاد مسیر صحیح تجارت بین استانی آب مجازی، با هدف صادر نمودن آب مجازی از مناطق پرآب به مناطق کم‌آب، محسوب شود. با اتخاذ چنین منطقی و تنها از دیدگاه تجارت آب مجازی گندم در سال ۱۳۹۰، اولویت‌بندی منطقه‌ای میزان تولید گندم از دیدگاه ردپای آب آبی آن (یعنی تولید بیش‌تر در مناطقی با ردپای آب آبی کم‌تر)، می‌توانست ۴/۳۶ میلیارد مترمکعب از مصرف آب آبی در کشور بکاهد. بدون شک، اتخاذ چنین راهکاری حتی راستای تجارت بین-المللی آب مجازی را نیز متاثر می‌ساخت. زیرا حتی با ثابت نگاه داشتن حجم صادرات برون کشوری، می‌توان امیدوار بود که آب آبی کم‌تری در پروسه‌ی صادرات گندم از کشور خارج می‌شد.

اگرچه ایران از دیدگاه ردپای آب آبی، همواره از واردات گندم منفعت حاصل نموده است، اما انتخاب صحیح و هوشمندانه‌تر مسیر تجارت بین‌المللی گندم، می‌تواند گام موثری در کاهش فشار بر منابع آبی جهانی محسوب شود. بر اساس آمار منتشر شده از سوی سازمان خواروبار جهانی، بیش از ۷۵ درصد از مجموع واردات گندم در سال ۱۳۹۰، از کشورهای امارات (۳۵٪)، قزاقستان (۱۵٪)، هلند (۱۳٪) و روسیه (۱۱٪) صورت گرفت و ۲۴ درصد از کشورهای ازبکستان (۷٪)، سوئیس (۶٪)، انگلستان (۵٪)، اتریش (۴٪)، استرالیا (۲٪)، و یک درصد باقی‌مانده از کشورهای آذربایجان، لبنان، ترکمنستان و مکزیک وارد شد. میزان آب آبی مصرفی در پروسه‌ی تولید هر تن گندم مازاد

در کشور امارات، به عنوان بزرگ‌ترین شریک تجاری ایران، ۲۱/۴- ۰/۱ برابر بیش‌تر از مقدار آن در دیگر کشورهای صادرکننده‌ی گندم به ایران بود. با بیانی دیگر، اگر همین میزان گندم از کشور قزاقستان وارد می‌شد، مصرف منابع آب آبی جهان، ۰/۱۶ میلیارد مترمکعب کاهش می‌یافت. نگاهی به مقادیرِ ردپای آب آبی گندم در کشورهایی که شرکای تجاری ایران در مبادلات بین‌المللی گندم محسوب می‌شوند نشان می‌دهد که گسترش روابط بین‌المللی با کشورهای اروپایی، هم‌چون اتریش و سوئیس، سهم بسزایی در ذخیره‌ی منابع آبی جهان خواهد داشت (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- مقادیر ردپای آب آبی و آب سبز در کشورهای صادرکننده‌ی گندم به ایران (برگرفته از گزارش Mekonnen and Hoekstra, 2012)

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، به شناسایی و تحلیل چالش‌های فعلی در کشت و مبادله‌های ملی و بین‌المللی گندم از دیدگاه ردپای آب پرداخته شد. با معیار قرار دادن دو شاخص سطح فشار بر منابع آب آبی و حد آلودگی آن‌ها، معلوم شد که الگوی فعلی تولید و مصرف گندم در ایران، تهدیدی جدی برای منابعِ آبی محدود کشور محسوب می‌شود. زیرا، از یک‌سو، تولید گندم اغلب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، که دارای سهم کم‌تری از مجموع منابع آب تجدیدپذیر کشور هستند، صورت می‌گیرد و مناطق پرآب‌تر، اغلب، واردکننده‌ی خالص آب مجازی در نتیجه‌ی مبادله‌های درون کشوری گندم هستند. از سویی دیگر، ردپای آب گندم در این مناطق، به دلیل حاکم بودن شرایط اقلیمی خاص، بالاتر از مناطق مرطوب است. این دو مساله، مناطق خشک و نیمه‌خشک را به مناطقی بحرانی از دیدگاه سطح فشار بر منابع آب آبی تبدیل نموده است. علاوه بر آن، تحلیل شاخص حد آلودگی نیز نشان داد که در بخش وسیعی از کشور، ظرفیت کافی برای حمل آلاینده‌های ورودی به منابع آب در پروسه‌ی تولید گندم وجود ندارد. بحران‌های فعلی علاوه بر ضعف‌های حاکم در پروسه‌ی تولید، به الگوی ناصحیح مصرف گندم نیز مربوط می‌شود. تمرکز جمعیت در مناطق خشک و کم‌آب از یک‌سو، و ضایعات گندم در سبد غذایی ایرانیان از سویی دیگر، سهم بسزایی در افزایش بحران‌های آب دارد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، ادامه‌ی چنین روندی، علاوه بر منابع آب داخلی، منابع آب جهانی را نیز متاثر خواهد ساخت، زیرا، سالانه حجم وسیعی از منابع آبی جهان برای تولید و صادرات گندم به ایران صورت می‌گیرد. بنابراین، علاوه بر اهمیت کاهش ضایعات گندم، ورود گندم از کشورهایی با ردپای آب کم‌تر می‌تواند راهکاری موثر در کاهش حجم آب آبی مصرفی در پروسه‌ی تولید گندم در مقیاس جهانی باشد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله، از حمایت‌های مادی و معنوی دانشگاه زابل جهت انجام این پژوهش قدردانی می‌گردد. هزینه‌های پژوهش حاضر، از محل گرنت شماره‌ی UOZ_GR_9517_6 پرداخت شد.

منابع

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

Chukalla,A.D., Krol,A.S., Hoekstra,A.Y. 2018. Trade-off between blue and grey water footprint of crop production at different nitrogen application rates under various field management practices. Science of Total Environment. 626 :962-970.

Chukalla,A.D., Krol,M.S and Hoekstra,A.Y. 2015. Green and blue water footprint reduction in irrigated agriculture: Effect of irrigation techniques, irrigation strategies and mulching, Hydrology and Earth

Liu,C., Kroeze,A. Hoekstra,Y and Gerbens-Leenes,W. 2012. Past and future trends in grey water footprints of anthropogenic nitrogen and phosphorus inputs to major world rivers, Ecological Indicators. 18.0:42-49,

Lovarelli,D., Bacenetti,J., Fiala,M. 2016. Water footprint of crop productions: A review. Science of Total Environment. 548.549:236-251.

Mekonnen,M.M and Hoekstra,A.Y. 2015. Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water, Environmental Science and Technology. 49.21: 12860−12868.

Mekonnen,M.M., Hoekstra,A.Y. 2014. Water footprint benchmarks for crop production: a first global assessment. Ecological Indices. 46: 214-23.

Mekonnen,M.M., Hoekstra,A.Y. 2016. Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water. Environmental Science and Technology. 49: 12860−12868.

Mekonnen,M.M., Hoekstra,A.Y. 2018. Global anthropogenic phosphorous loads to fresh water and associated grey water footprints and water pollution levels: a high-resolution global study. Water Resources Research. 54(1), 345-358

Ridoutt,B.G., Pfister,S. 2010. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. Global Environmental Change. 20:113-120.

Van-Oel,P., Hoekstra,A.Y. 2012. Towards Quantification of the Water Footprint of Paper: A First Estimate of its Consumptive Component. Water Resource Management. 26.3: 733-749.

Zhang,C., McBean,E.A., Huang,J. 2014. A virtual water assessment methodology for cropping pattern investigation. Water Resources Management. 28: 2331-2349.

Zhuo,L., Mekonnen,M.M., Hoekstra,A.Y., Wada,Y., 2016. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River Basin (1961-2009). Advances in Water Resources. 87: 21-41.

System Sciences. 19.12: 4877-4891.

FAO. 2016. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. http://www.fao.org/faostat/en/.

FAO. 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, http://www.fao.org/faostat/en/.

Franke,N., Mathews,R. 2013. Grey water footprint indicator of water pollution in the production of organic vs. conventional cotton in India. Water Footprint Network, 79p.

Galli,A., Wiedmann,T., Ercin,E., Knoblauch,D., Ewing,B., Giljum,S. 2012. Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a "Footprint Family" of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet. Ecological Indicators. 16: 100-112.

Hoekstra,A.Y. 2017. Water footprint assessment: evolvement of a new research field. Water Resources Management. 31: 3061-3081.

Hoekstra,A.Y., Chapagain,A.K. 2008. Globalization of Water: Sharing the Planet'S Freshwater Resources; Blackwell: Oxford, UK.

Hoekstra,A.Y. 2013. The Water Footprint of Modern Consumer Society; Routledge, London: UK, 2013.

Karadish,F., Hoekstra,A.Y. 2017. Informing national food and water security policy through water footprint assessment: the case of Iran. Water. 9.11: 1-25.

Karadish,F., Salari,S., Darzi-Naftchali. 2015. Application of virtual water trade to evaluate cropping pattern in arid regions. Water Resources Management. 29.11: 4061–4074.

Karadish,F., Šimůnek,J. 2017. Two-dimensional modeling of nitrogen and water dynamics for various N-managed water-saving irrigation strategies using HYDRUS. Agricultural Water Management. 193: 174-190.

Karandish,F., Mousavi,S.S., Tabari,H. 2017. Climate change impact on precipitation and cardinal temperatures in different climatic zones in Iran: analyzing the probable effects on cereal water-use efficiency. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 31.8: 2121-2146.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No. 4, Vol. 12, Oct.-Nov. 2018, p. 954-969

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۴، جلد ۱۲، مهر - آبان ۱۳۹۷، ص. ۹۶۹-۹۵۴

Analysing Management Scenarios for Proper Wheat Production and Consumption in Iran Regarding Water Footprint: Challenges and Opportunities

F. Karandish[1]

Recived: Apri.25, 2018 Accepted: Jul.01, 2018

Abstract

Improper wheat production and consumption pattern, which is the most important product in global food basket, has a significant role in the occurrence of the current water challenges, especially within the arid and semi-arid regions of the world. In this research, along with diagnosing and analyzing current challenges through wheat production and consumption in Iran, new opportunities for modifying current problems as well as the quantitative results of the proposed management scenarios were presented. Over a 31-year period during 1980-2010, blue, green and grey water footprints (WF) related to wheat production and consumption, and consequently, virtual water balance related to interregional and international wheat trades were estimated. All calculations were carried out at the provincial scale, and base on official statistics published by national and international organizations. Based on the national average, the contribution of blue water in wheat WF increased by 73.4% as a consequence of 43% reduction in the share of green water. For N-fertilizers applied for producing a unit of wheat, 1727 m^3 water is required to assimilated nitrogen loads to freshwater bodies beyond the standard level of 3.1 mg l^{-1}, which is 1.2 times higher than one requires for assimilating surplus P. Despite of an overall reduction in total WF related to wheat consumption in 2010, the share of blue water in total increased by 21%. With a 142% increase, the overall interregional virtual water trade of wheat got 9.64 billion m^3 in 2010, with 3.92 billion m^3 blue water, 21% more than one in 1980. Under current condition, there is not enough water capacity in 8 provinces to carry out pollutants loads to freshwater bodies from lands under wheat. Besides, WF related to wheat consumption in 5 provinces, and WF related to wheat production in 3 provinces is higher than available renewable water resources. Based on water pollutant level and water scarcity level indices, the arid and semi-arid regions need to be of priority when implementing adaptation solutions. In addition to the highlighted influence of adapting proper methods for moderating wheat production pattern through improving water and yield productivities, moderating wheat consumption pattern will also have a considerable role in alleviating current challenges. Wheat waste resulted in 0.87 and 1.6 billion m^3 water waste, respectively, in 1980 and 2010. In these years, the surplus pollution loads to water systems as a result of wheat waste were, respectively, 0.75 and 1.63 billion m^3. Also, moderating interregional wheat trade based on WF index, aiming at increase wheat export from water abundant regions to the water scarce one, may result in up to 4.36 billion m^3 water saving. In addition, expanding international wheat trade domain and selecting trading partners among those with lower wheat WFs may lead to 0.1-21.4 times lower pressure on global blue water resources. Based on the results, it could be concluded that implementing proper policies helps with achieving sustainable environment in both producing and consuming regions.

Keywords: Blue WF, Green WF, Grey WF, Wheat production and consumption pattern, Virtual water trade

1- Associate professor, Water Engineering Department, University of Zabol
(*- Corresponding Author Email: Karandish_h@yahoo.com & F.Karandish@uoz.ac.ir)