

مقاله علمی - پژوهشی

ردپای محیط زیستی آب گندم در سیستم‌های مختلف آبیاری در اقلیم‌های مختلف

فرشته بتوخته^{۱*}، عبدالله درزی نفتچالی^۲، علی متولی^{۳*}، فاطمه کاراندیش^۴، مارکوس برگر^۵

چکیده

ارزیابی ردپای محیط زیستی آب (WF) محصولات کشاورزی اهمیت زیادی در شناسایی پتانسیل‌های بهبود در چرخه عمر محیط زیستی آن‌ها دارد. در این مطالعه، با استفاده از مفهوم ارزیابی چرخه حیات (LCA)، میزان WF محیط زیستی گندم در پنج اقلیم فراهشک (HA)، خشک (A)، نیمه‌خشک (SA)، نیمه مرطوب (DSH) و مرطوب (H) و روش‌های آبیاری فارو (FI)، قطره‌ای (DI) و بارانی (SI) بررسی شد. برای هر اقلیم و روش آبیاری، شاخص‌های کلیدی شامل مقدار آب مصرفی، تأثیرات محیط زیستی ناشی از مصرف منابع آب و پایداری منابع آب برای تولید یک تن گندم بررسی شد. بالاترین آسیب به سلامتی بشر، کیفیت اکوسیستم و منابع محیط زیستی به روش Pfister به میزان ۰/۰۰۱۴ (DALY)، ۰/۰۰۱۴ (PDF*m²yr) و ۲۱۰۹ (MJ urplus) و ۱۳۲۵۴ و شاخص ردپای آب در روش Hoekstra ۳۲۱۶ (m³)، تخریب آب شیرین در روش Berger به میزان ۱۷۹۲ (m³) و ردپای کمبود آب در روش AWARE ۱۲۵۱۰۷ (m³) در گزینه HA.SI بدست آمد. در سناریوی SA.DI شرایط مساعد جهت افزایش عملکرد و کاهش نهاده‌های مصرفی و همچنین در سناریوی H.SI و DSH.SI استفاده بیشتر از آب سبز باعث کاهش ۶۰٪-۵۰٪ ردپای آب نسبت به میانگین در تمام روش‌های مورد بررسی شد. با توجه به شاخص‌های عملکرد محصول، بهره‌وری آب و ردپای مستقیم و غیرمستقیم آب و اثرات زیست محیطی گزینه SA.DI به‌عنوان پایدارترین شرایط جهت کشت گندم است. هر رویکرد، از Pfister تا Hoekstra، بینش‌های منحصر به فردی را در مورد مصرف آب و تأثیرات کمبود ارائه می‌دهد لذا نتایج این مطالعه نیاز به در نظر گرفتن چندین دیدگاه برای دریافت یک تصویر کامل از ردپای آب محصولات را برجسته می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تخلیه منابع، تنش آبی، پایداری منابع، ردپای آب

مقدمه

افزایش جمعیت و تقاضا برای منابع طبیعی باعث رقابت بین جوامع برای تأمین نیازهای خود شده است. (Ashoori et al., 2016). بهره‌برداری صحیح و اصولی از منابع طبیعی، یکی از چالش‌های اساسی زندگی بشر در عصر حاضر است. در میان این منابع، آب به‌عنوان مهم‌ترین رکن حیات و حیاتی‌ترین منبع برای تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی است که به دلیل کمبود شدید آب و تقاضای بالا برای این منبع کمیاب، مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب برای حفظ این منبع بسیار حائز اهمیت است. (Gholamrezai and Sepahvand, 2017). طبق تعریف کمیسیون جهانی محیط‌زیست و توسعه، مفهوم توسعه پایدار آب عبارت است از: تأمین نیاز جمعیت فعلی بدون اینکه اثر منفی بر توانایی تأمین نیازهای نسل‌های آینده وارد شود (WCED, 1987).

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران (* نویسنده مسئول: f.batoukhteh@gmail.com)

^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران (* نویسنده مسئول: motevali62@gmail.com)

^۴ محقق ارشد، پایداری آب‌های زیرزمینی و امنیت غذایی سیستم‌های زمین و تغییرات جهانی، دانشگاه Wageningen، هلند

^۵ ستاد، رئیس مدیریت چند رشته‌ای آب، گروه مهندسی عمران و مدیریت، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه Twente، هلند

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱

برخی مطالعات برای ارزیابی محیط زیستی سیستم‌های آبیاری از روش ارزیابی چرخه حیات^۱ (LCA) استفاده شده است (Eranksi et al., 2017; Jamali et al., 2021; Kaab et al., 2024). این روش ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم شناسایی و کمی می‌شود و به طیفی از دسته‌بندی‌های اثرات محیط زیستی ترجمه می‌گردد. با استفاده از این روش سیاست‌گذاران می‌توانند عملکرد مسیر تولید و استفاده از تکنیک‌های جدیدی که موجب بهبود محصول یا فرآیند تولید و در نتیجه کاهش اثرات کلی محیط زیستی می‌شود، را پیگیری نمایند. اخیراً ارزیابی اثرات محیط زیستی ردپای آب در تولید محصولات کشاورزی بر اساس ارزیابی چرخه حیات مورد بررسی قرار گرفته است. در بسیاری از مناطق، رفاه انسان و کیفیت اکوسیستم به‌طور جدی تحت تأثیر تغییرات در چرخه جهانی آب قرار گرفته است که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است (Pfister et al., 2009). مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی و مواد غذایی می‌تواند تأثیر بالقوه‌ای بر سلامتی انسان‌ها، اکوسیستم، منابع آبی (در ارتباط با کمبود آب محلی و منطقه‌ای) داشته باشد و به دنبال آن دسترسی به آب شیرین برای استفاده‌های انسانی و محیط‌زیست محدود گردد (Ridoutt and Pfister, 2010). از این رو سازمان بین‌المللی استاندارد^۲ بر اساس استاندارد ISO 14046، استاندارد بین‌المللی ردپای آب را بر اساس ارزیابی چرخه حیات توسعه داد.

یکی از اولین مطالعات برجسته که مفهوم ردپای آب^۳ را معرفی و توسعه داد، توسط هوکسترا و همکاران انجام شد. این مطالعات به شفاف‌سازی مفهوم ردپای آب کمک کرد و آن را به‌عنوان یک شاخص برای ارزیابی مقدار آبی که برای تولید یک محصول، مصرف یا آلوده می‌شود، تعریف کرد (Hoekstra et al., 2003). این تحقیقات زمینه‌ساز توسعه چارچوب‌های استاندارد برای محاسبه و تحلیل ردپای آب در بخش‌های مختلف اقتصادی از جمله کشاورزی، صنعت و مصرف خانگی شد. در ادامه فایستر و همکاران روش شناسی ارزیابی ردپای آب در چارچوب ارزیابی چرخه حیات (LCA) را توسعه دادند. در مطالعه آن‌ها از LCA برای

پایداری منابع آبی نیازمند تمرکز بیشتر بر کاهش تقاضا به‌منظور ایجاد توازن بهتر بین عرضه و تقاضا است تا از کاهش اجتناب‌ناپذیر منابع آبی و تخریب محیط آبی جلوگیری شود. در حل بحران‌های آبی، فناوری‌ها به همراه مدیریت و برنامه‌ریزی مناسب همواره مؤثر بوده و شرایطی فراهم کرده‌اند تا جهان قابل سکونت برای انسان باقی بماند. (Doosti Sabzi et al., 2023). در این راستا اتحادیه اروپا بر استفاده از فناوری‌های مناسب در زمینه آب تأکید می‌کند (CEC, 2008). طبق نظر پارلمان اروپا، راه‌حل‌ها باید در "فن‌آوری‌های دوستدار محیط‌زیست" که استفاده مؤثر از آب را تسهیل می‌کنند، ارائه گردد (EP, 2008). یکی از اقدامات انجام‌شده در جهت بهبود راندمان و صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی، توسعه استفاده از سیستم‌های آبیاری تحت فشار است. بر اساس گزارش کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID)، کل مساحت تحت پوشش آبیاری تحت فشار در جهان معادل ۵۶/۲ میلیون هکتار است که معادل ۲۴/۵ درصد کل اراضی آبی جهان است. از نظر سطح زیر پوشش سیستم آبیاری تحت فشار، ایران با ۲/۰۲ میلیون هکتار (۲۳/۹ درصد از اراضی آبی) در رتبه هشتم قرار دارد و آمریکا، چین، هند، برزیل، اسپانیا، روسیه و فرانسه در رتبه‌های ۱ تا ۷ قرار دارند (ICID 2021). براساس مطالعات انجام‌شده آبیاری تحت فشار نقش مهمی در افزایش بهره‌وری آب (پورمحمد و همکاران، ۱۳۹۶؛ درگاهی و همکاران، ۱۳۹۷؛ جناب و نظری، ۱۳۹۷)، کاهش ردپای آب و اثرات محیط زیستی (Jamali et al., 2021; Angnes et al., 2023; Kaab et al., 2024) در کشاورزی دارد. این نوع آبیاری می‌تواند در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌طور قابل‌توجهی مصرف آب را کاهش دهد و به حفظ منابع آب، افزایش تولید محصول و کاهش اثرات منفی محیط زیستی کمک کند (Chen et al., 2020).

در دهه اخیر با افزایش تغییرات اقلیمی و کمبود منابع آب، ارزیابی سیستم‌های آبیاری به سمت افزایش تاب‌آوری و کاهش آسیب‌پذیری در برابر تغییرات محیطی و ارزیابی تأثیرات آن‌ها بر بهره‌وری و پایداری محیط‌زیست سوق پیدا کرده است. از این رو در

² International Organization for Standardization
3 Water Footprint

¹ Life cycle assessment

مختلف ارزیابی نمودند. میانگین کل کارایی اقتصادی- محیط زیستی تولید گندم در کشور ۰/۸۴ برآورد شد. از این رو پیشنهاد شد در استان‌های با کارایی اقتصادی- محیط زیستی پائین تر به منظور حفظ محیط زیست از روش‌های نوین آبیاری برای کاهش ردپای آب آبی و از کودهای سبز و کودهای شیمیایی کم‌خطر برای کاهش ردپای آب خاکستری استفاده شود.

با توجه به تفاوت‌های قابل توجهی که در میزان آب مصرفی و اثرات محیط زیستی تولید گندم تحت شرایط اقلیمی مختلف و سامانه‌های گوناگون آبیاری وجود دارد در این مطالعه مقایسه جامع چهار روش برجسته ارزیابی ردپای آب، شامل Hoekstra, Berger, AWARE و Pfister انجام شده است. در این راستا از نرم‌افزار SimaPro به عنوان ابزاری یکپارچه جهت تحلیل مقایسه‌ای این روش‌ها بهره‌گیری شده است. به کارگیری نرم‌افزار SimaPro برای تحلیل این روش‌ها در کنار داده‌های دقیق میدانی، به‌ویژه در مورد محصولات کشاورزی مانند گندم، از نکات برجسته این مطالعه است. درحالی‌که پژوهش‌های پیشین بیشتر به کاربرد یک یا دو روش محدود می‌شدند، این پژوهش تمامی چهار روش یادشده را در کنار هم به‌طور جامع مقایسه می‌کند و اطلاعات عمیق‌تری درباره تفاوت‌های کارایی هر روش در ارزیابی ردپای آب ارائه می‌دهد.

مواد و روش‌ها

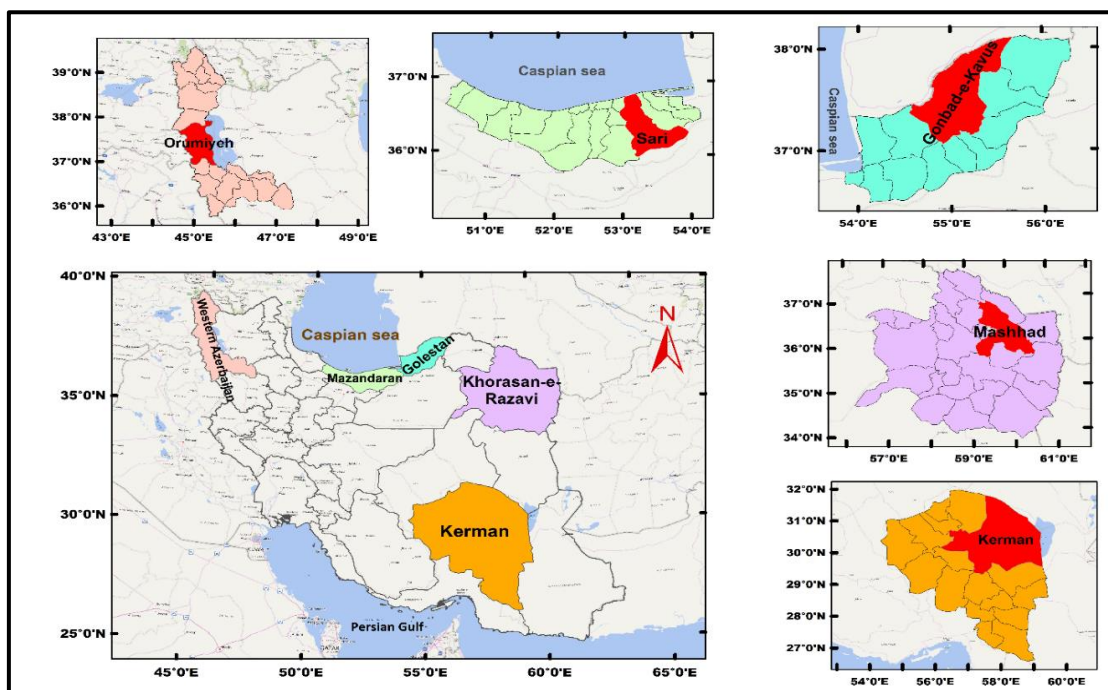
منطقه مورد مطالعه

گندم به دلیل سازگاری با اقلیم‌های مختلف و استفاده غذایی از آن به‌طور گسترده در سراسر جهان کشت می‌شود و یکی از غلات رایج است (Mostashari-Rad et al., 2020). گندم در ایران به‌عنوان اصلی‌ترین ماده غذایی و عمده‌ترین منبع تأمین کالری و پروتئین آحاد جامعه، از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است (Pakravan-Charvadeh et al., 2021). بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن و با استفاده از داده‌های هواشناسی گزارش شده برای سال‌های ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵، ایران در پنج اقلیم

تحلیل ردپای آبی در تولید محصولات استفاده شد و نشان دادند که چگونه می‌توان از این ابزار برای ارزیابی تأثیرات محیط زیستی مصرف آب در طول چرخه حیات محصولات مختلف بهره برد (Pfister et al., 2009). ژو و همکاران ردپای آبی محصولات کشاورزی در چین را بررسی کردند و نتایج نشان داد که برخی مناطق به دلیل وابستگی به آب‌های زیرزمینی و کاهش بارش، به شدت تحت تأثیر قرار گرفته‌اند (Zhuo et al., 2016). سونگ و چن کارایی اقتصادی- محیط زیستی تولید غلات در کشور چین را با استفاده از شاخص ردپای آب و به کارگیری مدل SFA، برآورد کردند. در این مطالعه از داده‌های سرمایه، نیروی کار و ردپای آب استفاده گردید. کارایی برآورد شده در این بررسی بین ۰/۴۲۴ و ۰/۹۸۶ است. بر اساس نتایج آنان اظهار داشتند که توانمندی برای افزایش پایداری محیط زیستی با افزایش تولید غلات وجود دارد. (Song & Chen, 2019). متولی و همکاران (۱۳۹۸) شاخص‌های محیط زیستی ردپای آب و تخلیه منابع را در سناریوهای مختلف کشت برنج بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از شاخص‌های محیط زیستی بر اثر مصرف آب نشان داد که بالاترین آسیب به سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و منابع محیط زیستی به روش فیشر و همکاران به میزان (DALY) ۰/۰۰۱۰۵۲، (MJ urplus) ۱۰۲۶۲/۵۴ و (PDF*m²yr) ۱۶۳۰/۸۵۳، شاخص تخریب آب شیرین در روش برگر به میزان (m³) ۱۳۸۲/۱۲۲ بدست آمد. همچنین بالاترین آثار مخرب محیط زیستی از منظر ردپای آب و تخلیه منابع در سناریوهای کشت دوم برنج و کشت بعد از برداشت کلزا بدست آمد. در پژوهشی دیگر سیاوشی و دستان (۱۴۰۰) ردپای بوم‌شناختی، ردپای آب و اثرات محیط زیستی تولید گندم آبی و دیم بر اساس اندازه مزرعه در منطقه بوشهر مقایسه کردند. بر اساس نتایج سهم آلاینده‌ها در کشت آبی در مقایسه با کشت دیم در منطقه بوشهر کمتر است. آن‌ها بیان داشتند که کشت آبی گندم و استفاده از کود سبز، خاک‌ورزی حفاظتی، راه‌اندازی سامانه‌های آبیاری نوین و استفاده بهینه از منابع آب منجر به افزایش بهره‌وری آب و کاهش اثرات محیط زیستی می‌گردد. قیاسی و شیخ زین‌الدین (۱۴۰۱) کارایی اقتصادی- محیط زیستی گندم را بر مبنای ردپای آب در استان‌های

گنبدکاووس) و اقلیم H استان مازندران (شهرستان ساری) جهت مطالعه انتخاب گردید (شکل ۱). سطح زیر کشت گندم آبی در استان‌های کرمان، خراسان رضوی، آذربایجان غربی، گلستان و مازندران به ترتیب ۱۰۱/۸، ۱۷۰/۴، ۱۱۸/۵، ۱۵۹ و ۳۱/۳ هزار هکتار است. مجموع تولید در این مناطق ۴۰۶، ۷۵۳، ۵۰۷، ۵۳۶ و ۱۳۱ هزار تن است (متوسط عملکرد ۳/۹۸، ۴/۴۲، ۴/۲۷، ۳/۳۷ و ۴/۱۸ تن در هکتار) که به ترتیب رتبه ۷، ۳، ۶، ۵ و ۲۰ در کشور را دارا هستند (آمارنامه جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲).

شامل فراخشک^۱ (HA)، خشک^۲ (A)، نیمه‌خشک^۳ (SA)، نیمه مرطوب^۴ (DSH) و مرطوب^۵ (H) طبقه‌بندی شده است (Karandish., 2021). بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی انجام شده و با توجه به سطح کشت و سطح آبیاری تحت فشار گندم در استان‌های مختلف و همچنین مشورت با کارشناسان مربوطه از اقلیم HA استان کرمان (شهرستان کرمان)، اقلیم A استان خراسان رضوی (شهرستان مشهد)، اقلیم SA استان آذربایجان غربی (شهرستان ارومیه)، اقلیم DSH استان گلستان (شهرستان



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه

آبیاری، نیروی انسانی)، شیوه‌های مدیریت مزرعه، عملکرد محصول، هزینه و درآمد طراحی شد. برای تعیین حجم نمونه از روش نمونه‌گیری تصادفی و فرمول کوکران به شرح زیر استفاده شد (Cochran, 1977):

$$n = \frac{N(S \times t)^2}{(N-1)d^2 + (S \times t)^2} \quad (1)$$

³ Semi-Arid

⁴ Dry-Sub Humid

⁵ Humid

جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات

پس از مشورت با کارشناسان منطقه، چندین مزرعه نماینده سامانه‌های آبیاری رایج انتخاب شدند. یک پرسشنامه برای جمع‌آوری داده‌ها در مورد مناطق زراعی، مصرف نهاده (آب، کود، آفت‌کش‌ها، مقدار بذر، ماشین‌ها، سوخت دیزل، برق، تجهیزات

¹ hyper-arid

² Arid

یک محصول، فرآیند یا خدمات ارزیابی کند. بر اساس این اطلاعات، ارزیابی چرخه حیات می‌تواند اثرات بالقوه بر محیط‌زیست را تفسیر و کمی کند و دید دقیق و جامع‌تری از جنبه‌های محیط زیستی کل فرآیند ارائه دهد. طبق استانداردهای ایزو ۱۴۰۴۰ و ایزو ۱۴۰۴۴، LCA شامل چهار مرحله اصلی است (ISO, 2006; Brenttrup et al., 2004).

تعیین هدف و دامنه کاربرد

تعریف هدف و محدوده اولین مرحله در فرآیند تجزیه‌وتحلیل چرخه حیات است که در آن محصول مورد ارزیابی و همچنین زمینه ارزیابی که باید انجام شود تعریف می‌شود. این مرحله در فرآیند LCA ضروری است. در مرحله تعیین هدف و دامنه کاربرد، در مورد چرایی (هدف) و چگونگی (دامنه کاربرد) یک مطالعه ارزیابی چرخه حیات بحث می‌شود. در مرحله اول، محصول نهایی مورد انتظار، مرزهای سیستم مورد مطالعه، واحد کارکردی و در نهایت فرض‌های مطالعه مشخص می‌شود. در این مطالعه هدف بررسی شاخص‌های مختلف محیط زیستی WF سامانه‌های آبیاری رایج مزارع گندم در پنج اقلیم (H و DSH؛ SA؛ A؛ HA) با استفاده از روش‌های (Hoekstra et al., 2012؛ AWARE؛ Berger et al., 2014 و Pfister et al., 2009) است که هر یک با استفاده از چارچوب‌های مختلفی به تحلیل مصرف آب و استرس آبی در بخش‌های مختلف کشاورزی پرداخته و دیدگاه‌های مختلفی در خصوص مدیریت منابع آب ارائه می‌دهند. قابل ذکر است در این مطالعه، تنها یک مرحله چرخه حیات تولید گندم در مزرعه در تمام سناریوها گنجانده شده است. این مطالعه بر مرحله تولید گندم از ورودی تا خروجی مزرعه به‌عنوان محدوده ارزیابی متمرکز است. واحد کارکردی^۱ (FU) نیز باید مشخص گردد که نشان‌دهنده معیاری کمی از تولید محصول نهایی است که اثرات محیطی بر مبنای آن محاسبه می‌گردد (Chang et al., 2014).
FU انتخاب شده برای مقایسه WF سناریوهای مختلف، تولید ۱ تن گندم در طی یک چرخه تولید بود. مطابق با مطالعات مشابه (Taki et al., 2018)، گاه گندم به دلیل حداقل ارزش اقتصادی آن برای

که در آن؛ N اندازه جامعه آماری، t ضریب اطمینان در سطح ۹۵ درصد، s واریانس، d دقت احتمالی مطلوب و n حجم نمونه است. مصاحبه‌های جامع با کشاورزان منتخب انجام شد، تا زمانی که پاسخ‌های ثابت برای هر سیستم آبیاری به دست آمد، مصاحبه ادامه یافت. در مجموع ۲۰۰ کشاورز، که ۲۵۰۰ هکتار را پوشش می‌دادند، در پنج اقلیم در طول فصل کشت ۱۴۰۱-۱۴۰۲ مصاحبه شدند. از این میزان، ۹۳۰ هکتار از آبیاری سطحی (FI)، ۸۵۰ هکتار از آبیاری بارانی (SI) و ۷۲۰ هکتار از آبیاری قطره‌ای (DI) استفاده شد. آبیاری قطره‌ای با استفاده از نوارهای تیپ با فاصله ۵۰ تا ۷۰ سانتی‌متر از هم انجام شد و نوع سیستم آبیاری بارانی بسته به اقلیم متفاوت بود. آبیاری بارانی کلاسیک ثابت با آبپاش متحرک در اقلیم نیمه‌خشک و به‌صورت خیلی محدود در اقلیم فراخشک (آبیاری بارانی در اقلیم فراخشک رایج نیست)، سیستم ویل موو در اقلیم خشک، و سیستم گان با بوم در اقلیم نیمه مرطوب و مرطوب استفاده شدند. آبیاری گندم در اقلیم‌های نیمه مرطوب و مرطوب یک یا دو بار در طول فصل کشت به‌صورت آبیاری تکمیلی برای جبران نسبی کمبودهای بارندگی منطقه‌ای انجام شد. در این مطالعه با توجه به پنج اقلیم (SA؛ A؛ HA؛ H و DSH) و روش‌های مختلف آبیاری مختلف (FI, DI, SI) شامل (HA.FI, HA.DI, HA.SI, A.FI, A.DI, A.SI, SA.FI, SA.DI, SA.SI, DSH.FI, DSH.SI, H.FI, H.SI) تعریف شد.

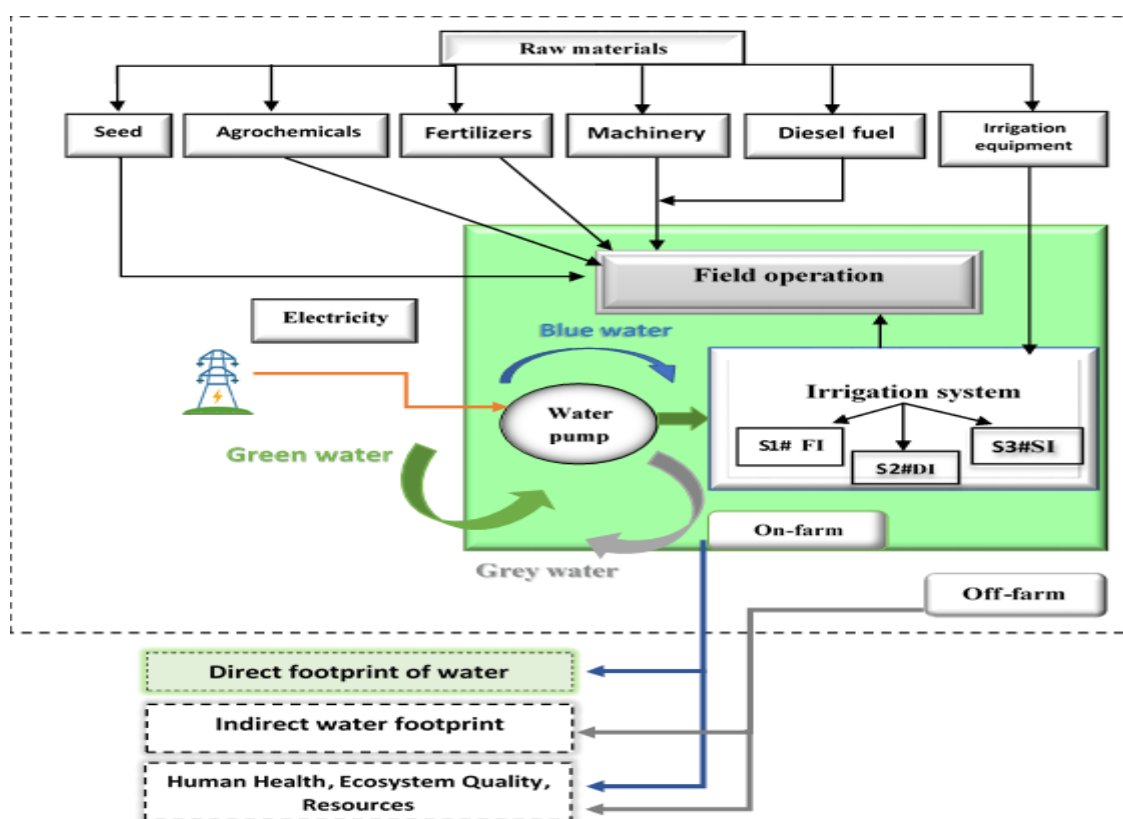
ارزیابی چرخه حیات (LCA)

در این پژوهش بررسی شاخص‌های محیط زیستی ردپای آب (WF) با استفاده از تکنیک ارزیابی چرخه حیات و با استفاده از نرم‌افزار SimaPro 9.4 انجام شد. روش LCA یک ابزار تحلیلی است که شامل جمع‌آوری و ارزیابی ورودی‌ها، خروجی‌ها و اثرات بالقوه محیط زیستی یک محصول، فرآیند یا سیستم در طول عمر آن می‌شود. هدف آن درک و ارزیابی بزرگی و اهمیت اثرات محیط زیستی بالقوه یک سیستم محصول است. ارزیابی چرخه حیات می‌تواند به‌طور جامع مصرف انرژی و مواد را در کل چرخه عمر

¹ Functional Unit

وارد شده به سیستم‌های آب طبیعی است تا کیفیت آب محیط در حد استانداردهای مشخص کیفیت، باقی بماند (Hoekstra and Chapagain, 2008). سیستم پس‌زمینه ردپای غیرمستقیم آب است که در تولید نهاده‌های مصرفی از جمله کود شیمیایی، سم، بذر، برق، گاز وئیل و تجهیزات آبیاری استفاده شده است. شکل ۲ مرزهای سیستم را برای همه سناریوها، با در نظر گرفتن تولید نهاده، عملیات مزرعه، استفاده از ماشین‌ها، و تأثیرات همه فعالیت‌ها تا برداشت گندم نشان می‌دهد.

کشاورزان منطقه، محصول جانبی در کنار تولید گندم در نظر گرفته نشد. سیستم پیش‌زمینه شامل ردپای مستقیم آب است که انواع آب (آب آبی، آب سبز، آب خاکستری) در کشت گندم را شامل می‌شود. آب آبی مقدار آب سطحی یا زیرزمینی تبخیر و تعرق شده در نتیجه تولید آن محصول را بیان می‌کند. آب سبز مقدار کل آب باران ذخیره شده در خاک به صورت رطوبت خاک و تبخیر شده از سطح مزرعه در طول دوره رشد محصول را نشان می‌دهد (که شامل تبخیر و تعرق توسط گیاهان و تبخیر از سطح خاک می‌شود). آب خاکستری حجم آب مورد نیاز برای رقیق کردن آلاینده‌های



شکل ۲- مرز سیستم LCA تعریف‌شده برای سناریوهای کشت گندم

آب در دسترس تعریف می‌شود. آب در دسترس شامل تمام رواناب‌ها است که ۸۰ درصد از آن برای نیازهای محیط زیستی کسر می‌شود. این روش به‌عنوان یکی از نخستین و

روش هوکسترا و همکاران

شاخص کمبود آب (WSI¹) بر اساس نسبت مصرف به دسترسی محاسبه می‌شود که به‌عنوان کسر بین آب مصرف‌شده و

¹ water scarcity indicator

روش AWARE (Available Water Remaining)

تعدد روش‌ها و شاخص‌ها در LCA مقایسه بین نتایج مطالعات مختلف را دچار مشکل کرده است و این باعث شد گروهی از متخصصین دانشگاهی، صنعتی، دولتی و مشاوره‌ای در -UNEP SETAC تحت عنوان گروه ارزیابی استفاده آب در چرخه حیات (WULCA²) تشکیل شود و روشی توافقی برای ارزیابی کمبود آب، قابل استفاده در مرحله میانه ارزیابی اثر LCA، توسعه داده شود. در نهایت روش AWARE بر پایه کمی کردن نسبت آب در دسترس باقیمانده بر مساحت (پس از تأمین نیاز انسانی و اکوسیستم) توسعه داده شد. در این روش فرض شده است که پتانسیل محرومیت دیگر مصرف‌کنندگان آب مستقیماً متناسب با مقدار آب مصرف شده بوده و با آب موجود باقیمانده در واحد سطح و زمان نسبت عکس دارد (Boulay et al., 2018).

در جدول ۱، پنج روش مورد مطالعه جهت برآورد ردپای محیط زیستی آب مقایسه شده‌اند. هر روش از نظر نوع اثرات مورد بررسی، شاخص‌ها، تمرکز بر جنبه‌های مختلف محیط زیستی یا اجتماعی و نقاط قوت و ضعف بررسی شده است.

تجزیه و تحلیل موجودی چرخه حیات (LCI)

سیاهه چرخه حیات یا همان فهرست ورودی‌ها و خروجی‌های چرخه حیات که اصطلاحاً به آن Life Cycle Inventory یا همان LCI گفته می‌شود، شامل جمع‌آوری داده‌ها و انجام محاسبات به منظور کمی سازی ورودی‌ها و خروجی‌های چرخه حیات محصول است. در این مرحله کلیه ورودی‌ها و خروجی‌های مربوط به تولید گندم در سناریوهای مختلف اعم از مصرف منابع و انتشار آلودگی جمع‌آوری و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای محاسبه میزان آب مصرفی غیرمستقیم ناشی از مصرف نهاده‌ها (مربوط به تولید کودها، آفت‌کش‌ها، سوخت و ...) از پایگاه‌های داده بین‌المللی EcoInvent موجود در نرم‌افزار سمیپرو (SimaPro 9.4) استفاده شد.

شناخته شده‌ترین روش‌ها برای محاسبه ردپای آب، در بسیاری از مطالعات به کار رفته است. این روش با تمرکز بر مصرف مستقیم و غیرمستقیم آب در محصولات و فرآیندها، به ویژه در حوزه کشاورزی، مطالعات زیادی را به خود اختصاص داده است. روش هوکسترا به صورت دقیق حجم آب مصرف شده در تولید یک محصول یا فرآیند را اندازه‌گیری می‌کند و آن را به آب سبز، آب آبی و آب خاکستری تقسیم می‌کند (Hoekstra et al., 2012).

روش برگر و همکاران

این روش آسیب‌پذیری حوضه‌ها را در برابر کاهش آب شیرین تجزیه و تحلیل می‌کند. بر اساس کمبود آب آبی محلی، شاخص کاهش آب (WDI¹) نشان‌دهنده خطری است که مصرف آب می‌تواند منجر به کاهش منابع آب شیرین شود. کمبود آب با مرتبط کردن مصرف سالانه آب به در دسترس بودن در بیش از ۱۱۰۰۰ حوضه تعیین می‌شود. هدف روش Berger، ارزیابی مصرف آب به شکلی است که نه تنها به پایداری محیطی بلکه به پایداری اجتماعی نیز توجه شود. پایداری اجتماعی به معنی تأمین منابع آب به شکلی است که نه تنها برای نسل حاضر بلکه برای نسل‌های آینده نیز پایدار باشد و تعادل در دسترسی به منابع آب بین گروه‌های مختلف اجتماعی حفظ شود. این روش به تحلیل جامع‌تری از اثرات محیط زیستی مصرف آب می‌پردازد و به جای تمرکز صرف بر حجم آب مصرفی، بر پیامدهای محیط زیستی و اجتماعی آن نیز تأکید می‌شود (Berger et al., 2014).

روش فایستر و همکاران

این روش به عنوان یکی از شاخص‌های استفاده شده در ارزیابی چرخه حیات، تمرکز خود را بر روی تأثیرات مصرف آب از منظر کیفیت اکوسیستم‌ها، سلامت انسان و استفاده از منابع قرار داده است. این روش در کنار روش‌های دیگر ردپای محیط زیستی آب، می‌تواند تصویری کامل از اثرات مصرف آب بر محیط زیست و جامعه ارائه دهد و به تصمیم‌گیری‌های پایدارتر کمک کند (Pfister et al. 2009).

1 water depletion index

2 Water Use in Life Cycle Assessment

جدول ۱- مقایسه پنج روش مورد مطالعه در برآورد ردپای محیط زیستی آب

Pfister	AWARE	Berger	Hoekstra	ویژگی / روش
سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم، منابع	استرس آبی منطقه‌ای	اثرات محیط زیستی و اجتماعی	اثرات مستقیم محیط زیستی	اثرات بررسی شده
منطقه‌ای و جهانی	منطقه‌ای	منطقه‌ای و جهانی	جهانی	مقیاس مکانی
ارزیابی کامل اثرات محیط زیستی مصرف آب	ارزیابی اثرات مصرف آب در مناطق دارای تنش آبی	ارزیابی اثرات اجتماعی و محیط زیستی	ارزیابی ردپای آب محصولات	کاربرد اصلی
ارزیابی همه‌جانبه اثرات محیطی، انسانی و منابع	بررسی تأثیرات در مناطق دارای تنش	توجه به جنبه‌های اجتماعی	جامعیت در انواع آب مصرفی	نقاط قوت
پیچیدگی و نیاز به داده‌های دقیق	تمرکز بر آب آبی	کمبود در شاخص‌های اکوسیستم	محدودیت در ارزیابی تنش آبی	نقاط ضعف

جدول ۲ نتایج LCI را برای تولید یک تن گندم در اقلیم‌ها و

سامانه‌های آبیاری مختلف نشان می‌دهد که شامل ۸ دسته اصلی ماشین‌های کشاورزی، کودها، آفت‌کش‌ها، آب، برق، بذر، سوخت گازوئیل و تجهیزات سیستم آبیاری است. وزن هر یک از تجهیزات آبیاری مورد استفاده بر اساس ابعاد و مشخصات فنی ارائه شده توسط سازندگان و وزن ماشین‌های کشاورزی بر اساس طول عمر مفید و ساعت کارکرد محاسبه شد. در اقلیم HA و A، آب و برق بیشترین نهاده‌های مصرفی برای تولید گندم بودند. بیشترین مصرف نهاده در سناریوی HA-SI به دلیل عملکرد پایین گندم رخ داد، درحالی‌که کمترین نهاده در سیستم SA-DI مصرف شد. در اقلیم HA، کل نهاده مصرفی در سیستم DI نسبت به سیستم FI ۴۶ درصد کاهش و در سیستم SI، ۲۳ درصد افزایش یافت. در اقلیم A، مجموع نهاده مصرفی در سیستم آبیاری DI و SI در مقایسه با FI به ترتیب ۳۹ و ۲۹ درصد کاهش یافت. این کاهش در اقلیم SA به ترتیب ۳۴ و ۱۳ درصد است. در اقلیم DSH و H، مصرف نهاده در سیستم SI نسبت به سیستم FI به ترتیب ۳۱ و ۱۸ درصد کاهش یافت.

بالاترین بار الکتریکی در سیستم SI مشاهده می‌شود، درحالی‌که پایین‌ترین بار مربوط به FI است. علاوه بر این، در اقلیم‌های HA و A به دلیل عمق بیشتر چاه‌ها بار الکتریکی مورد نیاز بالاتر است. در اقلیم HA، گندم در آبان ماه کشت و در

ارزیابی اثرات (LCIA¹)

ارزیابی پیامد چرخه حیات بخشی از ارزیابی چرخه حیات است که هدف آن دریافتن ارزیابی اثرات، تفسیر ورودی‌ها و خروجی‌ها در محاسبه ردپای آب در تولید گندم است. بر این اساس تحلیل ردپای آب و اثرات محیط زیستی آن با استفاده از تکنیک ارزیابی چرخه حیات مورد بررسی قرار گرفت.

تفسیر نتایج

در ارزیابی چرخه زندگی (LCA)، تفسیر نتایج آخرین بخش از مطالعه ارزیابی چرخه حیات و یک مرحله مهم است که زمینه و معنا را برای داده‌های جمع‌آوری شده و تجزیه و تحلیل شده در مراحل قبلی (تعریف هدف و محدوده، فهرست موجودی، و ارزیابی تأثیر چرخه حیات) فراهم می‌کند. این مرحله شامل ارزیابی و معنا بخشیدن به یافته‌ها برای به دست آوردن نتیجه‌گیری و توصیه‌های معنادار است. در طول این مرحله، نتایج ارزیابی اثرات محیط زیستی ردپای آب بر اساس سناریوهای از پیش تعریف شده، با در نظر گرفتن عواملی مانند شرایط اقلیمی و انواع سامانه‌های آبیاری در تولید گندم مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

نتایج و بحث

نهاده‌های مصرفی (LCI)

¹ Life Cycle Impact Assessment

به ازای یک تن تولید گندم در روش DI نسبت به FI به ترتیب ۰ و ۴۵ درصد کاهش و در سیستم SI نسبت به FI به ترتیب ۱۶ و ۲۵ درصد کاهش یافت. دوره آبیاری در اقلیم‌های HA، SA و A تقریباً مشابه است: ۱۲-۱۸ روز برای FI، ۸-۵ روز برای DI و ۱۲-۱۰ روز برای SI است. در اقلیم‌های DSH و H، گندم در آبان ماه کشت و در خردادماه برداشت می‌شود و با توجه به میزان بارندگی، یک یا دو مرتبه آبیاری در فروردین یا اردیبهشت انجام می‌شود. آب مصرفی در روش SI نسبت به FI در اقلیم DSH و H به ترتیب ۲۵ و ۴۵ درصد کاهش و برق مصرفی ۹۰ و ۱۵۲ درصد افزایش می‌یابد.

اردیبهشت‌ماه برداشت می‌شود و آبیاری از آذرماه تا فروردین‌ماه انجام می‌شود. برق و آب مصرفی به ازای یک تن تولید گندم در روش DI نسبت به FI به ترتیب ۳۸ و ۵۵ درصد کاهش و در سیستم SI نسبت به FI به ترتیب ۳۵ و ۱۹ درصد افزایش یافت. در اقلیم A، گندم در آبان کشت و در خرداد برداشت می‌شود و آبیاری در آبان و از اسفند تا اردیبهشت ادامه دارد. میانگین برق و آب مصرفی به ازای یک تن تولید گندم در روش DI نسبت به FI به ترتیب ۲۷ و ۵۳ درصد کاهش و در سیستم SI نسبت به FI به ترتیب ۱۷ و ۴۱ درصد کاهش یافت. در اقلیم SA، گندم در مهرماه کشت و در خردادماه برداشت می‌شود و آبیاری در مهرماه و از فروردین تا اردیبهشت انجام می‌شود. میانگین برق و آب مصرفی

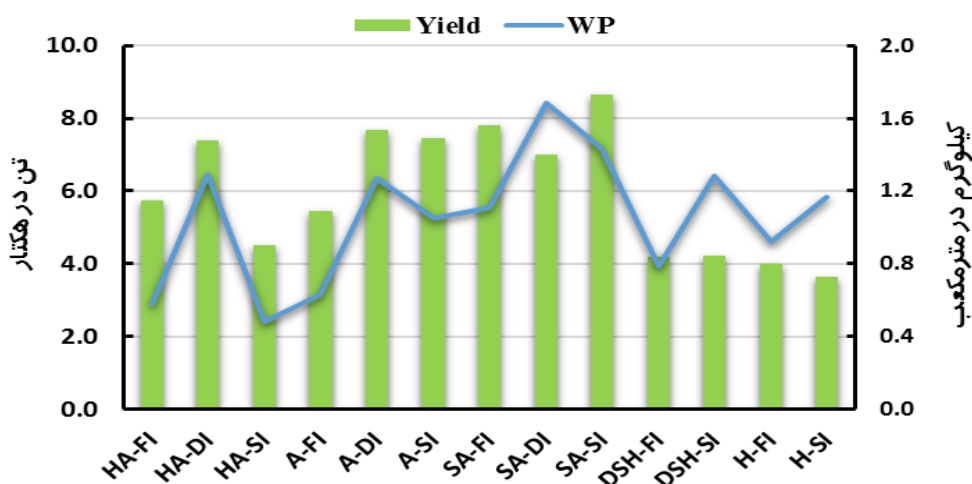
جدول ۲- نهاده‌های مصرفی تولید یک تن گندم و میزان عملکرد گندم در اقلیم‌ها و سامانه‌های آبیاری مختلف

اقلیم		HA			A			SA			DSH		H		سیستم آبیاری	واحد	نهاد
SI	DI	FI	SI	DI	FI	SI	DI	FI	SI	DI	FI	SI	FI	SI			
۰/۸	۰/۶	۱/۹	۱/۲	۰/۸	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۹	۰/۷	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۱/۶	۰/۸	کیلوگرم	ماشین‌ها
۶۴	۴۵	۶۷	۶۱	۳۸	۳۱	۳۱	۴۳	۳۸	۲۹	۳۵	۵۵	۷۰	۸۹	۸۳	۶۴	کیلوگرم	کود اوره
۱۹/۳	۸/۲	۲۲/۲	۱۵/۲	۱۵/۸	۱۱/۷	۱۶/۷	۱۴/۳	۱۴/۳	۱۴/۰	۲۳/۹	۲۳/۹	۲۱/۷	۲۵	۱۵/۱	۱۹/۳	کیلوگرم	کود فسفات
۹/۸	۵/۰	۱۱/۱	۷/۱	۷/۶	۴/۵	۲/۶	۰	۲/۶	۲/۰	۳۰/۹	۳۰/۹	۱۵/۶	۲۱/۹	۱۵/۱	۹/۸	کیلوگرم	کود پتاسیم
۰/۱۰	-	۰/۳۰	-	۰/۰۱	۰/۰۱	-	-	۰/۰۱	۰/۲۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۰۴	۰/۲۰	۰/۴۰	۰/۱۰	کیلوگرم	افت کتس
۰/۷۰	۰/۴۰	۰/۷۰	۰/۳۸	۰/۳۲	۰/۲۵	۰/۳۰	۰/۱۰	۰/۳۰	۰/۲۰	۱/۲	۱/۲	۰/۶۰	۰/۷۰	۱/۵	۰/۷۰	لیتر	افت کتس
۱۵۸۰	۷۱۷	۱۸۷۵	۱۴۱۳	۶۶۵	۸۲۸	۷۴۰	۴۱۱	۴۱۱	۵۵۲	۸۹۸	۸۹۸	۴۰۴	۶۱۰	۳۳۶	۱۵۸۰	مترمکعب	آب مصرفی
۷۳۸	۵۳۶	۹۹۲	۵۵۰	۴۰۴	۴۵۸	۱۷۲	۱۷۲	۱۷۲	۱۹۲	۸۴	۸۴	۱۶۰	۵۴	۱۳۶	۷۳۸	کیلووات ساعت	الکتریسیته
۲۷	۱۷	۳۱	۲۳	۱۶	۱۴	۱۶	۱۴	۱۴	۱۶	۳۸	۳۸	۲۲	۱۷	۲۰	۲۷	لیتر	گازوئیل
۴۹	۳۰	۶۴	۴۸	۳۸	۳۴	۳۷	۲۱	۳۴	۳۶	۴۶	۴۶	۴۴	۵۰	۵۰	۴۹	کیلوگرم	بذر
تجهیزات سیستم آبیاری																	
-	۰/۴۱	۰/۱۴	-	۰/۳۶	۰/۰۲	-	۰/۲۰	۰/۰۲	۰/۰۵	-	-	۰/۰۵	-	۰/۰۵	-	کیلوگرم	پلی اتیلن
۰/۱	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱	کیلوگرم	چدن
-	۰/۰۰۱	-	-	۰/۰۰۰۱	-	-	۰/۰۰۰۰۵	-	-	-	-	-	-	-	-	کیلوگرم	برنج
-	-	-	-	-	۰/۰۰۷	-	-	۰/۰۰۷	-	-	-	-	-	-	-	کیلوگرم	آلومینیوم
-	-	-	-	-	۰/۰۱	-	-	۰/۰۱	-	-	-	۰/۳۵	۰/۱۹	-	-	کیلوگرم	فولاد

عملکرد و بهره‌وری آب

در روش DI به‌طور کلی WP بیشتر از FI است که این یافته توسط مطالعات مختلف تأیید می‌شود (Fang et al., 2018; Taguta et al., 2022). متوسط بهره‌وری در روش FI ۰/۸، DI ۱/۴ و SI ۱/۱ کیلوگرم بر مترمکعب بدست آمد. متوسط بهره‌وری گندم در کشور ۰/۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب و متوسط بهره‌وری آب گندم در ۱۰ کشور عمده تولیدکننده (هند، چین، آمریکا، استرالیا، کانادا، ترکیه، آلمان، فرانسه، پاکستان و روسیه) به‌طور متوسط ۰/۹۳ کیلوگرم بر مترمکعب گزارش شده است (حیدری، ۱۴۰۰). بر اساس بررسی‌های انجام‌شده به‌منظور افزایش تولید پایدار گندم نیاز است فن‌آوری‌های سازگار با تغییرات اقلیمی همچون بهبود روش‌های برداشت محصول، آبیاری قطره‌ای، کشاورزی حفاظتی، کود، آبیاری و مدیریت تغذیه خاص مکانی گسترش یابند (واعظی و همکاران، ۱۳۹۹).

نتایج به‌دست‌آمده از مقادیر بهره‌وری آب و عملکرد در اقلیم‌ها و روش‌های مختلف آبیاری نشان از تفاوت قابل‌توجه این شاخص‌ها در شرایط مختلف بود (شکل ۳). حداکثر عملکرد (۸/۶ تن در هکتار) در اقلیم SA تحت سیستم SI به دست آمد، درحالی‌که حداقل عملکرد (۳/۷ تن در هکتار) در اقلیم H تحت سیستم SI ثبت شد. میانگین عملکرد در تمام سناریوها ۶ تن در هکتار بود. تغییر سیستم آبیاری از FI به DI و SI منجر به افزایش قابل‌توجهی در میانگین WP، با افزایش ۰/۷۶٪ و ۰/۳۵٪ شد. بالاترین WP در سناریوی SA-DI با ۱/۶۹ کیلوگرم بر مترمکعب و کمترین آن در سناریوی HA-SI با ۰/۴۸ کیلوگرم بر مترمکعب به دست آمد. سامانه‌های آبیاری تأثیر قابل‌توجهی بر WP داشتند،



شکل ۳- عملکرد و بهره‌وری آب در پنج اقلیم و تحت سامانه‌های مختلف آبیاری

ثانویه یا مراحل غیرمستقیم پرداخته می‌شود، برابر با ۸۱۰ مترمکعب به دست آمد. ردپای آب در روش Hoekstra به دلیل توجه بیشتر به تأثیرات مصرف آب در مراحل مختلف و اثرات ثانویه (مانند پساب و آلودگی) بیشتر از روش Berger برآورد گردید. چنین نگاهی جامع به مصرف آب، امکان تحلیل عمیق‌تر پیامدهای محیط زیستی تولید محصول را فراهم می‌سازد و تأثیرات غیرمستقیم آبی را نیز در بر می‌گیرد، و درنهایت، بر مدیریت پایدار

بررسی شاخص‌های ردپای آب در سناریوهای مختلف

روش Hoekstra که بر مفهوم ردپای آب آبی، سبز و خاکستری تأکید دارد، تجزیه و تحلیل چندوجهی از مصرف آب در تولید گندم ارائه کرد. نتایج حاصل از این روش نشان داد به‌طور متوسط ردپای آب تولید هر تن گندم ۱۴۵۶ مترمکعب است، متوسط ردپای آب در روش Berger که نشان‌دهنده میزان کاربرد واقعی آب در فرآیند آبیاری و تولید محصول است و کمتر به اثرات

بیماری یا مرگ زودرس از دست می‌دهد. کاهش دسترسی به آب، به‌خصوص در مناطقی با تنش آبی، می‌تواند بر افزایش DALY تأثیرگذار باشد. به‌عنوان مثال، سناریوی HA.SI با ۰/۰۰۱۴ DALY بالاترین مقدار را دارد، درحالی‌که SA.DI, DSH.SI, H.SI با ۰/۰۰۰۳ DALY کمترین مقدار را نشان می‌دهد. این نشان‌دهنده این است که برخی روش‌های آبیاری یا مدیریت در مناطق خاص می‌تواند تأثیرات منفی بیشتری بر سلامت انسانی داشته باشد. مقادیر PAF^2 (پتانسیل کاهش تنوع زیستی) در سناریوهای مختلف نشان‌دهنده فشارهای محیط زیستی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی است. این شاخص به تأثیرات مصرف آب بر اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی می‌پردازد. آب یکی از منابع ضروری برای بقای گونه‌های مختلف گیاهی و جانوری است، و کاهش دسترسی به آب، به‌ویژه در زیست‌بوم‌های حساس، می‌تواند باعث تخریب اکوسیستم‌ها و انقراض گونه‌ها شود. هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نشان‌دهنده تأثیر منفی بیشتری بر کیفیت اکوسیستم است. سناریوی HA.SI با $PAF * m^2 yr$ ۲۱۰۹ بیشترین فشار را بر اکوسیستم‌ها دارد، درحالی‌که H.SI با $PAF * m^2 yr$ ۳۸۵ پایین‌ترین فشار را گزارش می‌دهد. مقدار MJ surplus به معنی انرژی اضافی موردنیاز برای دسترسی به منابع طبیعی در آینده است. این شاخص به تأثیرات مصرف آب بر منابع طبیعی، به‌ویژه منابع آب تجدیدناپذیر، می‌پردازد. مصرف بیش‌ازحد آب به معنای نیاز به استخراج و بهره‌برداری بیشتر از منابع تجدیدناپذیر است. MJ surplus نشان‌دهنده میزان انرژی اضافی است که برای استخراج آب از منابع کمتر قابل‌دسترس، مانند آب زیرزمینی یا نمک‌زدایی آب دریا، نیاز است. هرچه مصرف آب در یک منطقه بیشتر باشد، انرژی بیشتری برای تأمین منابع آب موردنیاز باید صرف شود، که این باعث افزایش این شاخص می‌شود. همچنین اگر یک منبع طبیعی (مانند نفت یا فلزات) مصرف شود، مقدار MJ surplus نشان می‌دهد که چقدر انرژی باید صرف شود تا منابع جدید کشف یا تولید شوند. هرچه دسترسی به این منابع دشوارتر شود، مقدار انرژی لازم برای استخراج آن‌ها

آب تأکید می‌کند. متوسط استرس آبی در روش AWARE ۵۶۵۷۶ مترمکعب محاسبه شد که نشان‌دهنده استرس آبی بالا و آسیب‌پذیری بیشتر منابع آب در کشور است. مقایسه این سه روش نشان می‌دهد که هرکدام به جنبه خاصی از مصرف آب توجه دارند و بسته به نوع هدف و مقیاس مطالعه، می‌توانند نتایج متفاوتی ارائه دهند. میانگین ردپای آب کشت گندم در کشور ۲۲۰۹ مترمکعب (علیقلی نیا و همکاران، ۱۳۹۸) و میانگین جهانی ۱۸۲۷ مترمکعب بر تن (Mekonnen and Hoekstra, 2011) را نشان می‌دهد، که در این مطالعه به دلیل تأثیر کاربرد روش‌های آبیاری تحت فشار به‌ویژه آبیاری قطره‌ای متوسط کشوری کاهش یافته است.

بالاترین مقدار WF در تمام شاخص‌های محاسبه شده مربوط به سناریوی HA.SI و پایین‌ترین مربوط به سناریوی SA.DI است. این تفاوت‌ها نشان‌دهنده تأثیرات متفاوت اقلیم‌ها و روش‌های آبیاری بر ردپای آب گندم هستند. در اقلیم‌های HA و A، دستیابی به WF پایین به دلیل شرایط آب و هوایی و وابستگی بیشتر کشت گندم به آب آبی و نرخ تبخیر و تعرق بالا چالش‌برانگیز است. بنابراین، اجرای شیوه‌های کشاورزی مدرن، مانند کشاورزی دقیق و فناوری‌های پیشرفته آبیاری، برای بهبود WF در این مناطق بسیار حائز اهمیت است. در اقلیم‌های DSH و H، WF برای گندم عمدتاً به دلیل وابستگی بیشتر به بارندگی (آب سبز) و مدیریت ضعیف مزارع گندم که اغلب منجر به کاهش عملکرد می‌شود، بالا است. با این حال، پتانسیل قابل‌توجهی برای کاهش WF در این مناطق با استفاده از تکنیک‌های آبیاری مدرن و بهبود شیوه‌های مدیریت گندم وجود دارد.

بر اساس شاخص‌های محیط زیستی ردپای آب در ایجاد پتانسیل آسیب‌پذیری به سلامت بشر، کیفیت اکوسیستم و منابع محیط زیستی به روش فایستر و همکاران (Pfister et al., 2009)، کاهش دسترسی به آب بهداشتی و آشامیدنی می‌تواند منجر به بیماری‌ها و مرگ‌ومیر ناشی از آلودگی آب شود. DALY¹ واحدی است که برای اندازه‌گیری تأثیر مصرف آب بر سلامت انسان‌ها استفاده می‌شود و بیانگر سال‌هایی است که فرد به دلیل

1 Disability-adjusted life years

2 Potentially Affected Fraction

تولیدکننده پنبه نساجی نشان داد به طور متوسط تولید هر کیلوگرم پنبه نساجی ۳/۴۸ مترمکعب آب آبی مصرف می‌کند و اثرات سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و منابع به ترتیب DALY^۶ ۱۰×۵/۷۱، ۳/۸ PAF*m²yr و ۱۲/۸ MJ surplus به ازای هر کیلوگرم است (Pfister et al., 2009). بررسی پارامترهای مختلف محیط زیستی ناشی از مصرف آب به صورت مستقیم (آب آبی و سبز) و غیرمستقیم (آب مصرفی در تولید نهاده‌های مختلف ورودی) در تولید یک تن شلتوک نشان داد که بالاترین آسیب به سلامتی بشر، کیفیت اکوسیستم و منابع محیط زیستی به روش فایستر و همکاران به ترتیب به میزان DALY ۰/۰۰۰۸۳۱، ۱۲۸۶/۷ PAF*m²yr و MJ surplus ۸۰۹۳/۲ و در کشت مکانیزه به ترتیب DALY ۰/۰۰۰۷۷۵، ۱۲۰۰/۸ PAF*m²yr و MJ surplus ۷۵۵۳/۳ است.

بیشتر خواهد شد. لذا هرچه مقدار MJ surplus بالاتر باشد، نشان می‌دهد که منابع بیشتری مصرف شده و یا جایگزینی آن‌ها دشوارتر و پرهزینه‌تر است. این مقدار بالاتر نشان‌دهنده فشار بیشتر بر منابع طبیعی و عدم پایداری در مصرف منابع است. سناریوی HA.SI با MJ surplus ۱۳۲۵۵ عملکرد ضعیفی دارد، درحالی‌که H.SI با MJ surplus ۲۴۰۶ بهترین عملکرد را دارد. این اختلاف می‌تواند نشان‌دهنده کارایی بالای برخی روش‌های آبیاری در تأمین انرژی باشد. کاربرد آبیاری قطره‌ای در اقلیم‌های HA، A و SA موجب کاهش ۵۷٪-۵۴٪ آسیب به سلامت انسان، بهبود ۵۳٪-۵۰٪ کیفیت اکوسیستم و ۴۴٪-۴۰٪ منابع گردید. همچنین آبیاری بارانی در اقلیم DSH و H موجب کاهش ۴۴٪-۴۰٪ آسیب به سلامت انسان، بهبود ۵۴٪-۵۵٪ کیفیت اکوسیستم و ۴۴٪-۴۰٪ منابع گردید. نتایج پژوهش فایستر و همکاران در ۱۵ کشور مهم

جدول ۳- برآورد شاخص‌های مختلف ردپای آب در روش‌های مختلف

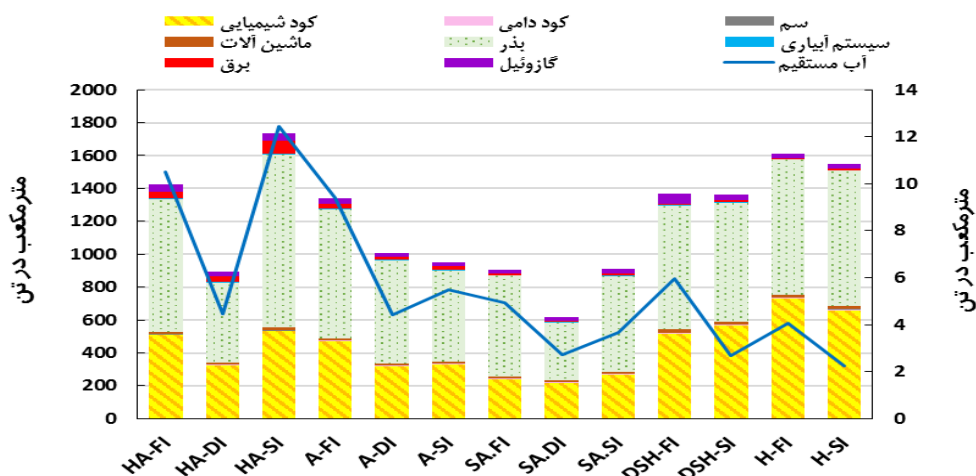
Pfister			AWARE	Berger	Hoekstra	سناریوها
Resources	Ecosystem Quality	Human Health				
MJ surplus	PAF*m ² yr	DALY	مترمکعب در تن			
۱۱۱۷۰	۱۷۷۷	۰/۰۰۱۱	۱۰۵۴۰۴	۱۵۰۹	۲۷۰۹	HA.FI
۴۷۴۷	۷۵۶	۰/۰۰۰۵	۴۴۸۷۶	۶۴۳	۱۱۵۵	HA. DI
۱۳۲۵۵	۲۱۰۹	۰/۰۰۱۴	۱۲۵۱۰۷	۱۷۹۲	۳۲۱۶	HA.SI
۹۹۹۲	۱۵۹۰	۰/۰۰۱۰	۹۴۲۹۶	۱۳۵۰	۲۴۲۴	A.FI
۴۷۰۹	۷۵۰	۰/۰۰۰۵	۴۴۵۳۹	۶۳۸	۱۱۴۷	A. DI
۵۸۵۹	۹۳۳	۰/۰۰۰۶	۵۵۳۳۶	۷۹۲	۱۴۲۳	A.SI
۵۲۳۸	۸۳۴	۰/۰۰۰۵	۴۹۴۷۸	۷۰۹	۱۰۶۳	SA.FI
۲۹۱۴	۴۶۴	۰/۰۰۰۳	۲۷۵۶۲	۳۹۵	۵۹۷	SA. DI
۳۹۱۴	۶۲۳	۰/۰۰۰۴	۳۷۰۳۳	۵۳۰	۱۲۷۳	SA.SI
۶۳۶۳	۱۰۱۳	۰/۰۰۰۷	۶۰۱۶۷	۸۶۲	۷۰۹	DSH.FI
۲۸۸۳	۴۶۱	۰/۰۰۰۳	۲۷۴۶۳	۳۹۳	۹۵۴	DSH.SI
۴۳۳۸	۶۹۲	۰/۰۰۰۵	۴۱۲۰۵	۵۹۰	۱۵۴۹	H.FI
۲۴۰۶	۳۸۵	۰/۰۰۰۳	۲۳۰۲۷	۳۳۰	۷۱۰	H.SI

نتایج بررسی شاخص‌های مختلف محیط زیستی در اقلیم‌های مختلف و تحت روش‌های مختلف آبیاری (شکل ۴ و ۵) نشان داد که ۹۵-۹۹ درصد ردپای آب کشت گندم ردپای مستقیم آب است و سیستم آبیاری DI به‌ویژه در اقلیم‌های HA و A میزان آب

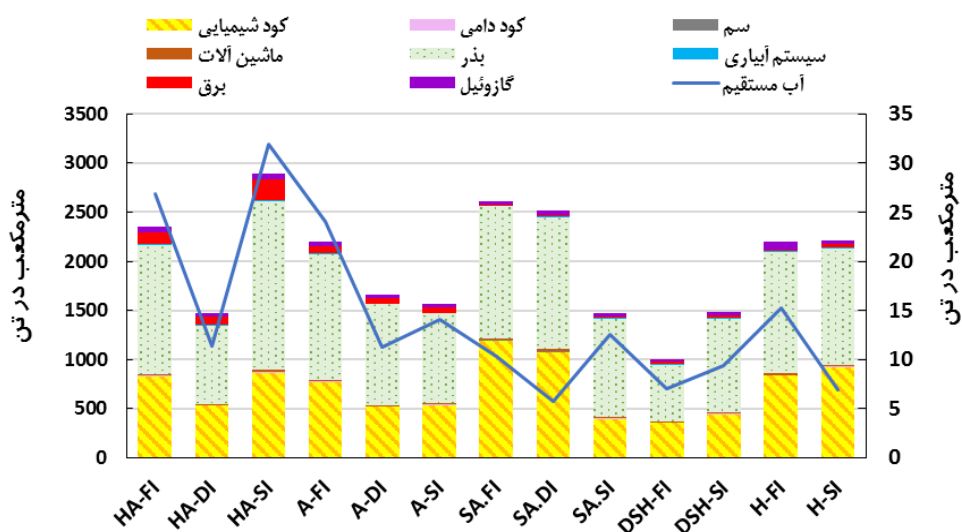
بررسی ردپای مستقیم و غیرمستقیم آب در سناریوهای مختلف

در اقلیم‌های DSH و H حدود ۵-۶ درصد بیش از سایر اقلیم‌ها است که به دلیل استفاده بیشتر از قارچ‌کش‌ها و علف‌کش‌ها و کودهای شیمیایی و همچنین عملکرد پایین‌تر محصول در این اقلیم‌ها است. افزایش سهم ماشین‌آلات در ردپای آب (غیرمستقیم) در اقلیم‌های SA، DSH، و H به دلیل مراحل بیشتر آماده‌سازی زمین و استفاده کمتر از شیوه‌های کشاورزی حفاظتی است. نتایج نشان می‌دهد که اقلیم منطقه و انتخاب سیستم آبیاری، تأثیر زیادی بر میزان ردپای آب در تولید گندم دارد، به طوری که اقلیم‌های HA، SI بالاترین ردپای آب و ناپایدارترین گزینه است لذا انتخاب سیستم آبیاری SI به منظور مدیریت بهینه مصرف منابع و کاهش ردپای محیط‌زیستی گزینه مناسبی برای این اقلیم نیست. همچنین H، SI، DSH، SA، DI دارای کمترین ردپای آب و پایدارترین گزینه است. مقایسه روش‌های مختلف برآورد ردپای آب نشان می‌دهد تأثیر استفاده از آب مستقیم (آب آبی) به طور عمده در روش Hoekstra برجسته‌تر است همچنین تأکید بیشتری بر تأثیرات منابع جانبی (نهاده‌های مصرفی) بر ردپای آب دارد. در روش Berger نسبت به روش Hoekstra ردپای آب کمتری برای منابع جانبی و مصرف مستقیم آب برآورد شده است که به دلیل رویکرد متفاوت این روش در محاسبه ردپای آب و تمرکز بر آب مصرفی به صورت مستقیم و عدم در نظر گرفتن آب خاکستری است.

مصرفی (آب آبی) را حدود ۵۰ درصد کاهش می‌دهد. گزینه HA-FI با مجموع ۱۷۷۹ مترمکعب در روش برگر و ۳۱۸۸ مترمکعب در روش هوکسترا بیشترین و گزینه H-SI با ۳۱۹ مترمکعب در روش برگر و گزینه SA-DI ۵۷۲ مترمکعب در روش هوکسترا کمترین ردپای مستقیم آب را داشتند. در بین نهاده‌های مصرفی کود شیمیایی و بذر در تمام سناریوها بالاترین ردپای آب (غیرمستقیم) را دارا می‌باشند. نتایج پژوهش‌های چا و همکاران (Cha et al., 2017) در تولید برنج نشان داد که تولید کودهای شیمیایی بالاترین سهم را در ردپای آب (غیرمستقیم) دارد. براساس نتایج سهم کودهای شیمیایی در ردپای آب (غیرمستقیم) در FI (۳۶/۵٪) بیشترین و در DI (۳۴/۳٪) کمترین بود که می‌تواند به دلیل بهبود راندمان استفاده از کودهای شیمیایی و کاهش آبشویی تحت سیستم آبیاری DI است که توسط مطالعاتی از جمله اوجلا و همکاران؛ یوان و پنگ؛ جمالی و همکاران تأیید شده است (Aujla et al., 2007, Yuan and Peng, 2017, Jamali et al., 2021). همچنین بیشترین ردپای آب (غیرمستقیم) حاصل از مصرف بذر در اقلیم HA، A، SA در سیستم FI (۶۱/۵٪) و کمترین در سیستم DI (۵۸/۵٪) به دست آمد و در اقلیم DSH و H تفاوت معنی‌داری مشاهده نشد. بر اساس شاخص‌های محاسبه‌شده ردپای آب (غیرمستقیم) مصرف کود شیمیایی و سم



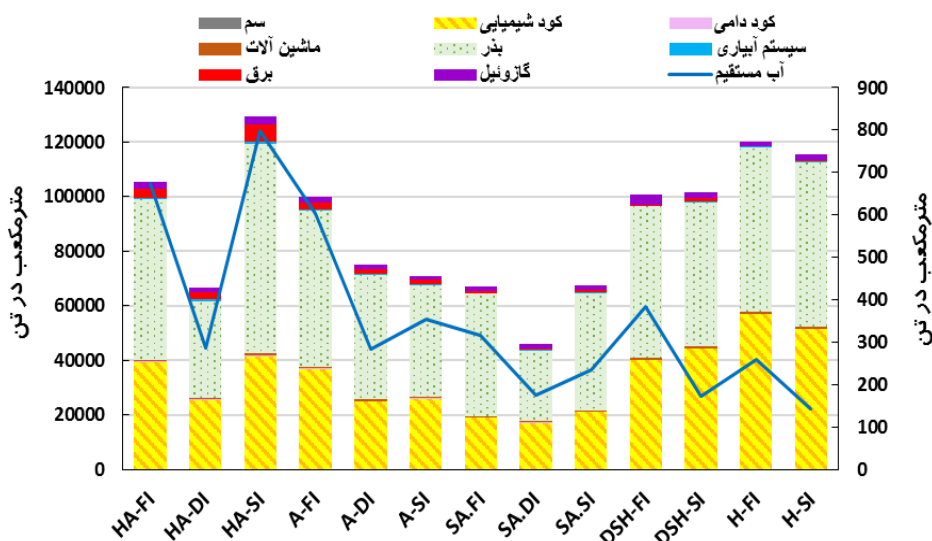
شکل ۴- برآورد شاخص ردپای آب با روش Berger



شکل ۵- برآورد شاخص ردپای آب با روش Hoekstra

این امر موجب افزایش مصرف برق جهت پمپاژ آب از اعماق بیشتر شده است. سامیان و همکاران میانگین سالانه کاهش سطح آب زیرزمینی را 1.4 ± 28 سانتی متر گزارش کردند که موجب تشدید مصرف انرژی برای آبیاری شده است (Saemian et al., 2022). نتایج بر اهمیت شرایط منطقه‌ای در استراتژی‌های مدیریت آب تأکید می‌کنند. همان‌طور که روش AWARE نشان می‌دهد، اثرات ردپای کمبود آب می‌توانند در مناطق مختلف به‌طور چشمگیری متفاوت باشند، که نشان‌دهنده این است که روش‌های یکسان برای مدیریت آب ممکن است مؤثر نباشند. درعین‌حال، استراتژی‌های متناسب با شرایط محلی، از جمله دسترسی به منابع آب، شرایط اقلیمی و نیازهای اکوسیستم، برای استفاده پایدار از آب ضروری است. بولی و همکاران بیان داشتند روش AWARE به‌عنوان روش جدید و توصیه‌شده برای ارزیابی اثرات مصرف آب است این روش هم محرومیت بالقوه کاربران انسانی و هم کاربران اکوسیستم‌ها را در سطح میانی ارزیابی می‌کند همچنین این روش با استاندارد ردپای آب مبتنی بر LCA (استاندارد ISO 14046) مطابقت دارد و به‌عنوان ردپای کمبود آب عمل می‌کند و برای ارزیابی جامع ردپای آب باید با شاخص‌های کیفیت آب تکمیل شود (Boulay et al., 2018).

نتایج حاصل از روش AWARE تغییرات قابل‌توجهی را در ردپای کمبود آب در مناطق مختلف نشان داد. در برخی از اقلیم‌ها (HA و A)، ردپای کمبود آب در تولید گندم تا سه مرتبه بیشتر از اقلیم‌های دیگر بود که منعکس‌کننده تفاوت‌های گسترده در دسترس بودن و تقاضای آب در مکان‌های مختلف جغرافیایی است. این امر اهمیت در نظر گرفتن شرایط آب محلی را هنگام ارزیابی پایداری شیوه‌های آبیاری گندم را برجسته می‌کند. کشت گندم در شرایط HA-SI با 125107 مترمکعب و H-SI با 23027 مترمکعب به ترتیب بیشترین و کمترین ردپای کمبود آب را داشتند. همچنین نتایج نشان داد که در یک اقلیم، ردپای کمبود آب می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی متأثر از روش آبیاری محصول، متفاوت باشد به‌نحوی که ردپای کمبود آب در اقلیم HA با آبیاری SI 19% افزایش و با آبیاری DI 58% کاهش داشت (شکل ۶). در روش AWARE در اقلیم HA و A پس از کود شیمیایی و بذر مؤثرترین نهاده در ردپای کمبود منابع برق است و درعین‌حال کشاورزی در این اقلیم‌ها به‌شدت به منابع آب زیرزمینی متکی است. بهره‌برداری بیش‌ازحد از این منابع منجر به کاهش قابل‌توجهی در سطح آب‌های زیرزمینی شده است (Saemian et al., 2022; Noori et al., 2021; Ashraf et al., 2017 که

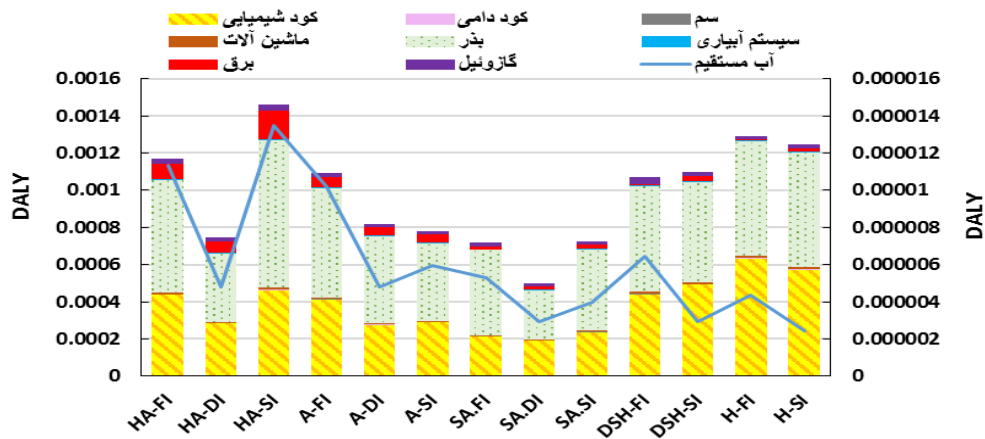


شکل ۶- برآورد شاخص ردپای آب با روش AWARE

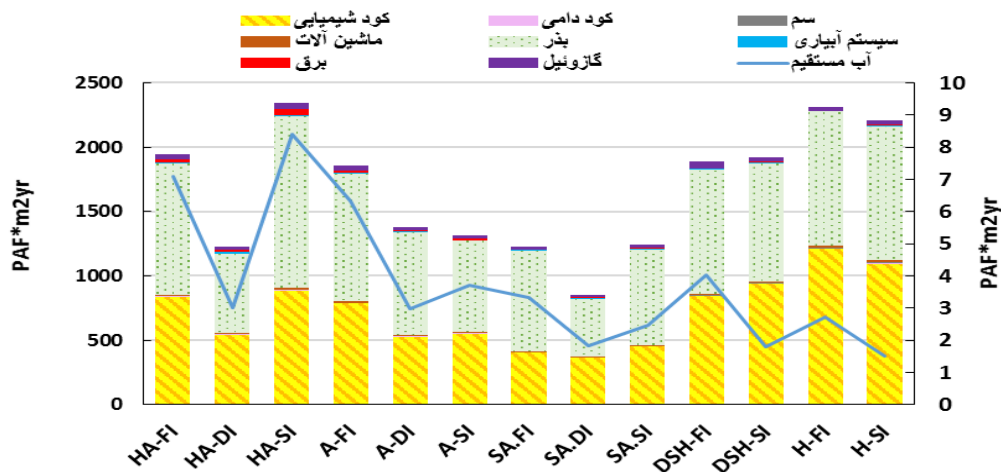
HA و A مصرف بالای برق جهت پمپاژ آب در رتبه سوم قرار دارد. در اقلیم‌های H و DSH گندم به‌عنوان یک محصول فرعی کشت می‌شود زیرا از نظر اقتصادی سود حاصل از کشت گندم در مقایسه با کشت محصولات مثل برنج پایین است و کشت گندم در این اقلیم‌ها بیشتر وابسته به آب سبز (بارندگی) است لذا عدم مدیریت مناسب زمین موجب کاهش عملکرد گندم و افزایش ردپای غیرمستقیم آب در این اقلیم‌ها شده است.

با توجه به شاخص‌های سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم‌ها و منابع محاسبه‌شده در روش Pfister کشت گندم در سناریوهای SA.DI و H.SI با کمترین ردپای مستقیم و غیرمستقیم آب پایدارترین و HA.SI با بیشترین ردپای مستقیم و غیرمستقیم آب ناپایدارترین اقلیم و روش آبیاری است. در این راستا نتایج مطالعه کعب و همکاران برای کشت جو و با استفاده از روش ReCiPe نشان دادد شاخص‌های سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم و تخلیه منابع در روش آبیاری DI نسبت به FI و SI بهبود دارد (Kaab et al., 2024).

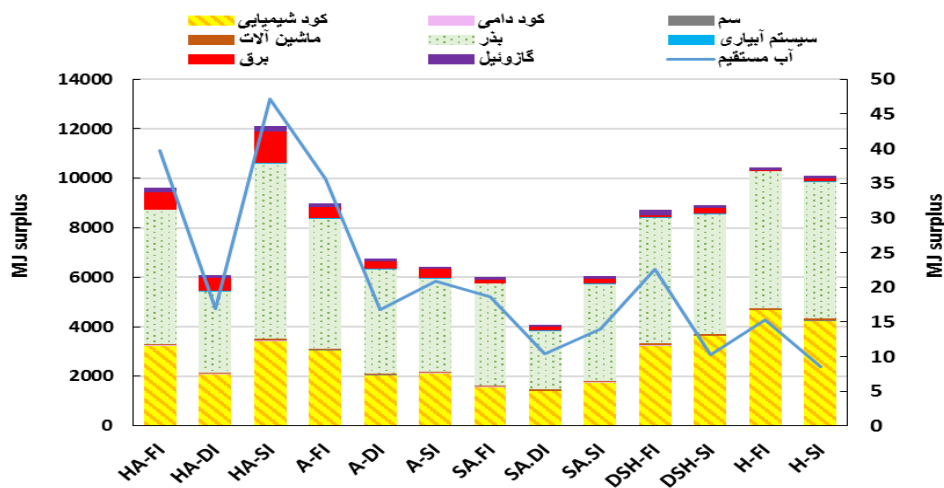
روش Pfister که تأثیرات بر سلامت انسان (شکل ۷)، کیفیت اکوسیستم‌ها (شکل ۸)، و تخلیه منابع (شکل ۹) را در نظر می‌گیرد، ارزیابی جامعی از ردپای آب ارائه می‌دهد. این روش نشان داد که ردپای آبی تولید گندم در اقلیم‌های مختلف بسته به سطوح تنش آبی محلی به‌طور قابل توجهی متفاوت است و روش آبیاری گندم می‌تواند اثرات قابل توجهی بر کمبود آب، به‌ویژه در مناطقی با دسترسی محدود به آب داشته باشد. در مناطق با تنش آبی بالا، روش Pfister نشان‌دهنده ردپای آب بیشتر در هر واحد تولید گندم است به طوری که کشت گندم در اقلیم HA بیشترین آسیب به سلامت انسان، اکوسیستم و تخلیه منابع را نشان داد و استفاده از روش آبیاری SI موجب تشدید آسیب‌ها به میزان ۱۸ درصد شد و در مقابل کاربرد سیستم آبیاری DI موجب بهبود ۵۷ درصدی شاخص‌های سلامت انسان، اکوسیستم و تخلیه منابع در این اقلیم گردید. ردپای غیرمستقیم آب در تولید کود شیمیایی و بذر در تمام سناریوها بالاترین سهم (۳۰-۵۰٪) را در افزایش آسیب به سلامت انسان، کیفیت اکوسیستم‌ها و تخلیه منابع دارا است و در اقلیم‌های



شکل ۷- ارزیابی اثرات محیط زیستی ردپای آب بر سلامت انسان با استفاده از روش Pfister



شکل ۸- ارزیابی اثرات محیط زیستی ردپای آب بر کیفیت اکوسیستم با استفاده از روش Pfister



شکل ۹- ارزیابی اثرات محیط زیستی ردپای آب بر تخلیه منابع با استفاده از روش Pfister

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به مقایسه روش‌های مختلف برآورد ردپای آب با استفاده از رویکرد ارزیابی چرخه حیات در تولید گندم در اقلیم‌های مختلف و روش‌های متفاوت آبیاری پرداخته است. روش‌های مختلف از فایستر تا هوکسترا، دیدگاه‌های منحصر به فردی در مورد مصرف آب و تأثیرات کمبود آب ارائه می‌دهد و بر نیاز به در نظر گرفتن چندین دیدگاه برای دستیابی به تصویری کامل تأکید می‌کند. بر اساس نتایج شاخص AWARE ردپای کمبود آب از ۱۲۵۱۰۷ مترمکعب در HA.SI تا ۲۳۰۲۷ مترمکعب در H.SI برآورد شد. در عین حال نتایج ردپای آب در اقلیم HA و A نسبت به سایر اقلیم‌ها حدود ۵۷ درصد بیشتر است. همچنین در روش آبیاری FI نسبت به DI ردپای آب به میزان ۵۳ درصد کاهش یافت. گنجاندن ردپای آب خاکستری در روش هوکسترا که اغلب مسئله نادیده گرفته شده در سایر روش‌ها است موجب شده است تا ردپای آب در روش هوکسترا نسبت به روش برگر ۴۴ درصد افزایش یابد که بیانگر اهمیت برآورد آب خاکستری است. باتوجه به نیاز آبی گندم در اقلیم‌های H و DSH مطابق با نت و وات و همچنین به میزان بارندگی و میزان آبیاری انجام شده به ترتیب ۶۰ و ۴۰ درصد آب مورد نیاز گیاه از آب سبز تأمین می‌شود ولی مدیریت ضعیف اراضی و همچنین استفاده از ارقام نامناسب موجب کاهش عملکرد و افزایش ردپای مستقیم و غیرمستقیم آب در این اقلیم‌ها شده است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که انتخاب روش مناسب برای محاسبه ردپای آب بستگی به اهداف مدیریت منابع آبی و میزان دقت مورد نیاز دارد. روش Hoekstra، با رویکرد جامع و توجه به اثرات جانبی، گزینه‌ای علمی‌تر و دقیق‌تر برای درک اثرات محیط زیستی مصرف آب است. این رویکرد به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا نه تنها میزان مصرف آب بلکه پیامدهای احتمالی محیط زیستی آن را نیز در نظر بگیرند. در مقابل، روش Berger به دلیل تمرکز بر مصرف واقعی آب، برای ارزیابی و مقایسه بین مزارع مناسب است. از سوی دیگر، روش AWARE به درک چالش‌های مرتبط با استرس آبی کمک می‌کند و می‌تواند در توسعه استراتژی‌های پایدار جهت مدیریت فشار روی منابع آبی به کار رود. همچنین روش Pfister در کنار روش‌های دیگر ردپای محیط زیستی آب، می‌تواند تصویری کامل از اثرات مصرف آب بر محیط‌زیست

جامعه ارائه دهد و به تصمیم‌گیری‌های پایدارتر کمک کند. با نگاهی به آینده، این یافته‌ها تأثیر قابل توجهی بر آینده کشاورزی پایدار و مدیریت منابع آب دارند. با استفاده از ترکیبی از این روش‌ها، تصمیم‌گیران می‌توانند استراتژی‌های موثرتری برای افزایش بهره‌وری آب، کاهش تنش آبی، و ترویج روش‌های کشاورزی پایدار توسعه دهند.

منابع

- آمارنامه کشاورزی. ۱۴۰۲. جلد اول. مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات معاونت برنامه‌ریزی و امور اقتصادی وزارت جهاد کشاورزی. <https://www.maj.ir>
- پورمحمد، ی.، موسوی بایگی، س.م.، علیزاده، ا.، ضیایی، ع.ن. و بنیان اول، م. ۱۳۹۶. برآورد بهره‌وری آب محصولات عمده نیشابور و بهینه‌سازی سطح زیرکشت محصولات. نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۳۱(۱): ۱۱۲-۱۲۶
- جناب، م. و نظری، ب. ۱۳۹۷. مطالعه شکاف عملکرد و شکاف بهره‌وری آب گندم، جو و ذرت در استان قزوین. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۹(۶): ۱۴۰۵-۱۴۱۷
- حیدری، ن. ۱۴۰۰. بهره‌وری آب گندم در ایران و مقایسه آن با مقادیر چند کشور. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. ۳۵(۴): ۴۲۱-۴۳۶
- درگاهی، ز.، نظری، ب.، رضانی اعتدالی، ه. و مازندرانی زاده، ح. ۱۳۹۷. ارزیابی سامانه‌های نوین آبیاری با مفاهیم بهره‌وری اقتصادی آب و راندمان آبیاری در استان قزوین. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۶۹۵-۶۸۳ (۳): ۱۲
- سیاوشی، م. و دستان، س. ۱۴۰۰. مقایسه ردپای بوم‌شناختی، ردپای آب و اثرات محیط‌زیستی نظام‌های تولید گندم (*Triticum aestivum* L.) آبی و دیم بر اساس اندازه مزرعه (مطالعه موردی: منطقه بوشهر). بوم‌شناسی کشاورزی. ۱۳(۱): ۱۳۵-۱۵۵
- علیقلی‌نیا، ت.، شیبانی، ح.، محمدی، ا. و حسام، م. ۱۳۹۸. مقایسه و ارزیابی رد پای آب آبی، سبز و خاکستری گندم در اقلیم‌های مختلف ایران. تحقیقات منابع آب. ۱۵(۳): ۲۴۵-۲۳۴.

- Environmental Science and Technology. 48 (8): 4521–4528.
- Boulay, A. M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M. J., Manzardo, A. and Margni, M. 2018. The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *International Journal of Life Cycle Assessment*. 23(2): 368-378
- CEC, December, 2008. Follow up Communication on Water Scarcity and Droughts in the European Union COM (2007) 414 final, [SEC(2008) 3069]. Commission of the European Communities, Brussels.
- Cochran, W.G. 1977. The estimation of sample size. *Sampling Techniques*. (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Chang, Y.-C., Lee, W. J., Wang, L. C., Yang, H. H., Cheng, M. T., Lu, J. H., Tsai, Y.I. and Young, L.H. 2014. Effects of waste cooking oil-based biodiesel on the toxic organic pollutant emissions from a diesel engine. *Energy*. 113: 631–638.
- Chen, X., Thorp, K.R., van Oel, P.R., Xu, Z., Zhou, B. and Li, Y. 2020. Environmental impact assessment of water-saving irrigation systems across 60 irrigation construction projects in northern China. *J. Clean. Prod.* 245:118883.
- Doosti Sabzi, B., Yazdi, N. and Maleki, A. 2023. Technological solutions for adaptation with Iran's water resources crisis. *Urban Climate Adaptation and Mitigation*. Chapter. 15: 327-343. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85552-5.00002-6>
- EP, 2008. Addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union. European Parliament resolution of 9 October 2008 on addressing the challenge of water scarcity and droughts in the European Union (2008/2074(INI).
- Eranki, P.L., El-Shikha, D., Hunsaker, D.J., Bronson, K.F. and Landis, A.E. 2017. A comparative life cycle assessment of flood and drip irrigation for guayule rubber production using experimental field data. *Industrial Crops and Products*. 99: 97–108.
- Fang, Q., Zhang, X., Shao, L., Chen, S. and Sun, H. 2018. Assessing the performance of different irrigation systems on winter wheat under limited water supply. *Agricultural Water Management*. 196:133–143.
- قیاسی، ح. و شیخ زین‌الدین، آ. ۱۴۰۱. سنجش کارایی اقتصادی- محیط زیستی گندم بر مبنای ردپای آب. *اقتصاد کشاورزی*. ۱۶ (۳): ۱-۳۱
- متولی، ع.، یاسور، ص.، تیموری عمران، م. و موسوی سیدی، س.ر. ۱۳۹۸. بررسی شاخص‌های محیط زیستی ردپای آب و تخلیه منابع در سناریوهای مختلف کشت برنج. *آبیاری و زهکشی ایران*. ۱۳ (۲): ۵۲۷-۵۱۲.
- واعظی، ب.، نامداری، ا. و کشاورزی، ک. ۱۳۹۹. رویکردها و راهبردهای تولید پایدار گندم. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی. مؤسسه آموزش و ترویج کشاورزی. نشر آموزش کشاورزی. ۸۸ ص.
- Angnes, G., Diotto, A.V., Rodias, E. and Romanelli, T.L. 2023. Water and Carbon Footprints of Biomass Production Assets: Drip and Center Pivot Irrigation Systems. *Sustainability*. 15: 8199
- Ashoori, D., Bagheri, A., Allahyari, M. S. and Al-Rimawi, A. S. 2016. An examination of soil and water conservation practices in the paddy fields of Guilan province, Iran. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*. 88: 959–971.
- Ashraf, B., AghaKouchak, A., Alizadeh, A., Baygi, M.M., Moftakhari, H.R., Mirchi, A., Anjileli, H. and Madani, K. 2017. Quantifying anthropogenic stress on groundwater resources. *Scientific reports*. 7: 1–9.
- Aujla, M., Thind, H. and Buttar, G. 2007. Fruit yield and water use efficiency of eggplant (*Solanum melongema* L.) as influenced by different quantities of nitrogen and water applied through drip and furrow irrigation. *Scientia Horticulturae*. 112(2):142–148.
- Brentrup, F., Kusters, J., Lammel, J., Barraclough, P. and Kuhlmann, H. 2004. Environmental impact assessment of agricultural production systems using the life cycle assessment (LCA) methodology– II, the application to N fertilizer use in winter wheat production systems. *European Journal of Agronomy*. 20(3): 265-279.
- Berger, M., Ent, R., Eisner, S., Bach, V. and Finkbeiner, M. 2014. Water Accounting and Vulnerability Evaluation (WAVE): Considering Atmospheric Evaporation Recycling and the Risk of Freshwater Depletion in Water Footprinting.

- management strategies. *AMBIO A Journal of the Human Environment*.
<https://www.researchgate.net/publication/350336291>
- Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*. 8: 763–809
- Mostashari-Rad, F., Ghasemi-Mobtaker, H., Taki, M., Ghahderijani, M., Kaab, A., Chau, K.W. and Nabavi-Pelesaraei, A. 2021. Exergoenvironmental damages assessment of horticultural crops using ReCiPe2016 and cumulative exergy demand frameworks. *J. Clean. Prod.* 278: 123788.
- Pakravan-Charvadeh, M.R., Mohammadi-Nasrabadi, F., Gholamrezai, S., Vatanparast, H., Flora, C. and Nabavi-Pelesaraei, A. 2021. The short-term effects of COVID-19 outbreak on dietary diversity and food security status of Iranian households (a case study in tehran province). *J. Clean. Prod.* 281: 124537.
- Pfister, S., Koehler, A. and Hellweg, S. 2009. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. *Environmental Science and Technology*, 43(11): 4098–4104. DOI: 10.1021/es802423e
- Pike, A., Rodriguez-Pose, A. and Tomaney, J. 2016. *Local and regional development*. Routledge.
- Ridoutt, B.G. and Pfister, S. 2010. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. *Global Environmental Change* 20: 113-120.
- Saemian, P., Tourian, M.J., AghaKouchak, A., Madani, K. and Sneeuw, N. 2022. How much water did Iran lose over the last two decades?. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 41:101095.
- Song, J. and Chen, X. 2019. Eco-efficiency of grain production in China based on water footprints: A stochastic frontier approach. *Journal of Cleaner Production*. 236:117685.
- Taguta, C., Dirwai, T.L., Senzanje, A., Sikka, A. and Mabhaudh, T. 2022. Sustainable irrigation technologies: a water-energy-food (WEF) nexus perspective towards achieving more crop per drop per joule per hectare. *Environmental Research*
- Gholamrezai, S. and Sepahvand, F. 2017. Farmers' participation in water user association in western Iran. *Journal of Water and Land Development*, 35: 49–56.
- Hoekstra, A.Y. 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*. 68(7): 1963-1974.
- Hoekstra, A.Y. (ed.). 2003. *Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands, 12-13 December 2002*, Value of Water Research Report Series No.12, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands.
www.waterfootprint.org/Reports/Report12.pdf.
- 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(2): e32688. doi:10.1371/journal.pone.0032688
- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. 2008. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*, Blackwell, Oxford.
- ICID (The International Commission on Irrigation and Drainage). Annual Report. 2020-21. <https://icid-ciid.org/publication/info/33>
- ISO (International Organization for Standardization). 2006. ISO 14040: 2006 (E) Environmental Management – Life Cycle Assessment – Principles and Framework.
- Jamali, M., Soufizadeh, S., Yeganeh, B. and Emam, Y. 2021. A comparative study of irrigation techniques for energy flow and greenhouse gas (GHG) emissions in wheat agroecosystems under contrasting environments in south of Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 139:110704.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110704>
- Kaab, A., Khanali, M., Shadamanfar, S. and Jalalvand, M. 2024. Assessment of energy audit and environmental impacts throughout the life cycle of barley production under different irrigation systems. *Environmental and Sustainability Indicators* 22: 100357. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100357>.
- Karandish, F. 2021. Socioeconomic benefits of conserving Iran's water resources through modifying agricultural practices and water

- Yuan, S. and Peng, S. 2017. Trends in the economic return on energy use and energy use efficiency in China's crop production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.70:836–844.
- Zhuo, L., Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. and 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: 29-41.
- Letters. 17(7): 073003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac7b39>.
- Taki, M., Ajabshirchi, Y. and Ghobadifar, A. 2016. Application of nonparametric method for optimization of energy consumption and greenhouse gas emission in wheat production. *J. Environ. Sci. Technol.* 18(2): 101-114.
- UNEP. 2007. *Global Environment Outlook GEO 4: Environment for Development*; UNEP: Malta.
- WCED (World Commission on Environment and Development). 1987. "From One Earth to One World: An Overview". Oxford: Oxford University Press.

Environmental Water Footprint in Different Wheat Irrigation Systems Across Various Climates

F. Batoukhteh^{1*}, A. Darzi-Naftchali², A. motevali^{3*}, F. Karandish⁴ and M. Berger⁵

Abstract

Considering the importance of selecting appropriate irrigation methods to reduce water consumption and improve its efficiency in agriculture, the environmental water footprint (WF) using the Life Cycle Assessment (LCA) method, as an indicator for measuring water consumption and productivity throughout all stages of a product's life cycle, can significantly contribute to evaluating the environmental impacts of different irrigation methods. In this study, to assess the environmental water footprint and water resource depletion in five climates (hyper-arid (HA), arid (A), semi-arid (SA), semi-humid (DSH), and humid (H)) and irrigation methods (furrow irrigation (FI), drip irrigation (DI), and sprinkler irrigation (SI)), the Hoekstra, Berger, AWARE, and Pfister indices were used with SimaPro 9.4 software. For each climate and irrigation method, key indicators including the amount of water consumed, the environmental impacts of water resource consumption, and the sustainability of water resources to produce one ton of wheat were analyzed. The results obtained from the environmental impact indicators of water consumption in wheat cultivation showed that the highest damage to human health, ecosystem quality, and environmental resources was found using the Pfister method with values of 0.0014 (DALY), 2109 (PDF*m²yr), and 13254 (MJ surplus). The water footprint index using the Hoekstra method was 3216 (m³), freshwater depletion using the Berger method was 1792 (m³), and the water scarcity footprint using the AWARE method was 125107 (m³) in the HA.SI scenario. In the DI.SA scenario, due to favorable conditions for increasing yield and reducing input consumption, and in the DSH.SI and H.SI scenarios, greater utilization of green water resulted in a 50%-60% reduction in the water footprint compared to the average across all evaluated methods. Considering performance indicators, water productivity, and direct and indirect footprints, the SA. DI scenario was found to be the most sustainable condition for wheat cultivation. Each approach, from Pfister to Hoekstra, provides unique insights into water consumption and scarcity impacts. Therefore, the results of this study highlight the need to consider multiple perspectives to obtain a comprehensive picture of the water footprint of products.

Keywords: Resource Depletion, Sustainability of resources, Water Footprint, Water Stress

¹Ph.D. Student, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran (* Corresponding Author: f.batoukhteh@gmail.com)

² Associate Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

³ Associate Professor, Department of Mechanics of Biosystem Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran (* Corresponding Author: motevali62@gmail.com)

⁴ Senior Researcher, Earth Systems and Global Change Group, Wageningen University and Research, Wageningen, Netherlands

⁵ Professor, Multidisciplinary Water Management Group, Faculty of Engineering Technology, University of Twente, Enschede, Netherlands

Received: 17 Nov 2024

Accepted: 1 Dec 2024