

مقدمه

یکی از چالش‌های جهانی، کمبود منابع آب است که ناشی از شرایط و تهدیدات طبیعی، افزایش جمعیت و توسعه کشورهای بوده که این چالش در کمربند خشک زمین حادث است [۵، ۱۰ و ۱۱]. شرایط ایران و دشت اردبیل نیز از این قاعده مستثنی نیست. نیاز آبی ایران نیز در دهه‌های گذشته به علت رشد سریع جمعیت و توسعه کشاورزی بیشتر شده و طبق پیش‌بینی سازمان ملل متحد تا سال ۲۰۵۰ ایران جزء ده کشور پرجمعیت دنیا خواهد شد [۱۰]. این افزایش جمعیت باعث افزایش تقاضای مصرف آب از طریق غذای بیشتر و توسعه بخش‌های دیگر خواهد شد که بخش کشاورزی فشار بیشتری را متحمل می‌شود. چرا که به صورت میانگین ۷۰ درصد آب استحصالی دنیا در بخش کشاورزی و در ایران این رقم حدود ۹۰ درصد تخمین زده شده است [۱۱]. عدم تناسب مصرف آب در بخش‌های مختلف علاوه بر تنش بیشتر در بخش کشاورزی باعث شده که سایر بخش‌ها نیز آسیب ببینند و دچار محدودیت شوند. استفاده پایدار از آب در بخش کشاورزی باعث توسعه اجتماعی و اقتصادی در مقیاس‌های منطقه‌ای، ملی و بین‌المللی خواهد شد [۴]. از این رو، ایجاد راهبردهای کارآمد مدیریت آب بر اساس نمایش عملکرد آب کشاورزی از دیرباز به عنوان یک جهت‌دهی مهم در حوزه مدیریت منابع آب شناسایی شده است [۵]. ارزیابی ارتباط فعالیت‌های کشاورزی و آب بر اساس بیلان آب از هر دو دیدگاه تولید و مصرف محصول، نشان‌دهنده برتری مفهوم رد پای آب (WF^2) و روش‌های آب مجازی (VW^3) و ارتباط آن با حفظ منابع آب مدرن است. رد پای آب (WF) کشاورزی به مقدار آبی که برای تولید هر محصول گیاهی استفاده می‌شود اشاره دارد و میزان تخصیص منابع در حجم آب مصرف شده و یا آلوده شده را اندازه‌گیری می‌کند [۱۲]. رد پای آب تولیدی (PWF^4)، حجم آبی است که در طول فرآیند رشد محصول مصرف می‌شود. از دیدگاه مصرف، می‌توان رد پای آب مصرفی (CWF^5) را به عنوان منابع آبی اشغال‌شده توسط انسان از طریق مصرف محصولات کشاورزی تعریف کرد. CWF به طور مشترک از دیدگاه تولید (PWF)، تجارت محصولات کشاورزی بین منطقه‌ای و شبکه‌های جریان آب مجازی (VWF) تعیین می‌شود [۳ و ۱۵]. به طور معمول، هر دو شاخص PWF و CWF به اجزای آبی،

محاسبه‌ی رد پای آب مجازی و میزان کمبود آب
محصولات اصلی دشت اردبیلجوانشیر عزیزی مبصر^۱

تاریخ دریافت ۱۴۰۲/۰۹/۲۰ تاریخ پذیرش ۱۴۰۲/۰۹/۳۰

DOI: 10.22034/WMI.2023.710723

چکیده

این تحقیق در دشت اردبیل باهدف بررسی وضعیت کمی و پایداری منابع مختلف تأمین نیاز آبی محصولات سیب‌زمینی، گندم، جو و یونجه انجام شد. نیاز آبی این محصولات به عنوان کشت‌های اصلی دشت با استفاده از نرم‌افزار CROPWAT تعیین شد. مؤلفه‌های مختلف رد پای آب مجازی شامل VWF_{blue} ، VWF_{green} ، VWF_{grey} و همچنین شاخص‌های تنش آب از منظر تولید (WSI) و مصرف آب ($CWSI$) محاسبه گردید. نتایج نشان داد که محصول سیب‌زمینی با مصرف سالانه حدود ۸۴ میلیون مترمکعب (۶۶ درصد) بیش‌ترین سهم را در شاخص رد پای آب مجازی (VWF) دشت اردبیل به خود اختصاص داده است. پس از آن محصولات جو، یونجه و گندم به ترتیب با ۲۱، ۱۲/۲ و ۱۱ میلیون مترمکعب از شاخص رد پای آب مجازی (VWF) در رتبه‌های بعدی هستند. شاخص‌های WSI_{blue} ، WSI_{green} و WSI_{grey} به ترتیب با مقادیر ۰/۵، ۶/۴ و ۰/۱ - محاسبه شدند و کمبود آب مربوطه به ترتیب به عنوان تنش آبی متوسط و تنش آبی شدید ارزیابی نمودند. با توجه به محدودیت‌های منابع آب در دشت اردبیل، لازم است از منظر تولید، بهره‌وری آب کشاورزی منطقه‌ای بهبود یابد و توسعه و حفاظت از منابع آبی برای اطمینان از کمیت و کیفیت آب موردنیاز در اولویت قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، منابع آب، $CWSI$ ، VWF و WSI .

2. Water Footprint
3. Virtual Water
4. Production Water Footprint
5. Consumption Water Footprint

۱- دانشیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
Email: ja_mobaser@uma.ac.ir

سبز و خاکستری تقسیم‌بندی می‌شوند. شاخص WF آبی، به مصرف آب‌های سطحی و زیرزمینی در طول دوره‌ی رشد محصول اشاره دارد. شاخص WF سبز، به مصرف آب باران دوره‌ی رشد گیاه که به شکل تبخیر و تعرق انجام‌شده اشاره دارد. همچنین شاخص WF خاکستری، به حجم آبی اشاره دارد که برای جذب بار آلاینده‌ها با توجه به غلظت‌های طبیعی و استانداردهای کیفیت آب موجود در محیط موردنیاز است [۱۱، ۱۲، ۱۸]. استفاده از منابع آب، حفاظت و مدیریت بر اساس رد پای آب کشاورزی و کمی سازی رد پای آب مجازی مربوط به محصول در دو دهه گذشته به یک کانون تحقیقاتی تبدیل شده است. به‌عنوان مثال میریعقوب زاده و همکاران [۱۷] پیشنهاد نمودند که کشوری مثل ایران که در کمربند خشک زمین قرار دارد برای پایداری منابع آب از آب مجازی استفاده نموده و محصولات پرمصرف را از طریق واردات تأمین نماید. همچنین بنی حبیب و همکاران [۲] با استفاده از مفهوم آب مجازی توصیه نمودند که در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه محصولات چغندرقلند و پیاز کشت نشوند و مقادیر موردنیاز وارد شود. گروه تحقیقاتی هوکسترا و همکاران [۱۲] ردپاهای سبز، آبی و خاکستری تولید و مصرف جهانی محصول و رد پای آب مجازی بین‌المللی را به روش مکانی کاملاً صریح برای دوره ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ را بر اساس رویکرد شبکه ردپای آب (WFN¹) اندازه‌گیری کردند [۱۶]. متعاقباً، تعدادی از مطالعات با تمرکز بر روی گیاهان رد پای آب مجازی آبی، سبز و خاکستری محصول در مقیاس‌های مختلف، از جمله کشور [۸] و [۹]، حوضه رودخانه [۶ و ۱۹]، منطقه و یا استان [۱۳]، منطقه آبیاری [۳۳] و مزرعه [۲۹ و ۳۰] منتشر شده است. مطالعات نشان داده‌اند که کاهش WF در کشت محصولات، اقدامی قابل‌اعتماد برای کاهش کمبود آب منطقه‌ای و ارتقای پایداری اکولوژیکی است، همچنین یکی دیگر از رویکردهای عملی مناسب در این خصوص، استراتژی تجارت آب مجازی بود [۳۴]. از این رو، محققان خطر کمبود جهانی و محلی آب را ارزیابی کرده‌اند و اقدامات متقابلی را با استفاده از مفاهیم VWF به‌صورت بین منطقه‌ای پیشنهاد کرده‌اند [۲۲]. در مشاهدات عملکرد آب آبی قابل تخصیص مشخص شد که VWF آبی کمبود آب را در مناطق وارداتی غلات کاهش می‌دهد در حالی که پایداری منابع آب را در صادرکننده محدود می‌کند. در واقع، آب آبی تنها بخش کوچکی از WF مواد غذایی را به خود اختصاص داده است و کمبود آب در اشکال دیگر (سبز و خاکستری) را برای ارزیابی عملکرد آب منطقه‌ای را نمی‌تواند تبیین کند [۳۲]. به‌عنوان مثال، اسپینز و همکاران [۲۴] کمبود آب سبز برای غذا، خوراک، فیبر، چوب و انرژی زیستی را در مقیاس جهانی نشان داد. ژین چون و همکاران [۳۱] و پورکا و همکاران [۲۱] کمبود آب سبز، آبی و تنش آبی کشاورزی را به ترتیب در تولید محصولات زراعی تعریف کردند تا مصرف آب مزرعه را با دسترسی به آب آبی و سبز مرتبط کنند. باین‌حال، اجرای آبی، سبز و خاکستری به‌ندرت

1. Water Footprint Network

در ارزیابی کمبود آب متمایز شدند و در نتیجه پیچیدگی روش WF به‌طور کامل نشان داده نشده است. عدم اطمینان در مورد منابع آب برای کشاورزی یک خطر بالقوه برای امنیت غذایی و پایداری آب ایران و به تبع آن استان اردبیل می‌باشد. همچنین راندمان پایین کود باعث آلودگی غیر نقطه‌ای می‌شود که رفع آن دشوار است و در نتیجه تهدیدی پنهان برای پایداری منابع آب و محیط‌زیست ایجاد می‌کند. لازم است تا تأثیر تولید و مصرف محصول بر منابع آب آشکار شود تا در خدمت تدوین استراتژی‌های حفاظت از منابع آب باشد؛ بنابراین اهداف مطالعه حاضر عبارت‌اند از: (۱) بررسی تأثیر VWF بر کمبود آب دشت اردبیل از دیدگاه رد پای آب‌های آبی، سبز و خاکستری. (۲) محاسبه‌ی مقادیر مربوط به VWF های آبی، سبز و خاکستری دشت اردبیل از سال ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۰ و (۳) تجزیه و تحلیل اثرات VWF بر WF کشاورزی و کمبود آب در دشت اردبیل و در مورد استراتژی‌های حفاظت از منابع آب کشاورزی منطقه‌ای برای پایداری کمیت و کیفیت آب بحث می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مطالعه‌ی حاضر در محدوده‌ی حوضه دشت اردبیل انجام‌گرفته است. دشت اردبیل در منطقه‌ی مرکزی استان اردبیل و در شرق فلات آذربایجان و شمال غرب ایران قرار دارد و با مساحتی در حدود ۱۲۹۱ کیلومتر مربع، در محدوده‌ی مختصات $38^{\circ}00'50''$ تا $38^{\circ}31'10''$ شمالی و $48^{\circ}09'00''$ تا $48^{\circ}39'00''$ شرقی واقع شده است (شکل ۱). متوسط بارش سالانه‌ی آن در ایستگاه سینوپتیک اردبیل حدود ۳۰۴ میلی‌متر ثبت شده است. در این دشت، اردیبهشت، پر بارش‌ترین ماه و میانگین دمای سالانه ۹ درجه سانتی‌گراد است. حداقل دمای مطلق این دشت، $33/8-$ درجه‌ی سانتی‌گراد و متوسط تعداد روزهای یخبندان در آن، ۱۳۰ روز در سال ثبت شده است و یکی از نواحی سردسیر کشور محسوب می‌شود [۲۶]. دشت اردبیل بعد از دشت مغان، مهم‌ترین دشت استان اردبیل از نظر کشاورزی است که طبق اطلاعات دریافتی از سازمان جهاد کشاورزی استان اردبیل مشخصات الگوی کشت غالب آن شامل محصول، مساحت (هکتار)، درصد مساحت و عملکرد محصولات (کیلوگرم در هکتار) طبق جدول (۱) می‌باشد. محصولات مختلفی در دشت اردبیل کشت می‌شود، اما با توجه به درصد سطح زیر کشت محصولات معرفی شده در جدول شماره ۱ و اهمیت این محصولات، در این تحقیق ردپای آب و آب مجازی آن‌ها محاسبه شد.

محاسبه‌ی رد پای آب محصولات و آب مجازی

برای مشخص شدن تفاوت بین اجزای آبی، سبز و خاکستری رد پای آب (WF) از رویکرد شبکه رد پای آب مجازی (WFN) استفاده شد. ردی پای آب هر محصول می‌بایست از هر دو جنبه‌ی مصرف آب و تولید محصول بررسی گردد. رد پای آب تولیدی

[۱۱] ارائه شده محاسبه می‌شود. اجزای PWF_{blue} و PWF_{green} به ترتیب نشان‌دهنده مقدار آب مورد نیاز آبیاری و بارندگی هستند و به شکل زیر محاسبه می‌شوند:

$$PWF_{blue} = A \times ET_{blue} \quad (۳)$$

$$PWF_{green} = A \times ET_{green} \quad (۴)$$

در این روابط A ، مساحت هر محصول در منطقه برحسب هکتار و پارامترهای ET_{blue} و ET_{green} به ترتیب مقدار تبخیر و تعرق تأمین شده توسط آبیاری و بارندگی برحسب میلی‌متر هستند. معمولاً تبخیر و تعرق توسط مدل Cropwat محاسبه می‌شود [۳۰] که در این تحقیق نیز از این مدل استفاده شده است. جزء PWF_{grey} با استفاده از روش

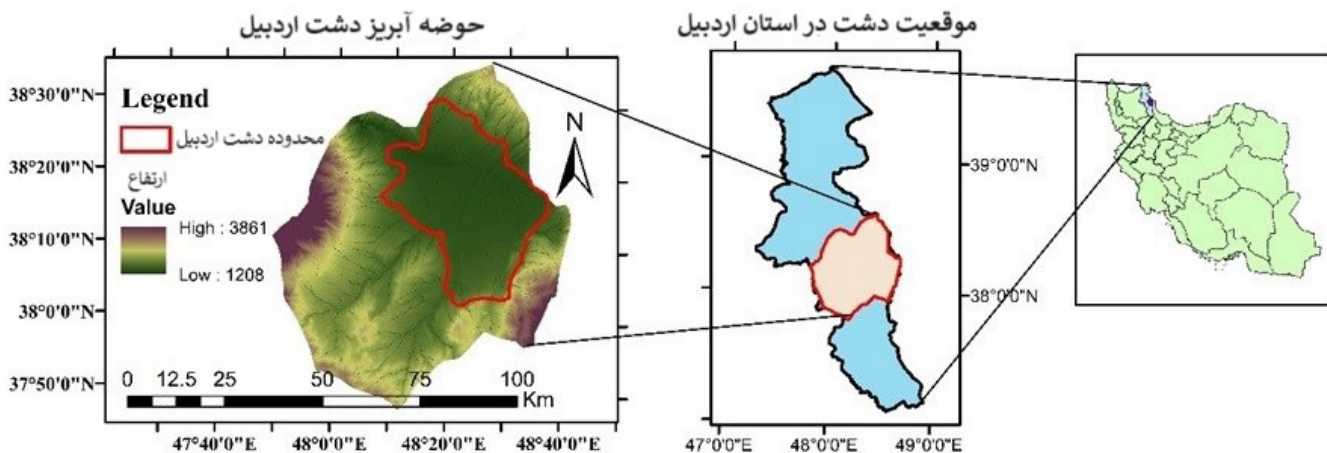
(PWF) هر منطقه برای کل محصولات به شکل زیر محاسبه می‌شود [۵]:

$$PWF = \sum PWF_i \quad (۱)$$

در این رابطه، i نشان‌دهنده تغییر محصولات در منطقه است. رد پای آب تولیدی (PWF) هر منطقه به سه جزء آبی (PWF_{blue})، سبز (PWF_{green}) و خاکستری (PWF_{grey}) تقسیم می‌شود:

$$PWF = PWF_{blue} + PWF_{green} + PWF_{grey} \quad (۲)$$

هرکدام از اجزای PWF_{blue} ، PWF_{green} و PWF_{grey} برای سیستم محصولات منطقه بر اساس روشی که توسط هوکسترا و همکاران



شکل ۱: موقعیت محدوده دشت اردبیل در حوزه آبریز، استان و کشور.

جدول ۱: اطلاعات الگوی کشت غالب دشت اردبیل در ۵ سال منتهی به سال ۱۴۰۰

سال	نام محصول	سطح زیر کشت (هکتار)	درصد مساحت	عملکرد (کیلوگرم در هکتار)	درصد مساحت الگوی کشت انتخابی
۱۳۹۶	گندم	۱۸۲۰۰	۳۳/۲	۵۱۶۵	۸۸/۱
	سیب‌زمینی	۱۴۵۰۰	۲۶/۴	۳۵۱۸۰	
	جو	۱۱۶۰۰	۲۱/۱	۴۰۰۰	
۱۳۹۷	یونجه	۴۰۷۶	۷/۴	۵۸۰۰	۹۰/۳
	گندم	۱۸۳۰۰	۳۴/۴	۴۱۰۰	
	سیب‌زمینی	۱۵۲۳۷	۲۸/۸	۳۶۰۰۰	
۱۳۹۸	جو	۱۰۳۰۰	۱۹/۴	۳۲۰۰	۸۷/۴
	یونجه	۴۱۰۰	۷/۷	۶۰۰۰	
	گندم	۱۸۰۰۰	۳۱/۵	۴۳۰۰	
	سیب‌زمینی	۱۵۸۰۰	۲۷/۷	۳۹۴۰۰	
۱۳۹۹	جو	۱۱۰۳۰	۱۹/۳	۳۳۰۰	۹۰/۹
	یونجه	۵۱۰۰	۸/۹	۶۰۰۰	
	گندم	۱۹۰۰۰	۳۱/۷	۴۴۰۰	
	سیب‌زمینی	۱۶۵۰۰	۲۷/۵	۳۹۰۰۰	
۱۴۰۰	جو	۱۳۰۲۸	۲۱/۷	۳۳۰۰	۸۹/۹
	یونجه	۶۰۰۰	۱۰	۷۵۰۰	
	گندم	۱۸۱۰۰	۳۲/۴	۴۴۰۰	
	سیب‌زمینی	۱۶۵۰۰	۲۹/۵	۳۹۲۰۰	
	جو	۵۹۰۰	۱۵/۹	۳۳۰۰	
	یونجه	۶۷۵۰	۱۲/۱	۶۰۰۰	

استاندارد زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$PWF_{grey} = (a \times AR) / (C_{max} - C_{net}) \quad (5)$$

در این رابطه a ، کسر شستشوی رواناب است و بر اساس دستورالعمل محاسبه ردپای آب ۱۰ درصد فرض شده است، هم‌چنین پارامتر AR نشان‌دهنده‌ی مقدار نیتروژن استفاده‌شده در مزرعه برحسب کیلوگرم در هکتار است. پارامتر C_{max} غلظت بیشینه قابل‌قبول نیتروژن و پارامتر C_{net} غلظت طبیعی نیتروژن در آب است که برابر صفر mg/L فرض شده است [۱۲] که در دشت اردبیل طبق آمار به‌طور متوسط ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد. مقدار رد پای آب مجازی هر محصول از جنبه‌ی مصرف آب (CWF) با استفاده از رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌شود:

$$CWF = \sum (PWF + VWF) \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶) مقدار رد پای آب مجازی (VWF) برای هر محصول از طریق تفاوت بین حجم آب مجازی وارداتی (VWI) و حجم آب مجازی صادراتی (VWE) به دست می‌آید:

$$VWF = VWI - VWE \quad (7)$$

حجم آب مجازی وارداتی (VWI) و حجم آب مجازی صادراتی (VWE) نیز از طریق روابط (۸) و (۹) به دست می‌آید:

$$VWI = \sum API_j^n \times \frac{PWF_j^n}{PRO_j^n} \quad (8)$$

$$VWE = \sum APE_k \times \frac{PWF_k}{PRO_k} \quad (9)$$

در این روابط پارامتر API_j^n ، مقدار محصول z واردشده به منطقه n برحسب تن؛ PWF_j^n پارامتر ردپای آب تولیدی محصول z در منطقه n برحسب مترمکعب؛ پارامتر PRO_j^n کل تولید محصول z در منطقه n برحسب تن؛ پارامتر APE_k نشان‌دهنده‌ی کل تولید محصول صادرشده از منطقه n برحسب تن؛ PWF_k و PRO_k^n به ترتیب پارامتر ردپای آب تولیدی و کل تولید محصول k در منطقه موردنظر می‌باشند.

ارزیابی کمبود آب مصرفی و تولیدی محصولات

پس از محاسبه رد پای آب مجازی، شاخص تنش آب^۱ (WSI) برای محصولات در دشت متناسب با موجودیت منابع آب^۲ (AWR) نیز به‌مانند رابطه (۱۰) قابل محاسبه است:

$$\left\{ \begin{array}{l} WSI = PWF / AWR \\ CWSI = CWF / AWR \end{array} \right\} \quad (10)$$

در این رابطه شاخص (AWR) مقدار آبی است که به‌صورت تئوری و برحسب مترمکعب برای تولید محصولات کشاورزی می‌توان تأمین نمود. به‌منظور پایداری اکولوژی و زیست‌محیطی^۳ (EWR) نمی‌توان کل منابع آب بالقوه^۴ (TWR) را برای کشاورزی مصرف نمود، بنابراین:

1. Water Stress Index
2. Availability Water Resources
3. Environmental Water Requirement
4. Total Potential Water Resources

$$AWR = TWR - EWR \quad (11)$$

در این رابطه TWR (برحسب مترمکعب) شامل منابع آب آبی (WR_{blue}) است که به شکل آب آبیاری برداشته‌شده و منابع آب سبز (WR_{green}) که از بارندگی قابل‌دسترس است. به‌عبارت‌دیگر:

$$TWR = WR_{blue} + WR_{green} \quad (12)$$

فرض شده است که دسترسی بخش‌های مختلف (صنعت، کشاورزی و مصرف خانگی) به منابع آب آبی یکسان است، بنابراین شاخص WR_{blue} را می‌توان به‌صورت رابطه زیر برآورد نمود:

$$AWU / WU \times WR_{blue} = WR \quad (13)$$

در رابطه ۱۳ شاخص WR کل آب آبی موجود در منطقه برحسب مترمکعب، WU و AWU به ترتیب کل آب برداشت‌شده و آب برداشت‌شده برای کشاورزی برحسب مترمکعب است. در مقایسه با مصارف خانگی و صنعتی آب سبز تنها در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، بنابراین شاخص WR_{green} کل آب تأمین‌شده در بخش کشاورزی توسط بارندگی مؤثر (P_e) در طول دوره رشد است:

$$A \times P_e \times WR_{green} = 10 \quad (14)$$

که در این رابطه A سطح زیر کشت محصولات برحسب هکتار، P_e بارندگی مؤثر برحسب میلی‌متر و عدد ۱۰ ثابت تبدیل است. با توجه به تحقیقی که اسدزاده و همکاران [۱]، برای این منظور در دشت اردبیل انجام شد، مشخص گردید که روش موسوم به USDA S.C دقت بیشتری داشته، بنابراین در این تحقیق نیز از این روش استفاده شد. هوکسترا و همکاران [۱۲] برای محاسبه شاخص EWR پیشنهاد نمودند که از رابطه (۱۵) محاسبه شود:

$$WR_{blue} \times EWR = 80\% \quad (15)$$

شاخص‌های تنش آب آبی و سبز با استفاده از آب مصرفی و موردنیاز برای تولید محصولات طبق روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} WSI_{blue} = PWF_{blue} / (AWR_{blue} - EWR) \\ CWSI_{blue} = CWF_{blue} / (AWR_{blue} - EWR) \end{array} \right\} \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} WSI_{green} = PWF_{green} / TWR \\ CWSI_{green} = CWF_{green} / TWR \end{array} \right\} \quad (17)$$

در این روابط WSI_{blue} و WSI_{green} به ترتیب مقدار کمبود آب آبی و سبز از جنبه تولید محصول و شاخص‌های $CWSI_{blue}$ و $CWSI_{green}$ به ترتیب مقدار کمبود آب آبی و سبز از جنبه مصرف محصول هستند. TWR کل آب باران منطقه‌ای است که زمین‌های قابل‌کشت در بارندگی در طول سال ضرب می‌شود. به روشی مشابه، کمبود آب خاکستری در سیستم کشاورزی از دیدگاه تولید و مصرف محصول به‌صورت زیر قابل ارزیابی است:

$$\left\{ \begin{array}{l} WSI_{grey} = PWF_{grey} / (TWR - PWF_{blue} - PWF_{green}) \\ CWSI_{grey} = CWF_{grey} / (TWR - PWF_{blue} - PWF_{green}) \end{array} \right\} \quad (18)$$

پس از محاسبه کمبود آب منطقه‌ای، درجه و طبقه‌بندی آن بر اساس جدول استاندارد (۲) انجام خواهد شد.

جدول ۲: مقادیر استاندارد شدت کمبود آب [۶]

دامنه شاخص تنش آبی	درجه کمبود آب	نوع کمبود آب
(۰/۱ و ۰)	۱	بدون تنش آبی
(۰/۲ و ۰/۱)	۲	تنش آبی کم
(۰/۵ و ۰/۲)	۳	تنش آبی متوسط
(۱/۰ و ۰/۵)	۴	تنش آبی زیاد
(+∞ و ۱) و (۰/۰ و -∞)	۵	تنش آبی خیلی زیاد

در جدول ۳ می‌شود. مقدار VWF_{blue} دشت اردبیل به‌طور میانگین در دوره‌ی مطالعاتی برابر $۲۴/۴$ میلیون مترمکعب برآورد شده است که به ترتیب $۳/۲۴$ و ۱۳۵ برابر VWF_{green} و VWF_{grey} می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی نقش مهم آب آبیاری در مقدار تولیدات کشاورزی دشت اردبیل است (شکل ۲ ب). روابط اجزای آب مجازی برای تمام چهار محصول زراعی بررسی شده به‌صورت $VWF_{blue} > VWF_{green} > VWF_{grey}$ بود. در این تحقیق سیب‌زمینی بزرگ‌ترین مشارکت‌کننده در شاخص رد پای آب مجازی (VWF) بود و پس از آن محصول جو بیش‌ترین نقش را داشت.

نتایج و یافته‌های پژوهش

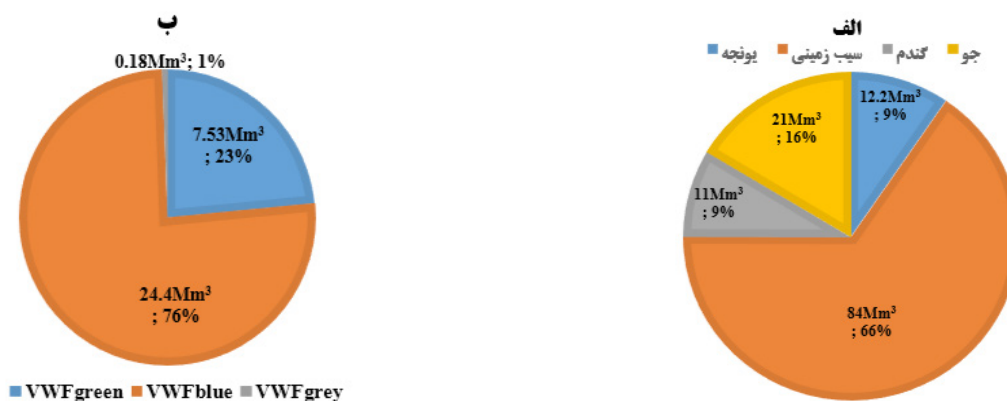
جریان آب مجازی آبی، سبز و خاکستری دشت اردبیل

به‌صورت میانگین در دوره آماری بررسی‌شده این تحقیق در دشت اردبیل برای الگوی کشت اصلی، شامل سیب‌زمینی، گندم، جو و یونجه به ترتیب ۵۹۴، ۹۶، ۴۳ و ۳۵ هزار تن محصول تولیدشده است که بیش‌ترین و کم‌ترین سهم تولید به ترتیب به سیب‌زمینی (۷۷/۳ درصد) و یونجه (۴/۶ درصد) اختصاص یافت (جدول ۳). با بررسی مقادیر تولید، مصرف و اجزای آب مجازی در جدول ۳ مشخص شد که برای محصول گندم سال ۱۳۹۶ علاوه بر تأمین نیاز دشت مقادیری نیز به خارج از محدوده‌ی مطالعاتی صادرشده اما از سال ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۰ نیاز به واردات گندم بوده است. برای محصول جو روند کاملاً برعکس محصول گندم بوده، یعنی در چهار سال ابتدایی دوره در دشت اردبیل مازاد تولید وجود داشته اما در سال پایانی در محدوده‌ی مطالعاتی نیاز به واردات جو بوده است. در خصوص محصول سیب‌زمینی که دشت اردبیل یکی از قطب‌های تولید آن در کشور است، در دوره‌ی انجام این تحقیق همواره تولید مازاد بر نیاز را ثبت نموده است. تولید و مصرف یونجه در دشت اردبیل به‌گونه‌ای بوده که در سه سال اول مازاد تولید وجود داشته، درحالی‌که در دو سال باقیمانده شرایط تغییر کرده و نیاز به واردکردن محصول از سایر نقاط استان و مناطق دیگر کشور بوده است. تفاوت در تولید محصول، تجارت و مقدار آب مجازی (WF) در واحد محصول منجر به تفاوت در میزان مقادیر آب مجازی آبی (VWF_{blue})، سبز (VWF_{green}) و خاکستری (VWF_{grey}) فهرست شده

جدول ۳: مقادیر تولید، تجارت و آب مجازی دشت اردبیل بر اساس محصولات مهم زراعی در دوره مطالعاتی

محصول	سال	مقدار تولید مقدار تجارت		
		VWF_{blue}	VWF_{green}	VWF_{grey}
گندم	۱۳۹۶	۱۰۵/۷۱	۷/۳۴	۳/۴۹۰
	۱۳۹۷	۸۷/۲۷	۱۲/۲۱	۵/۴۳۰
	۱۳۹۸	۸۹/۶۳	۶/۸۰	۸/۲۰
	۱۳۹۹	۱۰۰/۲۵	۱/۴۶	۱/۱۰
	۱۴۰۰	۹۶/۲۹	۶/۵۶	۳/۹۰
	۱۳۹۶	۵۲/۰۰	۱۸/۳۷	۱۶/۴۶۰
	۱۳۹۷	۳۹/۱۲	۶/۳۶	۷/۴۴۰
	۱۳۹۸	۴۵/۹۴	۱۳/۳۳	۱۳/۴۰۰
	۱۳۹۹	۵۲/۵۳	۱۹/۵۱	۱۷/۴۰۰
	۱۴۰۰	۲۵/۷۹	۸/۰۲	۴/۱۰
جو	۱۳۹۶	۵۱۰/۱۱	۴۸۲/۶۲	۷۹/۴۶۰
	۱۳۹۷	۵۴۸/۵۳	۵۱۷/۸۳	۶۸/۴۶۰
	۱۳۹۸	۶۲۲/۵۲	۵۸۸/۵۸	۷۴/۴۹۰
	۱۳۹۹	۶۴۳/۵۰	۶۰۶/۲۹	۷۱/۴۳۰
	۱۴۰۰	۶۴۶/۸۰	۶۰۳/۱۷	۸۴/۴۲۰
	۱۳۹۶	۲۶/۰۴	۹/۵۸	۱۴/۴۳۰
	۱۳۹۷	۲۷/۰۰	۷/۶۹	۸/۹۰
	۱۳۹۸	۳۳/۰۰	۰/۸۰	۰/۳۰
	۱۳۹۹	۴۷/۱۰	۱۲/۵۰	۵/۴۳۰
	۱۴۰۰	۴۱/۶۰	۵/۷۹	۲/۴۱۰

آ مقادیر و مؤلفه‌های واردات آب و C مقادیر و مؤلفه‌های صادرات آب را در دشت اردبیل نشان می‌دهد



شکل ۲: میانگین نیاز آبی الگوی کشت غالب (الف) و میانگین اجزای مختلف آب مجازی (ب) محصولات منتخب دشت اردبیل در دوره‌ی مطالعات

این دو محصول به‌طور مشترک حدود ۸۲ درصد از شاخص رد پای آب مجازی (VWF) مربوط به محصولات دشت اردبیل را تشکیل می‌دهند. محاسبات نشان داد که محصول سیب‌زمینی با مصرف سالانه حدود ۸۴ میلیون مترمکعب (۶۶ درصد) بیش‌ترین سهم را در شاخص رد پای آب مجازی (VWF) در دشت اردبیل به خود اختصاص داده است. پس از آن محصولات جو، یونجه و گندم به ترتیب با ۲۱، ۱۲/۲ و ۱۱ میلیون مترمکعب از شاخص رد پای آب مجازی (VWF) در رتبه‌های بعدی هستند (شکل ۲ الف). معمولاً تخصیص منابع آب کشاورزی از منظر تولید با دیدگاه مصرف در مناطق خاص به دلیل تفاوت اقلیمی که منجر به تفاوت الگوی کشت می‌شود، باعث تفاوت در پتانسیل تولید و نیاز آبی خواهد شد. مبادله‌ی آب مجازی بین شهرستان، استانی و ملی راه مهمی برای تنظیم اختلاف بین تولید و مصرف غذا بوده و تأثیر قابل‌توجهی بر رد پای آب کشاورزی (WF) خواهد داشت. به‌طور کلی، با توجه به مقدار تقاضای مصرف برای محصولات کشاورزی (CWI) با حجم آبی برابر ۲۹۶/۱۳ میلیون مترمکعب کم‌تر از مقدار آب برای تولید داخلی (PWF) با حجم آبی برابر ۳۵۳/۹۲ میلیون مترمکعب در دشت اردبیل بود (جدول ۴).

با بررسی جداگانه هر یک از محصولات و مقایسه نیاز آبی از دیدگاه تولید (PWF) با نیاز آبی از جنبه‌ی مصرف (CWF) در دشت اردبیل، محصول سیب‌زمینی سهم عمده‌ای در خارج کردن آب از محدوده دارد، زیرا درحالی‌که حدود ۵/۲۳ میلیون مترمکعب برای مصرف کافی است، به‌طور متوسط سالانه حجم آبی برابر ۸۹/۲ میلیون مترمکعب مصرف می‌کند. این وضعیت برای محصول جو نیز صادق است، اما اختلاف آب مصرفی و تولیدی به‌اندازه‌ی محصول سیب‌زمینی نیست. با توجه به نتایج جدول (۴) محصولات گندم و یونجه وضعیتی برعکس محصولات سیب‌زمینی و جو دارند و نیاز مصرفی آن‌ها بیش‌تر از تولیدات دشت بوده که برای جبران کمبود می‌بایست واردات صورت پذیرد. علاوه بر آن، نتایج نشان داد که غلات (گندم و جو)، دسته‌ای از محصولات است که بیش‌ترین مقدار منابع آب را از منظر تولید و مصرف به خود اختصاص داده است. محصولات غلات حدود ۵۸ درصد از رد پای آب از جنبه‌ی تولید (PWF) و ۷۳ درصد از جنبه‌ی مصرف (CWF) در دشت اردبیل را شامل می‌شوند (شکل ۳). تبادلات بین منطقه‌ای غذا، آب مجازی

آبی، سبز و خاکستری را می‌تواند کاهش داده و تولید محصول را با دیدگاه مصرف مقایسه کند تا نیازهای کشاورزی ساکنان را برآورده کند. به‌عبارت‌دیگر، VWF بین منطقه‌ای مزایای همه‌جانبه صرفه‌جویی در مصرف آب در می‌تواند در دشت اردبیل ایجاد کند. به‌طور خاص، برای محصول سیب‌زمینی در بخش نیاز آب تولیدی، ملاحظه می‌شود که حدود ۲۵ درصد منابع آب را مصرف می‌کند (شکل ۳-الف)، درحالی‌که بر اساس نیاز مصرفی کافی است که تنها دو درصد از منابع آب شهرستان اردبیل را به آن اختصاص داد (شکل ۳-ب). به‌عبارت‌دیگر با کاشت سیب‌زمینی در دشت اردبیل، سالانه به‌طور متوسط حدود ۸۴ میلیون مترمکعب آب از محدوده‌ی شهرستان خارج می‌شود. با نسبت و شدت کم‌تر محصول جو نیز به‌مانند محصول سیب‌زمینی منجر به خروج سالانه حدود ۳۵ میلیون مترمکعب آب از دشت اردبیل می‌شود. با کمی اغماض مشاهده می‌شود که وضعیت کشت یونجه در شرایطی است که تولید تقریباً اندازه‌ی مصرف است؛ اما برای محصول گندم تولید کم‌تر از نیاز مصرفی بوده و با تأمین نیاز مصرفی، به‌طور متوسط سالیانه کمی بیش‌تر از هفت میلیون مترمکعب آب وارد دشت اردبیل می‌شود.

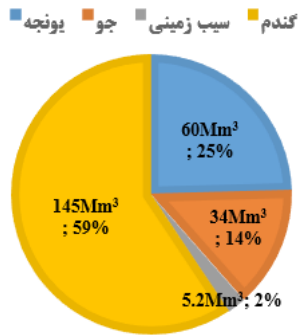
اثرات شاخص VWF بر کمبود آب دشت اردبیل

مقدار شاخص VWF تأثیر آشکاری بر مصرف آب کشاورزی منطقه‌ای دارد که به‌نوبه خود باعث تغییر شاخص‌های تنش آبی کشاورزی خواهد شد. معمولاً کمبود آب ممکن است برای صادرکنندگان محصول تشدید شود، درحالی‌که برای واردکننده به دلیل تأثیر شاخص VWF بین منطقه‌ای کاهش می‌یابد. اثرات VWF بر کمبود آب هر منطقه‌ای را می‌توان با تفاوت بین شاخص‌های تنش آبی محاسبه‌شده از دیدگاه تولید و مصرف محصول تعیین کرد. برای دشت اردبیل مقادیر شاخص تنش آبی با زیر مؤلفه‌های آبی، سبز و خاکستری و انواع کم‌آبی مربوطه از هر دو دیدگاه تولید و مصرف محصول در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده‌شده است. در شکل ۴ نشان داده‌شده است که CWSI کلی در مدت‌زمان انجام تحقیق برابر با ۲/۵ برآورد شد که نشان می‌دهد دشت اردبیل با تنش شدید آب کشاورزی از منظر مصرف محصولات زراعی مواجه است. تنش شدید آب کشاورزی در مصرف محصولات کشاورزی در دشت اردبیل عمدتاً ناشی از منابع کمیاب آب آبی است. شاخص

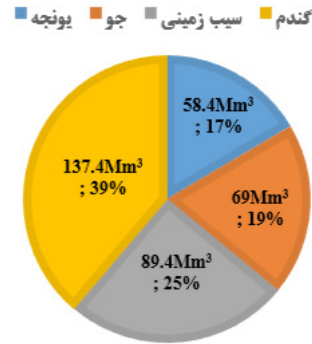
جدول ۴: رد پای آب آبی، سبز و خاکستری محصولات منتخب در دشت اردبیل از جنبه‌های تولید (PWF) و مصرف (CWF) برحسب میلیون مترمکعب

محصول	PWF _{blue}	PWF _{green}	PWF _{grey}	PWF	CWF _{blue}	CWF _{green}	CWF _{grey}	CWF
سیب‌زمینی	۸۰/۴	۸/۲	۰/۶	۸۹/۲	۴/۷	۰/۵	۰/۰۳	۵/۲۳
گندم	۶۰/۳	۷۶/۵	۰/۴۵	۱۳۷/۲۵	۶۳/۴	۸۰/۷	۰/۵	۱۴۴/۶
جو	۲۶	۴۲/۸	۰/۲۲	۶۹/۰۲	۱۹/۷	۳۴/۱	۰/۲	۵۴
یونجه	۴۳/۳	۱۵	۰/۱۵	۵۸/۴۵	۶۶	۲۶	۰/۳	۹۲/۳
مجموع	۲۰۹/۷	۱۴۲/۵	۱/۴۲	۳۵۳/۹۲	۱۵۳/۸	۱۴۱/۳	۱/۰۳	۲۹۶/۱۳

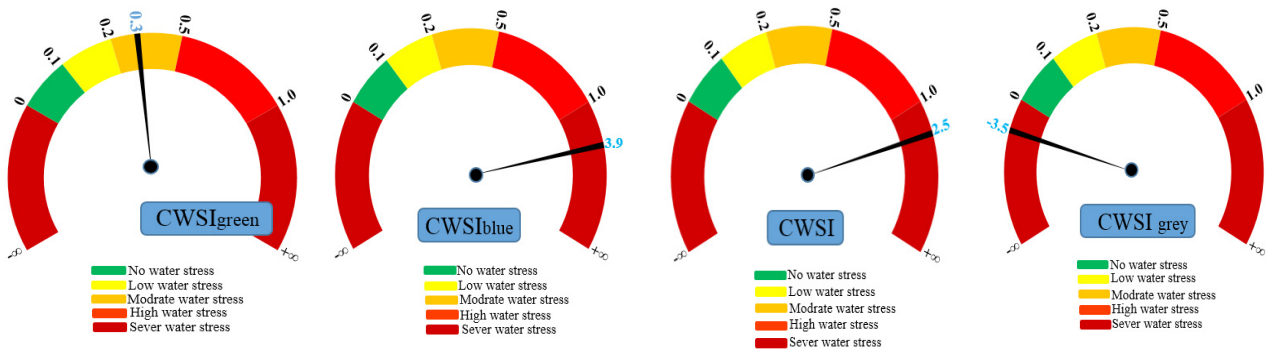
ب - CWF



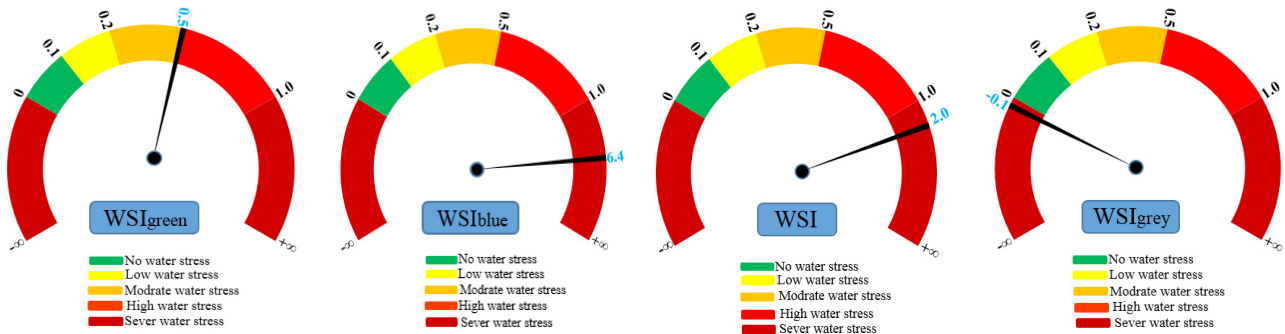
الف - PWF



شکل ۳: مقایسه ردپای آب از جنبه‌ی تولید (الف-PWF) و از نظر مصرف (ب-CWF) محصولات منتخب دشت اردبیل



شکل ۴: کمبود آب آبی، سبز و خاکستری محصولات منتخب دشت اردبیل از دیدگاه نیاز مصرف محصول



شکل ۵: کمبود آب آبی، سبز و خاکستری محصولات منتخب دشت اردبیل از دیدگاه تولید محصول

ناشی از کمبود منابع آبی سبز و آبی) از نظر تولید و مصرف محصول طبقه‌بندی شود.

به‌طورکلی، مقادیر آب مجازی آبی، سبز و خاکستری وارداتی باعث رفع تنش و برطرف نمودن کمبود آب در دشت اردبیل نشد؛ زیرا کمبود آب را در برخی از صادرکنندگان محصولات کشاورزی و منابع آب از قبیل سیب‌زمینی و جو تشدید کرد. مسیرهای تجاری و حجم برخی محصولات غیرمعقول بود که باعث شد اثر VWF ها بر کاهش کمبود آب کاهش یابد. در دشت اردبیل شاخص‌های $CWSI_{blue}$ ، $CWSI_{green}$ و $CWSI_{grey}$ به ترتیب در سطوح ۵، ۳ و ۵ بودند که نشان‌دهنده‌ی کمبود آب مبتنی بر منابع را داشت و به دلیل بارش نسبتاً کم، هم در آب سبز و مخصوصاً در منابع آب آبی محدودیت ایجاد می‌کند. در کل دنیا مشخص شده است که

$CWSI_{green}$ برابر $0/3$ (در ناحیه تنش متوسط) محاسبه شد، درحالی‌که هر دو شاخص $CWSI_{blue}$ و $CWSI_{grey}$ در ناحیه تنش آبی شدید و به ترتیب $3/9$ و $3/5$ برآورد گردیدند. به‌عبارت‌دیگر، در دشت اردبیل آب آبیاری نسبت به آب باران در مصرف محصولات کشاورزی پایداری کم‌تری داشت. در ادامه شاخص تنش آبی از منظر تولید محصول (WSI) محاسبه شد که دشت اردبیل را با محاسبه‌ی عدد ۲ با پنجمین سطح کمبود آب (تنش آبی شدید) در تولید محصولات کشاورزی تبیین می‌کند. شاخص‌های WSI_{green} ، WSI_{blue} و WSI_{grey} به ترتیب با مقادیر $0/5$ ، $6/4$ و $0/1$ محاسبه شدند و کمبود آب مربوطه به ترتیب به‌عنوان سطوح ۳ (تنش آبی متوسط)، ۵ (تنش آبی شدید) و ۵ (تنش آبی شدید) ارزیابی شدند. علاوه بر این، کمبود آب دشت اردبیل باید به‌عنوان کمبود آب مبتنی بر منابع (عمدتاً

VWF توزیع آب اصلی را تغییر می‌دهد و تأثیر قابل توجهی بر منابع آب در هر دو منطقه واردات و صادرات آب مجازی دارد [۲۷] و [۳۴]. آب سبز به‌ندرت در تولید صنعتی دخالت دارد و نقش آن در پایداری آب منطقه‌ای اغلب نادیده گرفته می‌شود. باین‌حال، در دشت اردبیل در اغلب محصولات پاییزه از قبیل گندم و جو، کشت محصول بیش‌تر به آب سبز حاصل از بارش بستگی دارد، مشابه این نتیجه‌گیری توسط کائو همکاران [۵] نیز که تحقیقی در چین انجام داده بودند، گزارش شد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که مقادیر PWF_{grey} و VWF_{grey} نسبت به سایر مؤلفه‌ها کوچک هستند و در حال حاضر برای دشت در اولویت نیستند. کمبود و مازاد تولید در هر منطقه وابسته به عواملی از قبیل شرایط اقلیمی، منابع آب‌وخاک، بهره‌وری کشاورزی و سایر عوامل از جمله بروز خشک‌سالی، سطح زیر کشت و الگوی مصرف است. برای محصول گندم در دشت اردبیل، با در نظر گرفتن اطلاعات جدول (۱) تقریباً سطح زیر کشت تغییرات زیادی نداشته و کمبود تولید را می‌توان ناشی از خشک‌سالی و تا حدودی تغییر الگوی مصرف دانست؛ اما کمبود محصولی مثل گندم را تا حدودی می‌توان ناشی از افزایش نسبی جمعیت دانست که مشابه این نتایج در تحقیقات اویسی و همکاران [۲۰] مورد اشاره قرار گرفته است. برای حل معضل تولید گندم در دشت اردبیل به‌مانند سایر نقاط کشور، اگرچه تغییر الگوی کشت یک راهکار است که همیشه جزء گزینه‌های مدیریتی می‌باشد اما آبیاری تکمیلی در کشت دیم می‌تواند بسیار مفید و عملی باشد [۲۰]. هم‌چنین در بخش کشت دیم با اعمال شخم محافظتی به همراه مدیریت کود در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله دشت اردبیل و جمع‌آوری آب‌های سطحی می‌توان عملکرد واحد سطح را افزایش داد. علاوه بر آن عدم جایگزینی کشت سیب‌زمینی با گندم برای جبران کمبود به علت سود بیش‌تر محصول سیب‌زمینی است که دلپسند و همکاران [۷] نیز به آن اشاره نموده‌اند. همان‌گونه که اشاره شد در دشت اردبیل بیش‌ترین کمبود مربوط به شاخص VWF_{blue} بود، از طرفی محصول سیب‌زمینی بیش‌ترین نقش را در صادرات آب دارد که برای این محصول شاخص رد پای آب مجازی سبز (VWF_{green})، یا تأثیر بارندگی، در آن به نسبت سایر محصولات کم‌تر است. به‌ندرت دقیق‌تر سهم استفاده از بارندگی محصولات سیب‌زمینی، یونجه، گندم و جو در دشت اردبیل به ترتیب حدود ۹/۴، ۱۳/۴، ۵۷ و ۶۱ درصد (با استفاده از نتایج جدول ۳) است؛ بنابراین مدیریت کشت سیب‌زمینی از طریق کاهش سطح زیر کشت و یا افزایش بهره‌وری آب از طریق سامانه‌های نوین آبیاری می‌تواند به پایداری منابع آب در این منطقه کمک کند [۲۳]. با توجه به اینکه کشت محصول سیب‌زمینی بیش‌ترین آب آبی را مصرف می‌نماید و بخش وسیعی از مزارع سیب‌زمینی در حال حاضر به روش سنتی آبیاری (شیاری) شده و گاهی تا ۱۰ هزار مترمکعب در هکتار مصرف می‌شود از طریق آبیاری تیپ مرسوم یا زیرسطحی مصرف آب آبیاری به ازای واحد سطح را می‌توان کاهش داد و در ادامه از

محل صرفه‌جویی آب آبیاری برای آبیاری تکمیلی استفاده نمود. کشت سیب‌زمینی در دشت اردبیل به علت سود نسبی آن نسبت به سایر محصولات است که برای دستیابی به این سود و درعین‌حال مصرف کم‌تر آب جایگزینی آن با سایر محصولات (تصمیم‌گیری پس از مطالعات تخصصی موردنیاز، اجتماعی، فرهنگی و اقتصادی) را در نظر گرفت که این راهکار توسط خرمی‌وفا و همکاران [۱۴] و دلپسند و همکاران [۷] نیز توصیه‌شده است. با جمع‌بندی نتایج این تحقیق، مشخص می‌شود در شرایطی که در سال‌های اخیر در کشور خشک‌سالی حاکم بوده و دشت اردبیل نیز از آن متأثر بوده، اما دشت اردبیل صادرکننده آب بوده درحالی‌که در برخی اقلام از قبیل کالای استراتژی گندم کمبود وجود داشته است که نشان از عدم توازن در الگوی کشت بر اساس نیاز می‌باشد. این وضعیت در بخش‌های مختلف کشور و برخی نقاط دنیا نیز توسط سایر محققین از قبیل کائو و همکاران [۵]، ژائو و همکاران [۳۴]، رستگاری‌پور و همکاران [۲۳] و حمدی و همکاران [۱۰] گزارش شده است. انتظار می‌رود در دشت اردبیل که بعد از دشت مغان، مهم‌ترین دشت استان اردبیل است، برای توسعه کشاورزی به‌ویژه در تخصیص و استفاده از منابع آب، در صورت ادامه‌ی روند کنونی در سال‌های آتی بیش‌تر با معضل مواجه شود. انجام مدیریت صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی از منظر تولید و مصرف محصول برای کاهش کمبود آب، می‌تواند معضلات منابع آب دشت اردبیل را کاهش دهد. بهبود عملکرد محصول و بهره‌وری آب به‌منظور کاهش WF برای هر واحد محصول کشاورزی از دیدگاه تولید محصول ضروری است [۹]. کنترل PWF محصول (به‌ویژه برای غلات) و کاهش جریان خروجی آب مجازی مخصوصاً (VWF_{blue}) به‌منظور کاهش کمبود سیستماتیک آب، برای مدیریت آب در دشت اردبیل بسیار ضروری است. در همین حال، برای ارتقای پایداری منابع آب منطقه‌ای، نیاز به بهره‌برداری از پتانسیل توسعه منابع آب سبز و کاهش بیش‌تر آلودگی آب کشاورزی است [۲۹]. می‌توان گفت که اثرات VWF بر کمبود آب مبتنی بر منابع و محیط‌زیست، اطلاعات مهم و جامعی را برای مدیریت منابع آب منطقه‌ای فراهم می‌کند؛ بنابراین، لازم است چارچوب ارزیابی تأثیر VWF بر منابع آب بر اساس ارزیابی WF های آبی، سبز و خاکستری ایجاد شود سپس تصمیمات کلان در سطح ملی، منطقه‌ای و استانی اتخاذ شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اجزای رد پای آب (WF) و کمبود آب در دشت اردبیل، از دیدگاه تولید و مصرف محصول، ارزیابی شد. نتایج نشان داد که در شاخص VWF برای دشت اردبیل، چنانچه مؤلفه‌های WF آبی، سبز و خاکستری در نظر گرفته می‌شوند، درک بیش‌تری را از وضعیت منابع آب نشان می‌دهد. طبق استانداردهای تعریف‌شده مشخص شد از جنبه‌ی تولید و مصرف آب محصولات در دشت اردبیل کمبود شدید آب وجود دارد، اما شدت آن از نظر تولید

5. Cao, X., Bao, Y., Li, Y., Li, J. and Wu, M. 2023. Unravelling the effects of crop blue, green and grey virtual water flows on regional agricultural water footprint and scarcity. *Agricultural Water Management*, 278, p.108165.

6. D'Ambrosio, E., Gentile, F., and De Girolamo, A.M. 2019. Assessing the sustainability in water use at the basin scale through water footprint indicators. *Journal of Cleaner Production*, 118847.

7. Delpasand, M., Bozorg-Haddad, O., Goharian, E. and Loáiciga, H.A. 2023. Virtual water trade: Economic development and independence through optimal allocation. *Agricultural Water Management*, 275, p.108022.

8. Deng, G., Lu, F., Wu, L., and Xu, C. 2020. Social network analysis of virtual water trade among major countries in the world. *Science of The Total Environment*. 142043.

9. Finogenova, N., Dolganova, I., Berger, M., Núñez, M., Blizniukova, D., Müller-Frank, A., and Finkbeiner, M. 2019. Water footprint of German agricultural imports: local impacts due to global trade flows in a fifteen-year perspective. *Science of The Total Environment*. 662: 521- 529.

10. Hamdi Ahmadabad, Y., Liaghat, A., Rasoulzadeh, A., ghaderpour, R. 2019. 'Investigation of in the Capita Water Consumption Variation in Iran Based on the Past Two-Deca Diet', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(1): 77-87. (In Persian)

11. Hekmatnia, M., Hosseini, S. M., and Safdari, M. 2020. 'Water Use Assessment of Date in Sistan and Baluchestan Province Based on the Concept of Virtual Water', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(2), 513-524. (In Persian)

12. Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M. 2011. The water footprint assessment manual: setting the global standard. Earthscan, London, UK.

13. Jorrat, M., Del, M., Araujo, P.Z., and Mele, F.D. 2018. Sugarcane water footprint in the province of Tucumán, Argentina. Comparison between different management practices. *Journal of Cleaner Production*. 188: 521–529.

14. Khoramivafa, M., Nouri, M., Mondani, F., and Veisi, H. 2017. 'Evaluation of Virtual Water, Water Productivity and Ecological Footprint in Wheat and Maize Farms in West of Iran: A Case Study of Kouzaran Region, Kermanshah Province', *Journal of Water and Sustainable Development*, 3(2): 19-26. (In Persian)

15. Li, M., Xu, Z., Jiang, S., Zhuo, L., Gao, X., Zhao, Y., and Wu, P. 2021. Non-negligible regional differences in the driving forces of crop-related water footprint and virtual water flows: a case study for the Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Cleaner*

نسبت به مصرف حجم آب کمتری موردنیاز است. این موضوع نشان‌دهنده‌ی این واقعیت است که علی‌رغم تنش آبی در دشت اردبیل، سالانه حجم قابل‌توجهی آب از محدوده خارج می‌شود که نیازمند مدیریت آن در سال‌های آتی است. از نظر مؤلفه‌های مفهوم آب مجازی نیز (VWF) که شامل آب‌های آبی، سبز و خاکستری است، دشت اردبیل با تنش آبی مواجه است که این تنش در منابع آب آبی (آبیاری) کمبود در رده تنش شدید قرار دارد. از طرفی تنش آب سبز در منطقه در ناحیه تنش متوسط قرار دارد که نشان‌دهنده‌ی تأمین نیاز آبی محصولات از طریق بارندگی بوده که به نسبت مؤلفه‌ی آب آبی پایداری بیشتری دارد، بنابراین مدیریت منابع آب از منظر کشت محصول، شرایط ارتباطات و مصرف برای تضمین امنیت آب، موردنیاز است. با توجه به محدودیت‌های منابع آب در دشت اردبیل، لازم است از منظر تولید، بهره‌وری آب کشاورزی منطقه‌ای بهبود یابد و توسعه و حفاظت از منابع آبی برای اطمینان از کمیت و کیفیت آب موردنیاز در اولویت قرار گیرد. از جمله راهکارهای افزایش بهره‌وری آب می‌توان به استفاده از روش‌های نوین آبیاری با راندمان بیشتر، آبیاری تکمیلی در محصولات دیم و تغییر الگوی کشت در جهت جایگزینی بخشی از محصول سیب‌زمینی با محصولاتی از قبیل زعفران با نیاز آبی کم‌تر و درآمد اقتصادی مناسب، اشاره نمود. از طرفی در بخش کشاورزی دیم پیشنهاد می‌شود بهره‌وری را به‌صورت عملکرد محصول در ازای واحد بارندگی در دشت اردبیل تعریف نمود تا اقدامات لازم برای استفاده بیشینه از بارش و جلوگیری از هدررفت آن به‌صورت رواناب صورت گیرد. همچنین لازم است جهت‌های تحقیقاتی آبی که تأثیر VWF در محیط‌زیست بر منابع آب را ترکیب می‌کنند، برای دستیابی به منابع آب پایدار موردتوجه قرار داد.

منابع

1. Asadzadeh Sharfa, H. and Raoof, M. 2014. Estimating the suitable method of calculating the effective precipitation in the Ardabil plain, the second National Conference on Conservation of Natural Resources and Environment, Ardabil, Iran. (In Persian)

2. Banihabib, M. E., Hadi Nezhad, M. H., and Mohammadi, A. 2019. 'Managing Virtual Water of Agricultural Products in Urmia Lake Basin', *Extension and Development of Watershed Management*, 7(26): 34-44.

3. Bazrafshan, O., and Gerkanı Nezhad Moshizi, Z. 2019. Assessment of Water Use Efficiency and Water Footprint of Saffron Production in Iran', *Saffron Agronomy and Technology*, 7(4), 505-519. (In Persian)

4. Beltran-Peña, A., Rosa, L., and D'Odorico, P. 2020. Global food self-sufficiency in the 21st century under sustainable intensification of agriculture. *Environmental Research Letters*, 15 (9): 095004.

26. Sobhani, B., and Nasiri, F. 2022. Agro-ecological zonation of canola cultivation in Ardebil Plain. *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 22(65): 61-78. (In Persian)
27. Sun, S., Wang, Y., Engel, B.A., and Wu, P. 2016. Effects of virtual water flow on regional water resources stress: a case study of grain in China. *Science of The Total Environment*. 550: 871-879
28. Wan, L., Cai, W., Jiang, Y., and Wang, C. 2016. Impacts on quality-induced water scarcity: drivers of nitrogen-related water pollution transfer under globalization from 1995-2009. *Environmental research letters*, 11 (7), 074017.
29. Wu, M., Cao, X., Guo, X., Xiao, J., and Ren, J., 2021. Assessment of grey water footprint in paddy rice cultivation: effects of field water management policies. *Journal of Cleaner Production*. 313, 127876.
30. Xinchun, C., Mengyang, W., Rui, S., La, Z., Dan, C., Guangcheng, S., Xiangping, G., Weiguang, W., and Shuhai, T. 2018. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: a case study of irrigated paddy rice in East China. *Science of The Total Environment*. 610-611, 84-93.
31. Xinchun, C., Mengyang, W., Xiangping, G., Yalian, Z., Yan, G., Nan, W., and Weiguang, W. 2017. Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework. *Science of The Total Environment*. 609: 587-597.
32. Xu, Z., Chen, X., Wu, S.R., Gong, M., Du, Y., Wang, J., Li, Y., and Liu, J. 2019. Spatial-temporal assessment of water footprint, water scarcity and crop water productivity at the county level in China's major crop production region. *Journal of Cleaner Production*. 224: 375-383.
33. Yuguda, T.K., Li, Y., Zhang, W., and Ye, Q. 2020. Incorporating water loss from water storage and conveyance into blue water footprint of irrigated sugarcane: a case study of Savannah Sugar Irrigation District, Nigeria. *Science of The Total Environment*, 136886.
34. Zhao, H., Qu, S., Liu, Y., Guo, S., Zhao, H., Chiu, A., Liang, S., Zou, J., and Xu, M., 2020. Virtual water scarcity risk in China. *Science of The Total Environment*. 160: 104886.
- Production. 279, 123670.
16. 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*. 15 (5): 1577-1600.
17. Miryaghoubzadeh, M., Khosravi, S., Ebrahim, S., and Zabihi, M. 2019. 'Virtual Water, New Approach to Water Crisis', *Extension and Development of Watershed Management*, 7(24): 11-20.
18. Mojtahedi, M., Kalantari, K., Asadi, A., varmaziyari, H., and Hosseinzad, J. 2021. 'Investigating the Water Footprint Components of Wheat and Barley in East Azerbaijan Province', *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(4): 981-995. (In Persian)
19. Novoa, V., Ahumada-Rudolph, R., Rojas, O., Munizaga, J., S'aez, K., and Arumí, J.L. 2019. Sustainability assessment of the agricultural water footprint in the Cachapoal River basin, Chile. *Ecological indicators*. 98: 19-28.
20. Oveisi F, Fattahi Ardakani A, and Fehresti Sani M. 2019. Investigation of Virtual Water and Ecological Footprints of Water in Wheat Fields of Isfahan Province. *Journal of Water and Soil Science*. 23(1):87-99 (In Persian)
21. Porkka, M., Gerten, D., Schaphoff, S., Siebert, S., and Kumm, M. 2016. Causes and trends of water scarcity in food production. *Environmental research letters*. 11 (1), 015001.
22. Qu, S., Liang, S., Konar, M., Zhu, Z., Chiu, A.S.F., Jia, X., and Xu, M. 2017. Virtual water scarcity risk to the global trade system *Environmental science & technology*. 52 (2): 673-683.
23. Rastegaripoor, F., Salari, A., and Azizzadeh, F. 2021. 'Determination of virtual water indices and ecological footprint of sugar beet water in villages of Torbat Heydarieh city', *Rural Development Strategies*, 8(2): 233-243. (In Persian)
24. Schyns, J.F., Hoekstra, A.Y., Booij, M.J., Hogeboom, R.J., and Mekonnen, M.M. 2019. Limits to the world's green water resources for food, feed, fiber, timber, and bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 116 (11): 4893-4898.
25. Shu, R., Cao, X., and Wu, M. 2021. Clarifying Regional Water scarcity in agriculture based the theory of blue, green and grey water footprints. *Water Resources Management*. 35 (3), 1101-1118.



Abstract

Estimation of the Virtual water Footprint and Water Shortage of Ardabil Plain Main Crops

J. Azizi Mobaser¹

Received: 2023/12/11 Accepted: 2023/12/21

This research was conducted in Ardabil plain with the aim of investigating the quantitative and sustainable status of different sources of water supply for potato, wheat, barley and alfalfa crops. Using CROPWAT software, the water requirement of these products as the main crops of the plain was determined. Various components of the virtual water footprint, including VWFblue, VWFgreen, VWFgrey, as well as water stress indices from the perspective of production (WSI) and water consumption (CWSI) were calculated. The results showed that potatoes with an annual consumption of approximately 84 million m³ (66%) have the largest share in the virtual water footprint index (VWF) of Ardabil Plain. In addition, barley, alfalfa and wheat products have a virtual water footprint (VWF) of 21, 12.2, and 11 million m² respectively. The WSIgreen, WSIblue, and WSIgrey indices were calculated with values of 0.5, 6.4, and -0.1, respectively, and moderate water and severe water shortages, respectively. Considering the limitations of water resources in the Ardabil Plain, it is necessary to improve the productivity of regional agricultural water from a production point of view and to prioritize the development and protection of water resources to ensure the quantity and quality of the water needed.

Keywords: CWSI, VWF, Water stress, Water resource and WSI.

1. Associate. Prof, Department of water engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil. Ja_mobaser@uma.ac.ir .