

مقاله علمی-پژوهشی

تحلیل پایداری منابع آبی در تولید جو در ایران

شهلا دهقان پیر<sup>۱</sup>، ام‌البنین بذرافشان<sup>۲\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۹

چکیده

جو یکی از غلات مهم و مقاوم در مناطق خشک و نیمه خشک خاورمیانه، از جمله ایران است که با مشکلات کمبود آب و بارندگی مواجه است. در این شرایط، دسترسی به منابع آب کافی برای آبیاری، چالش اصلی در تولید این محصول در ایران به شمار می‌آید. این مطالعه به بررسی شاخص‌های کمبود آب در تولید جو در ایران طی دوره ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که ردپای آب سبز، خاکستری و آبی به ترتیب ۱۶، ۱۴ و ۷۰ درصد از مجموع ردپای آب در تولید جو را تشکیل می‌دهند. تغییرات تنش آبی جو در استان‌های غربی، شمال غربی و شمالی ایران معمولاً کمتر از ۰/۳ است و نشان‌دهنده تنش آبی پایین است. در حالی که در استان‌های جنوبی، مرکزی و شرق ایران میانگین این شاخص حدود ۰/۵ بوده که نشان‌دهنده تنش آبی متوسط و بالا است. محدوده تغییرات شاخص تنش آبی جو از ۰/۰۳ در غرب (کرمانشاه) تا ۱/۲۲ در استان (یزد) متغیر است. مقدار متوسط فقر آب در این دوره برابر با ۵۸/۱۷ میلیون مترمکعب و کمترین مقدار فقر آب در استان گیلان (۰/۷۴ میلیون متر مکعب) و بیشترین مقدار در استان خراسان شمالی (۲۵۸/۷۷ میلیون مترمکعب) ثبت شده است. همچنین مقدار متوسط شاخص خودکفایی و وابستگی آب به ترتیب ۳۸ درصد و ۶۲ درصد است. این پژوهش می‌تواند به بهبود مدیریت منابع آب و ارتقاء پایداری تولید جو در ایران کمک کند.

واژه‌های کلیدی: تنش آبی، جو، منابع آب، ردپای آب، فقر آب، کمبود آب

مقدمه

در معرض خشکسالی و کمبود آب قرار دارند، از جمله ایران، به بحران‌های جدی در تأمین منابع آب و امنیت غذایی منجر شده است (Cao et al., 2021; Zhao et al., 2020). ارزیابی کمبود آب و توسعه استراتژی‌های مدیریت منابع آب در مناطق مختلف بستگی به شاخص‌های متعددی دارد که هر یک دیدگاه‌های خاصی را در مورد ابعاد مختلف استفاده و دسترسی به آب ارائه می‌دهند. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های پیشنهادی برای مدیریت منابع آبی، مفهوم ردپای آب است که می‌تواند به‌عنوان ابزاری مفید برای اندازه‌گیری و پیش‌بینی مقدار آب مصرفی در بخش کشاورزی و تقاضای مورد نیاز آن استفاده شود. مفهوم ردپای آب، که برای نخستین بار در سال ۲۰۰۲ توسط اوکسترا و هانگ معرفی شد، ابزاری مناسب برای تعیین میزان منابع آب شیرین مصرفی و آلوده شده در فرآیند تولید محصولات کشاورزی به‌شمار می‌آید (Hoekstra and Hung., 2002; Hoekstra and Mekonnen., 2012; Liu et al., 2017; Morillo et al., 2015). این شاخص می‌تواند به‌طور دقیق‌تری میزان آب مصرفی برای تولید جو را در سطوح مختلف، از جمله منابع آبی سطحی و زیرزمینی، به‌ویژه در شرایط اقلیمی و توپوگرافی ایران ارزیابی کند. در رابطه با استفاده از مفهوم ردپای آب مطالعات زیادی مانند (Bazrafshan and Dehghanpir., 2020; Cao et al., 2014; Hoekstra and

آب یکی از عوامل ضروری برای تولید کشاورزی و بقای انسان است و نقش مهمی در امنیت غذایی ایفا می‌کند. در سال‌های اخیر، افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی موجب افزایش رقابت برای دسترسی به منابع آب شیرین شده است (Hoekstra and Mekonnen., 2012). ارزیابی و مدیریت منابع آب به یک اولویت اساسی در سراسر جهان تبدیل شده است، زیرا کمبود آب به‌طور فزاینده‌ای تولیدات کشاورزی، امنیت غذایی و ثبات اقتصادی-اجتماعی را تهدید می‌کند (Hoekstra et al., 2011; Behnassi et al., 2024). در همین راستا، ناترازی میان تقاضای فزاینده برای آب و منابع محدود آن به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده است (Vallino et al., 2020). این مسئله به‌ویژه در کشورهایی که

۱- فارغ‌التحصیل دکتری آبیاری و محقق پسا دکتری دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲- استاد گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

\*- نویسنده مسئول: (Email: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir)

است (دهقان پیر و همکاران، ۱۴۰۱). بنابراین، یکی از راه‌حل‌های اصلی برای کاهش کمبود آب، کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی است. جو به عنوان یکی از غلات اساسی و مهم در کشاورزی ایران، با سطح زیر کشت قابل توجه در بسیاری از مناطق کشور کشت می‌شود. مقاومت جو در برابر محدودیت‌ها و کاربرد آن در چرخه تغذیه انسان، از عوامل کلیدی برای کشت گسترده این محصول در کشور به شمار می‌آید (Bijanazadeh et al., 2021). طبق آمار فائو، ایران با تولید سه میلیون تن و سطح زیر کشت ۱/۷ میلیون هکتار در رده چهاردهم در میان کشورهای تولید کننده این محصول قرار دارد (پیری و مبارکی، ۱۴۰۰). جو در مناطق خشک و نیمه خشک خاورمیانه از جمله ایران، که با بارندگی محدود و شرایط تنش آبی مواجه هستند کشت می‌شود. به همین دلیل، بخش کشاورزی ایران با کمبود فزاینده منابع آب روبروست و دسترسی به آب کافی برای آبیاری، چالش اصلی در تولید جو به شمار می‌آید (Bijanazadeh et al., 2021). در این تحقیق، هدف اصلی ارزیابی وضعیت منابع آبی در تولید جو با استفاده از شاخص‌های ردپای آب، تنش آبی و فقر آب در استان‌های مختلف کشور است. این پژوهش می‌تواند به عنوان گامی مؤثر در جهت بهبود مدیریت منابع آب و ارتقاء پایداری تولید جو در ایران محسوب شود.

### مواد و روش‌ها

ایران کشوری بزرگ در خاورمیانه با مساحت حدود ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع است که در مختصات جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی و ۵۳ درجه شرقی قرار دارد. ارتفاع آن از ۴۰ تا ۵۶۷۸ متر نسبت به میانگین سطح دریا متغیر است. کشور ایران در کمربند خشک و نیمه خشک جهان قرار دارد و میانگین بارش سالیانه آن کمتر از ۲۴۰ میلی‌متر است. حدود ۷۰ درصد از مساحت ایران بارش کم (کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر در سال) و تنها ۳ درصد دارای بارش متوسط (بیش از ۵۰۰ میلی‌متر در سال) است (Madani, 2016). ایران دارای ۳۱ استان است که به ۶ موقعیت جغرافیایی طبقه‌بندی می‌شوند (جدول ۱). منطقه مورد مطالعه در این تحقیق استان‌های تولیدکننده جو است. جو یکی از غلات مهم و مقاوم، در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور کشت می‌شود و در مقایسه با سایر غلات به آب کمتری نیاز دارد. این محصول در تأمین علوفه دام‌ها و منابع غذایی دیگر نقش اساسی دارد. سطح زیر کشت جو در کشور به طور متوسط حدود ۲ میلیون هکتار بوده، هرچند که در برخی سال‌ها افزایش یافته است. این محصول، به ویژه در مناطق خشک در تأمین امنیت غذایی و اقتصادی کشور و در شرایط بحران کم‌آبی، نقش برجسته‌ای ایفا کند. جدول (۱) اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، تولید و عملکرد جو آبی در مناطق مختلف کشور را در دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد (جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲).

Mekonnen., 2012; Bazrafshan et al., 2019, Ramezani et al., 2019) Etedali انجام شده است. ردپای آب به سه بخش آبی، سبز و خاکستری تقسیم می‌شود که به ترتیب نشان‌دهنده استفاده از آب سطحی و زیرزمینی، استفاده از آب باران و حجم آب مورد نیاز برای رقیق کردن آلاینده‌ها هستند (Hoekstra et al., 2011, Zhai et al., 2019). در زمینه ردپای آب، چندین شاخص معرفی شده است که برای ارزیابی ارتباط بین وضعیت منابع آب منطقه‌ای و درک تأثیر فعالیت‌های انسانی بر منابع آب استفاده می‌شود. نمونه‌هایی از شاخص‌هایی که به طور رایج در ارزیابی کمبود آب منطقه‌ای استفاده شده‌اند شامل: شاخص تنش آبی (Falkenmark, 1989; Pfister et al., 2009)، تنش آبی کشاورزی (Cao et al., 2017, 2018; Dehghanpir et al., 2023)، کمبود آب آبی، شاخص فقر آبی (Salameh, 2000)، شاخص وابستگی و خودکفایی آب (Hoekstra and Hung., 2005) که به عنوان رایج‌ترین شاخص‌ها برای ارزیابی کمبود آب هستند. این شاخص‌ها، به عنوان معیاری برای بررسی مقدار آب مصرفی نسبت به منابع موجود هستند، و می‌توانند کمک کنند تا میزان بحران آب در مناطق تولید جو مشخص شود مطالعات مختلفی از شاخص تنش آبی برای ارزیابی کمبود آب منطقه‌ای استفاده کرده‌اند مانند: (Dehghanpir et al., 2023; Cao et al., 2017, 2018; Mekonnen and Hoekstra., 2016; Dehghanpir et al., 2024; Ma et al., 2024). به عنوان نمونه: لیو و همکاران به ارزیابی جهانی کمبود آب در بخش کشاورزی پرداختند و از شاخص تنش آبی کشاورزی استفاده کردند نتایج حاصل از مطالعه نشان داد که گسترش زمین‌های کشاورزی و رقابت برای برداشت آب از جمله دلایل اصلی کمبود آب هستند (Liu et al., 2022). فو و همکاران در تحقیقی به بررسی ردپاهای آبی، سبز، خاکستری و همچنین ارزیابی فشار کمبود آب بر اساس شاخص تنش آبی برای محصولات گندم، جو ذرت، پنبه و بادام زمینی در استان شاندونگ چین طی دوره آماری ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۶ پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد در بین اجزای مختلف ردپای آب، ردپای آب آبی بیشترین مقدار را داشته و این نشان دهنده خطر بالای کمبود آب برای تولیدات کشاورزی در بیشتر مناطق استان است. بنابراین برای بهره‌برداری بهینه از منابع آبی، لازم است که ساختار کشت کشاورزی با توجه به منابع آبی محلی به طور منطقی تنظیم شود (Fu et al., 2019). ایران کشوری خشک و نیمه‌خشک است که با کمبود شدید آب مواجه بوده و این امر تأثیرات منفی زیادی بر اقتصاد، عملکرد اکوسیستم‌ها و رفاه مردم کشور داشته است (Madani, 2016). بخش کشاورزی یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین بخش‌های مصرف‌کننده منابع آبی در ایران است، به طوری که بیش از ۹۲ درصد منابع آب شیرین در این بخش مصرف می‌شود، بنابراین آگاهی از منابع آبی تخصیص‌یافته برای تولید محصولات کشاورزی برای مدیران و سیاست‌گذاران کشور بسیار مهم

جدول ۱- متوسط سطح زیر کشت، تولید و عملکرد کشت آبی جو در کشور ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰

منطقه	استان	مساحت		عملکرد
		میلیون هکتار	تولید میلیون تن	
شمال	مازندران	۳/۶۳	۹/۹۹	۲/۷۵
	گیلان	۰/۱۰	۰/۲۴	۲/۴۲
	گلستان	۱۳/۹۸	۴۰/۶۲	۲/۹۱
شمال غرب	اردبیل	۲۳/۹۴	۶۴/۹۸	۲/۷۱
	آذربایجان شرقی	۲۴/۶۹	۶۶/۰۴	۲/۶۷
	آذربایجان غربی	۱۴/۳۷	۴۱/۱۴	۲/۸۶
غرب	ایلام	۱/۴۴	۳/۶۳	۲/۵۲
	کرمانشاه	۹/۶۵	۴۰/۶۹	۴/۲۱
	لرستان	۷/۹۷	۲۱/۹۸	۲/۷۶
	کردستان	۴/۳۹	۱۴/۱۸	۳/۲۳
	زنجان	۸/۷۷	۲۷/۶۵	۳/۱۵
	همدان	۴۳/۷۱	۱۶۴/۷۲	۳/۷۷
	چهارمحال بختیاری	۸/۶۸	۲۴/۵۶	۲/۸۳
جنوب	کهگیلویه بویر احمد	۲/۴۲	۵/۵۰	۲/۲۸
	سیستان بلوچستان	۱۲/۸۰	۲۳/۱۰	۱/۸۱
	بوشهر	۱/۶۲	۲/۹۳	۱/۸۱
	هرمزگان	۱/۳۱	۲/۹۴	۲/۲۴
شرق	خوزستان	۲۹/۲۰	۵۸/۴۴	۲
	خراسان شمالی	۲۱/۴۶	۵۴/۶۰	۲/۵۴
	خراسان رضوی	۱۲۱/۷۴	۳۳۸/۷۶	۲/۷۸
مرکزی	خراسان جنوبی	۱۹/۱۷	۴۶/۲۸	۲/۴۱
	یزد	۴/۳۵	۱۲/۵۰	۲/۸۸
	اصفهان	۴۳/۸۲	۱۶۱/۷۲	۳/۶۹
	تهران	۳۴/۲۷	۱۲۷/۷۲	۳/۷۳
	کرمان	۳۱/۵۶	۷۶/۰۳	۲/۴۱
	قزوین	۲۹/۵۲	۱۰۱/۰۷	۳/۴۲
	مرکزی	۴۱/۱۱	۱۴۲/۳۳	۳/۴۶
	قم	۲۲/۸۲	۷۲/۳۱	۳/۱۷
	سمنان	۱۷/۷۳	۵۳/۷۹	۳/۰۳
	فارس	۵۹/۹۹	۱۷۳/۴۴	۲/۸۹
متوسط		۲۲/۰۱	۶۵/۸۰	۲/۸۵
بیشترین		۱۲۱/۷۴	۳۳۸/۷۶	۴/۲۱
کمترین		۰/۱	۰/۲۴	۱/۸۱

### ردپای آب

ردپای آب هر محصول از سه مولفه اصلی، سبز، خاکستری و آبی تشکیل شده است. ردپای آب سبز و آبی به ترتیب مصرف آب از منابع آب سبز و آبی را اندازه گیری می کنند. آب سبز به آب باران گفته می شود که به رواناب تبدیل نمی شود، در حالی که آب آبی شامل آب های زیرزمینی و سطح است (Hoekstra et al., 2011). از طرف دیگر، ردپای آب خاکستری به میزان آلودگی آب اشاره دارد و به

عنوان حجم آبی تعریف می شود که برای جذب آلاینده ها به منابع آب شیرین لازم است (Chapagain and Hoekstra., 2008). ردپای آب جو<sup>۱</sup> منطقه ای (BWF) برابر با مجموع ردپای آب جو در متر مکعب است و به صورت زیر محاسبه می شود:

$$BWF = WF * G \quad (1)$$

1- Barley Water Footprint (BWF)

1998).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (7)$$

که در آن  $ET_0$  تبخیر و تعرق مرجع (میلی متر در روز)،  $K_c$  ضریب گیاهی (میلی متر)،  $R_n$  تابش خالص بر سطح گیاه ( $MJ/m^2/day$ ) جریان گرمای خاک ( $MJ/m^2/day$ )،  $T$  میانگین دمای هوا بر حسب درجه سانتی گراد،  $U_2$  سرعت باد اندازه گیری شده در ارتفاع ۲ متر  $m/s$ ،  $e_a$  فشار بخار اشباع ( $kPa$ )،  $e_d$  فشار بخار واقعی ( $kPa$ )،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار ( $kPa/^\circ C$ ) و  $\gamma$  ثابت پیزومتریک ( $kPa/^\circ C$ ).

$WF_{Green}$  ردپای آب سبز به حجم آب باران مصرف شده اشاره دارد که با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه می شود (Chapagain and Hoekstra., 2008).

$$Green\ Water\ Footprint \rightarrow GrWF = \frac{P_e * 10}{Y} \quad (8)$$

### منابع آب در دسترس

مقدار منابع آب موجود برای تولید جو (BWR) شامل در دسترس بودن منابع آب آبی  $BWR_{blue}$  و در دسترس بودن منابع آب سبز  $BWR_{green}$  است که به صورت زیر محاسبه می شود (Cao et al., 2017):

$$BWR = BWR_{blue} + BWR_{green} \quad (9)$$

$BWR_{blue}$  با استفاده از معادله (۱۰) محاسبه می شود:  $WR$  در دسترس بودن کل منابع آب (آبی) منطقه ای بر حسب متر مکعب است.  $AWU$  و  $WU$  به ترتیب نشان دهنده منابع آب مصرفی در بخش کشاورزی و مقدار مصرف واقعی جو در یک منطقه هستند.

$$BWR_{blue} = WR * \frac{AWU}{WU} \quad (10)$$

$BWR_{green}$  به میزان بارش موثر سالانه در زمین های زراعی را عنوان می کند که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$AWR_{green} = 10 * A * P_e \quad (11)$$

که در آن  $A$  مساحت اراضی قابل کشت منطقه ای برای محصول جو بر حسب متر مربع و  $P_e$  بارش موثر سالانه بر حسب میلی متر می باشد که به عنوان روش توصیه شده در مدل FAO CROPWAT به شرح زیر برآورد شده است (Cao et al., 2018):

$$P_e = \begin{cases} P * \left( \frac{4.17 - 0.02 * P}{4.17} \right), & P < 83 \\ (41.7 + 0.1 * P), & P \geq 83 \end{cases} \quad (12)$$

### شاخص تنش آبی جو

$BWSI$  به عنوان نسبت کل ردپای آب تولید جو به منابع آبی در دسترس برای تولید این محصول تعریف می شود.  $BWF$ ، مجموع آب مصرفی (آب آبی و سبز) برای تولید محصول جو در یک منطقه است.  $BWR$  مقدار آب در دسترس برای تولید محصول جو در یک منطقه است. اگر  $BWSI$  بیشتر از ۱ باشد نشان دهنده این است که منابع آبی

که در آن  $WF$  ردپای آب برای تولید جو و  $G$  میزان تولید محصول را بر حسب تن نشان می دهند.  $WF$  به عنوان مجموع ردپای آب برای محصول جو به شرح زیر محاسبه می شود:

$$WF = BWF + GrWF + GWF \quad (2)$$

### شدت ردپای آب منطقه ای جو

شدت  $WF$  منطقه ای را می توان به صورت زیر محاسبه کرد (Dehghanpir et al., 2023):

$$(Barley\ Water\ Footprint\ Intensity) BWF I = \frac{BWF}{A} \quad (3)$$

که در آن  $BWF I$  ردپای آب منطقه ای محصول جو<sup>۱</sup> در واحد زمین قابل کشت بر حسب متر و  $A$  مساحت اراضی قابل کشت منطقه ای برای این محصول بر حسب متر مربع است.

### اجزاء ردپای آب (ردپای آب سبز، آبی و خاکستری)

هوکسترا و همکاران در سال ۲۰۱۱ روش استاندارد محاسباتی ردپای آب آبی، سبز و خاکستری را در سیستم تولید محصولات زراعی تعریف کردند (Hoekstra et al., 2011). طبق این روش های استاندارد محاسباتی ردپای آب خاکستری به صورت زیر محاسبه می شود:

$$Grey\ Water\ Footprint \rightarrow GWF = \frac{a * NAR}{C_{MAX} - C_{NAT}} * \frac{1}{Y} \quad (4)$$

که در آن  $a$  کسری از آبشویی،  $NAR$  میزان مصرف کود شیمیایی در مزارع بر حسب کیلوگرم در هکتار،  $C_{MAX}$  حداکثر غلظت قابل قبول برای نیتروژن بر حسب کیلوگرم در متر مکعب و  $C_{NAT}$  غلظت واقعی نیتروژن بر حسب کیلوگرم در متر مکعب که مقدار صفر در نظر گرفته می شود.  $WF_{blue}$  ردپای آب آبی به عنوان حجمی از آب های سطحی و زیرزمینی مصرف شده در طول فرآیند تولید تعریف می شود.  $P_e$  مجموع بارندگی موثر در طول رشد گیاه (میلی متر)  $ET_c$  تبخیر و تعرق گیاه (میلی متر)،  $Y$  عملکرد محصول (تن در هکتار) می باشد (Mekonnen and Hoekstra., 2020).

$$Blue\ Water\ Footprint \rightarrow BWF = \frac{(ET_c - P_e) * 10}{Y} \quad (5)$$

تبخیر و تعرق گیاه  $ET_{crop}$  بر حسب ( $m^2/day$ ) در طی دوره رشد محصول محاسبه شده است. تبخیر و تعرق گیاه  $ET_c$  از حاصل ضرب  $ET_0$  (تبخیر و تعرق پتانسیل مرجع) بر حسب میلی متر در روز در ضریب گیاهی  $k_c$  بدست می آید:

$$ET_{crop} = K_c * ET_0 \quad (6)$$

تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش FAO- Penman Monteith و نرم افزار CROPWAT محاسبه می شود (Allen.,

1- Regional Barley Water Footprint (BWF I)

منابع آب مجازی ندارد. اگر این شاخص به صفر نزدیک شود آنگاه یک منطقه به شدت به وارد کردن آب به صورت مجازی متکی است (Hoekstra and Hung., 2002).

$$WSS = 100 - WD \quad (۱۶)$$

## نتایج و بحث

### تغییرات تولید، عملکرد و سطح زیر کشت

سطح زیر کشت سالانه، عملکرد و تولید جو (کشت آبی) در ایران برای دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ به طور متوسط به ترتیب برابر با ۶۵۴/۶۹ هزار هکتار، ۲/۹۹ تن در هکتار و ۱۹۶۲/۳۴ هزار تن است. شکل (۱) نشان می‌دهد که سطح زیر کشت جو در ایران در دوره آماری مورد مطالعه با شیب ملایم از ۵۵۰/۶۵ هزار هکتار در سال ۱۳۸۷ به ۷۴۲/۷۷ هزار هکتار در سال ۱۴۰۰ افزایش یافته است. همچنین نتایج مربوط به تولید جو در سطح کشور نشان می‌دهد که با توجه به افزایش سطح زیر کشت، مقدار تولید محصول نیز افزایش یافته است به طوری که از مقدار ۱۲۸۹/۰۲ هزار تن در سال ۱۳۸۷ به مقدار ۲۳۶۶/۳۲ هزار تن در سال ۱۴۰۰ رسیده است و روند افزایشی با تغییرات جزئی داشته است. در طول دوره مورد مطالعه، عملکرد جو از ۲/۳۴ تن در هکتار در سال ۱۳۸۷ به ۳/۱۹ تن در هکتار در سال ۱۴۰۰ افزایش یافته است.

مقادیر متوسط سطح زیر کشت، تولید و عملکرد محصول جو در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ در شکل (۲) نشان داده شده است. مقادیر متوسط سطح زیر کشت، تولید و عملکرد به ترتیب برابر با ۲۲/۰۱ هزار هکتار، ۶۵/۸۰ هزار تن و ۲/۸۵ تن در هکتار است. بیشترین و کمترین مقدار سطح زیر کشت مربوط به استان خراسان رضوی (۱۲۱/۷۴ هزار هکتار) و استان گیلان (۰/۱ هزار هکتار) است. با توجه به شکل بیشترین مقدار تولید و سطح زیر کشت جو مربوط به استان‌های مرکزی و شرقی کشور است. کمترین میزان سطح زیر کشت و تولید مربوط به استان‌های شمالی کشور است.

### ردپای آب جو

متوسط حجم اجزاء ردپای آب در تولید جو آبی ایران در جدول (۳) طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ نشان داده شده است. کل حجم ردپای آب در ایران ۴۰۴۰/۲۷ میلیون متر مکعب است که ۲۹۹۵/۹۵ میلیون متر مکعب مربوط به آب آبی، ۴۶۸/۶۰ میلیون متر مکعب مربوط به آب سبز و ۵۷۵/۷۳ میلیون متر مکعب مربوط به آب خاکستری می‌باشد. در طول دوره آماری مورد بررسی، ردپای آب آبی بیشترین سهم ردپای آب را به خود اختصاص داده است و بعد از آن به ترتیب ردپای آب خاکستری و سبز قرار دارند. نتایج حاصل از این بخش با پژوهش (دهقان‌پیر و همکاران، ۱۴۰۱) هم‌راستا است.

برای تولید جو کافی نیست و تولید این محصول با تنش آبی رو به رو است. در مقابل، اگر BWSI کمتر از ۱ باشد به این معنا است که منابع آبی برای تولید این محصول به اندازه کافی موجود هستند (Cao et al., 2017; Raskin et al., 1997).

$$BWSI = \frac{BWF}{BWR} \quad (۱۳)$$

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص‌های تنش آبی و کمبود آب آبی جو (Pfister et al, 2009, Cao et al, 2017, Dehghanpir et al., 2023)

دسته‌بندی	BWSI, BWS
بدون تنش آبی	۰ - ۰/۱۵
تنش آبی پایین	۰/۱۶ - ۰/۳
تنش آبی متوسط	۰/۳۱ - ۰/۶
تنش آبی بالا	۰/۶۱ - ۱/۲
تنش آبی بسیار بالا	۱/۲۱ - ۱/۹
تنش آبی بحرانی	> ۱/۹

### شاخص فقر آب

فقر آب با حاصل ضرب ردپای آب BWF در شاخص تنش آبی جو BWSI (معادله ۱۴) تعیین می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده تأثیر آب مورد استفاده برای تولید محصولی مانند جو در مقایسه با سایر مصرف‌کنندگان است. هر چقدر که مقدار این شاخص کمتر باشد نشان‌دهنده این است که تأثیر آن بر آب مصرفی کمتر است و مقدار آن بر حسب متر مکعب می‌باشد (Hanafiah et al., 2019 and Dehghanpir et al., 2023; Salameh, 2000).

$$BWP \rightarrow \text{Barley Water Poverty} = BWF * BWS$$

(۱۴)

### شاخص وابستگی به آب

شاخص وابستگی آب (WD) به عنوان نسبت کل واردات حاصل آب مجازی (NVWI) به کل آب اختصاص داده شده برای تولید محصولات کشاورزی (WU) در یک منطقه است. این شاخص نشان‌دهنده میزان وابستگی به منابع آب خارجی از طریق آب مجازی خالص وارد شده به منطقه (NVWI) است که با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود. محدوده این شاخص در دامنه ای بین ۰ تا ۱۰۰ درصد تغییر می‌کند. مقدار ۰ به معنای خودکفایی کامل منطقه در تأمین نیازهای غذایی است و مقدار ۱۰۰ نشان‌دهنده وابستگی کامل به واردات آب مجازی است (Hoekstra and Hung., 2002).

$$WD = \frac{NVWI}{WU + NVWI} * 100 \quad (۱۵)$$

### شاخص خودکفایی آب

شاخص خودکفایی آب، میزان توانایی یک منطقه را در تأمین آب مورد نیاز برای تولیدات داخلی نشان می‌دهد. اگر مقدار این شاخص برابر با ۱۰۰ باشد نشان‌دهنده این است که منطقه نیازی به واردات



جدول ۳- حجم ردپای آب و سهم هر یک از اجزاء آن در تولید جو در ایران

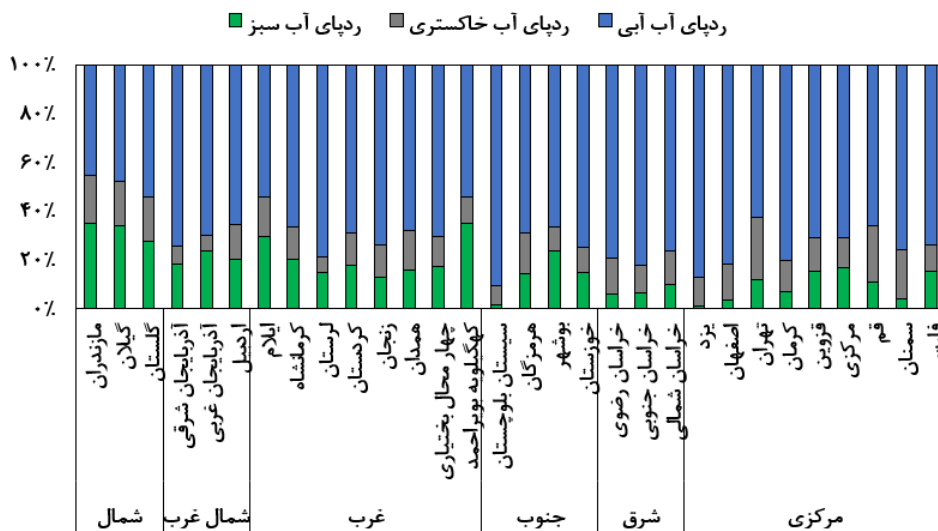
(درصد)			(میلیون متر مکعب)			استان	منطقه
آبی	خاکستری	سبز	آبی	خاکستری	سبز		
۴۵	۲۰	۳۵	۵/۵۳	۲/۴۱	۴/۳۱	مازندران	شمال
۴۸	۱۸	۳۴	۰/۱۸	۰/۰۷	۰/۱۳	گیلان	
۵۴	۱۹	۲۸	۲۵/۷۳	۸/۸۶	۱۳/۲۶	گلستان	
۷۴	۸	۱۸	۹۱/۶۰	۹/۳۳	۲۲/۸۵	آذربایجان شرقی	شمال غرب
۷۰	۷	۲۴	۴۲/۶۷	۳/۹۷	۱۴/۴۵	آذربایجان غربی	
۶۵	۱۴	۲۱	۶۶/۴۰	۱۴/۵۲	۲۱/۰۴	اردبیل	
۵۴	۱۶	۳۰	۳/۵۵	۱/۰۶	۱/۹۴	ایلام	غرب
۶۶	۱۴	۲۰	۲۸/۰۴	۵/۸۱	۸/۵۹	کرمانشاه	
۷۹	۶	۱۵	۲۷/۳۰	۲/۱۵	۵/۲۰	لرستان	
۶۹	۱۳	۱۸	۲۱/۶۹	۴/۲۶	۵/۶۷	کردستان	
۷۴	۱۳	۱۳	۵۱/۶۱	۹/۲۲	۹/۱۶	زنجان	
۶۸	۱۷	۱۶	۱۸۱/۹۲	۴۴/۷۵	۴۲/۴۷	همدان	
۷۰	۱۲	۱۷	۴۳/۸۹	۷/۷۶	۱۰/۸۹	چهار محال بختیاری	
۵۴	۱۱	۳۵	۷/۹۸	۱/۵۹	۵/۱۷	کهگیلویه بویر احمد	
۹۰	۸	۱	۵۸/۹۰	۵/۴۱	۰/۹۵	سیستان بلوچستان	
۶۹	۱۷	۱۴	۵/۱۷	۱/۲۶	۱/۰۸	هرمزگان	جنوب
۶۶	۱۰	۲۰	۴/۴۷	۰/۶۶	۱/۶۰	بوشهر	
۷۵	۱۰	۱۵	۱۱۱/۲۹	۱۵/۰۲	۲۲/۴۰	خوزستان	
۷۹	۱۵	۶	۶۰۹/۴۱	۱۱۳/۳۳	۴۶/۱۷	خراسان رضوی	شرق
۸۲	۱۱	۶	۱۲۹/۶۸	۱۷/۸۵	۱۰/۱۹	خراسان جنوبی	
۷۶	۱۴	۱۰	۹۱/۷۸	۱۶/۴۴	۱۲/۲۵	خراسان شمالی	
۸۷	۱۲	۱	۳۶/۰۵	۴/۷۹	۰/۵۲	یزد	مرکزی
۸۱	۱۵	۴	۲۷۴/۳۰	۵۰/۵۷	۱۲/۰۷	اصفهان	
۶۲	۲۶	۱۲	۱۴۰/۲۷	۵۸/۰۹	۲۶/۸۶	تهران	
۸۰	۱۳	۷	۱۴۰/۵۹	۲۲/۰۸	۱۲/۳۸	کرمان	
۷۱	۱۴	۱۵	۱۴۶/۳۶	۲۹/۰۱	۳۱/۹۲	قزوین	
۷۱	۱۲	۱۷	۱۶۷/۵۳	۲۹/۰۱	۳۹/۸۲	مرکزی	
۶۶	۲۳	۱۱	۸۰/۵۸	۲۸/۶۲	۱۳/۵۰	قم	
۷۶	۲۰	۴	۷۷/۷۴	۲۰/۴۵	۴/۲۴	سمنان	
۷۴	۱۱	۱۵	۳۲۳/۷۴	۴۷/۳۶	۶۷/۵۲	فارس	
۷۰	۱۴	۱۶	۹۹/۸۶	۱۹/۱۹	۱۵/۶۲	متوسط	
۹۰	۲۶	۳۵	۶۰۹/۴۱	۱۱۳/۳۳	۶۷/۵۲	حداکثر	
۴۵	۶	۱	۰/۱۸	۰/۰۷	۰/۱۳	حداقل	

ردپای آب سبز، استان یزد کمترین مقدار (۱ درصد) و استان‌های مازندران و کهگیلویه و بویراحمد بیشترین مقدار (۳۵ درصد) را به خود اختصاص داده‌اند. در مورد ردپای آب خاکستری، کمترین مقدار (۶ درصد) مربوط به استان لرستان و بیشترین مقدار (۲۶ درصد) به استان تهران تعلق دارد. برای ردپای آب آبی نیز، استان مازندران با ۴۵ درصد کمترین و استان سیستان و بلوچستان با ۹۰ درصد بیشترین

نتایج بررسی تغییرات مکانی اجزا ردپای آب محصول جو شامل ردپای آب آبی، سبز و خاکستری، در ایران در دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ نشان‌دهنده الگوهای متفاوت توزیع این اجزا در استان‌های مختلف کشور است (شکل ۳). به‌طور کلی، مقادیر متوسط ردپای آب سبز، خاکستری و آبی محصول جو در این بازه زمانی به‌ترتیب ۱۶، ۱۴ و ۷۰ درصد از مجموع ردپای آب در کشور بوده‌اند. درخصوص

باشد. نتایج حاصل از این بخش با پژوهش‌های (Cao et al., 2017, 2018; Dehghnpir et al., 2023; Bazrafshan et al., 2022) هم راستا است که نشان می‌دهند بالا بودن ردپای آبی می‌تواند یکی از دلایل افزایش تنش آبی در تولید محصول باشد.

مقدار را نشان می‌دهند. این نتایج نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجه در الگوهای مصرف آب محصول جو در سطح استانی است، که می‌تواند ناشی از تفاوت‌های اقلیمی، کشاورزی، صنعتی و جمعیتی در این استان‌ها باشد. درک این تفاوت‌ها می‌تواند برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی منابع آبی در سطح کشور و به‌ویژه در مقیاس استانی مفید



شکل ۳- تغییرات مکانی اجزاء ردپای آب (ردپای آب سبز، آبی و خاکستری) محصول جو در ایران طی دوره آماری ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۱

مطالعه به طور متوسط برابر با ۲۲۲/۴۳ میلی متر می‌باشد. استان‌های مرکزی، جنوبی و شرقی با توجه به سطح زیر کشت بالایی جو، دارای BWFی بالاتری هستند در حالی که استان‌های شمالی و غربی کشور از BWFی کمتری برخوردارند. بیشترین مقدار BWFی مربوط به استان یزد با ۶۸۹/۲۹ میلی متر است، در حالی که استان گیلان با ۱۰/۸۱ میلی متر کمترین مقدار BWFی را دارد.

### فقر آب

نتایج بررسی تغییرات مکانی فقر آب محصول جو در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجهی در میزان فقر آب در استان‌های مختلف کشور است (شکل ۴). مقدار متوسط فقر آب در این دوره برابر با ۵۸/۱۷ میلیون مترمکعب است. کمترین مقدار فقر آب مربوط به استان گیلان بوده است که معادل ۰/۷۴ میلیون مترمکعب بوده و بیشترین مقدار فقر آب نیز مربوط به استان خراسان شمالی با مقدار ۲۵۸/۷۷ میلیون مترمکعب است. براساس تحلیل‌های مکانی، کمترین مقدار فقر آب در تولید جو در استان‌های شمالی و شمال غربی کشور مشاهده می‌شود. این استان‌ها به دلیل سطح کشت پایین‌تر محصول جو، میزان کمتری از فقر آب را تجربه کرده‌اند. در مقابل، بیشترین مقدار فقر آب در استان‌های شرقی و مرکزی کشور ثبت شده است. این استان‌ها به‌ویژه به دلیل وسعت

نتایج تغییرات زمانی اجزاء ردپای آب محصول جو در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، بیشترین مقدار ردپای آب مربوط به ردپای آبی بوده است که به‌طور متوسط معادل ۲۹۶۵/۰۴ میلیون مترمکعب بوده و کمترین مقدار نیز به ردپای آب سبز تعلق دارد که برابر با ۴۷۶/۳۰ میلیون مترمکعب در طول دوره مذکور است. همچنین، مقدار متوسط ردپای آب خاکستری در این دوره ۵۷۲/۰۷ میلیون مترمکعب ثبت شده است. روند تغییرات اجزاء ردپای آب طی این دوره تقریباً ثابت بوده است. به‌طور دقیق‌تر، مقادیر متوسط ردپای آب سبز، آبی و خاکستری در سال ۱۳۸۷ به ترتیب معادل ۳۸۵/۶۸ میلیون مترمکعب، ۲۵۷۵/۶۷ میلیون مترمکعب و ۵۰۲/۷۶ میلیون مترمکعب بوده است. این مقادیر در سال ۱۴۰۰ به ترتیب به ۵۴۹/۸۱ میلیون مترمکعب، ۲۷۷۹ میلیون مترمکعب و ۵۷۳ میلیون مترمکعب افزایش یافته‌اند. این افزایش‌ها در مقادیر ردپای آب به‌ویژه در ردپای آبی و سبز نشان‌دهنده تغییرات نسبی در مصرف منابع آبی برای تولید محصول جو در این دوره زمانی است.

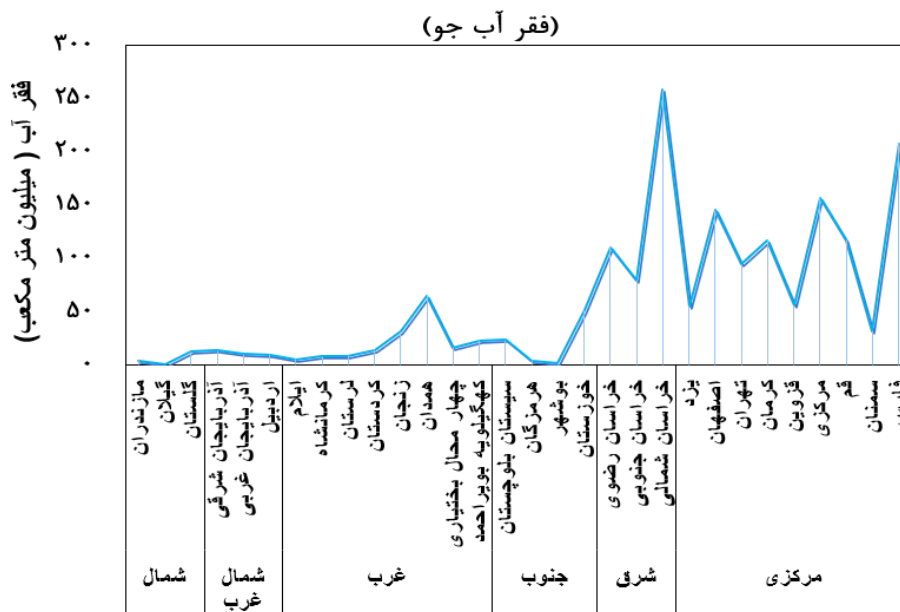
### شدت ردپای آب جو

شکل (۵) تغییرات مکانی شدت ردپای آب کشاورزی در تولید جو را نشان می‌دهد. در خصوص تولید جو، شدت BWFی در طول دوره

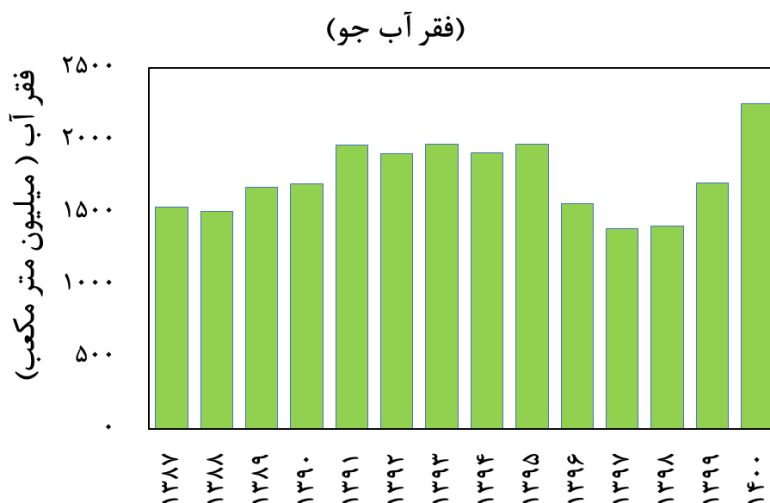


خاکستری باعث شده که مقدار شاخص BWSI پایین تر از BWS باشد و تغییرات این دو شاخص مشابه یکدیگر باشد. نتایج حاصل از این بخش با پژوهش (دهقان پیر و همکاران، ۱۴۰۱) هم‌راستا است.

BWSI در استان‌های جنوبی، مرکزی و شرق ایران به طور متوسط برابر با ۰/۶ است که نشان دهنده سطح متوسط و بالا از تنش آبی است. همچنین در شکل (۸) مقدار متوسط شاخص BWS نشان داده شده است. بالا بودن ردپای آبی نسبت به ردپای آب سبز و



شکل ۶- تغییرات مکانی فقر آب محصول جو در ایران طی دوره آماری ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۱



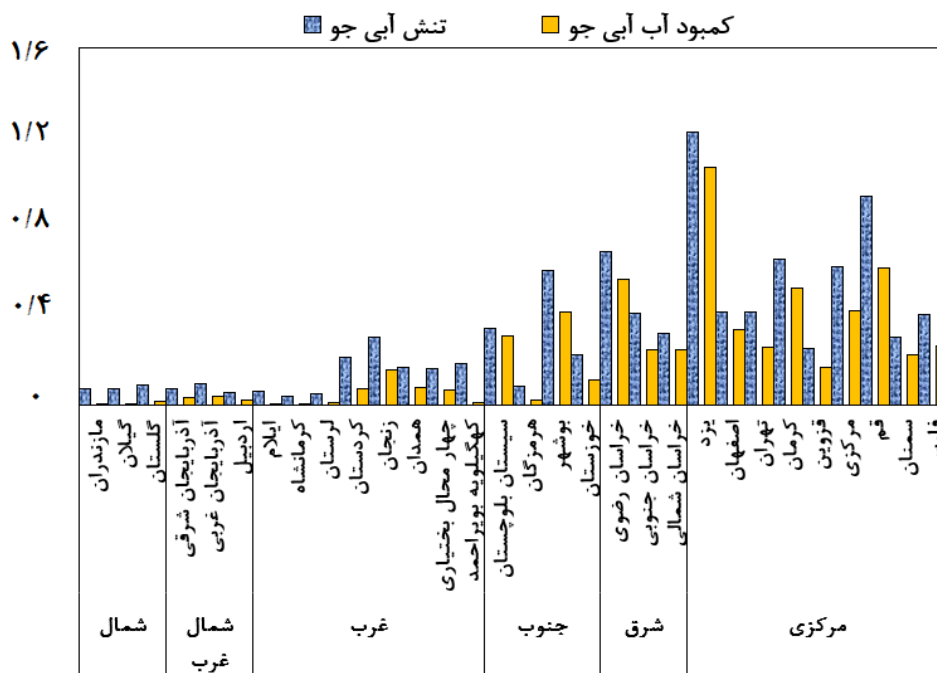
شکل ۷- تغییرات زمانی فقر آب محصول جو در ایران طی دوره آماری ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۱

نزدیک هستند که نشان دهنده تنش آبی و کمبود آبی پایین است. در این استان‌ها، استفاده از آب سبز بیشتر از آب آبی است به همین دلیل تنش آبی در سطح پایین است. در استان‌های غربی و شمال غربی، BWSI و BWS به طور کلی در سطح خیلی پایین (کمتر از

مقدار متوسط BWS برابر با ۰/۲۱ است که کمترین مقدار مربوط به استان ۰/۰۰۱ استان گیلان در شمال کشور و بیشترین مقدار ۱/۰۷ مربوط به استان یزد در مرکز کشور است. در استان‌های شمالی، مقدار BWS کمتر از ۰/۰۲ است و مقادیر BWSI و BWS بسیار به هم

معنی داری بین دو شاخص BWSI و BWS وجود دارد به طوری که کمترین مقدار BWS (۰/۱۶) مربوط به استان قزوین و بیشترین مقدار BWS ۱/۰۶ مربوط به استان یزد است در رابطه با BWSI کمترین مقدار ۰/۲۵ مربوط به استان قزوین و بیشترین مقدار مربوط به استان یزد ۱/۲۲ است. این نتایج با پژوهش‌های قبلی مانند (Cao et al., 2017, 2018) هم‌راستا است.

۰/۱ قرار دارند. که این نتیجه، به دلیل بارندگی بالا و منابع آبی فراوان در این مناطق است. در استان‌های شرق کشور (خراسان رضوی، شمالی و جنوبی) شاخص‌های BWS و BWSI بین ۰/۳ تا ۰/۸ قرار دارند که نشان‌دهنده سطح بالا از تنش آبی است. با توجه به متفاوت بودن منابع آب آبی و سبز و همچنین میزان تولید محصولات کشاورزی و مصرف آب و بارندگی در استان‌های مرکزی، تفاوت‌های

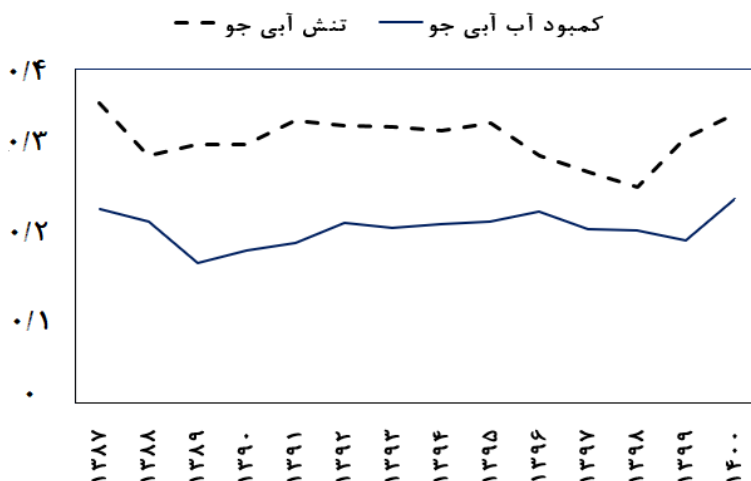


شکل ۸- مقایسه تغییرات مکانی شاخص‌های تنش آبی و کمبود آب آبی جو در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰

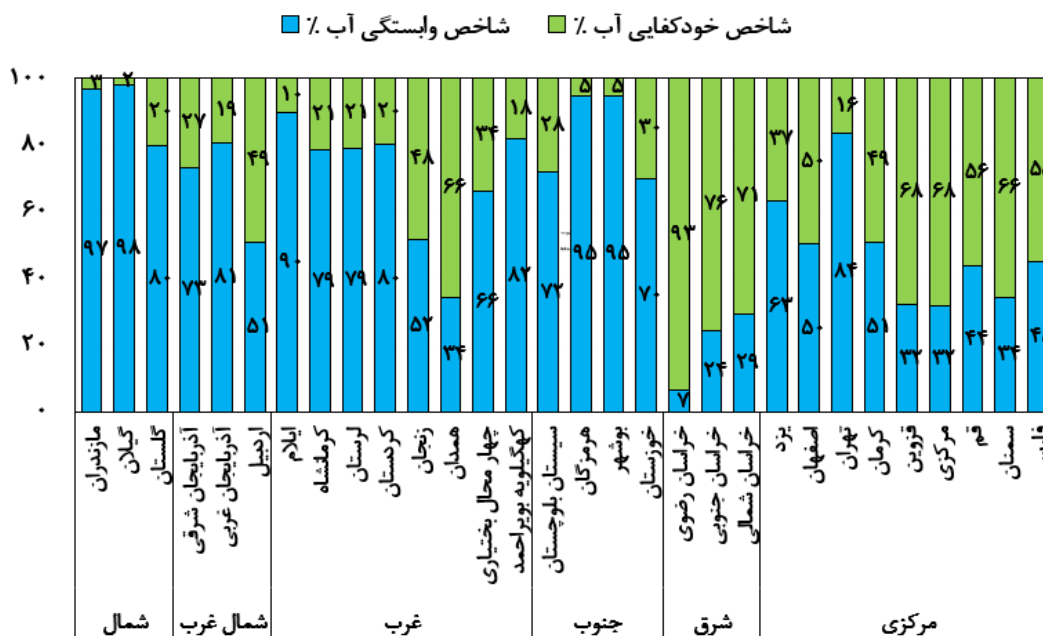
### شاخص خودکفایی و وابستگی آب

تغییرات مکانی شاخص‌های وابستگی و خودکفایی آب برای تولید جو در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ در شکل (۱۰) نشان داده شده است. نتایج بررسی‌ها حاکی از تفاوت‌های قابل توجه در توزیع این شاخص‌ها در استان‌های مختلف کشور است. به طور کلی، مقدار متوسط شاخص خودکفایی آب و وابستگی آب به ترتیب برابر با ۳۸ درصد و ۶۲ درصد است. براساس نتایج، بیشترین مقدار شاخص وابستگی آب برای جو مربوط به استان‌های گیلان و مازندران (۹۸ درصد) و کمترین مقدار مربوط به استان خراسان رضوی (۷ درصد) است. در عین حال، کمترین مقدار شاخص خودکفایی آب نیز به استان‌های گیلان و مازندران (۲ درصد) تعلق دارد و بیشترین مقدار آن در استان خراسان رضوی (۹۳ درصد) مشاهده می‌شود که با مطالعه (Bazrafshan et al 2019; Cao et al., 2017; Dehghanpir et al., 2023; Hoekstra et al., 2011) همخوانی دارد.

نتایج تغییرات زمانی تنش آبی و کمبود آب آبی جو در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ نشان‌دهنده همبستگی و روند مشابه این دو شاخص در تولید محصول جو است (شکل ۹). به طور متوسط، مقدار تنش آبی جو برابر با ۰/۳۲ و مقدار کمبود آب آبی جو معادل ۰/۲۱ به دست آمده است. اگرچه تغییرات شاخص کمبود آب آبی جو از نظر مقادیر کمتر از تنش آبی است، اما به دلیل اینکه بالاترین ردپای آب مربوط به ردپای آب آبی است، تغییرات این دو شاخص به طور قابل توجهی از یکدیگر پیروی می‌کنند. به عبارت دیگر، با افزایش یا کاهش تنش آبی، تغییرات کمبود آب آبی جو نیز به طور مشابه تغییر می‌کند. این همبستگی، اهمیت مدیریت منابع آبی را در فرآیند تولید جو بیشتر برجسته می‌کند، زیرا بالا بودن میزان ردپای آب آبی و تنش آبی در این محصول، فشار زیادی را بر منابع آبی کشور وارد می‌کند.



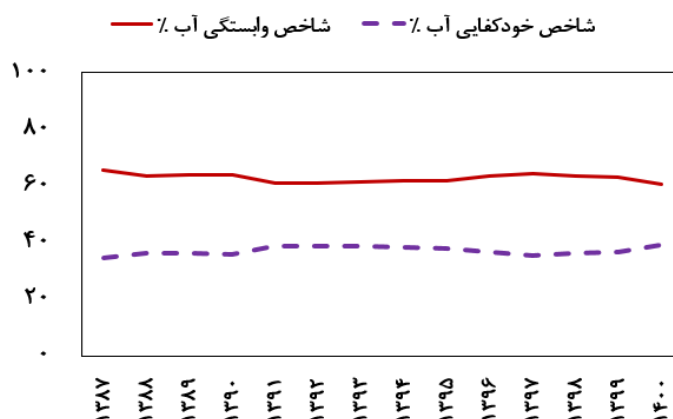
شکل ۹- تغییرات مکانی و زمانی تنش آبی و کمبود آب آبی محصول جو در ایران طی دوره آماری ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۱



شکل ۱۰- تغییرات مکانی شاخص های خودکفایی و وابستگی آب محصول جو در ایران طی دوره آماری ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۱

شاخص خودکفایی آب از ۳۵ درصد در سال ۱۳۸۷ به ۳۹ درصد در سال ۱۴۰۰ افزایش یافته است. این یافته‌ها هم‌راستا با نتایج تحقیقات گذشته مانند (Cao et al., 2017; Dehghanpir et al., 2023; Hoekstra et al., 2011) هستند که نشان دادند تغییرات در این شاخص‌ها به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأثیرات قابل توجهی بر تأمین منابع آبی دارند.

شکل (۱۱) تغییرات زمانی شاخص‌های وابستگی و خودکفایی آب در تولید جو در ایران را طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد. نتایج بررسی تغییرات زمانی این شاخص‌ها نشان‌دهنده روند نسبتاً ثابت در این شاخص‌ها است. به‌طور متوسط، مقدار شاخص خودکفایی آب برابر با ۳۷ درصد و شاخص وابستگی آب برابر با ۶۳ درصد در این دوره به دست آمده است. همچنین، شاخص وابستگی آب از ۶۵ درصد در سال ۱۳۸۷ به ۶۱ درصد در سال ۱۴۰۰ کاهش یافته، در حالی که



شکل ۱۱- تغییرات زمانی شاخص‌های خودکفایی و وابستگی آب محصول جو در ایران طی دوره آماری ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۱

## نتیجه گیری

گیرد و تغییرات این دو شاخص هم‌راستا با یکدیگر باشند. بالا بودن ردپای آب آبی تأثیر قابل توجهی بر افزایش تنش آبی در تولید جو داشته است. این امر نشان می‌دهد که تولید جو یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر منابع آبی و امنیت آبی کشور است. بنابراین، نمی‌توان مسئله کمبود آب و تنش آبی ناشی از آن را نادیده گرفت، زیرا افزایش تنش آبی و کاهش قابل توجه منابع آب آبی می‌تواند تهدیدی جدی برای امنیت غذایی، به‌ویژه در زمینه تولید محصولاتی چون جو به شمار رود و در نهایت منجر به محدودیت‌های گسترده در تولید این محصول در سطح کشور شود. نتایج همچنین نشان می‌دهد که استان‌های مرکزی که بیشترین سطح زیر کشت جو آبی را دارند، از نظر تولید این محصول خودکفا هستند و کمترین وابستگی را به منابع آبی سایر استان‌ها دارند. با توجه به این نتایج، پیشنهاد می‌شود که برای کاهش فشارهای آبی و افزایش پایداری در تولید جو، برنامه‌هایی برای بهبود بهره‌وری منابع آبی به‌ویژه آب آبی و استفاده بهینه از منابع آبی سبز و خاکستری اجرا شود. به‌کارگیری روش‌های آبیاری نوین، ارتقای تکنیک‌های کشاورزی پایدار، و افزایش آگاهی کشاورزان می‌تواند در کاهش وابستگی به منابع آبی محدود کمک شایانی کند. همچنین، بررسی و مدیریت دقیق میزان مصرف آب در هر استان و تطبیق الگوهای کشت با شرایط اقلیمی و منابع آبی موجود، از جمله گام‌های مهم در حفظ امنیت آبی و تأمین غذا برای کشور است.

### پی‌نوشت‌ها

این مقاله با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران (INSF) با شماره طرح ۴۰۲۴۵۹۰ به عنوان بخشی از انجام تعهدات دوره پسا دکتری نوشته شده است.

کمبود آب در بخش کشاورزی به عنوان یک نگرانی جدی در ایران است. با توجه به اینکه بیش از ۸۰ درصد منابع آب شیرین کشور در این بخش مصرف می‌شود، این کمبود آب نه تنها امنیت آبی کشور را تهدید می‌کند، بلکه به چالش‌های جدیدی در امنیت غذایی نیز منجر می‌شود. به‌ویژه، کمبود شدید آب باعث مشکلات عمده‌ای در توسعه تولیدات کشاورزی و گسترش کشت غلات ایجاد کرده و تهدیدی مستقیم برای امنیت غذایی به شمار می‌آید. در این مطالعه، از مفهوم ردپای آب و چندین شاخص برای ارزیابی کمبود آب ناشی از تولید جو در ایران استفاده کردیم. نتایج نشان داد که منابع آب آبی نقش حیاتی در تولید جو ایفا می‌کنند و ۷۰٪ از کل ردپای آب را تشکیل می‌دهند. براساس نتایج بدست آمده، تغییرات شاخص‌های تنش آبی، فقر آب و ردپای آب برای ارزیابی کمبود آب در تولید جو بیشتر به استفاده از منابع آب آبی وابسته است تا منابع آب سبز. از این رو، ارزیابی فقر آب همراه با شاخص‌های تنش آبی و ردپای آب می‌تواند رویکرد مناسبی برای تحلیل کمبود آب در تولید جو در سطح کشور باشد. ردپای بالای آب در استان‌های فارس، مرکزی، خراسان رضوی، کرمان، اصفهان، خراسان جنوبی، خوزستان و همدان باعث تشدید فقر آبی در تولید جو شده است. بنابراین، استان‌هایی که دارای فقر آب و تنش آبی کمتری هستند و در نتیجه ردپای آب پایین‌تری دارند، پتانسیل بیشتری برای مدیریت بهینه منابع آبی دارند و می‌توانند نقش موثرتری در بهبود وضعیت منابع آب ایفا کنند. شاخص BWSI به عنوان نسبت کل ردپای آب تولید جو به منابع آبی در دسترس برای تولید این محصول تعریف می‌شود. در محاسبه شاخص BWSI علاوه بر مصرف آب آبی، مصرف آب سبز و خاکستری نیز در نظر گرفته می‌شود. با توجه به اینکه سهم زیادی از کل ردپای آب (۷۰ درصد) به ردپای آبی اختصاص دارد، این امر باعث شده است که مقدار شاخص BWSI به شدت مشابه با تغییرات شاخص BWSI قرار

## منابع

- water footprint and total water use. *Hydrology and Earth System Sciences*. 18(8), 3165–3178.
- Chapagain, A. K. and Hoekstra, A. Y. 2008. The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. *Water International*. 33(1): 19–32. <https://doi.org/10.1080/02508060801927812>
- Cao, X., Huang, X., Huang, H., Liu, J., Guo, X., Wang, W. and She, D. 2018. Changes and driving mechanism of water footprint scarcity in crop production: A study of Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators*. 95: 444-454. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.059>
- Cao, X., Zeng, W., Wu, M., Li, T., Chen, S. and Wang, W. 2021. Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint. *Journal of Cleaner Production*. 309: 127371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127371>
- Dehghanpir, S.H., Bazrafshan, O., Ramezani Etedali, H., Holisaz, A. and Collins, B. 2023. Water scarcity assessment in Iran's agricultural sector using the water footprint concept. *Environment, Development and Sustainability*. 26(11): 28995-29020. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03852-3>
- Dehghanpir, S.H., Bazrafshan, O., Nadi, S. and Jamshidi, S. 2024. Assessing the Sustainability of Agricultural Water Use Based on Water Footprints of Wheat and Rice Production. In *Sustainability and Water Footprint: Industry-specific Assessments and Recommendations*. 57-82.
- Falkenmark, M. 1989. The massive water scarcity now threatening Africa: Why isn't it being addressed? *Journal of the Human Environment*. 18(2): 112–118.
- Fu, H., Chen, Y., Yang, X., Di, J., Xu, M. and Zhang, B. 2019. Water resource potential for large-scale sweet sorghum production as bioenergy feedstock in Northern China. *Science of The Total Environment*. 653: 758-764.
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. and Mekonnen, M. 2011. "The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard". Daugherty Water for Food Global Institute: Faculty Publications. 77.
- Hanafiah, M.M., Ghazali, N.F., Harun, S.N., Abdulaali, H.S., AbdulHasan, M.J. and Kamarudin, M.K.A. 2019. Assessing water scarcity in Malaysia: a case study of rice production. *Desalination and water Treatment*. 149:274-287.
- Hoekstra, A.Y. and Hung, P.Q. 2002. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. *Value of Water Research Report Series*. 11: 25-47.
- بوالتن کشاورزی ایران، وزارت جهاد کشاورزی. انتشارات جهاد کشاورزی. تهران. ۱۴۰۲.
- پیری، ح.، مبارکی، م. ۱۴۰۰. توزیع زمانی و مکانی ردپای آب و کارایی مصرف آب جو در مناطق مختلف ایران. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*. ۱ (۱۵): ۱۷۶ – ۱۶۴.
- دهقانپیر، ش.، بذرافشان، ا.، رضوانی اعتدالی، ه.، حلی ساز، ا. و آبابایی، ب. ۱۴۰۱. کاربرد مفهوم ردپای آب در ارزیابی کمبود آب و تنش آبی بخش کشاورزی استان هرمزگان. *مجله مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*. ۱ (۳): ۲۳۳ – ۲۴۸.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome. 300(9): D05109.
- Bazrafshan, O., Zamani, H., Etedali, H. and Dehghanpir, S.H. 2019. Assessment of citrus water footprint components and impact of climatic and nonclimatic factors on them. *Scientia Horticulturae*. 250: 344–351.
- Bijanazadeh, E., Tarazkar, M.H. and Emam, Y. 2021. Water productivity and virtual water of barley cultivars under different irrigation regimes. *Journal of Agricultural Science and Technology*. 23(3): 603-616.
- Bazrafshan, O. and Dehghanpir, S.H. 2020. Application of water footprint, virtual water trade and water footprint economic value of citrus fruit productions in Hormozgan Province, Iran. *Sustainable Water Resources Management*. 6(6): 1–10.
- Bazrafshan, O., Yahyazadeh, M., Jamshidi, S. and Zamani, H. 2022. Spatial prioritization of tomato cultivation based on water footprint, land productivity, and economic indices. *Irrigation and Drainage*, 71(5), 1363–1378.
- Behnassi, M., Al-Shaikh, A. A., Gurib-Fakim, A., Baig, M. B. and Bahir, M. 2024. *The Water, Climate, and Food Nexus: Linkages, Challenges and Emerging Solutions—An Introduction*. 1–16.
- Cao, X., Wu, M., Guo, X., Zheng, Y., Gong, Y., Wu, N. and Wang, 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.191>
- Cao, X. C., Wu, P. T., Wang, Y. B. and Zhao, X. N. 2014. Assessing blue and green water utilization in wheat production of China from the perspectives of

- 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.
- Ramezani Etedali, H., Ahmadaali, K., Gorgin, F. and Ababaei, B. 2019. Optimization of the cropping pattern of main cereals and improving water productivity: application of the water footprint concept. *Irrigation and Drainage*. 68(4): 765-777.
- Raskin, P., Gleick, P., Kirshen, P., Pontius, G. and Strzepek, K. 1997. Water futures: Assessment of long-range patterns and problems. In *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world* (p. 83). Stockholm Environment Institute (SEI).
- Salameh, E. 2000. Redefining the water poverty index. *Water International*.25: 469–473.
- Vallino, E., L. Ridolfi. and F. Laio. 2020. Measuring economic water scarcity in agriculture: a cross country empirical investigation. *Environmental Science and Policy*. 114: 73-85.
- Vanham, D., Medarac, H., Schyns, J. F., Hogeboom, R. J. and Magagna, D. (2019). The consumptive water footprint of the European Union energy sector, 1748–9326.
- Zhao, X., Ke, Y., Zuo, J., Xiong, W. and Wu, P. 2020. Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019. *Journal of Cleaner Production*. 256:120404
- Zhai, Y., Shen, X., Quan, T., Ma, X., Zhang, R., Ji, C. and Hong, J. 2019. Impact-oriented water footprint assessment of wheat production in China. *Science of the Total Environment*. 689: 90-98.
- Hoekstra, A. Y. and Hung, P. Q. 2005. Globalisation of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade. *Global Environmental Change*. 15(1): 45–56.
- Hoekstra, A.Y. and Mekonnen, M.M. 2012. The water footprint of humanity. *Proceedings of the national academy of sciences*. 109(9): 3232-3237.
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kumm, M., Flörke, M., Pfister, S. and Oki, T. 2017. Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future*. 5(6): 545–559.
- Liu, W., Liu, X., Yang, H., Ciais, P. and Wada, Y. 2022. Global water scarcity assessment incorporating green water in crop production. *Water Resources Research*. 58(1).
- Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. 2020. Sustainability of the blue water footprint of crops. *Advances in Water Resources*. 143, 103679.
- Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A. Y. 2016. Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*. 2(2): e1500323.
- Morillo, J. G., Diaz, J. A. R., Camacho, E. and Montesinos, P. 2015. Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production*. 87: 594–602.
- Madani, K. 2016. Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of environmental studies and sciences*. 4:315-328.
- Ma, X., Liu, C., Niu, Y. and Zhang, Y. 2024. Spatio-temporal pattern and prediction of agricultural blue and green water footprint scarcity index in the lower reaches of the Yellow River Basin. *Journal of Cleaner Production*. 437: 140691.

## Analysis of Water Resource Sustainability in Barley Production in Iran

S. Dehghanpir<sup>1</sup>, O. Bazrafshan<sup>2\*</sup>

Received: Mar.08, 2025

Accepted: Apr.18, 2025

### Abstract

Barley is one of the most important and resilient cereals in the arid and semi-arid regions of the Middle East, including Iran, which faces challenges of water scarcity and limited rainfall. Under these conditions, access to sufficient water resources for irrigation is a major challenge in the production of this crop in Iran. This study examines water scarcity in barley production in Iran during the period from 2008 to 2021. The results indicate that the green, gray, and blue water footprints account for 16%, 14%, and 70% of the total water footprint in barley production, respectively. Variations in water stress for barley in the western, northwestern, and northern provinces of Iran are generally less than 0.3, indicating low water stress. In contrast, in the southern, central, and eastern provinces of Iran, the average of this index is around 0.5, indicating moderate to high water stress. The range of the barley water stress index varies from 0.03 in the west (Kermanshah) to 1.22 in Yazd Province. The average water poverty value during this period was 58.17 million cubic meters, with the lowest water poverty recorded in Gilan Province (0.74 million cubic meters) and the highest in North Khorasan Province (258.77 million cubic meters). Additionally, the average values of the water self-sufficiency and dependency indices were 38% and 62%, respectively. This research can contribute to improving water resource management and enhancing the sustainability of barley production in Iran.

**Keywords:** Water stress, Barley, Water resources, Water footprint, Water poverty, Water scarcity

---

1- PhD Graduate in Watershed Management and Postdoctoral Researcher at the University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

2- Professor at the Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural Science and Natural Resources, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran

(\*- Corresponding Author Email: O.bazrafshan@hormozgan.ac.ir)