

## ارزیابی کمبود آب در تولید گندم در ایران

شهلا دهقان پیر<sup>۱</sup>، ام‌البین بذرافشان<sup>۲\*</sup>، هادی رضانی اعتدالی<sup>۳</sup>، ارشک حلی‌ساز<sup>۴</sup>، بهنام آبابایی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان

۲. دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان

۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(ره)</sup>، قزوین

۴. استادیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

۵. دکتری علوم و مهندسی آب، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه جیمز کوک، تاونزویل، استرالیا

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۴/۲۰؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۵/۲۸ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۹/۲۸)

### چکیده

کشاورزی بیشترین سهم از کل مصرف آب در سراسر جهان را به خود اختصاص داده است. در بین غلات مصرف و تقاضای زیاد گندم در سراسر جهان، آن را به یک محصول استراتژیک تبدیل کرده است. به دلیل زیاد بودن سطح زیر کشت آن در دنیا، میزان آب مصرف‌شده برای تولید گندم به طور قابل ملاحظه‌ای می‌تواند روی کل آب مصرف‌شده در بخش کشاورزی تأثیر بگذارد و تهدیدی جدی برای دسترسی به منابع آب باشد. این مطالعه با هدف ارزیابی کمبود آب در تولید گندم در ایران با تأکید بر چارچوب ردپای آب در سطح کشور طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ صورت گرفته است. نتایج حاصل از مطالعه حاضر نشان داد سهم ردپای آب آبی، سبز و خاکستری به ترتیب ۷۱/۷۶، ۱۵/۸۷ و ۱۳/۱۱ درصد از کل ردپای آب در تولید محصول گندم فاریاب و ۵۵ و ۳۸/۳۴ درصد سهم ردپای آب سبز و خاکستری در گندم دیم در ایران را تشکیل می‌دهد. همچنین، نتایج نشان داد میانگین شاخص تنش آبی تولید گندم در سطح کشور ۰/۶ است که محدوده تغییرات مکانی این شاخص از ۰/۱ در گیلان تا ۳/۰۱ در اردبیل در شمال کشور متغیر است. بیشترین میزان شاخص خودکفایی آب (کمترین شاخص وابستگی) مربوط به استان خراسان شمالی، خوزستان و فارس با مقدار متوسط ۷۰ درصد و کمترین میزان شاخص خودکفایی مربوط به استان گیلان (۲ درصد)، مازندران ۹ و تهران ۱۶ درصد (بیشترین شاخص وابستگی) است. مطالعه حاضر برای تصمیم‌گیری در مورد مدیریت پایدار منابع آب برای تولید گندم در ایران بسیار راه‌گشاست.

**کلمات کلیدی:** شاخص تنش آبی، گندم، فقر آب، ردپای آب، کمبود آب.

## ۱. مقدمه

افزایش تقاضا برای غذا موجب افزایش مصرف و رقابت برای دستیابی به آب شیرین شده است. این تقاضا همچنین منجر به افزایش نگرانی در رابطه با کمبود آب و کاهش کیفیت آب به دلیل شیوه‌های نادرست کشاورزی شده است [۱]. کمبود آب یکی از مشکلات بزرگ پیش روی بسیاری از جوامع در سراسر جهان است. به منظور کاهش کمبود منابع آب، مفهوم ردپای آب برای تعیین کمیت منابع آبی مورد استفاده پیشنهاد شد. مفهوم ردپای آب برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط اوکسترا و هانگ [۲] ارائه شده و در بسیاری از مطالعات در زمینه مدیریت منابع آب شیرین مورد استفاده قرار گرفته است. ردپای آب معیاری از میزان مصرف منابع آب شیرین است که نه تنها مصرف مستقیم آب توسط یک تولیدکننده یا مصرف‌کننده را شامل می‌شود، بلکه مصرف غیر مستقیم آب را هم شامل می‌شود. ردپای آب مربوط به یک محصول، حجم آب شیرینی است که برای تولید آن محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد و در کل زنجیره تولید آن محصول محاسبه می‌شود. ردپای آب شامل سه جزء (ردپای آب آبی، سبز و خاکستری) است [۳]. ردپای آب آبی به مصرف منابع آب آبی (آب سطحی و زیرزمینی) طی فرایند تأمین یک محصول اشاره دارد. ردپای آب سبز به مصرف منابع آب سبز (آب باران) اشاره دارد. ردپای آب خاکستری به حجم آب شیرین مورد نیاز برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها اشاره دارد. با توجه به اینکه تعادل بین تقاضای آب و در دسترس بودن منابع آب در بسیاری از مناطق جهان به حد بحرانی رسیده و تقاضا برای تولید آب و مواد غذایی افزایش یافته [۲]، ارائه نوعی رویکرد پایدار برای مدیریت منابع آب در بخش کشاورزی ضروری است. مفهوم مدیریت پایدار منابع آب به روش‌های اشاره دارد که سبب بهبود عملکرد محصول و به حداقل رساندن تلفات غیر مفید آب می‌شوند [۴]. بنابراین، ردپای آب می‌تواند دیدگاه بهتر و جامع‌تری از چگونگی ارتباط بین یک مصرف‌کننده یا تولیدکننده با مصرف منابع آب شیرین ارائه کند. ردپای آب به عنوان یک شاخص مناسب برای بررسی منابع آب شیرین مورد استفاده و همچنین، آگاهی بیشتر برای استفاده پایدار از منابع آبی است. در رابطه با استفاده از این شاخص برای ارزیابی کمبود آب مطالعات زیادی مانند اوکسترا و هانگ [۵]، اوکسترا و چاپاگین [۶]، چاپاگین و همکاران [۷]، کائو و همکاران [۸]، ژای و همکاران [۹]، ژانگ و همکاران

[۱۰] انجام شده است. در ایران نیز می‌توان به مطالعات بذرافشان و همکاران [۱۱]، آبابایی و رضایی اعتدالی [۱۲]، بذرافشان و همکاران [۱۳] اشاره کرد. علاوه بر ردپای آب، یکی دیگر از شاخص‌هایی که در مطالعات مربوط به کمبود آب به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته، شاخص تنش آبی است. این شاخص اولین بار در سال ۱۹۸۹ توسط فالکنمارک مطرح شد که برابر با نسبت مقدار آب مصرفی برای تولید محصول به منابع آب موجود است. طبقه‌بندی این شاخص در جدول ۳ نشان داده شده است که با توجه به آن، یک منطقه می‌تواند از نظر تنش آبی در ۵ سطح شامل: بدون تنش آبی، تنش آبی کم، تنش آبی متوسط، تنش آبی بالا و تنش آبی بسیار بالا قرار گیرد [۱۴] در کنار شاخص تنش آبی، شاخص فقر آب هم می‌تواند وضعیت منابع آب و در دسترس بودن آن‌ها را در یک منطقه نشان دهد [۱۵]. محققان زیادی مانند لیو و همکاران [۱۶]، اوکسترا و همکاران [۱۷]، کائو و همکاران [۱۸ و ۱۹] کوشیده‌اند تا با استفاده از شاخص تنش آبی به مطالعه و بررسی وضعیت منابع آبی بپردازند.

کشور ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود و خشکسالی‌های مداوم باعث بروز مشکل کم آبی در بیشتر مناطق کشور شده است [۲۰]. مصرف و تقاضای زیاد گندم در سراسر جهان، آن را به یک محصول استراتژیک تبدیل کرده و یکی از محصولات مهم کشاورزی در ایران است [۲۱]. به طور متوسط از ۱۱ میلیون هکتار سطح محصولات برداشت‌شده سالانه در ایران، حدود ۶۶/۵۹ درصد به غلات اختصاص داشته است [۲۲]. محصول گندم با ۴۹/۴۶ درصد عمده‌ترین محصول کشور [۲۲] و همچنین، عمده‌ترین محصول واردشده به کشور است. گندم به عنوان یک محصول استراتژیک، نقش بسیار مهمی در امنیت غذایی کشور دارد. این نکته باعث شده است کشت سایر محصولات زراعی تحت تأثیر قرار گیرد. بنابراین، رقابت بین این محصول با سایر محصولات کشاورزی در بیشتر دشت‌های کشور به همراه تغییرات اقلیمی سال‌های اخیر، الگوی کشت بیشتر مناطق کشور را تحت تأثیر قرار داده است. در این شرایط نه تنها تغییر در الگوی کشت به‌تنهایی باعث عدم پایداری بخش کشاورزی شده، بلکه بحران‌های شدیدی در تأمین آب مصرفی محصولات و عدم پایداری منابع آب را به دنبال داشته است [۲۳] با توجه به اینکه گندم یکی از محصولات مهم استراتژیک در کشور ایران محسوب می‌شود و سطح زیر کشت قابل توجهی را به خود

گندم است. گندم به عنوان غله‌ای سازگار و مهم در کشاورزی، در ۳۲ استان از کشور کشت و کار می‌شود و وجود شرایط آب‌وهوایی سبب شده که در غالب استان‌های کشور، بیشترین سطح محصولات کشاورزی را به خود اختصاص دهد. در ایران گندم محصول عمده زراعی است که در شرایط آبی و دیم کشت می‌شود. سطح زیر کشت گندم در کشور حدود ۶/۲ میلیون هکتار است که بیش از ۵۰ درصد زراعت کشور را به خود اختصاص می‌دهد، گندم آبی با حدود ۲/۲ میلیون هکتار حدود ۳۵ درصد و سطح گندم دیم ۴ میلیون هکتار حدود ۶۵ درصد زراعت گندم کشور را تشکیل می‌دهد [۲۲]. اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت، تولید و عملکرد گندم در دو حالت آبی و دیم طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ در جدول ۱ نشان داده شده است.

اختصاص داده است، عملکردی پایین و نیاز آبی بسیار زیاد دارد و پایین بودن سطح عملکرد، موجب بالا رفتن ردپای آب گندم و اتلاف منابع آب شده است. بنابراین، کاهش تنش آب و مقابله با کمبود منابع آب ناشی از تولید گندم، یک اقدام مهم برای توسعه استفاده پایدار از منابع آبی است. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد، تا کنون تحقیقی که به بررسی شاخص تنش آبی ناشی از کشت گندم که با هدف ارزیابی کمبود آب صورت بگیرد، دیده نشده است. بنابراین، هدف از این تحقیق، برآورد تغییرات زمانی و مکانی ردپای آب در مقیاس ملی و استانی، برآورد تنش آبی در بخش کشاورزی و محاسبه فقر و خودکفایی آب در تولید گندم در ایران است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. منطقه مطالعه شده

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق استان‌های تولیدکننده

جدول ۱. متوسط سطح زیر کشت، تولید و عملکرد کشت آبی و دیم گندم در کشور ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ [۲۲]

مناطق	استان	گندم آبی		گندم دیم	
		مساحت هزار هکتار	تولید هزار تن	مساحت هزار هکتار	تولید هزار تن
شمال	مازندران	۱۷۱/۰۹	۶۴/۰۶	۳۷/۹۹	۷۶/۰۹
	گیلان	۰/۰۸۴	۰/۱۵	۱۰/۱۱	۱۰/۹۲
	گلستان	۱۵۰/۳۳	۴۹۴/۶۹	۲۰۵/۴۹	۴۴۰/۵۳
	اردبیل	۷۸/۳۳	۲۹۱/۳۸	۲۳۷/۷۹	۲۶۰/۱۹
غرب	آذربایجان شرقی	۸۴/۹۹	۲۶۲/۷۲	۳۲۸/۱۳	۲۹۶/۱۴
	آذربایجان غربی	۹۶/۲۸	۲۹۰/۷۰	۲۶۹/۶۹	۲۶۴/۰۶
	ایلام	۴۸/۶۹	۱۵۰/۵۸	۷۴/۴۷	۶۹/۱۵
	کرمانشاه	۹۱/۵۰	۳۷۸/۸۵	۳۰۰/۴۸	۳۳۰/۹۷
	لرستان	۵۹/۶۲	۱۸۵۵/۳۲	۲۰۴/۹۸	۲۲۲/۱۳
	کردستان	۳۶/۴۲	۱۸۵/۵۴	۵۱۶/۷۱	۵۴۶/۷۲
	زنجان	۲۱/۵۹	۸۱/۴۱	۳۲۶/۴۳	۲۷۴/۶۷
	همدان	۸۳/۵۰	۳۱۹/۲۸	۳۰۳/۶۸	۲۶۷/۶۵
	چهارمحال بختیاری	۲۶/۲۹	۷۵/۳۰	۳۷/۷۱	۳۴/۱۴
	کهگیلویه و بویر احمد	۲۲/۹۲	۵۹/۷۱	۲/۵۸	۵۲/۸۶
جنوب	سیستان و بلوچستان	۶۴/۹۳	۱۲۵/۸۶	۱/۷۰	۱/۰۱
	بوشهر	۱۷/۵۶	۴۲/۲۷	۷۳/۴۳	۳۰/۰۲
	هرمزگان	۱۲/۶۵	۴۷/۶۸	۳/۷۷	.
	خوزستان	۴۱۲/۸۳	۱۲۵۳/۲۴	۳/۱۲	۹۵/۴۰
شرق	خراسان شمالی	۴۹/۹۹	۱۳۹/۰۴	۹۹/۱۰	۷۹/۷۰
	خراسان رضوی	۱۹۹/۵۳	۵۷۶/۹۱	۱۵۵/۶۱	۸۰/۴۳
	خراسان جنوبی	۲۵/۶۰	۶۰/۲۹	۷/۷۶	۲/۴۶
مرکزی	یزد	۱۸/۲۳	۵۳/۰۳	۳/۳۱	.
	اصفهان	۲۳۰/۸۷	۲۳۰/۶۰	۳/۷۱	۱۲/۶۳
	تهران	۴۲/۰۳	۲۲۰/۳۴	۴/۷۵	۱/۰۳
	کرمان	۴۹/۵۴	۱۶۰/۳۸	۳/۴۱	۰/۱۹
	قزوین	۵۵/۳۵	۲۰۴/۱۴	۳/۷۴	۷۱/۹۶
	مرکزی	۶۲/۸۵	۲۱۸/۲۹	۳/۵۴	۱۴۲/۴۹
	قم	۷۸/۸	۲۹/۴۹	۳/۶۳	۰/۹۸
	سمنان	۲۸/۵۰	۹۱/۹۲	۳/۳۵	۹/۸۰
	فارس	۲۹۱/۵۹	۱۰۶۱/۰۷	۳/۷۵	۶۸/۴۱

جدول ۲. متوسط وضعیت منابع آب مصرفی در تولید گندم در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ - ۱۳۹۸ [۲۲]

مناطق	بارش (میلی متر)	کل منابع آب کشور (گیگا متر مکعب)	مساحت زراعی (هزار هکتار)	سرانه منابع آب (متر مکعب)	مساحت اراضی قابل کشت (هزار هکتار)	سرانه تولید (تن)
شمال	۷۰۲/۱۱	۳۹۴/۹۱	۴۲۱/۳۲	۳۴۸۶/۷۶	۳۹۰	۰/۱۸
غرب	۳۹۹/۲۷	۹۳۲/۱۶	۲۲۴۹/۹۷	۵۳۷۴/۰۶	۱۰۴۶/۶	۰/۲۹
شرق	۱۹۵/۱۹	۲۳۲/۴۰	۵۳۶/۲۸	۳۰۸۹/۸۲	۳۹۴	۰/۱۵
جنوب	۲۰۷/۸۹	۴۱۸/۶۴	۶۷۶/۵	۲۵۰۵/۷۲	۵۳۰	۰/۱۰
مرکزی	۲۷۱/۳۹	۷۱۱/۱۱	۹۹۴/۵۹	۲۶۱۱/۸۶	۸۴۹	۰/۱۱

## ۲.۲. منابع آب در ایران

به طور کلی، منابع آب در ایران شامل منابع آب سطحی و زیرزمینی است که جدول ۲ اطلاعات کلی از وضعیت منابع آب مصرفی در تولید گندم را به طور متوسط در ایران طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد.

## ۳.۲. ارزیابی ردپای آب

ارزیابی ردپای آب بر اساس روش توصیف‌شده توسط اوکسترا و همکاران [۵] انجام می‌شود. محققان نامبرده در سال ۲۰۱۱ روش‌های محاسباتی استاندارد ردپای آبی، سبز و خاکستری را در سیستم تولید محصول ارائه دادند.

در روابط ۱-۳،  $WF_{Green}$ ،  $WF_{Blue}$  و  $WF_{Grey}$  بر حسب متر مکعب در هر تن است [۷].  $P_e$  مجموع بارندگی مؤثر طی دوره رشد گیاه به میلی‌متر،  $ET_c$  تبخیر و تعرق هر گیاه به میلی‌متر،  $Y$  عملکرد هر محصول به تن در هکتار،  $a$  درصد تلفات کودهای نیتروژن،  $NAR$  نرخ مصرف کود برای هر گیاه به کیلوگرم در هکتار،  $C_{Max}$  غلظت بحرانی نیتروژن به کیلوگرم در متر مکعب،  $C_{Nat}$  غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت‌کننده به کیلوگرم در متر مکعب هستند [۷] در این مطالعه  $WF_{Grey}$  تنها برای کود نیتروژن به کار گرفته می‌شود. حداکثر غلظت نیتروژن در منابع آب دریافت‌کننده براساس استاندارد US-EPT برابر با ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر است و چون اطلاعات دقیقی از غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت‌کننده در دست نیست، این مقدار برابر صفر در نظر گرفته می‌شود [۷]

$$WF_{blue} = \frac{(ET_c - P_e) * 10}{Y} \quad (۱)$$

$$WF_{Green} = \frac{P_e * 10}{Y} \quad (۲)$$

$$WF_{Grey} = \frac{a * NAR}{C_{MAX} - C_{NAT}} * \frac{1}{Y} \quad (۳)$$

تبخیر و تعرق گیاه  $ET_c$  بر حسب  $(mm \ day^{-1})$  طی دوره رشد محصول محاسبه شده است. تبخیر و تعرق گیاه  $ET_c$  از حاصل ضرب تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه (مرجع) در ضریب گیاهی  $k_c$  به دست می‌آید (رابطه ۴):

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad (۴)$$

تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روش FAO-Penman Monteith ارائه‌شده توسط آلن در سال ۱۹۹۸ محاسبه می‌شود [۲۴]

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (۵)$$

که در آن  $ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع،  $K_c$  ضریب محصول،  $(mm \ day^{-1})$   $R_n$  تابش خالص بر سطح گیاه،  $T$ ،  $(MJ \ M^{-2} \ d^{-1})$  جریان گرمای خاک،  $G$ ،  $(MJ \ M^{-2} \ d^{-1})$  میانگین دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد،  $U_2$  سرعت باد اندازه‌گیری‌شده در ارتفاع ۲ متر  $s^{-1}$ ،  $e_a$  فشار بخار اشباع،  $kPa$ ،  $e_s$  فشار بخار واقعی،  $kPa$ ،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار  $kPa \ C^{-1}$  و  $\gamma$  ثابت پیزومتریک  $kPa \ C^{-1}$ .

ردپای آب کشاورزی منطقه‌ای (AWF) برابر با مجموع ردپای آب برای همه انواع محصولات زراعی در متر مکعب است و به صورت زیر محاسبه می‌شود که در آن  $i$  تعداد محصول است، CWF مجموع ردپای آب برای همه انواع محصولات و  $G_i$  میزان تولید محصول را بر حسب تن نشان می‌دهند. CWF منطقه‌ای به عنوان مجموع ردپای آب برای همه انواع محصولات به شرح زیر محاسبه می‌شود (روابط ۶ و ۷):

باران ( $AWR_{green}$ ) به صورت روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$AWR = AWR_{blue} + AWR_{green} \quad (10)$$

$$AWR_{blue} = AWR * \frac{AWU}{WU} \quad (11)$$

که در آن  $AWR$  کل منابع آب در دسترس منطقه‌ای بر حسب متر مکعب است.  $AWU$  و  $WU$  به ترتیب نشان‌دهنده منابع آب مصرفی در بخش کشاورزی و کل منابع آب مصرف‌شده منطقه‌ای هستند.  $AWR_{green}$  به میزان بارش مؤثر سالانه اشاره دارد و به صورت روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه می‌شود. که در آن  $A$  مساحت اراضی قابل کشت بر حسب متر مربع و  $P_e$  بارش مؤثر سالانه بر حسب میلی‌متر است که با استفاده از روش ارائه‌شده توسط United States Department محاسبه می‌شود [۱۸ و ۲۵]:

$$AWR_{green} = 10 * A * P_e \quad (12)$$

$$P_e = \begin{cases} P * \left( \frac{4.17 - 0.02 * P}{4.17} \right), & P < 83 \\ (41.7 + 0.1 * P), & P \geq 83 \end{cases} \quad (13)$$

سطح کمبود آب کشاورزی و تنش آبی گندم منطقه‌ای به پنج گروه تقسیم می‌شود: بدون تنش آبی، تنش آبی کم، تنش آبی متوسط، تنش آبی زیاد و تنش آبی بسیار زیاد که در جدول ۳ این نوع طبقه‌بندی نشان داده شده است.

جدول ۳. طبقه‌بندی شاخص تنش آبی [۱۸ و ۲۶]

WWSI	WSI	دسته‌بندی
۰ - ۰/۱۵	۰ - ۰/۱۵	بدون تنش آبی
۰/۱۶ - ۰/۳	۰/۱۶ - ۰/۳	تنش آبی پایین
۰/۳۱ - ۰/۶	۰/۳۱ - ۰/۶	تنش آبی متوسط
۰/۶۱ - ۱/۲	۰/۶۱ - ۰/۸	تنش آبی بالا
۱/۲۱ - ۱/۹	۰/۸۱ - ۰/۹	تنش آبی بسیار بالا
> ۱/۹	۰/۹۱	تنش آبی بحرانی

$$AWF = \sum_{i=1}^n (CWF_i * G_i) \quad (6)$$

$$CWF = WF_{blue} + WF_{green} + WF_{grey} \quad (7)$$

#### ۴.۲. شاخص تنش آبی

روش شناخته‌شده برای محاسبه WSI نسبت برداشت یا مصرف آب به مقدار منابع آب موجود است [۱۸ و ۲۵] که در آن  $WU$  و  $AWR$  به ترتیب نشان‌دهنده مصرف آب و منابع آب موجود بر حسب متر مکعب هستند (رابطه ۸).

$$WSI = \frac{WU}{AWR} \quad (8)$$

#### ۵.۲. شاخص تنش آبی گندم

WWSI در یک منطقه به عنوان نسبت کل  $AWF$  به  $AWR$  طی یک دوره معین تعریف می‌شود. بنابراین، WWSI برای سیستم تولید محصول گندم که بر اساس چارچوب منابع آبی و سبز و ردپای آب است به صورت رابطه ۹ محاسبه می‌شود، که در آن  $AWF$  ردپای آب گندم و  $AWR$  منابع آبی در دسترس در یک منطقه است.

$$WWSI = \frac{AWF}{AWR} \quad (9)$$

$AWR$  شامل منابع آب آبی یا به اصطلاح در دسترس بودن منابع آب سطحی و زیرزمینی است. ( $AWR_{blue}$ ) و منابع آب سبز یا به اصطلاح در دسترس بودن منابع آب

## ۲.۶. ارزیابی فقر آب

فقر آب در بخش کشاورزی عبارت است از: حاصل ضرب کل ردپای آب در بخش کشاورزی AWF در شاخص تنش آب در تولید گندم WWSI (معادله ۱۴).

$$\text{Water Deprivation} = \text{AWF} * \text{WWSI} \quad (14)$$

## ۳. نتایج

## ۳.۱. ردپای آب محصول گندم در ایران

متوسط حجم اجزای ردپای آب در تولید گندم آبی و دیم ایران در جدول ۴ طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ نشان داده شده است. کل حجم ردپای آب در ایران  $23327/6$  میلیون متر مکعب آن مربوط به آب آبی،  $5731/82$  میلیون متر مکعب مربوط به آب سبز و  $4802/37$  میلیون متر مکعب مربوط به آب خاکستری است. طی 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 سبز و آب خاکستری هستند. نتایج نشان می‌دهد در بین استان‌های مورد مطالعه بیشترین مقدار ردپای آب آبی مربوط به استان‌های خوزستان، فارس و خراسان رضوی با مقدار  $1922/4$ ،  $1875/67$  و  $1464/92$  میلیون متر مکعب (بیشترین تولیدات کشاورزی در جنوب، مرکز و شرق ایران) و کمترین آن مربوط به استان گیلان با مقدار  $0/21$  (کمترین تولید در شمال ایران) است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد استان‌های خوزستان و گیلان با مقدار  $654/59$  و  $9/09$  به ترتیب بیشترین و کمترین میزان ردپای آب خاکستری را به خود اختصاص داده‌اند. در رابطه با ردپای آب سبز بیشترین میزان آن طی دوره آماری مورد مطالعه مربوط به استان کردستان  $715/6$  میلیون متر مکعب (شمال ایران) و کمترین آن مربوط به استان یزد  $2/38$  میلیون متر مکعب (مرکز ایران) است.

شکل ۱ تغییرات سهم هر یک از اجزای ردپای آب را در کشت آبی گندم طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ در

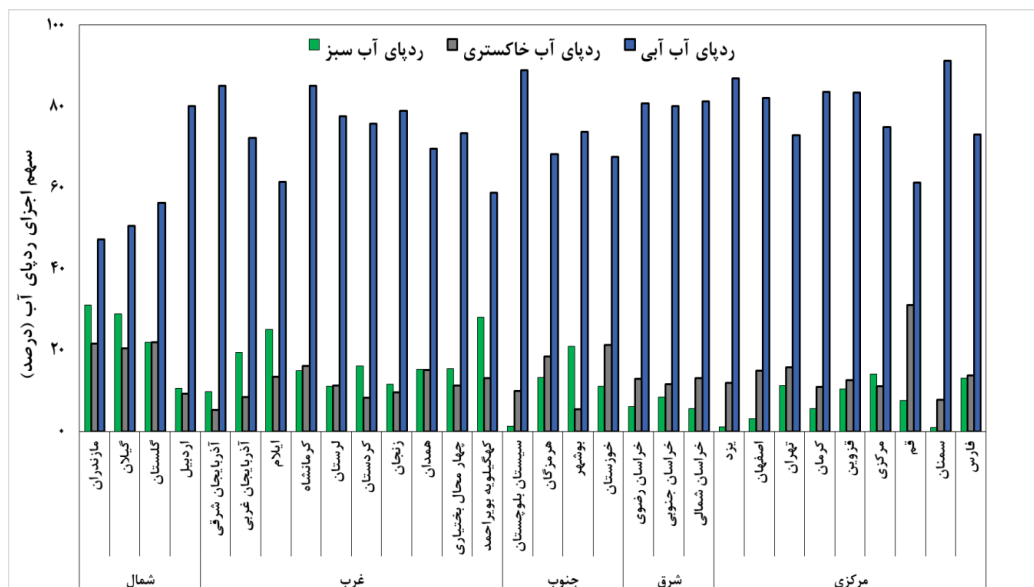
مقیاس استانی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱ در کشت آبی گندم بیشترین میزان ردپای آب متعلق به ردپای آب آبی با متوسط  $73/50$  درصد است. با توجه به شکل ۱ در کشت آبی گندم منابع آب آبی (سطحی و زیرزمینی) بیشتر از منابع آب سبز (بارش مؤثر) مورد استفاده قرار می‌گیرند. ردپای سبز و خاکستری به ترتیب ۱۳ و ۱۴ درصد از کل ردپای آب در حالت کشت آبی را تشکیل می‌دهند.

تغییرات اجزای ردپای آب (ردپای آب سبز و ردپای آب خاکستری) در کشت دیم گندم طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ در هر یک از استان‌های مورد مطالعه به صورت شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل یادشده در مناطق شمال و غرب کشور میزان ردپای آب سبز بیشتر از ردپای آب خاکستری است. در حالی که در استان‌های جنوبی، مرکزی و شرق به طور متوسط ردپای آب خاکستری بیشتر از ردپای آب سبز است. به طور کلی، در کشت دیم بیشترین میزان ردپای آب به طور متوسط با مقدار ۵۵ درصد مربوط به ردپای آب سبز و ردپای آب خاکستری هم در سطح کشور دارای سهم متوسط  $38/34$  درصد است.

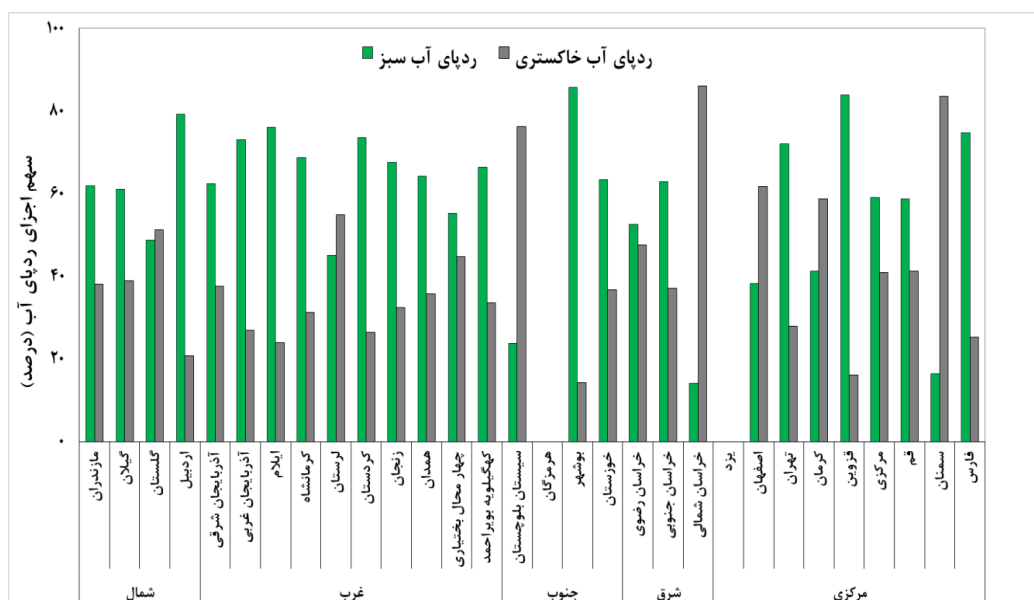
شکل ۳ سهم هر یک از اجزای ردپای آب در تولید گندم را به طور متوسط طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ در مقیاس ملی به صورت درصد نشان می‌دهد. سهم سالانه ردپای آب آبی، ردپای آب سبز و ردپای آب خاکستری در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ به ترتیب  $55/74$ ،  $24/89$  و  $19/37$  درصد است. شکل ۳ روند تغییرات ردپای آب آبی، سبز و خاکستری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۳ ردپای آب طی دوره آماری مورد مطالعه تقریباً دارای روند ثابتی بوده است و کمترین میزان نوسان را نشان داده‌اند. بالا بودن ردپای آب آبی نسبت به ردپای آب سبز و ردپای آب خاکستری نشان می‌دهد منابع آب آبی مانند آب‌های سطحی و زیرزمینی منابع آب قطعی برای تولید گندم در کشور محسوب می‌شوند.

جدول ۴. متوسط حجم اجزای ردپای آب گندم در دو کشت آبی و دیم در استان‌های مورد مطالعه

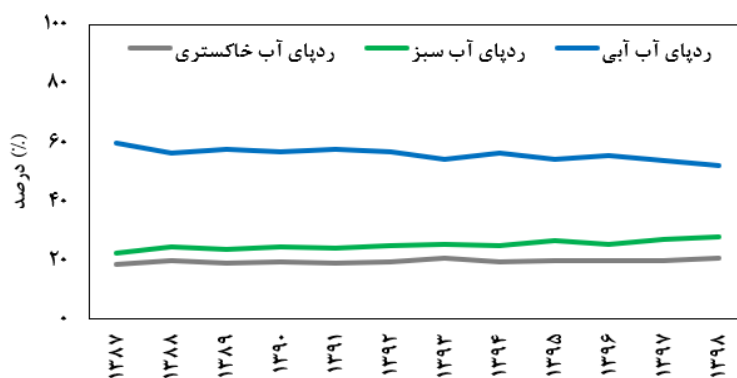
ردپای آب (میلیون متر مکعب)								مناطق
گندم دیم				گندم آبی				
کل	خاکستری	سبز	کل	آبی	خاکستری	سبز	استان	
۷۵/۹۷	۲۸/۹۵	۴۷/۰۲	۶۲/۸۵	۳۲/۵۳	۱۴/۸۶	۲۱/۴۶	مازندران	شمال
۲۳/۱۶	۹/۰۱	۱۴/۱۶	۰/۴۱	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۱۲	گیلان	
۳۹۹/۳۶	۲۰۴/۴۴	۱۹۴/۹۲	۶۴۹/۶۹	۳۶۵/۰۴	۱۴۲/۰۵	۱۴۲/۵۹	گلستان	
۲۶۵/۳۵	۵۵/۱۲	۲۱۰/۲۳	۶۵۰/۱۸	۵۲۰/۸۹	۶۰/۰۴	۶۹/۲۵	اردبیل	
۴۹۸/۹۹	۱۸۷/۵۶	۳۱۱/۴۳	۸۳۲/۱۱	۷۰۷/۲۳	۴۴/۲۱	۸۰/۶۷	آذربایجان شرقی	شمال غرب
۴۰۶	۱۰۹/۳۶	۲۹۶/۶۴	۵۴۴/۸۴	۳۹۳/۲۱	۴۵/۷۳	۱۰۵/۹۰	آذربایجان غربی	
۲۶۵/۳۵	۵۵/۱۲	۲۱۰/۲۳	۶۵۰/۱۸	۵۲۰/۸۹	۶۰/۰۴	۶۹/۲۵	اردبیل	غرب
۱۳۲/۸۹	۳۱/۷۵	۱۰۱/۱۴	۲۶۳/۴۲	۱۶۱/۹۲	۳۵/۳۷	۶۶/۱۳	ایلام	
۴۴۰/۵۹	۱۳۷/۹۵	۳۰۲/۶۴	۶۱۹/۴۰	۵۲۷/۲۵	۹۹/۸۷	۹۲/۱۵	کرمانشاه	
۳۰۳/۰۸	۱۶۶/۶۲	۱۳۶/۴۵	۶۳۵/۹۸	۴۹۳/۶۷	۷۲/۱۲	۷۰/۲۰	لرستان	
۹۰۸/۲۵	۲۳۹/۷۵	۶۶۸/۵۰	۲۹۳/۸۵	۲۲۲/۶۰	۲۴/۱۴	۴۷/۱۱	کردستان	
۵۱۲/۵۴	۱۶۶/۴۱	۳۴۶/۱۳	۱۹۸/۶۶	۱۵۶/۵۶	۱۹/۲۲	۲۲/۸۹	زنجان	
۵۱۷/۶۱	۱۸۵/۳۱	۳۳۲/۳۱	۵۹۶/۳۶	۴۱۴/۶۰	۹۰/۳۹	۹۱/۳۷	همدان	
۸۷/۵۲	۳۹/۱۵	۴۸/۳۶	۲۱۹/۱۴	۱۶۰/۹۰	۲۴/۵۲	۳۳/۷۲	چهارمحال بختیاری	
۲۳۱/۳۷	۷۷/۶۴	۱۵۳/۷۳	۱۷۴/۸۱	۱۰۲/۷۴	۲۲/۸۴	۴۹/۲۳	کهگیلویه و بویر احمد	
۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۰۳	۳۹۷/۲۸	۳۵۳/۱۳	۳۹/۲۶	۴/۸۹	سیستان و بلوچستان	
۷۰/۴۵	۱۰/۰۳	۶۰/۴۲	۸۳/۰۶	۶۱/۲۳	۴/۵۰	۱۷/۳۴	بوشهر	جنوب
۰	۰	۰	۸۲/۴۸	۵۶/۳۳	۱۵/۱۹	۱۰/۹۶	هرمزگان	
۱۲۹/۸۳	۴۷/۶۲	۸۲/۲۲	۲۸۴۶/۸۵	۱۹۲۲/۴۰	۶۰۶/۹۷	۳۱۷/۴۸	خوزستان	
۱۳۶/۴۱	۵۰/۵۲	۸۵/۸۹	۵۱۵/۵۰	۴۱۲/۷۷	۵۹/۴۰	۴۳/۳۳	خراسان شمالی	شرق
۹۲/۲۷	۷۹/۳۳	۱۲/۹۴	۱۸۰۲/۲۷	۱۶۶۴/۹۲	۲۳۷/۰۳	۱۰۰/۳۲	خراسان رضوی	
۶/۹۳	۳/۲۹	۳/۶۴	۲۳۴/۹۵	۱۸۹/۴۵	۳۰/۴۱	۱۴/۴۲	خراسان جنوبی	
۰	۰	۰	۲۰۱/۴۴	۱۷۵/۰۸	۲۳/۹۹	۲/۳۸	یزد	مرکزی
۱۳/۹۵	۸/۶۲	۵/۳۳	۵۷۴/۱۴	۴۷۰/۸۴	۸۵/۶۴	۱۷/۶۶	اصفهان	
۱/۲۶	۰/۳۵	۰/۹۰	۳۲۹/۹۰	۲۴۰/۶۸	۵۲/۲۲	۳۷	تهران	
۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۳	۵۲۳/۱۸	۴۳۶/۷۸	۵۷/۱۸	۲۹/۲۲	کرمان	
۱۱۳/۶۴	۱۸/۳۷	۹۵/۲۸	۵۸۲/۶۶	۴۵۸/۷۹	۷۳/۳۷	۶۰/۷۷	قزوین	
۲۸۱/۴۹	۱۱۵/۳۲	۱۶۶/۱۶	۴۳۷/۱۰	۳۲۷/۲۲	۴۸/۱۶	۶۱/۷۲	مرکزی	
۱/۴۴	۰/۵۹	۰/۸۵	۷۰/۱۸	۴۳/۰۱	۲۱/۸۲	۵/۳۴	قم	
۷/۸۶	۶/۵۷	۱/۲۹	۴۰۷/۷۰	۳۷۲/۱۶	۳۱/۴۶	۴/۰۸	سمنان	
۱۳۰/۲۷	۳۲/۹۴	۹۷/۳۳	۲۵۶۶/۰۷	۱۸۷۵/۶۷	۳۵۴/۲۳	۳۳۶/۱۷	فارس	
۵۷۸۸/۷۱	۲۰۱۲/۷۲	۳۷۷۶	۱۷۴۰۲/۴۶	۱۲۷۹۳/۴۴	۲۷۸۹/۶۵	۱۹۵۵/۸۳	مجموع	
۹۰۸/۲۵	۲۳۹/۷۵	۶۶۸/۵۰	۲۸۴۶/۸۵	۱۹۲۲/۴۰	۶۰۶/۹۷	۳۳۶/۱۷	بیشترین	
۱۹۲/۹۶	۶۷/۰۹	۱۲۵/۸۷	۵۸۰/۰۸	۴۲۶/۴۵	۹۲/۹۹	۶۵/۱۹	متوسط	
۰	۰	۰	۰/۴۱	۰/۲۱	۰/۰۸	۰/۱۲	کمترین	



شکل ۱. تغییرات سهم هر یک از اجزای ردپای آب در تولید گندم آبی در استان‌های کشور طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸



شکل ۲. تغییرات سهم هر یک از اجزای ردپای آب در تولید گندم دیم در مقیاس استانی در سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸



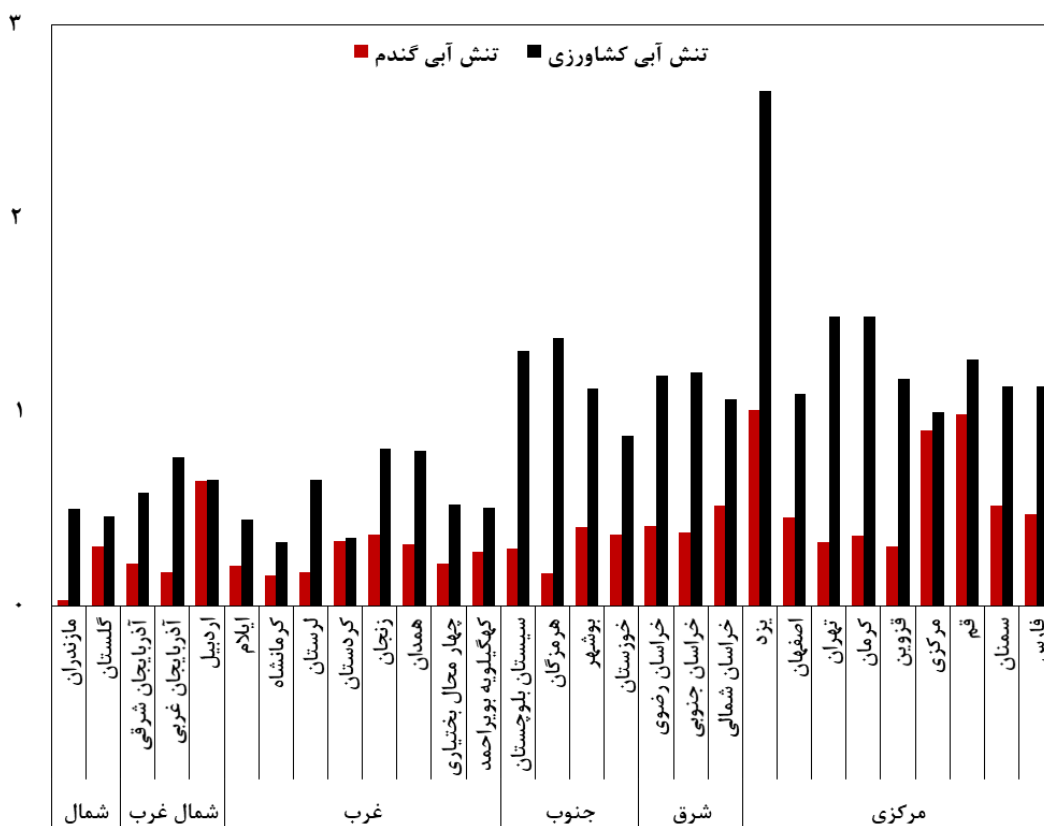
شکل ۳. تغییرات زمانی سهم هر یک از اجزای ردپای آب در دو کشت (آبی و دیم) گندم در ایران طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸



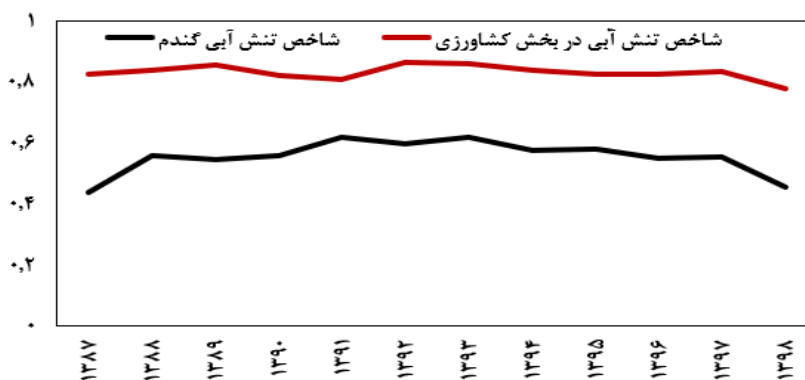
## ۲.۳. شاخص تنش آبی

شکل ۴ تغییرات WWSI و WSI را طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ در هر یک از استان‌ها نشان می‌دهد. محدوده تغییرات شاخص WWSI از ۰/۰۱ در شمال (گیلان) تا ۱/۰۱ در استان (یزد) متغیر است. شاخص تنش آبی در استان‌های مانند اردبیل، مرکزی، قم و یزد کردستان زیاد و بیشتر از ۰/۶ است که نشان می‌دهد این مناطق با تنش آبی بسیار بالا در تولید محصول زراعی گندم مواجه هستند. براساس شکل ۴، تغییرات AWSI طی زمان در بین استان‌ها متفاوت است، اما برخی مناطق در تمام سال‌ها با افزایش تنش آبی مواجه هستند. AWSI تقریباً در بیشتر استان‌های ایران بیشتر از ۰/۹ بوده که نشان می‌دهد این مناطق با تنش آبی بسیار شدید مواجه‌اند. AWSI در استان‌های غربی و شمالی ایران به طور متوسط کمتر از ۰/۶۵ است که نشان می‌دهد این استان‌ها در سطح تنش آبی متوسط قرار گرفته‌اند. با این حال مناطق جنوبی، مرکزی و شرق ایران کشور با تنش آبی بحرانی بین ۰/۹ و ۱ مواجه‌اند.

تغییرات زمانی شاخص تنش آبی تولید گندم و تنش آبی در بخش کشاورزی برای تمامی محصولات در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ در شکل ۵ نمایش داده شده است. مقدار متوسط شاخص تنش آبی گندم طی دوره آماری برابر با ۰/۶ است که نشان می‌دهد مطابق با طبقه‌بندی (جدول ۳) در کلاس با تنش آبی متوسط و رو به بالاست. طی دوره مورد مطالعه شاخص تنش آبی روند تغییرات قابل توجهی از خود نشان نداده و طی دوره آماری مورد مطالعه تقریباً دارای روند ثابتی بوده است. تغییرات سالانه WSI در ایران از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۹ در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین WSI در این دوره ۰/۸ بوده و مقدار آن همیشه بیشتر از ۰/۸ بوده که نشان می‌دهد تولید محصولات کشاورزی در ایران طی این دوره آماری با تنش آبی شدید مواجه بوده است. علاوه بر این، WSI طی دوره مطالعه روند تغییرات معناداری نداشته است.



شکل ۴. مقایسه WSI, WWSI در مقیاس استانی

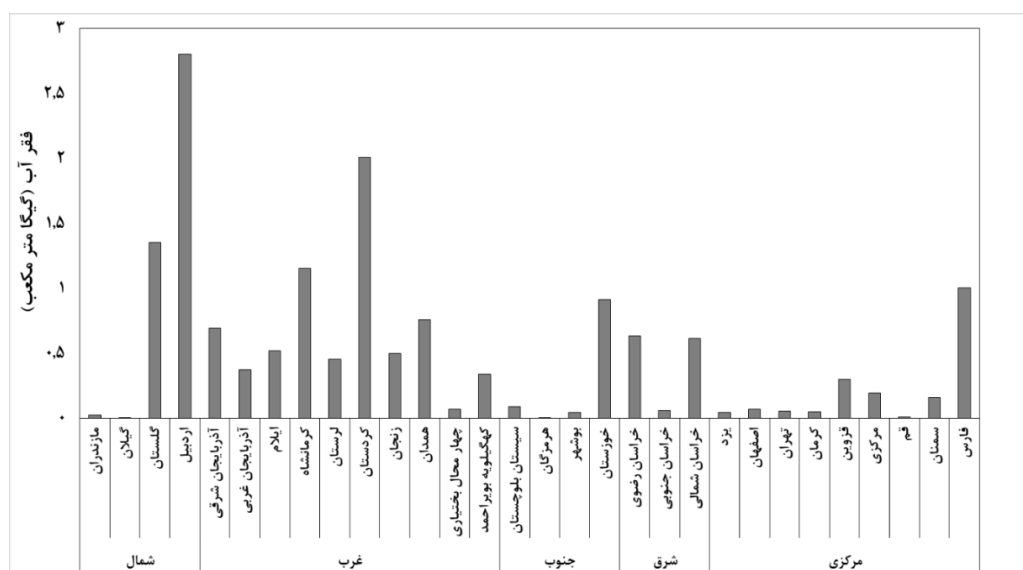


شکل ۵. تغییرات زمانی WWSI و WSI در ایران طی سال‌های ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸

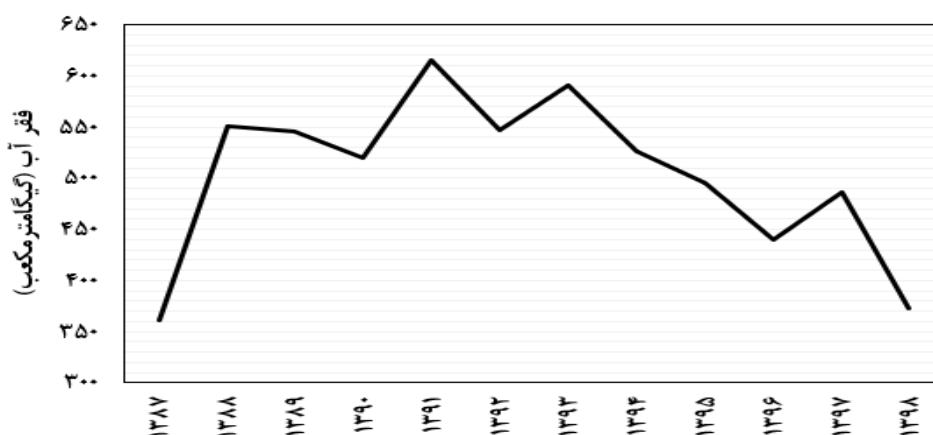
### ۳.۳. فقر آب در تولید گندم در مقیاس ملی و استانی

فقر آب حاصل ضرب ردپای آب در تنش آب در بخش کشاورزی است. در هر منطقه، هر قدر ردپای آب بیشتر، فقر آب بیشتر است. تغییرات فقر آب محصول گندم طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ برای هر یک از استان‌های مورد مطالعه به طور متوسط در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ استان گیلان با مقدار ۰/۳۴ میلیون متر مکعب دارای کمترین و استان اردبیل با مقدار ۲۸۰۱/۴۹ میلیون متر مکعب دارای بیشترین میزان فقر آبی است. بعد از آن کردستان ۲۰۰۶/۱۷ میلیون متر مکعب، گلستان ۱۳۴۹/۷۸ میلیون متر مکعب، کرمانشاه ۱۱۵۱/۴۵ میلیون متر مکعب و فارس ۱۰۰۴/۴۴ میلیون متر مکعب در رده بعدی قرار می‌گیرند. در مجموع، به دلیل سطح شدید تنش آبی در استان‌های شمال شرقی و غربی و همچنین، بالا

بودن ردپای آب در تولید گندم، بیشترین میزان محرومیت از آب در این استان‌ها اتفاق افتاده است. پایین بودن سطح زیرکشت و مصرف کمتر منابع آب برای تولید گندم باعث کمتر بودن فقر آب نسبت به سایر مناطق شده است. شکل ۷ تغییرات سالانه فقر آب در ایران را برای محصول گندم طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸ نشان می‌دهد. براساس نتایج میانگین فقر آب ۱۰۰۴/۴۴ میلیون متر مکعب در این دوره است. همان‌طور که شکل یادشده نشان می‌دهد، روند تغییرات فقر آب معنادار نیست و دارای یک فرایند افزایشی با مقادیر کمی کاهشی است. به طوری که کمترین میزان فقر آب مربوط به سال ۱۳۹۷ با مقدار ۴۸۸/۰۱ میلیون متر مکعب و بیشترین میزان فقر آب مربوط به سال ۱۳۸۸ با مقدار ۱۴۷۱/۹۱ میلیون متر مکعب بوده است.



شکل ۶. تغییرات فقر آب گندم در مقیاس استانی طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸

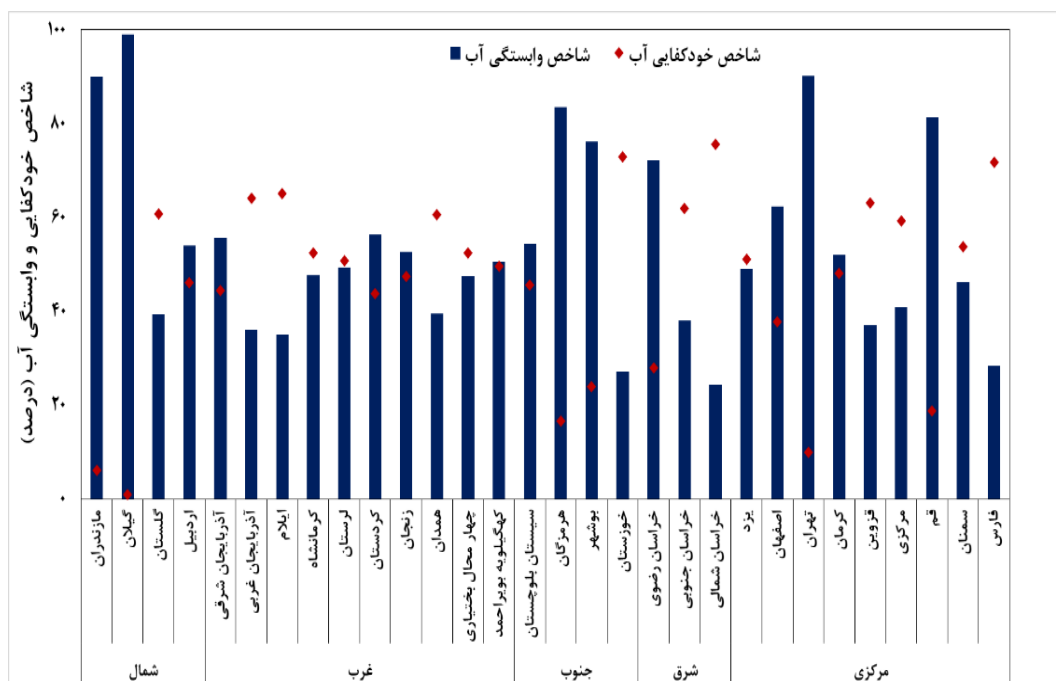


شکل ۷. تغییرات زمانی فقر آب گندم در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸

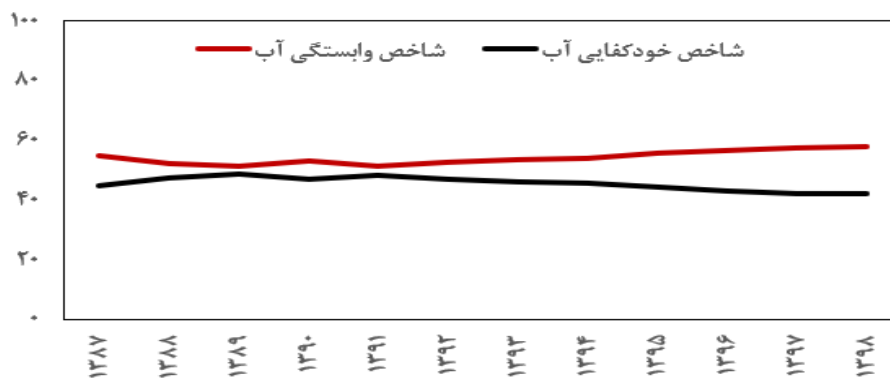
### ۴.۳. تغییرات شاخص خودکفایی و وابستگی آب

تغییرات شاخص وابستگی آب و شاخص خودکفایی آب در هر استان در شکل ۸ نشان داده شده است. هر چه میزان تولید گندم بیشتر و جمعیت کمتر باشد، میزان خودکفایی نیز بیشتر خواهد بود. بالاترین میزان شاخص خودکفایی آب (کمترین شاخص وابستگی) مربوط به استان خراسان شمالی، خوزستان و فارس و کمترین میزان شاخص خودکفایی مربوط به استان گیلان، مازندران و تهران (بیشترین شاخص وابستگی) است. این نشان می‌دهد این استان‌ها در تولید محصولات کشاورزی کاملاً به واردات

منابع آبی مجازی سایر استان‌ها وابسته است و استان‌های مانند خراسان شمالی، خوزستان و فارس بیش از ۷۰ درصد در تأمین منابع آب برای تولید گندم خودکفا هستند. با توجه به تغییرات زمانی شاخص‌های مورد بررسی، میانگین شاخص وابستگی و خودکفایی به ترتیب ۵۴/۳۳ و ۴۵/۶۷ درصد است. با توجه به شکل یادشده طی دوره مطالعه روند تغییرات معناداری در این دو شاخص وجود داشته است، به طوری که از سال ۱۳۹۲ مقدار شاخص خودکفایی در کشور در تولید گندم افزایش و وابستگی کاهش یافته است.



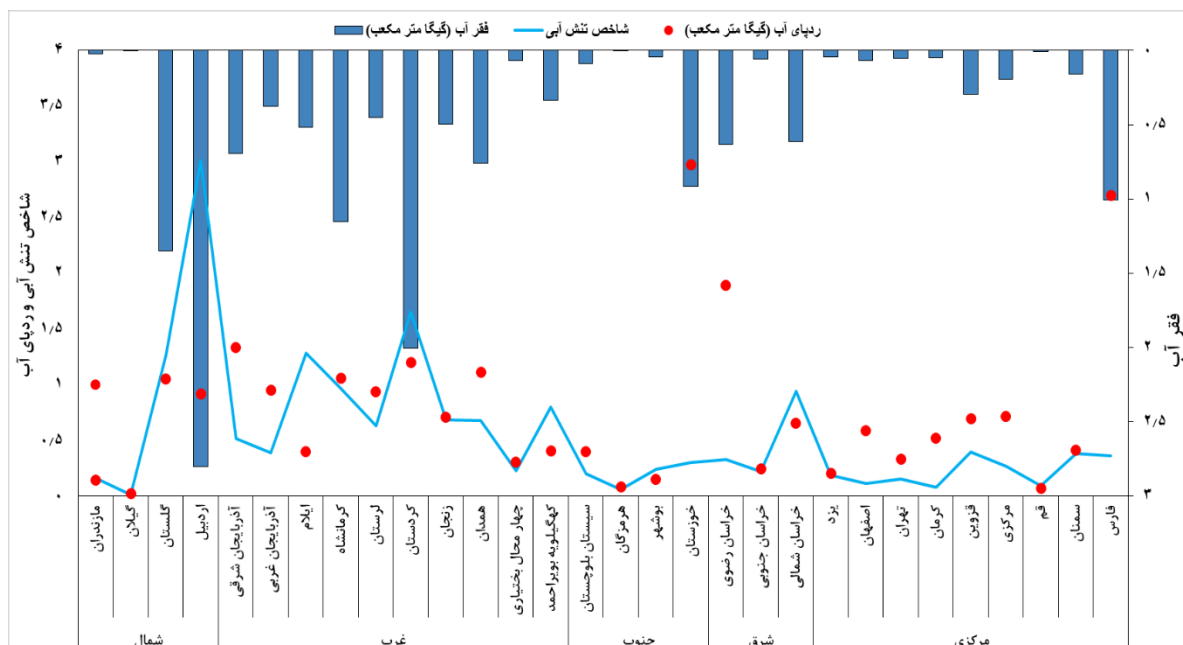
شکل ۸. تغییرات شاخص خودکفایی و وابستگی آب تولید گندم در مقیاس استانی



شکل ۹. تغییرات زمانی شاخص خودکفایی و وابستگی آب تولید گندم در ایران طی دوره آماری ۱۳۸۷ تا ۱۳۹۸

بالا قرار دارند که این وضعیت تنش آبی باعث بالا رفتن فقر آب هم در این استان‌ها شده است. همچنین در استان‌های خوزستان، خراسان رضوی و فارس هم این وضعیت دیده می‌شود. در کل می‌توان گفت که ردپای آب آبی بالا باعث افزایش فقر آب شده است، اما استان‌های مانند مازندران، قم، گیلان، هرمزگان، تهران، یزد و خراسان جنوبی که سطح زیر کشت کمتری از گندم را به خود اختصاص داده‌اند، از نظر تنش آبی و فقر آب هم وضعیت مناسب‌تری دارند.

۵.۳. مقایسه تغییرات سه شاخص ردپای آب، تنش آبی و فقر آب  
 شاخص ردپای آب همراه با دو شاخص تنش آبی و فقر آب در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۰ استان‌هایی که دارای ردپای آب بالا هستند، به دلیل بالا بودن مصرف آب آبی نسبت به آب سبز تنش آبی بیشتر و در نتیجه فقر آب بیشتری دارند. همان‌طور که نتایج نشان داد، استان‌های واقع در غرب کشور دارای بیشترین سطح زیر کشت گندم در سطح کشور هستند و با توجه به شکل ۱۰ این استان‌ها از نظر تنش آبی هم در سطح بالا و خیلی



شکل ۱۰. مقایسه سه شاخص تنش آبی، ردپای آب و فقر آب در تولید گندم در ایران

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد ردپای آب آبی مربوط به تولید گندم در ایران بسیار بیشتر از ردپای آب سبز است که اهمیت آب آبی را در فرایند تولید گندم تأیید می‌کند. نتایج نشان داد مقدار بیشتری از آب آبی برای تولید گندم در ایران مورد استفاده قرار می‌گیرد که به معنای بالا بودن مصرف منابع آب آبی (منابع آب سطحی و زیر زمینی) نسبت به منابع آب سبز (باران مؤثر) است. پایین بودن ردپای آب سبز نشان می‌دهد [۲۸] که میزان بارندگی در سطح کشور برای کشت گندم کافی نیست. این مسئله تأثیر اهمیت آب آبی را در فرایند تولید گندم نشان می‌دهد، بنابراین تأثیر تولید گندم بر منابع آب موجود در کشور را نمی‌توان نادیده گرفت. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات شاخص تنش آبی، فقر آب و ردپای آب برای ارزیابی میزان کمبود آب در تولید گندم بیشتر به استفاده از منابع آب آبی نسبت به منابع آب سبز بستگی دارد. بنابراین، برآورد پتانسیل محرومیت از آب در کنار شاخص تنش آبی و ردپای آب می‌تواند برای ارزیابی کمبود آب در رابطه با تولید محصول گندم در سطح کشور مناسب باشد. ردپای بالای آب در استان‌های فارس، گلستان، کردستان، خراسان رضوی، گلستان، همدان، کردستان، خوزستان، کرمانشاه و اردبیل باعث افزایش فقر آبی در تولید گندم شده است. بنابراین، استان‌هایی که میزان فقر آب و تنش آبی کمتر و در نتیجه ردپای آب پایین‌تری دارند، می‌توانند تأثیر بالقوه بیشتری در مدیریت منابع داشته باشند. برای تخمین شاخص WSI، تنها مصرف آب آبی در نظر گرفته می‌شود، در حالی که در محاسبه شاخص WWSI علاوه بر مصرف آب آبی، مصرف آب سبز و همچنین، مصرف آب خاکستری (آب مورد نیاز برای رقیق کردن کودهای شیمیایی) هم در تولید گندم در نظر گرفته شده است. بنابراین، WWSI یک شاخص واقع‌بینانه‌تری نسبت به WSI در ارزیابی کمبود آب و مدیریت آب در تولید گندم است. شاخص تنش آبی توسط محققان مانند [۸]، [۱۸] و [۱۹] در چین استفاده شده است. با توجه به بالا بودن ردپای آب آبی نسبت به ردپای آب سبز و خاکستری می‌توان گفت که یکی از دلایل افزایش تنش آبی در تولید گندم همان بالا بودن ردپای آب آبی است. بنابراین، می‌توان گفت که تولید گندم بیشترین تأثیر را روی منابع آبی و

امنیت آبی دارد. بنابراین، نمی‌توان مسئله کمبود آب و تنش آبی ناشی از آن را نادیده گرفت، چرا که افزایش تنش آبی و کاهش شدید آب آبی می‌تواند امنیت غذایی را تهدید کند و در نتیجه، تولید محصولی مانند گندم را در سطح کشور محدود کند. همچنین، نتایج نشان داد استان‌هایی مانند خراسان رضوی، فارس و خوزستان که بیشترین سطح زیر کشت گندم آبی را به خود اختصاص داده‌اند، از نظر تولید این محصول خودکفا هستند و کمترین وابستگی را به منابع آبی سایر استان‌ها دارند. این مطالعه برای تصمیم‌گیری در مورد مدیریت پایدار منابع آب برای تولید گندم در ایران مهم است و می‌تواند برای شناسایی مناطقی که از نظر کمبود آب باید حفظ شوند، در اختیار مدیران و سیاست‌گذاران قرار گیرد. مطالعات بعدی باید محصولات مختلفی را در کشور تجزیه و تحلیل کند تا تأثیرات زیست‌محیطی مربوط به آب را در تولید محصولات کشاورزی به طور جامع اندازه‌گیری کند و توصیه‌هایی را برای کاهش فشار آب در بخش کشاورزی ارائه کند.

#### منابع

- [1]. Gerbens-Leenes PW, Mekonnen MM, Hoekstra AY. The water footprint of poultry, pork and beef: a comparative study in different countries and production systems. *Water Resour.* 2012; 25(36):1-2.
- [2]. Hoekstra AY, Hung PQ. Virtual Water Trade: a Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Crop Trade. *Value of Water Research Report Series.* 2002; No. 11. UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands.
- [3]. Fu H, Chen Y, Yang X, Di J, Xu M, & Zhang B. Water resource potential for large-scale sweet sorghum production as bioenergy feedstock in Northern China. *Science of the Total Environment.* 2019; 653:758-764.
- [4]. Mancosu N, Snyder R. L, Kyriakakis G, & Spano D. Water scarcity and future challenges for food production. *Water.* 2015; 7(3): 975-992.
- [5]. Hoekstra AY, & Hung PQ. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade. *Global environmental change.* 2005; 15(1): 45-56.
- [6]. Hoekstra AY, Chapagain AK. The water footprints of Morocco and the Netherlands: global water use as a result of domestic consumption of agricultural commodities. *Ecol. Econ.* 2007; 64 (1): 143-151.

- [7]. Chapagain AK, Hoekstra AY, Savenije HHG, Gautam R. The water footprint of cotton consumption: an assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries. *Ecol. Econ.* 2006; 60: 186-203.
- [8]. Cao X, Wu P T, Wang Y B, & Zhao XN. Assessing blue and green water utilisation in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use. *Hydrology and Earth System Sciences.* 2014; 18(8): 3165-3178.
- [9]. Zhai SX, Quan T, Ma X, Zhang R, Ji C, Zhang T, Hong J. Impact-oriented water footprint assessment of wheat production in China. *Science of the Total Environment.* 2019; 689: 90-98.
- [10]. Zhang Y, Huang K, Ridoutt BG, Yu Y. Comparing volumetric and impact-oriented water footprint indicators: case study of agricultural production in Lake Dianchi Basin, China. *Ecol. Indic.* 2018; 87: 14-21.
- [11]. Bazrafshan O, Zamani H, Etedali H R, & Dehghanpir S. Assessment of citrus water footprint components and impact of climatic and nonclimatic factors on them. *Scientia Horticulturae.* 2019; 250: 344-351.
- [12]. Ababaei B, & Etedali H R. Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agricultural water management.* 2017; 179: 401-411.
- [13]. Bazrafshan O, Ramezani Etedali H, Gerkan Nezhad Moshizi Z, Shamili, M. Virtual water trade and water footprint accounting of Saffron production in Iran, *Agricultural Water Management.* 2019; 213: 368-374.
- [14]. Falkenmark M. The greatest water problem: the inability to link environmental security, water security and food security. *International Journal of Water resources development.* 2001; 17(4): 539-554.
- [15]. Sullivan C. Calculating a water poverty index. *World Dev.* 2002; 30 (7): 1195-1210.
- [16]. Vanham D, Bidoglio G. A review on the indicator water footprint for the EU28. *Ecol. Indic.* 2013; 26: 61-75.
- [17]. Liu J, Yang H, Gosling SN, Kummu M, Flörke M, Pfister S, & Oki T. Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's future.* 2017; 5(6): 545-559.
- [18]. Hoekstra AY, Chapagain AK. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. *Ecol. Econ.* 2011; 70: 749-758.
- [19]. Cao X, Wu M, Guo X, Zheng Y, Gong Y, Wu N, & Wang W. Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework. *Science of the Total Environment.* 2017; 609: 587-597.
- [20]. Cao X, Huang X, Huang H, Liu J, Guo X, Wang W, & She D. Changes and driving mechanism of water footprint scarcity in crop production: A study of Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators.* 2018; 95: 444-454.
- [21]. Hadi M, Jalili M, Heris A. Assessing the Wheat Yield under Irrigated and Rainfed Farming and Evaluating the Possibility of Supplemental Irrigation of Rainfed by Water Stored in Deficit Irrigated Farming. 2017; 3 (11): 403-411. [Persian]
- [22]. Nasrabadi T, Arab E, Pourasghar F. Investigating the proportion of wheat planted area in Iran with wheat yield and water demand by focusing on virtual water approach. 2015; 3 (41): 529 -543. [Persian]
- [23]. MAJ. Iran Agriculture Bulletin. Ministry of Agriculture Jihad, Agriculture Jihad Press, Tehran. 2021. [Persian]
- [24]. Sheibani S, Ghanbari A, Asghari pour MR. Determining the Optimal Water Use Efficiency in Wheat Production Sustainability. 2017; 2 (27): 1-18. [Persian]
- [25]. Allen, J.A. Virtual water: a strategic resource global solution to regional deficits. *Ground Water.* 1998; 36: 545-546.
- [26]. Raskin, P, Gleick, P, Kirshen, P, Pontius, G, & Strzepek, K. Water futures: assessment of long-range patterns and problems. *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world.* 1997; SEI.
- [27]. Pfister, S, Koehler, A, Hellweg, S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA, *Environ. Sci. Technol.* 2009; 43: 4098-4104.
- [28]. Arabi Yazdi, A, Alizadeh, A, Nairizi S, 2009. Study of food security based on the concept of virtual water trade and ecological water footprint (Case study: Khorasan Razavi Province). *Journal Of Agroecology*, 1(1), -. doi: 10.22067/jag.v1i1.2649.