تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال پانزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۸
Volume 15, No. 3, Fall 2019 (IR-WRR)
۲۳۴-۲۴۵

مقایسه و ارزیابی ردّپای آب آبی، سبز و خاکستری گندم در اقلیم‌های مختلف ایران

توحید علیقلی‌نیا[۱]، حسین شیبانی[۲]، امید محمدی[۳*] و موسی حسام[۴]

چکیده

ردّپای‌آب نشان‌دهنده آب مصرفی واقعی محصولات در سه جزء آبی، سبز و خاکستری است، که امروزه در راستای مدیریت نوین منابع‌آب با رویکرد یکپارچه مورد توجه قرار گرفته است. به‌منظور ارزیابی مناسب آب مصرفی در بخش کشاورزی، لازم است که شاخص ردّپای‌آب در اقلیم‌های مختلف مورد بررسی قرارگیرد. در این تحقیق به ارزیابی ردّپای آب محصول‌گندم در نقاط استراتژیک از نظر منابع‌آب (آب آبی، آب سبز و آب خاکستری) و ارائه الگوی کشت بهینه در اقلیم‌های مختلف ایران پرداخته شده است. ابتدا ۳۳ استان کشور بر اساس اقلیم‌بندی یونسکو طبقه‌بندی شدند. تمامی ایستگاه‌ها در ۶ اقلیم، خیلی مرطوب خنک گرم[۱] (PH-C-W)، نیمه‌خشک سرد گرم[۲] (SA-K-W)، نیمه‌خشک خنک خیلی گرم[۳] (SA-C-VW)، خشک خنک گرم[۴] (A-C-W)، خشک معتدل گرم[۵] (A-M-W) و خشک خنک خیلی گرم[۶] (A-C-VW) دسته‌بندی شدند. ردّپای آب محصول در هر سه جزء آب آبی، سبز و خاکستری در هر اقلیم محاسبه شد. نتایج نشان‌داد، بیشترین مقادیر ردّپای آب آبی در قسمت‌های مرکزی و جنوبی، بیشترین مقدار ردّپای آب سبز در قسمت‌های شمالی و غربی و بیشترین مقدار ردّپای آب خاکستری در قسمت‌های جنوبی دیده می‌شود. میانگین ردّپای آب سبز، آبی و خاکستری به ترتیب ۵۰۳/۳، ۱۳۹۲/۸ و ۲۸۶/۲ مترمکعب بر تن بدست آمد. نتایج این تحقیق نشان داد که کشت محصول گندم در همه اقلیم‌ها مناسب نبوده و در اقلیم‌های A-C-W و A-C-VW ایران توصیه نمی‌گردد.

کلمات کلیدی: اقلیم‌بندی یونسکو، آب آبی، آب خاکستری، آب سبز، ردّپای آب، گندم.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۲۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۴/۲۸

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۲- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشگاه صنعتی اصفهان.
۳- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
۴- دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان زمستان ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Evaluation and Comparison of Blue, Green and Gray Water Footprint of Wheat in Different Climates of Iran

T. Aligholi Nia[1] , H. Sheibani[2], O. Mohammadi[3], and M. Hesam[4]*

Abstract

Water footprint index shows actual consumption of water in three components: blue, green and gray. Nowadays, the modern management of water resources with integrated approach takes into account the concept of water footprint. In this research, wheat water footprint was evaluated at strategic zones with regards to water resources (blue water, green water and gray water) and an optimal cropping pattern in different climates of Iran was presented. For this purpose, 33 provinces of the country were first classified according to the UNESCO cluster. All stations were classified in 6 climates; Plentiful Humidity Cool Warm (PH-C-W), Semi -Arid Cold Warm (SA-K-W), Semi -Arid Cool Very Warm (SA-C-VW), Arid Cool Warm (A-C-W), Arid Mild Warm (A-M-W), Arid Cool Very Warm (A-C-VW). Then the water footprint was calculated and evaluated in each climate for all three components as blue, green and gray water. The results showed that the highest amounts of blue water footprint are seen in the central and southern parts of Iran. The highest amounts of green water footprint was seen in the northern and western parts and the maximum gray water footprint was for the southern parts of the country. The average of green, blue and gray water footprints was obtained respectively as 503.3, 1392.8 and 286.2 m^3/ton over the country. The results showed that wheat crop cultivation was not recommended in A-C-W and A-C-VW climate zones of Iran.

Keywords: UNESCO Climate Category, Blue Water, Gray Water, Green Water, Water Footprint, Wheat.

Received: January 10, 2019
Accepted: July 19, 2019

1- Ph.D. Student of Water Science and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2- M.Sc. Graduate in Irrigation and Drainage, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
3- Ph.D. Student of Water Sciences and Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: o.mohamadi333@gmail.com
4- Associate Professor of Water Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. Email: Mhesam@yahoo.com
*- Corresponding Author

۱- مقدمه

امروزه به لحاظ رشد جمعیت، نیاز به غذای بیشتر، گسترش صنعت و فعالیت‌های اقتصادی، سرانه منابع تجدیدشونده رو به کاهش است و آب به‌عنوان یک منبع کمیاب به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک تلقی می‌شود. از طرفی چگونگی توزیع جهانی آب مسأله دیگری است که به کمبود آب افزوده شده است. قاره آسیا با ۶۰ درصد جمعیت فقط ۳۰ درصد منابع آب دنیا را در خود جای داده است و ایران با حدود ۱ درصد جمعیت جهان تنها ۳/۶ درصد منابع آب شیرین و تجدیدشونده را در اختیار دارد این در حالی است که بحران آب در ایران به وضعیتی غیرمتعارف دچار شده است. منابع آبی به‌پایین‌ترین سطح خود رسیده و دشت‌ها برای خشک شدن از همدیگر سبقت می‌گیرند. برداشت آب از سفره‌های زیرزمینی به بیش از ۸۰ درصد رسیده و نیمی از حدود ۶۰۹ دشت ایران دیگر از نقطه نظر سطح ایستابی غیرقابل بازگشت هستند. توزیع زمانی نزولات جوی در کشور نیز به دلیل ناهماهنگی با فصول آبیاری وضعیت مناسبی ندارد و میزان آن در سال‌های مختلف و حتی فصول مختلف متغیر بوده و این مسئله مشکلات گوناگونی را در چند سال اخیر برای بخش‌های مختلف، به‌ویژه بخش کشاورزی به همراه داشته و زیان‌های زیادی را به این بخش تحمیل کرده است (Razavi and Davari, 2013). از این رو با توجه به عدم توزیع زمانی و مکانی مناسب بارش، مدیریت کشاورزی جهت افزایش کارایی مصرف آب، بسیار دشوارتر از کشورهایی با شرایط آبی مطلوب است. الگوی کشت یکی از عوامل مهم در مدیریت کشاورزی جهت افزایش کارایی مصرف آب است. با توجه به گستردگی پهنه‌ی جغرافیایی کشور و تنوع اقلیمی مناطق گوناگون آن، رسیدن به الگوی کشت مناسبی که از آن بتوان حداکثر بهره‌برداری را از عوامل و نهاده‌های تولید به‌ویژه عامل محدودکننده‌ی آب به دست آورد ضرورتی انکارناپذیر است.

در بسیاری از مناطق کشور، کشت محصولات زراعی، بیلان منفی آب دشت‌ها و نیاز به‌پایداری تولید محصولات، ما را ملزم می‌کند که در جهت روش‌های کمک به بهبود سفره‌های زیرزمینی آب و افزایش راندمان مصرف آب حرکت کنیم. همچنین باید نسبت تخصیص زمین‌های کشاورزی و برنامه‌ی کشت یک منطقه به انواع محصولات زراعی همان منطقه توسط محققان بخش کشاورزی تعیین و در اختیار سازمان‌های مربوطه قرار گیرد تا با برنامه‌ریزی مناسب اقدامات لازم انجام گیرد. از سوی دیگر میزان کشت محصولات کشاورزی در یک منطقه باید با توجه به منابع آب موجود، عملکرد محصول، نیاز کشور و سیاست‌های درست انجام شود و تصمیم‌گیری در انتخاب گیاهان زراعی مناطق مختلف بر اساس مشخصات اقلیم منطقه باشد (Rouhani et al., 2008).

بررسی وضعیت موجود کشاورزی بیانگر آن است که با وجود پتانسیل افزایش تولید محصولات کشاورزی، به دلیل فقدان سیستم مدیریتی صحیح، امکان استفاده بهینه از منابع موجود آب و خاک میسر نشده است. در این راستا بررسی راهکارهای استفاده بهینه آب از طریق بازنگری در تخصیص منابع آب و مدیریت آن امری لازم و ضروری است. اما از آنجایی‌که میزان آب مصرفی واقعی هر محصول تحت‌تأثیر بر اقلیم منطقه، میزان تولیدات، الگوی مصرفی، عملیات کشاورزی و راندمان کاربرد آب متغیر است، لذا نیاز به شاخصی است که بتوان با آن نیاز واقعی هر محصول را مورد ارزیابی قرار داد. در این راستا توسعه روش‌های مدیریتی کارآمد و جدید که بتوان با آن مقدار آب واقعی مصرفی را بر اساس الگوی مصرفی مردم، شرایط اقلیمی، راندمان کاربرد آب و عملکرد محصول، محاسبه کرد، امری لازم و ضروری است (Rasooli Majd et al., 2015).

در ادبیات استفاده بهینه از منابع آب و کاهش ضایعات و تلفات آن در دهه اخیر بحث جدیدی تحت عنوان ردّپای آب مورد توجه واقع شده است (Arabi and Nikniya, 2010). شاخص ردّپای آب به‌عنوان یک شاخص جهانی نشان‌دهنده مقدار واقعی آب مصرفی بر اساس شرایط و اقلیم هر منطقه می‌باشد (Aligholinia et al., 2015).

شاخص ردّپای آب نیز همانند سایر شاخص‌ها، سبب پیدایش مفاهیم متفاوتی همراه با خود شده است. مفاهیم برگرفته از شاخص ردپای آب عمدتاً مفاهیمی مدیریتی در حوضه منابع و مصارف آب هستند، بدین معنی که این مفاهیم را می‌توان برای برنامه‌ریزی‌های منابع و مصارف آب در یک کشور یا محدوده جغرافیایی به کار بست. همچنین، ابزارهای تعریف شده به کمک این شاخص، می‌توانند از طریق کنترل جابه‌جایی‌های آب در سطح بین‌المللی، چه به‌صورت حقیقی و چه به‌صورت مجازی و یا از طریق ایجاد تغییراتی در الگوی مصارف افراد یک جامعه میزان آب مصرفی آن جامعه را با رعایت اصول توسعه پایدار، تا حد ممکن کاهش دهند. به‌طوری‌که با برآورد آن در محصولات مختلف کشاورزی، دامی و صنعتی، می‌توان در اخذ تصمیمات مهم در راستای جبران کمبود منابع آب، تعیین سهم آب آبی و آب سبز در تولید محصولات کشاورزی، تغییر در الگوی کشت، تغییر حجم صادرات و واردات محصولات و همچنین حفظ ذخایر آب با واردات محصولات آب‌بر و با در نظر گرفتن خودکفایی کشور قدم مؤثری برداشت (Sohrabi, 2007).

این شاخص در سال ۲۰۰۲ توسط هواکسترا و هونگ ارائه گردید و پس از معرفی، در سال‌های اخیر به‌طور گسترده توسط متخصصین در نقاط مختلف دنیا مورد استفاده قرار گرفته است و محققین بسیاری به

بررسی میزان آب واقعی محصولات مختلف نظیر گندم (Hoekstra and Chapagain, 2007)، چای (Jefferies et al., 2012)، برنج (Chapagain and Hoekstra, 2012)، پنبه (Chico et al., 2013)، انگور (Ene et al., 2013)، ذرت (Nana et al., 2014) و سیب‌زمینی (Herath et al., 2014; Rodriguez et al., 2015) پرداختند. محققین مختلف ایرانی نیز کم و بیش به بررسی موضوع ردّپای آب برای محصولات مختلف پرداختند که از آن جمله می‌توان به تحقیقات (Arabi and Nikniya, 2010)، (Aligholinia et al., 2015) و (Rasooli majd et al., 2015) اشاره کرد.

با توجه به مطالب ذکرشده، هدف از این تحقیق ارزیابی ردّپای آب برای محصول گندم به عنوان یکی از محصولات استراتژیک زراعی کشور، بررسی شرایط موجود با تکیه بر رویکرد ردّپای آب به‌منظور شناسایی و ارزیابی نقاط مهم و استراتژیک ازنظر منابع آب (آب آبی، آب سبز و آب خاکستری) و ارائه الگوی کشت بهینه مدیریتی این محصول در اقلیم‌های مختلف ایران می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق، به منظور بررسی ردّپای آب محصول گندم در سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری در اقلیم های مختلف ایران، ابتدا ۳۳ استان کشور بر اساس اقلیم‌بندی یونسکو طبقه‌بندی گردید (Zare Abyaneh et al., 2010). بدین ترتیب تمامی ایستگاه‌ها در ۶ اقلیم، خیلی مرطوب خنک گرم (PH-C-W)، نیمه‌خشک سرد گرم (SA-K-W)، نیمه‌خشک خنک خیلی گرم (SA-C-VW)، خشک خنک گرم (A-C-W)، خشک معتدل گرم (A-M-W) و خشک خنک خیلی گرم (A-C-VW) دسته‌بندی شدند (Zare Abyaneh et al., 2010). شکل ۱ تقسیم‌بندی استان‌ها را بر اساس اقلیم‌بندی یونسکو و جدول ۱ مشخصات محصول گندم در هر یک از اقلیم‌ها را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که آب و هوای مراکز استان‌ها نماینده کل مناطق این استان‌ها نیست. بنابراین مقادیر ردّپای آب محاسبه شده برای استان یک تقریب است و هرگونه توصیه برای کشت یا عدم کشت گندم باید براساس محاسبات دقیق‌تر منطقه مورد نظر صورت گیرد. مقادیر مندرج در جدول ۱ از آمارنامه‌های ۲۰ ساله (۷۶ تا ۹۵) جهاد کشاورزی استان‌ها برداشت شده است (Zare Abyaneh et al., 2010).

در بررسی ردّپای آب یک محصول از روشی که هوکسترا و هانگ در سال ۲۰۰۲ در راهنمای محاسبه ردّپای آب ارائه دادند استفاده شد بدین ترتیب که ردّپای آب هر محصول از حاصل جمع سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری به دست می‌آید (رابطه-۱) (Hoekstra and Hung, 2002).

$$WF_i = WF_{i\,green} + WF_{i\,blue} + WF_{i\,grey} \qquad (۱)$$

که در آن WF_i، ردّپای آب کل محصول i می‌باشد. WF_{blue} ردّپای آب آبی است که برای آب‌های مورد استفاده از منابع سطحی و زیرزمینی محاسبه می‌گردد. WF_{green}، ردّپای آب سبز می‌باشد که شامل حجمی از آب باران مؤثر است که به‌صورت رطوبت در خاک ذخیره می‌شود. WF_{grey} نیز به‌عنوان آب خاکستری تعریف می‌شود و به حجم آبی اطلاق می‌گردد که برای از بین بردن آلودگی‌های ایجادشده ناشی از کشت گیاه و تولید محصول در محیط، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

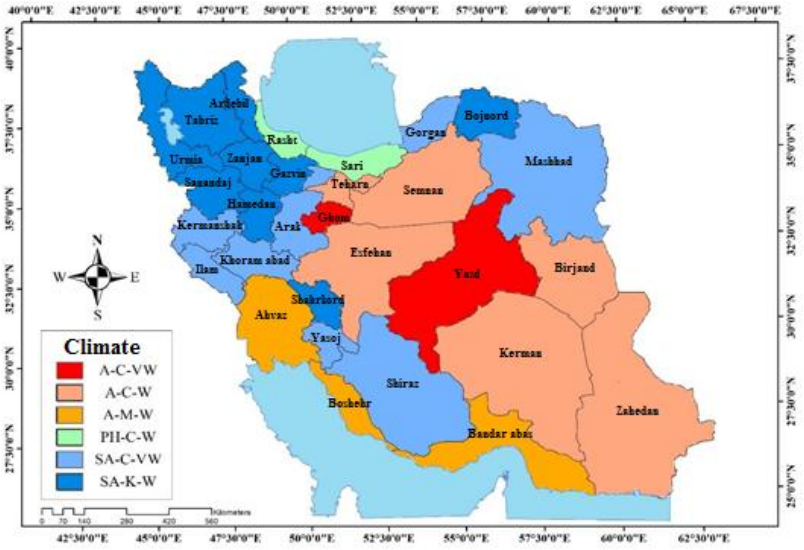

Fig. 1- Provinces categorized based on the UNESCO cluster

شکل ۱- تقسیم‌بندی استان‌ها بر اساس اقلیم‌بندی یونسکو (Zare Abyaneh et al., 2010)

Table 1- Vegetation characteristics of wheat in each of Iran's climate zones

جدول ۱- مشخصات گیاهی گندم در هر یک از اقلیم‌های شش‌گانه ایران (Zare Abyaneh et al., 2010)

Growth period (day)	Function (ton/ha)	Irrigation requirement (mm/year)	Index	Climate
260	3.54	385.1	SA-K-W	Semi Arid- Cold- Warm
160	3.00	457.7	A-M-W	Arid- Mild- Warm
231	3.64	744.8	A-C-VW	Arid- Cool- Very Warm
216	2.88	192.1	PH-C-W	Very Humid- Cool- Warm
230	3.52	298.5	SA-C-VW	Semi Arid- Cool- Very Warm
216	3.40	829.0	A-C-W	Arid-Cool- Warm

در رابطه (۱)، ردّپای آب به‌عنوان واحد محصول بیان می‌شود، یعنی حجم آب بر وزن محصول که معمولاً برای بیان روند ردّپای آب در بخش کشاورزی از عنوان m^3/ton استفاده می‌شود. برای این منظور از حاصل تقسیم ردّپای آب هر محصول بر مقدار عملکرد آن استفاده می‌گردد (رابطه-۲):

$$WF_i = CWU_i/Y \quad (۲)$$

ردّپای آب هر جزء نیز طبق روابط (۳) تا (۵) به دست می‌آید:

$$WF_{i\,green} = \frac{CWU_{green}}{Y} \quad (۳)$$

$$WF_{i\,blue} = \frac{CWU_{blue}}{Y} \quad (۴)$$

$$WF_{i\,grey} = \frac{(\alpha * AR)(C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad (۵)$$

که در روابط (۳) و (۴) به ترتیب CWU_{blue} و CWU_{green}، جزء آب آبی و جزء آب سبز محصول برحسب (m^3/ha) و Y عملکرد گیاهان زراعی برحسب (ton/ha) می‌باشد. مقدار جزء خاکستری ردّپای آب $(WF_{i.grey})$ نیز توسط مقدار مواد شیمیایی مورد استفاده در هر هکتار از زمین زراعی (AR)، کسر آبشویی (α)، حداکثر غلظت قابل قبول مواد آلوده‌کننده (C_{max}) و غلظت طبیعی مواد آلوده‌کننده (C_{nat}) و درنهایت عملکرد محصول (Y) به‌صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که آلاینده‌ها به‌طورکلی از آلودگی‌ها (نیتروژن، فسفر و غیره) و همچنین آفت‌کش‌ها و حشره‌کش‌ها ایجاد می‌شوند. همان‌طور که ذکر شد، جزء آب خاکستری حجم آبی است که طی فرآیند تولید محصول آلوده شده و کیفیت اولیه خود را از دست می‌دهد ولی می‌توان این آب را در مناطق خشک که در آن ارزش آب بسیار بالاست، دوباره با انجام عمل تصفیه مورد استفاده قرار داد. اجزای سبز و آبی مصرف آب محصول (CWU) نیز از مجموع تبخیر- تعرق روزانه در تمام دوره رشد یک گیاه به‌صورت رابطه (۶) و (۷) محاسبه می‌گردند:

$$CWU_{green} = 10 * \sum_{d=1}^{lgp} ETgreen \quad (۶)$$

$$CWU_{blue} = 10 * \sum_{d=1}^{lgp} ETblue \quad (۷)$$

که ET_{green} تبخیر- تعرق آب سبز (تبخیر- تعرق ناشی از آب باران مورداستفاده گیاه) و ET_{blue} تبخیر- تعرق آب آبی (تبخیر- تعرق ناشی از آب آبیاری مورداستفاده گیاه) و برحسب (mm/year) می‌باشند. عدد ۱۰ نیز به‌منظور تبدیل عمق آب به میلی‌متر به حجم آب در سطح زمین (m^3/ha) است. در فرمول‌های (۶) و (۷)، lgp طول دوره رشد با واحد روز است. بدین ترتیب منظور از مجموع داده‌های تبخیر- تعرق در طول دوره رشد یعنی محاسبه مجموع تبخیر- تعرق روزانه گیاه از روز اول کاشت گیاه تا روز برداشت آن می‌باشد. به‌منظور محاسبه تبخیر- تعرق روزانه نیز از رابطه پیشنهادی آلن و همکاران مطابق رابطه (۹) استفاده گردید (Allen et al., 1998):

$$ET = Ks[t] * Kc[t] * ET0[t] \quad (۹)$$

که در آن Kc[t] ضریب گیاهی، Ks[t] عامل بدون بعد کاهش تعرق که وابسته به آب قابل‌دسترس در خاک می‌بـــاشد و ET_0 [t] نیز تبخیر- تعرق مرجع می‌باشد. Ks[t] بر اساس تابع روزانه حداکثر مقدار واقعی رطوبت قابل دسترس در ناحیه ریشه خاک قابل محاسبه است (رابطه- ۱۰):

$$Ks[t] = \begin{cases} \frac{S[t]}{(1-p)*Smax[t]} & , S[t] < (1-p)*Smax[t] \\ 1 & , \text{other wise} \end{cases} \quad (۱۰)$$

در رابطه (۱۰)، Smax[t] ماکزیمم رطوبت قابل‌دسترس در ناحیه ریشه خاک در حالت ظرفیت زراعی زمین و p کسری از Smax است که در آن‌یک محصول می‌تواند آب موردنیاز خود را بدون تنش از منطقه ریشه جذب نماید. تبخیر- تعرق مرجع (ET_0) یک منطقه را می‌توان با اندازه‌گیری مستقیم و یا با تخمین با استفاده از یک مدل یا فرمول تجربی محاسبه نمود. ازآنجایی‌که اندازه‌گیری مستقیم تبخیر- تعرق

کاری پرهزینه می‌باشد، در اکثر موارد از روش‌های غیرمستقیم استفاده می‌شود. در ایـــن تحقیق به منظور محاسبه تبخیر و تعرق از روش فائو- پنمن- مانتیث استفاده گردید.

۳- نتایج

در این تحقیق ابتدا به بررسی ردّپای آب گندم در تمامی مراکز استان‌های کشور پرداخته شد. بدین ترتیب ردّپای آب آبی، آب سبز، و آب خاکستری گندم در هر ۳۳ ایستگاه (استان) محاسبه گردید. جدول ۲ نتایج حاصل از محاسبه ردپا در هر سه جزء آب آبی، سبز و خاکستری را نشان می‌دهد. آمار مربوط به عملکرد و غیره محصولات مربوط به متوسط دوره ۲۰ ساله ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۵ می‌باشدکه از آمارنامه‌های کشاورزی و وزرات جهاد کشاورزی اخذ گردیده‌اند.

مطابق جدول ۲، بیشترین مقدار ردّپای آب سبز مربوط به دو ایستگاه رشت و خرم‌آباد به ترتیب با مقادیر ۱۱۴۳/۶ و ۱۱۳۷/۲ متر مکعب بر تن و کمترین مقدار آن برای ایستگاه سمنان با ۶۶/۵ متر مکعب بر تن بدست آمده است. بیشترین مقدار ردّپای آب آبی نیز با ۳۳۴۹/۵ متر مکعب بر تن در ایستگاه یزد به‌دست آمد که نشان‌دهنده کمبود بارندگی و بالا بودن نیاز آبی گیاه در این ایستگاه می‌باشد. کمترین مقدار ردّپای آب آبی نیز برای ایستگاه ساری به‌دست آمده که به دلیل بالا بودن مقدار رطوبت و بارندگی و همچنین بالا بودن عملکرد محصول در این ایستگاه نسبت به سایر ایستگاه‌ها می‌باشد. نکته قابل توجه در بررسی بین هر دو جزء ردّپای آب آبی و سبز در تمامی ایستگاه‌ها، بالا بودن مقدار ردّپای آب آبی نسبت به ردّپای آب سبز می‌باشد که این نشان دهنده کم بودن نرخ بارش‌ها و حاکی از پایداری اقلیم خشک و نیمه‌خشک در تمامی استان‌های کشور از نظر کشاورزی می‌باشد. بنابراین، انتظار می‌رود که برای افزایش بهره‌وری محصول و همچنین کاهش اثرات اقلیمی بر عملکرد محصول، استفاده از کودهای شیمیایی کاری رایج در بین کشاورزان باشد.

لذا ردّپای آب خاکستری نیز باید به تبع آن رقم بیشتری باشد. نتایج حاصل از برآورد ردّپای آب خاکستری نشان داد که تغییرات ردّپای آب در تمامی استان‌ها تقریبا در یک طیف بوده کمترین مقدار آن برای ایستگاه ارومیه (۱۷۴/۸) و بیشترین مقدار آن برای ایستگاه زاهدان (۶۰۰/۳) مترمکعب بر تن برآورد گردید. لازم به ذکر است که مقادیر حاصل از برآورد ردّپای آب خاکستری در استان‌های جنوبی کشور بیشتر بوده که این به دلیل شور بودن اراضی و نیاز به آبشویی بیشتر و همچنین کم بودن عملکرد گندم به دلیل طول رشد کوتاه‌تر این محصول در این مناطق می‌باشد. میانگین ردّپای آب سبز، آبی و خاکستری نیز به ترتیب ۵۰۳/۳، ۱۳۹۲/۸ و ۲۸۶/۲ متر مکعب بر تن در کشور بدست آمد که در مقایسه با میانگین جهانی (میانگین جهانی رقم ردّپای آب سبز، آبی و خاکستری به ترتیب ۳۴۳، ۱۲۷۹ و ۲۰۸ متر مکعب بر تن می‌بـــاشد) رقم بالاتری بـــه حساب می‌آید (Rasooli Majd et al., 2015).

Table 2- Wheat's Blue, Green, and Gray Water Footprints in 33 stations at center of provinces (m^3/ton)

جدول ۲- ردپای آب آبی، سبز و خاکستری گندم در ۳۳ ایستگاه (مراکز استان‌ها). (متر مکعب بر تن)

Gray water	Blue water	Green water	Station	Gray Water	Blue water	Green water	Station
254.3	565.6	552.3	Arak	205.2	748.3	396.6	Ardebil
306.7	435.8	655.4	Gorgan	221.6	1170.3	632.9	Bojnord
411.9	572.7	703.3	Ilam	241.0	1211.8	594.3	Qazvin
228.1	940.7	439.8	Karaj	266.9	325.8	397.2	Hamedan
325.7	593.9	586.1	Kerman shah	309.4	992.7	713.0	Sanandaj
317.6	1308.9	1137.2	Khoram abad	263.4	1335.6	787.0	Shahre Kord
237.3	1342.7	542.7	Mashhad	204.7	1821.3	541.2	Tabriz
292.3	1302.2	418.2	Shiraz	174.8	1165.5	723.0	Urmia
405.0	529.8	978.2	Yasooj	234.0	1342.8	599.2	Zanjan
206.0	284.6	482.2	Birjand	208.4	1214.2	1143.6	Rasht
248.6	2212.9	215.8	Esfehan	267.5	283.7	822.4	Sari
215.1	1215.5	370.9	Tehran	264.0	1549.7	381.6	Ahvaz
340.0	3247.4	223.4	Kerman	446.3	1475.2	222.2	Bandar abbas
226.2	3349.5	66.5	Semnan	461.1	1574.4	521.4	Booshehr
600.3	2350.3	241.6	Zahedan	250.8	1539.3	248.7	Ghom
286.2	1392.8	530.3	Average country	237.7	2617.3	99.8	Yazd

به منظور بررسی روند تغییرات ردّپای آب، نقشه‌های پهنه‌بندی شده در هر سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری ترسیم شده و روند تغییرات ردپا در هر سه جزء در تمام پهنه ایران مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل‌های ۲ تا ۵، نقشه‌های پهنه‌بندی ردّپای آب را به ترتیب در سه جزء ردّپای آب آبی، آب سبز، آب خاکستری و حاصل جمع آن‌ها به صورت ردّپای آب کل را نشان می‌دهند.

مطابق شکل‌های ۲ تا ۵، روند تغییرات ردّپای آب آبی و آب سبز کاملاً برعکس بوده به طوری‌که در جاهایی که ردّپای آب آبی بیشتر است، ردّپای آب سبز کمتر بوده و برعکس که این نیز نشان‌دهنده تبعیت الگوهای ردّپای آب آبی و آب سبز از نزولات جوی می‌باشد. مطابق شکل‌های فوق، بیشترین مقادیر ردّپای آب آبی در قسمت‌های مرکزی و جنوبی ایران دیده می‌شود. قسمت‌های فوق در واقع مناطق بیابانی و اقلیم‌های گرم و خشک ایران را تشکیل می‌دهند که از نظر بارندگی حجم بارش کمتری را نسبت به سایر نقاط کشور دارند. این در حالی است که در بررسی ردّپای آب سبز، وضعیت کاملاً برعکس بوده و بیشترین مقدار ردّپای آب سبز در قسمت‌های شمالی و غربی کشور دیده می‌شود که همانطور که اشاره شد به دلیل بارش‌های فراوان در این مناطق می‌باشد.

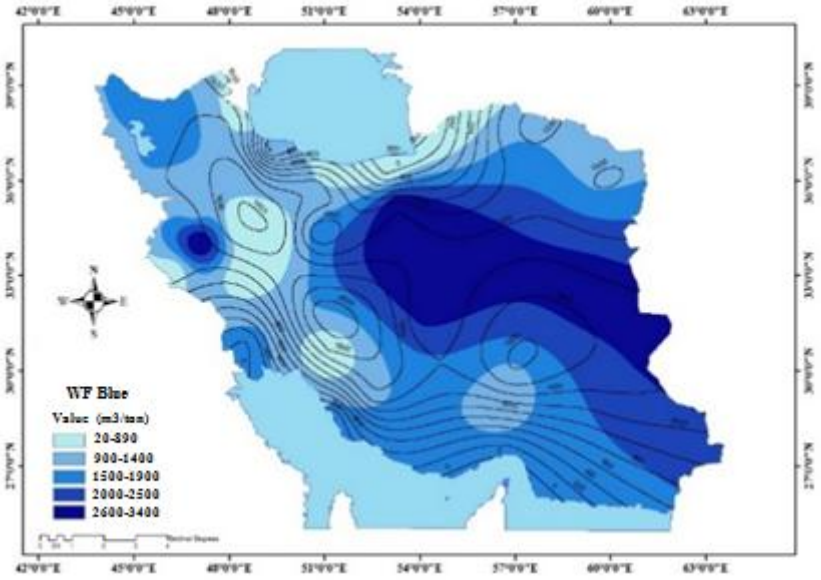

Fig. 2- Blue water footprint zones in Iran

شکل ۲- پهنه‌بندی ردّپای آب آبی در گستره ایران

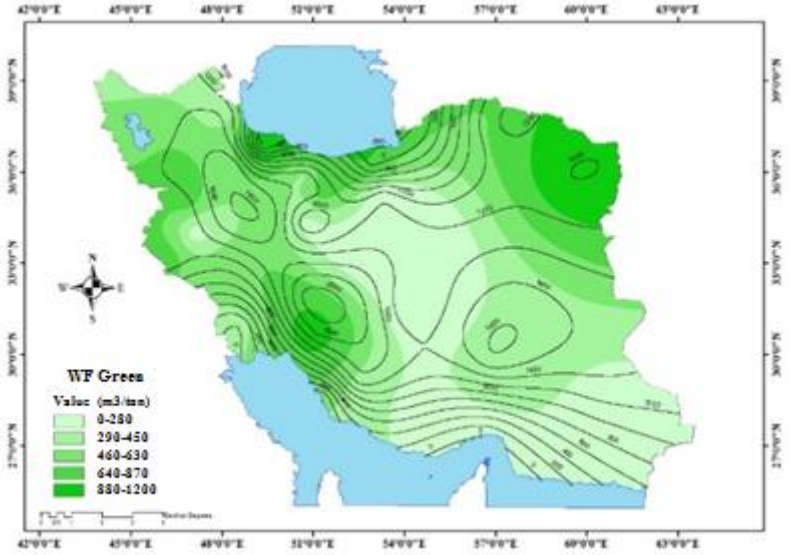

Fig. 3- Green water footprint zones in Iran

شکل ۳- پهنه‌بندی ردّپای آب سبز در گستره ایران

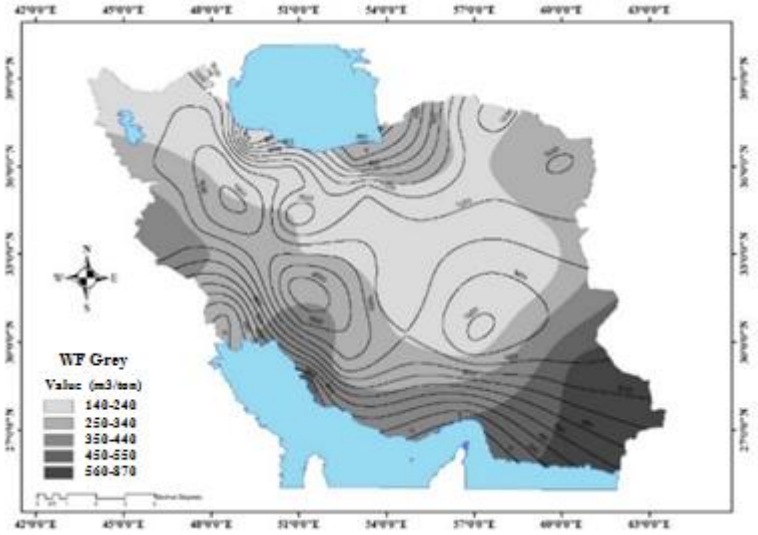

Fig. 4- Gray water footprint zones in Iran

شکل ۴- پهنه‌بندی ردّپای آب خاکستری در گستره ایران

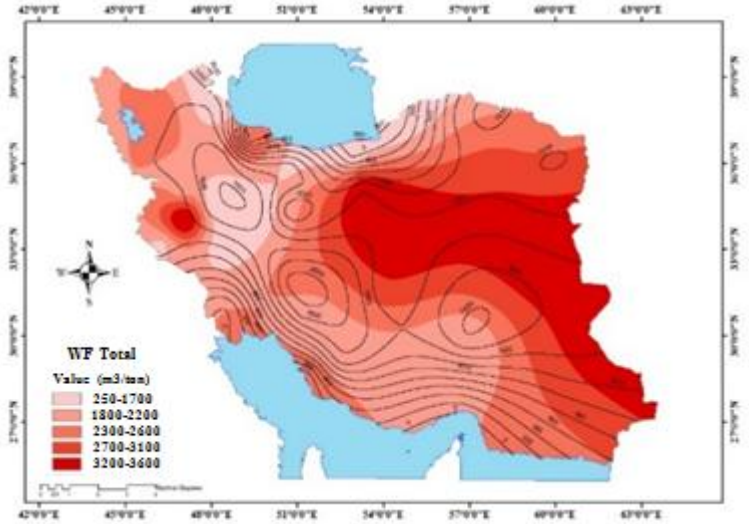

Fig. 5- Water footprint zones in Iran

شکل ۵- پهنه‌بندی ردّپای آب کل در گستره ایران

بررسی نقشه تغییرات ردّپای آب خاکستری نیز روند تقریباً مشابهی را با ردّپای آب سبز نشان می‌دهد با این تفاوت که بیشترین مقدار ردّپای آب خاکستری در قسمت‌های جنوبی کشور دیده می‌شود اما مشابه ردّپای آب سبز، ردّپای آب خاکستری نیز در مناطق مرکزی ایران کمتر است که به دلیل کمبود بارندگی، کشت کمتر و در نتیجه، مصرف کمتر از سموم و کود می‌باشد. ردّپای آب کل نیز همانطور که قبلا اشاره شد، حاصل جمع هر سه جزء ردّپای آب آبی، آب سبز و آب خاکستری می‌باشد و بنابراین روند تغییرات آن نیز باید بر اساس این سه جزء درکشور تغییر کند. این در حالی است که نقشه پهنه‌بندی ردّپای آب کل روندی مشابه روند تغییرات ردّپای آب آبی را دارد که این با توجه به نتایج جدول ۲ به دلیل بالا بودن مقادیر ردّپای آب آبی نسبت به ردّپای آب سبز و آب خاکستری بوده، به‌طوری‌که سهم این جزء (ردّپای آب آبی) در میزان تأثیرپذیری ردّپای آب کل بیشتر از ردّپای آب سبز و خاکستری می‌باشد. به منظور بررسی عوامل اقلیمی و تأثیر اقلیم منطقه در ردّپای آب گندم، ردّپای آب این محصول در سه جزء آب آبی، سبز و خاکستری و همچنین حاصل جمع آن‌ها به عنوان ردّپای آب کل در هر یک از ۶ اقلیم موجود در گستره ایران مورد محاسبه قرار گرفته و تغییرات آن مورد ارزیابی واقع شد. شکل‌های ۶ تا ۹ به ترتیب تغییرات ردّپای آب گندم را در سه جزء آب آبی، سبز و خاکستری و حاصل جمع آنها به عنوان ردّپای آب کل را در اقلیم‌های مختلف ایران نشان می‌دهد.

بررسی تغییرات ردّپای آب در اقلیم‌های مختلف نشان می‌دهد که بیشترین مقدار ردّپای آب آبی در اقلیم A-C-W و کمترین آن در اقلیم PH-C-W دیده می‌شود این در حالی است که بیشترین مقدار ردّپای آب سبز در اقلیم PH-C-W بوده که با توجه به بالا بودن نرخ بارش‌ها و کم بودن نیاز آبیاری گندم در این اقلیم (جدول ۱-) منطقی است. بیشترین مقدار ردّپای آب خاکستری نیز در اقلیم A-M-W دیده می‌شود.

بررسی ردّپای آب کل نیز بیشترین مقدار را برای اقلیم A-C-W و کمترین مقدار را برای اقلیم‌های PH-C-W و SA-C-VW نشان می‌دهد که با توجه به نتایج مطرح شده در مورد بالا بودن مقادیر ردّپای آب و تأثیرگذاری بیشتر ردّپای آب آبی در تغییرات ردّپای آب کل، کاملاً توجیه‌پذیر است.

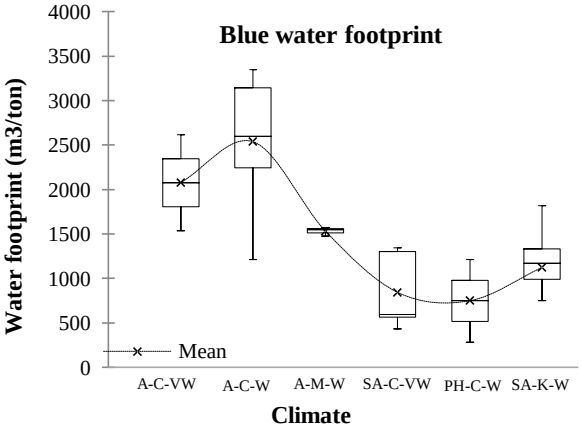

Fig. 6- Changes in water footprints in different climates

شکل ۶- تغییرات ردّپای آب آبی در اقلیم‌های مختلف

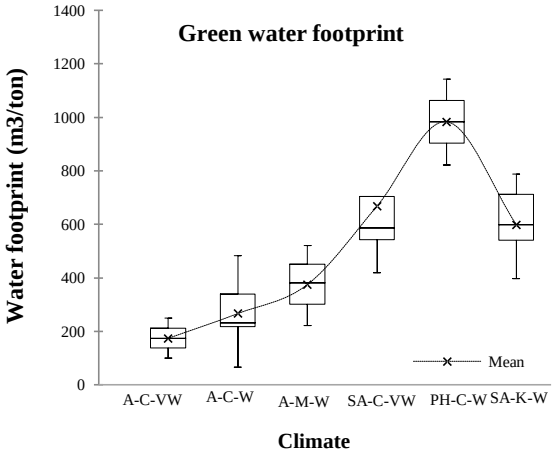

Fig. 7- Changes in greenhouse gas footprint in different climates

شکل ۷- تغییرات ردّپای آب سبز در اقلیم‌های مختلف

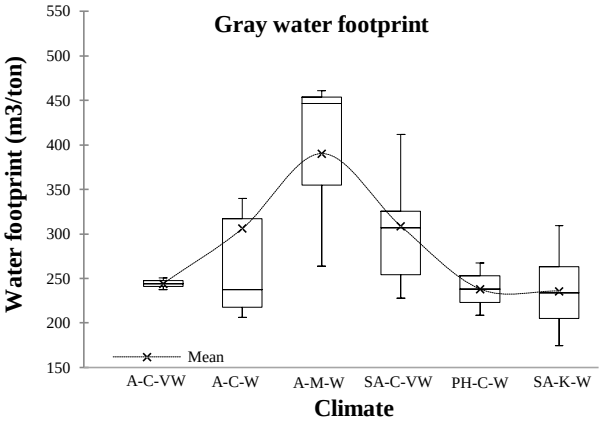

Fig. 8- Changes in the gray water footprint in different climates

شکل ۸- تغییرات ردّپای آب خاکستری در اقلیم‌های مختل

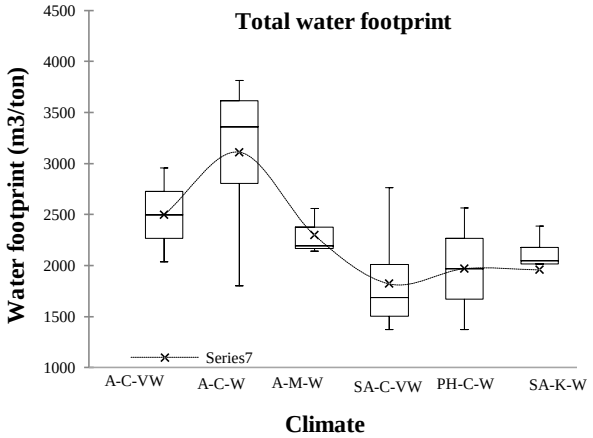

Fig. 9- Changes in total water footprint in different climates

شکل ۹- تغییرات ردّپای آب کل در اقلیم‌های مختلف

بررسی نمودارهای جعبه‌ای نشان می‌دهد که تغییرات ردپاهای آب آبی و سبز تقریباً در تمامی اقلیم‌ها نرمال بوده و در یک طیف ثابت می‌باشد (به جزء اقلیم (SA-C-VW) که در آن مقادیر ردّپای آب آبی اکثراً بیشتر از میانگین است). این در حالی است که تغییرات در مقادیر ردّپای آب خاکستری ایستگاه‌ها در اقلیم‌های یکسان در یک حد ثابتی نبوده و میزان تغییرپذیری آن قابل ملاحظه است. به منظور بررسی بیشتر این موضوع تغییرات ردّپای آب خاکستری در مقابل ردّپای آب آبی و سبز رسم گردید. شکل‌های ۱۰ تا ۱۶ تغییرات ردّپای آب خاکستری را به صورت نمودارهای حبابی در مقابل دو جزء ردّپای آب آبی و آب سبز نشان می‌دهند. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵، هرچه اندازه حباب بزرگتر باشد، نشان‌دهنده بیشتر بودن مقدار ردّپای آب خاکستری است، همانطور که از شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ مشاهده می‌شود، تغییرات ردّپای آب خاکستری در اکثر اقلیم‌ها تحت تأثیر ردّپای آب آبی و سبز می‌باشد.

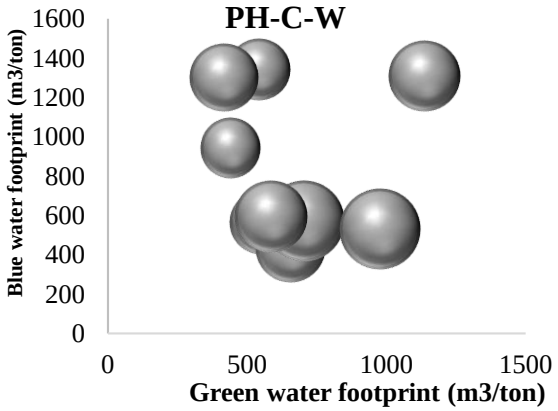

Fig. 13- Bubble chart of gray water footprint in the PH-C-W

شکل ۱۳- نمودار حبابی ردّپای آب خاکستری در اقلیم PH-C-W

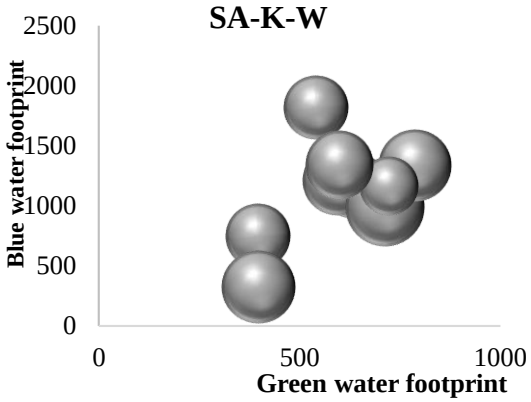

Fig. 10- Bubble chart of gray water footprint in the SA-K-W climate

شکل ۱۰- نمودار حبابی ردّپای آب خاکستری در اقلیم SA-K-W

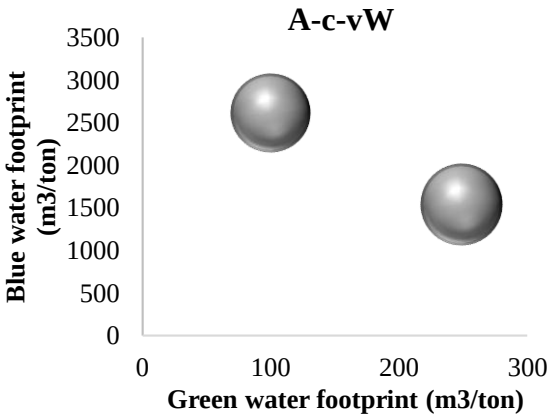

Fig. 14- Bubble chart of gray water footprint in A-C-VW climate

شکل ۱۴- نمودار حبابی ردّپای آب خاکستری در اقلیم A-C-VW

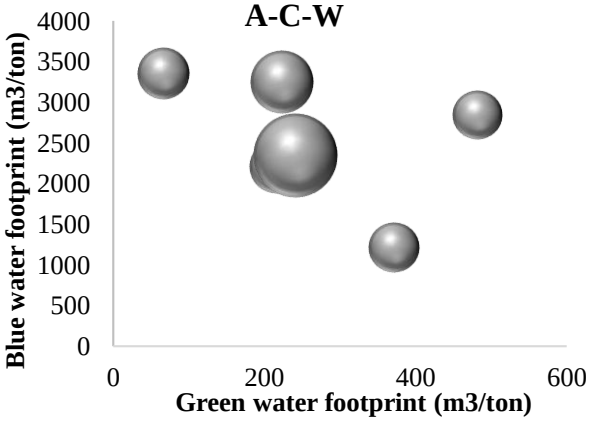

Fig. 11- Bubble chart of gray water footprint in A-C-W climate

شکل ۱۱- نمودار حبابی ردّپای آب خاکستری در اقلیم A-C-W

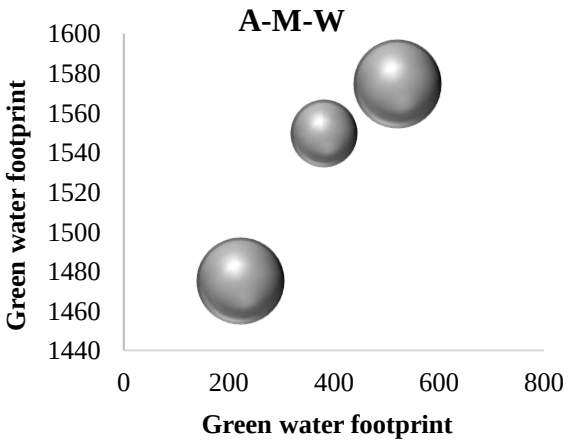

Fig. 15- Bubble chart of gray water footprint in the A-M-W climate

شکل ۱۵- نمودار حبابی ردّپای آب خاکستری در اقلیم A-M-W

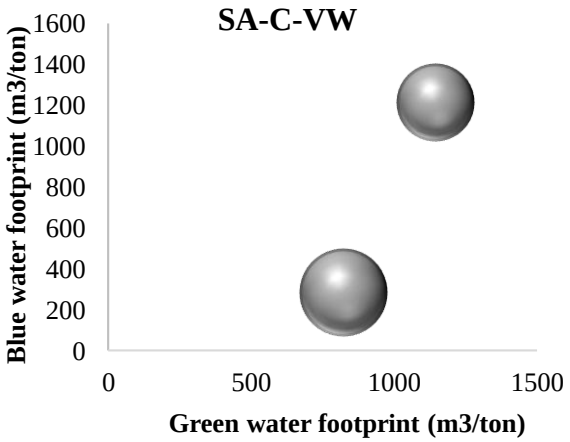

Fig. 12- Bubble chart of gray water footprint in the SA-C-VW climate

شکل ۱۲- نمودار حبابی ردّپای آب خاکستری در اقلیم SA-C-VW

به طوری که در اکثر اقلیم‌ها که میزان ردّپای آبی کمتر بوده و میزان ردّپای آب سبز بیشتر، ردّپای آب خاکستری نیز بیشتر می‌باشد که این در واقع حاکی از این موضوع است که کشاورزانی که در طی طول دوره رشد محصول گندم از منابع آب سبز بیشتر استفاده می‌نمایند، برای جبران تنش‌های وارده ناشی از آبیاری از کود و سموم بیشتر استفاده می‌کنند. این در حالی است که بررسی نمودار مربوط به اقلیم A-C-W روند متفاوتی را نشان می‌دهد که این به دلیل شور بودن اراضی و نیاز آبشویی بالا در خاک‌های این اقلیم می‌باشد. بنابراین در یک دید کلی می‌توان به این نتیجه رسید که در اکثر استان‌های ایران میزان ردّپای آب محصول گندم زیاد است که این به دلیل عملکرد کم آن محصول می‌باشد، لذا کشاورزان برای جبران عملکرد روی به استفاده بیشتر از کود و سموم می‌آورند که این شاید در دید اول باعث افزایش عملکرد محصول و کاهش ردّپا و آب مصرفی محصول گردد اما با افزایش ردّپای آب خاکستری، میزان ردّپای آب کل محصول افزایش می‌یابد و در صورت عدم آبشویی می‌تواند در درازمدت باعث تخریب منابع خاک شود. بنابراین، لازم است که با دید کلی و با در نظر گرفتن سیاست‌های بلندمدت و آگاهانه با رویکردهای مطابق با توسعه پایدار، مسائل را بررسی کرده و مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در همین راستا و به منظور بررسی دقیق‌تر وضعیت کشت و تولید محصول گندم، میزان ردپاهای آب آبی، سبز و خاکستری این محصول دراقلیم‌های مختلف با هم مقایسه گردید. برای این منظور نمودارهای مثلثی مربوط به هر اقلیم به‌دست آمد. شکل‌های ۱۶ تا ۲۱، وضعیت کلی تولید محصول گندم در اقلیم‌های مختلف از نظر ردّپای آب آبی، سبز و خاکستری نشان می‌دهند. در نمودارهای فوق هر ضلع نمودار نشان‌دهنده وضعیت گیاه از نظر یکی از سه جزء ردّپای آب آبی، سبز و خاکستری است. بنابراین، می‌توان گفت که هر چه پراکندگی داده‌ها (ایستگاه‌ها) به سمت ردّپای آب سبز باشد، بهتر بوده و اگر به سمت ردّپای آب خاکستری و آبی متمایل باشند، وضعیت ایستگاه‌ها از نظر کشت محصول گندم نامناسب می‌باشد. بهترین حالت هم زمانی است که پراکندگی داده‌ها در وسط مثلث و در جایی بین میانه تمامی اضلاع نمودارهای مثلثی باشد.

با توجه به نمودارهای ۱۶ تا ۲۱ در دو اقلیم A-C-W و A-C-VW پراکنش ایستگاه‌ها به سمت ردّپای آب آبی بوده و در واقع این اقلیم‌ها برای تولید گندم از آب آبی با نسبت بسیار بیشتری در مقابل با آب سبز استفاده می‌نمایند اما هرچه به اقلیم‌های سردتر و مرطوب‌تر می‌رویم شرایط بهتر شده و پراکنش داده‌ها در میانه نمودارهای مثلثی قرار می‌گیرد. نکته قابل توجه در شکل‌های ۱۶ تا ۲۱ زیاد بودن نرخ مصرف آب آبی در دو اقلیم A-C-W و A-C-VW بوده که این میزان به‌قدری بـــالاست که حتی اثرات ردّپای آب خاکستری را کمتر کرده و بعد از

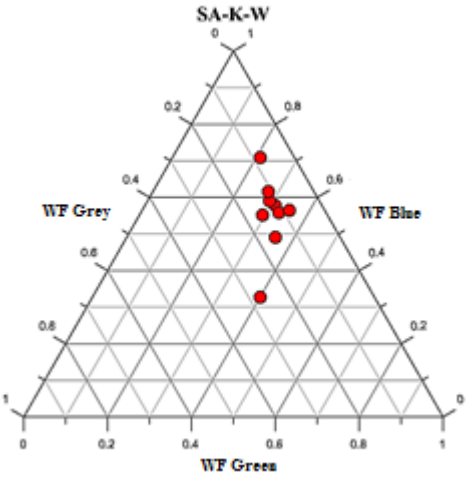

Fig. 16- Triangular diagram of wheat water footprint in the SA-K-W climate

شکل ۱۶- نمودار مثلثی ردّپای آب گندم در اقلیم SA-K-W

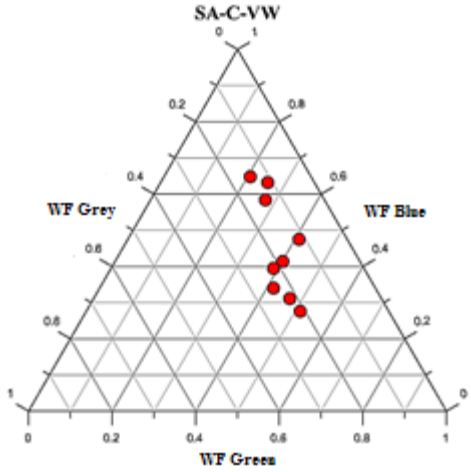

Fig. 17- Triangular diagram of wheat water footprint in the SA-C-VW climate

شکل ۱۷- نمودار مثلثی ردّپای آب گندم در اقلیم SA-C-VW

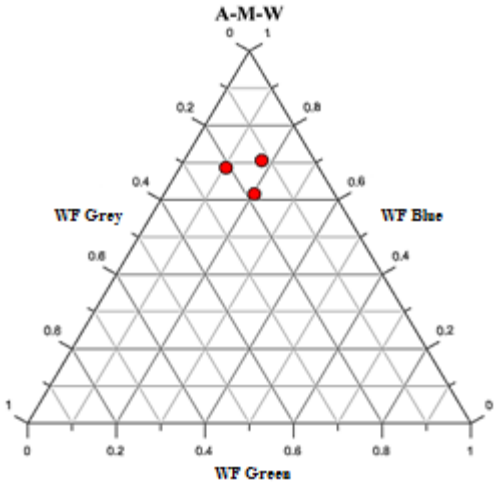

Fig. 18- Triangular diagram of wheat water footprint in the A-M-W climate

شکل ۱۸- نمودار مثلثی ردّپای آب گندم در اقلیم A-M-W

استانداردسازی داده‌ها به کمترین حد ممکن رسانده است. بنابراین می‌توان گفت که کشت محصول گندم در این دو اقلیم مناسب نبوده به‌طوری که حتی با افزودن کود و مواد شیمیایی نیز در این دو اقلیم نمی‌توان به تولید محصول گندم با ردّپای آب کمتر و شرایط بهینه‌تر پرداخت.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بررسی ردّپای آب محصول گندم در مراکز استان‌های مختلف ایران نشان می‌دهد که مقدار آب مصرفی واقعی این محصول در سه جزء آب آبی، آب سبز و آب خاکستری در مناطق و اقلیم‌های مختلف ایران یکسان نبوده و بسته به نوع اقلیم، وضعیت آب و هوایی و نحوه کشت و زرع این محصول متفاوت است. بنابراین لزوم مدیریت کشت این محصول در اقلیم‌های مختلف ایران امری لازم و ضروری بوده که همواره باید مدنظر مسئولین و مدیران امر قرار گیرد. چراکه مطابق با نتایج این تحقیق کشت محصول گندم در همه نقاط و در همه اقلیم‌ها مناسب نبوده و لذا کشت ایـــن محصول در اقلیم‌های A-C-W و A-C-VW ایران توصیه نمی‌گردد. لذا لازم است که مسئولین امر در جهت حفظ خودکفایی این محصول در کشور، الگوی کشت بهینه این محصول را متناسب با اقلیم مناطق و با در نظر گرفتن آب واقعی مصرفی و مقادیر ردّپای آب آبی، سبز و خاکستری، برنامه‌ریزی نمایند. قابل ذکر است که با توجه به آمارنامه‌های جهادکشاورزی و آمار اخذشده از وزارت جهادکشاورزی، محصول گندم در تمامی استان‌ها و در تمامی اقلیم‌های کشور مورد کشت و زرع واقع شده در طی سالیان اخیر برنامه دولت بر روری خودکفایی این محصول بوده و لذا برنامه‌ریزی‌های دولتی عموما معطوف به تبلیغ و ترغیب کشاورزان همه استان‌ها بر روری این محصول بوده، لذا پیشنهاد فوق در این راستا مطرح شده است که کشت این محصول با توجه به اهمیت استراتژیک آن لازم بوده اما نه در همه اقلیم‌ها و به هر قیمتی و باید حداقل در اقلیم‌های مورد اشاره در نتیجه‌گیری این مقاله از کشت این محصول خودداری کرد تا در حفظ منابع ارزشمند آب کشور قدم مؤثر برداشت.

در انتها لازم به ذکر است که در کنار استفاده متداول و معمول از شاخص‌ها و مدل‌های جدید برای رفع تنش‌های موجود در سیستم‌های منابع آب بایستی به فرصت‌ها و چالش‌های موجود برای توسعه استفاده از این مدل‌ها و ترکیب آن‌ها با سیستم‌های مدیریتی و اطلاعاتی نوین نیز توجه داشته و از آن‌ها نیز استفاده نمود چراکه برای رسیدن به توسعه پایدار در زمینه سیستم‌های آبی جنبه‌های مبهمی چون در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی، فرهنگی، سیاسی و اجتماعی وجود دارند،

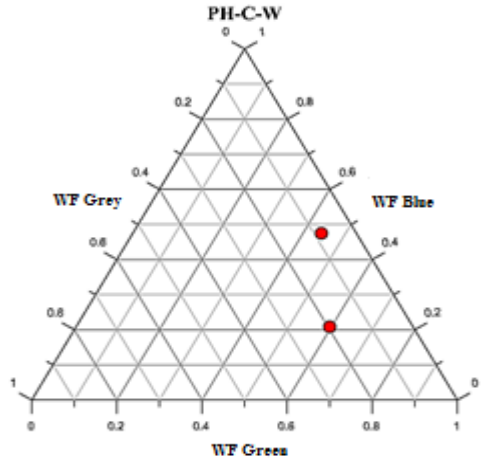

Fig. 19- Triangular diagram of wheat water footprint in the PH-C-W region

شکل ۱۹- نمودار مثلثی ردّپای آب گندم در اقلیم PH-C-W

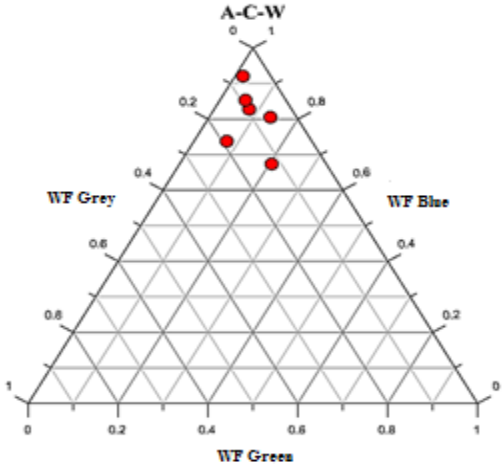

Fig. 20- Triangular diagram of wheat water footprint in the A-C-W climate

شکل ۲۰- نمودار مثلثی ردّپای آب گندم در اقلیم A-C-W

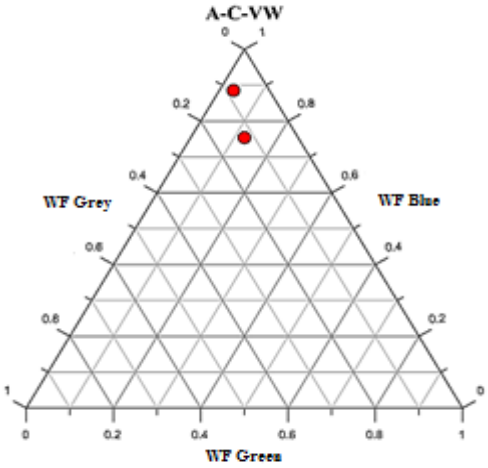

Fig. 21- Triangular diagram of wheat water footprint in the A-C-VW climate

شکل ۲۱- نمودار مثلثی ردّپای آب گنـــــدم در اقلیم A-C-VW

که برای رسیدن به اهداف واقعی جامع‌نگری در مدیریت منابع آب نیاز به شناسایی و ملحوظ کردن آن‌ها در مدل‌های بهینه‌سازی و بهره‌برداری از منابع آب می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

1- Very Humid- Cool- Warm
2- Semi Arid- Cold- Warm
3- Semi Arid- Cool- Very Warm
4- Arid- Cool- Warm
5- Arid- Mild- Warm
6- Arid- Cool- Very Warm

۵- مراجع

Aligholinia T, Rezaie H, Bahmanesh J, Montaseri M (2015). Sustainable management of water resources in order to maximize water extraction with a water footprint approach. Master's thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University (In Persian)

Allen R G, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration (Guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage, FAO

Arabi A, Nikniya N (2010) A global perspective on water consumption; water footprint, an indicator of the impact of the pattern of national consumption on world water resources. The 5th National Geographic Congress May 14th to May 16th, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (In Persian)

Chapagain A K, Hoekstra AY (2012) The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. Journal of Ecological Economics 70:749-758

Chico D, Aldaya M, Garrido A (2013) A water footprint assessment of a pair of jeans: the influence of agricultural policies on the sustainability of consumer products. Journal of Cleaner Production 57:238-248

Ene AS, Teodosiu C, Robu b, Volf I (2013) Water footprint assessment in the winemaking industry: a case study of office paper. Journal of Cleaner Production 24:30-35

Herath I, Green S, Horne D, Singh R, Clothier B (2014) Quantifying and reducing the water footprint of rain-fed potato production, Part I: Measuring the net use of blue and green water. Journal of Cleaner Production 81:111-119

Hoekstra AY, Chapagain AK (2007) Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. Journal of Water Resources Management 21(1):35-48

Hoekstra AY, Hung PQ (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

Jefferies D, Munoz I, Hodges J, King VJ, Aldaya M, Ercin AE, Canals LMI, Hoekstra AY (2012) Water footprint and life cycle assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption. Key learning points from pilot studies on tea and margarine. Journal of Cleaner Production 33:155-166

Nana E, Corbari C, Bocchiola D (2014) A model for crop yield and water footprint assessment: Study of maize in the Po valley. Journal of Agricultural Systems 127:139-149

Rasooli Majd N, Montaseri M, Bahmanesh J, Rezaei H (2015) Identification and evaluation of the water footprint index, broken down by water, green water and gray water, by applying climate change. Master's Thesis, Faculty of Agriculture, Urmia University (In Persian)

Razavi SS, Davari K (2013) The role of virtual water in managing water resources. Journal of Water and Sustainable Development 1:9-18 (In Persian)

Rodriguez CI, de Galarreta VR, Kruse EE (2015) Analysis of water footprint of potato production in the Pampean region of Argentina. Journal of Cleaner Production 90:91-96

Rouhani N, Yang H, Amin Sichani S, Afyouni M, Mousavi F, Kamgar Haghighi A (2008) Evaluating the exchange of food and water based on available water resources in Iran. Journal of Agricultural Science and Technology 12(46):417-432 (In Persian)

Sohrabi R (2007) Preparing a mathematical model for calculating the optimal use of virtual water in supplying the water needed by the region in terms of economic. Social and Food Security Conditions (Case study: Isfahan Province) Master's Degree, Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology (In Persian)

Zare Abyaneh H, Bayat varkeshi M, Sabzi Parvar AK, Maroufi S, Ghasemi A (2010) Estimation of estimation methods of evapotranspiration of the reference plant and its zoning in Iran. Natural Geographic Research 74:110-95 (In Persian)