Iranian Journal of Soil and Water Research ISNN: 2423-7833
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

Estimating the Blue and Green Water Footprint of Rice in the Agro-Ecological Zones (AEZ) of Iran

Mohammadreza Khodadadi Balanaghibi[1] | Afshin Soltani[2]✉ | Ebrahim Zeinali[3]

1. Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: m.kho1363@yahoo.com
2. Corresponding Author, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: afshin.soltani@gmail.com
3. Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran. E-mail: e.zeinali@yahoo.com

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 26, 2024

Revised: Aug. 12, 2024

Accepted: Aug. 27, 2024

Published online: Dec. 2024

Keywords:
Blue Water Footprint,
Evapotranspiration,
Green Water Footprint,
Volume of Net Applied Irrigation Water,
Yield.

ABSTRACT

After wheat, rice is the main food of Iranian people and has a special role in nutrition, income and job creation in the agricultural sector. Despite the undeniable importance of this crop, it is considered one of the water-intensive plants in the agricultural sector, and due to the water crisis in the country, the continuation of the cultivation of this crop in many regions of the country is facing many problems. The purpose of this research was to evaluate the potential yield (yield in the absence of water, nutrients, pests and diseases) and to estimate the blue and green water footprint of rice in the agro-ecological zones (AEZ) of the entire country. Water footprint calculations were done with the SSM-iCrop2 model for the time period of 2006-2015. The results show that parts of the northern regions of the country, such as Gilan, Mazandaran and Golestan provinces, which are located in the vicinity of the Caspian Sea, have less blue water footprint and more green water footprint, and are suitable areas for rice cultivation. Other provinces of the country, such as Khuzestan, Bushehr, Fars and South Khorasan, which are mainly located in the warm regions of the country, have more blue water footprints and less green water footprints, therefore, these provinces are not suitable for rice cultivation at all.

Cite this article: Khodadadi Balanaghibi, M., Soltani, A., & Zeinali, E. (2024). Estimating the Blue and Green Water Footprint of Rice in the Agro-Ecological Zones (AEZ) of Iran., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (10), 1719-1741. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377040.669719

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377040.669719

EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

After wheat, rice is the main food of Iranian people and has a special role in nutrition, income and job creation in the agricultural sector. Despite the undeniable importance of this crop, it is considered one of the water-intensive plants in the agricultural sector, and due to the water crisis in the country, the continuation of the cultivation of this crop in many regions of the country is facing many problems. The purpose of this research was to evaluate the potential yield (yield in the absence of water, nutrients, pests and diseases) and to estimate the blue and green water footprint of rice in the agro-ecological zones (AEZ) of the entire country.

Materials and Methods:

By using the GYGA climate map and the HC27 soil map and the combination and overlap of these maps, 198 polygons or zones were finally obtained for the agricultural lands of the entire country. In this research, the rice crop was cultivated in virtual form in these zones to evaluate its yield, volume of net applied irrigation water, evapotranspiration, and blue and green water footprints. These 198 zones are covered by 130 meteorological stations and the information collected from these zones was used for simulation. The data required in this research were collected in four groups: 1- meteorological data, 2- soil data, 3- plant data, and 4- management data. Water footprint calculations were done with the SSM-iCrop2 model for the time period of 2006-2015.

Results:

The yield potential of paddy was estimated between 17 and 5527 kg/ha for low yield cultivars in the whole country and between 2682 and 10173 kg/ha for high yield cultivars. The blue water footprint for low yield cultivars in the whole country fluctuated between 446 m3/t and 27268 m^3/t. The blue water footprint for high yield cultivars was also 223 m^3/t to 2170 m^3/t. Furthermore, the amount of green water footprint for low yield cultivars in the whole country was estimated between 51 and 5835 m^3/t, and this amount for high yield cultivars was estimated between 29 and 265 m^3/t.

Conclusion:

The results show that parts of the northern regions of the country, such as Gilan, Mazandaran and Golestan provinces, which are located in the vicinity of the Caspian Sea, have less blue water footprint and more green water footprint, and are suitable areas for rice cultivation. Other provinces of the country, such as Khuzestan, Bushehr, Fars and South Khorasan, which are mainly located in the warm regions of the country, have more blue water footprints and less green water footprints, therefore, these provinces are not suitable for rice cultivation at all. By estimating the water footprint of this crop, while identifying and distinguishing the regions of the country and with necessary planning, rice cultivation should be limited and stopped in areas that have high water consumption.

Author Contributions

Conceptualization, M.Kh.B., A.S. and E.Z.; methodology, M.Kh.B. and A.S.; software, M.Kh.B. and A.S.; validation, M.Kh.B. and A.S.; formal analysis, M.Kh.B. and A.S.; investigation, M.Kh.B. and A.S.; resources, M.Kh.B.; data curation, M.Kh.B. and A.S.; writing—original draft preparation, M.Kh.B.; writing—review and editing, M.Kh.B., A.S. and E.Z.; visualization, M.Kh.B. and A.S.; supervision, A.S.; project administration, A.S.; funding acquisition, A.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers and editor for their critical comments that helped to improve the paper. The authors gratefully acknowledge the support and facilities provided by the Department of Agronomy, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، دوره ۵۵، شماره ۱۰ شاپا: ۷۸۳۳-۲۴۲۳
Homepage: http://ijswr.ut.ac.ir

برآورد ردپای آب آبی و سبز برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور

محمدرضا خدادادی بالانقیبی[۱] | افشین سلطانی[۲]✉ | ابراهیم زینلی[۳]

۱. گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: m.kho1363@yahoo.com

۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: afshin.soltani@gmail.com

۳. گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: e.zeinali@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۲۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۶
تاریخ انتشار: دیماه ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:
تبخیر تعرق،
حجم آب آبیاری کاربردی خالص،
ردپای آب آبی،
ردپای آب سبز،
عملکرد.

چکیده

برنج پس از گندم، غذای اصلی مردم ایران است و نقش ویژه‌ای در تغذیه، درآمد و اشتغال‌زایی در بخش کشاورزی دارد. علی‌رغم اهمیت غیرقابل‌انکار این محصول زراعی، یکی از گیاهان آب بر در بخش کشاورزی به شمار می‌آید و با توجه به بحران آب در کشور، تداوم کشت این محصول در بسیاری از مناطق کشور با مشکلات متعددی رو به رو می‌باشد. هدف از انجام این پژوهش ارزیابی عملکرد پتانسیل (عملکرد در شرایط عدم محدودیت آب، عناصر غذایی، آفات و بیماری‌ها) و تخمین ردپای آب آبی و سبز برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور بوده است. محاسبات ردپای آب، با مدل SSM-iCrop2 برای محدوده زمانی ۱۳۸۵-۱۳۹۴ (۲۰۰۶-۲۰۱۵) صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد بخش‌هایی از مناطق شمالی کشور، مانند استان‌های گیلان، مازندران و اندکی نیز گلستان که در مجاورت دریای خزر قرار دارند از ردپای آب آبی کمتر و در مقابل از ردپای آب سبز بیشتر برخوردار می‌باشند و محدوده مناسب برای کشت برنج در کشور را تشکیل می‌دهند. سایر استان‌های کشور نیز مانند استان‌های خوزستان، بوشهر، فارس و خراسان جنوبی که عمدتاً در نواحی گرم کشور قرار گرفتند دارای ردپای آب آبی بیشتر و نیز ردپای آب سبز کمتر می‌باشند از این رو، این استان‌ها به هیچ عنوان برای کشت برنج مناسب نمی‌باشند.

استناد: خدادادی بالانقیبی، محمدرضا؛ سلطانی، افشین؛ و زینلی، ابراهیم (۱۴۰۳). برآورد ردپای آب آبی و سبز برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۱۰)، ۱۷۴۱-۱۷۱۹. https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377040.669719

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
© نویسندگان.
DOI: https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.377040.669719

مقدمه

برنج از قدیمی‌ترین گیاهان زراعی و پس از گندم بیشترین سطح زیر کشت اراضی کشاورزی جهان را به خود اختصاص داده است. این محصول غذای اصلی میلیون‌ها نفر در جهان است و نقش بارزی در تغذیه، درآمد و اشتغال‌زایی مردم جهان، از جمله کشور ایران دارد (عرفانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۷). برنج ماده غذایی اصلی بیش از نیمی از جمعیت دنیا است و ۲۵ تا ۶۰ درصد از کالری موردنیاز روزانه ۲/۷ میلیارد نفر در جهان از آن تأمین می‌شود (FAO, 2020). برنج به عنوان دومین محصول استراتژیک کشور، جایگاه ویژه‌ای در سبد غذایی مردم ایران به خصوص استان‌های مازندران و گیلان دارد. سطح زیر کشت ارقام مختلف برنج در کشور ۸۵۴۸۷۴ هکتار و میزان تولید آن ۴۵۶۰۶۹۳ تن برآورد گردیده است. متوسط عملکرد شلتوک در ایران ۵۳۳۵ کیلوگرم در هکتار است و استان‌های مازندران و گیلان از مناطق مهم تولید برنج هستند، همچنین استان‌های خوزستان، گلستان و فارس در رتبه‌های بعدی قرار دارند (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۰).

افزایش جمعیت و نیز افزایش فعالیت‌های اقتصادی – اجتماعی، بحران آب را به یک مشکل بزرگ در جهان تبدیل نموده است. برای پاسخگویی به چالش‌های کمبود آب شیرین که در آینده با آن روبرو هستیم، کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (حکمت نیا و همکاران، ۱۳۹۹). آب مایه حیات است و در کشاورزی نیز بسیار اهمیت دارد. تولید صورت نمی‌گیرد مگر این‌که آب وجود داشته باشد. در ایران، ۹۲ درصد برداشت آب برای کشاورزی و ۶ درصد برای شرب و مصارف خانگی و نیز ۲ درصد برای صنعت استفاده می‌شود. بنابراین کشاورزی، مهم‌ترین برداشت کننده آب کشور است (سلطانی و میرزائی، ۱۴۰۰). با توجه به این‌که بیشتر مناطق کشور خشک و نیمه‌خشک می‌باشند محدودیت آب به عنوان نهاده اصلی، مهم‌ترین عامل محدودکننده تولید محصولات کشاورزی است. از این رو، توجه به نیاز آبی و بهره‌وری آب در محصولات کشاورزی برای سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی در بخش کشاورزی حائز اهمیت است (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۷).

به دلیل میزان بارندگی اندکی که در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان اتفاق می‌افتد، کشاورزی شدیداً به آبیاری و استحصال آب‌های زیرزمینی وابستگی دارد (حکمت نیا و همکاران، ۱۳۹۹). وزارت نیرو حجم آب قابل‌برنامه‌ریزی برای کشاورزی را ۶۲ میلیارد مترمکعب در سال تعیین نموده است این در حالی است که ۲۸ درصد بیشتر از این مقدار یعنی ۸۶ میلیارد مترمکعب در سال برای فعالیت‌های کشاورزی مورد مصرف قرار می‌گیرد. از سوی دیگر حد پایدار برداشت آب برای کشاورزی کشور کمتر از ۴۰ میلیارد مترمکعب در سال است ولی برداشت کنونی، دو برابر حد مجاز برداشت است (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ سلطانی و میرزائی، ۱۴۰۰). مهم‌ترین مشکل که در مورد زوال و تخریب منابع آب وجود دارد برداشت بیش از حد آن است که مهم‌ترین مشکل در کشور به شمار می‌رود. تقریباً هرگونه تخریب که در محیط اطراف و طبیعت کشور مشاهده می‌گردد ناشی از برداشت بیش از حد آب است (سلطانی و میرزائی، ۱۴۰۰).

برنج یکی از محصولات آب بر در بخش کشاورزی به حساب می‌آید. نیاز آبی برنج بیشتر از سایر غلات است و مقدار آب موردنیاز برای آن، تحت تأثیر عوامل متعددی مانند رقم، اقلیم و نوع کشت قرار می‌گیرد (شیخ زین‌الدین و قیاسی، ۱۴۰۲). روش‌های مختلف آبیاری نیز بر میزان آب مصرفی تأثیرگذار است. برای مثال، یکی از بهترین راهکارهای موجود برای کاهش مصرف آب در کشت برنج، تغییر روش آبیاری غرقاب دائم به روش آبیاری تناوبی با دور مناسب هر یک از ارقام است (عرفانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۷). سلطانی و همکاران (۱۳۹۸) گزارش نمودند که ۱۲ درصد منابع آبی کشور به تولید برنج اختصاص می‌یابد. این مقدار برای استان‌های شمالی کشور به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد. میانگین نیاز آبی خالص برنج در کشور در مناطق تولید فعلی این گیاه زراعی توسط سلطانی و همکاران (۱۳۹۷) ۹۹۱۰ مترمکعب در هکتار برآورد گردیده است. پیش‌بینی می‌شود این مقدار در اثر تغییراقلیم ۵ درصد افزایش یابد (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۷؛ سلطانی و همکاران، ۱۳۹۸). این در حالی است که هیئت وزیران مناطقی از کشور را برای کشت برنج که مصرف آب در آن‌ها بیشتر از ۷۰۰۰ مترمکعب در هکتار باشد غیرمجاز دانسته‌اند.

درک صحیح از عملکرد گیاهان زراعی و نیاز آبی آن‌ها برای رسیدن به کشاورزی پایدار بسیار قابل اهمیت است. ردپای آب یکی از شاخص‌های نشان‌دهنده کارایی مصرف آب است که برآورد میزان دقیق آن در اقلیم‌ها و سیستم‌های زراعی مختلف از جمله دیم و آبی می‌تواند در مدیریت منابع آب تأثیرگذار باشد. مقدار ردپای آب به طور قابل‌توجهی تحت تأثیر فاکتورهای مختلف شامل خاک، اقلیم و روش‌های مدیریتی قرار می‌گیرد (رحیمی مقدم و همکاران، ۱۴۰۲).

ردپای آب (Water Footprint) ابزاری قدرتمند برای کمک به مدیریت و برنامه‌ریزی پایدار آب در سطح ملی، منطقه‌ای یا حوزه‌های آبخیز یا برای محصولات خاص است (Hoekstra & Mekonnen, 2012). ردپای آب معیاری برای آب شیرین مصرفی است که نه تنها

به مصرف مستقیم آب توسط یک مصرف‌کننده یا تولیدکننده توجه می‌کند، بلکه آب مصرفی غیرمستقیم را نیز در نظر می‌گیرد. ردپای آب یک محصول، حجم آب شیرینی است که برای تولید واحد آن محصول به کار برده می‌شود که در کل زنجیره تولید آن محصول اندازه‌گیری می‌شود (کاراندیش و همکاران، ۱۳۹۹).

آب آبی، آب سبز و آب خاکستری، ردپای آب یک محصول را تشکیل می‌دهند (Van Oel et al., 2009). ردپای آب آبی، معیاری از میزان آب آبی مصرفی است که شامل آب‌های شیرین سطحی و یا زیرزمینی است. ردپای آب سبز، به مصرف منابع آب سبز اشاره می‌کند. منظور از آب سبز، بخشی از آب باران است که تبدیل به رواناب نشده و یا باعث تغذیه آب‌های زیرزمینی نمی‌شود، بلکه در خاک ذخیره شده و یا به صورت موقت، در سطح خاک یا پوشش گیاهی باقی می‌ماند. در نهایت، این بخش از باران، تبخیر شده و یا از طریق گیاهان تعرق می‌شود. ردپای آب خاکستری نیز به آلودگی آب توجه داشته و حجم آب شیرین موردنیاز برای پذیرش بار آلاینده‌ها در منبع آبی است که در آن، مقادیر معینی که غلظت‌های طبیعی و مجاز آن آلاینده‌ها محسوب می‌شوند تعریف شده است (کاراندیش و همکاران، ۱۳۹۹).

تا کنون مطالعات اندکی در رابطه با ردپای آب برنج در جهان و به ویژه در ایران انجام گرفته است که می‌توان به پژوهش‌های (Mekonnen & Hoekstra, 2011)، (Ewaid et al., 2021)، (Li et al., 2018)، (Sidhu et al., 2021)، (شیخ زین‌الدین و قیاسی، ۱۴۰۲) و (رحیمی پول و همکاران، ۱۳۹۶) اشاره نمود.

برای تولید مطلوب و ایجاد پایداری آن، می‌بایست شرایط محیطی و نیز آب و هوایی از بعد قابلیت‌ها و محدودیت‌ها مشخص شوند. سپس بر اساس شباهت‌های موجود، مناطق همسان در یک گروه قرار می‌گیرند و نوعی طبقه‌بندی یا پهنه‌بندی اقلیمی انجام می‌شود. اگر پهنه‌بندی بر مبنای شاخص‌های اقلیمی و همچنین خاکی باشد، پهنه‌بندی مذکور را زراعی – بوم‌شناختی یا زراعی – اکولوژیک می‌نامند که به منظور شناسایی پتانسیل‌ها و محدودیت‌های منابع زمینی در جهت بهبود تولیدات کشاورزی است (Williams et al., 2008).

لزوم مطالعه میزان تولید و ظرفیت هر کدام از مناطق کشور برای تولید محصولات کشاورزی با توجه به وضعیت اقلیمی، شرایط مدیریتی تولید، زمین قابل‌دسترس، مقدار آب موجود و غیره و نیز برنامه‌ریزی دقیق کاملاً احساس می‌شود. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی می‌تواند در جهت سرعت بخشیدن به روند مطالعات و کاهش هزینه‌های اجرای آن‌ها و همچنین افزایش دقت انجام کار کمک شایانی نماید (پراور و همکاران، ۱۴۰۲).

بر اساس مطالب فوق، با توجه به اهمیت و جایگاه ویژه‌ای که برنج به عنوان دومین غله پرمصرف در سبد غذایی ایرانیان دارا می‌باشد و نیز به دلیل این‌که با شرایط بحرانی کمبود آب در نظام‌های تولید روبرو است، هدف از انجام این پژوهش ارزیابی عملکرد پتانسیل و تخمین ردپای آب آبی و سبز برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور بوده است. در این پژوهش عملکرد، حجم آب آبیاری کاربردی خالص، تبخیر تعرق و ردپای آب آبی و سبز برآورد گردیده است و بر اساس آن‌ها پهنه‌های اگرواکولوژیک یا زراعی – بوم‌شناختی کشور از یکدیگر مورد تمایز قرار گرفتند. نتایج نشان خواهد داد که در هر یک از ایستگاه‌ها (بافر) و نیز مناطق اقلیمی کشور، به ازای تولید هر واحد محصول چه مقدار آب آبی و همچنین آب سبز مورد مصرف قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است به دلیل گستردگی کار و عدم امکان جمع‌آوری اطلاعات، ردپای آب خاکستری از اهداف پژوهش حاضر نبوده است و از برآورد این جزء از ردپای آب صرف‌نظر گردیده است.

مواد و روش‌ها

با استفاده از نقشه اقلیمی GYGA[۱] و نیز نقشه خاک HC27 و ترکیب و هم‌پوشانی این نقشه‌ها در نهایت ۱۹۸ پلی گون یا پهنه برای اراضی کشاورزی کل کشور به دست آمد. به عبارتی دیگر پهنه‌های زراعی – بوم‌شناختی ترکیبی از پهنه‌بندی اقلیمی کشور به روش GYGA و پهنه‌بندی خاک کشور به روش HC27 است. مساحت پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور (آبی، دیم و باغی) ۱۴۹۶۷۳۵۰ هکتار است. برای جزئیات بیشتر به پراور و همکاران (۱۴۰۲) مراجعه شود. در این پژوهش، گیاه زراعی برنج به صورت مجازی (Virtual) در این پهنه‌ها کشت گردید تا از لحاظ عملکرد، حجم آب آبیاری کاربردی خالص، تبخیر تعرق و ردپای آب آبی و سبز مورد ارزیابی قرار گیرد. این ۱۹۸ پهنه تحت پوشش ۱۳۰ ایستگاه هواشناسی قرار دارند و اطلاعاتی که از این پهنه‌ها جمع‌آوری شدند جهت شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه توضیحات بیشتر به تفکیک ارائه گردیده است.

---

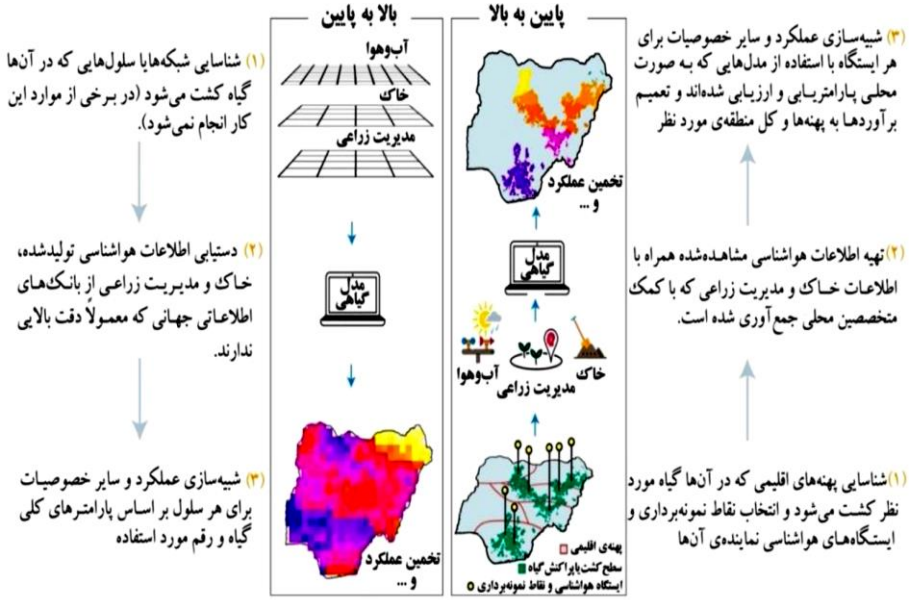
۱. Global Yield Gap Atlas

محدوده پژوهش

محدوده پژوهش، تمام پهنه‌های اگرواکولوژیک اراضی کشاورزی کشور است. ایران در مختصات جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی قرار دارد و مساحت آن ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومترمربع است. با وجود این‌که ایران کشور وسیعی است، تنها ۱۲ درصد از مساحت آن یعنی کمتر از ۲۰۰۰۰۰ کیلومترمربع تحت فعالیت‌های کشاورزی است. بر اساس نقشه اقلیمی GYGA بیش از ۵۰ درصد اراضی آبی کشور در اقلیم‌های ۵۰۰۳، ۴۰۰۳، ۵۰۰۲، ۸۰۰۳، ۶۰۰۳ و در شرایط اقلیمی گرم و خشک قرار دارند. بیش از ۵۰ درصد اراضی دیم کشور نیز، در اقلیم‌های ۴۱۰۳، ۴۰۰۳، ۳۱۰۳ و در شرایط اقلیمی سرد و نیمه‌خشک قرار دارند. همچنین، بیش از ۵۰ درصد اراضی باغی کشور در اقلیم‌های ۴۱۰۳، ۳۱۰۳، ۴۰۰۳، ۵۰۰۲ و در شرایط اقلیمی سرد و نیمه‌خشک قرار دارند. بر اساس نقشه خاک HC27 بیش از ۵۰ درصد اراضی آبی کشور در کد خاک ۵ و ۱۷، اراضی دیم کشور در کد خاک ۵ و ۱۲، اراضی باغی کشور در کد خاک ۵ و ۱۲ قرار دارند و بافت خاک غالب تمام آن‌ها رسی و لومی است (پراور و همکاران، ۱۴۰۲).

اصول و راهکار (پروتکل) گیگا

به طور کلی، روش‌ها جهت شبیه‌سازی رشد، عملکرد و بیلان آب در سطح گسترده (وسیع) مثل استان و کشور به دو گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول، روش‌های بالا به پایین هستند که در آن‌ها استان، کشور و یا ناحیه موردنظر را شبکه‌بندی می‌کنند سپس اطلاعات هواشناسی، خاک، گیاهی و مانند این‌ها را برای آن شبکه‌ها از بانک‌های اطلاعاتی موجود استخراج می‌کنند. اطلاعات این بانک‌های مختلف که از طریق برون‌یابی و درون‌یابی تولید می‌شوند، معمولاً دقیق نیستند (Mourtzinis et al., 2017; Rattalino Edreira et al., 2021). سپس این اطلاعات به مدل شبیه‌سازی داده می‌شود و برای آن ناحیه با استفاده از پارامترهای گیاهی شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. گروه دوم، روش‌های پایین به بالا هستند که از سال ۲۰۱۰ به بعد بیشتر این روش‌ها در پروژه‌های بزرگ و متعددی مورداستفاده قرار گرفته‌اند (Van Ittersum et al., 2013). در این روش‌ها ابتدا در ناحیه موردنظر پراکنش گیاه یا گیاهان موردمطالعه مشخص می‌شود که در کجا چه گیاهانی کشت می‌شوند. به عبارت دیگر موقعیت مکانی محصول یا محصولات مورد کشت تعیین می‌گردد و همچنین پهنه‌های اقلیمی کشت گیاه شناسایی شده و سپس ایستگاه‌های هواشناسی به عنوان نماینده آن پهنه‌ها شناسایی می‌شوند. از آن نقاط نماینده اطلاعات موردنیاز جمع‌آوری می‌شود و به عنوان اطلاعات ورودی به مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۱ مقایسه این دو روش آمده است. در مجموع می‌توان گفت که روش پایین به بالا به زمان، کار و تلاش بیشتری نیاز دارد و دقت آن نیز بالاتر است. برای جزئیات بیشتر به Rattalino Edreira و همکاران (۲۰۲۱) مراجعه شود.



شکل ۱. مقایسه روش‌های بالا به پایین و پایین به بالا برای تخمین و برآورد عملکرد، حجم آب آبیاری کاربردی خالص و سایر متغیرها در سطح گسترده (وسیع) توسط مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی (بر گرفته از سلطانی و همکاران، ۱۴۰۱)

در این مطالعه از روش پایین به بالا موسوم به GYGA استفاده شد (Grassini et al., 2015; Van Ittersum et al., 2013;

(Van Wart et al., 2013). GYGA به دنبال ایجاد پهنه‌های اقلیمی با حداقل غیریکنواختی آب و هوایی است تا نیاز به اطلاعات هواشناسی را به حداقل برساند. در این روش، پهنه‌های اقلیمی بر اساس اطلاعات متغیرهای واحد دمایی (TU) با دمای پایه صفر درجه سلسیوس، شاخص خشکی سالیانه (AI) و نوسانات دمای فصلی (TS) از هم تفکیک می‌شوند. برای نامگذاری هر پهنه اقلیمی از کلاس‌های تعریف‌شده برای هر متغیر استفاده می‌شود. نام هر پهنه متشکل از یک عدد ۴ رقمی است (در مواردی که مقدار متغیر برای یک پهنه در کلاس TU > ۹۸۵۱ باشد، عدد ۵ رقمی خواهد شد). هر کلاس متغیر TU با اعداد ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ مشخص شده است. همچنین کلاس‌های مربوط به متغیر AI با اعداد ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ تا ۹۰۰ و کلاس‌های متغیر TS با اعداد ۱، ۲، ۳ مشخص شده‌اند. وجود واحد دمایی بالاتر در یک منطقه نشان‌دهنده گرم‌تر بودن، AI بالاتر نشان‌دهنده خشک‌تر بودن و TS بالاتر نشان‌دهنده نوسانات دمایی بیشتر در منطقه موردنظر است. اگر در یک پهنه اقلیمی مقدار متغیر TU در کلاس ۳۰۰۰ (دامنه ۳۷۹۱-۳۱۷۰)، متغیر AI در کلاس ۴۰۰ (دامنه ۶۵۸۸-۵۶۹۰) و متغیر TS در کلاس ۲ (دامنه ۸۳۵۵-۳۸۳۳) قرار داشته باشد، نام یا کد آن پهنه اقلیمی ۳۴۰۲ خواهد بود. در حالتی که متغیر TU در کلاس ۱۰۰۰۰ قرار گیرد کد پهنه اقلیمی ۵ رقمی خواهد شد. به عنوان مثال اگر در یک پهنه اقلیمی مقدار متغیر TU در کلاس ۱۰۰۰۰ (TU > ۹۸۵۱)، متغیر AI در کلاس ۴۰۰ (دامنه ۶۵۸۸-۵۶۹۰) و متغیر TS در کلاس ۲ (دامنه ۸۳۵۵-۳۸۳۳) قرار داشته باشد، نام یا کد آن پهنه اقلیمی ۱۰۴۰۲ خواهد بود.

جمع‌آوری اطلاعات

شبیه‌سازی برای تمام پهنه‌های اگرواکولوژیک یا اراضی کشاورزی کل کشور از جمله آبی، دیم و باغی انجام گردید. داده‌های موردنیاز در این پژوهش، در چهار گروه جمع‌آوری شد : ۱- داده‌های هواشناسی، ۲- داده‌های خاک، ۳- داده‌های گیاهی، و ۴- داده‌های مدیریتی.

اطلاعات هواشناسی. در طول دوره پژوهش طی سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹۴ (۲۰۰۶-۲۰۱۵)، داده‌های هواشناسی در ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب در محدوده پژوهش و در مقیاس روزانه از سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری گردید. این اطلاعات، شامل حداقل و حداکثر مقادیر دمای هوا، بارش، سرعت باد، رطوبت نسبی، و ساعات آفتابی بوده است.

اطلاعات خاک. برای تعیین خصوصیات خاک غالب هر منطقه اقلیمی، از نقشه خاک که خصوصیات خاک‌های مناطق مختلف دنیا را دارا است استفاده گردید. این نقشه با نام HC27 (Koo & Dimes, 2013) شناخته می‌شود که بر اساس معیارهای بافت خاک، عمق ریشه و کربن آلی تولید گردیده است و پاسخگوی اکثر مدل‌های شبیه‌سازی گیاهان زراعی است. این بانک اطلاعاتی خاک دارای وضوح ۱۰ کیلومتری است و مناسب بودن اطلاعات آن برای ایران قبلاً ارزیابی شده است (Nehbandani et al., 2020).

اطلاعات گیاهی. جمع‌آوری اطلاعات گیاه زراعی (سطح زیر کشت، تولید و عملکرد) در هر استان از طریق وزارت جهاد کشاورزی انجام پذیرفت. اطلاعات مدیریتی. اطلاعات مربوط به نوع رقم، زمان کاشت و زمان برداشت از وب‌سایت مؤسسه تحقیقات برنج کشور دریافت شد. نوع رقم بر اساس بیشترین میزان سطح زیر کشت، زمان کاشت و زمان برداشت نیز بر اساس تاریخ‌های رایج در مناطق (یا استان‌های) مختلف کشور تعیین گردید. همچنین، برای جمع‌آوری اطلاعات از مناطقی که برنج کشت نمی‌شود از اطلاعات مناطق مشابه یا مجاور استفاده شد.

در این پژوهش، محاسبات برای ارقام کم محصول و ارقام پر محصول به صورت جدا از هم انجام گرفت. ارقام کیفی محلی (بومی) ایرانی مورد پسند مصرف‌کنندگان ایرانی قرار دارند و درصد آمیلوز، غلظت یا قوام ژل و درجه حرارت ژلاتینی شدن آن‌ها در حد مطلوب و نیز از عطر و طعم مناسب برخوردار می‌باشند (Sharifi et al., 2017). این ارقام مانند طارم، هاشمی و غیره علی‌رغم بازارپسندی و کیفیت مناسب، دارای عملکرد پایین می‌باشند و به دلیل داشتن ساقه‌های بلند و حساس بودن به خوابیدگی، امکان افزایش عملکرد آن‌ها با استفاده از کود چندان فراهم نیست (محدثی و همکاران، ۱۳۹۵). یکی از راهکارهای ممکن برای افزایش تولید و کاهش واردات، استفاده از ارقام پر محصول است که از کم‌هزینه‌ترین روش‌های افزایش تولید برای کشاورزان و نیز حفظ محیط‌زیست محسوب می‌گردد (عرفانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۸). از آغاز فعالیت رسمی تحقیقات برنج در کشور، تا کنون ارقام متعددی معرفی شده است که در برخی سال‌ها این ارقام، بیش از ۵۰ درصد سطح زیر کشت برنج کشور را به خود اختصاص داده‌اند. هر چند ارقام پر محصول معرفی‌شده در اغلب استان‌های برنج‌خیز کشور کشت می‌شوند، ولی همواره بیشترین سطح زیر کشت ارقام پر محصول را استان مازندران به خود اختصاص داده است (عرفانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۷).

مدل SSM-iCrop2

در این مطالعه از مدل شبیه‌سازی گیاهی SSM-iCrop2 استفاده شد (Soltani et al., 2020). تهیه و کاربرد مدل‌های SSM[1] از سال ۱۹۸۶ شروع شده است که در آن زمان مدلی توسط Sinclair برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد سویا ارائه شد (Sinclair, 1986) و از آن زمان تا به حال مدل‌های SSM در مطالعات مختلف برای گیاهان متنوع در قاره‌ها و کشورهای مختلف استفاده شده‌اند (Soltani & Sinclair, 2012; Sinclair et al., 2019). مدل SSM-iCrop2 (Soltani et al., 2020) ساده‌شده مدل اصلی SSM (Soltani et al., 2013) است که به اطلاعات و ورودی‌های کمتری نیاز دارد و برای شبیه‌سازی انواع گونه‌های گیاهی در سطح گسترده (وسیع) مناسب است. این مدل رشد، عملکرد و موازنه آب را بر مبنای داده‌های هواشناسی، ویژگی‌های خاک، نحوه مدیریت مانند آبیاری و پارامترهای گیاهی رقم مورداستفاده محاسبه می‌کند. مدل توانایی شبیه‌سازی نمو فیزیولوژیک، گسترش و پیری برگ، تجمع و توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه (بیلان) آب خاک را دارد. مدل، شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد. لازم به ذکر است که این مدل اثر آفات، بیماری‌ها و علف‌های هرز را بر روی گیاه در نظر نمی‌گیرد و فرض می‌کند به طور مؤثر مدیریت شده‌اند. همچنین فرض شده است که هر گونه کمبود عناصر غذایی با مدیریت مناسب رفع می‌شود.

در مدل SSM-iCrop2 برای انجام محاسبات موازنه آب خاک، خاک به صورت دو لایه در نظر گرفته شده است : یک لایه فوقانی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و یک لایه دوم که شامل لایه اول نیز است و برابر با عمق مؤثر استخراج آب توسط ریشه است. عمق لایه دوم با شروع رشد ریشه افزایش می‌یابد تا به حداکثر خود برسد. عمق مؤثر ریشه در زمان سبز شدن در گیاهان زراعی در اکثر موارد برابر ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. پس از مرحله سبز شدن به ازای هر واحد دمایی، به مقداری که از پارامترهای گیاهی محسوب می‌شود، بر عمق ریشه افزوده می‌شود. عمق نهایی قابل‌دسترس برای ریشه می‌تواند بر اساس مرحله فنولوژیک، عمق نفوذ ریشه، عمق خاک و یا موانع فیزیکی و شیمیایی موجود در خاک برای رشد ریشه تعیین شود (Soltani & Sinclair, 2012). واکنش به CO_2 و دما نیز در این مدل لحاظ شده است که بسته به هدف مطالعات برای تغییر اقلیم در آینده کاربرد دارد. برای جزئیات بیشتر درباره مدل به سلطانی (۱۳۸۸)، سلطانی و همکاران (۱۳۹۸)، Soltani و Sinclair (۲۰۱۲)، Soltani و همکاران (۲۰۲۰) مراجعه شود.

لازم به ذکر است با توجه به این‌که کشت رایج برنج در کشور عمدتاً بر اساس سیستم نشایی – غرقابی انجام می‌گیرد از این رو، در اجرای مدل فرض گردید از نشاکاری تا نزدیکی برداشت محصول، ارتفاع آب برابر با ۵۰ میلی‌متر در مزرعه حفظ می‌شود و چون خاک شالیزار در سیستم نشایی – غرقابی گل ورزی می‌گردد، ضرایب زهکشی خاک‌ها به محدوده ۰/۰۳ تا ۰/۰۴ کاهش داده شدند درصورتی‌که برای شرایط غیر گل ورزی این محدوده بین ۰/۲ تا ۰/۵ است. عمق خاک نیز برای جذب رطوبت برای برنج غرقاب شده ۲۵ سانتی‌متر لحاظ گردید. مدل SSM-iCrop2 قبلاً توسط کرامت (۱۴۰۰) و Soltani و همکاران (۲۰۲۰) برای گیاه برنج پارامتریابی و ارزیابی شده است. مدل عملکرد شلتوک با ۱۴ درصد رطوبت را پیش‌بینی می‌کند. درصورتی‌که عملکرد برنج سفید مدنظر باشد با ضرب عملکرد شلتوک در ۰/۶ قابل محاسبه است.

نتایج پارامتریابی نشان داد مدل، روز تا رسیدگی را با RMSE، CV و r به ترتیب ۱۲ روز، ۱۱ درصد و ۰/۶۱ پیش‌بینی نمود. دامنه تغییرات روز تا رسیدگی برنج در پارامتریابی برای داده‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده به ترتیب بین ۷۴ تا ۱۳۴ و ۶۸ تا ۱۱۸ روز با میانگین ۱۰۵ و ۹۹ روز بود. همچنین نتایج پارامتریابی نشان داد مدل، عملکرد دانه را به طور قابل قبولی با RMSE، CV و r به ترتیب ۵۶ گرم در مترمربع، ۲۱ درصد و ۰/۸۰ پیش‌بینی نمود. دامنه تغییرات عملکرد دانه برنج در پارامتریابی برای داده‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده به ترتیب بین ۱۸۴ و ۴۸۶ و ۱۸۱ تا ۶۰۸ گرم در مترمربع با میانگین ۲۶۹ و ۲۸۹ گرم در مترمربع بود.

با توجه به نتایج ارزیابی مدل با استفاده از داده‌های مستقل از آزمایش‌های مورداستفاده در پارامتریابی، مقادیر RMSE، CV و r برای روز تا رسیدگی به ترتیب ۹ روز، ۱۰ درصد و ۰/۹۵ برآورد شد. دامنه تغییرات روز تا رسیدگی در ارزیابی برای داده‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده به ترتیب بین ۷۴ تا ۱۱۴ و ۶۸ تا ۱۰۲ روز با میانگین ۹۶ و ۸۸ روز بود. همچنین مقادیر RMSE، CV و r در ارزیابی مدل برای عملکرد دانه به ترتیب ۴۳ گرم در مترمربع، ۱۴ درصد و ۰/۷۷ پیش‌بینی شد. دامنه تغییرات عملکرد دانه در ارزیابی برای داده‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده به ترتیب بین ۱۶۷ تا ۴۶۷ و ۱۹۷ تا ۴۱۸ گرم در مترمربع با میانگین ۳۰۵ و ۲۹۸ گرم در مترمربع بود.

---

[1]. Simple Simulation Models

محاسبه ردپای آب

ردپای آب در فرآیند تولید، در دو بخش ردپای آب سبز و ردپای آب آبی محاسبه گردید. ردپای آب سبز و ردپای آب آبی به ترتیب، از تقسیم مجموع آب سبز و آب آبی مصرفی در فرآیند تولید محصول در واحد هکتار ($m^3\ ha^{-1}$) بر مقادیر عملکرد محصول ($t\ ha^{-1}$) به دست آمد (کاراندیش، ۱۳۹۹). برای تخمین مقادیر روزانه آب سبز و آب آبی در طول دوره رشد این گیاه، از مدل SSM-iCrop2 استفاده گردید. این مدل، بر پایه معادله بیلان آب روزانه، قادر به محاسبه هر یک از مؤلفه‌های بیلان آب، از جمله آب سبز و آب آبی مصرفی در طول فصل رشد محصول، به شکل ذیل است.

$$ESW_i = ESW_{i-1} + I - ES - TR1 - D \quad \text{رابطهٔ ۱)}$$

$$ATSW_i = ATSW_i + I + EWAT - ES - TR - D \quad \text{رابطهٔ ۲)}$$

$$FTSW_i = ATSW_i / TTSW \quad \text{رابطهٔ ۳)}$$

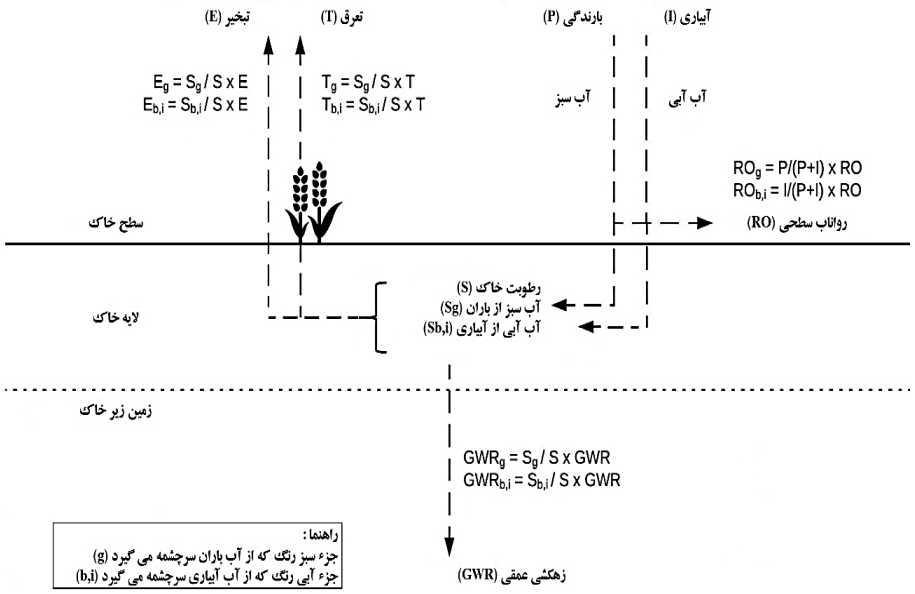
که در این معادلات، ESW مقدار آب قابل‌دسترس در لایه اول، I مقدار آب نفوذ کرده به خاک در اثر بارندگی (پس از کسر رواناب) یا آبیاری، ES تبخیر از سطح خاک، TR1 مقدار آب تعرق یافته که از لایه اول جذب شده است، D مقدار زهکشی، ATSW مقدار آب قابل‌دسترس برای گیاه، EWAT مقدار آبی که در اثر افزایش عمق مؤثر استخراج آب یعنی نفوذ ریشه به لایه‌های زیرین قابل‌دسترس شده است، TR مقدار آب تعرق یافته، FTSW کسر آب قابل تعرق، TTSW کل آب قابل تعرق خاک (بالقوه) است. به جز FTSW که فاقد واحد است، تمامی اجزای این معادلات بر حسب میلی‌متر بر روز بیان شده است (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۸).

همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد تعیین سهم آب سبز و آب آبی بدین‌صورت انجام گرفت : مقدار تبخیر سبز و تبخیر آبی از حاصل‌ضرب تبخیر محاسبه‌شده روزانه توسط مدل در نسبت آب سبز به کل آب خاک و آب آبی به کل آب خاک محاسبه گردید. برای تعرق نیز به همین صورت انجام گرفت. مقدار آب سبز که با افزایش عمق ریشه در هر روز در دسترس گیاه قرار گرفته است از حاصل‌ضرب مقدار آب جدیدی که در اثر رشد ریشه در اختیار گیاه قرار گرفته است در نسبت آب سبز به کل آب خاک در لایه زیر ریشه به دست آمد. به همین ترتیب مقدار آب آبی که با افزایش عمق ریشه در هر روز در دسترس گیاه قرار گرفته است از حاصل‌ضرب مقدار آب جدیدی که در اثر رشد ریشه در اختیار گیاه قرار گرفته است در نسبت آب آبی به کل آب خاک در زیر منطقه ریشه محاسبه گردید. مقدار رواناب آب سبز در هر روز برابر است با رواناب محاسبه‌شده توسط مدل ضرب در نسبت بارندگی روزانه به جمع بارندگی و آب آبیاری در آن روز و همچنین مقدار رواناب آب آبی در هر روز از حاصل‌ضرب رواناب محاسبه‌شده توسط مدل در نسبت آب آبیاری روزانه به جمع بارندگی و آب آبیاری در آن روز حاصل گردید. زهکشی محاسبه‌شده روزانه توسط مدل در نسبت آب سبز به کل آب خاک ضرب گردید تا زهکشی آب سبز به دست آید و در نسبت آب آبی به کل آب خاک ضرب شد تا زهکشی آب آبی حاصل گردد (Hoekstra, 2019). سپس، نیاز آبی گیاه به‌صورت نیاز آبی سبز (ET_{green} , mm) و نیاز آبی آبی (ET_{blue} , mm) محاسبه و در نهایت، ردپای آب سبز ($WF_{green.prod}$) و ردپای آب آبی ($WF_{blue.prod}$) در فرآیند تولید محصول به صورت ذیل محاسبه گردید.

$$WF_{green} = ET_{green} / Y \quad \text{رابطهٔ ۴)}$$

$$WF_{blue} = ET_{blue} / Y \quad \text{رابطهٔ ۵)}$$

که در آن، Y میزان عملکرد محصول ($kg\ ha^{-1}$) است (کاراندیش، ۱۳۹۹).



شکل ۲. محاسبه آب سبز - آبی رطوبت خاک و جریان‌های آب ورودی و خروجی از رطوبت خاک در صورت وجود یک لایه خاک. کدهای رنگ به شکل زیر مجموعه به منشأ آب اشاره دارد (Hoekstra, 2019)

نرم‌افزارهای مورداستفاده

در این مطالعه جهت تهیه و ترسیم نقشه‌ها از نرم‌افزار ArcGIS 10.3 و برای انجام محاسبات و رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel 2013 استفاده گردید.

نتایج و بحث

عملکرد شلتوک

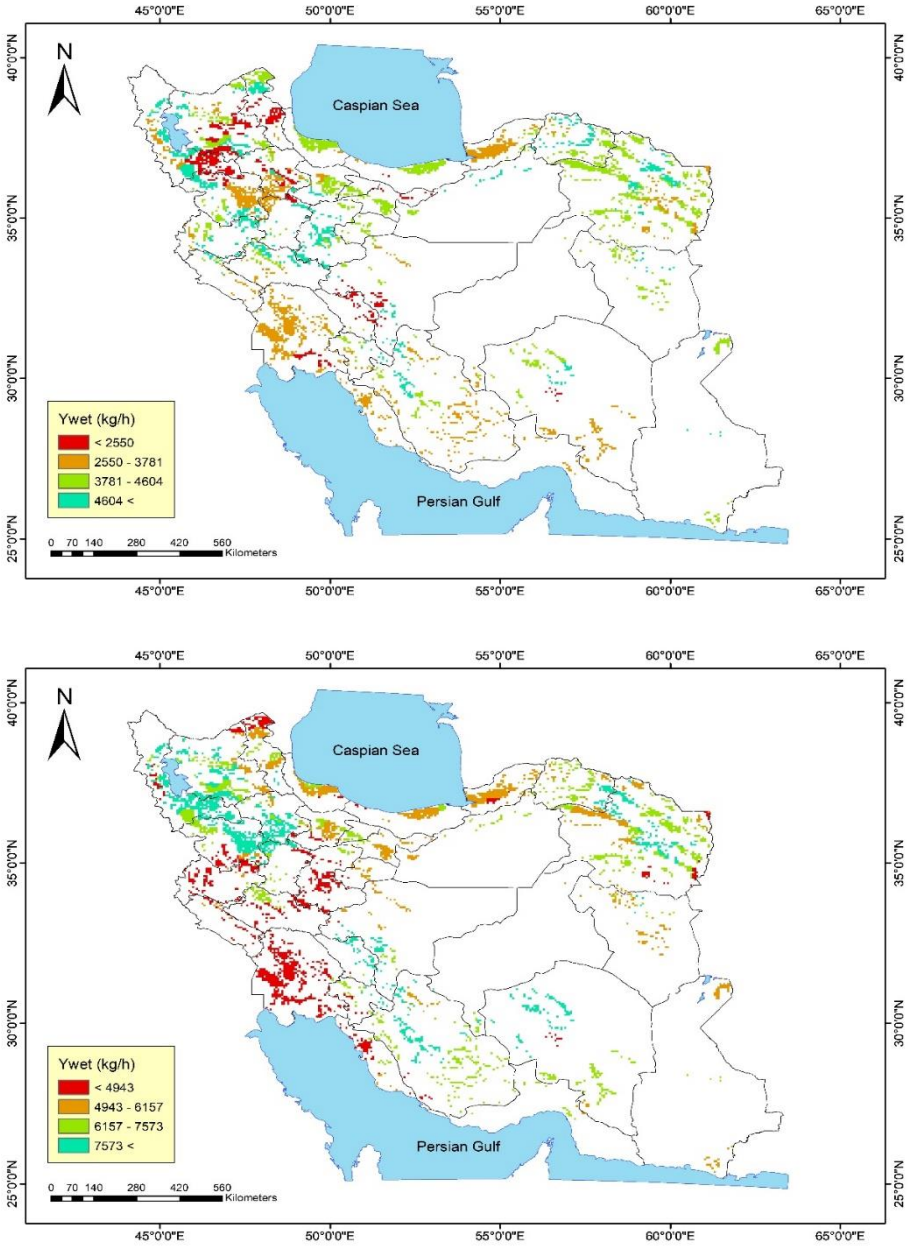
عملکرد پتانسیل برای ارقام کم محصول در ایستگاه (بافر) های مختلف کشور، از بدون عملکرد (۰ کیلوگرم در هکتار) در ایستگاه (بافر) لاله‌زار تا ۵۵۲۷ کیلوگرم در هکتار در ایستگاه (بافر) قائن متغیر بود (شکل ۳). عدم وجود عملکرد در ایستگاه (بافر) لاله‌زار به دلیل میانگین دمای پایین‌تر از دمای مطلوب برای رشد برنج یعنی ۳۰ تا ۳۷ درجه سلسیوس (Soltani & Sinclair, 2012) است. به‌گونه‌ای که میانگین دما در این ایستگاه (بافر) در هیچ‌یک از سال‌ها در محدوده زمانی پژوهش به دمای مطلوب برای رشد برنج نرسیده است و رشد گیاه در مرحله رویشی متوقف شده و مرحله رشد زایشی را تجربه نکرده است. بعد از ایستگاه (بافر) لاله‌زار، پایین‌ترین عملکرد پتانسیل برای ایستگاه (بافر) آبعلی به مقدار ۱۷ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. مقدار این عملکرد در مناطق اقلیمی، بین ۹۰۴ کیلوگرم در هکتار در کد اقلیم ۳۰۰۳ تا ۵۰۹۱ کیلوگرم در هکتار در کد اقلیم ۴۲۰۲ متغیر بود.

همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد برای ارقام پر محصول، عملکرد پتانسیل در ایستگاه (بافر) لاله‌زار از بدون عملکرد (۰ کیلوگرم در هکتار) تا ۱۰۱۷۳ کیلوگرم در هکتار در ایستگاه (بافر) شهرکرد به دست آمد. بعد از ایستگاه (بافر) لاله‌زار، پایین‌ترین عملکرد پتانسیل با ۲۶۸۲ کیلوگرم در هکتار به ایستگاه (بافر) امیدیه (پایگاه هوایی) تعلق دارد. دلیل عدم وجود عملکرد در ایستگاه (بافر) لاله‌زار همانند دلیلی است که برای ارقام کم محصول بیان گردید. عملکرد پتانسیل در مناطق اقلیمی، از ۳۲۲۵ کیلوگرم در هکتار در کد اقلیم ۶۱۰۳ تا ۸۶۴۴ کیلوگرم در هکتار در کد اقلیم ۳۰۰۳ متفاوت بود.

نتایج نشان داد مناطقی که دارای اقلیم معتدل و مرطوب و نیز گرم و مرطوب می‌باشند عملکرد پتانسیل بالاتری نسبت به سایر مناطق دارند. برنج گیاهی است که در مناطق گرم و مرطوب استوایی و یا معتدل رشد و توسعه می‌یابد. سرما و کمبود آب، از عوامل محدودکننده رشد برنج هستند. در ایران، مناطق مساعد رشد برنج دامنه گسترده‌ای از شمال تا جنوب کشور است، اما بیشترین سطح کشت این گیاه به اراضی شمال کشور اختصاص دارد که دارای اقلیم مناسب، آب کافی و خاک حاصلخیز هستند (عرفانی مقدم و همکاران، ۱۳۹۷). دمای بالا یعنی ۳۷ تا ۴۵ درجه سلسیوس که دمای سقف یا بحرانی برای رشد برنج به حساب می‌آید، موجب کوتاه‌تر شدن دوره رشد

محصول و عدم دریافت نور کافی شده و در نهایت کاهش تولید ماده خشک و عملکرد را در پی دارد (Nehbandani et al., 2021).

با توجه به این‌که ارزیابی‌ها در این پژوهش برای کل کشور انجام شده است و شامل مناطقی نیز می‌شود که کشت برنج در آن‌ها صورت نمی‌گیرد از این رو، عملکرد پتانسیل به دست آمده با نتایج پژوهش‌های دیگران قابل مقایسه نیست.



شکل ۳. عملکرد پتانسیل (کیلوگرم در هکتار) ارقام کم محصول (شکل بالا) و ارقام پر محصول (شکل پایین) برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور. عملکرد پتانسیل با استفاده از مدل SSM-iCrop2 برای سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹۴ (۲۰۰۶-۲۰۱۵) شبیه‌سازی گردیده است.

حجم آب آبیاری کاربردی خالص و تبخیر تعرق

حجم آب آبیاری کاربردی خالص برای ارقام کم محصول در ایستگاه (بافر) های مختلف کشور، از ۱۱۱۰ مترمکعب در هکتار در ایستگاه (بافر) جاسک تا ۱۰۴۵۰ مترمکعب در هکتار در ایستگاه (بافر) اهواز متغیر بود. حجم آب آبیاری کاربردی خالص از ۱۱۱۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۱۰۰۰۲ تا ۱۰۱۴۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۵۱۰۲ حاصل گردید.

برای ارقام کم محصول در کل کشور تبخیر سبز از ۹۰ تا ۱۲۵۰ مترمکعب در هکتار، تبخیر آبی از ۲۳۰ تا ۲۱۲۰ مترمکعب در هکتار، تعرق سبز از ۷۰ تا ۱۱۷۰ مترمکعب در هکتار و تعرق آبی از ۶۶۰ تا ۹۱۴۰ مترمکعب در هکتار برآورد گردید. تبخیر تعرق سبز از ۱۲۰

مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۳۲۰۳ تا ۲۱۸۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۳۱۰۲ و نیز تبخیر تعرق آبی از ۸۹۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۱۰۰۰۲ تا ۱۰۰۴۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۵۱۰۲ نوسان داشت.

حجم آب آبیاری کاربردی خالص برای ارقام پر محصول در ایستگاه (بافر) های مختلف کشور، بین ۱۲۱۰ مترمکعب در هکتار در ایستگاه (بافر) جاسک تا ۹۸۳۰ مترمکعب در هکتار در ایستگاه (بافر) شهرکرد مورد تخمین قرار گرفت. حجم آب آبیاری کاربردی خالص در مناطق اقلیمی، بین ۱۲۱۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۱۰۰۰۲ تا ۷۸۸۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۷۰۰۲ برآورد گردید.

برای ارقام پر محصول در کل کشور تبخیر سبز از ۸۰ تا ۱۱۴۰ مترمکعب در هکتار، تبخیر آبی از ۲۳۰ تا ۱۶۸۰ مترمکعب در هکتار، تعرق سبز از ۸۰ تا ۱۰۷۰ مترمکعب در هکتار و تعرق آبی از ۷۴۰ تا ۸۶۱۰ مترمکعب در هکتار حاصل گردید. تبخیر تعرق سبز از ۲۲۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۳۲۰۳ تا ۱۹۳۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۳۱۰۲ و نیز تبخیر تعرق آبی از ۹۷۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۱۰۰۰۲ تا ۷۷۶۰ مترمکعب در هکتار در کد اقلیم ۷۰۰۲ نوسان داشت.

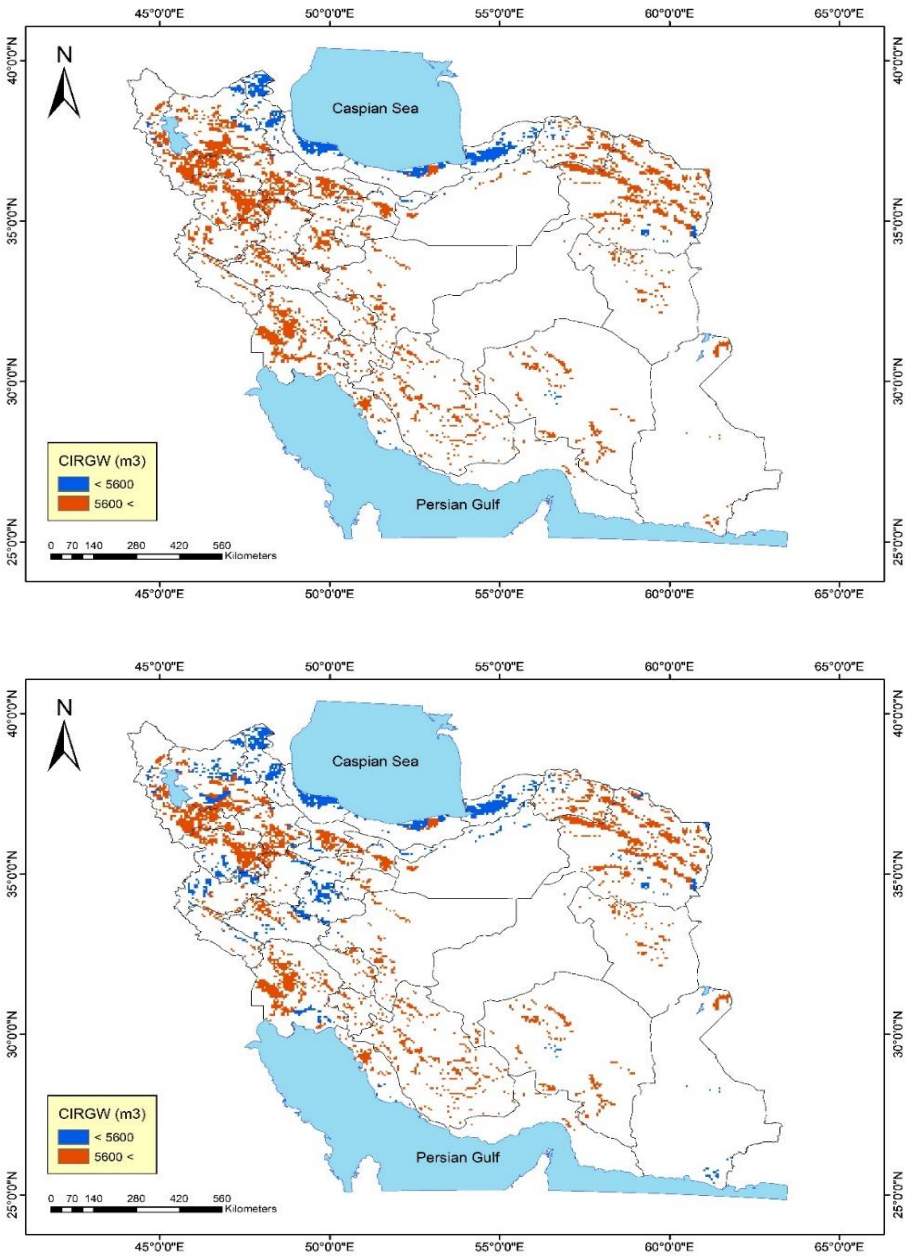
نتایج نشان داد با افزایش تبخیر تعرق، حجم آب آبیاری کاربردی خالص نیز افزایش پیدا می‌کند. بنابراین، در مناطقی که میزان تبخیر تعرق در آن‌ها بالاتر بود آب بیشتری جهت رشد و تولید برنج مورد مصرف قرار گرفت. به طور کلی، در مناطقی که دارای اقلیم معتدل و مرطوب می‌باشند میزان تبخیر تعرق سبز بیشتر از مناطقی بوده است که دارای اقلیم گرم و خشک می‌باشند. همین‌طور، بر عکس آن مناطقی که دارای اقلیم گرم و خشک می‌باشند میزان تبخیر تعرق آبی در آن‌ها بیشتر از مناطقی بوده است که دارای اقلیم معتدل و مرطوب می‌باشند. از آنجایی که آب سبز از باران تأمین می‌گردد از این‌رو، مناطقی که از نزولات آسمانی بیشتری برخوردار می‌باشند به‌خصوص استان گیلان با کدهای اقلیمی ۳۱۰۲، ۵۸۰۲ و ۵۹۰۲ دارای تبخیر تعرق سبز بیشتری می‌باشند و مناطقی که دارای بارندگی کمتری می‌باشند مانند استان خوزستان با کدهای اقلیمی ۶۰۰۳، ۷۰۰۳، ۸۰۰۲ و ۸۰۰۳ به علت نیاز به آب آبیاری بیشتر، دارای تبخیر تعرق آبی بیشتری می‌باشند.

دمای هوا یکی از عوامل تأثیرگذار بر میزان مصرف آب است به‌گونه‌ای که هر چقدر بر درجه حرارت هوا افزوده شود میزان تبخیر آب از مزرعه نیز بیشتر گردیده و در نهایت نیاز آبی گیاه افزایش می‌یابد. بنابراین، لازم است تولید برنج در مناطقی که دمای هوا در آن‌ها زیاد است به خصوص مناطقی که دارای اقلیم گرم و خشک هستند متوقف گردد. اساساً کشت و کار این گیاه با شرایط آب و هوایی حاکم در این مناطق سازگاری ندارد و با شرایط کمبود آب که با آن روبرو هستیم مطابقت ندارد.

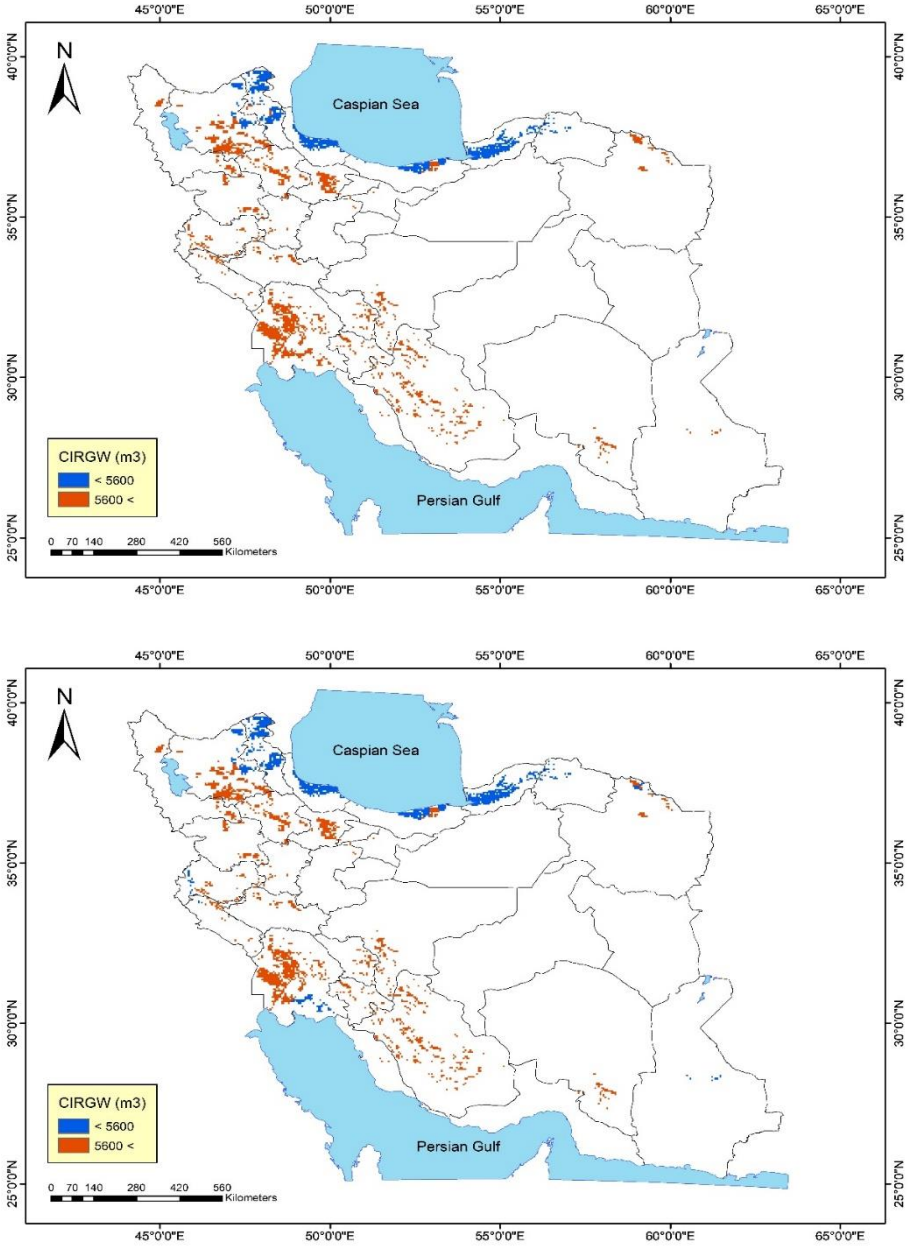
عدم مقایسه برآوردهای مربوط به حجم آب آبیاری کاربردی خالص و نیز تبخیر تعرق در این پژوهش با نتایج سایر پژوهش‌ها همانند دلیلی است که برای عملکرد پتانسیل بیان گردید.

هیئت وزیران در جلسه ۱۳۹۷/۰۸/۰۹ به پیشنهاد شماره ۹۷/۳۴۴۸۳/۳۱/۱۰۰ به تاریخ ۱۳۹۷/۰۷/۲۱ وزارت نیرو و به استناد اصل یک‌صد و سی و هشتم قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران تأکید داشته‌اند که کشت برنج فقط در مناطقی از کشور صورت پذیرد که مصرف آب در آن‌ها کمتر از ۷۰۰۰ مترمکعب در هکتار باشد. از آنجایی که راندمان آبیاری ۱۰۰ درصد نیست و مقداری از آب آبیاری در اثر تلفات ناشی از نفوذ آب در جدار کانال‌ها، نفوذ عمقی به خارج از منطقه توسعه ریشه‌ها، رواناب سطحی، تبخیر و امثال آن‌ها هدر می‌رود و با توجه به این‌که محاسبات مربوط به حجم آب آبیاری کاربردی توسط مدل SSM-iCrop2 به صورت خالص است از این رو، حدود ۲۰ درصد مقدار اعلام شده توسط هیئت وزیران به عنوان تلفات لحاظ گردید و مبنای ارزیابی برای حجم آب آبیاری کاربردی خالص ۵۶۰۰ مترمکعب در هکتار مورد نظر قرار گرفت. برای ارقام کم محصول در برخی از مناطق اقلیمی کشور، حجم آب آبیاری کاربردی خالص کمتر از ۵۶۰۰ مترمکعب در هکتار برآورد گردید. کدهای اقلیمی این مناطق عبارتند از : ۳۱۰۲، ۳۳۰۳، ۴۲۰۲، ۵۲۰۲، ۵۷۰۲، ۵۸۰۲، ۵۹۰۲، ۶۱۰۲، ۶۲۰۲، ۶۳۰۲، ۶۵۰۲، ۶۶۰۲ و ۱۰۰۰۲ که در استان‌های اردبیل، گیلان، آذربایجان شرقی، مازندران، گلستان و هرمزگان قرار دارند. برای ارقام پر محصول نیز، حجم آب آبیاری کاربردی خالص برای حدود نیمی از مناطق کشور با کدهای اقلیمی ۳۰۰۳، ۳۱۰۳، ۳۲۰۳، ۴۰۰۲، ۴۰۰۳، ۴۱۰۳، ۴۲۰۳، ۵۰۰۲، ۵۰۰۳، ۵۱۰۲، ۶۰۰۲، ۶۰۰۳، ۶۴۰۲، ۷۰۰۲، ۷۰۰۳، ۸۰۰۲ و ۸۰۰۳ بیشتر از ۵۶۰۰ مترمکعب در هکتار بوده است که قسمت‌هایی از استان‌های قزوین، آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، کردستان، خراسان شمالی، زنجان، کرمان، خراسان رضوی، چهارمحال و بختیاری، فارس، گلستان، کهگیلویه و بویراحمد، لرستان، مرکزی، سمنان، تهران، همدان، کرمانشاه، خراسان جنوبی، البرز، اصفهان، ایلام، یزد، خوزستان، قم، مازندران، بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان را تشکیل می‌دهند (شکل ۴). لازم به ذکر است با توجه به این‌که حدود ۴۰ درصد از اراضی کشاورزی کشور را اراضی دیم تشکیل می‌دهد به دلیل قرار گرفتن این اراضی در نواحی کوهستانی با توجه به شیب زمین و عدم وجود امکانات و تجهیزات آبیاری و غیره کشت برنج امکان‌پذیر نیست. شکل ۵ حجم آب آبیاری کاربردی خالص ارقام کم محصول و ارقام پر محصول را در نواحی اگرواکولوژیک تولیدکننده فعلی برنج در کشور نشان می‌دهد.

مناطق مناسب از نظر حجم آب آبیاری کاربردی خالص در استان‌های شمالی کشور و در اطراف دریای خزر متمرکز می‌باشند مانند استان‌های گیلان، مازندران، گلستان، اردبیل و آذربایجان شرقی که به صورت لکه‌ای در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شوند. با مقایسه و بررسی تفاوت این شکل‌ها می‌توان دریافت که بسیاری از این لکه‌ها اراضی دیم را تشکیل می‌دهند که با توجه به مواردی که در بالا بیان گردید قابل آبیاری نمی‌باشند و امکان کشت برنج در آن‌ها وجود ندارد.



شکل ٤. حجم آب آبیاری کاربردی خالص (مترمکعب در هکتار) ارقام کم محصول (شکل بالا) و ارقام پر محصول (شکل پایین) برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور برای سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹٤ (۲۰۰٦-۲۰۱۵). رنگ آبی مناطق مجاز و رنگ قرمز مناطق غیرمجاز را برای کشت برنج نشان می‌دهند.



شکل ۵. حجم آب آبیاری کاربردی خالص (مترمکعب در هکتار) ارقام کم محصول (شکل بالا) و ارقام پر محصول (شکل پایین) برنج در نواحی اگرواکولوژیک تولیدکننده فعلی این محصول در کشور برای سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹٤ (۲۰۰٦-۲۰۱۵). رنگ آبی مناطق مجاز و رنگ قرمز مناطق غیرمجاز را برای کشت برنج نشان می‌دهند.

ردپای آب

ردپای آب آبی برای ارقام کم محصول در ایستگاه (بافر) های مختلف کشور، از ۴۴۶ مترمکعب بر تن در ایستگاه (بافر) رامسر تا ۲۷۲۶۸ مترمکعب بر تن در ایستگاه (بافر) آبعلی مورد تخمین قرار گرفت (شکل ۶). ردپای آب آبی از ۴۴۶ مترمکعب بر تن در کد اقلیم ۵۷۰۲ تا ۶۶۴۹ مترمکعب بر تن در کد اقلیم ۳۰۰۳ حاصل گردید. ردپای آب سبز نیز در ایستگاه (بافر) های مختلف کشور بین ۵۱ مترمکعب بر تن در ایستگاه (بافر) قائن تا ۵۸۳۵ مترمکعب بر تن در ایستگاه (بافر) آبعلی متغیر بوده است (شکل ۷). ردپای آب سبز در مناطق اقلیمی، بین ۵۷ مترمکعب بر تن در کد اقلیم ۵۲۰۳ تا ۲۴۶ مترمکعب بر تن در کد اقلیم ۳۱۰۲ برآورد گردید. با توجه به این‌که در ایستگاه (بافر) لاله‌زار عملکرد پتانسیل حاصل نگردید و مقدار آن برابر با ۰ کیلوگرم در هکتار بود از این رو، برای این ایستگاه (بافر) ردپای آب آبی و سبز برآورد نگردید.

ردپای آب آبی برای ارقام پر محصول در ایستگاه (بافر) های مختلف کشور، از ۲۲۳ مترمکعب بر تن در ایستگاه (بافر) ماسوله تا ۲۱۷۰ مترمکعب بر تن در ایستگاه (بافر) صفی‌آباد (دزفول) به دست آمد (شکل ۶). ردپای آب آبی در مناطق اقلیمی، بین ۲۳۷ مترمکعب

بر تن در کد اقلیم ۵۹۰۲ تا ۱۹۴۱ مترمکعب بر تن در کد اقلیم ۸۰۰۳ متغیر بود. در ایستگاه (بافر) های مختلف کشور، ردپای آب سبز بین ۲۹ مترمکعب بر تن در ایستگاه (بافر) مروست تا ۲۶۵ مترمکعب بر تن در ایستگاه (بافر) ماسوله حاصل گردید (شکل ۷). ردپای آب سبز از ۳۰ مترمکعب بر تن در کد اقلیم ۴۰۰۲ تا ۲۴۶ مترمکعب بر تن در کد اقلیم ۳۱۰۲ مورد تخمین قرار گرفت. دلیل عدم برآورد ردپای آب آبی و سبز برای ایستگاه (بافر) لاله‌زار همانند دلیلی است که برای ارقام کم محصول بیان گردید.

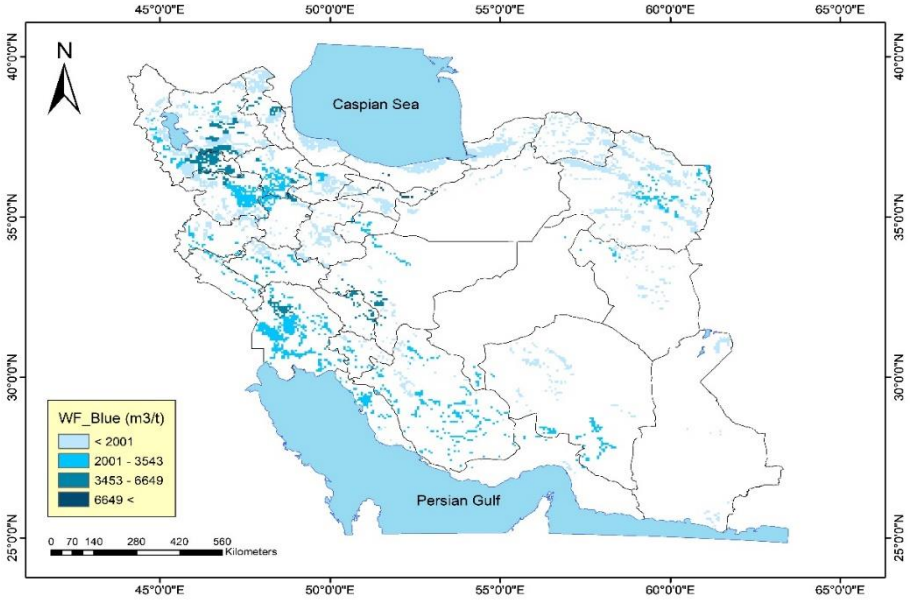
پایین بودن مقدار ردپای آب آبی در برخی ایستگاه (بافر) ها و نیز مناطق اقلیمی، نشان‌دهنده نیاز به آب آبیاری کمتر و نقش کمتر آبیاری نسبت به نزولات آسمانی در آن‌ها است و برعکس، بالا بودن مقدار ردپای آب آبی در برخی ایستگاه (بافر) ها و نیز مناطق اقلیمی، به معنای نیاز به آب آبیاری بیشتر و تأثیر کمتر بارندگی در آن‌ها بوده است. بالا بودن مقدار ردپای آب آبی در ایستگاه (بافر) صفی‌آباد (دزفول) که دارای اقلیم گرم و مرطوب است به دلیل بالا بودن میزان تبخیر تعرق آبی در این ایستگاه (بافر) بوده است. بالا بودن مقدار ردپای آب سبز در ایستگاه (بافر) آبعلی به دلیل قرار گرفتن این ایستگاه (بافر) در ارتفاع بالاتر نسبت به سطح دریا است و نیز بالا بودن مقدار ردپای آب سبز در ایستگاه (بافر) ماسوله که دارای اقلیم معتدل و مرطوب است به دلیل قرار گرفتن این ایستگاه (بافر) در مجاورت دریا بوده است که منجر به بهره‌مندی بیشتر از نزولات آسمانی در هر کدام از این ایستگاه (بافر) ها گردیده است. آب سبز، نقش ویژه‌ای در تولید محصول ایفا می‌کند. همان‌طور که توسط Rockstrom و همکاران (۲۰۰۹) نشان داده شد در بیشتر کشورها آب سبز بیشترین نقش را در تولید محصول دارد. در مناطقی که میزان بارندگی (آب سبز) زیاد است می‌توان بهره‌وری آب را از طریق افزایش عملکرد محصول در واحد سطح و بدون نیاز به آب آبی اضافی بهبود بخشید (Rockstrom & Barron, 2007). به‌طورکلی، تولید غلات بدون مصرف آب آبی به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد (Rost et al., 2009; Siebert & Doll, 2010). بنابراین یک هماهنگی دقیق از مصرف آب آبی و سبز در تولید محصول مورد نیاز است.

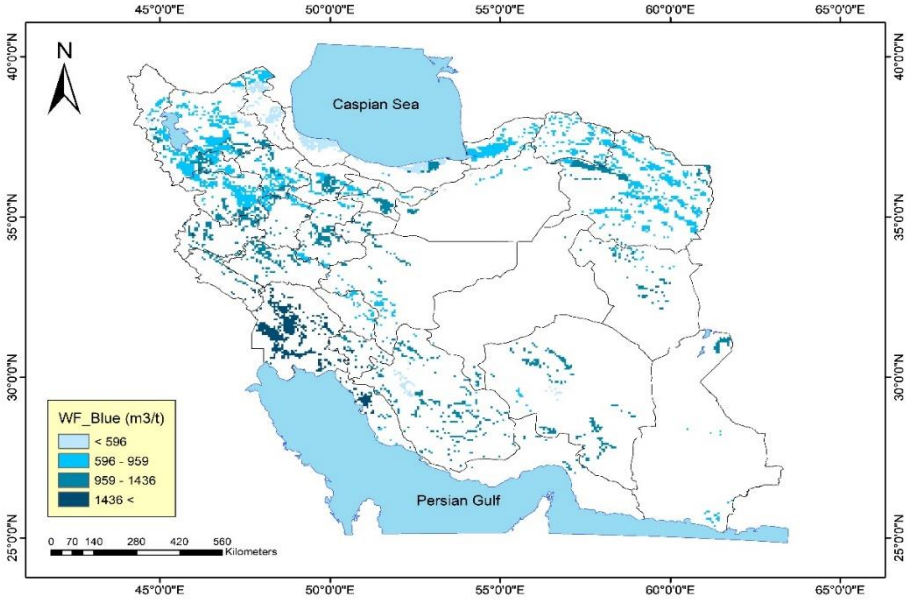
تفاوت بین ردپای آب آبی و سبز در ایستگاه (بافر) ها و نیز مناطق اقلیمی مختلف کشور، ناشی از اختلاف در تبخیر تعرق و مقدار عملکرد در آن‌ها است. به بیان دیگر، تبخیر تعرق بیشتر منجر به ردپای آب بالاتر نمی‌گردد و مقدار عملکرد و نوع منطقه کشت محصول نیز بر میزان ردپای آب تأثیرگذار می‌باشند. به عنوان مثال بالا بودن مقدار ردپای آب آبی در ایستگاه (بافر) آبعلی به دلیل پایین بودن بیش از اندازه عملکرد در این ایستگاه (بافر) است. بنابراین، باید توجه داشت مناطقی که دارای عملکرد بیشتری می‌باشند از ردپای آب کمتری برخوردار خواهند بود و برعکس، مناطقی که دارای عملکرد کمتری می‌باشند از ردپای آب بیشتری برخوردار خواهند بود.

استان‌های گیلان و مازندران به علت بالا بودن مقدار رطوبت و بهره‌مند بودن از باران (آب سبز) کافی و همچنین، تا حدی بالا بودن مقدار عملکرد در آن‌ها نسبت به سایر استان‌ها از کمترین ردپای آب آبی و بیشترین ردپای آب سبز برخوردار می‌باشند و بر این اساس، بهترین و مناسب‌ترین مناطق از این نظر به حساب می‌آیند. سایر استان‌های کشور مانند استان‌های خوزستان، بوشهر، فارس و خراسان جنوبی به علت افزایش درجه حرارت و بارندگی اندک در این استان‌ها، ردپای آب آبی در آن‌ها بسیار زیاد و از سوی دیگر از ردپای آب سبز کمتری برخوردار می‌باشند. بنابراین با توجه به وضعیت آبی موجود در کشور، مجاز به کشت برنج نمی‌باشند و درصورتی‌که در این استان‌ها کشت برنج انجام می‌گیرد می‌بایست سریعاً متوقف گردد.

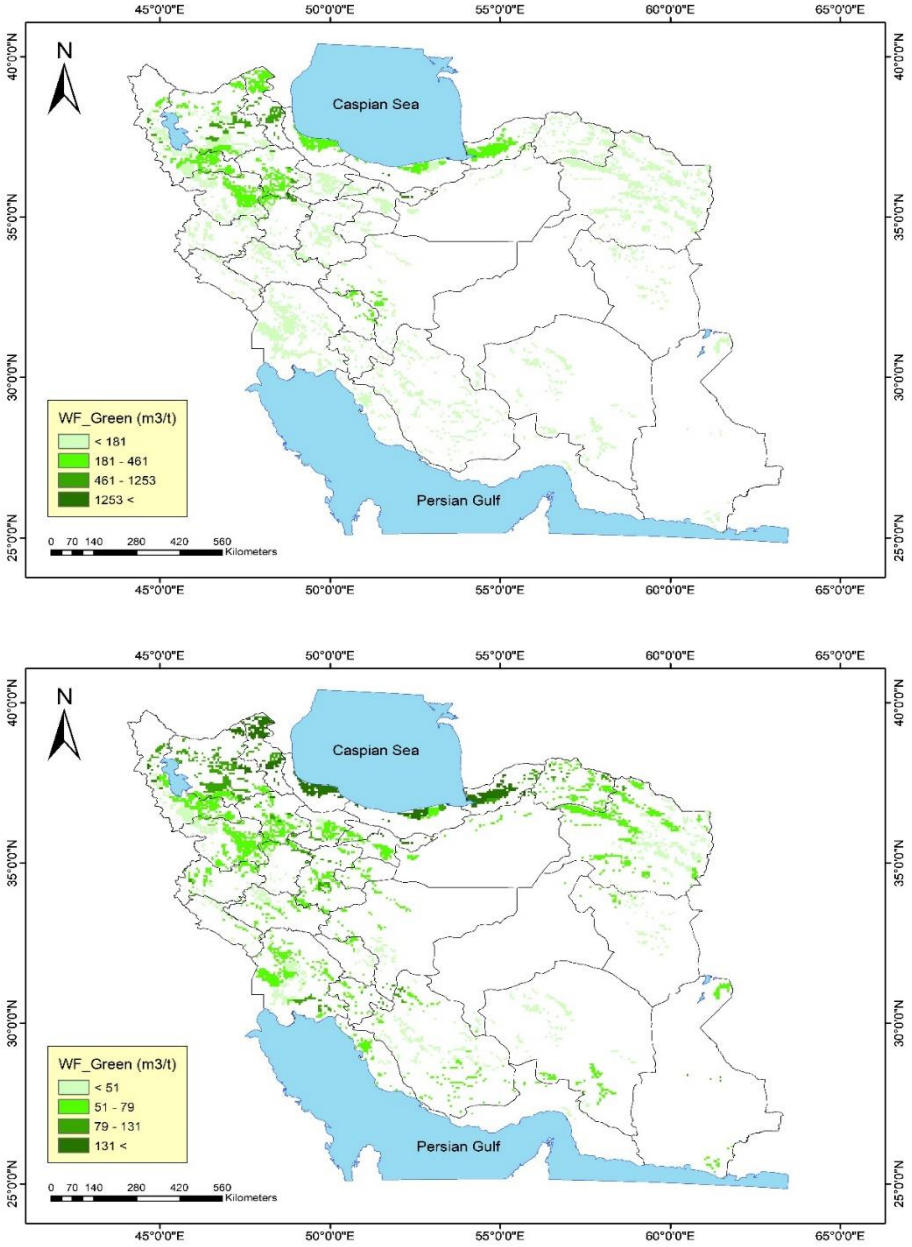
استان‌هایی که اراضی کشاورزی آن‌ها را عمدتاً اراضی دیم تشکیل می‌دهند مانند استان‌های کردستان، کرمانشاه، آذربایجان شرقی، همدان و غیره به دلیل این‌که در این اراضی برای تأمین آب مصرفی گیاهان زراعی به‌جای استفاده از سامانه‌های آبیاری به آب باران متکی می‌باشند و موفقیت این نوع کشت به‌صورت مستقیم به زمان توزیع و مقدار بارندگی در طول فصل رشد بستگی دارد از این رو، میزان ردپای آب سبز در این استان‌ها بیشتر از میزان ردپای آب آبی است. البته می‌بایست این را در نظر داشت که با توجه به عدم امکان استفاده از سامانه‌های آبیاری در این اراضی، قابلیت کشت برنج به‌صورت رایج (نشایی - غرقابی) وجود ندارد.

نتایج مربوط به ردپای آب آبی و سبز که در پژوهش حاضر به دست آمد نیز، همانند دلیلی که برای عملکرد پتانسیل، حجم آب آبیاری کاربردی خالص و همچنین تبخیر تعرق بیان گردید با نتایج پژوهش‌های دیگران مورد مقایسه و تحلیل قرار نگرفت.



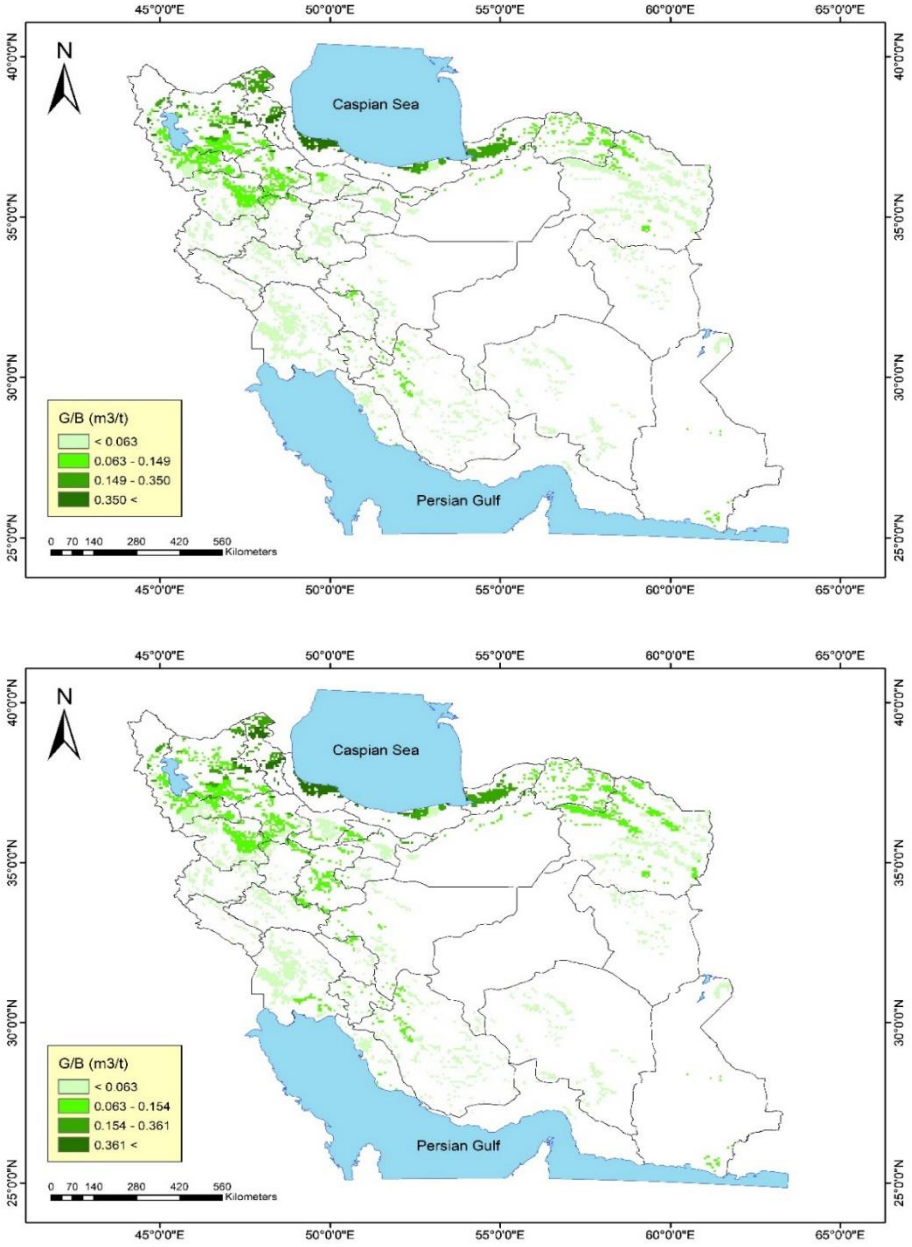


شکل ٦. ردپای آب آبی (مترمکعب بر تن) ارقام کم محصول (شکل بالا) و ارقام پر محصول (شکل پایین) برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور برای سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹٤ (۲۰۰٦-۲۰۱۵).



شکل ۷. ردپای آب سبز (مترمکعب بر تن) ارقام کم محصول (شکل بالا) و ارقام پر محصول (شکل پایین) برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور برای سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹۴ (۲۰۰۶-۲۰۱۵).

نسبت ردپای آب سبز به آب آبی برای ارقام کم محصول و ارقام پر محصول در مناطقی از استان‌های گیلان و مازندران بالاتر از سایر مناطق است بدین معنا که این مناطق به دلیل مجاورت با دریا از بارندگی مناسب برخوردار می‌باشند از این رو، برای تأمین نیاز آبی این محصول از آب باران بهره‌مند می‌باشند. اما برعکس، در مناطقی از استان‌های خوزستان و ایلام این نسبت کمتر از سایر مناطق است. این مطلب نشان می‌دهد که این مناطق برای تأمین آب مصرفی گیاه به آب آبیاری متکی می‌باشند. این نسبت برای ارقام کم محصول در کد اقلیم ۳۱۰۲، ۱/۰۴۵ مترمکعب بر تن و در کد اقلیم ۸۰۰۳ برابر با ۰/۰۲۸ مترمکعب بر تن حاصل گردیده است. همچنین، این نسبت برای ارقام پر محصول در کد اقلیم ۳۱۰۲، ۰/۹۲۴ مترمکعب بر تن و در کد اقلیم ۷۰۰۳ برابر با ۰/۰۳۴ مترمکعب بر تن به دست آمده است. بنابراین، برای ارقام کم محصول و ارقام پر محصول این نسبت تفاوتی برابر با ۰/۸۹ و ۱/۰۱۷ مترمکعب بر تن در بین این مناطق اقلیمی به وجود آورده است. بر این اساس اگر مناطق شمالی کشور یعنی استان‌های گیلان و مازندران را با توجه به نسبت‌های به دست آمده به عنوان مبنا در نظر بگیریم سایر مناطق کشور برای کشت برنج مناسب نمی‌باشند. (شکل ۸).



شکل ۸. نسبت ردپای آب سبز به ردپای آب آبی (مترمکعب بر تن) ارقام کم محصول (شکل بالا) و ارقام پر محصول (شکل پایین) برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور برای سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹٤ (۲۰۰٦-۲۰۱۵).

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر عملکرد، حجم آب آبیاری کاربردی خالص، تبخیر تعرق و ردپای آب آبی و سبز برنج مورد ارزیابی قرار گرفت. این کار با استفاده از مدل SSM-iCrop2 برای پهنه‌های اگرواکولوژیک کشاورزی کل کشور و در محدوده زمانی سال‌های ۱۳۸۵-۱۳۹۴ (۲۰۰۶-۲۰۱۵) انجام گردید. این مدل قادر به برآورد مقادیر عملکرد پتانسیل و اجزای بیلان آب در مقیاس زمانی روزانه است. به همین دلیل، با تفکیک مقادیر تبخیر تعرق گیاه به مؤلفه‌های سبز و آبی بر اساس اجزای بیلان، و با در دست داشتن مقادیر شبیه‌سازی‌شده عملکرد، مقادیر ردپای آب به ازای عملکرد پتانسیل تعیین گردید.

عملکرد برنج با فرض مدیریت مطلوب، برای ارقام کم محصول در کل کشور از ۱۷ تا ۵۵۲۷ کیلوگرم در هکتار حاصل گردید. این مقدار برای ارقام پر محصول نیز بین ۲۶۸۲ تا ۱۰۱۷۳ کیلوگرم در هکتار به دست آمد. حجم آب آبیاری کاربردی خالص برای ارقام کم محصول از ۱۱۱۰ تا ۱۰۴۵۰ مترمکعب در هکتار و برای ارقام پر محصول نیز بین ۱۲۱۰ تا ۹۸۳۰ مترمکعب در هکتار تعیین گردید. مقدار ردپای آب آبی برای ارقام کم محصول از ۴۴۶ تا ۲۷۲۶۸ مترمکعب بر تن برآورد گردید. این مقدار برای ارقام پر محصول نیز بین ۲۲۳ تا

۲۱۷۰ مترمکعب بر تن به دست آمد. همین‌طور، مقدار ردپای آب سبز برای ارقام کم محصول از ۵۱ تا ۵۸۳۵ مترمکعب بر تن و برای ارقام پر محصول نیز بین ۲۹ تا ۲۶۵ مترمکعب بر تن حاصل گردید.

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، بخش‌هایی از استان‌های گیلان، مازندران و اندکی نیز گلستان از ردپای آب آبی کمتر و در مقابل از ردپای آب سبز بیشتری برخوردار می‌باشند. این مطلب نشان می‌دهد که در این استان‌ها برای تأمین آب مصرفی این محصول به آب آبیاری کمتر و به آب باران بیشتری متکی می‌باشند. بنابراین، محدوده مناسب برای کشت این محصول در کشور محسوب می‌شوند. سایر استان‌های کشور نیز، مانند استان‌های خوزستان، بوشهر، فارس و خراسان جنوبی دارای ردپای آب آبی بیشتر و از سوی دیگر از ردپای آب سبز کمتری برخوردار می‌باشند. بر این اساس، لازم است با توجه به متکی بودن این استان‌ها به آب آبیاری جهت تأمین نیاز آبی این محصول با در نظر گرفتن وضعیت آبی موجود در کشور، کشت برنج محدود و متوقف گردد.

با برآورد ردپای آب محصول برنج در پهنه‌های اگرواکولوژیک کشور، مناطق از نظر آب مصرفی واقعی این محصول شناسایی و از یکدیگر متمایز گردیدند تا بدین ترتیب برنامه‌ریزی لازم جهت مدیریت کشت این محصول متناسب با میزان آب موجود در نواحی اقلیمی مختلف کشور صورت گیرد و بر این اساس در مناطقی که این امکان در آن‌ها وجود دارد کشت برنج انجام شود و نیز، کشت برنج در مناطقی که نیاز آبی در آن‌ها بالا است متوقف گردد تا بدین‌صورت که با وضعیت بحرانی آب روبرو هستیم، از برداشت مازاد آب در کشور جلوگیری گردد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

پراور، عفت؛ سلطانی، افشین؛ زینلی، ابراهیم؛ کاظمی، حسین و دادرسی، امیر (۱۴۰۲). پهنه‌بندی اگرواکولوژیک کشور ایران برای تولید گیاهی. نشریه پژوهش‌های زراعی ایران، ۲۱ (۲)، ۱۸۹-۲۰۲.

حکمت نیا، مهران؛ صفدری، مهدی و حسینی، سید مهدی (۱۳۹۹). تعیین و ارزیابی ردپای آب‌های سبز، آبی و خاکستری در تجارت بین‌المللی محصولات کشاورزی ایران. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴ (۲)، ۴۴۶-۴۶۳.

رحیمی پول، مهسا؛ کریمی، ولی‌الله و اسدی، رضا (۱۳۹۶). برآورد اجزاء ردپای آب محصول برنج در استان مازندرانپایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم محیطی، مؤسسه آموزش عالی آبان هراز.

رحیمی مقدم، سجاد؛ دیهیم فرد، رضا و غلامی زالی، علی (۱۴۰۲). مقایسه ردپای آب در بوم نظام‌های مختلف گندم دیم با گندم آبی در کشور. نشریه تولید گیاهان زراعی، ۱۶ (۲)، ۴۳-۶۰

سلطانی، افشین (۱۳۸۸). مدل‌سازی ریاضی در گیاهان زراعی. انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد. ۱۷۶ صفحه.

سلطانی، افشین و میرزائی، عبدالرحمان (۱۴۰۰). کشاورزی پایدار. انتشارات سیرنگ. ۳۸۴ صفحه.

سلطانی، افشین؛ جافر نوده، صفورا؛ دادرسی، امیر؛ رهبان، سمانه؛ ناظری، محمد؛ زینلی، ابراهیم؛ نجفی نژاد، علی؛ ترابی، بنیامین و کاظمی، حسین (۱۴۰۱). تهیه سیستم استانی بیلان و حسابداری آب کشاورزی با مدل‌سازی تولید گیاهی و موازنه آب در اراضی کشاورزی : مطالعه موردی استان گلستان. طرح پژوهشی. دانشکده تولید گیاهی. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

سلطانی، افشین؛ زند، اسکندر؛ عالی مقام، سید مجید؛ نه بندانی، علیرضا؛ بارانی، حسین؛ سلطانی، الیاس؛ ترابی، بنیامین؛ زینلی، ابراهیم؛ میر کریمی، شهرزاد و جولایی، رامتین (۱۳۹۸). تحلیل امنیت غذایی کشور تا ۲۰۵۰ با مدل‌سازی همبست آب، زمین، غذا و محیط‌زیست : چشم‌انداز و سیاست‌های لازم. طرح پژوهشی. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

سلطانی، افشین؛ نه بندانی، علیرضا؛ زینلی، ابراهیم؛ ترابی، بنیامین؛ زند، اسکندر؛ قاسمی، ثریا؛ الستی، امید؛ دادرسی، امیر؛ حسینی، رقیه السادات؛ عالی مقام، سید مجید؛ زاهد، محبوبه؛ محمدزاده، زهرا؛ کمری، حسین؛ عرب عامری، راحله؛ فیاضی، حسنا؛ رهبان، سمانه؛ محمدی، سمانه و کرامت، صالح (۱۳۹۷). اطلس خلأ عملکرد و توان تولید گیاهان زراعی مهم در کشور در شرایط اقلیمی فعلی و آینده. انتشارات سیرنگ. ۲۶۸ صفحه.

سلطانی، افشین؛ نه بندانی، علیرضا؛ عالی مقام، سید مجید؛ دادرسی، امیر؛ ترابی، بنیامین؛ زینلی، ابراهیم؛ زند، اسکندر؛ قاسمی، ثریا؛ بارانی، حسین؛ الستی، امید؛ حسینی، رقیه السادات؛ زاهد، محبوبه؛ فیاضی، حسنا؛ کمری، حسین؛ عرب عامری، راحله؛ محمدزاده، زهرا؛ رهبان، سمانه؛ پورشیرازی، شبنم؛ محمدی، سمانه؛ کرامت، صالح؛ سوسرایی، نعیمه؛ آشناور، محبوبه و احمدی، مادح (۱۳۹۸). مدل‌سازی رشد و تولید پوشش‌های گیاهی در سطح وسیع با SSM-iCrop2. طرح پژوهشی. دانشکده تولید گیاهی. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

شیخ زین‌الدین، آذر و قیاسی، حامد (۱۴۰۲). ارزیابی ردپای آب و کارایی مصرف آب در محصول برنج در راستای پایداری. نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۳۴ (۲)، ۲۰۷-۲۲۵.

عرفانی مقدم، رحمان؛ محدثی، علی؛ نبی پور، علیرضا؛ آبادیان، هدی و نصیری، مرتضی (۱۳۹۸). تیسا، برنج زودرس، کیفی و پر محصول. مجله ترویجی شالیزار، ۱ (۱)، ۲۸-۳۲.

عرفانی مقدم، رحمان؛ نبی پور، علیرضا و نوری، محمد زمان (۱۳۹۷). دستورالعمل تولید برنج سالم در شرایط کشاورزی پایدار. سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.

کاراندیش، فاطمه (۱۳۹۹). بررسی تأثیر دقت‌های مکانی و زمانی در ارزیابی ردپای آب بر شاخص کمبود آب آبی در ایران. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴ (۵)، ۱۶۲۸-۱۶۳۸.

کاراندیش، فاطمه؛ اسماعیلی ساری، عباس و درزی نفت چالی، عبداله (۱۳۹۹). راهنمای ارزیابی ردپای آب : تدوین استاندارد جهانی. انتشارات دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری. ۲۳۰ صفحه.

کرامت، صالح (۱۴۰۰). مدل‌سازی خلأ تولید و عملکرد برنج در شرایط فعلی و آینده در ایران. رساله دکتری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

محدثی، علی؛ عرفانی مقدم، رحمان؛ شریفی، پیمان؛ امین پناه، هاشم و عباسیان، ابوذر (۱۳۹۵). بررسی روابط بین عملکرد و اجزای عملکرد و پایداری تعدادی از ژنوتیپ های برنج با استفاده از روش بای پلات. نشریه تحقیقات غلات، ۶ (۴)، ۴۱۱-۴۲۱.

وزارت جهاد کشاورزی (۱۴۰۰). آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۹۹-۱۳۹۸ جلد اول: محصولات زراعی. وزارت جهاد کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، مرکز فناوری اطلاعات و ارتباطات.

REFERENCES

Erfani Moghaddam, R., Mohaddesi, A., Nabipour, A., Abadian, H., & Nasiri, M. (2018). Tisa, early ripening rice, good quality and high of yield. Shalizar Promotion Magazine, 1 (1), 28-32. (In Persian)

Erfani Moghaddam, R., Nabipour, A., & Nouri, M. Z. (2017). Guidelines for healthy rice production in sustainable agricultural conditions. Agricultural research, education and promotion organization. (In Persian)

Ewaid, S. H., Abed, S. A., & Al-Ansari, N. (2021). Water Footprint of Rice in Iraq. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 722: 1-17.

Food and Agricultural Organization (FAO). 2020. Rice production. Available from http://www.fao.org/faostat/

Grassini, P., Van Bussel, L. G. J., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., Boogaard, H., De Groot, H., Van Ittersum, M. K., & Cassman, K. G. (2015). How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield gap analysis. Field Crops Research. 177: 49-63.

Hekmatnia, M., Safdari, M. & Hosseini, S. M. (2019). Determination and assessment of green, blue and gray water footprints in the international trade of agricultural products of Iran. Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 14 (2), 446-463. (In Persian)

Hoekstra, A. Y. (2019). Green-blue water accounting in a soil water balance. Journal of Advances in Water Resources. 129: 112-117.

Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity, P. Natl. Academy of Sciences. 109: 3232-3237.

Karandish, F. (2019). Investigating the impact of spatial and temporal accuracy in evaluating the water footprint on the water scarcity index in Iran. Iranian Irrigation and Drainage Journal, 14 (5), 1628-1638. (In Persian)

Karandish, F., Esmaeili Sari, A., & Darzi Naftchali, A. (2019). Water footprint evaluation guide: Compilation of a global standard. Publications of Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. 230 p. (Translated in Persian)

Keramat, S. (2020). Modeling the production gap and yield of rice in current and future conditions in Iran. Ph. D. Thesis. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)

Koo, J., & Dimes, J. (2013). HC27 Generic Soil Profile Database, http://hdl.handle.net/1902.1/20299, Harvard Dataverse, V2.

Li, H., Qin, L., & He, H. (2018). Characteristics of the water footprint of rice production under different rainfall years in Jilin Province, China. Journal of Sci. Food Agric. 98: 3001-3013.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Journal of Hydrology and Earth System Sciences. 15: 1577-1600.

Ministry of Jahad Agricultural. (2020). Agricultural statistics for the crop year 2018-2019, volume one: Crops. Ministry of Jahad Agriculture, Planning and Economic Deputy, Information and Communication Technology Center. (In Persian)

Mohaddesi, A., Erfani Moghaddam, R., Sharifi, P., Aminpanah, H. & Abbasian, A. (2017). Studying the

relationships between yield and yield components and stability of some of rice genotypes using biplot method. Cereal Research Journal, 6 (4), 411-421. (In Persian)

Mourtzinis, S., Edreira, J. R., Conley, S. P., & Grassini, P. (2017). From grid to field: assessing quality of gridded weather data for agricultural applications. European Journal of Agronomy. 82: 163-172.

Nehbandani, A., Soltani, A., Rahemi Karizaki, A., Dadrasi, A., & Nourbakhsh, F. (2021). Determination of soybean yield gap and potential production in Iran using modeling approach and GIS. J. Integr. Agric. 20 (2): 395-407.

Nehbandani, A., Soltani, A., Taghdisi, R., Dadrasi, A., & Alimagham, S. M. (2020). Assessing HC27 Soil Database for Modeling Plant Production. International Journal of Plant Production.

Paravar, E., Soltani, A., Zeinali, E., Kazemi, H. & Dadrasi, A. (2023). Agro-ecological zoning of Iran for plant production. Iranian Journal of Field Crops Research, 21 (2), 189-202. (In Persian)

Rahimi Moghaddam, S., Deihimfard, R. & Gholami Zali, A. (2023). Comparison of water footprint in various irrigated and rainfed wheat agro-ecosystems from Iran. Crop Production Journal, 16 (2), 43-60. (In Persian)

Rahimi Pol, M., Karimi, V. A., & Asadi, R. (2016). Estimation of water footprint components of rice crop in Mazandaran province. M. Sc. Thesis, Faculty of Environmental Sciences, Aban Haraz Institute of Higher Education. (In Persian)

Rattalino Edreira, J. I., Andrade, J. A., Cassman, K. G., Van Ittersum, M. K., Van Loon, M. P., & Grassini, P. (2021). Spatial frameworks for robust estimation of yield gaps. Nature Food.

Rockstrom, J., & Barron, J. (2007). Water productivity in rainfed systems: overview of challenges and analysis of opportunities in water scarcity prone savannahs. Journal of Irrigation Science. 25 (3): 299-311.

Rockstrom, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S., & Gerten, D. (2009). Future water availability for global food production: the potential of green water for increasing resilience to global change. Journal of Water Resource Research. 45, W00A12.

Rost, S., Gerten, D., Hoff, H., Lucht, W., Falkenmark, M., & Rockstrom, J. (2009). Global potential to increase crop production through water management in rainfed agriculture. Environmental Research Letters 4.

Sharifi, P., Aminpanah, H., Erfani, R., Mohaddesi, A., & Abbasian, A. (2017). Evaluation of Genotype × Environment Interaction in Rice Basedon AMMI Model in Iran. Rice Science. 24 (3): 173-180.

Sheikh Zeinoddin, A., & Ghiyasi, H. (2022). Evaluation of water footprint and efficiency of water consumption in rice production in line with sustainability. Agricultural Science and Sustainable Production Journal, 34 (2), 207-225. (In Persian)

Sidhu, B. S., Sharda, R., & Singh, S. (2021). An assessment of water footprint for irrigated rice in Punjab. Journal of Agrometeorology. 23 (1): 21-29.

Siebert, S., & Doll, P. (2010). Quantifying blue and green virtual water contents in global crop production as well as potential production losses without irrigation. Journal of Hydrology. 384: 198-207.

Sinclair, T. R. (1986). Water and nitrogen limitations in soybean grain production I. Model development. Field Crops Research. 15 (2): 125-141.

Sinclair, T. R., Soltani, A., Marrou, H., Ghanem, M., & Vadez, V. (2019). Geospatial assessment for crop physiological and management improvements with examples using the Simple Simulation Model. Crop Science. 59: 1-9.

Soltani, A. (2009). Mathematical modeling in crops. Mashhad University Jahad Publications. 176 p. (In Persian)

Soltani, A., & Mirzaei, A. (2020). Sustainable agriculture. Sirang Publications. 384 p. (In Persian)

Soltani, A., & Sinclair, T. R. (2012). Modeling physiology of crop development, growth and yield. CABI Publisher. 312p.

Soltani, A., Alimagham, S. M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Dadrasi, A., Zand, E., Ghassemi, S., Pourshirazi, S., Alasti, O., Hosseini, R. S., Zahed, M., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Kamari, H., Fayazi, H., Mohammadi, S., Keramat, S., Vadez, V., Van Ittersum, M. K., & Sinclair, T. R. (2020). SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. Agricultural Systems. 182, 102855.

Soltani, A., Jafar Noudeh, S., Dadarsi, A., Rahban, S., Nazeri, M., Zeinali, E., Najafinejad, A., Torabi, B., & Kazemi, H. (2021). Preparing the provincial agricultural water balance and accounting system by modeling plant production and water balance in agricultural lands: a case study of Golestan province. Research Project. Faculty of plant production. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)

Soltani, A., Maddah, V., & Sinclair, T. R. (2013). SSM-Wheat: a simulation model for wheat development,

growth and yield. International Journal of Plant Production. 7 (4): 711-740.

Soltani, A., Nehbandani, A., Alimagham, S. M., Dadarsi, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Ghassemi, S., Barani, H., Alasti, O., Hosseini, R. S., Zahed, M., Fayazi, H., Kamari, H., Arabameri, R., Mohammadzadeh, Z., Rahban, S., Pourshirazi, S., Mohammadi, S., Keramat, S., Sosaraei , N., Ashnavar, M., & Ahmadi, M. (2018). Modeling the growth and production of vegetation on a large scale with SSM-iCrop2. Research Project. Faculty of plant production. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)

Soltani, A., Nehbandani, A., Zeinali, E., Torabi, B., Zand, E., Ghassemi, S., Alasti, O., Dadarsi, A., Hosseini, R. S., Alimagham, S. M., Zahed, M., Mohammadzadeh, Z., Kamari, H., Arabameri, R., Fayazi, H., Rahban, S., Mohammadi, S., & Keramat, S. (2017). Atlas of yield gap and production capacity of important crops in the country in current and future climatic conditions. Sirang Publications. 268 p. (In Persian)

Soltani, A., Zand, E., Aalimagham, S. M., Nehbandani, A., Barani, H., Soltani, E., Torabi, B., Zeinali, E., Mir Karimi, S., & Julaei, R. (2018). Analysis of the country's food security until 2050 by modeling the correlation of water, land, food and environment: perspective and necessary policies. Research Project. Agricultural research, education and promotion organization. (In Persian)

Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance—a review. Field Crops Res. 143, 4-17.

Van Oel, P. R., Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2009). The external water footprint of the Netherlands: Geographically-explicit quantification and impact assessment. Journal of Ecological Economics. 69: 82-92.

Van Wart, J., Kersebaum, K. C., Peng, S., Milner, M., & Cassman, K. G. (2013). Estimating crop yield potential at regional to national scale. Field Crops Research. 143: 34-43.

Williams, C. L., Liebman, M., Edwards, J. W., James, D. E., Singer, J. W., Arritt, R., & Herzmann, D. (2008). Patterns of regional yield stability in association with regional environmental characteristics. Crop Sci. 48: 1545-1559.