

Water Footprint of Sugarcane in Iran: An SSM-iCROP2 Based Approach

Nastaran Zamani¹, Jahangir Abedi Koupai^{1*} , Saeid Eslamian¹ and Afshin Soltani²

(Received: July 14-2025 ; Revised: September 17-2025 ; Accepted: January 13-2026)

1. Department of Water Science and Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agriculture Science and Natural Resources, Gorgan, Golestan. Iran.

*Corresponding author, E-mail: koupai@iut.ac.ir

Abstract

Water scarcity has made the agricultural water footprint a critical measure for sustainable resource management, particularly in water-stressed regions such as Iran. This index depends on various factors, including climate, crop yield, dietary habits, and irrigation/agricultural efficiency, which can be estimated more rapidly using modeling approaches. The SSM-iCROP2 model is a simulation model that has been parameterized and evaluated for over 30 crop species in Iran and has been widely used in studies related to crop yield. Since sugar is a key energy source in the food basket, sugarcane occupies vast cultivated areas in the country. Sugarcane is primarily grown in Khuzestan province. This study aimed to apply the aforementioned model to estimate the blue and green water footprint of this strategic crop, using upscaling methods for both potential and farmer-managed conditions from 1992 to 2022. The results showed that the total water footprint of sugarcane (sum of blue, green, and gray water footprints) was 2,251 and 3,134 cubic meters per ton for potential and actual (farmer) conditions, respectively.

Keywords: Water footprint, Modeling, Upscaling, Potential condition, Actual condition

How to cite this article: Zamani, N., Abedi Koupai, J., Eslamian, S. and Soltani, A. 2026. Water Footprint of Sugarcane in Iran: An SSM-iCROP2 Based Approach. *J. Water and Soil Sci.* 30(1): 178-194. DOI: [10.47176/jwss.30.1.49839](https://doi.org/10.47176/jwss.30.1.49839)

Copyright © 2026 Zamani et al. Published by Isfahan University of Technology.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

ردپای آب نیشکر در ایران: رویکردی مبتنی بر مدل SSM-iCROP2

نسترن زمانی^۱، جهانگیر عابدی کوپایی^{۱*} , سعید اسلامیان^۱ و افشین سلطانی^۲

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۴/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۶/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۳)

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
۲. گروه زراعت، دانشکده تولیدات گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گلستان، ایران.
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: koupai@cc.iut.ac.ir

چکیده

کمبود آب، ردپای آب کشاورزی را به شاخصی مهم برای مدیریت پایدار منابع به ویژه در مناطق خشکی مانند ایران تبدیل کرده است. این شاخص وابسته به عوامل مختلفی از جمله اقلیم، میزان عملکرد، عادات غذایی مردم و راندمان آبیاری و کشاورزی است که می‌توان با بهره‌گیری از مدل‌ها آن را با سرعت بیشتری برآورد کرد. مدل SSM-iCROP2 دسته‌ای از مدل‌های شبیه‌سازی است که در ایران برای بیش از ۳۰ گونه گیاهی پارامتریابی و ارزیابی شده است و در بیشتر مطالعات مربوط به عملکرد گیاهی استفاده شده است. از آنجایی که شکر یکی از منابع مهم تأمین انرژی در سبد غذایی است، سطح زیر کشت وسیعی را در کشور به خود اختصاص داده است. شکر حاصل از نیشکر در کشور به طور عمده در استان خوزستان کشت می‌شود. در این مطالعه با هدف معرفی مدل نام‌برده در برآورد ردپای آب آبی و سبز این محصول استراتژیک در کشور از روش بزرگ‌مقیاس‌نمایی برای شرایط پتانسیل و کشاورزان در بازه زمانی ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱ استفاده شد. نتایج نشان داد میزان ردپای آب کل نیشکر در کشور که حاصل جمع ردپای آب آبی، سبز و خاکستری است، برای شرایط پتانسیل و کشاورزان به ترتیب معادل ۲۲۵۱ و ۳۱۳۴ مترمکعب بر تن است.

واژه‌های کلیدی: ردپای آب، مدل‌سازی، بزرگ‌مقیاس‌نمایی، شرایط پتانسیل، شرایط کشاورزان

حق انتشار این مستند، متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است. © ۱۴۰۴.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشر شده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط به استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است: (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



مقدمه

تشخیص مقدار آب مصرف‌شده برای تولید محصولات کشاورزی اهمیت زیادی دارد و ارزیابی آن می‌تواند در شناسایی و ارائه راهکارهای مناسب برای کاهش مصرف آب مؤثر باشد (۲۷). به دلیل کمبود منابع آب در نقاط مختلف دنیا طی سال‌های اخیر، مدیریت بهینه منابع آب حوضه‌های آبریز کار پیچیده‌ای است که شاخص ردپای آب می‌تواند ابزاری مفید در این راستا باشد (۳۳). ردپای آب شاخصی است که مصرف مستقیم و غیر مستقیم آب را در زنجیره تولید یک محصول نشان می‌دهد. این شاخص اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط هوکسترا و همکاران معرفی شد (۱۶) و تا به امروز با اهداف مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. ردپای آب هر محصول دارای سه جزء ردپای آب آبی، سبز و خاکستری است. ردپای آب آبی شاخصی از میزان آب سطحی یا زیرزمینی مصرف‌شده در چرخه تولید محصول است. ردپای آب سبز، شاخصی از میزان آب باران مصرف‌شده در خاک یا روی سطح خاک در چرخه تولید محصول است. ردپای آب خاکستری نیز حجم آب مورد نیاز برای از بین بردن آلودگی ایجاد شده طی تولید محصول است (۱۶). مصرف آب و شاخص ردپای آب تحت تأثیر اقلیم، میزان عملکرد، عادات غذایی مردم و راندمان آبیاری و کشاورزی است؛ بنابراین یافتن روشی بهینه که بتوان به کمک آن میزان مصرف آب را محاسبه کرد، اهمیت دارد. استفاده از مدل‌ها برای شبیه‌سازی شرایط واقعی رشد و عملکرد گیاهان می‌تواند در این زمینه کمک‌کننده باشد (۳۸).

برای دستیابی به ردپای آب در بیشتر مطالعات از مدل‌های مختلف گیاهی مانند EPIC، CROPWAT و AQUACROP به منظور محاسبه تبخیر و تعرق گیاه استفاده شده است. هر کدام از این مدل‌ها مربوط به شرایط خاصی است. به طور مثال مدل AQUACROP برای تخمین تبخیر تعرق گیاه در شرایط کمبود آب (۴۰) و مدل CROPWAT برای محاسبه تبخیر تعرق در شرایط بهینه استفاده می‌شود (۴). برآورد مقدار ردپای آب و اجزای آن ۸۶ درصد از مطالعات را به خود اختصاص داده است

(۳۵). بنابراین وجود یک مدل گیاهی مناسب برای برآورد ردپای آب و اجزای آن در موقعیت‌های مختلف کشاورزی و اقلیمی احساس می‌شود (۴۰).

SSM (Simple Simulation Models) دسته‌ای از مدل‌های شبیه‌سازی هستند که ساختار آن قابلیت استفاده برای تقریباً همه گیاهان زراعی را دارد. این مدل برخلاف سایر مدل‌های گیاهی به اطلاعات و پارامترهای زیادی برای شبیه‌سازی عملکرد گیاهان نیاز ندارد و ساختار آن ساده و به راحتی قابل استفاده است (۳۷). مدل SSM-iCROP2 در ایران برای بیش از ۳۰ گونه گیاهی پارامتریابی و ارزیابی شده است. نتایج نشان داده که این مدل قابلیت خوبی در برآورد عملکرد و میزان آبیاری خالص دارد (۳۶). همچنین این مدل در مطالعات جهانی امنیت غذایی (GYGA) با موفقیت استفاده شده است (۳۷). این مدل می‌تواند با رویکرد بزرگ‌مقیاس‌نمایی (روش پایین به بالا) در محاسبه عملکرد گیاه در مقیاس‌های گوناگون استفاده شود. رویکرد بزرگ‌مقیاس‌نمایی توسط ارزیابی چرخه حیات (Life Cycle Assessment) و دستیابی به ردپای آب (WF Assessment) معرفی شده است (۱۱) که بر اساس اطلاعات هواشناسی، اطلاعات سیستم خاک و گیاه و مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی برای محاسبه عملکرد پتانسیل گیاهان عمل می‌کند و نتایج می‌تواند در مقیاس منطقه‌ای، ملی و قاره‌ای به کمک وزن‌دهی گزارش شود (۳۱).

بررسی عملکرد گیاهان در کنترل و مدیریت مصرف آب و برنامه‌ریزی غذایی برای مردم در مطالعات مختلفی انجام شده است. از طرف دیگر شاخص ردپای آب نیز ابزار مناسبی برای این منظور می‌تواند باشد. بنابراین برآورد عملکرد گیاه و ردپای آب به صورت همزمان در یک مدل و در مقیاس‌های مختلف جغرافیایی می‌تواند به متخصصان کمک بزرگی در راستای مدیریت گیاهی کند.

امروزه یکی از منابع مهم تأمین انرژی در رژیم غذایی روزانه مردم شکر است که به عنوان یک کالای راهبردی معرفی می‌شود و سطح زیر کشت وسیعی در کشور به خود اختصاص داده است. اهمیت این محصول از آنجایی است که در مقایسه

با کالری تولیدی به نسبت ارزان قیمت است. از این رو این محصول همواره مورد حمایت دولت‌ها قرار داشته است. یکی از منابع تأمین شکر در ایران نیشکر است که از اواخر دهه ۱۳۳۰ کشت آن در کشور شروع شد (۲۹). نیشکر یک گیاه چند ساله از خانواده گندمیان است که متعلق به مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری است. ساقه این گیاه دارای مغز است که قند ذخیره شده در آن حدود ۱۴ تا ۱۶ درصد است (۱۷).

بررسی‌ها نشان می‌دهد، ۸۶ مورد از مطالعات مربوط به ردپای آب با هدف تعیین میزان و کیفیت ردپای آب انجام می‌شود و مابقی مقایسه آب و نیاز کودی با سایر ردپاها انجام می‌شود (۳۵). در اولین مطالعه پیش‌بینی ردپای آب جهانی در افق ۲۰۵۰ نشان داده شد که حتی با روند افزایش جمعیت موجود، کاهش ردپای آب به سطح پایدار در صورت تغییر الگو مصرف انسان امکان‌پذیر است (۵).

برای کنترل و مدیریت مصرف آب و برنامه‌ریزی برای الگوی غذایی آینده مردم مطالعات مختلفی روی عملکرد گیاهان انجام شده است. ردپای آب نیز می‌تواند ابزاری مفید در این راستا باشد. بنابراین، ارزیابی همزمان عملکرد گیاه و ردپای آب در یک مدل می‌تواند برای کارشناسان این حوضه بسیار کمک کننده باشد. در بعضی از پژوهش‌ها از مدل خاصی برای برآورد عملکرد پتانسیل یک گیاه خاص استفاده شده است. برای نمونه مدل LINTUL-POTATO برای برآورد عملکرد پتانسیل سیب‌زمینی (۴۱) و CropSyst برای ذرت در آرژانتین استفاده شده است (۲۶). دو مدل زراعی AQUACROP و CROPWAT نیز که برای تخمین تبخیر- تعرق گیاهان مختلف استفاده می‌شوند در مطالعه‌ای برای ارزیابی اثر تکنولوژی و استراتژی آبیاری روی گیاه پنبه مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مدل AQUACROP برای تخمین اثر هر دو عملکرد خوبی دارد؛ درحالی‌که دیگری تغییرات استراتژی آبیاری را به خوبی تخمین می‌زند (۴۲). همچنین مدل CROPWAT برای برآورد عملکرد گیاه در شرایط کم آبیاری نیز قابل استفاده است (۳۲). مطالعه ردپای آب در تایلند روی ده گیاه مهم کشت‌شده در

آنجا، نشان داد تفاوت زیادی بین نیاز آبی گیاهان در مناطق مختلف این کشور وجود دارد. گیاه نیشکر نیز دارای رتبه سوم از نظر میزان ردپای آب در بین این ده گیاه بود. مجموع ردپای آب سبز و آبی این گیاه برابر با ۱۰۳۶۲ مترمکعب بر هکتار برآورد شد (۸). برای دستیابی به ردپای آب گندم در کشور عراق از مدل CROPWAT و CLIMWAT استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد با تفاوت در اقلیم رشد و فاکتورهای تولید میزان ردپا متفاوت خواهد شد. از آنجایی که میزان رد پای آب سبز در این کشور در تولید گندم دو برابر ردپای آب آبی است، امکان کاهش ردپای آب سبز با کشت گندم در ۴ استان پرباران و کشت گیاهان کم آب‌بر، پربازده و اقتصادی در مناطق مرکزی و جنوبی کشور باعث صرفه‌جویی در مصرف آب آبی خواهد شد (۶).

در ایران نیز مطالعاتی در مورد ردپای آب انجام شده است: در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۲ کل ردپای آب ملی گندم، جو و ذرت به ترتیب ۳۶۷۷۷، ۷۹۷۵ و ۳۷۴۴ میلیون متر مکعب در سال تخمین زده شد. این میزان در مجموع ۴۸۴۹۶ میلیون متر مکعب در سال تقریباً نیمی از برداشت آب کشور است. در همین بازه زمانی مجموع ردپای خاکستری و سفید برای این محصولات به ترتیب ۳۳٪، ۳۶٪ و ۵۷٪ بود. در سطح استانی اردبیل (۱۰/۳٪)، فارس (۹/۷٪) و آذربایجان شرقی (۸/۵٪) بیشترین سهم در ردپای آب کل ملی در تولید غلات را داشتند (۱). در پژوهشی به میزان آب مجازی برای تولید و تجارت شکر تولیدشده از نیشکر و چغندر قند در دوره ۱۳۹۳-۱۳۸۴ پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان داد در حوضه تجارت شکر، ایران بیشتر از صادرات به واردات مجازی آب محصول شکر متکی است. به طور میانگین حجم آب مجازی وارداتی در این دوره بیش از ۱۵ برابر حجم آب مجازی صادراتی برای شکر تولیدشده از این دو محصول بود (۳۰). به منظور ارزیابی شاخص ردپای آب محصولات زراعی و باغی استان تهران با استفاده از آمارنامه‌های ارائه‌شده توسط جهاد کشاورزی شهرستان‌هایی که بیشترین مقدار تولید و سطح زیر کشت را داشتند، شناسایی شدند و با استفاده

و طول جغرافیایی ۴۲ تا ۶۲ درجه شرقی قرار گرفته است. به دلیل همین پهنه وسیع، تنوع اقلیمی زیادی در کشور به چشم می‌خورد و به همین دلیل در ایران شکر از دو محصول چغندرقد و نیشکر تولید می‌شود. گیاه نیشکر به طور عمده در جنوب غرب کشور یعنی استان خوزستان و در هفت کشت و صنعت به صورت وسیع کشت می‌شود. در این مطالعه از داده‌ها و اطلاعات موجود در ۳۰ سال منتهی به سال ۱۴۰۱ برای برآورد میزان ردپای آب محصول شکر به کمک مدل SSM-iCROP2 استفاده شد. مراحل کار به شرح زیر است:

مدل شبیه‌سازی گیاهی و روش بزرگ مقیاس‌نمایی

در این پژوهش برای اولین بار برای محاسبه ردپای آب آبی و سبز از مدل SSM-iCROP2 استفاده شد. مدل‌سازی با این مدل به کمک اطلاعات هواشناسی، خاک، مدیریت زراعی و پارامترهای گیاهی انجام می‌گیرد که با وارد کردن کدهای جدید امکان برآورد شاخص ردپای آب سبز و آبی نیز در این پژوهش فراهم شد (۳۶).

ابتدا نقشه زمین‌های زراعی زیر کشت نیشکر از آمار جهاد کشاورزی کشور تهیه شد. سپس نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی سینوپتیک به مزارع به گونه‌ای انتخاب شد که حداقل ۴۰ درصد از مساحت زمین‌های زراعی را پوشش دهد. بر این اساس ایستگاه اهواز دارای این خصوصیت بود (۱۴) و داده‌های هواشناسی شامل دمای بیشینه، دمای کمینه، بارندگی و تشعشع خورشیدی روزانه از اداره هواشناسی کشور در بازه ۳۰ ساله از سال ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۱ تهیه شد. اطلاعات مربوط به ایستگاه در فایل اکسل جداگانه با فرمت مخصوص مدل SSM-iCROP2 به صورت روزانه همراه با اطلاعات مختصات جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه آماده شد.

روش دامنه برون‌یابی اطلس خلأ عملکرد (GYGA)

آخرین روشی که توسط گیگا برای پهنه‌بندی اقلیمی ارائه شده است، دامنه برون‌یابی اطلس جهانی خلأ عملکرد نام دارد که

از نرم افزار NetWat که نسخه بومی شده CropWat است، نیاز آبی گیاهان محاسبه شدند. عملکرد محصولات و پارامترهایی که در محاسبات دخالت داشتند نیز از طریق آمارنامه‌های کشاورزی محاسبه و گردآوری شد. پس از محاسبه شاخص ردپای آب تعیین شد که هر شهرستان برای کشت چه محصولی مناسب‌تر است؛ هرچند در صورت عدم کشت در استان تهران منابع ملی بیشتر حفظ خواهد شد (۴۷).

به دلیل اهمیت شکر در سبد غذایی مردم و سطح زیر کشت وسیعی که به گیاهان این محصول اختصاص دارد، مطالعات مختلفی در مورد عملکرد این محصول به خصوص در کشت و صنعت‌های خوزستان انجام شده است. برای نمونه در مطالعه‌ای که در دو مزرعه ۲۵ هکتاری از واحد کشت و صنعت سلمان فارسی برای بررسی وضعیت مصرف آب گیاه نیشکر انجام شد، از مدل AQUACROP و تغییر سناریوهای آبیاری و زهکشی استفاده شد. نتایج نشان داد مقدار آب مورد نیاز برای تولید نیشکر در این مزرعه با زهکشی آزاد ۲۵۸ متر مکعب بر تن بود که از این مقدار ۱۲ درصد آب سبز و ۷۲ درصد آب آبی است. در حالت زهکشی کنترل شده و تأمین ۸۵ درصد نیاز آبی گیاه، شاخص ردپای آب نسبت به حالت معمولی ۲۳ درصد کاهش می‌یابد (۲۷). در پژوهشی با نرم افزار CROPWAT مقدار نیاز آبی خالص و آب مجازی تولید محصول چغندرقد، نیشکر و شکر حاصل از آن در کشور برآورد شد. نتایج آنها نشان داد شکر تولیدشده از نیشکر آب مجازی بیشتری نسبت به شکر حاصل از چغندرقد دارد. میزان آب مجازی تولید نیشکر و چغندرقد در سال ۱۳۹۳ در این پژوهش به ترتیب ۲۳۵ متر مکعب بر تن و ۱۸۰ متر مکعب بر تن تخمین زده شد (۳۰).

هدف از این مطالعه معرفی مدل SSM-iCROP2 برای برآورد ردپای آب سبز و آبی محصول نیشکر در کشور برای اولین بار است.

مواد و روش‌ها

کشور پهناور ایران در عرض جغرافیایی ۲۴ تا ۳۹ درجه شمالی

اطراف هر ایستگاه هواشناسی زده شد و با استفاده از تابع Clip بافر هر ایستگاه به اندازه منطقه اقلیمی آن ایستگاه برش داده شد (۴۳).

در مرحله بعد باید اطلاعات پروفیل خاک تعیین شود که معمولاً این اطلاعات دارای محدودیت است و برای حل این مشکل از نقشه HC27 (Harvest Choice) که پروفیل عمومی خاک بر اساس سه معیار بافت خاک، عمق ریشه و کربن آلی می باشد و در مدل های شبیه سازی گیاهی قابل استفاده هستند، استفاده شد. در این نقشه همه مناطق جهان با شبکه های به اندازه ۵ دقیقه (در حدود ۱۰ در ۱۰ کیلومتر) شبکه بندی شده است. شماره گذاری پروفیل خاک در این نقشه از ۱ تا ۲۷ می باشد که از ترکیب سه گروه بافت خاک رس، سیلت و شن، سه عمق خاک عمیق، متوسط و سطحی و حاصل خیزی زیاد، متوسط و کم حاصل شده است. ارزیابی HC27 در ایران با مدل SSM-iCROP2 توسط نه‌بندانی و همکاران (۲۸) انجام شد و نتایج آنها این بانک اطلاعات خاک را برای ایران قابل قبول گزارش کرد. برای تعیین میزان مساحتی که هر بافت خاک از اراضی نیشکر کشور تشکیل می دهد از تابع Zonal statistics as table در نرم افزار ArcGIS استفاده شد. بدین ترتیب نقشه خاک و نوع خاک در هر بافر و درصد اراضی در هر نوع خاک تهیه شد. برای نیشکر به دلیل اینکه خاک HC17-Loam LF120 بیش از ۵۰ درصد از اراضی را به خود اختصاص داده بود، همین یک نوع خاک در نظر گرفته شد (شکل ۱).

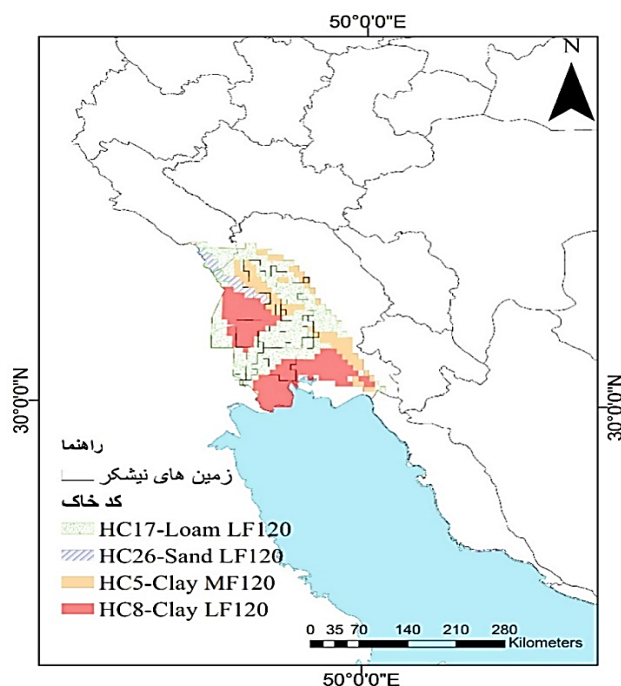
پارامتریابی مدل SSM-iCROP2

در برپایی مدل باید داده های ورودی در چهار شیت وارد شود: اطلاعات هواشناسی در Location، اطلاعات خاک در Soil، پارامترهای گیاهی در Crop و اطلاعات مربوط به مدیریت مزرعه در Manage. پارامتریابی مدل با استفاده از پژوهش های انجام شده در کشور و استخراج میزان عملکرد پتانسیل در نقاط مختلف کشور انجام شد. پارامتریابی مدل برای نیشکر نیز با استفاده از ۶ مقاله که در ادامه مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه

ترکیب ساده شده ای از چند روش پهنه بندی است. در این مطالعه نیز از پهنه بندی ارائه شده برای ایران توسط GYGA (Global yield gap atlas extrapolation domain (GYGA-ED)) برای پهنه بندی اقلیمی استفاده شده است. در این روش، پهنه های اقلیمی بر اساس سه متغیر ۱) واحد دمایی (GDD) (Growing degree days) با دمای پایه صفر درجه سانتی گراد، ۲) شاخص خشکی سالیانه (AI) (Annual aridity index) و ۳) نوسانات دمای فصلی از یکدیگر تفکیک می شوند. برای آشنایی بیشتر با این روش، می توان مرجع اطلس خلأ عملکرد و توان تولید گیاهان زراعی مهم در کشور در شرایط اقلیمی فعلی و آینده از سلطانی و همکاران (۳۹) را مطالعه کرد.

در روش GYGA و استفاده آن از مدل های شبیه سازی تولید گیاهان برای برآورد عملکرد پتانسیل محصولات در مناطق مختلف به داده های هواشناسی نیاز است. خصوصیت اصلی هر پهنه اقلیمی یکنواختی آب و هوا در آن است که مدیریت داده های هواشناسی را راحت تر می کند و به داده های هواشناسی کمتری نیاز خواهد بود. به کمک پروتکل GYGA، پهنه های اقلیمی (CZs) با استفاده از روش بزرگ مقیاس نمایی یا پایین به بالا انتخاب می شوند. سپس مناطق اقلیمی برگزیده (DCZs) و ایستگاه های هواشناسی مرجع (RWS) در مناطق اقلیمی برگزیده انتخاب می شوند. محدوده ای به شعاع ۱۰۰ کیلومتر با مرکز بودن ایستگاه هواشناسی (بافر) در محدوده RWS، با در نظر گرفتن بافت خاک، مشخصات زراعی و پارامترهای گیاهی تعیین شد. پس از تخمین عملکرد پتانسیل، به کمک میانگین وزنی سطح زیر کشت گیاه مورد نظر، عملکرد در سطح بالاتر یعنی DCZ و سپس در مقیاس ملی تعیین می شود که به این فرایند روش پایین به بالا یا بزرگ مقیاس نمایی گفته می شود (۹ و ۲۸).

برای محاسبه تشعشع رسیده روزانه از اطلاعات ساعت آفتابی استفاده شد و در نهایت داده های هواشناسی به فرمت قابل شناسایی توسط مدل SSM-iCROP2 تبدیل شد. به کمک تابع Buffer در نرم افزار ArcGIS بافری به شعاع ۱۰۰ کیلومتر



شکل ۱. نقشه خاک و محدوده اراضی زیر کشت نیشکر

جدول ۱. مقالات بررسی شده برای پارامتریابی مدل برای نیشکر

مرجع	عنوان مقاله	کشت و صنعت
(۱۲)	تخمین عملکرد کمی و کیفی نیشکر با استفاده از شبکه فازی-عصبی تطبیق یافته با الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام	دعبل خزایی
(۴۴)	مدل سازی عملکرد محصول نیشکر با استفاده از مدل ترکیبی مبتنی بر داده‌های سنجش از دور	حکیم فارابی
(۳۴)	بررسی نیاز آبی و ضرایب گیاهی نیشکر به روش لایسمتری در اراضی نیشکر جنوب اهواز	مؤسسه تحقیقات
(۱۳)	ارزیابی عملکرد نیشکر تحت تأثیر سطوح آبیاری و کود با استفاده از مدل AQUACROP	امیرکبیر
(۴۸)	تأثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری قطره‌ای زیرسطحی بر بهره وری آب آبیاری، عملکرد و اجزای عملکرد نیشکر رقم CP69-1062	مؤسسه تحقیقات

مقادیر پیش‌بینی شده در نمودار ۱:۱ با حدود اطمینان ۲۰ درصد ترسیم شد.

$$RMSE (\%) = \sqrt{\left(\frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{n-1} \right) \times \frac{100}{\bar{X}}} \quad (۱)$$

$$CV = \frac{RMSE}{\mu_{Y_i}} \times 100 \quad (۲)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (۳)$$

شده است، انجام شد. در مدل میزان عملکرد ریشه برحسب وزن خشک و تر شبیه‌سازی می‌شود و میزان عملکرد مشاهده شده در بیشتر مقالات برحسب وزن تر است؛ بنابراین مقدار رطوبت باید از عملکرد ریشه کم شود. میزان رطوبت در این مقاله ۷۰ درصد در نظر گرفته شد.

بررسی قدرت مدل‌های مختلف در پیش‌بینی با استفاده از سه شاخص جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (معادله ۱)، ضریب تغییرات (CV) (معادله ۲) و نیز ضریب همبستگی (r) (معادله ۳) تعیین می‌شود. در این مطالعه مقادیر واقعی در مقابل

در این معادلات X_i و Y_i به ترتیب مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری‌شده متغیرها و n تعداد مشاهدات است. RMSE به صورت درصد اختلاف نسبی مقادیر پیش‌بینی‌شده در برابر مقادیر واقعی بیان می‌شود. کم بودن میزان خطا (RMSE) و زیاد بودن ضریب همبستگی (r) بیانگر دقت قابل قبول مدل و ملاک برتری آن خواهد بود.

مدل‌سازی شرایط کشاورزان

بیشتر مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی مانند CROPWAT شرایط بهینه را شبیه‌سازی می‌کنند (۴). مدل‌سازی شرایط کشاورز در مدل SSM-iCROP2 با تغییر سه پارامتر بیشینه شاخص سطح برگ مورد انتظار (LAIMX) (Maximum expected leaf area index)، کارایی استفاده از تشعشع در شرایط مطلوب رشد (IRUE) (Radiation use efficiency under optimal growth conditions) و بیشینه شاخص برداشت (Himax) (Maximum harvest index/Liner increase in harvest index) امکان‌پذیر است. با کم کردن این پارامترها و مقایسه نتایج شبیه‌سازی با عملکرد گزارش‌شده کشاورزان می‌توان پارامترهای مناسب برای شبیه‌سازی شرایط کشاورز را پیدا کرد. با استفاده از آمار گزارش شده از سازمان جهاد کشاورزی این کار برای محصول مد نظر انجام گرفت.

ردپای آب خاکستری

در این مطالعه ردپای آب خاکستری محصول نیشکر با توجه به آمار و اطلاعات موجود در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ محاسبه شد. روش به‌کارگرفته‌شده به دلیل وسعت سطح کشت این محصول و کمبود داده‌های مورد نیاز روش تایر-۱ (Tier-1) براساس گزارش ۶۵ ارائه‌شده توسط فرنک و همکاران (۷) است. برای محاسبه ردپای آب خاکستری، تنها بحرانی‌ترین آلاینده در نظر گرفته می‌شود که در این مطالعه کود نیتروژن است (۲۱). تا به امروز استفاده از ضریب آبشویی مؤثرترین روش در تخمین میزان آلودگی رسیده به آب زیرزمینی یا سطحی بوده است که

این روش خود در چهار سطح دقت متفاوت ضریب آبشویی نترات را تخمین می‌زند. روش‌ها به ترتیب بهتر می‌شوند و از طرف دیگر به داده‌های بیشتری نیاز دارند. در سطح اول یک مقدار ثابت برای آلودگی رسیده به آب ناشی از آبشویی در نظر گرفته می‌شود که در این روش برای شرایطی که هیچ گونه اطلاعاتی در مورد خاک، آب و هوا و مدیریت کشاورزی وجود نداشته باشد، استفاده می‌شود. سطح دوم مازاد نیتروژن در خاک را با استفاده از یک میانگین جهانی برای آبشویی در نظر می‌گیرد. در دو سطح دیگر نیز بر اساس مصرف و مازاد نیتروژن با در نظر گرفتن ضرایب آبشویی بیشینه و کمینه ضریب آبشویی تخمین زده می‌شود. در این مطالعه از سطح سوم برآورد ضریب آبشویی استفاده شده است که این ضریب به عنوان تابعی از وزن‌های وابسته به شرایط محیطی و کشاورزی به دست می‌آید. عوامل تأثیرگذار شامل بافت خاک، جذب از اتمسفر، زهکشی طبیعی، بارندگی، تثبیت، میزان استفاده از کود، جذب گیاه و مدیریت کشاورزی هستند. در نهایت ضریب آبشویی نترات به عنوان تابعی از فاکتورهای تأثیرگذار بین یک مقدار کمینه و بیشینه به صورت معادله ۴ تخمین زده می‌شود:

$$\alpha = \alpha_{\min} + \left[\frac{\sum S_i \times W_i}{\sum W_i} \right] \times (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \quad (4)$$

که در این معادله α ضریب آبشویی محلی، $\alpha_{\min}$ کمترین میزان ضریب آبشویی، $\alpha_{\max}$ بیشترین مقدار ضریب آبشویی است که طبق گزارش ارائه‌شده، این دو پارامتر برای منطقه مورد مطالعه به ترتیب برابر با ۰/۰۱ و ۰/۲۵ است (۷). نمره و وزن هر یک از عوامل تأثیرگذار نیز طبق جدول ارائه‌شده در گزارش فرنک و همکاران (۷) محاسبه شد که برای اختصار در اینجا نتایج ارائه شده است. پس از محاسبه ضریب آبشویی میزان ردپای آب خاکستری طبق معادله ۵ محاسبه شد:

$$WF = \frac{(\alpha \times AR)}{\frac{C_{\max} - C_{\min}}{Y}} \quad (5)$$

در این معادله AR میزان مصرف مواد شیمیایی (کیلوگرم بر هکتار)، $C_{\max}$ بیشترین غلظت مجاز، $C_{\min}$ غلظت طبیعی آلاینده

معمولاً به کمک منابع و تحقیقات انجام شده قبلی و واسنجی مدل محاسبه می‌شود. آماره‌های مورد استفاده برای بررسی دقت مدل، ضریب تغییرات (CV)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی (r) هستند. در ادامه در شکل ۲ نتایج پارامتریابی انجام شده برای نیشکر قابل ملاحظه است. در جدول ۴ نیز برخی از پارامترهای برآورد شده توسط مدل ارائه شده است. در مطالعه انجام شده برای ارزیابی مدل AQUACROP در برآورد عملکرد نیشکر نیز میزان برخی از پارامترهای گیاهی مطابق با پژوهش حاضر بود. دمای پایه، دمای مطلوب فوقانی برای نمو و بیشینه شاخص برداشت به ترتیب برابر ۹، ۳۲ و ۰/۹ گزارش شده بود (۱۰). در یک مطالعه میدانی در استرالیا دمای پایه برای رشد نیشکر ۱۲ و دمای سقف برای نمو ۴۵ درجه سانتی‌گراد به دست آمد. همچنین آنها شاخص سطح برگ بیشینه در شرایط بهینه آب و کود را بین ۵ تا ۷ محاسبه کردند. بیشینه دمای تخریب برگ نیز ۴۵ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شد (۱۸). در مطالعه میدانی دیگری روی نیشکر کسر آب قابل دسترس خاک ۰/۳ تا ۰/۴ محاسبه شد (۱۹).

همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است، حدود ۷۴ درصد از ۱۳۹۳۸۲۷ هکتار اراضی نیشکر در اقلیم ۸۰۰۳ قرار گرفته و بقیه اراضی در اقلیم ۸۰۰۲ هستند.

مدل‌سازی شرایط کشاورزان

در این پژوهش برای اولین بار با استفاده از مدل SSM-iCROP2 شرایط کشت گیاه در شرایط واقعی مدل‌سازی شد. با تغییر سه پارامتر گیاهی شرایطی غیر از شرایط پتانسیل شبیه‌سازی شد که به کمک آن عملکرد در شرایط کشاورزان (با وجود تنش و آفات و بیماری‌ها) شبیه‌سازی شد. این سه پارامتر شامل RUE، LAIMX و Himax است که با کاهش آنها شرایط شبیه‌سازی مدل به شرایط کشاورزان نزدیک می‌شود (جدول ۵). در شکل ۴ حدود اطمینان با استفاده از ضریب تغییرات عملکردهای گزارش شده رسم شده که برای نیشکر ۱۰ درصد است.

مد نظر (کیلوگرم بر مترمکعب) است که در صورت نبود دخالت‌های انسان در حوضه احتمال وجود آن می‌رفت که برای مواد ساخته دست بشر مقدار آن صفر در نظر گرفته می‌شود و Y عملکرد گیاه (تن در هکتار) است (۲۱).

نتایج و بحث

با توجه به اطلاعات موجود در آمارنامه کشاورزی وزارت جهاد کشاورزی کشور در سال ۱۴۰۰-۱۳۹۹، رتبه چهارم تولید محصولات آبی زراعی متعلق به نیشکر است. این محصول با تولید ۵/۹ میلیون تن، ۹ درصد از سهم تولیدات زراعی آبی را دارا است. استان خوزستان با ۹۹/۹۸ درصد بیشترین تولید کننده نیشکر است (۳). در جدول ۲ اطلاعات مربوط به ایستگاه هواشناسی اهواز که ایستگاه منتخب برای این محدوده بود و در جدول ۳ اطلاعات مربوط به خاک منطقه ارائه شده است. در صورتی که بیش از ۵۰ درصد از اراضی یک بافر از یک نوع خاک باشد، برای آن ایستگاه یک نوع خاک در نظر گرفته می‌شود. خاک اراضی نیشکر کد ۱۷ را داشت.

وضعیت جاری عملکرد و تولید نیشکر در کشور

برنامه‌ریزی برای آینده نیازمند آگاهی از وضعیت شرایط کنونی است. در این بخش روند تغییرات سطح زیر کشت، تولید و عملکرد برای گیاه مد نظر بر اساس آمار سال‌های برداشت ۱۳۹۲ تا ۱۴۰۲ وزارت جهاد کشاورزی (۴۶) آورده شده است. بر اساس این آمار استان خوزستان با ۱۰۲۰۵۸ هکتار بیشترین سطح زیر کشت نیشکر را در مقایسه با گیلان و مازندران که هرکدام به ترتیب ۲۹ و ۲۴۰ هکتار کشت داشتند، دارد. میزان تولید این محصول در این استان با عملکرد ۷۴۴۰۲ کیلوگرم در هکتار برابر با ۷/۵ میلیون تن در سال زراعی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ است.

پارامتریابی مدل SSM-iCROP2

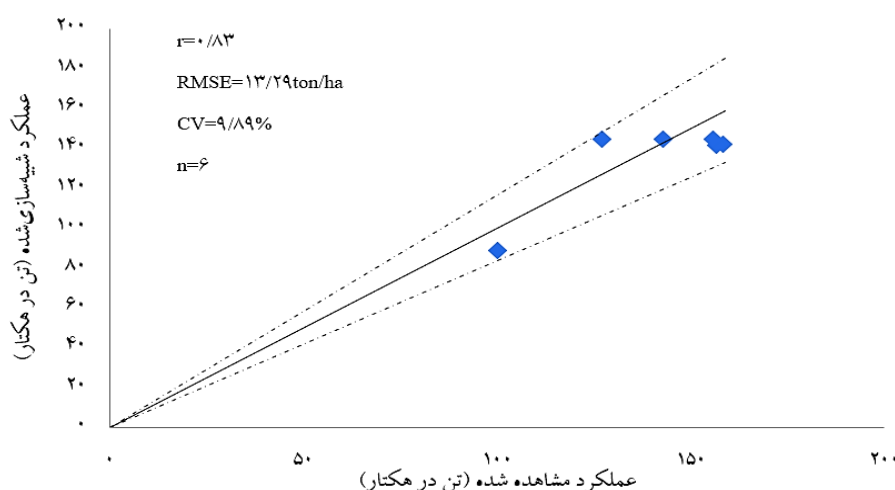
چندین پارامتر گیاهی در مدل وجود دارد که قبل از اجرای مدل برای هر گیاه باید مقادیر این پارامترها برآورد شوند. این کار

جدول ۲. مشخصات ایستگاه هواشناسی منتخب

منطقه اقلیمی	ایستگاه هواشناسی مرجع	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا	گد خاک (درصد)	سطح زیر کشت درون هر بافر (درصد از کل سطح زیر کشت)
۸۰۰۳	اهواز	۳۱/۳۴	۴۸/۷۴	۲۲/۵	۱۷ (۶۳)	۸۴۴۳۰۱ (۶۱)

جدول ۳. مشخصات خاک‌های انتخاب شده برای اجرای مدل (۲۲)

نام خاک	کد خاک	کربن آلی خاک	عمق خاک	ضریب آلیبدو	شماره منحنی خاک	زهکشی	اشباع	ظرفیت زراعی	حد مقدار آب
HC17-Loam LF120	۱۷	۰-۰/۷	۱۲۰۰	۰/۱	۷۵	۰/۵	۰/۴۱	۰/۳۰۷	۰/۱۸



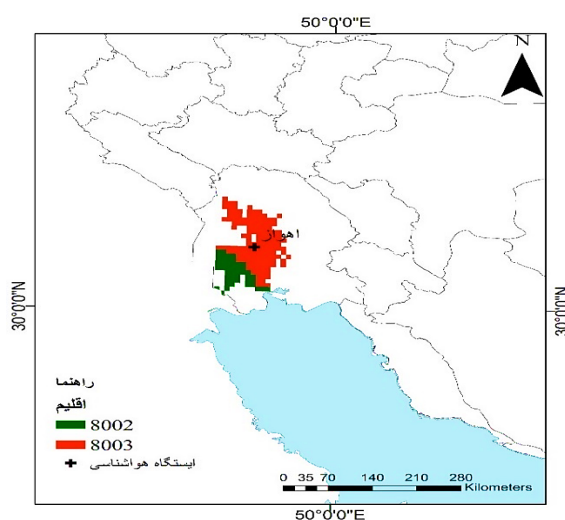
شکل ۲. مقادیر عملکرد شبیه سازی شده مدل در برابر مقادیر مشاهده شده به کمک داده های استخراج شده از مقالات

خروجی دیگر مدل SSM-iCROP2 ردپای آب آبی و سبز است که براساس دستورالعمل هوکسترا ۲۰۱۹ شبیه سازی شد (۱۵). در شکل ۶ ردپای آب آبی و سبز نیشکر طی ۳۰ سال دوره پژوهش در شرایط پتانسیل و کشاورزان ارائه شده است. ردپای آب سبز در شرایط کشاورزان حدود ۱۰ درصد و در شرایط پتانسیل حدود ۶ درصد ردپای آب آبی است. به طور کلی شرایط پتانسیل ردپای آب آبی حدود ۷۷ درصد شرایط کشاورزان و ردپای سبز در این شرایط حدود ۴۵ درصد شرایط کشاورزان است. در جدول ۶ خلاصه اطلاعات آماری ردپای آب نیشکر ارائه شده است. سهم قابل توجه ردپای آب آبی به

عملکرد پتانسیل در ۳۰ سال گذشته در سطح اقلیم تغییر چندانی نداشته است؛ درحالی که در شرایط کشاورزان عملکرد به دلیل پیشرفت روش ها و تجهیزات کشاورزی افزایش یافته است. به دلیل اینکه کشت نیشکر بیشتر در خوزستان متمرکز است، عملکرد این نقطه به کل کشور تعمیم داده می شود (شکل ۵). در برزیل نیز در مطالعه ای نشان دادند که با وجود ثبات عملکرد پتانسیل نیشکر، عملکرد واقعی از طریق روش های بهبود مدیریتی تا ۲۵ درصد افزایش یافته است. این همسویی بین المللی نشان می دهد که بهبود مدیریت زراعی کلید اصلی کاهش شکاف عملکرد در کشت نیشکر است (۲۳).

جدول ۴. برخی از پارامترهای برآوردشده در مدل SSM-iCrop2 برای نیشکر در ایران

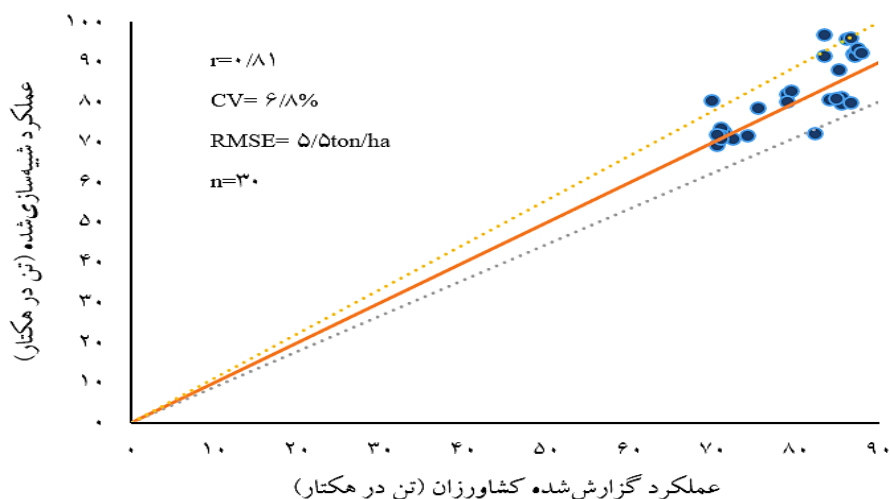
پارامتر	توصیف	مخفف	نیشکر
مراحل فنولوژی (درجه سانتی گراد روز)	دمای پایه برای نمو	TBD	۱۰
	دمای مطلوب تحتانی برای نمو	TP1D	۳۲
	دمای مطلوب فوقانی برای نمو	TP2D	۳۵
	دمای سقف برای نمو	TCD	۴۵
	واحد حرارتی در زمان رسیدگی برداشت	tuHAR	۴۵۰۰
	واحد حرارتی تا رسیدگی	tuBLS	۴۲۷۵
سطح برگ	شاخص سطح برگ در مرحله گیاهچه ای	yl	۰/۰۱
	کسری از واحد حرارتی از کاشت تا ۹۶ درصد شاخص سطح برگ بیشینه	x2	۰/۷۵
	شاخص سطح برگ بیشینه	LAIMX	۵/۸
ماده خشک	دمای مطلوب تحتانی برای تولید ماده خشک	TP1RUE	۲۰
	دمای مطلوب فوقانی برای تولید ماده خشک	TP2RUE	۳۵
	دمای سقف برای تولید ماده خشک	TCRUE	۵۰
	کارایی استفاده از تشعشع در شرایط مطلوب رشد	IRUE	۳/۴
	دمای پایه برای تولید ماده خشک	TBRUE	۱۰
	بیشینه شاخص برداشت	HI _{max}	۰/۹
	کمینه شاخص برداشت	HI _{min}	۰/۹
رشد ریشه	کسری از واحد حرارتی که در آن رشد ریشه شروع می شود (درجه سانتی گراد روز)	tuBRG	۰/۰۱
	کسری از واحد حرارتی که در آن رشد ریشه متوقف می شود (درجه سانتی گراد روز)	tuTRG	۰/۵
	کسر آب قابل دسترس خاک که در کمتر از آن گسترش تولید ماده خشک کاهش می یابد	WSSG	۰/۴
	کسر آب قابل دسترس خاک که در کمتر از آن گسترش سطح برگ کاهش می یابد	WSSL	۰/۵
	کمینه دمای آستانه برای تخریب برگ (درجه سانتی گراد)	FrzTh	۸
	بیشینه دمای آستانه برای تخریب برگ (درجه سانتی گراد)	HeatTH	۴۵
	محتوای رطوبت ریشه (درصد رطوبت تر ریشه)	MC	۷۰



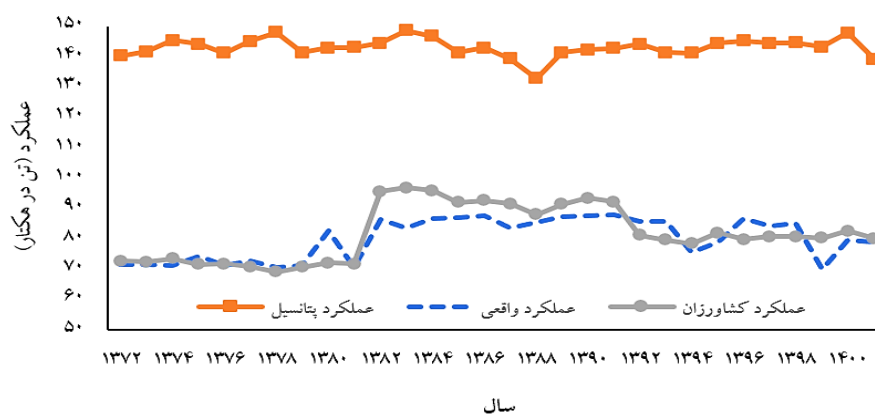
شکل ۳. اقلیم های زمین های کشت نیشکر و موقعیت ایستگاه هواشناسی

جدول ۵. ضرایب گیاهی تغییر یافته برای شرایط کشاورزان نیشکر

گیاه	LAIMX	IRUE	Himax
نیشکر پتانسیل	۵/۸	۳/۴	۰/۹
نیشکر کشاورزان	۳/۶۶	۲/۲۸	۰/۶۳



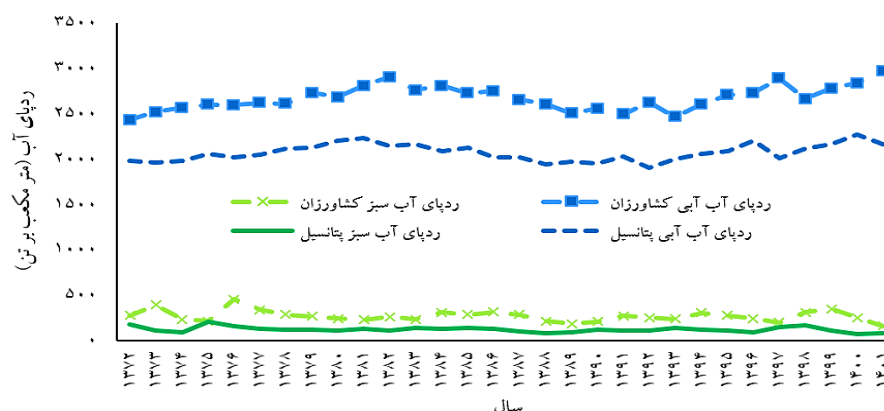
شکل ۴. مقایسه نتایج شبیه سازی مدل با مقادیر عملکرد گزارش شده کشاورزان با ضرایب گیاهی متناسب با عملکرد کشاورزان نیشکر در کل دوره آماری، خط ۱:۱ با حدود اطمینان ۱۰٪



شکل ۵. عملکرد پتانسیل، واقعی و کشاورزان نیشکر در کل کشور در طول دوره آماری

ویژه در شرایط کشاورزان می تواند تمرکز سیاست های کلان کشور را بر این بخش بیشتر کند. توسعه کشاورزی هوشمند نسبت به آب و هوا می تواند با هدف بیشترین استفاده از آب سبز صورت گیرد. نتایج به دست آمده نشان می دهد مصرف آب آبی کشاورزان

حدود ۳۰ درصد بیشتر از شرایط پتانسیل است که این نشان دهنده امکان صرفه جویی ۶۰۱ متر مکعب بر تن از راه بهینه سازی است. این شکاف آبی نیازمند نوسازی سیستم های آبیاری، آموزش کشاورزان در مدیریت آب و استفاده از ارقام کم آب بر است. همچنین پیشنهاد می شود اصلاح نظام تخصیص



شکل ۶. ردپای آب آبی و سبز شرایط پتانسیل و کشاورزان

جدول ۶. خلاصه اطلاعات آماری ردپای آب نیشکر (مترمکعب بر تن) طی ۳۰ سال دوره آماری

ردپای آب	کشاورزان		پتانسیل	
	سبز	آبی	سبز	آبی
میانگین	۲۷۰	۲۶۷۲	۱۲۳	۲۰۷۱
انحراف معیار	۶۲	۱۳۴	۲۹	۹۴
ضریب تغییرات (%)	۲۰	۱۰	۲۰	۵
بیشینه	۴۵۴	۲۹۶۹	۲۰۹	۲۲۷۰
کمینه	۱۶۰	۲۴۳۰	۷۳	۱۹۰۴

بیشتر آب در خوزستان نسبت به میانگین جهانی است. این تفاوت می‌تواند به دلیل روش‌های سستی آبیاری و یا مدیریت نامناسب آب در منطقه باشد (۲۴). مطالعه دیگری روی ردپای آب محصولات کشاورزی ایران نشان می‌دهد که نیشکر یکی از پرمصرف‌ترین محصولات از نظر آب آبی در خوزستان است (حدود ۲۵۰۰ متر مکعب بر تن). یافته‌های پژوهش حاضر (۲۶۷۲ متر مکعب بر تن) این نتیجه را تأیید می‌کند و تفاوت جزئی احتمالاً به دلیل تفاوت دوره آماری است. هر دو پژوهش بر ضرورت بهینه‌سازی آبیاری و کاهش وابستگی به منابع آب زیرزمینی در خوزستان تأکید دارد (۲۰).

ردپای آب خاکستری

با توجه به آنچه گفته شد و به کمک جداول موجود مقدار ضریب آبتیوی نترات مطابق زیر تخمین زده شد:

آب با توجه به ردپای آب واقعی محصول و پاداش به کشاورزانی که بهره‌وری بیشتری از آب دارند، صورت گیرد. البته سرمایه‌گذاری در راستای رسیدن به شرایط پتانسیل نیازمند بررسی و تحلیل اقتصادی است تا این کار هم برای کشاورز و هم کشور دارای توجیه اقتصادی باشد. از طرفی ضریب تغییرات کمتر آب آبی (۱۰-۵ درصد) نشان می‌دهد الگوی مصرف یکنواخت است و ضریب تغییرات بیشتر در آب سبز (۲۰ درصد) بیانگر وابستگی به بارش‌های متغیر است. همچنین سهم کم آب سبز (۶ درصد) در شرایط پتانسیل نشان‌دهنده آسیب‌پذیری زیاد در خشکسالی‌هاست.

بررسی جهانی در پژوهشی نشان می‌دهد میانگین ردپای آب نیشکر در شرایط اقلیمی مشابه خوزستان (مناطق نیمه خشک) بین ۲۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر مکعب بر تن است. نتایج پژوهش حاضر (۲۶۷۲ متر مکعب بر تن در شرایط کشاورزان) حاکی از مصرف

باشد. با این حال برای حفظ این مزیت نسبی، پیشنهاد می‌شود سیستم‌های پایش کیفیت آب توسعه‌یافته و آموزش کشاورزان در استفاده بهینه از کود و سم گسترش یابد. در مطالعه‌ای با تمرکز بر ایران اشاره شد که اگرچه بخش کشاورزی کشور به طور کلی با چالش آلودگی آب‌های زیرزمینی مواجه است، اما محصولات صنعتی مانند نیشکر به دلیل نظارت بیشتر بر مصرف نهاده‌ها، معمولاً ردپای خاکستری کمتری دارند (۱۹). این نتیجه‌گیری با یافته‌های پژوهش حاضر همخوانی دارد. از طرفی پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از روش‌های دقیق‌تر نیز برای برآورد ردپای آب خاکستری استفاده شود.

نتیجه‌گیری

آگاهی از میزان مصرف آب به صورت مستقیم و غیر مستقیم در زنجیره تولید یک محصول می‌تواند ابزاری کمک‌کننده در راستای مدیریت بهینه منابع آب باشد. در این پژوهش با استفاده از مدل SSM-iCROP2 و روش بزرگ‌مقیاس‌نمایی میزان ردپای آب نیشکر در کشور در شرایط پتانسیل و کشاورزان تخمین زده شد. در این مدل با وارد کردن کدهای جدید امکان برآورد شاخص ردپای آب آبی و سبز نیز فراهم شد. پس از جمع‌آوری داده‌ها و نقشه‌های مورد نیاز و تبدیل آنها به فرمت مناسب پارامتریابی مدل آغاز شد. ردپای آب خاکستری نیز با استفاده از روش مرسوم تایر-۱ (Tier-1) تخمین زده شد و در نهایت شاخص ردپای آب برای این محصول برآورد شد. استان خوزستان با ۱۰۲۰۵۸ هکتار سطح زیر کشت نیشکر، استان اصلی کشت این محصول در نظر گرفته شد. پس از پارامتریابی مدل برای شرایط پتانسیل با تغییر سه پارامتر RUE، LAIMX و Himax شرایط شبیه‌سازی به شرایط کشاورزان نزدیک شد. سپس شبیه‌سازی برای هر دو حالت طی ۳۰ سال منتهی به سال ۱۴۰۱ انجام شد و نتایج ردپای آب آبی و سبز استخراج شد. ردپای آب سبز در شرایط کشاورزان حدود ۱۰ درصد و در شرایط پتانسیل حدود ۶ درصد ردپای آب آبی است. به طور کلی شرایط پتانسیل ردپای آب آبی حدود ۷۷

$$\frac{\sum S W_i}{\sum W_i} = \left[\frac{(0.67 \times 15) + (0.33 \times 10) + (0.33 \times 10) + (0.67 \times 5) + (1 \times 10) + (1 \times 10) + (0.5 \times 5) + (0.67 \times 10)}{10 + 15 + 10 + 10 + 5 + 15 + 10 + 10 + 5 + 10} \right]$$

$$\alpha = 0.01 + (0.492 \times (0.25 - 0.01)) = 0.128$$

براساس استاندارد کیفیت آب‌های ایران بیشترین میزان غلظت نیتروژن نیتراتی موجود در آب برای مصرف کشاورزی برابر با ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر است. همچنین طبق نشریه توصیه‌هایی برای مصرف بهینه کود در مزارع نیشکر مؤسسه تحقیقات فنی مهندسی کشاورزی، نیاز نیشکر به مواد مغذی زیاد است. کود اوره مورد نیاز آن بین ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر هکتار گزارش شده است و چنانچه مبنا رسیدن به ۱۲۰ تن در هکتار محصول باشد، باید ۳۵۰ کیلوگرم کود اوره ۴۶ درصد ازت مصرف شود. میزان عملکرد نیز با توجه به داده‌های حاصل از مدل SSM-iCROP2 برای دو حالت پتانسیل و کشاورزان به ترتیب معادل ۱۳۹/۰۳ و ۷۸/۹۸ تن در هکتار است. بنابراین میزان ردپای آب خاکستری در دو حالت شرایط کشاورزان و شرایط بیشترین مقدار تولید در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ معادل زیر است (۲ و ۴۵):

$$GWF_{\text{لایمن‌اتپ}} = \frac{(0.128 \times 175) / (30 \times 10^{-3} - 0)}{139.03} = 5.37 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}}$$

$$GWF_{\text{نازرواچک}} = \frac{(0.128 \times 100) / (30 \times 10^{-3} - 0)}{78.98} = 5.40 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}}$$

در نهایت ردپای آب نیشکر از حاصل جمع ردپای آب سبز، آبی و خاکستری برای سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ معادل ۲۲۵۱ برای شرایط پتانسیل و ۳۱۳۴ مترمکعب بر تن برای شرایط کشاورزان خواهد بود. برخلاف ردپای آب آبی که اختلاف قابل توجهی (۲۳ درصد) بین شرایط پتانسیل و کشاورزان نشان داد، ردپای نیشکر در خوزستان از وضعیت نسبتاً مطلوبی برخوردار است. این نتیجه می‌تواند به دلیل مدیریت آلودگی در مزارع نیشکر خوزستان به وضعیت بهینه نزدیک است و یا این نتایج می‌تواند به دلیل کمبود داده‌های ورودی در برآورد این شاخص نیز باشد. به هر حال مقایسه با مطالعات جهانی نشان می‌دهد مقدار آب خاکستری محاسبه‌شده به طور قابل توجهی (۵۰-۳۰ درصد) کمتر از میانگین جهانی است (۲۵ و ۲۷). این تفاوت ممکن است ناشی از عوامل طبیعی مانند ظرفیت خاک منطقه در تجزیه آلاینده‌ها و یا مدیریت نسبتاً مناسب مصرف نهاده‌های شیمیایی

است. این مدل با دریافت داده‌های نسبتاً ساده، قادر به تولید خروجی‌های ارزشمندی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی است. می‌توان از این مدل به عنوان یک نرم‌افزار تحت وب استفاده کرد تا مدیران و کشاورزان بتوانند با وارد کردن داده‌های مزرعه خود، ردپای محصولشان را به صورت تقریبی محاسبه کنند و راهکارهای کاهش آن را نیز ببینند. نیاز فوری به اصلاح سیستم‌های آبیاری در مزارع نیشکر، لزوم توجه به کاهش وابستگی به منابع آب زیرزمینی و اهمیت توسعه ارقام کم‌آب‌بر متناسب با شرایط اقلیمی خوزستان از نتایج مهم این پژوهش برای ذینفعان است. به همین دلیل برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود بررسی اقتصادی راهکارهای کاهش مصرف آب صورت گیرد و تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر روند تغییرات ردپای آب نیز بررسی شود. درنهایت، این پژوهش نشان داد که با بهینه‌سازی مدیریت آب در مزارع نیشکر خوزستان، می‌توان سالانه حجم قابل توجهی از منابع آب را حفظ کرد، بدون آنکه به تولید خدشه‌ای وارد شود. این امر نیازمند همکاری همه جانبه کشاورزان، پژوهشگران و سیاستگذاران است. چنانچه این مطالعه برای سایر محصولات استراتژیک و پرآب‌بر کشور (مانند برنج و مرکبات) انجام شود، می‌توان نقشه راه کاملی برای مدیریت منابع آب کشور تهیه کرد.

درصد شرایط کشاورزان و ردپای سبز در این شرایط حدود ۴۵ درصد شرایط کشاورزان است. میزان ردپای آب خاکستری نیز برای هر دو حالت تخمین زده شد و در آخر میزان ردپای آب از برآیند سه ردپای آب آبی، سبز و خاکستری برای شرایط پتانسیل و کشاورزان به ترتیب ۲۲۵۱ و ۳۱۳۴ متر مکعب بر تن برای سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ برآورد شد. اختلاف قابل توجه بین شرایط پتانسیل و کشاورزان (۸۸۳ متر مکعب) نشان‌دهنده ظرفیت قابل توجه برای بهینه‌سازی مصرف آب در کشت نیشکر است. تحلیل سهم اجزای مختلف ردپای آب نکات مهمی را آشکار می‌سازد:

۱. سهم آب سبز (بارش) در شرایط کشاورزان تنها ۱۰٪ و در شرایط پتانسیل ۶٪ است که نشانگر وابستگی شدید به منابع آب آبی در منطقه خوزستان می‌باشد.

۲. ردپای آب آبی در شرایط پتانسیل حدود ۷۷٪ شرایط کشاورزان است که بیانگر امکان صرفه‌جویی ۲۳٪ در مصرف آب آبی است.

۳. ردپای آب خاکستری در هر دو شرایط تقریباً یکسان بود که حاکی از مدیریت نسبتاً مناسب آلاینده‌ها در مزارع نیشکر است. مدل SSM-iCROP2 در این پژوهش ثابت کرد که ابزاری کارآمد برای شبیه‌سازی همزمان عملکرد محصول و ردپای آب

References

منابع مورد استفاده

1. Ababaei, B. and H. R. Etedali. 2017. Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agriculture Water Managment* 179: 401-411
2. Abbasi, F. and A. Sheini Dashtgol. 2016. Recommendations for optimal fertilizer use in sugarcane fields. Agricultural Engineering Research Institute, Sugarcane Research and Training Institute of Khuzestan (in Farsi).
3. Deputy of Statistics, Information and Communication Technology Center. 2022. Agricultural Statistics Yearbook 2021-2022, Volume 1: Crop Products. Ministry of Agricultural Jihad (in Farsi).
4. El-Marsafawy, S. M. and A. I. Mohamed. 2021. Water footprint of Egyptian crops and its economics. *Alexandria Engineering Journal* 60(5): 4711-4721.
5. Ercin, A. E. and A. Y. Hoekstra. 2014. Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environment International* 64: 71-82.
6. Ewaid, S. H., S. A. Abed and N. Al-Ansari. 2019. Water Footprint of Wheat in Iraq. *Water* 11:535.
7. Franke, N., A. Y. Hoekstra and H. Boyacioglu. 2013. Grey water footprint accounting: Tier 1 supporting guidelines.
8. Gheewala, S. H., T. Silalertruksa, P. Nilsalab, R. Mungkung, S. R. Perret and N. Chaiyawanakarn. 2014. Water Footprint and Impact of Water Consumption for Food, Feed, Fuel Crops Production in Thailand. *Water* 6(6): 1698-1718. <https://doi.org/10.3390/w6061698>

9. Gobbett, D., Z. Hochman, H. Horan, J. N. Garcia, P. Grassini and K. Cassman. 2017. Yield gap analysis of rainfed wheat demonstrates local to global relevance. *The Journal of Agricultural Science* 155(2): 282-299.
10. Golabi, M. and A. A. Naseri. 2015. Evaluation of AQUACROP model for predicting sugarcane yield and soil salinity profile under salinity stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 46(4): 685-94 (in Farsi).
11. Guinée, J. B. 2002. Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards. Springer Science and Business Media.
12. Hafezi, N., M. J. Sheikh Davoodi, H. Bahrami and E. Alavi. 2020. Estimation of sugarcane quantitative and qualitative yield using adaptive Neuro-Fuzzy network improved by particle swarm optimization algorithm. *Agriculture Engineering* 43(2): 255-276 (in Farsi).
13. Haghazari, F., M. Ghanbarian, A. Sheini Dashtegol and V. Varnaseri Ghandali. 2020. Evaluation of sugarcane yield affected as irrigation level and fertilizer by using AQUACROP model. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions* 2(1): 87-95 (in Farsi).
14. Hajarpour, A., M. Yusefi and B. Kamkar. 2012. Evaluation of accuracy of LARS-WG, WeatgerMan and CLIMGEN simulators in climate parameter simulation across three distinct climate zones (Gorgan, Gonbad and Mashhad). *Geography and Development* 12(35): 201-216 (in Farsi).
15. Hoekstra, A. Y. 2019. Green-blue water accounting in a soil water balance. *Advances in Water Resources* 129: 112-117.
16. Hoekstra, A. Y., A. K. Chapagain, M. M. Mekonnen and M. M. Aldaya. 2011. The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Routledge.
17. <https://hakimfarabi.co/>
18. Inman-Bamber, N. 1994. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. *Field Crops Research* 36(1): 41-51.
19. Inman-Bamber, N. 2004. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field crops Research* 89(1): 107-122.
20. Karandish, F. and A. Y. Hoekstra. 2017. Informing national food and water security policy through water footprint assessment: The case of Iran. *Water* 9(11): 831.
21. Karandish, F., A. Esmaili Sari and A. Darzi Naftchali. 2020. The water footprint assessment manual: setting the global standard. Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University (in Farsi)
22. Koo, J. and J. Dimes. 2013. HC27 generic soil profile database.
23. Marin, F. R., J. W. Jones, A. Singels, F. Royce, E. D. Assad, G. Q. Pellegrino and F. Justino. 2013. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climatic Change* 117: 227-239.
24. Mekonnen, M. M. and A. Y. Hoekstra. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(5): 1577-1600.
25. Mekonnen, M. M. and A. Y. Hoekstra. 2018. Global anthropogenic phosphorus loads to freshwater and associated grey water footprints and water pollution levels: A high-resolution global study. *Water Resources Research* 54(1): 345-358.
26. Monzon, J., V. O. Sadras and F. H. Andrade. 2012. Modelled yield and water use efficiency of maize in response to crop management and Southern Oscillation Index in a soil-climate transect in Argentina. *Field Crops Research* 130: 8-18.
27. Moradian Vafaei, S. M., A. Soltani Mohammadi, A. A. Naseri and P. Van Oel. 2022. Predicting sugarcane yield under different farm management using Aqua Crop model (Case study: Salman Farsi Agro-industry). *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 1(16): 39-53 (in Farsi).
28. Nehbandani, A., Soltani, A., Taghdisi Naghab, R., Dadrasi, A., and Alimagham, S. M. 2020. Assessing HC27 soil database for modeling plant production. *International Journal of Plant Production* 14: 679-687.
29. Office of Infrastructure Studies. 2008. Sugar production status in Iran (Subject Code: 250, Serial No. 8936 (in Farsi).
30. Omid, T., A. Bagheri and N. Heydari. 2019. Water footprint analysis of Iran's sugar export/import and production for the period of 2005-2014. *Iran-Water Resources Research* 15(3):78-90 (in Farsi).
31. Rattalino Edreira, J. I., J. F. Andrade, K. G. Cassman, M. K. Van Ittersum, M. P. Van Loon, P. Grassini 2021. Spatial frameworks for robust estimation of yield gaps. *Nature Food* 2: 773-779.

32. Saed, B., A. Afshar, M. R. Jalali, M. Ghoreishi and P. Aminpour Mohammadabadi. 2018. A water footprint based hydro-economic model for minimizing the blue water to green water ratio in the Zarrinehrud river-basin in Iran. *Agriculture Engineering* 1: 58-74.
33. Sharafi, S., M. J. Nahvinia and F. Salehi. 2024. Assessing the water footprints (WFPs) of agricultural products across arid regions: Insights and implications for sustainable farming. *Water* 16: 1311.
34. Sheini-Dashtgol, A., S. Boroomand-Nasab and A. A. Naseri. 2020. Effects of subsurface drip irrigation on salinity dynamics, water productivity and ratoon sugarcane yield. *Journal of Water and Soil* 34(4): 797-811 (in Farsi).
35. Sidhu, B., R. Sharda and S. Singh. 2021. Water footprint of crop production: A review. *Indian Journal of Ecology* 48(2): 358-366.
36. Soltani, A., S. Alimagham, A. Nehbandani, B. Torabi, E. Zeinali, E. Zand, V. Vadez, M. Van Loon and M. Van Ittersum. 2020. Future food self-sufficiency in Iran: A model-based analysis. *Global Food Security* 24: 100351.
37. Soltani, A., S. Alimagham, A. Nehbandani, B. Torabi, E. Zeinali, A. Dadrasi, E. Zand, S. Ghassemi, S. Pourshirazi and O. Alasti. 2020. SSM-iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. *Agriculture System* 182: 102855.
38. Soltani, A., A. Nehbandani, S. M. Alimagham, A. Dadresi, B. Torabi, E. Zeinali, E. Zand, S. Ghasemi, H. Barani, R. Hosseini, M. Zahed, H. Fayazi, H. Kamari, R. Arab Ameri, Z. Mohammadzade, S. Rohban, S. Pourshirazi, S. Mohammadi, S. Keramat, N. Sousaraii, M. Ashnavarand M. Ahmadi. 2019. Growth and production of crops modeling on large scale with SSM-iCROP2. Gorgan University of Agriculture Sciences and Natural Resources. (In Farsi)
39. Soltani, A., A. Nahbandani, A. Zeynli, B. Torabi, E. Zand, A. Ghasemi, et al. 2018. Atlas of yield gaps and production potential of major crops in Iran under current and future climatic conditions. 1st ed. VazheganeSirang Publications (in Farsi).
40. Sunitha, S., A. Akash, M. Sheela and J. S. Kumar. 2024. The water footprint of root and tuber crops. *Environment. Development and Sustainability* 26: 3021-3043.
41. Svubure, O., P. Struik, A. Haverkort and J. M. Steyn. 2015. Yield gap analysis and resource footprints of Irish potato production systems in Zimbabwe. *Field Crops Research* 178: 77-90.
42. Tsakmakis, I. D., M. Zoidou, G. D. Gikas and G. K. Sylaios. 2018. Impact of irrigation technologies and strategies on cotton water footprint using AquaCrop and CROPWAT models. *Environmental Process* 5: 181-199.
43. Van Wart, J., L. G. Van Bussel, J. Wolf, R. Licker, P. Grassini, A. Nelson, H. Boogaard, J. Gerber, N. D. Mueller and L. Claessens. 2013. Use of agro-climatic zones to upscale simulated crop yield potential. *Field Crops Research* 143: 44-55.
44. Velashjerdi, M. M., S. Hamzeh, M. Moghaddasi and A. Sheini Dashtgol. 2019. Modeling the sugarcane product yield using a hybrid model based on remotely sensed data. *Journal of Water and Soil Conservation* 25(6): 141-158 (in Farsi).
45. Water and Soil Office. 2014. Iranian water quality standards. Department of Environment, Deputy of Human Environment. (in Farsi).
46. www.dpe.maj.ir
47. Yousefi, H., A. Mohammadi, Y. Noorollahi and S. J. Sadatinejad. 2018. Water footprint of Tehran's crops and garden crops. *Journal of Water and Soil Conservation* 24(6): 67-85 (in Farsi).
48. Zanganeh Yusef Abadi, E., A. R. Hooshmand, A. A. Naseri, S. Boroomand Nasab and M. Parvizi. 2021. The effect of different management of sub-surface irrigation on water productivity, yield and yield component of sugarcane (Var. CP69-1062). *Irrigation Sciences and Engineering* 44(1): 1-15 (in Farsi).