



Assessment of suitable areas for cultivation of wheat, corn, sugar beet, and tomato in different climates of Iran considering the climate change effects using AquaCrop model

Maedeh Soltani Sistani¹ | Hossein Ansari² | Kamran Davary³ | Seyed Mohammadreza Naghedifar⁴

1. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad(FUM), Mashhad, Iran. E-mail: maedeh.soltanisistani@mail.um.ac.ir.
2. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran. E-mail: ansary@um.ac.ir.
3. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad. E-mail: k.davary@gmail.com
4. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran. E-mail: s.m.rezanaghedifar@mail.um.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Feb. 6, 2024

Revised: July. 30, 2024

Accepted: Aug. 26, 2024

Published online: Oct. 2024

Keywords:

Aquacrop,
Crop Production Forecasting,
Cmhyd,
Plant Modeling.

ABSTRACT

Choosing suitable crops for cultivation in each region, considering the resilience of the agronomic system and water status is a vital aspect in formulating the country's agronomic strategy and requires meticulous planning. The present study was conducted to provide a general framework for finding the best area for cultivating tomato, wheat, fodder corn and sugar beet crops in 12 selected locations of Iran by applying distribution and climate change from 1980 to 2020. In this study the Aqua Crop model was used to perform plant simulations. After comparing the dry product values reported in each of the 12 regions studied by the Agricultural Jihad Organization and the valued modeled by AquaCrop, the validation error for the mentioned regions was estimated to be 4.8, 3.8, 6.6 and 4.6 percent for sugar beets, tomatoes, wheat, and fodder corn, respectively. The model was able to consistently demonstrate an average simulation error below 10 percent. Prediction of future crop production was derived from climate data sourced from the MRI-ESM 0-2 weather modeling software, using SIMIP6 and SIMHIDE models. By analyzing the modeling and historical data for the proposed crops, the highest and lowest amounts of wheat, sugar beet, fodder corn and tomato were determined in Isfahan and Zahedan, Urmia and Bojnord, Isfahan and Mashhad, and Zanjan and Zahedah, respectively. Three indicators of mass amount, crop price and irrigation depth were used as Comparable indices among the crops in different cities for the two planned and potential modes. The priority of crop cultivation in each city, to decide which crop is the best and prioritize them, was determined using mass, product price, and irrigation water depth. The study highlights the best and worst locations for cultivating tomatoes, fodder corn, wheat, and sugar beets as Kermanshah and Zahedan, Isfahan and Mashhad, Tehran and Zahedan, and Kermanshah and Mashhad, respectively.

Cite this article: Soltani Sistani, M., Ansari, H., Davari, K., & Naghedifar, S.M.R. (2024). Assessment of suitable areas for cultivation of wheat, corn, sugar beet, and tomato in different climates of Iran considering the climate change effects using AquaCrop model, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (8), 1433-1450. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.372037.669661>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.372037.669661>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction:

The pivotal task of selecting crops for a country's agricultural strategy, considering resilience and water conditions, demands meticulous planning. This study delves into the assessment of spatial potential for cultivating tomatoes, wheat, forage corn, and sugar beet across 12 diverse points in Iran. These locations include Mashhad, Kermanshah, Qazvin, Shiraz, Semnan, Zanjan, Zahedan, Tehran, Bandar Abbas, Bojnourd, Isfahan, and Urmia. The geographical spread encompasses a variety of climate conditions, and the analysis spans the years 1980 to 2020. This comprehensive approach aims to provide a nuanced understanding of the agricultural landscape in these key regions, guiding strategic decisions for sustainable crop cultivation.

Materials and Methods:

By employing the Hargreaves–Samani equation, Rosetta pedotransfer model, and NetWat, our study intricately calculates daily reference evapotranspiration, soil characteristics, and irrigation water planning. The comprehensive approach involves utilizing the AquaCrop model to formulate dry product quantities, which are then rigorously validated against data from the Ministry of Agriculture Jihad. The comparison of measured values with AquaCrop-modeled dry yields results in validation error rates of 4.8 percent for sugar beet, 3.8 percent for tomatoes, 6.6 percent for wheat, and 4.6 percent for corn. On average, the model showcases an impressive simulation accuracy of 90 percent, with an overall error rate remaining below 10 percent. To forecast future crop yields, we leverage climate data from the meteorological model MRI-ESM 0-2 with CMIP6 outputs, obtained through the CMhyd software.

Results and Discussion:

Analyzing both modeling and historical data unveils considerable variations in production levels for wheat, sugar beet, forage corn, and tomatoes across different cities. The prioritization, based on factors like crop mass, irrigation water depth, and monetary value, provides valuable insights into identifying the most and least suitable locations for each crop. This process aids in efficient resource management and informed decision-making, offering crucial guidance for agricultural and environmental experts. By evaluating the highest and lowest production levels in cities such as Isfahan, Zahedan, Urumieh, Bojnord, Mashhad, and Zanjan, the study explores a comprehensive perspective on crop cultivation dynamics. The utilization of three indices—crop mass, irrigation water depth, and monetary value—enhances the accuracy of comparisons, ensuring a nuanced understanding of the planning required for cultivating various crops in different cities. The prioritization achieved in this research not only optimizes resource management but also underscores the importance of sustainable practices for the preservation of vital resources.

Conclusions:

The research, by emphasizing the importance of comprehensive studies, not only contributes to national food security but also plays a pivotal role in ecosystem preservation. The prioritization process, a key outcome of this study, significantly enhances efficient resource management, providing substantial support for the principles of sustainable agriculture. This research serves as a guiding beacon for agricultural and environmental experts, empowering them with precise planning insights for cultivating crops optimally. The identified gap in existing research endeavors, considering multifaceted aspects, accentuates the urgency of undertaking such investigations. The holistic approach proposed in this study is not just essential but imperative for safeguarding national food security and ensuring the preservation of ecosystems. By addressing these critical aspects, the research paves the way for a sustainable future, where prudent decision-making aligns with the long-term well-being of both agriculture and the environment.

Author Contributions

For research articles with several authors, a short paragraph specifying their individual contributions must be provided. The following statements should be used “Conceptualization, M.Ss., H.A., K.D. and SM.N.; methodology, M.Ss., H.A., K.D. and SM.N.; software, M.Ss. and SM.N.; validation, M.Ss. and SM.N.; formal analysis, M.Ss., H.A., K.D. and SM.N.; investigation, M.Ss. and SM.N.; resources, H.A. and K.D; data curation, M.Ss. and SM.N.; writing—original draft preparation, M.Ss. and SM.N.; writing—review and editing, M.Ss., H.A., K.D. and SM.N.; visualization, M.Ss. and SM.N.; supervision, H.A., K.D. and SM.N.; funding acquisition, H.A. and K.D. 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 all participants of the present study.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

ارزیابی مناطق مناسب کاشت گیاه گندم، ذرت، چغندر قند و گوجه فرنگی در اقلیم‌های مختلف ایران با توجه به اثرات تغییر اقلیم به کمک نرم‌افزار اکواکراپ

مآده سلطانی سیستانی^۱ | حسین انصاری^۲ | کامران داوری^۳ | سید محمدرضا ناقدی فر^۴

۱. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: maedeh.soltanisistani@mail.um.ac.ir

۲. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: ansary@um.ac.ir

۳. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: k.davary@gmail.com

۴. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: S.m.rezanaghedifar@mail.um.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	انتخاب گیاهان مناسب برای کشت در هر منطقه، با توجه به تاب‌آوری سیستم زراعی و وضعیت آب، از ابعاد حیاتی در تدوین استراتژی زراعی کشور بوده و مستلزم برنامه‌ریزی دقیق است. پژوهش حاضر به منظور ارائه چارچوبی کلی برای یافتن بهترین منطقه برای کشت محصولات گوجه‌فرنگی، گندم، ذرت علوفه‌ای و چغندر قند، در ۱۲ نقطه انتخابی از ایران با اعمال پراکنش و تغییرات اقلیمی از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ صورت گرفت. در این پژوهش برای انجام شبیه‌سازی‌های گیاهی از مدل اکواکراپ استفاده شد. پس از مقایسه مقادیر محصول خشک گزارش شده در هر یک از ۱۲ مناطق مورد مطالعه توسط سازمان جهاد کشاورزی و مقادیر مدل‌سازی شده توسط اکواکراپ، خطای صحت‌سنجی برای مناطق مذکور و محصولات چغندر قند ۸/۴ درصد، گوجه‌فرنگی ۸/۳ درصد، گندم ۶/۶ درصد، و ذرت ۶/۴ درصد بود. به طور میانگین مدل قادر به شبیه‌سازی مقدار محصول خشک تولیدی با خطای زیر ۱۰ درصد بوده است. برای پیش‌نگری مقدار محصول تولیدی در آینده نزدیک، داده‌های اقلیمی مدل‌سازی هواشناسی MRI-ESM 0-2 با خروجی‌های سیمپ ۶ در نرم‌افزار سیم‌هاید تهیه شد. با تحلیل داده‌های مدل‌سازی و تاریخی، برای گندم، چغندر قند، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی، بیشترین و کمترین مقدار تولید به ترتیب در اصفهان و زاهدان، ارومیه و بجنورد، اصفهان و مشهد، و زنجان و زاهدان مشخص شد. شاخص قابل‌مقایسه بین محصولات در شهرهای مختلف برای دو حالت برنامه‌ریزی شده و پتانسیل، از سه شاخص مقدار جرم و قیمت ریالی محصول و عمق آب آبیاری، استفاده شد. اولویت کشت محصولات در هر شهر با قیاس ۳ عامل بهترین و ضعیف‌ترین مکان کشت گوجه‌فرنگی، ذرت علوفه‌ای، گندم و چغندر قند به ترتیب کرمانشاه و زاهدان، اصفهان و مشهد، تهران و زاهدان، کرمانشاه و مشهد است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۹	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۵	
تاریخ انتشار: آبان ۱۴۰۳	
واژه‌های کلیدی: اکواکراپ، پیش‌بینی تولید محصول، سیم‌هاید، مدل‌سازی گیاهی.	

استاد: سلطانی سیستانی، مآده؛ انصاری، حسین؛ داوری، کامران؛ و ناقدی فر، سید محمدرضا (۱۴۰۳). ارزیابی مناطق مناسب کاشت گیاه گندم، ذرت، چغندر قند و گوجه‌فرنگی در اقلیم‌های مختلف ایران با توجه به اثرات تغییر اقلیم به کمک نرم‌افزار اکواکراپ، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۵ (۸)، ۱۴۳۳-۱۴۵۰.



© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.372037.669661>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.372037.669661>

مقدمه

کمبود آب به طور فزاینده‌ای به عنوان یک خطر بزرگ در بسیاری از نقاط جهان شناخته می‌شود، به طوری که بحران‌های آب به طور مداوم در بین خطرات جهانی رتبه‌بندی می‌شوند (FAO, 2012). پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که بدون پیشرفت در مدیریت آب و اجرای سیاست‌های یکپارچه‌تر، کمبود آب و مشکلات مرتبط به آب، در کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه، به طور چشمگیری در طول چند دهه آینده افزایش خواهد یافت (Jiménez et al., 2014) و مدیریت منابع آب برای کشاورزی را روز به روز پیچیده‌تر می‌کند. رشد جمعیت جهان، افزایش تقاضا برای غذا، دستیابی به منابع آب و انرژی و تغییرات آب‌وهوا، نیاز به راه‌کارهای هماهنگ و مشارکتی متمرکز بر مدیریت آبیاری و منابع آب طبیعی یکپارچه‌تر و مقیاس‌پذیرتر، برای تضمین امنیت غذایی و حفظ محیط‌زیست می‌طلبد (Pereira, 2017; Bleischwitz et al., 2018). در نتیجه این امر، تأمین نیاز غذایی جهان با توجه به رشد جمعیت در مدت زمان کوتاهی به یک چالش بزرگ تبدیل شده است (Mizik, 2021; Karamian et al., 2023). برای دستیابی به توسعه پایدار کشاورزی، استفاده از یک رویکرد مدیریت یکپارچه که سه منبع آب، انرژی و غذا را به هم متصل می‌کند مثل شاخص پیوند آب-انرژی-غذا، ضروری است (Karamian et al., 2023). به منظور کاهش فشارها و هزینه‌ها بر منابع جهانی مانند آب، انرژی و غذا از مدل‌سازی استفاده شده است (Chamas, 2021).

پیشینه پژوهش

مدل‌های رایانه‌ای، به طور کلی، نمایشی ریاضی از یک سیستم در دنیای واقعی هستند (Mize & Cox., 1968; Fu & Seyed., 2022) که استخراج دانش از این داده‌ها و ایجاد سیستم‌های تصمیم‌گیری برای بهینه‌سازی مزارع و افزودن ارزش برای برآوردن نیازهای غذایی جمعیت و اطمینان از استفاده پایدار منابع طبیعی، اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است (Sundmaeker et al., 2016). مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، مراحل پیچیده‌ی رشد گیاهان و عوامل متعدد، از جمله ابزارهای اساسی متناسب با شرایط انتخابی و سناریوهای مختلف مدیریتی حاکم بر روابط آب، خاک و گیاه، اثرات کمبود آب بر بهره‌وری محصول و پیش‌بینی عملکرد برای بهینه‌سازی آبیاری با مقدار آب محدود برای تولید را شبیه‌سازی می‌کنند (Bao et al., 2017؛ سعادت و همکاران، ۱۳۹۷). یکی از مدل‌های گیاهی، مدل اکواکراپ است که توسط سازمان خواروبار کشاورزی ملل متحد (فائو) برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد محصولات کشاورزی گوناگون از جمله علوفه‌ها، سبزی‌ها، غلات، میوه‌ها، محصولات روغنی و گیاهان دارویی با تعداد محدودی متغیر ورودی و متغیرهای ورودی ارائه شده است (Alishiri et al., 2014; Vanuytrecht et al., 2014). این مدل با استفاده از شاخص‌های تصمیم‌گیری محصول، عملکرد محصول نهایی را در چهار مرحله ساده شبیه‌سازی می‌کند (Katerji et al., 2013). نتایج ارزیابی مدل اکواکراپ در پژوهش‌های مختلف برای مطالعه و پیش‌بینی عملکرد گیاهان و مصرف آب آن‌ها در زمان‌های گوناگون (جرعه‌نوش و همکاران، ۱۳۹۸) نشان از توانایی مناسب این ابزار محاسباتی کشاورزی در شبیه‌سازی عواملی مانند رطوبت خاک، برآورد سطح سابه‌انداز، زیست‌توده محصول، و عملکرد دانه با ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) کمتر از ۱۰ درصد دارد (Garcia-Vila et al., 2019; Garcia-Vila et al., 2012; Mkhabela & Bullock., 2012; Andarzian et al., 2011). بنابراین، این مدل می‌تواند به عنوان یک ابزار مورد اعتماد برای تحلیل تأثیرات متغیرها در تولیدات کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. از طرف دیگر، نتایج مدل‌های اقلیمی نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی می‌تواند زمان کاشت محصولات را دچار تغییر نماید (FAO, 2022). برای پیش‌بینی این تغییرات، از مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود که با افزایش دقت در پیش‌بینی‌ها در سالیان اخیر، می‌توانند به برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در آینده کمک کنند (انصاری مهابادی و همکاران، ۱۴۰۱). در حال حاضر، اکثر اطلاعات مربوط به تغییرات آینده با شبیه‌سازی‌هایی که توسط مدل‌های اقلیمی انجام می‌شود، تحلیل می‌گردد (هوشمند و همکاران، ۱۳۹۸). تاکنون، فازهای متفاوتی از مدل‌های اقلیمی (به عبارتی سیمپ) به روزرسانی شده‌اند. داده‌های مرتبط با پروژه سیمپ به ترتیب تا سری ۶ (CMIP 6) ارتقا یافته که طیف گسترده‌ای از مشخصات اقلیمی و اطلاعات محیطی را برای محققان و اقلیم‌شناسان در سراسر جهان ارائه می‌دهد (Yukimoto, 2020). تحقیقات انجام‌شده در ایران، تغییرات دما و بارش در آینده و اولویت‌بندی مدل‌های اقلیمی بر اساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی پدیده‌های جوی با سناریوهای مختلف را پیش‌بینی می‌کنند و اطلاعات مربوط به هر مدل‌سازی را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهند (انصاری و همکاران، ۱۴۰۱؛ زرین و داداشی، ۱۳۹۹).

تخصیص بهینه سطح زراعی می‌تواند مدیریت منابع آب کشاورزی را برای حفظ بهره‌وری کشاورزی و توسعه پایدار بهبود بخشد. تجزیه و تحلیل ارزیابی زمین به منظور بررسی زمین برای فعالیت‌های کشاورزی، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای تخصیص کارآمد منابع آب آبیاری و زمین، برنامه‌ریزی سطح زراعی می‌تواند به تصمیم‌گیری برای تعیین مقدار آب و دستیابی به اهداف معین در مناطق مختلف کشت‌شده کمک شایانی نماید (Cheng et al., 2021). در تحقیق انجام‌شده در چین، تأثیر زمان‌بندی‌های مختلف آبیاری بر عملکرد ذرت و کارایی استفاده از آب (WUE)، تحت سناریوهای مختلف آب و هوایی بررسی شد. انتخاب زمان‌بندی‌های مناسب آبیاری برای تعادل بین کمبود آب و امنیت غذایی، به حفظ رطوبت مناسب خاک و تأمین نیازهای آبی گیاه در مراحل مختلف رشد، کمک می‌کند. بنابراین تغییرات بارش و دما می‌تواند تأثیرات مختلفی بر عملکرد محصولات داشته باشند و از آنجایی که مصرف آب در زراعت اهمیت ویژه‌ای دارد، تنظیم برنامه‌ریزی آبیاری به عنوان راهی برای کاهش مصرف آب و حفظ عملکرد محصولات پیشنهاد شده است (Nie et al., 2022). مطالعات انجام‌شده در صربستان نشان از تأثیر قابل توجه تغییرات آب و هوایی با افزایش دما و تغییر الگوی بارش‌ها می‌دهد. این تغییرات، سبب طولانی شدن فصل رشد گیاهان تا ۵۰ روز و کاهش تولید کمتر می‌شود. افزایش روزهای بسیار گرم (بیش از ۳۵ درجه سانتی‌گراد) سلامت انسانی و مصرف انرژی را به خطر می‌اندازد. برای کاهش این تأثیرات، نیازمند برنامه‌ریزی و مدیریت دقیق منابع کشاورزی و آب است. همچنین، اقدامات فوری برای تطبیق با شرایط جدید و کاهش مخاطرات باید انجام شود تا از تأثیرات منفی بر تولیدات کشاورزی و منابع طبیعی جلوگیری شود. این تحقیقات می‌توانند به برنامه‌ریزی مناسب در حوزه‌های مختلف اقتصادی، حفظ محیط‌زیست و امنیت غذایی کمک کنند و اهمیت تغییرات اقلیمی در آینده را بیشتر تأکید کنند (Vuković et al., 2018). تصمیم‌گیری مؤثر در انتخاب مکان برای کاشت محصولات زراعی به دلیل پیچیدگی و وابستگی به متغیرهای مختلف میسر نمی‌گردد. از این‌رو، تحلیل دقیقی از ویژگی‌های مکانی برای کاشت محصولات زراعی امری حیاتی و اساسی محسوب می‌شود. بنابراین پتانسیل‌یابی مکانی برای کاشت محصولات کشاورزی به یک انتخاب استراتژیک تبدیل شده است و نیاز به اعمال راه‌کارهای مدیریتی با توجه به شرایط هر منطقه است. هدف اصلی این تحقیق، تدوین چهارچوبی برای مکان‌یابی محصولات کشاورزی در کشور ایران است. این چارچوب با ارائه راه‌کارهای اجرایی، امکان انتخاب مکان‌های مناسب کاشت محصولات کشاورزی از منظر منابع آب و اقتصاد را فراهم می‌آورد.

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر، ۱۲ ایستگاه سینوپتیک از کشور ایران با پراکنش‌های اقلیمی مختلف آب‌وهوایی انتخاب شدند (جدول ۱) این ایستگاه‌ها شامل زنجان، زاهدان، ارومیه، بندرعباس، بجنورد، اصفهان، مشهد، قزوین، سمنان، شیراز، تهران، کرمانشاه بود که هر یک دارای حداقل ۴۰ سال داده‌ی آماری بودند. در این پژوهش، عوامل اقلیمی دما از ایستگاه‌های سینوپتیک مراکز استان‌ها در بازه‌ی زمانی روزانه (۲۴ ساعته) برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰ از سازمان هواشناسی کشور^۱ دریافت شد.

محاسبه تبخیر تعرق به روش هارگریوز سامانی

به دلیل محدودیت بازه ورودی داده‌های تبخیر تعرق به اکواکراپ و دسترسی به داده‌های این معادله، از بین سایر معادلات، روش هارگریوز سامانی برای محاسبه‌ی تبخیر تعرق گیاه مرجع استفاده شد. روش هارگریوز (۱۹۸۵) اغلب به منظور ارائه پیش‌بینی‌های تبخیر تعرق پتانسیل (تبخیر تعرق گیاه مرجع)^۲ برای دوره‌های هفتگی یا طولانی‌تر برای استفاده در برنامه‌ریزی منطقه‌ای، مطالعات بهره‌برداری از مخزن، ظرفیت‌های طراحی کانال، نیازهای منطقه‌ای برای آبیاری و یا زهکشی، پتانسیل‌های تولید کشاورزی دیم، و در برخی شرایط برای برنامه‌ریزی آبیاری، استفاده می‌شود (Hargreaves & Allen., 2003). رضانی اعتدالی و صفری، (۱۴۰۲). با کمک رابطه (۱) می‌توان میزان تبخیر تعرق را بدست آورد.

$$ET_0 = 0.0023 (T_{mean} + 17.8)(T_{max} + T_{min})^{0.5} R_a \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در رابطه فوق ET_0 تبخیر تعرق مرجع و R_a تابش فرازمینی بر مبنا (mm day^{-1}) میلی‌متر بر روز و T_{mean} متوسط درجه حرارت $(^{\circ}\text{C})$ ، T_{max} دمای حداکثر $(^{\circ}\text{C})$ ، T_{min} دمای حداقل $(^{\circ}\text{C})$ است.

1 <https://data.irimo.ir>

2 ET_0

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک کشور

ردیف	کد ایستگاه	کد منطقه	نام ایستگاه	نام منطقه	اقلیم (شاخص دومارتن ^۱)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
۱	۴۰۷۴۵	OIMM	مشهد	خراسان رضوی	خشک ^۲	۵۹/۶۳	۳۶/۲۴	۹۹۹/۲
۲	۴۰۷۳۱	OIIK	قزوین	قزوین	نیمه‌خشک ^۳	۵۰/۰۲	۳۶/۳۲	۱۲۷۹/۱
۳	۴۰۷۵۴	OIII	تهران	تهران	خشک	۵۱/۳۱	۳۵/۶۹	۱۱۹۱
۴	۴۰۸۰۰	OIFM	اصفهان	اصفهان	خیلی خشک ^۴	۵۱/۷۱	۳۲/۵۲	۱۵۵۰/۴
۵	۴۰۸۵۶	OIZH	زاهدان	سیستان و بلوچستان	بسیار خشک	۶۰/۹۰	۲۹/۴۷	۱۳۷۰
۶	۴۰۷۲۹	OITZ	زنجان	زنجان	نیمه‌خشک	۴۸/۵۲	۳۶/۶۶	۱۶۵۹/۴
۷	۴۰۷۵۷	OIIS	سمنان	سمنان	خیلی خشک	۵۳/۴۲	۳۵/۵۹	۱۱۲۷
۸	۴۰۸۴۸	OISS	شیراز	فارس	نیمه‌خشک	۵۲/۶۰	۲۹/۵۶	۱۴۸۸
۹	۴۰۷۶۶	OICC	کرمانشاه	کرمانشاه	نیمه‌خشک و مرطوب ^۵	۴۷/۱۵	۳۴/۳۵	۱۳۱۸/۵
۱۰	۴۰۷۱۲	OITR	ارومیه	آذربایجان غربی	نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب ^۶	۴۵/۰۶	۳۷/۶۶	۱۳۳۸
۱۱	۴۰۸۷۵	OIKB	بندرعباس	هرمزگان	بسیار خشک	۵۶/۳۷	۲۷/۲۱	۹/۸
۱۲	۴۰۷۲۳	OIMN	بجنورد	خراسان شمالی	نیمه‌خشک	۵۷/۳۰	۳۷/۴۹	۱۰۶۵

فازهای محاسباتی الگوریتم رشد گیاه در اکواکراپ

اکواکراپ عملکرد را بر مبنای ۴ شاخص (۱) توسعه محصول، (۲) تعرق محصول، (۳) تولید زیست‌توده و (۴) تولید محصول، محاسبه می‌کند. تعرق واقعی محصول (Tr) (میلی‌متر) با ضرب تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) در ضریب تعرق محصول (K_{CTr}) و ضریب تنش آبی (K_s) محاسبه می‌شود (Raes et al., 2009).

$$Tr = K_s K_{CTr} ET_0$$

رابطه ۲)

در نرم‌افزار اکواکراپ ارتباط بین مقدار زیست‌توده تولیدشده (B)، و مقدار تجمعی تعرق نرمال شده ($\sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr}{ET_0}\right)$)، به صورت خطی در نظر گرفته شده است؛ که شیب این خط برابر با Wp^* (بهره‌وری آب زیست‌توده) است (Raes et al., 2009).

$$B = Wp^* \sum_{i=1}^n \left(\frac{Tr}{ET_0}\right)$$

رابطه ۳)

عملکرد محصول نهایی: عملکرد محصول، جرم ماده خشک در واحد سطح (تن در هکتار) (Y) رابطه ۴) از مقدار زیست‌توده تولید شده روی زمین، با استفاده از شاخص برداشت (HI_0) که میزان محصول قابل برداشت از کل زیست‌توده تولیدشده روی زمین و قابل برداشت است، به دست می‌آید. HI واقعی در طول شبیه‌سازی با تنظیم شاخص برداشت مرجع (HI_0) با یک ضریب تعدیل برای اثرات تنش به دست می‌آید (لو و همکاران، ۲۰۲۲، آلواربلتران، ۲۰۲۳، رائس و همکاران، ۲۰۲۳).

$$Y = HI_0 \times B$$

رابطه ۱)

عملکرد خشک (Y_{dry}) درصدی (f_m) از محصول تازه (Y_{fresh}) است. کسر (f_m)، میزان ماده خشک از یک محصول تازه را بیان

می‌کند (رائس و همکاران، ۲۰۲۳)

$$Y_{dry} = f_m \times Y_{fresh}$$

رابطه ۵)

- 1 De Martonne
- 2 Arid
- 3 Semi-Arid
- 4 Hyper-Arid
- 5 Humid
- 6 Semi-Humid



با مشخص شدن تاریخ کشت محصولات گردآوری شده توسط اطلاعات موجود در مقالات و پژوهش‌ها و ارتباط با متخصصان هر بخش و مقایسه با خروجی حاصل از نرم‌افزار اکواکراپ با نیاز آبی برآورد شده توسط نرم‌افزار نت‌وات^۱، مقدار عمق آبیاری حاصل از واسنجی برنامه‌ریزی آبیاری برای ۱۲ استان، نسبت به مقدار عملکرد محصول در سالنامه آماری جهاد کشاورزی و اطلاعات هیدرولیکی خاک، به پردازش‌های مربوط به عملکرد محصول در اکواکراپ پرداخته شد. به‌طور دقیق‌تر در مرحله واسنجی، با اصلاح پارامترهای موجود در فایل CRO و در نظر گرفتن تابع هدف به صورت خطای RMSE در مقایسه با مقادیر ارائه شده در آمارنامه، به‌طور عمده پارامترهای CDC و اصلاح‌های CGC گردید تا حداقل خطا برای هر شهر در هر سال بدست آمد. با کالیبره کردن مدل اکواکراپ به شبیه‌سازی قابل قبولی برای عملکرد ذرت، چغندر، گندم و گوجه در استان‌ها دست یافته شد.

خاک

شبکه‌بندی جهانی خاک توسط هنگل و همکاران (۲۰۱۷)، برای برخی از خصوصیات فیزیکی (مانند بافت خاک از ۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر، چگالی ظاهری و ...) و شیمیایی (مثل مقدار کربن آلی خاک، ظرفیت تبادل کاتیونی، pH و ...) خاک ارائه شده است. این سامانه بر اساس سیستم طبقه‌بندی دپارتمان کشاورزی ایالات متحده^۲ (در مجموع حدود ۲۸۰ لایه رستری) با تفکیک مکانی ۲۵۰ متر ارائه شده است.

منحنی مشخصه رطوبتی خاک

منحنی مشخصه رطوبتی از شاخص‌های مهم فیزیکی خاک و بیانگر ارتباط بین رطوبت خاک و مکش ماتریک است و در مسائل آب‌و‌خاک مانند آبیاری و زهکشی و حفاظت خاک از اهمیت زیادی برخوردار است. از مرسوم‌ترین مدل‌های منحنی مشخصه رطوبتی که به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل مشخصه رطوبتی ون گنوختن (۱۹۸۰) است.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad n > 1 \quad (\text{رابطه ۶})$$

در این مدل α, m, n پارامترهای شکل هستند. در این پژوهش، از منحنی مشخصه برای محاسبه نقاط رطوبتی در حد اشباع، ظرفیت زراعی و حد پژمردگی به‌عنوان ورودی‌های نرم‌افزار اکواکراپ استفاده شده است.

مدل روزتا^۳

برای پیش‌بینی ویژگی‌های هیدرولیکی خاک، تاکنون توابع انتقالی زیادی پیشنهاد شده‌اند. روزتا از شبکه عصبی مصنوعی برای تشکیل توابع انتقالی بهره برده که می‌تواند پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی ون گنوختن (۱۹۸۰) را با استفاده از ویژگی‌های زودیافت خاک تخمین بزند. این ویژگی‌های زودیافت می‌تواند حداقل شامل درصد ذرات معدنی خاک (شن، سیلت و رس)، چگالی ظاهری، رطوبت در پتانسیل ماتریک ۳۳- کیلوپاسکال (FC) و رطوبت در پتانسیل ماتریک ۱۵۰۰- کیلوپاسکال (PWP) باشد که این ورودی‌ها می‌توانند به‌صورت سلسله مراتبی افزایش یابد. در این پژوهش نمونه‌های بافت خاک برای عمق‌های مختلف با ورود مقادیر درصد شن، ماسه، سیلت و چگالی ظاهری $[M L^{-3}]$ ، مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع $[L T^{-1}]$ ، پارامترهای α و n در رابطه (۶) (در معادله ون گنوختن)، رطوبت اشباع $[L^3 L^{-3}]$ ، رطوبت باقیمانده $[L^3 L^{-3}]$ محاسبه می‌شود. شاپ^۴ و همکاران (۲۰۰۱) نشان دادند که با افزایش داده‌های ورودی، این مدل تخمین‌های قابل قبول‌تری برای پارامترهای منحنی مشخصه رطوبتی ون گنوختن (۱۹۸۰) ارائه می‌نماید.

مدل سیم‌هاید

برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی، از مدل اقلیمی سیمپ^۵ برای پیش‌بینی آینده نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۰) استفاده شد. داده‌های مدل گزارش ششم از سایت <https://esgf-node.llnl.gov> برای دوره تاریخی (از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰) و دوره آینده (از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰)، تحت سناریوهای مختلف برای پیش‌نگری سه متغیر بارش، دمای ماکزیمم و دمای مینیمم، بر اساس نیاز این تحقیق به صورت روزانه استخراج شدند. طبق مقایسه‌ی سنجه‌های آماری انجام‌شده در مقاله زرین و رودباری (۲۰۲۰) که برای پیش‌نگری دمای کشور انجام شده

1 NETWAT
2 USDA (United States Department of Agriculture)
3 ROSETTA
4 Schaap
5 CMIP6

بود، سناریوی میانه (متوسط) SSP2-4/5 و مدل 2 - ESM 0 - MRI نسبت به سایر سناریوها و مدل‌ها، با عملکرد بهتری، انتخاب شدند؛ همچنین، با بررسی نتایج پژوهش انصاری مهابادی و همکاران (۲۰۲۲)، برای یافتن مناسب‌ترین مدل GCM، گزارش ششم (سیمپ ۶) به منظور پیش‌نگری میزان بارش، مدل 2 - ESM 0 - MRI بارش نواحی غربی را دقیق‌تر تصویرسازی کرد. بنابراین با بررسی چنین شواهدی، در این پژوهش، مدل 2 - ESM 0 - MRI برای پیش‌نگری داده‌های اقلیمی انتخاب شد. پردازش داده‌های خروجی از نرم‌افزار سیم‌هاید^۱ برای مناطق مورد نظر و تحلیل شرایط اقلیمی ۴۰ سال گذشته و ۲۰ سال آتی انجام گرفت. مدل سیم‌هاید^۲، ابزاری مبتنی بر برنامه‌نویسی پایتون است که امکان استفاده از داده‌های مدل آب‌وهوای جهانی و حوضه‌ای را در مدل‌های هیدرولوژیکی فراهم می‌کند (Rathjens et al., 2016).

بررسی اقتصادی کشت محصولات مختلف

به منظور مکان‌یابی مناسب کشت هر محصول و اولویت‌بندی کشت در هر شهر و مقایسه‌ی آن با یکدیگر بایستی از ارزش ریالی هر محصول استفاده کرد. پژوهش حاضر برای برنامه‌ریزی‌های کلان مورد استفاده قرار گرفته و به دلیل عدم کفایت وجود داده‌ها و صحت‌سنجی داده‌های قیمت آب از متغیر جایگزین (Proxy) برای تعیین بهای هر مترمکعب آب به شرح ذیل استفاده شد. بنا به دسترسی محققین این پژوهش به داده‌های با جزئیات بالا در سطح مشهد، در این شهر هزینه‌ها برآورد شده و به شهرهای دیگر تعمیم داده شد. متغیر جایگزین حاضر توسط نویسندگان ابداع شده و بر اساس مقدار هزینه حفاری و نگهداری چاه در مناطق مختلف ارائه شده است.

شهر مشهد به نمایندگی از شهرهای موجود در این پروژه، انتخاب شد. به‌طور دقیق‌تر برای ارزیابی هزینه عملیات حفاری یک چاه آبرفت به عمق ۲۵۰ متر در محدوده مشهد با دستگاه ضربه‌ای (به‌عنوان روش اقتصادی‌تر نسبت به روش روتاری) برای ۲۴ ساعت، از تعرفه مصوب انجمن حفاران خراسان استفاده شد. مجموع میانگین هزینه حفاری چاه به روش ضربه‌ای با اعمال سالانه ۲۰ درصد برای هزینه‌ی نگهداری چاه با توجه به کارکرد چاه در ۲۴ ساعت، محاسبه گردید. هزینه هر مترمکعب آب برای هر محصول به وسعت یک هکتار با رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$\text{رابطه (۷)} \quad \text{مقدار هزینه حفاری و نگهداری چاه} * \frac{\text{حجم آب مصرفی}}{\text{حجم آب استخراج شده از چاه در سال (ثانیه بر مکعبی‌تر)}} = \text{هزینه هر متر مکعب آب}$$

قیمت محصولات گندم، گوجه‌فرنگی، ذرت علوفه‌ای و چغندر قند از سالنامه آماری جهاد کشاورزی استخراج شد. قیمت گندم و چغندر قند به‌صورت تضمینی ارائه شده که در واقع نرخ اعلام‌شده توسط دولت برای کل کشور است؛ اما برای گوجه‌فرنگی و ذرت علوفه‌ای قیمت‌ها در شهرهای متفاوت، اختلاف جزئی دارد. به دلیل نوسانات شدید و عدم دستیابی به قیمت گوجه‌فرنگی و ذرت علوفه‌ای در شهرهای مختلف، ارزش بهای محصولات در زمین کشاورزی (به‌اصطلاح هزینه سرخرمن) در شهر مشهد به نمایندگی از سایرین، انتخاب شد. سپس مقدار هزینه آب و درآمد محصول برای حالت برنامه‌ریزی و حالت پتانسیل محاسبه شد و با کسر این مبالغ از یکدیگر، مقدار اختلاف درآمد و هزینه که همان سود حاصل از هر سال مختلف است، به‌طور مجزا محاسبه گردید. سودهای محاسبه‌شده ناشی از قیمت‌های هر سال هست؛ برای مقایسه‌ی بهتر نیاز به، به‌روزرسانی و تبدیل قیمت به سال ۱۴۰۱ است. پس با استفاده از رابطه (۸) قیمت‌ها به روز شدند.

$$\text{رابطه (۸)} \quad \text{مبلغ ریالی} * \frac{\text{عدد شاخص در مقطع زمانی مورد نظر}}{\text{عدد شاخص در مقطع زمانی اول}} = \text{ارزش ریالی مبلغ در مقطع زمانی مورد نظر}$$

رابطه (۸)، توسط یک محاسبه‌گر برخط (online) تبدیل قیمت از سال‌های متفاوت به یکدیگر از آدرس amar.org.ir قابل استفاده است. این محاسبه‌گر بر اساس شاخص قیمت مصرف‌کننده (CPI) عمل می‌کند که توسط درگاه ملی آمار ایران ارائه شده است.

شاخص‌های مقدار محصول، آب مصرفی و اقتصادی

به منظور مقایسه و اولویت‌بندی کشت محصولات مختلف در شهرهای مورد مطالعه، سه شاخص بدون بعد برای مقدار محصول، آب مصرفی و سود اقتصادی ارائه شد. این سه شاخص از سه منظر زراعی، صرفه‌جویی در منابع آب و اقتصاد کشت گیاهان مختلف را مورد بررسی قرار می‌دهند. در نهایت، با استفاده از این سه شاخص، مدیریت الگوی کشت در سطح کلان قابل ارائه خواهد بود.

1 CMhyd

2 Ddgd (Climate Model data for hydrologic modeling)



بدین منظور، ابتدا برای هر شهر و هر محصول، حالت پتانسیل برای کشت گیاه با استفاده از نرم‌افزار اکواکراپ ارائه شد. با توجه به اینکه پژوهش حاضر از منظر تخصیص منابع آب به اولویت‌بندی کشت محصولات مختلف می‌پردازد، عدم وجود تنش خشکی به عنوان عامل اساسی برای تعیین حالت پتانسیل برای کشت گیاهان مختلف در نظر گرفته شد. به عبارت دیگر، در حالت پتانسیل رطوبت منطقه‌ی ریشه برای گیاه مورد نظر در حالت ظرفیت زراعی ثابت باقی می‌ماند. این مهم از طریق نرم‌افزار اکواکراپ برای تعیین مقدار نیاز خالص آبیاری قابل انجام است. بر این اساس شاخص مصرف آب نسبت به حالت پتانسیل طبق رابطه (۹) قابل تعریف است.

$$\text{رابطه ۹)} \quad \text{مصرف آب در حالت واقعی} = \frac{\text{مصرف آب در حالت واقعی}}{\text{مصرف آب در حالت پتانسیل}} * 100 = \text{شاخص مصرف آب}$$

بر اساس چنین تعریفی شاخص مصرف آب، امکان بیشتر شدن نسبت به ۱۰۰ درصد را نیز دارد، زیرا که حفظ رطوبت خاک در منطقه ریشه از طریق آبیاری در حد ظرفیت زراعی، گرچه شرایط مطلوبی برای رشد گیاه فراهم نماید؛ الزاماً منجر به مصرف کمینه منابع آب نخواهد شد. مشابه با شاخص مصرف آب می‌توان برای مقایسه‌ی عملکرد گیاهان مختلف، شاخص مقدار محصول را مطابق رابطه (۱۰) تعریف نمود.

$$\text{رابطه ۱۰)} \quad \text{مقدار محصول در حالت واقعی} = \frac{\text{مقدار محصول در حالت واقعی}}{\text{مقدار محصول در حالت پتانسیل}} * 100 = \text{شاخص مقدار محصول}$$

صورت کسر رابطه (۱۰) مقدار محصول متناظر با برنامه‌ریزی آبیاری در مقدار مصرف آب در حالت واقعی (صورت کسر در رابطه ۹) است. به‌طور مشابه برای مخرج نیز مقدار محصول در حالت پتانسیل برابر با مقدار مصرف آب در حالت پتانسیل (مخرج کسر رابطه ۹) است. در این حالت انتظار می‌رود شاخص فوق مقادیر قابل ملاحظه‌ای بیش از ۱۰۰ نداشته باشد. مقادیر بیش از ۱۰۰ درصد صرفاً در حالت‌هایی رخ خواهد داد که تنش‌های موجود، سبب افزایش شاخص برداشت بشود. در نهایت شاخص اقتصادی به عنوان عامل تعیین‌کننده برای اولویت‌بندی کشت یا عدم کشت محصول به صورت رابطه (۱۰) تعریف شد.

$$\text{رابطه ۱۱)} \quad \text{شاخص سود اقتصادی} = \frac{\text{هزینه حالت واقعی} - \text{درآمد حالت واقعی}}{\text{هزینه حالت پتانسیل} - \text{درآمد حالت پتانسیل}} * 100$$

مشابه با استدلال رابطه (۱۰) انتظار می‌رود که این شاخص صرفاً مقادیر اندکی بیش از ۱۰۰ درصد را داشته باشد.

یافته‌های پژوهش

در این بخش، با بررسی و مطالعات انجام‌شده، داده‌ها از نرم‌افزار اکواکراپ استخراج و آماده‌سازی می‌شوند تا برای تحلیل مقدار تولید محصول در شرایط مرجع (رشد گیاه در شرایط رطوبتی برابر با حد ظرفیت زراعی در تمام طول فصل رشد) برای هر منطقه مدل‌سازی شوند. برای مدل‌سازی نرم‌افزار و درک روند تولید و مقدار محصول، نیاز به تغذیه مدل با استفاده از داده‌های گذشته مناطق انتخابی است. این ورودی‌ها شامل: (۱) داده‌های اقلیمی، (۲) داده‌های آبیاری، (۳) داده‌های محصول و (۴) داده‌های خاک هستند.

به این منظور، تبخیر ترقق به روش هارگریوز-سامانی محاسبه و تاریخ کشت محصولات در شهرهای مورد مطالعه از طریق مصاحبه با کارشناسان و یا جستجو در مقالات تعیین شد (جدول ۲). بخش‌های خالی جدول، نمایانگر عدم کاشت آن محصول در آن منطقه است. با انتخاب هر یک از محصولات گوجه‌فرنگی، گندم، چغندر قند و ذرت با تاریخ کشت تعیین‌شده در هر شهر، فایل‌های محصولات (CRO). پیش‌فرض در نرم‌افزار اکواکراپ استفاده می‌شود. برخی از پارامترهای مهم هر محصول در جدول ۳ به نمایش گذاشته شده است. به منظور کالیبره کردن محصول چغندر قند برخی پارامترها از جمله طول مدت جوانه‌زنی، زمان رسیدن به حداکثر سبزی‌نگی گیاه، زمان گلدهی، زمان پیری و مدت زمان بلوغ و طول مدت HI و در نتیجه‌ی آن، درصد دو ضریب رشد پوشش گیاهی و کاهش پوشش گیاهی تغییر یافت. در شهرهای مشهد، بجنورد و اصفهان و برای محصول گندم در شهرهای اصفهان، زنجان، قزوین، کرمانشاه، بجنورد و مشهد نیاز به تصحیح داشت تا با شرایط موجود کالیبره شود. سایر شهرها و پارامترها از همان مقدار پیش‌فرض استفاده شد.

جدول ۲. تاریخ کشت ذرت، گوجه‌فرنگی، گندم و چغندر قند در مناطق مختلف کشور

ردیف	نام ایستگاه	نام منطقه	ذرت	گوجه‌فرنگی	گندم	چغندر
۱	مشهد	خراسان رضوی	21-May	15-May	1-Nov	3-Apr
۲	قزوین	قزوین	26-May	18-May	16-Nov	20-Apr
۳	تهران	تهران	23-Apr	12-May	23-Sep	9-May
۴	اصفهان	اصفهان	22-Jun	5-Jul	26-Oct	20-Apr
۵	زاهدان	سیستان و بلوچستان	22-Jun	20-Apr	1-Oct	-
۶	زنجان	زنجان	21-May	19-Jul	22-Oct	-
۷	سمنان	سمنان	22-May	8-May	22-Oct	-
۸	شیراز	فارس	4-Jul	21-May	22-Oct	21-Mar
۹	کرمانشاه	کرمانشاه	5-May	1-Mar	23-Oct	21-Mar
۱۰	ارومیه	آذربایجان غربی	15-May	30-May	6-Oct	4-Apr
۱۱	بندرعباس	هرمزگان	-	2-Sep	6-Oct	-
۱۲	بجنورد	خراسان شمالی	12-May	13-May	22-Oct	9-Apr

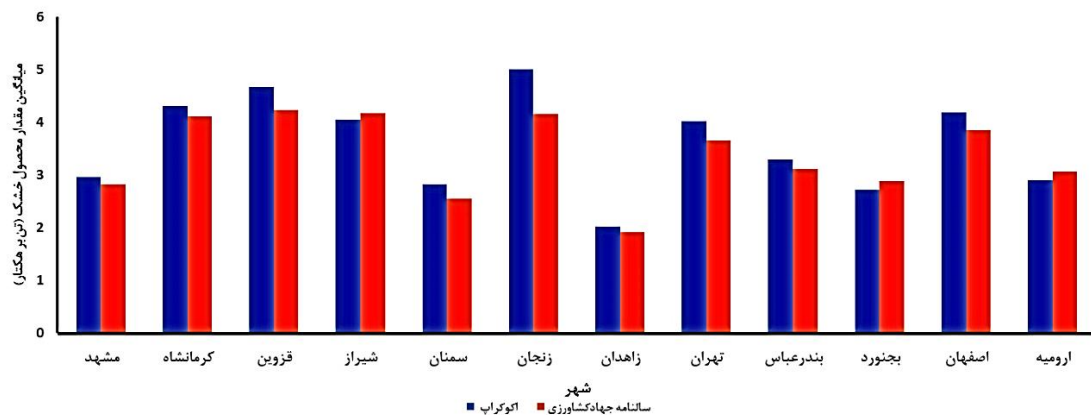
جدول ۳. مدت زمان دوره‌های رشد گیاهی در محصولات ذرت، چغندر، گندم و گوجه‌فرنگی

دوره / محصولات	ذرت	چغندر	گندم	گوجه‌فرنگی
جوانه‌زنی (روز)	۶	۴	۱۳	۴
حداکثر سبزیگی (روز)	۵۴	۷۳	۱۱۹	۶۳
گلدهی (روز)	۶۶	-	۱۲۷	۳۴
مدت زمان گلدهی (روز)	۱۳	-	۱۵	۴۲
پیری (روز)	۱۰۷	۱۱۵	۱۵۸	۹۱
بلوغ (روز)	۱۳۲	۱۴۲	۱۹۷	۱۱۰
طول مدت HI (روز)	۶۱	۷۰	۶۷	۵۸
درصد سطح سایه‌انداز در ۹۰٪ جوانه‌زدن یا پس از پیوند (CC_0)	۰/۴۹	۰/۱	۶/۷۵	۰/۶۷
ضریب رشد پوشش گیاهی (CGC) (درصد به روز)	۱۶/۳	۱۳/۶	۴/۹	۱۲/۳
ضریب کاهش پوشش گیاهی (CDC) (درصد به روز)	۱۱/۷	۷/۱	۷/۲	۷/۲
حداکثر عمق مؤثر ریشه‌زایی (متر)	۲/۳	۱	۱/۵	۱
ضریب تعرق محصول (K_{eff})	۱/۰۵	۱/۱	۱/۱	۱/۱
بهره‌وری آب زیست‌توده نرمال شده (w_p^*) (گرم بر مترمربع)	۳۳/۷	۱۷	۱۵	۱۸
شاخص برداشت (HI_0) (درصد)	۴۸	۷۰	۴۸	۶۳

در مرحله بعد با برنامه‌ریزی آبیاری بر مبنای مقادیر تعریف‌شده در نت‌وات و مقدار نیاز آبی گیاه نسبت به شرایط اقلیمی و بررسی خاک هر نقطه، مقدار محصول تولیدی نسبت به شرایط تعریف‌شده، بدست می‌آید.

صحت‌سنجی

با مقایسه‌ی بین میزان محصول خشک گزارش شده از آمارنامه جهادکشاورزی، هر کدام از محصولات شهرها با مقادیر خروجی حاصل از برنامه‌ریزی با اکواکراپ، مقدار درصد خطا مشخص می‌شود. در شکل ۱. **Error! Reference source not found.** برای محصول گوجه‌فرنگی به مدت ۵ سال در ۱۲ شهر، درصد خطا به نمایش گذاشته شده است؛ همچنین درصد ماکزیمم خطا برای ذرت‌علوفه‌ای و چغندر قند به مدت ۱۵ سال و گندم به مدت ۱۶ سال به ترتیب کرمانشاه ۹/۶۱، ارومیه ۹/۰۲ و اصفهان با ۹/۸۸ درصد برآورد شد.



شکل ۱. صحت‌سنجی محصول گوجه‌فرنگی در استان‌های کشت‌شده ایران

برخی از پارامترهای ورودی برای محصول چغندر قند در شهرهای مشهد، بجنورد و اصفهان نیاز به تصحیح داشت تا با شرایط موجود کالیبره شود. سایر شهرها و پارامترها از همان مقدار پیش‌فرض استفاده شد (جدول ۴).

جدول ۴. مدت زمان دوره‌های رشد گیاهی در محصول چغندر در برخی شهرها

چغندر قند	مشهد	بجنورد	اصفهان
جوانه‌زنی (روز)	۶	۵	۵
حداکثر سبزی‌نگی (روز)	۱۱۱	۹۳	۹۸
پیری (روز)	۱۷۴	۱۴۶	۱۵۳
بلوغ (روز)	۲۲۲	۱۸۱	۱۹۱
CGC	۹	۱۰/۷	۱۰/۱
CDC	۷/۱	۷/۱	۷/۱
طول مدت HI	۱۴۶	۱۰۷	۱۱۷

برخی از پارامترهای ورودی برای محصول گندم در شهرهای اصفهان، زنجان، قزوین، کرمانشاه، بجنورد و مشهد نیاز به تصحیح داشت تا با شرایط موجود کالیبره شود. سایر شهرها و پارامترها از همان مقدار پیش‌فرض استفاده شد (جدول ۵).

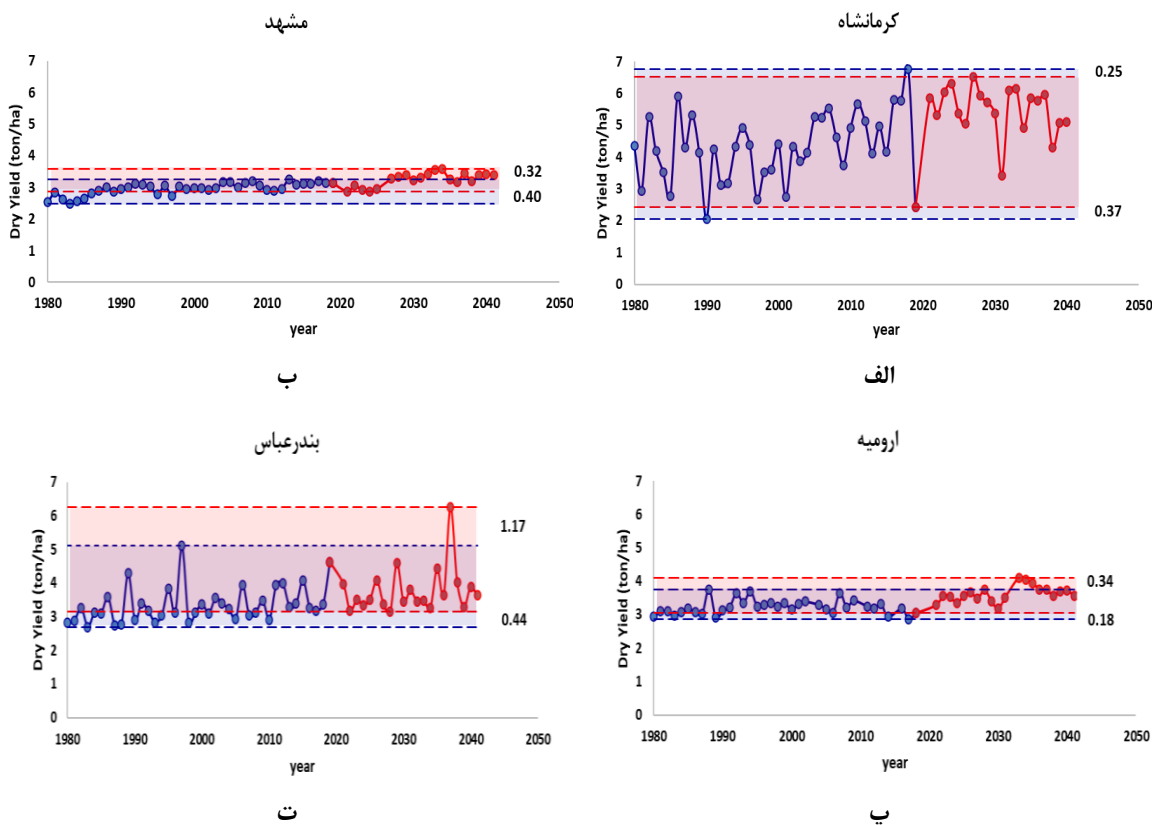
جدول ۵. مدت زمان دوره‌های رشد گیاهی در محصول گندم در برخی شهرها

گندم	اصفهان	بندرعباس	زنجان	قزوین	کرمانشاه	بجنورد	مشهد
جوانه‌زنی (روز)	۱۴	۸	۱۶	۱۵	۱۴	۱۵	۱۵
حداکثر سبزی‌نگی (روز)	۱۲۴	۶۷	۱۵۸	۱۳۸	۱۲۴	۱۴۴	۱۲۱
پیری (روز)	۱۶۴	۱۱۴	۲۰۸	۱۸۳	۱۶۴	۲۰۰	۱۶۰
بلوغ (روز)	۲۱۱	۱۵۳	۲۷۰	۲۲۹	۲۱۱	۲۴۹	۲۳۳
CGC	۴/۷	۸/۸	۳/۷	۴/۲	۴/۷	۴	-
گلدهی (روز)	۱۲۸	۱۱۴	۱۳۰	۱۲۹	۱۲۸	۱۲۹	۱۲۹
مدت زمان گلدهی (روز)	-	-	۵۴	۱۸	-	۳۰	-
طول مدت HI	۷۹	۳۰	۱۳۴	۹۶	۷۹	۱۱۵	۹۹

پیش‌نگری برای ۲۰ سال آینده با نرم‌افزار سیم‌هاید

در ادامه به منظور پیش‌بینی مقدار محصولات برای ۲۰ سال آینده از مدل‌سازی استفاده شد. نرم‌افزار سیم‌هاید با توجه به داده‌های ورودی، خروجی‌های اقلیمی برای آینده نزدیک را پیش‌بینی می‌نماید. در نتیجه‌ی پردازش‌های اقلیمی، می‌توان مقدار محصول تولیدشده را پیش‌بینی کرد. به دلیل طولانی‌شدن مقاله و عدم وجود فضای کافی برای ارائه‌ی کلیه خروجی‌ها برای همه‌ی محصولات انتخابی، فقط ۴ شهر مشهد، کرمانشاه، ارومیه و بندرعباس با فرض اعمال پراکنش اقلیمی به نمایندگی از ۱۲ شهر برای محصول گوجه‌فرنگی در شکل ۲ به

نمایش گذاشته می‌شود.



شکل ۲. میزان تولید محصول گوجه‌فرنگی به صورت سالانه در شهرهای (الف) مشهد، (ب) کرمانشاه، (پ) بندرعباس و (ت) ارومیه، برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۴۰

ترتیب اولویت‌بندی کشت با بیشترین مقدار محصول تولیدی (تن بر هکتار) گیاه گندم، شهرهای: اصفهان (۵/۰۶)، سمنان (۴/۱۸)، کرمانشاه (۴/۱۷)، برای چغندرقد، ارومیه (۱۱/۶۶)، کرمانشاه (۱۱/۵۵)، شیراز (۱۰/۳۹)، برای ذرت اصفهان (۱۳/۸۳)، تهران (۱۳/۶۸)، کرمانشاه (۱۳/۴۴) و برای گوجه‌فرنگی زنجان (۵)، قزوین (۴/۶۷)، اصفهان (۴/۱۹) می‌باشند.

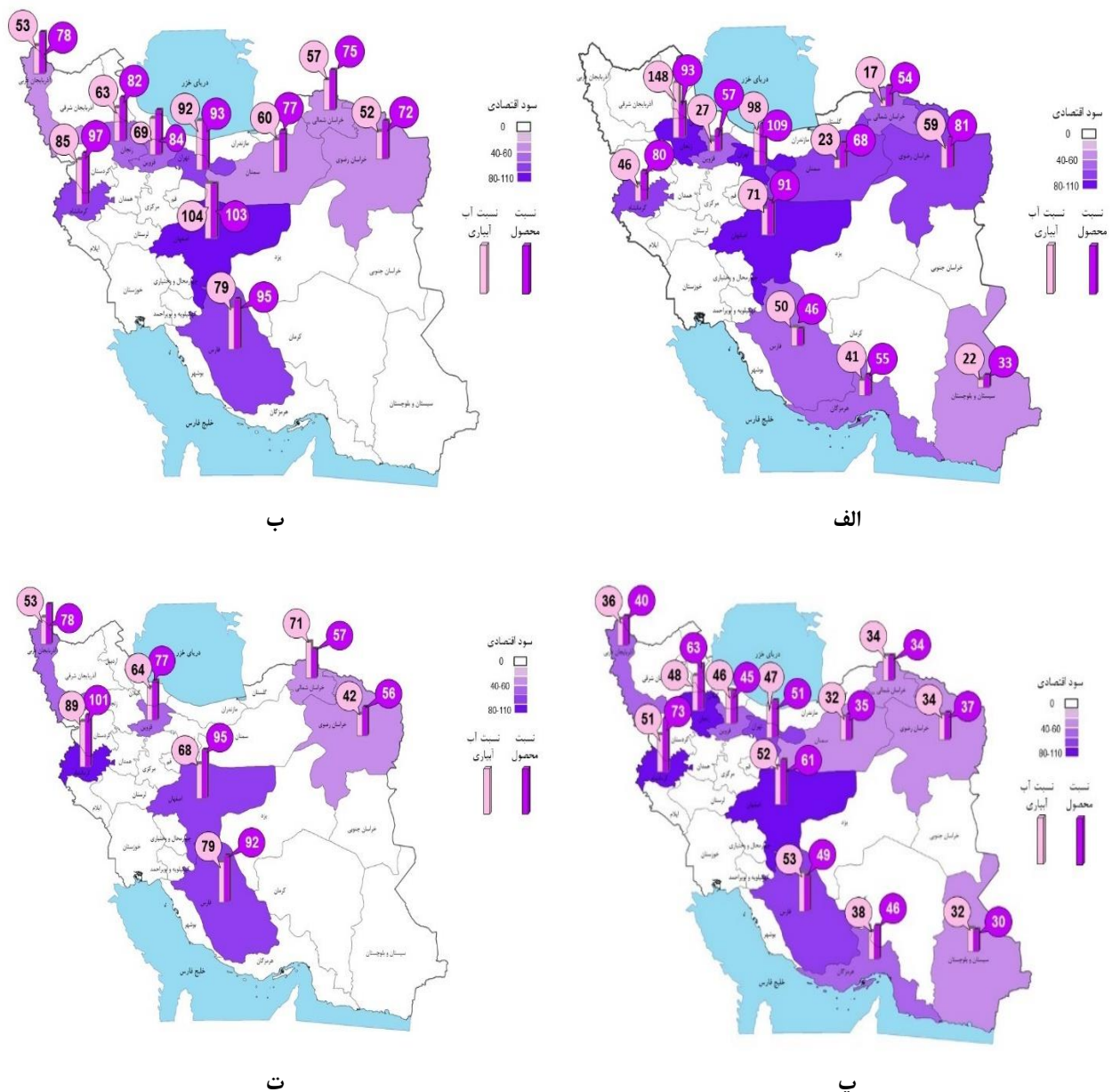
بررسی اقتصادی کشت و پتانسیل‌یابی مکانی محصولات

برای ارائه چارچوبی به منظور انتخاب بهترین محل کشت هر محصول در شهرهای مختلف نیاز به مقایسه ریالی در شرایط برنامه‌ریزی (آبیاری با توجه به نیاز آبی گیاه و مقدار آب موجود) و پتانسیل (آبیاری کامل) است. مقدار هزینه یک کیلوگرم از هر محصول گندم، چغندرقد، ذرت علوفه‌ای و گوجه‌فرنگی که از سالنامه‌ی آماری جهاد کشاورزی استخراج گردیده و هزینه حفاری یک چاه آبرفت در شهر مشهد به عمق ۲۵۰ متر به روش ضربه‌ای برای سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۴۰۱ در جدول ۶ برای شهر مشهد مشخص شده است.

جدول ۶. برآورد هزینه‌های حفاری (ریال) یک چاه در شهر مشهد به عمق ۲۵۰ متر به روش ضربه‌ای

عملیات	واحد	قیمت
هزینه رفت و برگشت ۱۵۰ کیلومتر	هر کیلومتر	۸۰۰۰۰۰
تجهیز کارگاه برای حفاری	هر کارگاه	۳۰۰۰۰۰۰۰
نصب و جمع‌آوری	هر مرحله	۱۲۰۰۰۰۰۰۰
حفاری ۱۶ اینچ تا عمق ۱۵۰ متر	هر متر	۹۵۰۰۰۰۰
حفاری ۱۶ اینچ عمق ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر	هر متر	۱۲۰۰۰۰۰۰
لوله‌گذاری ۱۲ اینچ تا ۱۵۰ متر	هر متر	۳۰۰۰۰۰۰
لوله‌گذاری ۱۲ اینچ ۱۵۰ تا ۲۰۰ متر	هر متر	۴۰۰۰۰۰۰
دبی چاه	لیتر بر ثانیه	۲۰

مقدار سود خالص محصولات کشاورزی بر اساس شاخص قیمت مصرف‌کننده در شهرهای مختلف طبق رابطه (۱) نسبت به سال ۱۴۰۱ به‌روزرسانی شده است. با داشتن مقدار سود (میلیون تومان)، مقدار آب آبیاری (میلی‌متر) و مقدار محصول تولیدی (تن بر هکتار) می‌توان موقعیت مناسب برای کشت هر محصول را اولویت‌بندی کرد. بنابراین، مقایسه نسبت‌های محاسبه‌شده برای مقدار محصول تولیدشده، مقدار میلی‌متر آب آبیاری استفاده‌شده و سود ریالی ناشی از دو حالت برنامه‌ریزی با اکواکراپ و حالت پتانسیل منجر به تولید اولویت‌های کشت برای محصولات مورد مطالعه شده است (جدول ۷). درصد ظرفیت کاشت محصول در شهرهای مختلف برای چهار محصول گندم، ذرت علوفه‌ای، گوجه‌فرنگی و چغندر قند استفاده شد.



شکل ۳. مقایسه‌ی نسبت مقدار محصول، آب آبیاری و میزان سود اقتصادی در دو حالت برنامه‌ریزی و پتانسیل برای گیاهان (الف) گندم، (ب) ذرت علوفه‌ای،

(پ) گوجه‌فرنگی و (ت) چغندر قند (شهرهای سفیدرنگ، مناطق مطالعاتی این پژوهش نیستند)

با مقایسه‌ی این ۳ شاخص برای هر شهر، ترتیب اولویت‌بندی کشت محصولات در شهرهای مورد مطالعه به شرح زیر است.

جدول ۷. اولویت بندی کشت محصولات در شهرهای مختلف ایران به ترتیب از راست (مناسب ترین) به چپ (نامناسب ترین)

شهر	محصولات
مشهد	گندم
کرمانشاه	چغندر قند
قزوین	ذرت علوفه‌ای
شیراز	ذرت علوفه‌ای
بجنورد	ذرت علوفه‌ای
اصفهان	ذرت علوفه‌ای
سمنان	ذرت علوفه‌ای
تهران	گندم
زنجان	گندم
ارومیه	چغندر قند
بندرعباس	گندم
زاهدان	گندم

همچنین مناسب ترین و نامناسب ترین مکان کشت گوجه فرنگی، ذرت علوفه‌ای، گندم و چغندر قند در ۱۲ شهر انتخابی به ترتیب کرمانشاه (۶۵ درصد) و زاهدان (۳۱ درصد)؛ اصفهان (۱۰۳ درصد) و مشهد (۶۵ درصد)؛ تهران (۱۰۵ درصد) و زاهدان (۳۲ درصد)؛ کرمانشاه (۹۶ درصد) و مشهد (۱۴ درصد) است. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۷ و شکل ۳، علل اولویت بندی محصولات کشت شده در بخش بعد تجزیه و تحلیل شده است.

بحث

در شکل ۲ مقایسه چهار منطقه مورد مطالعه (مشهد، بندرعباس، ارومیه و کرمانشاه) با اقلیم‌های متفاوت را برای آمار طولانی مدت (سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۰) نشان می‌دهد که با توجه به نوسانات شدید آب‌وهوایی در کرمانشاه و بندرعباس، ریسک تولید محصول بالا و در نتیجه پایداری تولید محصول، پایین است. بالعکس، نوسانات ملایم در مشهد و ارومیه، ریسک تولید محصول نسبتاً پایین است. در مقایسه‌ی ارومیه با کرمانشاه (مناطق غربی کشور)، گرچه مقدار محصول تولید شده در ارومیه نسبت به متوسط مقدار محصول کرمانشاه پایین تر است، با این حال به لحاظ پایداری احتمال تولید محصول به صورت پایدار، بالاتر خواهد بود. همچنین در مقایسه‌ی شهر بندرعباس با شهر مشهد (مناطق مرکزی و شرقی) مشخص می‌شود که در شهر بندرعباس، تولید محصولات با یک بازه نوسان گسترده‌تر نسبت به مشهد همراه است که نشان از متوسط مقدار تولید بیشتر در بندرعباس است. با این وجود، احتمالاً ریسک تولید محصولات در بندرعباس بیشتر و پایداری آن کمتر از مشهد است. علت این اختلاف را می‌توان به وجود نوسانات بارش در پیش‌نگری داده‌های اقلیمی مدل سیم‌هاید که با الگوبرداری از ۴۰ سال گذشته برای ۲۰ سال بعد اعمال می‌کند، ارتباط داد. ضمناً لازم به ذکر است تغییرات سطح ایستابی به دلیل استفاده از مدل اکواکراپ در این پژوهش، احتمال عدم قطعیت دارد.

چنانچه در شکل ۳-الف ملاحظه می‌شود، از نظر سود اقتصادی، محصول گندم در نوار شمالی کشور و شهر اصفهان دارای اولویت برتر است. همچنین مشاهده می‌شود که هماهنگی بین شاخص‌ها نشان می‌دهد که شاخص اقتصادی جایگزین مناسبی برای هر دو شاخص مقدار محصول و آب آبیاری است. شکل ۳-ب و پ نشان می‌دهد که کشت ذرت علوفه‌ای و گوجه فرنگی به لحاظ سود اقتصادی در مرکز و در غرب کشور دارای اولویت است. برای این محصولات کمینه شاخص مصرف آب و بیشینه شاخص مقدار محصول توسط شاخص اقتصادی قابل توضیح نیست و نیاز به استفاده از هر ۳ پارامتر برای تصمیم‌گیری است. اولویت کشت برای چغندر قند در قسمت غرب نسبت به سمت شرق کشور، بیشتر است که توسط شاخص‌های نسبت محصول و سود اقتصادی تبیین می‌شود.

در شکل ۳ سه شاخص مقدار محصول، آب مصرفی و سود اقتصادی، محصولات گندم، چغندر قند، ذرت علوفه‌ای و گوجه فرنگی در کل کشور ایران در مقیاس کلان، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. با توجه به این مقایسه، به نظر می‌رسد که ذرت با میانگین شاخص اقتصادی ۹۰ درصد بین شهرهای مورد مطالعه، به عنوان محصولی با بهترین عملکرد به لحاظ سود اقتصادی و مقدار محصول تولیدی معرفی شود.



علت این امر را می‌توان در مقاومت ذرت نسبت به تغییرات اقلیمی و تنش‌ها جستجو نمود. همچنین، با توجه به مقایسه آب مصرفی، گوجه‌فرنگی با میانگین شاخص آب آبیاری ۴۰ درصد، به عنوان محصولی با شاخص مصرف آب کم معرفی شده است، که احتمالاً مربوط به دوره‌ی کشت کوتاه‌تر آن در مقایسه با سایر محصولات است و از این جهت به عنوان یک گزینه پایدار می‌تواند مطرح شود. بر اساس شاخص سود اقتصادی و مقدار محصول به منظور تعیین اولویت کشت محصولات در سطح ملی به ترتیب اولویت‌بندی ذرت، چغندر، گندم و گوجه‌فرنگی (با میانگین شاخص سود اقتصادی و مقدار محصول به ترتیب برای ذرت، چغندر، گندم و گوجه‌فرنگی ۹۰، ۸۰، ۷۰ و ۵۰ درصد) پیشنهاد می‌شود. در زمینه مقایسه آب مصرفی نیز، اولویت‌های پیشنهادی گوجه‌فرنگی، گندم، چغندر، و ذرت (با میانگین شاخص آب مصرفی به ترتیب برای گوجه‌فرنگی، گندم، چغندر، و ذرت ۴۰، ۵۰، ۷۰ و ۷۰ درصد) می‌باشند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه، با هدف شناسایی بهترین نقاط برای کشت محصولات اصلی در ایران با توجه به نوسانات اقلیمی آینده و اهمیت تأمین غذا با در نظر گرفتن رشد جمعیت، انجام شد. صحت‌سنجی ناشی از مدل اکواکراپ برای محصولات چغندر ۸/۴ درصد، گوجه‌فرنگی ۸/۳ درصد، گندم ۶/۶ درصد، و ذرت ۶/۴ درصد محاسبه شد. درصد خطای زیر ۱۰ درصد، نشان از شبیه‌سازی قابل قبولی را می‌دهد. همچنین با مدل‌سازی هواشناسی MRI - ESM 0 - 2، خروجی‌های سیمپ ۶ در نرم‌افزار سیم‌هاید برای ۲۰ سال آینده استخراج شد. در نهایت، با تحلیل و بررسی مقادیر میانگین تولید محصولات با استفاده از داده‌های تاریخی، برای گندم، بیشترین مقدار تولید در اصفهان و کمترین مقدار تولید در زاهدان، بیشترین مقدار تولید چغندر در ارومیه و کمترین مقدار آن در بجنورد، ذرت علوفه‌ای با بیشترین مقدار تولیدی در اصفهان و کمترین آن در مشهد، و گوجه‌فرنگی با بیشترین مقدار در زنجان و کمترین مقدار تولیدی در زاهدان مشخص شد. برای یافتن بهترین مکان کشت بین محصولات مختلف در شهرهای متفاوت نسبت به حالت برنامه‌ریزی با اکواکراپ و حالت پتانسیل هر محصول، ارزش ریالی محصولات و هزینه آب مقادیر پتانسیلی استفاده شد.

در ۱۲ شهر انتخابی بهترین و ضعیف‌ترین مکان کشت گوجه‌فرنگی، ذرت علوفه‌ای، گندم و چغندر قند به ترتیب کرمانشاه و زاهدان، اصفهان و مشهد، تهران و زاهدان، کرمانشاه و مشهد اولویت‌بندی شد. با یافتن مناسب‌ترین و نامناسب‌ترین مناطق کشت محصولات توصیه می‌شود، شهرهایی که شاخص‌های بهتری دارند، از نظر کشت محصول در اولویت قرار گیرند. همچنین توصیه می‌شود از کشت در شهرهایی که دارای ضعیف‌ترین شاخص‌ها هستند، اجتناب شود (یا می‌توان دنبال محصول جایگزین بود). در نتیجه به منظور پیش‌بینی میزان بیشینه و کمینه و مقدار بارش و در نتیجه برآورد مقدار محصول خشک در هر هکتار می‌توان ترکیبی از مدل‌سازی توسط اکواکراپ و مدل هواشناسی MRI - ESM 0 - 2 برای اقلیم‌های متفاوت ایران، استفاده کرد. این ابزارها با بهره‌گیری از آنالیز دقیق می‌توانند به مدیریت بهینه منابع کمک کرده و تا به بهترین نحو از شرایط موجود استفاده شود. گرچه در این تحقیق سعی شده است تا نقاط ضعف به حداقل رسانده شود، اما باید بپذیریم که این مطالعه تنها یک جزء محدود از حوزه‌های بی‌پایان علمی است. از این رو به منظور بهبود کیفیت این تحقیق، بکارگیری نمونه‌های بیشتری از محصولات کشاورزی برای ارزیابی صحت مدل سیم‌هاید، ایجاد مدل جایگزین برای تخمین عکس‌العمل اکواکراپ از جمله مدل‌های شبکه‌ی عصبی در مناطق با تغییرات دمایی زیاد مثل یزد و اردبیل و اعمال سیاست‌های مدیریتی متفاوت برای شهرهایی با پتانسیل کشت بالا، پیشنهاد می‌شود. در نهایت می‌توان ذکر نمود که پژوهش حاضر می‌تواند از لحاظ فرهنگی و اجتماعی و رفتارهای کشاورزان بر الگوی کشت نیز مورد تحقیق قرار گیرد.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

انصاری مهابادی، ثمین، دهبان، حسین، زارعیان، محمدجواد، و فرخ نیا، اشکان. (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برونداد مدل‌های CMIP ۶. *مجله پژوهش آب/ایران*، ۱۶(۱) (پیاپی ۴۴)، ۱۱-۲۴.

جرعه نوش، محمدهادی، برومندنسب، سعید، ناصری، عبدعلی، پاک پرور، مجتبی، و تقواییان، صالح. (۱۳۹۸). ارزیابی مدل اکواکراپ در شبیه‌سازی عملکرد گندم و تعیین تاریخ کشت در استان فارس. *مدیریت آب و آبیاری*، ۹(۱)، ۹۵-۱۰۷.

رضانی اعتدالی، هادی؛ و صفری، فاطمه. (۱۴۰۲). ارزیابی تأثیر روش‌های مختلف برآورد ETO در شبیه‌سازی تبخیر و تعرق واقعی و زیست‌توده گندم

- با مدل اکواکراپ. آب و خاک، ۳۷(۱)، ۱-۱۴.
- زرین، آذر، داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۳۹۹). پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6). فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳)، ۵۸۳-۶۰۲.
- سعادت، زهرا؛ دلبری، معصومه، پناهی، مهدی، و امیری، ابراهیم. (۱۳۹۷). شبیه‌سازی رشد چغندر قند تحت تنش آبی با استفاده از مدل AquaCrop. حفاظت منابع آب و خاک، ۷(۳)، ۱-۱۸.
- هوشمند، دل آرام، اسماعیلی، کاظم، فریدحسینی، علیرضا، ثنایی نژاد، سیدحسین، و خلیلی، داوود. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های گزارش ارزیابی پنجم تحت سناریوهای RCP بر منابع آبی حوضه‌ی آبریز سد سلمان فارسی. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۲)، ۲۴۳-۲۵۸.

REFERENCES

- Alishiri, R., Paknejad, F., Aghayari, F. (2014). Simulation of sugarbeet growth under different water regimes and nitrogen levels by Aqua crop. 4. 1-9. 10.12692/ijb/4.4.1-9.
- Andarzian, B. & Bannayan, Mohammad & Steduto, Pasquale & Mazraeh, Hamed & Barati, Mehdi & Barati, M. & Rahnema, Amir. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Fuel and Energy Abstracts*. 100. 1-8. 10.1016/j.agwat.2011.08.023.
- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M.j., Farokhnia, Ashkan. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Research Journal*, 11 to 24. (In Persian).
- Bao, Y., Hoogenboom, G., McClendon, R., & Vellidis, G. (2017). A comparison of the performance of the CSM-CERES-Maize and EPIC models using maize variety trial data. *Agricultural Systems*, 150, 109-119. doi: 10.1016/j.agsy.2016.10.006.
- Bleischwitz, C., Spataru, R., VanDeveer, C., Obersteiner, S.D., Van, E., Johnson, D. P., Andrews-Speed, P., Boersma, P., Hoff, H., & van Vuuren, M. (2018). Resource Nexus Perspectives towards the UN Sustainable Development Goals, *Nature*, 1. 737 - 743
- Chamas, Z., Abou Najm, M., Al-Hindi, M., Yassine, A., & Khattar, R. (2021). Sustainable resource optimization under water-energy-food-carbon nexus. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123894. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123894.
- Cheng, Kun & Wei, Shuai & Ren, Yongtai & Fu, Qiang. (2021). Optimal Allocation of Agricultural Water Resources under the Background of China's Agricultural Water Price Reform—a Case Study of Heilongjiang Province. *Applied Mathematical Modelling*. 97. 10.1016/j.apm.2021.04.019.
- Etedali, H. R., & Safari, F. (2023). Evaluation of the Influence of Different ET0 Estimation Methods in Simulation of Wheat Actual Evapotranspiration and Biomass by AquaCrop Model, 37(1), 1–14. (In Persian).
- FAO. (2012). Coping with water scarcity An action framework for agriculture and food security.
- FAO. (2022). The future of food and agriculture: Drivers and triggers./ *The state of food and agriculture*.
- FAO. (2022). The future of food and agriculture: Drivers and triggers./ *The state of food and agriculture*.
- Fu, C., & Seyed, T. (2022). Bayesian dynamic extreme value modeling for conflict-based real-time safety analysis. *Analytic methods in accident research*, 34, 100204.
- Garcia-Vila, M., Morillo-Velarde, R., & Fereres, E. (2019). Modeling sugar beet responses to irrigation with AquaCrop for optimizing water allocation. *Water (Switzerland)*, 11(9). doi: 10.3390/w11091918.
- Hargreaves, George & Allen, Richard. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*. 129. 10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53).
- Houshmand Kouchi, D., Esmaili, K., Faridhosseini, A., Sanayi Nejad, S. H. & Khalili, D. (2018). Simulation of Climate Change Impacts Using Fifth Assessment Report Models under RCP Scenarios on Water Resources in the Upper Basin of Salman Farsi Dam. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 13(2) 243-258. <https://sid.ir/paper/131746/fa>. (In Persian).
- Jiménez, B., Oki, T., Arnell, N., Benito, G., Cogley, J.G., Döll, P., Jiang, T., Mwakalila, S.S. (2014). Freshwater resources. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.229-269.



- Jorenush, M.Hadi., BoroomandNasab, S., Naseri, A., Pakparvar, M., Taghvaeian, S. (2019). AquaCrop evaluation to simulate wheat production and planting date in Fars province. *Journal of Water and Irrigation Management*, 95-107. (In Persian).
- Karamian, F., Mirakzadeh, A. A., & Azari, A. (2023). Application of multi-objective genetic algorithm for optimal combination of resources to achieve sustainable agriculture based on the water-energy-food nexus framework. *Science of the Total Environment*, 860, 160419. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160419
- Katerji, N., Campi, P., & Mastrorilli, M. (2013). Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 130, 14–26. doi: 10.1016/j.agwat.2013.08.005.
- Mize, J.H., Cox, J.G. (1968). *Essentials of simulation*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. New York, U.S.A.
- Mizik, T. (2021). The Performance of the Agri-food Sector in the Recent Economic Crisis and during Covid-19 Pandemic. *HighTech and Innovation*, 2(3), 168-178.
- Mkhabela, M. S., & Bullock, P. R. (2012). Performance of the FAO AquaCrop model for wheat grain yield and soil moisture simulation in Western Canada. *Agricultural Water Management*, 110, 16–24. doi: 10.1016/j.agwat.2012.03.009.
- Nie, T., Tang, Y., Jiao, Y., Li, N., Wang, T., Du, C., Zhang, Z., Chen, P., Li, T., Sun, Z., & Zhu, S. (2022). Effects of Irrigation Schedules on Maize Yield and Water Use Efficiency under Future Climate Scenarios in Heilongjiang Province Based on the AquaCrop Model. *Agronomy*, 12(4), 810. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040810>
- Pereira, L. S. (2017). Water, Agriculture and Food: Challenges and Issues. *Water Resources Management*, 31(10), 2985-2999. doi: 10.1007/s11269-017-1664-z
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. & Fereres, E. (2009), AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. *Agron. J.*, 101: 438-447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. 2016. “CMhyd User Manual Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies,”.
- Saadati, Z., Delbari, M., Panahi, M., Amiri, E. (2018). Simulation of sugar beet growth under water stress using AquaCrop model. *journal of water and soil resources conservation*, 7(3) 1-18.(In Persian).
- Schaap, Marcel & Leij, Feike & Van Genuchten, Martinus. (2001). ROSETTA: A computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. 251. 163-176. 10.1016/S0022-1694(01)00466-8.
- Sundmaeker, H., & Verdouw, C., & Wolfert, S., & Pérez-Freire, L. (2016). *Internet of Food and Farm 2020*, 129–151. DOI:10.1201/9781003337966-4.
- Vanuytrecht, E. & Hsiao, T. & Fereres, E. & Heng, Lee & García-Vila, Margarita & Mejías, Patricia. (2014). AquaCrop: FAO’S crop water productivity and yield response model. *Environmental Modelling and Software*. 62. 10.1016/j.envsoft.2014.08.005.
- Vuković, A J., Vujadinović, M. P., Rendulić, S. M., Djurdjević, V. S., Ruml, M. M. and Babić, V. P. (2018) “Global Warming Impact on Climate Change in Serbia for The Period 1961-2100. by,” *vol. 22, no. 6, pp. 2267-2280.*
- Yukimoto, S., Koshiro, T., Kawai, H., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, Sh., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M., Yoshimura, H., Shindo, E., Mizuta, R., Ishii, M., Obata, A., Adachi, Y. (2020). MRI MRI-ESM2-0 model output prepared for CMIP6 DCPP. *Version 2020 Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.630>
- Zarrin, A., & Dadashi Roudbari, A. A. (2020). Projection the Long-Term Outlook Iran Future Temperature Based on the Output of The coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Journal of the Earth and Space Physics*, Vol. 46, No. 3, Autumn 2020, P. 10. (In Persian).