



From consumption monitoring to response to water footprint unsustainability: Integrated multi-objective optimization of cropping patterns with a holistic-detail approach (Case study: Markazi Province)

Saeed Farahani¹ | Farhad Mirzaei² | Masoud Parsinejad³ | Mahmood Akbari⁴

1. Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Saeed.Farahaniha@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: fmirzaei@ut.ac.ir

3. Department of Irrigation & Reclamation Engineering, College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: parsinejad@ut.ac.ir

4. Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, Arak University, Arak, Iran. E-mail: m-akbarii@araku.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: May. 10, 2025

Revised: June. 30, 2025

Accepted: July. 15, 2025

Published online: Oct. 2025

Keywords:

Water footprint assessment, Cropping pattern and composition, Multi-objective cropping pattern optimization, Blue Water Shortage (BWS) index, Sustainable management of agricultural water resources.

ABSTRACT

Due to the limitation of water resources and the need to manage water demand, especially in the agricultural sector, it is necessary to develop effective strategies to reduce pressure on water resources. The present study aimed to provide a model for cropping pattern optimization at the county level, based on the water footprint index, and economic and environmental considerations. Using climatic, agronomic, and economic data over a 10-year period, the blue and green water footprints were calculated for 18 crops in both irrigated and rainfed cultivations. Then, the cropping pattern optimization was designed with the NSGA-II multi-objective algorithm. Two objective functions were defined, including reducing the ratio of blue water to green water consumption, and increasing net economic profit, along with food and environmental security constraints. The results showed that in cropping patterns with greater freedom, the ratio of blue water to green water decreased by more than 35% at the provincial level. In some counties, the volume of blue water consumption was estimated to be more than 60 MCM lower than the baseline. The cultivated area in irrigated and rainfed lands decreased by about 25%, and increased by more than 30%, respectively, which led to a shift in the balance of resource extraction in favor of green water. Water resource sustainability using the Blue Water Shortage (BWS) index was also maintained or improved in all counties, with a distribution around the optimal value of one. From an economic point of view, in scenarios with more freedom, the net economic benefit remained relatively stable compared to the baseline situation. The findings emphasize the effectiveness of an integrated approach based on water footprint and multi-objective optimization of cropping patterns.

Cite this article: Farahani, S., Mirzaei, F., Parsinejad, M., & Akbari, M. (2025). From consumption monitoring to response to water footprint unsustainability: Integrated multi-objective optimization of cropping patterns with a holistic-detail approach (Case study: Markazi Province)., *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (8), 1987-2011. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.395048.669937>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.395048.669937>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Increasing pressure on water resources, instability in agricultural production systems, and climate change have made the need to review water consumption patterns and manage its demand to a fundamental necessity in arid and semi-arid regions. The Water Accounting, as an analytical tool for quantifying and monitoring water inflows, outflows, and consumption, provides a new platform for data-driven decision-making. The importance of this tool doubles when water resources management focuses not only on supply, but also on monitoring and optimizing demand and increasing water productivity in the face of increasing demand. The Water Footprint concept, as an analytical and applied indicator within the water accounting framework, plays a prominent role in understanding and managing water demand.

Method

In this regard, the present study aimed to provide a model for cropping pattern optimization at the county level, based on the water footprint index and economic, and environmental considerations. For this purpose, using climatic, agronomic, and economic data over a 10-year period, the blue and green water footprints were calculated for 18 crops in both irrigated and rainfed cultivations. Then, the cropping pattern optimization was designed with the NSGA-II multiobjective algorithm. Two objective functions were defined, including reducing the ratio of blue water to green water consumption, and increasing net economic profit, along with food and environmental security constraints. The analyzes were done in the form of six scenarios, based on different degrees of freedom in changes in the cropping pattern.

Results

The results showed that in cropping patterns with greater freedom, the ratio of blue water to green water decreased by more than 35% at the provincial level. In some counties, the volume of blue water consumption was estimated to be more than 60 million cubic meters lower than the baseline. Also the volume of green water consumption was estimated to be more than 29 and 84 million cubic meters in irrigated and rainfed lands, respectively upper than the initial condition in some counties. The cultivated area in irrigated and rainfed lands decreased by about 25%, and increased by more than 30%, respectively, which led to a shift in the balance of resource extraction in favor of green water. Water resource sustainability using the Blue Water Shortage (BWS) index was also maintained or improved in all counties, with a distribution around the optimal value of one. From an economic point of view, in scenarios with more freedom, the net economic benefit remained relatively stable compared to the baseline situation. Meanwhile, according to the limits and goals, the share of production of crops with low water-economic efficiency in the cropping pattern was decreased.

Conclusions

The findings emphasize the effectiveness of an integrated approach based on water footprint and multi-objective optimization of cropping patterns. Also, considering smaller county scales in decision-making, and designing cropping patterns in the form of an interconnected provincial system, can pave the way for more accurate, coordinated, and consistent decision-making with the ecological and institutional characteristics of each region for effective policy-making in managing water demand in the agricultural sector.

Author Contributions

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

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors wish to acknowledge the support from the University of Tehran, Iran for providing the financial support for this research project.

Ethical considerations

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

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

از رصد مصرف تا واکنش به ناپایداری ردپای آب: بهینه‌سازی چندهدفه یکپارچه الگوی کشت با رویکرد کل‌نگر- جزئی‌نگر (مطالعه موردی: استان مرکزی)

سعید فراهانی^۱ | فرهاد میرزایی^۲ | مسعود پارسی‌نژاد^۳ | محمود اکبری^۴

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Saeed.Farahaniha@ut.ac.ir

۲. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: fmirzaei@ut.ac.ir

۳. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: parsinejad@ut.ac.ir

۴. گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: m-akbari@araku.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۲/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۴/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۲۴

تاریخ انتشار: آبان ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

ارزیابی ردپای آب،

الگو و ترکیب کشت،

بهینه‌سازی چندهدفه الگوی

کشت،

شاخص کمبود آب آبی (BWS)،

مدیریت پایدار منابع آب

کشاورزی

با توجه به محدودیت منابع آب و لزوم مدیریت تقاضای آب به‌ویژه در بخش کشاورزی، تدوین راهکارهای مؤثر برای کاهش فشار بر منابع آب ضروری است. پژوهش حاضر با هدف ارائه مدل بهینه‌سازی الگوی کشت در سطح شهرستانی، با تکیه بر شاخص ردپای آب و ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی صورت گرفت. با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی، زراعی و اقتصادی طی دوره ۱۰ ساله، ردپای آب آبی و سبز برای ۱۸ محصول محاسبه شد. بهینه‌سازی الگوی کشت با الگوریتم چندهدفه NSGA-II طراحی شد. دو تابع هدف کاهش نسبت مصرف آب آبی به آب سبز و افزایش سود خالص اقتصادی همراه با قیود امنیت غذایی و زیست‌محیطی تعریف گردید. نتایج نشان داد در الگوهای کشت با آزادی بیشتر، نسبت آب آبی به آب سبز در سطح استان بیش از ۳۵ درصد کاهش یافت. در برخی شهرستان‌ها، حجم مصرف آب آبی تا بیش از ۶۰ میلیون مترمکعب کمتر از وضعیت پایه برآورد شد. سطح کشت اراضی فاریاب و دیم به ترتیب حدود ۲۵ درصد کاهش و بیش از ۳۰ درصد افزایش یافت که منجر به تغییر توازن برداشت از منابع به نفع آب سبز شد. پایداری منابع آب با استفاده از شاخص کمبود آب آبی (BWS) نیز با پراکنش حول مقدار بهینه یک، در تمامی شهرستان‌ها حفظ شد و یا بهبود یافت. از نظر اقتصادی، در سناریوهای با آزادی بیشتر، سود خالص اقتصادی نسبت به وضعیت پایه به طور نسبی پایدار باقی ماند. یافته‌ها، بر کارآمدی یک رویکرد تلفیقی مبتنی بر ردپای آب و بهینه‌سازی چندهدفه الگوی کشت تأکید دارد.

استناد: فراهانی، سعید؛ میرزایی، فرهاد؛ پارسی‌نژاد، مسعود؛ و اکبری، محمود (۱۴۰۴). از رصد مصرف تا واکنش به ناپایداری ردپای آب: بهینه‌سازی چندهدفه یکپارچه الگوی کشت با رویکرد کل‌نگر- جزئی‌نگر (مطالعه موردی: استان مرکزی)، *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۶ (۸)، ۱۹۸۷-۲۰۱۱.



<https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.395048.669937>

© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2025.395048.669937>

مقدمه

با رشد فزاینده جمعیت، گسترش فعالیت‌های اقتصادی و تشدید تغییرات اقلیمی، نظام تأمین و تقاضای آب با چالش‌های پیچیده مواجه شده است (Cai et al., 2022) و به شکاف میان عرضه طبیعی آب و تقاضای فزاینده انجامیده است (Ren et al., 2021) و امنیت غذایی را به خطر انداخته است (Kompas et al., 2024). لذا در این شرایط برای مدیریت منابع آب، دسترسی به اطلاعات دقیق الزامی است و این امر ضرورت استفاده از حسابداری آب به عنوان ابزاری تحلیلی برای کمی‌سازی مصرف آب (Nouri et al., 2023) را بیش از پیش آشکار می‌سازد (Slattery, 2008).

ارزیابی ردپای آب به عنوان مفهومی کاربردی در چارچوب حسابداری آب که توسط (Hoekstra et al., 2012) معرفی شد نقش برجسته‌ای در شناخت و مدیریت تقاضای آب ایفا می‌کند. صرف نظر از قابلیت هم‌راستایی این مفهوم با اهداف متفاوت در گام نخست ارزیابی ردپای آب، در گام دوم، این مفهوم میزان مصارف آب و نوع مصارف را در چهار مؤلفه آبی، سبز، خاکستری (Demir and Muratoglu, 2025) و سفید (Ababaei and Etedali, 2014) و زمان و مکان مصرف را تعیین می‌نماید (Hoekstra et al., 2012). گامی که محور اصلی مطالعاتی چون (Ababaei and Etedali, 2017; Sharafi et al., 2024) در ایران و (Hossain et al., 2021) در جهان قرار گرفته است. در گام سوم، همچون مطالعات (Karandish, 2021; Mehla et al., 2023)، با تحلیل داده‌ها در بستر منابع آب، می‌توان مشخص کرد که میزان مصرف تا چه حد با منابع آب در دسترس منطقه سازگار است و آیا پایداری آن را به مخاطره می‌اندازد. این ارزیابی‌ها، در هر منطقه با استفاده از شاخص کمبود آب آبی (BWS)، می‌توانند نواحی بحرانی را شناسایی و وضعیت پایداری مصرف آب را تعیین کنند (کاراندیش، ۱۳۹۹). در گام چهارم، امکان تدوین واکنش مدیریتی و بررسی اثرات واکنش بر روی مصرف و پایداری را ایجاد می‌نماید. لذا با توجه به ویژگی‌های فوق استفاده از مفهوم ارزیابی ردپای آب در مدیریت تقاضای آب نقش برجسته‌ای پیدا می‌کند. در واکنش‌ها برای مدیریت تقاضا، محققان راه حل‌های گوناگونی را همچون اقدامات حفاظت از آب، اقدامات زراعی، تنظیم الگوی کشت، انتقال فیزیکی و مجازی آب، اصلاح نژاد بیولوژیکی و غیره را پیشنهاد کرده‌اند (Husenov et al., 2015; Xue et al., 2017; Zhang et al., 2020; Karandish et al., 2021; Luo et al., 2022). ایران ناپایداری در منابع آب به دلیل الگوی کشت نامناسب بوده است و نیازمند بازنگری اساسی می‌باشد (Karandish and Hoekstra, 2017; کاراندیش، ۱۳۹۹). بنابراین بهینه‌سازی الگوی کشت می‌تواند مزایای متعددی به همراه داشته باشد و نقش مهمی در تضمین توسعه پایدار کشاورزی منطقه‌ای ایفا کند (Wang et al., 2019). نتایج اعمال واکنش‌های مختلف و همزمان برخی مطالعات همچون (Nouri et al., 2019; et al., 2020) نیز نشان می‌دهد برخلاف برخی از راهکارها، بهینه‌سازی الگوی کشت نه تنها مصرف آب را بیشتر از سایر روش‌ها کاهش می‌دهد، بلکه ساختار تقاضا را نیز تغییر می‌دهد. بهینه‌سازی الگوی کشت با هدف ایجاد یک ارتباط بین منابع آب و تولیدات کشاورزی در عین در نظر گرفتن افزایش سود اقتصادی با تعیین سطح و مکان کشت است (Li et al., 2016; He et al., 2020). لذا در ایجاد امنیت غذایی هر واحد مکانی خودکفا نقش مهمی دارد.

با این حال، بهینه‌سازی سنتی الگوی کشت محصولات کشاورزی چه در سطوح کلان (ملی، استانی) و چه در سطوح خردتر (شهرستان، شهر و دشت) اغلب تأثیر آن بر روابط منطقه‌ای به ویژه در عرضه و تقاضای مواد غذایی را نادیده می‌گیرد (Liu et al., 2023). به عبارت بهتر در مطالعات متعددی (میرزایی و همکاران، ۱۴۰۴؛ یوسفی و نظری، ۱۳۹۸) با در نظرگیری سطح استانی، مطالعات (Karandish et al., 2020) و (علیقلی نیا و همکاران، ۱۳۹۰) با سطح ملی در ایران و مطالعات (Chouchane et al., 2020; Yu et al., 2021) در سطوح جهانی، بدون در نظرگیری مقیاس‌های کوچک‌تر تصمیم‌گیری، علی‌رغم بهینه‌سازی الگوی کشت با اهداف آبی و اقتصادی، در چهارچوب نظری مذکور ارزیابی ردپای آب، نمی‌توانند نتایج قابل اجرایی را پیشنهاد دهند. این مطالعات صرفاً سیاست‌هایی کلی برای تولید یا کاهش مصرف آب را اعلام می‌نمایند. در این مطالعات در سطوح مورد بررسی، مناطق تولید یا کاهش مصرف آب به صورت دقیق مشخص نمی‌گردند و در عین حال تفاوت پتانسیل‌های درون منطقه‌ای برای تولید نیز در نظر گرفته نشده است.

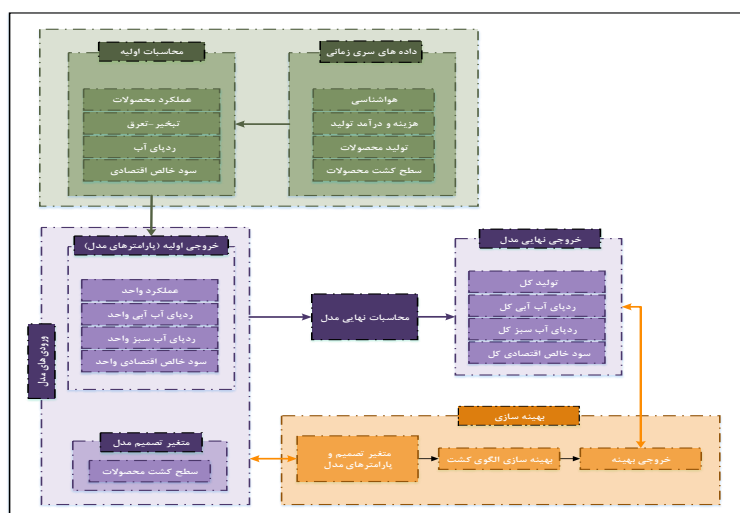
از طرفی در مطالعاتی که با استفاده از چهارچوب ارزیابی ردپای آب در سطوح خرد شهرستان، دشت یا حوضه در ایران (جعفرزاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ علیپور و همکاران، ۱۳۹۸؛ فلاحی و همکاران، ۱۳۹۲) و در جهان (Nouri et al., 2020; Zhang et al., 2022) صورت گرفته است، عدم توجه به اثرات مرتبط در خارج از منطقه مورد مطالعه، منجر به بهینه‌سازی ناقص الگوی کشت منطقه‌ای می‌گردد.

(Liu et al., 2023). به عبارت بهتر نتایج این مطالعات در سطوح خرد ممکن است منجر به کاهش تولید برخی محصولات گردد و در آن صورت بار عدم تولید این محصولات بر دوش مناطق دیگری در سطوح کلان تر خواهد افتاد؛ بدون اینکه در بهینه سازی، ارتباطی بین سطوح خرد و کلان ایجاد گردیده باشد. از سویی اساسا مفهوم ردپای آب و در کنار آن تجارت آب مجازی بر اساس ارتباط بین مناطق مختلف و چگونگی توانمندسازی مناطق کم آب برای کاهش کمبود آب در ارتباط با مناطق پر آب است (Faramarzi et al., 2010; Hoekstra et al., 2012; Antonelli et al., 2017). بنابراین، بهینه سازی الگوی کشت به ویژه اگر در چهارچوب ارزیابی ردپای آب باشد، باید هدفی که در مطالعاتی چون (عارفی نیا و احمدآلی، ۱۴۰۰؛ گلابی و همکاران، ۱۳۹۸) در ایران و (Kang et al., 2023) در جهان در نظر گرفته شده را دنبال کرده و با تعیین سطوح کشت محصولات هر شهرستان، الگوی کشت هر شهرستان را متناسب با اهداف و نیازهای استانی و پتانسیل سایر شهرستان ها تنظیم نماید.

نکات فوق الذکر و مطالعات پیشین، بر لزوم استفاده از یک چارچوب کلی برای بهینه سازی جامع الگوی کشت مبتنی بر مقیاس های همزمان منطقه ای و استانی در کنار استفاده از مفهوم ارزیابی ردپای آب با گام مکانی خرد برای تعیین میزان مصرف آب و پایداری منابع آب در الگوی کشت تاکید دارند. بنابراین این مطالعه به بهینه سازی الگوی کشت با رویکرد فوق در استان مرکزی می پردازد. منطقه ای که علی رغم بحران های آبی و مشکلاتی مانند افت سطح آب های زیرزمینی، روش های آبیاری ناکارآمد، و کشت محصولات پرمصرف (Sharifi et al., 2021) تاکنون مطالعه گسترده ای با چهارچوب ذکر شده، در آن انجام نشده است. این پژوهش با تمرکز بر تحلیل همزمان ۱۲ شهرستان استان مرکزی و با فرض این استان به عنوان یک واحد خودکفا، با ارائه رویکرد مذکور، برخلاف عمده مطالعات متداول چون (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۲) که هر منطقه را به صورت جداگانه بررسی می کنند، الگوی کشت را در مقیاس شهرستانی بهینه کرده و هر شهرستان را به عنوان بخشی از یک سیستم یکپارچه استانی در نظر می گیرد. از سویی نتایج مطالعه (کاراندیش، ۱۳۹۹) نشان می دهد که حتی در چهارچوب ارزیابی ردپای آب نیز در نظرگیری گام های مکانی خردتر ضروری است. بنابراین در این مطالعه با بهره گیری از ارزیابی کامل ردپای آب، مصرف آب در مقیاس خرد شهرستانی محاسبه و پایداری آن نیز ارزیابی شده است. این تحلیل کل نگر خلأهای موجود را پر کرده و راهکاری جامع برای مدیریت تقاضای آب در کشاورزی ارائه می دهد.

روش شناسی پژوهش

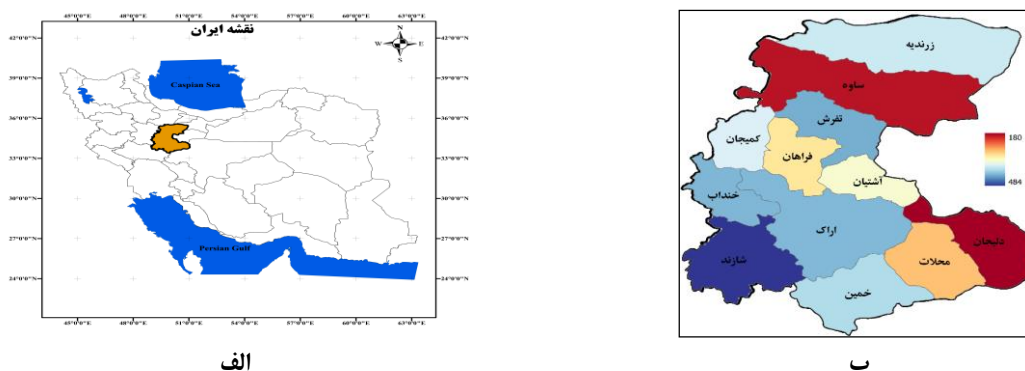
در این تحقیق یک مدل بهینه سازی با هدف بهینه نمودن الگوی کشت تهیه شد. روندنمای مدل در شکل ۱ نمایش داده شده است. مدل در بخش اولیه با دریافت ورودی ها، محاسباتی را انجام داده و خروجی ها از جمله ضرایب فنی بهینه سازی شامل عملکرد، ردپای آب و سود خالص اقتصادی (پارامترهای مدل) را اعلام می نماید. در انتهای خروجی ها، توابع وضع موجود (آبی و اقتصادی) که نشان دهنده وضعیت فعلی الگوی کشت هستند وجود دارد. پس از محاسبات در بخش اولیه، بهینه سازی با در نظرگیری اهداف آبی و اقتصادی و لحاظ نمودن قیودی چون امنیت غذایی و پایداری منابع آب انجام می شود. در نهایت وضعیت بهینه الگوی کشت و برآورده شدن اهداف و ارضای قیود بررسی می گردد. همچنین می توان نقش متغیر تصمیم در بهبود وضعیت نسبت به شرایط فعلی را بررسی نمود.



شکل ۱. روندنمای مدل در بهینه سازی الگوی کشت

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه در استان مرکزی با موقعیت جغرافیایی از ۳۳ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی تا ۳۵ درجه شمالی و از ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی تا ۵۱ درجه شرقی انجام شد (شکل ۲). استان مرکزی شامل ۱۲ شهرستان است و طبق دسته‌بندی دومارتن دارای اقلیم نیمه‌خشک (SCI, 2024) و دارای میانگین بارش سالانه بلندمدت ۲۷۷ میلی‌متر است (IRIMO, 2024). این استان حدود ۲ درصد از منابع آبی تجدیدپذیر کشور (IWRM, 2024)، ۲ درصد از اراضی کشت شده و حدود ۳ درصد تولیدات کشاورزی ایران را شامل می‌شود و کشاورزی فاریاب تقریباً ۸۵ درصد تولیدات زراعی را تشکیل می‌دهد (IMAJ, 2024). مدیریت منابع آب در این منطقه با چالش‌هایی مانند محدودیت دسترسی به آب و ناکارآمدی مصرف در کشاورزی رو به رو است. پیش‌بینی می‌شود تغییرات اقلیمی نیز این چالش‌ها را تشدید کند و موجب کاهش بیشتر منابع آبی و افزایش شدت رویدادهای جوی گردد (IMAJ, 2024; Madani et al., 2016; Soltani et al., 2023).



شکل ۲. موقعیت استان مرکزی (الف) و وضعیت بارندگی بلندمدت شهرستان‌های استان مرکزی (ب) (میلی‌متر)

داده‌های مورد استفاده

این مطالعه بر ۱۸ محصول کشاورزی در ۱۲ شهرستان استان مرکزی تمرکز دارد. محصولات ارزیابی‌شده شامل غلات (گندم، جو و ذرت)، حبوبات (نخود، عدس و لوبیا)، محصولات صنعتی (پنبه، چغندر، آفتابگردان و کلزا)، سبزیجات (سیب‌زمینی، پیاز و گوجه‌فرنگی)، محصولات جالیزی (هندوانه و خیار) و علوفه‌ای (یونجه، شبدر و ذرت علوفه‌ای) هستند. محصولات انتخاب شده به طور میانگین (۱۰ ساله) به ترتیب حدود ۹۵ و ۱۰۰ درصد از کل سطح فاریاب و دیم استان را دربر گرفته‌اند (IMAJ, 2024). داده‌های سطح زیر کشت و تولید محصولات فاریاب و دیم و همچنین اطلاعات اقتصادی از داده‌های هزینه و درآمد تولید کشاورزی، به تفکیک دسته‌های بذر، کود، سموم، آب، زمین، ماشین‌آلات و نیروی کارگری از (IMAJ, 2024) به دست آمده است. داده‌های هواشناسی شامل بارندگی، دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد نیز از (IRIMO, 2024) و داده‌های میزان منابع آب تجدیدپذیر از (IWRM, 2024) اخذ شده است. کل دوره زمانی داده‌ها سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲ را پوشش می‌دهند. مقیاس زمانی و مکانی در داده‌های کشاورزی، اقتصادی و منابع آب، سالانه و شهرستانی است و در داده‌های هواشناسی روزانه و ایستگاهی است (داده‌های هر ایستگاه در سطح شهرستان، تجمع شده‌اند). همچنین با توجه به مقیاس زمانی داده‌ها، در محاسبات و بهینه‌سازی از مقادیر حداقل، حداکثر و یا میانگین ۱۰ ساله داده‌ها استفاده شده است. اینکار به منظور حذف اثر نوسانات کوتاه‌مدت یا تغییرات موقتی در الگوهای زراعی است تا مقادیر محاسبه‌شده بازتابی از وضعیت واقعی و بالقوه مناطق باشد و نه یک سال خاص. همچنین داده‌های اقتصادی هزینه و درآمد تولید هر سال با توجه به نرخ تورم اعلامی از سوی بانک مرکزی، به سال پایه ۱۴۰۲ تبدیل شده است.

محاسبات ردپای آب

تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) و تبخیر و تعرق محصول (ET_c) با استفاده از مدل CROPWAT 8.0 برآورد شدند. پس از محاسبه ET_0 با استفاده از ضرایب گیاهی و مراحل رشد تدقیق شده سامانه نیاز آبی کشور (ET_c (SWRI, 2024) تعیین شد. در محاسبه بارش مؤثر (P_{eff})

از روش^۱ USDA که به صورت پیش فرض در نرم افزار CROPWAT برای محاسبه بارش مؤثر است، استفاده شد. انتخاب روش USDA مطابق با پیشنهادها و دستورالعمل‌های (Smith, 1992; Hoekstra et al., 2012) در استفاده از CROPWAT در محاسبه ردپای آب است. P_{eff} در محاسبه تبخیر و تعرق سبز (ET_{Green}) و تبخیر و تعرق آبی (ET_{Blue}) به کار می‌رود که بر اساس دستورالعمل منتشر شده در (Hoekstra et al., 2012) این مقادیر محاسبه می‌شود. بر این اساس زمانی که P_{eff} (mm/day) از ET_C (mm/day) بیشتر باشد، فرض می‌شود که نیاز آبی محصول کاملاً توسط بارش تأمین می‌شود. بنابراین، تبخیر و تعرق به عنوان آب سبز (GW) خواهد بود. زمانی که P_{eff} کمتر از ET_C باشد، محصول برای تأمین نیاز آبی خود به آبیاری نیاز دارد. آب تأمین شده توسط آبیاری به عنوان آب آبی (BW) در نظر گرفته می‌شود. معادله ۱ و ۲ برای تعیین ET_{Green} و ET_{Blue} (mm/day) است (Hoekstra et al., 2012):

$$ET_{Green} = \min(ET_C, P_{eff}) \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$ET_{Blue} = \max(0, ET_C - P_{eff}) \quad (\text{رابطه ۲})$$

برای محصولات دیم، تنها ET_{Green} در نظر گرفته می‌شود. تفکیک تبخیر و تعرق به اجزای سبز و آبی توسط این معادلات برای درک سهم بارش و آبیاری در تأمین نیاز آبی محصول ضروری است. مصرف کل آب آبی (CWU_{Blue}) و مصرف کل آب سبز (CWU_{Green}) برای هر محصول با تجمیع مقادیر ET_{Green} و ET_{Blue} در طول کل فصل رشد محصول (lgp) از طریق معادلات ۳ و ۴ به دست می‌آید (Hoekstra et al., 2012):

$$CWU_{Blue} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{Blue} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$CWU_{Green} = 10 \times \sum_{d=1}^{lgp} ET_{Green} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آنها عدد ۱۰ برای تبدیل مقادیر تبخیر و تعرق از mm/day به m^3/ha برای مقادیر CWU_{Blue} و CWU_{Green} هر محصول استفاده شده است. لازم به ذکر است که برای محصولات دیم، CWU_{Blue} برابر با صفر است.

ردپای آب آبی واحد (BWF_U) و سبز واحد (GWF_U) به حجم BW و GW مصرفی در فرآیند تولید محصولات کشاورزی در اراضی فاریاب و دیم اشاره دارند (Ababaei and Etedali, 2017; Zhang et al., 2021). به این معنی که BW تبخیر شده، به محصول وارد شده، یا به حوضه آبریز دیگر یا دریا بازگشته و دیگر برای استفاده مجدد در همان حوزه آبریز در دسترس نیست و یا باران مؤثر است که در خاک ذخیره شده و سپس توسط محصول تبخیر می‌شود (ET_C) یا تولید محصول برداشت شده مشارکت می‌کند (Zhao et al., 2015). BWF_U نمایانگر آب آبیاری مصرفی در اراضی فاریاب و GWF_U بیانگر آب باران مصرفی در اراضی فاریاب و دیم توسط محصولات است (Hoekstra, 2017). BWF_U و GWF_U براساس مقادیر CWU_{Blue} و CWU_{Green} و عملکرد محصولات (Y) از روابط ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند (Hoekstra et al., 2012). در نظریه عملکرد در این محاسبات برای ارزیابی میزان آب مورد نیاز در تولید هر واحد محصول و درک بهتر از مصرف آب در ارتباط با تولید سیستم‌های کشاورزی است. مقادیر عملکرد از حاصل تقسیم تولید بر سطح کشت هر محصول قابل محاسبه است.

$$GWF_U = \frac{CWU_{Green}}{Y} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$BWF_U = \frac{CWU_{Blue}}{Y} \quad (\text{رابطه ۶})$$

که در معادلات ۵ و ۶، Y برحسب kg/ha و BWF_U و GWF_U برحسب m^3/kg بیان می‌شوند. همچنین مقادیر ردپای آب آبی کل

1. United States Department of Agriculture
2. Green Evapotranspiration
3. Blue Evapotranspiration
4. Green Water
5. Blue Water
6. Blue Crop Water Use
7. Green Crop Water Use
8. Length of Growth Period
9. Unit Blue Water Footprint
10. Unit Green Water Footprint
11. Yield

(BWF) و ردپای آب سبز کل (GWF) که نشان از کل حجم آب مصرفی آبی و سبز محصولات بر حسب m^3 دارند، با توجه به مقادیر کل تولید هر محصول P^3 (kg) از رابطه ۷ و ۸ مطابق با (Ababaei and Etedali, 2017) به دست می‌آیند:

$$BWF = BWF_U \times P \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$GWF = GWF_U \times P \quad (\text{رابطه ۸})$$

محاسبات پایداری ردپای آب - شاخص کمبود آب آبی

محاسبه ردپای آب علی رغم بینش مفید در مورد مصرف منابع آب، به تنهایی فشار وارده به منابع آب و اثرات تغییرات در دسترسی به آب را به طور کامل منعکس نمی‌کند. بنابراین با استفاده از شاخص‌های کمبود آب، می‌توان ارزیابی بهتری از سطح فشار بر منابع آبی و وضعیت ناپایداری منابع آب آبی داشت. از جمله می‌توان به شاخص کمبود آب آبی (BWS) اشاره کرد. BWS تعادل یا نسبت بین مصرف آب آبی و دسترسی یا موجودیت آب آبی (BWA) را منعطف می‌کند (Veettil and Mishra, 2018; Liang et al., 2020). از آنجایی که این شاخص به طور مطلق مقادیر ردپای آب پایدار و ناپایدار را تعیین می‌کند، در تحلیل‌های مربوط به بحران آب آبی از مزیت بیشتری نسبت به سایر شاخص‌ها برخوردار است (Hoekstra, 2016). BWS بدون بعد و بزرگ‌تر از صفر است. بر اساس طبقه‌بندی مکونن و هوکسترا که اگر بین صفر تا یک باشد، نشان از پایداری و عدم کمبود آب است. مقادیر بیش از یک نشان از تعدی به نیازهای زیست محیطی، ناپایداری و بحرانی بودن استفاده از منابع آب است. لذا به ازای $1/5 < BWS < 1$ کمبود اندک آب، به ازای $2 < BWS < 1/5$ کمبود متوسط آب و به ازای $BWS > 2$ کمبود شدید آب وجود خواهد داشت (Mekonnen and Hoekstra, 2016). محاسبات این شاخص شامل هر دو عامل تولید آب و ذخیره آب زیرزمینی و سطحی است و مناطق بحرانی را شناسایی می‌کند (Liang et al., 2020). محاسبه BWS طبق رابطه ۹ است (Hoekstra et al., 2012):

$$BWS_{jt} = \frac{\sum_{i=1}^{18} BWF_{ijt}}{BWA_{jt}} \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن i ، j و t به ترتیب نمایانگر محصول، شهرستان و دوره زمانی هستند. BWA بر اساس رواناب واقعی حوضه (R_{nat}) و نیاز جریان زیست‌محیطی (EFR) که نمایانگر حداقل جریان ضروری برای حفظ سلامت اکوسیستم‌های آبی است، در هر منطقه تعیین می‌شود. چون برداشت بیش از حد آب آبی می‌تواند به آسیب‌های زیست‌محیطی منجر شود، برای حفظ یکپارچگی زیست‌محیطی، EFR به عنوان ۸۰ درصد از کل رواناب واقعی سالانه حوضه مطابق با نظر (Hoekstra et al., 2012; Liang et al., 2020; Nouri et al., 2020) تعریف می‌شود. لذا استخراج بیش از ۲۰ درصد از منابع آب آبی می‌تواند باعث تخریب محیط زیست شود. در این شرایط داریم:

$$EFR_{jt} = 0.8 R_{nat-jt} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$BWA_{jt} = R_{nat-jt} - EFR_{jt} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

سود خالص اقتصادی

در نظریه سود خالص اقتصادی (NB) این امکان را فراهم می‌سازد که علاوه بر کاهش مصرف آب و ارتقای پایداری منابع، منافع اقتصادی کشاورزان نیز حفظ شود و از وارد شدن آسیب اقتصادی به آن‌ها جلوگیری گردد. این شاخص از تفاضل درآمد حاصل از فروش محصولات (B_{ij} Rial/ha) و هزینه‌های تولید آن‌ها (C_{ij} Rial/ha) در هر سال زراعی از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$NB_{ij} = B_{ij} - C_{ij} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

1. Blue Water Footprint
2. Green Water Footprint
3. Production
4. Blue Water Availability
5. Natural Run-Off
6. Environmental Flow Requirement
7. Net Benefit
8. Benefit
9. Cost

بهینه‌سازی

متغیر تصمیم و فرضیات

بهینه‌سازی الگوی کشت که به منظور تعیین سطح بهینه کشت برای هر محصول در هر شهرستان انجام می‌شود. به طوری که در چارچوب منابع موجود (مانند آب، زمین، نیروی کار و سرمایه)، اهداف از پیش تعیین شده آبی، اقتصادی و... برآورده شوند؛ لذا برای هر محصول و در هر واحد مکانی (مانند شهرستان) و زمانی (سال زراعی)، سطح کشت محصولات مختلف i در هر شهرستان j (A_{ij}) به تفکیک نوع کشت (دیم و فاریاب) برحسب ha متغیر تصمیم هستند. به منظور مدل‌سازی این متغیرها، کدینگ پاسخ، یک ماتریس تصمیم با ابعاد ۱۸×۲۴ است. سطرها (۱۸) نمایانگر محصولات زراعی و هر ۱۲ ستون به ترتیب نشانگر شهرستان‌ها به صورت فاریاب یا دیم هستند.

در پژوهش حاضر تعیین سطح کشت مناسب محصولات در هر شهرستان استان مرکزی با فرضیاتی حاکم است. همچون ۱. توسعه اراضی فاریاب یا دیم چه از نظر میزان سطح کشت و چه از نظر تبدیل اراضی فاریاب به دیم یا برعکس صورت نگیرد. ۲. ترکیب کشت در هر منطقه تغییر نکند؛ به این معنی که هیچ محصولی از کشت خارج نشود و همواره سطوح حداقلی برای هر محصولی که در حال حاضر کشت می‌شود، در نظر گرفته شود. ۳. در کنار فرض ۲، فرض می‌شود که هیچ گونه کشت محصولات جدید در مناطق صورت نگیرد. همچنین بهینه‌سازی تابعی، چندهدفی، ایستا، مقید، پیوسته، چندهدفه و فراابتکاری انجام شد.

توابع هدف

تابع (توابع) هدف معیاری عددی است که هدف یک مسئله را به صورت کمینه‌سازی یا بیشینه‌سازی تعریف می‌کند. این پژوهش دو هدف اصلی را به صورت هم‌زمان بررسی می‌کند: پایداری منابع آب و توجیه اقتصادی. این بهینه‌سازی چندهدفه مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه (نقاط بهینه پارتو) را ارائه می‌دهد که هر یک تعادلی متفاوت بین اهداف برقرار می‌کنند و به تصمیم‌گیرندگان امکان می‌دهد تا با توجه به اولویت‌ها و شرایط محلی، مناسب‌ترین گزینه را انتخاب کنند.

تابع هدف اول، کاهش نسبت حجم آب آبی به حجم آب سبز را مدنظر دارد. افزایش سهم آب سبز (منابع آب کمتر تحت فشار)، کاهش حجم آب آبی (منابع آب کمیاب و به شدت تحت فشار) و به عبارتی کاهش نسبت مذکور در تأمین نیاز آبی محصولات، به معنای بهره‌برداری پایدارتر از منابع آب، کشاورزی مقاوم‌تر در برابر تغییرات اقلیمی و بازگرداندن تعادل به سیستم آبی است؛ بنابراین با در نظرگیری BWF و GWF در اراضی فاریاب (IRR) و دیم (RF)، تابع هدف اول به صورت کمینه‌سازی حجم آب آبی به حجم آب سبز کل در استان مرکزی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$Z_1 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{18} BWF_{ij}}{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{18} GWF_{ij-IRR} + \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{18} GWF_{ij-RF}} \right) \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

اما سود اقتصادی، عامل کلیدی تصمیم‌گیری کشاورزان، تعیین‌کننده پایداری اقتصادی طرح‌های پیشنهادی و ضامن پذیرش اجتماعی طرح‌های جدید است؛ لذا تابع هدف دوم به سود خالص اقتصادی می‌پردازد تا علاوه بر بهبود بهره‌برداری از منابع آب، از کاهش سود اقتصادی نیز جلوگیری شود و به دنبال بهبود آن نیز باشد. برای هم‌راستا شدن جهت دو تابع هدف در مدل بهینه‌سازی (تبدیل هر دو به فرم کمینه‌سازی)، سود خالص اقتصادی محصولات فاریاب و دیم در کل استان مرکزی به صورت معکوس و باتوجه به مقادیر سطح کشت محصولات فاریاب و دیم (A_{ij}) طبق رابطه ۱۴ مدل‌سازی شده است:

$$Z_2 = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{18} (NB_{ij-IRR} \times A_{ij-IRR}) + \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^{18} (NB_{ij-RF} \times A_{ij-RF})} \right) \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

قیود

در فرایند بهینه‌سازی تعیین قیود برای اطمینان از تطابق مدل با واقعیت‌های عملی ضروری است. نخستین دسته از قیود بر روی کل سطح کشت در هر شهرستان اعمال می‌شود تا از تجاوز از ظرفیت‌های واقعی اراضی قابل کشت جلوگیری شود. به عبارتی در هر یک از ۱۲

شهرستان زمین‌های کشاورزی به طور طبیعی محدود هستند و نمی‌توان سطح کشت را فراتر از مقدار واقعی آن افزایش داد. این محدودیت‌ها به‌صورت جریمه و بر اساس حداکثر سطح کشت ثبت‌شده در بازه ده‌ساله گذشته برای هر شهرستان طبق روابط ۱۵ و ۱۶ تعریف شده‌اند.

$$\sum_{i=1}^{18} A_{ij-IRR} \leq a_{j-IRR} \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$\sum_{i=1}^{18} A_{ij-RF} \leq a_{j-RF} \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

که در آن A_{ij} سطح کشت محصول i در شهرستان j (ha) است و a_j حداکثر کل سطح کشت ۱۰ ساله موجود در شهرستان j (ha) است. با توجه به اهمیت تأمین امنیت غذایی، دسته دوم قیود به الزام تأمین حداقل تولید برای هر یک از محصولات زراعی مربوط است. مدل موظف است برای هر یک از ۱۸ محصول موردبررسی، تولید کمتر از مقدار معین نداشته باشد. این مقدار برای هر محصول، میانگین کل تولید آن در استان مرکزی طی ده سال گذشته در نظر گرفته شده و شامل مجموع تولید فاریاب و دیم آن محصول در سطح تمام شهرستان‌هاست.

$$\sum_{j=1}^{12} P_{ij-IRR} + \sum_{j=1}^{12} P_{ij-RF} \geq p_{i-IRR} + p_{i-RF} \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

که در آن P_{ij} تولید محصول i در شهرستان j (kg) است و p_i میانگین تولید ۱۰ ساله محصول i در کل شهرستان‌ها (kg) است. سومین دسته از قیود، به مصرف آب آبی در هر شهرستان اختصاص دارد. اگرچه تابع هدف مدل به‌گونه‌ای طراحی شده که نسبت کل حجم آب آبی به آب سبز در سطح استان را کاهش دهد، اما بدون محدودیت‌های محلی ممکن است الگوریتم، به‌منظور بهبود هدف در مقیاس کلی، باعث افزایش مصرف آب آبی در برخی شهرستان‌ها شود. چنین رفتاری، هرچند ممکن است در سطح استان مفید به نظر برسد، اما می‌تواند منجر به افزایش آسیب‌پذیری و ناپایداری منابع آب در برخی شهرستان‌ها شده و شاخص پایداری BWS را به طور چشمگیری افزایش دهد. از این‌رو برای هر شهرستان، حداکثر مقداری برای مصرف آب آبی تعریف شده که برابر با حداکثر حجم برداشت مجاز برای مصرف پایدار در آن منطقه است. این مقدار، همان BWA است و تجاوز از آن به منزله ورود به وضعیت ناپایدار است. بدین ترتیب، مدل ضمن تلاش برای بهبود وضعیت کلی منابع آب در استان، از افزایش ناپایداری در مناطق آسیب‌پذیر جلوگیری می‌کند. همچنین این نوع قید ظرفیت، انعطاف لازم را ایجاد می‌کند تا در شرایط خاص، اگر افزایش محدود در مصرف آب یک شهرستان بتواند منجر به کاهش چشمگیر مصرف در دیگر شهرستان‌ها شود، مدل این امکان را به‌صورت مشروط فراهم کند؛ مشروط بر اینکه پایداری محلی حفظ شود. این قید برای هر شهرستان به‌صورت زیر است:

$$\sum_{i=1}^{18} BWF_{ij} \leq BWA_j \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

الگوریتم بهینه‌سازی، پارامترهای الگوریتم و پیاده‌سازی

برای حل مسئله بهینه‌سازی الگوی کشت با اهداف چندگانه و متضاد مذکور، از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک چندهدفه با مرتب‌سازی نامغلوب (NSGA II) استفاده شد. این الگوریتم بر پایه اصول تکامل طبیعی و با تولید جمعیتی از راه‌حل‌ها، جستجوی هم‌زمان در فضای تصمیم را امکان‌پذیر می‌سازد و از به دام افتادن در بهینه‌های محلی اجتناب می‌نماید (Deb et al., 2000).

در اجرای الگوریتم NSGA-II، تعداد نسل‌ها ۱۵۰۰، اندازه جمعیت برابر ۱۰۰، نرخ تقاطع ۰/۷، نرخ اعمال جهش ۰/۴ و نرخ تاثیر جهش ۰/۰۲، روش انتخاب بر پایه تورنمنت دو نفره، نوع تقاطع از نوع یکنواخت یا چندقطه‌ای، و نوع جهش به‌صورت یکنواخت در نظر گرفته شد. تنظیم این مقادیر به‌صورت تجربی و پس از آزمون‌های اولیه انتخاب شده است تا توازن مناسبی میان دقت، سرعت همگرایی، و تنوع راه‌حل‌های نهایی برقرار گردد. کد الگوریتم در محیط MATLAB پیاده‌سازی شد.

اجرای بهینه‌سازی

در فرایند بهینه‌سازی الگوی کشت، علاوه بر محدودیت‌های مذکور در بخش‌های قبل، بخشی از محدودیت‌ها به‌صورت مستقیم بر روی متغیرهای تصمیم به‌عنوان قیود ساختاری تعریف می‌شوند. این قیود محدوده مجاز متغیرهای تصمیم را تعیین می‌کنند و از تولید نتایج غیرواقعی یا نامعتبر جلوگیری می‌نمایند. فرم کلی برخورد ساختاری برای تمامی متغیرهای تصمیم (DV) به‌صورت رابطه ۱۹ است:

$$DV = DV_{\min} + \hat{x} \cdot (DV_{\max} - DV_{\min}) \quad (\text{رابطه ۱۹})$$

که $DV_{\min}^1$ ، $DV_{\max}^2$ و $\hat{x}$ به ترتیب حد کمینه و بیشینه هر یک از متغیرهای تصمیم و پاسخ خام الگوریتم هستند. به عبارت بهتر مقادیر متغیرهای تصمیم در بازه‌هایی بین $DV_{\min}$ و $DV_{\max}$ قرار خواهند داشت. $DV_{\max}$ و $DV_{\min}$ بر اساس داده‌های تاریخی یعنی به ترتیب حداقل و حداکثر سطح کشت هر محصول در هر شهرستان در ۱۰ ساله گذشته تعریف شده‌اند.

به‌منظور بررسی اثرگذاری این قیود بر نتایج بهینه‌سازی و به عبارت بهتر تحلیل میزان انعطاف‌پذیری موردنیاز برای ایجاد تغییر در ساختار فعلی کشت، درصد تغییرات متفاوت روی مقادیر $DV_{\min}$ و $DV_{\max}$ به‌عنوان سناریویی مجزا اعمال شد. در مجموع، شش سناریو در نظر گرفته شد که در آن‌ها مقادیر $DV_{\max}$ به ترتیب ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درصد نسبت به مقدار فعلی افزایش یافتند (جدول ۱). همچنین برای $DV_{\min}$ نیز سه سطح ۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد کاهش از مقادیر فعلی اعمال شد (جدول ۱). با ذکر این نکته که برای حفظ حداقل سطح کشت و جلوگیری از حذف کامل یک محصول، مقادیر بیشتر از ۷۵ درصد کاهش حداقل متغیر تصمیم لحاظ نشدند.

جدول ۱. درصد تغییرات حد بالا و پایین متغیر تصمیم در سناریوها ۶ گانه

سناریو ۱	سناریو ۲	سناریو ۳	سناریو ۴	سناریو ۵	سناریو ۶
۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰
درصد تغییرات $DV_{\max}$ (افزایش نسبت به حداکثر ۱۰ ساله)					
۲۵	۵۰	۷۵	۷۵	۷۵	۷۵
درصد تغییرات $DV_{\min}$ (کاهش نسبت به حداقل ۱۰ ساله)					

در طراحی سناریوهای بهینه‌سازی، بازه تغییرات به‌ویژه برای حد بالای سطح زیر کشت از ۲۵ تا ۴۰۰ درصد برای بررسی تأثیر تغییرات محدود و گسترده بوده است. سناریوهای کم‌تغییر (۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد) برای تحلیل شرایط محافظه‌کارانه طراحی شدند؛ اما نتایج اولیه و پیش اجراها ضرورت سناریوهای با تغییرات وسیع‌تر (۲۰۰ تا ۴۰۰ درصد) را نشان داد تا امکان بررسی اثرات آزادی عمل الگوریتم در انتخاب سطح کشت و اثرات تغییرات ساختاری در الگوی کشت فراهم شود؛ بنابراین، سناریوهای با تغییرات ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ درصد نیز اعمال گردید تا مقایسه نتایج این سناریوها نشان دهد که تحقق اهداف مذکور در بهینه‌سازی تا چه حد مستلزم تغییرات بنیادین در ساختار الگوی کشت فعلی است و امکان ارزیابی تاب‌آوری الگوی کشت به تغییرات بنیادی فراهم آید. همچنین، برای محصولاتی که $DV_{\min}$ و $DV_{\max}$ اولیه آن‌ها حتی در حداکثر مقدار ده‌ساله خود، بسیار کم است (مانند نخود، عدس، چغندر و برخی دیگر)، انتخاب متغیرهای تصمیم بر اساس مقادیر اولیه می‌توانست مانع تغییرات مؤثر، گسترده و شناسایی نقش بالقوه این محصولات شود؛ بنابراین افزایش سقف تغییرات تا ۴۰۰ درصد به‌منظور انعطاف‌پذیری بیشتر و امکان تغییرات بنیادین در الگوی کشت در نظر گرفته شد.

شایان‌ذکر است که سناریوهای فوق برای محصولات فاریاب و دیم به‌صورت هم‌زمان و مشابه اعمال شده‌اند. همچنین باتوجه‌به بهینه‌سازی چندهدفه و وجود جبهه پارتو پاسخ‌های بهینه، دو پاسخ حدی از جبهه پارتو، یعنی بهینه آبی (بهینه‌ترین پاسخ از منظر تابع هدف اول) و بهینه اقتصادی (بهینه‌ترین پاسخ از منظر تابع هدف دوم) بررسی می‌گردد؛ لذا سناریوها با نام S_{xy} بررسی می‌شود که x نشان از شماره سناریو (۱ تا ۶) و y نشان از نوع جواب بهینه آبی و اقتصادی (۱: جواب بهینه اقتصادی ۲: جواب بهینه آبی) دارد. لذا نتایج بررسی شده شامل S_{11} ، S_{12} ، S_{21} ، S_{22} ، S_{31} ، S_{32} ، S_{41} ، S_{42} ، S_{51} ، S_{52} ، S_{61} و S_{62} خواهد بود.

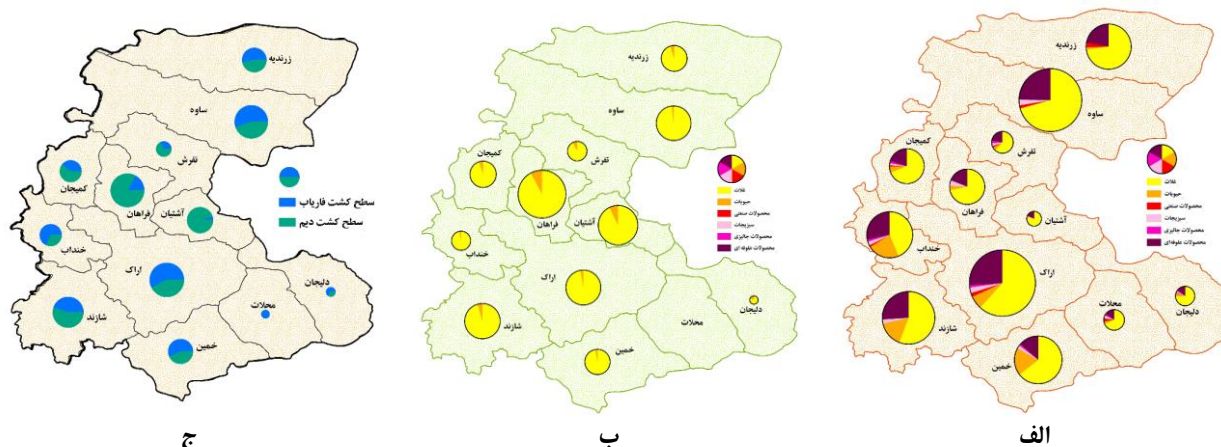
یافته‌های پژوهشی و بحث

وضعیت اولیه

سطح کشت

نتایج تحلیل اولیه سطح زیر کشت محصولات در استان مرکزی به تفکیک شهرستان و نوع کشت (فاریاب و دیم) در شکل‌های ۳-الف و ۳-ب ارائه شده است. شهرستان‌های اراک و آشتیان به ترتیب بیشترین و کمترین سطح کشت فاریاب را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین

شهرستان‌های فراهان و محلات به‌ترتیب بیشترین و کمترین سطح زیر کشت دیم را به خود اختصاص داده‌اند. ترکیب این نتایج نشان می‌دهد که شهرستان آشتیان با وجود سهم اندک از اراضی فاریاب، دارای سهم زیادی از کشت دیم است؛ مسئله‌ای که می‌تواند بیانگر اتکای بیشتر کشاورزی این منطقه به بارندگی‌های سالانه باشد.



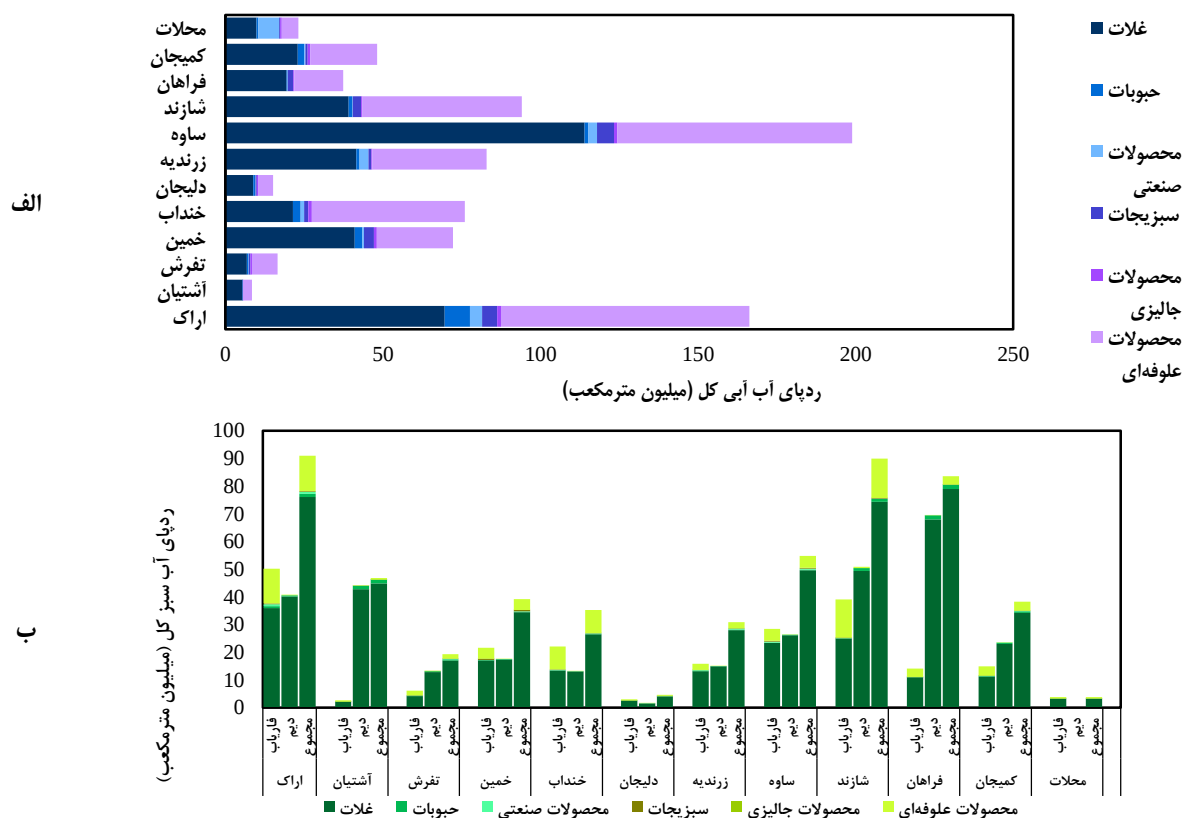
شکل ۳. سطح کشت فاریاب (الف) سطح کشت دیم (ب) به تفکیک دسته محصولات و درصد مشارکت سطح کشت فاریاب و دیم در هر شهرستان (ج)

تحلیل درصد مشارکت دسته محصولات در سطح زیر کشت فاریاب نشان می‌دهد که بیشترین سهم مربوط به غلات (به‌ویژه گندم و جو) و محصولات علوفه‌ای (به‌ویژه یونجه) است. همچنین سهم حبوبات در شهرستان‌های غربی و جنوبی استان نسبت به مناطق شمالی و شرقی بالاتر است. سایر دسته محصولات در بیشتر شهرستان‌ها سهم نسبتاً ناچیزی دارند. در اراضی دیم، تنها هفت محصول شامل گندم، جو، نخود، عدس، آفتاب‌گردان روغنی، هندوانه و یونجه کشت می‌شوند که از میان آن‌ها، غلات و حبوبات دارای بیشترین سطح زیر کشت هستند. در شکل ۳-ج، درصد مشارکت اراضی فاریاب و دیم از کل سطح زیر کشت هر شهرستان نشان داده شده است. طبق این شکل، شهرستان‌های آشتیان، فراهان و تفرش به‌ترتیب بیشترین نسبت کشت دیم به کل سطح زیر کشت را در استان دارند.

ردپای آب کل

از بررسی اولیه مقادیر BWF و GWF برای الگوی کشت فعلی برمی‌آید که رابطه مستقیمی بین سطح کشت فاریاب و دیم هر شهرستان با میزان BWF و GWF وجود دارد. شهرستان‌های ساوه، اراک و شازند به‌ترتیب دارای بیشترین و شهرستان‌های آشتیان، تفرش و دیجان دارای کمترین BWF هستند (شکل ۴-الف) که این تفاوت‌ها با سطح کشت فاریاب شهرستان‌های مذکور در شکل ۳-الف هم‌راستا است. همچنین همانند BWF، در مورد GWF نیز روند مشابهی وجود دارد. شهرستان‌هایی با سطح زیر کشت بیشتر چه فاریاب (اراک، ساوه و شازند - شکل ۳-الف) و چه دیم (فراهان، آشتیان و شازند - شکل ۳-ب)، مقادیر بیشتری از GWF را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴-ب).

بالاین‌حال، در برخی موارد این رابطه مستقیم میان سطح کشت و مقدار BWF و GWF مشاهده نمی‌شود. در خصوص BWF به‌عنوان نمونه، علی‌رغم بیشتر بودن سطح کشت فاریاب در شهرستان‌های اراک، خنداب و فراهان به ترتیب نسبت به ساوه، زرنديه و کمیجان (شکل ۳-الف)، BWF در اراک، خنداب و فراهان کمتر است (شکل ۴-الف). این اختلافات عمدتاً ناشی از تفاوت در ترکیب محصولات کشت‌شده در این شهرستان‌هاست. در ساوه محصولات آب‌بر چون غلات (مانند گندم و جو) و محصولات علوفه‌ای با BWF_U زیاد نسبت به اراک غالب است (شکل ۳-الف و ۴-الف). در زرنديه غلات سهم بیشتری در ترکیب الگوی کشت دارند. درحالی‌که حبوبات با BWF_U کم در خنداب غالب هستند (شکل ۳-الف). همچنین کمیجان سهم بیشتری به محصولات جالیزی با BWF_U زیاد اختصاص داده است درحالی‌که در فراهان سیب‌زمینی و حبوبات با مصرف کمتر آب غالب هستند (شکل ۳-الف).



شکل ۴. درصد مشارکت دسته محصولات هر شهرستان در BWF (الف) و GWF (ب)

به طور کل تفاوت در نوع محصولات کشت شده در هر منطقه و به تبع آن تفاوت در مقادیر BWF_U ، نقش تعیین کننده‌ای در میزان نهایی BWF دارد. در مجموع، دو عامل اساسی در تعیین مقدار BWF هر شهرستان نقش دارند: نخست، سطح زیر کشت فاریاب و دوم، نوع محصول کشت شده و مقدار BWF_U مربوط به آن که تحت تأثیر عملکرد زراعی و نیاز تبخیر و تعرق است.

بر خلاف BWF ، علاوه بر نوع محصول عوامل متعدد دیگری نیز در عدم تطابق میزان سطح کشت با GWF اثر دارند. یکی از عوامل، اثر نوع و فصل رشد محصولات است. به عنوان نمونه می توان به الگوی کشت استان مرکزی در محصولات دیم اشاره کرد که در آن عمدتاً گندم، جو، نخود و عدس غالب هستند (شکل ۳-ب). بنابراین سهم زیاد این محصولات در GWF دیم به دلیل تطابق زمانی فصل رشد آن‌ها (پاییز تا بهار) با فصل بارش استان قابل پیش بینی است (شکل ۴-ب). اما به دلیل تنوع محدود محصولات دیم، تأثیر نوع محصول بر مقدار GWF دیم چندان محسوس نیست. این در حالی است که با توجه به اینکه در اراضی فاریاب نیز مقدار قابل توجهی از GWF کل هر شهرستان مشاهده می شود، در اراضی فاریاب به واسطه تنوع بیشتر محصولات، این اثر نمایان تر است (شکل ۴-ب).

از سویی افزایش یا کاهش میزان بارندگی می تواند با افزایش یا کاهش GWF_U ، منجر به افزایش یا کاهش GWF نهایی در هر منطقه گردد؛ بنابراین علت GWF بیشتر در شازند نسبت به ساوه (شکل ۴-ب) را می توان در بارندگی بیشتر در شازند نسبت به ساوه (شکل ۲-ب) علی رغم سطح کشت کمتر در شازند (شکل ۳-الف) دانست. و یا عدم تفاوت قابل توجه بین GWF کميجان با ساوه و اراک با آشتيان (شکل ۴-ب) را علی رغم تفاوت قابل توجه در سطح کشت این مناطق، بیشتر بودن بارندگی در اراک و کميجان (شکل ۲-ب) بیان نمود.

علاوه بر عوامل فوق، تفاوت های مشاهده شده در مقادیر BWF و GWF میان شهرستان ها می تواند تحت تأثیر مجموعه ای از عوامل دیگری چون ویژگی های اقلیمی مانند شدت تبخیر و تعرق، مشخصات فیزیکی خاک به ویژه ظرفیت نگهداری رطوبت و اثر آن بر نیاز آبی گیاهان و عملکرد محصولات که می توانند بر میزان BWF_U و در نهایت میزان BWF اثر گذار باشند.

اما آنچه که از نتایج برمی آید اثر مستقیم و قابل توجه سطح کشت و نوع محصولات انتخابی در هر منطقه است. انتخاب محصولات با ردیای آب آبی زیاد و سطح کشت زیاد برای این محصولات در شهرستان های ساوه، شازند و اراک منجر به مصرف ناپایدار آب و انتخاب محصولات با ردیای آب در سبز بیشتر در فراهان و کميجان موجب سازگاری بیشتر با کم آبی شده است؛ بنابراین توجه محدودیت منابع آب

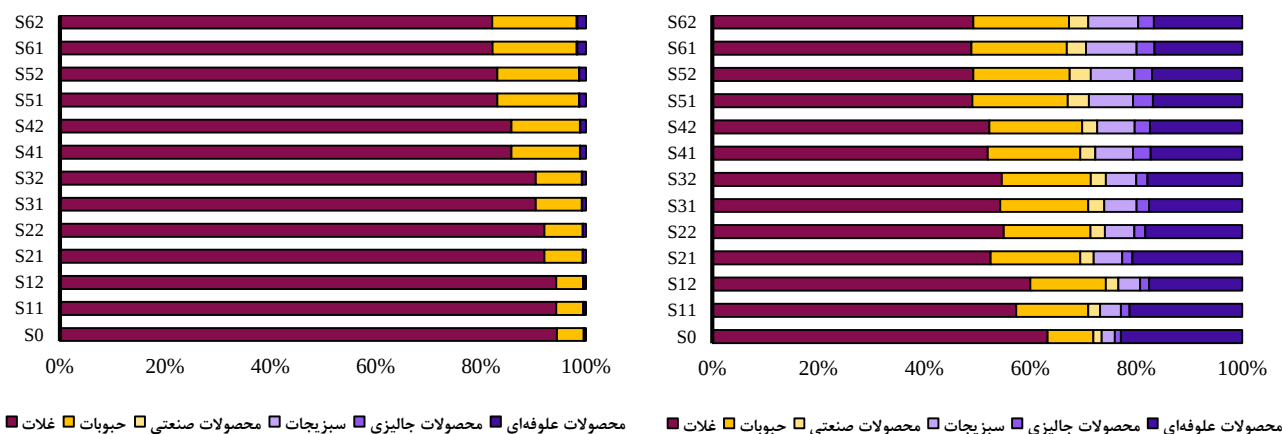
آبی و وضعیت ناپایدار الگوی کشت فعلی غیربهبوده بوده نوع محصولات و سطح کشت آن در هر منطقه از طریق الگوی کشت باید بهبود یابد. نتایج فوق مبنی بر اثرگذاری سطح کشت و تولید محصولات و نوع محصولات کشت شده به واسطه اثرگذاری در BWF با نتایج مطالعه (Karandish et al., 2021) همراستا است که در آن ارتباط تجارت آب مجازی و آب مصرفی با نوع و سطح کشت محصولات بررسی گردیده است.

وضعیت بهینه و مقایسه با وضعیت اولیه

سطح کشت بهینه و تغییرات

برای تحلیل تأثیر بهینه‌سازی بر ترکیب محصولات فاریاب، ابتدا تغییرات سهم شش گروه محصولی در سطح کشت فاریاب در سناریوهای مختلف نسبت به شرایط فعلی بررسی شد. نتایج شکل ۵-الف نشان می‌دهد که بهینه‌سازی منجر به بازتوزیع سهم گروه‌های محصولی در اراضی فاریاب شده است؛ به گونه‌ای که سهم گروه‌هایی با ردپای آب زیاد، کاهش یافته و در مقابل، گروه‌هایی با ردپای آب کمتر و بهره‌وری اقتصادی بیشتر سهم بیشتری به خود اختصاص داده‌اند.

بررسی روند تغییرات در سناریوهای ۱۲گانه (S11-S62) نسبت به وضعیت پایه (S0) (شکل ۵-الف) نشان می‌دهد که سطح کشت دو گروه غلات و محصولات علوفه‌ای به تدریج کاهش یافته است. اما این گروه‌ها به ویژه غلات همچنان در تمام سناریوها سهم زیادی را دارند. در حالی که سهم چهار گروه دیگر به تدریج افزایش یافته است. کاهش سطح کشت غلات و محصولات علوفه‌ای با توجه به ردپای آب زیاد آنها توجیه‌پذیر است. اما افزایش سهم برخی گروه‌ها مانند حبوبات و محصولات صنعتی (شکل ۵-الف) که دارای ردپای آب زیادی هستند، صرفاً در راستای کاهش مصرف آب آبی نبوده و بیشتر با هدف افزایش تولید و سود اقتصادی رخ داده است. روند افزایشی حبوبات موجب بیشتر شدن سهم این محصولات در سناریوی ششم از محصولات علوفه‌ای شده است. در مقابل، افزایش سهم سبزیجات و محصولات جالیزی (شکل ۵-الف) با توجه به عملکرد بیشتر و در نتیجه ردپای آب آبی کمتر، توجیه‌پذیر بوده و می‌تواند به حفظ تولید و سود اقتصادی کمک کند. همچنین تنوع کشت حفظ شده و مطابق با فرضیات اولیه مدل، ترکیب کلی محصولات دستخوش تغییرات ساختاری نشده است.



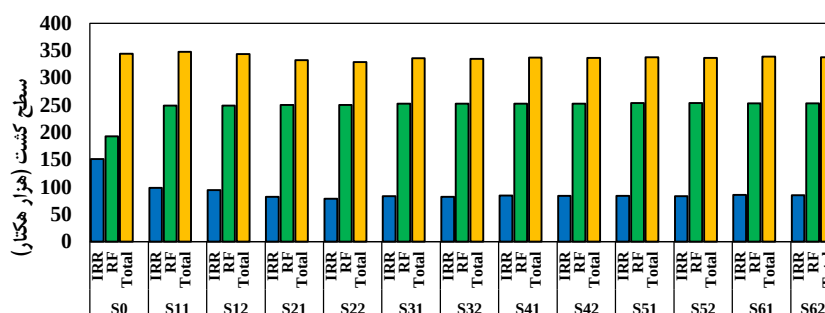
شکل ۵. درصد مشارکت دسته محصولات در سطح کشت فاریاب (الف) و دیم (ب) کل استان در وضعیت فعلی و بهینه

نتایج فوق در استان با عمده شهرستان‌ها نیز همسو است. اما مقایسه نتایج شهرستان فراهان با نتایج مطالعه (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۲) که در همه دسته محصولات به جز دسته محصولات صنعتی، روند افزایشی یا کاهشی سطح کشت در این دو مطالعه با هم مغایرت دارد. این موضوع می‌تواند از تفاوت اهداف مطالعه به ویژه خودکفایی و عدم در نظرگیری ارتباط بین مناطق در مطالعه (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۲) ناشی شود. همچنین نتایج پژوهش حاضر در کاهش سطح کشت غلات در استان مرکزی با نتایج مطالعه (Ramezani Etedali et al., 2019) در تضاد است. از دلایل این تضاد می‌توان در نظرگیری بهینه‌سازی جامع در کشور و اثر استان مرکزی در تامین غلات در کشور در مطالعه فوق دانست. همچنین بررسی و بهینه‌سازی الگوی کشت در سطح شهرستانی می‌تواند امکان ارزیابی دقیق‌تری را ارائه دهد. در حالی که در مطالعه (Ramezani Etedali et al., 2019) در استان مرکزی به صورت کلی بررسی شده و مقادیر ردپای آب نیز

به صورت میانگین وزنی برای کل استان در نظر گرفته شده و امکان تفاوت در برآورد آب مصرفی و سیاستگذاری کلی برای استان وجود دارد.

در وضعیت اولیه، بخش اعظم سطح کشت دیم به غلات و حبوبات اختصاص داشته است (S0) (شکل ۵-ب) و الگوی کلی درصد مشارکت گروه‌های محصولی در سناریوها تغییر اساسی نکرده است. با این حال، روندی کاهشی در سهم غلات و افزایشی در سهم حبوبات و محصولات علوفه‌ای مشاهده می‌شود. افزایش سهم حبوبات در کشت دیم نیز همچون کشت فاریاب، با هدف ارتقاء سود اقتصادی قابل تبیین است (شکل ۵-ب). مقایسه شکل‌های ۵-الف و ۵-ب نشان می‌دهد که کاهش سهم محصولات علوفه‌ای در اراضی فاریاب، تا حدی با افزایش سهم آن‌ها در اراضی دیم جبران شده است. این جابجایی می‌تواند با هدف استفاده بهتر از آب سبز و کاهش فشار بر منابع آب آبی انجام شده باشد.

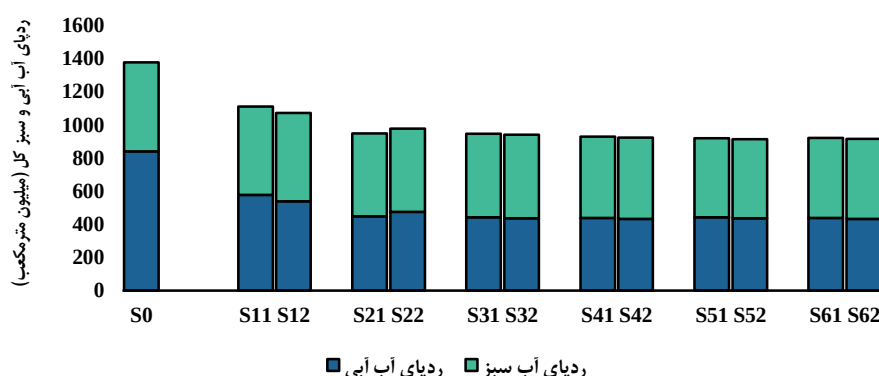
بر اساس نتایج، سناریوی اول (با دامنه تغییر ± 25 درصد) کمترین انحراف از وضعیت پایه را در الگوی کشت فاریاب و دیم نشان می‌دهد (شکل‌های ۵-الف و ۵-ب). به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که در بسیاری از سناریوها، کاهش سطح کشت فاریاب با افزایش نسبی سطح کشت دیم یا حفظ سطح کلی جبران شده است. این موضوع بیانگر تلاش مدل بهینه‌سازی برای کاهش مصرف آب آبی بدون ایجاد کاهش چشمگیر در سطح کشت یا سود اقتصادی است (شکل ۶).



شکل ۶. میزان سطح کشت آبی (IRR)، دیم (RF) و مجموع (Total) در استان در سناریوهای مختلف

ردپای آب آبی و سبز کل

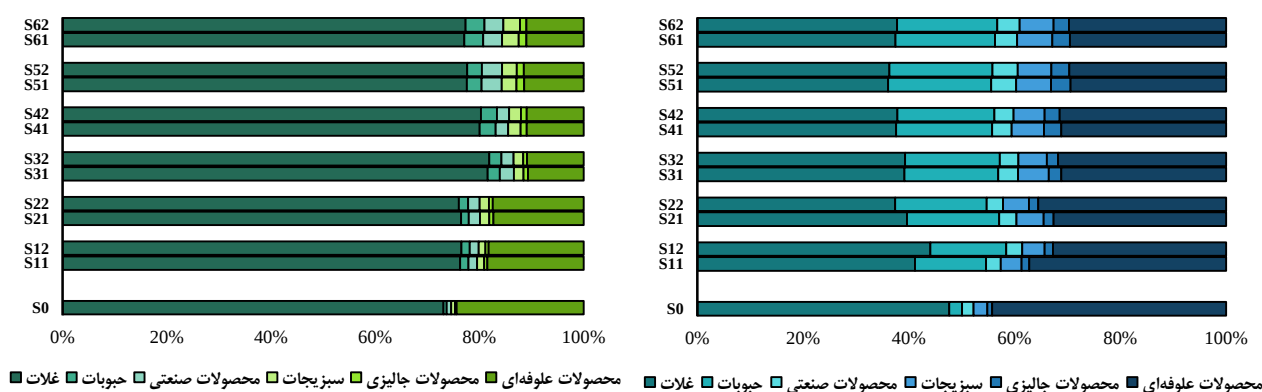
بررسی BWF و GWF در سناریوهای مختلف (S11-S62) نسبت به وضعیت پایه (S0) (شکل ۷)، حاکی از کاهش BWF و افزایش GWF در سطح استان در تمامی سناریوها است. این تغییرات که در راستای تابع هدف مدل بهینه‌سازی (رابطه ۱۳) قرار دارند، نشان‌دهنده کارایی مدل در جهت‌گیری مطلوب مصرف منابع آبی هستند. هرچند پس از سناریوی دوم، شدت این تغییرات کاهش می‌یابد. این روند با تغییرات سطح زیرکشت (شکل‌های ۵ و ۶) نیز مطابقت دارد؛ به‌طوری‌که بیشترین و کمترین تغییرات در تابع هدف به‌ترتیب در سناریوی شش و یک رخ داده است. کاهش مصرف آب آبی و افزایش نسبت آب سبز به آبی در بهینه‌سازی الگوی کشت با مطالعات (Saed et al., 2018) و (گودرزی و همکاران، ۱۴۰۲) همسو است.



شکل ۷. مقدار BWF و GWF (فاریاب و دیم) در هر سناریوی بهینه‌سازی

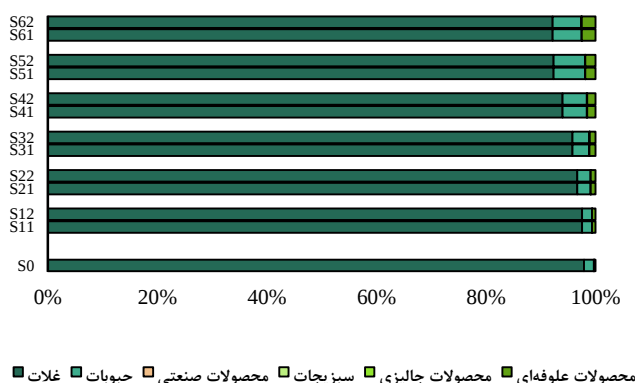
بررسی درصد مشارکت گروه‌های شش‌گانه محصول در BWF (شکل ۸-الف) نشان می‌دهد که الگوی تغییرات این مشارکت‌ها همسو با تغییرات درصد سطح زیرکشت آن‌هاست (شکل ۵ و ۶). به‌عنوان نمونه، کاهش درصد سطح زیرکشت غلات و علوفه‌ای با کاهش نسبی سهم آن‌ها در BWF همراه بوده و برعکس، افزایش درصد سطح زیرکشت سایر گروه‌ها موجب افزایش سهم آن‌ها در BWF شده است (شکل ۸-الف). نتایج مشابهی برای محصولات دیم نیز مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که کاهش سهم غلات و افزایش سهم حبوبات و محصولات علوفه‌ای در سطح زیرکشت دیم، به ترتیب باعث کاهش و افزایش سهم آن‌ها در GWF شده است (شکل ۸-ج). نتایج شکل ۸ مبنی بر کاهش BWF و GWF غلات فاریاب در استان مرکزی با نتایج مطالعه (Ramezani Etedali et al., 2019) در تضاد است. در حالی که افزایش GWF غلات دیم در پژوهش حاضر با مطالعه فوق هم‌راستایی دارد. این موضوع به علت تفاوت در نحوه و مقیاس بهینه‌سازی و رویکردهای کلی به ویژه میزان تولید کل در کشور، خودکفایی و رابطه استان‌های دیگر کشور با استان مرکزی متفاوت در مطالعه فوق است.

در خصوص کشت فاریاب، تحلیل GWF، نقش توزیع مکانی محصولات را نیز آشکارتر می‌سازد. بررسی شکل ۸-ب نشان می‌دهد که تغییرات درصد مشارکت گروه‌های محصول در GWF، به‌جز برای غلات، هم‌راستا با تغییرات سطح زیرکشت آن‌هاست (شکل ۷ و ۸). با این حال، در مورد غلات، علی‌رغم کاهش سهم آن‌ها در سطح زیرکشت، درصد مشارکت‌شان در GWF افزایش یافته است. این مسئله نشان می‌دهد که توزیع مکانی کشت غلات در سناریوهای بهینه‌سازی تغییر یافته است.



ب

الف

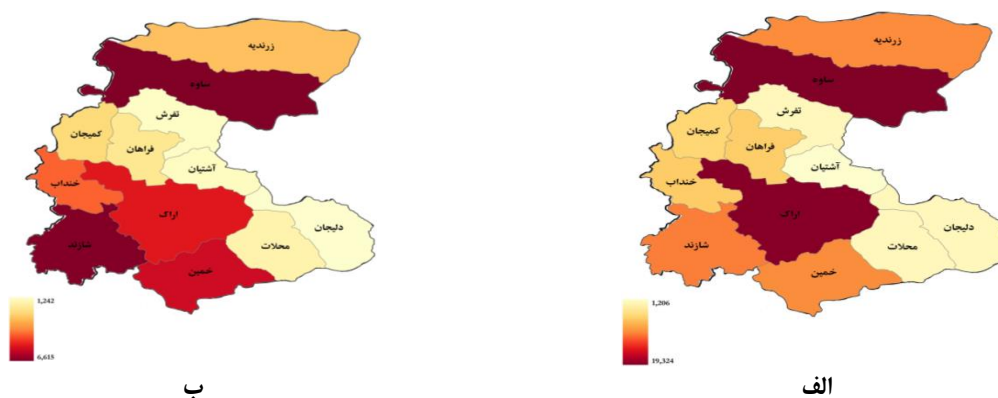


ج

شکل ۸. درصد مشارکت محصولات در BWF (الف)، GWF فاریاب (ب) و GWF دیم (ج) در هر سناریو

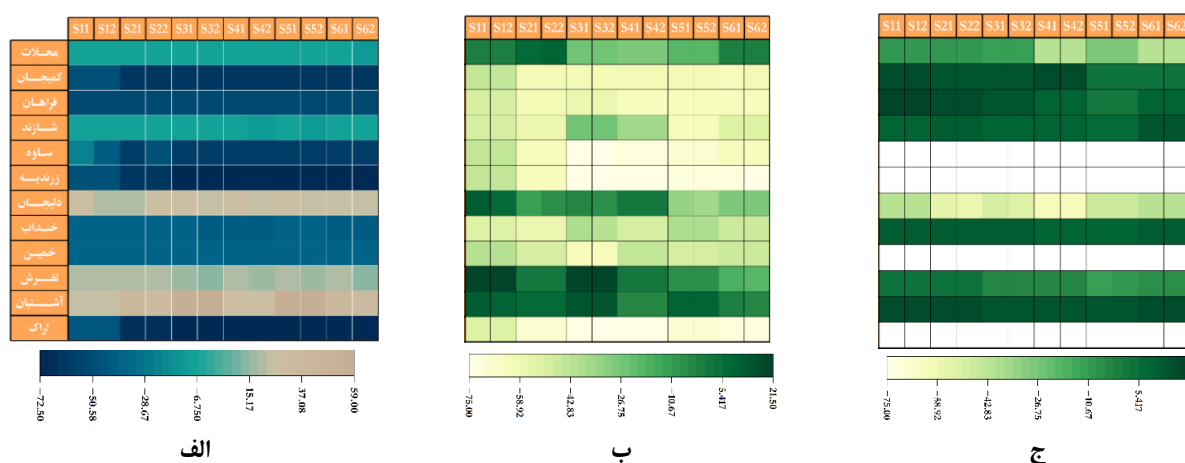
در وضعیت پایه (S0)، غلات عمدتاً در شهرستان‌های اراک و ساوه کشت می‌شدند (شکل ۹-الف)، اما در سناریوی S61 (سناریوی با بیشترین کاهش BWF و بیشترین افزایش GWF)، مراکز کشت به شهرستان‌های پربارش‌تر غرب استان (شکل ۲-ب) یعنی شازند، خنداب و خمین منتقل شده‌اند (شکل ۹-ب). این بهینه‌سازی توزیع مکانی بیانگر رویکرد مدل در استفاده بهینه از منابع آب سبز و ارتقاء بهره‌وری آب سبز است. این تغییرات نتیجه به‌کارگیری یک رویکرد یکپارچه و هم‌زمان برای کل استان است که تصمیم‌گیری را از سطح شهرستانی به مقیاس استانی ارتقاء داده است. نکته قابل توجه این است که با وجود پتانسیل زیاد بارندگی در اراک، کاهش سهم آن در

کشت غلات می‌تواند به علت عملکرد کمتر این محصول در اراک نسبت به شهرستان‌های غربی باشد و یا به علت روند کلی استان در کاهش حجم آب مصرفی آبی و به تبع آن آب سبز در کشت فاریاب باشد.



شکل ۹. سطح کشت کل غلات در وضعیت پایه S0 (الف) و بهترین سناریوی از نظر مصرف آب S62 (ب)

همچنین بر اساس شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب شهرستان‌های آشتیان، تفرش و دلیجان، با وجود روند کاهشی مصرف آب در سایر شهرستان‌ها، افزایش در BWF و GWF کشت فاریاب را تجربه کرده‌اند. این تغییر می‌تواند نتیجه‌ی پتانسیل بالای این مناطق از نظر بارش یا عملکرد محصول باشد، که به مدل امکان می‌دهد با افزایش سطح زیرکشت در این مناطق، فشار تولید و تأمین اقتصادی را از سایر شهرستان‌ها کاهش دهد. به عبارت دیگر، ساختار یکپارچه بهینه‌سازی و نحوه تعریف قیود، این امکان را فراهم کرده که برخی مناطق با مصرف بیشتر آب (در حد قابل قبول از نظر پایداری)، نقش بیشتری در تأمین امنیت غذایی و سود اقتصادی ایفا کنند.



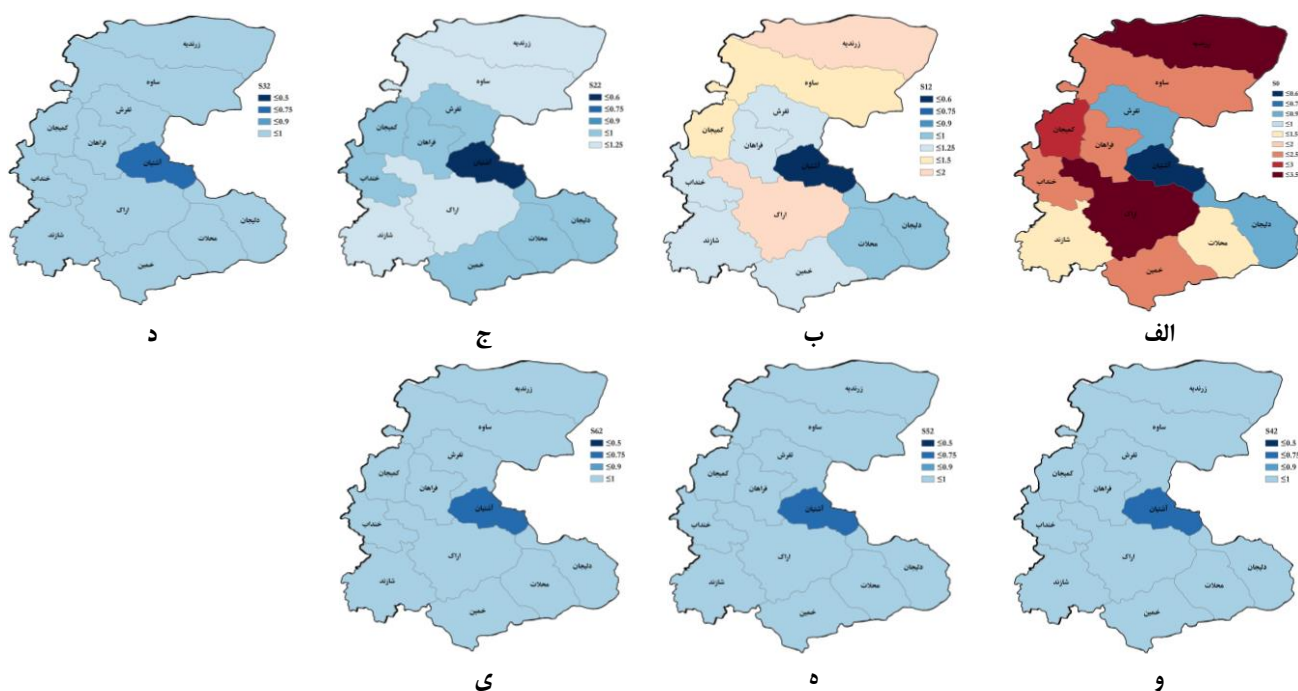
شکل ۱۰. درصد تغییرات حجم مصرف آب آبی (الف)، آب سبز فاریاب (ب) و آب سبز دیم (ج) در هر شهرستان و هر سناریو نسبت به وضعیت اولیه

در نهایت، افزایش GWF در اراضی دیم اغلب نقاط استان مطابق با اهداف بهینه‌سازی رخ داده است (شکل ۱۰-ج). استثنایی مانند شهرستان‌های اراک، زرنديه و ساوه که کاهش سطح کشت دیم و در نتیجه مصرف آب سبز را تجربه کرده‌اند، احتمالاً به دلیل عملکرد کمتر محصولات در این مناطق بوده است.

به طور کل، تغییرات در سطح کشت و نحوه توزیع مکانی محصولات در سناریوهای مختلف بهینه‌سازی، موجب کاهش وابستگی استان به منابع آب آبی و افزایش بهره‌مندی از آب سبز شد. این تغییرات، به‌ویژه در مورد محصولات فاریاب، نه تنها متأثر از نوع محصول، بلکه از محل کشت آن نیز بوده است؛ به‌طوری‌که با جابه‌جایی کشت به مناطق پر بارش، GWF افزایش یافته و سهم BWF کاهش یافته است. از سوی دیگر، مشارکت برخی شهرستان‌ها در افزایش سطح کشت به منظور تحقق اهداف اقتصادی، بیانگر نقش رویکرد یکپارچه در تخصیص بهینه منابع در سطح استانی است. این یافته‌ها نشان از اهمیت سیاست‌گذاری صحیح در مقیاس منطقه‌ای دارد.

ارزیابی تأثیر بهینه‌سازی بر شاخص کمبود آب آبی

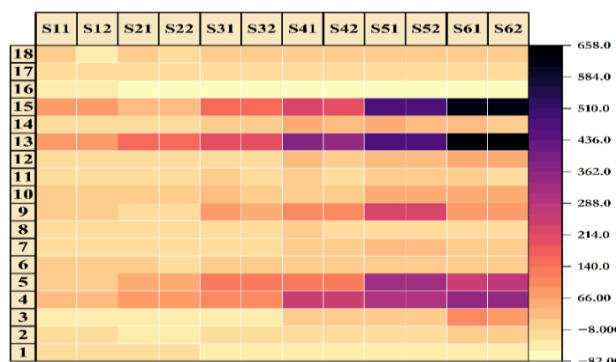
مقادیر پایه شاخص BWS (شکل ۱۱-الف) نشان می‌دهد که ۹ شهرستان از ۱۲ شهرستان استان، BWS بیش از ۱ و در وضعیت ناپایدار قرار داشته‌اند؛ که حکایت از فشار شدید بر منابع آب آبی به ویژه در شهرستان‌های اراک و ساوه دارد. از بین شهرستان‌های ناپایدار، محلات و شازند دچار کمبود اندک و باقی شهرستان‌ها دچار کمبود شدید آبی بوده‌اند. (شکل ۱۱-الف). نتایج حاصل از بهترین اجرای آبی شش سناریوی بهینه‌سازی نشان داد که در طی سناریوها، شاخص BWS به تدریج در تمامی شهرستان‌ها به مقادیر پایدار (کمتر از ۱) کاهش یافت. در شهرستان‌هایی که در وضعیت کمبود اندک یا شدید قرار داشتند، مقدار شاخص کاهش قابل توجهی یافت و در نهایت به بازه پایداری رسید. هم‌زمان، در سه شهرستان آشتیان، تفرش و دلجان که از ابتدا در وضعیت پایدار قرار داشتند، برای کاهش فشار در سایر مناطق، امکان افزایش منطقی مصرف آب آبی فراهم شد، به‌طوری که همچنان در محدوده پایدار باقی ماندند (شکل ۱۱) و مصرف در محدوده پایدار باقی ماند (شکل ۱۰-الف). این الگو نشان‌دهنده یک رویکرد همه‌جانبه و نظام‌مند در بهینه‌سازی است؛ به‌گونه‌ای که با اعمال محدودیت و کاهش فشار در نقاط بحرانی، ظرفیت‌های استفاده‌نشده در مناطق کم‌مصرف فعال شده و تعادل منطقه‌ای در مصرف منابع برقرار شده است. به عبارت دیگر، دستیابی به پایداری منابع در سطح استان نه از طریق کاهش یکنواخت مصرف، بلکه با بازتوزیع هوشمندانه و سازگار سطح کشت با ظرفیت هر منطقه تحقق یافته است که این موضوع با نتایج مطالعه (Nouri et al., 2020) در کاهش ناپایداری از طریق بهینه‌سازی الگوی کشت همراستا است. همچنین تعیین میزان BWS برای کل استان از تقسیم BWF در کل استان نسبت به کل BWA استان نشان از کمبود متوسط استان مرکزی (BWS برابر ۱/۸) دارد. در حالی که نتایج، بسیاری از شهرستان‌ها را در وضعیت کمبود شدید نشان می‌دهد. نتایج بررسی شاخص BWS در مطالعه حاضر نشان از اهمیت بررسی پایداری منابع آب و کارایی مقیاس خرد همچون شهرستانی در ارزیابی دقیق‌تر ناپایداری‌های منابع دارد که با نتایج مطالعه (کاراندیش، ۱۳۹۹) تطابق دارد.



شکل ۱۱. مقادیر شاخص BWS در هر شهرستان و هر سناریو

میزان تولید محصولات و سود خالص اقتصادی

تحلیل روند تولید در طی سناریوها بازتابی از سازگاری آبی و اقتصادی محصولات با بهینه‌سازی است. در این راستا، علاوه بر سه الگوی کلی رفتار تولید، بررسی میزان مشارکت محصولات در سود خالص اقتصادی نیز شواهد مکملی در تحلیل عملکرد سامانه ارائه می‌دهد.



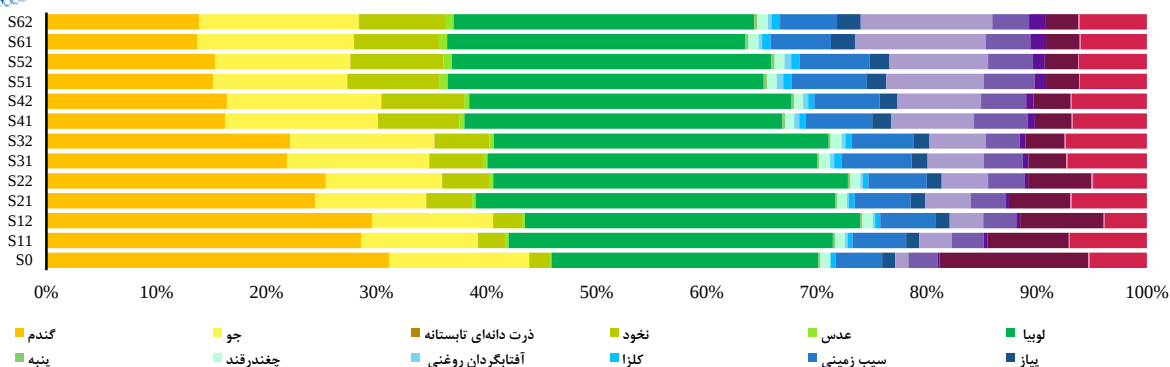
شکل ۱۲. درصد تغییرات تولید محصولات (آبی و دیم) در هر سناریو نسبت به وضعیت پایه. گندم (۱)، جو (۲)، ذرت دانه‌ای (۳)، نخود (۴)، عدس (۵)، لوبیا (۶)، پنبه (۷)، چغندر قند (۸)، آفتابگردان روغنی (۹)، کلزا (۱۰)، سیب زمینی (۱۱)، پیاز (۱۲)، گوجه فرنگی (۱۳)، هندوانه (۱۴)، خیار (۱۵)، یونجه (۱۶)، شبدر (۱۷) و ذرت علوفه‌ای (۱۸)

نخست، در گروه محصولات دارای رشد پایدار در تولید شامل نخود، عدس، گوجه‌فرنگی و خیار مشاهده می‌شود که علاوه بر تداوم افزایش تولید در تمام سناریوها (شکل ۱۲)، مشارکت آن‌ها در سود خالص نیز رشد پیوسته داشته است (شکل ۱۳). این روند، نشانگر هم‌سویی کامل این محصولات با اهداف مدل دارد؛ به‌ویژه در شرایطی که بهره‌وری آب، بازده اقتصادی و توانایی رشد در محیط دیم از اهمیت زیادی برخوردارند.

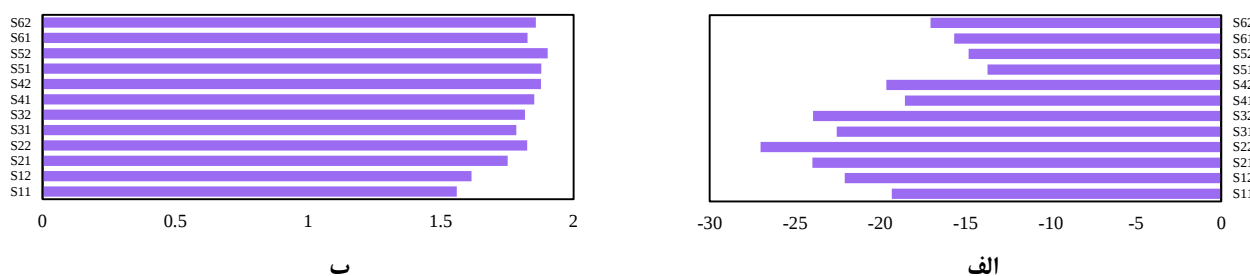
در گروه دوم، محصولات دارای روند نوسانی در تولید، شامل هندوانه، پیاز، کلزا، آفتابگردان روغنی، ذرت دانه‌ای، لوبیا و پنبه، الگوی رفتاری متمایزی مشاهده می‌شود (شکل ۱۲). این محصولات در سناریوهای اولیه به دلیل محدودیت در تغییر سطح کشت ($\pm 25\%$ درصد) و ساختار بهره‌وری پایین‌تر، از ترکیب بهینه حذف شده‌اند؛ با این حال، با افزایش تدریجی دامنه آزادی در سناریوهای میانی و نهایی، مجدداً وارد چرخه تولید شده‌اند. این بازگشت تدریجی بیانگر آن است که محدودیت‌های ساختاری در مدل مانند محدودیت‌های سخت سطح کشت اثر معناداری بر امکان حضور محصولات آب‌برتر دارد. به‌ویژه، محصول لوبیا در این گروه شاخص‌تر است؛ چرا که علی‌رغم کاهش اولیه در تولید (شکل ۱۳)، در ادامه به بیشترین سطح مشارکت در سود خالص رسیده است (شکل ۱۳). این جایگاه، نه فقط در سناریوهای نهایی، بلکه حتی در وضعیت پایه نیز قابل مشاهده است، که نشان از مزیت اقتصادی ذاتی این محصول دارد. با این حال، وابستگی زیاد لوبیا به آب آبی می‌تواند چالش‌زا باشد.

در گروه سوم، محصولات با روند کاهشی پایدار، شامل گندم، جو و یونجه، علی‌رغم اعمال قیود جریمه در مدل، کاهش معناداری را هم در سطح تولید (شکل ۱۲) و هم در مشارکت اقتصادی (شکل ۱۳) تجربه کرده‌اند. کاهش سطح کشت آبی در این محصولات، با وجود افزایش نسبی کشت دیم، نتوانسته کاهش کل تولید را جبران کند (شکل ۱۳). به عبارتی تولید دیم نتوانسته عدم رقابت‌پذیری این محصولات در ترکیب بهینه را جبران کند. این موضوع نشان می‌دهد که مدل تمایل به کاهش سهم این محصولات حتی با وجود جریمه عدم تحقق حداقل سطح تولید آنها دارد. اما در عین حال حذف کامل آن‌ها با توجه به نقش آن‌ها در امنیت غذایی ممکن نیست. بنابراین این محصولات به دلیل مقادیر زیاد تولید و سطح کشت در سناریوهای نهایی همچنان در بین پنج محصول اول قرار دارند (شکل ۱۳). از سویی روند کاهشی شدیدتر تولید یونجه (شکل ۱۲) نیز نشان از کارایی کم این محصول از نظر ترکیب درآمد-آب مصرفی دارد و حذف یا جایگزینی آن به سود کلی سیستم کمک می‌کند. در مقابل برای محصولاتی مانند جو روند کاهشی کندتر است که نشان‌دهنده توان تطبیق بهتر این محصول با اهداف بهینه‌سازی به خصوص کاهش مصرف آب است.

همچنین مجموع سود خالص اقتصادی در کل استان طی سناریوها نسبت به وضعیت پایه کاهش یافته است (شکل ۱۴-الف). در شرایط پایه این مقدار معادل ۷۰۱۸۰ میلیارد ریال بوده، درحالی‌که در سناریوی دوم بیشترین افت، حدود ۲۷ درصد، و در سناریوی پنجم کمترین افت، حدود ۱۳ درصد مشاهده شده است. این روند نزولی به‌روشنی بیانگر آن است که اعمال سیاست‌های پایداری منابع، علی‌رغم مزایای زیست‌محیطی و توزیعی، ممکن است با هزینه‌های اقتصادی همراه باشد که باید در تصمیم‌گیری‌های کلان لحاظ گردد.



شکل ۱۳. درصد مشارکت محصولات در سود خالص اقتصادی کل استان (دیم و فاریاب)



شکل ۱۴. درصد کاهش سود اقتصادی (فاریاب و دیم) در استان در هر سناریو نسبت به وضعیت اولیه (الف) - نسبت سود اقتصادی محصولات دیم به فاریاب در هر سناریو (ب)

با این حال، نکته قابل توجه، رشد سهم کشاورزی دیم در سود خالص کل است (شکل ۱۴-ب). این نسبت که در وضعیت پایه در سطح پایین‌تری قرار داشته، در سناریوهای نهایی افزایش محسوسی یافته است؛ به طوری که بخشی از شکاف سود کل نسبت به وضعیت پایه، از طریق افزایش مشارکت سیستم دیم جبران شده است (شکل ۱۴). به‌ویژه در محصولاتی نظیر نخود و عدس، نسبت تولید دیم به آبی به ترتیب از حدود ۷ به ۱۵ برابر و از ۳ به ۵ برابر افزایش یافته و سپس در برخی سناریوها تثبیت شده است. این روند نشان می‌دهد که توسعه هدفمند کشاورزی دیم می‌تواند به عنوان یک راهبرد مکمل برای کاهش فشار بر منابع آب آبی و حفظ پایداری اقتصادی منطقه تلقی شود.

وضعیت بهینه‌سازی و سناریوها

در سناریوها با سطح آزادی محدود (سناریوی S11 و S12) که شباهت بسیاری به وضعیت فعلی دارند، مدل به دلیل ساختار سخت‌گیرانه قیود (نظیر حداقل تولید یا حداقل سطح کشت برخی محصولات) ناچار به پذیرش تخطی‌هایی در قیود منابع آب یا تولید محصولات شد (جدول ۲). این مسئله به‌ویژه برای محصولات با آب مصرفی زیاد علی‌رغم درآمد متوسط یا کم نظیر گندم و یونجه برجسته بوده است. در چنین سناریوهایی حذف یا کاهش سهم این محصولات ممکن نیست و همین امر مدل را با تعارض مواجه ساخته است.

جدول ۲. مقادیر جریمه تخطی از قیود در سناریوهای شش‌گانه

قیود	S11	S12	S21	S22	S31	S32	S41	S41	S51	S52	S61	S62
سطح کشت	۰/۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۱۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
قید مصرف آب	۲/۸۴	۲/۳۹	۰/۶۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
قید تولید	۱/۰۵	۱/۴۶	۱/۴۳	۱/۷۷	۱/۴	۱/۴	۱/۳۹	۱/۳۹	۱/۴۶	۱/۴۶	۱/۴۱	۱/۴۱

با گسترش دامنه تغییرات مجاز سطح کشت در سناریوهای S21 تا S62، الگوهای بهینه‌شده به تدریج از ساختار فعلی فاصله گرفته‌اند؛ لذا بیشترین سود اقتصادی در سناریوهای S51 تا S62 با بیشترین آزادی در تغییر سطح کشت به دست آمده است (شکل ۱۴). این آزادی موجب شد که مدل با حذف یا کاهش سهم محصولات پرمصرف و جایگزینی آن‌ها با محصولات با ردپای آب کمتر، هم‌زمان به بهبود شاخص پایداری آبی و سود اقتصادی بدون تخطی از قیود و جریمه به‌ویژه در S41 تا S62 دست یابد (جدول ۲). این امر نشان می‌دهد که

ساختار فعلی سیستم کشاورزی، در شرایط محدودکننده، ظرفیت انعطاف‌پذیری کمی دارد؛ اما با اعطای آزادی عمل مناسب، قابلیت انطباق زیادی از خود نشان می‌دهد.

نکته قابل توجه آن است که باوجود تفاوت ساختاری میان سناریوها، نتایج اقتصادی و آبی حاصل شده در جبهه پارتو هر سناریو حتی در سناریوهای با آزادی بیشتر، اختلاف چشمگیری با یکدیگر ندارند. این هم‌گرایی عملکرد اقتصادی و پایداری آبی بیانگر آن است که تضاد بنیادینی میان این دو هدف در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد و می‌توان با تنظیم مناسب الگوی کشت به‌گونه‌ای حرکت کرد که هر دو هدف با هزینه‌های اندک محقق شوند.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مطالعه، با توسعه یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه، امکان بازطراحی الگوی کشت در استان مرکزی برای کاهش مصرف آب آبی، حفظ پایداری اقتصادی کشاورزان و امنیت غذایی فراهم شد. هدف اصلی در این مطالعه بررسی اثربخشی مقیاس تصمیم‌گیری در ایجاد شرایط بهینه بود. به عبارتی درنظرگیری یک مقیاس کل (استان مرکزی) برای سیاست‌گذاری و در نظرگیری مقیاس خرد (شهرستان‌ها) و ارتباط بین شهرستان‌ها برای اجرای تصمیم‌ها و سیاست‌ها رویکردی بود که مدنظر قرار گرفت. بنا بر چنین رویکردی مصرف آب و پایداری منابع آب با استفاده از مفهوم ارزیابی ردپای آب در مقیاس خرد شهرستانی تعیین گردید.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که مدل بهینه‌سازی به‌خوبی توانسته با درنظرگیری رویکرد کل به جزء، ناپایداری منابع آب را کاهش دهد و به عبارتی ناپایداری را بین شهرستان‌های مختلف استان توزیع نماید. راه‌حل اصلی برای این هدف، تعیین بهینه‌ترین مکان و سطح کشت برای هر محصول بوده است. به‌گونه‌ای که مطابق نتایج، شهرستان‌هایی برای کشت هر محصول انتخاب شده‌اند که کمترین ردپای آب و بیشترین درصد مشارکت بارندگی در تولید را داشته باشند؛ بنابراین با چنین تغییرات گسترده مکانی و بازآرایی ساختار الگوی کشت، کاهش و افزایش به‌ترتیب حجم آب آبی و سبز مصرفی مشاهده شد. این مهم خود باعث کاهش ناپایداری منابع آب و ایجاد وضعیت پایدار در همه مناطق استان گردید. اما نکته حایز اهمیت ارتباط بین شهرستان‌ها است. چرا که برخی شهرستان‌های پایدار با افزایش مصرف آب و تولید برخی محصولات و کاستن از میزان پایداری در منابع آب خود، در ایجاد پایداری برخی شهرستان‌های دیگر مؤثر واقع گردیدند. این فرایند مطابق با هدف اصلی مدل در ایجاد یک الگوی کشت بهینه برای توزیع مناسب بار تولید محصولات بین شهرستان‌ها متناسب با پتانسیل هر شهرستان بوده است.

همچنین مطابق با نتایج علی‌رغم کاهش وابستگی به آب آبی و درنظرگیری اهداف و محدودیت‌هایی برای حفظ سطح اقتصادی و تولید محصولات، مقادیر سود اقتصادی با کاهشی اندک نسبت به وضعیت فعلی مواجه شده است و تولید برخی محصولات نظیر گندم، جو و یونجه با کاهش روبه‌رو گردید. این موضوع باوجود کاهش بسیار زیاد مصرف آب آبی و تغییر گسترده در وضعیت ناپایدار شهرستان‌ها کاملاً قابل توجه است. به‌ویژه اینکه برخی محصولات ذاتاً در کشاورزی استان کارایی آبی - اقتصادی لازم را ندارند؛ بنابراین برای حفظ یا افزایش سود اقتصادی و سطح تولید محصولات مختلف توصیه می‌شود تا در مطالعات بعدی اثرات افزایش بهره‌وری و اقدامات به‌زراعی در افزایش واحد تولید به‌ازای آب مصرفی، در کنار اثرات الگوی کشت بهینه سنجیده شود. همچنین در نظرگیری تجارت آب مجازی بین استان مرکزی و سایر استان‌ها در کشور و یا ایجاد الگوی کشت بهینه سراسری در کشور از جمله اقداماتی است که می‌تواند اثرات کاهش تولید محصولات مذکور را کاهش داده و در حفظ امنیت غذایی استان مؤثر باشد؛ بنابراین بررسی اثرات چنین اقداماتی در مطالعات آینده توصیه می‌گردد.

منابع

- جعفرزاده، احمد؛ خاشعی، عباس و شهیدی، علی (۱۳۹۵). طراحی یک مدل تصمیم‌گیری چندهدفه به‌منظور تعیین الگوی کشت بهینه تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم (مطالعه موردی: دشت بیرجند). *تحقیقات آب و خاک/ ایران*، ۴۷(۴)، ۸۵۹-۸۴۹-۱۸۴۹. doi: 10.22059/ijswr.2016.59991
- عارفی نیا، علی و احمدآلی، خالد (۱۴۰۰). بهینه‌سازی چندهدفه الگوی کشت مبتنی بر ردپای آب در استان‌های شرق کشور. *نشریه آبیاری و زهکشی/ ایران*، ۱۵ (۱)، ۱۹۸-۱۸۸.
- علیپور، اکبر؛ داوری، کامران؛ موسوی بایگی، محمد؛ صبوچی صابونی، محمود و ایزدی، عزیر الله (۱۳۹۸). تعیین الگوی کشت بهینه با هدف پایداری آب زیرزمینی. *پژوهش آب در کشاورزی*، ۳۳ (۳)، ۵۱۸-۵۰۷. doi: 10.22092/jwra.2019.120477
- علیقلی نیا، توحید؛ قربانی، خلیل؛ رضایی، حسین و قربانی نصرآباد، قربان (۱۴۰۰). بهینه‌سازی الگوی کشت بر مبنای شاخص ردپای آب در اقلیم‌های



مختلف ایران. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳ (۱)، ۵۲-۶۶. doi: 10.22059/ijswr.2020.300709

- فلاحی، اسماعیل؛ خلیلیان، صادق و احمدیان، مجید (۱۳۹۲). بهینه‌سازی الگوی کشت با تاکید بر محدودیت منابع آب مطالعه‌ی موردی: دشت سیدان- فاروق شهرستان مرودشت. فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۱۸ (۵)، ۹۱-۱۱۵.
- کاراندیش، فاطمه (۱۳۹۹). بررسی تاثیر دقت‌های مکانی و زمانی در ارزیابی ردپای آب بر شاخص کمبود آب آبی در ایران. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴ (۵)، ۱۶۳۸-۱۶۴۸.
- گلای، محمدرضا؛ فرزی، سهیلا و رادمش، فریدون (۱۳۹۸). تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر شاخص ردپای آب (مطالعه موردی: استان کرمانشاه). نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳ (۳)، ۶۰۲-۵۸۸.
- گودرزی، مصطفی؛ قدیک لو، جواد؛ غدیری، عادل و خودشناس، محمدعلی (۱۴۰۲). تعیین الگوی کشت بهینه مبتنی بر هم‌بست آب، انرژی، غذا و سود اقتصادی (مطالعه موردی استان مرکزی- دشت فراهان). آب و خاک، ۳۷ (۲)، ۱۸۷-۱۲۳۳۲۰۲. doi: 10.22067/jsw.2023.79946.1233202-187
- میرزائی، عبدالرحمان؛ سلطانی، افشین؛ عباسی، فریبرز؛ زینلی، ابراهیم و میرکریمی، شهرزاد (۱۴۰۴). بهینه‌سازی الگوی کشت آبی استان فارس به‌منظور سازگاری با کم‌آبی. علوم آب و خاک، ۲۹ (۱)، ۱۳۱-۱۵۲.
- یوسفی، شیدا و نظری، بیژن (۱۳۹۸). بهینه‌سازی الگوی کشت برای مدیریت پایدار منابع آب در کشاورزی با استفاده از مدل‌سازی سیستم‌های پویا در استان آذربایجان غربی، اولین کنگره بین‌المللی و چهارمین کنگره ملی آبیاری و زهکشی ایران، ارومیه، <https://civilica.com/doc/1025261>.

REFERENCES

- Ababaei, B., & Etedali, H. R. (2014). Estimation of water footprint components of Iran's wheat production: Comparison of global and national scale estimates. *Environmental processes*, 1, 193-205.
- Ababaei, B., & Etedali, H. R. (2017). Water footprint assessment of main cereals in Iran. *Agricultural water management*, 179, 401-411.
- Aligholnia, t., Ghorbani, K., Rezaie, H., & Ghorbani Nasrabad, G. (2021). Optimization of Crop Pattern Based on Water Footprint Index in Different Climates of Iran. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 52(1), 66-53. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.300709.668574> (in Persian)
- Alipoor, A., Davari, K., Mousavi Baygi, M., Sabuhi, M., & Izady, A. (2019). Determination of Optimum Cropping Pattern for Groundwater Stability. *Journal of Water Research in Agriculture*, 33(3), 507-518. <https://doi.org/10.22092/jwra.2019.120477> (in Persian)
- Antonelli, M., Tamea, S., & Yang, H. (2017). Intra-EU agricultural trade, virtual water flows and policy implications. *Science of The Total Environment*, 587, 439-448.
- Arefinia, A., & Ahmadaali, K. (2021). Multi-objective optimization of cropping pattern by emphasizing on water footprint in the eastern provinces of Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 15(1), 188-198. https://idj.iaid.ir/article_126752_f40bebc36fea4f93f694e91ab8da029b.pdf (in Persian)
- Cai, W., Jiang, X., Sun, H., He, J., Deng, C., & Lei, Y. (2022). Temporal and spatial variation and driving factors of water consumption in the middle Heihe river basin before and after the implementation of the "97 water diversion scheme". *Agricultural water management*, 269, 107727.
- Chouchane, H., Krol, M. S., & Hoekstra, A. Y. (2020). Changing global cropping patterns to minimize national blue water scarcity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(6), 3015-3031.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000). A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. International conference on parallel problem solving from nature,
- Demir, M. S., & Muratoglu, A. (2025). Water footprint concept, approaches, and applications: A comprehensive review for the agricultural sector. *Water and Environment Journal*.
- Fallahi, E., KHalilian, S., & Ahmadian, M. (2013). Optimizing Cropping Pattern with Emphasis on Water Resource Restrictions: A Case Study of Seidan-Farough Plain, Marvdasht Township. *Agricultural Economics Research*, 5(2), 91-115. https://jae.marvdasht.iau.ir/article_247_e2c4478d04dddb524b51b1588cbf2444.pdf (in Persian)
- Faramarzi, M., Yang, H., Mousavi, J., Schulin, R., Binder, C. R., & Abbaspour, K. C. (2010). Analysis of intra-country virtual water trade strategy to alleviate water scarcity in Iran. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(8), 1417-1433.
- Golabi, M. R., farzi, s., & radmanesh, f. (2019). The determination of optimal cultivation pattern according to Water Footprint Index(case study: Kermanshah province). *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*,

- 13(3), 588-602. https://idj.iaid.ir/article_95426_61b4ad7a39d7075b6250019cda103dc3.pdf (in Persian)
- Goodarzi, M., Ghadbeiklou, J., Ghadir, A., & Khodshenas, M. A. (2023). Determining the Optimal Cropping Pattern Based on the Multiple Objectives of Water, Energy, Food and Economic Profit Indices (Case Study: Markazi Province - Farahan Plain). *Water and Soil*, 37(2), 187-202. <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.79946.1233> (in Persian)
- He, L., Bao, J., Daccache, A., Wang, S., & Guo, P. (2020). Optimize the spatial distribution of crop water consumption based on a cellular automata model: A case study of the middle Heihe River basin, China. *Science of The Total Environment*, 720, 137569.
- Hoekstra, A., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2012). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.
- Hoekstra, A. Y. (2016). A critique on the water-scarcity weighted water footprint in LCA. *Ecological indicators*, 66, 564-573.
- Hoekstra, A. Y. (2017). Water footprint assessment: evolvment of a new research field. *Water Resources Management*, 31(10), 3061-3081.
- Hossain, I., Imteaz, M. A., & Khastagir, A. (2021). Water footprint: applying the water footprint assessment method to Australian agriculture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(10), 4090-4098.
- Husenov, B., Makhkamov, M., Garkava-Gustavsson, L., Muminjanov, H., & Johansson, E. (2015). Breeding for wheat quality to assure food security of a staple crop: the case study of Tajikistan. *Agriculture & Food Security*, 4, 1-8.
- IMAJ. (2024). *Iran's Ministry of Agriculture Jihad* www.maj.ir
- IRIMO. (2024). *Islamic Republic of Iran's Meteorological Organization* <http://www.irimo.ir/far/index.php>
- IWRM. (2024). *Iran's Water Resource Management Company* <http://daminfo.wrm.ir/fa/home>
- Jafarzadeh, a., Khaseii, A., & Shahidi, A. (2016). Designing a multiobjective decision-making model to determine optimal crop pattern influenced by climate change phenomenon (case study: Birjand plain). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(4), 849-859. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.59991> (in Persian)
- Kang, M., Wang, Y., Zhu, Y., He, F., Jiang, S., & Yang, M. (2023). Optimizing the structure of food production in China to improve the sustainability of water resources. *Science of The Total Environment*, 900, 165750.
- Karandish, F. (2020). Investigating the influence of spatial and temporal resolutions in water footprint assessment on blue water scarcity index in Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 14(5), 1628-1638. https://idj.iaid.ir/article_122330_86b73d87a893c9dc9de4dcda41a2d0.pdf (in Persian)
- Karandish, F. (2021). Socioeconomic benefits of conserving Iran's water resources through modifying agricultural practices and water management strategies. *Ambio*, 50(10), 1824-1840.
- Karandish F, Hoekstra AY. Informing National Food and Water Security Policy through Water Footprint Assessment: the Case of Iran. *Water*. 2017; 9(11):831. <https://doi.org/10.3390/w9110831>
- Karandish, F., Hoekstra, A. Y., & Hogeboom, R. J. (2020). Reducing food waste and changing cropping patterns to reduce water consumption and pollution in cereal production in Iran. *Journal of hydrology*, 586, 124881.
- Karandish, F., Hogeboom, R. J., & Hoekstra, A. Y. (2021). Physical versus virtual water transfers to overcome local water shortages: A comparative analysis of impacts. *Advances in water resources*, 147, 103811.
- Karandish, F., Nouri, H., & Brugnach, M. (2021). Agro-economic and socio-environmental assessments of food and virtual water trades of Iran. *Scientific Reports*, 11(1), 15022.
- Kompas, T., Che, T. N., & Grafton, R. Q. (2024). Global impacts of heat and water stress on food production and severe food insecurity. *Scientific Reports*, 14(1), 14398.
- Li, M., Guo, P., Singh, V. P., & Yang, G. (2016). An uncertainty-based framework for agricultural water-land resources allocation and risk evaluation. *Agricultural water management*, 177, 10-23.
- Liang, J., Liu, Q., Zhang, H., Li, X., Qian, Z., Lei, M., Li, X., Peng, Y., Li, S., & Zeng, G. (2020). Interactive effects of climate variability and human activities on blue and green water scarcity in rapidly developing watershed. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121834.
- Liu, Q., Niu, J., Du, T., & Kang, S. (2023). A full-scale optimization of a crop spatial planting structure and its associated effects. *Engineering*, 28, 139-152.
- Luo, J., Zhang, H., Qi, Y., Pei, H., & Shen, Y. (2022). Balancing water and food by optimizing the planting structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Agricultural water management*, 262, 107326.
- Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2016). Iran's socio-economic drought: challenges of a water-bankrupt nation. *Iranian studies*, 49(6), 997-1016 .



- Mehla, M. K., Kothari, M., Singh, P. K., Bhakar, S. R., & Yadav, K. K. (2023). Blue water scarcity assessment in Banas River basin using water footprint approach. *Ecology, Environment, and Conservation*, 29(1), 115-119.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*, 2(2), e1500323.
- Mirzaei, A., Soltani, A., Abbasi, F., Zeinali, E., & Mirkarimi, S. (2025). Optimization of the Irrigated Cropping Pattern in Fars Province to Adapt to Water Scarcity. *Journal of Water and Soil Science*, 29(1), 131-152. <https://doi.org/10.47176/jwss.29.1.65821> (in Persian)
- Nouri, H., Stokvis, B., Borujeni, S. C., Galindo, A., Brugnach, M., Blatchford, M., Alaghmand, S., & Hoekstra, A. (2020). Reduce blue water scarcity and increase nutritional and economic water productivity through changing the cropping pattern in a catchment. *Journal of hydrology*, 588, 125086.
- Nouri, H., Stokvis, B., Galindo, A., Blatchford, M., & Hoekstra, A. Y. (2019). Water scarcity alleviation through water footprint reduction in agriculture: the effect of soil mulching and drip irrigation. *Science of The Total Environment*, 653, 241-252.
- Nouri, M., Homaei, M., Pereira, L. S., & Bybordi, M. (2023). Water management dilemma in the agricultural sector of Iran: A review focusing on water governance. *Agricultural water management*, 288, 108480.
- Ramezani Etedali, H., Ahmadaali, K., Gorgin, F., & Ababaei, B. (2019). Optimization of the cropping pattern of main cereals and improving water productivity: application of the water footprint concept. *Irrigation and Drainage*, 68(4), 765-777.
- Ren, C., Xie, Z., Zhang, Y., Wei, X., Wang, Y., & Sun, D. (2021). An improved interval multi-objective programming model for irrigation water allocation by considering energy consumption under multiple uncertainties. *Journal of hydrology*, 602, 126699.
- Saed, B., Afshar, A., Jalali, M. R., Ghoreishi, M., & Aminpour Mohammadabadi, P. (2018). A water footprint based hydro-economic model for minimizing the blue water to green water ratio in the Zarrinehrud river-basin in Iran. *AgriEngineering*, 1(1), 58-74.
- SCI. (2024). Statistical Center of Iran <https://amar.org.ir/english>
- Sharafi, S., Nahvinia, M. J., & Salehi, F. (2024). Assessing the Water Footprints (WFPs) of Agricultural Products across Arid Regions: Insights and Implications for Sustainable Farming. *Water*, 16(9), 1311.
- Sharifi, A., Mirchi, A., Pirmoradian, R., Mirabbasi, R., Tourian, M. J., Haghighi, A. T., & Madani, K. (2021). Battling water limits to growth: lessons from water trends in the central plateau of Iran. *Environmental Management*, 68, 53-64.
- Slattery, M. (2008). Making every drop count: Water accounting. *Charter*, 79(5), 24-26.
- Smith, M. (1992). CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management. Food & Agriculture Org.
- Soltani, F., Javadi, S., Roozbahani, A., Massah Bavani, A. R., Golmohammadi, G., Berndtsson, R., Ghordoyee Milan, S., & Maghsoudi, R. (2023). Assessing climate change impact on water balance components using integrated groundwater-surface water models (case study: Shazand Plain, Iran). *Water*, 15(4), 813.
- SWRI. (2024). Soil and Water Research Institute, Iran <http://www.swri.ir/>
- Veetil, A. V., & Mishra, A. K. (2018). Potential influence of climate and anthropogenic variables on water security using blue and green water scarcity, Falkenmark index, and freshwater provision indicator. *Journal of environmental management*, 228, 346-362.
- Wang, Z., Liu, Q., Dai, W., & Shi, Y. (2019). A review of the optimization method of planting structure based on water constraints. *Journal of water resources and architectural engineering*, 17(3), 231-235.
- Xue, J., Guan, H., Huo, Z., Wang, F., Huang, G., & Boll, J. (2017). Water saving practices enhance regional efficiency of water consumption and water productivity in an arid agricultural area with shallow groundwater. *Agricultural water management*, 194, 78-89.
- Yousefi, S., & Nazari, B. (2019). Crop pattern optimization for sustainable water resources management in agriculture using system dynamics modeling in West Azerbaijan Province Proceedings of the 1st International and 4th National Congress on Irrigation and Drainage of Iran, Urmia, Iran. <https://civilica.com/doc/1025261> (in Persian)
- Yu, H., Liu, K., Bai, Y., Luo, Y., Wang, T., Zhong, J., Liu, S., & Bai, Z. (2021). The agricultural planting structure adjustment based on water footprint and multi-objective optimisation models in China. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126646.
- Zhang, F., Cai, Y., Tan, Q., & Wang, X. (2021). Spatial water footprint optimization of crop planting: A fuzzy multiobjective optimal approach based on MOD16 evapotranspiration products. *Agricultural water management*, 256, 107096.

- Zhang, P., Wei, T., Han, Q., Ren, X., & Jia, Z. (2020). Effects of different film mulching methods on soil water productivity and maize yield in a semiarid area of China. *Agricultural water management*, 241, 106382.
- Zhang, S., Tan, Q., Zhao, H., Zhang, T., Zhang, T., & Hu, K. (2022). Improving footprint-based water use efficiency through planting structure optimization. *Ecological Engineering*, 180, 106643.
- Zhao, X., Liu, J., Liu, Q., Tillotson, M. R., Guan, D., & Hubacek, K. (2015). Physical and virtual water transfers for regional water stress alleviation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(4), 1031-1035.