



Use of Water Footprint and Virtual Water to Determine the Optimal Cropping Pattern; Case Study: Ghaenat and Zirkoh Counties

H.R. Aboutorabi¹, M. Ramroudi^{2*}, M.R. Asgharipour³ and M.S. Ghazanfari Moghadam⁴

Received: 09-12-2020 Revised: 13-02-2021 Accepted: 16-02-2021 Available Online: 15-06-2022	How to cite this article: Aboutorabi, H.R., Ramroudi, M., Asgharipour, M.R., and Ghazanfari Moghadam, M.S., 2022. Use of water footprint and virtual water to determine the optimal cropping pattern; Case study: Ghaenat and Zirkoh counties. Journal of Agroecology 14(1):173-191. DOI:10.22067/agry.2021.67480.1002
---	---

Introduction

Management of water consumption in arid and semi-arid regions in recent years has been considered a key issue in the field of water resources management. Zirkoh and Ghaenat counties are the hot spots of water consumption in the region. Water footprint and virtual water are critical indicators for water resources management. Therefore, the development of the cropping pattern with high water requirements has led to a negative water balance in the Ghaenat and Zirkoh counties. To prevent the negative consequences of this crisis, it is necessary to consider the restriction of cropping pattern with high water requirements in the region, as well as the assessment of water footprint and virtual water of agricultural products. Also, one of the strategies for managing and optimizing the consumption of water resources in the region is to determine the appropriate cropping pattern with regard to the local conditions. Therefore, this study has been conducted with the aim of calculating the components of water footprint and virtual water in the cropping patterns of Zirkoh and Ghaenat counties and determining the optimal cropping pattern for planting crops from the perspective of water footprint.

Materials and Methods

In this study, the amount of virtual water and green, blue, gray, and white water footprint for wheat, barley, potato, sugar beet, cotton, alfalfa, and saffron were calculated in the current cropping pattern and at multi-objective nonlinear programming (MOP) approach with the objectives of maximizing net profit and minimizing virtual water, green, blue, gray and white water footprint as the optimal cropping pattern in Ghaenat and Zirkoh counties. The study area was irrigated areas of Zirkoh and Ghaenat counties in 2017.

Results and Discussion

The results showed that the indices of virtual water and water footprint components in Zirkoh county were higher than in Ghaenat county. Also, in two counties, the blue water footprint was more than the green water footprint, and the results showed that a large amount of water resources in this area is spent on the production of cotton. In all studied crops, blue water footprint was more than other components of water footprint, which shows the reliance on the surface and sub-surface water resources. The results also showed that the area under cultivation of potatoes, melons, and barley in the multi-objective pattern of Ghaenat and the area under cultivation of melons, sugar beets, potatoes, watermelons, alfalfa, and saffron increased compared to the current cropping pattern. Reduction of the area under cultivation of cotton, alfalfa, and watermelon in Ghaenat county and cotton, wheat, and barley in Zirkoh county by 50% in the multi-objective crop pattern were other important results. By determining the optimal cropping pattern, the environmental effects of the agricultural sector on

1- Ph.D. Candidate, Department of Agronomy, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.

2- Associate Professor, Department of Agronomy, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.

3- Professor, Department of Agronomy, College of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.

4- Assistant Professor of Energy Research Institute, Research Institute of Advanced Science and Technology and Environmental Sciences, Kerman University of Industrial and Advanced Technology, Kerman, Iran.

*Corresponding author: mramroudi42@uoz.ac.ir

water resources could be reduced so that the implementation of this pattern in the region reduced virtual water by 26%, blue water footprint by 4%, gray water footprint by 18% compared to the current cropping pattern.

Conclusion

According to the findings of this study, it is necessary to pay attention to the environmental objectives affecting water resources in optimizing cropping patterns. Using the proposed model, in addition to selecting the appropriate model and optimal use of water and land resources to increase profits and reduce water and virtual water footprint, about 13 million cubic meters of water could be saved compared to the current cropping pattern in the region. Therefore, by implementing the optimal cropping pattern, in addition to reducing the environmental effects, the net income could be maximized of water consumed per cubic meter in the region, and by reducing water consumption, we can help achieve sustainable consumption of limited water resources in the region.

Keywords: Bluewater footprint, Green water footprint, Nonlinear planning, Saffron, Water resources, White water footprint



مقاله پژوهشی

برآورد ردپای آب و آب مجازی برای تعیین الگوی کشت بهینه؛ مطالعه موردی: شهرستان‌های قائنات و زیرکوه

حمیدرضا ابوترابی^۱، محمود رمرودی^{۲*}، محمدرضا اصغری پور^۳ و محمد صادق غضنفری مقدم^۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۱/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۸

ابوترابی، ح. ر.، رمرودی، م.، اصغری پور، م. ر.، و غضنفری مقدم، م. ص.، ۱۴۰۱. برآورد ردپای آب و آب مجازی برای تعیین الگوی کشت بهینه؛ مطالعه موردی: شهرستان‌های قائنات و زیرکوه. بوم‌شناسی کشاورزی ۱۴(۱): ۱۹۱-۱۷۳.

چکیده

برای اجتناب از پیامدهای منفی بیابان منفی آب در شهرستان‌های قائنات و زیرکوه، محدودیت کشت محصولات زراعی با نیاز آبی بالا ضروری است. در این پژوهش با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی چندهدفه (MOP)، الگوی کاشت بهینه با هدف حداکثرسازی سودخالص و حداقل‌سازی آب مجازی، ردپاهای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید محصولات زراعی منطقه قائنات و زیرکوه پیشنهاد شده است. در تمامی محصولات مورد مطالعه، ردپای آب آبی بیش از سایر اجزای ردپای آب بود که نشان‌دهنده اتکای زراعت بر منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی است. در مدل MOP سطح زیر کشت سیب‌زمینی، خربزه و جو قائنات و سطح زیر کشت خربزه، چغندرقد، سیب‌زمینی، هندوانه، یونجه و زعفران زیرکوه نسبت به الگوی جاری افزایش یافت. کاهش سطح زیر کشت ۵۰ درصدی پنبه، یونجه، هندوانه قائنات و پنبه، گندم و جو زیرکوه در الگوی MOP از دیگر موارد مهم نتایج بود. با تعیین الگوی کشت بهینه می‌توان اثرات محیطی کشاورزی بر منابع آب را کاهش داد، به طوری که اجرای این الگو در منطقه کاهش ۲۶ درصدی آب مجازی، چهار درصدی ردپای آب آبی، ۱۸ درصدی ردپای آب خاکستری به میزان ۳۶۸۷۷۹ تن در هکتار نسبت به وضع موجود را نتیجه داد. با توجه به یافته‌های این مطالعه توجه به اهداف محیطی مؤثر بر منابع آب در بهینه‌سازی الگوی کشت ضروری است. با استفاده از مدل پیشنهادی می‌توان علاوه بر انتخاب الگوی مناسب و استفاده بهینه از منابع آب و زمین، در حدود ۱۳ میلیون مترمکعب آب را نسبت به الگوی جاری در منطقه ذخیره کرد.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی غیرخطی، ردپای آب آبی، ردپای آب سبز، ردپای آب سفید، زعفران، منابع آب

مقدمه

منابع آب در کنار سایر عوامل تولید، نقش تعیین‌کننده و

روزافزونی در رشد اقتصادی کشورها دارد. وابستگی روزافزون به منابع آب، سرعت در روند رشد و توسعه را وابسته به سطح مصرف منابع آبی کرده است. کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده منابع آب در جهان به‌شمار می‌آید (Mekonnen et al., 2020)، طی دهه‌های اخیر رشد اقتصادی جهان و روند صنعتی شدن، موجب افزایش تقاضا برای منابع آب شده است (Vallino et al., 2020). منطقه قائنات و زیرکوه یکی از مهم‌ترین مناطق کشاورزی شرق کشور بوده که به دلیل آب و هوای مطلوب، اکوسیستمی مناسب برای کشت محصولات کشاورزی دارد. سطح زیر کشت محصولات زراعی آبی شهرستان‌های قائنات و

- ۱- دانشجوی دکتری آگرواکولوژی، گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
 - ۲- دانشیار گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
 - ۳- استاد گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
 - ۴- استادیار پژوهشکده انرژی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران.
- (Email: mramroudi42@uoz.ac.ir) * - نویسنده مسئول:

DOI:10.22067/agry.2021.67480.1002

شده در فرآیند تولید محصول، مورد نیاز است. مفهوم ردپای آب سفید مفهوم جدیدی است که میزان تلفات آب آبیاری در تولید محصول را مشخص می‌سازد (Xinchun et al., 2017; [Bazrafshan et al., 2019](#)).

با توجه به اهداف اقتصادی و کاهش اثرات محیطی مصرف بیش از حد آب و همچنین در نظر گرفتن محدودیت‌های عوامل تولید از جمله آب و زمین، اصلاح الگوی کشت از راهکارهای مناسب برای کاهش مصرف آب و افزایش سود در بخش کشاورزی است. الگوی کشت عبارت است از تعیین یک نظام کشاورزی دارای مزیت اقتصادی پایدار مبتنی بر سیاست‌های کلان کشور، دانش بومی کشاورزان و بهره‌گیری بهینه از پتانسیل‌های منطقه‌ای با رعایت اصول اکوفیزیولوژیک تولید محصولات کشاورزی در راستای حفظ محیط زیست ([Dury et al., 2013](#)). با توجه به تعریف فوق، تأمین اهداف مختلف با توجه به محدودیت‌ها و ظرفیت‌های تولید در الگوی کشت هر منطقه، مشخص می‌کند که هدف در انتخاب فعالیت‌های زراعی معمولاً به یک موضوع خاص ختم نشده و تصمیم‌گیر باید بین نتایج خروجی حاصل از تصمیم که در تضاد و تقابل همدیگر هستند، تعادل برقرار کند ([Zhang et al., 2020](#); [Li et al., 2020](#)). بنابراین، تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی در شرایطی که چند هدف ویژه و گاهی متضاد پیش روی مدیران واحدهای مختلف قرار می‌گیرد، کار ساده‌ای نیست و نیازمند روش‌هایی است که بتواند براساس مجموعه‌ای از اطلاعات و اهداف متفاوت در پیش روی مدیران واحدهای کشاورزی، آن‌ها را در جهت اتخاذ یک تصمیم منطقی راهنمایی کند ([Ren et al., 2017](#)). در این راستا، استفاده از رهیافت‌های برنامه‌ریزی ریاضی از جمله برنامه‌ریزی چندهدفه^۲ (MOP) برای ارائه الگوی کشت بهینه از مزیت‌های قابل توجهی برخوردار است ([Xie Nie et al., 2019](#)); [et al., 2018](#); [Zhang et al., 2020](#)). مدل تصمیم‌گیری چندهدفه؛ بُرداری از متغیرهای تصمیم، توابع هدف و محدودیت‌ها را شامل می‌شود و هدف تصمیم‌گیر ماکزیمم کردن یا مینیمم کردن توابع هدف است. از آن جایی که این مسایل به ندرت راه‌حل منحصر به فرد دارند، تصمیم‌گیر جوابی را از میان مجموعه جواب‌های کارا انتخاب می‌کند ([Afshar et al., 2020](#)). در مطالعات بهینه‌سازی الگوی کشت، برای افزایش بهره‌وری از طریق تأمین حداکثر بازده ناخالص ([Paramijita et al., 2018](#)), حداقل‌سازی مصرف آب آبیاری ([Ren et al., 2020](#));

زیرکوه به ترتیب ۲۳۷۵۲ و ۱۰۱۱۴ هکتار، با تولید ۲۷۸۰۱ و ۱۹۴۷۲ تن می‌باشد. در این منطقه گندم، جو، پنبه، سیب زمینی، چغندر قند، خربزه، هندوانه، یونجه و زعفران در محصولات زراعی و پسته، زرشک و عناب در محصولات باغبانی بیشترین سطح زیر کشت را دارند ([Agricultural Organization of South Khorasan, 2019](#)).

در شهرستان‌های قانات و زیرکوه برای استفاده در کشاورزی سالانه بیش از ۲۰۰ میلیون مترمکعب آب فقط از منابع زیرزمینی (چاه‌های عمیق) و حدود ۱۰۰ میلیون مترمکعب آب از منابع (قنوات، چشمه‌ها و چاه‌های نیمه‌عمیق) استحصال می‌شود، اما مسأله نگران‌کننده، منابع زیرزمینی هستند که هر ساله با افت شدید مواجه بوده و علاوه بر کاهش دبی، کیفیت آب استحصالی نیز کاهش یافته و هدایت الکتریکی آب به سرعت روند افزایشی دارد ([Agricultural Organization of South Khorasan, 2019](#)). با این وجود، مطالعه انجام شده آشکار ساخته است که خطرات جدی زیست‌محیطی منطقه را تهدید می‌کند ([Qasemipour et al., 2019](#)). از جمله عوامل زیست محیطی می‌توان به افزایش سطح زیرکشت، تغییر اقلیم، الگوی کشت نامناسب، پایین بودن راندمان آب و عملکرد محصول و افزایش جمعیت اشاره کرد. بنابراین، در صورتی که بشر بخواهد با چالش‌هایی که در آینده پیش روی او قرار دارد مقابله کند، باید سطح مصرف آب در بخش کشاورزی را تا سطح پایدار کاهش دهد ([Jones et al., 2016](#)).

ضرورت استفاده و تخصیص بهینه منابع آب و مطالعه دقیق‌تر نقش عوامل تأثیرگذار در مقدار کمی و کیفی آن امری بدیهی است. در این میان استفاده از شاخص‌ها و معیارهای جدید، مسیر حرکت در جهت برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه و پایدار منابع آب را هموارتر می‌سازد. در سال‌های اخیر چارچوب جدیدی که امکان تحلیل ارتباط بین مصارف و تخصیص منابع آب شیرین را فراهم می‌سازد تحت عنوان ردپای آب پیشنهاد شده است ([Zhuo et al., 2016](#)).

ردپای آب^۱، شاخصی برای نشان دادن حجمی از آب است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم برای تولید کالا مصرف می‌شود. ردپای آب آبی، به حجم آبی که در تولید محصول مورد استفاده قرار می‌گیرد (نیاز خالص) اشاره دارد. ردپای آب سبز، به سهم آب حاصل از بارندگی (مؤثر) مرتبط است. ردپای آب خاکستری، به حجم آب شیرین اطلاق می‌شود که برای رقیق‌سازی کودها و سموم استفاده

$$n = \frac{\frac{z^2 pq}{d^2}}{1 + \frac{1}{N} \left(\frac{z^2 pq}{d^2} - 1 \right)} \quad \text{معادله (۱)}$$

که در این فرمول، N: حجم جامعه آماری، n: حجم نمونه، Z: مقدار متغیر نرمال واحد استاندارد (در سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر ۱/۹۶)، P: مقدار نسبت صفت موجود در جامعه (در صورت در اختیار نبودن می‌توان آن را ۰/۵ در نظر گرفت که در این حالت مقدار واریانس به حداکثر مقدار خود می‌رسد)، q: درصد افرادی که فاقد آن صفت در جامعه هستند (q=1-P) و d: مقدار اشتباه مجاز پنج درصد می‌باشند.

محاسبه شاخص‌های آب مجازی

آب مجازی^۱ مقدار آبی است که یک فرآورده کشاورزی از ابتدایی‌ترین مرحله تولید مصرف می‌کند و از آن با عنوان‌هایی چون آب مجازی، آب تعبیه شده و یا آب بیرونی نیز یاد شده است. به‌منظور محاسبه آب مجازی و میزان بهروری آب کشاورزی از معادله‌های ۲ و ۳ استفاده شد (Fader et al., 2011):

$$SWDc = CWRc / Cyc \quad \text{معادله (۲)}$$

$$VW = 1 / SWD \quad \text{معادله (۳)}$$

که در آن، SWDc و CWRc: به‌ترتیب نیاز ویژه آب گیاه و نیاز خالص آبی (صرف نظر از بارش مؤثر)، Cyc: متوسط عملکرد محصول (t. ha⁻¹) و SWD: بهروری آب کشاورزی و VW: آب مجازی است.

برای برآورد نیاز خالص محصول (CWR) از نرم‌افزار استاندارد فائو (Cropwat) استفاده شد. برای این منظور اطلاعاتی شامل مشخصات مزارع منطقه از نظر موقعیت، نوع و عمق خاک، آمار سطح زیرکشت و میزان تولید هر محصول، روش‌های آبیاری مرسوم و بازده آبیاری (از طریق جهاد کشاورزی استان خراسان جنوبی)، طول فصل رشد، تاریخ کاشت و برداشت جمع‌آوری شد.

۲-۲- محاسبه شاخص‌های ردپای آب

ردپای آب آبی، سبز، خاکستری و سفید برای محصولات مختلف با استفاده از روابط زیر محاسبه شدند (Bazrafshan et al., 2019):

(Li et al., 2020) حداقل‌سازی ردپای آب آبی (Nouri et al., 2010) از MOP استفاده شده است.

در هر حال سخن اصلی این است که راه حل عبور از بحران باید راه حلی جامع‌نگر، هم از نظر حفظ منابع آب و هم از نظر تأمین منابع اقتصادی و ثبات اجتماعی باشد. با توجه به این مبانی، تحقیق حاضر با استفاده از اصول ردپای آب و آب مجازی طرح گردید تا بتوان زوایای پنهان مشکلات موجود در بهره‌برداری و مدیریت کلان سیستم آب و مدیریت منابع آب در منطقه را آشکار نمود و با تعیین الگوی کشت بهینه توسط برنامه‌ریزی چندهدفه راه‌حل مناسبی را جهت افزایش پایداری در منطقه جستجو کرد.

مواد و روش‌ها

موقعیت و شرایط منطقه مورد مطالعه

این مطالعه به‌منظور بهینه‌سازی الگوی کشت در راستای افزایش سود خالص و ردپای آب سبز و کاهش آب مجازی، ردپای آب آبی، ردپای آب سفید و خاکستری با استفاده از MOP در سطح شهرستان‌های قائنات و زیرکوه اجرا شد (شکل ۱). این منطقه در حد فاصل ۳۳ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۸ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۶۰ درجه و ۵۶ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. اقلیم حاکم بر این منطقه در تمام طبقه‌بندی‌های اقلیمی سردسیر است (Meteorology of South Khorasan Province, 2020). میانگین دمای سالانه در طول سال ۱۴ درجه سانتی‌گراد است. حداکثر و حداقل مطلق به‌ترتیب ۴۲ و ۲۸- درجه سانتی‌گراد بوده است. حداکثر متوسط رطوبت نسبی در بهمن ماه با ۶۵ درصد و حداقل آن در ماه تیرماه ۳۵ درصد است. متوسط بارش سالیانه قائنات ۱۸۰ میلی‌متر بوده و پرباران‌ترین شهرستان استان خراسان جنوبی می‌باشد. تحقیق حاضر از لحاظ میزان و درجه کنترل، غیرآزمایشی و توصیفی، همچنین از نظر نحوه گردآوری داده‌ها؛ میدانی و درنهایت، به لحاظ قابلیت تعمیم‌یافته‌ها، از نوع پیمایشی محسوب می‌شود. جامعه آماری تحقیق حاضر شامل زارعین خواهد بود. به‌منظور تعیین حجم نمونه از فرمول کوکران استفاده شد. فرمول اصلی محاسبه حجم نمونه کوکران نیز به‌صورت معادله ۱ است (Woolson et al., 1986).

(Feng et al., 2020).

همچنین Pe: مجموعه بارندگی مؤثر در طول دوره رشد گیاه (mm)،
ETc: تبخیر و تعرق گیاه (mm)، Y: عملکرد هر محصول (ton.ha⁻¹)
، α: درصد تلفات کودی نیتروژن، NAR: نرخ مصرف
کود برای هر گیاه، C_{max}: غلظت بحرانی نیتروژن (Kg.m⁻³)، C_{Nat}:
غلظت واقعی نیتروژن در منابع آب دریافت‌کننده (Kg.m⁻³)، Dt:
عمق آب آبیاری برای هر گیاه در طول فصل رشد (mm) و ۱۰ فاکتور
تبدیل واحد از mm به m³.ha⁻¹ می‌باشد. مقادیر Pe و ETc با استفاده
از روش فائو و با به‌کارگیری مدل CROPWAT محاسبه شد
(Rodriguez et al., 2015).

$$WF_{Green} = (Pe \times 10) / Y \quad (4)$$

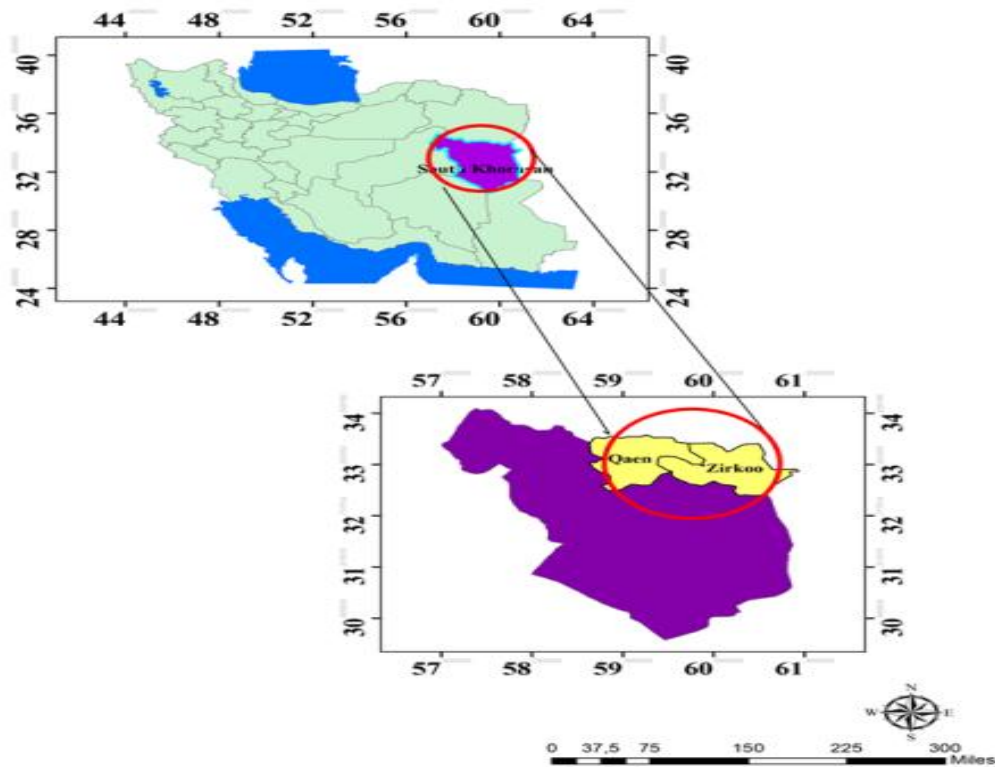
$$WF_{Blue} = ((ETc - Pe) \times 10) / Y \quad (5)$$

$$(6)$$

$$WF_{gray} = (\alpha \times NAR / C_{max} - C_{Nat}) \times (1 / Y)$$

$$WF_{White} = 10 \times (Dt - (ETc - Pe)) / Y \quad (7)$$

در روابط فوق، WF_{Green}: ردپای آب سبز، WF_{Blue}: ردپای آب سفید
آبی، WF_{gray}: ردپای آب خاکستری و WF_{White}: ردپای آب سفید
است و ردپای آب برحسب m³.ton⁻¹ محصول تولیدی می‌باشد.



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

Fig. 1- Study location within Iran and South Khorasan province

آبی، ردپای آب سفید و ردپای آب خاکستری است. واضح است که
معیارهای اندازه‌گیری در اهداف مذکور کاملاً متفاوت است. به‌عنوان
نمونه، هدف حداکثرسازی سود که با واحد پولی اندازه‌گیری شده
متفاوت از هدف حداقل‌سازی ردپای آب با واحد m³.ton⁻¹ است.
استفاده از روش‌های MOP مستلزم استفاده از روش‌های همگون-
سازی است. در مطالعه حاضر، جهت متجانس کردن اهداف

برنامه‌ریزی چندهدفه (MOP)

در این مطالعه، سعی در ارائه الگوی کشتی برای افزایش سود
کشاورزان توأم با کاهش اثرات زیست‌محیطی مصرف آب از راه
اصلاح الگوی کشت محصولات زراعی شده است. این موضوع
مستلزم توجه به اهداف متفاوت و گاهاً متضادی شامل حداکثرسازی
سود خالص، ردپای آب سبز و بهره‌وری آب و حداقل‌سازی ردپای آب

مشخص و میزان معین از مصرف آب است.

برای تشکیل توابع عضویت اهداف یاد شده، ابتدا باید مقادیر بهینه یا آرمانی برای هر یک از اهداف را تعیین نمود. منظور از مقدار بهینه، حداکثر سود (Z_1)، ردپای آب سبز (Z_2)، حداقل آب مجازی (Z_3)، ردپای آب آبی (Z_4)، ردپای آب خاکستری (Z_5) و ردپای آب سفید (Z_6) است. این مقادیر در قالب یک الگوی برنامه‌ریزی تک هدفه مشروط بر محدودیت‌ها (معادله ۴) و توابع هدف تعیین گردیدند (جدول ۱ و ۲).

الف) محدودیت‌های مدل:

۱- مجموعه محدودیت مربوط به مقدار زمین قابل دسترس: در این مجموعه محدودیت مقدار کل زمین تخصیص داده شده به محصولات در شرایط آبی نباید از کل زمین قابل کشت برای محصولات برای هر شهرستان (در هر منطقه) و در هر ماه بیشتر باشد.

معادله (۱۳)

$$\sum_{j=1}^m \text{LandSch}_{jm}^d \text{Land_Cl}_{Irrigated} V_j^d \leq \text{LandRHS Irrigated}^d \quad \forall d, m$$

۲- مجموعه محدودیت مربوط به حداکثر و حداقل مقدار زمین: در این مجموعه محدودیت حداکثر و حداقل مقدار زمین جهت کشت هر محصول در هر شهرستان ارائه شده است.

معادله (۱۴)

$$\sum_{j=1}^j \text{Land_Cl_} V_j^d \leq \text{Land_Cl_max}_j^d \quad \forall d, j$$

معادله (۱۵)

$$\sum_{j=1}^j \text{Land_Cl_} V_j^d \geq \text{Land_Cl_min}_j^d \quad \forall d, j$$

۳- مجموعه محدودیت مربوط به آب در منطقه: در این مجموعه محدودیت‌ها به موازنه سطوح متفاوت میزان مصرف آب آبیاری به تفکیک ماه، شهرستان، محصولات در الگوی کشت آبی و منابع آبی پرداخته شده است. در این میان توجه به عدم انحراف مدل از مقدار آب قابل دسترس برای منابع و ماه‌های مختلف مد نظر قرار گرفته است.

معادله (۱۶)

$$\text{Water_Cl_} V_{jm}^d = \left(\frac{\text{NetWaterReq}_{jm}^d}{\text{WaterEff}_j^d} \right) \text{Land_Cl_} V_j^d \quad \forall d, j, m$$

معادله (۱۷)

$$\text{Water_Cl_} V_{jm}^d \leq \text{WaterRHS}_m^d \quad \forall d, m$$

۴- مجموعه مربوط به عوامل اقتصادی: در این مجموعه

برنامه‌ریزی غیرخطی فازی چندهدفه از الگوی جونز و بارنز (Jones & Barnes, 2000) استفاده شده که شکل عمومی این الگو در روابط ۸ تا ۱۲ آمده است:

معادله (۸)

$$\max: \lambda = \left[\sum_{j=1}^m w_j \Delta_j^p \right]^{\frac{1}{p}}$$

معادله (۹)

S. t

معادله (۱۰)

$$\Delta_j (Z_j^{\max} - Z_j^{\min}) + Z_j(X^*) \leq Z_j^{\max} \quad \text{when } Z_j^{\min} \text{ is best}$$

معادله (۱۱)

$$Z_j(X^*) - \Delta_j (Z_j^{\max} - Z_j^{\min}) \geq Z_j^{\min} \quad \text{when } Z_j^{\max} \text{ is best}$$

معادله (۱۲)

$$A_{hi} X_i \leq b_h$$

$$X_i \leq 0$$

$$0 \leq \lambda \leq 1$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad t = 1, 2, 3 \quad j = 1, 2, \dots, 4 \quad h = 1, 2, \dots, p$$

در معادله‌های بالا، X_i : سطح زیر کشت محصول نام و Z_j : مسافت تا حد آرمانی هدف زام است. هدف زام عبارت است از متغیرهای تصمیم الگو و باید مقادیر بهینه آن‌ها به دست آید.

معادله ۹ تابع الگو است و در آن λ جمع موزون آرمانی اهداف مورد نظر در این مطالعه است. در این معادله، W_j : وزن هدف، Z_j : $(\sum_{j=1}^m w_j = 1, w_j \geq 0)$ عامل تعادلی اهداف است. این عامل نوع درجه جانشینی بین اهداف را مشخص می‌کند. در حالت P برابر ۱، بیشترین درجه جانشینی و در حالت P برابر ۳، اهداف از کمترین درجه جانشینی برخوردارند. معادله‌های ۲ و ۳ تابع عضویت اهداف یاد شده در الگوی مطالعه را مشخص می‌کنند. در این معادله‌ها، Z_j^{\max} و Z_j^{\min} : به ترتیب حداقل و حداکثر هدف زام، $Z_j(X^*)$: مقدار بهینه هدف X^* و اختلاف Z_j^{\max} و Z_j^{\min} : را به عنوان حد تحمل تعریف می‌کنند. مجموعه معادله‌های ۱ تا ۳ مشروط بر محدودیت‌های فنی معادله ۴ در نظر گرفته می‌شوند. در این معادله، A_{hi} : ضریب فنی آمین محصول برای آمین محدودیت (محدودیت تولیدی) و b_h : موجودی آمین محدودیت در الگو است. محدودیت‌های الگو شامل محدودیت زمین، محدودیت آب و محدودیت خاص روش حل مقید MOP شامل محدودیت سطح بازده برنامه‌ای

برای کلیه مناطق تحت بررسی که به صورت زیر فرموله می‌شود:

معادله (۲۵)

$$Z_1: \text{ObjectProfit}_v = \sum_{d=1}^d \text{NetBenefit_Cl_V}_j^d$$

که در آن، ObjectProfit_v : متغیر تابع هدف و مربوط به سود خالص کل در الگو است.

۲- حداکثرسازی آب سبز کلیه مناطق تحت بررسی یکی از اهداف کاهش مصرف آب است.

معادله (۲۶)

$$Z_3: \text{Object WFGreen}_v = \sum_{d=1}^d \sum_{j=1}^j \text{WFGreen_Cl_V}_j^d$$

که در آن، Object WFGreen_v : متغیر تابع هدف و مربوط به ردپای آب سبز الگو است.

۳- حداقل‌سازی آب مجازی کلیه مناطق تحت بررسی یکی از اهداف کاهش مصرف آب است.

معادله (۲۷)

$$Z_5: \text{ObjectVW}_v = \sum_{d=1}^d \sum_{j=1}^j \text{VW_Cl_V}_j^d$$

که در آن، Object VW_v : متغیر تابع هدف و مربوط به آب مجازی الگو است.

۴- حداقل‌سازی ردپای آب آبی کلیه مناطق تحت بررسی یکی از اهداف کاهش مصرف آب است.

معادله (۲۸)

$$Z_4: \text{ObjectWFblue}_v = \sum_{d=1}^d \sum_{j=1}^j \text{WFblue_Cl_V}_j^d$$

که در آن، Object WFblue_v : متغیر تابع هدف و مربوط به ردپای آب آبی الگو است.

۵- حداقل‌سازی ردپای آب خاکستری کلیه مناطق تحت بررسی یکی از اهداف زیست محیطی است.

معادله (۲۹)

$$Z_5: \text{Object WFgray}_v = \sum_{d=1}^d \sum_{j=1}^j \text{WFgray_Cl_V}_j^d$$

که در آن، Object gray_v : متغیر تابع هدف و مربوط به ردپای آب خاکستری الگو است.

۶- حداقل‌سازی ردپای آب سفید کلیه مناطق تحت بررسی یکی از اهداف زیست محیطی است.

معادله (۳۰)

$$Z_5: \text{Object WFwhite}_v = \sum_{d=1}^d \sum_{j=1}^j \text{WFwhite_Cl_V}_j^d$$

که در آن، Object WFwhite_v : متغیر تابع هدف و مربوط

محدودیت سود خالص نباید از سود خالص کنونی محصولات اصلی کشاورزی منطقه کمتر شود.

معادله (۱۹)

$$\text{NetBenefit_Cl_V}_j^d \geq \sum_{d=1}^d \text{NetBenefit_Crrrent}^d \quad \forall d$$

۵- مجموعه مربوط به ردپای آب سبز: در این مجموعه محدودیت ردپای آب سبز نباید از ردپای آب سبز در شرایط کنونی محصولات اصلی کشاورزی منطقه کمتر شود.

معادله (۲۰)

$$\text{WFGreen_Cl_V}_j^d \geq \sum_{d=1}^d \text{WFGreen_Crrrent}^d \quad \forall d$$

۶- مجموعه مربوط به آب مجازی: در این مجموعه محدودیت آب مجازی نباید از آب مجازی در شرایط کنونی محصولات اصلی کشاورزی منطقه بیشتر شود.

معادله (۲۱)

$$\text{VW_Cl_V}_j^d \geq \sum_{d=1}^d \text{SVW_Crrrent}^d \quad \forall d$$

۷- مجموعه مربوط به ردپای آب آبی: در این مجموعه محدودیت ردپای آب آبی نباید از ردپای آب آبی در شرایط کنونی محصولات اصلی کشاورزی منطقه بیشتر شود.

معادله (۲۲)

$$\text{WFblue_Cl_V}_j^d \geq \sum_{d=1}^d \text{WFblue_Crrrent}^d \quad \forall d$$

۸- مجموعه مربوط به ردپای آب خاکستری: در این مجموعه محدودیت ردپای آب خاکستری نباید از ردپای آب خاکستری در شرایط کنونی محصولات اصلی کشاورزی منطقه بیشتر شود.

معادله (۲۳)

$$\text{WFgray_Cl_V}_j^d \leq \sum_{d=1}^d \text{WFgray_Crrrent}^d \quad \forall d$$

۹- مجموعه مربوط به ردپای آب سفید: در این مجموعه محدودیت ردپای آب سفید نباید از ردپای آب سفید در شرایط کنونی محصولات اصلی کشاورزی منطقه بیشتر شود.

معادله (۲۴)

$$\text{WFwhite_Cl_V}_j^d \leq \sum_{d=1}^d \text{WFwhite_Crrrent}^d \quad \forall d$$

ب) توابع هدف مدل تدوین الگوی کشت منطقه اهداف متفاوتی از مدل کشت ارائه شده می‌توان متصور شد. به علت انعطاف در مدل و تقابل آن با افراد تصمیم‌گیر می‌توان اهداف متفاوت اقتصادی و محیط زیستی در مدل مورد نظر گنجانده شود، که در ادامه شرح داده شده است.

۱- حداکثرسازی سود خالص حاصل از فعالیت‌های کشاورزی

$$\Delta(i) = \sum_{j=1}^M W_j \Delta_j(i) \quad \text{معادله (۳۳)}$$

مقادیر وزن اهداف باید حداکثر و حداقل باشد و بر این اساس وزن اهداف به صورت زیر تعریف می‌گردد (Chiappero, 1996):

$$W_j = \frac{\ln(\frac{1}{\Delta_j})}{\sum_{j=1}^m \ln(\frac{1}{\Delta_j})} \quad \text{معادله (۳۴)}$$

در معادله‌های فوق، W_j : تابعی معکوس از میانگین سطح اهداف نسبت به Z است. تابع لگاریتمی نیز بیانگر آن است که اولویت هر الگوی بهینه تابعی غیرخطی از اهداف مورد استفاده است. به دلیلی غیرخطی بودن تابع مسافت مرکب آرمانی جاری، از روش برنامه‌ریزی غیرخطی برای حل آن استفاده شد. به این ترتیب، با توجه به فازی‌سازی اهداف مطالعه و تلاش تحقق یک آرمان کلی براساس حداکثر کردن مقدار تابع مسافت مرکب آرمانی آن‌ها، ساختار مدل تصمیم‌گیری به شکل یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی فازی چندهدفه که امکان مصالحه چند هدف را به طور توأم، مشروط بر محدودیت منابع فراهم می‌نماید طراحی شد. در نهایت، الگوریتم‌های ریاضی الگوی برنامه‌ریزی منطقه‌ای مورد استفاده در محیط بسته نرم‌افزاری GAMS LICENCE-24.3.7 توسعه داده شد (GAMS, 2010).

نتایج و بحث

میزان شاخص‌های ردپای آب، حسابداری آب و آب مجازی محصولات در الگوی کشت جاری منطقه

در الگوی کشت جاری منطقه، گندم و جو محصولات اصلی الگوی کشت منطقه مطالعاتی بوده و ۷۰ درصد سطح کشت منطقه را پوشش می‌دهند. محصولات پنبه، چغندر، خربزه، هندوانه، سیب-زمینی و زعفران نیز ۳۰ درصد سطح الگوی کشت منطقه مطالعه را تشکیل داده‌اند. جدول ۳ میزان ردپای آب، آب مجازی و بهره‌وری آب را در الگوی کشت جاری محصولات نشان داده است. نتایج نشان داد که شاخص‌های آب مجازی و اجزای ردپای آب در شهرستان قائنات نسبت به شهرستان زیرکوه کمتر بوده است. باید توجه داشت که مقدار آب مجازی مورد نیاز برای تولید محصول با توجه به شرایط اقلیمی، فرهنگی و مدیریتی در هر منطقه متفاوت است. این مسئله موجب می‌شود که مطالعات برآورد شاخص‌های مجازی در هر منطقه امری ضروری باشد (Golabi et al., 2020). بیشترین میزان آب مجازی در الگوی کشت جاری محصولات به ترتیب در مزارع پنبه، گندم، یونجه،

به ردپای آب سفید الگو است.

پس از مشخص شدن الگوی مورد استفاده برای بهینه‌سازی فعالیت‌ها در چارچوب تأمین آرمان‌های یاد شده، باید محدودیت‌ها و معیارهای تصمیم‌گیری برای رسیدن به اهداف مشخص در هر گزینه را مشخص کرد. وابسته به ترجیحات تصمیم‌گیر، وزن‌هایی بر حسب اهمیت اهداف رقیب به معیارهای تصمیم‌گیری داده می‌شود (Chakraborty et al., 2002). با فرض اینکه $n \in [1, N]$ مناطق (شهرستان‌ها) و $j \in [1, M]$ که Z_j^n شماره معیار (هدف) مورد نیاز را مشخص می‌کند و همچنین Z_j^n مقداری است که معیار Z برای به‌بردار n اختیار می‌کند، آنگاه روش کار برای به‌دست آوردن تابع عضویت شاخص Z را برای منطقه n در شرایطی که کمترین مقدار شاخص به‌عنوان حد آرمانی در نظر گرفته می‌شود (در اینجا، سود خالص و ردپای آب سبز و کاهش آب مجازی، ردپای آب آبی، ردپای آب سفید و ردپای آب خاکستری) را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود (Berenger & Verdier-Chouchane, 2019; Mardani Najafabadi, 2007; Marzban et al., 2020a,b):

معادله (۳۱)

$$\Delta_j(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_j^n \leq Z_j^{\min}, \\ \frac{Z_j^{\max} - Z_j^n}{Z_j^{\max} - Z_j^{\min}} & \text{if } Z_j^{\max} \leq Z_j^n \leq Z_j^{\min}, \\ 0 & \text{if } Z_j^n \geq Z_j^{\min}, \end{cases}$$

که در آن، تابع $\Delta_j(n)$: درجه برخورداری n امین بهره‌بردار را نسبت به معیار Z اندازه‌گیری می‌کند. به همین ترتیب، اگر بیشترین مقدار اهداف به‌عنوان حد آرمانی تعریف شود (در اینجا، بازده برنامه‌ای و اشتغال) تابع عضویت $\Delta_j(n)$ به صورت زیر تعریف خواهد شد:

معادله (۳۲)

$$\Delta_j(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z_j^n \leq Z_j^{\max}, \\ \frac{Z_j^n - Z_j^{\min}}{Z_j^{\max} - Z_j^{\min}} & \text{if } Z_j^{\min} \leq Z_j^n \leq Z_j^{\max}, \\ 0 & \text{if } Z_j^n \geq Z_j^{\min}, \end{cases}$$

توابع یاد شده توابعی افزایشی از درجه برخورداری الگو بوده و مقادیر بین صفر و یک اختیار می‌کنند. در مطالعه حاضر این توابع عضویت برای رتبه‌بندی اهداف مدنظر بهره‌برداران مطالعه جاری استفاده شد و با استفاده از روش میانگین وزنی هندسی برای توابع عضویت اهداف مناطق به صورت زیر تعیین گردید:

جو و زعفران مشاهده شد. مجموع حجم ردپای آب در تولیدات محصولات اصلی منطقه قائنات و زیرکوه به ترتیب ۳۶۸ و ۶۶ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد. همچنین مجموع حجم ردپای آب آبی، خاکستری و سفید به قائنات و زیرکوه به ترتیب ۳۴۴ و ۵۶ میلیون مترمکعب در سال (در حدود ۹۳ و ۸۳ درصد از حجم ردپای آب) است (جدول ۳).

جدول ۱- فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف مجموعه‌ها و متغیره

Table 1- List of symbols used in the model to define sets and variables

شرح Description	نماد Symbol	نوع Type
سطح دوم تقسیمات سیاسی (شهرستان) Second level of political divisions (County)	$d \in \{1, 2, \dots, D\}$	
گروه اصلی محصولات The main group of products	$j \in \{1, 2, \dots, j\}$	مجموعه‌ها Sets
ماه‌های سال Months of the year	$m \in \{1, 2, \dots, m\}$	
مقدار زمین تخصیص داده شده به محصول j در شهرستان d به محصولات آبی The amount of land allocated to product j in the county d to irrigated products	$Land_Cl_{Irrigated} V_j^d$	
مقدار آب تخصیص داده شده به ماه m برای شهرستان d The amount of water allocated to the month m for the county d	$Water_Cl_V_{jm}^d$	
سود خالص کل برای کشت محصول j برای شهرستان d Total net profit for crop production j for county d	$NetBenefit_Cl_V_j^d$	
آب مجازی برای کشت محصول j برای شهرستان d Virtual water for crop cultivation j for county d	$SWD_Cl_V_j^d$	
ردپای آب سبز برای کشت محصول j برای شهرستان d Green water footprint for crop cultivation j for county d	$WFGreen_Cl_V_j^d$	
ردپای آب آبی برای کشت محصول j برای شهرستان d Water footprint for crop cultivation j for county d	$WFBlue_Cl_V_j^d$	
ردپای آب خاکستری برای کشت محصول j برای شهرستان d Gray water footprint for crop cultivation j for the county d	$WFGray_Cl_V_j^d$	
ردپای آب سفید برای کشت محصول j برای شهرستان d White water footprint for crop cultivation j for county d	$WFwhite_Cl_V_j^d$	
تابع هدف و مربوط به سود خالص کل در الگو Objective function and related to the total net profit in the template	$ObjectProfit_v$	متغیرها Variables
ردپای آب مجازی کل برای کشت محصول j برای شهرستان d Total virtual water footprint for crop cultivation j for county d	$SWD_Cl_V_j^d$	
تابع هدف و مربوط به آب مجازی Objective function related to virtual water	$ObjectSWD_v$	
ردپای آب سبز کل برای کشت محصول j برای شهرستان d Total green water footprint for crop cultivation j for county d	$WFGreen_Cl_V_j^d$	
تابع هدف و مربوط به آب سبز Target and green water function	$ObjectWFGreen_v$	
ردپای آب آبی کل برای کشت محصول j برای شهرستان d Total water footprint for crop cultivation j for county d	$WFBlue_Cl_V_j^d$	
تابع هدف و مربوط به ردپای آب آبی Objective function related to blue water footprint	$ObjectWFBlue_v$	
ردپای آب خاکستری کل برای کشت محصول j برای شهرستان d Total gray water footprint for crop cultivation j for county d	$WFGray_Cl_V_j^d$	
تابع هدف و مربوط به ردپای آب خاکستری Objective function related to gray water footprint	$ObjectWFGray_v$	
ردپای آب سفید کل برای کشت محصول j برای شهرستان d Total white water footprint for crop cultivation j for county d	$WFwhite_Cl_V_j^d$	
تابع هدف و مربوط به ردپای آب سفید Target function and related to white water footprint	$ObjectWFwhite_v$	

جدول ۲- فهرست نمادهای مورد استفاده در مدل برای تعریف پارامترها
Table 2- List of symbols used in the model to define parameters

شرح Description	نماد symbol
سود خالص Net profit	NB
آب مجازی Virtual water	SWD
ردپای آب سبز Green water footprint	WF ^{Green}
ردپای آب آبی Blue water footprint	WF ^{Blue}
ردپای آب خاکستری Gray water footprints	WF ^{Gray}
ردپای آب سفید White water footprint	WF ^{White}
ضریب کاربری زمین برای محصول z ماه m در شهرستان d Land use coefficient for crop j , month m in county d	LandSch _{jm} ^d
مقدار زمین قابل کشت در شهرستان d محصولات آبی Amount of arable land in the county d Irrigated crops	LandRHS Irrigated ^d
مقدار زمین قابل کشت در شهرستان d محصولات آبی و دیم Amount of arable land in the county d irrigated and rainfed crops	LandRHS Rainfed ^d
حداکثر سطح زیر کشت هر محصول در منطقه Maximum area under cultivation of each crop in the area	Land_CI_max _j ^d
حداقل سطح زیر کشت هر محصول در منطقه Minimum area under cultivation of each crop in the area	Land_CI_min _j ^d
راندمان آبیاری محصول z در شهرستان d Irrigation efficiency of crop j in county d	WaterEff _j ^d
مقدار آب خالص مورد نیاز برای کشت یک هکتار از محصول z برای شهرستان d The amount of pure water required to cultivate one hectare of crop j for county d	NetWaterReq _{jm} ^d
مقدار آب قابل دسترس در ماه m برای شهرستان d The amount of water available per month m for the county d	WaterRHS _m ^d
سود خالص شرایط کنونی برای کشت محصول z برای شهرستان d Net profit Current conditions for crop cultivation j for county d	NetBenefitCrrrent ^d
آب مجازی شرایط کنونی برای کشت محصول z برای شهرستان d Virtual water Current conditions for crop cultivation j for county d	SWD_Crrrent ^d
ردپای آب سبز شرایط کنونی برای کشت محصول z برای شهرستان d Green water footprint Current conditions for crop cultivation j for county d	WFGreen_Crrrent ^d
ردپای آب آبی شرایط کنونی برای کشت محصول z برای شهرستان d Trace of irrigated water Current conditions for crop cultivation j for county d	WFBlue_Crrrent ^d
ردپای آب خاکستری شرایط کنونی برای کشت محصول z برای شهرستان d Gray water footprint Current conditions for crop cultivation j for county d	WFGray_Crrrent ^d
ردپای آب سفید شرایط کنونی برای کشت محصول z برای شهرستان d White water footprint Current conditions for crop cultivation j for county d	WFwhite_Crrrent ^d

دو منطقه از طریق آب آبیاری تأمین می‌شود، ردپای آب آبی بیشتر از ردپای آب سبز بوده که نشان‌دهنده اتکای تولید محصول زراعی بر استفاده از منابع آبی سطحی و زیرزمینی است. لذا با توجه به خشکسالی‌های اخیر و کمبود منابع آبی باید از منابع آب به بهترین

بیشترین میزان ردپای آب سبز در الگوی کشت جاری به ترتیب به محصولات زعفران، گندم و جو و بیشترین میزان ردپای آب آبی، خاکستری و سفید نیز به ترتیب در محصولات زعفران، پنبه، گندم و یونجه مشاهده شد. با توجه به اینکه بیشتر نیاز آبی محصولات در هر

نحو استفاده نمود و کشت محصولات با نیاز آبی کمتر و سود بیشتر مورد برنامه‌ریزی قرار گیرد (Mesgaran et al., 2019; Sun et al., 2017).

جدول ۳- میزان آب مجازی، ردپای آب و سود خالص در الگوی کشت جاری محصولات در منطقه قائنات و زیرکوه
Table 3- Amount of virtual water, water footprint and net benefit in the current irrigated cropping patterns

	سود خالص NB (\$·ha ⁻¹)	آب مجازی VW (m ³ ·kg ⁻¹)	ردپای آب سبز WF _{Green} (m ³ ·t ⁻¹)	ردپای آب آبی WF _{Blue} (m ³ ·t ⁻¹)	ردپای آب خاکستری WF _{Grey} (m ³ ·t ⁻¹)	ردپای آب سفید WF _{White} (m ³ ·t ⁻¹)
قائنات Qaenat						
گندم Wheat	396	2530	364	1744	62	399
جو Barley	257	1465	302	629	42	950
پنبه Cotton	314	9040	160	6075	100	2075
سیب زمینی Potato	3392	585	10	393	3	126
چغندر قند Sugar beet	866	366	6	246	5	126
خربزه Melon	1184	382	18	245	3	45
هندوانه Watermelon	304	407	15	230	3	59
یونجه Alfalfa	984	2053	185	1230	29	1127
زعفران Saffron	3714	1040	253600	583058	200	3279125
زیرکوه Zirkoh						
گندم Wheat	180	3357	385	1930	57	170
جو Barley	178	1588	337	1093	37	881
پنبه Cotton	275	12209	178	8242	105	4409
سیب زمینی Potato	3045	766	10	528	3	261
چغندر قند Sugar beet	844	491	7	339	5	220
خربزه Melon	1946	480	25	330	3	64
هندوانه Watermelon	304	530	22	318	3	147
یونجه Alfalfa	1125	2576	212	1764	29	593
زعفران Saffron	3714	1456	278200	886796	210	498560

NB: سود خالص، VW: آب مجازی، WF_{Green}: ردپای آب سبز، WF_{Blue}: ردپای آب آبی، WF_{Grey}: ردپای آب خاکستری، WF_{White}: ردپای آب سفید

منبع: یافته‌های تحقیق

NB: net profit, VW: virtual water, WF_{Green}: green water footprint, WF_{Blue}: blue water footprint, WF_{Grey}: gray water footprint, WF_{White}: white water footprint
Source: Research findings

(et al., 2020). بنابراین، به‌جای مصرف منابع آب کمیاب، در تولید محصولاتی که مصرف آب آن‌ها زیاد است، می‌توان محصولاتی با مصرف آب پایین‌تر تولید کرد و از فشار بیش از حد بر منابع آب

تعیین الگوی کشت مبتنی بر آب مجازی و اجزای ردپای آب، راه حل مناسبی برای بحران آب به‌ویژه در مناطق دارای آب و هوای خشک می‌باشد که کشاورزی آن‌ها بستگی به آب آبیاری دارد (Feng).

نسبت به الگوی جاری افزایش داشت (جدول ۵). این افزایش سطح زیرکشت در الگوی MOP در تمام اهداف مورد بررسی مشاهده شد که نشان‌دهنده کم بودن آب مجازی، ردپای آب آبی، خاکستری و سفید و بالا بودن سود این محصولات در بین محصولات کشت آبی منطقه بود.

از دیگر موارد قابل توجه الگوی کشت بهینه پیشنهادی، کاهش ۵۰ درصدی سطح زیر کشت پنبه، یونجه و هندوانه و ۳۹ درصدی چغندرکند در الگوی MOP نسبت به الگوی جاری شهرستان قائنات بود. همچنین تغییرات سطح زیر کشت محصولات در الگوی MOP شهرستان زیرکوه آهنگ منظمی نداشت (جدول ۴)، به‌طوری‌که در الگوی MOP سطح زیرکشت گندم، جو و پنبه ۵۰ درصد نسبت به الگوی جاری کاهش یافت. این کاهش‌ها در الگوی کشت MOP در تمامی اهداف مشاهده شد که بیانگر بالا بودن شاخص‌های مؤثر بر ردپای آب و پایین بودن سود این محصولات نسبت به سایر محصولات منطقه است (جدول ۳). (Chouchane et al., 2020) گزارش کردند محصولاتی که ردپای آب بالا به‌ویژه ردپای آب آبی بالایی دارند، میزان سطح زیرکشت آن‌ها در الگوی کشت بهینه کاهش می‌یابد. جهت کاهش اثرات ناشی از تولید محصولات بر اکوسیستم باید سطح کشت محصولات کشاورزی که اثرات محیطی بالایی دارند کاسته شده و در عوض با تغییراتی در الگوی کشت، استراتژی به‌سوی تولید محصولاتی با اثرات کمتر بر اکوسیستم تغییر داده شود. تدوین الگوی کشت می‌تواند بهره‌وری از ظرفیت‌های بخش کشاورزی را به حداکثر رسانده و در عین حال پیامدهای مخرب تولید محصول را تقلیل دهد (Inas et al., 2017). همچنین این محققین بیان کردند که تغییر الگوی کشت می‌تواند به‌طور قابل توجهی کمبود آب را کاهش و میزان سود را افزایش دهد. همچنین با توجه به مغایرت الگوی پیشنهادی با الگوی جاری شهرستان‌ها، می‌توان اظهار کرد که طراحی یک الگوی کشت مناسب برای هر منطقه به‌طور مجزا امری ضروری است و نمی‌توان الگوی کشت یک منطقه را به مناطق دیگر تعمیم داد.

خوداری نمود (Gao et al., 2020).

همچنین بیشترین سودخالص در منطقه در الگوی کشت جاری محصولات به‌ترتیب مربوط به زعفران، سیب‌زمینی، خربزه و یونجه بود (جدول ۳). به‌طور کلی، نتایج مطالعه الگوی کشت جاری در منطقه بیان‌گر این بود، محصولاتی که سود بالایی دارند میزان آب مجازی و ردپای آب قابل توجهی نیز دارند. به‌دلیل مصرف بالای منابع آب در بخش کشاورزی، نظام‌های کشاورزی باید به‌گونه‌ای بازطراحی شوند که در عین به‌کارگیری راهکارهای مناسب مدیریتی به‌منظور کاهش آب مجازی و اجزای ردپای آب آبی، سفید و خاکستری و افزایش استفاده از ردپای آب سبز سود بیشتری نیز عاید کشاورزان منطقه کنند (Nemecek et al., 2011; Nikkhah et al., 2019). با توجه به اینکه کشاورزی در منطقه قائنات و زیرکوه به‌شدت به آب آبیاری وابسته است، لذا به نظر می‌رسد کمبود منابع آب، علاوه‌بر کاهش روند توسعه کشاورزی در حال حاضر، باعث خسارات و زیان‌هایی نیز در آینده خواهد شد بنابراین، لازم است از هم‌اکنون با اتخاذ تدابیر اصولی و معقول، راهکارهایی را برای عبور از بحران‌های احتمالی آینده اندیشید. بهبود نظام‌های بهره‌وری آب کشاورزی و راهکارهای راهبردی آب مجازی و ردپای آب در جهت مدیریت بهتر منابع آب، پیشنهاد می‌گردد. رویکرد جدید طراحی الگوی کشت منطقه نیز باید با لحاظ کردن آب مجازی و اجزای ردپای آب تعیین شود.

سطح زیر کشت پیشنهادی محصولات در الگوهای کشت با اهداف مختلف

میزان آب مجازی و اجزای ردپای آب محصولات در الگوهای کشت مختلف پیشنهادی به تفکیک محصول و اهداف مورد مطالعه در جدول ۴ ارائه شده است. مجموع سطح زیرکشت الگوهای کشت محصولات در شهرستان‌های قائنات و زیرکوه در تمامی اهداف نسبت به الگوی جاری محصولات کمتر بود که دلیل آن محدودیت منابع آب و بالا بودن میزان آب مجازی، ردپای آب خاکستری و سفید در منطقه به‌ویژه در شهرستان زیرکوه است. در الگوی کشت MOP محصولات شهرستان قائنات، سطح زیرکشت سیب‌زمینی ۷۰، خربزه ۱۰ و جو ۴ درصد نسبت به الگوی جاری افزایش یافت (جدول ۴). همچنین ارزیابی الگوی MOP نسبت به الگوی جاری به شهرستان زیرکوه نشان داد سطح زیر کشت خربزه ۸۸ درصد، چغندر ۸۰، سیب‌زمینی و هندوانه ۳۳، یونجه ۵ درصد و زعفران ۳ درصد در الگوی MOP

جدول ۴- سطح زیر کشت محصولات کشاورزی در الگوی کشت محصولات شهرستان های قائنات و زیرکوه به تفکیک اهداف مورد مطالعه (واحد: هکتار)

Table 4- Area under cultivation of agricultural products in the cultivation cropping pattern in Ghaenat and Zirkoh counties according to the studied objectives (unit: ha)

محصول Crop	حداکثرسازی الگوی جاری Current Pattern	سود خالص MNB	حداقل سازی آب مجازی MVW	حداکثرسازی ردپای آب سبز MWF ^{Green}	حداقل سازی ردپای آب آبی MWF ^{Blue}	حداقل سازی ردپای آب سبز MWF ^{Grey}	حداقل سازی ردپای آب سفید MWF ^{White}	برنامه ریزی چند هدفه MOP
گندم Wheat	3808	3773	3800	3800	3725	3800	3800	3800
جو Barley	2429	2481	2523	2523	2660	2523	2523	2523
پنبه cotton	800	400	400	400	400	400	400	400
سیب زمینی potato	57	193	193	193	193	193	193	193
قائنات Qaenat چغندر قند Sugar beet	626	835	376	376	818	376	376	376
خریزه Melon	529	580	593	593	265	593	593	593
هندوانه Watermelon	83	42	42	42	42	42	42	42
یونجه Alfalfa	416	416	208	208	208	208	208	208
زعفران Saffron	84	84	84	84	84	84	84	84
کل Total	8832	8804	8219	8219	8395	8219	8219	8219
زیرکوه Zirkoh گندم Wheat	1397	1054	699	699	699	699	699	699
جو Barley	586	500	293	293	500	293	293	293
پنبه cotton	331	277	166	166	166	166	166	166
سیب زمینی potato	6	9	9	9	9	9	9	9
چغندر قند Sugar beet	1	5	5	5	5	5	5	5
خریزه Melon	9	81	81	81	81	81	81	81
هندوانه Watermelon	357	536	536	536	536	536	536	536
یونجه Alfalfa	172	190	180	182	150	182	182	182
زعفران Saffron	34	35	36	35	35	35	35	35
کل Total	2893	2687	2004	2006	2181	2006	2006	2006

Current: الگوی جاری، MNB: حداکثرسازی سود خالص، MVW: حداقل سازی آب مجازی، MWF^{Green}: حداکثرسازی ردپای آب سبز، MWF^{Blue}: حداقل سازی ردپای آب آبی، MWF^{Grey}: حداقل سازی ردپای آب خاکستری، MWF^{White}: حداقل سازی ردپای آب سفید، MOP: برنامه ریزی چند هدفه

Current: MNB: net profit maximization, MVW: virtual water minimization, MWF^{Green}: green water footprint maximization, MWF^{Blue}: blue water footprint minimization, MWF^{grey}: gray water footprint minimization, MWF^{White}: footprint minimization white water, MOP: multipurpose planning

میلیون مترمکعب آب را نسبت به الگوی جاری در منطقه ذخیره کرد. میزان ردپای آب خاکستری نیز در الگوهای آب مجازی، ردپای آب سبز، خاکستری، سفید و مدل MOP محصولات به میزان 109797 $m^3 \cdot ton^{-1}$ نسبت به الگوی جاری کاهش یافت. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد با اجرای الگوی کشت بهینه، کاهش آلودگی را نسبت به الگوی کشت جاری و شاهد کاهش ۱۸ درصدی آلودگی در منطقه خواهیم بود. همچنین میزان ردپای آب سفید در الگوهای ردپای آب سبز، آبی، خاکستری و سفید به میزان 368779 $m^3 \cdot ton^{-1}$ نسبت به الگوی جاری کاهش یافت. با افزایش سطح زیرکشت محصولاتی مانند سیبزمینی، خربزه و جو در قائنات و خربزه، چغندرقد، سیبزمینی، هندوانه، یونجه و زعفران در زیرکوه و کاهش سطح زیرکشت گندم و جو نسبت به الگوی جاری، میزان آب مجازی و ردپای آب کاهش یافت. بنابراین، اصلاح الگوی کشت محصولات نیز در منطقه که بر پایه کاهش مصرف منابع آب باشد، ضروری به نظر می‌رسد. همچنین بررسی و مدیریت اجزای ردپای آب می‌تواند به عنوان یکی از عوامل دستیابی به تولید پایدار مدنظر قرار گیرد

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، الگوی بهینه کشت محصولات زراعی منطقه زیرکوه و قائنات بر اساس میزان آب مجازی و بهره‌وری آب تعیین شد. نتایج این مطالعه نشان داد با در نظر گرفتن الگوی کشت MOP سطح زیر کشت محصولات سیبزمینی، خربزه، جو در شهرستان قائنات و سطح زیر کشت محصولات خربزه، چغندرقد، سیبزمینی، هندوانه، یونجه و زعفران افزایش قابل توجهی داشت. با توجه به این موضوع برای کاهش میزان ردپای آب به‌ویژه ردپای آبی در منطقه مورد مطالعه سیاست‌های کلی باید به سمت افزایش سطح زیر کشت این محصولات و کاهش سطح زیر کشت پنبه، یونجه، هندوانه، چغندرقد در شهرستان قائنات و گندم، جو و پنبه در منطقه زیرکوه باشد؛ زیرا میزان تولید محصولات کشاورزی یک منطقه باید با توجه به اهداف کسب حداکثر سود و کاهش میزان ردپای آب مجازی و ردپای آب انجام شود. به بیان دیگر، تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب گیاهان زراعی مناطق مختلف باید بر اساس هر دوی مسائل اقتصادی و منابع آب باشد.

متغیرهای مهم در تعیین الگوی کشت

درآمد اقتصادی نقش مهمی در رونق و توسعه کشاورزی دارد. به طوری که در این مطالعه سود خالص کلیه الگوهای محصولات آبی به جز الگوی حداکثرسازی سود خالص، در حد الگوی جاری باقی ماند. در الگوی حداکثرسازی سود محصولات آبی به ازای 702410 دلار سود خالص بیشتر در کل منطقه، میزان آب مجازی ۱۶ درصد، ردپای آب آبی ۲ درصد و ردپای آب خاکستری ۱۱ درصد نسبت به وضع موجود کاهش یافت. این افزایش سود و کاهش آب مجازی و اجزای ردپای آب در الگوی پیشنهادی MOP محصولات شهرستان قائنات نسبت به شهرستان زیرکوه بیشتر بود (جدول ۵). [Nouri et al.](#) (2020) گزارش کردند که با تعیین الگوی کشت بهینه در منطقه می‌توان ردپای آب آبی را $4/5$ درصد کاهش و میزان سود را بین ۳ تا ۵۰ درصد افزایش داد. این در حالی است که با استفاده از مالچ و آبیاری قطره‌ای میزان ردپای آب فقط $1/5$ درصد کاهش خواهد یافت. نتایج نشان داد در کلیه الگوهای مورد بررسی، امکان کاهش آب مجازی و اجزای ردپای آب وجود دارد. بیشترین کاهش آب مجازی مربوط به الگوها با اهداف آب مجازی، ردپای آب خاکستری، ردپای آب سفید و MOP بود که با اجرای این الگوها آب مجازی به میزان 8591511 $m^3 \cdot kg^{-1}$ و در حدود ۲۶ درصد نسبت به الگوی جاری کاهش خواهد یافت.

[Delpasand et al.](#) (2020) گزارش کردند که مصرف آب مجازی با توجه به پایین بودن بهره‌وری آب کشاورزی در ایران بسیار بالاست، بنابراین در شرایط کنونی و خشکسالی‌های اخیر، باید بتوان میزان آب مجازی را کمتر کرد. به‌واقع در این مطالعه با کاهش سطح زیرکشت پنبه، یونجه، چغندرقد و هندوانه در منطقه قائنات و گندم، جو و پنبه در منطقه زیرکوه، در مدل MOP می‌توان مقدار ۲۶ درصد آب مورد نیاز برای تولید محصولات را ذخیره کرد. بیشترین کاهش ردپای آب آبی در کشت محصولات مربوط به الگوها با اهداف حداقل‌سازی ردپای آب آبی، ردپای آب خاکستری، ردپای آب سفید و MOP با کاهش 4152855 $m^3 \cdot t^{-1}$ حدود چهار درصد نسبت به الگوی جاری بود. با توجه به اینکه در شهرستان‌های مذکور برای تولید محصولات کشاورزی بیش از 305 میلیون مترمکعب از سفره‌های منابع آب زیرزمینی آب برداشت می‌شود ([Falahat et al.](#), 2019). بنابراین، با اجرای الگوی کشت MOP می‌توان در حدود ۱۳

محیطی بر منابع آب، الگوی کشت مناسب با شرایط منطقه را فراهم نماید. بنابراین، تعیین الگوی کشت بهینه در منطقه می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد پایدار در مدیریت منابع آبی مطرح باشد که ریسک‌های اقتصادی و محیطی را کاهش داده، و در عین حال وضعیت مطلوبی از لحاظ اقتصادی برای منطقه فراهم کند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت مالی در چاپ مقاله که از محل اعتبارات معاونت پژوهشی دانشگاه زابل به‌شماره IR-UOZ-GR-9360 تأمین شده، سپاسگزاری می‌گردد.

مطالعه شاخص‌های اقتصادی، آب مجازی، ردپای آب سبز، آبی خاکستری و سفید در الگوی کشت زیرکوه و قائنات نشان داد که تأکید بر معیارهای مختلف نتایج متفاوتی را در بر دارد. لذا تصمیم‌گیری و استفاده از شاخص‌های مختلف باید منطبق بر اهمیت هر گزینه در منطقه مورد مطالعه صورت گیرد. همچنین مدل نهایی این مطالعه به کشاورزان این امکان را می‌دهد که همزمان با حفظ درآمد اقتصادی، ملاحظات محیطی از جمله ردپای آب را نیز برای کاهش اثرات سوء بر منابع آبی را در الگوی کشت لحاظ کنند. واضح است در مناطقی که مصرف نهاده‌ها شیمیایی بیش از حد است، حداقل‌سازی ردپای آب خاکستری به‌عنوان یکی از اهداف در مدل MOP قادر است با در نظر گرفتن هر دوی اهداف اقتصادی و

References

- Afshar, A., Tavakoli, M.A., and Khodaghali, A., 2020. Multi-objective hydro-economic modeling for sustainable groundwater management. *Water Resources Management* 1-15.
- Agricultural organization of South Khorasan., 2016. <https://kj-agrijahad.ir/>. (In Persian)
- Amiri, Z., Asgharipour, M.R., Campbell, D.E. and Armin, M., 2019. A sustainability analysis of two rapeseed farming ecosystems in Khorramabad, Iran, based on emergy and economic analyses. *Journal of Cleaner Production* 226: 1051-1066.
- Antonelli, M., and Ruini, L.F., 2015. Business engagement with sustainable water resource management through water footprint accounting: the case of the Barilla Company. *Sustainability* 7(6): 6742-6758.
- Bazrafshan, O., Etedali, H.R., Moshizi, Z.G.N., and Shamili, M., 2019. Virtual water trade and water footprint accounting of Saffron production in Iran. *Agricultural Water Management* 213:368-374.
- Berenger V., and Verdier-Chouchane, A., 2007. Multidimensional measures of well-being: Standard of living quality of life across countries. *World Development* 35: 1259- 76.
- Chouchane, H., Krol, M.S., and Hoekstra, A.Y., 2020. Changing global cropping patterns to minimize national blue water scarcity. *Hydrology and Earth System Sciences* 24(6): 3015-3031.
- Delpasand, M., Bozorg-Haddad, O., and Loáiciga, H.A., 2020. Integrated virtual water trade management considering self-sufficient production of strategic agricultural and industrial products. *Science of the Total Environment* 743:140797.
- Dury, J., Garcia, F., Reynaud, A., and Bergez, J.E., 2013. Cropping-plan decision-making on irrigated crop farms: A spatio-temporal analysis. *European Journal of Agronomy* 50: 1-10.
- Fader, M., Gerten, D., Thammer, M., Heinke, J., Lotze-Campen, H., Lucht, W., and Cramer W., 2011. Internal and external green-blue agricultural water footprints of nations, and related water and land savings through trade. *Hydrol. Hydrology and Earth System Sciences* 15(5): 1641-1660.
- Falahat, S.E., Hadi, H., Moghaddam, S.S., and Aryanfar, A., 2019. Exploring cultivation site of saffron (*Crocus sativus* L.) by utilizing GIS linked to AHP. *Spatial Information Research* 27(3): 285-293.
- Feng, B., Zhuo, L., Xie, D., Mao, Y., Gao, J., Xie, P., and Wu, P., 2020. A quantitative review of water footprint accounting and simulation for crop production based on publications during 2002–2018. *Ecological Indicators* 120: 106962.
- GAMS/CONOPT3, 2010. Bagsvaerdvej 246A, DK-2880 Bagsvaerd, Denmark: ARKI Consulting and Development.
- Gao, J., Zhuo, L., Liu, Y., Xie, P., Wang, W., Li, M., Gao, X., and Wu, P., 2020. Efficiency and sustainability of inter-provincial crop-related virtual water transfers in China. *Advances in Water Resources* 103560.
- Golabi, M., Hasili, M.A., and Nasab, S.B., 2020. Study and evaluation of irrigation and drainage networks using

- analytic hierarchy process in Khuzestan province: A virtual water approach. *Agricultural Water Management* 241: 106305.
- Inas, E.G., Grigg, N., and Waskom, R., 2017. Water-food-energy: nexus and non-nexus approaches for optimal cropping pattern. *Water Resources Management* 31(15): 4971-4980.
- Jones, D., and Barnes, E.M., 2000. Fuzzy composite programming to combine remote sensing and crop models for decision support in precision crop management. *Agricultural Systems* 65(3): 137-158.
- Jónsson, J.O.G., and Davíðsdóttir, B., 2016. Classification and valuation of soil ecosystem services. *Agricultural Systems* 145: 24-38.
- Li, M., Fu, Q., Singh, V.P., Liu, D., Li, T., and Zhou, Y., 2020. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty. *Agricultural Systems* 178: 102685.
- Mardani-Najafabadi, M.M., Ziaee, S., Nikouei, A., and Borazjani, M.A., 2019. Mathematical programming model (MMP) for optimization of regional cropping patterns decisions: A case study. *Agricultural Systems* 173:218-232.
- Marzban, Z., Asgharipour, M.R., Ghanbari, A., Ramroudi, M., and Seyedabadi, E., 2020a. Evaluation of environmental consequences affecting human health in the current and optimal cropping patterns in the eastern Lorestan province, Iran. *Environmental Science and Pollution Research* 1-16.
- Marzban, Z., Asgharipour, M.R., Ganbari, A., Nikouei, A., Ramroudi, M., and Seyedabadi, E., 2020b. Reducing environmental impacts through redesigning cropping pattern using LCA and MOP (Case study: East Lorestan province). *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production* 30(3): pp.311-330.
- Mekonnen, M.M., and Gerbens-Leenes, W., 2020. The water footprint of global food production. *Water* 12(10): 2696.
- Mesgaran, M.B., Madani, K., Hashemi, H., and Azadi, P., 2017. Iran's land suitability for agriculture. *Scientific Reports* 7(1):1-12.
- Meteorology of South Khorasan province., 2020. <http://skhmet.ir/index.php>. (In Persian)
- Niu, G., Li, Y.P., Huang, G.H., Liu, J., and Fan, Y.R., 2016. Crop planning and water resource allocation for sustainable development of an irrigation region in China under multiple uncertainties. *Agricultural Water Management* 166:53-69.
- Nouri, H., Stokvis, B., Borujeni, S.C., Galindo, A., Brugnach, M., Blatchford, M.L., Alaghmand, S., and Hoekstra, A.Y., 2020. Reduce blue water scarcity and increase nutritional and economic water productivity through changing the cropping pattern in a catchment. *Journal of Hydrology* 125086.
- Paramjita, D., Panigrahi, B., and Paul, J.C., 2018. STEP method of multi objective programming: An operational research tool for efficient resource planning for minor irrigation command. *Journal of Krishi Vigyan* 7(special): 144-150.
- Qasemipour, E., and Abbasi, A., 2019. Virtual water flow and water footprint assessment of an arid region: A case study of South Khorasan province, Iran. *Water* 11(9): 1755-1768.
- Ren, C., Guo, P., Tan, Q., and Zhang, L., 2017. A multi-objective fuzzy programming model for optimal use of irrigation water and land resources under uncertainty in Gansu Province, China. *Journal of Cleaner Production* 164: 85-94.
- Ren, C., Li, Z., and Zhang, H., 2019. Integrated multi-objective stochastic fuzzy programming and AHP method for agricultural water and land optimization allocation under multiple uncertainties. *Journal of Cleaner Production* 210: 12-24.
- Rodriguez, C.I., De Galarreta, V.R., Kruse, E.E., 2015 Analysis of water footprint of potato production in the Pampean region of Argentina. *Journal of Cleaner Production* 90:91-96.
- Sun, H., Zhang, X., Liu, X., Liu, X., Shao, L., Chen, S., Wang, J., and Dong, X., 2019. Impact of different cropping systems and irrigation schedules on evapotranspiration, grain yield and groundwater level in the North China plain. *Agricultural Water Management* 211: 202-209.
- Vallino, E., Ridolfi, L., and Laio, F., 2020. Measuring economic water scarcity in agriculture: a cross-country empirical investigation. *Environmental Science and Policy* 114: 73-85.
- Woolson, R.F., Bean, J.A., and Rojas, P.B., 1986. Sample size for case-control studies using Cochran's statistic. *Biometrics* 927-932.
- Xie, Y.L., Xia, D.X., Ji, L., and Huang, G.H., 2018. An inexact stochastic-fuzzy optimization model for agricultural water allocation and land resources utilization management under considering effective rainfall. *Ecological*

Indicators 92: 301-311.

Zhang, T., Tan, Q., Zhang, S., Wang, S., and Gou, T., 2020. A robust multi-objective model for supporting agricultural water management with uncertain preferences. *Journal of Cleaner Production* 255: 120204.

Zhuo, L., Mekonnen, M.M., Hokestra, A.Y., and Wada, Y., 2016. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River basin (1961-2009). *Advances in Water Resources* 87:29–41.