The University of Tehran Press

Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research

Online ISSN: 2008-4838

Homepage: http://ijaedr.ut.ac.ir/

Evaluation of the Damage Caused by Reduced Flow of the Harirod River on Groundwater and Agricultural Farming in the Sarakhs Plain

Hamed Akbarpour[1], Saeed Yazdani[2] ✉, Hamed Rafiee[3], Iraj Saleh[4]

1. Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Economics and Developmen, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: akbarpoor_hamed@ut.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Economics and Developmen, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: Syazdani@ut.ac.ir
3. Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Economics and Developmen, University of Tehran, Karaj, Iran..E-mail: hamedrafiee@ut.ac.ir
4. Department of Agricultural Economics, Faculty of Agricultural Economics and Developmen, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: isaleh@ut.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: 8 March 2025

Revised: 19 July 2025

Accepted: 23 December 2025

Published online: Winter 2025

Keywords:

Environmental Damage

Harirod River

Mathematical Programming Model,

Sarakhs Plain.

ABSTRACT

The Harirod River, a key water resource for the Sarakhs Plain, has experienced an average flow reduction of over 63% in the past two decades due to a combination of natural and anthropogenic factors. This decline in river flow has led to numerous environmental consequences, including a drop in groundwater levels, increased dust storms, and land subsidence in the plain. These impacts have been further exacerbated by transboundary actions, such as the construction of the Salma Dam in Afghanistan, significantly affecting the livelihoods of farmers and the environment in the Sarakhs Plain. This situation underscores the necessity of evaluating the economic consequences of reduced shared water resources. This study hypothesizes that if the policy of transferring water from agricultural to domestic use in the Doosti Dam had not been implemented, and if the water available to farmers in the Sarakhs Plain had been allocated according to the treaty (equivalent to one-third of the Harirod River's inflow), the extent of damage to the agricultural sector and groundwater resources in the Sarakhs Plain due to reduced river flow could have been determined.h Method.

Cite this article: Akbarpour, H., Yazdani, S., Rafiee, H. & Saleh, I. (2025 Evaluation of the Damage Caused by Reduced Flow of the Harirod River on Groundwater and Agricultural Farming in the Sarakhs Plain. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 56-2 (4), 357-375. DOI: https://doi.org/10.22059/ijaedr.2026.391392.669361

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijaedr.2026.391392.669361

Extended Abstract

Objectives

The Harirod River, a key water resource for the Sarakhs Plain, has experienced an average flow reduction of over 63% in the past two decades due to a combination of natural and anthropogenic factors. This decline in river flow has led to numerous environmental consequences, including a drop in groundwater levels, increased dust storms, and land subsidence in the plain. These impacts have been further exacerbated by transboundary actions, such as the construction of the Salma Dam in Afghanistan, significantly affecting the livelihoods of farmers and the environment in the Sarakhs Plain. This situation underscores the necessity of evaluating the economic consequences of reduced shared water resources. This study hypothesizes that if the policy of transferring water from agricultural to domestic use in the Doosti Dam had not been implemented, and if the water available to farmers in the Sarakhs Plain had been allocated according to the treaty (equivalent to one-third of the Harirod River's inflow), the extent of damage to the agricultural sector and groundwater resources in the Sarakhs Plain due to reduced river flow could have been determined.h Method

Research Method

To estimate the damage to the agricultural sector, a Positive Mathematical Programming (PMP) model was used, along with production cost data from the baseline period. The net effects of changes in river flow were analyzed, assuming other factors affecting cultivated area and farmers' profits remained constant over the period from 2007 to 2021. To calculate the damage to groundwater resources, the shadow value obtained from the PMP model for the baseline year was applied to scenarios of annual flow changes and the volume of lost groundwater. And Conclusion

Findings and Conclusion

The cumulative damage to the agricultural sector caused by the reduction in river flow due to upstream factors (Afghanistan) during the study period was estimated at 7,036 billion Rials, with a cumulative reduction in cultivated area of 50,375 hectares compared to the baseline period. The damage to groundwater resources was estimated at 8,219 billion Rials. The total damage to the Sarakhs Plain was estimated at 15,255 billion Rials, averaging 1,017 billion Rials annually, equivalent to 76% of the agricultural sector's value added at 2023 prices. Therefore, it is recommended that the findings of this study be used as a scientific and evidence-based tool to support legal claims for compensation, enhance the bargaining power of Iranian officials in water diplomacy, and secure Iran's water rights from the upstream country (Afghanistan) in international forums.

Author Contributions

This article is an extract from a postdoctoral research project, the contribution and role of the first author was as the project leader, and the second author was as the project guide and host.

Data Availability Statement

Not applicable

Acknowledgements

The authors would like to thank Tarbiat Modares University and the National Elite Foundation

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the University of Tarbiat Modares, The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

مجله تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، دوره ۲- ۵۶، شماره ۴

انتشارات دانشگاه تهران

شاپا الکترونیکی: ۷۸۵X-۲۴۲۳

Homepage: http://ijaedr.ut.ac.ir/

ارزیابی خسارت کاهش دبی رودخانه هریرود بر آب‌های زیرزمینی و کشاورزی زراعی در دشت سرخس

حامد اکبرپور[۱] | سعید یزدانی[۲]✉ | حامد رفیعی [۳] | ایرج صالح[۴]

۱. گروه اقتصاد کشاورزی ، دانشکده اقتصاد و توسعه کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: akbarpoor_hamed@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه اقتصاد کشاورزی ، دانشکده اقتصاد و توسعه کشاورزی ، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Syazdani@ut.ac.ir
۳. گروه اقتصاد کشاورزی ، دانشکده اقتصاد و توسعه کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: hamedrafiee@ut.ac.ir
۴. گروه اقتصاد کشاورزی ، دانشکده اقتصاد و توسعه کشاورزی ، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: isaleh@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲
تاریخ انتشار: زمستان ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:
دشت سرخس، مدل برنامه ریزی ریاضی، دیپلماسی آب، رودخانه هریرود، خسارت محیط-زیستی.

چکیده

رودخانه هریرود، به‌عنوان یکی از منابع آبی حیاتی دشت سرخس، طی دو دهه گذشته بر اثر عوامل طبیعی و انسانی با کاهشی بیش از ۶۳ درصدی در میانگین دبی مواجه شده است. این کاهش، پیامدهای طبیعی شدیدی نظیر افت سطح آب‌های زیرزمینی، افزایش ریزگردها و فرونشست زمین را در پی داشته که با اقدامات فرامرزی همچون احداث سد سلما در افغانستان تشدید شده و تأثیرات عمیقی بر معیشت کشاورزان و محیط‌زیست منطقه گذاشته است. این شرایط، لزوم ارزیابی اقتصادی پیامدهای ناشی از کاهش منابع آبی مشترک را پررنگ می‌سازد. مطالعه حاضر با به‌کارگیری مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت و با فرض عدم انتقال آب کشاورزی به شرب در سد دوستی و تخصیص یک‌سوم آورده رودخانه طبق معاهده به کشاورزان، به برآورد خسارت‌های ناشی از کاهش دبی در بازه ۱۳۸۶ تا ۱۴۰۰ پرداخته است. یافته‌ها نشان می‌دهد کاهش دبی، خسارتی تجمعی معادل ۷٬۰۳۶ میلیارد ریال به بخش کشاورزی زراعی و ۸٬۲۱۹ میلیارد ریال به منابع آب زیرزمینی وارد کرده و سطح زیرکشت را نیز ۵۰٬۳۷۵ هکتار نسبت به دوره پایه کاهش داده است. با توجه به این برآوردها، نتایج این مطالعه می‌تواند به‌عنوان پشتوانه‌ای علمی و حقوقی برای افزایش قدرت چانه‌زنی ایران در دیپلماسی آب و پیگیری جبران خسارات از کشور بالادستی در مجامع بین‌المللی مورد استفاده قرار گیرد.

استناد: اکبرپور، حامد؛ یزدانی، سعید؛ رفیعی، حامد و صالح، ایرج (۱۴۰۴). ارزیابی خسارت کاهش دبی رودخانه هریرود بر آب¬های زیرزمینی و کشاورزی زراعی در دشت سرخس. *مجلهٔ تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران*، ۲-۵۶ (۴)، ۳۷۵-۳۵۵. DOI: https://doi.org/10.22059/ijaedr.2026.391392.669361

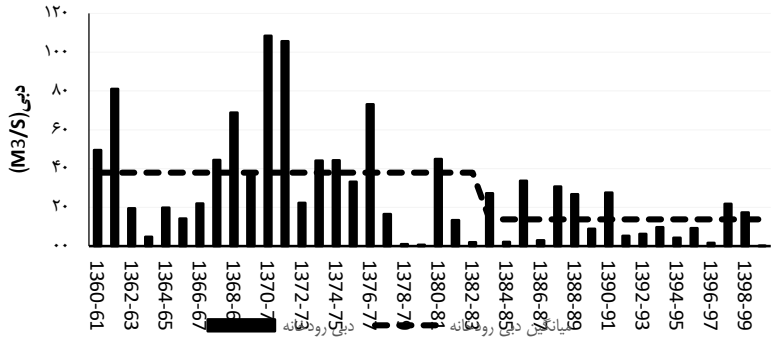
ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

DOI: https://doi.org/10.22059/ijaedr.2026.391392.669361

مقدمه

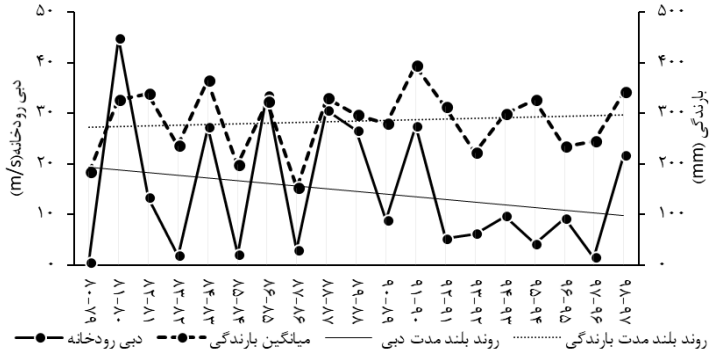
بحران آب به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی قرن بیست‌ویکم، در سراسر جهان و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به یک معضل جدی تبدیل شده است. بخش کشاورزیکه مسئولیت تأمین امنیت غذایی جمعیت رو به افزایش کشور را بر عهده دارد، به طور قابل توجهی به منابع آبی وابسته است (Golpazir et al., 2023). کاهش منابع آبی، تغییرات اقلیمی و مدیریت ناکارآمد منابع مشترک، اثرات قابل‌توجهی بر معیشت، امنیت غذایی و پایداری اقتصادی–اجتماعی دارد. در شمال شرق ایران، رودخانه تجن که یکی از منابع آبی کلیدی دشت سرخس است، طی دو دهه گذشته به دلیل ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی با کاهش میانگین بیش از ۶۳ درصدی دبی روبرو بوده است.(Office of Economic Planning and Research, 2022a) این رودخانه، علاوه بر تأمین نیاز آب کشاورزی منطقه و معیشت افراد محلی، نقش اساسی در حفظ محیط‌زیست ایفا می‌کند. این کاهش جریان، پیامدهای متعدد طبیعی نظیر کاهش سطح آب زیرزمینی، افزایش ریزگردها و فرونشست دشت را به دنبال داشته است (Pourhashemi et al., 2018; Azin Amaish Toos Consulting Engineers, 2018; Office of Economic Planning and Research, 2022b).



شکل ۱. میانگین بلندمدت دبی رودخانه هریرود (Planning & Group, 2021)

Figure 1. Long-term average flow rate of the Harirod River(Planning & Group, 2021)

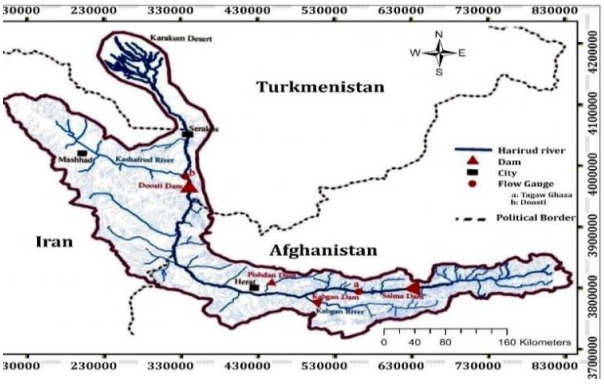
کاهش دبی رودخانه هریرود متأثر از عوامل محیطی و انسانی است. تجزیه‌وتحلیل داده‌های بارندگی در حوضه آبریز این رودخانه در افغانستان (به‌عنوان سرچشمه اصلی) نشان می‌دهد روند بلندمدت بارندگی در این منطقه ثابت بوده و حتی در دهه اخیر افزایشی را تجربه کرده است (شکل ۲). با این وجود، دبی رودخانه در مرز ایران به‌طور همزمان کاهش یافته است. این تناقض آشکار، حاکی از نقش تعیین‌کننده عوامل انسانی در کاهش جریان آب است. اصلی‌ترین عامل در این زمینه، احداث سازه‌های آبی در بالادست، به‌ویژه سد سلما بر روی سرشاخه‌های رودخانه هریرود است. این سد که با اهداف کشاورزی، تأمین آب شرب و تولید برق احداث شده، جریان طبیعی آب به سمت ایران را به شدت مختل کرده است(Hosseini, 2018).



شکل ۱. ارتباط دبی و بارندگی سالانه حوزه هریرود (NASA, 1997; Planning & Group, 2021)

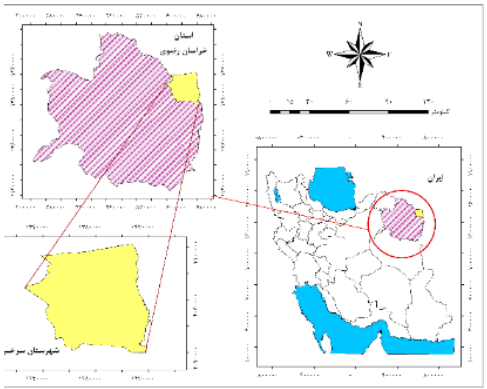
Figure 2. Relationship between discharge and annual rainfall in the Harirud Basin (NASA, 1997; Planning & Group, 2021)

مدیریت ناپایدار منابع آبی فرامرزی، در ترکیب با تأثیرات تغییرات اقلیمی، توجه پژوهشگران را در سطح جهانی به خود جلب کرده است. مطالعات نشان می‌دهند که کاهش دبی رودخانه‌های بین‌المللی می‌تواند تنش‌های اجتماعی، زیست‌محیطی و اقتصادی را تشدید کند. نمونه شاخص این تنش‌ها، اختلافات پیرامون بهره‌برداری از رودخانه‌های دجله و فرات بین ترکیه، سوریه و عراق است (Korkutan, 2001; Zawahri, 2006; Mianabadi, 2013). در بستر ایران نیز، اثرات کاهش منابع آب سطحی بر بخش کشاورزی در مطالعات متعددی بررسی شده است. به‌طور مثال، پژوهش‌ها در استان‌های گلستان و اصفهان نشان داده‌اند که کاهش دسترسی به آب و تغییرات اقلیمی می‌تواند به کاهش معنادار سطح زیر کشت (بین ۰,۴٪ تا ۹۲٪)، سود ناخالص کشاورزان (تا ۵٪) و تغییر ارزش اقتصادی آب (از ۴۱۶ تا ۵۷۱ ریال به ازای هر واحد) منجر شود (Rezaee et al., 2016, 2020; Keramatzadeh et al., 2011; Mardani Najafabadi & Kavand, 2021). با این وجود، شکاف پژوهشی آشکاری در مورد ارزیابی کمی خسارت‌های اقتصادی مستقیم ناشی از کاهش دبی یک رودخانه مرزی و پیوند دادن آن به اقدامات فرامرزی خاص (مانند احداث سد) وجود دارد. بحران کاهش دبی رودخانه هریرود در دشت سرخس، که با احداث سد سلما در افغانستان تشدید شده، نمونه بارز این شکاف است. این پدیده پیامدهای شدید طبیعی و اقتصادی برای معیشت کشاورزان و محیط‌زیست منطقه به همراه داشته و ضرورت یک ارزیابی اقتصادی مشخص و متمرکز را برجسته می‌سازد. در پاسخ به این شکاف، هدف اصلی این پژوهش، ارزیابی کمّی تأثیر کاهش دبی رودخانه هریرود بر سود کشاورزی و درآمدهای زراعی دشت سرخس است. این پژوهش، از رهگذر تحلیل کمّی و مدل‌سازی اقتصادی، دانش لازم را برای پشتیبانی از تصمیم‌سازی پایدار در سطح ملی ایجاد می‌کند و همزمان، چارچوبی قابل تعمیم برای مدیریت یکپارچه منابع آب و کاهش مناقشات در سایر حوضه‌های آبی فرامرزی ارائه می‌دهد.منطقه مورد مطالعه این پژوهش، دشت سرخس واقع در شمال شرق ایران است. این دشت با مساحتی حدود ۱۹۲ هزار هکتار، در منتهی‌الیه شرقی کشور و در حوزه آبریز قره‌قوم (کوچک‌ترین از شش حوزه آبریز اصلی ایران) قرار دارد (Planning & Strategic Supervision Deputy of the Presidency, 2012). موقعیت جغرافیایی خاص دشت سرخس، آن را در مرز مشترک با دو کشور افغانستان و ترکمنستان قرار داده و به‌طور مستقیم تحت تأثیر رودخانه تجن است. این رودخانه که خود از پیوستن دو رودخانه کشف‌رود و هریرود تشکیل می‌شود، بخشی از مرز ایران و ترکمنستان را شکل می‌دهد. رودخانه هریرود، که از افغانستان سرچشمه می‌گیرد و نهایتاً به دشت قره‌قوم می‌ریزد، منبع آبی اصلی این رودخانه مرزی محسوب می‌شود (Hosseini, 2018). توپوگرافی نسبتاً مسطح دشت، با ارتفاع ۲۵۰ تا ۴۰۰ متر از سطح دریا، همراه با دسترسی به این منابع آبی، سبب شده است تا این منطقه به بخشی حیاتی برای کشاورزی و فعالیت‌های اقتصادی در شمال شرق ایران تبدیل شود.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی رودخانه هریرود

Figure 3: Geographical location of the Harirod River



شکل ٤. موقعیت جغرافیایی شهرستان سرخس

Figure 4:Geographical location of Sarakhs County

روش‌شناسی پژوهش

بر اساس معاهده ایران و اتحاد جماهیر شوروی (۱۹۲۱)، سهم ایران از آب رودخانه هریرود، یک‌سوم از کل آورده آن بود. پیش از احداث سد دوستی (۱۳۸۵)، این آب از طریق پنج نهر منشعب از رودخانه بهره‌برداری می‌شد و مابقی به سمت ترکمنستان جریان داشت (TOOSSAB, 2009). پس از احداث این سد مشترک، طبق توافق جدید، خروجی سد به‌طور مساوی بین دو کشور تقسیم و سهم ایران بین مصارف شرب و کشاورزی تخصیص یافت. این پژوهش برای برآورد خسارت‌های وارده به بخش کشاورزی و منابع آب زیرزمینی دشت سرخس (ناشی از کاهش دبی رودخانه در بالادست)، از مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) استفاده می‌کند.در این روش، ابتدا مدل دوره پایه (۱۳۸۳–۱۳۸۵) برای بازتولید رفتار کشاورزان کالیبره می‌شود. سپس، سناریوی کاهش آب (که در آن دسترسی کشاورزان به یک‌سوم آورده رودخانه محدود می‌شود) اعمال و میزان تولید و سطح زیرکشت محصولات بازتولید می‌شود. داده‌های موردنیاز (هزینه تولید، سطح زیرکشت، دبی رودخانه) از سازمان جهاد کشاورزی و شرکت آب منطقه‌ای استان استخراج و سناریوهای کاهش دبی در بازه ۱۳۸۵–۱۴۰۰ با نرم‌افزار GAMS تحلیل شده‌اند.مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP) که نخستین بار توسط هاویت (۱۹۹۵) معرفی شد، امکان کالیبراسیون دقیق مدل‌های برنامه‌ریزی با داده‌های سال پایه را فراهم می‌آورد. برخلاف مدل‌های مرسوم برنامه‌ریزی ریاضی (NMP)، در این روش، متغیرها به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که نتایج مدل، مقادیر مشاهده‌شده در سال مرجع را به‌طور دقیق بازتولید کند. این ویژگی کلیدی، خروجی‌های مدل را به داده‌های واقعی گره زده و PMP را به ابزاری کارآمد و قابل اعتماد برای تحلیل سیاست‌ها تبدیل می‌سازد (Howitt, 1995, 2005). مبنای روش PMP، استفاده از اطلاعات واقعی (مانند هزینه‌های فرصت) برای طراحی یک مدل غیرخطی است، به‌طوری که مقادیر بهینه‌شده آن با رفتار واقعی سیستم (مانند تخصیص زمین و تولید کشاورزان) کاملاً همخوانی داشته باشد. این رویکرد، نیاز به افزودن محدودیت‌های ساختگی برای انطباق با واقعیت را از بین برده و انعطاف‌پذیری و دقت شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد (Howitt, 2005). از این رو، PMP به‌ویژه در شرایطی که داده‌های تاریخی محدود هستند (مانند مطالعات منطقه‌ای در کشورهای در حال‌توسعه)، چارچوبی تجربی و کاربردی محسوب می‌شود که امکان تحلیل‌های اقتصادی واقع‌بینانه را فراهم می‌کند (de Frahan et al., 2007). اجرای این مدل عموماً در سه گام ساختاریافته انجام می‌پذیرد (Howitt, 1995; Paris & Howitt, 1998): برآورد هزینه نهایی (MC) محصولات با استفاده از یک مدل پایه کالیبره‌شده. مدل‌سازی یک تابع هزینه غیرخطی بر مبنای هزینه‌های نهایی استخراج‌شده. تحلیل سیاست با استفاده از سیستم کالیبره‌شده نهایی برای شبیه‌سازی اثرات تغییرات مختلف.گام اول PMP:

در گام نخست، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی پایه (معمولاً خطی) فرموله می‌شود. وجه تمایز اصلی این مدل، افزودن یک مجموعه محدودیت کالیبراسیون به محدودیت‌های معمول منابع است. وظیفه این محدودیت‌های جدید، اطمینان از این است که مقادیر بهینه محاسبه‌شده توسط مدل، دقیقاً برابر با مقادیر واقعی مشاهده‌شده در سال پایه باشند. تابع هدف در این مرحله، یک تابع خطی است که صرفاً هزینه‌های حسابداری (قابل مشاهده) را دربر می‌گیرد. حل این مدل، مقادیر دوگان (سایه‌ای) مرتبط با محدودیت‌های کالیبراسیون را تولید می‌کند. این مقادیر دوگان، در واقع هزینه‌های نهایی ضمنی (قیمت‌های سایه‌ای) برای هر فعالیت تولیدی هستند که بازتاب‌دهنده هزینه‌های فرصت مشاهده‌نشده هستند و برای کالیبره‌کردن مدل در گام بعدی حیاتی است. این فرآیند در قالب روابط (۱) تا (۳) ارائه شده است.

رابطه ۱
$$Maximize \;\; z = \sum_{i=1}^{n} p'x - c'x$$

رابطه ۲
$$[\rho] subject\ to \;\; AX \leq b$$

رابطه ۳
$$[\boldsymbol{\lambda}] x \leq x_0 + \dot{\varepsilon}$$

$$x \geq 0$$

که در آن:

Z: ارزش تابع هدف.

p' : بردار (n*1) قیمت‌های محصول

X: بردار (n*1) غیر منفی از سطوح فعالیت‌های تولیدی

c' : بردار (n*1) از هزینه حسابداری هر واحد فعالیت

b: بردار (m*1) مقادیر منابع در دسترس

X_0: بردار (n*1) غیر منفی از سطوح مشاهده شده فعالیت‌های تولیدی

A: ماتریس (m*n) ضرایب فنی تولید (ضرایب در محدودیت‌های منابع)

λ: بردار (n*1) از متغیرهای دوگان مربوط به محدودیت کالیبراسیون را نشان می‌دهد.

ρ: بردار (m*1) از متغیرهای دوگان مربوط به محدودیت منابع

ε: بردار (n*1) از اعداد مثبت کوچک برای جلوگیری از وابستگی خطی بین محدودیت‌های ساختاری و محدودیت کالیبراسیون

در این گام، یک محدودیت کالیبراسیون به مجموعه محدودیت‌های منابع اضافه می‌شود و یک مدل برنامه‌ریزی خطی (LP) معمولی شکل می‌گیرد. با حل این مدل، مقادیر دوگان (سایه‌ای) مرتبط با محدودیت‌های کالیبره‌شده به‌دست می‌آیند. این مقادیر دوگان، نشان‌دهنده میزان تأثیر تغییرات در محدودیت‌ها بر ارزش تابع هدف هستند و به عنوان داده‌های کلیدی برای کالیبره‌کردن مدل و انجام تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این فرآیند، دقت مدل را افزایش داده و امکان شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تر را فراهم می‌کند.

گام دوم PMP

در گام دوم، مقادیر دوگان (قیمت‌های سایه‌ای) استخراج‌شده از مدل کالیبره‌شده مرحله اول، به عنوان داده‌های کلیدی برای پارامترسازی یک تابع هدف غیرخطی به کار می‌روند. در این مرحله، تابع هزینه خطی مدل اولیه با یک تابع هزینه درجه‌دوم (یا به طور کلی، یک تابع غیرخطی) جایگزین می‌شود. منطق این جایگزینی آن است که هزینه نهایی واقعی هر فعالیت، برآیندی از هزینه‌های آشکار حسابداری و هزینه‌های ضمنی یا پنهان (مانند هزینه فرصت زمین، مدیریت و ریسک) در نظر گرفته می‌شود. شرایط مرتبه اول (FOC) برای حداکثرسازی سود تحت تعادل رقابتی اعمال می‌شود تا پارامترهای تابع هزینه غیرخطی (مانند ضرایب درجه دوم) به گونه‌ای محاسبه شوند که مقادیر بهینه مدل، همان سطوح مشاهده‌شده در سال پایه را بازتولید کنند. این امر دقت مدل را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد و انعطاف‌پذیری لازم برای شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تر واکنش سیستم به تغییرات سیاستی (مانند تغییر در دسترسی به آب) را فراهم می‌کند. تابع هزینه متغیر درجه‌دوم به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$C^v(x) = d'x + \frac{1}{2}x'Qx$$ رابطه ۴

در این رابطه، d بردار پارامترهای بخش خطی و Q یک ماتریس مثبت–نیمه‌معین متقارن از پارامترهای بخش درجه‌دوم تابع هزینه است. برای برآورد پارامترهای مجهول d و Q، شرط بهینه‌سازی مدل (شرط مرتبه اول) مبنا قرار می‌گیرد. بر این اساس، هزینه نهایی هر فعالیت باید برابر با مجموع هزینه حسابداری آن فعالیت (c) و قیمت سایه‌ای مربوطه (λ) باشد (رابطه ۵):

$$MC^v = \frac{\partial C^v(x^{\cdot})}{\partial C} = d + Qx^{\cdot} = c + \boldsymbol{\lambda}$$ رابطه ۵

در رابطه (۵)، مقادیر x (سطوح فعالیت مشاهده‌شده)، c (هزینه‌های حسابداری) و λ (قیمت‌های سایه‌ای استخراج‌شده از گام اول) شناخته‌شده هستند. حال، هدف یافتن پارامترهای d و Q است. این رابطه یک سیستم n معادله ایجاد می‌کند، در حالی که تعداد مجهولات بسیار بیشتر ([n + n(n+1)/2]) است. در نتیجه، بینهایت جواب برای d و Q وجود دارد که می‌تواند

این سیستم را ارضا کند.این ویژگی به ظاهر مشکل‌زا، در واقع منشأ انعطاف‌پذیری و قدرت مدل PMP است. سیستم کاملاً کالیبره می‌شود و می‌تواند داده‌های پایه را دقیقا بازتولید کند. با این حال، واکنش مدل به تغییرات سیاستی (مانند تغییر در دسترسی به آب) به‌طور کامل به مقادیر برآوردی Q (مشتقات مرتبه دوم) وابسته است. بنابراین، انتخاب یک روش برآورد قوی برای تعیین یک مجموعه منحصربه‌فرد و معقول از این پارامترها اهمیت محوری دارد. در ادامه، مهم‌ترین روش‌های توسعه‌یافته برای این منظور مرور می‌شوند (Bakhshi et al., 2010). الف) روش‌های برآورد پارامترهای تابع هزینه

برای غلبه بر مشکل عدم تعیین‌پذیری در برآورد پارامترهای d و Q، روش‌های متعددی توسعه یافته‌اند:

قاعده تصریح اولیه: در این رویکرد ساده که در مراحل ابتدایی توسعه PMP به کار رفته، با فرض استقلال فعالیت‌ها، تمامی عناصر غیرقطری ماتریس Q صفر در نظر گرفته می‌شوند ($qij = 0$ for $i \neq j$). همچنین، فرض می‌شود $d = c$ (بردار هزینه‌های حسابداری). در این حالت، عناصر قطری Q از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$q_{ii} = \frac{\rho_i}{x_i^0}$$ رابطه ۶

که در آن ρ_i قیمت سایه‌ای و x_i^0 مقدار مشاهده‌شده محصول iام است (Paris & Howitt, 1998). یک گونه جایگزین از این قاعده، با قرار دادن d=0 و استفاده از رابطه (۷)، مقادیر بزرگ‌تری برای عناصر قطری تولید می‌کند:

$$q_{ii} = \frac{C_i + \rho_i}{X_i^0}$$ رابطه ۷

۲- رویکرد هزینه متوسط:

در این روش فرض بر آن است که بردار هزینه مشاهده‌شده c بیانگر هزینه متوسط است. بر این اساس، پارامترها از رابطه (۸) به دست می‌آیند:

$$q_{ii} = \frac{2\rho_i}{X_i^0} \quad و \quad d_i = C_i - P_i$$ رابطه ۸

این روش مقادیر بزرگ‌تری برای عناصر قطری Q نسبت به قاعده اولیه ایجاد می‌کند (Heckelei & Britz, 2000).۳- استفاده از کشش‌های برون‌زای عرضه:

در این روش، کشش‌های عرضه که توسط پژوهشگران دیگر و با استفاده از مدل‌های اقتصادسنجی تخمین زده شده‌اند، برای محاسبه پارامترهای تابع هزینه نهایی به کار گرفته می‌شوند.

۴- تصریح بر مبنای تابع تولید با کشش جانشینی ثابت (CES):

در این روش، با بهره‌گیری از اطلاعات پیشین درباره کشش جانشینی بین نهاده‌ها، تابع تولید با کشش جانشینی ثابت (CES) به عنوان پایه تکنولوژی مدل در نظر گرفته می‌شود. این کار انعطاف‌پذیری بیشتری را در مدل‌سازی روابط بین فعالیت‌ها فراهم می‌آورد. ۵- روش ماکسیمم آنتروپی (ME): این روش با به‌کارگیری اصل حداکثر آنتروپی، تمامی پارامترهای بردار d و ماتریس Q را به‌گونه‌ای برآورد می‌کند که بیشترین عدم قطعیت با حفظ قیود موجود (اطلاعات نمونه) را داشته باشد. این رویکرد قدرتمند، با تلفیق برنامه‌ریزی ریاضی و اقتصادسنجی، امکان برازش بهینه توابع هزینه یا تولید را با در نظرگیری همزمان تمامی داده‌های در دسترس فراهم می‌سازد (Paris & Howitt, 1998; de Frahan et al., 2007). مرحله سوم PMP:

پس از انتخاب یک روش و برآورد پارامترهای تابع هزینه غیرخطی (d و Q)، مدل نهایی PMP فرموله می‌شود. در این مرحله، تابع هدف غیرخطی (رابطه ۹) جایگزین تابع خطی اولیه می‌شود، در حالی که محدودیت‌های کالیبراسیون حذف و تنها محدودیت‌های واقعی منابع (رابطه ۱۰) و غیرمنفی بودن (رابطه ۱۱) باقی می‌مانند.

$$Maximize \;\; Z = \sum_{j=1}^{n} p'X - (X'\hat{Q}\,X)/2$$ رابطه ۹ :

$$subject\ to \;\; AX \leq 0$$ رابطه ۱۰ :

$$X \geq 0$$ رابطه ۱۱ :

حل این مدل کالیبره‌شده نهایی، امکان شبیه‌سازی واقع‌بینانه اثرات تغییر در شرایط (مانند کاهش دسترسی به آب) بر تصمیمات کشاورزان (سطح زیر کشت، تولید) و رفاه اقتصادی آنان را فراهم می‌آورد.

محاسبه خسارت اقتصادی وارد بر منابع آب زیرزمینی:خسارت به سفره آب زیرزمینی دشت سرخس از دو جزء اصلی برآورد شد و ارزش ریالی آن با روش ارزش‌گذاری مبتنی بر قیمت سایه‌ای محاسبه شد.

کاهش تغذیه مستقیم از رودخانه: بر اساس مطالعه بیلان آب منطقه‌ای، میزان خالص نفوذ آب از بستر رودخانه به سفره در دوره پایه، ۴۵٫۸۶ میلیون مترمکعب در سال تعیین شده بود. حجم آب کاهش‌یافته در هر سال از این مسیر، متناسب با کاهش دبی رودخانه نسبت به دوره پایه محاسبه شد.

کاهش آب بازگشتی از بخش کشاورزی: نخست، کل کاهش حجم آب در دسترس بخش کشاورزی در هر سال نسبت به دوره پایه از خروجی مدل PMP استخراج شد. این کاهش تجمعی (A) از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آید:

$$A = \sum_{15}^{i=1} (V_i - V_0)$$ رابطه ۱۲

که در آن V_i حجم آب در دسترس کشاورزان در سال i و V_0 میانگین آب در دسترس در دوره پایه (۱۳۸۴–۱۳۸۵) است. سپس، با اعمال ضریب نفوذ ۳۰ درصد، حجم معادل کاهش تغذیه سفره از این منبع (ΔV_i) محاسبه شد.

۳. ارزش‌گذاری خسارت: ارزش اقتصادی هر واحد آب ازدست‌رفته در هر سال (p_i)، برابر با تفاوت قیمت سایه‌ای آب (برآمده از مدل PMP) و هزینه استحصال آب زیرزمینی (۶۲/۲ ریال بر مترمکعب در دوره پایه) در نظر گرفته شد (رابطه ۱۳).

$$P_i = \text{Shadow Price_i} - 62.2$$ رابطه ۱۳

در نهایت، خسارت کل سالانه آب زیرزمینی (Loss) از رابطه (۱۴) محاسبه شد:

$$Loss = \sum_{15}^{i=1} (\Delta V_i \times P_i)$$ رابطه ۱۴

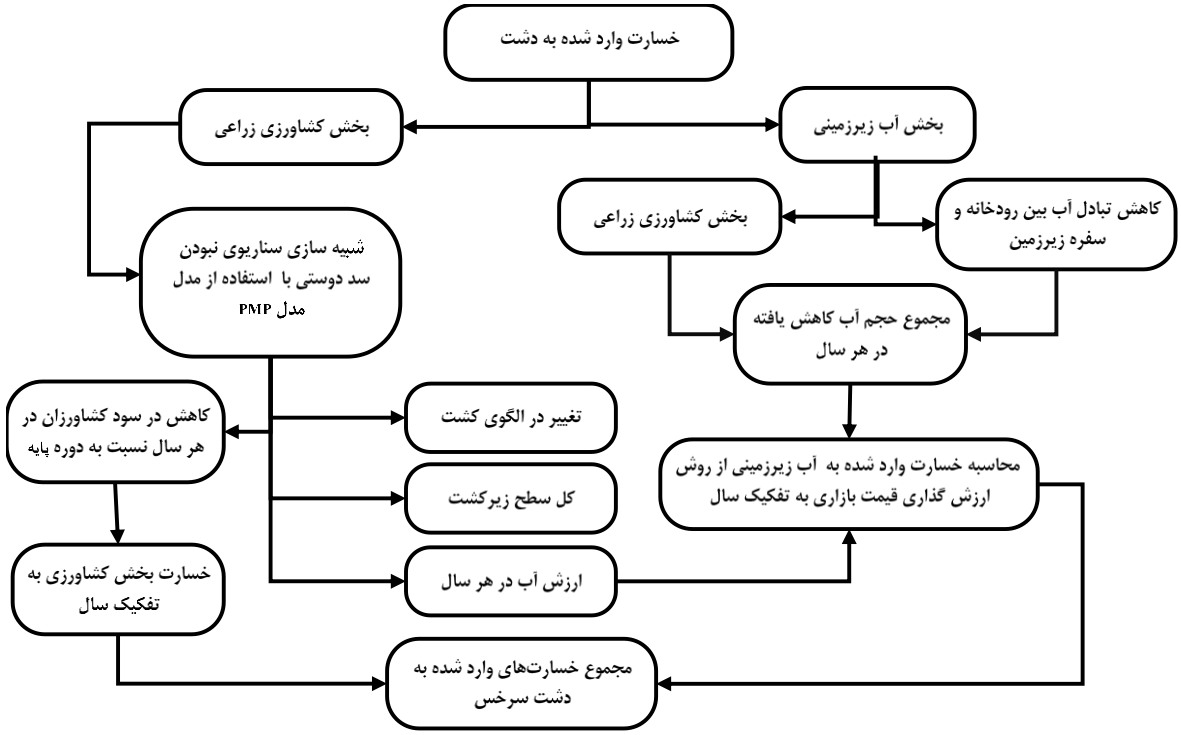
تبدیل به ارزش جاری: کلیه خسارت‌های محاسبه‌شده برای سال‌های مختلف، با استفاده از متوسط نرخ تورم سالانه کشور (i) و رابطه (۱۵) به قیمت‌های ثابت سال پایه ۱۴۰۳ (F) تبدیل شدند تا قابلیت جمع‌بندی و مقایسه داشته باشند (Skonjad, 1996).

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \;\rightarrow\; F = P(1+i)^n$$ رابطه ۱۳

که در آن P ارزش خسارت به قیمت سال وقوع (۸۴–۱۳۸۵) و n تعداد سال‌های فاصله تا سال پایه ۱۴۰۳ است. در شکل ۳: خلاصه روش تحقیق

Figure 5. Summary of research methodology

روش پژوهش به‌طور خلاصه نشان داده شده است.



شکل ۳: خلاصه روش تحقیق

Figure 5. Summary of research methodology

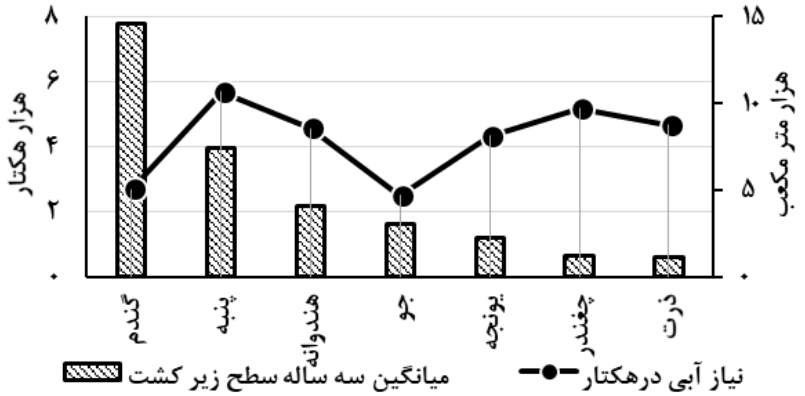
نتایج و بحث

برای دستیابی به اهداف تحقیق که شامل بررسی سناریوهای کاهش منابع آب جاری رودخانه هریرود در بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۴۰۰ بر سود ناخالص، الگوی کشت محصولات زراعی و کل سطح زیرکشت محصولات زراعی در دشت سرخس است. ابتدا با استفاده از میانگین دوره پایه در سال‌های ۸۳، ۸۴ و ۱۳۸۵ مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت الگوی کشت محصولات زراعی در دشت سرخس شبیه‌سازی شد. نتایج واسنجی مدل $\varepsilon = ۰/۰۰۰۱$ نشان‌دهنده اعتبار و قدرت بالای مدل PMP دوره پایه است. سپس سناریو مورد استفاده در جدول ۲ اعمال شد و نتایج تغییرات در سطح زیرکشت و سود ناخالص کشاورزان به دست آمد. با توجه به میانگین سطح زیر کشت کشاورزان در دوره پایه جدول ۱ و نیاز آبی محصولات کشت شده در دشت سرخس، متوسط آب مورد نیاز برای یک هکتار از محصولات زراعی کشت شده در دشت سرخس با راندمان ۴۰٪ آبیاری غرقابی محاسبه شده است. (شکل) بر این اساس متوسط آب مورد نیاز برابر با ۱۶۳/۱۴ میلیون مترمکعب و متوسط آب تأمین‌شده از رودخانه برابر با ۱۱۰ میلیون مترمکعب (۶۷٪) است که مابقی آن ۵۳ میلیون مترمکعب (۳۳٪) از آب‌های زیرزمینی تأمین شده است. بررسی الگوی کشت محصولات در دوره پایه نشان می‌دهد ۸۰ درصد سطح زیر کشت کشاورزان از محصولات آب‌بر مانند پنبه و هندوانه و کم آب بر مانند گندم و جو کشت شده است. (شکل) (koocheki et al., 2022; Planning et al., 2006; (Planning & Group, 2021))

جدول ۱: اطلاعات دوره پایه

Table 1:Basic course information

سال آبی Water year	سطح زیرکشت Cultivated area	نیاز آبی محصولات کشت Water requirement of crops	سهم آب ایران از رودخانه Iran's share of water from the river
1382-83	20407	168.8	19.83
1383-84	18905	152.82	288.26
1384-85	20378	167.81	22.27
میانگین Average	19907	163.14	110.12



شکل ٦. میانگین الگوی کشت و نیاز آبی محصولات زراعی در دوره پایه (koocheki et al., 2022):(Planning et al., 2006))

Figure 6. Average cropping pattern and water requirement of crops in the base period(koocheki et al., 2022):(Planning et al., 2006))

الف: خسارت‌های وارد شده به سفره زیرزمینی در دشت سرخس:

بررسی تغییرات دبی آب رودخانه هریرود در **Error! Reference source not found.** نشان دهنده کاهش دبی در سال‌های اخیر است که یکی از عوامل اصلی آن را می‌توان بهره‌برداری از سد سلما و توسعه صنعت سد سازی در افغانستان دانست به‌طوری‌که میانگین آورده در سال‌های ۸۵ الی ۱۳۹۴ قبل از بهره‌برداری از سد سلما برابر با ۵۳۴ (MCM) و بعدازآن (۹۴ الی ۱۴۰۰) برابر با ۲۸۶ (MCM) است. در همین جدول میزان آب از دسترس خارج شده از سفره (برابر با ۳۰ درصد آب کاهش یافته نسبت به دوره پایه) و خسارت وارد شده به سفره زیرزمینی دشت سرخس محاسبه شده است.

جدول ۱. آورده هریرود و سهم ایران (منبع: نتایج تحقیق)

Table 1:Harirud's output and Iran's share (Source: Research results)

سال آبی Water year	کل آورده (MCM) Total income	سهم ایران Iran's share (MCM)	اختلاف با دوره پایه Difference from the base period	درصد تغییر Percentage change	حجم آب تبادلی کاهش‌یافته Reduced volume of exchanged water (MCM)	حجم آب خارج‌شده از سفره زیرزمینی Volume of water withdrawn from the aquifer (MCM)	ارزش آب زیرزمینی (میلیون ریال) Value of groundwater (million rials)	خسارت واردشده به قیمت ۱۳۸۴(میلیارد ریال) Damage caused in 2005 (billion rials)	خسارت واردشده به قیمت ۱۴۰۲(میلیارد ریال) Damage caused at a cost of 1402 (billion rials)
1385-86	1076.48	358.83	248.70	226	0.00	74.61	0.00	0.00	0.00
1386-87	92.84	30.95	-79.18	-72	-33.0	-23.75	631.8	-35.8	-1412.1
1387-88	979.03	362.34	216.21	198	0.00	64.86	0.00	0.00	0.00
1388-89	841.34	280.45	170.32	155	0.00	51.1	0.00	0.00	0.00
1389-90	276.87	92.29	-17.84	-16	-7.4	5.35	204.6	-2.6	-102.4
1390-91	872.48	290.83	180.70	164	0.00	54.2	0.00	0.00	0.00
1391-92	161.71	53.90	-56.23	-51	-23.4	-16.86	498.2	-20.0	-790.1

[1] : میلیون متر مکعب

ادامه جدول ۲. آورده هریرود و سهم ایران (منبع: نتایج تحقیق)

Table 2. Harirud's output and Iran's share (Source: Research results)

سال آبی Water year	کل آورده (MCM) Total income	سهم ایران Iran's share (MCM)	اختلاف با دوره پایه Difference from the base period	درصد تغییر Percentage change	حجم آب تبادلی کاهش‌یافته Reduced volume of exchanged water (MCM)	حجم آب خارج‌شده از سفره زیرزمینی Volume of water withdrawn from the aquifer (MCM)	ارزش آب زیرزمینی (میلیون ریال) Value of groundwater (million rials)	خسارت واردشده به قیمت ۱۳۸۴(میلیارد ریال) Damage caused in 2005 (billion rials)	خسارت واردشده به قیمت ۱۴۰۲(میلیارد ریال) Damage caused at a cost of 1402 (billion rials)
1392-93	199.94	66.65	-43.48	-39	-18.1	-13	423.9	-13.2	-519.5
1393-94	307.54	102.51	-7.62	-7	-3.1	-2.3	0.00	0.0	0.00
1394-95	133.80	44.60	-65.53	-59	-27.3	19.66	522.3	-25.9	-1021.3
1395-96	286.88	95.63	-14.50	-13	-6.0	-4.35	0.00	0.00	0.00
1396-97	47.47	15.82	-94.31	-86	-39.0	-28.3	720	-48.6	-1917.1
1397-98	691.80	230.60	120.47	109	0.00	36	0.00	0.00	0.00
1398-99	551.65	183.88	73.75	67	0.00	22.12	0.00	0.00	0.00
1399-00	5.08	1.69	-108.44	-98	-45.2	-32.53	802.4	-62.3	-2457.3
میانگین Average		145	-32.4		-13.5	-9.7	222.4	-13.9	-548.0
مجموع Total		2175	-486*		202.6*	-145.8	[redacted]	-208.4	-8219.9

*: فقط مجموع آب‌های کاهش‌یافته نسبت به دوره پایه

طبق نتایج بدست آمده در جدول ۱ از کاهش دبی آب رودخانه نسبت به میانگین دوره پایه، مقدار تجمعی حجم آبی که در طول دوره مطالعه از دسترس سفره زیرزمینی خارج شده برابر با ۳۴۸/۴ میلیون مترمکعب و به‌طور میانگین سالانه برابر با ۲۳/۲ میلیون مترمکعب بوده است. با محاسبه ارزش آب زیرزمینی در هرسال با استفاده از مدل PMP دوره پایه میزان خسارت وارد شده به سفره زیرزمینی دشت سرخس ناشی از کاهش دبی آب رودخانه محاسبه شد که ارزش ریالی این خسارت به قیمت سال ۱۴۰۲ برابر با ۸،۲۱۹/۹ میلیارد ریال بدست آمده است.

ب – بررسی آثار سناریوهای تغییر نهاده آب بر سود کشاورزان در دشت سرخس:

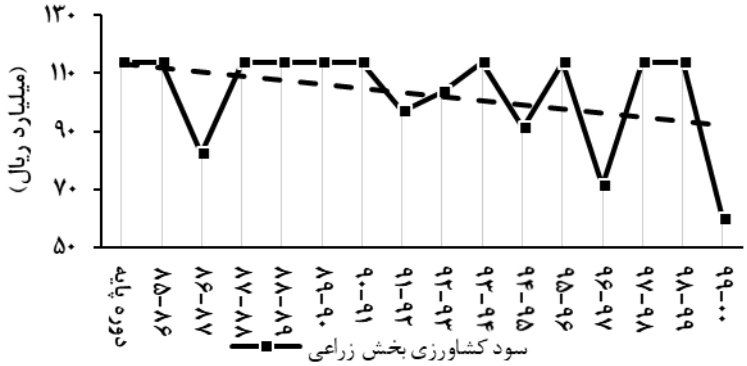
طبق سناریو تغییر محدودیت منابع آب کشاورزی براساس جدول ۱ نتایج تغییرات سود کشاورزان نسبت به دوره پایه و فرض ثابت بودن سایر شرایط در جدول نشان داده شده است.

جدول ۳. تغییرات سود کشاورزان در سناریوی کاهش دبی رودخانه (منبع: نتایج تحقیق)

Table 2. Changes in farmers' profits in a scenario of reduced river flow (Source: Research results)

سال yare	سود (میلیون ریال) Profit (million rials)	اختلاف سود با دوره پایه به قیمت دوره پایه (میلیون ریال) Difference in profit from the base period to the base period price (million rials)	اختلاف سود با دوره پایه به قیمت سال ۱۴۰۲(میلیارد ریال) Difference in profit with the base period at 1402 prices (billion rials)	درصد تغییرات سود Percentage change in profit
دوره پایه Basic course	113910.0	–	–	–
1385-86	113940.0	30.0	1.2	0.0
1386-87	82399.6	-31510.4	-1242.7	27.7
1387-88	11394.0	30.0	1.2	0.0
1388-89	11394.0	30.0	1.2	0.0
1389-90	11389.0	-20.0	-0.8	0.0
1390-91	11394.0	30.0	1.2	0.0
1391-92	96749.6	-17115.4	-657.0	-15.0
1392-93	103470.0	-10440.0	-411.7	-9.2
1393-94	113940.0	30.0	1.2	0.0
1394-95	91331.1	-22578.9	-890.4	-19.8
1395-96	113940.0	30	1.2	0.0
1396-97	71231.6	-42678.4	-1683.1	-37.5
1397-98	113940.0	30	1.2	0.0
1398-99	113940.0	30	1.2	0.0
1399-00	59597.6	-54312.4	-2141.9	-47.7
میانگین Average	102015.63	-11894.37	-469.08	-10
مجموع Total	1530234.42	178415.6	-7036	-157

میانگین سود بخش کشاورزی زراعی دشت سرخس در دوره پایه به قیمت‌های ثابت سال ۱۳۸۴ برابر با ۱۱۳۹۱۰ میلیون ریال است و بیشترین کاهش سود نسبت به دوره پایه به ترتیب در سال‌های (۰۰، ۹۶ و ۱۳۸۶) است که در این سال‌ها آورده رودخانه بیشترین کاهش را داشته است. زیان تجمعی در کل دوره برابر با برابر با ۱۷۸،۴۱۵/۶ میلیون ریال به قیمت‌های سال ۱۳۸۴ است که با تبدیل آن با استفاده از رابطه ۷ به سال ۱۴۰۲ با متوسط نرخ تورم دوره مورد مطالعه (۲۴ درصد) این خسارت برابر با ۷۰۳۶ میلیارد ریال است. در شکل ۴ روند سود کشاورزی بخش زراعی دشت سرخس در دوره مورد مطالعه نشان داده شده که دارای شیب منفی (نزولی) و هم‌جهت روند بلندمدت دبی آب رودخانه هریرود است.



شکل ٤: روند تغییرات سود کشاورزان (منبع نتایج تحقیق)

Figure 7:Trends in changes in farmers' profits (source of research results)

پ– بررسی آثار سناریوهای تغییر نهاده آب بر الگوی کشت و سطح زیرکشت کشاورزان در دشت سرخس:

بررسی اعمال سناریوهای تغییر نهاده آب بر مدل PMP سال پایه در جداول ۴ ارائه شده است.

جدول ۲. درصد تغییرات سطح زیرکشت محصولات در سناریوی کاهش دبی (منبع نتایج تحقیق)

Table 3. Percentage of changes in crop area under water discharge reduction scenario (source: research results)

	محصولات زراعی – آبی Crops - Water							کل سطح زیر کشت Total cultivated area
سال yare	گندم Wheat	پنبه Cotton	چغندر Beetroot	ذرت Corn	یونجه Alfalfa	جو Barley crop	هندوانه Watermelon	
دوره پایه Basic course	۷۷۷۶	۳۹۴۳	۶۴۰	۶۲۵	۱۲۱۷	۱۶۳۳	۴۰۴۴	۱۹۸۷۸
1385-86	-0.3	0.4	-6.1	2.3	-0.9	-2.2	1.7	0.0
1386-87	-54.6	-39.3	-26.8	-30.7	-43.2	-70.8	-29.7	-45.5
1387-88	-0.3	0.4	-6.1	2.3	-0.9	-2.2	1.7	0.0
1388-89	-0.3	0.4	-6.1	2.3	-0.9	-2.2	1.7	0.0
1389-90	-0.2	0.0	0.1	0.0	-0.1	-0.3	0.0	-0.1
1390-91	-0.3	0.4	-6.1	2.3	-0.9	-2.2	1.7	0.0
1391-92	-36.4	-23.1	-13.8	-18.3	-24.7	-47.7	-18.6	-29.1
1392-93	-26.3	-14.1	-6.5	-11.4	-14.4	-34.8	-12.4	-19.9
1393-94	-0.3	0.4	-6.1	2.3	-0.9	-2.2	1.7	0.0
1394-95	-43.8	-29.7	-19.0	-23.4	-32.2	-57.0	-23.1	-35.7
1395-96	-0.3	0.4	-6.1	2.3	-0.9	-2.2	1.7	0.0
1396-97	-66.7	-50.0	-35.4	-38.9	-55.4	-86.1	-37.1	-56.4
1397-98	-0.3	0.4	-6.1	2.3	-0.9	-2.2	1.7	0.0
1398-99	-0.3	0.4	-6.1	2.3	-0.9	-2.2	1.7	0.0
1399-00	-77.9	-60.0	-43.4	-46.6	-66.8	-100.0	-43.9	-66.5
میانگین Average	-20.6	-14.2	-12.9	-10.1	-16.2	-27.6	-10.1	-16.9
ضریب نوسان CV	35.4	24.6	14.6	-19.2	27.3	-49.2	18.1	28.6

نتایج نشان داده که بیشترین کاهش سطح زیر کشت به ترتیب در سال‌های ۹۴-۸۶-۹۶-۱۴۰۰ است. بررسی ضریب نوسان محصولات زراعی در دشت سرخس نشان داد که محصول جو بیشترین نوسان را دارد (۴۹٪) و محصولات هندوانه و ذرت کمترین ضریب نوسان به ترتیب ۱۸ و ۱۹ درصد دارند و سایر محصولات تقریباً برابر با ضریب نوسان کل سطح زیر کشت (۲۸٪) است. کل سطح زیر کشت محصولات زراعی –آبی از ۱۹،۸۷۸ هکتار در سال ۱۳۸۵ به ۱۳،۴۶۴ هکتار در سال ۱۴۰۰ کاهش یافته است (نمودار ۴).

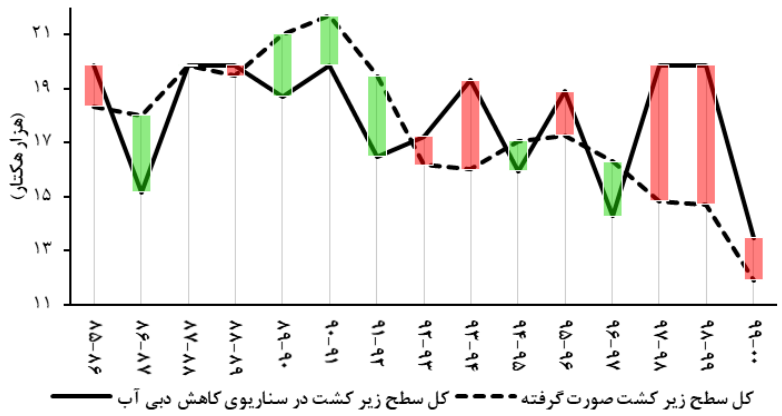
جدول ۳: مقایسه نتایج اعمال سناریو با سطح زیرکشت صورت گرفته (منبع: نتایج تحقیق)

Table 4:Comparison of the results of scenario application with the area under cultivation (Source: Research Results)

سال yare	سطح زیر کشت در سناریوی کاهش دبی (h۱) Cultivated area in the discharge reduction scenario (h۱)	Δ سطح زیرکشت سناریوی کاهش دبی با دوره پایه Δ Crop area in the discharge reduction scenario with the base period	**سطح زیر کشت صورت گرفته (h۲)** Cultivated area (h۲)	**Δ سطح زیرکشت صورت گرفته با دوره پایه** Δ Area under cultivation with base period	**اختلاف سطح (h۲ – h۱)** Surface difference (h۲ – h۱)
دوره پایه Basic course	۱۹۸۷۷.۹۶	–	۱۹۸۷۷.۶۹	–	–
1385-86	19870.6	-7.3	18350	-1528	-1521
1386-87	10831.8	-9046.1	18023	-1855	7191
1387-88	19870.6	-7.3	19880	2	9
1388-89	19870.6	-7.3	19470	-408	-401

1389-90	19858.3	-19.6	21029	1151	1171
1390-91	19870.6	-7.3	21710	1832	1839
1391-92	14102.6	-5775.3	19471	-407	5368
1392-93	15919.7	-3958.2	16180	-3698	260
1393-94	19870.6	-7.3	16007	-3871	-3864
1394-95	12777.2	-7100.8	17067	-2811	4289
1395-96	19870.6	-7.3	17260	-2618	-2610
1396-97	8675.5	-11202.5	16307	-3571	7631
1397-98	19870.6	-7.3	14840	-5038	-5031
1398-99	19870.6	-7.3	14720	-5158	-5151
1399-00	6663.8	-13214.2	11869	-7982	5232
میانگین Average	16519.61	-3358	17480.63	-2397.33	961

در بررسی و مقایسه نتایج سناریوهای کاهش دبی آب رودخانه در بازه زمانی مورد مطالعه و آنچه که در واقعیت در دشت سرخس کشت کشت شده است در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول ۵ آثار کل عوامل مؤثر بر سطح زیرکشت به‌طور متوسط سالانه ۲۳۹۷- هکتار از سطح زیر کشت دشت سرخس را نسبت به دوره پایه کاهش داده است که ازاین‌بین اثر تغییرات کاهش دبی آب رودخانه به‌طور متوسط سالانه ۳،۳۵۸- هکتار معادل ۱۴۰- درصد از کل کاهش و اثر سایر عوامل برابر با ۹۶۱+ هکتار معادل ۴۰+ درصد از کل کاهش سطح زیر کشت در هرسال نسبت به سطح بالفعل کشاورزان در دوره پایه است. شکل ۵ نشان دهنده میزان تأثیر سایر عوامل (مانند سیاست‌های دولت، سازگاری کشاورزان با کم‌آبی، پیشرفت تکنولوژی و...) بر سطح زیرکشت محصولات زراعی در دشت سرخس و اثر خالص کاهش دبی آب بر سطح زیرکشت است.



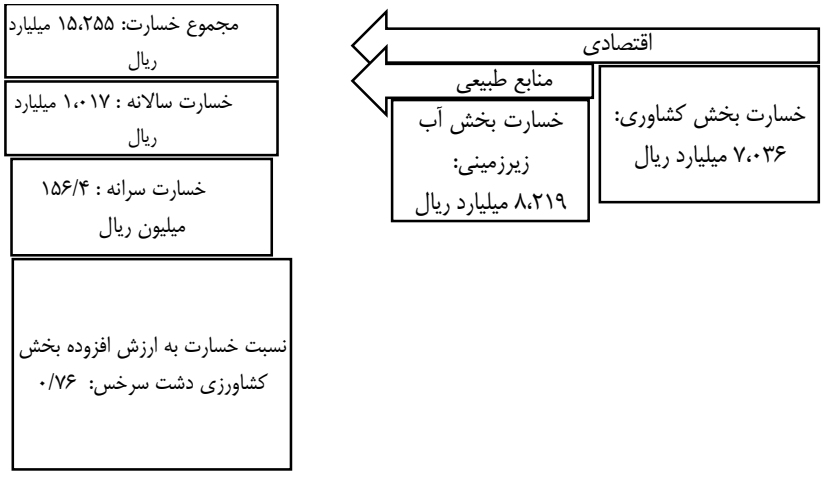
شکل ۵. سطح زیر کشت و الگوی کشت محصولات زراعی آبی دشت سرخس (منبع نتایج تحقیق)

Figure 8. Cultivated area and cultivation pattern of irrigated crops in the Sarakhs Plain (source of research results)

کندلهای سبزرنگ نشان دهنده اثرات مثبت سایر عوامل بر سطح زیر کشت است که باعث افزایش سطح زیر کشت نسبت به نتیجه رفتار کشاورزان در قبال کاهش دبی آب در مدل PMP شده است و به همین صورت کندلهای قرمز رنگ نشان دهنده اثرات منفی سایر عوامل بر سطح زیر کشت دشت سرخس است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس یافته‌های این مطالعه، کاهش دبی رودخانه هریرود منجر به کاهش ۶۱ درصدی سطح زیر کشت دشت سرخس در طی دوره مطالعه شده است، در حالی که مطالعات مشابه در دشتهای اطراف رودخانه زاینده‌رود (مانند پژوهش Lotfi & Ahmadi Nadoushan, 2024) کاهشی حدود ۵۰ درصدی را در همین بازه گزارش کرده‌اند. همچنین، سود خالص کشاورزان در منطقه سرخس در طی دوره مطالعه برابر با ۴۷ درصد نسبت به سال پایه کاهش یافته، در حالی که در دشتهای استان فارس (Rafiei Atani.et.al 2021) این کاهش حدود ۳۰ درصد بوده است. این اختلاف‌ها نشان‌دهنده تأثیر شدیدتر کاهش آب رودخانه هریرود بر دشت سرخس در مقایسه با سایر مناطق مشابه ایران است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشاهده می‌شود که خسارت تجمعی وارد شده در بخش کشاورزی برابر با ۷،۰۳۶ میلیارد ریال بوده و به‌طور تجمعی ۵۰،۳۷۵ هکتار نسبت به دوره پایه سطح زیرکشت کشاورزی کاهش یافته و خسارت وارد شده به بخش سفره زیرزمینی برابر با ۸،۲۱۹ میلیارد ریال که درمجموع کل خسارت وارد شده برابر با ۱۵،۲۱۵ میلیارد ریال است.شکل



شکل ۹. خلاصه نتایج تحقیق
Figure 9. Summary of research results

لذا پیشنهاد می‌شود که:

در ابتدا با تهیه الگوی کشت مناسب با محدودیت آبی در دشت سرخس، کشاورزی زراعی منطقه را به سمت محصولات کم آب بر سوق داده شود و همچنین با تغییر روش‌های آبیاری تمهیدات لازم برای مدیریت آب اتخاذ شود. سپس با توجه به این‌که یکی از عوامل اصلی تخریب جنگل‌ها و کاهش دبی رودخانه هریرود توسعه صنعت سدسازی در کشور افغانستان بر روی رودخانه مذکور بوده لذا پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج مطالعه که می‌تواند به‌عنوان ابزاری مستند و علمی برای دفاع از مطالبات حقوقی خسارت واردشده و افزایش قدرت چانه‌زنی مسئولین در دیپلماسی آب و گرفتن حق آبه کشور ایران از کشور بالادست (افغانستان) در مجامع بین‌المللی مورد استفاده قرار بگیرد.

باتوجه به اهمیت رودخانه هریرود در ایران و دشت سرخس به‌خصوص در بخش کشاورزی که معیشت کشاورزان در گرو آورده هریرود است پیشنهاد می‌شود با استفاده از تفاهم‌نامه‌های تجاری بین دو کشور با توجه به تأمین آب رودخانه هریرود به جهت جلوگیری از خسارت‌های اجتماعی و محیط‌زیستی کاهش دبی موردتوجه قرار بگیرد.

با توجه به نسبت خسارت‌های بخش محیط زیستی به بخش اقتصادی که برابر با ۱/۱۷ است پیشنهاد می‌شود GDP سبز به‌عنوان شاخصی جامعه برای برآورد رشد اقتصادی با در نظر گرفتن خسارت‌های محیط زیستی محاسبه شود؛ زیرا این رویکرد نه‌تنها رشد اقتصادی را به‌طور دقیق اندازه گیری می‌کند بلکه ضامن حفظ منابع طبیعی و محیط‌زیست در روند توسعه برای نسل‌های آینده است.

دشت سرخس به لحاظ موقعیت جغرافیایی در نزدیکی کلان‌شهر مشهد و اقلیم حساس خشک و نیمه‌خشک قرار دارد و با کاهش دبی رودخانه هریرود پیامدهای محیط زیستی زیادی ازجمله وجود ریزگردها در منطقه مورد مطالعه بروز کرده است. مطالعه پورهاشمی و همکاران در سال ۹۷ نشان داده که ۵ کانون ریزگرد استان خراسان رضوی در دشت سرخس به‌وجود آمده لذا پیشنهاد می‌شود جهت برآورد دقیق‌تری از خسارت‌های ناشی از کاهش دبی آب رودخانه هریرود، علاوه بر بخش کشاورزی دشت سرخس در مطالعات آتی خسارت ناشی از ریزگردها و سایر پیامدهای محیط زیستی مانند فرونشست دشت سرخس ناشی از برداشت آب زیرزمینی و شوری آب و تخریب جنگلهای پده در حاشیه رودخانه و ... نیز مورد توجه قرار بگیرد (Poorhashemi et al., 2019).

همچنین با توجه به حوضه‌های آبریز مشترک کشور ایران با کشورهای همسایه و وجود رودخانه‌های مرزی مشترک و اهمیت حیاتی آن‌ها در تأمین امنیت آبی، اقتصادی و زیست‌محیطی ایران، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، بررسی جامع و نظام‌مند خسارت‌های واردشده به ایران ناشی از کاهش دبی رودخانه‌های مشترک با کشورهای همسایه در دستور کار قرار بگیرد. این مطالعات باید با رویکردی علمی، حقوقی و دیپلماتیک طراحی شوند تا بتوانند به ابزاری قوی برای دفاع از حقابه ایران در مجامع بین‌المللی و مذاکرات دوجانبه تبدیل گردند. پیشنهاد می‌شود ابتدا تمرکز بر رودخانه‌های بحرانی مهم مرزی مانند هیرمند (با افغانستان)، ارس (با ارمنستان و آذربایجان) و قرهسو (با ترکیه) که کاهش دبی آن‌ها تأثیرات شدید اقتصادی–زیست‌محیطی بر مناطق مرزی ایران داشته شروع شود.

REFERENCES

Azin Amaish Toos Consulting Engineers. (2018). *Estimating the water needs of the Tajan River and its marginal wetlands*. D. O. Enviroment.

Bakhshi, M. R., Peykani, G., Hosseini, S. S., & Saleh, I. (2010). Evaluating Effects of Removing Fertilizer Subsidy and Direct Payment Polices on Cropping Pattern and Inputs Use (Case Study: Agronomy Subsector of Sabzevar Township). *Agricultural Economics*, *4*(2), 185-207. https://www.iranianjae.ir/article_9765_2edbc506069a7891ca4c8040558f8d43.pdf

de Frahan, B. H., Buysse, J., Polomé, P., Fernagut, B., Harmignie, O., Lauwers, L., Van Huylenbroeck, G., & Van Meensel, J. (2007). Positive mathematical programming for agricultural and environmental policy analysis: review and practice. *Handbook of operations research in natural resources*, 129-154.

Golpazir, M., Ebrahimi, K., Modaresi, F., & Shamsi, M. (2023). Quantifying the economic value of Isfahan agricultural water sources with the approach of modifying the cultivation pattern and based on virtual water. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, *54*(3), 575-592.

Heckelei, T., & Britz, W. (2000). Positive mathematical programming with multiple data points: a cross-sectional estimation procedure. *Cahiers d'Economie et de Sociologie Rurales*, *57*, 27-50.

Hosseini, S. A. (2018). *A Review of the Harirod River Basin*.

Howitt, R. E. (1995). Positive mathematical programming. *American journal of agricultural economics*, *77*(2), 329-342.

Howitt, R. E. (2005). Agricultural and environmental policy models: Calibration, estimation and optimization. *Davis: University of California, Davis. Available online at< http://www. agecon. ucdavis. edu/people/faculty/facultydocs/howitt/master. pdf*.

Keramatzadeh, A., Chizari, A., & Sharzehi, G. (2011). The Role of Water Market in Determining the Economic Value of Irrigation Water through Positive Mathematical Programming (PMP). *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, *42*(1), 29-44. https://ijaedr.ut.ac.ir/article_23225_bdf6aca412c6b6b3a32bb3d12c4d4238.pdf

koocheki, A., Nasiri mahalati, M., Asadi, s., & Zare, H. (2022). Evaluation of Spatial Crop Water Use Efficiency in Khorasan Razavi Province. *Journal Of Agroecology*, *14*(1), 69-94. https://doi.org/10.22067/jag.v1i1.61172

Korkutan, S. (2001). *The sources of conflict in the Euphrates-Tigris Basin and its strategic consequences in the Middle East* Citeseer].

Mardani Najafabadi, M., & Kavand, H. (2021). The Effects of Climate Change and Water Resource Conservation Policies on Farmers' Profit Using Economic-Hydrological Modeling. 6th International Conference on Knowledge and Technology in Agricultural Sciences, Natural Resources and Environment of Iran,

Mianabadi, H. (2013). A Review of International Water Laws. 7th National Congress on Civil Engineering,

NASA. (1997). *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite data (2001-2019)* NASA. https://gpm.nasa.gov/missions/trmm

Lotfi, P. and Ahmadi Nadoushan, M. (2024). Investigation of The Trend of Agricultural Land Use Changes in the Zayandeh Rood Watershed Using Google Earth Engine Platform. Environment and Interdisciplinary Development, 8(82), 35-48. doi: 10.22034/envj.2024.421306.1323

Office of Economic Planning and Research. (1401a). R. W. C. o. K. Razavi.

Office of Economic Planning and Research. (1401b). *Sarakhs Plain Water Report*. R. W. C. o. K. Razavi.

Paris, Q., & Howitt, R. E. (1998). An analysis of ill-posed production problems using maximum entropy. *American journal of agricultural economics*, *80*(1), 124-138.

Planning, & Strategic Supervision Deputy of the Presidency of the Islamic Republic of, I. (2012). *Division and coding guidelines for watershed basins and areas: Document No. 310*.

http://seso.moe.org.ir

Planning, K. R. J.-e.-A. O.-D. o., Statistics, E. A.-A., & Office, I. (2006). *Agricultural Statistics of Crops*.

Planning, K. R. R. W. C.-D. o. P.-O. o., & Group, E. S.-S. (2021). *Time Series Report of the Harirod River Discharge (Water Years 1991-2021)*.

Pourhashemi, S., Amirahmadi, A., Diasa, M. A. Z., & Salehi, S. M. (2018). Determination of Geomorphic and Land use Characteristics of Dust Source Hotspots (Case Study: Khorasan Razavi Provience). *Arid regions Geographic Studies*, *9*(34), 14-24. https://www.magiran.com/paper/2042213

Rezaee, A., joolaie, r., & keramatzadeh, A. (2020). Effects of Water Pricing Policy and Water Quota on Water Resources Sustainability in Golestan Province. *Journal of Water Research in Agriculture*, *34*(2), 269-285. https://doi.org/10.22092/jwra.2020.122263

Rezaee, A., Mortazavi, A., & Peykani, G. (2016). Analysis of Farmers Economic Status in Drought Conditions, the East of Zayandeh-Rud River Basin. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, *47*(2), 335-342. https://doi.org/10.22059/ijaedr.2016.59712

Rafiei Atani, R. , Nasiri Saleh, F. and Najafi Tokhoshkeh, N. (2021). Hydro-Economic Modeling of Rainfall Reduction Effect on Cropping Pattern and Farmers' Profits in the Tashk-Bakhtegan Basin. Iran-Water Resources Research, 16(4), 65-76.

Skonjad, M. M. (1996). *Engineering economics or economic evaluation of industrial projects* (Vol. 7). Amir Kabir University of Technology publication.

TOOSSAB, C. E. (2009). *Updating the Integration of Water Resources Studies in the Qaraqum River Basin*.

Zawahri, N. A. (2006). Stabilising Iraq's water supply: what the Euphrates and Tigris rivers can learn from the Indus. *Third World Quarterly*, *27*(6), 1041-1058.