# Research Paper

# Developing a Model for Optimizing the Integrated Allocation of Water Resources and Cultivation Area Using Game Theory: The Case Study Downstream Lands of the Narmab Reservoir Dam

Abbas Sedghamiz[1]*, Mohammad Reza Nikoo[2], Manoochehr Heidarpour[3]

1.Assistant Prof. of Water Engineering, Darab College of Agricultural Sciences and Natural Resources, Shiraz University, Iran

2. Associate Prof. of Civil Engineering, College of Civil Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

3. Professor of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

**Received**: 2020/11/15
**Revised:** 20221/01/24
**Accepted:** 2021/04/22

**Use your device to scan and read the article online**

DOI:
10.30495/wej.2021.26431.2278

**Keywords:**
Multiobjective optimization model, simulation model, conjunctive use, cooperative game model, Condorcet method

**Abstract**

**Introduction:** Due to the occurrence of frequent droughts in recent years and the increasing need for food production, effective planning of water resources for irrigation purposes is vital. In the present study, in order to optimally allocate water, cultivation area and pattern, an integrated multiobjective optimization-simulation model has been developed using collaborative game methods.

**Methods:** The developed model is an integrated multi-objective model of surface water and groundwater in which the MODFLOW-GMS model is used to simulate groundwater behavior. The objectives defined in the model are to maximize equity in water supply, maximize farmers' profits and maximize the use of green water. After running the model and extracting the pareto front curve between the objectives, the most preferred solution has been selected as the superior solution through the Condorcet method. Then, by forming possible coalitions and applying the cooperative games, profit reallocation has been done between different regions.

**Findings:** The results show that the amount of water allocated annually depends on the area under summer crops. The results also indicate that the maximum total profit and profit per unit area belong to Gonbad Kavous and Minoodasht counties, respectively. In addition, the formation of the main coalition has increased the profits of each region by at least 3% and at most 40%.

Citation: Sedghamiz A, Nikoo M. R, Heidarpour M. Developing a Model for Optimizing the Integrated Allocation of Water Resources and Cultivation Area Using Game Theory: The Case Study Downstream Lands of the Narmab Reservoir Dam. Water Resources Engineering Journal. Water Resources Engineering Journal. 2021; 14 (50):1-16

⁎**Corresponding author:** Abbas Sedghamiz
**Address:** Darab College of Agricultural Sciences and Natural Resources, Shiraz University, Iran
**Tell:** +9836139810
**Email:** sedghamiz@shirazu.ac.ir

# Extended Abstract

## Introduction

As an undeniable fact, water is an essential element for human life, including domestic, industrial, agricultural and environmental requirements. Therefore, water is a multifunctional resource, threatened by population growth, climate change, rainfall variability, etc. These factors lead to more pressure on water resources, including both groundwater and surface water resources. So, we will face numerous challenges if these resources are not appropriately managed. Many researches focused on agricultural requirements because a large amount of available water in watersheds is used by agricultural sectors. The researchers offer some solutions to manage the resources. Conjunctive use of groundwater and surface water resources is one of the most efficient tools to manage water resources in agricultural sectors. According to restrictions in water resources and the project's aims, various mathematical methods can be applied to get the best solution. These methods are known as optimization methods and include a wide range of classical and heuristics methods. Also, depending on cooperative or noncooperative relations between agricultural sectors, water consumption can be varied. These issues have been studied in game theory methods, which can be embedded in the water resource management model. At present, the Narmab region in Golestan province faces various problems related to water shortage and the growth of demands. This research has been tried to offer a solution to alleviate the issues.

## Materials and Methods

This research was conducted in the geographical area of the Narmab region of Golestan province. The region mentioned is located downstream of Narmab dam and divided into three agricultural sectors; Minoodasht, Azadshahr, and Gonbad Kavoos. The study period was from September 2002 to September 2007, which determined based on SPI index as a five-year drought period. In the presented study, a conjunctive use model was developed to allocate optimal water, cultivation area, and crop pattern in a river, groundwater, reservoir system. The model was a multiobjective optimization- simulation model in which an ANN meta-model simulates Groundwater's behavior through the obtained results from the MODFLOW-GMS model. Also, the reservoir was simulated based on the minimum and maximum water level, hydraulic characteristics of gates, and reservoir inflow. In the optimization part, the objectives functions were related to maximizing the equity, agricultural benefit, and green water ratio. This part used GA tools to solve the optimization model. By running the model, a variety of solutions related to the Pareto front curve was obtained. One of the social choice methods; 'Condorcet method' was used to select the preferable solution. The input data for the method is a matrix with rows equal to 'the number of objective functions' and columns equal to 'the number of solution points. After choosing the preferable solution, the results were used in the game model, and reallocation prosses were done for all cooperative game methods (Nucleolus, Weak Nucleolus, Proportional Nucleolus, Normal Nucleolus, Shapley value) in the study.

## Findings

The results showed that the obtained Pareto front curve consists of 63 solution points. By the Condorcet method, solution point NO.36 was selected as the preferable solution. The solution is a vector with the optimal values for crop pattern, crop area, water allocation, agricultural benefit, and reallocation benefit of different agricultural sectors. The results showed that crop patterns varied dynamically for each sector in the simulation period. Based on the results, the maximum and minimum total crop area were for the first and fourth years. Another significant result is the summer and winter crop area. The maximum and minimum summer crop area were for the third and the second year, respectively. These results were for the winter crops in the first and fourth year, respectively. Also, the maximum water allocation occurred in the third year, while the minimum value was for the fourth year. Another result is related to agricultural benefit per area, which had the maximum value for the Minoodasht sector and the minimum value for the Azadshahr sector. By applying the cooperative game method and making use of agricultural benefit results, benefit reallocated was done. The results showed that the most reallocated benefit for Minoo dasht, Azad shahr, and Gonbad kavoos are obtained from the normal nucleolus, nucleolus, and

proportional nucleolus, respectively. However, the results from the Shapley value method can be more suitable than other cooperative games.

## Discussion

According to the crop area results, the maximum and minimum water allocation to the sectors is expected to occur in the first and fourth years, respectively. However, other factors such as crop type in terms of water requirements and cultivation season play key roles in the amount of water consumed. So that consumable plants do not exist in the fourth year or have less area. Also, due to the economic advantages of summer crops, these crops are more preferable to cultivate than winter crops. Regarding to agricultural benefit results, the Minoodasht sector includes more economic advantages plants than the other areas. According to the reallocation results, the Shapley value method is the best cooperative game method. In this method the percentages of benefit growth in sectors have the least variance, so it creates the fairest distribution of benefit.

## Conclusion

In drought conditions, effective use of water is vital. The simulation-optimization approach for water resource management helps us to protect water resources. In the research, the developed model lets farmers have the maximum probable benefit, as the most important objective in terms of social. The mentioned condition is definitely affected by green water maximization, decreasing irrigation water requirement (water resources protection), and increasing the total crop area. Simultaneously they feel satisfactory due to minimum variation of distributed water among sectors. This makes sectors' cooperative efforts more effective and encourages farmers in sectors to form a grand coalition.

## Ethical Considerations compliance with ethical guidelines

The cooperation of the participants in the present study was voluntary and accompanied by their consent.

## Funding

No funding.

## Authors' contributions

Design and conceptualization: Mohammad Reza Nikoo, Abbas Sedghamiz.
Methodology and data analysis: Abbas Sedghamiz, Mohammad Reza Nikoo.
Supervision and final writing: Abbas Sedghamiz, Mohammad Reza Nikoo, Manoochehr Heidarpour.
Conflicts of interest
The authors declared no conflict of interest.

# مقاله پژوهشی

# تدوین یک مدل بهینه‌سازی تخصیص تلفیقی منابع آب و سطح زیر کشت با کاربرد تئوری بازی‌ها، مطالعه موردی اراضی پایین دست سد مخزنی نرماب

عباس صدق آمیز[۱*]، محمد رضا نیکو[۲] ، منوچهر حیدرپور [۳]
۱. استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز
۲. دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شیراز
۳. استاد دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

**تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۴**
**تاریخ داوری: ۱۴۰۰/۱۱/۰۴**
**تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۲**

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید

DOI:
10.30495/wej.2021.26431.2278

**واژه‌های کلیدی:**
مدل بهینه سازی چندهدفه، مدل شبیه سازی، تخصیص تلفیقی، مدل بازی همکارانه، روش کندورسه

## چکیده

**مقدمه:** با توجه به وقوع خشکسالی‌های مکرر در سال‌های اخیر و افزایش نیاز به تولید مواد غذایی، استفاده صحیح و برنامه‌ریزی شده از منابع آب امری حیاتی می‌باشد. در تحقیق حاضر، به منظور تخصیص بهینه مقدار آب، سطح زیر کشت و الگوی کشت، یک مدل تلفیقی چندهدفه بهینه‌سازی- شبیه‌سازی، با بکارگیری روش‌های بازی همکارانه توسعه داده شده است.

**روش:** مدل توسعه داده شده که یک مدل تلفیقی چندهدفه آب سطحی و آب زیرزمینی می‌باشد که در آن، جهت شبیه‌سازی آب‌زیرزمینی از مدل MODFLOW-GMS استفاده شده‌است. اهداف مورد نظر در مدل بهینه‌سازی عبارت از حداکثرسازی عدالت در توزیع، حداکثرسازی سود کشاورزان و حداکثرسازی استفاده از آب سبز می‌باشند. پس از اجرای مدل مذکور و استخراج منحنی تعامل بین اهداف، ارجح‌ترین راه حل، از طریق روش کندورسه به عنوان جواب (گزینه) برتر انتخاب شده است. در ادامه، با تشکیل ائتلاف‌های ممکن و به‌کارگیری تئوری بازی‌های همکارانه، توزیع مجدد سود بین مناطق مختلف انجام شده‌است. این مدل برای منطقه کشاورزی محدود به شهرستان‌های مینودشت، آزادشهر و گنبدکاووس در استان گلستان واقع در پایین‌دست سد مخزنی نرماب به‌کار گرفته شد.

**یافته‌ها:** نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مقدار آب تخصیص داده شده سالیانه، وابسته به سطح زیر کشت محصولات تابستانه می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از این است که حداکثر سود کل و سود در واحد سطح بترتیب متعلق به شهرستان های گنبد کاووس و مینودشت می‌باشد. علاوه بر این، تشکیل ائتلاف اصلی باعث شده است که سود هر یک از مناطق، حداقل ۳ و حداکثر ۴۰ درصد افزایش داشته باشد.

**نتیجه‌گیری:** در مدل ارائه شده بعنوان یک مدل با رویکرد شبیه‌سازی – بهینه‌سازی، با مدیریت میزان رها سازی آب از سد، برداشت از آبخوان و انتخاب بهترین الگوی کشت متناسب با وضعیت منابع آب، امکان صیانت از این منابع و در عین حال افزایش درآمد کشاورزان میسر گردیده است. همچنین با تغییر رفتار کشاورزان در جهت همکاری و شکل‌گیری ائتلاف کلی (اصلی) بین مناطق، افزایش سود ایشان به میزان قابل توجهی مورد انتظار می‌باشد.

* **نویسنده مسئول:** عباس صدق آمیز
**نشانی:** گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز
**تلفن:** ۰۹۱۷۳۱۱۸۲۱۲
**پست الکترونیکی:** sedghamiz@shirazu.ac.ir

## مقدمه

امروزه بسیاری از کشورهای در حال توسعه، به علت رشد جمعیت، صنعتی‌شدن، تغییر اقلیم و نبود مدیریت کارآمد، در معرض کمبود آب قرار دارند، ضمن اینکه تغییرات اقلیمی، تأثیرات مخرب خود را در سایر مناطق جهان آشکار کرده است (۲). لذا این شرایط اقتضا می‌نماید که جهت حفظ و صیانت از منابع موجود و رو به کاهش فعلی، با دقت و به صورت برنامه‌ریزی شده عمل نمود. از این رو محققان متعددی با ارائه روش‌های مختلف سعی نمودند تا با توسعه روش‌های مؤثرتر، راهکارهای مناسب‌تری را در زمینه بهره‌برداری بهینه از منابع آب ارائه نمایند. پراساد و همکاران (۲۲) به منظور حداکثرسازی سود حاصل از تولید محصولات کشاورزی، مقدار آب تخصیص داده شده به گیاه را بر اساس دوره رشد گیاهی بطوری بهینه‌سازی نمودند، که کشت گیاهان حساس با آبیاری کامل و گیاهان مقاوم با کم‌آبیاری (بدون کاهش محصول قابل توجه) قابل برنامه‌ریزی گردد. در تحقیق دیگری نادرا و همکاران (۱۳) از یک رویکرد جدید به منظور افزایش کارایی و قابلیت اطمینان در بهره‌برداری از مخزن سد در مواجهه با تأثیرات تغییر اقلیم استفاده نمودند. سانگ و همکاران (۲۱) نیز با لحاظ سناریوهای تغییر اقلیم، مدل خود را ارائه نمودند. آنها مدل خود را بر اساس اهداف اقتصادی اجتماعی و زیست محیطی بنا نهادند و نشان دادند که کاهش جریان سطحی تأثیر منفی زیادی بر اهداف مدیریتی دارد. آنها نتیجه گرفتند که مدیریت یکپارچه منابع آب از اهمیت حیاتی برای اکوسیستم‌های شکننده برخوردار است. فلاح- مهدی‌پور و همکاران (۵) یک مدل تلفیقی را جهت بهره‌برداری بهنگام از سیستمهای مخزن – آبخوان ارائه نمودند. آنها نشان دادند که تخصیص آب در شرایط غیر متمرکز دارای قابلیت اعتماد و پایائی بیشتر و آسیب‌پذیری کمتری نسبت به شرایط متمرکز می‌باشد. در مطالعه دیگری زینلی و همکاران (۲۵) با ارائه یک مدل بهینه سازی تلفیقی آب سطحی و آب زیرزمینی برای مناطق خشک نشان دادند که استفاده از این مدل، بخصوص در مناطق خشک و کم جریان می‌تواند قابلیت اطمینان به تقاضا را افزایش داده و به کاهش برداشت آب زیرزمینی در پایان دوره عملیاتی کمک کند. سپهوند و همکاران (۱۹) نیز در مطالعه خود یک مدل شبیه‌سازی – بهینه‌سازی را برای مدیریت منابع آب با هدف کاهش کمبود آب کشاورزی و افزایش سود کشاورزی ارائه نمودند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که منافع حاصل از کشت محصولات معرفی شده برای الگوی کشت بهینه نسبت به الگوی کشت رایج، افزایش قابل توجهی داشته است. در مطالعه دیگری ماتیوزی و همکاران (۱۲) اثر استراتژی‌های مختلف تخصیص آب در یک سیستم بهره‌برداری تلفیقی را جهت کاهش کمبود آب و اثرات منفی آن مورد توجه قرار دادند. آنها از یک مدل هیدرواکونومیک برای ارزیابی میزان کمبود آب در یک منطقه کشاورزی استفاده نمودند و گزارش کردند که امکان کاهش نسبی کمبود آب بر اساس توزیع مجدد آب بین مصرف کنندگان، بدون اعمال کم آبیاری برای مصارف پایین دست وجود دارد. گارسیا و همکاران (۳) انتخاب الگوی کشت بهینه و مقدار بهینه آب آبیاری در شرایط کمبود آب را بعنوان یک راهکار در جهت استفاده صحیح از منابع آب، مورد توجه قرار دادند. ایشان با تفکیک هر واحد کشت به تعدادی مناطق مدیریتی شیمیایی و فیزیکی، بهینه‌سازی الگوی کشت و تخصیص آب را با استفاده از تابع حداکثرسازی منافع اقتصادی و با لحاظ پارامتر ضریب واکنش گیاهی بانجام رساندند. در پژوهش دیگری گالان- مارتین و همکاران (۶) با توجه به اهمیت تولید پایدار غذا در کنار حفظ محیط زیست، یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه خطی، با توابع هدف حداکثرسازی تولید محصول و حداقل‌سازی آسیب به محیط زیست ارائه نمودند و آن را بر اساس روش محدودیت اپسیلون[1] حل کردند. ایشان حداکثرسازی سطح زیر کشت را همزمان با حداقل‌سازی مجموع آب مصرفی توسط گیاهان بانجام رساندند.

مدل‌سازی فعل و انفعالات رفتاری بازیگران مختلف که بدنبال دستیابی به حداکثر منافع می‌باشند، توسط تئوری بازی‌ها میسر می‌گردد. از این تئوری به صورت گسترده‌ای در زمینه انتقال آب داخل و بین حوضه‌ای (۲۴، ۱۱) ، محیط زیست (۴) و حل اختلاف در بهره‌برداری از آب زیرزمینی و سد (۱۵، ۷) استفاده شده‌است. همچنین لوایسیگا (۹) با استفاده از تئوری بازی‌ها، بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی مشترک را مورد بررسی قرار داد. محققین دیگری از قبیل صدق‌آمیز و همکاران (۱۶) و وانگ و همکاران (۲۳) ازکاربرد تئوری بازی‌های همکارانه در زمینه تخصیص مشارکتی منابع آب در سطح حوضه استفاده نمودند. در پژوهش دیگری صدق‌آمیز و همکاران (۱۷) با تدوین یک مدل بازی غیرهمکارانه بر اساس وجود رابطه پیشرو- دنباله‌رو بین دستگاه اجرایی و کشاورزان، یک مدل تخصیص بهینه آب بین مناطق مختلف کشاورزی ارائه نمودند. آنها نشان دادند که سود پیشرو مستقل از کل آب تخصیص داده شده است و صرفاً بستگی به الگو و سطح زیر کشت محصولات دارد.

معمولاً نتیجه حل یک مسئله چندهدفه بسته به روش حل استفاده شده، شامل تعدادی جواب غیر مغلوب می‌باشد که منحنی تعامل بین اهداف را تشکیل می‌دهند. در این حالت انتخاب بهترین جواب از بین جواب‌های ارائه شده از اهمیت خاصی برخوردار است. در این خصوص روش‌های متعددی از جمله روش‌های چانه‌زنی برگشتی[2] و انتخاب اجتماعی[3] توسط محققین مختلف در زمینه تخصیص منابع آب به‌کار گرفته شده است (۲۰، ۱۴، ۱۰، ۱).

در هیچ یک از پژوهش‌های اشاره شده، بهینه‌سازی تلفیقی آب سطحی و آب‌زیرزمینی، با به‌کارگیری مدل شبیه‌ساز آب‌زیرزمینی توزیع‌شده و به صورت چندهدفه به همراه نظریه تئوری بازی‌ها انجام نشده است. همچنین با ایجاد قابلیت انتخاب الگوی کشت به صورت پویا در مدل بهینه‌سازی ارائه شده، الگوی کشت در مناطق مختلف و سال‌های مختلف بر اساس اهداف تعریف شده، قابل تغییر می‌باشد. با اجرای مدل

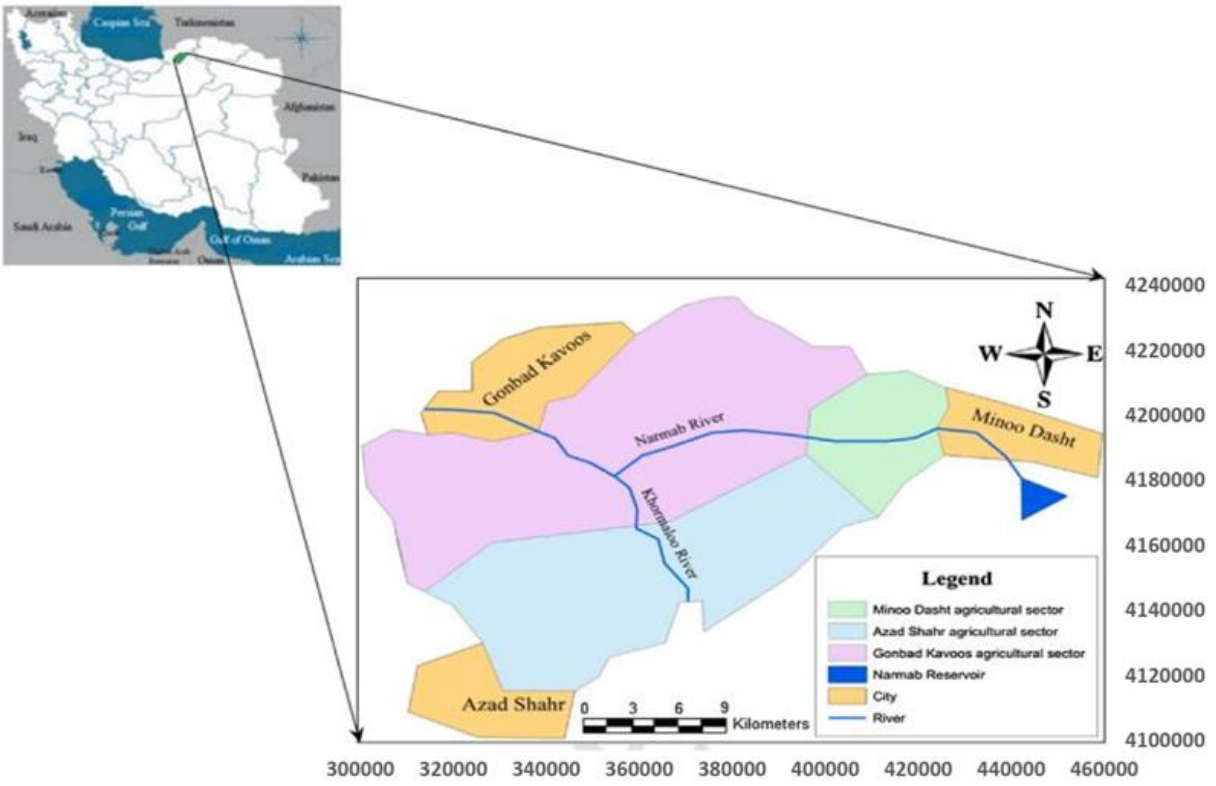
[1] Epsilon Constraint
[2] Fallback Bargaining
[3] Social Choice

و تولید جواب‌های متعدد، ارجح‌ترین جواب با استفاده از روش کندورسه[1] از دسته روش‌های انتخاب اجتماعی انتخاب می‌گردد. بکارگیری نظریه تئوری بازی‌ها در مدل ارائه شده با مختصات مورد اشاره، از دیگر ویژگی‌های این تحقیق است که در سایر پژوهش‌ها مغفول مانده‌است. در این بخش از تحقیق، از بازی‌های همکارانه جهت بازتوزیع سود ناشی از تشکیل ائتلاف استفاده شده‌است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در استان گلستان، حدفاصل شهرستان‌های مینودشت، آزادشهر و گنبد کاووس واقع شده است. حوضه آبریز این محدوده بین مختصات جغرافیایی ˝۲۰ ´۱۶ °۵۵ تا ˝۲۵ ´۳۸ °۵۵ طول شرقی و ˝۰۲ ´۴۵ °۳۶ تا ˝۴۰ ´۱۳ °۳۷ عرض شمالی، در جنوب و جنوب شرقی استان گلستان واقع شده است و متوسط بارندگی ۵۵۰ میلی متر را ثبت نموده است. منطقه مورد اشاره، اراضی کشاورزی پایین‌دست سد نرماب را که در محدوده سه شهرستان مینودشت، آزادشهر و گنبدکاووس به‌ترتیب با وسعت ۳۰۰۰، ۷۰۰۰ و ۱۰۰۰۰ هکتار قرار می‌گیرد، شامل می‌گردد (شکل ۱). سد نرماب در ۴/۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان مینودشت و با هدف تأمین آب کشاورزی، شرب و صنعت بر رودخانه نرماب در حوضه آبریز قره‌سو–گرگان، آخرین مراحل ساخت را سپری می‌کند و قادر به تنظیم سالانه ۱۸۰ میلیون متر مکعب از جریان رودخانه می‌باشد. این سد خاکی که ارتفاع ۶۰ متر از بستر را دارا می‌باشد، مخزنی به حجم ۱۱۵ میلیون متر مکعب در تراز نرمال را به خود اختصاص می‌دهد. ارتفاع متوسط محدوده مورد مطالعه در حدود ۶۹ متر (از سطح آزاد دریا) می‌باشد.




**شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در کشور**

در تحقیق حاضر، آب زیرزمینی به صورت توزیع‌شده با استفاده از مدل عددی MODFLOW شبیه‌سازی شده است. این تحقیق برای یک دوره خشکسالی مشخص که با استفاده از شاخص رواناب استانداردشده[2] تعیین شده است به انجام رسیده است. بر اساس نتایج بدست آمده طول دوره فوق الذکر ۵ سال و شروع و پایان آن به ترتیب مقارن با مهرماه ۱۳۸۱ و مهرماه ۱۳۸۶ می‌باشد. مدل بهینه‌سازی به‌کار گرفته شده، یک مدل چندهدفه متناسب با محدودیت‌های موجود در فیزیک مسئله می‌باشد. در این مدل، اهداف در نظر گرفته شده شامل حداکثرسازی عدالت در توزیع آب بین مناطق مختلف، حداکثرسازی سود کشاورزی هر یک از مناطق (سه تابع هدف) و حداکثرسازی استفاده از آب سبز[3] (رطوبت ذخیره شده در خاک در اثر بارندگی) با لحاظ تغییراتی مرتبط با الگوی کشت محصولات می‌باشند. قیود موجود در مسئله نیز شامل

[1] Condorcet
[2] Standard Runoff Index
[3] Green water

حداکثر سطح قابل کشت در هر یک از مناطق، حداکثر و حداقل حجم مخزن، حداکثر حجم رهاسازی ماهیانه و کنترل برداشت آب زیرزمینی با توجه به افت مجاز سطح آب زیرزمینی می‌باشند. در این تحقیق، موضوع بهینه‌سازی سطح زیر کشت – الگوی کشت با استفاده از مدل بهینه‌سازی ژنتیک الگوریتم چندهدفه (NSGA-II) در شرایط خشکسالی در یک دوره پنج‌ساله مورد بررسی قرار گرفته است و پتانسیل منطقه از جهت تولید محصول و کسب سود کشاورزی در شرایط تخصیص بهینه آب از منابع موجود ارزیابی گردیده است. مدل تدوین شده شامل ۲۸۵ متغیر تصمیم می‌باشد که ۲۴۰ متغیر مربوط به سطح زیر کشت، ۳۰ متغیر مربوط به دبی برداشت آب زیرزمینی و ۱۵ متغیر مربوط به الگوی کشت در سه منطقه می‌شود. مدل ژنتیک الگوریتم چندهدفه با تعداد جمعیت ۲۸۵۰ در ۲۰۰۰ نسل به اجرا در آمد و با انتخاب عدد ۰/۰۲ برای نسبت پارتو، تعداد نقاط در فضای جواب به ۶۳ نقطه کاهش داده شد. برای سایر پارامترهای مدل، از مقادیر پیش فرض استفاده گردید. در این مطالعه به دلیل چند هدفه‌بودن مدل بهینه‌سازی، جواب‌های غیر مغلوب متعددی نتیجه می‌شود. پس از اجرای مدل بهینه‌سازی چندهدفه، بهترین جواب بر اساس روش انتخاب اجتماعی (روش کندورسه) انتخاب شده است. ورودی‌های مدل پیشنهادی شامل پارامترهای هواشناسی (بارندگی، باران مؤثر، تبخیر و تبخیر و تعرق)، هیدرولوژیکی (دبی جریان رودخانه) و فیزیکی محدوده ی مورد مطالعه هم برای منابع سطحی و هم برای منابع زیر زمینی، الگوی کشت و تمامی فاکتورهای مرتبط با آن از قبیل عملکرد، درآمدها و هزینه‌ها و تقاضاهای بخش زیست‌محیطی می‌باشند. از دیگر داده‌های مهم ورودی به مدل، اطلاعات مربوط به مخزن شامل منحنی سطح–حجم–ارتفاع سد و قیود حداکثر برداشت و حجم حداقل و حداکثر مخزن سد می‌باشند. پس از جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز، به‌منظور شبیه‌سازی رفتار آبخوان در مقابل پمپاژ، از مدل شبیه‌ساز MODFLOW-GMS استفاده شده است. پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل، با تعریف راهبردهای مختلف برداشت از آبخوان در مناطق مختلف، افت سطح ایستابی به‌ازای تمام راهبردها تعیین می‌گردد. بدین‌ترتیب، پایگاه داده‌ای با ورودی دبی‌های پمپاژ و خروجی متوسط افت سطح ایستابی تولید می‌گردد که از آن برای آموزش، تست و اعتبارسنجی فرامدل شبکه عصبی مصنوعی استفاده می‌شود. در مرحله بعد، این فرامدل به مدل بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک الگوریتم متصل گردیده تا با اجرای آن بتوان منحنی تعامل اهداف را تعیین نمود. این منحنی شامل نقاط جواب ممکن برای مسئله می‌باشد و به‌منظور انتخاب ارجح‌ترین جواب، از روش انتخاب اجتماعی کندورسه استفاده شده است.

مرحله بعد شامل تشکیل ائتلاف‌ها و انجام بهینه‌سازی برای تعیین سود ناشی از ائتلاف‌ها می‌باشد. در این مرحله، ائتلاف‌های ممکن بین مناطق کشاورزی تشکیل شده و آب تخصیص‌یافته به هر منطقه که قبلاً از مدل چندهدفه به‌دست آمده است برای هر ائتلاف بازتوزیع می‌شود. تابع هدف بهینه‌سازی ائتلاف‌ها، حداکثرسازی مجموع سود خالص ائتلاف‌ها می‌باشد به‌طوری که سود آب برانی که در ائتلاف‌ها شرکت می‌کنند از سودی که آن‌ها بر اساس نتایج مدل تخصیص اولیه به‌دست آورده‌اند، کمتر نباشد. معادلات مورد استفاده باید بیانگر این باشد که سود شرکت‌کنندگانی که در ائتلاف شرکت می‌کنند تحت هیچ شرایطی نباید کمتر از سود حاصل از عدم شرکت آن‌ها در ائتلاف گردد. نکته قابل توضیح در ارتباط با الگوی کشت به‌کار گرفته شده در مدل حاضر این است که از آن جایی که الگوی کشت پیشنهادی سازمان آب منطقه‌ای استان گلستان، الگوی کشت بهینه‌سازی شده بر اساس اهداف فرضی در این مطالعه و بخصوص حداکثرسازی محتوای آب مجازی نبوده است، تعدادی محصول مناسب جهت کشت در این منطقه به الگوی کشت پیشنهادی اضافه گردید و تعداد کل محصولات قابل کشت به ۱۶ محصول رسانده شد. این محصولات شامل ۷ محصول زمستانه و ۹ محصول تابستانه می‌باشد (جدول ۱). در این مرحله، مدل بهینه‌سازی طوری کدنویسی شده است که امکان انتخاب الگوی کشت مناسب بصورت دینامیک در هر یک از مناطق و در هر سال از دوره ۵ ساله مدل‌سازی فراهم گردد. بدین‌ترتیب با انتخاب ۴ محصول از بین ۷ محصول زمستانه و ۶ محصول از بین ۹ محصول تابستانه، در مجموع ۱۰ محصول برای هر یک از مناطق قابل انتخاب می‌باشندکه می‌توانند با یکدیگر متفاوت باشند. بدین ترتیب تعداد کل الگوهای کشت قابل انتخاب معادل ۲۹۴۰ می‌باشد.

**جدول ۱: محصولات زمستانه و تابستانه در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی در منطقه مورد مطالعه**

| محصولات | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| زمستانه | نخود فرنگی | گندم | پیاز | جو | اسفناج | کلزا | لوبیا سبز | – | – |
| تابستانه | برنج | پنبه | خیار | سویا | سیب‌زمینی | گوجه فرنگی | ماش | هندوانه | ذرت |

## شبیه‌سازی آب زیرزمینی

در این تحقیق، شبیه‌سازی آب زیرزمینی به‌صورت توزیع‌شده به‌وسیله مدل عددی MODFLOW-GMS انجام گرفته است. در دشت مورد مطالعه (دشت گرگان–گنبد) آبخوان تحت فشار و نیمه تحت فشار نسبت به آبخوان آزاد گسترش بیشتری (در حدود ۸۶ درصد) داشته است. اندازه‌گیری ضرایب هیدرودینامیکی حاکی از تغییرات شدید مشخصه‌های آبخوان در نقاط مختلف دشت و لایه‌های مختلف آن دارد، بطوریکه حداقل و حداکثر ضریب انتقال بترتیب مقادیر ۲۰ و ۲۹۳۰ متر مربع در روز و مقادیر ضریب ذخیره نیز بترتیب مقادیر ۰/۲۵ تا ۲۵ درصد را به خود اختصاص می‌دهند (۸). کالیبراسیون مدل در حالت ماندگار، به این دلیل که نوسانات سطح آب نسبت به ماه قبل و بعد از آن ناچیز بوده است برای مقطع زمانی دی‌ماه سال ۱۳۹۲ انجام شده

است. همچنین صحت‌سنجی مدل آب زیرزمینی برای شرایط ناپایدار، در بازه زمانی بهمن‌ماه ۱۳۹۲ الی دیماه ۱۳۹۳ انجام شده است.

## تهیه فرامدل شبکه عصبی مصنوعی

پس از کالیبراسیون مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی، برای استفاده از آن در مدل بهینه‌سازی چندهدفه، از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه به عنوان فرامدل، جایگزین استفاده شده است. بدین منظور با اجرای مدل شبیه‌ساز آب زیرزمینی برای حالت‌های ممکن پمپاژ از نواحی مختلف، میانگین افت سطح ایستابی آبخوان برای ۵۱۲ حالت ممکن محاسبه و ذخیره‌سازی شد. سپس ۳۶۰ حالت (۷۰٪) از ۵۱۲ حالت ممکن برای آموزش شبکه عصبی مصنوعی و مابقی برای صحت‌سنجی آن مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق از شبکه عصبی پرسپترون سه‌لایه با لحاظ چهار نرون برای هر لایه، استفاده شده است. جدول ۲ مقادیر شاخص‌های خطای آماری شامل میانگین مربعات خطا (MSE)، میانگین مطلق خطای نسبی (MARE) و ضریب تعیین ($R^2$) فرامدل شبکه عصبی مصنوعی را در دو دوره آموزش و صحت‌سنجی ارائه می‌دهد.

**جدول ۲: خطاهای مراحل آموزش و صحت سنجی فرامدل شبکه عصبی مصنوعی پریسپترون چند لایه**

| ردیف | شاخص خطا | آموزش | صحت- |
|---|---|---|---|
| ۱ | $MSE$ | ۰/۰۱۱ | ۰/۰۱۵ |
| ۲ | $MARE$ | ۰/۰۳۶ | ۰/۰۴۴ |
| ۳ | $R^2$ | ۰/۹۵ | ۰/۹۱ |

## ساختار مدل بهینه‌سازی چندهدفه

در این مطالعه، تدوین مدل بهینه‌سازی چندهدفه بر اساس پنج هدف انجام گرفته است، که شکل ریاضی آن‌ها به شرح زیر می‌باشد. در این معادلات توابع $f$ بیان‌کننده توابع هدف مسئله می‌باشند که با اندیس یک تا پنج به ترتیب مربوط به حداکثرسازی عدالت در توزیع، حداکثرسازی سود در هر یک از سه منطقه (اندیس ۲ الی ۴) و حداکثرسازی استفاده از آب سبز (رطوبت ذخیره شده در خاک در اثر بارندگی) می‌باشند. لازم به ذکر است که شهرستان‌های مینودشت، آزادشهر و گنبدکاووس به‌ترتیب مناطق ۱ الی ۳ را در این مطالعه تشکیل می‌دهند.

$$Min\ \ f_1 = \left[ \frac{\sum_{r=1}^{m} \left( \frac{RGal_r / A_{sgr} - W_{sg} / At_{sg}}{W_{sg} / At_{sg}} \right)^2}{m-1} \right]^{1/2} \qquad (۱)$$

$$Max\ \ f_2 = \sum_{y=1}^{NY} \sum_{t=1}^{2} \sum_{c=1}^{n} alfa(c) \left[ \left( x_{ytc}.Y_{ytc}.P_{ytc} - x_{ytc}.C_{ytc} \right) \right] \qquad (۲)$$

$$Max\ \ f_3 = \sum_{y=1}^{NY} \sum_{t=1}^{2} \sum_{c=1}^{n} beta(c) \left[ \left( x_{ytc}.Y_{ytc}.P_{ytc} - x_{ytc}.C_{ytc} \right) \right] \qquad (۳)$$

$$Max\ \ f_4 = \sum_{y=1}^{NY} \sum_{t=1}^{2} \sum_{c=1}^{n} gama(c) \left[ \left( x_{ytc}.Y_{ytc}.P_{ytc} - x_{ytc}.C_{ytc} \right) \right] \qquad (۴)$$

$$Max\ \ f_5 = \sum_{r=1}^{nr} \sum_{y=1}^{NY} \sum_{t=1}^{2} \sum_{c=1}^{n} crop_pat. \left[ x_{rytc}.Y_{rytc}.VWC_{rytc-g} / \sum_{r=1}^{nr} \sum_{y=1}^{NY} \sum_{t=1}^{2} \sum_{c=1}^{n} x_{rytc}.Y_{rytc}.VWC_{rytc} \right] \qquad (۵)$$

$$\begin{cases} crop_pat = alfa & if \quad r=1 \\ crop_pat = beta & if \quad r=2 \\ crop_pat = gama & if \quad r=3 \end{cases}$$

تابع هدف اول در حقیقت واریانس توزیع آب بین مناطق است که بایستی حداقل‌سازی گردد تا آب بین مناطق عادلانه توزیع شود. در این تابع هدف، آب تخصیص داده شده به هر منطقه به نسبت سطح زیر کشت آن منطقه مورد توجه قرار گرفته است، به عبارتی هر منطقه که دارای سطح زیر کشت بزرگتری باشد، آب بیشتری به آن منطقه تخصیص می‌یابد. حداکثرسازی سود در هر یک از سه منطقه، در توابع هدف دوم تا چهارم لحاظ شده است. تابع هدف پنجم نیز عبارت از نسبت رطوبت قابل استفاده ذخیره‌شده در خاک (در اثر بارندگی) به کل حجم آب (شامل آب آبیاری) لازم برای تولید یک کیلوگرم محصول می‌باشد، که در صورت حداکثرسازی منجر به کاهش حجم آب آبیاری می‌گردد. در این معادلات سطح زیر کشت محصولات ($x$) در هر منطقه (r)، در هر سال (y) و در هر فصل کشت (t) به‌عنوان متغیرهای تصمیم مسئله در نظر گرفته شده‌اند. اندیس c شماره محصولات و n تعداد محصولات قابل کشت در هر منطقه می‌باشد. در این معادلات NY تعداد سال‌ها در دوره مدل‌سازی را نشان می‌دهد. $lGaR$ و $W$ به‌ترتیب عبارت از مجموع تخصیص آب سطحی و آب زیرزمینی و تخصیص کل می‌باشند. A و m به‌ترتیب نشان‌دهنده کل سطح زیر کشت در هر منطقه و تعداد مناطق می‌باشند. همچنین $Y$ , $P$ و $C$ به‌ترتیب عبارت از میزان عملکرد محصول، قیمت محصول و هزینه کشت محصول می‌باشند. VWC نیز محتوای آب مجازی محصولات می‌باشد که در آن اندیس g بیانگر محتوای آب مجازی سبز می‌باشد. با توجه به اینکه الگوی کشت در هر منطقه متفاوت می‌باشد سه متغیر gama, beta, alfa ترکیب الگوی کشت در هر یک از سه منطقه را مشخص می‌نمایند. بدین ترتیب اندیس crop_pat که یک بردار ۱۶ عضوی با مقادیر صفر و یک می‌باشد، انتخاب الگوی کشت در هر منطقه را به شکلی انجام می‌دهد که ۱۰ عضو این بردار همواره برابر یک (به تعداد محصولات انتخاب شده برای کشت، که شامل ۴ محصول زمستانه و ۶ محصول تابستانه می‌گردد) و ۶ عضو دیگر برابر صفر (محصولات انتخاب نشده برای کشت) می باشد. اهداف تشریح شده در این مطالعه تحت تسلط قیودی مرتبط با سطح زیر کشت، حجم مخزن، رها سازی آب از مخزن، بیلان حجم آب در مخزن و افت مجاز سطح آب زیرزمینی قرار می‌گیرند. رابطه ریاضی این قیود به شکل زیر قابل نمایش است:

$$\sum_{c=1}^{n} x_c = A_r \quad r = 1,2,3 \qquad (۶)$$

$$S \le S_{\max} \qquad (۷)$$

$$S \ge S_{\min} \qquad (۸)$$

$$R \le R_{\max} \qquad (۹)$$

$$S_{i+1} = S_i + I_i - R_i - E \qquad (۱۰)$$

$$Dr_Groundwater \le Dr_allowable \qquad (۱۱)$$

در این معادلات $A_r$ بیان کننده حداکثر سطح قابل کشت در هر یک از سه منطقه می‌باشد. $S$ و $R$ بترتیب حجم مخزن و حجم رهاسازی ماهیانه از سد می‌باشد. حجم رهاسازی شامل نیاز زیست محیطی بطور کامل و بخشی از نیاز شرب، صنعت و باغات می‌گردد. $I$ و $E$ نیز بترتیب بیانگر حجم ورودی و تبخیر از مخزن می‌باشد. همچنین $Dr$ مبین میزان افت سطح ایستابی می‌باشد که با اندیس‌های Groundwater و allowable به‌ترتیب نشانگر میزان افت سطح ایستابی محاسبه شده و مجاز می‌باشد.

## جواب‌های نهایی انتخاب شده

پس از حل مدل با استفاده از مدل الگوریتم ژنتیک چندهدفه، بهترین جواب با استفاده از روش انتخاب اجتماعی کندورسه برگزیده شده است. روش کار بدین‌ترتیب است که مقادیر مربوط به هر هدف را برای گزینه‌های مختلف به ترتیب نزولی مرتب نموده و رتبه هر گزینه را برای هر هدف مشخص می‌نماییم. رتبه‌های به‌دست آمده برای هدف و تمام نقاط جواب تشکیل ماتریس تصمیم می‌دهند. این ماتریس به عنوان ماتریس ورودی برای روش مذکور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## بازتوزیع سود حاصل از تشکیل ائتلاف

در این مرحله با تشکیل ائتلاف‌های ممکن، امکان افزایش بهره‌وری اقتصادی فعالیت‌های کشاورزی در منطقه مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور پس از تشکیل هر ائتلاف و تعیین محصولات با مزیت نسبی بیشتر برای هر منطقه، اقدام به محاسبه حداکثر سود آن ائتلاف شده است. روابط حداکثرسازی سود ائتلاف توسط عبارات زیر قابل بیان می‌باشد. در این روابط $W_r$ میزان تخصیص به هر منطقه در مدل ائتلاف می‌باشد.

$$Max\ f_{coalition} = \sum_{y=1}^{NY}\sum_{t=1}^{2}\sum_{c=1}^{n}\left[\left(x_{ytc}.Y_{ytc}.P'_{ytc} - x_{ytc}.C_{ytc}\right)\right] \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{c=1}^{n_r} x_r \le A_r \qquad for \quad r = 1,2,3 \qquad (۱۳)$$

$$W_r \le RG_{al-r} \qquad for \quad r = 1,2,3 \qquad (۱۴)$$

رابطه (۱۲) سود حاصل از تشکیل هر ائتلاف را حداکثر می‌کند. این رابطه برای هر یک از ائتلاف‌های دوتایی (سه ائتلاف) و همچنین ائتلاف اصلی (ائتلاف هر سه منطقه با هم) بطور مجزا نوشته می‌شود و مدل بهینه سازی خطی مربوطه حل می‌گردد. بطور مثال اگر منطقه ۱ و۲ با هم ائتلاف نمایند، محصولاتی برای کشت انتخاب می‌شوند که دارای مزیت نسبی باشند، بدین معنی که مثلاً اگر عملکرد و قیمت محصول x در منطقه ۱ بیشتر از منطقه ۲ باشد و بالعکس عملکرد و قیمت محصول y در منطقه ۱ کمتر از منطقه ۲ باشد، در شرایط ائتلاف در منطقه ۱ محصول x کشت می‌شود و اصلاً محصول y کشت نمی‌شود و بالعکس در منطقه ۲ محصول y کشت می‌شود و اصلاً محصول x کشت نمی‌شود. بقیه محصولات هم به همین نحو انتخاب

می‌شوند. بعنوان اولین قید (رابطه ۱۳) حداکثر مجموع سطح زیر کشت محصولات در هر یک از مناطق نباید از کل سطح قابل کشت در آن مناطق بیشتر باشد. همچنین قید دوم (رابطه ۱۴) بیان می‌دارد که کل تخصیص آب به هر ائتلاف نباید از مجموع آبی که در مرحله اول به عنوان تخصیص بهینه برای هر یک از مناطق شرکت کننده در آن ائتلاف محاسبه شده است، بیشتر باشد.

## بازی‌های همکارانه

در این مطالعه از روش های مختلف بازی‌های همکارانه از جمله روش نوکلئولوس[1]، نوکلئولوس ضعیف[2]، نوکلئولوس متناسب[3]، نوکلئولوس نرمال[4] و ارزش شاپلی[5] استفاده شده است. در مجموعه روش‌های نوکلئولوس، بردار جواب بر اساس تعریف شاخصی موسوم به بی‌عدالتی محاسبه می‌شود. میزان بی‌عدالتی عبارت از اختلاف بین حداکثر سود یک ائتلاف و مجموع سودهای تخصیص یافته به بازیگران آن ائتلاف در ائتلاف اصلی می‌باشد. در روش شاپلی، پیامد هر بازیکن معادل متوسط وزنی سهم ایشان در هر ائتلاف می‌باشد (۱۱).

## روش کندورسه

بر اساس این روش، گزینه‌ای که نسبت به گزینه‌های دیگر از نظر ذینفعان درگیر، دارای اولویت بالاتری باشد، به عنوان برنده کندورسه شناخته می‌شود. در این روش گزینه‌ها دو بدو با هم مقایسه می‌شوند و در هر بار انتخاب هر گزینه، یک امتیاز به آن گزینه تعلق می‌گیرد و در نهایت با شمارش امتیازات بدست آمده برای هر گزینه، گزینه برتر انتخاب می‌شود (۲۰). این روش را می‌توان با کمترین شکست در انتخاب گزینه برتر و با کمترین هزینه رأی‌گیری نسبت به سایر روش‌های موجود مورد استفاده قرار داد. تحت شرایطی ممکن است برنده کندورسه نداشته باشیم. این اتفاق حاصل نوعی برابری است که به‌عنوان "دور قاعده رأی‌گیری حداکثر" شناخته می‌شود که همان تناقض کندورسه محسوب می‌شود.

## نتایج و بحث

در این مطالعه به دلیل در اختیار داشتن جواب های غیر مغلوب متعدد از روی منحنی تعامل[6]، بهترین جواب بر اساس اهداف تعریف شده، با استفاده از یکی از روش‌های انتخاب اجتماعی (روش کندورسه) انتخاب شده است. بدین ترتیب از بین ۶۳ نقطه جواب که از مدل چند هدفه بدست آمده است، جواب شماره ۳۶ بعنوان بهترین جواب مدل چند هدفه، از روش کندورسه بدست آمده است. در ادامه، نتایج بدست آمده برای این جواب (گزینه) مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

## الگوی کشت

همان طور که در بخش روش شناسی اشاره گردید این مدل‌سازی به نحوی انجام شده است که الگوی کشت در هر منطقه و در هر سال بتواند به صورت دینامیک تغییر نماید. این تغییر در الگوی کشت به شکلی انجام می‌شود که توابع هدف تعریف شده، بهینه‌ترین مقادیر خود را در هر سال و برای هر منطقه کسب نمایند. هر الگوی کشت که شامل ۱۰ محصول می‌باشد، از بین ۱۶ محصول قابل کشت در مناطق انتخاب می‌شود. با توجه به اینکه ۷ محصول از بین ۱۶ محصول زمستانه و بقیه محصولات تابستانه را شامل می‌شوند، جهت انتخاب ۴ محصول زمستانه و ۶ محصول تابستانه، مجموعا ۲۹۴۰ حالت ممکن بوجود می‌آید. با معرفی الگوی کشت به عنوان متغیر تصمیم، هر یک از این حالات ممکن بصورت تصادفی انتخاب و مورد بررسی قرار می‌گیرند. جدول ۳ الگوی کشت بهینه را برای مناطق مختلف در سال‌های مختلف برای جواب (گزینه) ۳۶ نشان می‌دهد. در این جدول عدد یک به منزله کشت محصول و عدد صفر به منزله عدم کشت محصول می‌باشد. بدین ترتیب مجموع هر ردیف در هر سال و برای هر منطقه بایستی برابر ۱۰ گردد که نشان‌دهنده حضور ۱۰ گونه از محصولات، در الگوی کشت آن منطقه مفروض در سال مربوطه می‌باشد.

## سطح زیر کشت

مجموع سطح زیر کشت محصولات در دوره مدل‌سازی برای گزینه ۳۶ معادل ۸۳۱۱۱ هکتار می‌باشد. برای این گزینه مجموع سطح زیرکشت محصولات زمستانه ۳۶۸۴۹ هکتار و مجموع سطح زیرکشت محصولات تابستانه معادل ۴۶۲۶۲ هکتار می‌باشد. جدول ۴ مجموع سطح زیر کشت محصولات انتخاب شده را در سال‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌گردد حداکثر مجموع سطح زیر کشت محصولات در سال اول و حداقل آن در سال چهارم حادث گردیده است. همچنین شکل ۲ مجموع سطح زیر کشت محصولات را به تفکیک محصولات زمستانه و تابستانه برای سال‌های مختلف در دوره ۵ ساله نشان می‌دهد. در این شکل حداقل و حداکثر مجموع سطح زیرکشت محصولات زمستانه به‌ترتیب برای سال چهارم و سال اول و حداقل و حداکثر مجموع سطح زیر کشت محصولات تابستانه به‌ترتیب برای سال دوم و سال سوم بدست آمده است. لذا می‌توان انتظار داشت که بیشترین میزان تخصیص آب به کشت محصولات در مناطق سه‌گانه مربوط به سال اول و کمترین مقدار آن در سال چهارم باشد، اگرچه علاوه بر سطح زیر کشت، نوع محصولات از نظر میزان مصرف و تابستانه و یا زمستانه بودن آنها در میزان آب مصرفی نقش کلیدی دارند.

[1] Solution points
[2] Weak Nucleolus
[3] Proportional Nucleolus
[4] Normal Nucleolus
[5] Shapley value
[6] Pareto front curve

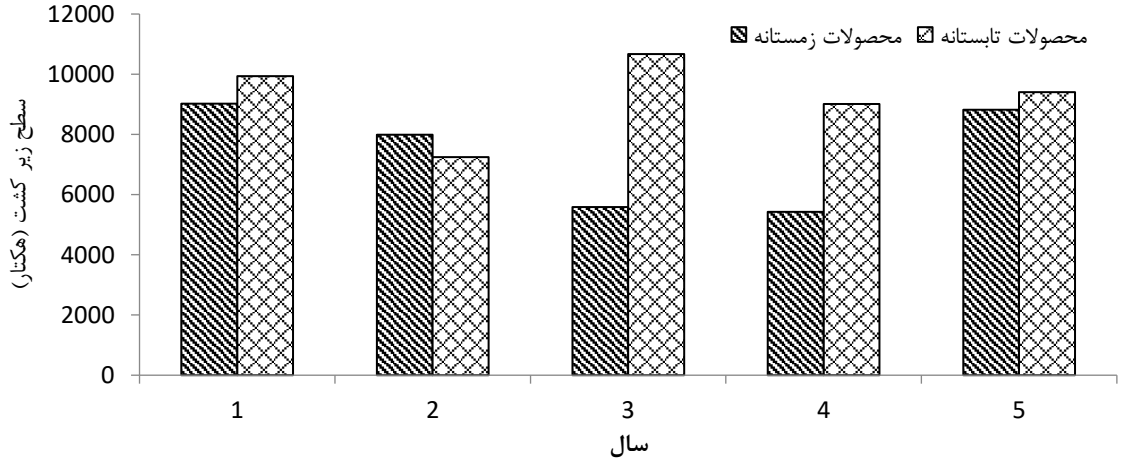
**جدول ۳: الگوی کشت بهینه در دوره مدل‌سازی در مناطق مختلف**

| منطقه | س ال | نوع محصول | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | نخودفرنگی | گندم | پیاز | جو | اسفناج | کلزا | لوبیاسبز | برنج | پنبه | خیار | سویا | سیب‌زمینی | گوجه‌فرنگی | ماش | هندوانه | ذرت |
| مینودشت | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ |
| | ۲ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ |
| | ۳ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ |
| | ۴ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ |
| | ۵ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ |
| آزادشهر | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ |
| | ۲ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ |
| | ۳ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ |
| | ۴ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ |
| | ۵ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ |
| گنبد کاووس | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ |
| | ۲ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ |
| | ۳ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۱ |
| | ۴ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ |
| | ۵ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ |

همچنین متوسط سطح زیر کشت محصولات زمستانه ۷۳۷۰ هکتار و متوسط سطح زیر کشت محصولات تابستانه۹۲۵۳ هکتاراست. سطح زیر کشت وسیع‌تر محصولات تابستانه نسبت به محصولات زمستانه می‌تواند به‌دلیل این باشد که عمدتاً محصولات تابستانه دارای ارزش اقتصادی بیشتری نسبت به محصولات زمستانه می‌باشند و مدل برای حداکثرسازی سود کشاورزی (معادلات ۲،۳،۴)، به عنوان یکی از اهداف مدل‌سازی، سطوح بیشتری را به کشت محصولات تابستانه اختصاص می‌دهد.

**جدول٤: مجموع سطح زیر کشت محصولات در سال‌های مختلف**

| گزینه | سال | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
| ۳۶ | ۱۸۹۵۸ | ۱۵۲۴۰ | ۱۶۲۵۲ | ۱۴۴۴۳ | ۱۸۲۱۹ |




**شکل ۲: سطح زیر کشت محصولات زمستانه و تابستانه برای دوره ۵ ساله**

## سطح آب زیرزمینی

همانطور که اشاره گردید از مدل شبکه عصبی تدوین شده، برای محاسبه افت سطح ایستابی در مدل بهینه‌سازی چند هدفه استفاده شده است. جدول ۵ متوسط افت سطح آب زیرزمینی (متر) را در سال‌های مختلف برای گزینه انتخابی (۳۶) نشان می‌دهد.

**جدول ۵: افت سطح آب زیرزمینی (متر) در سال‌های مختلف برای گزینه انتخابی**

| گزینه انتخابی | سال | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
| ۳۶ | ۰/۳۴ | ۰/۷۱ | ۰/۷۴ | ۰/۳۶ | ۰/۳۸ |

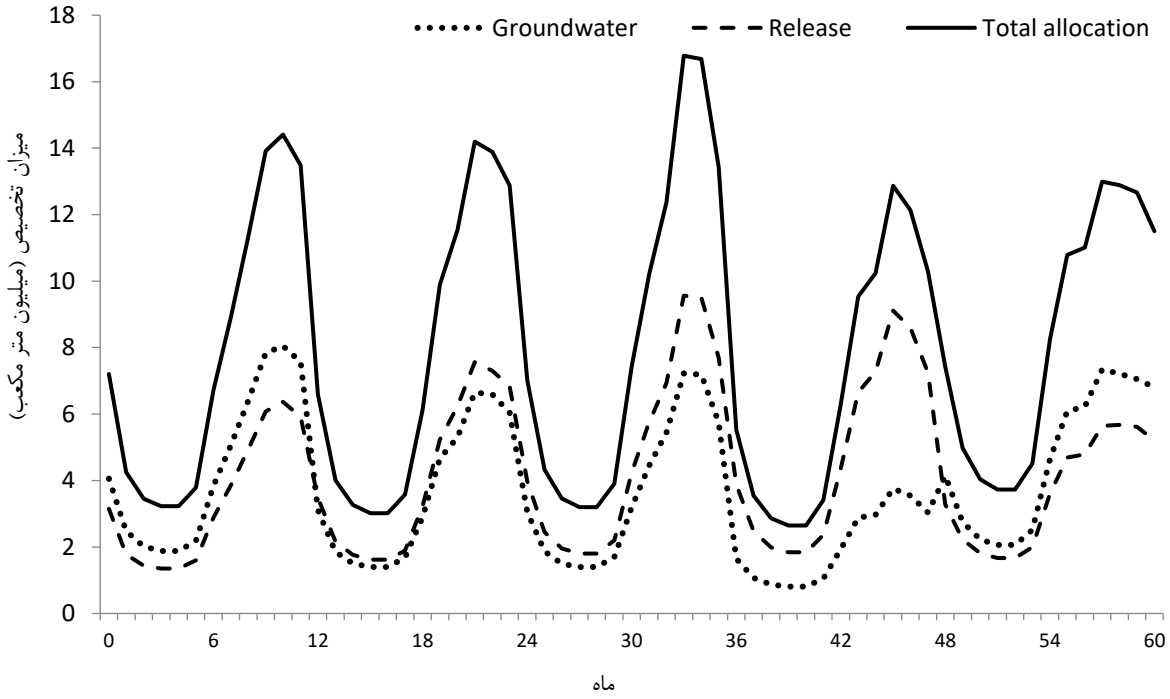
## میزان تخصیص آب

جدول ۶ میزان تخصیص آب به نیاز کشاورزی را در سال‌های مختلف برای گزینه انتخاب شده نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین میزان تخصیص آب مربوط به سال سوم و کمترین مقدار آب تخصیص یافته مربوط به سال چهارم می‌باشد.

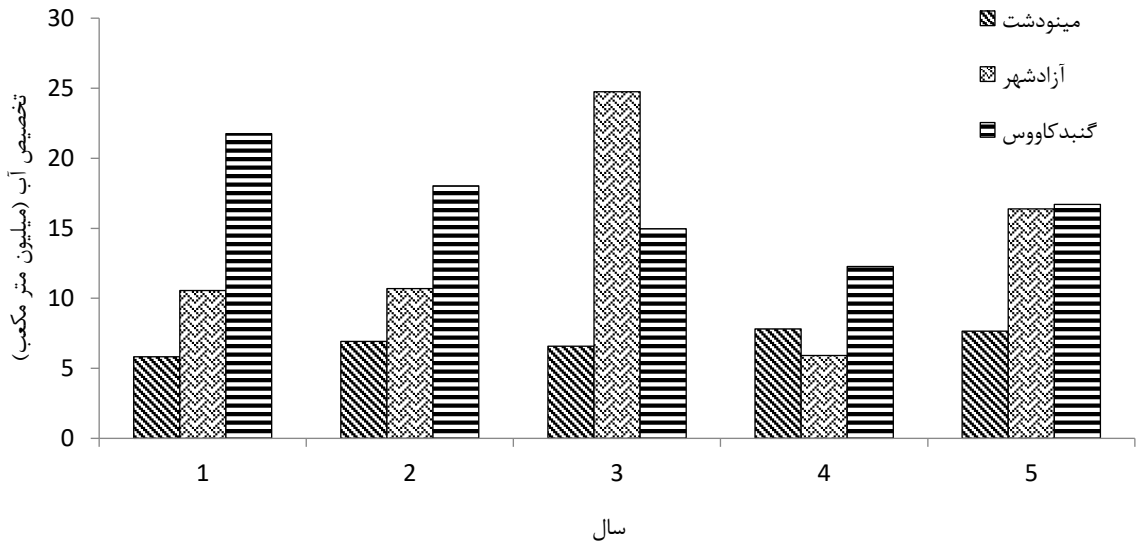
**جدول ٦: میزان تخصیص آب کشاورزی در سال‌های مختلف (میلیون متر مکعب)**

| گزینه | سال | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
| ۳۶ | ۳۸/۱۴ | ۳۵/۶۷ | ۴۶/۳۰ | ۲۵/۹۸ | ۴۰/۷۴ |

همان طور که در بخش قبل ذکر شد میزان تخصیص آب سالیانه علاوه بر کل سطح زیر کشت سالیانه به سطح زیر کشت محصولات تابستانه نیز بستگی دارد و اینکه کدام عامل نقش تعیین کننده داشته باشد، بستگی به حضور محصولات پرمصرف و میزان سطح زیر کشت آنها در الگوی کشت تابستانه دارد. از این رو وقوع حداکثر تخصیص آب در سال سوم می‌تواند بدلیل سطح زیر کشت گسترده‌تر محصولات تابستانه در این سال باشد. همچنین در سال چهارم کل سطح زیر کشت سالیانه عامل تعیین کننده بوده است. به عبارتی در این سال، عدم حضور محصولات پر مصرف و یا کم بودن سطح زیر کشت آنها باعث شده است که حداقل تخصیص آب را در این سال داشته باشیم. با توجه به برداشت تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی، شکل ۳ نحوه تخصیص از این منابع را بصورت ماهیانه نشان می‌دهد. این شکل، تخصیص به کل نیازها و از جمله نیاز کشاورزی را در بر می‌گیرد. همانطور که ملاحظه می‌گردد در ماه سی و سوم و ماه چهل و پنجم به‌ترتیب بیشترین و کمترین میزان تخصیص انجام شده است. شکل ۴ نیز تخصیص سالیانه آب بین مناطق مختلف را نشان می‌دهد. در حقیقت این بخش از نتایج، انعکاس دهنده توزیع عادلانه آب بین مناطق است که توسط هدف حداکثرسازی عدالت (معادله ۱) در مدل‌سازی لحاظ شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، حداکثر تخصیص مربوط به سال سوم، برای شهرستان آزادشهر و حداقل تخصیص مربوط به سال چهارم و مجدداً برای همین شهرستان است.




**شکل ۳: میزان تخصیص از منابع آب سطحی و زیرزمینی بصورت ماهیانه برای گزینه ٣٦**




**شکل ٤: تخصیص سالیانه آب بین مناطق مختلف**

## سود تولید محصولات کشاورزی

جدول ۷ سود کل و سود هر یک از مناطق را برای گزینه مورد نظر نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود سود مربوط به شهرستان گنبد کاووس نسبت به دو شهرستان دیگر بیشتر می‌باشد. با توجه به تفاوت وسعت شهرستان‌ها، شاخص سود در واحد سطح، شاید بیان مناسب‌تری برای بازدهی اقتصادی مناطق باشد. از این منظر شهرستان مینودشت با ۱۹۸ واحد بیشترین مقدار را بین مناطق به خود اختصاص داده است. پس از آن گنبدکاووس با ۱۵۸ واحد در رتبه دوم و در نهایت آزادشهر با ۱۱۶ واحد در آخرین جایگاه قرار می‌گیرد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در مجموع، الگوهای کشت اعمال شده در منطقه مینودشت در دوره ۵ ساله مدل‌سازی، نسبت به دو منطقه دیگر، شامل محصولات با ارزش اقتصادی بیشتری مـی‌باشد. مینودشت با ۱۹۸ واحـد بیشترین

مقدار را بین مناطق به خود اختصاص داده است. پس از آن گنبدکاووس با ۱۵۸ واحد در رتبه دوم و در نهایت آزادشهر با ۱۱۶ واحد در آخرین جایگاه قرار می‌گیرد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در مجموع، الگوهای کشت اعمال شده در منطقه مینودشت در دوره ۵ ساله مدل‌سازی، نسبت به دو منطقه دیگر، شامل محصولات با ارزش اقتصادی بیشتری می‌باشد.

## باز توزیع سود حاصل از تشکیل ائتلاف

در این مرحله در نظر است تا با تشکیل ائتلاف‌های ممکن امکان افزایش بهره‌وری اقتصادی فعالیت‌های کشاورزی در منطقه مورد بررسی قرارگیرد. بدین منظور پس از تشکیل هر ائتلاف، اقدام به محاسبه حداکثر سود آن ائتلاف شده است. جدول ۸ سود محاسبه شده برای هر منطقه به شکل انفرادی (از مدل بهینه‌سازی چند هدفه) و به‌صورت ائتلاف با مناطق دیگر را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌گردد شرط عقلانیت فردی و گروهی برای شرکت در ائتلاف برقرار می‌باشد. همچنین در این جدول سود حاشیه‌ای ۴ ائتلاف ممکن محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سود ناشی از شرکت در ائتلاف اصلی برابر با ۲۴۷۷۰۰۰ میلیون ریال می‌باشد. پس از این مرحله، با بکارگیری روش‌های مختلف بازی‌های همکارانه، اقدام به بازتوزیع سود حاصل از شرکت در ائتلاف اصلی برای بازیگران (مناطق کشاورزی) مختلف شده است. در این بخش بازی‌های نوکلئولوس، نوکلئولوس ضعیف، نوکلئولوس متناسب، نوکلئولوس نرمال و ارزش شاپلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

**جدول ۷: میزان سود در واحد سطح زیرکشت برای شهرستان‌های مختلف**

| | منطقه | | | مجموع |
|---|---|---|---|---|
| سود (۱۰۹ ریال) | مینودشت | آزاد شهر | گنبد کاووس | |
| سطح زیر کشت (هکتار) | ۲۹۴۲ | ۳۷۰۲ | ۵۷۴۳ | ۱۲۳۸۷ |
| متوسط سود در واحد سطح (۱۰۶ ریال) | ۱۴۷۹۱ | ۳۱۹۴۹ | ۳۶۳۷۱ | ۸۳۱۱۱ |
| | ۱۹۸ | ۱۱۶ | ۱۵۸ | ۱۴۹ |

**جدول ۸: سود هر منطقه (از مدل بهینه‌سازی چند هدفه) به شکل انفرادی و ائتلاف با مناطق دیگر (۱۰۹ ریال)**

| | مناطق | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۲،۱ | ۳،۱ | ۳،۲ | ۳،۲،۱ |
| سود | ۲۹۴۲ | ۳۷۰۲ | ۵۷۴۳ | ۷۳۰۸ | ۹۹۰۱ | ۱۱۱۴۵ | ۱۴۸۶۴ |
| سود حاشیه‌ای | ۱ | ۱ | ۱ | ۶۶۴ | ۱۲۱۶ | ۱۰۸۰ | ۲۴۷۷ |

جدول ۹ بازتوزیع سود حاصل از شرکت در ائتلاف اصلی را برای بازیگران مختلف درگزینه انتخابی به‌ترتیب بوسیله روش‌های نوکلئولوس، نوکلئولوس ضعیف، نوکلئولوس متناسب، نوکلئولوس نرمال و ارزش شاپلی ارائه داده است. همچنین حداکثر مقادیر بازتوزیع سود بدست آمده برای مناطق مینودشت، آزادشهر و گنبدکاووس بترتیب از روش‌های نرمال نوکلئولوس، نوکلئولوس (بطور مشترک با نرمال نوکلئولوس) و نوکلئولوس متناسب بدست آمده است. همچنین دیده می‌شود که در روش ارزش شاپلی درصد افزایش سود بین مناطق دارای کمترین واریانس می‌باشد. بدین ترتیب می‌توان گفت که منصفانه‌ترین توزیع سود توسط این روش انجام شده است.

**جدول ۹: سود مدل چند هدفه و بازتوزیع سود حاصل از شرکت در ائتلاف اصلی (۱۰^۹ ریال)**

| روش بازی | سود | منطقه | | |
|---|---|---|---|---|
| | | مینودشت | آزادشهر | گنبد کاووس |
| | مدل چند هدفه | ۲۹۴۲ | ۳۷۰۲ | ۵۷۴۳ |
| نوکلئولوس | مدل ائتلاف اصلی | ۳۲۴۸ | ۴۴۶۰ | ۶۷۸۵ |
| | درصد افزایش | ۱۰ | ۲۰ | ۱۸ |
| نوکلئولوس ضعیف | مدل ائتلاف اصلی | ۳۱۸۰ | ۴۳۹۲ | ۶۹۲۰ |
| | درصد افزایش | ۸ | ۱۹ | ۲۱ |
| نوکلئولوس متناسب | مدل ائتلاف اصلی | ۳۴۴۲ | ۴۰۰۲ | ۷۰۴۹ |
| | درصد افزایش | ۱۷ | ۸ | ۲۳ |
| نوکلئولوس نرمال | مدل ائتلاف اصلی | ۴۱۱۱ | ۴۴۵۲ | ۵۹۳۰ |
| | درصد افزایش | ۴۰ | ۲۰ | ۳ |
| ارزش شاپلی | مدل ائتلاف اصلی | ۳۴۲۷ | ۴۴۰۳ | ۶۶۶۳ |
| | درصد افزایش | ۱۶ | ۱۹ | ۱۶ |

آمیز (۱۸) که بر اساس الگوی کشت ثابت در همان منطقه انجام شده است، توضیحات زیر قابل ذکر می‌باشد:

الف–در این مطالعه نسبت سطح زیر کشت محصولات تابستانه به زمستانه بطور متوسط ۱/۲۸ می‌باشد که حدود ۰/۲۹ از مقدار بدست آمده برای الگوی کشت ثابت بیشتر است. بدین ترتیب سهم استفاده از آب سبز در مطالعه حاضر بیشتر می‌باشد.

ب– مجموع سطح زیر کشت در الگوی کشت پویا نسبت به الگوی کشت ثابت، چه برای محصولات تابستانه و چه زمستانه افزایش یافته است و به همان نسبت سود حاصله نیز افزایش پیدا کرده است. مدل سعی کرده است تا محصولات اقتصادی‌تر (گران‌تر) را در الگوی کشت انتخابی جای دهد و بدین ترتیب سود را افزایش دهد، به طوریکه مجموع سود حاصله برای گزینه منتخب در این مطالعه بطور متوسط بیش از ۲۴ درصد نسبت به گزینه منتخب در شرایط الگوی کشت ثابت افزایش یافته است.

ج–مصرف آب در واحد سطح برای الگوی کشت پویا در مقایسه با الگوی کشت ثابت ۴۰ درصد کاهش نشان می‌دهد و این در حالی است که مطابق آنچه گفته شد در این حالت افزایش سود قابل توجهی نیز عاید منطقه می‌گردد.

## نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بهینه‌سازی استفاده از منابع آب سطحی و زیرزمینی منطقه پائین دست سد نرماب مینودشت در بخش کشاورزی و برای یک دوره خشکسالی ۵ ساله انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که ثبات محصولات حاضر در الگوی کشت برای منطقه گنبدکاووس بیشتر است. حداقل و حداکثر مجموع سطح زیرکشت مجموع محصولات و محصولات زمستانه بترتیب برای سال چهارم و سال اول و حداقل و حداکثر سطح زیر کشت محصولات تابستانه به‌ترتیب برای سال دوم و سال سوم بدست آمده است. به عبارتی کاهش سطح زیر کشت محصولات تابستانه در سال دوم منجر به کاهش مصرف آب و ایجاد فرصت افزایش سطح زیر کشت این محصولات در سال بعد شده است. حداکثر تخصیص آب نیز مربوط به سال حداکثر سطح زیر کشت محصولات تابستانه یعنی سال سوم می‌باشد. اگرچه در سال چهارم سطح زیر کشت محصولات حداقل نمی‌باشد، اما تخصیص مربوط به این سال حداقل است. علت این مسئله را می‌توان در کم مصرف بودن محصولات انتخابی الگوی کشت در سال چهارم دانست. همچنین نشان داده شد که شهرستان مینودشت با کسب ۱۹۸ میلیون ریال در واحد سطح، بیشترین مقدار بازدهی اقتصادی را بین مناطق به خود اختصاص داده است. در آخرین بخش با اعمال روش‌های مختلف بازی‌های همکارانه، تأثیر مثبت شرکت کلیه مناطق در ائتلاف اصلی در افزایش سود هر یک از مناطق نشان داده شده است. علاوه بر این موارد با مقایسه نتایج بدست آمده از این تحقیق با تحقیق دوم از مطالعه صدق

## References:


1. Alizadeh, M. R., Nikoo, M. R. and Rakhshandehroo, G. R. 2017. Developing a Multi-Objective Conflict-Resolution Model for Optimal Groundwater Management Based on Fallback Bargaining Models and Social Choice Rules: a Case Study. Water Resources Management, 31(5): 1457–1472.
2. Cañón, J., González, J., and Valdés, J. 2009. Reservoir Operation and Water Allocation to Mitigate Drought Effects in Crops: A Multilevel Optimization Using the Drought Frequency Index. Journal of Water Resources Planning and Management, 135(6): 458–465.
3. Cid-Garcia, N. M., Bravo-Lozano, A. G., and Rios-Solis, Y. A. 2014. A crop planning and real-time irrigation method based on site-specific management zones and linear programming. Computers and Electronics in Agriculture, 107: 20–28.
4. Dinar, A., and Howitt, R. E. 1997. Mechanisms for Allocation of Environmental Control Cost: Empirical Tests of Acceptability and Stability. Journal of Environmental Management, 49(2): 183–203.
5. Fallah-Mehdipour, E. Bozorg Hadadad, O., Alimohammadi, S., and Loáiciga, Hugo A. 2015. Development of Real-Time Conjunctive Use Operation Rules for Aquifer-Reservoir Systems. Water Resources Management, 29(6): 1887–1906.
6. Galán-Martín, Á., Vaskan, P., Antón, A., Esteller, L. J., and Guillén-Gosálbez, G. 2017. Multi-objective optimization of rainfed and irrigated agricultural areas considering production and environmental criteria: a case study of wheat production in Spain. Journal of Cleaner Production, 140: 816–830.
7. Ganji, A., Karamouz, M. and Khalili, D. 2007. Development of stochastic dynamic Nash game model for reservoir operation II. The value of players; information availability and cooperative behaviors. Advances in Water Resources, 30(1): 157–168.
8. IWRMC. 1388. Report of water resource conjunctive use in Garesoo-Gorganrood basins, Vol 1: Analyzing data and water budjet, Part 3: Groundwater [In Persian]. Tehran.
9. Loáiciga, H. A. 2004. Analytic game - Theoretic approach to ground-water extraction. Journal of Hydrology, 297(1–4): 22–33.
10. Madani, K. 2010. Game theory and water resources. Journal of Hydrology, 381(3–4): 225–238.
11. Mahjouri, N., and Ardestani, M. 2010. A game theoretic approach for interbasin water resources allocation considering the water quality issues. Environmental Monitoring and Assessment, 167(1–4): 527–544.
12. Mattiuzi, C. D. P., Marques, G. F., and Medellín-Azuara, J. 2019. Reassessing Water Allocation Strategies and Conjunctive Use to Reduce Water Scarcity and Scarcity Costs for Irrigated Agriculture in Southern Brazil. Water, 11(6): 1140.
13. Nadrah, N., Tukimat, A. and Harun, S. 2014. Optimization of Water Supply Reservoir in the Framework of Climate Variation. International Journal of Software Engineering and Its Applications, 8(3): 361–378.
14. Nikoo, M. R., Varjavand, I., Kerachian, R., Pirooz, M., and Karimi, A. 2014. Multi-objective optimumdesign of double-layer perforated-wall breakwaters: Application of NSGA-II and bargaining models. Applied Ocean Research, 47: 47–52.
15. Raquel, S., Ferenc, S., Emery, C., and Abraham, R. 2007. Application of game theory for a groundwater conflict in Mexico. Journal of Environmental Management, 84(4): 560–571.
16. Sedghamiz, A., Heidarpour, M., Nikoo, M. R., and Eslamian, S. 2018. A Game Theory Approach for Conjunctive Use Optimization Model Based on Virtual Water Concept. Civil Engineering Journal, 4(6): 1315-1325.
17. Sedghamiz, A., Nikoo, M. R., Heidarpour, M., and Sadegh, M. 2018. Developing a non-cooperative optimization model for water and crop area allocation based on leader-follower game. Journal of Hydrology, 567: 51–59.
18. Sedghamiz, A. 2018. Developing an Agent-Based Model and the Application

of Game Theory for Optimal Water Conjunctive Allocation in Rivers Basin [In Persian]. Isfahan University of Technology.
19. Sepahvand, R., Safavi, H. R. and Rezaei, F. 2019. Multi-Objective Planning for Conjunctive Use of Surface and Ground Water Resources Using Genetic Programming. Water Resources Management, 33(6): 2123–2137.
20. Sheikhmohammady, M. and Madani, K. 2008. Bargaining over the Caspian Sea — The Largest Lake on the Earth. World Environmental and Water Resources Congress Ahupua'a - Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress, 316:1–9.
21. Song, J. Yang, Y., Sun, X., and Lin, J. 2020. Basin-scale multi-objective simulation-optimization modeling for conjunctive use of surface water and groundwater in northwest China. Hydrol. Earth Syst. Sci., 24: 2323–2341.
22. Srinivasa Prasad, A., Umamahesh, N. V., and Viswanath, G. K. 2011. Optimal irrigation planning model for an existing storage based irrigation system in India. Irrigation and Drainage Systems, 25(1): 19–38.
23. Wang, L., Fang, L., and Hipel, K. W. 2008. Basin-wide cooperative water resources allocation. European Journal of Operational Research, 190(3): 798–817.
24. Young, H. P., Okada, N., and Hashimoto, T. 1982. Cost allocation in water resources development. Water Resources Research, 18(3): 463–475.
25. Zeinali, M., Azari, A., and Heidari, M. M. 2020. Multiobjective Optimization for Water Resource Management in Low-Flow Areas Based on a Coupled Surface Water–Groundwater Model. Journal of Water Resources Planning and Management, 146(5).