Optimal Cropping Pattern and Management of Ground and Surface Water Resources of Kohpayeh-Segzi Plain Using the Integrated Model of Game Theory and Optimization Algorithm

A. Kolahdouzan, H. Nozari*, and S. Marofi

PhD student, Water science and Engineering Department, Bu-Ali Sina University.
iuttaw7@gmail.com
Associate Prof., Water science and Engineering Department, Bu-Ali Sina University.
h.nozari@basu.ac.ir
Professor, Water science and Engineering Department, Bu-Ali Sina University.
marofi@basu.ac.ir

Received: April 2024 and Accepted: June 2024

Abstract

In recent years, the conflict between environmental interests and farmers' livelihoods has emerged as one of the most crucial issues in the environmental and agricultural governance of the Zayandeh-Rood watershed. Hence, achieving a balance between economic profitability through the use of an optimal cropping pattern and preventing the excessive extraction of groundwater resources holds great importance for policymakers in this field. In this study, the environmental function was modeled by considering water resources limitation, while the economic function was modeled based on the economic profit derived from the cultivated crops in Kohpayeh-Segzi Plain in 1996-2011. The Nash function was optimized by using constrained nonlinear optimization by taking into account the limitation of water resources in each year. After optimizing the Nash function, the cropping pattern was determined using both game theory (GT) method and linear programming (LP) method. Results indicated 30% reduction in water consumption with the GT and 17% reduction with the LP method. Additionally, the profit reductions for these two methods were 16% and 3%, respectively, compared to the base case. Furthermore, the results revealed that the groundwater level in the representative hydrograph of the plain decreased by 3.94 and 2.23 m in the GT and LP methods, respectively. Conversely, in the optimized GT method with an economic function weight of 0.5, the groundwater level of the plain increased by 8.67 m. Considering the reduction of water consumption, profit reduction, and the increase in groundwater level, the optimized GT method with a weight of 0.5 was superior to the LP method.

Keywords: Groundwater table drop, Linear programming, Environmental function, Economical function, Representative hydrograph of the plain

*- Corresponding author's email: **h.nozari@basu.ac.ir**
https://doi.org/10.22092/jwra.2024.365445.1037

مقاله پژوهشی نشریه پژوهش آب در کشاورزی / ب / جلد ۳۸ / شماره ۲/ ۱۴۰۳.ص ۱۵۱-۱۶۹
https://doi.org/10.22092/jwra.2024.365445.1037

الگوی کشت بهینه و مدیریت منابع آب زیرزمینی و سطحی دشت کوهپایه- سگزی با استفاده از مدل تلفیقی تئوری بازی‌ها و الگوریتم بهینه‌سازی

علی کلاهدوزان، حامد نوذری* و صفر معروفی

دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا.
iuttaw7@gmail.com
دانشیار گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا.
h.nozari@basu.ac.ir
استاد گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا.
marofi@basu.ac.ir

دریافت: فروردین ۱۴۰۳ و پذیرش: خرداد ۱۴۰۳

چکیده

در سال‌های اخیر، تضاد منافع زیست‌محیطی با معیشت کشاورزان به یکی از مهمترین مسائل حکمرانی محیط‌زیست و کشاورزی در حوضه آبریز زاینده‌رود تبدیل شده است. بنابراین، دستیابی به نقطه تعادل میان سود اقتصادی با استفاده از الگوی کشت بهینه و جلوگیری از برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی از اهمیت زیادی برای سیاست‌گذاران این حوزه برخوردار است. در این پژوهش، تابع محیط‌زیست با استفاده از محدودیت منابع آب و تابع اقتصادی با استفاده از سود اقتصادی محصولاتی که در دشت کوهپایه- سگزی کشت می‌گردد در بازه زمانی ۱۳۷۶ – ۱۳۹۰ مدل‌سازی گردید. تابع نش با استفاده از بهینه‌سازی غیرخطی مقید با توجه به محدودیت منابع آب در هر سال بهینه شد. پس از آن، الگوی کشت محصولات با روش تئوری بازی‌ها و روش برنامه‌ریزی خطی محاسبه شد. نتایج نشان داد که کاهش مصرف آب در روش تئوری بازی‌ها ۳۱٪ و برای روش برنامه‌ریزی خطی ۱۷٪ است. در این حالت، میزان کاهش سود برای این دو روش به ترتیب ۱۷٪ و ۴٪ نسبت به حالت مبنا است. نتایج نشان داد که افت سطح آب زیرزمینی برای هیدروگراف معرف دشت و روش برنامه‌ریزی خطی به ترتیب برابر با ۳/۶۹ و ۲/۰۴ متر است. در حالی که در روش تئوری بازی‌های بهینه شده با وزن تابع اقتصادی ۰/۵، تراز آب زیرزمینی دشت افزایش ۷/۴۵ متری دارد. با توجه به میزان کاهش مصرف آب، میزان کاهش سود و افزایش تراز آب زیرزمینی، روش تئوری بازی‌های بهینه شده با وزن ۰/۵ نسبت به روش برنامه‌ریزی خطی برتری دارد.

واژه‌های کلیدی: افت سطح آب زیرزمینی، برنامه‌ریزی‌خطی ، تابع زیست محیطی ، تابع اقتصادی ، هیدروگراف معرف دشت

* – آدرس ایمیل نویسنده مسئول: **h.nozari@basu.ac.ir**

مقدمه

کشاورزی پایدار باید از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه، از نظر زیست‌محیطی سالم و از نظر اجتماعی مسئولیت‌پذیر باشد، اما حکمرانی و مدیریت نامناسب آب، پایداری کشاورزی را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به چالش کشیده است (فروزانی و کرمی، ۲۰۱۱). افت آب زیرزمینی و کمبود منابع آب سطحی باعث به خطر افتادن معیشت کشاورزان شده است. کشت بهینه به ازای میزان آبی که هر منطقه داراست می‌تواند علاوه بر تأثیرگذاری بر اقتصاد منطقه، بر مدیریت منابع آب نیز تأثیرگذار باشد. در همین راستا، مدنی (۲۰۱۴) با بررسی مدیریت منابع آب در ایران، بحران آب در ایران را ناشی از سه عامل افزایش جمعیت و پراکنش جمعیتی نامناسب، عدم مطابقت الگوی کشت با محدودیت‌های محیطی و عدم مدیریت و توسعه بی‌ضابطه دانست. این مسائل باعث چالش‌های جدی در بخش آب، شامل کاهش سطح آب زیرزمینی، کاهش کیفیت آب و افزایش تلفات زیست-محیطی شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که یکی از راهکارهای برون‌رفت از این مشکل، توسعه الگوی کشت بهینه با توجه به محدودیت‌های محیطی شامل انرژی، آب و زمین و وضعیت بهره‌وری اقتصادی است. یکی از بهترین روش‌های به‌دست آوردن بهینه‌گی در توابع خطی، استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی است (مِیز و تونگ، ۲۰۰۳). بسیاری از پژوهشگران با استفاده از برنامه‌ریزی خطی به بهینه‌سازی الگوی کشت برای به‌دست آوردن بیشترین سود و سایر اهداف پرداخته‌اند. کلاهی و همکاران (۱۴۰۱) الگوی کشت بهینه را با استفاده از برنامه‌ریزی‌خطی برای به‌دست آوردن بیشترین سود و کمترین مصرف آب مجازی تعیین کردند. تابع هدف تحقیق، حداکثر کردن درآمد خالص فروش محصولات کشاورزی در منطقه دشت عمرانی گناباد واقع در خراسان رضوی است و محدودیت‌های اعمال‌شده روی تابع هدف شامل مساحت زمین در دسترس، حجم آب، حداکثر و حداقل سطح زیر کشت، هزینه کودها، هزینه سموم شیمیایی و کارگری است. نتایج این پژوهش نشان داد که در بهترین سیاست، با هدف حداقل کردن مصرف آب مجازی و حداکثر کردن سود، می‌توان آب مجازی مصرفی را تا ۵۷ درصد کاهش داد. مهرپور و همکاران (۲۰۲۴) یک مدل چندهدفه را برای بهینه‌سازی الگوی کشت بر اساس دو گام گسترش دادند. در گام اول، امتیاز پایداری محصولات منتخب با توجه به ابعاد پایداری، زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی محاسبه گردید. در گام دوم، یک مدل برنامه‌ریزی خطی با توجه به امتیازات کسب شده در گام قبل برای محاسبه الگوی کشت بهینه در خراسان رضوی استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که سیر خشک، شلغم، علوفه، ارزن و خصیل، محصولات مناسب برای دوره شش‌ماهه بهار و تابستان هستند، درحالی‌که سیب‌زمینی، چغندر علوفه، شاهدانه و ماش جایگزین‌های بهینه برای دوره شش‌ماهه دیگر هستند. همان‌طور که در پژوهش‌های کلاهی و همکاران (۱۴۰۱) و مهرپور و همکاران (۲۰۲۴) اشاره گردید، برای به‌دست آوردن الگوی کشت بهینه، علاوه بر سود، باید به منابع آب، محیط‌زیست و توسعه پایدار نیز توجه کرد؛ اما با توجه به تعارض بین محیط‌زیست و به‌دست آوردن بیشترین سود در الگوی کشت بهینه، استفاده از ابزاری مناسب در حل تعارضات می‌تواند در به‌دست آوردن الگوی کشت بهینه کمک کند. تئوری بازی[1]، به‌عنوان ابزاری قدرتمند در حل تعارضات استفاده می‌شود. تئوری بازی‌ها اساساً مطالعه ریاضی رقابت و همکاری است که نشان می‌دهد چگونه تعاملات استراتژیک بین بازیکنان منجر به نتایج کلی می‌شود. هرچند که هر کدام از این بازیکنان به نقطه بهینه مدنظرشان نرسند (اشنایدر، ۲۰۱۷). در تئوری بازی‌ها، به‌جای رسیدن به نقطه بهینه برای همه اعضا، نقطه تعادل بین تعارضات بر مبنای قوانین تعریف شده برای بازی مد نظر است. این تئوری برای اولین بار توسط فون نیومن و مورگنسترن (۱۹۵۳) مطرح شده است و بسیاری از محققان در سراسر دنیا، از تئوری بازی‌ها به‌عنوان ابزاری قدرتمند

[1]- Game theory

در منازعات منابع آب استفاده کرده‌اند. زنگ و همکاران (۲۰۱۹) با بررسی وجود تعارضات منافع میان تصمیم‌گیران در رودخانه‌های فرامرزی، علاوه بر استفاده از تئوری بازی‌های تکاملی، از پویایی سیستم برای حل تعارضات استفاده کرده‌اند. نتایج این پژوهش نشان داد که: ۱) تعادل همیشه در صلح پیش نمی‌آید، ۲) افزایش هزینه‌ها همیشه منجر به تعادل نمی‌شود و ۳) نابرابری ناشی از مطلوبیت بدست آمده از هر واحد آب، بستگی به شرایط اقتصادی و اجتماعی ذینفعان دارد.

در تئوری بازی‌ها، تعارضات به‌عنوان بازی‌های تعاملی و غیرتعاملی در نظر گرفته می‌شوند. در بازی‌های تعاملی، تمام ذینفعان در جهت دستیابی به نقطه بهینه با یکدیگر تعامل می‌کنند و بازی‌های تعاملی بیشتر شبیه روش‌های بهینه‌سازی است؛ اما در بازی‌های غیرتعاملی، هر کدام از اعضا به‌تنهایی به دنبال بیشترین منفعت خود هستند. پژوهشگران بسیاری با روش بازی‌های غیرتعاملی به حل تعارضات آبی پرداخته‌اند (بزرگ حداد، ۲۰۲۱). نظری و همکاران (۲۰۲۰) از روش غیرتعاملی تئوری بازی‌ها برای بهره‌برداری بهینه از منابع آب زیرزمینی در منطقه خالدآباد استفاده کردند. در این پژوهش، برای محاسبه پرداخت‌های هرکدام از ذینفعان، اعم از دولت و کشاورز، از شبیه‌سازی و بهینه‌سازی برداشت‌های آب زیرزمینی استفاده شد و سه نوع بازی به نام‌های جابه‌جایی الگوی کشت، افزایش بازده و بازی پیوندی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که سناریوی بازی پیوندی علاوه بر افزایش سود کشاورز می‌تواند منجر به افزایش دو متری در تراز آب زیرزمینی شود.

یکی از روش‌های کاربردی تئوری بازی‌ها در بازی‌های غیرتعاملی برای به‌دست آوردن الگوی کشت بهینه، استفاده از تابع نش[۲] می‌باشد. پژوهشگران مختلفی از روش غیرتعاملی تابع نش برای به‌دست آوردن الگوی کشت بهینه استفاده کرده‌اند. سالازار و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از روش تابع نش تئوری بازی‌ها و برنامه‌ریزی خطی، به بهینه‌سازی الگوی کشت و مدیریت منابع آب زیرزمینی برای ۱۲ سناریوی برداشت آب زیرزمینی پرداختند. در این مطالعه، اجزای اقتصادی شامل هزینه پمپاژ و سود خالص بود و اجزای محیط‌زیستی شامل اضافه برداشت از منابع آب زیرزمینی، میزان نقوذ و رواناب نیترات و آفت‌کش‌ها در یکی از دشت‌های آب زیرزمینی در کشور مکزیک بود. در این پژوهش، برای به‌دست آوردن الگوی کشت بهینه و حل تابع نش از چهار روش نامتقارن نش، کلی– اسمیردینسکای، سطوح یکنواخت و ضررهای مساوی استفاده گردید. به‌منظور مساوی بودن سهم ذینفعان شامل محیط‌زیست و اقتصاد، وزن هر دو تابع زیست‌محیطی و اقتصاد یکسان و برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شد. نتایج برنامه‌ریزی خطی نشان داد که سود و میزان مصرف آب برای هر ۱۲ سناریو حداکثر است؛ اما نتایج تئوری بازی‌ها با وزن ۰/۵ تابع اقتصادی نشان داد که مصرف آب برای هر چهار روش نامتقارن نش، کلی– اسمیردینسکای، سطوح یکنواخت و ضررهای مساوی تقریباً مشابه و به ترتیب برابر با ۳۷۱/۶، ۳۶۷/۳، ۳۶۸ و ۳۶۷/۳ میلیون مترمکعب است. مفتاح هلقی و همکاران (۱۳۹۹) الگوی کشت در حوضه آبریز رودخانه قره‌سو را با استفاده از روش تابع نش تئوری بازی‌ها و برنامه‌ریزی خطی در شهرستان‌های گرگان و کردکوی به‌منظور مدیریت منابع آب و افزایش سود بهینه کردند. نتایج بهینه‌سازی با برنامه‌ریزی خطی نشان داد که میزان صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش سود نسبت به شرایط فعلی به ترتیب ۱۰/۵ درصد به ۳۲۰ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد و ۱۴ درصد به ۶۴۳۱ میلیارد ریال افزایش می‌یابد. در این پژوهش، برای بهینه‌سازی الگوی کشت با استفاده از تئوری بازی‌ها از چهار روش نامتقارن نش، کلی– اسمیردینسکای، سطوح یکنواخت و ضررهای مساوی استفاده گردید. به‌منظور بهینه‌سازی الگوی کشت، برای سه روش، وزن تابع اقتصادی و زیست‌محیطی یکسان و برابر ۰/۵ گرفته شد و برای روش سطوح یکنواخت، وزن

[۲]- Nash function

۰/۵۷۵ برای تابع اقتصادی و وزن ۰/۴۲۵ برای تابع زیست-محیطی در نظر گرفته شد. نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت با نظریه بازی‌ها برای وزن ۰/۵ تابع اقتصادی برای مصرف آب سه روش نامتقارن نش، کلی– اسمیردینسکای و ضررهای مساوی ۲۰۷/۵ میلیون مترمکعب و برای روش سطوح یکنواخت با وزن ۰/۵۷۵ تابع اقتصادی ۱۸۲/۷ میلیون مترمکعب است و میزان سود سه روش اول ۴۹۳۸ میلیارد ریال و برای روش سطوح یکنواخت ۴۵۲۰ میلیارد ریال است. با توجه به ماهیت تابع نش که به‌صورت غیرخطی و دارای محدودیت‌های مختلف برای به‌دست آوردن الگوی کشت است، می‌توان از روش‌های بهینه‌سازی غیرخطی مقید برای حل تابع نش استفاده کرد. از جمله روش‌های غیرخطی مقید می‌توان به روش بهینه‌سازی غیرخطی مقید تعمیم‌یافته گرادیان مختصر شده اشاره کرد که برای حل توابع غیرخطی و به‌تبع آن تابع نش مناسب است (میز و تونگ، ۲۰۰۳).

نتایج بدست آمده از پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که می‌توان از تئوری بازی‌ها، به‌ویژه روش غیرتعاملی تابع نش، به‌عنوان ابزاری قدرتمند در به‌دست آوردن الگوی کشت بهینه و مدیریت منابع آب استفاده کرد. در این مطالعه، به‌عنوان یک استراتژی نوآورانه در حوزه‌ی تکنیک‌های بهینه‌سازی، با استفاده از روش بهینه‌سازی غیرخطی مقید تعمیم‌یافته گرادیان، به بهینه‌سازی تابع نش پرداخته می‌شود. علاوه بر این، از طریق ادغام اصول تئوری بازی‌ها و در نظر گرفتن محدودیت‌های اقتصادی و زیست-محیطی، یک الگوی کشت بهینه برای دشت کوهپایه-سگزی در استان اصفهان که به دلیل خشکسالی‌های اخیر، تراز آب زیرزمینی آن روندی نزولی داشته است، به دست می‌آید. با در نظر گرفتن دقیق پویایی‌های اقتصادی و محدودیت‌های زیست‌محیطی، هدف این تحقیق ارائه چارچوبی قوی برای تعیین مناسب‌ترین استراتژی کشت است که بهره‌وری و پایداری را متعادل کند. با تجزیه‌وتحلیل میزان مصرف آب و حاشیه سود حاصل از نتایج کشت بهینه، اطلاعاتی در خصوص میزان تأثیر اجرای آن بر سطح آب زیرزمینی منطقه به دست می‌آید. لذا می توان بینش ارزشمندی در مورد پیامدهای بالقوه بر سطوح آب زیرزمینی در منطقه به دست آورد و از این طریق به مدیریت آگاهانه‌تر و پایدارتر منابع آب در منطقه کمک کرد.

مواد و روش‌ها

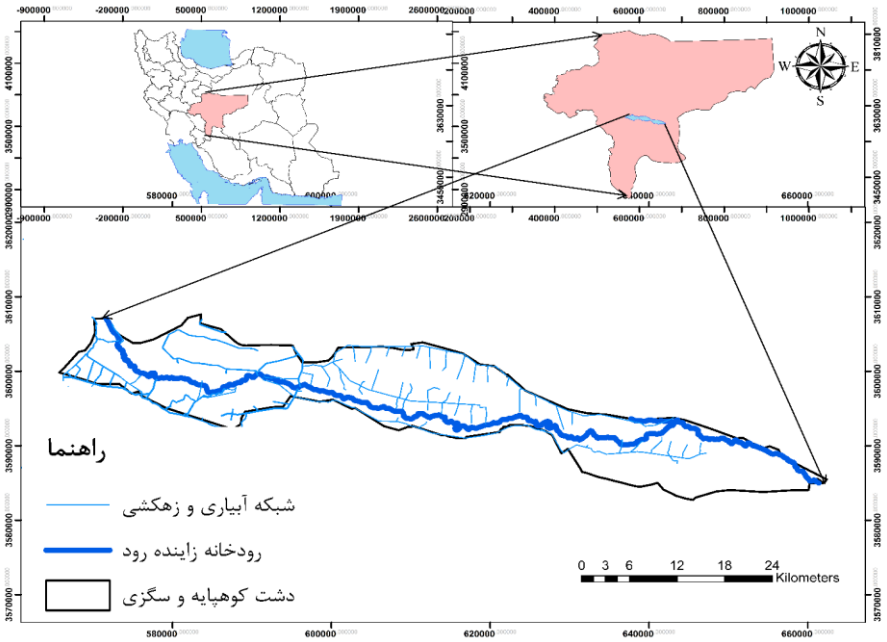
معرفی منطقه مورد مطالعه

با توجه به اهمیت مسئله تضاد منافع محیط‌زیست و معیشت کشاورزان حوضه آبریز زاینده‌رود، به‌خصوص در شرق استان اصفهان، دشت کوهپایه- سگزی به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. شکل ۱، موقعیت دشت کوهپایه- سگزی، رودخانه زاینده‌رود و شبکه آبیاری و زهکشی در این دشت را نشان می‌دهد. کشاورزی در دشت کوهپایه- سگزی به‌شدت به میزان آب رودخانه زاینده‌رود و تغذیه آن از طریق رودخانه وابسته است. مساحت دشت ۲۹۴۱/۱ کیلومتر مربع است و دارای سفره آزاد تا عمق متوسط ۵۰ متر است. متوسط ارتفاع این دشت ۱۵۲۶ متر از سطح دریا و متوسط بارندگی سالانه آن، ۹۷ میلی‌متر است. الگوی کشت غالب دشت کوهپایه- سگزی شامل گیاهان زراعی مانند گندم، یونجه، جو، سبزی و صیفی (شامل طالبی گرمک، هندوانه، خربزه، انواع کدو، خیار و گوجه‌فرنگی)، برنج، ذرت علوفه‌ای، پیاز و سایر محصولات (شامل سبزی‌های خوردن و خورشتی، کاهو، کلم، کرفس، هویج، بادمجان، بامیه، فلفل، سیر، چغندر لبویی، نخودفرنگی) است. جدول ۱، الگوی کشت محصولات دشت کوهپایه- سگزی را به همراه نسبت سود به هزینه و عمق خالص آبیاری آن‌ها نشان می‌دهد.

در این مطالعه، محصولات گندم، جو، یونجه، پیاز، ذرت علوفه‌ای و برنج به‌صورت سطحی و با راندمان ۰/۴ آبیاری می‌شوند و راندمان آبیاری سبزی و صیفی، پنبه و سایر محصولاتی که به‌صورت بارانی آبیاری می‌شوند ۰/۷۵ در نظر گرفته شد (عباسی و همکاران، ۱۳۹۵).

جدول ۱- الگوی کشت سال ۱۳۹۱ دشت کوهپایه- سگزی، نسبت سود به هزینه و عمق خالص آبیاری

محصول	گندم	جو	یونجه	پیاز	ذرت علوفه‌ای	سبزی و صیفی	پنبه	سایر محصولات	برنج
سطح زیر کشت (هکتار)	30294	3700	3950	575	3550	1790	1250	990	205
نسبت سود به هزینه	1.78	1.23	2.29	2.30	2.86	2.78	0.44	0.39	4.66
عمق خالص آبیاری (متر مکعب در هکتار)	4800	4060	9640	6020	9333	4370	9640	9420	8790

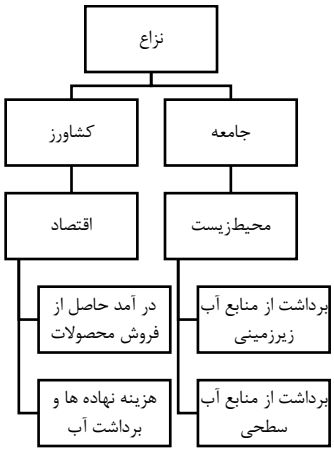


شکل ۱- موقعیت دشت کوهپایه- سگزی، رودخانه زاینده‌رود و شبکه‌های آبیاری و زهکشی

معرفی مدل

تئوری بازی‌ها

تئوری بازی‌ها برای اولین بار در سال ۱۹۴۴ توسط فون نیومن و مورگنسترن معرفی گردید. این نظریه اساساً مطالعه ریاضی رقابت و همکاری است و نشان می دهد که چگونه تعاملات استراتژیک بین بازیکنان منجر به نتایج کلی می‌شود به‌طوری‌که ممکن است آرمان نهایی تمام بازیکنان، نتیجه نهایی نباشد (اشنایدر، ۲۰۱۷). نظریه بازی‌ها، شاخه‌ای از پژوهش در عملیات است که به مطالعه در تصمیم‌گیری در شرایط تضاد منافع میان تصمیم-گیرندگان عاقل و هوشمند می‌پردازد (نویدی و همکاران، ۲۰۱۱).شکل ۲، نزاع مطرح‌شده در پژوهش حاضر که تضاد میان محیط‌زیست و اقتصاد ناشی از کشاورزی است را نشان می‌دهد.



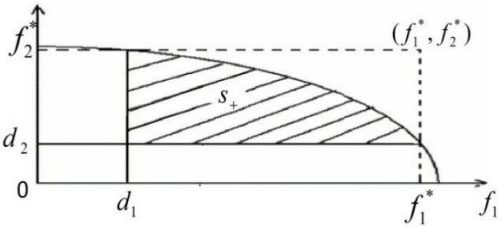
شکل ۲- شکل کلی نزاع در پژوهش حاضر

تئوری بازی‌ها به‌طورکلی به دو قسمت بازی‌های مشارکتی و غیرمشارکتی تقسیم‌بندی می‌شود. در بازی‌های غیرمشارکتی، بازیگران به دنبال حداکثر کردن سود خودشان

هستند. ولی در بازی‌های مشارکتی، طبق یک توافق که بین همه بازیگران است، بازیگران به دنبال حداکثر کردن سود جمعی هستند. یکی از روش‌های مرسوم در تئوری بازی‌های غیرمشارکتی، تئوری تعادل نش است که برای اولین بار در سال ۱۹۵۱ توسط جان نش مطرح گردید.

در این پژوهش، برای مدل‌سازی نظریه‌بازی‌ها از تعادل نش استفاده شده است. در این روش، هر دو هدف اقتصادی و محیط‌زیستی بین صفر تا یک نرمال می‌شوند. بهترین پاسخ برای تابع اقتصادی، بیشترین سود و برای تابع زیست‌محیطی نیز بهترین پاسخ، کمترین استفاده از منابع آب منطقه است. این نزاع، به‌صورت ریاضی زوج مرتب (s,d) نشان داده می‌شود که $s \subseteq R^2$ مجموعه راه‌حل‌های ممکن و $d \subseteq R^2$ بدترین راه‌حل‌ها است که به‌عنوان ندیر یا بردار دستاوردها شناخته می‌شود. هر کدام از بازیکنان قصد دارند بیشترین سود را برای خود کسب کنند. در حالتی که تابع محیط‌زیست و تابع اقتصادی در این پژوهش نرمال شوند کمترین مقدار ممکن برای هر دو تابع $d_1 = d_2 = 0$ می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، مرز پارتو توسط تابع اکیداً نزولی P در فاصله $[d_1, f_1^*]$ و $[d_2, f_2^*]$ تعریف می‌گردد. یا به‌عبارت‌دیگر، $d_2 = p(f_1^*)$ و $f_2^* = p(f_1^*)$ است. درصورتی‌که بردار d به‌عنوان بدترین نتایج ممکن در نظر گرفته شود، مجموعه راه-حل‌های S به بدترین نتایج ممکن محدود می‌شود که مجموعه S^+به‌صورت زیر تعریف می‌گردد (سالازار و همکاران، ۲۰۰۷):

$$S^+ = \{ f = (f_1, f_2) \,/\, f \in S, f \geq d \} \quad (1)$$



شکل ۳- محدوده راه‌حل‌های قابل‌دستیابی

لازم به ذکر است که در رابطه فوق، f_1^* بیشترین میزان تابع اول و f_2^* بیشترین میزان تابع دوم و d_1 حداقل میزان تابع اول و d_2 حداقل میزان تابع دوم می‌باشد.

نش، ارتباط میان توابع هدف را به‌صورت ریاضی زیر تعریف می‌کند:

$$maximize \left(f_1 - d_1)(f_2 - d_2\right) \quad (2)$$
$$s.t \quad d_1 \leq f_1 \leq f_1^*$$
$$f_2 = g(f_1)$$

در (۲)، چنانچه $f_1 = d_1$ باشد و $f_1 = f_1^*$ باشد مقدار تابع هدف صفر می‌شود و برای تمام $\forall f_1 \in (d_1, f_1^*)$ f_1 مقدار این تابع مثبت است. محدودیت دوم را می‌توان در تابع هدف جایگزین کرده و تابع را به‌صورت یک‌بعدی تبدیل کرد، به صورتی که معادله را بر مبنای شرط اول حل کرد:

$$maximize \left(f_1 - d_1)(g(f_1) - d_2\right) \quad (3)$$
$$s.t \quad d_1 \leq f_1 \leq f_1^*$$

برای به‌دست آوردن مقدار بهینه (۳)، از چهار روش راه‌حل نامتقارن نش، راه‌حل نامتقارن سطوح یکنواخت، راه‌حل نامتقارن ضررهای مساوی و راه‌حل نامتقارن کلی– اسمر دینسکای استفاده شده است. با توجه به مطالعاتی که پیشتر انجام شده است، هر چهار روش تقریباً به جواب‌های یکسانی دست پیدا می‌کنند (سالازار و همکاران، ۲۰۰۷؛ مفتاح هلقی و همکاران، ۱۳۹۱)؛ بنابراین در این پژوهش از روش راه‌حل نامتقارن نش استفاده می‌شود.

راه‌حل نامتقارن نش (تئوری بازی‌ها)

راه‌حل نامتقارن نش که برای اولین بار توسط هارسانی و سلتن (۱۹۷۲) معرفی گردید، با اعمال وزن‌های w_1 و w_2 مطابق با رابطه (۴) به بازیکن‌ها به مقدار بهینه دست پیدا می‌کند (سالازار و همکاران، ۲۰۰۷؛ مفتاح هلقی و همکاران، ۱۳۹۱).

$$maximize (f_1 - d_1)^{w_1} (f_2 - d_2)^{w_2} \quad (4)$$
$$s.t \quad d_1 \leq f_1 \leq f_1^*$$

$$f_۲ = g(f_۱)$$

در این پژوهش، با توجه به اینکه مقادیر تابع اقتصادی و تابع محیط‌زیست بین صفر و یک نرمال شده‌اند و $d_۱ = d_۲ = ۰$. لذا رابطه (۴) به‌صورت رابطه (۵) تغییر می‌کند:

$$maximize(Eco)^{w_۱}(\mathrm{Env})^{w_۲} \qquad (۵)$$

در رابطه (۵)، Env نماد تابع زیست‌محیطی و Eco نماد تابع اقتصادی است.

$$w_۲ = ۱ - w_۱ \qquad (۶)$$

با توجه به روابط (۵) و (۶) می‌توان نوشت:

$$maximize(Eco)^{w_۱}(\mathrm{Env})^{۱-w_۱} \qquad (۷)$$

تابع اقتصادی

در این پژوهش، تابع اقتصادی به‌صورت رابطه زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\mathrm{Net}_n = \sum_c^n \sum_t^۲ X_{tc}.Y_{tc}.(P_{tc} - C_{tc}) \qquad (۸)$$

در این رابطه، Net_n نشان‌دهنده سود خالص، X_c مساحت محصولات به هکتار برای محصول c ام، Y_c عملکرد محصول برای محصول c ام در هکتار، P_c قیمت فروش محصولات برای محصول c ام ، C_c هزینه محصولات برای محصول c ام، n تعداد محصولات و t نشان‌دهنده فصل کشت محصول است.

برای نرمال نمودن سود خالص به‌عنوان تابع اقتصادی، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی، مقدار بیشترین و کمترین میزان سود خالص، با توجه به محدودیت‌های مورد نظر محاسبه شد. محدودیت‌های اعمال‌شده روی سود خالص شامل محدودیت منابع آب، محدودیت کل زمین‌های قابل کشت و محدودیت میزان تغییرات در مساحت هر محصول است. محدودیت کل اراضی به‌صورت رابطه (۹) در نظر گرفته شد:

$$\sum_i^۹ X_i \le TX \qquad (۹)$$

که X_i مساحت هر کشت و TX بیشترین اراضی قابل کشت در دشت کوهپایه- سگزی است.

محدودیت منابع آب با توجه به جدول بیلان و منابع آب زیرزمینی برای هر سال (دوره آماری ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۰) تعیین شده است. لازم به ذکر است که گزارش بیلان این دشت برای سال‌های ۱۳۹۱ تا ۱۴۰۰ هنوز منتشر نشده است.

برای محاسبه بیلان کلی دشت و میزان آب در دسترس کشاورزی، از هیدروگراف واحد دشت و میزان منابع آب سطحی در بازه زمانی ۱۳۷۶ – ۱۳۹۰ استفاده شد. به‌طورکلی، مجموع عوامل ورودی و خروجی آبخوان، تغییرات حجم ذخیره را بیان می‌کند. یکی از روش‌های برآورد تغییرات حجم ذخیره آبخوان، استفاده از ارقام نوسانات سطح آب زیرزمینی است که از طریق هیدروگراف معرف آبخوان به دست می‌آید. همان‌طور که در ملاحظه می‌شود، این دشت به‌طور متوسط با کسری مخزن ۲۹/۴ میلیون مترمکعب در سال روبه‌روست که مدیریت منابع آب در این دشت به‌منظور جلوگیری از فرونشست زمین را ضروری ساخته است. میزان تغییرات ذخیره در آبخوان از رابطه (۱۰)، محاسبه می‌شود:

$$\pm \Delta V = S.A.\Delta H \qquad (۱۰)$$

که S ضریب آبدهی آبخوان، A مساحت آبخوان (کیلومترمربع) و ΔH نوسانات سطح آب زیرزمینی (متر) است.

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است، ضریب آبدهی ویژه در آبخوان برابر با چهار درصد و میزان متوسط افت سالانه از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۰ برابر با ۲۵ سانتی‌متر است. با توجه به وسعت آبخوان که برابر با ۲۹۴۱/۱ کیلومترمربع است میزان کسری سالانه حجم مخزن در آبخوان، برابر با ۲۹/۴۱ میلیون مترمکعب است.

جدول ۲- افت سالانه و حجم کسری مخزن آبخوان

حجم افت سالانه (میلیون مترمکعب)	ضریب آبدهی ویژه	مساحت آبخوان (کیلومتر مربع)	میانگین افت سالانه (متر)	تعداد سال	تراز شهریور سال ۱۳۹۰ (متر)	تراز مهر سال ۱۳۷۶ (متر)
-29.41	0.04	2941.1	-0.25	15	1508.58	1512.56

می‌توان گفت که تفاوت تخلیه و تغذیه در دشت باعث ایجاد افت در دشت کوهپایه- سگزی می‌شود که به‌منظور جلوگیری از فرونشست زمین باید از برداشت بیش از اندازه از آبخوان جلوگیری شود (گزارش بیلان شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، دشت کوهپایه- سگزی ۱۳۸۰ - ۱۳۹۰).

برای به‌دست آوردن میزان آب در دسترس در هر سال از معادله بیلان در آن سال در منطقه استفاده شد رابطه (۱۱).

$$\delta S = S_R - S_C \qquad (۱۱)$$

که S_C مقدار مصـــرف از آب زیرزمینی و S_R مقدار ذخیره تجدیدشونده است.

به‌منظور مدیریت منابع آب زیرزمینی، میزان برداشت آب از آبخوان باید به‌گونه‌ای باشد که افت تراز سطح آب زیرزمینی از حد مجاز آن تجاوز نکند؛ بنابراین میزان برداشت آب باید به میزان ذخیره تجدیدشونده باشد؛ بنابراین S_R میزان برداشت بدون افت منابع آب زیرزمینی است. پس از به‌دست آوردن میزان برداشت مجاز از منابع آب زیرزمینی، مقدار آب در دسترس در دشت کوهپایه- سگزی با توجه به رابطه زیر به‌دست می‌آید:

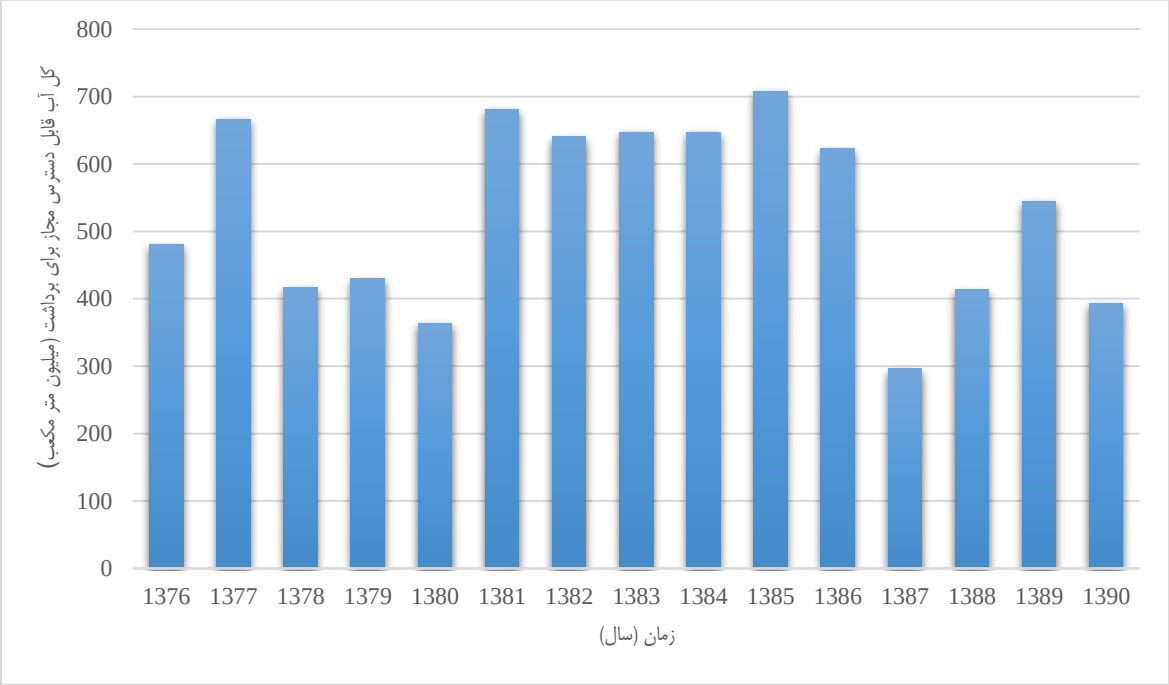
$$S_T = S_S + S_R \qquad (۱۲)$$

S_S میزان آب سطحی در هر سال و S_T مقدار آب کل موجود برای کشاورزی است.

جدول ۳، محاسبات مربوط به میزان مجاز برداشت از آب زیرزمینی و کل آب موجود در دسترس را در طول دوره آماری موردمطالعه نشان می‌دهد. شکل ۴ نیز نمودار میله‌ای کل آب موجود در دشت کوهپایه- سگزی را برای سال‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۳- میزان آب موجود سالانه دشت کوهپایه- سگزی

سال آبی (سناریو)	تراز مهر (متر)	تراز شهریور (متر)	افت سالانه (متر)	حجم افت (میلیون مترمکعب) δS	برداشت آب زیرزمینی S_C	آب زیرزمینی بدون افت S_R	آب سطحی S_S	کل آب موجود S_T
1376	1512.56	1512.27	-0.29	-34.12	276.96	242.84	237.51	480.35
1377	1512.22	1512.11	-0.11	-12.94	289.29	276.35	390.01	666.36
1378	1512.16	1511.84	-0.32	-37.65	241.92	204.28	212.63	416.91
1379	1511.73	1510.96	-0.77	-90.59	280.53	189.94	240.04	429.98
1380	1510.91	1510.04	-0.87	-102.35	248.74	146.39	217.47	363.85
1381	1509.92	1509.62	-0.3	-35.29	311.64	276.35	405.1	681.45
1382	1509.64	1510.05	0.41	48.23	228.11	276.35	364.21	640.56
1383	1509.93	1510.31	0.38	44.7	231.64	276.35	371.01	647.36
1384	1510.24	1510.6	0.36	42.35	234	276.35	371.01	647.36
1385	1510.62	1510.81	0.19	22.35	254	276.35	431.13	707.48
1386	1510.85	1511.16	0.31	36.47	239.88	276.35	346.47	622.82
1387	1511.21	1510.18	-1.03	-121.17	220.03	98.85	197.08	295.93
1388	1510.07	1509.26	-0.81	-95.29	273.71	178.42	235.2	413.63
1389	1509.2	1509.2	0	0	276.35	276.35	268.38	544.73
1390	1509.19	1508.58	-0.61	-71.76	248.25	176.49	217.12	393.61
میانگین	1510.59	1510.33	-0.25	-29.93	259.51	229.58	297.26	526.84



شکل ۴- میزان آب قابل دسترس برای هر سال (میلیون متر مکعب)

تابع زیست‌محیطی

تابع زیست‌محیطی در نظر گرفته شده به صورت زیر می باشد:

$$Env = ۱ - \frac{S_{TC}}{S_T} \quad (۱۳)$$

که S_{TC} مقدار آب مصرف شده به ازای الگوی کشت است. به منظور محاسبات اولیه، الگوی کشت در سال ۱۳۹۱ به عنوان الگوی کشت مبنا در نظر گرفته شد و بر اساس محدودیت های موجود، الگوی کشت بهینه در هر سال پیشنهاد شد.

نرمال‌سازی تابع اقتصادی و تابع زیست‌محیطی

جهت استفاده از توابع اقتصادی و زیست‌محیطی در (۷)، ابتدا این توابع باید بین دو عدد صفر و یک نرمال شوند. برای نرمال‌سازی داده‌ها از رابطه ۱۴ استفاده شده است (علی و فرج، ۲۰۱۴):

$$Z = \frac{X - X_{Min}}{X_{MAX} - X_{MIN}} \quad (۱۴)$$

به منظور نرمال‌سازی توابع اقتصادی و زیست‌محیطی، بیشترین و کمترین مقادیر سود اقتصادی و میزان مصرف آب، براساس برنامه‌ریزی خطی و با استفاده از روش سیمپلکس محاسبه شد. نتایج این بخش در جدول ۴،ارائه شده است. با توجه به تضاد تابع زیست‌محیطی با تابع اقتصادی، بیشترین و کمترین مصرف آب نیز به ترتیب مطابق با کمترین و بیشترین تابع اقتصادی بدست آمد. لازم به ذکر است که مقدار نرمال شده مصرف آب و مقدار سود نرمال در سال ۱۳۹۱ به عنوان سال مبنا به ترتیب ۰/۱۹ و ۰/۶۲ محاسبه شد.

جدول ۴- بیشترین و کمترین مقدار سود و میزان مصرف آب در دوره آماری مورد مطالعه با استفاده از روش سیمپلکس

پارامتر	کل آب موجود (میلیون متر مکعب)	میزان سود (میلیون ریال)
بیشترین	707.48	1865185.59
کمترین	295.93	988110.92

بهینه‌سازی غیرخطی مقید روش تعمیم‌یافته گرادیان مختصر شده

پس از نرمال سازی پارامترها، در این مرحله مقادیر تابع نش اولیه با استفاده از روش تئوری بازی‌ها و به کمک روش بهینه‌سازی غیرخطی مقید تعمیم‌یافته گرادیان مختصر شده[۳]، الگوی کشت بهینه محاسبه شد.

مسأله بهینه‌سازی مقید را با در نظر گرفتن متغیرهای اساسی برای قیدها به تعداد m و متغیرهای غیراساسی به تعداد n می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت (میز و تونگ، ۲۰۰۲):

$$Minimize\ f(x_1, x_2, \ldots\ldots, x_n) \qquad (۱۵)$$

$$g(x)_i \le b$$
$$g \le x_j \le h$$

با توجه به رابطه ۱۵، متغیرهای اساسی برای قیدها تعریف می‌شوند که مجموعه متغیرهای اساسی و غیراساسی (x_B, x_N) به صورت رابطه ۱۶، می‌باشد:

$$x = (x_B, x_N)^T \qquad (۱۶)$$

که مسأله بهینه‌سازی به صورت رابطه (۱۷) بازنویسی می شود:

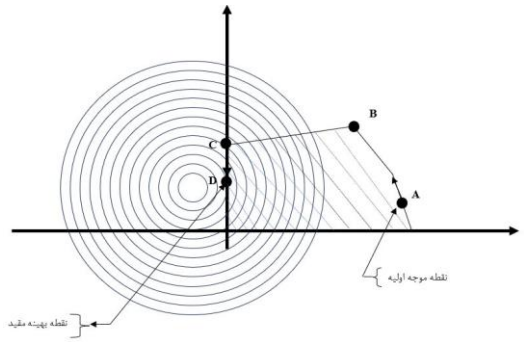
$$Minimize\ f(x_B, x_N) \qquad (۱۷)$$

$$g(x)_i =$$
$$Q \le x_B \le w$$
$$E \le x_N \le R$$

جواب مسأله تغییریافته را می‌توان توسط گام‌های زیر پیدا کرد:

گام ۱: انتخاب نقطه شروع اولیه، گام ۲: تعیین مسیر جستجو d^k در تکرار k ام، گام ۳: پیدا کردن نقطه جدید $x^{k+1} = x^k + \beta^k d^k$ که β^k اندازه گام محاسباتی و عددی است که $f(x^k + \beta^k d^k)$ را کمینه می‌کند و گام ۴: کنترل معیار همگرایی به صورت رابطه (۱۸)، که برای بررسی پایان الگوریتم تعریف شده‌است. شکل ۵، روش GRG را نشان می‌دهد.

$$\left\| x^k - x^{k+1} \right\| < \varepsilon \qquad (۱۸)$$



شکل ۵- روش ترسیمی *GRG*

نتایج و بحث

در این قسمت، نتایج الگوی کشت بهینه منطقه مورد مطالعه به روش‌های مختلف بهینه‌سازی، به صورت سالانه در طول دوره آماری مورد مطالعه، بر اساس محدودیت آب موجود ارائه می‌شود.

بهینه‌سازی تابع نش با روش GRG

نتایج بهینه‌سازی مقادیر تابع نش با توجه به محدودیت منابع آب هر سال در طول دوره آماری مورد مطالعه و با استفاده از روش بهینه‌سازی غیرخطی مقید در جدول ۵، ارائه شده است. میزان مصرف آب و میزان سود ناشی از اجرای هر سناریو، برای وزن‌های مختلف تابع اقتصادی به ترتیب در جدول ۶ و جدول ۷ ارائه شده است. بر اساس نتایج بدست آمده، می‌توان گفت که بیشترین میزان تابع هدف در وزن صفر تابع اقتصادی به دست آمده است. بدین ترتیب اگر تابع اقتصادی لحاظ نشود، میزان سود و میزان مصرف آب به کمترین میزان خود خواهد رسید. از سوی دیگر، اگر تمام وزن تابع را به اقتصاد اختصاص دهیم (وزن تابع اقتصادی برابر با واحد شود)، میزان سود و میزان مصرف آب به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به طور کلی، می‌توان گفت که هر چه وزن تابع اقتصادی بیشتر شود، میزان سود و مصرف آب افزایش می‌یابد.

[۳] -Generalized Reduced Gradient (GRG)

جدول ۵-مقادیر بهینه تابع نش برای هر سال با توجه به محدودیت‌ها و وزن‌های مختلف اقتصادی

سال	محدودیت منابع آب (میلیون متر مکعب)	مقدار تابع هدف بهینه نش بر اساس وزن تابع اقتصادی										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
1376	480.35	1	0.83	0.73	0.65	0.6	0.57	0.56	0.58	0.59	0.6	0.61
1377	666.36	1	0.83	0.73	0.65	0.6	0.57	0.56	0.59	0.64	0.74	0.93
1378	416.91	1	0.83	0.73	0.65	0.6	0.57	0.55	0.54	0.53	0.51	0.5
1379	429.98	1	0.83	0.73	0.65	0.59	0.57	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52
1380	363.85	1	0.83	0.73	0.65	0.59	0.56	0.53	0.5	0.47	0.44	0.42
1381	681.45	1	0.83	0.73	0.65	0.59	0.57	0.56	0.59	0.64	0.74	0.96
1382	640.56	1	0.83	0.73	0.65	0.59	0.57	0.56	0.59	0.64	0.74	0.89
1383	647.36	1	0.83	0.73	0.65	0.59	0.57	0.56	0.59	0.64	0.74	0.9
1384	647.36	1	0.83	0.73	0.65	0.59	0.57	0.56	0.59	0.64	0.74	0.9
1385	707.48	1	0.83	0.73	0.65	0.6	0.57	0.56	0.59	0.64	0.74	1
1386	622.82	1	0.83	0.73	0.65	0.6	0.57	0.56	0.59	0.64	0.74	0.86
1387	295.93	1	0.83	0.73	0.65	0.58	0.52	0.47	0.42	0.37	0.33	0.3
1388	413.63	1	0.83	0.73	0.65	0.59	0.57	0.55	0.54	0.52	0.51	0.5
1389	544.73	1	0.83	0.73	0.65	0.6	0.57	0.56	0.59	0.63	0.67	0.72
1390	393.61	1	0.83	0.73	0.65	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51	0.49	0.46

جدول ۶ - مقادیر مصرف آب به ازای تابع نش بهینه در هر سال بر اساس ضرایب مختلف تابع اقتصادی (میلیون متر مکعب)

سال	محدودیت منابع آب	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
1376	480.35	252.48	270.41	280.79	296.92	355.11	415.82	474.93	480.35	480.35	480.35	480.35
1377	666.36	252.48	270.41	280.79	297.33	354.17	415.86	474.59	532.24	590.64	648.58	666.36
1378	416.91	252.48	270.41	280.79	298.85	355.46	416.89	416.9	416.91	416.91	416.91	416.91
1379	429.98	252.48	270.41	280.79	297.35	358.99	415.8	429.98	429.98	429.98	429.98	429.98
1380	363.85	252.48	270.41	280.79	297.58	356.11	363.85	363.85	363.85	363.85	363.85	363.85
1381	681.45	252.48	270.41	280.79	296.96	361.01	415.95	473.83	533.35	590.65	648.56	681.45
1382	640.56	252.48	270.41	280.79	298.91	357.24	415.87	474.68	533.07	590.64	640.56	640.56
1383	647.36	252.48	270.4	280.79	298.91	356.78	417.18	474.9	533.65	590.65	647.35	647.35
1384	647.36	252.48	270.4	280.79	298.91	356.78	417.18	474.9	533.65	590.65	647.35	647.35
1385	707.48	252.48	270.4	280.79	297.76	357.22	417.17	474.12	533.68	590.64	648.58	707.48
1386	622.82	252.48	270.45	280.79	299	357	415.83	474.03	534.15	590.64	622.82	622.82
1387	295.93	252.48	270.41	280.79	295.91	295.93	295.93	295.93	295.93	295.93	295.93	295.93
1388	413.63	252.48	270.41	280.79	298.26	359.37	413.61	413.63	413.63	413.63	413.63	413.63
1389	544.73	252.48	270.4	280.79	298.71	357.18	416.28	474.08	533.14	544.73	544.73	544.73
1390	393.61	252.48	270.41	280.79	295.14	354.76	393.6	393.61	393.61	393.61	393.61	393.61

جدول ۷- مقادیر سود خالص به ازای تابع نش بهینه در هر سال بر اساس ضرایب مختلف تابع اقتصادی (میلیارد ریال)

سال	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
1376	614.37	896.57	955.24	994.62	1117.62	1239.8	1358.71	1378.69	1378.69	1378.69	1378.69
1377	614.38	896.65	955.24	993.37	1126.04	1239.84	1366.62	1494.78	1616.22	1740.88	1778.57
1378	614.38	896.6	955.24	994.43	1118.13	1242.51	1242.57	1242.57	1242.57	1242.58	1242.57
1379	614.38	896.6	955.24	993.57	1121.83	1233.17	1270.19	1270.2	1270.2	1270.2	1270.1
1380	614.38	896.58	955.24	991.33	1116.57	1133.16	1133.15	1134.72	1134.72	1134.72	1134.72
1381	614.38	896.64	955.24	992.71	1121.11	1239.9	1365	1496.96	1616.22	1740.96	1810.36
1382	614.38	896.6	955.24	994.22	1121.08	1243.59	1366.61	1493.12	1616.21	1723.7	1723.7
1383	614.38	896.56	955.24	990.65	1121.12	1240.6	1366.22	1493.66	1616.21	1738.32	1738.34
1384	614.38	896.56	955.24	990.65	1121.12	1240.6	1366.22	1493.66	1616.21	1738.32	1738.34
1385	614.38	896.68	955.24	994.68	1121.15	1239.89	1365.12	1493.15	1616.22	1740.96	1865.18
1386	614.38	896.61	955.24	994.33	1117.33	1239.85	1366.64	1494.3	1616.21	1685.5	1685.5
1387	614.38	896.6	955.24	987.84	987.8	987.8	987.81	987.89	987.89	987.89	987.89
1388	614.38	896.6	955.24	993.49	1120.41	1235.48	1235.52	1235.53	1235.53	1235.53	1235.53
1389	614.38	896.61	955.24	992.63	1121.09	1239.77	1366.46	1489.14	1517.32	1517.32	1517.32
1390	614.38	896.63	955.24	993.56	1109.5	1193.39	1199.72	1199.78	1200.08	1200.08	1199.51

به منظور رعایت عدالت و تساوی در بین ذینفعان، وزن انتخاب شده برای به‌دست آوردن الگوی کشت تابع اقتصادی ۰/۵ در نظر گرفته شد (سالازار و همکاران، ۲۰۰۷؛ مفتاح هلقی و همکاران، ۱۳۹۹) و الگوی کشت بهینه منطقه محاسبه شد. جدول ۸، مقادیر مساحت هر محصول محاسبه شده به کمک تئوری بازی‌ها برای وزن ۰/۵ را نشان می‌دهد. به طور کلی، می‌توان گفت که محصولات برنج، سبزی و صیفی و پیاز نسبت به سال مبنا (سطح زیر کشت محصولات ارائه شده در جدول ۱) افزایش سطح زیر کشت داشته‌اند و برای محصولات پنبه، جو، گندم و سایر محصولات، سطح زیر کشت برای تمام سال‌ها کاهش یافته است. یکی از دلایل افزایش و کاهش سطح کشت در این محصولات، نسبت سود به هزینه است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، نسبت سود به هزینه برای محصولات پنبه، جو، سایر محصولات و گندم کمترین مقدار است؛ بنابراین مساحت زیر کشت این محصولات نسبت به سطح کشت مبنا کاهش یافته است. ذرت علوفه‌ای جزو محصولات آب‌بر در این دشت است و نسبت سود به هزینه متوسطی در بین محصولات مختلف دارد؛ اما با توجه به آب‌بر بودن، در تمام سال‌ها دچار کاهش سطح کشت شده است. نکته قابل توجه اینست که مدل تمایل دارد سطح زیر کشت محصولاتی مانند برنج که جزو محصولات آب‌بر در دشت کوهپایه- سگزی است را افزایش دهد. دلیل این امر نیز سودآور بودن این محصول نسبت به سایر محصولات است و علی‌رغم محدودیت منابع آب در هر سال، با توجه به قیمت کم آب کشاورزی، کشاورز تمایل به کاشت این محصول دارد.

جدول ۸- مقدار بهینه مساحت هر محصول (هکتار) با استفاده از تئوری بازی‌ها، برای وزن ۰/۵ تابع اقتصادی

کل مساحت	برنج	سایر محصولات	پنبه	سبزی و صیفی	ذرت علوفه‌ای	پیاز	یونجه	جو	گندم	میزان سود (میلیارد ریال)	مصرف آب (میلیون متر مکعب)	سال (سناریو)
32628	328	396	500	2864	1441	920	1633	1480	23066	1239.8	415.82	1376
32072	328	396	500	2864	2084	920	1580	1480	21919	1239.84	415.86	1377
32272	328	396	500	2864	1422	920	1821	1480	22541	1242.51	416.89	1378
32534	328	396	500	2864	1495	920	1600	1480	22950	1233.17	415.8	1379
26126	328	396	500	2864	2248	920	2750	1480	14640	1133.16	363.85	1380
32686	328	396	500	2864	1461	920	1620	1480	23116	1239.9	415.95	1381
32665	328	396	500	2864	1484	920	1581	1480	23111	1243.59	415.87	1382
32665	328	396	500	2864	1484	920	1581	1480	23111	1240.6	417.18	1383
32665	328	396	500	2864	1484	920	1581	1480	23111	1240.6	417.18	1384
32647	328	396	500	2864	1420	920	1625	1480	23113	1239.89	417.17	1385
32657	328	396	500	2864	1476	920	1582	1480	23110	1239.85	415.83	1386
22045	328	396	500	2864	1710	920	1728	1480	12118	987.8	295.93	1387
32088	328	396	500	2864	1422	920	1688	1480	22489	1235.48	413.61	1388
32651	328	396	500	2864	1420	920	1630	1480	23112	1239.77	416.28	1389
30561	328	396	500	2864	1422	920	1585	1480	21065	1193.39	393.6	1390

بهینه‌سازی الگوی کشت با برنامه‌ریزی خطی

در این قسمت، با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی و به منظور بیشینه‌سازی مقدار سود و با در نظر گرفتن محدودیت منابع آب در هر سال، الگوی کشت بهینه تعیین گردید. همچنین با توجه به جلوگیری از بر هم زدن تعادل عرضه و تقاضا در بازار، حداکثر مجاز برای تغییر در سطح زیر کشت هر محصول ۶۰ درصد مساحت هر محصول در نظر گرفته شد. جدول ۹، نتایج مربوط به الگوی کشت بهینه توسط این روش را نشان می‌دهد.

می‌توان گفت که بیشترین میزان سود مربوط به الگوی کشت سال آبی ۱۳۸۵ است. در این سال، بیشترین مقدار منابع آب وجود دارد که به تبع آن بیشترین میزان مصرف آب و مساحت کشت شده به ترتیب به میزان ۷۰۷/۴۳ میلیون مترمکعب و ۴۸۳۶۱/۰۶ هکتار می‌باشد. کمترین میزان سود نیز مربوط به سال ۱۳۸۷ است که کمترین میزان آب و مساحت کشت شده به ترتیب به میزان ۲۹۵/۹۳ میلیون متر مکعب و ۲۲۲۳۴/۰۸ هکتار را به خود اختصاص داده است. به طور کلی، مقایسه نتایج الگوی کشت برنامه‌ریزی‌خطی (جدول ۹) با الگوی کشت مبنا (جدول ۱) نشان می‌دهد که افزایش سطح کشت در محصولات برنج، سبزی و صیفی، پیاز و یونجه رخ داده است و برای محصولات پنبه، جو، گندم سطح کشت برای تمام سال‌ها کاهش یافته است.

مقایسه نتایج تئوری بازی‌ها (جدول ۶ و ۸) و برنامه‌ریزی خطی سود بیشینه (جدول ۹) از لحاظ مصرف آب و سود نشان می‌دهد که مصرف آب در تمام سال‌ها در همه وزن‌های تابع اقتصادی کمتر از روش برنامه‌ریزی خطی سود بیشینه است. به طور کلی مقایسه نتایج سود برنامه‌ریزی خطی و تئوری بازی‌ها نشان می‌دهد که در تمام وزن‌های تئوری بازی‌ها، میزان سود، از میزان سود روش برنامه‌ریزی خطی کمتر است.

جدول ۹- الگوی کشت بهینه محصولات با استفاده از برنامه‌ریزی‌خطی در هر سال (هکتار)

سال	میزان آب مصرفی (میلیون متر مکعب)	سود برای برنامه‌ریزی‌خطی (میلیارد ریال)	گندم	جو	یونجه	پیاز	ذرت علوفه‌ای	سبزی و صیفی	پنبه	سایر محصولات	برنج	کل مساحت
1376	480.35	1386.26	12118	1480	6320	920	5077	2864	500	396	328	30003
1377	666.36	1778.58	26446	1480	6320	920	5680	2864	500	396	328	44934
1378	416.91	1250.12	12118	1480	6320	920	2358	2864	500	396	328	27284
1379	429.98	1278.18	12118	1480	6320	920	2919	2864	500	396	328	27844
1380	363.85	1135.51	12118	1480	5027	920	1420	2864	500	396	328	25052
1381	681.45	1810.36	27704	1480	6320	920	5680	2864	500	396	328	46192
1382	640.56	1724.24	24296	1480	6320	920	5680	2864	500	396	328	42784
1383	647.36	1738.55	24863	1480	6320	920	5680	2864	500	396	328	43351
1384	647.36	1738.55	24863	1480	6320	920	5680	2864	500	396	328	43351
1385	707.48	1865.19	29873	1480	6320	920	5680	2864	500	396	328	48361
1386	622.82	1686.88	22818	1480	6320	920	5680	2864	500	396	328	41306
1387	295.93	988.11	12118	1480	2208	920	1420	2864	500	396	328	22234
1388	413.63	1243.08	12118	1480	6320	920	2218	2864	500	396	328	27143
1389	544.73	1522.4	16310	1480	6320	920	5680	2864	500	396	328	34798
1390	393.61	1200.09	12118	1480	6261	920	1420	2864	500	396	328	26287

مقایسه نتایج دو روش بهینه‌سازی الگوی کشت

با مقایسه نتایج مربوط به الگوی کشت بهینه دو روش بهینه‌سازی استفاده شده در این تحقیق (جدول ۹) می توان گفت که بیشترین سطح کشت، همچنان به کشت گندم در بین تمام سال‌ها اختصاص دارد؛ اما در هر دو روش کشت گندم، نسبت به کشت سال مبنا (جدول ۱) کاهش یافته است؛ اگرچه میانگین کشت گندم در روش تئوری بازی‌های بهینه شده بیشتر از روش برنامه‌ریزی‌خطی است. از دلایل افزایش کشت گندم در روش تئوری بازی‌های بهینه شده در مقایسه با روش برنامه‌ریزی‌خطی می‌توان به کم آب‌بر بودن گندم نسبت به بقیه محصولات اشاره کرد. در هر دو روش، کشت پنبه، جو و سایر محصولات کاهش یافته است؛ اما سطح کشت یونجه و ذرت علوفه‌ای در روش تئوری بازی‌های بهینه شده نسبت به روش

برنامه‌ریزی‌خطی کاهش یافته است. دلیل این کاهش را می توان اینگونه بیان نمود که نیاز ناخالص آبیاری این محصولات نسبت به بقیه محصولات بیشتر است. در هر دو روش، مساحت کشت محصولات برنج، سبزی و صیفی و پیاز افزایش یافته است. دلیل این امر نیز نسبت زیاد سود به هزینه کشت برنج می‌باشد که علی‌رغم آب‌بر بودن، تمایل به کشت این محصول زیاد است. در روش تئوری بازی‌ها، سطح کشت سبزی و صیفی به دلیل اینکه عمق خالص آبیاری کمتری نسبت به بقیه محصولات دارد و از آبیاری بارانی با راندمان بیشتری استفاده می‌کند، افزایش یافته است. افزایش سطح کشت پیاز نیز ناشی از صرفه اقتصادی نسبتاً زیاد آنست که تمایل کشاورز به کشت پیاز نیز در منطقه تأییدکننده این موضوع می‌باشد.

جدول۱۰، نشان‌دهنده نتایج مصرف آب و میزان سود روش‌های مختلف بهینه‌سازی خطی (سود بیشینه) و تئوری بازی‌ها (بهینه شده برای وزن ۰/۵ تابع اقتصادی) در طول دوره آماری است. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مصرف آب مربوط به کشت سال مبنا است که بیشترین سود را نیز شامل می‌شود؛ اما با توجه به کسری مخزن به وجود آمده و فرونشست زمین، ادامه این روند تقریباً غیرممکن است. نتایج بهینه‌سازی با روش برنامه‌ریزی‌خطی نشان می‌دهد که با توجه به محدودیت منابع آب موجود، با صرفه‌جویی ۱۷ درصدی در مصرف آب فقط چهار درصد از سود نسبت به تکرار الگوی کشت سال مبنا کم شده است. از سوی دیگر، نتایج تئوری بازی‌های بهینه شده با وزن ۰/۵ حاکی از کاهش مصرف آب به میزان ۳۱ درصد است. در این روش، سود به میزان ۱۷ درصد نسبت به سال مبنا کاهش یافته است.

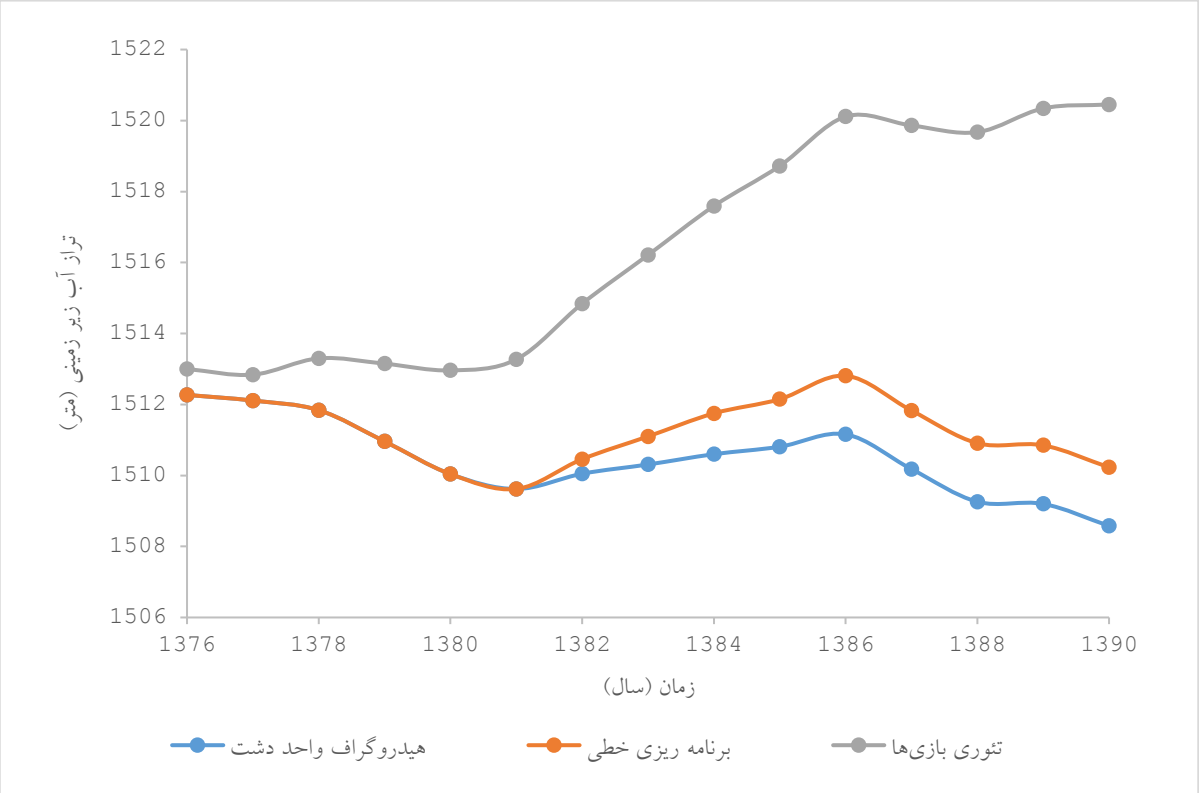
جدول ۱۰- میزان مصرف آب (میلیون متر مکعب) و سود (میلیارد ریال) در بین تمام سال‌های پژوهش

	سال مبنا	برنامه‌ریزی خطی	تئوری بازی‌ها (وزن اقتصادی ۰/۵)
میزان مصرف آب	9467967000	7884763895.85	6523423228.82
میزان سود	23038.93	22201.85	19233.42
کاهش مصرف آب نسبت به سال مبنا	0	-0.17	-0.31
کاهش سود نسبت به سال مبنا	0	-0.04	-0.17

با توجه به اینکه دشت کوهپایه- سگزی دارای افت آب زیرزمینی است، روشی که دارای افت آب زیرزمینی کمتر و سود مناسب باشد می‌تواند به عنوان برترین روش انتخاب شود؛ بنابراین، در این قسمت، تراز آب زیرزمینی ناشی از اجرای الگوی پیشنهادی روش‌های مدیریتی مذکور در طول دوره آماری مورد مطالعه محاسبه شد (جدول ۱۰). نتایج نشان می‌دهد که میزان افت آب زیرزمینی برای هیدروگراف واحد دشت برابر با ۳/۶۹ متر می‌باشد. در حالی که اگر روش پیشنهادی برنامه‌ریزی‌خطی با هدف به‌دست آوردن بیشترین سود، در طول دوره آماری مذکور اجرا می‌شد، میزان افت تراز آب زیرزمینی به ۲/۰۴ متر کاهش می‌یافت. از سوی دیگر، در صورت اجرای روش تئوری بازی‌های بهینه شده با وزن تابع اقتصادی ۰/۵ ، نه تنها تراز آب زیرزمینی کاهش نمی‌یافت، بلکه شاهد افزایش آن به میزان ۷/۴۵ متر بودیم. جدول ۱۱، تغییرات تراز آب زیرزمینی برای روش برنامه‌ریزی‌خطی و تئوری بازی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۱۱- تراز آب زیرزمینی شبیه‌سازی شده برای روش برنامه‌ریزی‌خطی و تئوری بازی‌ها برای هر سال

سال	تئوری بازی‌های بهینه شده با وزن ۰/۵ تابع اقتصادی	برنامه‌ریزی‌خطی	هیدروگراف واحد دشت
1376	1513.00	1512.27	1512.27
1377	1512.84	1512.11	1512.11
1378	1513.30	1511.84	1511.84
1379	1513.15	1510.96	1510.96
1380	1512.96	1510.04	1510.04
1381	1513.27	1509.62	1509.62
1382	1514.84	1510.46	1510.05
1383	1516.21	1511.10	1510.31
1384	1517.59	1511.75	1510.60
1385	1518.72	1512.15	1510.81
1386	1520.11	1512.81	1511.16
1387	1519.86	1511.83	1510.18
1388	1519.67	1510.91	1509.26
1389	1520.34	1510.85	1509.20
1390	1520.45	1510.23	1508.58



شکل ۶ - تغییرات تراز آب زیرزمینی برای ۱۶ سال با توجه به سه روش تعیین الگوی کشت با برنامه‌ریزی خطی، تئوری بازی‌ها با وزن ۰/۵ تابع اقتصادی و هیدروگراف واحد دشت

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، با استفاده از روش بهینه‌سازی غیرخطی مقید و با توجه به محدودیت‌های آبی دشت کوهپایه- سگزی، تابع نش بهینه شد. به‌طورکلی، می‌توان نتایج حاصل از این تحقیق را به شرح زیر ارائه نمود:

هر چه وزن تابع اقتصادی بیشتر شود، میزان سود و مصرف آب، به ازای الگوی کشت‌های مختلف افزایش می‌یابد.

نتایج برنامه‌ریزی خطی نسبت به نتایج تئوری بازی‌های بهینه‌شده، متفاوت است و بستگی به نحوه‌ی تعامل بازیگرهای مختلف (در این پژوهش محیط‌زیست و اقتصاد) و به میزان تأثیرگذاری در نظر گرفته‌شده برای هر بازیگر دارد. پژوهش‌های دیگر همچون هایپل و عبیدی (۲۰۰۵)، مدنی (۲۰۱۰)، اشنایدر (۲۰۱۷)، سالازار و همکاران (۲۰۰۷) و مفتاح هلقی و همکاران (۱۳۹۹) نتایج مشابهی را در خصوص تفاوت روش‌های برنامه‌ریزی خطی و تئوری بازی‌ها به دست آورده‌اند.

نتایج حاصل از برنامه‌ریزی خطی، نشان می‌دهد سطح زیر کشت محصولاتی که نسبت سود به هزینه کمتری دارند، در الگوی کشت پیشنهادی کاهش می‌یابند. از سوی دیگر سطح زیر کشت پیشنهادی محصولات آب‌بری مانند ذرت علوفه‌ای با وجود مصرف آب زیاد، افزایش یافته است.

نتایج بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی برای بیشترین سود نشان داد که با صرفه‌جویی ۱۷ درصدی در مصرف آب از سال آبی ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۰ فقط چهار درصد از میزان سود نسبت به سال مبنا کاهش می‌یابد.

در این پژوهش همانند پژوهش‌های سالازار و همکاران (۲۰۰۷) و مفتاح هلقی و همکاران (۱۳۹۹) سهم محیط‌زیست و اقتصاد مساوی و برابر ۰/۵ در نظر گرفته شد. نتایج تئوری بازی‌های نشان داد که در این روش، صرفه‌جویی در مصرف آب ۳۱ درصد و کاهش سود ۱۷ درصد نسبت به سال مبنا است.

نتایج شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی نشان داد که افت آب زیرزمینی هیدروگراف دشت و برنامه‌ریزی خطی به ترتیب برابر با ۳/۹۴ و ۲/۰۴ متر بود؛ درحالی‌که در روش تئوری بازی‌ها، تراز آب زیرزمینی نه تنها افتی ندارد بلکه به‌اندازه ۷/۴۵ متر افزایش نیز داشته است.

با در نظر گرفتن پارامترهای اقتصادی و محدودیت‌های زیست‌محیطی منطقه و اهداف موجود بین ذینفعان پارامترهای مذکور در منطقه (افزایش سود حاصل از کشت و همچنین کاهش میزان برداشت آب زیرزمینی)، پیشنهاد می‌شود نسبت به سال مبنی، سطح زیر کشت محصولاتی مانند برنج، سبزی و صیفی و پیاز حدود ۱/۶ برابر افزایش یابد و از سوی دیگر میزان سطح زیر کشت پنبه و جو حدود ۶۰ درصد و سطح زیر کشت گندم حدود ۳۰ درصد کاهش یابد. از جمله دلایل افزایش و کاهش سطح کشت در این محصولات، نسبت سود به هزینه و همچنین میزان مصرف آب آن‌ها است. نکته قابل‌توجه، پیشنهاد افزایش سطح زیر کشت محصول برنج که جزو محصولات آب‌بر است، است. دلیل این امر نیز سودآور بودن این محصول نسبت به سایر محصولات است و علی¬رغم محدودیت منابع آب در هر سال، با توجه به قیمت کم آب کشاورزی، کشاورز تمایل به کاشت این محصول دارد.

تقدیر و تشکر

از دانشگاه بوعلی سینای همدان، سازمان آب منطقه‌ای اصفهان و سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان برای در اختیار گذاشتن امکانات و داده‌های این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافعی وجود ندارد و این موضوع مورد تایید نویسندگان این مقاله است.

فهرست منابع

۱. حمیدرضا نویدی، سعید کتابچی و معصومه مسی بیدگلی، ۱۳۹۹. مدخلی بر نظریه بازی‌ها. انتشارات دانشگاه شاهد.

۲. سازمان تحقیقات کشاورزی اصفهان، ۱۳۹۱. گزارش قیمت‌ها و مصرف نهاده‌ها.

۳. سازمان جهاد کشاورزی استان اصفهان. ،۱۴۰۰. بازنگری، تکمیل و تدوین الگوی کشت بهینه محصولات زراعی و باغی استان اصفهان.

۴. عباسی، فریبرز.، سهراب، فرحناز و عباسی، نادر، ۱۳۹۵. ارزیابی وضعیت راندمان آب آبیاری در ایران. *تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و زهکشی*, ۶۷: ۱۱۳-۱۲۰. **doi:10.22092/aridse.2017.109617**

۵. کلاهی، مهدی.، حسینعلی، فرهاد. و کریمائی طبرستانی، مجتبی.، ۱۴۰۱. تعیین الگوی بهینه کشت با هدف حداقل سازی آب مجازی و حداکثرسازی سود اقتصادی محصولات (مطالعه موردی: دشت عمرانی در خراسان رضوی). *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*, ۱۶(۶): ۱۲۲۱-۱۲۳۲.
doi: 20.1001.1.20087942.1401.16.6.12.9

۶. گزارش بیلان آب منطقه‌ای اصفهان برای سال‌های ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۰ برای دشت کوهپایه‌سگزی سال۱۳۹۴.

۷. مفتاح هلقی مریم, قربانی خلیل, کرامت زاده علی و سالاری جزی میثم, ۲۰۲۱. کاربرد نظریه بازی‌ها در تعیین برداشت بهینه منابع آب و ارائه الگوی کشت بهینه (مطالعه ی موردی: حوضه آبریز قره سو). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، ۱۲۷(۵): ۶۹-۸۷. **doi: 10.22069/jwsc.2020.17430.3290**

8. Ali, P.J.M., Faraj, R.H., Koya, E., Ali, P.J.M. and Faraj, R.H., 2014. Data normalization and standardization: a technical report. Mach Learn Tech Rep, 1(1), pp.1-6.
9. Bozorg-Haddad, O. ed., 2021. *Essential tools for water resources analysis, planning, and management*. Springer.
10. Forouzani, M. and Karami, E., 2011. Agricultural water poverty index and sustainability. *Agronomy for Sustainable Development*, *31*, pp.415-431. **doi:10.1051/agro/2010026**
11. Harsanyi, J.C. and Selten, R., 1972. A generalized Nash solution for two-person bargaining games with incomplete information. *Management science*, *18*(5-part-2), pp.80-106. **doi:10.1287/mnsc.18.5.80**
12. Hipel, K.W. and Obeidi, A., 2005. Trade versus the environment: Strategic settlement from a systems engineering perspective. Systems Engineering, 8(3), pp.211-233. **doi:10.1002/sys.20031**
13. Madani, K., 2010. Game theory and water resources. *Journal of hydrology*, *381*(3-4), pp.225-238. **doi:10.1016/j.jhydrol.2009.11.045**
14. Madani, K., 2014. Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *Journal of environmental studies and sciences*, *4*, pp.315-328. doi:10.1007/s13412-014-0182-z
15. Mays, L.W. and Tung, Y.K., 2002. *Hydrosystems engineering and management*. Water Resources Publication.
16. Mehrpour, M.R., Kheybari, S., Srai, J.S. and Rohani, A., 2024. Integration of strategic and operational attributes to calculate the optimal cultivation of crops. *Expert Systems with Applications*, *236*, p.121238. **doi**:**10.1016/j.eswa.2023.121238**
17. Nazari, S., Ahmadi, A., Rad, S.K. and Ebrahimi, B., 2020. Application of non-cooperative dynamic game theory for groundwater conflict resolution. *Journal of Environmental Management*, *270*, p.110889. **doi**:**10.1016/j.jenvman.2020.110889**
18. Raquel, S., Ferenc, S., Emery Jr, C. and Abraham, R., 2007. Application of game theory for a groundwater conflict in Mexico. *Journal of environmental management*, *84*(4), pp.560-571. **doi**:**10.1016/j.jenvman.2006.07.011**

19. Snyder, L. J. 2017. Stanford Encyclopedia of Philosophy. pp. 1-22.
20. Von Neumann, J. and Morgenstern, O., 1953. *Theory of games and economic behavior: by J. Von Neumann and O. Morgenstern*. Princeton university press.
21. Zeng, Y., Li, J., Cai, Y., Tan, Q. and Dai, C., 2019. A hybrid game theory and mathematical programming model for solving trans-boundary water conflicts. *Journal of Hydrology*, *570*, pp.666-681. **doi**:**10.1016/j.jhydrol.2018.12.053**