

## تخصیص بهینه منابع آب در بخش کشاورزی با کاربرد مدل استاکلبرگ - نش-کورنو و تأکید بر بازار آب (مطالعه موردی: طرح انتقال آب با لوله منطقه سیستان)\*

زهرا غفاری مقدم<sup>۱</sup>، ابراهیم مرادی<sup>۲\*</sup>، محمود هاشمی تبار<sup>۲</sup>، علی سردار شهری<sup>۳</sup>

۱. استادیار گروه اقتصاد کشاورزی، پژوهشکده کشاورزی، پژوهشگاه زابل، زابل، ایران

۲. استادیار اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۳. دانشیار اقتصاد کشاورزی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۰۸/۰۲؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۰/۱۲/۲۰)

### چکیده

از بزرگ‌ترین طرح‌های انتقال آب در کشور، طرح انتقال آب با لوله دشت سیستان است که با اجرای این طرح می‌توان آب اندک را به بهترین روش مدیریت کرد. هدف از این مطالعه، تخصیص بهینه منابع آب در بخش کشاورزی با استفاده از تئوری بازی و تأکید بر بازار آب در منطقه سیستان در سال ۱۳۹۸-۱۳۹۹ برای این طرح است. برای این منظور، از مدل تعادلی استاکلبرگ-نش-کورنو در دو حالت تخصیص عمومی و شرایط وجود بازار آب و برای حل مدل از یک فرایند فراابتکاری که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک پویا و روش برنامه‌ریزی فازی است، استفاده شده است. نتایج مطالعه نشان داد با ایجاد بازار آب در منطقه سود کل سیستم از ۵۸۵۴۸۴ میلیون ریال به ۸۵۹۳۲۲ میلیون ریال افزایش می‌یابد که میزان تغییرات معادل ۳۸۳۷ میلیون ریال است. همچنین، نتایج نشان داد مقدار شاخص برابری با ایجاد بازار کاهش می‌یابد و امکان تخصیص عادلانه آب بین مناطق فراهم می‌شود که میزان این تغییرات ۷/۷ درصد است و با کاهش راندمان آبیاری و استفاده از سیستم‌های سنتی آبیاری در سطح مزرعه، میزان سود کل سیستم کاهش خواهد یافت. بنابراین، شکل‌گیری بازار آب در سطح منطقه سیستان علاوه بر تغییر در میزان آب تخصیصی به محصولات در مناطق مورد مطالعه، سود حاصل از الگوی کشت را تغییر می‌دهد و در حالت کلی، منجر به بهبود وضعیت درآمدی کشاورزان و باعث ایجاد عدالت در تخصیص آب بین مناطق منطقه سیستان می‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** تئوری بازی، استاکلبرگ، بازار آب، طرح انتقال آب با لوله، سیستان.

\* مقاله مستخرج از رساله دکتری است.

\*\* نویسنده مسئول

## مقدمه

آب به عنوان یکی از نهاده‌های مهم تولیدات محصولات کشاورزی جایگاه مهمی در توسعه پایدار بخش کشاورزی و توسعه اقتصادی سایر بخش‌ها دارد [۱]. کمبود آب یکی از مشکلات اصلی بیشتر کشورهای جهان است و تنها راه خروج از این بحران استفاده و تخصیص بهینه و بالا بردن بهره‌وری آب در بخش‌های مختلف به‌خصوص بخش کشاورزی است [۲]. برنامه‌ریزی صحیح منابع آب و تخصیص آب در شرایط بهینه، یکی از مشکلات و مباحث اصلی مدیریت منابع آب به‌خصوص در کشور ایران است [۳]. در ایران در سال‌های اخیر به دلیل وجود تقاضاهای متعدد و گوناگون و نیز وقوع خشکسالی‌ها و محدودیت‌های منابع آب، چالش‌هایی در مدیریت منابع آب و مصارف حوضه ایجاد شده که موجب شده است سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان توجه خاصی به مدیریت جامع حوضه آبریز و تخصیص آب به مصارف گوناگون در سال‌های اخیر داشته باشند [۴]. در سیستم‌های تولید کشاورزی، آب آبیاری نقش مهمی در بهبود عملکرد محصولات به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد، به طوری که منابع آب محدود توسعه کشاورزی را محدود می‌کند و مستقیم منجر به بیابان‌زایی اراضی و نابودی محیط زیست می‌شود [۵]. بنابراین، تضمین عملکرد محصول، کاهش اثرات منفی بر محیط زیست و بهبود کارایی مصرف آب از چالش‌های توسعه پایدار کشاورزی است [۵]. با توجه به اینکه بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب است، ارائه روش‌های جامع مدیریت منابع آب و تهیه سیاست‌های صحیح در این زمینه ضروری و لازم است. با توجه به سهم عظیم آب کشاورزی در کشور، هر فعالیتی برای مدیریت صحیح آن اثربخش خواهد بود که مدل‌سازی و تخصیص بهینه منابع آب از روش‌های مرسوم برای مدیریت منابع آب در این بخش است [۶]. یکی از مسائل موجود در مدیریت آب در بخش کشاورزی، تخصیص بهینه آن بین بخش‌های مختلف تحت آبیاری و توزیع آب بین محصولات زراعی مختلف است [۷]. در مطالعات به سه روش مختلف بازار آب، قیمت حاشیه‌ای و تخصیص عمومی آب برای تخصیص منابع آب اشاره شده است. در این بین، سافینو و همکاران (۲۰۲۰) از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی [۸]، زنگ و همکاران (۲۰۱۶) از برنامه‌ریزی مشترک چندمرحله‌ای بازه‌ای-

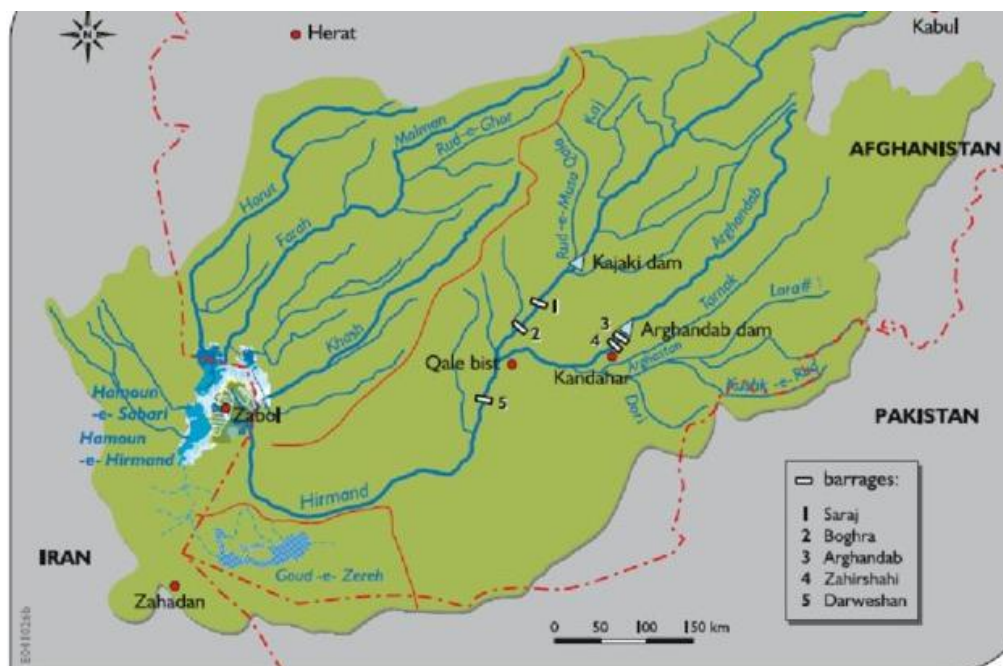
احتمالاتی و روش شبیه‌سازی مونت کارلو [۹]، ایگزینو و همکاران (۲۰۱۹) و یائو و همکاران (۲۰۱۹) از مدل استاکلبرگ نش - کورنو [۷ و ۱۰]، الارکون و ژوانا (۲۰۱۶) از مدل‌های بهینه‌سازی در قالب بازار آب برای تخصیص منابع آب استفاده کردند [۱۱]. که در همه این مطالعات به اثربخشی بازار آب در تخصیص منابع آب اشاره شده است. همچنین، مدل‌های مختلفی در ادبیات برای تخصیص منابع آب معرفی شده‌اند از جمله می‌توان به روش‌های بهینه‌سازی (یو و همکاران، ۲۰۲۰؛ لی و همکاران، ۲۰۲۰؛ الوچ و همکاران، ۲۰۱۹)، روش‌های شبیه‌سازی (ویو و همکاران، ۲۰۱۷؛ امین و همکاران، ۲۰۱۸)، مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی توأم (لی و همکاران، ۲۰۱۹؛ وانگ و همکاران، ۲۰۱۹) و تئوری بازی‌ها (ال وی و همکاران، ۲۰۱۹؛ زنگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ کاسولاپووا و همکاران ۲۰۱۸؛ غفاری مقدم و همکاران، ۱۳۹۱، فیلیپوت و همکاران، ۲۰۱۷) اشاره کرد. در این مطالعه از تئوری بازی‌ها با تأکید بر بازار آب جهت تخصیص منابع آب استفاده شده است. برای این منظور، از مدل استاکلبرگ که یکی از انواع مدل‌های برنامه‌ریزی دوسطحی است، استفاده شده است. تئوری بازی در مطالعه موضوعاتی از جمله مسائل اقتصادی، اجتماعی، تجاری و سیاسی کاربرد زیادی دارد. نظریه بازی تلاش می‌کند تا یک موقعیت استراتژیک را با رفتار ریاضی مدل‌سازی کند. این موقعیت زمانی به وجود می‌آید که موفقیت یک فرد به راهبردهایی که دیگران انتخاب می‌کنند، بستگی داشته باشد. در تئوری بازی‌ها هدف این است که راهبرد بهینه برای ذی‌نفعان به دست آید [۲۴]. این نظریه اولین بار در سال ۱۹۴۴ توسط ون نیومن، ریاضی‌دان مشهور، و مورگنسترن اقتصاددان اتریشی مطرح شد [۲۵]. از جمله مطالعات انجام‌شده در این زمینه می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد: ایگزینو و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهش خود الگوی آبیاری رضایت‌بخشی را برای هر محصول در هر منطقه تحت آبیاری بر مبنای مدل تعادلی کورنو-نش-استاکلبرگ مشخص کردند. هدف آن‌ها در این مطالعه، تخصیص حق‌آبه بین مناطق مختلف تحت آبیاری و توزیع آب بین محصولات مختلف با مجوز معامله حق‌آبه است. نتایج مطالعه بیانگر اثربخشی بازار آب در تخصیص منابع آب است، به طوری که ایجاد بازار آب باعث افزایش سود

### منطقه مطالعه شده

یکی از حوضه‌های مهم آبریز ایران، حوضه آبریز فرامرزی هیرمند است که نقش مهمی در حیات منطقه سیستان دارد. دشت سیستان به دلیل بارندگی بسیار کم (متوسط ۵۰ میلی‌متر در سال) و تبخیر بسیار زیاد (۴ تا ۵ هزار میلی‌متر در سال) دارای آب‌وهوای خشک و فراخشک است [۲۹]. شرایط آب‌وهوایی و وابستگی کامل به رودخانه هیرمند و اقدامات کشور افغانستان در مهار آب رودخانه هیرمند، باعث بروز بحران شدید آبی و تأثیرات منفی در اقتصاد، کشاورزی، اشتغال و محیط زیست این منطقه شده است. برای حل مسئله تخصیص منابع آب در بخش کشاورزی که دارای چندین ذی‌نفع با منافع متضاد است، نیازمند مدلی هستیم که بتواند شرایط آبی منطقه سیستان را مدل‌سازی کند با توجه به مطالعات انجام‌شده، در این مطالعه از مدل تعادلی استاکلبرگ - نش-کورنو<sup>۱</sup> که یک نوع برنامه‌ریزی دوسطحی است، برای تخصیص بهینه هم‌زمان آب بین مناطق تحت آبیاری و محصولات کشاورزی در هر منطقه استفاده می‌شود. همچنین، در این مدل‌سازی بازار آب در قالب یک بازی غیر همکارانه تشکیل می‌شود. در این مطالعه برای حل مسئله از یک الگوریتم فراابتکاری که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک پویا و برنامه‌ریزی فازی است، استفاده کردیم. از آنجا که بخش کشاورزی بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب در منطقه سیستان است، بنابراین استفاده بهینه از آب در این بخش، به میزان قابل توجهی در حفاظت منابع آب و استفاده حداکثری از آب موجود مؤثر است. یکی از طرح‌هایی که امروزه برای مدیریت منابع آب در منطقه سیستان در حال اجرا است، طرح انتقال آب با لوله است. بر اساس برنامه این پروژه، ۴۶ هزار هکتار از گستره ۲۰۰ هزار هکتاری دشت سیستان با تخصیص ۴۰۰ میلیون مترمکعب آب از چاه نیمه‌ها آبیاری می‌شود. بنابراین، در این مطالعه ما به دنبال آن هستیم که این میزان آب موجود در بخش کشاورزی را با استفاده از مدل پیشنهادی بین مناطق پیش‌بینی‌شده در طرح و الگوی کشت منتخب تخصیص دهیم. مدل پیشنهادی برای اولین بار در منطقه سیستان به کار گرفته شده است.

اقتصادی و کاهش نابرابری در تخصیص آب بین مناطق می‌شود [۷]. یائو و همکاران (۲۰۱۹) از مدل استاکلبرگ برای تخصیص بهینه آب تحت سناریوهای مختلف اقلیمی استفاده کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که مدل پیشنهادی آن‌ها می‌تواند یک مکانیسم همکاری واکنش اضطراری بر اساس سناریوهای مختلف آب‌وهوایی برای کشورهای در حال توسعه ایجاد کند که باید با کمبود آب و شرایط نامشخص کنار بیایند [۱۰]. فو و همکاران (۲۰۱۸) منابع آب را در رودخانه فرامرزی بر اساس مدل رهبر- پیرو و نش- هرسنی تخصیص دادند. آن‌ها در مدل پیشنهادی خود از نظریه ورشکستگی برای استخراج نقاط اختلاف و تعیین وزن چانه‌زنی با توجه به اصول عدالت و کارایی استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد فرایند تخصیص منابع آب، محاسبه وزن‌های چانه‌زنی با استفاده از اصول عدالت و کارایی می‌تواند سطوح توسعه اقتصادی را در بین پیروان بهتر منعکس کند که می‌تواند با تخصیص واقعی منابع آب همخوانی بیشتری داشته باشد [۲۶]. سد قمیز و همکاران (۲۰۱۸) از بازی رهبر- پیرو و روش حل چانه‌زنی نش- هرسنی برای حل اختلاف میان استفاده‌کنندگان آب در بخش کشاورزی و تخصیص بهینه آب و سطح زیر کشت در استان گلستان استفاده کردند. هدف رهبر در این مطالعه، حداکثر کردن سود و همچنین سهم آب سبز در تولید کشاورزی از طریق انتخاب الگوی کشت کارا است و هدف پیرو حداکثر کردن سود حاصل از الگوی کشت انتخاب شده است [۲۷]. چن و همکاران (۲۰۱۷) در مطالعه خود به مدیریت منابع آب با استفاده از روش رهبر- پیرو همراه با تقاضای چندگانه آب و محدودیت‌های زیست‌محیطی پرداختند. آن‌ها با استفاده از این مدل به طور هم‌زمان مجموعه‌ای از اهداف پویای رهبر- پیرو که توسط تصمیم‌گیرندگان مختلف طی فرایند بهینه‌سازی ایجاد می‌شود، را دنبال می‌کنند [۲۸]. صفاری و همکاران (۲۰۱۳) از مدل رهبر- پیرو جهت تخصیص منابع آب حوضه زربنده رود استفاده کردند. آن‌ها یک روش جدید برای حل تضاد میان استفاده‌کنندگان مختلف آب و عرضه‌کننده آب با در نظر گرفتن نیاز زیست‌محیطی و دیگر محدودیت‌های سیستم ارائه دادند نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد منافع رهبر در مدل رهبر- پیرو نسبت به چانه‌زنی نش بیشتر است [۲۵].

1. Stackelberg- Nash- Cournot equilibrium



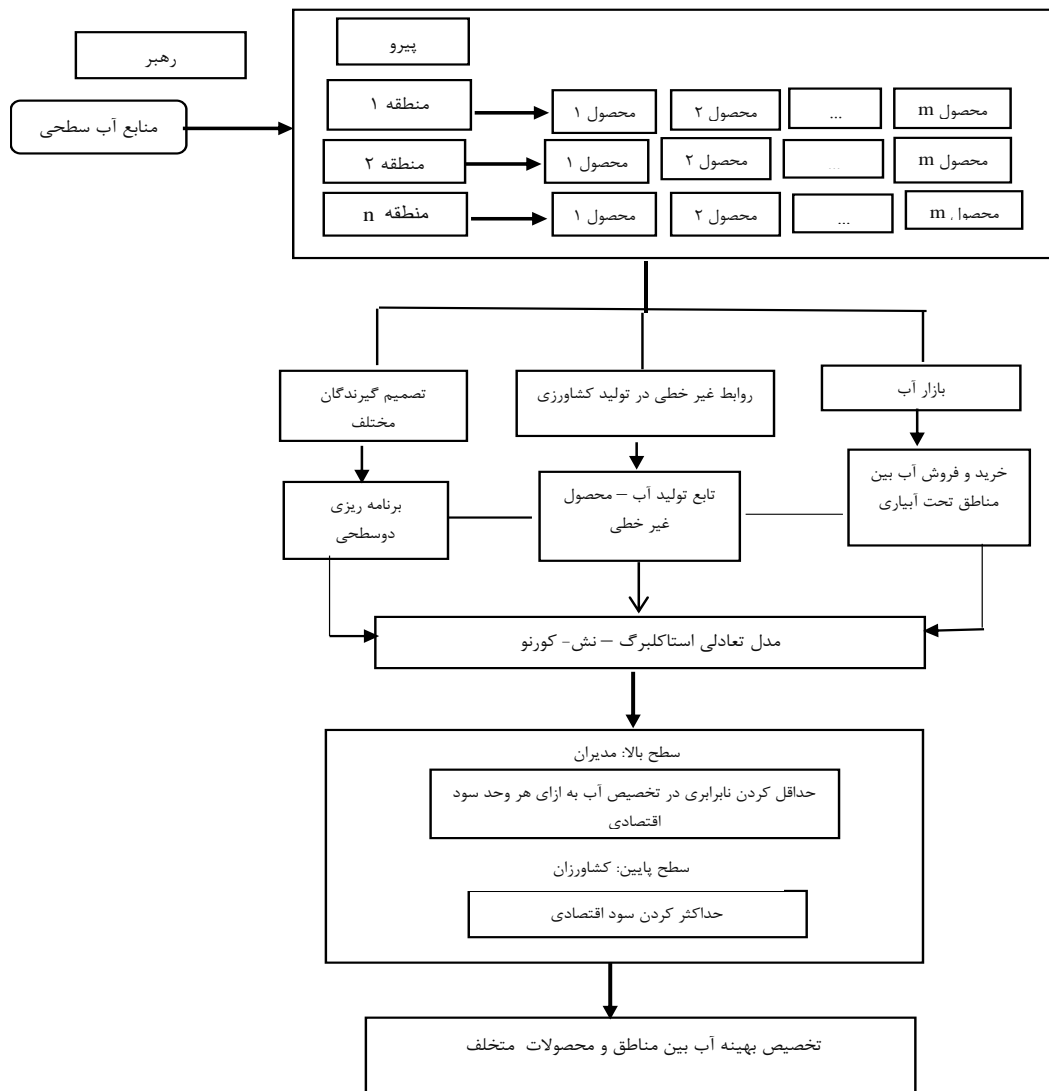
شکل ۱. موقعیت منطقه سیستان و حوضه آبریز هیرمند

می‌شود [۳۳]. رهبر با در نظر گرفتن این موضوع استراتژی را در پیش می‌گیرد که سود خود را حداکثر کند. متداول‌ترین بازی رهبر - پیرو که در این مطالعه نیز به کار گرفته شده، بر اساس یک رهبر و چندین پیرو است [۲۵]. فلوجارت مطالعه حاضر به طور خلاصه در شکل ۲ نشان داده شده است.

کاربرد مدل استاکلیبرگ - نش - کورنو در مدیریت منابع آب در این مطالعه از یک استراتژی بهینه برای تخصیص آب آبیاری در بخش کشاورزی با دنبال کردن مدل تعادلی استاکلیبرگ - نش و نش - کورنو استفاده می‌شود که می‌توان آن را مدل تعادل استاکلیبرگ - نش - کورنو (SNC) نامید. بر مبنای مدل استاکلیبرگ دو نهاد تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده است. تصمیم‌گیرندگان سطح بالا، مدیران محلی که حق‌آبه اولیه را بین نواحی مختلف آبیاری تخصیص می‌دهند که با متغیر تصمیم  $X_i$  نشان داده می‌شود. نهاد دوم تصمیم‌گیرندگان سطح پایین، کشاورزان هستند که آب را بین محصولات کشاورزی توزیع می‌کنند و با  $Y_{ij}$  نشان داده می‌شود، آن‌ها همچنین می‌توانند آب مازاد خود را به مناطق دیگر تحت آبیاری بفروشند و یا آب بیشتر از نیاز خود را از دیگر مناطق خریداری کنند و با  $BSW_i^{\mp}$  نشان داده می‌شود [۷].

## مواد و روش‌ها

یکی از روش‌های نوین در تئوری بازی استفاده از تئوری استاکلیبرگ در تخصیص منابع آب است، این بازی از نوع بازی غیر همکارانه است که در مطالعه حاضر توسعه داده شده است. مدل استاکلیبرگ یک مدل استراتژیک در اقتصاد است که در آن برخی از بازیکنان به عنوان رهبر و برخی نیز به عنوان پیرو در بازی وجود دارند و بازیکنان به طور مدام در حال حرکت در این بازی هستند. در این بازی رهبر اطلاعات کامل‌تری نسبت به پیروها از سیستم دارند، ولی اطلاعاتی نسبت به سایر رهبرها ندارد. همچنین، هر پیرو فقط اطلاعات مربوط به خود را می‌داند و اطلاعاتی در مورد سایر پیروها ندارد. این تئوری توسط اقتصاددان آلمانی فریر فن استاکلیبرگ در سال ۱۹۳۵ با انتشار کتابی با عنوان *ساختار بازار و تعادل* بیان شد [۳۰]. بازی استاکلیبرگ یک نمونه کلاسیک از مسائل بهینه‌سازی دوسطحی هستند که اغلب در تئوری بازی و اقتصاد مشاهده می‌شوند [۳۱]. در بازی رهبر - پیرو تقدم حرکت با رهبر است و رهبر استراتژی خود را انتخاب می‌کنند و پس از آن پیروان بازی با آگاهی از بازی رهبر، به حرکت می‌پردازند و استراتژی خود را به صورت خودخواهانه به صورتی انتخاب می‌کند که سودشان حداکثر شود [۳۲]. بنابراین، تعادل بازی ابتدا با حل تابع هدف پیروها بررسی



شکل ۲. فلوجارت مطالعه حاضر

### تعریف نمادها و متغیرها

$i$ : مناطق تحت آبیاری،  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j$ : نوع محصول در منطقه آبیاری  $i$ ،  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $b_{ij}$ : مقدار سود برای محصول  $j$  در منطقه  $i$  به ازای هر واحد آبی که تخصیص داده می‌شود.  $\gamma$ : قیمت آب که توسط رهبر تعیین می‌شود.  $c_i$ : هزینه آبی که از بازار آب خریداری می‌شود.  $\eta$ : راندمان آبیاری،  $A_{ij}$ : سطح زیر کشتی که اختصاص داده می‌شود، به محصول  $j$  در منطقه  $i$ ،  $A_i$ : سطح زیر کشت در هر منطقه  $i$ ،  $F_{ij}$ : عملکرد محصول  $j$  در هکتار در مناطق  $i$ ،  $a$ ،  $b$  و  $c$  پارامترهای تابع تولید آب،  $ET_j$ : نیاز آبی محصول،  $R_i$ : درآمد خالص،  $X_i$ : میزان حق آبه اولیه هر منطقه  $i$  که توسط تصمیم‌گیرنده سطح بالا (رهبر) تعیین می‌شود.  $Y_{ij}$ : آبی که تخصیص داده می‌شود به هر محصول در منطقه  $i$

که توسط تصمیم‌گیرنده سطح پایین (پیرو) تعیین می‌شود.  $BSW_i^-$ : مقدار آبی که به دیگر نواحی فروخته می‌شود.  $BSW_i^+$ : مقدار آبی که از دیگر نواحی خریداری می‌شود.  $T_i$ : متغیر  $0-1$  که آیا آب فرخته شود یا خیر،  $S$  مقدار آب موجود

### تصمیم‌گیرندگان سطح بالا

بر اساس اصل برابری، مدیران محلی سعی دارند نابرابری در تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی در هر ناحیه را حداقل کنند. به این ترتیب، رهبر تعیین می‌کند چه مقدار حق آبه به هر یک از مناطق آبیاری اختصاص یابد. معادله ۱ برای دستیابی به عدالت تخصیص آب در مناطق آبیاری به عنوان یک تابع هدف پیشنهاد شده است [۷].

۱. دو نوع آب برای توزیع بین محصولات در هر منطقه موجود است: حق آبه‌ای که توسط رهبر اختصاص داده می‌شود و آبی که از بازار آب خرید می‌شود. بنابراین، کل آبی که بین محصولات توزیع می‌شود، نمی‌تواند از آب موجود بیشتر باشد (رابطه ۵) [۷].

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} A_{ij} \leq X_i A_i + \tau_i \cdot BSW_i^+ A_i + (\tau_i - 1) \cdot BSW_i^- A_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

۲. رابطه ۶ محدودیت معامله آب را نشان می‌دهد، به طوری که هر مدیر منطقه هنگام تصمیم‌گیری برای شرکت در تجارت، باید از منافع منطقه خود مراقبت کند. هنگامی که برداشت آب در یک منطقه بیشتر از حق آبه باشد، مدیر نیاز دارد از بازار آب، آب بخرد و به‌عکس. اگر تجارت آب منجر به سود بیشتر از استفاده آن برای آبیاری محصولات زراعی شود، مدیر می‌تواند آب اضافی را در بازار آب بفروشد. بنابراین، اگر میزان آب تخصیص یافته به یک منطقه بیش از نیاز آبی همان منطقه باشد، فروش آب خواهیم داشت و چنانچه میزان آب تخصیص یافته کمتر از نیاز آبی منطقه باشد، خرید آب خواهیم داشت (رابطه ۶).

$$\tau_i = \begin{cases} 0, & X_i \geq \sum_{j=1}^n ET_j A_{ij} \\ 1, & X_i < \sum_{j=1}^n ET_j A_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

۳. رابطه ۷ نشان می‌دهد حجم منابع آبی که به فروش می‌رسد، نباید از مقدار آب موجود در منطقه در همان دوره بیشتر باشد.

$$BSW_i^- A_i \leq X_i A_i - \sum_{j=1}^n Y_{ij} A_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

۴. رابطه ۸ نشان می‌دهد یک منطقه فقط می‌تواند یا خریدار آب باشد و یا فروشنده آب و به طور هم‌زمان نمی‌تواند که خریدار و هم فروشنده آب باشد.

$$BSW_i^- \cdot BSW_i^+ = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

بنابراین، مدل کلی مورد استفاده در مطالعه به صورت رابطه ۹ است:

$$\min E = \sum_{i=1}^m \sum_{i'=2}^m \left| \frac{X_i A_i}{R_i} - \frac{X_{i'} A_{i'}}{R_{i'}} \right| \quad (1)$$

در این رابطه E شاخص برابری و عدالت در تخصیص آب بین مناطق تحت آبیاری است. که مقدار آن بین ۰ و ۱ است. هر چه E به صفر نزدیک‌تر باشد، به این معناست که نواحی مختلف تخصیص آب یکسان به ازای هر واحد اقتصادی به دست می‌آورند و تخصیص آب میان مناطق عادلانه خواهد بود. و هر چه مقدار E به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان می‌دهد یک ناحیه برای تأمین منافع اقتصادی خود، باید آب بیشتری به آن اختصاص داده شود.  $\frac{X_i A_i}{R_i}$  مقدار تخصیص آب به ازای هر واحد سود اقتصادی در هر منطقه آبیاری است.  $R_i$  تابع سود اقتصادی است که توسط رابطه ۲ نشان داده می‌شود:

$$R_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot F_{ij} \cdot A_{ij} - \gamma X_i A_i - c_i BSW_i^- A_i - c_i BSW_i^+ A_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

محدودیت متناظر با تابع هدف تصمیم‌گیرندگان سطح بالا عبارت است از:

کل آب تخصیص یافته به مناطق تحت آبیاری نمی‌تواند از مقدار کل آب موجود در بخش کشاورزی بیشتر باشد که با استفاده از رابطه ۳ نشان داده می‌شود [۷].

$$\sum_{i=1}^m X_i A_i \leq S \quad (3)$$

#### تصمیم‌گیرندگان سطح پایین

تصمیم‌گیرنده سطح پایین کشاورزان هر منطقه هستند که نقش پیرو را دارند و هدف آن‌ها حداکثر کردن سود اقتصادی است. تابع هدف برای سطح پایین به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$\max \sum_{i=1}^m R_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot F_{ij} \cdot A_{ij} - \gamma X_i A_i - c_i BSW_i^- A_i - c_i BSW_i^+ A_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

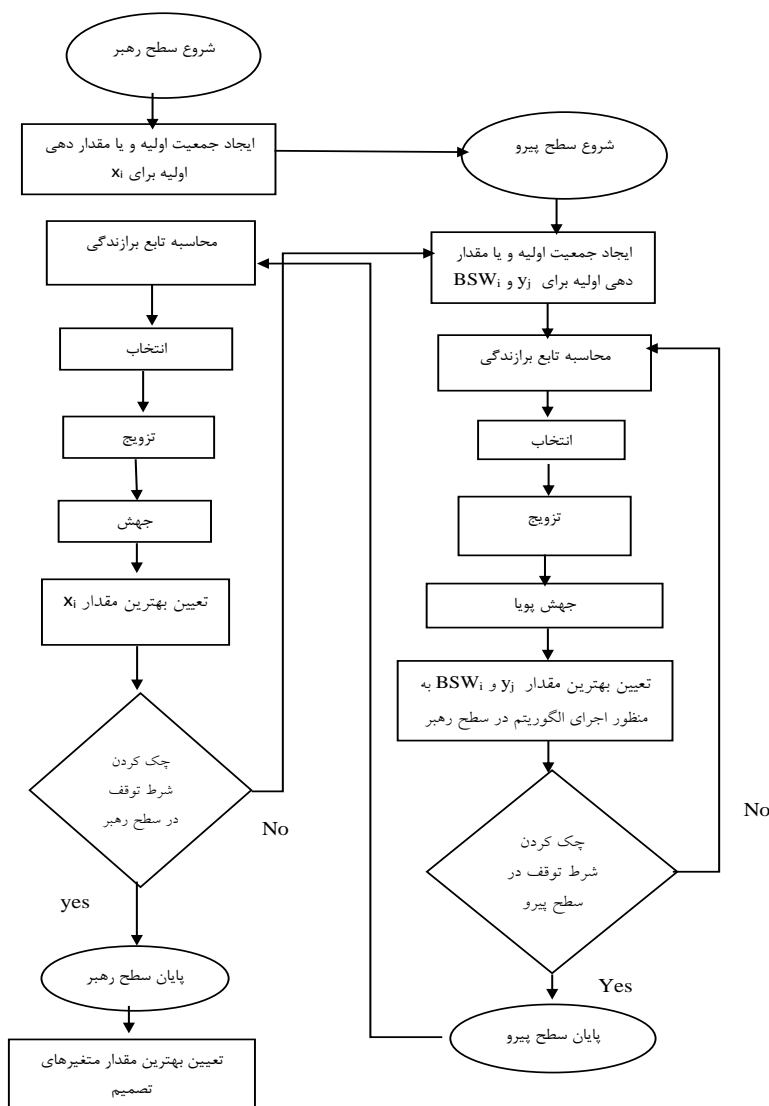
محدودیت‌های متناظر با تابع هدف تصمیم‌گیرندگان سطح پایین عبارتند از:

$$\begin{aligned}
 \min &= \sum_{i=1}^m \sum_{i'=2}^m \left| \frac{X_i A_i}{R_i} - \frac{X_{i'} A_{i'}}{R_{i'}} \right| \\
 &\left\{ \begin{aligned}
 R_i &= \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot F_{ij} A_{ij} - \gamma X_i A_i - c_i BSW_i^- A_i - c_i BSW_i^+ A_i, i = 1, 2, \dots, m \\
 \sum_{i=1}^m X_i A_i &\leq S \\
 \max \sum_{i=1}^m R_i & \\
 \sum_{j=1}^n Y_{ij} A_{ij} &\leq X_i A_i + \tau_i \cdot BSW_i^+ A_i + (\tau_i - 1) \cdot BSW_i^- A_i, i = 1, 2, \dots, m \\
 \tau_i &= \begin{cases} \cdot, X_i \geq \sum_{j=1}^n ET_j A_{ij} \\ \backslash, X_i < \sum_{j=1}^n ET_j A_{ij} \end{cases} \\
 BSW_i^- A_i &\leq X_i A_i - \sum_{j=1}^n Y_{ij} A_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \\
 BSW_i^- \cdot BSW_i^+ &= 0, i = 1, 2, \dots, m \\
 F_{ij} &= a \cdot \left( \eta \sum_{j=1}^n Y_{ij} \right)^\tau + b \cdot \left( \eta \sum_{j=1}^n Y_{ij} \right) + c, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \right. \tag{9}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M^U &= \begin{cases} \cdot, F \geq F_{max} \\ \frac{F_{max} - F}{F_{max} - F_{min}}, F_{min} \leq F \leq F_{max} \\ \backslash, F \leq F_{min} \end{cases} \\
 M^L &= \begin{cases} \cdot, f \leq f_{min} \\ \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}}, f_{min} \leq f \leq f_{max} \\ \backslash, f \geq f_{i, max} \end{cases} \tag{10}
 \end{aligned}$$

در این مطالعه یک الگوریتم ژنتیک جدید برای حل مسئله پیشنهاد شده است که می‌توان آن را الگوریتم ژنتیک پویا نامید که در این الگوریتم عملگر جهش به صورت پویا برای تولید نسل بعدی استفاده می‌شود که با معرفی این الگوریتم جواب‌های بهتری برای مدل حاصل شده است. در این الگوریتم میزان جهش سطح پایین به صورت پویا تغییر می‌کند، به طوری که در تکرارهای بالاتر میزان حداکثر جهش متغیر  $\gamma$  کمتر خواهد شد تا  $\gamma$  مقدار کمتری تغییر کند. این الگوریتم از همگرایی زودرسی که در الگوریتم ژنتیک ساده وجود دارد، جلوگیری می‌کند. در شکل ۳ چارچوب روش الگوریتم ژنتیک برای مدل‌سازی برنامه‌ریزی منابع آب نشان داده شده است.

از آنجا که مدل‌هایی با چندین پیرو و رهبر یک مسئله سخت چندجمله‌ای غیر قطعی و غیر محدب است که امکان بافتن جواب بهینه برای آن مشکل است که در این مطالعه از یک فرایند فراابتکاری برای حل استفاده شده است که ترکیبی از الگوریتم ژنتیک پویا و روش برنامه‌ریزی فازی است [۷]. در مواردی که چندین تابع هدف (متناقض و غیر قابل مقایسه) وجود دارد، جواب بهینه برای یک تابع لزوماً برای سایر توابع بهینه نیست و در اینجا برای اینکه به یک جواب بهینه که همه توابع هدف را بهینه سازد، دست یابیم از روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا مدل پیشنهادی را به دو مدل با یک هدف تبدیل می‌کنیم که هر تابع هدف محدودیت‌های متناظر با خودش را دارد و ماکزیمم و مینیمم هر یک از توابع هدف را به طور مجزا محاسبه می‌کنیم. سپس، توابع عضویت مربوط به هر یک از توابع هدف را با استفاده از روش برنامه‌ریزی آرمانی فازی تشکیل می‌دهیم و توابع عضویت به عنوان تابع برانزندی وارد الگوریتم ژنتیک می‌شود (رابطه ۱۰).



شکل ۳. چارچوب روش الگوریتم ژنتیک برای مدل استاکلبرگ - نش - کورنو

**یافته‌ها**

در طرح انتقال آب با لوله کل دشت سیستان به ۱۶ ناحیهٔ عمرانی تقسیم شده که با سه ایستگاه پمپاژ اصلی و ۱۴ ایستگاه ثانویه و دو خط اصلی، انتقال آب به نواحی عمرانی صورت می‌گیرد. در این شیوه آب به روش کم‌فشار برای هر قطعهٔ کشاورزی با مساحت متوسط یک تا دو هکتار، از مخازن چاه‌نیمه‌های سیستان طبق سهمیه آب تعریف‌شده‌ای به صورت حجم آب قابل ثبت تحویل و توزیع می‌شود [۳۶]. در این طرح آب مورد نیاز از طریق لوله از چاه نیمه‌ها تأمین می‌شود، و ذخیرهٔ آب در چاه نیمه‌ها از طریق آورد رودخانهٔ هیرمند صورت می‌گیرد. به منظور تأمین آب اراضی طرح انتقال آب با لولهٔ دشت

برای محاسبهٔ قیمت آب در بازار، قیمت آب در بازار هر منطقه برابر ارزش سایه‌ای آب در آن منطقه در نظر گرفته شده است. قیمت سایه‌ای برای هر منطقه از محاسبهٔ سود حاصل از مصرف یک واحد آب مازاد بر مقدار تخصیص‌یافته، به دست آمده است. این قیمت معادل ارزشی است که در تابع هدف به ازای افزایش یک واحد آب به دست می‌آید [۳۵]. حجم آب تخصیصی به بخش کشاورزی، سطح زیر کشت محصولات، هزینهٔ تولید و قیمت محصولات از گزارش‌های مربوط به طرح انتقال آب با لوله و داده‌های تجربی مربوط به تابع تولید آب از مؤسسهٔ تحقیقات کشاورزی منطقهٔ سیستان جمع‌آوری شده است.



استفاده می‌شود. در این مطالعه این ۱۶ ناحیه عمرانی و مدیران محلی (سازمان آب و منطقه‌ای که وظیفه تخصیص و تحویل آب را به عهده دارند) به عنوان بازیکنان در نظر گرفته شده‌اند. مقدار سطوح زیر کشت خالص نواحی مختلف عمرانی در طرح انتقال آب با لوله دشت سیستان به شرح جدول ۱ است.

سیستان، آب ذخیره‌شده در مخازن چاه نیمه از طریق سیستم آبیاری در پایاب چاه نیمه‌های ۱ و ۴، وارد کانال خروجی این چاه نیمه‌ها شده و تحویل مدیریت بهره‌برداری از شبکه می‌شود. میزان آب تحویلی سالانه از خروجی چاه نیمه ۱ حدود ۱۵۳ میلیون متر مکعب و از خروجی چاه نیمه ۴ حدود ۲۴۷ میلیون متر مکعب تعیین شده است. که این حجم آب برای آبیاری ۱۶ ناحیه عمرانی

جدول ۱. سطح زیر کشت نواحی مختلف عمرانی تحت بررسی در مطالعه

ردیف	ناحیه عمرانی	وسعت اراضی کشاورزی (هکتار)	سطح زیر کشت پیش‌بینی شده در طرح (هکتار)
۱	هیرمند ۱	۱۱۴۴۹	۲۸۶۰
۲	هیرمند ۲	۱۱۳۳۰	۳۲۰۰
۳	هیرمند ۳	۱۲۷۳۲	۲۸۳۰
۴	هیرمند ۴	۱۲۲۲۵	۳۲۰۰
۵	هامون ۱	۸۰۵۱	۲۹۰۰
۶	هامون ۲	۸۷۶۱	۳۰۰۰
۷	هامون ۳	۷۰۴۰	۲۶۰۰
۸	هامون ۴	۸۹۵۳	۳۶۰۰
۹	نیمروز ۱	۱۰۸۶۱	۲۸۰۰
۱۰	نیمروز ۲	۸۴۳۷	۲۴۰۰
۱۱	نیمروز ۳	۹۲۶۴	۲۷۰۰
۱۲	زابل ۱	۱۰۴۰۲	۴۰۰۰
۱۳	زابل ۲	۶۵۲۳	۲۳۰۰
۱۴	زهک ۱	۴۹۸۵	۱۳۰۰
۱۵	زهک ۲	۵۲۳۶	۲۰۹۰
۱۶	زهک ۳	۱۳۲۶۶	۴۲۲۰
	جمع کل	۱۴۹۵۱۴	۴۶۰۰۰

مأخذ: گزارش‌های طرح انتقال آب با لوله (۱۳۹۹)

به دست آوردن سطح زیر کشت هر یک از محصولات در الگوی کشت پیشنهادی از درصد سطح زیر کشت موجود هر یک از محصولات در منطقه که بر اساس اطلاعات محلی به دست آمده، استفاده شده است. سپس، با استفاده از درصد سطح زیر کشت هر یک از محصولات در شرایط موجود، سطح زیر کشت هر یک از محصولات در الگوی کشت پیشنهادی در ۱۶ ناحیه عمرانی تحت بررسی به دست آمد که نتایج آن در جدول ۲ آورده شده است.

در این جدول ستون سوم مربوط به سطح زیر کشت موجود در هر یک از نواحی است و ستون چهارم سطح زیر کشت پیش‌بینی شده در طرح انتقال آب با لوله دشت سیستان است.

#### الگوی کشت منتخب در طرح انتقال آب با لوله دشت سیستان

از آنجا که اطلاعات مربوط به سطح زیر کشت هر یک از محصولات در طرح انتقال آب با لوله موجود نیست، برای

جدول ۲. سطح زیر کشت هر یک از محصولات در الگوی کشت (هکتار)

جمع کل	انگور	یونجه	هندوانه	خریزه	پیاز	عدس	جو	گندم	
۲۸۶۰	۴۵/۸	۱۰۳	۴۷۷/۶	۶۳۸	۲۰	۲۲/۸	۴۷۲	۱۰۸۱	هیرمند ۱
۳۲۰۰	۵۱	۱۱۵	۵۳۴/۴	۷۱۳/۶	۲۲/۴	۲۵/۶	۵۲۸	۱۲۰۹/۶	هیرمند ۲
۲۸۳۰	۴۵/۳	۱۰۱/۸	۴۷۲/۶	۶۳۱	۱۹/۸	۲۲/۶	۴۶۷	۱۰۶۹/۷	هیرمند ۳
۳۲۰۰	۵۱	۱۱۵	۵۳۴	۷۱۳/۶	۲۲/۴	۲۵/۶	۵۲۸	۱۲۰۹/۶	هیرمند ۴
۲۹۰۰	۴۶	۱۰۴	۴۸۴	۶۴۶/۷	۲۰	۲۳	۴۷۸/۵	۱۰۹۶	هامون ۱
۳۰۰۰	۴۸	۱۰۸	۵۰۱	۶۶۹	۲۱	۲۴	۴۹۵	۱۱۳۴	هامون ۲
۲۶۰۰	۴۱/۶	۹۳/۶	۴۳۴	۵۷۹/۸	۱۸	۲۰/۸	۴۲۹	۹۲۸/۸	هامون ۳
۳۶۰۰	۵۷/۶	۱۲۹/۶	۶۰۱	۸۰۲/۸	۲۵	۲۸/۸	۵۹۴	۱۳۶۰/۸	هامون ۴
۲۸۰۰	۴۴/۸	۱۰۰/۸	۴۶۷/۶	۶۲۴	۱۹/۶	۲۲	۴۶۲	۱۰۵۸	نیمروز ۱
۲۴۰۰	۳۸	۸۶/۴	۴۰۰/۸	۵۳۵	۱۶/۸	۱۹	۳۹۶	۹۰۷	نیمروز ۲
۲۷۰۰	۴۳	۹۷	۴۵۱	۶۰۲	۱۸/۹	۲۱/۶	۴۴۵/۵	۱۰۲۰/۶	نیمروز ۳
۴۰۰۰	۶۴	۱۴۴	۶۶۸	۸۹۲	۲۸	۳۲	۶۶۰	۱۵۱۲	زابل ۱
۲۳۰۰	۳۶/۸	۸۲/۸	۳۸۴	۵۱۳	۱۶	۱۸	۳۷۹/۵	۸۶۹	زابل ۲
۱۳۰۰	۲۱	۴۶/۸	۲۱۷	۲۹۰	۹	۱۰	۲۱۴/۵	۴۹۱	زهک ۱
۲۰۹۰	۳۳	۷۵	۳۴۹	۴۶۶	۱۴/۶	۱۶/۷	۳۴۴/۸	۷۹۰	زهک ۲
۴۲۲۰	۶۷/۵	۱۵۲	۷۰۴/۷	۹۴۱	۲۹/۵	۳۳/۸	۶۹۶	۱۵۹۵	زهک ۳

نظر گرفته شده است. چنانچه در سطح مزرعه از روش‌های آبیاری سنتی مانند غرقابی استفاده شود راندمان مصرف در سطح مزرعه معادل ۵۵ درصد خواهد بود که در این حالت راندمان کل ۵۰ درصد برآورد می‌شود. در این مطالعه راندمان آبیاری ۷۲ درصد در نظر گرفته شده است.

#### نتایج تابع تولید آب

در این قسمت ضرایب مربوط به توابع تولید آب هر یک از محصولات در ۵ شهرستان منطقه سیستم با استفاده از نرم‌افزار استتا به دست آمد که نتایج آن را در جدول ۳ آورده شده است

در این طرح کل آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی ۴۰۰ میلیون متر مکعب است که این آب از طریق مخازن چاه نیمه تأمین می‌شود و از طریق لوله به سر مزارع برای سطح زیر کشت معینی انتقال داده می‌شود. راندمان کل آبیاری شامل ۳ قسمت راندمان انتقال، توزیع و مصرف در مزرعه است، راندمان انتقال و توزیع در پروژه آبیاری دشت سیستان به دلیل استفاده از خط لوله و همچنین تجهیزات تحویل آب معادل ۹۰ درصد برآورد شده است. همچنین، با توجه به روش آبیاری پیشنهادی (تحت فشار) و استفاده از سیستم آبیاری قطره‌ای، راندمان مصرف در مزرعه معادل ۸۰ درصد در نظر گرفته شده است. بنابراین، راندمان کل برای طرح آبیاری دشت سیستان ۷۲ درصد در

جدول ۳. ضرایب تابع تولید آب برای محصولات انتخابی در شهرستان‌های منطقه سیستم

محصولات	زابل - نیمروز - هامون			زهک			هیرمند		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
گندم	-۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۸۷	-۲۷۰	-۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۸۷	-۲۷۰	-۰/۰۰۰۰۴۴	۰/۵۱	-۱۶۳
جو	-۰/۰۰۰۰۵۱	۰/۵۳	-۱۳۲	-۰/۰۰۰۰۵۱	۰/۵۳	-۱۳۲	-۰/۰۰۰۰۵۱	۰/۵۳	-۱۳۲
عدس	-۰/۰۰۰۰۴۸	۰/۴	-۷۵	-۰/۰۰۰۰۴۸	۰/۴	-۷۵	-۰/۰۰۰۰۴۸	۰/۴	-۷۵
پیاز	-۰/۰۰۰۰۳۲	۵/۲۵	-۲۲۷۴	-۰/۰۰۰۰۳۲	۵/۲۵	-۲۲۷۴	-۰/۰۰۰۰۳۲	۵/۲۵	-۲۲۷۴
خریزه	-۰/۰۰۰۰۸۲	۸/۴۱	-۱۸۳۴	-۰/۰۰۰۰۸۲	۸/۴۱	-۱۸۳۴	-۰/۰۰۰۰۴۶	۵/۱۱	-۲۴۰
هندوانه	-۰/۰۰۰۰۴۱	۵	-۱۶۶۴/۶	-۰/۰۰۰۰۱۶	۳/۸۱	-۱۲۶۶	-۰/۰۰۰۰۱۶	۳/۸۲	-۱۲۶۰
یونجه	-۰/۰۰۰۰۴۸	۲/۱۴	-۱۲۶۶	-۰/۰۰۰۰۴۸	۲/۱۴	-۱۲۶۶	-۰/۰۰۰۰۴۸	۲/۱۴	-۱۲۶۶
انگور	-۰/۰۰۰۰۴۷	۱/۲	-۶۸۱	-۰/۰۰۰۰۴۷	۱/۲	-۶۸۱	-۰/۰۰۰۰۴۷	۱/۲	-۶۸۱

نتایج تخصیص عمومی آب

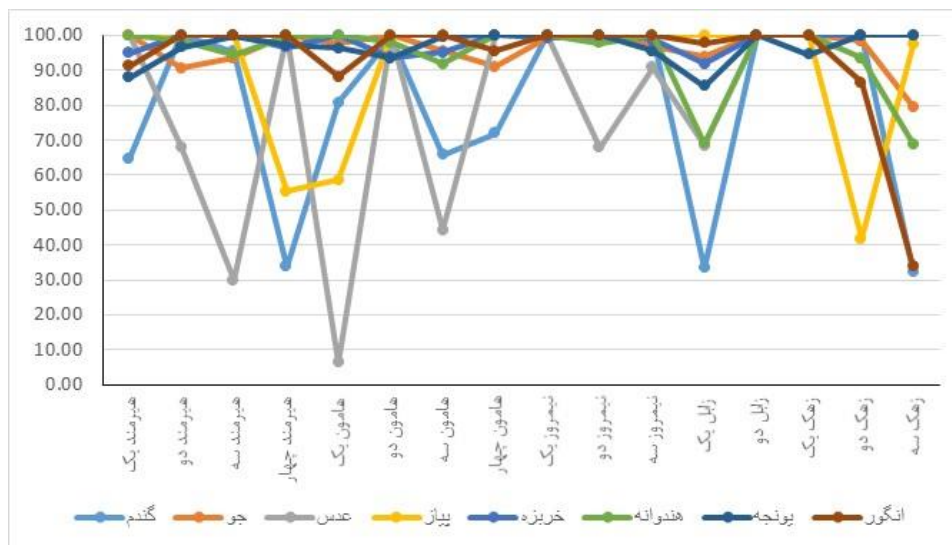
در حالت تخصیص عمومی آب بدون ایجاد بازار آب، آب بخش کشاورزی بین مناطق تحت بررسی و محصولات الگوی کشت پیشنهادی با استفاده از مدل سازی این مطالعه به صورت بهینه تخصیص داده شد. نتایج با استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون 3.10 و محیط برنامه نویسی Visual Studio Code برای ۱۶ ناحیه عمرانی و ۸ محصول در منطقه سیستان به دست آمد (جدول ۴). از کل حجم آب تخصیص یافته به بخش کشاورزی بیشترین مقدار آب به ناحیه عمرانی هامون ۴ و کمترین آب به ناحیه عمرانی زهک ۱ اختصاص داده شده است. از آب تخصیص داده شده بین محصولات در هر منطقه، بیشترین آب به محصول خربزه و هندوانه و کمترین آب به محصول عدس تخصیص داده شده است.

در نمودار ۱ نیاز آبی تأمین شده محصولات منتخب در الگوی کشت در طرح انتقال آب با لوله برای راندمان آبیاری ۷۲ درصد در تخصیص عمومی ارائه شده است. نتایج نشان می دهد در بیشتر محصولات در بیشتر مناطق

نیاز آبی آن ها به طور کامل رفع شده است. فقط برای محصول گندم و جو در بیشتر مناطق نیاز آبی آن ها به طور کامل رفع نشده است و این نشان می دهد آب کمی به این محصولات با توجه به سطح زیر کشت آن ها تخصیص یافته است که این به دلیل پایین بودن بازدهی نسبت به آب برای این دو محصول و همچنین، نیاز زیاد آبی این محصولات است. برای محصول پیاز در بیشتر مناطق نیاز آبی آن رفع شده است به جز در دو ناحیه عمرانی هیرمند ۴ و هامون ۱ که فقط نیمی از نیاز آبی پیاز در این دو منطقه رفع شده است و حدود ۴۰ درصد کمبود آب دارند. در محصول خربزه و هندوانه بیش از ۹۰ درصد نیاز آبی آن رفع شده است. در محصول یونجه و انگور در بیشتر مناطق بیشتر از ۸۰ درصد نیاز آبی آن ها رفع شده است. بنابراین، به کارگیری مدل پیشنهادی برای تخصیص آب در طرح انتقال آب با لوله و الگوی کشت پیشنهادی، چنانچه در سطح مزرعه از آبیاری تحت فشار استفاده شود به بیشتر محصولات در بیشتر مناطق به طور کامل آب اختصاص داده می شود و سیستم به حداکثر سود خود خواهد رسید.

جدول ۴. تخصیص عمومی آب بین مناطق و محصولات الگوی کشت (هزار متر مکعب)

مناطق	مقدار آب تخصیص یافته به محصولات زراعی در هر یک از مناطق								
	تخصیص یافته به هر منطقه	گندم	جو	عدس	پیاز	خربزه	هندوانه	بونجه	انگور
هیرمند ۱	۲۱۵۰۴	۵۲۰۶	۳۲۷۷/۱	۱۰۹/۳	۲۰۸/۳	۴۳۷۶/۲۴	۴۸۶۲/۴۴	۲۸۲۳/۵	۶۳۷/۲
هیرمند ۲	۲۷۴۲۳/۲۴	۹۰۰۰	۳۳۲۴/۳۴	۸۳/۱۳	۲۳۳	۵۱۵۳/۸	۵۳۵۶/۱۳	۳۴۶۸/۵	۷۸۰/۲
هیرمند ۳	۲۳۸۳۵/۷	۷۵۹۴	۳۰۲۸/۵	۳۲/۴۵	۲۰۶/۱	۴۵۵۸	۴۵۵۱/۲	۳۱۷۰/۶	۶۹۱/۸
هیرمند ۴	۲۱۶۶۰/۲	۳۰۴۶	۳۶۶۶/۷	۱۲۲/۳	۱۲۸/۸	۴۹۸۰/۸	۵۴۳۲	۳۴۹۰/۳	۷۸۲/۲
هامون ۱	۲۳۳۳۸	۶۵۸۴/۵	۳۲۴۳	۷/۱	۱۲۳/۷	۴۶۷۰/۶	۴۹۲۹/۴	۳۱۳۸	۶۲۵/۲۲
هامون ۲	۲۵۵۶۶/۱۵	۸۳۹۱/۷	۳۴۳۷/۵	۱۱۴/۷	۲۱۸/۴۵	۴۵۲۷/۹	۴۹۹۹/۸	۳۱۴۵/۸	۷۳۳/۳
هامون ۳	۱۹۵۰۱/۶	۴۸۰۹/۷	۲۸۴۸/۳۴	۴۴/۰۵	۱۸۹/۳	۳۹۸۱	۴۰۵۶/۲۵	۲۹۰۷/۷۵	۶۳۵/۵
هامون ۴	۲۸۲۴۰/۲۵	۷۲۸۲/۴۲	۳۷۵۱/۲	۱۳۷/۶	۲۶۲/۱۵	۵۷۹۸	۶۱۲۰/۵	۴۰۳۹/۲	۸۴۰/۷
نیمروز ۱	۲۴۳۹۳/۴	۷۸۷۹/۲	۳۱۸۱/۸	۱۰۷	۲۰۴	۴۴۷۰/۳	۴۷۶۰/۴	۳۱۴۱/۶	۶۸۴/۴
نیمروز ۲	۲۰۸۵۱	۶۰۸/۸	۲۷۵۰	۶۲/۱۸	۱۷۴/۸	۳۸۶۵/۳	۳۹۹۱/۳	۲۶۹۲/۸	۵۸۶/۷
نیمروز ۳	۲۳۲۸۳/۴	۷۵۶۱/۸	۲۹۹۴/۲۳	۹۳/۸	۱۹۶/۶	۴۲۹۶/۵۶	۴۵۹۰/۴	۲۸۹۶/۶	۶۶۰
زابل ۱	۲۳۸۶۹/۲۳	۳۷۶۴/۲	۴۳۰۶/۲	۱۰۴/۶	۲۹۱/۳	۵۹۲۱/۵۶	۴۶۹۹/۴	۳۸۳۷/۲۳	۹۵۵/۸
زابل ۲	۲۰۱۴۳/۴	۶۴۷۲/۲	۲۶۳۵/۴	۸۸	۱۶۷/۵	۳۷۰۴/۳	۳۹۱۰/۳۵	۲۵۸۰/۶	۵۶۲/۲
زهک ۱	۱۱۲۹۳	۳۶۵۸/۲	۱۴۸۹/۶	۴۹/۷	۹۴/۷	۲۰۹۳/۷	۲۲۱۰/۲	۱۳۷۸/۲۶	۳۱۷/۸
زهک ۲	۱۷۸۸۰/۳	۵۸۸۱/۳	۲۳۵۸/۲	۸۰	۶۳/۷۴	۳۳۶۶/۱	۳۳۲۱/۱۳	۲۳۴۵	۴۴۱/۸
زهک ۳	۲۵۰۲۳	۳۸۴۵	۳۸۵۰/۱۳	۱۶۱/۳	۲۹۹/۵	۶۷۹۶/۵	۴۹۴۲/۲۲	۴۷۳۴/۸	۳۴۸/۶



نمودار ۱. نیاز آبی تأمین‌شده محصولات منتخب در الگوی کشت در تخصیص عمومی آب (درصد)

است. در جدول ۵ میزان تخصیص آب بین مناطق و محصولات الگوی کشت در شرایط وجود بازار ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین و کمترین آب به ترتیب به نيمروز ۲ و هامون ۱ اختصاص داده شده است. از آب تخصیص‌داده‌شده بین محصولات در هر منطقه کمترین آب متعلق به عدس و بیشترین آب متعلق به خربزه و هندوانه است.

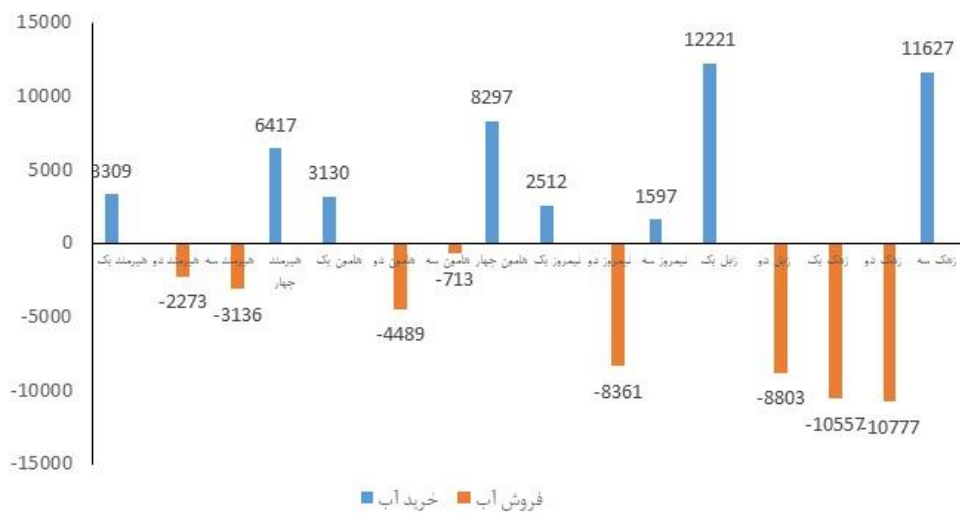
نتایج میزان آب تخصیصی با تأکید بر بازار آب در این مطالعه قیمت آب در بازار معادل قیمت سایه‌ای آب در نظر گرفته شده است. قیمت سایه‌ای آب در هر منطقه، از افزایش سود حاصل از یک واحد آب مازاد بر مقدار تخصیص‌یافته، به دست آمده است. متوسط ارزش سایه‌ای آب برای سناریوی راندمان آبیاری ۷۲ درصد ۱۴۱ به دست آمده

جدول ۵. میزان تخصیص آب بین مناطق و محصولات زراعی در شرایط وجود بازار آب (هزار متر مکعب)

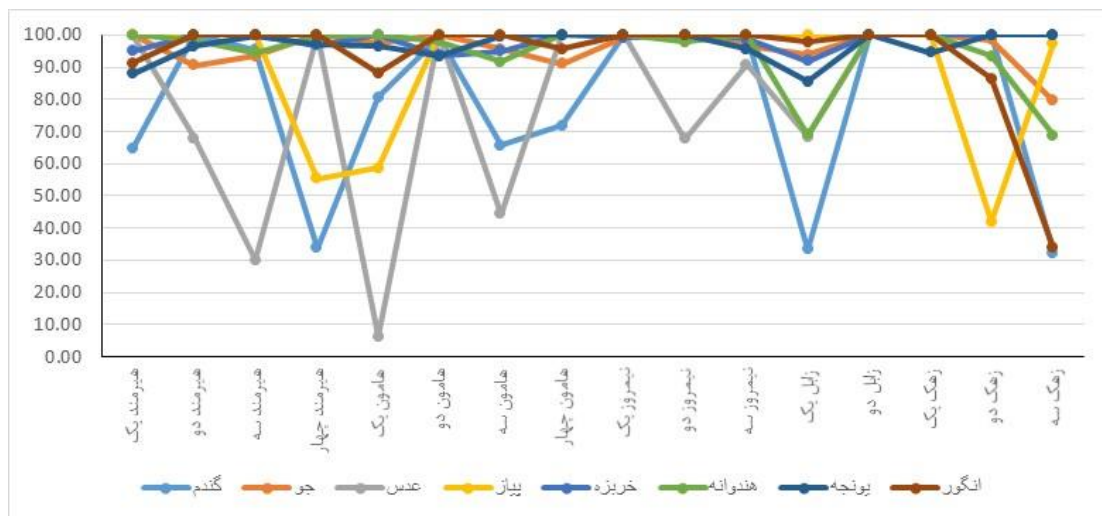
مناطق	تخصیص‌یافته به هر منطقه	مقدار آب	گندم	جو	عدس	پیاز	خربزه	هندوانه	بونجه	انگور
هیرمند ۱	۲۰۸۸۶	۷۲۳۸/۹	۳۲۷۷/۱	۱۰۹/۳	۴۱۹۸	۴۶۰۶/۲	۴۸۶۲/۴	۳۲۰۴	۶۹۹	
هیرمند ۲	۲۶۸۸۹	۵۸۹۴/۸۱	۳۶۶۶/۷	۴۱/۲	۲۳۳	۵۱۵۳/۸	۵۴۴۰/۵	۳۵۱۲/۱	۶۷۲/۷	
هیرمند ۳	۲۷۶۱۷/۳	۷۷۸۴	۳۲۴۲/۷۱	۱۴/۴	۲۰۶	۴۵۵۵/۶	۴۸۱۱/۴	۳۱۷۵/۳	۶۹۱/۸	
هیرمند ۴	۲۱۱۱۲/۷	۹۰۰۵	۳۴۶۸/۶	۱۲۲/۳	۲۳۳	۵۱۵۳/۸	۵۴۴۰/۵	۳۳۲۴/۷	۷۸۲	
هامون ۱	۱۹۶۳۰	۶۰۰۹/۴۵	۳۳۲۳	۱۱۰/۸	۲۱۱/۲	۴۵۵۴	۴۵۸۸/۵	۳۲۵۳/۸	۷۰۹	
هامون ۲	۲۹۲۳۳	۷۳۹۵/۴۶	۳۳۵۷/۴	۱۱۴/۷	۲۱۸/۴۶	۴۷۲۴	۴۸۳۵	۳۳۶۶	۷۳۳	
هامون ۳	۲۲۲۲۷	۷۳۱۶/۴	۲۶۳۴/۵	۷۲/۶۵	۱۸۹/۳	۴۰۹۱	۳۷۴۵/۸	۲۸۲۸/۷	۶۳۵/۵	
هامون ۴	۲۲۵۵۱/۳	۱۰۱۳۰/۴	۴۱۲۵	۱۳۷/۶	۲۶۲	۵۶۸۰/۸	۵۸۲۸	۳۸۱۹	۸۶۵	
نیمروز ۱	۲۱۱۷۲/۸	۷۸۷۹	۳۱۱۰/۲	۱۰۷	۲۰۴	۴۴۴۰	۴۱۷۲	۳۱۴۱/۷	۶۳۰/۴	
نیمروز ۲	۲۸۶۷۸/۷	۶۷۳۰	۲۷۱۰	۹۱/۷	۱۷۴/۸	۳۸۶۵	۳۴۶۶	۲۶۹۲/۸	۵۸۶/۷	
نیمروز ۳	۲۰۸۹۲/۲	۷۵۹۷/۸	۲۶۳۴	۱۰۳	۱۹۶/۶	۴۱۵۲	۴۱۱۵/۷	۳۰۲۹/۴	۶۶۰	
زابل ۱	۲۲۱۷۸/۳۵	۱۱۲۵۶	۴۵۲۶/۶	۱۵۳	۲۹۱/۳	۶۴۴۲	۶۲۸۶/۵	۴۴۶۷/۳۵	۹۷۶/۱	
زابل ۲	۲۷۸۹۵/۶	۶۱۱۹/۳	۲۶۳۵/۴۲	۳۳/۶	۱۶۷/۵	۳۶۶۲	۳۳۳۱/۷	۲۵۸۰/۶	۵۶۲	
زهک ۱	۲۱۳۶۵	۳۶۵۸	۱۱۱۵/۸	۴۹/۷	۹۴/۷	۲۰۹۳/۷	۲۲۱۰/۲	۱۲۶۷/۵۵	۳۱۷/۸	
زهک ۲	۲۸۶۳۵/۱	۵۴۵۶	۲۳۹۴/۸	۸۰	۱۵۲/۲	۳۳۶۶/۱	۳۵۵۳/۳۲	۲۳۴۵	۵۱۱	
زهک ۳	۲۱۱۶۹/۱۴	۸۰۵۶	۴۶۲۵	۱۶۱/۳	۳۰۷/۳	۶۷۶۸/۵	۷۱۷۴/۶	۴۶۷۱/۵	۱۰۳۱/۵	

داده شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورت وجود بازار و امکان مبادله آب بین مناطق نیاز اکثر محصولات در بیشتر مناطق تأمین می‌شود. برای محصول پیاز در همه مناطق به جز هیرمند یک نیاز آبی به طور کامل رفع شده است. برای خربزه بیش از ۹۵ درصد و برای هندوانه بیشتر از ۸۵ درصد نیاز آن‌ها رفع شده است. برای محصول یونجه در اکثر مناطق نیاز تأمین شده آن ۱۰۰ درصد است و کمترین درصد نیاز تأمین شده متعلق به ناحیه عمرانی زهک ۱ و حدود ۸۴ درصد است. برای محصول انگور نیز به جز در نواحی عمرانی هیرمند ۲، نیمروز ۱ و هامون ۴ در بیشتر مناطق نیاز آن به طور کامل رفع شده است.

نمودار ۲ حجم آب مبادله شده بین مناطق تحت بررسی را نشان می‌دهد. حجم آب مبادله شده معادل ۴۹۱۰۹ هزار متر مکعب است که هیرمند ۱ و ۴، هامون ۱ و ۴، نیمروز ۱، زابل ۱ و زهک ۳ خریدار و دیگر مناطق فروشنده آب بودند و ترجیح می‌دهند به جای استفاده مستقیم آب در سطح مزارع، این مقدار آب را به سایر مناطق بفروشند و از این طریق سود بیشتری کسب کنند. در بین این مناطق بیشترین آب را زابل ۱ و کمترین آب توسط نیمروز ۳ خریداری شده است. همچنین، بیشترین فروش و کمترین فروش آب را به ترتیب زهک ۲ و هامون ۳ داشته‌اند. در نمودار ۳ نیاز آبی تأمین شده محصولات منتخب در الگوی کشت در شرایطی که بازار وجود داشته باشد، نشان



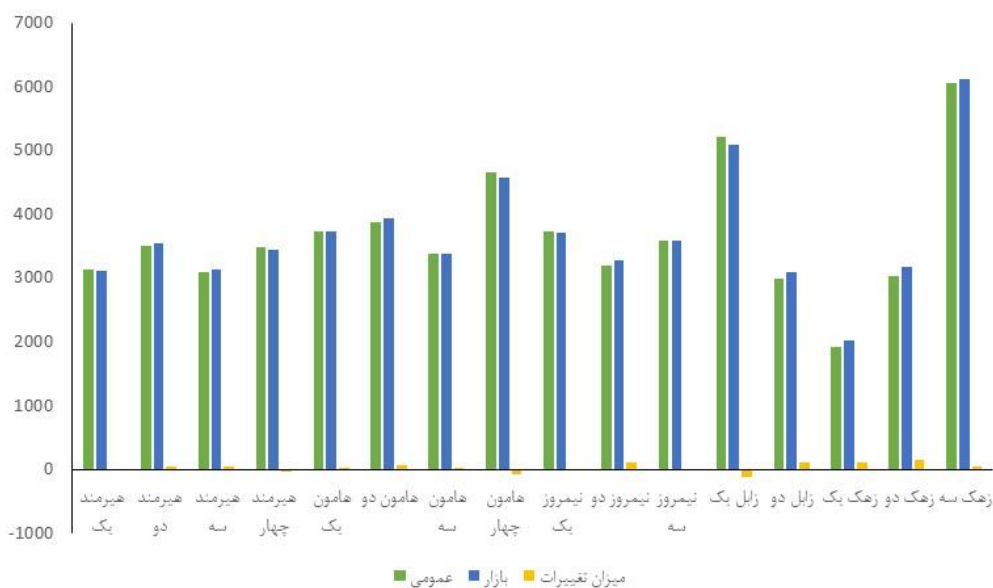
نمودار ۲. میزان مبادله آب بین مناطق تحت بررسی (هزار متر مکعب)



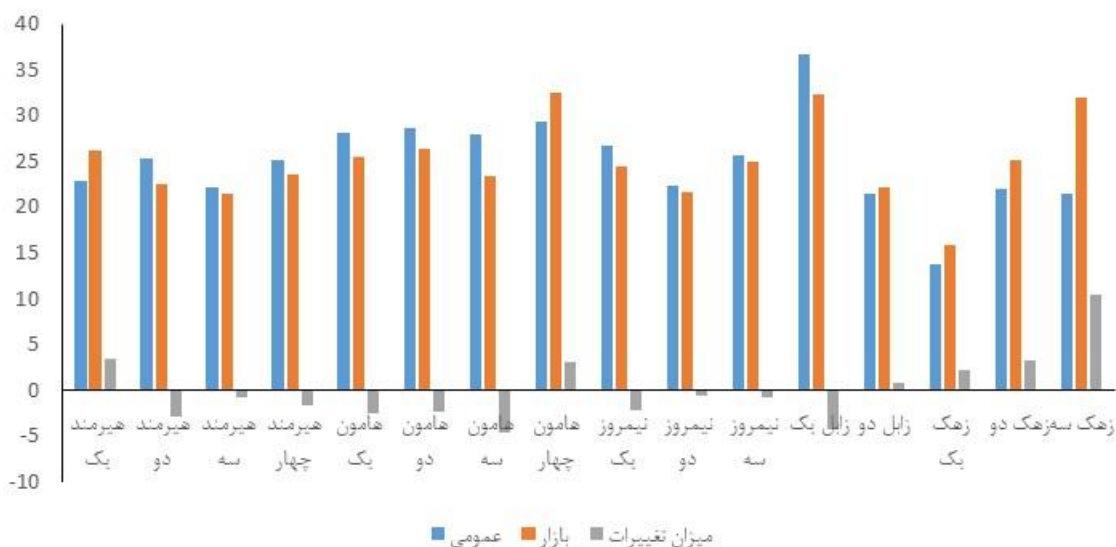
نمودار ۳. نیاز آبی تأمین شده محصولات منتخب در الگوی کشت در شرایط بازار (درصد)

عمومی و بازار آب نشان می‌دهد. با توجه به نمودار میزان حق آبه مناطق هیرمند ۳، هامون ۲، هامون ۳، نیمروز ۲، زابل ۲، زهک ۱ و زهک ۲ در شرایط وجود بازار بیشتر از تخصیص عمومی آب است. و برای دیگر مناطق حق آبه آن‌ها در شرایط تخصیص عمومی بیشتر از بازار است. جدول ۶ مقایسه سود کل به دست آمده و شاخص برابری حاصل از تخصیص آب در شرایط تخصیص عمومی و وجود بازار در راندمان آبیاری ۷۲ درصد و ۵۰ درصد نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج در دو حالت تخصیص عمومی و ایجاد بازار نمودار ۴ مقایسه سود هر منطقه در شرایط تخصیص عمومی و بازار آب را نشان می‌دهد. نتایج نمودار نشان می‌دهد میزان سود برای بیشتر مناطق در صورتی که بازار آب وجود داشته باشد، افزایش می‌یابد و فقط برای مناطق هیرمند ۱ و ۴، هامون ۴، نیمروز ۱ و ۳، زابل ۱، مقدار سود در شرایط وجود بازار مقدار بسیار کمی کاهش نسبت به تخصیص عمومی داشته است. نمودار ۵ مقایسه حق آبه هر منطقه در شرایط تخصیص



نمودار ۴. مقایسه سود هر منطقه در شرایط تخصیص عمومی و بازار آب (میلیون ریال)



نمودار ۵. مقایسه حق آبه هر منطقه در شرایط تخصیص عمومی و بازار آب (میلیون متر مکعب)

جدول ۶. مقایسه مقادیر شاخص E و سود اقتصادی

راندمان آبیاری	متغیر تصمیم	عمومی	بازار	میزان تغییرات (ده میلیون ریال)	درصد تغییرات
۷۲٪	سود اقتصادی کل (ده میلیون ریال)	۵۸۵۴۸۵	۵۸۹۳۲۲	۳۸۳۷	۰/۶۵
۵۰٪	سود اقتصادی کل (ده میلیون ریال)	۴۰۰۴۴۷	۴۰۲۶۷۴	۲۲۲۶	۰/۵۶
۷۲٪	شاخص E	۰/۰۱۳	۰/۰۱۲	-۰/۰۰۱	-۷/۷
۵۰٪	شاخص E	۰/۰۱۴۵	۰/۰۱۴	-۰/۰۰۰۵	-۳/۴۵

نتایج جدول ۸ نشان می‌دهد با ایجاد بازار و مبادله آب بین مناطق، سود کل سیستم در راندمان آبیاری ۷۲ درصد از ۵۸۵۴۸۵ به ۵۸۹۳۲۲ میلیون ریال افزایش می‌یابد که میزان تغییرات سود معادل ۳۸۳۷/۵ میلیون ریال خواهد بود. با کاهش راندمان آبیاری و استفاده از روش‌های سنتی آبیاری میزان سود در شرایط وجود بازار و نبود بازار به ترتیب به ۴۰۰۴۴۷ و ۴۰۲۶۷۴ میلیون ریال کاهش خواهد یافت. مقدار شاخص E در هر دو راندمان آبیاری، در شرایطی که بازار ایجاد شود کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد با ایجاد بازار، آب به طور عادلانه‌تری بین مناطق تخصیص می‌یابد.

#### بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه یکی از طرح‌های بزرگ انتقال آب در کشور طرح انتقال آب با لوله دشت سیستان است که با اجرای این طرح می‌توان آب اندک را به بهترین روش مدیریت کرد. بنابراین، در این مطالعه با استفاده از مدل پیشنهادی تخصیص بهینه آب بین مناطق و محصولات منتخب انجام شد. این مدل نه تنها تعادل بین مدیران و کشاورزان را مورد توجه قرار می‌دهد، بلکه مبادله آب بین مناطق نیز در این مدل در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان داد در تخصیص عمومی مقدار سود کل سیستم به حداکثر مقدار خود که معادل ۵۸۵۴۸۵ میلیون ریال است، رسیده است و بخش زیادی از نیاز آبی محصولات در مناطق مختلف به طور کامل تأمین می‌شود و چنانچه بازار آب تشکیل شود، مقدار سود کل سیستم به ۵۸۹۳۲۲ میلیون ریال افزایش یافته که میزان تغییرات معادل ۳۸۳۷/۵ میلیون ریال است. همچنین، تعداد محصولاتی که در مناطق مختلف نیاز آبی آن‌ها به طور کامل تأمین می‌شود، افزایش می‌یابد. چنانچه در این طرح از آبیاری سنتی در سطح مزرعه استفاده شود، راندمان کل آبیاری به ۵۰ درصد کاهش می‌یابد که در این حالت سود سیستم در شرایط بدون بازار ۴۰۰۴۴۷/۷ میلیون ریال خواهد

بود و با ایجاد بازار و مبادله آب بین مناطق سود سیستم به ۴۰۲۶۷/۴ میلیون ریال افزایش خواهد یافت. در شرایط بدون بازار مقدار آبی که به محصول گندم و جو اختصاص داده می‌شود، کاهش می‌یابد و بیشترین آب به محصول پیاز، خربزه و انگور تخصیص داده می‌شود. با توجه به نتایج حاصل از تخصیص آب بین مناطق و محصولات کشاورزی پیشنهاد می‌شود، محصولات کم‌بازده مانند گندم و جو از الگوی کشت حذف شده و جایگزین آن‌ها محصولاتی با بازدهی زیاد نظیر پیاز، خربزه و یونجه باشد. شکل‌گیری بازار آب منطقه‌ای در سطح منطقه سیستان علاوه بر تغییر در میزان آب تخصیصی به محصولات در مناطق مورد مطالعه، سود حاصل از الگوی کشت را تغییر می‌دهد و در حالت کلی منجر به بهبود وضعیت درآمدی کشاورزان و باعث ایجاد عدالت در تخصیص آب بین مناطق تحت بررسی می‌شود. با توجه به نقش حمایتی و سازنده بازارهای آب محلی و منطقه‌ای، مهیا شدن زمینه و شرایط لازم برای برقراری و استفاده بهینه از مکانیسم این نوع نهادها نه تنها در سطح منطقه سیستان، بلکه در سایر مناطقی از کشور نیز که دارای منابع آبی مشترک و قابلیت داد و ستد آب آبیاری هستند، پیشنهاد می‌شود.

#### منابع

- [1]. Chizari A, Sharzei GH, Keramatzade A. Determination of water economic value with goal programming approach: case study, Barzu Shirvan dam. Journal of Economic Research. 2005;71:39-66.
- [2]. Keramatzadeh A, Chizari AH, Mirzaei A. Determining the economic value of irrigation water through: Optimal cropping pattern for integrated farm and horticulture. 2006; 35-60
- [3]. Muttiah RS, Wurbs RA. Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. Water International. 2002 Sep 1;27(3):407-19.

- [4]. SardarShahraki A. Optimal Allocation of Water Resources of Hirmand Basin by Application of Game Theory and Evaluating the Managerial Scenarios. PhD Thesis in agricultural economic university of Sistan and Baluchestan. 2016. (in Persian)
- [5]. Zhang Z, Lei X, Tian Y, Wang L, Wang H, Su K. Optimized scheduling of cascade pumping stations in open-channel water transfer systems based on station skipping. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2019 Jul 1;145(7):05019011.
- [6]. Paymozd S, Morid S, MOGHADASI M. Comparison of non-linear optimization and a system dynamics approaches for agricultural water allocation (A case study: Zayande Rud Basin). (in Persian)
- [7]. Xu Z, Yao L, Zhou X, Moudi M, Zhang L. Optimal irrigation for sustainable development considering water rights transaction: A Stackelberg-Nash-Cournot equilibrium model. *Journal of Hydrology*. 2019 Aug 1;575:628-37.
- [8]. Sapino F, Pérez-Blanco CD, Gutiérrez-Martín C, Frontuto V. An ensemble experiment of mathematical programming models to assess socio-economic effects of agricultural water pricing reform in the Piedmont Region, Italy. *Journal of Environmental Management*. 2020 Aug 1;267:110645.
- [9]. Zeng XT, Li YP, Huang GH, Liu J. Modeling water trading under uncertainty for supporting water resources management in an arid region. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2016 Feb 1;142(2):04015058.
- [10]. Yao L, Xu Z, Chen X. Sustainable water allocation strategies under various climate scenarios: A case study in China. *Journal of Hydrology*. 2019 Jul 1;574:529-43.
- [11]. Alarcón J, Juana L. The water markets as effective tools of managing water shortages in an irrigation district. *Water resources management*. 2016 Jun 1;30(8):2611-25.
- [12]. Yue Q, Zhang F, Zhang C, Zhu H, Tang Y, Guo P. A full fuzzy-interval credibility-constrained nonlinear programming approach for irrigation water allocation under uncertainty. *Agricultural Water Management*. 2020 Mar 1;230:105961.
- [13]. Li M, Xu Y, Fu Q, Singh VP, Liu D, Li T. Efficient irrigation water allocation and its impact on agricultural sustainability and water scarcity under uncertainty. *Journal of Hydrology*. 2020 Jul 1;586:124888.
- [14]. Elleuch MA, Anane M, Euch J, Frikha A. Hybrid fuzzy multi-criteria decision making to solve the irrigation water allocation problem in the Tunisian case. *Agricultural systems*. 2019 Nov 1;176:102644.
- [15]. Wu RS, Liu JS, Chang SY, Hussain F. Modeling of mixed crop field water demand and a smart irrigation system. *Water*. 2017 Nov;9(11):885.
- [16]. Asghar A, Iqbal J, Amin A, Ribbe L. Integrated hydrological modeling for assessment of water demand and supply under socio-economic and IPCC climate change scenarios using WEAP in Central Indus Basin. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 2019 Mar 1;68(2):136-48.
- [17]. Li M, Li J, Singh VP, Fu Q, Liu D, Yang G. Efficient allocation of agricultural land and water resources for soil environment protection using a mixed optimization-simulation approach under uncertainty. *Geoderma*. 2019 Nov 1;353:55-69.
- [18]. Wang Y, Yang J, Chang J. Development of a coupled quantity-quality-environment water allocation model applying the optimization-simulation method. *Journal of Cleaner Production*. 2019 Mar 10;213:944-55.
- [19]. Lv T, Xie H, Lu H, Zhang X, Yang L. A game theory-based approach for exploring water resource exploitation behavior in the Poyang Lake Basin, China. *Sustainability*. 2019 Jan;11(22):6237.
- [20]. Zeng Y, Li J, Cai Y, Tan Q, Dai C. A hybrid game theory and mathematical programming model for solving trans-boundary water conflicts. *Journal of Hydrology*. 2019 Mar 1;570:666-81.
- [21]. Kosolapova NA, Matveeva LG, Nikitaeva AY, Molapisi L. Modeling resource basis for social and economic development strategies: Water resource case. *Journal of hydrology*. 2017 Oct 1;553:438-46.
- [22]. GHAFFARI Moghadam Z, Keikhah A, Sabouhi M. Optimum water resources allocation using game theory. *Iran-Water Resources Research*. 2012; 8(2): 12-23(in Persian)
- [23]. Philpot SL, Johnson PA, Hipel KW. Analysis of a brownfield management conflict in Canada. *Hydrological Research Letters*. 2017;11(3):141-8.
- [24]. Gholami M, Morteza-pour MR, Shahnourian MM. Conflict resolution of sefidrud irrigation and drainage network with games theory. *Iran-*



- Water Resources Research. 2017 Nov 22;13(3):101-11. (in Persian)
- [25]. Safari N, Zarghami M, Szidarovszky F. Nash bargaining and leader-follower models in water allocation: Application to the Zarrinehrud River basin, Iran. *Applied Mathematical Modelling*. 2014 Apr 1;38(7-8):1959-68.
- [26]. Fu Q, Li L, Li M, Li T, Liu D, Hou R, Zhou Z. An interval parameter conditional value-at-risk two-stage stochastic programming model for sustainable regional water allocation under different representative concentration pathways scenarios. *Journal of Hydrology*. 2018 Sep 1;564:115-24.
- [27]. Sedghamiz A, Nikoo MR, Heidarpour M, Sadegh M. Developing a non-cooperative optimization model for water and crop area allocation based on leader-follower game. *Journal of hydrology*. 2018 Dec 1;567:51-9.
- [28]. Chen Y, Lu H, Li J, Ren L, He L. A leader-follower-interactive method for regional water resources management with considering multiple water demands and eco-environmental constraints. *Journal of hydrology*. 2017 May 1;548:121-34.
- [29]. Agricultural Statistics, Ministry of Jihad Agriculture, Deputy of Planning and Economy. Tehran, Volume 1, 2017.
- [30]. Mahmoudinia D, Dallali Esfahani R, Engwerda J, Bakhshi Dastjerdi R. Game theory and its role in determining optimal policies and strategic interaction between fiscal and monetary policymakers (Application of differential game theory and stackelberg games). *Journal of Applied Economics Studies in Iran*. 2016 Jul 22;5(18):1-34. (in Persian)
- [31]. Sinha A, Malo P, Frantsev A, Deb K. Finding optimal strategies in a multi-period multi-leader-follower Stackelberg game using an evolutionary algorithm. *Computers & Operations Research*. 2014 Jan 1;41:374-85.
- [32]. Safari N. Optimal Surface Water Resources Allocation by Public and Market-Based Mechanisms with the Approach of Cooperative Game; Case Studies. PhD Thesis university of Tabriz. 2016
- [33]. Gibbons R. An introduction to applicable game theory. *Journal of Economic Perspectives*. 1997 Mar;11(1):127-49.
- [34]. Nori Naeini S, Salahmanesh A. Determining the shadow value of resources in the agricultural sector (Case study: Khorasan villages). *Journal of Economic Research*. 1994;48: 81-109 (in Persian)
- [35]. Sharafian A, Zeyaei S, Mardani M. Comparison of economic efficiency of water consumption in agricultural products before and after the implementation of water transfer project with pipes (Case study: Sistan plain). sixth international conference on applied research in agricultural sciences. Tehran. 2019. (in Persian)