

## Agent Based Model Development for Optimal Water Allocation from Dam Reservoir Case Study: Shahid Rajaee Dam

MAHSA NOORI<sup>1</sup>, ALIREZA EMADI<sup>1\*</sup>, RAMIN FAZLOULA<sup>1</sup>

1. Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

(Received: Nov. 14, 2019- Revised: Dec. 23, 2019- Accepted: Jan. 8, 2020)

### ABSTRACT

Despite the development of technical tools for the analysis of complex systems, the most important issue in resolving water resource problems focuses on the interaction of human and natural systems. Agent based modeling (ABM) has been used in recent years as an effective tool for the development of integrated human and environmental models. One of the main challenges of ABM application in water resources management is to identify and characterize key agents. In this study, an ABM has been developed for optimal water allocation from dam reservoir to downstream needs. The proposed model includes reservoir simulation using Standard Operating Policy, optimization of water allocation using Genetic Algorithm, and behavioral simulation of agents using ABM. The behavioral simulation model simulated stakeholders interactions and their reactions to water allocation decisions. To develop this model, key agents including drinking, industry, agriculture, environment and policy sector were identified in the Tajan basin. The proposed model is a new method for simulation of stakeholder interactions and establishing a hydrological-environmental-human relationship to manage demand and to optimize water allocation to water needs. The obtained results showed that the proposed model has a high potential for increasing agent utility and total profit through agents feedback analysis, so that agricultural agent utility increased from 19% to 47% and the total profit increased up to 21.4%.

**Keywords:** Agent Based Models, Behavioral simulation, Optimal water allocation, Tajan basin, Water resources management.

## توسعه مدل عامل بنیان جهت تخصیص بهینه آب از مخزن سد مطالعه موردی: سد شهید رجایی

مهسا نوری<sup>۱</sup>، علیرضا عمادی<sup>۱\*</sup>، رامین فضل اولی<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۸/۲۳ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۱۰/۱۸)

### چکیده

با وجود پیشرفت ابزارهای فنی برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های پیچیده، مهم‌ترین مسئله در حل مشکلات منابع آب بر تعامل سیستم‌های انسانی و طبیعی تمرکز دارد. مدل‌سازی عامل بنیان در سال‌های اخیر به‌عنوان ابزاری مؤثر برای توسعه مدل‌های یکپارچه انسانی و زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گرفته است. یکی از اصلی‌ترین چالش‌های کاربرد مدل‌های عامل بنیان در مدیریت منابع آب، شناسایی و توصیف عامل‌های اصلی می‌باشد. در این پژوهش، یک مدل عامل بنیان برای تخصیص بهینه آب از مخزن سد به نیازهای پایین دست توسعه داده شده است. مدل ارائه شده شامل شبیه‌سازی مخزن با استفاده از سیاست بهره‌برداری استاندارد، بهینه‌سازی تخصیص آب با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی رفتاری عامل‌ها با استفاده از مدل عامل بنیان می‌باشد. مدل شبیه‌سازی رفتاری، تعامل ذی‌نفعان را شبیه‌سازی کرده و واکنش آن‌ها به تصمیمات تخصیص آب را نشان می‌دهد. برای توسعه مدل، عامل‌های اصلی در حوزه آبریز تجن اعم از شرب، صنعت، کشاورزی، محیط‌زیست و بخش سیاست‌گذار، شناسایی شدند. مدل ارائه شده روشی جدید برای شبیه‌سازی تعاملات ذی‌نفعان و ایجاد یک رابطه هیدرولوژیکی-زیست محیطی-انسانی به‌منظور مدیریت تقاضا و تخصیص بهینه‌ی آب به نیازها می‌باشد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل ارائه شده توانایی بالایی در افزایش مطلوبیت عامل‌ها و سود کل از طریق تحلیل بازخورد عامل‌ها دارد به‌طوری‌که مطلوبیت عامل‌های کشاورزی از ۱۹ درصد تا ۴۷ درصد و سود کل به‌میزان ۲۱/۴ درصد افزایش یافته است.

**واژه‌های کلیدی:** تخصیص بهینه آب، حوضه آبریز تجن، شبیه‌سازی رفتاری، مدل‌های عامل بنیان، مدیریت منابع آب.

### مقدمه

آب یک منبع منحصر به فرد و حیاتی برای همه موجودات زنده است و هیچ جایگزینی برای آن وجود ندارد. با این حال، واقعیت این است که توزیع غیریکنواخت آب، چالش‌های قابل توجهی در مدیریت منابع آب ایجاد کرده است. تنها یک هدف برای مدیریت آب وجود ندارد و همیشه با توجه به نیاز بخش‌های مختلف مانند: مصارف کشاورزی، شرب، صنعت، تولید برق آبی، تفریحی و حفاظت از محیط‌زیست مدیریت می‌شود. بنابراین مدیریت منابع آب معمولاً با درگیری بین آب‌بران همراه است که به دنبال بهره‌برداری از آب برای اهداف مختلف هستند. برای شبیه‌سازی فرایندهای اجتماعی، عامل‌ها به عنوان افراد یا گروه‌هایی از مردم در نظر گرفته شده و روابط آن‌ها نمایانگر فرایندهای تعامل اجتماعی است (Gilbert and Troitzsch, 1999). در مدیریت منابع آب با وجود تصمیم‌گیرندگان مستقل و اهداف متنوع و غیرقابل کنترل، شناسایی و توصیف دقیق عامل‌ها پیچیده است و

باید فاکتورهای رفتاری در نظر گرفته شود. در این میان، توجه به مدل‌های عامل بنیان<sup>۱</sup> افزایش یافته است. کاربردهای مدل‌سازی عامل بنیان در علوم آب و منابع طبیعی ابتدا درباره مدیریت منابع تجدیدپذیر توسط Bousquet *et al.* (1993) مورد مطالعه قرار گرفت. در تحقیق آن‌ها، یک شبیه‌ساز چند عاملی برای درک بهتر اندرکنش میان بهره‌برداران و منابع طبیعی ایجاد گردید. (2003) Becu *et al.* در زمینه شبیه‌سازی عامل بنیان برای مدیریت آب حوضه آبریز در جنوب تایلند مطالعه‌ای انجام دادند. آن‌ها برای این هدف سناریوهای اقتصادی، کاربری اراضی و مدیریت منابع آب را مورد آزمون قرار دادند. (Kock 2008) نشان داد که ظرفیت نهادی و مناقشات آبی ارتباط زیادی با سیستم‌های اجتماعی-هیدرولوژیکی دارد. (Galán *et al.* 2009) یک مدل عامل بنیان برای مدیریت آب شرب در کلان‌شهر والادولید توسعه دادند که با استفاده از مدل‌های عامل بنیان نتایجی می‌توان کسب کرد که با استفاده از روش‌هایی مانند پویایی سیستم‌ها و سایر مدل‌ها به

\* نویسنده مسئول: emadia355@yahoo.com

عامل‌بنیان اجتماعی-هیدرولوژیکی برای مدیریت منابع آب پرداختند. آن‌ها یک مدل عامل‌بنیان را به‌عنوان چارچوبی برای بررسی رفتارهای اجتماعی مرتبط با آلودگی آب‌های زیرزمینی پیشنهاد کردند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که استفاده از خطر سلامت اجتماعی، به جای غلظت آلاینده‌ها، به‌عنوان یک متغیر بهینه‌سازی، می‌تواند تصمیمات مدیریت آب را با هدف به حداکثر رساندن رفاه اجتماعی بهبود بخشد. (Hyun *et al.* (2019) از یک روش مدل‌سازی عامل‌بنیان برای تحلیل نقش احساس خطر در تصمیمات مدیریت منابع آب استفاده کردند. آن‌ها به‌منظور نشان دادن مطلوبیت این روش، به بررسی رفتار یک عامل در شرایط تغییرات اجتماعی و اقتصادی در حوضه رودخانه سان جووان در مکزیک پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل ارائه شده چارچوب بهتری از رفتار انسان را در فرآیندهای تصمیم‌گیری در مقایسه با مدل‌های عامل‌بنیانی که احساس خطر را در نظر نمی‌گیرند، فراهم می‌کند. (Lin *et al.* (2019) به مدل‌سازی عامل‌بنیان برای مدیریت منابع آب در منطقه باککن پرداختند. آن‌ها از این مدل برای تخصیص منابع آب شیرین به‌منظور توسعه فعالیت‌های صنعتی استفاده کردند. مدل ارائه شده برای ارزیابی سیاست‌های آب و تدوین استراتژی‌های مؤثر در مدیریت آب در منطقه باککن به‌کار برده شد. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل‌سازی عامل‌بنیان برای مدیریت آب در منطقه باککن می‌تواند به سایر سیاست‌گذاران و مدیران در توسعه سیاست‌های آب جهت رفع نیازهای صنعتی مرتبط با توسعه نامتعارف نفت و گاز در مناطق کمک کند.

در این پژوهش، یک مدل عامل‌بنیان برای توصیف عامل‌های اصلی در تصمیم‌گیری‌های آبی شامل کشاورزی، شرب، صنعت و محیط‌زیست با هدف تخصیص بهینه آب بر مبنای تعاملات اجتماعی و هیدرولوژیکی ارائه شده است. بخش سیاست‌گذار نیز به‌عنوان عامل تنظیم‌کننده و تعیین‌کننده در نظر گرفته شد. مدل ارائه شده برای ایجاد یک رابطه هیدرولوژیکی-زیست محیطی-انسانی به‌عنوان ابزار تصمیم‌گیری در مناقشات منابع آب در حوضه آبریز تچن مورد استفاده قرار گرفت. این راهکار علمی با شبیه‌سازی رفتار عامل‌ها نسبت به میزان تخصیص آب ارائه گردید. تخصیص اولیه با استفاده از الگوریتم ژنتیک صورت گرفت. از سطح رضایت عامل‌های کشاورزی برای تخصیص مجدد آب و محاسبه مطلوبیت آن‌ها و سود کل برای ارزیابی نتایج استفاده گردید. هدف اصلی این پژوهش، نشان دادن رویکرد و کاربرد مدل‌های عامل‌بنیان در حل مناقشات آبی و یافتن راه‌حل بر مبنای تعاملات اجتماعی و هیدرولوژیکی می‌باشد. تلفیق مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با مدل عامل‌بنیان از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد.

سختی قابل دست‌یابی می‌باشند. (Barthel *et al.* (2010) یک مدل چندعامله با در نظر گرفتن مناطق بحرانی که نیاز به راهکارهای سازگاری اقلیمی دارند توسعه دادند و تصمیم‌گیری در مورد آبرسانی را شبیه‌سازی کردند. (Ng *et al.* (2011) در زمینه کیفیت آب در سطح حوضه آبریز تحت‌تاثیر آلودگی کشاورزی در یک منطقه با استفاده از مدل‌های عامل‌بنیان مطالعه‌ای انجام دادند که نتایج آن نشان داد تغییر رفتار کشاورزان بر پیش‌بینی و تصمیم‌گیری سایر کشاورزان مؤثر است و نتایج واکنش عوامل در منابع آب متفاوت می‌باشد. (Akhbari and Grigg (2013) نیز یک چارچوب برای مدیریت اختلاف میان ذی‌نفعان در حوضه آبریز سن واکین ارائه دادند. این چارچوب برای ارزیابی راه‌های مؤثر در تشویق ذی‌نفعان جهت همکاری بیشتر به‌منظور کاهش مصرف آب کشاورزی و به‌دنبال آن، کاهش میزان آلودگی آب و افزایش جریان آب رودخانه ارائه گردید. (Berger and Troost (2013) با تلفیق یک مدل عامل‌بنیان با مدل‌های شبیه‌ساز ادعا نمودند که یک مدل عامل‌بنیان به‌عنوان یک ابزار مکمل می‌تواند جهت ارزیابی واکنش کشاورزان به تغییرات اقلیمی و چگونگی تاثیرپذیری این واکنش‌ها از قواعد و سیاست‌های اعمال شده، مورد استفاده قرار گیرد. (Murray-Rust *et al.* (2014) با اشاره به افزایش تمایل در به‌کارگیری مدل‌های عامل‌بنیان برای شبیه‌سازی تغییرات کاربری اراضی در مقیاس زمانی و مکانی، نیاز به لحاظ نمودن فرآیندهای رفتاری عوامل تاثیرگذار در شبیه‌سازی فیزیکی-زیست‌محیطی را مورد تاکید قرار دادند. (Bakker *et al.* (2015) در تحقیق خود یک مدل عامل‌بنیان جهت شبیه‌سازی تغییر کاربری ناشی از مبادله زمین بین عوامل مختلف (کشاورزان، سازمان‌ها و صاحبان املاک) ارائه نمودند و در آن قواعد تصمیم‌گیری مربوط به خرید و فروش زمین را بر اساس مشاهدات تاریخی، مصاحبه‌ها و تجارب موجود استخراج کردند. (Ghallelhban Tekmedash *et al.* (2015) به بررسی مدل‌های عامل‌بنیان در شبیه‌سازی رفتار ذی‌نفعان در مدیریت منابع آب پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با استفاده از این مدل‌ها می‌توان سیستم‌های پشتیبانی تصمیم‌گیری ایجاد کرد تا از این طریق دیدگاه جامع‌تری نسبت به مسائل منابع آب حاصل شود. (Ding *et al.* (2016) به مدل‌سازی عامل‌بنیان برای تخصیص منابع آب در حوضه رود نیل پرداختند. آن‌ها از یک الگوریتم جستجوی تکاملی موازی برای معرفی مکانیسم توزیع مجدد ارزش درآمد در بین عوامل رقیب بر اساس سهم آن‌ها استفاده کردند. چارچوب ارائه شده توسط آن‌ها برای تخصیص منابع آب در کنار حوضه رودخانه نیل، که در آن یازده کاربر رقیب وجود دارد، مورد استفاده و بحث قرار گرفت. (Bakarji *et al.* (2017) به مدل‌سازی

## مواد و روش‌ها

مدل‌های عامل‌بنیان ابزاری قدرتمند برای مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده می‌باشند (Levin et al. 2013). مدل‌سازی عامل‌بنیان، امکان در نظر گرفتن دو بخش کلی اجتماعی و اکولوژیکی و نیز تأثیرات متقابل آن‌ها بر یکدیگر را فراهم می‌سازد. بخش اجتماعی در این رویکرد شامل همه‌ی کاربران و یا به‌عبارت دیگر بازیگرانی است که از سیستم تأثیر می‌پذیرند و متقابلاً بر آن تأثیر می‌گذارند. از نقاط قوت رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان این است که ضمن در نظر گرفتن بعد اجتماعی در مدل، این امکان را فراهم می‌سازد که مدل‌سازی رفتار عامل‌ها با در نظر گرفتن ابعادی همچون یادگیری، تعامل با یکدیگر، تنوع در رفتارها و ... انجام گیرد. بخش اکولوژیکی در مدل‌های عامل‌بنیان، شامل تمام زیرمدل‌هایی است که منابع آب و سیستم‌های مرتبط با منابع آب را تشکیل می‌دهند. در این رویکرد مدل‌سازی، هیچ محدودیتی برای تعریف بخش اجتماعی و اکولوژیکی و ارتباطات بین آن‌ها وجود ندارد و تنها کاستی در داده‌ها و اطلاعات میدانی است که می‌تواند در مدل محدودیت ایجاد کند. بزرگ‌ترین نقطه قوت این رویکرد مدل‌سازی، در نظر گرفتن بخش اجتماعی در مدل، همپای بخش اکولوژیکی و همین‌طور لحاظ نمودن ارتباطات و تأثیرات متقابل آن‌هاست. در واقع ایده اصلی این روش مدل‌سازی، نزدیک کردن هر چه بیشتر مدل به شرایط واقعی مسأله و در نتیجه حصول نتایج واقع‌بینانه‌تر از مدل است. به همین دلیل استفاده از رویکرد مدل‌سازی عامل‌بنیان در زمینه مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده و به‌خصوص سیستم‌های پیچیده منابع آب در سال‌های اخیر افزایش قابل توجهی داشته است (Berglund, 2015).

در مدل‌سازی عامل‌بنیان، محققان رفتار عوامل را به دو کلاس انفعالی و شناختی تقسیم کرده‌اند. عوامل انفعالی براساس درک خود از محرک‌ها واکنش نشان می‌دهند (Bandini et al. 2009). رفتار این عوامل شامل یک سری از قوانین شرطی است که با یک استراتژی، انتخاب و تلفیق شده و هنگام مواجه شدن با قوانین مختلف از خود واکنش نشان می‌دهند. عوامل شناختی مکانیسم انتخاب پیچیده‌تری دارند. رفتار این عوامل براساس دانش آن‌ها درباره محیط، حافظه و تجربیات ایشان شکل می‌گیرد. علاوه بر این دو نوع رفتار، کلاس سومی نیز وجود دارد که هیبرید نامیده می‌شود که ترکیبی از عوامل انفعالی و شناختی می‌باشد. در این کلاس عوامل دارای ساختار لایه‌ای هستند. در این ساختار برای تحلیل رفتار عامل‌ها، نتایج لایه‌های مختلف بایستی ترکیب شوند. براساس سطح اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری در هر

عامل، خصوصیت رفتاری آن‌ها مشخص می‌گردد (Brooks 1986). ممکن است عامل‌ها مستقیماً از طریق تبادل اطلاعات مستقیم یا به‌طور غیرمستقیم از طریق یک نهاد واسطه در تعامل باشند. این نهاد واسطه می‌تواند یک عامل سیاست‌گذاری یا یک مقام دولتی باشد و حتی ممکن است تعامل را تنظیم کند (Bandini et al. 2009). رفتار عامل‌های کشاورزی از نوع انفعالی می‌باشد، درحالی‌که عامل محیط‌زیست به دلیل فرآیند تصمیم‌گیری پیچیده، رفتاری شناختی از خود نشان می‌دهد. رفتار عوامل توزیع‌کننده آب (سیاست‌گذار) هیبریدی است.

در این پژوهش، برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد شهید رجایی به‌منظور تأمین نیازهای پایین‌دست اعم از نیاز شرب، صنعت، زیست‌محیطی و کشاورزی، از مدل‌سازی عامل‌بنیان به همراه سیاست بهره‌برداری استاندارد و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

شبیه‌سازی مخزن براساس سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP)<sup>۱</sup>

سیاست بهره‌برداری استاندارد یکی از روش‌های بهره‌برداری از مخزن است. در این روش، میزان برداشت آب برابر با مقدار نیاز فرض می‌شود. هنگامی که مخزن نتواند نیاز را به‌طور کامل تأمین کند، درصدی از آن را تأمین می‌نماید. در این مدل در هر دوره زمانی سعی می‌شود کل نیاز آبی پایین‌دست تأمین شود. در این پژوهش، برنامه شبیه‌سازی مخزن بر اساس روش SOP با کدنویسی در نرم‌افزار MATLAB تهیه شد. در این برنامه اطلاعات مربوط به مخزن سد از جمله مقادیر دبی ماهانه ورودی به مخزن به‌صورت سری زمانی، توزیع ماهانه ارتفاع تبخیر و بارش، تعداد ماه‌های بهره‌برداری، حجم حداقل و حداکثر مخازن، توزیع ماهانه نیازها و حجم حداکثر نیاز وارد برنامه می‌شود. با برقراری رابطه بین سطح و حجم مخزن در هر دوره از روی منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن، حجم تبخیر و بارش در هر دوره به‌دست می‌آید. سپس با فرض حجم اولیه مخزن و رعایت قیود و محدودیت‌های ذکر شده در بخش نحوه شبیه‌سازی مخزن، حجم ذخیره مخزن، حجم سرریز و میزان برداشت آب در هر دوره محاسبه می‌شود. در نهایت از این مدل شبیه‌سازی برای محاسبه تابع هدف تعیین شده برای بهره‌برداری از مخزن در ترکیب با مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده می‌گردد. رابطه (۱) معادله پیوستگی که از اساسی‌ترین روابط مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن می‌باشد و نیز روابط (۲) تا (۵) قیود و محدودیت‌های مسئله را نشان می‌دهند.

است.

(رابطه ۶)

$$Min Z = \sum_{s=1}^8 \sum_{m=1}^{12} (d_{s,m} - r_{s,m})^2$$

$$r_{s,m} \leq d_{s,m} \quad (\text{رابطه ۷})$$

$$m=1,2,\dots,12$$

(رابطه ۸)

$$\frac{\sum_{m=1}^{12} r_{1,m}}{\sum_{m=1}^{12} d_{1,m}} = \frac{\sum_{m=1}^{12} r_{2,m}}{\sum_{m=1}^{12} d_{2,m}} = \frac{\sum_{m=1}^{12} r_{3,m}}{\sum_{m=1}^{12} d_{3,m}} = \frac{\sum_{m=1}^{12} r_{4,m}}{\sum_{m=1}^{12} d_{4,m}} \\ = \frac{\sum_{m=1}^{12} r_{5,m}}{\sum_{m=1}^{12} d_{5,m}} = \frac{\sum_{m=1}^{12} r_{6,m}}{\sum_{m=1}^{12} d_{6,m}} \\ = \frac{\sum_{m=1}^{12} r_{7,m}}{\sum_{m=1}^{12} d_{7,m}} = \frac{\sum_{m=1}^{12} r_{8,m}}{\sum_{m=1}^{12} d_{8,m}}$$

(رابطه ۹)

$$\sum_{s=1}^8 r_{s,m} = R_m$$

در روابط فوق،  $s$ ، عامل‌های کشاورزی،  $d$ ، نیاز آبی هر عامل کشاورزی در ماه  $m$  می‌باشد.  $r$  مقدار آب رهاسازی شده برای هر عامل از سد در ماه  $m$  می‌باشد که به عامل‌های کشاورزی اختصاص می‌یابد.  $R_m$  مجموع آب قابل رهاسازی از مخزن سد در ماه  $m$  می‌باشد. رابطه (۷) نشان می‌دهد که مقدار آب تخصیص یافته شده به هر عامل در هر ماه، از نیاز همان عامل در آن ماه بیشتر نباشد. رابطه (۸) بیانگر قید رعایت عدالت بین تمامی عامل‌ها می‌باشد. رابطه (۹) نیز قید فیزیکی مربوط به حجم آب قابل رهاسازی از مخزن سد می‌باشد.

پس از تأمین مقدار نیاز بخش‌های شرب و صنعت و همچنین تعیین مقدار حبابه هشت عامل کشاورزی، می‌بایست درصد مطلوبیت آن‌ها و نیز درصد مطلوبیت بخش محیط‌زیست محاسبه گردد. برای محاسبه مطلوبیت بخش محیط‌زیست از روش مونتانا-تنانت استفاده شده است. روش مونتانا-تنانت مبتنی بر تخصیص درصد مشخصی از جریان آبی رودخانه در دوره‌های کم‌آبی و پرآبی است. درصد تأمین آب به معنی برقراری نسبت ثابتی از جریان طبیعی رودخانه به عنوان جریان زیست‌محیطی است. در این روش شش سطح اصلی برای تعیین جریان زیست-محیطی مشخص شده و یک سطح نیز برای شرایط سیلابی وجود دارد (Davis and Hirji, 2003). در روش اصلی، ماه‌های مشخص میلادی به دوره کم‌آبی و پرآبی اختصاص داده شده است، ولی با توجه به تفاوت شرایط اقلیمی و منابع آب ایران این دوره‌ها در ایران با آنچه در کشور منشاء این روش وجود داشته متفاوت است. به همین دلیل در روش اصلاح شده برای سازگاری بیشتر، ماه‌های میلادی حذف و دوره کم‌آبی و پرآبی جای آن را گرفته است. جدول (۱) روش مونتانا-تنانت اصلاح شده برای تعیین جریان

(رابطه ۱)

$$S_{t+1} = S_t + Q_t + P_t - Ev_t - Re_t - Sp_t$$

(رابطه ۲)

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max}$$

(رابطه ۳)

$$Sp_t = 0, Re_t = De_t$$

(رابطه ۴)

$$\text{if } S_{t+1} > S_{max} \quad \begin{cases} Sp_t = S_{t+1} - S_{max} \\ S_{t+1} = S_{max} \end{cases}$$

(رابطه ۵)

$$\text{if } S_{t+1} < S_{min} \quad Def_t = S_{min} - S_{t+1}$$

$$\text{if } Def_t < De_t \rightarrow \begin{cases} Re_t = De_t - Def_t \\ S_{t+1} = S_{min} \end{cases}$$

$$\text{if } Def_t > De_t \rightarrow \begin{cases} Re_t = Q_t \\ S_{t+1} = S_{min} \end{cases}$$

که در آن:  $S_t$  و  $S_{t+1}$  به ترتیب حجم مخزن در ابتدا و انتهای دوره  $t$ ،  $Q_t$  حجم جریان ورودی به مخزن در طول دوره  $t$ ،  $Sp_t$  حجم سرریز از مخزن در طول دوره  $t$ ،  $Ev_t$  حجم تبخیر از سطح مخزن در ماه  $t$  و  $P_t$  حجم بارش بر روی سطح مخزن در ماه  $t$  و  $Re_t$  حجم آزاد شده از مخزن در گام  $t$  می‌باشد.  $S_1$  به عنوان حجم اولیه،  $S_{min}$  حداقل حجم مخزن معادل حجم مرده سد،  $S_{max}$  حداکثر حجم مخزن معادل حجم نرمال سد،  $Sp_t$  حجم سرریز در گام  $t$ ،  $Def_t$  مقدار حجم مورد نیاز در گام  $t$ ،  $S_{t+1}$  حجم مخزن در گام  $t+1$ ، و  $De_t$  مقدار کمبود در گام  $t$  است.

**تخصیص اولیه با استفاده از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک**  
در گام اول، مقدار آب قابل دسترس براساس قید عدالت با استفاده از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک به عامل‌ها تخصیص داده می‌شود. هدف از تخصیص اولیه، تأمین نیازها بدون توجه به اهداف اقتصادی و با رعایت عدالت می‌باشد. به عبارت دیگر، درگام اول با استفاده از قیود لحاظ شده، سعی می‌شود تخصیص آب به همه ذی‌نفعان به نسبت یکسان از نیاز آن‌ها صورت گیرد. در صورتی که حجم آب قابل دسترس در مخزن سد، نیاز آبی همه عامل‌ها را به طور کامل تأمین نکند، با استفاده از قیود رعایت عدالت، درصد تأمین نیاز آن‌ها به یک میزان خواهد بود. متغیرهای تصمیم مدل، مقادیر ماهانه آب تخصیصی به عامل‌ها در یک دوره ۱۲ ماهه می‌باشد. در این پژوهش، هشت عامل اصلی در بخش کشاورزی اعم از شالی، مرکبات، دانه‌های روغنی، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای، زیتون، سیاه‌ریشه و گندم در طول یک دوره کشت در نظر گرفته شده است. در این مدل، اولویت با تأمین نیازهای شرب و صنعت می‌باشد و سپس نیازهای عامل‌های کشاورزی تأمین می‌شود. در این بخش، از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است و گام زمانی انجام محاسبات بهینه‌سازی ماهانه می‌باشد. تابع هدف و قیود در روابط (۶) تا (۹) نشان داده شده

متوسط دبی رودخانه پایین دست سد،  $\alpha$  ضریب تنانت،  $\bar{Q}_{river}$  متوسط دبی سالانه رودخانه پایین دست سد،  $\beta$  میزان درصدی که سیاست گذار قصد پرداخت یارانه در ازای کمبود آب به عامل های کشاورزی را دارد.

جمله اول رابطه (۱۰) مربوط به عامل کشاورزی بوده و به طور مستقیم به میزان درصد تأمین نیاز آبی آن بستگی دارد. جمله دوم اهرم فشار عامل محیط زیست است که در صورت عدم تأمین نیاز آن و یا امکان آسیب پذیری محیط زیست، باعث افزایش مطلوبیت عامل های کشاورزی و در نتیجه کاهش نیاز آن ها خواهد شد. جمله سوم نیز مربوط به بخش سیاست گذار است که می تواند از طریق تعیین یارانه در ازای عدم تأمین نیاز آبی به عامل های کشاورزی مشخص گردد.

پس از محاسبه مطلوبیت عامل های کشاورزی، مقادیر سود به ازای هر متر مکعب آب تخصیص داده شده به آن ها، با استفاده از جدول (۲) به منظور بررسی تغییرات اعمال شده محاسبه می - گردد.

زیست محیطی براساس درصد متوسط جریان سالانه رودخانه را نشان می دهد (CIWP, 2014).

با توجه به شرایط زیست محیطی رودخانه پایین دست سد و با استفاده از روش تنانت، شرایط اکوسیستم خوب در نظر گرفته شد. بدین ترتیب درصد متوسط جریان سالانه برای فصل های بهار و تابستان برابر ۴۰ درصد و برای فصل های پاییز و زمستان برابر ۲۰ درصد مشخص گردید. همچنین میزان جریان متوسط سالانه با توجه به آمار ۱۸ ساله موجود در منطقه مورد مطالعه برابر با ۱۶۸ میلیون متر مکعب می باشد.

به منظور محاسبه مطلوبیت عامل های کشاورزی رابطه (۱۰) ارائه شده است.

$$U_i = \frac{Al_i}{D_i} + \left(1 - \frac{Q_{river}}{\alpha(\bar{Q}_{river})}\right) + \beta(1 - \frac{Al_i}{d_i}) \quad i=1,2,\dots,8$$

در رابطه (۱۰)،  $i$  تعداد عامل های کشاورزی،  $Al_i$  مقدار آب تخصیص یافته به هر عامل کشاورزی در طول یک دوره کشت،  $D_i$  نیاز آبی هر عامل کشاورزی در طول یک دوره کشت،  $Q_{river}$

جدول ۱- روش مونتانا-تنانت اصلاح شده برای تعیین جریان زیست محیطی براساس درصد متوسط جریان سالانه رودخانه

درصد متوسط جریان سالانه		هدف
پاییز - زمستان	بهار - تابستان	
۶۰-۱۰۰	۶۰-۱۰۰	جریان رودخانه
بقا شرایط رودخانه	درصد جریان مورد نیاز جهت حفظ شرایط اکوسیستم	شرایط اکوسیستم
۴۰	۶۰	بسیار عالی
۳۰	۵۰	عالی
۲۰	۴۰	خوب
۱۰	۳۰	متوسط
۱۰	۱۰	ضعیف یا حداقل
<۱۰	۰-۱۰	بسیار تخریب کننده

جدول ۲- سود حاصل از تخصیص هر متر مکعب آب و درصد تأمین نیاز آبی بدون کاهش قابل توجه در عملکرد محصول\*

نوع محصول	سود به ازای هر متر مکعب آب تخصیص داده شده (ریال)	درصد تأمین نیاز آبی بدون کاهش قابل توجه در عملکرد محصول
شالی	۱۰۰۳۰	۹۵
مرکبات	۳۵۴۳۰	۷۰
دانه های روغنی	۶۰۴۰	۸۰
ذرت دانه ای	۳۰۳۰	۸۰
ذرت علوفه ای	۶۸۵۰	۷۰
زیتون	۱۰۹۸۰	۷۵
سیاه ریشه	۵۸۱۱۰	۷۰
گندم	۱۵۰۰۰	۷۵

\* اطلاعات جدول (۲) از جهاد کشاورزی استان مازندران دریافت شده است.

برابر شده و همچنین مطلوبیت بخش محیط زیست به منظور عدم تخریب آن صورت پذیرد. این شرط، به عنوان ضابطه‌ی توقف مراحل محاسبات در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{\sum_{m=1}^{12} r_{i,m}}{\sum_{m=1}^{12} d_{i,m}} \leq \alpha \quad i = 1, \dots, 8 \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در این رابطه  $i$  تعداد عامل‌ها برابر با ۸ و  $\alpha$  درصد تأمین نیاز آبی بدون کاهش قابل توجه در عملکرد محصول با توجه به جدول (۲) می‌باشد.

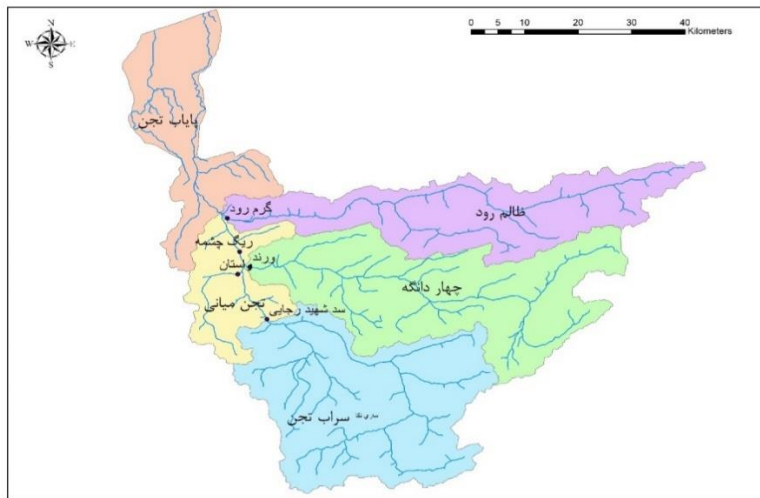
### مطالعه موردی

مطالعه موردی در این پژوهش، سد شهید رجایی در ۴۵ کیلومتری جنوب غربی ساری واقع در حوضه تجن می‌باشد. کاربری اصلی این سد تأمین آب کشاورزی زمین‌های اطراف و تأمین آب آشامیدنی است. در شکل (۱) حوضه آبریز تجن نشان داده شده است. شکل (۲) سری زمانی سالانه حجم آب ورودی به مخزن سد شهید رجایی را بر حسب میلیون متر مکعب نشان می‌دهد.

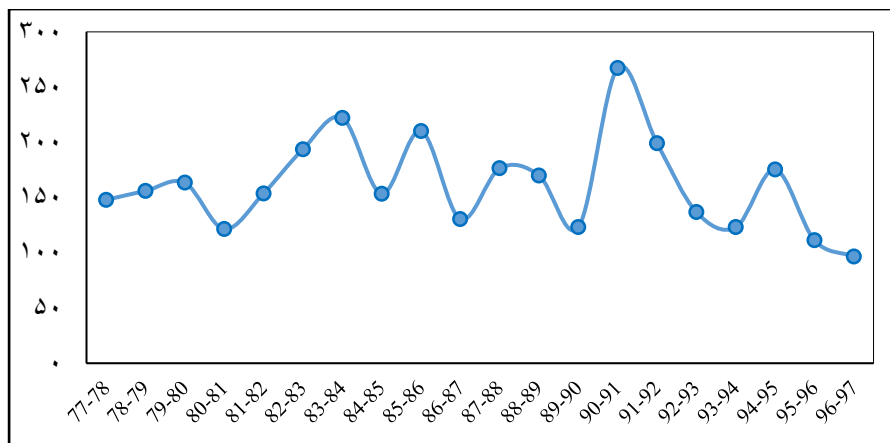
پس از تعیین مطلوبیت عامل‌ها و بخش محیط زیست، با استفاده از رابطه (۱۱) مقدار نیاز آبی هر یک از عامل‌ها اصلاح شده و سپس به مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک داده خواهد شد تا تخصیص ثانویه با توجه به بازخورد عامل‌ها و محیط زیست صورت گیرد.

$$D_{new_i} = Al_i + (1 - U_i) \times (D_i - Al_i) \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

در رابطه (۱۱)،  $D_{new_i}$  مقدار نیاز آبی جدید هر یک از عامل‌های کشاورزی و  $U_i$  مطلوبیت هر عامل کشاورزی می‌باشد. در این مرحله قید عدالت از الگوریتم ژنتیک حذف شده و قید دیگری جایگزین آن می‌گردد به طوری که در شرایط کم‌آبی، میزان تخصیص آب به هر عامل کشاورزی از میزان درصد تأمین نیاز آبی بدون کاهش قابل توجه در عملکرد محصول، بیشتر نباشد (رابطه ۱۲). در جدول (۲) میزان درصد تأمین نیاز آبی بدون کاهش قابل توجه در عملکرد محصول برای هشت عامل نشان داده شده است. این مراحل تا جایی تکرار خواهد شد که میزان آب قابل برداشت از سد، با میزان تقاضای عامل‌های کشاورزی



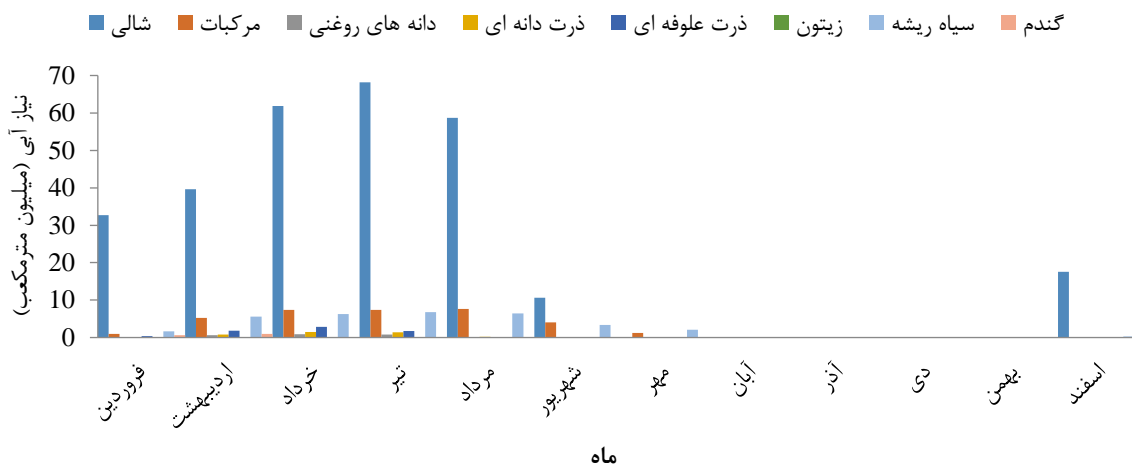
شکل ۱- حوضه آبریز تجن



شکل ۲- سری زمانی سالانه حجم آب ورودی به مخزن سد شهید رجایی (میلیون متر مکعب)

شکل (۳) نیاز آبی عامل‌های کشاورزی را نشان می‌دهد. در این پژوهش، نیاز آبی محصولات با استفاده از نرم افزار Cropwat محاسبه شده است. جدول (۳) مقادیر نیازهایی که باید از مخزن سد شهید رجایی تأمین شوند را نشان می‌دهد. اطلاعات جدول (۳) از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران دریافت گردیده است.

برای تخصیص آب به نیازهای مختلف اعم از شرب، زیست-محیطی، کشاورزی و صنعت، لازم است همه مصرف‌کنندگان آب در پایین‌دست و نیازهای هریک از آنها مشخص شوند. تأمین نیاز آبی شرب و صنعت در همه ماه‌های سال به‌طور کامل ضروری است. عامل‌های کشاورزی شامل شالی، مرکبات، دانه‌های روغنی، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای، زیتون، سیاه‌ریشه و گندم می‌باشند.



شکل ۳- نیاز آبی عامل‌های کشاورزی در هر ماه

جدول ۳- مقادیر مهم‌ترین نیازهای پایین‌دست سد شهید رجایی (میلیون متر مکعب)

نیاز آبی	شرب	صنعت	محیط زیست
فروردین	۲/۳۰	۱/۱۰	۷/۴۰
اردیبهشت	۳/۵۰	۱/۳۶	۰/۲۰
خرداد	۳/۵۰	۱/۴۵	۰/۵۰
تیر	۴/۷۰	۱/۸۷	۱/۱۰
مرداد	۴/۱۰	۱/۶۳	۱/۷۰
شهریور	۳/۵۰	۱/۳۶	۱/۷۰
مهر	۲/۳۰	۰/۸۵	۰/۵۰
آبان	۱/۱۰	۰/۵۱	۱/۲۰
آذر	۰/۵۰	۰/۳۴	۱/۲۰
دی	۰/۵۰	۰/۳۴	۱/۳۰
بهمن	۱/۱۰	۰/۳۴	۱/۳۰
اسفند	۲/۹۰	۰/۸۵	۱/۸۰

عامل‌های کشاورزی به عنوان سود کل تعریف می‌شود.

### محاسبه سود کل

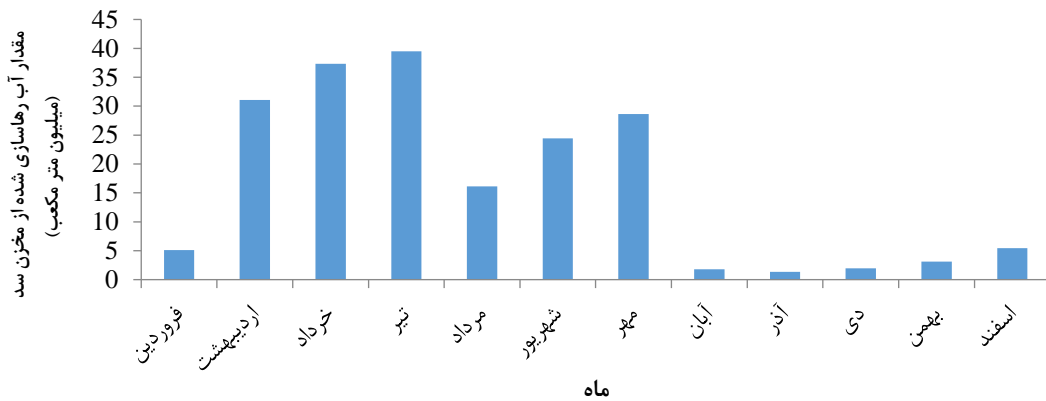
به‌طور کلی در مدل ارائه شده ۱۰ عامل شامل ۸ عامل کشاورزی، ۱ عامل محیط‌زیست و ۱ عامل سیاست‌گذار در نظر گرفته شده است. با استفاده از ضریب سود عامل‌ها (جدول ۲) و مقادیر تخصیص‌یافته از اجرای مدل الگوریتم ژنتیک، مقادیر سود برای هر یک از عامل‌های کشاورزی محاسبه شد. مجموع مقادیر سود

### نتایج و بحث

در گام اول، مقدار آب قابل رهاسازی از مخزن سد شهید رجایی به‌طور ماهانه با استفاده از سیاست بهره‌برداری استاندارد تعیین گردید. از قیود به‌کار رفته در مدل SOP می‌توان به مقدار جریان ورودی به مخزن سد که توسط ایستگاه هیدرومتری اندازه‌گیری



ژنتیک استفاده می‌گردد. در شکل (۴) مقدار آب رهاسازی شده از مخزن سد به‌طور ماهانه برای یک سال نشان داده شده است.



شکل ۴- مقدار آب رهاسازی شده از مخزن سد در هر ماه (میلیون متر مکعب)

که در رابطه (۱۰) بیان شد به منظور کاهش تقاضای نیاز آبی عامل‌های کشاورزی در این سال استفاده نخواهد کرد. میزان یارانه عامل سیاست‌گذار ( $\beta$ ) به عامل‌های کشاورزی برابر با ۲۰ درصد مقدار کمبود آب تخصیص یافته، در نظر گرفته شده است (رابطه ۱۰). این مقدار باعث می‌شود که مطلوبیت عامل‌های کشاورزی افزایش یافته و به تبع در تعیین میزان نیاز آبی جدید آن‌ها تأثیر گذار خواهد بود.

میزان مطلوبیت عامل‌های کشاورزی و یارانه در نظر گرفته شده برای آن‌ها از سوی عامل سیاست‌گذار و همچنین مقدار تقاضای جدید هر عامل، در جدول (۵) محاسبه و نشان داده شده است.

همان‌طور که در جدول (۵) دیده می‌شود، با توجه به نیاز اولیه عامل‌های کشاورزی و میزان حبابه اختصاص یافته، مطلوبیت عامل‌ها بین ۵۳ تا ۵۶ درصد می‌باشد. با توجه به کم‌آبی در سال مورد نظر، و میزان حبابه مشخص شده (۴۵ درصد نیاز اولیه عامل‌های کشاورزی) عملکرد محصولات بسیار پایین می‌باشد. در نتیجه می‌بایست با استفاده از رابطه (۱۱) میزان تقاضای جدید برای عامل‌های کشاورزی محاسبه گردد تا مطلوبیت عامل‌ها افزایش یابد. مطلوبیت عامل‌ها به این صورت افزایش می‌یابد که با توجه به شرایط کم‌آبی، عامل‌های کشاورزی، میزان تقاضای خود را از طریق کاهش سطح زیرکشت پایین می‌آورند تا حبابه آن‌ها نسبت به سطح زیرکشت جدید، افزایش یافته و در نتیجه عملکرد محصولاتشان به حد قابل قبولی برسد. میزان نیاز آبی جدید عامل‌های کشاورزی در جدول (۵) محاسبه گردیده تا به- عنوان ورودی مجدداً وارد مدل الگوریتم ژنتیک شود و حبابه‌های

شده و نیز محدودیت‌های فیزیکی مسئله از جمله حجم حداکثر و حجم حداقل سد اشاره نمود. نتایج این گام به‌عنوان بخشی از ورودی‌ها برای گام دوم به منظور تخصیص اولیه با مدل الگوریتم

لازم به توضیح است که در مرداد ماه به دلیل کمبود آب در مخزن سد نسبت به تقاضای آب در همان ماه، میزان آب رهاسازی شده در مقایسه با ماه‌های شهریور و مهر کمتر می‌باشد. در گام دوم، با استفاده از مدل بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، مقدار تخصیص اولیه به نیازهای عامل‌های کشاورزی پایین دست سد با قید رعایت عدالت تعیین گردید. تأمین نیازهای شرب و صنعت نیز به عنوان قیود در مدل الگوریتم ژنتیک لحاظ شد. به عبارت دیگر، ابتدا می‌بایست از حجم آب رهاسازی شده از مخزن سد، نیازهای شرب و صنعت تأمین گردد و سپس مقدار حجم آب باقیمانده به تأمین نیاز عامل‌های کشاورزی تخصیص داده شود. همان‌طور که گفته شد، نیاز عامل‌ها در پایین دست مخزن سد با توجه به تنوع کشت و سطح زیرکشت به هشت دسته شالی، مرکبات، دانه‌های روغنی، ذرت دانه‌ای، ذرت علوفه‌ای، زیتون، سیاه‌ریشه و گندم تقسیم‌بندی شد. در جدول (۴) تخصیص اولیه ماهانه به هشت عامل کشاورزی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و قید عدالت نشان داده شده است. نتایج این گام به‌عنوان ورودی برای گام سوم (مدل‌سازی رفتاری عامل‌ها و محاسبه میزان مطلوبیت آن‌ها) استفاده می‌گردد.

با توجه به حجم آب رهاسازی شده در فصل بهار و تابستان به مقدار ۱۵۳/۶ میلیون متر مکعب و در فصل پاییز و زمستان به مقدار ۴۲/۳ میلیون متر مکعب، مطلوبیت بخش محیط‌زیست با استفاده از روش مونتانا-تنانت، ۱۰۰ درصد محاسبه گردید و نیاز آن به‌طور کامل برآورده شده است. به‌عبارت دیگر، گونه‌های آبی منطقه مورد نظر در رودخانه پایین دست سد، مورد تهدید قرار نخواهند گرفت. در نتیجه بخش محیط‌زیست از اهرم فشاری خود

جدید عامل‌ها مشخص گردد. در این مرحله در الگوریتم ژنتیک قید عدالت از مدل حذف شده و به جای آن قیدی قرار می‌گیرد که میزان حقبه هر یک از عامل‌ها، از مقدار درصد تأمین نیاز آبی بدون کاهش قابل توجه در عملکرد، بیشتر نباشد (رابطه ۱۲).

جدید عامل‌ها مشخص گردد. در این مرحله در الگوریتم ژنتیک قید عدالت از مدل حذف شده و به جای آن قیدی قرار می‌گیرد که میزان حقبه هر یک از عامل‌ها، از مقدار درصد تأمین نیاز آبی بدون کاهش قابل توجه در عملکرد، بیشتر نباشد (رابطه ۱۲).

جدول ۴- تخصیص اولیه ماهانه آب به نیازهای کشاورزی (میلیون متر مکعب)

ماه	شالی	مرکبات	دانه‌های روغنی	ذرت دانه‌ای	ذرت علوفه‌ای	زیتون	سیاه‌ریشه	گندم
فروردین	۱۸/۵۶۷	۰/۴۷۳	۰	۰/۰۱۰	۰/۱۲۴	۰/۰۰۶	۱/۱۲۰	۰/۲۸۶
اردیبهشت	۲۹/۲۱۲	۲/۰۲۹	۰/۲۵۲	۰/۵۳۵	۰/۹۴۹	۰/۰۲۵	۳/۰۳۲	۰/۴۲۵
خرداد	۱۶/۳۷۳	۴/۴۸۷	۰/۳۵۲	۰/۶۳۳	۱/۵۱۶	۰/۰۲۷	۱/۶۳۲	۰/۰۱۶
تیر	۲۶/۰۲۰	۲/۹۶۲	۰/۳۵۹	۰/۴۲۰	۰/۴۸۹	۰/۰۳۲	۴/۰۰۰	۰
مرداد	۳۱/۵۶۹	۳/۴۸۷	۰/۰۵۱	۰/۱۷۴	۰	۰/۰۳۰	۱/۶۳۸	۰
شهریور	۶/۹۹۶	۱/۳۹۷	۰	۰	۰	۰/۰۱۱	۲/۰۰۲	۰
مهر	۰	۰/۵۶۳	۰/۰۰۳	۰	۰	۰/۰۰۵	۱/۲۳۹	۰/۰۲۸
آبان	۰	۰/۰۴۹	۰	۰	۰	۰	۰/۰۷۲	۰
آذر	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۰۰۴
دی	۰	۰	۰/۰۳۴	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲۴
بهمن	۰	۰	۰/۰۲۶	۰	۰	۰	۰	۰/۰۲۴
اسفند	۲/۹۳۱	۰	۰/۰۰۲	۰	۰	۰	۰/۱۲۵	۰/۱۲۱

جدول ۵- میزان مطلوبیت عامل‌های کشاورزی و یارانه عامل سیاست‌گذار و مقدار تقاضای جدید هر عامل

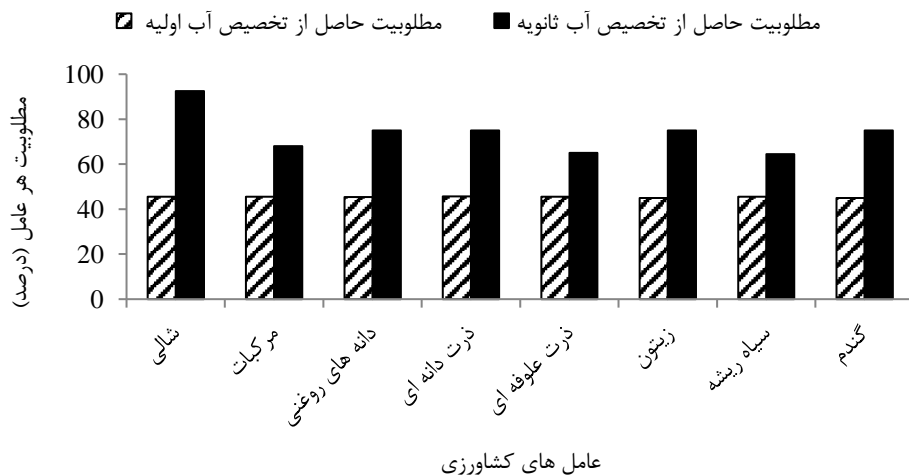
محصول	مقدار تخصیص یافته (AI) (میلیون متر مکعب)	نیاز آبی (D) (میلیون متر مکعب)	مطلوبیت عامل کشاورز بر اساس مقدار تخصیص	درصد کمبود آب برای عامل	میزان یارانه دولت	مجموع مطلوبیت عامل کشاورز	نیاز آبی اصلاح شده (میلیون متر مکعب)
شالی	۱۳۱/۶۷	۲۸۹/۲۱	۰/۴۵	۰/۴۹	۰/۱۰	۰/۵۶	۲۰۱/۰۸
مرکبات	۱۵/۴۵	۳۳/۹۳	۰/۴۵	۰/۲۴	۰/۰۷	۰/۵۳	۲۴/۲۳
دانه‌های روغنی	۱/۰۸	۲/۳۸	۰/۴۵	۰/۳۵	۰/۰۹	۰/۵۴	۱/۶۷
ذرت دانه‌ای	۱/۷۷	۳/۸۸	۰/۴۵	۰/۳۴	۰/۰۸	۰/۵۴	۲/۷۴
ذرت علوفه‌ای	۳/۰۸	۶/۷۶	۰/۴۵	۰/۲۴	۰/۰۷	۰/۵۳	۴/۸۳
زیتون	۰/۱۴	۰/۳۰	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۰۸	۰/۵۳	۰/۲۱۳
سیاه‌ریشه	۱۴/۸۶	۳۲/۶۴	۰/۴۵	۰/۲۴	۰/۰۷	۰/۵۳	۲۳/۳۰
گندم	۰/۹۰	۲/۰۱	۰/۴۵	۰/۳۰	۰/۰۸	۰/۵۳	۱/۴۲

جدول ۶- میزان مطلوبیت جدید عامل‌های کشاورزی و یارانه سیاست‌گذار برای آن‌ها و مقدار تقاضای جدید هر عامل

محصول	مقدار تخصیص یافته (AI) (میلیون متر مکعب)	نیاز آبی (D) (میلیون متر مکعب)	مطلوبیت عامل کشاورز بر اساس مقدار تخصیص	درصد کمبود آب برای عامل	میزان یارانه دولت	مجموع مطلوبیت عامل کشاورز	نیاز آبی اصلاح شده (میلیون متر مکعب)
شالی	۱۸۵/۹۲	۲۰۱/۰۸	۰/۹۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۹۳	۱۸۶/۹۸
مرکبات	۱۶/۴۷	۲۴/۲۳	۰/۶۸	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۶۹	۱۸/۹۱
دانه‌های روغنی	۱/۲۶	۱/۶۸	۰/۷۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۷۶	۱/۳۶
ذرت دانه‌ای	۲/۰۵	۲/۷۴	۰/۷۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۷۶	۲/۲۱
ذرت علوفه‌ای	۳/۱۴	۴/۸۳	۰/۶۵	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۶۶	۳/۷۰
زیتون	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۷۵	۰	۰	۰/۷۵	۰/۱۷
سیاه‌ریشه	۱۵/۰۴	۲۳/۳۰	۰/۶۴	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۶۶	۱۷/۸۴
گندم	۱/۰۷	۱/۴۲	۰/۷۵	۰	۰	۰/۷۵	۱/۱۶

بین ۲ تا ۵/۵ درصد می باشد. میزان یارانه سیاست‌گذار نیز با توجه به گام قبل به طور چشمگیری کاهش یافته است. به طوری که یارانه سیاست‌گذار در مرحله قبل بین ۷/۴ تا ۱۰ درصد بوده و در این مرحله، بالاترین مقدار آن ۲ درصد محاسبه شده است. در این مرحله، با توجه به برقراری شرط توقف، مراحل انجام محاسبات پایان می‌یابد و به بررسی سود کل پرداخته خواهد شد. شکل (۵) مقایسه مطلوبیت‌های عامل‌های کشاورزی را در دو حالت تخصیص آب اولیه با قید رعایت عدالت و تخصیص آب ثانویه با هدف افزایش سود کل نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول (۶) مشاهده می‌شود، حذف قید عدالت و همچنین اعمال قیدی که پیش‌تر توضیح داده شد، باعث بهبود در میزان تخصیص و در نتیجه افزایش میزان مطلوبیت عامل‌های کشاورزی شده است. به طوری که مطلوبیت عامل‌های کشاورزی نسبت به گام قبل که بین ۵۳ تا ۵۶ درصد بوده به ۶۶ تا ۹۳ درصد تغییر نموده است. به عبارت دیگر، مطلوبیت عامل‌های کشاورزی از ۱۹ درصد تا ۴۷ درصد افزایش یافته است. همچنین درصد کمبود آب تخصیص یافته به عامل‌ها نسبت به میزان مجاز کمبود (درصد تأمین نیاز آبی بدون کاهش قابل توجه در عملکرد)



شکل ۵- مقایسه مطلوبیت‌های عامل‌های کشاورزی در تخصیص آب اولیه و ثانویه

پرداخته شد. در مدل ارائه شده بخش سیاست‌گذار به‌عنوان عامل تنظیم‌کننده و تعیین‌کننده در نظر گرفته شد. با هدف توسعه مدل، از روش مونتانا-تنانت، سیاست بهره‌برداری استاندارد، مدل الگوریتم ژنتیک و مدل عامل‌بنیان استفاده شد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان دریافت که با دو بار تخصیص آب به عامل‌ها (هر بار تخصیص آب حداکثر شامل ۳۰۰۰ تکرار در مدل الگوریتم ژنتیک می‌باشد) و نیز با استفاده از مدل عامل‌بنیان، حتی در سال‌های کم‌آبی، علاوه بر افزایش سود کل، مطلوبیت عامل‌های کشاورزی نیز افزایش و میزان یارانه‌ای که عامل سیاست‌گذار باید به عامل‌های کشاورزی پرداخت نماید، کاهش یافته است. این در حالی است که تنها با اعمال یک سری مراحل محاسباتی و نیز تحلیل بازخورد عامل‌ها از طریق تابع مطلوبیت، امکان بهینه‌سازی تخصیص آب و نیز افزایش سود فراهم می‌گردد. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل عامل-بنیان ارائه شده از کارایی بالایی در زمینه تخصیص بهینه آب از مخزن سد به نیازهای پایین‌دست برخوردار بوده و روشی جدید

با استفاده از ضریب سود عامل‌ها (جدول ۲) و مقادیر تخصیص‌یافته از اجرای مدل الگوریتم ژنتیک، مقادیر سود برای هر یک از عامل‌های کشاورزی محاسبه شد. سود کل حاصل از تخصیص آب به عامل‌ها را در هر گام می‌توان با گام قبل مقایسه نمود. تابع مطلوبیت و مقدار سود کل را می‌توان به عنوان ابزارهای سنجش کارایی مدل ارائه شده تلقی نمود. مقدار سود کل عامل-های کشاورزی برای جداول (۵) و (۶) به ترتیب برابر با ۲۷۸۰ میلیارد ریال و ۳۳۷۵ میلیارد ریال محاسبه شده است. این در حالی است که نه‌تنها سود کل به‌میزان ۲۱/۴ درصد افزایش یافته است بلکه میزان مطلوبیت عامل‌های کشاورزی نیز افزایش یافته و همچنین میزان یارانه‌ای که عامل سیاست‌گذار باید به عامل‌های کشاورزی پرداخت نماید، کاهش چشم‌گیری داشته است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به توسعه یک مدل به منظور بهینه‌سازی تخصیص آب به عامل‌های کشاورزی، شرب، صنعت و محیط‌زیست

تخصیص بهینه‌ی آب به نیازها می‌باشد و تصمیم‌گیری‌های آگاهانه و عملی در منابع آبی را فراهم می‌کند.

برای شبیه‌سازی تعاملات ذی‌نفعان و ایجاد یک رابطه هیدرولوژیکی-زیست محیطی-انسانی به‌منظور مدیریت تقاضا و

## REFERENCES

- Akhbari, M., Grigg, N.S. (2013) A Framework for an agent-based model to manage water resources conflicts. *Journal of Water Resources Management*, 27(11): 4039-4052
- Conservation of Iranian Wetlands Project (CIWP) and Asarab Consulting Company (2014). Manual for determining the water requirement of wetlands. *Talaei Press*, 188 p. Tehran. (In Persian)
- Bakarji, J., Malley, D., Vesselinov, V. (2017) Agent-Based Socio-Hydrological Hybrid Modeling for Water Resource Management. *Journal of Water Resources Management*, DOI: 10.1007/s11269-017-1713-7
- Bakker, M., Alam, S., van Dijk J.J., Rounsevell, A. (2015) Land - use change arising from rural land exchange: an agent-based simulation model. *Journal of landscape ecology*, 30:273-286
- Bandini, S., Manzoni, S., Vizzari, G. (2009) Agent-based modeling and simulation: an informatics perspective. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 12(4):4
- Barthel, R., Janisch, S., Nickel, D., Trifkovic, A., Hörhan, T. (2010) Using the multifactor-approach in GLOWADanube to simulate decisions for the water supply sector under conditions of global climate change. *Journal of Water Resources Management*, 24:239-275
- Becu, N., Perez, P., Walker, A., Barreteau, O. (2003) Agent based simulation of a small catchment water management in northern Thailand: description of the CATCHSCAPE model. *Journal of Ecological Modeling*, 170(2): 319-331
- Berger, T., Troost, C. (2013) Agent-based Modeling of Climate Adaptation and Mitigation Options in Agriculture. *Journal of Agricultural Economics*. 65: 323-348
- Berglund, E. (2015) Using agent-based modeling for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(11): 04015025
- Bousquet, F., Cambier, C., Mullon, C., Morand, P., Quensièrre, J., Pavé, A. (1993) Simulating the interaction between a society and a renewable resource. *Journal of biological systems*, 1(02): 199-214
- Brooks, R.A. (1986) A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2:14-23
- Davis, R. and Hirji, R. (2003). *Water Resources & Environment*, technical note c1- c3, Environmental Flows: Case Studies. World Bank, Washington, dc
- Ding, N., Erfani, R., Mokhtar, H., Erfani T. (2016). Agent Based Modelling for Water Resource Allocation in the Trans boundary Nile River. *Journal of Water*. Doi: 10.3390/w8040139
- Galán, J. M., López-Paredes, A., Del Olmo, R. (2009) An agent-based model for domestic water management in Valladolid metropolitan area. *Journal of Water Resources Research*, 45
- Ghallehban Tekmedash, M., Taheri Tizro, A., Zare Abyane, H. (2015) Agent based modeling framework in simulation of stakeholder's behavior for managing water resources. *Journal of Water and Sustainable Development*. 2:87-94
- Gilbert, N. and K. G. Troitzsch. (1999) *Simulation for the Social Scientist*, Buckingham UK: Open University Press.
- Hyun, J.Y., Huang, S.Y., Yang, Y., Tidwell, V., Macknick, J. (2019). Using a coupled agent-based modeling approach to analyze the role of risk perception in water management decisions. *Journal of Hydrology and Earth System Sciences*, 23: 2261-2278
- Lin, Z., Lim, S.H., Tong Lin, T., Borders, M. (2019). Using Agent-Based Modeling for Water Resources Management in the Bakken Region. *Journal of Water Resources Planning Management*. DOI: 10.1061/ (ASCE) WR.1943-5452.0001147
- Kock, B. E. (2008), Agent-Based Models of Socio-Hydrological Systems for Exploring the Institutional Dynamics of Water Resources Conflict, Master of Science Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- Levin, S., Xepapadeas, T., Crépin, A.S., Norberg, J., De Zeeuw, A., Folke, C., Hughes, T., Arrow, K., Barrett, S., Daily, G., Ehrlich, P., Kautsky, N., Mäler, K.G., Polasky, S., Troell, M., Vincent, J.R., Walker, B. (2013) Social-ecological systems as complex adaptive systems: Modeling and policy implications. *Journal of Environment and Development Economics*, 18(2): 111-132
- Murray-Rust, D., Robinson, D. T., Guillem, E., Karali, E., Rounsevell, M. (2014) An open framework for agent based modelling of agricultural land use Change. *Journal of Environmental Modelling & Software*, 61: 19-38
- Ng, T.L., Eheart, J.W., Cai, X., Braden, J.B. (2011) An agent-based model of farmer decision-making and water quality impacts at the watershed scale under markets for carbon allowances and a second-generation biofuel crop. *Journal of Water Resources Research*, 47 (9)