

Using System Dynamics Modeling to Develop the Operation Policy for Yamchi Reservoir (Iran) by Applying Optimum Cropping Pattern

M.R. Fotookian^{1*}, N. Safari², and M. Zarghami³

Abstract

The operation of reservoirs has become more important due to the increase in water consumption, the climate change impacts, and the geography of Iran. In this study, Yamchi reservoir (Ardabil, Iran) operation is simulated using system dynamics model in the Vensim software environment. The optimum cropping pattern is then proposed based on the virtual water concept, strategic role of products to supply public demands, increased financial benefits, storage ability (in terms of time), and water requirement of products. Next the reservoir operation is assessed in system dynamics model applying the management policy of the optimum cropping pattern and based on three kinds of performance criteria including vulnerability, resiliency, and reliability. The results showed that applying this policy will decrease the water shortages by 43% compared to the business-as-usual status for the period 1388-1410 (2009-2032). The results of sustainability analysis also showed the increase in sustainability indices by applying the optimal cropping pattern. Finally the comparison of the results indicated that the proposed policy were effective and practical in reservoir operation improvement.

Keywords: Simulation, System Dynamics, Optimum Cropping Pattern, Virtual Water, Yamchi Dam, VENSIM.

Received: August 20, 2016

Accepted: January 8, 2017

مدل سازی پویای سیستم سد مخزنی یامچی با اعمال الگوی بهینه کشت جهت تدوین سیاست بهره برداری

محمد رضا فتوکیان^{۱*}، نسیم صفاری^۲ و مهدی ضرغامی^۳

چکیده

با توجه به افزایش مصارف آب، تأثیرات تغییر اقلیم و موقعیت جغرافیایی ایران، مسأله مدیریت مخازن سدها بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق، بهره برداری از مخزن سد یامچی (اردبیل)، به کمک مدل پویای سیستم‌ها در محیط نرم افزار Vensim شبیه سازی شده است. در ادامه بر مبنای معیارهای مختلف از جمله آب مجازی، نقش محصول در تأمین نیازهای عمومی، سود مالی، قابلیت انبار (از لحاظ زمانی) و نیاز آبی محصولات، الگوی بهینه کشت برای منطقه مورد مطالعه پیشنهاد گردیده است. سپس عملکرد سد، با اعمال سیاست مدیریتی الگوی کشت بهینه در مدل پویای سیستم سد یامچی و بر اساس سه شاخص آسیب پذیری، برگشت پذیری و اطمینان پذیری مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می دهد که اعمال سیاست الگوی کشت بهینه پیشنهادی سبب کاهش مصرف آب بخش کشاورزی در منطقه مورد مطالعه می گردد و در نتیجه موجب کاهش کمبود کلی آب، در حدود ۴۳ درصد در مقایسه با کمبود آب با ادامه روند بهره برداری کنونی در بازه زمانی ۱۴۱۰-۱۳۸۸ خواهد شد. نتایج به دست آمده برای پایداری سیستم نیز، نشان دهنده افزایش شاخص های پایداری با اعمال الگوی بهینه کشت در مقایسه با شرایط فعلی می باشد و مقایسه نتایج نمایانگر ارزیابی مؤثر و کارآمد سیاست ارائه شده در تحقیق حاضر، در بهبود عملکرد مخزن سد می باشد.

کلمات کلیدی: شبیه سازی، پویای سیستم، الگوی بهینه کشت، آب مجازی، سد مخزنی یامچی، VENSIM.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۵/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۰/۱۹

1- M.Sc. in Environment, Dept. of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran. Email: m_fotookian92@ms.tabrizu.ac.ir

2- Ph.D. in Water Engineering, Dept. of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran

3- Prof., Dept. of Civil Engineering, University of Tabriz, Iran. Email: mzarghami@tabrizu.ac.ir

*- Corresponding Author

۱- کارشناس ارشد محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۲- دکتری مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان اسفند ۱۳۹۶ امکان پذیر است.

مجازی بر تنش آب محلی بر اساس تجارت محصولات دانه‌ای در کشور چین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از تأثیر قابل توجه جریان آب مجازی در تغییر توزیع منابع آب محلی می‌باشد به نحوی که باعث افزایش تنش آبی در مناطق صادرکننده و کاهش تنش در مناطق واردکننده محصولات خواهد بود.

به سبب پیچیدگی سیستم‌های منابع آب، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی با هدف تدوین روشی برای افزایش اطمینان بهره‌برداران در خصوص اتخاذ سیاست‌های سازگاری، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این مدل‌ها، شبیه‌سازی به کمک پویایی سیستم‌ها می‌باشد (Sterman, 2000). امروزه استفاده از مدل پویا، به دلیل وجود محدودیت‌های زیاد در بخش کشاورزی، برای بهبود راندمان تخصیص آب، کاربرد فراوانی پیدا کرده است (Elmahdi et al. 2007). از جمله تحقیقاتی که در آن‌ها از مدل پویایی سیستم‌ها جهت شبیه‌سازی سیستم منابع آب استفاده شده است، می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود.

Ahmad et al. (2000) عملکرد مخزن چند منظوره شلمونت را به صورت منفرد، در کشور کانادا با هدف مدیریت سیلاب به کمک مدل پویایی سیستم‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند پس از ساخت و تهیه مدل نهایی، شبیه‌سازی برای ۵ سیلاب عمده با تجدید نظر در قوانین بهره‌برداری و ایجاد تغییر در سرریز سد انجام شد که نتایج، کنترل سیلاب در بالادست و پایین دست مخزن را مفید ارزیابی کرد. Simonovic et al. (2004) منابع آب کشور کانادا را با رویکرد پویایی سیستم‌ها مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، دوازده سناریو در بخش‌های جمعیت، توسعه کشاورزی، تولید غذا، سرمایه‌گذاری مالی، تولید انرژی، منابع تجدیدناپذیر و آلودگی اعمال گردید که نتایج، وابستگی شدید توسعه آینده کانادا را به نگهداری کیفیت و تراز آب در سطح قابل قبول نشان دادند. (Salavitabar et al. 2006)، مدل تأمین و مصارف آب شهر تهران را با روش پویایی سیستم، جهت ارزیابی روند تأمین، مصارف و عوامل مؤثر بر آن، تهیه و توسعه دادند. (Madani and Marino 2009) مبحث مدیریت در حوضه آبریز زاینده‌رود واقع در بخش مرکزی ایران با آب هوای نیمه‌خشک را به کمک مدل پویا مورد بررسی قرار دادند. در نهایت پس از بررسی سناریوهای مختلف، تغییر در سیاست‌های اصلی اتخاذ شده در چند دهه اخیر به طرح‌ریزان منابع آب پیشنهاد گردید. (Sheikh Khozani et al. 2011) از مدل پویا جهت بررسی بهره‌برداری از مخزن چند منظوره دامغان واقع در استان سمنان برای افق ۱۴۱۰ بهره جستند. نتایج نشان دادند که با اجرای سیاست‌های مناسب بهره‌برداری نه تنها می‌توان نیازهای مورد نظر در حالت موجود در حد قابل قبول را تأمین نمود بلکه می‌توان توسعه نیازها را در

کامبود آب در چند دهه اخیر، مسأله تأمین آب را به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل محدودکننده در توسعه همه جانبه حوضه‌های آبریز در حال و آینده تبدیل کرده است. در این میان بخش کشاورزی با مصرف بیشترین آب قابل استحصال به عنوان عمده‌ترین مصرف‌کننده منابع آبی کشور به شمار می‌رود (Ardakanian and Sohrabi, 2006). براین اساس، کاهش مصرف و افزایش بهره‌وری آب در این بخش، باید بیش از سایر مصرف‌کنندگان آب مورد توجه قرار گیرد. یکی از راهکارهای مؤثر در راستای کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی، ارائه الگوی بهینه کشت با رویکرد آب مجازی می‌باشد.

یکی از راهکارهای نوین مدیریتی در عرصه مدیریت منابع آب، ظهور مفهوم آب مجازی می‌باشد. مفهوم آب مجازی نخستین بار توسط Allen، در دهه ۱۹۹۰ مطرح شد و به معنای میزان آبی است که به صورت مصرف نهان و آشکارا در طی مدت تولید یک کالای معین استفاده می‌گردد (Allen, 1998). با معرفی این رویکرد در مباحث مدیریت منابع آب، نیاز به محاسبه آب مجازی محصولات کشاورزی ضرورت یافت. در ایران مطالعات زیادی پیرامون جایگاه شاخص آب مجازی (Maknoon and Sohrabi, 2011) و مدیریت منابع آب کشور با رویکرد تجارت آب مجازی (Maknoon and Arbabi Bigdeli, 2009) صورت گرفته است. (Sabouhi and Soltani 2008) الگوی بهینه کشت را در سطح حوضه هریرود و کشف رود استان خراسان، با تأکید بر منافع اجتماعی (مزیت نسبی محصولات) و واردات خالص آب مجازی ارائه کردند. آنان نتیجه گرفتند که پیش از طراحی الگوی کشت، لازم است یک الگوی مناسب از صادرات و واردات محصولات کشاورزی طراحی گردد. (Rouhani et al. 2009) مقدار آب مجازی را برای برخی از محصولات مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان دادند که حتی یک تغییر در الگوی کشت می‌تواند به لحاظ فنی و اقتصادی از توجیه مناسبی برخوردار باشد. در همین راستا (Mekonnen and Hoekstra 2011) ردپای آب را برای برخی از محصولات کشاورزی در سطح جهانی به تفکیک آب سبز، آبی و قهوه‌ای محاسبه کردند. نتایج این بررسی کاهش ۱۲ و ۹ درصدی آب کشاورزی به ازای حداکثر عملکرد درآمد و کالری محصولات را نشان داد. همچنین، مطالعه (Ranjbar and Footokian 2014) در بررسی روند صادرات و واردات آب مجازی در سطح کشور ایران می‌تواند معیاری جهت کنترل صادراتی و وارداتی بودن محصولات منتخب بر اساس گزارشات FAO باشد. (Sun et al. 2016) تأثیر جریان آب

سیاستی‌هایی چون بهره‌برداری استاندارد از مخزن نیز در نظر گرفت. (Ghashghaie et al. (2014) تأثیر اولویت نیازها بر جریان پایین دست چهار سد: چراغ ویس، مرخز، کردکند و سنات در استان کردستان را به کمک مدل پویا مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی، از رویکرد پویا جهت فهم تقابل عوامل ایجادکننده مشکل در حوضه زاینده‌رود استفاده گردید. (Zarghami and AmirRahmani (2015) با استفاده از مدل پویایی سیستم، راهکارهای احیای دریاچه ارومیه را مورد بررسی قرار دادند. (Yang et al. (2015) یک روش ارزیابی جهت تعیین ظرفیت حوضه آبریز بر مبنای پویایی سیستم‌ها در شهر Tieling واقع در چین ارائه کردند که ترکیبی از اثرات و بازخوردهای مؤلفه‌های اقتصادی، اجتماعی و آب می‌باشد. (Kotir et al. (2016) برای مدیریت پایدار منابع آبی و توسعه کشاورزی حوضه رودخانه ولتا در کشور غنا، از مدل پویایی سیستم‌ها در محیط نرم‌افزار STELLA استفاده کردند. در این بررسی، سه سناریو توسعه زیرساخت‌های آبی، توسعه زمین‌های کشاورزی و اعمال شرایط خشکسالی بر مدل اعمال گردید، که بر طبق نتایج حاصل، علیرغم تأثیر مثبت سناریو اول، در نهایت همه سناریوها با محدودیت رشد مواجه خواهند شد. نتایج مطالعات انجام شده حاکی از توانایی و کاربرد گسترده مدل‌سازی به کمک پویایی سیستم‌ها در عرصه مدیریت منابع آب می‌باشد.

علی‌رغم تحقیقات فراوان صورت گرفته پیرامون کاربرد مدل پویایی سیستم‌ها در عرصه مدیریت منابع آب، به کاربرد مباحث نوین مدیریتی از جمله مفهوم آب مجازی در بهبود وضعیت سیستم به نسبت اهمیت موضوع، کمتر پرداخته شده است. در اکثر مطالعات انجام شده در تحقیقات قبلی در بررسی عملکرد مخزن سد، مدل بهینه‌سازی و

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه در این تحقیق، حوضه آبریز سد یامچی با وسعت ۷۵۰ کیلومتر مربع می‌باشد که در شمال غرب ایران و در استان اردبیل واقع شده است (شکل ۱). سد یامچی در حوضه آبریز ارس و بر روی رودخانه بالخلی جای از سرشاخه‌های اصلی رودخانه قره‌سو، احداث گردیده است. این سد با ظرفیت ۸۲ میلیون متر مکعب و حجم مفید ۸۰ میلیون متر مکعب در سال ۱۳۸۳ به بهره‌برداری رسیده است.

تراز آب زیرزمینی دشت اردبیل در بازه زمانی ۱۳۸۵-۱۳۶۷ بطور متوسط حدود ۱۸ سانتی‌متر در سال افت دارد.

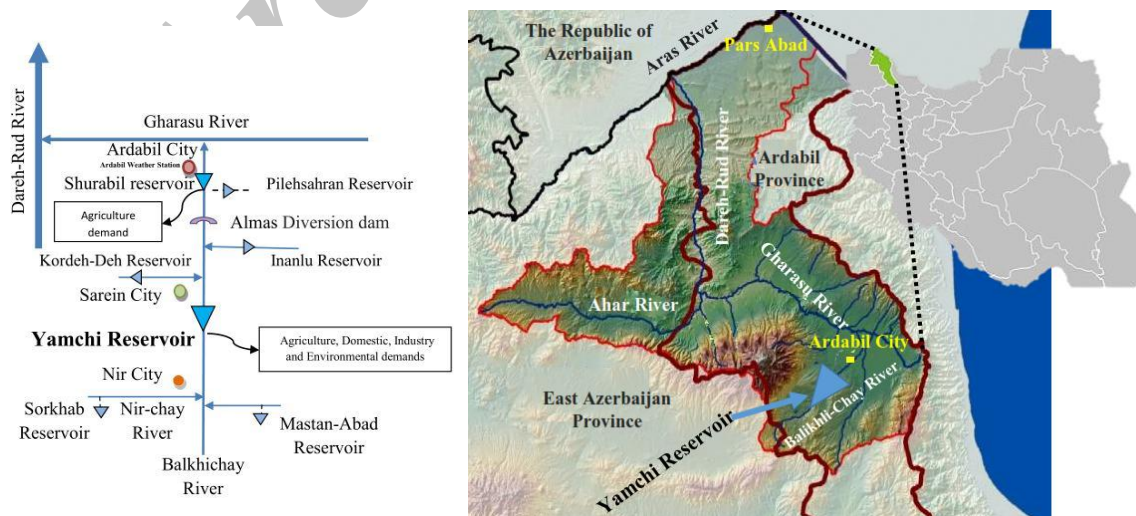


Fig. 1- Schematic Diagram of the Water Supply and Demand for Yamchi Reservoir (ARWMC, 2013)

شکل ۱- شماتیک منابع عرضه و تقاضای آب در سد یامچی (ARWMC, 2013)

تحقیقات منابع آب ایران، سال سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶

Volume 13, No. 3, Fall 2017 (IR-WRR)

منطقه‌ای دشت اردبیل، که در سال‌های اخیر کشت شده‌اند، تهیه گردید. سپس چهار محصول (تحت عنوان محصولات منتخب) براساس معیارهای ارائه شده در جدول ۱ با لحاظ وزن اختصاص یافته به هر معیار و به کمک روش جمع وزنی ساده پس از نرمال‌سازی و مشخص شدن ارزش هر یک از محصولات، انتخاب شدند.

لازم به ذکر است که تعیین محدوده امتیاز برای هر یک از معیارها، براساس دامنه تغییرات داده‌های موجود و با توجه به ویژگی‌های مختص به همان معیار انجام شده است. برای هر محدوده، این امتیازات منحصر به همان معیار می‌باشد و امتیاز بیشتر حاکی از اهمیت هر محصول از نظر معیار مورد نظر می‌باشد که در نهایت، محصولات نهایی با لحاظ تمام معیارها انتخاب می‌شوند. یکی از معیارهای انتخاب محصول، میزان آب مجازی می‌باشد که باید برای تمامی محصولات محاسبه گردد. در ادامه روند محاسبه آب مجازی و انتخاب محصولات به تفصیل بیان خواهد شد.

۲-۱-۲- آب مجازی

با تأکید بر اهمیت آب مجازی در مدیریت منابع آب کشور، در این تحقیق تلاش شده است تا محاسبه آب مجازی به عنوان یکی از معیارهای انتخاب محصولات بهینه قابل کشت در حوضه مورد توجه قرار گیرد. در این مرحله نیاز آبی محصولات جهت محاسبه آب مجازی، با استفاده از نرم افزار NETWAT تعیین می‌شود.

(Daneshvar Vousoughi et al., 2012) سد یامچی در مرحله مطالعاتی برای تأمین نیاز کشاورزی و آبیاری در حدود ۱۵۰۰۰ هکتار اراضی منطقه طراحی شده بود ولی در مراحل بعدی به دلیل کمبود آب شرب شهر اردبیل و نیز حفظ آبخوان دشت اردبیل، کاربری این سد به کشاورزی، شرب، صنعت و نیاز زیست محیطی تغییر یافته است. این سد در حال حاضر تأمین کننده بیش از ۲۰ میلیون متر مکعب از آب شرب شهرهای توریستی اردبیل و سرعین (جمعیتی در حدود ۱۶۰۰۰۰ نفر) می‌باشد. تغییر کاربری و افزایش نیازهای آبی مختلف حوضه، باعث ایجاد مشکلاتی در روند بهره‌برداری از مخزن این سد شده است.

ساختار روش تحقیق در مطالعه حاضر، در شکل ۲ نشان داده شده است. به طور خلاصه، پس از تعیین محصولات قابل کشت در منطقه، محصولات اصلی حوضه امتیازدهی و محصولات بر مبنای معیارهای مورد نظر و با لحاظ محدودیت‌های سیستم انتخاب می‌گردد. سپس سطح بهینه زیر کشت هر یک از محصولات تعیین می‌گردد. با اعمال الگوی ارائه شده در مدل پویای مخزن یامچی، پایداری سیاست پیشنهادی، ارزیابی می‌گردد.

۲-۲- انتخاب محصولات

در ابتدا با همکاری سازمان جهاد کشاورزی و آب منطقه‌ای استان اردبیل، مجموعه‌ای از ۲۴ محصول عمده قابل کشت و سازگار با شرایط

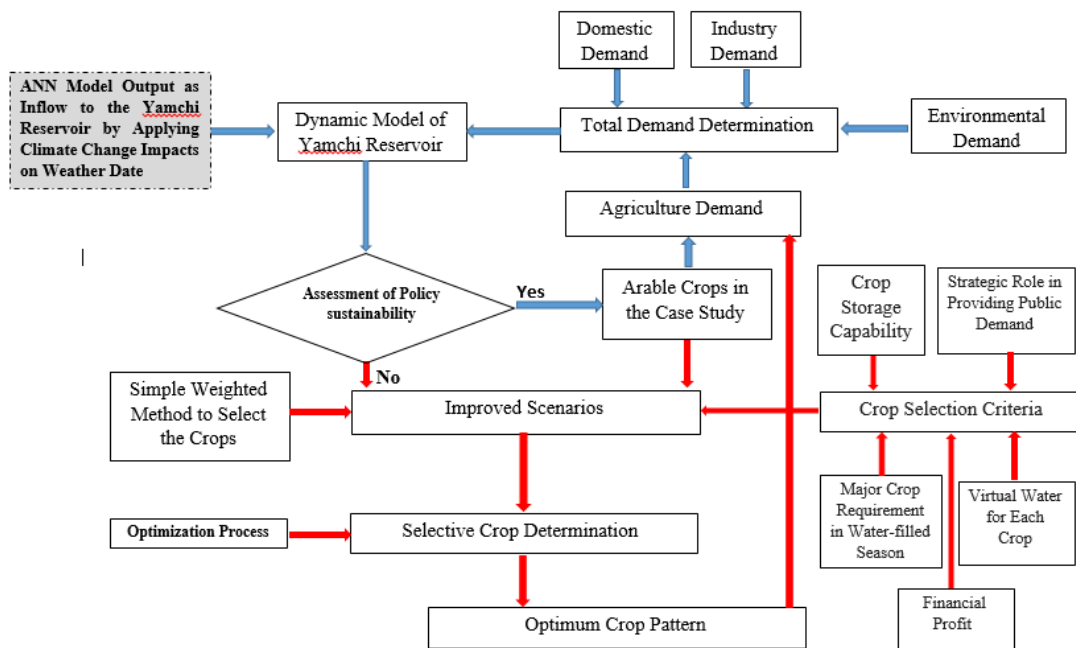


Fig. 2- Flowchart of the Study

شکل ۲- فلوچارت تحقیق

Table 1- Criteria and Value of Each Criterion

جدول ۱- معیارها و میزان امتیاز هر معیار

Criteria	Range of Value	Weight of Criterion	Definition
Virtual Water for Each Crop	1-9	4	The higher the virtual water, the less the Value
Strategic Role in Providing Public Demand	1-5	5	The more the Crops meet the Basic Public needs, the more the Value
Financial Profit	1-10	3	The Higher the Economic Efficiency Results, the Higher the Value.
Crop Storage Capability	1-5	3	Products with more Storage Capacity have more Privileges.
Major Crop Requirement in High-Water Season	1-3	2	The Value Determined Due to the Crop Water Requirement and Seasonal Irrigation.

۲-۲-۳- بهینه‌سازی

در این بررسی به منظور تعیین سطح بهینه زیر کشت محصولات منتخب، از بهینه‌سازی خطی استفاده شده است. برای بهینه‌سازی الگوی کشت منطقه، تابع سود خالص اقتصادی محاسبه و به عنوان تابع هدف بهینه‌سازی تعریف شده است. محدودیت‌های مسأله بهینه‌سازی شامل حداقل و حداکثر سطح زیرکشت هر یک از محصولات حوضه، محدودیت در میزان منابع آب تخصیص داده شده به بخش کشاورزی و کل سطح زیر کشت تحت آبیاری سد و شبکه می‌باشد. مدل بهینه‌سازی سود حاصل از کشاورزی با رابطه (۴) ارائه شده است.

$$\begin{aligned} \text{Max } B(x) &= \text{Max } \sum_{i=1}^4 (b_i Y_i - C_i) A_i \\ \text{Subject to:} \\ A_{i\text{Min}} &\leq A_i \leq A_{i\text{Max}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^4 A_i \leq A_{\text{Total}}$$

$$\sum_{i=1}^4 A_i \cdot w_i \leq W_{\text{Total}}$$

b_i ، C_i ، Y_i و A_i به ترتیب بیان کننده قیمت فروش عمده تک محصول (ریال)، سود نهایی (ریال)، هزینه تولید (ریال)، عملکرد و سطح زیر کشت از کل محصولات کشت شده (هکتار) در سال کشت محصول در استان اردبیل می‌باشد. همچنین $A_{i\text{Min}}$ ، $A_{i\text{Max}}$ و W_{Total} بیان کننده حداکثر سطح قابل کشت (هکتار)، حداقل سطح قابل کشت (هکتار)، نیاز آبی گیاه (مترمکعب بر هکتار) و کل آب قابل تخصیص (مترمکعب) سالانه به بخش کشاورزی می‌باشد. با هدف تأمین حداقل نیاز منطقه و مشکل در فروش محصولات مازاد بر نیاز، برای هر محصول با توجه به اطلاعات موجود در منطقه و نظر کارشناسان، مقدار حداقل و حداکثری در محدودیت‌های مسأله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. در این

در ادامه متوسط عملکرد و سطح زیر کشت محصولات قابل کشت در دشت اردبیل و منطقه تحت آبیاری شبکه سد یامچی، تهیه شده و مقدار آب مجازی محصولات قابل کشت، با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌گردد (Rouhani et al., 2009; Hoekstra et al., 2011; Dehghan Menshadi et al., 2015). لازم به ذکر است در بررسی حاضر از مفهوم آب مجازی برای تولید محصولات کشاورزی در مزرعه بر اساس نیاز آبی محصولات استفاده شده است، بنابراین مراحل تولید، برداشت و انجام سایر فرآیندهای عرضه محصول به بازار، در قالب ردپای آب مطرح می‌گردد.

$$VWC_c = \frac{CWR_{C,j}}{\bar{Y}_{C,j}} \quad (1)$$

$$\bar{Y}_c = \frac{\sum_{j=1}^n Y_{C,j} \times A_{C,j}}{TA_{C,j}} \quad (2)$$

c و j به ترتیب بیان کننده نوع محصول کشت شده و سال کشت محصول می‌باشند. $VWC_{c,j}$ مقدار آب مجازی محصولات، $\bar{Y}_{C,j}$ متوسط عملکرد هر محصول (ton/ha)، $CWR_{C,j}$ نیاز آبی در سطح منطقه برای هر محصول (m^3/ha)، $Y_{C,j}$ عملکرد هر محصول (ton/ha)، $A_{C,j}$ سطح زیر کشت محصول هر منطقه (ha) و $TA_{C,j}$ کل سطح زیر کشت منطقه (ha) می‌باشند.

۲-۲-۲- روش جمع وزنی ساده

میانگین امتیاز هر گزینه (F_i) در روش جمع وزنی ساده، به صورت معادله زیر بیان می‌شود که در آن هر گزینه i از دید معیار j ارزشی به اندازه a_{ij} دارد و n تعداد معیارها است. از طرف دیگر هر معیار j یک وزن نسبی به اندازه u_j دارد.

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_j a_{ij}}{\sum_{j=1}^n u_j} \quad (3)$$

می‌یابد. عناصری چون تولد، مرگ و میر و مهاجرت موجب فرآیندی پویا در جمعیت می‌شوند که به تغییر در ساختار جمعیت و در نتیجه منجر به افزایش تقاضای آب نیز می‌گردد.

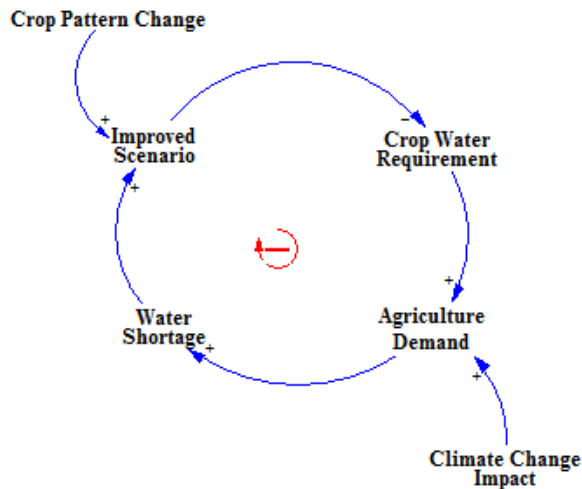


Fig. 3- Causal Loop Diagram of Agriculture Demand

شکل ۳- حلقه علت و معلولی نیاز آب کشاورزی

در این بررسی، نرخ خالص رشد سالانه جمعیت به میزان ۱/۴۴ درصد و سرانه مصرف در حالت پایه سال ۱۳۸۸ به میزان ۱۹۴ لیتر در روز برای هر نفر و همچنین ضریب پیک روزانه ۱/۶ بر اساس اطلاعات اداره آب منطقه‌ای استان اردبیل (Abran Consulting Engineers, 2013) در نظر گرفته شده است. مقدار تقاضای آب شرب با رابطه (۶) تعریف شده است.

$$W_D = P \cdot q \cdot PF \quad (6)$$

W_D ، P ، q ، PF : به ترتیب بیان کننده ضریب بیک مصرفی، سرانه مصرف به ازای هر نفر، جمعیت تحت پوشش و نیاز شرب می‌باشند.

۳-۱-۳-۲- تقاضای آب صنعت

تقاضای صنعت، براساس اظهارات مدیران بهره‌برداری اداره آب منطقه‌ای استان اردبیل، از سال ۱۴۰۰ آغاز خواهد شد. مقدار تقاضای بخش صنعت، سالانه یک میلیون مترمکعب، افزایش خواهد یافت.

۳-۱-۳-۲- تقاضای آب زیست محیطی

مطابق بررسی‌های انجام شده، مطالعه‌ای پیرامون تعیین نیاز زیست محیطی رودخانه‌های حوضه و پایین دست سد مورد مطالعه صورت گرفته است و تنها اطلاعات در دسترس داده‌های تاریخی میزان آب رهاسازی شده از مخزن سد می‌باشد. بنابراین، در این تحقیق، مقادیر تاریخی به عنوان نیاز زیست محیطی لحاظ گردید.

تحقیق، نرم‌افزار GAMS جهت بهینه‌سازی سطح زیر کشت محصولات منتخب استفاده شده است.

۳-۲- مدل‌سازی پویای بهره‌برداری از مخزن

در این بخش، توسعه مدل پویای سیستم سد یامچی با بیان حلقه‌های اصلی و زیر مدل‌های سیستم تشریح می‌گردد. در این بررسی، با هدف تدوین سیاست‌ها و طرح‌های توسعه موجود در حوضه مورد مطالعه، سال ۱۴۱۰ به عنوان افق طرح مدل انتخاب شده است. مدل حوضه یامچی شامل سه زیر مدل اصلی تقاضای آب، کمبود آب و مخزن سد می‌باشد.

۱-۳-۲- زیر مدل تقاضای آب

زیر مدل تقاضای آب برای حوضه سد یامچی، شامل چهار بخش نیاز کشاورزی، نیاز شرب، نیاز صنعت و نیاز زیست محیطی می‌باشد. در ادامه، هر یک از زیرمدل‌ها تشریح می‌گردد.

۱-۱-۳-۲- تقاضای آب کشاورزی

تقاضای آب کشاورزی، اصلی‌ترین نیاز آبی در حوضه مورد مطالعه می‌باشد. در این زیر مدل، سطح زیر کشت، نیاز آبی محصولات، راندمان آبیاری و تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز آبی به عنوان عوامل مؤثر بر تقاضای نیاز کشاورزی، لحاظ شده است. الگوی کشت در دو حالت سطح زیر کشت فعلی و الگوی بهینه کشت بدست آمده از مدل بهینه‌سازی، در نظر گرفته شده است. با افزایش میزان تقاضای کشاورزی، میزان کمبود آب افزایش می‌یابد و سیاست‌های مدیریتی جهت کاهش تقاضای کشاورزی فعال می‌شود. با توجه به کاهش کمبود آب با تغییر الگوی کشت، حلقه منفی تشکیل می‌گردد.

نیاز کشاورزی با استفاده از رابطه ۵ محاسبه می‌گردد:

$$W_A = \sum_{i=1}^n \frac{w_i \cdot A_i \cdot CC_i}{I_i} \quad (5)$$

W_A و w_i ، A_i ، I_i ، CC_i : به ترتیب بیان کننده تأثیر تغییر اقلیم بر نیاز آبی محصولات، راندمان آبیاری، سطح زیر کشت محصولات، نیاز آبی محصولات و مقدار کل نیاز کشاورزی می‌باشند. بر اساس مطالعه صورت گرفته در منطقه، نیاز آبی محصولات کشاورزی در اثر تأثیرات تغییر اقلیم، ۶ درصد افزایش خواهد یافت (Zarghami et al., 2015).

۲-۱-۳-۲- تقاضای آب شرب

نیاز شرب، متأثر از میزان جمعیت، سرانه مصرف به ازای هر نفر و ضریب پیک روزانه و ساعتی می‌باشد. جمعیت متغیر اصلی مرتبط با نیاز آب شرب می‌باشد و با افزایش جمعیت، مقدار نیازهای آبی افزایش

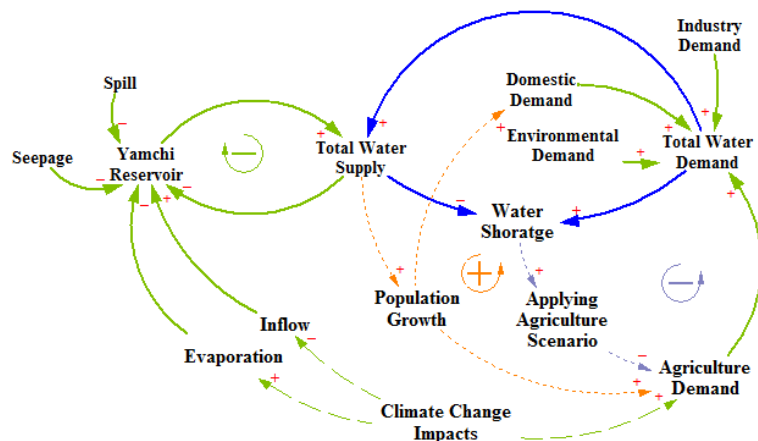


Fig. 4- Causal Loop diagram of the System

شکل ۴- نمودار علت و معلولی حاکم بر کل مدل

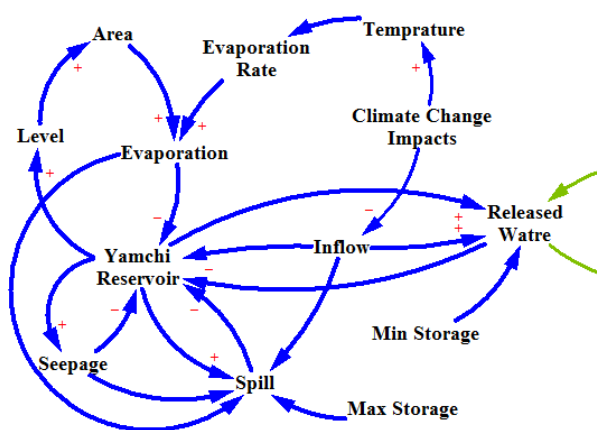


Fig. 5- Causal Loop Diagram of Yamchi Reservoir Operation

شکل ۵- حلقه علت و معلولی عملکرد مخزن سد یامچی

۴-۲- صحت‌سنجی مدل

پس از تعیین تمامی متغیرها و استخراج روابط ریاضی حاکم بر پارامترهای هر زیر مدل، نمودار ذخیره جریان (شکل ۸) با استفاده از نرم افزار Vensim که یک محیط مدل‌سازی شیء‌گرا می‌باشد، ترسیم گردید.

برای ارزیابی عملکرد مدل، نوسانات سطح آب مخزن در مدل سد یامچی شبیه‌سازی شده و نتایج مدل با مقادیر واقعی مقایسه گردیده است. مدل سد یامچی با داده‌های تاریخی ۱۳۸۲-۱۳۹۹ صحت‌سنجی شده است. شکل ۷، نوسانات سطح آب، در سری زمانی تاریخی و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. به منظور ارزیابی عملکرد مدل شبیه‌سازی سیستم سد یامچی، از ضریب تعیین R^2 و معیار نش-ساتکلیف استفاده شده است (Ashofteh et al. 2014).

۲-۳-۲- زیر مدل مخزن سد

حجم مخزن سد یامچی تحت تأثیر پارامترهای جریان ورودی، میزان تبخیر، مقدار سرریز، میزان نشت و میزان آب تنظیمی از خروجی سد می‌باشد. جریان ورودی به مخزن سد نیز از تغییر اقلیم تأثیر می‌پذیرد. جریان تنظیمی با توجه به کل نیازهای آبی، مقدار ذخیره مخزن، حداقل ذخیره مخزن و مقدار جریان ورودی به مخزن سد بر مدل تعریف می‌گردد. ورودی مخزن با استفاده از مدل شبکه عصبی با اعمال تأثیرات تغییر اقلیم و همچنین برآورد میزان تبخیر با استفاده از رابطه USBR، در مدل پویای سد یامچی اعمال گردید (Zarghami et al. 2016). شکل ۵، نشان دهنده حلقه علت و معلولی مربوط به مخزن سد یامچی می‌باشد.

۲-۳-۳- زیر مدل کمبود آب

در این مدل، رابطه بین تأمین آب و تقاضا با متغیر کمبود آب برقرار می‌گردد و اختلاف بین تقاضا و تأمین آب با متغیر کمبود تعریف شده است. عوامل مؤثر بر تغییرات بیلان آب، میزان عرضه و مصرف آب می‌باشد. حلقه علت و معلولی مدل کمبود آب در شکل ۶ نشان داده شده است.

۲-۳-۴- زیر مدل کمبود آب

در این مدل، رابطه بین تأمین آب و تقاضا با متغیر کمبود آب برقرار می‌گردد و اختلاف بین تقاضا و تأمین آب با متغیر کمبود تعریف شده است. عوامل مؤثر بر تغییرات بیلان آب، میزان عرضه و مصرف آب می‌باشد. حلقه علت و معلولی مدل کمبود آب در شکل ۶ نشان داده شده است.

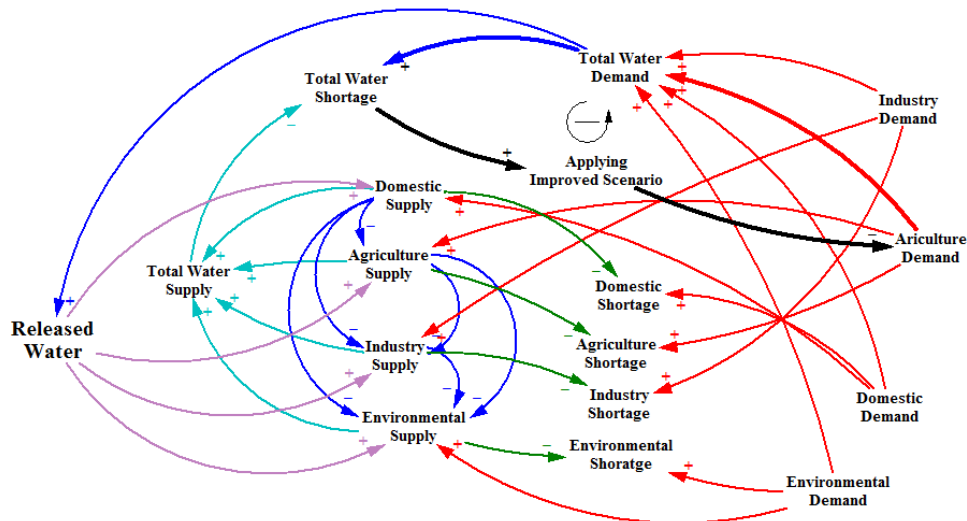


Fig. 6- Causal Loop Diagram of Yamchi Reservoir Shortage
 شکل ۶- حلقه علت و معلولی کمبود آب سد مخزنی یامچی

علاوه بر اطلاعات سودمندی که برای تصمیم‌گیران و تصمیم‌سازان دارد، امکان پیش‌بینی سیستم در شرایط شکست را نیز فراهم می‌آورد (Shafie Jood et al., 2013). این شاخص‌ها همچنین در عرصه مدیریت منابع آب به کمک مدل پویایی سیستم‌ها استفاده شده‌اند (Felfelani et al., 2013).

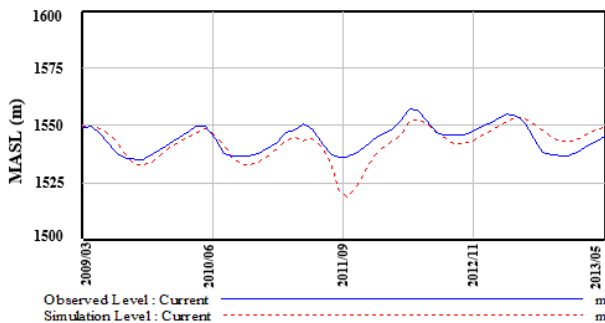


Fig. 7- The Validation of Water Level in Yamchi Reservoir (2009-2013)

شکل ۷- نمودار صحت‌سنجی سطح آب مخزن یامچی
 (۱۳۹۲-۱۳۸۸)

به طور خلاصه اطمینان‌پذیری نشان دهنده تعداد شکست یا موفقیت سیستم در یک بازه زمانی مشخص می‌باشد و به صورت احتمال مطلوبیت یا شکست بیان می‌شود، برگشت‌پذیری نشان دهنده احتمال برگشت یک سیستم به حالت مطلوب بعد از یک شکست می‌باشد و آسیب‌پذیری شدت شکست‌های مشاهده شده را نشان می‌دهد. همچنین Kjeldsen and Rosbjerg (2001) از ترکیب این معیارها برای ارزیابی پایداری طرح‌های منابع آب استفاده کردند. در این بررسی

ضریب تعیین، بیانگر میزان احتمال همبستگی میان دو دسته داده شده و داده‌های مشاهده‌ای می‌باشد (رابطه ۷). این شاخص همواره بین صفر و یک متغیر می‌باشد. معیار نش- ساتکلیف که دامنه تغییرات آن از منفی بی‌نهایت تا یک را شامل می‌شود، از رابطه ۸ بدست می‌آید. هر چه این معیار به عدد یک نزدیک‌تر باشد صحت‌سنجی مدل دقیق‌تر خواهد بود. مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۵، حاکی از عملکرد قابل قبول مدل می‌باشد.

$$R^2 = \frac{[\sum(y_{m,i} - \bar{y}_{m,i})(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})]^2}{\sum(y_{m,i} - \bar{y}_{m,i})^2 \sum(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})^2} \quad (7)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(y_{m,i} - y_{s,i})^2}{\sum(y_{s,i} - \bar{y}_{s,i})^2} \quad (8)$$

در روابط بالا $y_{m,i}$ مقدار داده محاسباتی و $y_{s,i}$ نمایانگر داده مشاهده‌ای می‌باشد. $\bar{y}_{m,i}$ و $\bar{y}_{s,i}$ مقدار میانگین داده‌های محاسباتی و مشاهده‌ای می‌باشد.

مقادیر معیار ارزیابی برای متغیر سطح آب مخزن برای R^2 و NSE به ترتیب ۰/۷۲ و ۰/۷۳ محاسبه گردید که نسبتاً قابل قبول می‌باشد همچنین با توجه به انطباق مناسب تراز مخزن مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده (شکل ۷)، نتایج قابل قبولی را جهت صحت‌سنجی مدل نشان می‌دهد.

۲-۵- معیارهای ارزیابی پایداری سیستم تأمین آب تحت اثر الگوی کشت اعمالی

(1982) Hashimoto et al. از دیدگاه سه معیار اطمینان‌پذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری عملکرد سیاست‌های بهره‌برداری را بررسی کردند. بهره‌گیری از این شاخص‌ها در کنار نتایج مدل‌سازی

نیز، این معیارها (جدول ۲) جهت محاسبه پایداری سیاست پیشنهادی برای سیستم، به کار برده شده است.

۲-۶- ارزیابی و تحلیل عدم قطعیت

کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی مستلزم داشتن اطلاعاتی درباره عدم قطعیت آن‌ها با توجه به عدم قطعیت پارامترهای ورودی می‌باشد. با ارزیابی عدم قطعیت‌های مدل، اطمینان و اعتماد بیشتری در خصوص تصمیم‌گیری‌های ناشی از کاربرد این معادلات حاصل می‌شود (Hope et al., 2004). در این مطالعه، با احتساب عدم قطعیت در پارامترهای ورودی مدل با کمک مدل شبیه‌ساز مونت کارلو، قابلیت اطمینان مدل در بازه‌های اطمینان مختلف تعیین شده است. روش مونت کارلو از مهم‌ترین روش‌های تحلیل عدم قطعیت است که تحلیل عدم قطعیت در این روش، بر اساس تولید اعداد تصادفی است. هر متغیر با استفاده از اعداد تصادفی تولید شده و تابع توزیع احتمال مربوطه، شبیه‌سازی و سپس متناظر با آن‌ها خروجی مدل محاسبه می‌شود. عدم قطعیت پارامترهای خروجی از طریق محاسبه شاخص‌های آماری نظیر میانگین، انحراف معیار، دامنه، ضریب تغییرات و یا تعیین تابع توزیع آن نمایش داده می‌شود (Skebede et al., 2005).

در مدل‌سازی پویایی سیستم سد یامچی سعی شده است تا عدم قطعیت‌های موجود در پارامترها یا معادلات با انجام تحلیل حساسیت مورد بررسی دقیق‌تری قرار بگیرد و درک بهتری از عملکرد مدل تحت عدم قطعیت‌های محتمل به دست آید. با تغییر پارامترهایی که دارای عدم قطعیت بیش‌تری هستند، عملکرد مخزن تحت تغییرات این پارامترها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در مدل‌سازی پویایی سد یامچی، بیشترین عدم قطعیت در پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی وجود

دارد. این متغیرها به صورت مستقیم بر جریان ورودی به مخزن سد تأثیرگذار می‌باشد. بر این اساس، تغییرات نتایج مدل نسبت به تغییر در جریان ورودی مورد تحلیل واقع شده است. براساس داده‌های آماری موجود برای متغیر جریان ورودی، توزیع نرمال با میانگین ۴/۵ و انحراف از معیار ۲/۷ در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج و بحث

پس از تعیین محصولات قابل کشت در حوضه سد یامچی، مقدار آب مجازی هر یک بر اساس روابط ارائه شده محاسبه گردید. در ادامه هزینه آب برای کشت هر محصول تعیین شد. این مقدار بیانگر درآمد حاصل از کشت محصولات می‌باشد که می‌تواند جهت قیمت‌گذاری، فروش آب و تشکیل بازار آب محلی مد نظر قرار گیرد.

با اعمال محصولات فوق در مدل پویایی مخزن یامچی، با توجه به کاهش ورودی به مخزن تحت تأثیر تغییر اقلیم و افزایش نیاز در بخش‌های شرب، کشاورزی و صنعت، افزایش ۸۷ درصدی میانگین کمبودهای ماهانه از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۱۰ نسبت به سال‌های ۱۳۸۸ تا ۱۳۹۳ را شاهد خواهیم بود. کمبود آب در بخش کشاورزی در طول بازه زمانی ۱۳۸۸ تا ۱۴۱۰ به میزان ۸۰ درصد کمبود کل را تشکیل می‌دهد. پس از امتیازدهی بر مبنای جدول ۱ و رتبه‌بندی براساس روش جمع وزنی ساده چهار محصول گندم، سیب زمینی، یونجه و جو به عنوان اولویت کشت در زمین‌های تحت آبیاری شبکه سد یامچی پیشنهاد شدند. در شرایط حاضر، بیشتر از ۸۵ درصد سطح زیر کشت اراضی منطقه به این چهار محصول اصلی اختصاص یافته است. نتایج مدل بهینه‌سازی و سطح بهینه زیر کشت هر یک از محصولات استراتژیک و اساسی در جدول ۴ نشان داده شده است.

Table 2- Sustainability Criteria to Evaluate the Dynamic Model of Yamchi Reservoir

جدول ۲- معیارهای پایداری جهت ارزیابی مدل پویایی سد یامچی

Performance Criteria	Equation
Reliability	$Rel = 1 - \frac{\text{number of satisfactory values}}{\text{number of total time series}}$
Resiliency	$Res = \frac{\text{number of times a satisfactory value follows an unsatisfactory value}}{\text{number of unsatisfactory values}}$
Vulnerability	$Vul = \frac{\text{sum of the positive values of difference between satisfactory values and threshold value}}{\text{number of unsatisfactory values}}$
Sustainability	$\text{Sustainability} = Rel \times Res \times \left[1 - \frac{\text{Vulnerability}}{\sum \text{Vulnerability}} \right]$

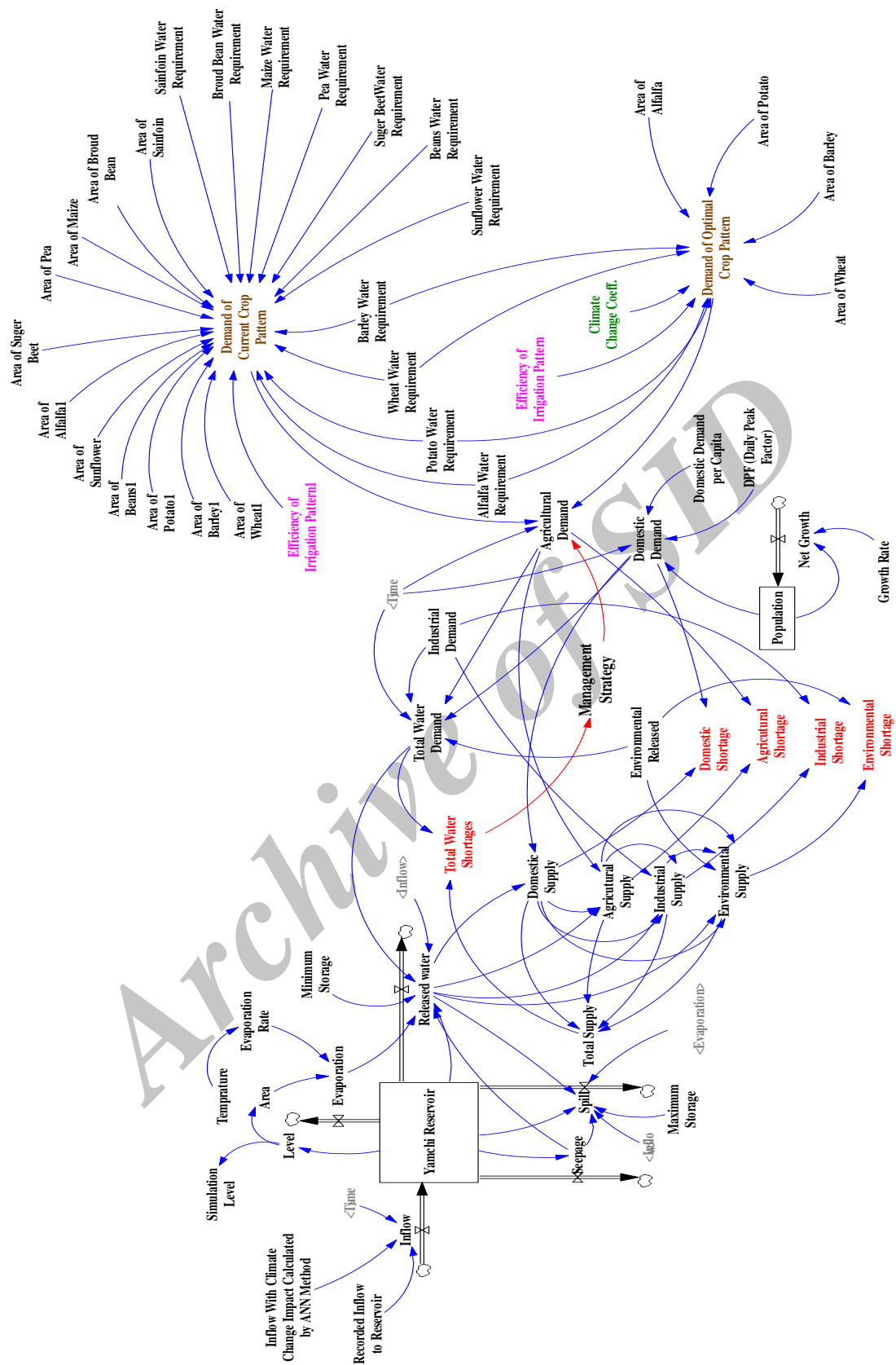


Fig. 8- Stock- Flow Diagram of Yamchi Reservoir

شکل ۸- مدل جریان - ذخیره سد مخزنی یامچی

تحقیقات منابع آب ایران، سال سیزدهم، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۶
 Volume 13, No. 3, Fall 2017 (IR-WRR)

می‌شود. نتایج اعمال الگوی کشت بهینه در بخش بعدی تشریح می‌گردد.

۳-۱- نتایج اعمال الگوی بهینه کشت

در این مرحله، الگوی بهینه کشت، در مدل پویای سد یامچی اعمال گردید. نتیجه اعمال الگوی بهینه کشت در کاهش هر یک از کمبودها در بازه زمانی ۱۳۹۵ الی ۱۴۱۰ در شکل ۹ ارائه شده است. با اعمال الگوی بهینه کشت و تخصیص آب به محصولاتی با نیاز آبی کمتر و سودآوری بیشتر میزان مصرف آب کاهش یافت و با کاهش در تقاضا، از میزان کمبودها نیز کاسته شد. شکل ۱۰ کاهش میزان و شدت کمبود کلی و تعویق زمان وقوع آن را نشان می‌دهد.

به طوری که با اعمال الگوی بهینه کشت، کمبود کلی در حدود ۴۳ درصد کاهش خواهد یافت. جدول ۵ بیانگر میزان کاهش کمبود هر بخش با اعمال الگوی بهینه کشت نسبت به ادامه روند بهره‌برداری کنونی می‌باشد.

محاسبه سود در هر دو حالت شرایط فعلی و شرایط بهینه براساس قیمت فروش و هزینه های تولید سال ۹۲-۹۱ در نظر گرفته شده است. محدودیت منابع آب در صورت اصلاح الگوی کشت سبب کاهش سطح زیر کشت شده است. با کاهش ۵ درصد در سطح زیر کشت از طریق ارائه الگوی بهینه کشت و شاهد افزایش سود به میزان ۱۴۷ میلیون ریال با تخصیص آب کمتر خواهیم بود. در واقع الگوی پیشنهادی، با اصلاح الگوی کشت و کاهش سطح زیر کشت، سبب کاهش مصرف آب و کاهش کمبودها شده است. مطمئناً بررسی اصلاح و تغییر الگوی کشت در یک منطقه نیازمند مطالعات جامع و بررسی‌های دقیق تر با در نظر گرفتن مسائل مختلف اجرایی، اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی می‌باشد.

سطح زیر کشت بهینه با در نظر گرفتن چهار محصول انتخاب شده، از سال ۱۳۹۲ تا افق طرح ۱۴۱۰، در مدل پویایی سیستم سد یامچی اعمال گردید. الگوی کشت بهینه، سبب کاهش کمبود در بخش کشاورزی گردید و به دلیل ماهیت دینامیکی سیستم بهره‌برداری از مخزن، اعمال این سیاست، موجب کاهش کمبود در سایر بخش‌ها نیز

Table 3- Virtual Water for the Selected Crops

جدول ۳- محصولات منتخب و مقدار آب مجازی

Crops	Virtual Water (m ³ /kg)	Mean Water Requirement (m ³ /ha)	Performance (kg/ha)	Sales Price (Rial(IR)/kg)	Water Cost (Rial(IR)/m ³)	Value of Each Crop
Wheat	0.62	2560	4145	14500	23477	0.74
Barley	0.52	1860	3600	9200	17806	0.64
Maize	1.02	6050	5907	9600	9374	0.44
Forage Corn	0.09	4040	43746	1100	11911	0.62
Peas	3.15	3480	1104	22200	7046	0.48
Bean	2.79	2900	1041	21000	7538	0.54
Potato	0.18	5360	29120	3600	19558	0.63
Onion	0.18	5950	32992	2400	13308	0.46
Tomato	0.14	4770	34911	6000	43913	0.51
Watermelon	0.09	3200	36208	3500	39603	0.53
Cucumber	0.23	3500	15125	5000	21607	0.39
Beet	0.18	7970	43327	2700	14678	0.53
Apple	0.62	4960	7953	6600	10582	0.39
Grape	0.99	4840	4907	10000	10139	0.28
Apricot	0.72	4130	5758	10000	13942	0.25
Pear	0.83	4960	5956	4500	5404	0.22
Sour cherry	1.54	4570	2975	8500	5534	0.23
Cherry	1.27	4570	3612	9000	7114	0.25
Walnut	6.64	5760	868	220000	33140	0.44
Peach	0.76	6890	9061	8500	11178	0.25
Cotton	2.01	5540	2754	25500	12675	0.52
Sunflower	3.37	4290	1272	21500	6377	0.44
Melon	0.17	3710	21791	3500	20558	0.38
Soya	3.61	6580	1824	19700	5462	0.46
Alfalfa	0.89	5540	6197	8000	8949	0.63

Table 4- Optimum Crop Pattern and the Profit of Each Crop (10⁶ Rials/ha)

جدول ۴- سود و سطح زیر کشت بهینه محصولات شبکه یامچی (میلیون ریال / هکتار)

Crops	Mean area of tillage(ha)	Optimum Crop Pattern(ha)	Profit of Mean area of tillage(10 ⁶ Rials)	Profit of Optimum Crop Pattern(10 ⁶ Rials)
Wheat	1750	2000	41116.65	1169.5
Potato	2564	2534	48543.42	55477.94
Alfalfa	390	200	595696.72	58899.41
Barley	352	100	645141	3308.54
Sum	5056	4834	118708.20	118855.39

روند بهره‌برداری کنونی، مقایسه شده است. حجم مطلوب مخزن برابر ۱۰ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شده است. با ادامه شرایط فعلی بهره‌برداری، حجم ذخیره مخزن روند نزولی را تجربه خواهد کرد و در مرداد ماه سال ۱۳۹۸، قادر به تامین حداقل نیازها هم نخواهد بود.

اعمال الگوی بهینه کشت با ورود مفهوم آب مجازی، با به تعویق انداختن کمبودها به مدت تقریباً پنج سال نسبت به وضعیت فعلی (خرداد ۱۳۹۸ الی اردیبهشت ۱۴۰۳) و افزایش شاخص پایداری سیستم تا ۰/۱۵، از جمله سیاست‌های مفید در بهبود وضعیت سیستم در تأمین تقاضا، ارزیابی می‌شود. این رویکرد با مذاکرات بین مدیران بهره‌برداری از مخزن و ذینفعان به خصوص کشاورزان با دادن تسهیلات و امکانات لازم، قابل اجرا می‌باشد.

بر طبق نتایج بدست آمده، در شرایط اصلاح الگوی کشت، کمبود کشاورزی و زیست محیطی به ترتیب با ۴۹ و ۴۷ درصد، بیشترین تغییر را در مقایسه با شرایط فعلی دارا می‌باشند و با اعمال الگوی بهینه کشت، شاهد کاهش قابل توجه کمبود در بخش کشاورزی خواهیم بود. همچنین لازم به ذکر است که اعمال الگوی بهینه کشت در بخش کشاورزی و اثرگذاری چشمگیر آن در کاهش سایر کمبودها حاکی از ماهیت دینامیکی مدل ارائه شده می‌باشد.

۳-۲- بررسی پایداری الگوی بهینه کشت

در تحقیق حاضر، برای بررسی پایداری سیاست تغییر الگوی کشت، حجم ذخیره مخزن در شرایط الگوی بهینه کشت و در شرایط ادامه

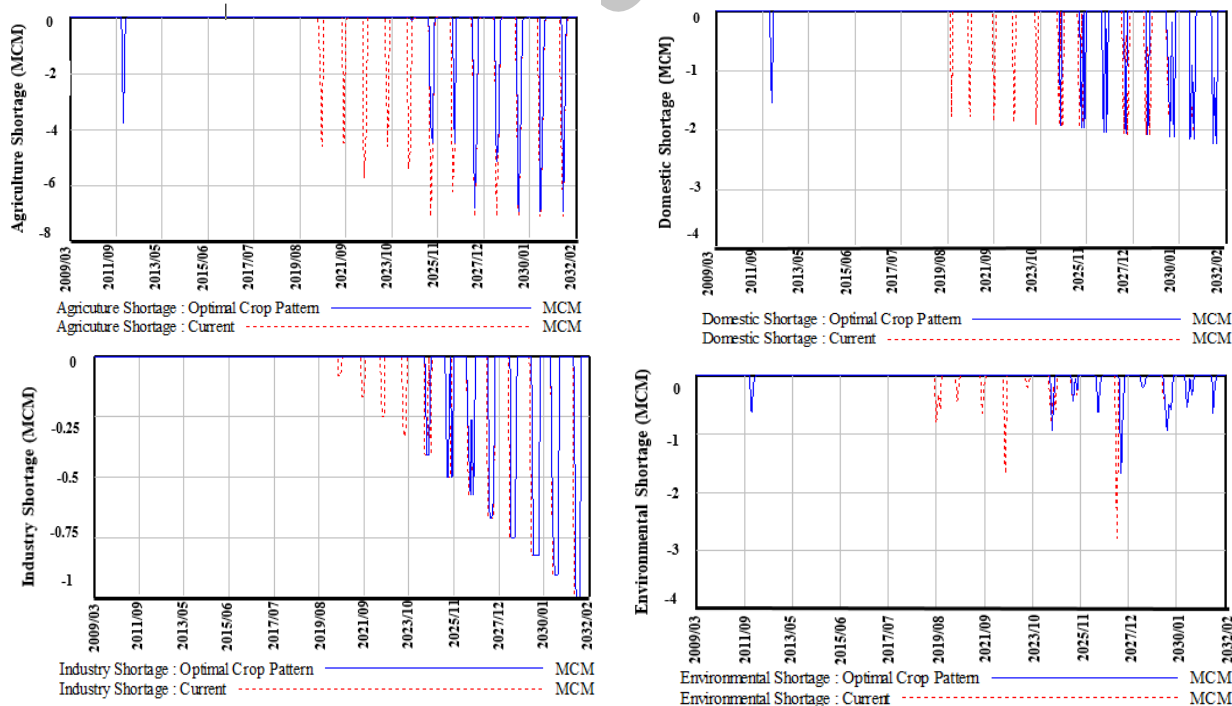


Fig. 9- Shortage in Different Part of consumption (MCM) Applying Optimum Crop Pattern (2009-2032)

شکل ۹- کمبود آب در بخش‌های مختلف مصارف در صورت اعمال الگوی بهینه کشت در سیستم سد یامچی (۱۴۱۰-۱۳۸۸)

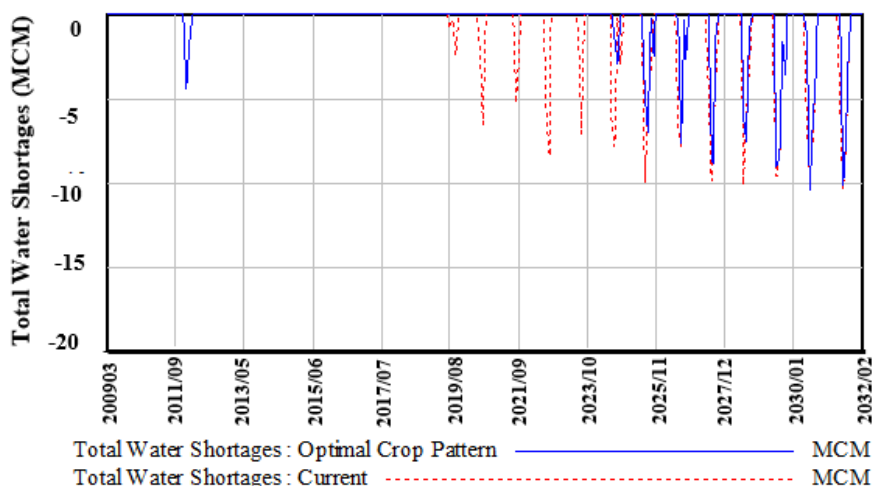


Fig. 10- Total Shortage (MCM) Applying Optimum Crop Pattern (2009-2032)
 شکل ۱۰- کمبود کلی آب (م.م) در صورت اعمال الگوی بهینه کشت (۱۳۸۸-۱۴۱۰)

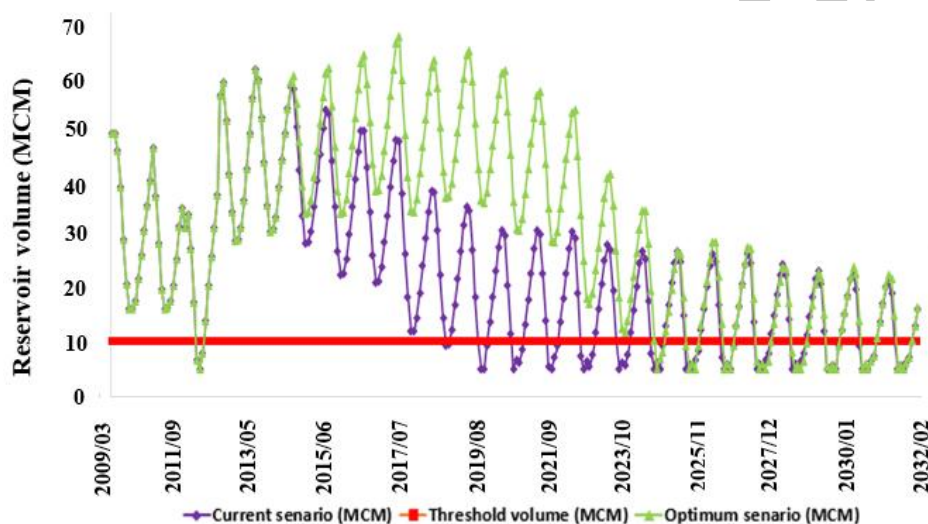


Fig. 11- Volume of Yamchi Reservoir (MCM) Applying the Optimum Cropping Pattern
 شکل ۱۱- حجم ذخیره مخزن سد یامچی (م.م) در صورت اعمال الگوی بهینه کشت

مقادیر مربوط به متغیرهای کمبود آب و ذخیره مخزن در بازه‌های مشخص شده در نمودار قرار گرفته‌اند.

شاخص پایداری در شرایط پایه نسبت به الگوی بهینه کشت اعمال شده در سطح پایین‌تری قرار دارد که این حاکی از بهبود وضعیت پایداری سیستم می‌باشد. لازم به ذکر است منظور از پایداری در این بخش، توانایی مخزن در تأمین یک مقدار مطلوب فرض شده برای حجم ذخیره می‌باشد.

Table 5- Reduction in Shortages by Applying the Optimum Crop Pattern

جدول ۵- میزان کاهش کمبود با اعمال الگوی بهینه کشت

Shortages	Reduction in Shortages (in Percent)
Agriculture shortage	48.96
Domestic Shortage	35.72
Industry Shortage	24.6
Environmental Shortage	47
Total Shortage	43.45

۳-۳- نتایج تحلیل عدم قطعیت

نتایج به دست آمده برای بازه‌های اطمینان ۵۰، ۷۵ و ۹۵ درصد، متغیرهای ذخیره آب مخزن سد یامچی و کمبود آب در مقابل تغییر پارامتر جریان ورودی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. این نمودارها بیان‌کننده این مفهوم می‌باشند که با تغییر پارامتر عنوان شده، با احتمال‌های مختلفی که به عنوان بازه اطمینان بیان شده است

کاهش تقاضای آب در تامین بخش کشاورزی را شاهد بودیم. به طور کلی در نظر گرفتن مفهوم آب مجازی به عنوان یک سیاست نوین مدیریتی در مصارف مختلف آبی و ورود ماهیت دینامیکی الگو و ترکیب کشت برای کشاورزی در سطح حوضه و تجارت آب مجازی در مطالعات بین حوضه‌ای پیشنهاد می‌گردد.

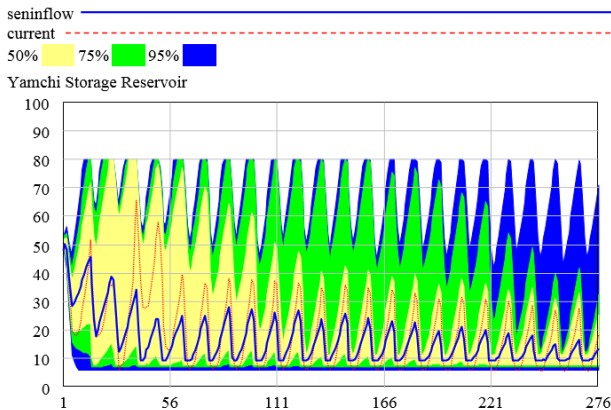


Fig. 12- Yamchi Reservoir Volume Variations Compared to the Inflow Variations (2009-2032)

شکل ۱۲- تغییرات ذخیره مخزن سد یامچی نسبت به تغییرات جریان ورودی (۱۳۸۸-۱۴۱۰)

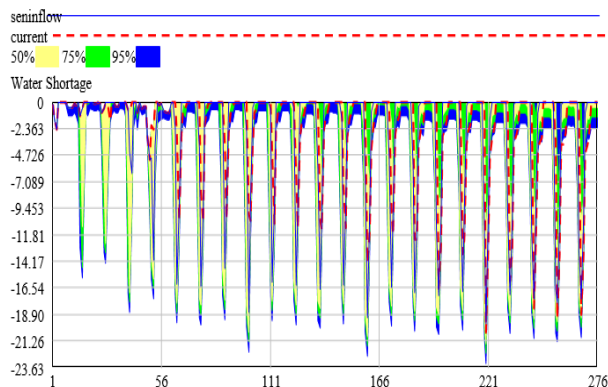


Fig. 13- Water Shortage Variations Compared to the Inflow Variations (2009-2032)

شکل ۱۳- تغییرات کمبود آب نسبت به تغییرات جریان ورودی (۱۳۸۸-۱۴۱۰)

این نتایج بر اساس ۲۰۰ بار تکرار محاسبه شده‌اند. با کاهش بازه اطمینان، دقت در نتایج به دست آمده کاهش می‌یابد و یافته‌ای که عدد مربوط به بازه اطمینان آن بزرگتر باشد به واقعیت نزدیکتر است و می‌توان بر اساس آن تصمیم‌گیری نمود. مطابق نتایج به دست آمده، با افزایش بازه اطمینان، بازه به دست آمده برای متغیر مورد بررسی دارای محدوده بزرگتری خواهد بود.

با توجه به نتایج تحلیل عدم قطعیت، متغیر ذخیره مخزن نسبت به جریان ورودی حساس می‌باشد و عدم قطعیت در جریان ورودی بر سطح و ذخیره مخزن تأثیرگذار است. دامنه تغییرات متغیر ذخیره مخزن نسبت به حالت قطعی در حدود ۶۰ درصد نوسان داشته است که در سطح اعتمادپذیری ۷۵ درصد، تغییرات از این مقدار نیز بیشتر شده است. بیشترین تغییرات متغیر کمبود آب نسبت به تغییرات جریان ورودی، در سطح اعتمادپذیری ۹۵ درصد، در حدود ۵۰ درصد می‌باشد ولی در اکثر ماه‌ها تغییرات کمتری دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل شبیه‌سازی-بهینه‌سازی برای بهره‌برداری از سد یامچی با رویکرد پویایی سیستم‌ها ارائه گردید. در مدل بهینه‌سازی، الگوی کشت بهینه با لحاظ معیارهای مختلف از جمله مقدار آب مجازی محصولات محاسبه گردید. براساس نتایج به دست آمده، با فرض ثابت ماندن روند تغییرات نیاز زیست محیطی، مقادیر تقاضا برای نیازهای مختلف کشاورزی، شرب و صنعت در سال‌های آینده افزایش می‌یابد.

میزان کل تقاضا در سال ۱۴۱۰ به ۷۸/۶۷ میلیون متر مکعب می‌رسد که تأمین نیازها با وجود کاهش منابع سیستم تأمین کننده، غیرممکن خواهد شد. از سال ۱۴۰۰، با تخصیص آب به بخش صنعت، افزایش کمبودها تشدید می‌یابد و سیستم با شرایط بحرانی شدیدتری روبرو خواهد شد. برای مقابله با شرایط بحرانی و بازنگری در مصارف سد، الگوی بهینه کشت برای چهار محصول عمده و استراتژیک حوضه پیشنهاد گردید که تأثیرگذاری قابل توجهی در حدود ۴۹ درصد در

Table 6- Sustainability Criteria to Evaluate the Management Policies in the Yamchi Reservoir Model

جدول ۶- معیارهای پایداری در ارزیابی اعمال سیاست مدیریتی در مدل سد یامچی

Scenarios	Reliability	Resiliency	Vulnerability	Sustainability
Status Quo	0.7681	0.2031	3.7528	0.1407
Optimum crop Pattern	0.8586	0.2051	3.9535	0.1579

Dez reservoir, Iran. *Lake and Reservoir Management* 29:126-149

Ghashghaie M, Marofi S, Marofi H (2014) Using system dynamics method to determine the effect of water demand priorities on downstream flow. *Water Resource Management* 28:5055-5072

Hashimoto T, Stedinger JR, Loucks DP (1982) Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research* 18(1):14-20

Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM (2011) *The water footprint assessment manual. Setting the global standard*, London, UK

Hope AS, Stein AK and McMichael CE (2004) Uncertainty in monthly river discharge predictions in a semi-arid shrubland catchment, *Hydrology: Science and Practice for the 21 st Century*, 1:284-290

Kjeldsen TR, Rosbjerg D (2001) A framework for assessing the sustainability of a water resources system. *IAHS Publication* 107-114

Kotir JH, Smith C, Brown G, Marshall N, Johnstone R (2016) A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agriculture development in the Volta river basin, Ghana. *Science of the Total Environment* 573:444-457

Madani K, Marino MA (2009) System dynamics analysis for managing Iran's Zayandeh-Rud river basin. *Water Resources Management* 23:2163-2187

Maknoon R, Arbabi Bigdeli A (2009) Review of Iran water resources management policies with the approach of virtual water trade. *The 8th International Conference of Civil Engineering*, University of Shiraz, Shiraz, Iran (In Persian)

Maknoon R, Sohrabi H (2011) Water footprint index from concepts to application. *The Fourth Conference of Iran Water Resources Management*, University of Amirkabir, Tehran, Iran (In Persian)

Mekonnen M M, Hoekstra AY (2011) The green, blue and gray water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences* 15:1577-1600

Ranjbar A, Footokian M (2014) Evaluating the trend of import and export of virtual water in Iran. *International Conference on Environmental Science, Engineering and Technology*, Tehran, Iran (In Persian)

Rouhani N, Yang H, Amin Sichay S, Afyouni M, Mousavi SF, Kamkar A (2009) Assessment of virtual water and food trade considering water resources in

بدین وسیله از حمایت شرکت سهامی آب منطقه‌ای اردبیل از این پژوهش تشکر می‌شود. به‌خصوص از زحمات آقایان بابک خیاط رستمی، ابراهیم مکلف، عارف انوار و آیدین اصلانزاده نیز تقدیر به‌عمل می‌آید.

۵- مراجع

Abran Consulting Engineers (2013) Master plan studies of supply and distribution of domestic and industrial water in Ardabil province. Fourth and fifth volumes (In Persian)

Ahmad S, Prashar D (2010) Evaluation municipal water conservation policies using a dynamic simulation model. *Water Resources Management* 24:3371-3395

Ahmad S, Simonovic SP (2000) System dynamics modeling of reservoir operation for flood management. *Journal of Computing in Civil Engineering* 3:190-198

Allen JA (1998) Virtual water: a strategic resource, global solutions to regional deficits. *National Ground Water Association* 36(4):545-546

Ardakanian R, Sohrabi R (2006) Virtual water trade: world literature and application in Iran. *The Second Conference on Water Resources Management*, Industrial University of Isfahan, Isfahan (In Persian)

ARWMC: Ardabil Regional Water Resources Manganment Copmany (2013) *Portrait of Ardabil Water Resources* (In Persian)

Ashofteh PS, Bozorg Haddad O, Akbari-Alashti H, Marino MA (2014) Determination of irrigation allocation policy under climate change by genetic programming. *American Society of Civil Engineers*, 04014059:1-12

Daneshvar Vousoughi F, Dinpashoh Y, Alami MT (2012) Effect of drought on groundwater level in the past two decades (Case study: Ardebil Plain). *Water and Soil Science* 21(4):165-179 (In Persian)

Dehghan Menshadi H, Niksokhan MH, Ardestani M (2015) A quantity-quality model for inter-basin water transfer system using game theoretic and virtual water approaches. *Water Resources Management* 29:4573-4588

Elmahdi A, Malano H, Etchells T (2007) Using system dynamics to model water reallocation. *Environmentalist* 27:3-12

Felfelani F, Jalali Movahed A, Zarghami M (2013) Simulating hedging rules for effective reservoir operation by using system dynamics: a case study of

- Sun S, Wang Y, Engel BA, Wu P (2016) Effects of virtual water flow on regional water resources stress: A case study of grain in China. *Science of the Total Environment* 550:871-879
- Ventana Simulation Environmental (2007) User's Guide Version 5, Ventana Systems, Ins
- Yang CC, Chang LC, Ho CC (2008) Application of system dynamics with impact analysis to solve the problem of water shortages in Taiwan. *Water Resource Management* 22:1561-1577
- Yang J, Lei K, Khu S, Meng W (2015) Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model. *Water Resource Management* 29:885-899
- Zarghami M, Amir Rahmani M (2015) Toward effective water diplomacy by using system dynamics: Case study. The 33rd International Conference of the System Dynamics Society, Cambridge, Massachusetts, USA
- Zarghami M, Fotookian MR, Safari N, Aslanzadeh A (2016) Reservoir operation using system dynamics under climate change impacts: A case study of Yamchi Reservoir, Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 9:678. DOI 10.1007/s12517-016-2676-3
- Zarghami M, Safari N, Aslanzadeh A, Fotookian MR (2015) A system dynamics model to improve the supply and demand Management in Yamchi reservoir, Iran. Ardabil Regional Water Management Company, Technical Report (In Persian)
- Iran. *Science and Technology of Agriculture and Natural Resources* 12 (45):417-432 (In Persian)
- Sabouhi M, Soltani GR (2008) Optimization of cropping patterns in the catchment area with an emphasis on social benefits and virtual water imports. *Water and Soil Sciences* 12(43):297-313 (In Persian)
- Salavitarbar A, Zarghami M, Abrishamchi A (2006) System dynamic model in Tehran urban water management. *Journal of Water and Wastewater* 17(3):12-28 (In Persian)
- Shafie Jood M, Abrishamchi A, Salavitarbar A (2013) Evaluation of water resources development plans in multi-reservoir darehrood sub catchment system using performance indices. *Journal of Water and Wastewater* 24(3):22-32 (In Persian)
- Sheikh Khozani Z, Hosseini Kh, Rahimian M (2011) System dynamic modeling of multi-purpose reservoir operation. *Journal of Modeling in Engineering* 8(21):51-62 (In Persian)
- Simonovic SP, Rajasekaram V (2004) Integrated analyses of Canada's water resources: A system dynamics approach. *Canadian Water Resources Journal* 29(4):223-250
- Skebede S, Travi Y, Alemayehu T, Marc V (2005) Water balance of lake Tana and its sensitivity to fluctuations in rainfall, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology* 316:233-247
- Sterman JD (2000) *Business dynamics: system thinking and modeling for a complex world*. McGraw-Hill, Boston