Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 4, No. 4, PP. 51-59, Winter 2020
DOI: 10.22112/jwwse.2020.178145.1155

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال چهارم، شماره ۴، صفحات ۵۱-۵۹، زمستان ۱۳۹۸

Research Paper

A System Dynamics Approach to Analyze Reservoir Operation of Gerati Dam (Iran)

Abbas Akbarzadeh[1] and Maryam Abareshi[2*]
1- Assistant Professor, WRI, Head of Tehran Higher Education and Research Complex, Tehran, Iran.
2- PhD in Water Engineering, Tehran Higher Education and Research Complex, Tehran, Iran.
* Corresponding author, Email: Abareshi.maryam@yahoo.com

Received: 10/04/2019
Revised: 18/12/2019
Accepted: 05/01/2020

Abstract

One of the important approaches to allocate water resources is system dynamics approach. In this research, the water allocation from the Gerati Dam reservoir was investigated using the system dynamics approach. Model input data included meteorological and hydrological data, downstream water demands (in this study, environmental and agricultural demands) and reservoir geometry. The model developed in the VENSIM software is able to calculate the volume of water being released from Gerati dam based on input data and continuity equation (water balance of reservoir) to supply downstream demands with respect to the maximum allowable lack. The analysis of the reservoir performance indicated that the Gerati dam can prioritize the environmental demand and then supply the water needed in the agricultural sector, according to the cropping pattern, in the area of 1217 hectares for the first 25 years and in the area of 1050 hectares for the second 25 years of the operating period. Also, as a result of the construction of the Gerati dam, net revenue per cubic meter of agricultural water will increase from 671 Rials to 2604 Rials. In addition, after the implementation of the plan, in addition to providing the total forage required in the present situation, 18550 livestock units could be added to the current livestock units of the region to make entrepreneurship for the residents and improve the economic situation of the villagers.

Keywords: Water Resources Allocation, System Dynamics, Gerati Dam, VENSIM Model.

مقاله پژوهشی

بررسی عملکرد مخزن سد گراتی با رویکرد پویایی‌های سیستم

عباس اکبرزاده[۱] و مریم ابارشی[۲*]
۱ـ استادیار مؤسسه تحقیقات آب، رئیس مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی تهران، تهران، ایران.
۲ـ دکتری مهندسی عمران آب، مجتمع عالی آموزشی و پژوهشی تهران، تهران، ایران.
* نویسنده مسئول، ایمیل: Abareshi.maryam@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۱
تاریخ اصلاح: ۱۳۹۸/۰۹/۲۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵

چکیده

یکی از رویکردهای مهم مطرح در تخصیص منابع آب استفاده از رویکرد پویایی‌های سیستم است. در این تحقیق با استفاده از مدل پویایی سیستم در محیط VENSIM مدل تخصیص آب سد مخزنی گراتی بررسی شد. اطلاعات ورودی مدل، شامل اطلاعات پایه هواشناسی و هیدرولوژی منطقه طرح، نیاز آبی منطقه پایاب سد (در این تحقیق، حقابه زیست‌محیطی و کشاورزی) و مشخصات هندسی مخزن سد است. مدل تهیه شده در محیط VENSIM قادر است با تحلیل اطلاعات ورودی و براساس معادله پیوستگی (بیلان آب مخزن)، حجم تنظیمی مخزن برای تأمین نیازهای آبی پایاب سد را با توجه به حداکثر کمبود مجاز دوره محاسبه نماید. نتایج تحلیل عملکرد مخزن سد حاکی از آن است که سد گراتی می‌تواند با اولویت تأمین حقابه زیست‌محیطی، آب مورد نیاز در بخش کشاورزی را نیز با توجه به الگوی کشت منطقه در مساحتی بالغ بر ۱۲۱۷ هکتار در ۲۵ سال اول و در مساحتی بالغ بر ۱۰۵۰ هکتار در ۲۵ سال دوم دوره بهره‌برداری به‌طور مطمئن تأمین نماید. هم‌چنین در نتیجه احداث سد گراتی، درآمد خالص هر مترمکعب آب کشاورزی از ۶۷۱ ریال به ۲۶۰۴ ریال افزایش پیدا خواهد کرد. به‌علاوه پس از اجرای طرح می‌توان علاوه‌بر تأمین کل علوفه مورد نیاز در شرایط فعلی منطقه، ۱۸۵۵۰ واحد دامی به‌میزان واحد دامی فعلی منطقه اضافه نمود تا علاوه بر کارآفرینی برای اهالی، وضعیت اقتصادی روستائیان بهبود یافته و موجبات ثبات آن‌ها در روستا فراهم آید.

کلمات کلیدی: تخصیص منابع آب، پویایی‌های سیستم، سد مخزنی گراتی، مدل VENSIM.

۱- مقدمه

ایران به‌عنوان یکی از کشورهای خاورمیانه، روی کمربند خشک جهان واقع شده و بیش از نیمی از مساحت آن از بیابان‌ها تشکیل شده است. در چنین شرایطی اعمال مدیریت صحیح بر منابع آبی می‌تواند به‌میزان زیادی محدودیت‌ها و مشکلات ناشی از کمبود منابع آب را تعدیل نماید. به‌منظور مدیریت کارآمد منابع آب می‌توان از علم پویایی‌های سیستم به‌عنوان ابزاری مدیریتی برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب استفاده نمود که ارتباط بین عناصر مختلف سیستم را به‌صورت روابط علت و معلولی تعریف نموده و امکان مدیریت پارامترها را فراهم می‌آورد (Sterman, 2000). یکی از ابزارهای قدرتمند در مطالعه سیستم‌های منابع آب، نرم‌افزار VENSIM است. این نرم‌افزار، ابزار مدل‌سازی تصویری با قابلیت تجسم، پردازش، بهینه‌سازی و تحلیل سیاست‌های پیچیده سیستم‌های منابع آب است. در واقع این نرم‌افزار، ارزیابی رفتار سیستم‌ها در شرایط فعلی و آینده را تسریع و تسهیل نموده و پیامدهای نامعلوم تصمیم‌گیری‌های مختلف را آشکار می‌سازد. هم‌چنین با برخورداری از قابلیت بهینه‌سازی، امکان واسنجی سریع مدل‌ها و حصول جواب بهینه را نیز فراهم می‌آورد (Pereira, 2012).

تاکنون مطالعات متعددی در زمینه کاربرد پویایی‌های سیستم در مدیریت منابع آبی در ایران و سایر کشورها (Leal Neto et al., 2006; Langsdale et al., 2007; Yang et al., 2008; Yang et al., 2015; Kotir et al., 2016;) انجام شده است که در ادامه برای رعایت اختصار به معرفی برخی از پژوهش‌های انجام شده در این حوزه در ایران پرداخته می‌شود. میثاقی و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از روش پویایی‌های سیستم و با درنظر گرفتن کلیه منابع آب اعم از سطحی و زیرزمینی و تمامی مصارف، به مدل‌سازی منابع آب در حوضه آبریز نیشابور پرداختند تا راه‌کارهایی برای بهبود وضعیت منابع آبی منطقه و خروج از وضعیت بحرانی کنونی اتخاذ نمایند. ارشدی و باقری (۱۳۹۲) سیستم منابع آب حوضه کارون را از منظر پایداری به کمک رویکرد پویایی‌های سیستم و نرم‌افزار VENSIM تحلیل نمودند. نتایج مطالعه نشان داد که خطرات و سناریوی بیرونی در مقایسه با سیاست‌های حاکم در کشاورزی، صنعت و خدمات تأثیر ناچیزی بر کیفیت آب رودخانه دارد. به‌عبارت دیگر، تمرکز بر نگرش حاکم و سیاست‌های اعمالی برای تأمین غذا و انرژی در حوضه، باعث کاهش آسیب‌پذیری حوضه خواهد شد. اعلمی و همکاران (۱۳۹۳) نیز اثرات سد مخزنی گلک در جمع‌آوری جریان‌های سیلابی در زمان‌های بارندگی، تأمین نیازهای منطقه و تغذیه آبخوان آبرفتی دشت پایین‌دست سد را به کمک مدل‌سازی پویا بررسی نمودند. مطالعات ایشان حاکی از آن است که احداث سد تغذیه‌ای گلک باعث تزریق سالانه ۲ میلیون‌مترمکعب از طریق پخش سیلاب می‌شود. بدین ترتیب می‌توان پاسخگوی صددرصد نیازهای آبی از طریق منابع آب زیرزمینی بود.

ایمانی‌زاده‌شریف‌پور و اسماعیلی (۱۳۹۴) مدیریت عرضه و تقاضای آب در سد مخزنی صفا را به کمک مدل VENSIM مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق ایشان مشخص شد که با کاهش ۳۰ درصدی مقدار نیاز شرب و صنعت در طول دوره بهره‌برداری، طرح جوابگوی اهداف خود خواهد بود. کدخداحسینی و همکاران (۱۳۹۶) نیز سناریوهای مختلف تخصیص منابع آب سد چغاخور از جمله تغییر در روش محاسبه نیاز زیست‌محیطی، افزایش بازده آبیاری و تغییر در سطح زیر کشت را به کمک روش پویایی‌های سیستم در محیط VENSIM مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج مدل نشان داد که سد چغاخور در بهینه‌ترین حالت می‌تواند نیاز آبی ۱۶۰۰ هکتار از اراضی آبخور را تأمین کند. به‌علاوه مشخص شد با انجام آبیاری تحت فشار و افزایش ۳۰ درصدی بازده آبیاری، می‌توان سطح زیر کشت با آبیاری سطحی را از ۳۰۰ به ۳۹۰ هکتار افزایش داد.

فتوکیان و همکاران (۱۳۹۶) نیز به مدل‌سازی پویای سیستم سد مخزنی یامچی در محیط نرم‌افزار VENSIM با اعمال الگوی بهینه کشت برای تدوین سیاست بهره‌برداری پرداختند. نتایج حاصل از تحقیق ایشان نشان داد که اعمال الگوی کشت بهینه پیشنهادی باعث کاهش کمبود کلی آب در حدود ۴۳ درصد و افزایش شاخص‌های پایداری در مقایسه با ادامه روند بهره‌برداری کنونی می‌شود. علاوه‌بر کلیه موارد فوق، موضوع تخصیص بهینه منابع آبی در حوضه‌های آبریز دیگری نیز از جمله زنجان‌رود، دره-رود، نازلوچای و حوضه آبریز سد علویان مورد مطالعه قرار گرفته است (محمدی و همکاران، ۱۳۸۸؛ آقابالایی و همکاران، ۱۳۹۱؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ فاضل مدرس و همکاران، ۱۳۹۱).

در این پژوهش، طرح تخصیص منابع آب حوضه آبریز سد گراتی با در نظر گفتن رویکرد پویایی‌های سیستم در محیط نرم‌افزار VENSIM مدل‌سازی و تحلیل می‌شود. ابتدا اطلاعات اولیه مورد نیاز از جمله سری رواناب ماهانه، تبخیر از سطح مخزن، توزیع ماهانه نیازهای آبی پایاب سد و ... تهیه می‌شوند. سپس عملکرد مخزن سد گراتی در تأمین نیازهای پایاب ارزیابی می‌شود. هم‌چنین تأثیر اجرای طرح سد گراتی بر درآمد خالص هر مترمکعب آب مصرفی در حوزه کشاورزی و بر دامپروری منطقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- حوضه مورد مطالعه

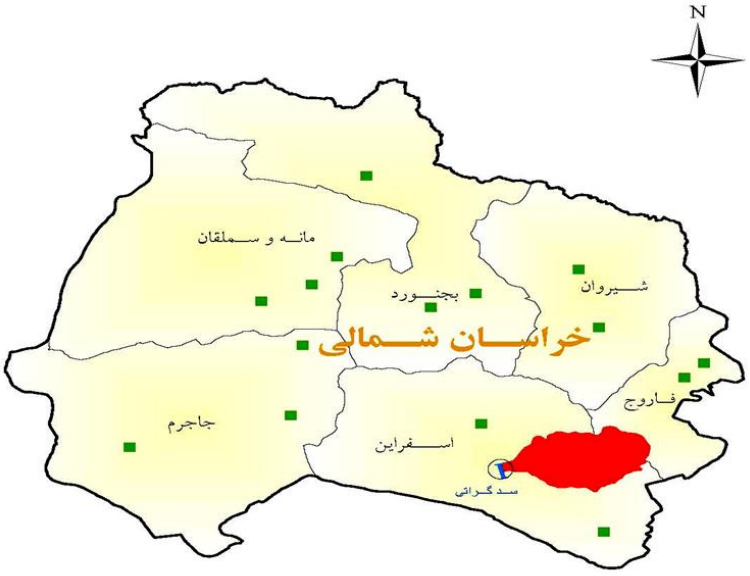
محدوده مطالعاتی و حوضه آبریز رودخانه کال ولایت (گراتی)، در استان خراسان شمالی و در ناحیه شمال غرب این استان در

فاصله ۲۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان اسفراین قرار دارد. حوضه آبریز رودخانه در مختصات جغرافیایی ′۳۴ °۵۷ تا ′۸ °۵۸ طول شرقی و ′۴۹ °۳۶ تا ′۴ °۳۷ عرض شمالی واقع است. بلندترین نقطه حوضه ۳۰۸۴ متر از سطح دریا ارتفاع دارد.

با هدف استفاده بهینه از رواناب رودخانه فصلی گراتی و دستیابی به آب مطمئن کشاورزی در منطقه، مطالعاتی پیرامون احداث سد مخزنی گراتی بر روی رودخانه گراتی در بالادست روستای گراتی و در فاصله حدود ۲۵ کیلومتری جنوب شرق شهرستان اسفراین انجام شده است. رودخانه گراتی که از ارتفاعات شاه جهان در شمال حوضه آبریز منشأ می‌گیرد، در پائین‌دست روستای گراتی به رودخانه بیدواز اسفراین پیوسته و وارد کال شور اسفراین می‌شود. محور سد در مختصات جغرافیایی طول ″۳۴′۳۶/۴ °۵۷ و عرض ″۵۴′۲۰/۰۷ °۳۶ قرار دارد. ارتفاع محل سد از سطح دریا ۱۲۲۰ متر است و مساحت حوضه آبریز رودخانه گراتی تا محل سد در حدود ۷۲۳ کیلومتر مربع می‌باشد (مهندسین مشاور آب‌پوی، ۱۳۹۳). شکل ۱ موقعیت محل طرح سد و شبکه آبیاری گراتی در استان را نشان می‌دهد.

۲-۲- اطلاعات پایه

رودخانه گراتی به‌دلیل ماهیت سیلابی و فقدان جریان دائم، فاقد ایستگاه هیدرومتری است. از این‌رو به‌منظور برآورد آبدهی سالانه رودخانه گراتی در یک دوره طولانی مدت و توزیع ماهانه آن در طول دوره، از داده‌های ایستگاه هیدرومتری بیدواز اسفراین در مجاورت حوضه آبریز مورد مطالعه در بازه زمانی سال آبی ۱۳۳۷-۱۳۳۸ تا پایان سال آبی ۱۳۸۶-۱۳۸۷ استفاده شده است. براساس داده‌های مشاهداتی در این بازه زمانی، حجم رواناب ماهانه (برمبنای تعداد روزهای هر ماه) و به‌تبع آن، حجم رواناب سالانه محاسبه شد. متوسط سالانه حجم رواناب ورودی به مخزن سد ۱۵/۷۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است. متوسط ماهانه حجم رواناب به‌علاوه مقادیر ارتفاع تبخیر ماهانه از سطح مخزن در محل سد گراتی در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت محل طرح سد و شبکه آبیاری گراتی در استان

همچنین با توجه به دبی ویژه رسوب حوضه معادل ۶۲۱/۲ تن در کیلومتر مربع در سال و با درنظر گرفتن مساحت حوضه حدود ۷۲۳ کیلومتر مربع و رواناب سالانه برابر ۱۵/۷۰میلیون مترمکعب، غلظت رسوب رودخانه برابر ۲۸/۶کیلوگرم بر مترمکعب رواناب به‌دست می‌آید (مهندسین مشاور آب‌پوی، ۱۳۹۳). نیاز آبی سالانه هر هکتار از اراضی کشاورزی پائین‌دست نیز ۵۷۵۷/۷ مترمکعب برآورد شده و توزیع ماهانه آن در جدول ۱ ارائه شده است. به‌علاوه در مجوز تخصیص طرح گراتی سالانه ۰/۸۲ میلیون مترمکعب نیاز زیست‌محیطی به‌عنوان حقابه زیست‌محیطی منظور شده که توزیع ماهانه آن براساس جدول ۱ است (مهندسین مشاور آب‌پوی، ۱۳۹۳).

۲-۳- مدل‌سازی پویای بهره‌برداری از مخزن

در این پژوهش با استفاده از ابزار پویایی سیستم و نرم‌افزار VENSIM، طرح تخصیص بهینه منابع آب حوضه آبریز رودخانه گراتی مورد مطالعه و مدل‌سازی قرار گرفته است. شکل ۲ نمودار علت و معلولی حاکم بر مدل مخزن سد گراتی را نشان می‌دهد. در این شکل که براساس معادله پیوستگی یا به‌عبارت دیگر، بیلان آبی مخزن سد گراتی ترسیم شده است، inflow رواناب ورودی، evaporation تبخیر از سطح مخزن، spill حجم سرریزی و outflow حجم آب رهاسازی شده از سد است که صرف تأمین حقابه زیست‌محیطی و آبیاری اراضی کشاورزی پایاب سد می‌شود. با ورود رواناب به مخزن، چنان‌چه تراز آب مخزن به تراز نرمال

برسد، حجم آب مازاد بر حجم نرمال از طریق سرریز به پایاب تخلیه می‌شود. از طرف دیگر، با توجه به مقادیر ارتفاع تبخیر ماهانه (جدول ۱) و سطح مخزن متناظر با تراز آب موجود (که براساس منحنی تراز- سطح (volume-elevation look up) درون‌یابی می‌شود)، حجم تبخیر ماهانه به‌دست می‌آید. پس از کسر احجام سرریز احتمالی و تبخیر ماهانه، حجم آب موجود در مخزن محاسبه می‌شود که البته حجم غیرفعال آن (ذیل تراز آبگیر پایین در ۲۵ سال اول بهره‌برداری و ذیل تراز آبگیر بالا در ۲۵ سال دوم بهره‌برداری) قابل استفاده نیست. حجم فعال نیز به‌منظور تأمین حقابه زیست‌محیطی و مشروب نمودن اراضی کشاورزی پایاب به‌صورت ماهانه رهاسازی می‌شود. با استفاده از این مدل و با اولویت تأمین حقابه مصوب زیست‌محیطی و نیز با اعمال حداکثر کمبود قابل قبول در طول دوره شبیه‌سازی که در این مطالعه به‌ترتیب برابر با ۴٪ زیست‌محیطی و ۷٪ کشاورزی (با توجه به تنش آبی قابل تحمل توسط الگوی کشت منطقه متشکل از گندم، جو و سورگوم) در نظر گرفته شد، سطح زیر کشت اراضی پایاب سد و حجم تنظیمی مخزن در جهت تأمین پایدار نیازهای آبی پایین دست سد محاسبه می‌شود. دوره آماری انتخاب شده برای شبیه‌سازی عملکرد مخزن سد، یک دوره ۵۰ ساله از سال آبی ۱۳۳۷-۱۳۳۸ تا ۱۳۸۶-۱۳۸۷ بالغ بر ۶۰۰ ماه است. لازم‌به ذکر است که در کمیسیون تخصیص مدیریت منابع آب، تخصیص ۷ میلیون مترمکعب آب برای اراضی کشاورزی و ۰/۸۲ میلیون مترمکعب برای زیست‌محیطی تصویب شده است.

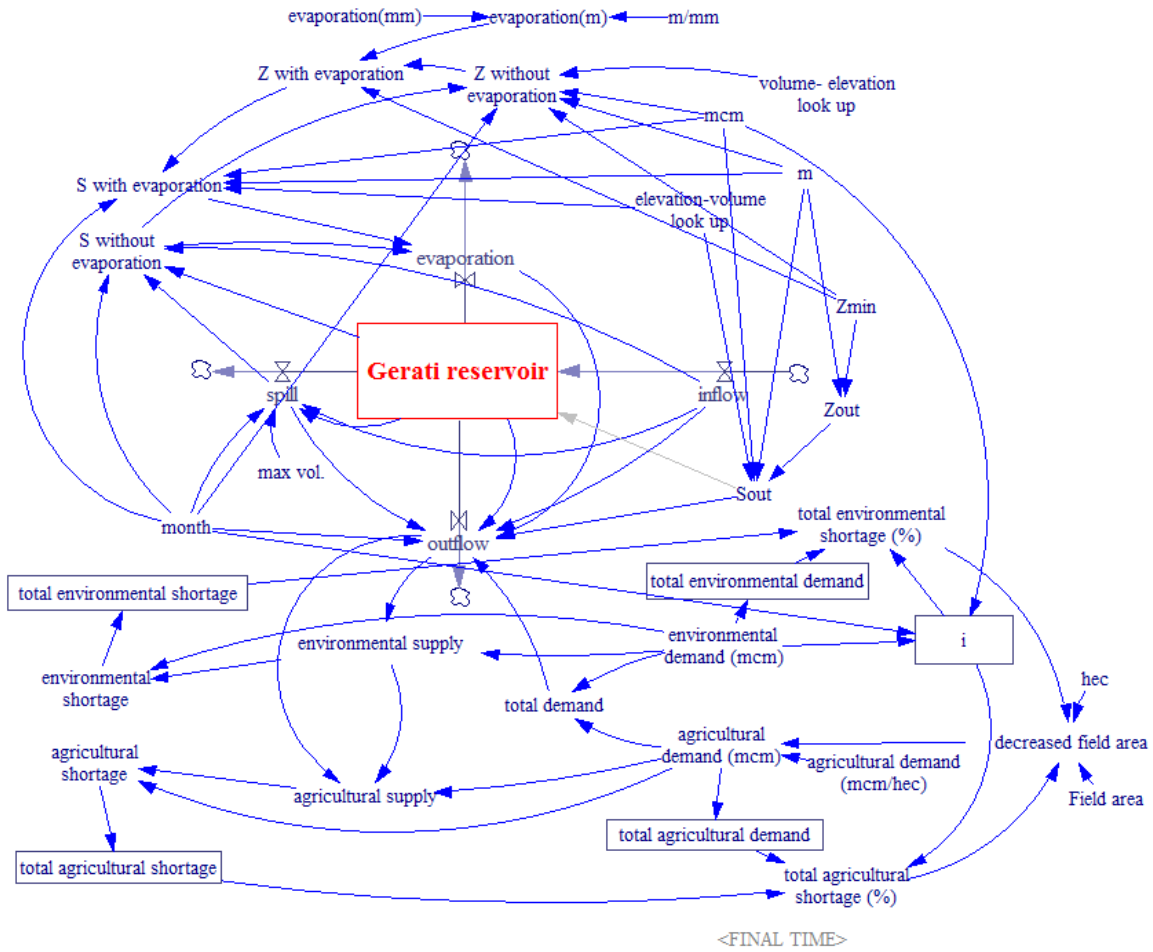
جدول ۱- متوسط ماهانه حجم رواناب، ارتفاع تبخیر و حجم نیاز آبی در محل طرح سد گراتی
(مهندسین مشاور آب‌پوی، ۱۳۹۳)

ماه	رواناب (میلیون مترمکعب)	تبخیر (میلی‌متر)	تقاضای کشاورزی (مترمکعب بر هکتار)	تقاضای زیست‌محیطی (میلیون مترمکعب)
مهر	۰/۳۶	۱۳۳/۵	۳۴۵/۰	۰/۰۲
آبان	۱/۰۵	۵۹/۶	۲۳۸/۲	۰/۰۳
آذر	۱/۷۱	۳۲/۳	۸۲/۱	۰/۰۲
دی	۱/۹۰	۲۰/۹	۰/۰	۰/۰۲
بهمن	۲/۰۱	۲۸/۷	۵۷/۵	۰/۰۲
اسفند	۲/۶۴	۵۳/۶	۵۲۵/۷	۰/۰۴
فروردین	۲/۹۲	۱۲۴/۰	۱۴۰۴/۵	۰/۱۷
اردیبهشت	۲/۳۱	۲۰۸/۷	۱۸۷۲/۷	۰/۲۲
خرداد	۰/۸۰	۳۱۹/۹	۳۸۶/۰	۰/۰۹
تیر	۰/۰۰	۳۹۷/۶	۲۳۰/۰	۰/۰۹
مرداد	۰/۰۰	۳۵۴/۳	۳۵۳/۲	۰/۰۵
شهریور	۰/۰۰	۲۴۴/۲	۲۶۲/۸	۰/۰۵
سالانه	۱۵/۷۰	۱۹۷۷/۳	۵۷۵۷/۷	۰/۸۲

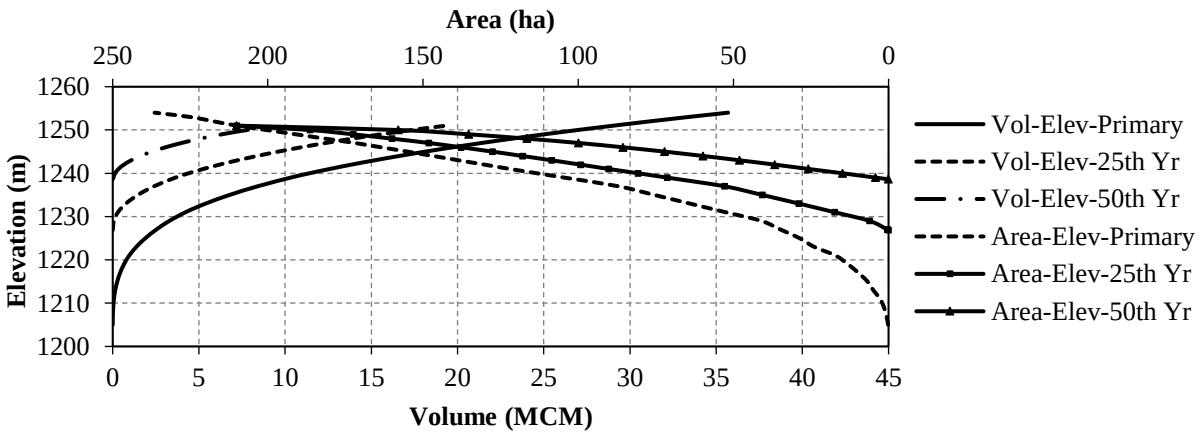
۳- تحلیل عملکرد مخزن سد گراتی

در مرحله مطالعات احداث سد، تراز آبگیرها نیز به‌عنوان یکی از اجزای اصلی طرح باید تعیین شود. با توجه به عمر مفید سدهای مخزنی با حجم متوسط و با درجه اهمیت متوسط در مقیاس سد گراتی که در ایران برابر با ۵۰ سال درنظر گرفته می‌شود و با پیش‌بینی دو آبگیر در طرح اولیه برای تأمین حقابه پایاب، منطقی است که تراز آبگیر پایین، بالاتر از تراز رسوبات توزیع شده در مخزن در ۲۵ سال اول دوره بهره‌برداری قرار گیرد. از طرف دیگر، با فرض آن‌که این آبگیر در ۲۵ سال دوم از عملکرد خارج شده و آبگیر بالا مورد استفاده قرار گیرد، لازم است که تراز این آبگیر بالاتر از تراز رسوبات توزیع شده در مخزن در ۲۵ سال دوم دوره بهره برداری واقع شود.

روند تحلیل عملکرد مخزن بدین صورت است که ابتدا با توجه به حجم رسوبات ورودی به مخزن سد در ۲۵ سال ابتدای دوره بهره‌برداری بالغ بر ۹/۷ میلیون مترمکعب، توزیع رسوب در مخزن به‌روش کاهش سطح به کمک نرم‌افزار کارون ۸۸ که برای بهره‌برداری در صنعت سدسازی و به‌طور عمده به‌منظور انجام محاسبات توزیع رسوب در مخازن و نیز روندیابی سیل در مخازن طراحی شده انجام می‌پذیرد. سپس از منحنی تراز - سطح - حجم به‌دست آمده پس از توزیع رسوب، در برنامه شبیه‌سازی مخزن سد استفاده می‌شود و حداکثر سطح زیر کشت در ۲۵ سال ابتدای دوره بهره‌برداری محاسبه می‌شود. این فرآیند بار دیگر به‌ازای حجم رسوبات ۵۰ ساله تکرار شده و این‌بار مدل سطح زیر کشت در ۲۵ سال دوم دوره بهره‌برداری را ارائه می‌دهد. شکل ۳ منحنی تراز - سطح - حجم اولیه مخزن و پس از رسوب‌گذاری ۲۵ ساله و ۵۰ ساله را نشان می‌دهد.



شکل ۲- نمودار علت و معلولی سد مخزنی گراتی



شکل ۳- منحنی تراز - سطح - حجم مخزن سد گراتی قبل و بعد از رسوب‌گذاری

لازم به توضیح است که با توجه به کاهش حجم مفید مخزن در ۲۵ سال دوم دوره بهره‌برداری در نتیجه حجم رسوبات ورودی به مخزن، نیاز به تغییر الگوی کشت و یا کاهش سطح زیر کشت است. با توجه به الگوی کشت منطقه که حدود ۹۰٪ آن از گندم و جو و حدود ۱۰٪ آن از سورگوم تشکیل شده است و این‌که گندم و جو از کم‌مصرف‌ترین گیاهان هستند، بنابراین امکان تغییر الگوی کشت در ۲۵ سال دوم دوره بهره‌برداری وجود ندارد. از طرف دیگر با توجه به این‌که عمر مفید شبکه‌های آبیاری اراضی حدود ۳۰ سال است، لذا می‌توان در ۲۵ سال دوم دوره بهره‌برداری و در زمان بازسازی شبکه اراضی، زمین زیر کشت کمتری را مدنظر قرار داد.

نتایج تحلیل عملکرد مخزن سد گراتی در ۲۵ سال اول و ۲۵ سال دوم دوره بهره‌برداری در جدول ۲ ارائه شده است. در این جدول مقادیر حجم کل مخزن، حجم مرده، حجم مفید، متوسط سالانه حجم رواناب و حجم تلفات سرریز و تبخیر و نیز مقادیر نیاز آبی، حجم تنظیمی و درصد کمبود دوره به تفکیک برای مصارف زیست‌محیطی و کشاورزی ارائه شده‌اند.

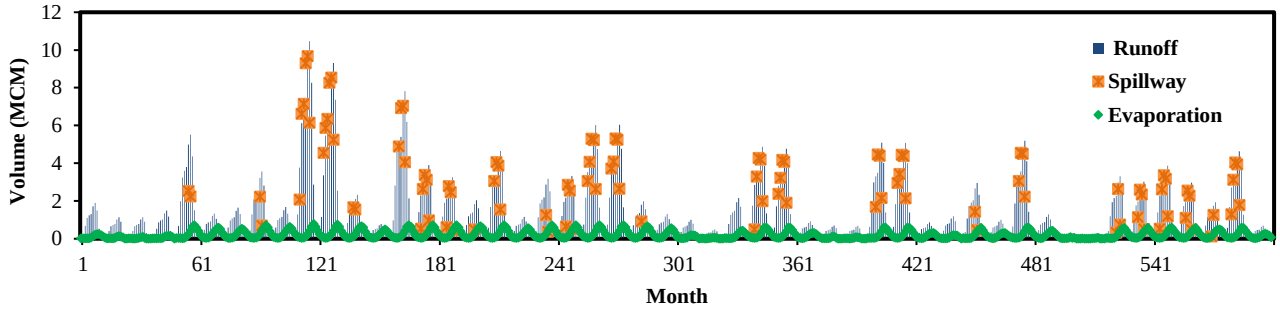
جدول ۲- نتایج تحلیل عملکرد مخزن سد گراتی در دوره بهره‌برداری

مشخصات مخزن		۰-۲۵ سال	۲۶-۵۰ سال
تراز نرمال (متر)		۱۲۵۱	۱۲۵۱
حجم کل مخزن (میلیون مترمکعب)		۲۹/۰۴	۲۹/۰۴
حجم مرده مخزن (میلیون مترمکعب)		۹/۷۰	۱۹/۴۰
حجم مفید مخزن (میلیون مترمکعب)		۱۹/۳۴	۹/۶۴
حجم رواناب سالانه (میلیون مترمکعب)		۱۵/۷۰	۱۵/۷۰
حجم سرریز سالانه (میلیون مترمکعب)		۵/۲۹	۷/۰۵
حجم تبخیر سالانه (میلیون مترمکعب)		۲/۷۲	۲/۲۴
تقاضای زیست‌محیطی	حجم نیاز سالانه (میلیون مترمکعب)	۰/۸۲	۰/۸۲
	حجم تأمین سالانه (میلیون مترمکعب)	۰/۸۰	۰/۷۹
	درصد کمبود (٪)	۲/۳۹	۳/۹۵
تقاضای کشاورزی	سطح زیر کشت (هکتار)	۱۲۱۷	۱۰۵۰
	حجم نیاز سالانه (مترمکعب بر هکتار)	۵۷۵۷/۷	۵۷۵۷/۷
	حجم نیاز سالانه (میلیون مترمکعب)	۷/۰۱	۶/۰۵
	حجم تأمین سالانه (میلیون مترمکعب)	۶/۷۶	۵/۶۲
	درصد کمبود (٪)	۳/۵۱	۶/۹۹
تقاضای کل	حجم نیاز سالانه کل (میلیون مترمکعب)	۷/۸۳	۶/۸۷
	حجم تأمین سالانه کل (میلیون مترمکعب)	۷/۵۶	۶/۴۱
	درصد تأمین دوره (٪)	۹۶/۶۱	۹۳/۳۸

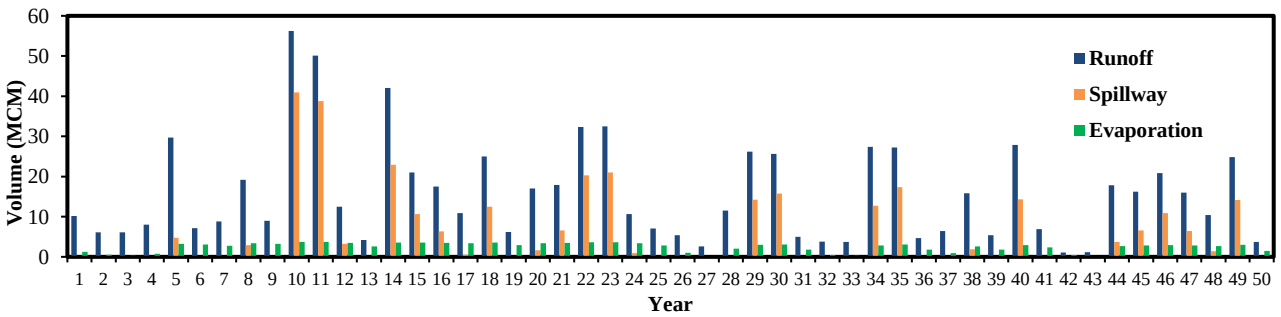
با توجه به نتایج حاصل از تحلیل عملکرد مخزن سد گراتی، با رهاسازی سالانه به‌طور متوسط ۰/۸۰ میلیون مترمکعب از مخزن سد، می‌توان ۹۸٪ نیاز زیست‌محیطی منطقه پایین‌دست سد را تأمین نمود. هم‌چنین در ۲۵ سال ابتدای دوره بهره‌برداری با رهاسازی سالانه به‌طور متوسط ۶/۷۶ میلیون مترمکعب از مخزن سد، با توجه به نیاز آبی الگوی کشت اراضی کشاورزی منطقه بالغ بر ۵۷۵۷/۷ مترمکعب بر هکتار در سال، این حجم آب سالانه پاسخگوی نیاز ۱۲۱۷ هکتار اراضی کشاورزی خواهد بود.

در ۲۵ سال دوم دوره بهره‌برداری نیز رهاسازی سالانه به‌طور متوسط ۵/۶۲ میلیون مترمکعب از مخزن سد، نیاز ۱۰۵۰ هکتار اراضی کشاورزی پایاب سد را تأمین خواهد نمود.

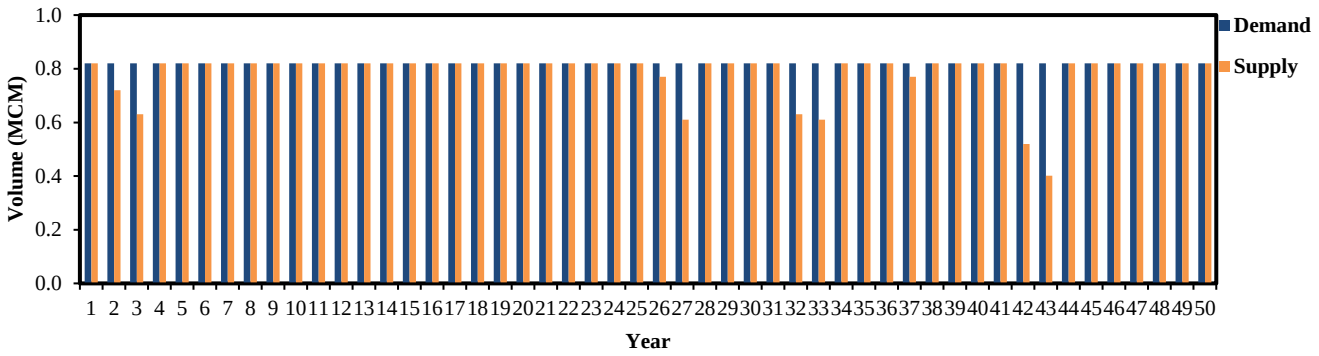
شکل‌های ۴ تا ۷ بیانگر نتایج شبیه‌سازی عملکرد مخزن سد گراتی از جمله تغییرات ماهانه و سالانه حجم رواناب ورودی، حجم سرریز و تبخیر و حجم آب رهاسازی شده از سد برای تأمین نیازهای زیست‌محیطی و کشاورزی هستند.



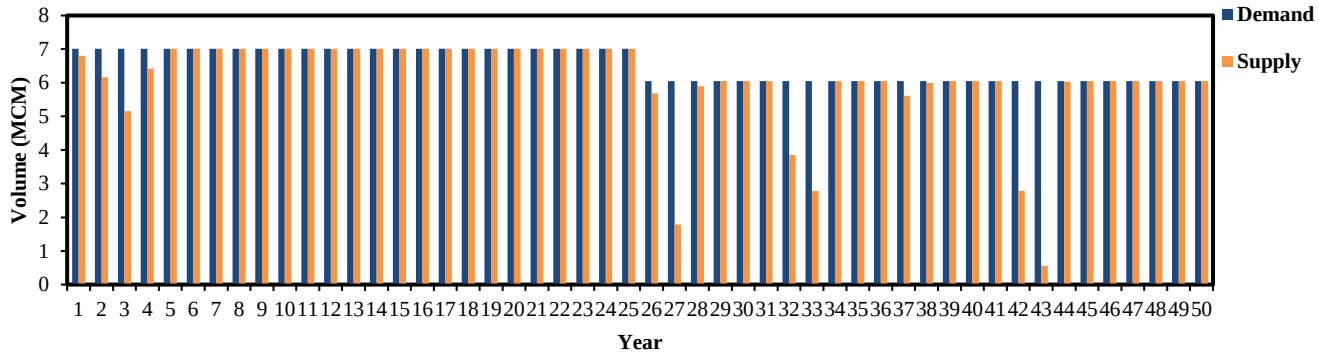
شکل ۴- تغییرات ماهانه حجم رواناب ورودی به مخزن سد، حجم سرریز و تبخیر در دوره بهره‌برداری



شکل ۵- تغییرات سالانه حجم رواناب ورودی به مخزن سد، حجم سرریز و تبخیر در دوره بهره‌برداری



شکل ۶- تغییرات سالانه توزیع نیاز زیست‌محیطی و حجم تأمین آب زیست‌محیطی در دوره بهره‌برداری



شکل ۷- تغییرات سالانه توزیع نیاز کشاورزی و حجم تأمین آب کشاورزی در دوره بهره‌برداری

۴- مقایسه سناریوی توسعه منطقه با سناریوی آینده بدون طرح

۴-۱- کاربری اراضی در محدوده پیشنهادی شبکه

در شرایط فعلی با توجه به کمبود آب کشاورزی، ۱۷۹ هکتار اراضی به کشت آبی، ۷۸۲ هکتار به کشت آیش آبی، ۵۴۰ هکتار به کشت دیم و ۹۵۰ هکتار به کشت آیش دیم اختصاص دارد. لازم‌به توضیح است زمین آیش‌شده زمینی است که به‌منظور استراحت و احیای خاک برای یک دوره معین بدون کشت رها شود. پیش‌بینی می‌شود که در شرایط آینده بدون طرح (وضعیت آینده منطقه مطالعاتی در شرایطی که سد احداث نشده باشد)، سطح اراضی زیر کشت آبی به ۱۴۰ هکتار کاهش و سطح اراضی زیر کشت آیش آبی به ۸۲۱ هکتار افزایش پیدا کند. در صورتی‌که با اجرای طرح سد گراتی، آب مورد نیاز ۱۲۱۷ هکتار از اراضی پایاب سد به‌طور مطمئن تأمین خواهد شد.

ستون دوم و سوم جداول ۳ و ۴ ترکیب و تراکم کشت محصولات مختلف کشاورزی در شرایط موجود و طرح توسعه منطقه (آینده با طرح) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در وضع موجود، در حدود ۵۳٪ از الگوی کشت به غلات اختصاص دارد که علت این امر را می‌توان به انطباق نیاز آبی این محصولات با رژیم آبدهی رودخانه گراتی دانست. لازم‌به ذکر است الگوهای کشت متفاوتی در منطقه مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به نیاز آبی پایین‌دست و افزایش سطح زیرکشت و در نهایت افزایش درآمد خالص کل منطقه، الگوی کشت ارائه شده در جدول ۴ به‌عنوان الگوی کشت توصیه شده معرفی شده است (مهندسین مشاور آب‌پوی، ۱۳۹۳). از دیگر مزیت‌های این الگو می‌توان به مصرف به‌هنگام آب در موقع پر آبی رودخانه و کاهش حجم ذخیره آب در سد و در نهایت کاهش تبخیر آب و هزینه ساخت سد از لحاظ ارتفاع و ... دانست.

۴-۲- اقتصاد کشاورزی

هزینه‌های تولید شامل کلیه هزینه‌هایی است که در مراحل کاشت، داشت و برداشت محصولات به مصرف می‌رسد. این هزینه‌ها به سه بخش هزینه‌های نهاده‌های کشاورزی، ماشین‌آلات و نیروی انسانی تقسیم می‌شوند. هزینه‌های تولید محصولات کشاورزی در وضع موجود در جدول ۳ و در شرایط آینده با طرح در جدول ۴ ارائه شده است. به‌علاوه در این جداول، درآمد تولید هریک از محصولات کشاورزی نیز با لحاظ نمودن درآمد حاصل از محصولات اصلی و فرعی ارائه شده‌اند. بدیهی است که با کسر هزینه‌های کشاورز از درآمد ناخالص، درآمد خالص کشاورز تعیین می‌شود. به‌علاوه با توجه به حجم آب مصرفی در هر هکتار کشت، درآمد خالص هر مترمکعب آب مصرفی محاسبه شده است (ستون آخر جداول ۳ و ۴).

جدول ۳- پارامترهای اقتصادی و درآمد هر هکتار کشت در شرایط وضع موجود

ردیف	محصول	نسبت کاشت	درآمد ناخالص (ریال)	هزینه‌های کشاورز (ریال)				درآمد خالص (ریال)	آب مصرفی (مترمکعب)	درآمد خالص یک مترمکعب آب (ریال)
				نهاده‌های کشاورزی	ماشین‌آلات	نیروی انسانی	جمع			
۱	گندم	۰/۳۳	۲۶۴۰۰۰۰	۲۰۴۰۸۹	۲۵۲۹۴۵	۲۷۷۲۰۰	۷۳۴۲۳۴	۱۹۰۵۷۶۷	۲۴۰۰	۷۹۴
۲	جـو	۰/۲۰	۱۳۲۰۰۰۰	۱۰۴۷۹۰	۱۵۳۳۰۰	۱۴۷۰۰۰	۴۰۵۰۹۰	۹۱۴۹۱۰	۱۱۶۴	۷۸۶
۳	چغندرقند	۰/۰۵	۷۶۲۷۵۰	۳۴۱۲۵	۸۱۶۳۸	۲۱۸۶۶۳	۳۳۴۴۲۵	۴۲۸۳۲۵	۹۴۵	۴۵۳
۴	پنبه	۰/۰۷	۷۸۷۵۰۰	۶۰۲۷۰	۳۶۳۸۳	۲۰۲۴۹۳	۲۹۹۱۴۵	۴۸۸۳۵۵	۸۱۵	۶۰۰
۵	هندوانه بذری	۰/۳۵	۳۵۰۰۰۰۰	۱۷۸۲۳۸	۱۵۲۵۱۳	۱۲۸۴۴۱۳	۱۶۱۵۱۶۳	۱۸۸۴۸۳۸	۳۰۵۴	۶۱۷
الگوی کشت		۱	۹۰۱۰۲۵۰	۵۸۱۵۱۱	۶۷۶۷۷۸	۲۱۲۹۷۶۸	۳۳۸۸۰۵۶	۵۶۲۲۱۹۴	۸۳۷۸	۶۷۱

جدول ۴- پارامترهای اقتصادی و درآمد تولیدی هر هکتار کشت در شرایط آینده با طرح

ردیف	محصول	نسبت کاشت	درآمد ناخالص (ریال)	هزینه‌های کشاورز (ریال)				درآمد خالص (ریال)	آب مصرفی (مترمکعب)	درآمد خالص یک مترمکعب آب (ریال)
				نهاده‌های کشاورزی	ماشین‌آلات	نیروی انسانی	جمع			
۱	گندم	۰/۵۰	۱۰۴۴۰۰۰۰	۸۷۶۷۵۰	۷۸۷۵۰۰	۶۷۷۲۵۰	۲۳۴۱۵۰۰	۸۰۹۸۵۰۰	۲۷۹۰	۲۹۰۲
۲	جو	۰/۴۰	۶۶۰۴۸۰۰	۵۶۴۴۸۰	۶۳۰۰۰۰	۴۹۹۸۰۰	۱۶۹۴۲۸۰	۴۹۱۰۵۲۰	۲۰۲۵	۲۴۲۵
۳	سورگوم	۰/۱۰	۲۹۲۵۰۰۰	۲۴۹۹۰۰	۴۳۸۹۰۰	۲۵۴۱۰۰	۹۴۲۹۰۰	۱۹۸۲۱۰۰	۹۴۳	۲۱۰۳
الگوی کشت		۱/۰۰	۱۹۹۶۹۸۰۰	۱۶۹۱۱۳۰	۱۸۵۶۴۰۰	۱۴۳۱۱۵۰	۴۹۷۸۶۸۰	۱۴۹۹۱۱۲۰	۵۷۵۸	۲۶۰۴

۴-۳- دامپروری

مطالعات انجام شده پیرامون جمعیت دام‌های موجود (۸۶۳۰ واحد دامی)، میزان علوفه مورد نیاز دام‌های منطقه (۲۵۸۹۰۰۰ واحد علوفه‌ای) و میزان تولید علوفه از منابع مختلف منطقه مطالعاتی در وضع موجود (۳۰۵۸۱۰ واحد علوفه‌ای) حاکی از آن است که در شرایط فعلی در حدود ۲۲۸۳۱۹۰ واحد علوفه‌ای کمبود وجود دارد که از طریق فشار بر مراتع و یا خرید علوفه از مناطق هم‌جوار به قیمت‌های گزاف تهیه می‌شود. بدیهی است که این وضعیت در شرایط آینده بدون طرح شرایط بدتری نسبت به وضع موجود خواهد داشت.

از طرف دیگر الگوی کشت توصیه شده در منطقه موجبات افزایش علوفه تولیدی در منطقه را فراهم خواهد ساخت. در هر هکتار از الگوی کشت توصیه شده در حدود ۱۲۳۲۴ کیلوگرم علوفه تولید می‌شود که معادل ۶۷۰۰ واحد علوفه‌ای است. با توجه به این‌که نیاز علوفه‌ای هر واحد دامی در سال معادل ۳۰۰ واحد علوفه‌ای است، می‌توان نتیجه گرفت که در هر هکتار از الگوی کشت در حدود ۲۲/۳ واحد دامی مورد تعلیف قرار خواهد گرفت.

هم‌چنان که در بخش ۳ ذکر شد، پس از اجرای طرح، سطحی معادل ۱۲۱۷ هکتار زیرکشت خواهد رفت، لذا پس از اجرای طرح، معادل ۸۱۵۳۹۰۰ واحد علوفه‌ای تولید خواهد شد که موجبات تعلیف ۲۷۱۸۰ واحد دامی را فراهم می‌آورد. به‌عبارت دیگر، پس از اجرای طرح سد گراتی می‌توان علاوه بر تأمین کل علوفه مورد نیاز در شرایط فعلی منطقه، ۱۸۵۵۰ واحد دامی به‌میزان واحد دامی فعلی منطقه اضافه نمود تا علاوه بر کارآفرینی برای اهالی، وضعیت اقتصادی روستائیان بهبود یافته و موجبات ثبات آن‌ها در روستا فراهم آید.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثرات احداث سد مخزنی گراتی با درنظر گرفتن رویکرد پویایی‌های سیستم و با استفاده از نرم‌افزار VENSIM مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی مخزن سد گراتی مشخص شد که این سد قادر است پس از تأمین حقابه زیست‌محیطی سالانه بالغ بر ۰/۸۲ میلیون‌مترمکعب، در ۲۵ سال اول دوره بهره‌برداری حجم آبی معادل ۶/۷۶ میلیون مترمکعب به طور سالانه در اختیار کشاورزان قرار دهد که با توجه به الگوی کشت منطقه پاسخگوی نیاز آبی ۱۲۱۷ هکتار از اراضی پایاب سد خواهد بود. در ۲۵ سال دوم دوره بهره‌برداری با توجه به کاهش حجم مفید مخزن در نتیجه رسوبات ورودی، حجم آب سالانه رهاسازی شده از مخزن سد به ۶/۴۱ میلیون‌مترمکعب کاهش خواهد یافت که از این مقدار، ۰/۷۹ میلیون‌مترمکعب به‌منظور تأمین حقابه زیست‌محیطی و مابقی آن برای تأمین نیاز

آبی ۱۰۵۰ هکتار از اراضی کشاورزی پایاب سد مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌علاوه در این مطالعه، هزینه‌های تولید در بخش کشاورزی و نیز درآمدهای حاصل از محصولات اصلی و فرعی کشاورزی محاسبه و مشخص شد که با احداث سد گراتی، درآمد خالص هر مترمکعب آب مصرفی در حوزه کشاورزی از ۶۱۷ ریال به ۲۶۰۴ ریال افزایش خواهد یافت. هم‌چنین نتایج بررسی در بخش دامپروری نشان داد که با اجرای طرح سد گراتی، علاوه‌بر این‌که کل علوفه مورد نیاز منطقه در شرایط فعلی تأمین می‌شود، امکان افزودن ۱۸۵۵۰ واحد دامی به واحدهای دامی منطقه نیز وجود دارد که موجب بهبود وضعیت اقتصادی روستائیان خواهد شد.

۶- تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از همکاری ارزشمند مهندسین مشاور آب‌پوی تشکر و قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

آقابالایی، ب.، فرزین، س.، و اعلمی، م.ت.، (۱۳۹۱)، "مدل‌سازی تخصیص منابع آب حوضه آبریز دره‌رود با استفاده از نرم‌افزار VENSIM"، *سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب*، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری.

احمدی، ل.، موسوی، س.ف.، و کرمی، ح.، (۱۳۹۴)، "مدیریت منابع آب حوضه نازلوچای با استفاده از نرم‌افزار VENSIM"، *اولین همایش مدیریت تقاضا و بهره‌وری مصرف آب*، همدان.

ارشدی، م.، و باقری، ع.، (۱۳۹۲)، "تحلیل سیستم منابع آب حوضه کارون از منظر پایداری با رویکرد پایداری سیستم‌ها"، *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، ۹(۳)، ۱-۱۳.

اعلمی، م.ت.، فرزین، س.، احمدی، م.ح.، و آقابالایی، ب.، (۱۳۹۳)، "مدل‌سازی پویای سیستم سد و آب‌های زیرزمینی به‌منظور مدیریت بهینه آب (مطالعه موردی: سد گلک)"، *نشریه مهندسی عمران و محیط زیست*، ۴۴(۱)، ۱-۱۳.

ایمانی‌زاده شریف‌پور، م.، و اسماعیلی، ک.، (۱۳۹۴)، "مدیریت بهره‌برداری مخزن با استفاده از مدل VENSIM (مطالعه موردی: سد مخزنی صفا)"، *هفتمین همایش ملی آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک*، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان.

شرکت مهندسین مشاور آب‌پوی، (۱۳۹۳)، "گزارش کشاورزی پروژه طرح سد و شبکه آبیاری گراتی اسفراین".

شرکت مهندسین مشاور آب‌پوی، (۱۳۹۳)، "گزارش هواشناسی و هیدرولوژی پروژه طرح سد و شبکه آبیاری گراتی اسفراین".

فاضل مدرس، ن.، نیازی، ف.، مفید، ح.، و فاخری‌فرد، ا.، (۱۳۹۱)، "برنامه‌ریزی تخصیص بهینه منابع آب با استفاده از مدل VENSIM (مطالعه موردی: سد علویان)"، *نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران*، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.

فتوکیان، م.ر.، صفاری، ن.، و ضرغامی، م.، (۱۳۹۶)، "مدل‌سازی پویای سیستم سد مخزنی یامچی با اعمال الگوی بهینه کشت جهت تدوین سیاست بهره‌برداری"، *مجله تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۳(۳)، ۱-۱۶.

کدخداحسینی، م.، شامحمدی، ش.، میرعباسی نجف‌آبادی، ر.، و نوذری، ح.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی سناریوهای مختلف تخصیص منابع آب سد چغاخور با استفاده از روش پویایی سیستم"، *نشریه علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*، ۱۱(۳۶)، ۲۳-۳۳.

محمدی، س.، امیراصلانی، ش.، و مهدی‌نژاد، ح.، (۱۳۸۸)، "برنامه‌ریزی تخصیص بهینه منابع آب با استفاده از مدل VENSIM (مطالعه موردی: حوضه آبریز زنجانرود)"، *اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت منابع آب*، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود.

میثاقی، ع.، داوری، ک.، قهرمان، ب.، و هاشمی‌نیا، س.م.، (۱۳۹۲)، "مدل‌سازی منابع آب در حوضه آبریز با استفاده از روش پویایی سیستم (مطالعه موردی: حوضه آبریز نیشابور)"، *مجله علوم و مهندسی آبیاری*، ۳۷(۳)، ۸۳-۹۴.

Kotir, J.H., Smith, C., Brown, G., Marshall, N., and 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.

Langsdale, S., Beall, A., Carmichael, J., Cohen, S., and Forster, C., (2007), "An exploration of water resources futures under climate change using system dynamics modeling", *Integratin Assessment*, 7, 51-79.

Leal Neto, A.C., Legey, L.F.L., Gonzalez-Araya, M.C., and Jablonski, S., (2006), "System dynamics model for the environmental management of the Sepetiba Bay watershed, Brazil", *Environmental Management*, 38, 879-888.

Pereira, R.M.S., Haie, N., and Machado, G.J., (2012), "VENSIM PLE to create models for water management", *International Journal of Mathematics and Computers in Simulation*, 6(4), 405-412.

Sterman, J., (2000), *Business dynamics: Systems thinking for a complex world*, Irwin/Mc Graw-Hill.

Yang, C.C., Chang, L.C., and Ho, C.C., (2008), "Application of system dynamics with impact analysis to solve the problem of water shortages in Taiwan", *Water Resources Management*, 22, 1561-1577.

Yang, J., Lei, K., Khu, S., and Meng, W., (2015), "Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model", *Water Resources Management*, 29, 885-899.