تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال چهاردهم، شماره ۵، زمستان ۱۳۹۷
Volume 14, No.5, Winter 2019 (IR-WRR)
۳۹-۵۳

ارائه مدل تولید- سودآوری نیروگاه‌های برقابی با رویکرد پویایی سیستم

آرش جمال‌منش[۱]، مهدی خداپرست مشهدی[۲*]، احمد سیفی[۳] و محمدعلی فلاحی[۴]

چکیده

صنعت برق ایران به دنبال راههایی برای کارایی بهتر در تولید، توزیع و انتقال انرژی برق در سال‌های اخیر است. تغییر قوانین در جهت رقابتی شدن، صنعت برق در ایران را دستخوش تغییر نموده است. با وجود ناطمینانی‌ها در قیمت بازار، میزان آب ورودی سدها، رفتار بازیگران، دسترسی به اطلاعات و در نتیجه افزایش ریسک، برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری برای تولیدکنندگان انرژی برقابی برای کسب حداکثر سود در بازار برق دشوارتر شده است. در این وضعیت، اتخاذ یک روش تصمیم‌گیری درست برای بهره‌برداری بهینه از نیروگاهها همواره یکی از دغدغه‌های اصلی این تولیدکنندگان است. در این تحقیق یک مدل پویای تولید- سودآوری، به منظور مدل‌سازی عملیات یک سیستم مخزنی برقابی و روند سودآوری تولیدکننده بسط داده شده که با استفاده نرم‌افزار STELLA در یک محیط شبیه‌سازی شیءگرا با رویکرد پویایی‌های سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات مورد نیاز به صورت سری زمانی ماهانه در سالهای ۱۳۹۴-۱۳۸۴ مورد استفاده قرار گرفته‌اند و پیش‌بینی‌ها برای یک دوره ۲۴ ماهه انجام شده است. این پژوهش برای مطالعه سودآوری نیروگاه‌های برقابی با استفاده از اطلاعات سد کارون ۱ در حوزه آبریز کارون بزرگ صورت گرفته است. در این تحقیق نااطمینانی وضعیت جریان ورودی آب و قیمت برق برای این تولیدکننده به وسیله مدل Gómes پیش‌بینی شده و وارد مدل شده است. روش‌های رهاسازی آب و هزینه‌های جریمه به صورت سناریوهای جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: مدل تولید- سودآوری، پویایی‌های سیستم، نیروگاه‌های برقابی، روش مونت‌کارلو.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۴/۲۳
تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۴/۵

۱- دانشجوی دکتری اقتصاد، پردیس بین‌الملل دانشگاه فردوسی مشهد.
۲- دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۳- دانشیار گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۴- استاد گروه اقتصاد، دانشکده علوم اداری و اقتصادی، دانشگاه فردوسی مشهد.
*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Investigating the Hydropower Plants Profitability Using System Dynamics Approach

A. Jamalmanesh [1], M. Khodaparast Mashhadi[2], A. Seifi[3] and M.A. Falahi[4]*

Abstract

Iran's electricity industry is looking for better more efficient ways in generation, transmission and distribution of electrical power in recent years. The industry rules have changed to become more competitive. With uncertainty of market price, water inflow, the beneficiary's behavior, access to information and corresponding increased risk, it is increasingly challenging for hydroelectric energy producers to maximize the profit in electricity market. In this situation, pursue a decision-making procedure for optimum operating in power plants is one of the main concerns. For this purpose, time series of average monthly data during 2005–2015 was used and profit is forecasted for twenty-four months. For this study, energy data from Karun1 HPP on Karun River was used. Firstly, Gómes-Maravall model was used to predict the electricity price and river inflow. Then, using an ARIMA model, operating and maintenance cost in the hydropower plant was estimated. In this research the hydropower plant profitability was estimated using system dynamics approach and multiple scenarios like climate change and penalty costs scenarios.

Keywords: Production-Profitability Model, System Dynamics, Hydropower Plants, Monte Carlo Methods.

Received: July 14, 2017
Accepted: June 26, 2018

1- Ph.D. Candidate of Economics, International Campus, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
2-Associate Professor of Economics, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: m_khodaparast@um.ac.ir
3- Associate Professor of Economics, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
4- Professor of Economics, Department of Economics, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
*- Corresponding author

۱- مقدمه

صنعت برق در ایران با رشد سالانه مصرف این انرژی بیش از دو برابر متوسط جهانی، به دنبال یافتن راههای بهتر و کاراتر در تولید، انتقال و توزیع انرژی برق است. رشد مصرف انرژی برق در ایران در سال ۱۳۹۳ در حدود ۸/۱ درصد نسبت به سال گذشته رشد داشته است در حالی که این رشد بطور متوسط در جهان ۲/۵ درصد بوده است (Ministry of Energy, Deputy for Energy, 2014). تجدید ساختار بازار برق و حرکت از انحصار به رقابت از جنبه‌های مختلف، این صنعت را دستخوش تغییر قرار داده و موجب افزایش ناطمینانی و ریسک شده است. این تجدید ساختار در ایران عملاً در سال ۱۳۸۲ با شروع بکار بازار برق ایران آغاز شد. با افزایش ناطمینانی‌ها در قیمت بازار، رفتار بازیگران، دسترسی به اطلاعات و در نتیجه افزایش ریسک، برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری برای شرکت در بازار برق برای نیروگاه‌های تولیدکننده برق دشوارتر گردیده است. در این وضعیت، اتخاذ روش تصمیم‌گیری درست برای بهره‌برداری بهینه از نیروگاهها همواره یکی از دغدغه‌های اصلی تولیدکنندگان انرژی بوده است. در این محیط رقابتی جدید صاحبان نیروگاه‌ها، نگران سود حاصله از فروش انرژی و خدمات جانبی خود هستند. در این میان نیروگاه‌های برقابی که از اهمیت بالایی به لحاظ تأمین انرژی برق، آب شرب و کشاورزی برخوردارند، باید مورد مطالعه دقیق‌تر قرار گیرند.

در مورد رفتار یک تولیدکننده انرژی با نیروگاه برقابی مطالعه رفتار یک بنگاه گیرندهٔ قیمت برای بحث ما مناسب است زیرا بازار برق ایران یک انحصارگر خرید است که محصول همگنی را که بنگاه‌های زیادی آن را تولید کرده‌اند، خریداری می‌نماید. از این رو، هر بنگاه وقتی سیاستگذاری بهینهٔ خود را تعیین می‌کند، قیمت بازار را به صورت داده شده تلقی و تنها کاری که می‌تواند انجام دهد پیش‌بینی قیمت و تنظیم تولید خود متناسب با این قیمت‌ها است.

اما در مورد درآمد و هزینه بنگاه وضعیت متفاوت است. هم درآمدها و هم هزینه‌های بنگاه بستگی به فعالیتهای بنگاه دارد. بنگاه‌های تولیدکننده برق می‌توانند از محل تولید انرژی اکتیو، اعلام آمادگی، تولید انرژی راکتیو و انجام سایر خدمات جانبی درآمدهایی بدست می‌آورند. هزینه‌ها می‌تواند شامل هزینه‌های مواد اولیه، دستمزد، تعمیرات و نگهداری، جریمه‌ها و سایر هزینه‌ها در بازار برق باشد. هزینه به دو بخش ثابت و متغیر تقسیم می‌شود. هزینه‌های ثابت در واقع هزینه ریخته شده به حساب می‌آیند. این موارد می‌توانند شامل وام‌های بانکی و بخش مهمی از حقوق و دستمزد باشد. بخش متغیر هزینه‌های حقوق و دستمزد در هزینه‌های عملیاتی نشان داده می‌شوند. هزینه استارت و استاپ، هزینه استهلاک تجهیزات نیروگاهی است که به دلیل خاموش و روشن شدن بوجود می‌آید.

فرض اساسی اکثر تحلیل‌های اقتصادی این است که بنگاه فعالیت‌هایش، را به گونه‌ای انتخاب می‌کند که سودش حداکثر گردد. توان تولیدی یک واحد آبی بر عکس واحدهای حرارتی معمولاً تابع پارامترهایی است که هر یک از آنها با یک نااطمینانی همراه است که این نااطمینانی و ریسک تولید در برنامه‌ریزی بلندمدت به مراتب بیشتر است. برنامه‌ریزی واحدهای آبی معمولاً در دو حوزه‌ی زمانی بلندمدت و کوتاه مدت انجام می‌شود. برنامه‌ریزی بلندمدت می‌تواند از یک هفته تا چند سال و برنامه‌ریزی کوتاه مدت از یک روز تا یک هفته را شامل شود. پیش‌بینی حجم آب ورودی به دریاچه‌ی سد، تخلیه آب مخزن سد، کنترل سیلاب و پیش‌بینی بار از جمله مواردی است که برنامه‌ریزی واحدهای آبی را با نااطمینانی مواجه می‌کند. پیش‌بینی بلندمدت وضعیت در دسترس بودن آب و برنامه‌ریزی تخلیه آب دریاچه سد، دو بخش عمده‌ی برنامه‌ریزی بلندمدت را تشکیل می‌دهند (Cheng et al., 2005). اگر یک سیستم شبکه برق فقط متشکل از واحدهای آبی باشد، آنگاه مسأله برنامه‌ریزی اقتصادی اینگونه سیستم‌ها در واقع تعیین برنامه‌ریزی تخلیه آب سد دریاچه به منظور تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز و برآورده شدن محدودیت‌های هیدرولیکی سد خواهد بود.

اکثر سیستم‌های منابع آب به لحاظ ابعادی بزرگ بوده و برای مدل‌سازی بهینه کاملاً پیچیده هستند. از آنجا که این نوع تولید انرژی در کشور از کم آلاینده‌ترین نوع آنها محسوب می‌شود مطالعه به منظور حداکثر نمودن سود این نیروگاهها می‌تواند در تأسیس و ادامه فعالیت آنها مفید واقع شده و حتی نوعی کمک به محیط زیست محسوب شود. کشور ایران در خشکسالی‌های متعدد و متوالی به سر برده و اصولاً کشور خشکی به لحاظ بارندگی محسوب می‌شود وجود سدها می‌تواند در جلوگیری از این روند خشکسالی و از بین رفتن مراتع مؤثر بوده و بخصوص اینکه پس از خوزستان آبها از کشور خارج می‌شوند و نهایتاً به خلیج فارس می‌ریزند. متغیر بودن رژیم‌های بارندگی و جریان رودخانه در سال‌های مختلف، اتخاذ یک راهکار مدیریتی مناسب جهت بهره‌برداری از مخزن سدها را الزامی می‌نماید. رودخانه کارون طولانی‌ترین (حدود ۹۵۰ کیلومتر) و پرآب‌ترین رود ایران است که سدهای متعددی بر روی آن ساخته شده، در حال اجرا و یا تحت مطالعه است.

Zuwei et al. (1998)، به ارائه یک مدل بلندمدت برای تولید نیرگاههای برقابی به منظور حداکثرسازی سود پرداخته‌اند. آنها در این تحقیق شکل‌های متفاوتی از ترکیب هزینه نهایی نیروگاه‌های حرارتی و آبی را با یک برنامه تولید ارائه کرده‌اند. Jabr (2005) در یک مدل خود برنامه‌ریز یک جریان برقی بهینه حداکثر کننده سود بر اساس پیش‌بینی قیمت نهایی محلی[1] را مدل‌سازی کرد. González et al. (2005) در مقاله‌ای مدل برنامه‌ریزی سود محور را برای نیروگاه‌های زنجیره‌ای آبی تحت مطالعه قرار دادند. آنها در این مقاله بازار برق روز بعد[2] را در نیروگاه‌های کوچک مقیاس بررسی و مطالعه کرده‌اند. Haghighat et al. (2008) یک مسئله برنامه‌ریزی مبتنی بر ریسک برای یک نیروگاه برق جهت شرکت در بازارهای انرژی و رزرو ارائه کردند. این مقاله، از روش تولید سناریو و محاسبه ریسک پایین‌دست[3] برای مدلسازی ریسک استفاده می‌کند. آنها هزینه، سود و نیز احتمال خروج اضطراری نیروگاه را بر اساس ریسک مدلسازی کردند. Ladurantaye et al. (2009)، دو مدل ریاضی برای به دست آوردن درآمد بیشینه از فروش انرژی حاصل از واحدهای برقآبی زنجیره‌ای در محیط تجدید ساختار شده ارائه دادند، این دو مدل براساس دو مدل قطعی و تصادفی برای قیمت انرژی عمل می‌نماید و دوره برنامه‌ریزی واحدها را تنها در کوتاه‌مدت در نظر گرفته است. Ghadami et al. (2009) با استفاده از الگوریتم ژنتیک اقدام به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنی کردند. در این تحقیق یک مدل الگوریتم ژنتیک قطعی جهت بهره‌برداری بهینه از یک سیستم چند مخزنی به جهت مصارف کشاورزی، تدوین گردید. Hosseini Safa et al. (2011) با ارزیابی روشهای تولید قوانین فازی برای بهره‌برداری از مخزن سد تلاش نموده‌اند تا با استفاده از روش‌های خودکار توابع عضویت و قواعد فازی برای تعیین خروجی سد را در بخش کشاورزی مورد ارزیابی قرار دهند. Molaiee et al. (2012) در پژوهشی به تعیین قیمت برق بعد از خروج بازار از تعادل پرداخته‌اند. به این منظور، پس از طراحی بازار برق در قالب مدل پویایی سیستم، با استفاده از مدل بهینه‌یابی، مقادیر بهینه‌ی عرضه، تقاضا و قیمت تعیین کرده‌اند. Arshadi and Bagheri (2014) با تحلیل سیستم منابع آب حوضه کارون از منظر پایداری با رویکرد پویایی سیستم‌ها مفهوم تضمین بقای سیستم را برای ارزیابی وضعیت سیستم آبی کارون بزرگ توسعه دادند. در این سیستم یکی از مهمترین دغدغه‌های مربوط به منابع آبی یعنی کیفیت آب را مورد مطالعه قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که در راستای کاهش آسیب‌پذیری حوزه باید تمرکز بر سیاست‌های اعمالی بر تأمین انرژی و کشاورزی در این حوزه باشد.

Teegavarapu and Simonovic (2014) یک مدل شبیه‌سازی شده از عملکرد ذخایر برقابی چند مخزنه ارائه کردند. آنها یک مدل واقعی از یک سیستم چند مخزنه برقابی واقع در کانادا ارائه و نشان دادند که با تصمیم عملیاتی برای بهینه‌سازی در یک مخزن می‌توان رفتار دیگر مخازن را نیز کنترل کرد. Moeini (2015) با ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان در حل مسأله بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنه، قابلیت‌های چهار الگوریتم مختلف بهینه‌سازی جامعه مورچگان در حل مسائل مرجع چهار و ده مخزنه مورد بررسی قرار داد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان الگوریتمی مناسب در حل مسأله بهره‌برداری بهینه از سیستم چند مخزنه است. Safavi and Golmohammadi (2016) با ارزیابی عملکرد سیستم‌های منابع آب با استفاده از معیارهای اطمینان‌پذیری برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری فازی حوضه آبریز زاینده‌رود را مورد مطالعه قرار دادند. مقایسه نتایج روش فازی و روش‌های کلاسیک و جمع‌بندی آنها به وسیله شاخص پایداری نشان می‌دهد که ضمن رفع اشکال روش‌های قبلی در ارزیابی عملکرد، بسیار مؤثر و کارآمد بوده است.

Fotookian et al. (2017) با استفاده از یک مدل پویایی‌های سیستم به مدل‌سازی سیستم سد مخزنی یامچی با اعمال الگوی بهینه جهت تدوین سیاست‌های بهره‌برداری پرداختند. Zarakani et al. (2017) به معرفی رژیم جامع اکولوژیکی برای تعیین حقآبه زیست‌محیطی رودخانه‌ها در شرایط کمبود داده پرداختند. آنها با برداشت از ایده روش اجزای سازنده به توسعه یک روش جامع‌نگر در شرایط کمبود داده پرداخته شده است. Jahani and Mousavi (2017) در مقاله‌ای با عنوان، تا چه مقدار اطلاع از آینده جریان رودخانه در طراحی و بهره‌برداری از مخازن سدها قابل برنامه‌ریزی است؟ به بررسی افق بهینه پیش‌بینی جریان رودخانه متناسب با حجم مخزن پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد گرچه با کاهش افق پیش‌بینی، ظرفیت مورد نیاز مخزن افزایش می‌یابد عکس این نتیجه نیز در برخی شرایط بسته به هیدرولوژی جریان رودخانه و موقعیت دوره‌های خشک امکان‌پذیر است. Raghibi et al. (2017) به مطالعه بهره‌برداری تلفیقی از منابع آب با تأکید بر کاهش اثرات خشکسالی پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که رهاسازی بهینه آب از سد با در نظر گرفتن شاخص خشکسالی منجر به قابلیت اطمینان بیشتر در تأمین منابع آب برای مصارف گوناگون در حوضه آبریز می‌گردد. Majidi et al. (2017) تبخیر از دریاچه‌ها و مخازن سدها را با توسعه الگوریتم سنجش از دوری بیلان انرژی آب و سطح مرجع را مورد مطالعه قرار دادند. Jamalmanesh et al. (2018) قیمت برق تولیدی در سدهای کارون

۳، کارون ۱ و مسجدسلیمان را با استفاده از داده‌های فصلی و مدل Gómes-Maravall پیش‌بینی نموده‌اند. آنها با استفاده از روش‌های SEATS[۴] و TARMO[۵] قیمت برق این سه نیروگاه خریداری شده توسط بازار برق را پیش‌بینی نمودند. Haghbin and Alimohamadi (2018) جهت ایجاد خاصیت انعطاف‌پذیری در مدل آبدهی به منظور وارد کردن عدم قطعیت هیدرولوژیکی و در نتیجه بهبود عملکرد سیستم با ایجاد سری‌های زمانی مصنوعی و استفاده از مفهوم تابع عضویت فازی، منحنی فرمان در مدل کلاسیک را به یک باند منحنی در مدل آبدهی فازی تبدیل نمودند.

در این مقاله برای مطالعه رفتار تولیدکننده انرژی برقابی در جهت حداکثر کردن سود خود از مدل‌سازی پویایی‌های سیستم[۶] استفاده می‌شود. ابتدا مبانی حداکثرسازی سود و روش‌های آماری مورد استفاده در این تحقیق بررسی می‌گردد. پس از آن مدل‌سازی تولید–سودآوری و سپس سناریوهای مربوط به حداکثرسازی سود مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- بهینه‌یابی برای حداکثرسازی سود

بهینه‌یابی سعی دارد تا با تغییر دادن یک ایده ابتدایی به سوی جواب بهینه حرکت کند. در این مسیر مدل ممکن است به جواب بهینه یا نزدیک به بهینه برسد. بهینه‌یابی، تغییر دادن ورودی و خصوصیات یک دستگاه، فرایند ریاضی و یا آزمایش تجربی است به نحوی که بهترین خروجی یا نتیجه بدست آید. سعی و خطا فرایندی است که در آن متغیرهای ورودی تغییر داده می‌شوند و اطلاعات دقیق در خصوص نحوه تأثیر هر متغیر بر خروجی در دست نیست (Stützle and Hoos, 1997). در این تحقیق به دنبال حداکثر کردن سود هستیم و به همین دلیل برخی متغیرها باید بهینه‌یابی شوند و به مقادیر بهینه خود نزدیک شوند تا هدف محقق شود.

در بهینه‌یابی، از یافتن بهترین جواب برای یک مسأله صحبت به میان می‌آید. لفظ بهترین به طور ضمنی بیان می‌کند که بیش از یک جواب برای مسأله مورد نظر وجود دارد که البته دارای ارزش یکسانی نیستند. تعریف بهترین جواب، به مسأله مورد بررسی، روش‌حل و همچنین میزان خطای مجاز وابسته است. بنابراین نحوه فرمول‌بندی مسأله نیز بر چگونگی تعریف بهترین جواب تأثیر مستقیم دارد. بنگاه در پی شناخت مسیر بهینه و نقطه‌ی بهینه‌ی سیستم در شرایط واقعی است. فرآیند شناخت نقطه بهینه در اصطلاح صعود از تپه نام دارد (Nelson & Winter, 1982). صعود از تپه، یک تکنیک بهینه‌یابی برای برقراری ارتباط بین وضعیت کنونی با وضعیت بهینه سیستم است. عوامل برونزای متعددی که مسیر صحیح را نشان می‌دهند وضعیت فعلی سیستم را تعدیل و تصحیح می‌کنند تا در نهایت به هدف یا وضعیت مطلوب برسد. ساختار عمومی این فرآیند به شرح زیر است.

$$SPOS=\frac{\pi^{*}-\pi}{\tau} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق SPOS تغییر در وضعیت سیستم (System Position)، π^{*} متغیر مبنا یا هدف و π مقدار واقعی سیستم است. τ زمان تعدیل، متوسط زمان مورد نیاز برای رسیدن از وضعیت موجود به وضعیت مطلوب است. تفاوت مقدار مطلوب از مقدار واقعی در طول دوره تعدیل یک سیستم، بازخورد منفی خطی است. در صورت عدم وجود دیگر متغیرهای جریان، سیستم به صورت نمایی به سمت هدف قابل تعدیل است. متغیر π از نوع متغیر جریان یا متغیر کمکی مربوط به یک متغیر جریان است. در صورت ثابت بودن اثر عوامل بیرونی بر وضعیت مطلوب مدل بازخورد خطی مرحله اول سیستم به صورت زیر است:

$$\pi^{*}=\theta\pi=\frac{(\theta-1)\pi}{\tau} \qquad (۲)$$

در رابطه فوق با فرض $\theta>1$ باشد، سیستم با نرخ $\frac{\theta-1}{\tau}$ رشد نمایی و با فرض $\theta<1$ سیستم دارای رشد نمایی منفی است. نقطه تعادلی از پیش قابل تعیین نیست و زمانی که مقدار به حدی برسد که فشار برای رسیدن به هدف حذف شود، برابر مقدار هدف خود شده و سیستم به تعادل رسیده است. در این تحقیق متغیر هدف سود (π) است که باید حداکثر گردد. اما از آنجایی که مقدار سود هدف از ابتدا مشخص نیست و هدف حداکثرسازی سود است برای تکمیل فرایند فوق و صعود از تپه بهینه‌یابی از تکنیک سناریو برای دستیابی به حداکثر سود استفاده می‌شود.

در روش تولید سناریو (Scenario Generation) با اختصاص دادن مقادیر مختلف به پارامترهای غیرقطعی چندین سناریو تشکیل می‌شود. مساله به صورت معین برای هر کدام از سناریوها حل می‌شود و هدف بهینه به ازای هر کدام از سناریوها بدست می‌آید (Hoyland & Wallace, 2001).

روش‌های مختلفی برای تولید سناریو در برنامه‌ریزی‌های تصادفی وجود دارد. در اغلب مواقع، سناریوها بوسیلهٔ نمونه‌برداری از سری‌های زمانی تاریخی و یا مدل‌های آماری از قبیل مدل‌های رگرسیون یا سری‌های زمانی بدست می‌آید. González et al. (2005) مدل‌های سری زمانی را برای تولید سناریوهای مربوط به قیمت در بازار برق بکارگرفته است. Plazas et al. (2005) یک مسأله بهینه‌سازی

غیرخطی را برای تولید درخت سناریو با فرض دانستن خصوصیات آماری متغیرهای تصادفی، استفاده نموده است.

۲-۲- الگوی ARIMA و Gómes

یکی از الگوهای معروف مورد بررسی الگوی خود توضیح انباشته میانگین متحرک (ARIMA) است. روش توسط Box & Jenkins (1976) در حالت عمومی به صورت ARIMA (p,d,q) نمایش داده می‌شود. در این مدل p مرتبه خود رگرسیو مدل و q مرتبه میانگین متحرک مدل و d مرتبه تفاضلی مدل (جهت ایستا کردن مدل) می‌باشد. در صورتی که یکی از جزءها برابر با صفر باشند معمولاً به صورت AR یا MA نوشته می‌شود. به عنوان مثال MA (1) همان ARIMA (0,0,1) است. در این روش پس از تعیین مرتبه تفاضلی و تعیین مرتبه هر یک از فرآیندهای AR و MA پارامترهای مدل مشخص می‌گردد.

SEATS به معنی مدل استخراج علائم از سری زمانی آریما مدلی است که Gómes و Maravall برای پیش‌بینی داده‌های فصلی دارای داده‌های مفقوده معرفی نموده‌اند. در سیستم تحت مطالعه، مهمترین متغیر که بر عملیات تولید انرژی و سودآوری تأثیر می‌گذارد، جریان ورودی به مخزن سد است. زمانی که میزان ذخیره مخزن کم باشد این متغیر مهمتر است. در این تحقیق مدل Gómes برای پیش‌بینی مقادیر جریان ورودی به مخزن استفاده شده است. این مدل بر اساس داده‌های ماهانه و با استفاده از فرایند میانگین متحرک و خودرگرسیون فصلی (SARIMA) به پیش‌بینی سری زمانی بر اساس سری زمانی واقعی می‌پردازد. این مدل از مزیت‌های زیادی بهره می‌برد، اول اینکه داده‌ها را بر اساس تغییرات فصلی ماهانه مورد بررسی قرار می‌دهد، مثلاً همه ماههای خرداد را با هم مقایسه و از نتایج این فرایند در پیش‌بینی سری زمانی استفاده می‌کند. دوم اینکه وجود داده‌های مفقود مشکلی در روند تخمین ایجاد نمی‌کند. یکی از مهمترین مزیت‌های این مدل دادن وزن‌های بیشتر به داده‌های انتهای دوره مورد استفاده برای پیش‌بینی است. در این تحقیق از داده‌های ماهانه سال ۸۴ تا ۹۴ برای تخمین مدل‌ها و مدل Gómes استفاده شده است. مدل Gómes همچنین برای پیش‌بینی قیمت‌های تولید و آمادگی استفاده شده است. بطور خلاصه می‌توان گفت مدل از ترکیباتی با خصوصیات ویژه بهره‌مند است که ارائه دقیقی از سیستم تحت بررسی فراهم می‌کنند. محیط شبیه‌سازی شیءگرا برای گنجاندن جنبه‌های فنی و اقتصادی سیستم، مکانیسم‌های مناسبی را ارائه می‌کند. وارد کردن این داده‌ها در مدل‌های شبیه‌سازی سنتی، کار ساده‌ای نیست. این سناریوها، در زمان اجرای قوانین عملی و اجرای فوری سودمند هستند و می‌توان از آنها در لحظه، کمک گرفت. با وجود اینکه مدل مخصوصِ یک مخزن تولید انرژی است، مفهوم مدل‌سازی را می‌توان به هر نوع مخزن دیگری تعمیم داد.

۲-۳- ساختار مدل

سیستمی بودن پدیده‌های اقتصادی از دیر باز توسط صاحبنظران زیادی از جمله کورنو و والرو، بعدها نیز توسط Forrester مورد توجه قرار گرفته است. بدین معنی که سیستم اقتصادی مجموعه ای از عناصر مرتبط را که بر روی هم تأثیرات متقابل دارند، در بر می‌گیرد. محیط شبیه‌سازی شیءگرا[۷] مبتنی بر اصول دینامیک سیستم، مثل STELLA، اغلب به عنوان محیط مدل‌سازی پویایی‌های سیستم شناخته می‌شود که می‌تواند پیچیدگی‌های زمانی را رفع نماید (Costanza & Gottlieb, 1998). داده‌های به وجود آمده از شبیه‌سازی، برای برآورد معیارهای سنجش عملکرد سیستم استفاده می شوند. استفاده از نمودارهای علی حلقوی بیشترین کاربرد را در این رویکرد دارد. نمودارهای علی حلقوی به مطالعه و شناسایی رفتار متغیرهای مختلف در سیستم‌های مورد مطالعه کمک می‌کنند (Stella, 2009). در این پژوهش از نمادسازی استاندارد Roberts et al. (1983) استفاده شده است که در آن نمودار علّی حلقوی از سیستم برقابی بر روی یک رودخانه در زیر ارائه شده است.

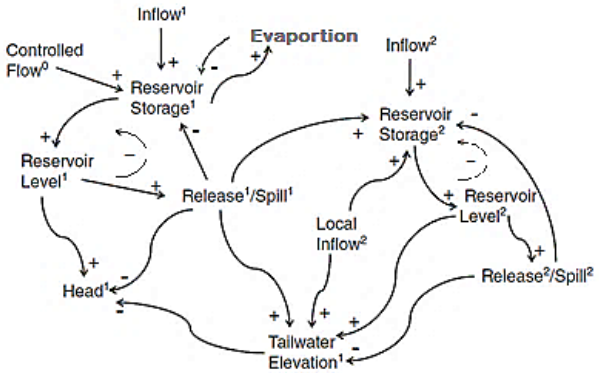

Fig. 1- Causal loop diagram for a reservoir hydropower system (Teegavarapu & Simonovic, 2014)

شکل ۱- فرآیندهای حلقه علی یک سیستم برق آبی (Teegavarapu & Simonovic, 2014)

در این شکل نشان داده شده است که چگونه خروجی آب یک نیروگاه برقابی ورودی نیروگاه دوم است و حجم آب پشت سد و سریز سدها، جریانات محلی، خروجی آب سدها، ارتفاع آب متوسط و نهایی چه ارتباطی با یکدیگر دارند. این ساختار علّی نشان‌دهنده روابط درونی بین مؤلفه‌های مختلف است و می‌تواند به درک رفتار سیستم کمک نماید.

شکل ۱ نشان دهنده ساختار علّت معلولی یک سیستم دو مخزنی به هم متصل شده است.

سرریز شدن، رهاسازی آب، سطح مخزن و اختلاف سطح کـــه در شکل ۱ نشان داده شده و با علامت ۱ و ۲ مشخص شده‌اند حاکی از وجود دو مخزن است. ورودی‌ها جریان‌های رو به داخل هستند که هم طبیعی و هم کنترل شده هستند. بازخوردها در این سیستم کاملاً مشهود بوده و بازخوردهایی منفی یا تعدیل‌گر هستند. این بازخوردها در پاسخ به عملیات کنترل شده تصمیم به رهاسازی و یا عملیات کنترل نشده (سرریز شدن آب) در سیستم، اعمال می‌شوند. به عنوان مثال افزایش جریان ورودی به بالا رفتن سطح مخزن می‌انجامد و این خود بر نحوه رهاسازی آب تأثیرگذار خواهد بود. اگر میزان رهاسازی آب افزایش یابد ارتفاع (ارتفاع آب بعد از سد) نیز افزایش می‌یابد و بنابراین به منظور تولید انرژی، اختلاف سطح بایستی کاهش یابد. اگر میزان رهاسازی محدود شود، میزان سرریز کنترل نشده همان اثر را بر سیستم وارد می‌کند.

ارتفاع آب بعد از سد[8] در یک مخزن بالادست متأثر از میزان ارتفاع آب در مخزن پایین دست است. عامل مهمی که در بسط دادن قوانین بهره‌برداری مورد توجه قرار می‌گیرد، اتصال هیدرولیکی[9] است. اما در صورتی که مخازن از سایر مخازن جدا باشند یا فاصله بسیار زیادی بین آنها باشد، اتصال هیدرولیکی وجود ندارد و در زمان گسترش مدل‌ها، نیازی به مطرح شدن آنها نیست (Wu & KW, 2009). در این مطالعه به دلیل اینکه یک سد تحت مطالعه قرار می‌گیرد و مخزن سد بعدی در فاصله بسیار دوری نسبت به سد کارون ۱ قرار گرفته و اتصال هیدرولیکی وجود ندارد نیازی به وارد نمودن ارتفاع آب بعد از سد در مدل نیست و ثابت در نظر گرفته شده است.

اتصال هیدرولیکی وجود ندارد نیازی به وارد نمودن ارتفاع آب بعد از سد در مدل نیست و ثابت در نظر گرفته شده است.

شکل ۲ ساختار مدل عملکرد یک سیستم با یک مخزن را نشان می‌دهد که آب ورودی این سد از خروجی و جریان های محلی بالادست بوجود می‌آید و خروجی آن به حوضچه سد بعد می‌ریزد. چهار مؤلفه در زمینه مخازن و دریاچه‌ها در محیط شبیه‌سازی وجود دارند، این مؤلفه‌ها شامل ورودی، خروجی، ذخیره و تولید برق می‌باشد. مدل یک نیروگاه برقابی نمونه که بر اساس نمودار حلقوی علت معلولی (شکل ۱) شبیه‌سازی کامپیوتری شده است در زیر ارائه می‌گردد.

خصوصیات ویژه مخزن عبارتند از نسبت ذخیره جریان ورودی محلی، جریان‌های کنترل شده از سایر مخازن (ورودی سیستم)، محاسبات مربوط به سرریز، رهاسازی آب، میانگین سطح ذخیره آب، تأخیر زمانی در انتقال آب و محاسبه اختلاف سطح برای تولید برق استفاده شده که در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

از این مرحله به بعد، عمل کامل کردن مدل آغاز می‌شود. طبیعت تکاملی مدل‌سازی امری اجتناب ناپذیری بوده و با حل مسأله در دست بررسی، مسأله تازه‌ای پیدا می‌شود یا درجه بالاتری از واقعیت اهمیت می‌یابد. پیدایش مسائل تازه و مطلوبیت یافتن شرایط جدید به اصلاح مدل و تهیه راه حل‌های بهتر می‌انجامد.

قوانین بهره‌برداری مخزن اغلب تغییر می‌کنند و براساس تفاوت موقعیت‌های موجود، دوباره تعریف می‌شوند. پیش‌داوری و آزمایش عملیات مخزن در بسیاری از موقعیت‌ها، به صرفه و سودمند است.

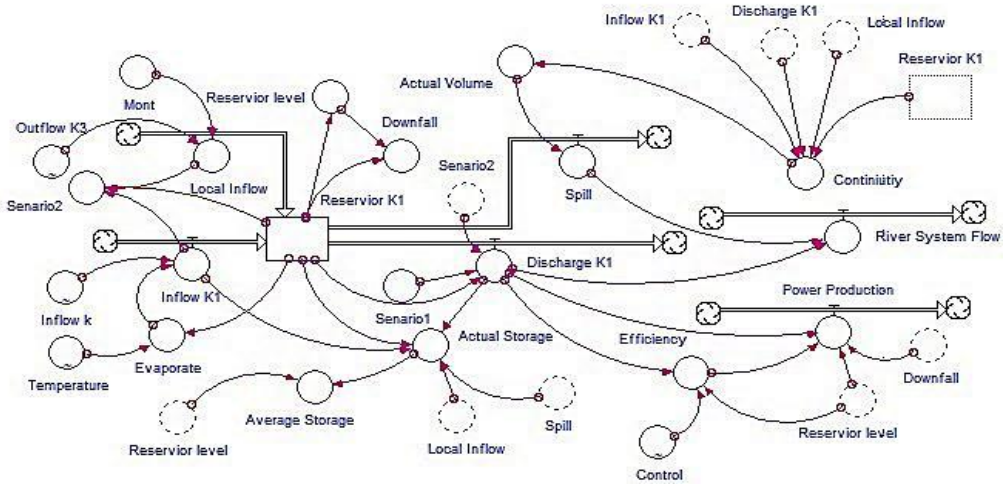

Fig. 2- The structure of Production model for hydropower system

شکل ۲- ساختار مدل تولید نیروگاه برقابی

با این وجود هدف اپراتور مخزن رهاسازی آب به بیشترین مقدار ممکن برسد تا تولید برق به ماکزیمم برسد. اضافه کردن قوانین مختلف درباره اکتشاف و وضع کردن آنها بر مخازن مختلف به یک رفتار سیستمی می‌انجامد که باعث می‌شود رفتار سیستم قابل پیش‌بینی نباشد یا به راحتی پیش‌بینی نشود.

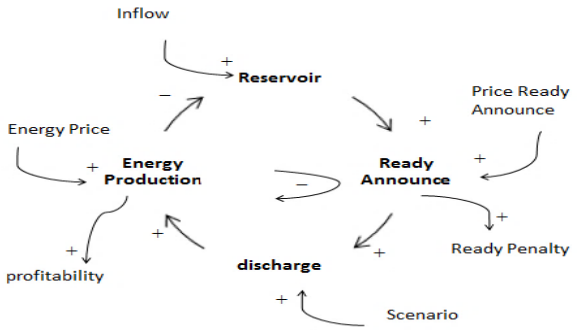

Fig. 3- Causal loop diagram of processes for a hydropower system to participate in power market

شکل ۳- فرایندهای حلقه علی یک سیستم برقابی برای مشارکت در بازار برق

حلقه علّی بخش سودآوری که یک حلقه بازخوردی منفی است با وجود متغیر تولید انرژی و قیمت‌های فروش آن شکل می‌گیرد. همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد، حلقه علّی سودآوری حول متغیر تصمیم رهاسازی آب با دخالت متغیرهای برونزای قیمت می‌چرخد و سناریوهای لازم برای تنظیم این متغیر به مدل وارد می‌شود.

در این سیستم انرژی تولید شده (شکل ۲) و به‌واسطه آن درآمدها ورودی و هزینه‌ها خروجی محسوب می‌شوند. ورودی‌ها شامل درآمد فروش انرژی اکتیو، راکتیو، اعلام آمادگی، خدمات جانبی و تنظیم فرکانس است. هزینه شامل هزینه‌های عملیاتی، تعمیر و نگهداری، استارت و استاپ، هزینه‌های جرایم و ثابت می‌باشد. در این بخش مدل سودآوری نیروگاه برقابی ارائه می‌گردد که در آن توابع و روابط با استفاده از مبدّل‌ها و کانکتورها تعریف شده‌اند. در این مدل، برای شبیه‌سازی سیستم از توابع متغیرهای تصادفی، شرطی، تأخیری و مونت کارلو استفاده شده است.

۲-۴- تعریف متغیرها و پارامترهای مدل

ساختار کلی مدل از یک سری متغیرهای جریان و ذخیره تشکیل شده است که از آنها در تشریح مدلی از یک سیستم واقعی استفاده می‌شود. در ابتدا متغیرهای فنی تعریف می‌شود و سپس روابط بین متغیرها توضیح داده می‌شود. متغیرهای مدل به صورت زیر تعریف می‌شوند.

جریان بین حوضه‌ای که به کانال اصلی جریان بین دو مخزن ملحق می‌شوند بایستی به عنوان ورودی به سیستم تلقی شوند و در تعادل حجم آب، نقش دارند. این جریان باعث افزایش حجم آب پشت سد می‌گردد. در بررسی سیستمی حوزه آبریز یک رودخانه برای تولید برقابی، مخزن سد که در یک دریاچه تخلیه می‌شود به عنوان مرزهای سیستم در نظر گرفته می‌شود (Sehlke and Jacobson, 2005). سیستم مخزن کارون ۱ یک جریان کنترل شده از سد کارون ۳ و سرریز این سد و همچنین جریان‌های ورودی بین حوضه‌ای از بالادست را دریافت می‌کند که می‌تواند به عنوان مرز سیستم[۱۰] مورد مطالعه در نظر گرفته شود.

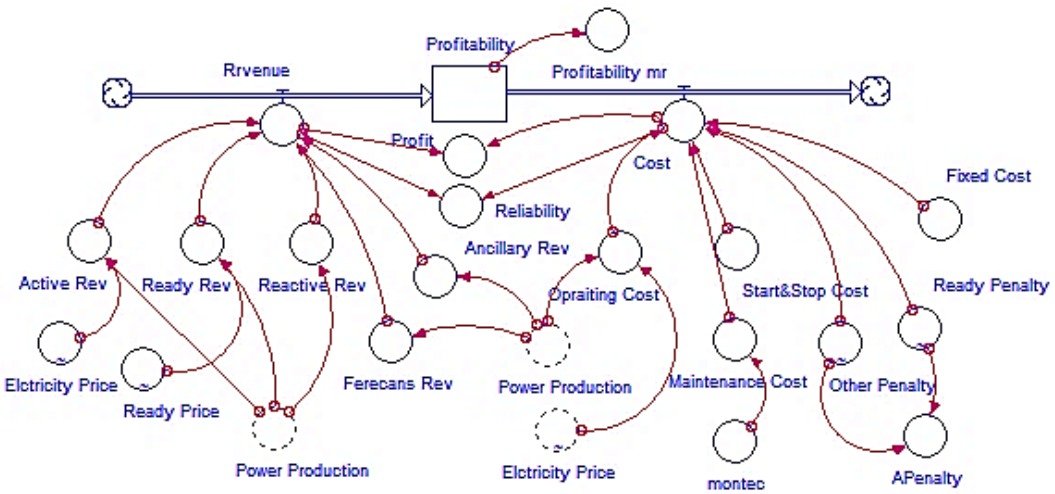

Fig. 4- The structure of Profit model for hydropower system

شکل ۴- ساختار مدل سودآوری نیروگاه برقابی

Table 1- The variables in the hydropower plant model

جدول ۱- متغیرهای بکار رفته در مدل نیروگاه برقابی

Active energy revenue	ACR_t	**Average elevation**	h_t^a
Ready revenue	RR_t	Initial and final elevations	h_t , h_{t+1}
Reactive revenue	RAR_t	Initial reservoir storage	S_0
Ancillary service revenue	ANR_t	Local inflow	I_t
Frequency revenue	FR_t	Tailwater	h_t^{tail}
Start and Stop Cost	$SSC_t^{montecarlo}$	Turbine outflow	r_t
Operating and maintenance cost	OMC_t	Energy generated	e_t^e
Fixed cost	FC_t	Reservoir storage	S_n^{min},S_n^{max}
Ready announcement price	P_t^s	Water Release	R_t
Electricity price	P_t^e	Dam's spill	$Spill_t$
Cost of non-ready penalty	RP_t	Evaporation	EV_t
Cost of other penalties	OP_t	Power plant efficiency	η
Power drop	h_t^f		

۲-۵- تعریف روابط میان متغیرهای مدل‌های تولید و سودآوری در نیروگاه برقابی

عملکرد سیستم را می‌توان با معادلات توضیح داد و از این طریق پویایی این فرآیندها را مطالعه کرد. در این مدل از ساختار و روابط پویایی‌های سیستم مانند: ذخیره- جریان، مبدل‌ها و کانکتورها برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. در مدل تولید انرژی برقابی از متغیرهای به کار رفته در Teegavarapu and Simonovic (2014) استفاده شده است. ترکیب هزینه و درآمد که در نهایت منجر به تعریف سود بنگاه می‌شود بر اساس ساختار هزینه- درآمد بنگاههای تولید کننده انرژی برقابی و با متغیرهای زیر تعریف می‌گردد:

$$\text{Maximize } \pi = \sum_{t=1}^{T}(e_t^e.P_t^e + e_t^e.P_t^S) + \sum_{t=1}^{T}(In_rec_t + In_anc_t + In_fqc_t) - \sum_{t=1}^{T}(FC_t + OMC_t + SSC_t^{montec} + RP_t + OP_t) \quad (۳)$$

$$h_t^a = (h_{t+1} + h_t)0.5 - h_t^{tail} - h_t^f \quad (۴)$$

$$e_t^e = \gamma\eta h_t^a r_t \quad (۵)$$

$$S_{n,t+1} = S_{n,t} + I_{n,t} + R_{n-1,t} - R_{n,t} - EV_{n,t} \quad (۶)$$

$$R_t = r_t + Spill_t \quad (۷)$$

$$Spill_t = \max[0,(S_{t+1} - S^{max})] \quad (۸)$$

$$S^{min} \le S_t \le S^{max} \quad (۹)$$

$$ACR_t = e_t^e.P_t^e \quad (۱۰)$$

$$RR_t = e_t^e.P_t^s \quad (۱۱)$$

بخش اول تابع هدف مربوط به درآمدهای فروش انرژی و درآمد اعلام آمادگی برای این تولیدکننده است و بخش دوم مربوط به هزینه‌هایی است که تولیدکننده با آن روبروست. برای بدست آوردن میانگین ارتفاع از رابطه ۲ استفاده می‌شود. معادلهٔ ۳ شامل روابطی است که می‌توان از طریق آنها برق تولیدی ژنراتور برق آبی مخزن (e_t^e) را محاسبه نمود. که در آن γ وزن مخصوص آب و سایر متغیرها در جدول ۱ تعریف شده‌اند. تعادل حجم مخزن‌ها در معادلهٔ ۶ تا ۸ بیان شده است. در روابط فوق، رابطه ۸ بیان‌کننده محدودیت سرریز و رابطه ۹ بیانگر محدودیت ذخیره مخزن است. متغیرهای S_t و S_{t+1} میزان ذخیره مخزن را در نخستین فواصل زمانی یعنی t و t+1 در واحد حجم نشان می‌دهند. متغیرهای R_t و $Spill_t$ به ترتیب میزان رهاسازی آب و سرریز را نشان می‌دهد. I_t مقدار پیش‌بینی شدهٔ جریان ورودی محلی و $R_{n-1,t}$ حجم رهاسازی شده توسط نیروگاه برقابی بالادست است. معادلات ۱۰ و ۱۱ به ترتیب بیانگر درآمد فروش انرژی اکتیو و راکتیو است. سایر متغیرهای درآمد و هزینه در تابع هدف، تخمین زده شده و در بخش ۱-۴ ارائه نتایج ارائه شده‌اند.

۲-۶- مطالعه موردی

در این مطالعه برنامه‌ریزی یک سد به منظور حداکثرسازی سود و شرکت در بازار برق مورد بررسی قرار می گیرد. سد کارون ۱ (شهید عباسپور) یکی از بزرگ‌ترین سدهای ایران است که بر روی رودخانه کارون در جنوب غربی ایران احداث شده‌است.

این سد در استان خوزستان و در ۵۰ کیلومتری شمال شرقی مسجد سلیمان، واقع شده‌است.

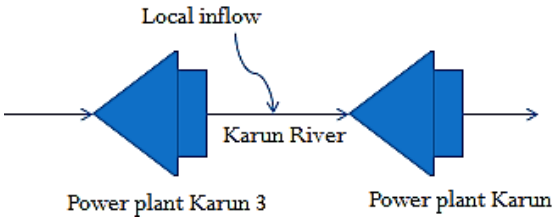

Fig. 5- Structure of the hydropower plants Karun3-Karun1

شکل ۵- شماتیک سیستم برقابی کارون ۱ و کارون ۳

مقدار آب ورودی به سد بین یک حداقل و حداکثر محدود است و اگر حجم آب سد در دوره‌ی فعلی در حداکثر نگه داشته شود، ممکن است در دوره‌ی بعدی، حجم آب ورودی به سد زیاد شده و عملاً بهره‌بردار نیروگاه آبی مجبور به سرریز آب اضافی شود. این‌کار باعث اتلاف انرژی برقابی می‌گردد. میانگین جریان ورودی طبیعی سد کارون ۱ در شکل زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

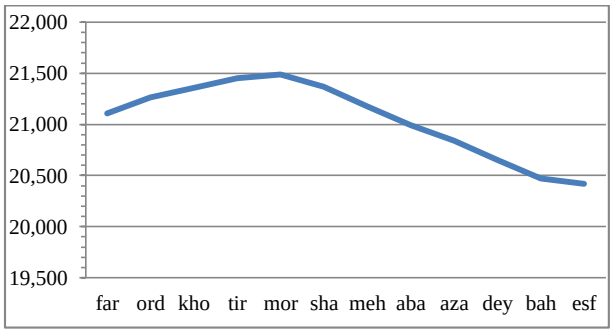

Fig. 6- The average monthly inflow to Karun1 reservoir

شکل ۶- میانگین جریان آب ورودی ماهانه به مخزن سد کارون ۱

همانطور که در شکل فوق ملاحظه می‌گردد، در بازه زمانی مورد مطالعه (۹۴-۱۳۸۴) میانگین ورودی به مخزن سد در مرداد به حداکثر میزان خود رسیده و در ماههای بعدی روند نزولی را طی می‌نماید. در جدول زیر مشخصات سد کارون ۱ ارائه شده است:

Table 2- Characteristics of Karun1 dam reservoir (Taghian and Shirdeli, 2016)

جدول ۲- مشخصات سد کارون ۱ (Taghian and Shirdeli, 2016)

Reservoir volume(MCM)	2997
Normal level (M)	530
Installed Capacity of power plant (MW)	2000
Power plant efficiency (%)	90

مقدار آب ورودی به سد بین یک حداقل و حداکثر محدود است و اگر حجم آب سد در دوره‌ی فعلی در حداکثر نگه داشته شود، ممکن است در دوره‌ی بعدی، حجم آب ورودی به سد زیاد شده و عملاً بهره‌بردار نیروگاه آبی مجبور به سرریز آب اضافی شود. این‌کار باعث اتلاف انرژی برقابی می‌گردد.

۳- نتایج

۳-۱- بررسی روابط میان مدل اقتصادی و تولیدی

به منظور اجرای مدل اقتصادی نیروگاه برقابی از تخمین روابط خطی میان این درآمدها و متغیرهای مدل تولید انرژی، استفاده می‌شود. این روابط بصورت فرم عمومی زیر با استفاده از نرم‌افزار Eviews 9 تخمین زده می‌شوند:

$$Rev_t=\beta_0+\beta_1.e_t^e+AR(q)+MA(q)+u_t \qquad t=1,...,T \qquad (۱۲)$$

در رابطه فوق Rev نشان‌دهنده درآمد و β_0 ثابت مدل و e_t^e متغیر مستقل (تولید انرژی) و u_t بیانگر جملات اخلال مدل است. همه تخمین‌های موجود در جدول زیر با استفاده از یک مدل ARMA بصورت زیر بدست آمده است که در مدل اقتصادی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

R^2 در تخمین‌های فوق بیانگر معناداری میان متغیرها است. آماره دوربین واتسون (D.W) نشان‌دهنده عدم وجود خود همبستگی میان متغیرهای این تخمین‌ها است.

Table 3- Relationships estimated for values of production vs income

جدول ۳- تخمین روابط بین مقادیر تولید و درآمد

Depended Variables	Constant	Production (e_t^e) Coefficients	R^2	D.W	J-Bera	Arch
RAR_t	431	-0.0005	0.54	1.84	80.6	6.3
ANR_t	223	-0.0004	0.84	1.83	86.3	5.9
FR_t	76	-0.0012	0.72	1.5	27.6	9.7

منبع: نتایج تحقیق

آماره جارک برا (J-Bera) برای تشخیص نرمال بودن رگرسیون و تست Arch جهت تعیین خود همبستگی سریالی میان جملات اخلال تخمین‌هاست. تست‌ها نشان از نرمال بودن نتایج تخمین‌ها دارد. تخمین مدل هزینه‌های عملیاتی بصورت زیر بدست آمده است:

(۱۳)

$$OMC_t = 14557 + 0.007.e_t^e + 0.015P_t^e + 0.7AR(1) \qquad t=1,...,T$$

$$R^2 = 0.96 \qquad D.W = 1.6$$

برای شبیه‌سازی هزینه‌های استارت و استاپ با استفاده از تابع مونت‌کارلو ابتدا هزینه متوسط هر بار استارت و استاپ بدست می‌آید:

$$SSC_t = Montecarlo(Rrpetition) \times SSCost \qquad (۱۴)$$

SS Cost هزینه هر بار استارت و استاپ نیروگاه است. که در محاسبات نیروگاهای برقابی هزینه هر بار استارت–استاپ را معادل ده ساعت درآمد (کار) آن نیروگاه محاسبه می‌نمایند. در شبیه‌سازی هزینه‌های استارت و استاپ در این مدل از تابع مونت‌کارلو استفاده شده است. در رابطه فوق ابتدا احتمال وقوع استارت و استاپ بر اساس تعداد اتفاق افتادن ماهانه در دوره زمانی محاسبه و سپس در میانگین هزینه هر بار استارت و استاپ ضرب می‌شود. مدل سودآوری نیروگاه‌های برقابی با توجه به ساختار هزینه درآمد این بنگاههای تولید کننده انرژی ارائه می‌شود. هزینه‌های مربوط به جرایم نیز به این دلیل که قابلیت تخمین رگرسیونی نداشتند (به دلیل داده‌های پراکنده، مفقود و کوتاه بودن دوره زمانی)، با نرخ افزایش ده درصد سالانه بر اساس داده‌های گذشته در نظر گرفته شده‌اند.

۳-۲- کاربرد مدل و حداکثرسازی سود

ویژگی تحلیل حساسیتِ محیط شبیه‌سازی برای مالکان نیروگاهها سودمند است زیرا از این طریق می‌توانند دستورالعمل‌های اجرایی در شرایط نامطمئن و مختلف، وضع کنند. در شکل ۷ منحنی سود بنگاه اقتصادی در دوره مورد پیش‌بینی به نمایش درآمده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود در ابتدا درآمد بالا بوده است و سپس به دلیل کاهش تولید و افزایش هزینه‌ها، سود بنگاه تحت تأثیر قرار گرفته و کاهش یافته است. این پیش‌بینی دو ساله بوده و برای ۲۴ ماه آینده نسبت به داده‌های بکار گرفته شده (۹۴-۱۳۸۴) تحقیق انجام شده است. همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می‌گردد درآمد و به طبع آن سود نیروگاه برقابی با توجه به توان تولیدی و آب ورودی به مخزن سد در ماههای مختلف از نوسان زیادی برخوردار است و در برخی ماهها با زیان همراه بوده است.

۳-۲-۱- حداکثرسازی سود با سناریوهای دشارژ آب

در این سناریو وضعیت سودآوری بنگاه تولیدکننده انرژی بـــا توجه به سناریوهای تخلیه آب مورد بررسی قرار گرفته است. همانطورکه انتظار می‌رود مهمترین متغیری که به دست مالکان نیروگاه قابل تغییر بوده و می‌تواند بر سودآوری تولید مؤثر باشد میزان دشارژ آب مخزن است. این متغیر مهمترین متغیری است که می‌توان بهینه‌یابی لازم برای کسب سودآوری[11] را بر روی آن انجام داد و در ضمن کنترل کننده میزان حجم ذخیره مخزن سد است. همانطور که در شکل زیر دیده می‌شود، تغییرات میزان رهاسازی آب برای پیش‌بینی ۲۴ ماه بعد تغییر یافته است. متغیر سودآوری در اینجا نشان دهنده سود تجمعی همراه با تغییرات مثبت و منفی سود نشان داده شده در شکل ۷ است که در شکل ۸ ارائه شده است.

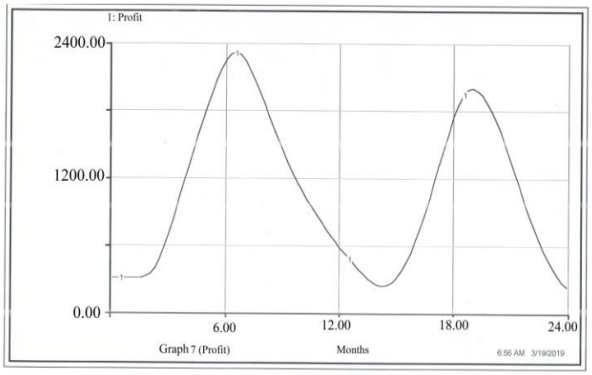

Fig. 7- Profit forecast for model of hydropower plant

شکل ۷- سود پیش‌بینی شده برای مدل نیروگاه برقابی

در شکل فوق سناریوهای ۱۰ تا ۴۰ درصد دشارژ آب به صورت سناریوهای سودآوری $\pi(r_{(10,20,30,40)})$ تحت مطالعه قرار گرفته است. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌گردد، با افزایش میزان دشارژ آب به منظور تولید انرژی، سودآوری بنگاه کاهش می‌یابد. در دشارژ آب تا میزان ۲۰ درصد سود در بالاترین وضعیت قرار دارد اما در بالاتر از آن به دلیل تخلیه بیش از حد مخزن سودآوری کاهش می‌یابد. در دشارژ با نرخ ۴۰ درصد ذخیره آب سد بزودی کاهش یافته و سودآوری به شدت کاهش می‌یابد که در اجرای ۴ شکل بالا کاملاً مشهود است. به منظور افزایش دقت بررسی، درصد تغییرات را کمتر می‌کنیم که در جدول زیر نشان داده شده است.

همانطور که از جدول فوق بر می‌آید با تغییرات در میزان رهاسازی آب در ماههای اولیه تغییرات زیادی در سودآوری حاصل نمی‌شود، اما در انتها تفاوت‌ها افزایش می‌یابد. همچنین از ۵ تا ۲۰ درصد دشارژآب ماهیانه از سد تغییر چندانی در سودآوری ایجاد نمی‌شود و این میزان ضامن قید حداکثرسازی سود در این نیروگاه است. اما بیش از ۲۰ درصد در ۶ ماهه اول حتی موجب افزایش سود گردد، اما در بلندمدت به دلیل تخلیه مخزن سد باعث کاهش سودآوری می‌گردد.

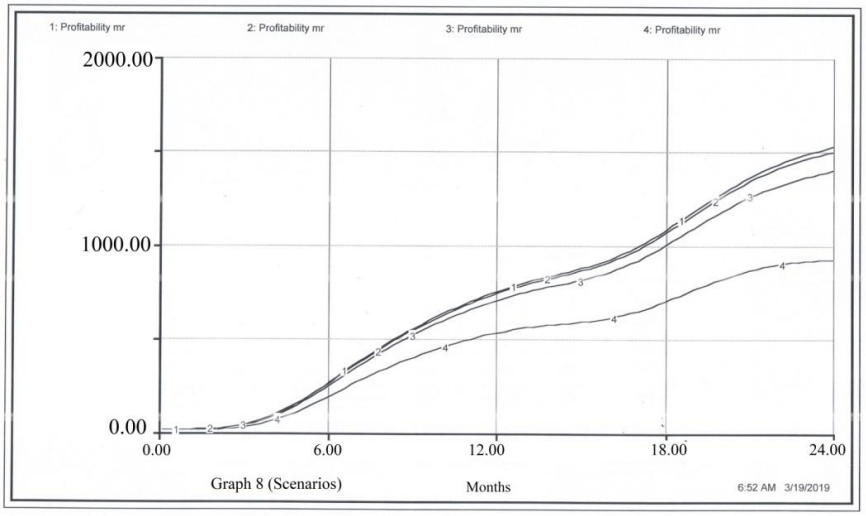

Fig. 8- The forecasted change in profitability with the changes in rate of water discharge scenarios

شکل ۸- پیش‌بینی تغییرات سود با سناریوهای تغییر در میزان دشارژ آب

Table 4- Variation of Profit based on different discharge scenarios

جدول ۴- میزان سودآوری (π) تولیدکننده انرژی با سناریوهای مختلف رهاسازی آب

Months	Scenarios (Percentage of Release)					
	5	10	15	20	25	30
6	690	693	693	693	695	698
12	1701	1708	1710	1706	1657	1609
18	2062	2074	2079	2072	1993	1911
24	3027	3036	3047	3035	2909	2752

منبع: نتایج تحقیق

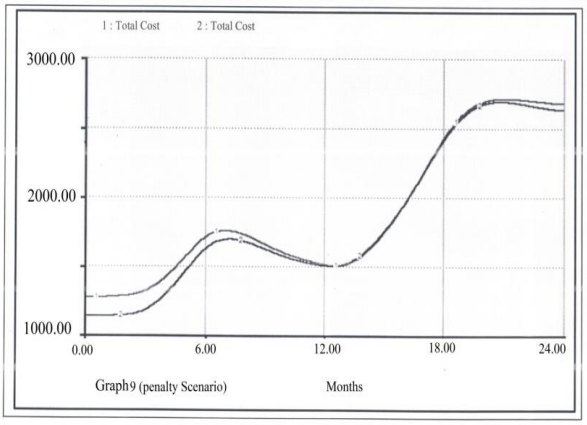

Fig. 9- The effects of penalty forgiveness on producer costs

شکل ۹- اثرات بخشش جریمه‌ها بر هزینه‌های تولیدکننده

۳-۲-۲- سناریو حذف جریمه‌ها

اگر جریمه‌های تولید کننده بخشیده شود تقریباً به این فرض که تولید کننده در تولید و فروش آزاد باشد رسیده‌ایم. البته برای دستیابی به این فرض تولیدکننده باید در ذخیره بهینه برای دستیابی به تولید بهینه نیز آزاد بوده و بتواند آب را در ماههای پرآب و یا دوره‌هایی که قیمت پایین‌تر است برای ماههای کم آبی و یا نرخ‌های بالاتر قیمت برق ذخیره نماید.

همانطوری که در شکل فوق دیده می‌شود در صورتی که جریمه‌ها از سیستم حذف گردند (اجرای دوم)، هزینه کل کاهش یافته و هموارتر می‌گردد در نتیجه پیش‌بینی برنامه‌ریزی برای تولید و سودآوری دقیق‌تر می‌شود.

۴- اعتبارسنجی مدل

بررسی پیرامون اعتبار مدل‌ها بر اساس قدرت پیش‌بینی مدل با توجه به مشخصات ساختاری و رفتاری سیستم و همچنین قدرت مدل در بکارگیری متغیرها انجام می‌گیرد.

رویکرد پویایی های سیستمی زمانی می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر مورد استفاده قرار گیرد که بتوان به وسیله آن فرایندهای گوناگون را بررسی و یا به کمک آن سناریوها و سیاست‌های مختلف را با دیدگاه سیستمی ارزیابی کرد (Ghasemianfard and mosavirad, 2017). آزمون‌های متعددی در زمینه اعتبارسنجی مدل‌های پویا مطرح شده

است که به دو دسته آزمون‌های ساختاری و رفتاری تقسیم می‌شوند. مدل این پژوهش بارها از طریق خصوصیات رفتاری مورد ارزیابی و اصلاح قرار گرفته است. بعد از شبیه‌سازی و انطباق آن با واقعیت، امکان بیشتری برای بهبود کارایی الگو در شبیه‌سازی وضعیت سودآوری نیروگاه فراهم گردید که در نهایت منجر به ارائه الگوی حاضر شد. مدل حاضر با استفاده از ادبیات موجود به شکلی تعدیل و اعتبار بخشیده که ابزاری برای تست کردن سناریوها و شبیه‌سازی‌های مختلف شده است. در حالت کلی مدل‌های توسعه یافته که از اصول پویایی‌های سیستم پیروی می‌کنند را می‌توان با انجام آزمون‌های از جمله آزمون حد نهایی یا تحلیل حساسیت، اعتبار زیرسیستم، اعتبار ظاهری و پیش‌بینی، اعتبار بخشید (Teegavarapu & Simonovic, 2014). در آزمون حد نهایی مقدار متغیرهای مدل را در حالت‌های بسیار زیاد و بسیار کم تغییر داده و میزان حساسیت مدل در برابر این تغییرات بررسی می‌شود (Mosavirad and Godsian, 2015). در این تحقیق از آزمون حد نهایی برای بررسی تحلیل حساسیت و اعتبار سنجی مدل استفاده شده است.

۴-۱- تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت[۱۲] شامل تغییرات مختلف در پارامترها یا ورودی مسأله و بررسی آن بر پاسخ مدل است. آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که سیستم نسبت به کدام پارامترها حساس‌تر است. همچنین می‌توان از این آزمایش به منظور تأیید پیش‌بینی‌های سیستم استفاده نمود. مدل شبیه‌سازی شده از طریق به کارگیری تغییرات ورودی آب مورد آزمایش تحلیل حساسیت قرار گرفت. مدل از طریق ورودی‌های متنوع مورد آزمایش تست حساسیت قرار گرفت. در سیستم تحت مطالعه، مهمترین متغیر جریان ورودی به مخزن سد است و زمانی که میزان ذخیره مخزن کم است این متغیر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. شبیه‌سازی فرایند تصادفی با ایجاد اختلال در متغیر جریان ورودی به مخزن، صورت می‌گیرد که در شکل زیر اثرات جریان ورودی کاهنده بر سودآوری تولیدکننده برای دوره مورد بررسی نشان داده شده است.

همانطور که در شکل فوق دیده می‌شود سودآوری بنگاه کاملاً به میزان ورودی سیستم حساس است و با تغییرات جزیی در متغیر جریان ورودی به سیستم تحت تأثیر قرار گرفته و تغییر می‌یابد. در این شکل حساسیت متغیر سود بنگاه نسبت به تغییرات حجم آب ورودی با توجه به روندهای تصادفی بکار گرفته شده در محاسبه آن نشان داده شده است. در شکل فوق سناریوهای ۵ تا ۲۰ درصد کاهش در آب ورودی پشت سد به صورت سناریوهای سودآوری $\pi(W_{(5,10,15,20)})$ تحت مطالعه قرار گرفته است.

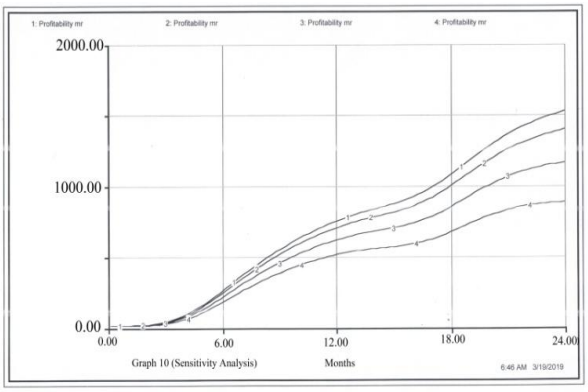

Fig. 10- The sensitivity analysis on profitability with the changes in rate of inflow water

شکل ۱۰- تحلیل حساسیت سودآوری با وجود جریان ورودی پشت سد

همانطور که از شکل فوق بر می‌آید با کاهش ۵ درصدی در آب ورودی تأثیر زیادی در تولید و سودآوری ندارد اما با افزایش خشکسالی و کاهش آب ورودی به صورت تصاعدی از میزان سودآوری کاسته می‌شود.

سناریوهای مختلف رهاسازی آب که در جدول ۴ نیز مورد مطالعه قرار گرفت به نوعی یک تست تحلیل حساسیت محسوب می‌شود. همانطور که از جدول ۴ بر می‌آید با تغییرات در میزان رهاسازی آب در ماههای اولیه تغییرات زیادی در سودآوری حاصل نمی‌شود، اما در انتها تفاوت‌ها افزایش می‌یابد. در این مورد حساسیت سودآوری نسبت به رهاسازی آب سنجیده شده است.

۵- شاخص عملکرد سیستم

دو شاخص قابلیت اعتماد[۱۳] و آسیب‌پذیری[۱۴] برای اندازه‌گیری عملکرد و اعتبار سیستم استفاده می‌شوند. قابلیت اطمینان سیستم را می‌توان از طریق تعداد دفعات رسیدن به هدف در یک افق زمانی، ارزیابی کرد. آسیب‌پذیری به وضعیتی اطلاق می‌شود که بر اثر یک نقص خاص، سیستم متحمل هزینه ناخواسته و یا مشمول جریمه می‌شود (Hashimoto and Stedinger, 1982). این دو شاخص برای سیستمهای برق آبی مناسب هستند. عملکرد سیستم بر پایه تعداد دفعاتی که میزان تولید انرژی مد نظر محقق می‌گردد اندازه‌گیری می‌شود، آسیب‌پذیری میزان شدت یک نقص در حالت از کار افتادگی سیستم را مشخص می‌کند. بطور کلی قابلیت اعتماد و آسیب‌پذیری سیستم به جریان‌های ورودی وابسته هستند زیرا نقش مهمی در کارکرد سیستم بعهده دارند. وجود اختلاف در شاخص‌های قابلیت اطمینان، محتمل است و با تعداد دفعاتی سروکار دارد که میزان مورد

نیاز از پیش تعیین شده، محقق شده است (Miloca et al., 2015). ابتدا به شاخص قابلیت اطمینان می‌پردازیم که در معادلات زیر توضیح داده شده‌اند:

$$\rho=\sum_{t=1}^{T}\pi_t \qquad (۱۵)$$

$$if(\rho>\rho_{target},then\alpha=1,else\alpha=0) \qquad (۱۶)$$

که در آن، ρ کل سود حاصل از تولید و ρ_{target} مقدار سود هدف است. شاخص قابلیت اطمینان α نیز به صورت نسبت تعداد بازه‌های زمانی که سود نیروگاه (ρ) از سود تعیین شده (ρ_{target})، تجاوز نماید تقسیم بر تعداد کل فواصل زمانی (بر مبنای ماه). تعریف تصحیح شدهٔ قابلیت اطمینان α عبارتست از:

$$\alpha=\frac{v}{t} \qquad (۱۷)$$

که در آن مقدار α باینری است و فقط اعدادی بین ۱ و ۰ می‌گیرد. مقادیر قابلیت اطمینان برحسب معادله ۱۱ محاسبه می‌شود. در اینجا v تعداد دفعاتی است که انرژی تولید شده از هدف تعیین شده فراتر رفته است و t تعداد کل فواصل زمانی در افق زمانی عملیات تحت بررسی است. بطور متوسط تعداد دفعاتی که v از هدف تعیین شده فراتر رفته است ۱۶ بار در دوره پیش‌بینی ۲۴ ماهه بوده است و شاخص قابلیت اطمینان سیستم (α) حدود ۶۷ درصد بوده که نشان دهنده شاخص مناسبی از سودآوری این بنگاه تولید کننده انرژی در طول دوره مورد مطالعه بوده است.

شاخص آسیب‌پذیری نشان دهنده نسبت هزینه به دوره زمانی که در آن نقص رخ داده است. شاخص آسیب‌پذیری به مقادیر تجمعی هزینه‌های جریمه در همه افق زمانی دلالت دارد. مقادیر کوچکتر شاخص، نشان‌دهندهٔ عملکرد بهتر سیستم است. این شاخص نیز با همان رهیافت شاخص قابلیت اطمینان محاسبه و از شاخص جریمه استفاده می‌گردد. در تعریف شاخص آسیب‌پذیری (υ) داریم:

$$\upsilon=\frac{\delta}{t} \qquad (۱۸)$$

که در آن δ تعداد دفعات جریمه شدن و t طول دوره مورد بررسی می‌باشد که بطور متوسط تعداد دفعاتی که تولید کننده مشمول هزینه جریمه می‌شود ۱۰ مرتبه در دوره پیش‌بینی (t) ۲۴ ماه بوده است. در نتیجه شاخص آسیب‌پذیری سیستم در حدود (υ =۰/۴۲) یا ۴۲ درصد بوده است.

۶- خلاصه و جمع بندی

مسأله برنامه‌ریزی اقتصادی یک سیستم هیدرولیکی در واقع تعیین برنامه‌ریزی تخلیه آب مخزن سد دریاچه به منظور تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز، کسب سود و برآورده شدن محدودیت‌های فنی سد خواهد بود. اکثر سیستم های منابع آب به لحاظ ابعاد بزرگ بوده و دارای مدل پیچیده‌ای هستند. تحلیل حساسیت بر اساس تعیین حساسیت مدل نسبت به تغییر یک یا چند پارامتر مطالعه می‌شود. مدل توسعه یافته شبیه‌سازی در تحقیق حاضر بر اساس این آزمون اعتبار بخشی شده است. مدل شبیه‌سازی شده از طریق به کارگیری تغییرات ورودی آب مورد آزمایش تحلیل حساسیت قرار گرفت. در سیستم تحت مطالعه، مهمترین متغیر جریان ورودی به مخزن سد است و زمانی که میزان ذخیره مخزن کم است این متغیر اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. برای انجام تحلیل حساسیت، توجه به شرایط اولیه ذخیره، مقدار جریان کنترل شده جهت ورود به سیستم لازم است. محیط شبیه‌سازی شی‌گرا می‌تواند به سادگی تحلیل حساسیت را انجام دهد و از طریق ایجاد اختلال در پارامترها و مقادیر متغیر مدل مانند ورودی سیستم، باعث کارکرد چندگانه مدل شبیه‌سازی شده می‌گردد.

مدل بکار گرفته شده در این تحقیق، از اصول شبیه‌سازی دینامیک سیستم بهره می‌گیرد تا سیستم‌های برقابی را شبیه‌سازی نماید. مهمترین مزیت این مدل این است که می‌توان آن را در ایجاد سناریو و ارزیابی عملکرد سیستم تولید انرژی برقابی به کار برد. اعتبار نتایج مدل را می‌توان با انجام مقایسه نتایج حاصل از مدل دینامیک سیستم و نتایج عملیات واقعی سیستم به دست آورد. نتایج کلی مدل توسعه یافته برای سد و نیروگاه مورد نظر در دوره مورد پیش‌بینی ۲۴ ماهه به شرح جدول ۵ است.

در این تحقیق یک مدل پویای تولید–سودآوری، به منظور مدل‌سازی دینامیک عملیات یک سیستم مخزنی برقابی و روند سودآوری تولیدکننده بسط داده شده و در شکل ۸ و جدول ۴ سناریوهای مختلف برای حداکثرسازی سودآوری بررسی شده است.

Table 5- Overall results of developed model

جدول ۵- نتایج کلی مدل توسعه یافته

Monthly profit average (MR)	Monthly flow rate average (CMS)	Monthly energy average (GWH)	Optimal minimum level (M)
126	418	185	477

منبع: نتایج تحقیق

مدل شبیه‌سازی توسعه یافته در این پژوهش، در شرایط مختلف عملیاتی، مزایای زیادی دارد که عبارتند از: ۱- ایجاد و ارزیابی قوانین مختلف عملیاتی براساس شرایط مختلف مرتبط با جریان‌های ورودی، سطوح ذخیره اولیه و شرایط ارتفاع آب، ۲- ارزیابی عملکرد سیستم از طریق شاخص‌های عملکرد سیستم، ۳- کاربردی بودن مدل در تصمیمات عملیاتی.

قابلیت اطمینان و آسیب‌پذیری به عنوان شاخصهایی برای کیفی‌سازی عملکرد سیستم، به کار گرفته شده‌اند و در پاسخ به شرایط مختلف جریان‌های ورودی، این مزیت را برای تصمیم‌گیرندگان به همراه دارند که جنبه اقتصادی بودن عملیات سیستم، را بهتر درک نمایند. مدلی که در این تحقیق از آن استفاده شده، دارای میزان تأخیر ثابت است. می‌توان با تغییر دادن زمان تأخیر در انتقال آب بین سدها، به سناریوهای زیادی دست یافت. همچنین می‌توان با تغییر میزان جریان خروجی از مخزن میزان تولید برق متفاوت را بدست آورد و آن وضعیت را در سودآوری مورد بررسی قرار داد.

پی‌نوشت‌ها

1- Predicted Locational Marginal Prices
2- Day-Ahead Electricity Market
3- Down-Side Risk
4- Signal Extraction in ARIMA Time Series
5- Time Series Regression with ARIMA Noise, Missing Observations, and Outliers
6- System Dynamics Modeling
7- Object-Oriented
8- Tailwater
9- Hydraulic Coupling
10- Boundaries of the System
11- Profitability
12- Sensitivity Analysis
13- Reliability
14- Vulnerability

۷- مراجع

Arshadi M, Bagheri A (2014) A system dynamic approach to sustainability analysis in karun river basin, Iran. Iran-Water Resources Research 9(3):1-13 (In Persian)

Azrakani M, Shokoohi A, Singh V (2017) Introducing a holistic ecological model under data shortage for determining rivers' ecological water requirements. Iran Water Resources Research 13(2):140-153 (In Persian)

Cheng CT, Chau K, Sun Y, Lin Y (2005) Long-term prediction of discharges in Manwan Reservoir using artificial neural network models. Lect Notes Science 3498:1040-1045

Costanza R, Gottlieb S (1998) Modeling ecological and economic systems with STELLA: part II. Ecol Model 112(2–3):81-84

Forrester JW (1961) Industrial dynamics. Productivity Press, Portland

Fotookian M, Safari N, Zarghami, M (2017) System dynamics modeling of Yamchi Reservoir (Iran) by applying optimum cropping pattern for operation policy proposal. Iran Water Resources Research 13(3):1-16 (In Persian)

Hannon B, Ruth M (1997) Modeling dynamic biological systems. Springer, New York

Ghadami S, Ghahraman B, Sharifi M, and Rajabi Mashhadi H (2009) Optimization of multireservoir water resources systems operation using genetic algorithm. Iran-Water Resources Research 5(2):1-15 (In Persian)

Ghasemianfard E, Mosavirad S H (2017) Undelivered electricity in North-Kerman Electricity Distribution Company: system dynamics analysis. Quarterly journal of energy policy and planning research 3(8):119-145

González AM, Roque AMS, Garcia-Gonzalez J et al. (2005) Modeling and forecasting electricity prices with input/output hidden Markov models. IEEE Transactions on Power Systems 20(1):38-52

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

Haghbin S, Alimohammadi S (2018) Development of flexible rule curve for reservoir operation via fuzzy approach. Iran-Water Resources Research 13(4):132-143

Haghighat H (2008) On the self-scheduling of a power producer in uncertain trading environment. Electric Power System Research 78:311-317

Hosseini Safa H, Morid S and Moghaddasi M (2011) Evaluation of fuzzy rule generation methods for reservoir operation. Iran-Water Resources Research 7(1):13-25 (In Persian)

Hoyland K and Wallace SW (2001) Generating scenario trees for multi-stage decision problems. Manage Science 47(2):295-307

Jabr RA (2005) Robust self-scheduling underprice uncertainty using conditional value-at-risk. IEEE Trans. Power System 20:1852-1858

effects reduction. Iran Water Resources Research 13(1):20-3 (In Persian)

Roberts N, Andersen D, Deal R, Garet M, Shaffer W (1983) Introduction to computer simulation, a system dynamics approach. Productivity Press, Portland

Plazas MA, Conejo AJ and Prieto F (2005) Multimarket optimal bidding for a power producer. IEEE Trans, Power System 20(4):2041-2050

Safavi H R, Golmohammadi M H (2016) Evaluating the water resource systems performance using fuzzy reliability, resilience and vulnerability. Iran-Water Resources Research 12(1):68-83 (In Persian)

Sehlke G, Jacobson J (2005) System dynamics modelling of transboundary systems: the Bear River basin model. Ground Water 43(5):722-730

STELLA (2009) Structural Thinking, Experiential Learning Laboratory with Animation: model building and simulation tutorials. NH, USA

Stützle T and Hoos H (1997) Max-Min Ant System and local search for combinatorial optimization problems. In Proceedings of Meta heuristics, International Conference

Taghian M, Shirdeli A (2016) Maximizing the hydropower generation in multi-objective reservoir system (The 6 dams system of Karun). Water and Soil Conservation 23(3)

Teegavarapu R S, Simonovic S P (2014) Simulation of multiple hydropower reservoir perations using system dynamics approach. Water Resource Manage 28:1937-1958

Wu CL, Chau KW, Li SY (2009) Predicting monthly streamflow using data-driven models coupled with data preprocessing techniques. Water Resources 45:8-32

Zuwei Yu, Sparrow FT, Bowen BH (1998) A new long-term hydro production scheduling method for maximizing the profit of hydropower systems. IEEE Transaction on power system 13:66-71

Jahani E, Mousavi SJ (2017) How much information on future stream flows is utilizable in design and operation of dam reservoirs? Iran-Water Resources Research 12(4):50-59 (In Persian)

Jamalmanesh A, Khodaparast Mashhadi M, Seifi A, Mohammad Ali Falahi MA (2018) Prediction of hydropower energy price using Gómes-Maravall seasonal model. International Journal of Energy Economics and Policy 8(2):81-88

Ladurantaye Daniel D, Gendreau M and Potvin Y (2009) Optimizing profits from hydroelectricity production. Computers & Operations Research 36:499-529

Majidi Kh M, Alizadeh A, Farid A, Vazifedoust M (2017) Evaporation from lakes and reservoirs: developing a remote sensing algorithm of refrence and water surface energy balance. Iran Water Resources Research 13(2):154-169 (In Persian)

Miloca SA, Volpi NMP, Yuan J and Pinto C (2015) Expansion planning problem in distribution system with reliability evaluation: an application in real network using georeferenced database. International Journal of Electrical Power & Energy Systems 70:9-16

Ministry of Energy, Deputy for Energy (2014) Energy balance. Ministry of Energy, Office of Planning for Electricity and Energy, Tehran

Moeini R (2015) Performance evaluation of the ant colony optimization algorithm for the optimal operation of a multi-reservoir system: comparing four algorithms. Iran-Water Resources Research 11(2):29-46 (In Persian)

Mosavirad S H, Godsian H, (2015) Analyzing the elites emigration and the impacts of preventive policies by using system dynamics. Strategic management research 21(59):37-63

Nelson RR and Winter SG (1982) An evolutionary theory of economic change. Cambridge MA: Belknap press of Harvard University Press

Raghibi V, Safavi H, Mortazavi-Naeini M (2017) Conjunctive use of water resources based on drought