Advanced Technologies in Water Efficiency
homepage:https://atwe.razi.ac.ir
Online ISSN:2783-4964
Razi University

Impacts assessment of Karun Bozorg Catchment development on production of hydrpower energy

Hasan Torabi Poodeh [1]✉ , **Simin Khosravi** [2]

[1] Corresponding author, Associate Professor, Department of the Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran. Email: torabi.ha@lu.ac.ir
[2] M. Sc graduated of Water structures, Department of the Water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran. Email: simin.khosravi@ymail.com

ABSTRACT

Introduction

Iran, with rainfall of less than one third of the world average, is considered one of the arid regions, and this is despite the fact that on the one hand, a significant part of the water leaves the country. On the other hand, due to improper exploitation of sources and lack of integration in the studies of different plans at the level of catchment basins. The goals of many dam construction projects such as water regulation and containment in order to meet the need and produce electric energy in contrast to other plans such as water transfer between basins or the expansion of agricultural areas The subject of the present research is to investigate the effects of the development of the Great Karun watershed, whether in the form of inter-basin water transfer plans or in the form of intra-basin development, on the amount of electrical energy produced by the dams of this basin.

Materials and methods

The area studied in this research is the Great Karun watershed, which consists of Karun and Dez rivers that are two important and large rivers in Iran. These two rivers currently have 6 dams with the ability to produce electric energy, of which 5 dams, Karun 4, Karun 3, Karun 1, Godarlander and upper Gotund are located on the Karun River and Dez reservoir dam is located on the Dez river.

Results and discussions

After 2008, the amount of withdrawal from underground water resources has increased and currently it is more than the amount considered in this research, so definitely the amount of the effect of excessive withdrawal from underground water resources on the production of electric energy is more than the value shown has been done in this research. And if this upward trend of extraction from underground water resources continues, the reduction of produced electrical energy due to excessive extraction from underground water resources will be significant in the future time horizons. Excessive extraction of the underground water resources of the Sezar basin, contrary to the fact that it is expected to be effective only in the amount of electric energy production of the Dez dam power plant, the power plants of other reservoirs, especially the Karun 3 power plant, are also effective on the Karun river.
The development of the Great Karun catchment basin has had the greatest impact on the primary energy production of Dez and Karun 4 and Karun 3 reservoir dams, which is primarily due to the transfer plans between water basins and secondly due to the relationship with the Karun 4 and Dez dams, there is no other reservoir dam immediately upstream of these two dams, because the presence of one dam immediately upstream of the other dam causes the water flow to enter the dam in a regulated manner, which It causes a significant increase in electricity production.

Conclusion

The results of this research show that according to the energy requirement defined for the power plants of Great Karun basin, there is currently a significant lack of primary energy, which is the lack of ability of the basin for further development, both internally and externally. The existence of the annual deficit percentage of the required primary energy is equal to 29% for the current basin power plant complex and with the current water transfer needs and plans, and the increase of this deficit percentage to 36% for the horizon of 2040 and the uses within the basin and the plan. The inter-basin water transfer considered in this research, for this time horizon, considering the importance of electric energy as one of the most important and best sources of electricity production in the country and the impossibility of predicting the future climate and Its effect on the drainage of the basin is very important and somewhat worrying.

Keywords: Hydropower energy, Karun Bozorg Catchment, Water inter-basin transfer, Weap model.

Article Type: Research Article
Article history: Received: 29 January 2022 **Revised:** 25 April 2022 **Accepted:** 31 May 2022 **ePublished:** 23 August 2022

Cite this article: Torabi Poodeh, H., &Khosravi, S. (2022). Impacts assessment of Karun Bozorg Catchment development on production of hydrpower energy, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(2), 1-13. DOI: 10.22126/atwe.2022.7429.1010

Publisher: Razi University
© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب

وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

ارزیابی اثرات توسعه‌ی حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ بر تولید انرژی برقابی

حسن ترابی پوده [۱]✉، سیمین خسروی [۲]

[۱] نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان. لرستان، ایران. رایانامه: torabi.ha@lu.ac.ir

[۲] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران. رایانامه: simin.khosravi@ymail.com

چکیده

حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ به‌عنوان تأمین‌کننده‌ی بخش مهمی از انرژی برقابی کشور، حائز اهمیت فراوان است. در این پژوهش اثرات توسعه‌ی حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ بر تولید انرژی برقابی این حوضه موردبررسی قرارگرفته است. به این منظور با توجه به زمان‌بندی پروژه‌های اجرایی توسعه‌ی منابع آب در حوضه‌ی موردبررسی، مدل منابع، مصارف و مخازن حوضه، تحت ۱۱سناریو در سه افق زمانی شرایط موجود، افق زمانی ۱۴۰۴و افق زمانی ۱۴۲۰ با در نظر گرفتن ترکیب‌های گوناگون از منابع و مصارف آب حوضه در محیط نرم‌افزار ویپ تهیه گردید، و سپس با توجه به نتایج حاصل از اجرای مدل تهیه‌شده، انرژی برقابی اولیه تولیدشده در محیط نرم‌افزار اکسل محاسبه گردید، و نتایج آن موردبررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از این پژوهش نشان‌دهنده‌ی کمبود قابل‌ملاحظه‌ی انرژی برقابی اولیه تولیدشده در نیروگاه‌های حوضه در مقایسه با نیاز انرژی، در هر سه افق زمانی موردبررسی و درنتیجه عدم توانایی منابع آب حوضه جهت توسعه‌ی بیشتر و اثرات قابل‌توجه طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب بر میزان تولید انرژی برقابی است.

واژه‌های کلیدی: انرژی برقابی، حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ، مدل ویپ، مطالعه‌ی یکپارچه منابع آب.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۹ بهمن ۱۴۰۰ **اصلاح:** ۰۵ اردیبهشت ۱۴۰۱ **پذیرش:** ۱۰ خرداد ۱۴۰۱ **چاپ الکترونیکی:** ۰۱ شهریور ۱۴۰۱

استناد: ترابی پوده، ح.، و خسروی، س. (۱۴۰۱). ارزیابی اثرات توسعه‌ی حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ بر تولید انرژی برقابی ، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۲(۲)، ۱-۱۳. شناسه دیجیتال:10.22126/atwe.2022.7429.1010

ناشر: دانشگاه رازی

©نویسندگان.

مقدمه

کشور ایران با میانگین بارش کمتر از یک‌سوم متوسط جهانی، جزء مناطق خشک محسوب شده و این در حالی است که از یک‌سو بخش قابل‌توجهی از آب‌ها از کشور خارج می‌گردد و از سویی دیگر به دلیل بهره‌برداری نادرست از منابع و عدم یکپارچه نگری در مطالعات طرح‌های مختلف در سطح حوضه‌های آبریز، اهداف بسیاری از پروژه‌های سدسازی همانند تنظیم و مهار آب به‌منظور تأمین نیاز و تولید انرژی برقابی در تقابل با دیگر طرح‌ها نظیر انتقال آب بین حوضه‌ای یا گسترش مناطق کشاورزی قرار می‌گیرد. روند مطالعات و اجرای طرح‌های مختلف بهره‌برداری از منابع آب حوضه‌های دز و کارون، در سال‌های اخیر از شتاب بیشتری برخوردار شده است و به دلایلی نظیر عدم هم‌زمانی مطالعات، تغییراتی که به‌صورت پیش‌بینی‌نشده در طرح‌ها رخ می‌دهد و همچنین معرفی طرح‌های جدید، هیچ‌گاه رویکردی جامع و یکپارچه مدنظر نبوده و ارزیابی اقتصادی این طرح‌ها بدون در نظر گرفتن اثرات متقابلشان بر سیستم انجام پذیرفته است، این مهم لزوم بازنگری و بررسی مجدد سیستم دز و کارون را با رویکردی سیستمی یادآور می‌شود، البته باید در نظر داشت که مطالعات یکپارچه با توجه به تأثیرپذیری از کوچک‌ترین تغییرات در سطح حوضه همانند تغییرات اقلیمی یا تغییرات پیش‌بینی‌نشده در پارامترهای طراحی، باگذشت چند سال نیاز به بازنگری و اعمال ملاحظات جدید دارد. بنابر مطالب بیان‌شده، در این پژوهش به بررسی اثرات توسعه‌ی حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ چه در قالب طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب و چه به‌صورت توسعه‌ی درون حوضه‌ای بر میزان تولید انرژی برقابی نیروگاه‌های سدهای این حوضه پرداخته‌شده است. پیشینه مطالعات سیستمی در حوضه‌ی دز و کارون به اواخر دهه‌ی ۷۰ برمی‌گردد. در یکی از جدیدترین این مطالعات، طرح جامعی در رابطه با حوضه‌ی موردنظر، توسط دو مشاور ایرانی و خارجی مهاب قدس[1]و اسکات ویلسون انگلستان[2] با عنوان طرح مدیریت بهینه سیستم رودخانه‌های کارون و دز انجام پذیرفت. این طرح شامل مطالعات محیط‌زیست، برنامه‌ریزی نیرو، منابع و نیازها، سیلاب، کشتیرانی و مدل بهره‌برداری و برنامه‌ریزی جهت سیستم رودخانه‌های دز و کارون است. کارفرمای این طرح سازمان آب و برق خوزستان بوده و در اواخر سال ۱۳۸۰ به مشاورین ابلاغ گردید.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

افتخار جوادی و نیک‌فال(۱۳۸۵)[3]اثرات توسعه‌ی حوضه‌ی آبریز دز و کارون را بر تولید انرژی برقابی ارزیابی کردند، نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان‌دهنده‌ی کاهش تولید انرژی برقابی در اثر به مدار آمدن طرح‌های انتقال بین‌حوضه‌ای و افزایش نیاز آبی کشاورزی است. فرخیان و همکاران(۱۳۹۱)[4]؛ در مطالعه‌ای به بررسی زیست‌محیطی و مدیریتی طرح انتقال بین‌حوزه‌ای قمرود از حوضه‌ی کارون بزرگ پرداخته‌اند. نتایج بررسی‌های آن‌ها بیانگر بروز خطرات جدی مانند کاهش دبی رودخانه‌های دز و کارون، کاهش سطح زیر کشت محصولات کشاورزی، کاهش تولید برق از نیروگاه‌های برقابی، عدم دریافت نیاز آبی تالاب‌ها و خشک شدن چاه‌های آب در استان خوزستان حوضه‌ی پایین‌دست طرح، با بهره‌برداری از طرح قمرود می‌باشد. هاریسون و وایت‌تینگتون(۲۰۰۲)[5]؛ بیلفیوس(۲۰۱۰)[6]؛ همودیودو و کیل‌لینگت‌ویت(۲۰۱۲)[7]؛ گایودارد و همکاران(۲۰۱۳)[8]؛ ماران و همکاران(۲۰۱۴)[9]؛ اسپالدینگ فیچر و همکاران(۲۰۱۴)[10]و آرهین‌هیمر و همکاران(۲۰۱۴)[11]؛ هرکدام در پژوهشی جداگانه و با روش‌ها و مدل‌های گوناگون به بررسی تأثیرپذیری و حساسیت تولید انرژی برقابی در نیروگاه‌های سدها در حوضه‌های آبریز مختلف جهان پرداخته‌اند. نتیجه‌ی مشترک تمامی این پژوهش‌ها و روش‌ها و مدل‌های به‌کاربرده شده در مناطق مختلف دنیا، نشان‌دهنده‌ی وابستگی و

[1] Consulting Engineering Company Mahab GHods
[2] Consulting Engineering Company Scott Wilson England
[3] Eftekharjavadi & Nikfal
[4] Farokhian et al
[5] Harrison & WHittington
[6] Beilfuss
[7] Hamududu & Killingtveit
[8] Gaudard et al
[9] Maran et al
[10] Spalding-Fecher et al
[11] Rheinheimer et al

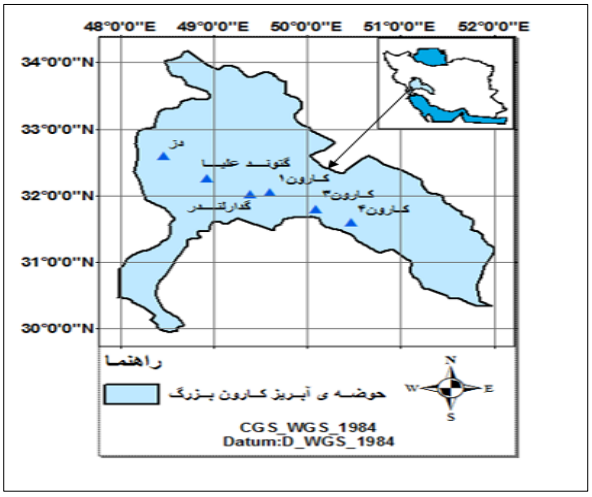
حساسیت بسیار بالای تولید انرژی برقابی در نیروگاه‌های سدها نسبت به رواناب جریان ورودی به مخازن سدها است، که بنابرآن هرگونه عامل تأثیرگذار در کمیت رواناب مانند کاهش رواناب در اثر تغییرات اقلیمی و گرم شدن زمین و یا کاهش در میزان بارندگی، کاهش جریان ورودی به مخازن در اثر بهره‌برداری از طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای و توسعه‌ی مناطق کشاورزی در بالادست و یا افزایش رهاسازی از مخازن به دلیل افزایش نیاز آبی مناطق پایین‌دست و یا باهدف تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه در پایین‌دست، موجب کاهش تولید انرژی برقابی در نیروگاه‌های سدها می‌شود و تمامی این پژوهش‌ها، توجه به مدیریت یکپارچه‌ی منابع آب را در توسعه‌ی حوضه‌های آبریز، جهت توسعه‌ی پایدار امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر می‌دانند و خواستار توجه به اصول مدیریت یکپارچه‌ی منابع آب در مطالعات پایه‌ی طرح‌های توسعه‌ی منابع آب می‌باشند. اونوکوای وهمکاران (۲۰۲۲)[1]از روش RSM برای بهینه‌سازی تولید انرژی برقابی جبا در نیجریه استفاده نمودند. مطالعات نشان داد که توان خروجی خالص، سرعت توربین و راندمان نیروگاه آبی را می‌توان با افزایش دبی و هد ناخالص بهینه کرد. دانشگر و زاهدی (۲۰۲۲) تولید و سودآوری نیروگاه‌های آبی را با رویکرد سیستم پویا موردبررسی قراردادند. در این مطالعه عدم قطعیت وضعیت جریان آب ورودی و قیمت برق برای این تولیدکننده توسط مدل گومز پیش‌بینی و وارد مدل شده است. روش‌های رهاسازی آب و هزینه‌های قابل‌قبول سناریوهای جداگانه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. نتایج نشان داد که سناریوی تخلیه ۱۵ درصد سد با ۳۰۴۷ دلار بر مگاوات برای بیست و چهارمین ماه بیشترین سود را دارد. اوزیگیس و همکاران(۲۰۲۲)[2]عملکرد نیروگاه برق‌آبی کاینجی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی چندگانه مورد ارزیابی قراردادند. آن‌ها از نتایج یافتند که حداکثر توان خروجی ۴۷۶ مگاوات و ۳۹۱ مگاوات به ترتیب برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۵ در مقابل ظرفیت طراحی ۷۶۰ مگاوات پیش‌بینی شد. بنابراین، نگهداری سیستم توربین برای افزایش خروجی نیروگاه مطلوب است. با انجام این پژوهش به دنبال یافتن پاسخی برای این سوال می‌باشیم، که با در نظر گرفتن کلیه‌ی نیازهای حوضه‌ی کارون بزرگ در شرایط فعلی و تغییراتی که پیش‌بینی‌شده است در مصارف آب حوضه رخ دهد، وضعیت تولید انرژی برقابی در نیروگاه‌های سدهای حوضه به چه صورت خواهد بود، و آنگاه با توجه به پاسخ این سوال، توانایی حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ را برای توسعه، با توجه به پتانسیل تولید انرژی برقابی، مورد ارزیابی قرار دهیم.

روش پژوهش

منطقه‌ی موردمطالعه

منطقه‌ی موردمطالعه در این پژوهش، حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ متشکل از دو رودخانه‌ی مهم و بزرگ کارون و دز است. این دو رودخانه در حال حاضر دارای ۶ سد با توانایی تولید انرژی برقابی می‌باشند، که ۵ سد، کارون۴، کارون۳، کارون۱، گدارلندر و گتوند علیا بر روی رودخانه‌ی کارون و سد مخزنی دز بر روی رودخانه‌ی دز قرار دارد. موقعیت حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ و۶ سد مذکور موردمطالعه در این پژوهش در شکل(۱) نمایش داده‌شده است. داده‌های مورداستفاده در این پژوهش، داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه‌ی کارون بزرگ جهت محاسبه‌ی آبدهی سرشاخه‌ها و رودخانه‌های حوضه‌های میانی به‌منظور مدل‌سازی منابع آب این حوضه، داده‌های مربوط به مصارف آب حوضه در تمامی زمینه‌های شرب و صنعت، کشاورزی و آبزی‌پروری، زیست‌محیطی و طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب از سرشاخه‌های حوضه تا خلیج‌فارس و همچنین اطلاعات مربوط به ۶ سد موجود و موردبررسی حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ، شامل حجم نرمال، حجم حداقل بهره‌برداری، نمودار حجم– سطح – ارتفاع، میزان تبخیر ماهانه از سطح مخازن، منحنی دبی– اشل پایاب نیروگاه‌ها، ظرفیت نصب نیروگاه، راندمان نیروگاه، ضریب کارکرد پیک نیروگاهی، تعداد واحدهای نیروگاه، دبی طراحی و ارتفاع طراحی توربین‌ها، با همکاری سازمان آب و برق خوزستان، مشاوران محترم و همچنین از طریق گزارش‌ها مختلف مربوط به منابع، مصارف و مخازن این حوضه گردآوری شد. برخی از این اطلاعات در جداول(۱)و(۲) ارائه‌شده است.

[1] Onokwai et al
[2] Ozigis et al



شکل۱. موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی آبریز و مخازن موردمطالعه

جدول۱. طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب در نظر گرفته‌شده در این پژوهش

عنوان طرح	محل برداشت	اهداف طرح	وضعیت طرح
کوهرنگ ۱	سرشاخه‌های رود کارون	شرب و کشاورزی	بهره‌برداری
کوهرنگ ۲	سرشاخه‌های رود کارون	شرب و کشاورزی	بهره‌برداری
ماربران (مکمل کوهرنگ۲)	سرشاخه‌های رود کارون	شرب و کشاورزی	بهره‌برداری
کوهرنگ۳	سرشاخه‌های رود کارون	شرب و کشاورزی	اجرائی
بهشت‌آباد	سرشاخه‌های رود کارون	شرب- صنعت- تولید برق	اجرائی
قمرود	سرشاخه‌های رودخانه بختیاری- زیر حوضه‌ی دز- حوضه کارون بزرگ	شرب و صنعت	بهره‌برداری
چشمه لنگان	سرشاخه‌های رودخانه بختیاری- زیر حوضه‌ی دز- حوضه کارون بزرگ	شرب و صنعت و کشاورزی	بهره‌برداری
خدنگستان	سرشاخه‌های رودخانه بختیاری- زیر حوضه‌ی دز- حوضه کارون بزرگ	شرب و صنعت و کشاورزی	بهره‌برداری
کمال صالح	سرشاخه‌های رودخانه سزار- زیر حوضه‌ی دز- حوضه کارون بزرگ	شرب و صنعت	بهره‌برداری

جدول۲. مشخصات سد و نیروگاه‌های موردبررسی در این پژوهش

	کارون٤	کارون۳	کارون۱	گدارلندر	گتوندعلیا	دز
حجم نرمال (MCM)	۲۱۹۲	۲۷۵۰	۲۸۰۰,۸	۲۲٦,۳	٤٥۹٥,٤	۳۰٤٦,۳
حجم حداقل بهره‌برداری (MCM)	۱۳۱۸,۳	۱۲٥۰	۱٥۱۸,۱	۱۸۰,۷	۲۸٦٤,۷	٥٥۹,۷
ظرفیت نصب نیروگاه (MW)	۱۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	٥۲۰
تعداد واحدهای نیروگاهی	٤	۸	۸	۸	۸	۸
ضریب کارکرد پیک نیروگاهی (%)	۲۰	۱٦	۱۳	۱۰	۱٥	٤٤
راندمان (%)	۹۲	۹۲	۹۰	۹۲	۹۳	۹۰
دبی طراحی هر واحد (m^3/s)	۱۸۰,۱	۱۷٦,۹	۱۸٦,٦	۱۹٤,۸	۲۳۱,۲	٥٤
هد طراحی (m)	۱٦۰,۸	۱٥٦,٦	۱٥۱,۷	۱۳٦,۳	۱۲۳,۸	۱۳٦,٥

در این پژوهش به‌منظور بررسی اثرات توسعه‌ی حوضه‌ی آبریز بر وضعیت تولید انرژی برقابی، با توجه به زمان‌بندی اجرای پروژه‌ها، مدل حوضه در سه افق زمانی شرایط موجود، افق زمانی ۱۴۰۴ و افق زمانی ۱۴۲۰ تهیه گردید، و کلیه‌ی مصارف این حوضه از طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب تا مصارف درون حوضه‌ای از سرشاخه‌ها تا خلیج‌فارس در این سه افق زمانی با توجه به میزان مصرف سالانه آب، تغییرات ماهانه مصرف آب و همچنین میزان آب برگشتی آن‌ها در مدل در نظر گرفته شد. سدهای مدل‌سازی شده نیز عبارت از ۶ سد کارون۴، کارون۳، کارون۱، گدارلندر و گتوند علیا بر روی رودخانه کارون و سد مخزنی دز بر روی رودخانه دز است. جهت مدل‌سازی منابع آب حوضه از سری زمانی آبدهی سرشاخه‌ها و حوضه‌های میانی سدها در یک دوره‌ی آماری ۵۰ ساله استفاده‌شده است. نکته‌ی قابل‌توجه در مدل‌سازی منابع آب حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ، آبدهی رودخانه‌ی سزار از سرشاخه‌های اصلی رودخانه‌ی دز، است. پژوهش‌های انجام‌شده بر روی آبدهی رودخانه‌ی سزار نشان‌دهنده‌ی وجود روند منفی معنادار در جریان آبدهی این رودخانه است. نتایج بررسی‌ها نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که علت وجود این روند منفی معنادار آبدهی رودخانه‌ی سزار، کاهش بارندگی و یا افزایش برداشت از منابع آب سطحی حوضه‌ی سزار نیست، بلکه نتایج نشان می‌دهد، با توجه به وجود تعاملات آب‌های سطحی و زیرزمینی و با توجه به این موضوع که آب‌های سطحی و زیرزمینی منابعی جدا از هم نیستند و پیوسته با یکدیگر در تعامل هستند، برداشت بیش‌ازحد از منابع آب‌های زیرزمینی موجب کاهش آبدهی معنادار این رودخانه شده است. به‌طوری‌که میانگین سری زمانی پیش‌بینی‌شده‌ی این رودخانه با احتساب برداشت‌های زیرزمینی، در حدود (m^3/s) ۲۲,۴۲ از میانگین سری زمانی آبدهی این رودخانه در حالت عدم برداشت بیش‌ازحد از منابع آب‌های زیرزمینی که موجب تعاملات آب‌های سطحی و زیرزمینی نمی‌شود، کمتر است(خسروی،۱۳۹۴). بنابراین لازم است با توجه به اصل مدیریت یکپارچه منابع آب این تغییر در آبدهی رودخانه سزار نیز در پیش‌بینی جریان آبدهی ورودی به دریاچه سد دز از رودخانه سزار و درنهایت در مدل‌سازی حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ لحاظ شود، تا بازتاب کلی آن در وضعیت حوضه مشخص شود. به‌منظور بررسی اثرات تغییرات در منابع و مصارف حوضه لازم است، مدل‌سازی و بررسی وضعیت حوضه در شرایط مختلف در نظر گرفته شود. بدین منظور در این پژوهش ۱۱سناریو در نظر گرفته‌شده است، که شرایط حوضه در این سناریوها به‌طور خلاصه در جدول(۳) ارائه‌شده است. در این پژوهش برای مدسازی منابع، مصارف و مخازن حوضه آبریز در افق‌های زمانی و سناریوهای مذکور از نرم‌افزار ارزیابی و برنامه‌ریزی سیستم منابع آب ویپ[1] استفاده‌شده است. مدل ویپ بر اساس معادلات بیلان آبی عمل کرده و می‌تواند محدوده زیادی از مسائل مانند تحلیل نیاز هر بخش، حقابه‌ها و اولویت‌های تخصیص، شبیه‌سازی آب‌های سطحی، بهره‌برداری از مخزن، تولید انرژی برقابی و نیازهای اکوسیستم را پوشش دهد. تحلیل‌گر، سیستم را به‌صورت اجزای مختلف، منابع تأمین(مانند رودخانه‌ها)، برداشت و انتقال، نیازهای اکوسیستم و نیازهای آبی ارائه می‌دهد. ساختار داده‌ها و سطح جزئیات را می‌توان به شکل دلخواه درآورد تا نیازهای یک تحلیل خاص را برآورده کرد و محدودیت‌های ناشی از کمبود داده‌ها را نشان

[1] Water Evaluation And Planning System

داد. مزیت اصلی مدل ویپ، در رویکرد یکپارچه در شبیه‌سازی سیستم‌های آبی و جهت‌گیری آن در راستای سیاست‌ها است(خودآموز ویپ،۲۰۰۸[1]). فرضیات در نظر گرفته‌شده در این پژوهش برای تهیه مدل حوضه موردنظر توسط نرم‌افزار ویپ به شرح زیر است.

- اولویت تأمین نیاز به ترتیب شرب و صنعت، زیست‌محیطی، کشاورزی و آبزی‌پروری است.
- هدف اولیه سدهای کارون۴، کارون۳، کارون۱ و گدارلندر تولید انرژی برقابی و هدف اولیه سدهای گتوندعلیا و دز تأمین نیاز پایین‌دست است.
- آب برگشتی شرب و صنعت ۸۰ ٪ و کشاورزی ۲۰ ٪ در نظر گرفته‌شده است.
- مدل در گام زمانی ماهانه تهیه‌شده است.

جدول۳. مشخصات سناریوهای مدل‌سازی شده جهت بررسی اهداف پژوهش

	مصارف مدل شده							طرح‌های انتقال آب مدل شده							تأثیر
	شرایط موجود	افق ۱٤۰٤	افق ۱٤۲۰	کوهرنگ۱	کوهرنگ۲	ماربران	کوهرنگ۳	بهشت‌آباد	چشمه لنگان	خدنگستان	قمرود	کمال صالح	برداشت بیش‌ازحد منابع آب زیرزمینی بر آبدهی حوضه
سناریو۱													
سناریو۲													
سناریو۳													
سناریو٤													
سناریو٥													
سناریو٦													
سناریو۷													
سناریو۸													
سناریو۹													
سناریو۱۰													
سناریو۱۱													

علیرغم توانایی‌های بسیار نرم‌افزار ویپ، این نرم‌افزار درزمینه‌ی مطالعه‌ی سیستم‌های برقابی نقاط ضعفی دارد و امکان تعریف سدهای صرفاً برقابی در مدل وجود ندارد. در این تحقیق برای رفع این مشکل و جهت مدل‌سازی نیروگاه‌های مخازن کارون۴، کارون۳، کارون۱ و گدارلندر که هدف اولیه‌ی آن‌ها تولید انرژی برقابی است از روش ارائه‌شده توسط جلالی و همکاران(۱۳۸۷)[2]استفاده‌شده است. مطابق با این روش در مدل ویپ،

[1] Weap, User Mannual
[2] Jalali et al

یک محل نیاز مجازی در پایین‌دست سد تعریف‌شده و چون آب خروجی از نیروگاه به‌طور کامل به پایین‌دست انتقال پیدا می‌کند، مقدار مصرف آب[1] در محل نیاز صفر واردشده و درنتیجه صد درصد آب ورودی به محل نیاز مجازی، برگشت داده‌شده و با یک خط برگشتی به رودخانه بازمی‌گردد. در تعریف مقدار نیاز انرژی برای این گره مجازی، ابتدا محدودیت هد حداکثر و حداقل بررسی می‌شود و سپس در صورتیکه هد خالص روی توربین در محدوده مجاز باشد، مقدار حجمی نیاز محاسبه می‌شود. رابطه نیاز انرژی به‌صورت رابطه(۱) تعریف می‌شود.

$$\text{if } H_{net}>H_{min}\rightarrow V_D=0 \text{ , if } H_{net}>H_{max}\rightarrow V_D=0 \text{ ,} \qquad (۱)$$

$$\text{if } H_{min}\leq H_{net}\leq H_{max}\rightarrow V_D=Q_{req}\times PF\times 3600$$

در این رابطه:

V_D : حجم آب موردنیاز نیروگاه برای تولید انرژی اولیه برحسب مترمکعب

H_{min} : حداقل هد مجاز آب روی توربین برحسب متر

H_{max} : حداکثر هد مجاز آب روی توربین برحسب متر

PF : تعداد ساعات پیک ماهانه نیروگاه

Q_{req} : دبی موردنیاز نیروگاه برای تولید انرژی اولیه برحسب مترمکعب بر ثانیه که با رابطه(۲) قابل‌محاسبه است.

$$Q_{req}=\min\left(\frac{P_{dep}\times 1000}{9810\times E\times H_{net}},Q_{max}\right) \qquad (۲)$$

دبی موردنیاز نیروگاه دارای دو محدودیت است، محدودیت دبی حداکثر عبوری از توربین‌ها و محدودیت حداکثر توان تولیدی نیروگاه که به ظرفیت نصب محدود است.

H_{net} : هد خالص آب روی توربین که با رابطه(۳) قابل‌محاسبه است.

$$H_{net}=H_t\text{-TWL-}H_f \qquad (۳)$$

H_t : تراز مخزن در ابتدای ماه برحسب متر

TWL: تراز پایاب نیروگاه برحسب متر از سطح دریا

H_f : افت هد برحسب متر

تمامی پارامترهای مورداستفاده در روابط فوق برای هر چهار مخزن کارون۴، کارون۳،کارون۱ و گدارلندر در قسمت فرضیات اصلی مدل ویپ واردشده‌اند. برای تعریف پارامترهای مورداستفاده از توابع داخلی مدل ویپ که به سه گروه کلی: توابع ریاضی ، توابع مدل‌سازی و توابع منطقی تقسیم می‌شوند، استفاده‌شده است. پس از محاسبه حجم آب موردنیاز نیروگاه با رعایت تمامی ملاحظات و عوامل محدودکننده در مدل ویپ، این مقادیر حجم آب، به نرم‌افزار اکسل جهت انجام محاسبات برقابی فرستاده‌شده و محاسبه‌ی میزان تولید انرژی اولیه، در محیط نرم‌افزار اکسل با روشی که در ادامه آورده شده است، انجام گردید. محیط نرم‌افزار اکسل جهت انجام محاسبات برقابی به‌گونه‌ای طراحی گردید، که بار دیگر تمامی محدودیت‌ها و ملاحظات مؤثر بر میزان تولید انرژی اولیه نیروگاه را بررسی می‌کند و سپس میزان انرژی اولیه‌ی شده را ارائه می‌دهد.

[1]Consumption

رابطه اصلی توان که در محاسبات انرژی به کار می‌رود، به‌صورت رابطه(۴) است:

$$P_t=\frac{\gamma Q_t H_t E_t}{1000} \quad (۴)$$

که در آن:

P_t : توان تولیدشده در دوره t به کیلووات

γ : وزن مخصوص آب معادل ۹۸۱۰ نیوتن بر مترمکعب

Q_t: دبی ورودی به توربین در دوره t به مترمکعب بر ثانیه

H_t: ارتفاع هیدرولیکی خالص (هد) آب روی توربین در طی دوره t به متر

E_t : راندمان کلی نیروگاه

و محدودیت‌های زیر که بر تولید انرژی تأثیرگذار می‌باشند در نظر گرفته‌شده است:

$N \rightarrow$ تعداد واحدهای نیروگاه

$P_t \leq PPC$

$Q_{min} \geq Q_t \leq Q_{max}$

$H_{min} \geq H_t \leq H_{max}$

PPC:ظرفیت نصب نیروگاه به کیلووات

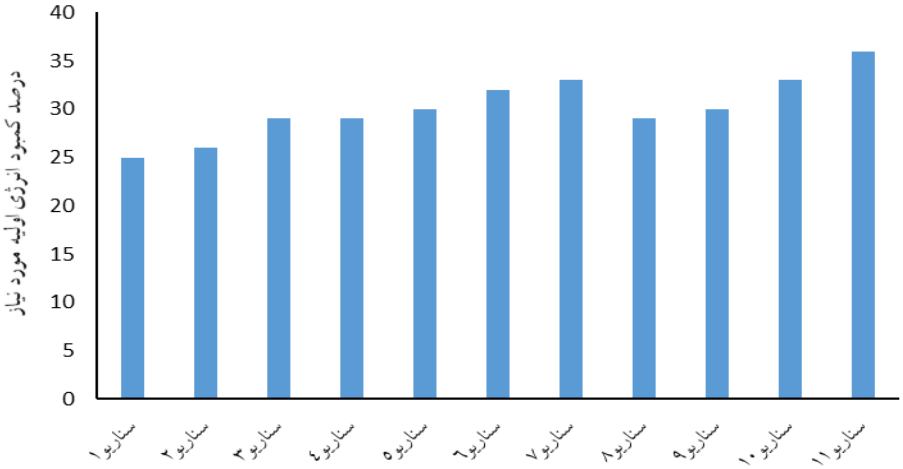
Q_{min}: حداقل دبی مجاز توربین به مترمکعب بر ثانیه

Q_{max} :حداکثر دبی مجاز توربین به مترمکعب بر ثانیه

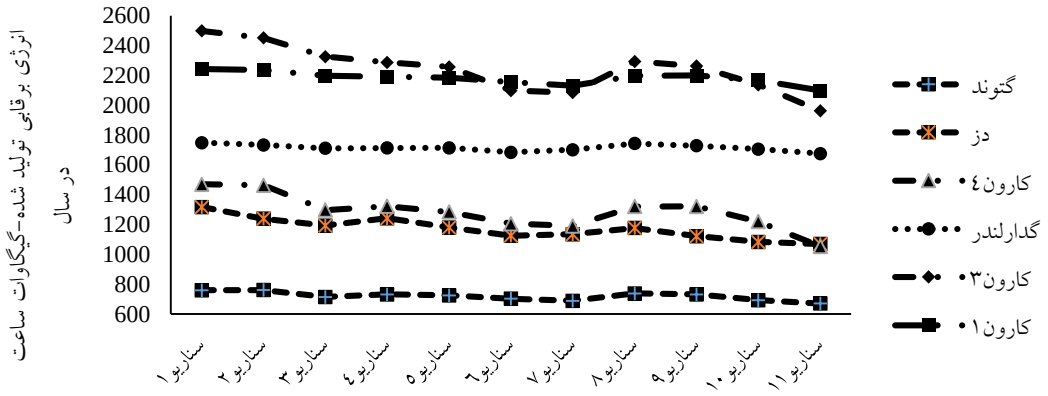
یافته‌ها

نیاز انرژی اولیه به‌صورت حاصل‌ضرب ظرفیت نصب نیروگاه در تعداد ساعات پیک در هرماه تعریف می‌گردد. با توجه به این تعریف و انرژی تولیدشده در هر سناریو می‌توان درصد کمبود انرژی اولیه موردنیاز را محاسبه کرد. مقادیر درصد کمبود سالانه انرژی اولیه‌ی موردنیاز تعریف‌شده برای سیستم مخازن حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ، برای هریک از سناریوهای ۱ تا ۱۱ درشکل(۲) نشان شده است. با توجه به تعاریفی که از سناریوهای ۱تا ۱۱ در جدول(۳) ارائه‌شده است و همان‌طور که در شکل(۲) دیده می‌شود، توسعه‌ی حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ باعث کاهش تولید انرژی اولیه گردیده است. سناریوهای ۲، ۵ و ۹ به‌منظور بررسی اثر برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی حوضه‌ی سزار که موجب کاهش آبدهی ورودی به دریاچه سد دز شده است، طراحی گردیده است. با توجه به شکل‌های(۲) و(۳) و مقایسه سناریو۱ با سناریو۲، سناریو۴ با سناریو۵ و همچنین سناریو۸ با سناریو۹ می‌توان دریافت که برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی حوضه‌ی سزار باعث کاهش تولید انرژی اولیه‌ی در حوضه‌ی موردبررسی گردیده است، اگرچه این میزان کاهش بسیار ناچیز به نظر می‌رسد، اما بایستی به این نکته توجه داشت که برداشت از منابع آب زیرزمینی در این پژوهش تا پایان سال آبی ۸۷-۱۳۸۶موردبررسی قرارگرفته است، در صورتیکه در چند سال اخیر پس از سال ۱۳۸۷ میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی افزایش‌یافته و در حال حاضر بیش از مقدار در نظر گرفته‌شده در این پژوهش است، بنابراین قطعاً میزان تأثیر برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی بر تولید انرژی برقابی بیشتر از مقدار نشان داده‌شده در این پژوهش و در شکل‌های(۲) و(۳) است، و

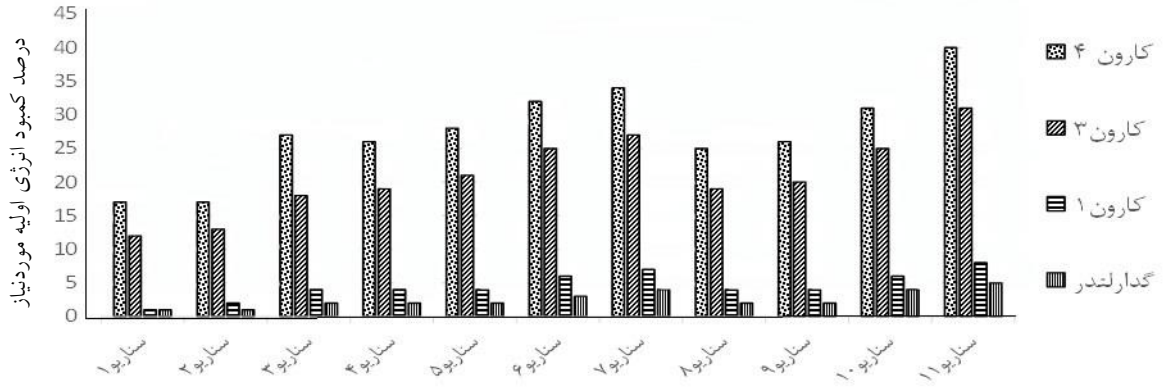
چنانچه این روند صعودی برداشت از منابع آب زیرزمینی ادامه یابد، کاهش انرژی برقابی تولیدی در اثر برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی در افق‌های زمانی آینده فراوان خواهد بود. نکته‌ی جالب‌توجه دیگری که با ملاحظه شکل(۳) در رابطه با نتایج سناریوهای ۲، ۵ و۹می‌توان دریافت، این است که برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی حوضه‌ی سزار برخلاف اینکه انتظار می‌رود تنها بر میزان تولید انرژی برقابی نیروگاه سد دز مؤثر باشد، برنیروگاه‌های مخازن دیگر به‌ویژه نیروگاه سد کارون۳ بر روی رودخانه‌ی کارون نیز مؤثر است، و این نکته ضرورت مطالعه‌ی سیستمی و یکپارچه‌ی منابع آب را گوشزد می‌کند، که هرگونه تغییر در گوشه‌ای از سیستم دارای بازتاب کلی در کل سیستم است. سناریوهای۳، ۶، ۷، ۱۰و ۱۱ به‌منظور بررسی اثرات طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای و همچنین اثرات توسعه‌ی این طرح‌ها نسبت به شرایط موجود، در کنار برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی، طراحی گردیده است. درشکه(۲) با مقایسه سناریوهای مذکور با سناریوهای ۱، ۲، ۴، ۵، ۸ و ۹ می‌توان اثرات قابل‌توجه این طرح‌ها را بر کاهش انرژی اولیه تولیدی نیروگاه‌های حوضه درک کرد، به‌گونه‌ای که همان‌طور که در شکل(۴) مشاهده می‌شود، در سناریو ۱۱ درصد کمبود انرژی اولیه‌ی موردنیاز برای نیروگاه کارون۴ و کارون ۳ به ترتیب ۱۰و ۷ درصد نسبت به سناریو ۱۰ افزایش‌یافته است، درحالی‌که تنها تفاوت سناریوهای ۱۰ و۱۱با توجه به جدول(۳) در به مدار آمدن طرح انتقال آب بهشت‌آباد و کوهرنگ۳ در سناریو۱۱ است، همچنین با توجه به شکل(۳) طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب سبب می‌شود که در افق‌های زمانی ۱۴۰۴ و ۱۴۲۰ میزان تولید انرژی اولیه نیروگاه سد کارون۳ باوجود ساعات کارکرد پیک بیشتر، کمتر از میزان انرژی اولیه تولیدی سد کارون۱ شود. با مقایسه سناریو ۱ با سناریوهای ۴ و ۸ درشکل (۲)و(۳) می‌توان اثرات توسعه درون حوضه‌ای را بر میزان تولید انرژی اولیه حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ دریافت. اما نکته‌ی بسیار مهم و جالب‌توجه درشکل‌های(۲)، (۳) و(۴) این است، که با مقایسه سناریوهای ۳، ۶، ۷، ۱۰ و ۱۱ با سناریوهای۱، ۴ و ۸ می‌توان دریافت که طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب نسبت به توسعه‌ی درون حوضه‌ای مصرف آب، اثرات بسیار بیشتر و فراوان‌تری بر کاهش انرژی اولیه حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ دارد. نکته‌ی قابل‌توجه دیگری را که می‌توان باملاحظه شکل(۳) و همچنین شکل(۴) دریافت این است، که توسعه‌ی حوضه‌ی آبریز کارون بزرگ بیشترین تأثیر را بر روی تولید انرژی اولیه سدهای مخزنی دز و کارون۴ و کارون ۳ داشته است که دلیل آن در درجه‌ی اول طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب و در درجه دوم در رابطه با سدهای کارون ۴ و دز، عدم وجود سد مخزنی دیگری بلافاصله در بالادست این دو سد است، چراکه وجود یک سد بلافاصله در بالادست سد دیگر سبب می‌شود، جریان آب به‌صورت تنظیم‌شده وارد سد شود، که این امر سبب افزایش قابل‌توجه تولید برق می‌گردد(افتخارجوادی و نیک‌فال،۱۳۸۵).



شکل۲. درصد کمبود انرژی اولیه موردنیاز تعریف‌شده برای سیستم مخازن کارون بزرگ تحت سناریوهای مختلف



شکل۳. تغییرات میزان انرژی اولیه تولیدشده توسط نیروگاه‌های سیستم موردبررسی تحت سناریوهای مختلف



شکل٤. درصد کمبود انرژی اولیه موردنیاز تعریف‌شده برای مخازن باهدف اولیه تولید انرژی تحت سناریوهای مختلف

بحث

مهم‌ترین هدفی که در این مطالعات دنبال می‌شود، یادآوری لزوم یکپارچه نگری در حوضه‌های آبریز به‌عنوان یک سیستم به‌هم‌پیوسته است. در چنین سیستمی اجزاء مستقل از یکدیگر عمل نمی‌کنند و هر تغییری در گوشه‌ای از سیستم دارای بازتاب کلی است. تأثیراتی ازاین‌دست بر سیستم فارغ از مثبت یا منفی بودنشان حائز اهمیت فراوان است. چراکه این مهم ارزیابی اقتصادی طرح‌ها را تحت تأثیر قرار داده و می‌تواند موجب توجیه‌پذیری یک پروژه غیراقتصادی و یا بالعکس گردد. البته چنین موضوعاتی در قالب این مطالعات نمی‌گنجد و خود نیازمند مطالعاتی جامع در سطح حوضه‌ی آبریز به‌منظور تعیین پارامترهای طراحی بر مبنای ارزیابی اقتصادی پروژه‌ها با رویکرد سیستمی است. بررسی نتایج مطالعات حاضر دارای موضوعاتی در خور توجه است،که مهم‌ترین آن اثرات منفی برداشت از سرشاخه‌های حوضه‌ی آبریز دز و کارون به‌منظور انتقال بین حوضه‌ای آب و همچنین اثرات منفی توسعه‌ی درون حوضه‌ای بیشتر از توان منابع آبی این حوضه، بر کار آیی نیروگاه‌های برقابی حوضه است. که با توجه به نتایج بررسی‌های انجام‌گرفته در این پژوهش اثرات طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب بر کاهش تولید انرژی برقابی بسیار بیشتر از اثرات توسعه‌ی درون حوضه‌ای مصرف آب بر تولید انرژی است. بنابراین ضروری است به‌منظور آسیب‌پذیری کمتر حوضه‌های مبدأ، در فرآیند تصمیم-گیری برای انتقال بین حوضه‌ای آب مطالعات پایه دقیق‌تری از اثرات این‌گونه طرح‌ها بر حوضه‌ی مبدأ صورت گیرد و تا حد امکان از تعریف این‌گونه طرح‌ها جهت مقابله باکم آبی صرف‌نظر شود و به‌جای آن، راه‌کارهای دیگری مانند مدیریت مصرف، محدود کردن مساحت زیر کشت و

استفاده از الگوهای کشت بهینه موردتوجه قرارگیرد. همچنین در رابطه با مصرف درون حوضه‌ای آب نیز بایستی در نظر داشت که با توجه به این موضوع که، بخش کشاورزی بزرگ‌ترین بخش مصرف‌کننده آب است، توسعه‌ی مناطق کشاورزی و همچنین انتخاب الگوی کشت این مناطق بایستی متناسب با توان آبی حوضه صورت گیرد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که با توجه به نیاز انرژی تعریف‌شده برای نیروگاه‌های حوضه کارون بزرگ در حال حاضر نیز درصد کمبود انرژی اولیه قابل‌توجهی وجود دارد، که این موضوع عدم توانایی حوضه جهت توسعه‌ی بیشتر چه به شکل درون حوضه‌ای و چه در قالب طرح‌های انتقال بین حوضه‌ای آب را گوشزد می‌کند. نتایج این پژوهش بازنگری و بررسی دقیق‌تر وضعیت نیروگاه‌های برقابی را به‌عنوان یک ضرورت یادآور می‌شود. چراکه وجود درصد کمبود سالانه انرژی اولیه موردنیاز برابر با ۲۹ درصد برای مجموعه نیروگاه‌های حوضه در حال حاضر و با نیازها و طرح‌های انتقال آب فعلی و افزایش این درصد کمبود تا ۳۶ درصد برای افق ۱۴۲۰ و مصارف درون حوضه‌ای و طرح‌های انتقال آب بین حوضه‌ای در نظر گرفته‌شده در این پژوهش، برای این افق زمانی، با توجه به اهمیت انرژی برقابی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و بهترین منابع تولید برق در کشور و عدم امکان پیش‌بینی وضعیت آب و هوایی آینده و تأثیر آن بر آبدهی حوضه، حائز اهمیت فراوان و تا حدی نگران‌کننده است.

منابع

افتخار جوادی، الهام.، و نیک فال، محمدرضا. (۱۳۸۵). بررسی اثرات توسعه حوضه آبریز دز و کارون بر تولید انرژی برقابی. دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، اصفهان. https://civilica.com/doc/13317

جلالی، محمدرضا.، آذرانفر، آرش.، و افضلی، راحله. (۱۳۸۷). توسعه قابلیت های برقابی در نرم افزار مدیریت یکپارچه منابع آبWEAP. سومین کنفرانس مدیریت منابع آب، تبریز. https://civilica.com/doc/50094

خسروی، سیمین. (۱۳۹۴). ارزیابی اثرات طرح‌های انتقال آب سطحی و برداشت های زیرزمینی از حوضه کارون بزرگ بر کشاورزی و تولید انرژی سد و نیروگاه‌های این حوضه با استفاده از مدل WEAP. پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه لرستان.

شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس و شرکت اسکات ویلسون انگلستان. (۱۳۸۵). مدیریت بهینه‌سازی سیستم رودخانه‌های کارون و دز و بهره‌برداری از سیستم‌های منابع آب و نیروگاه‌های حرارتی- برقابی. گزارش میانکار شماره۷، برنامه‌ریزی یکپارچه سیستم رودخانه‌های دز و کارون، سازمان آب و برق خوزستان.

فرخیان، فروزان.، ابراهیم زاده، سیدمحمدامین.، و مفاخر، مرتضی.(۱۳۹۱). بررسی زیست محیطی و مدیریتی انتقال آب بین حوضه ای ، مطالعه موردی حوضه کارون بزرگ، طرح قمرود. اولین کنفرانس ملی راه کارهای دستیابی به توسعه پایدار (کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست)، تهران.https://civilica.com/doc/197255

References

Beilfuss, R. (2010). Modelling trade-offs between hydropower generation and environmental flow scenarios: a case study of the lower Zambezi River Basin, Mozambique. International Journal of River Basin Management, 8(3-4), 331-347. https://doi.org/10.1080/15715124.2010.533643

Daneshgar, S., & Zahedi, R. (2022). Investigating the hydropower plants production and profitability using system dynamics approach. Journal of Energy Storage, 46. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103919

Eftekhar Javadi, A., & Nick Fal, M. (2006). Investigation of the effects of Dez and Karun catchment development on hydropower generation. Proceedings of the Second Iranian Water Resources Management Conference, Isfahan, University of Technology. https://civilica.com/doc/13317 [In Persian]

Farrokhian, F., Ebrahimzadeh, S. & Mafakher, M. (2012). Environmental and management study of inter-basin water transfer Case study of Karun Bozorg basin, Qamroud project. The first national conference on strategies for achieving sustainable development in Iran. Tehran, Ministry of Interior. https://civilica.com/doc/197255 [In Persian]

Gaudard, L., Romerio, F., Dalla Valle, F., Gorret, R., Maran, S., Ravazzani, G., Stoffel, M., & Volonterio, M. (2013). Climate change impacts on hydropower in the Swiss snd Italian Alps. Journal of Science of the Total Environment, 493, 1211-1221. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.012

Hamududu, B., & Killingtveit, A. (2012). Assessing climate change impacts on global hydropower. Journal of Energies, 5(2), 305-322. https://doi.org/10.3390/en5020305

Harrison, G.P., & Whittington, H(B). W. (2002). Susceptibility of the Batoka Gorge hydroelectric scheme to climate change. journal of Hydrologe, 264(1-4), 230-241. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00096-3

Jalali, M., Azaranfar, A., & Afzali, R. (1387). Development of hydropower capabilities in WEAP integrated water resources management software. Third Iranian Water Resources Management Conference. Tabriz, University of Tabriz, Faculty of Civil Engineering. https://civilica.com/doc/50094 [In Persian]

Khosravi, S. (2015). Evaluation of the effects of surface water transfer projects and groundwater withdrawals from the Greater Karun Basin on agriculture and energy production of dams and power plants in this basin using the WEAP model. Master Thesis in Water Engineering, Lorestan University. [In Persian]

Mahab Ghods Consulting Engineering Company & Scott Wilson Company of England. (2006). Optimization management of Karun and Dez river systems and operation of water resources systems and thermal-hydropower plants. Intermediate Report No. 7, Integrated Planning of Dez and Karun River Systems, Khuzestan Water and Electricity Organization. [In Persian]

Maran, S., Volonterio, M., & Gaudard, L. (2014). Climate change impacts on hydropower in an alpine catchment. Journal of Environmental Science & Policy, 43, 15-25. http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2013.12.001

Onokwai, A.O., Owamah, H. I., Ibiwoye, M.O., Ayuba, G.C., & Olayemi, O. A. (2022). Application of Response Surface Methodology (RSM) for the optimization of energy generation from Jebba hydro-power plant, Nigeria. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 28(1), 1-9. https://doi.org/10.1080/09715010.2020.1806120

Ozigis, I.I., Adeyemi, R.A., Ondachi, P.A., & Oodo, S.O. (2021) Performance evaluation of Kainji hydro-electric power plant using artificial neural networks and multiple linear regression. Int J Energ Water Res, 6, 231–241. https://doi.org/10.1007/s42108-021-00135-3

Rheinheimer, D.E., Viers, J.H., Sieber, J., Kiparsky, M., Mehta, V.K., & Ligare, S.T. (2014). Simulating high-elevation hydropower whit regional climate warming in the west slope, Sierra Nevada. Journal of Water Resources Planning and Management, 140, 714-723. http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000373

Spalding-Fecher, R., Chapman, A., Yamba, F., Walimwipi, H., Kling, H., Tembo, B., Nyambe, I., & Cuamba, B. (2014). The vulnerability of hydropower production in the Zambezi River Basin to the impacts of climate change and irrigation development. Journal of Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 19, 411-430. http://dx.doi.org/10.1007/s11027-014-9619-7

Water Evaluation and Planning System(Weap), User Guide. (2008). https://www.weap21.org/index.asp?action=208