

# Simulation and multi-objective optimization of integrated surface and groundwater based on the Clean Development Mechanism and reduction of greenhouse gas emissions

Hamidreza Majedi<sup>1</sup>, Hossein Fathian<sup>1\*</sup>, Alireza Nikbakht-Shahbazi<sup>1</sup>, Narges Zohrabi<sup>1</sup>

1-Department of Water Resources Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

**Keywords:** Clean Development Mechanism, Hydroelectricity, WEAP, MODFLOW, *NSGA-II* genetic algorithm

## 1- Introduction

The water-oriented development of countries calls for the enforcement of the Clean Development Mechanism (CDM) regulations through integrated water resources management (IWRM). The study's goal was to simulate the essential drainage basin in the Middle East, which consists of six reservoir dams with a cumulative PV capacity of over 10500MW. Therefore, the application of systematic and integrated models and multi-objective optimization facilitates understanding the mutual effects of the subsystems in a master plan and sustainable water resources management and planning. Recently, numerous studies have been carried out in Iran and the world on this issue. For instance, Dalir et al. (2017) introduced a conceptual method for calculating carbon footprint in Iran's combined cycle power plants. Anugrah et al. (2015) studied the effect of climate change on hydroelectricity in the small-scale power plants in the Bayang River basin in Indonesia using WEAP software under IPCC climate change scenarios, namely scenarios A2 and B2. Amponsah et al. (2014) compared the results from 79 studies carried out by assessing the life cycle of greenhouse gases and the effect of different hydropower plants on the emission of these gases and reported their findings. Also, Hadded et al. (2013) developed a decision support system (DSS) using the WEAP model and MODFLOW model to manage the Geous aquifer in the south of Tunisia. Poblete et al. (2012) modeled the Maule River basin's water resources under the climate change scenario using WEAP. Hondo (2005) estimated greenhouse gas emissions by nine power plant types: coal, petroleum, natural gas, combined cycle, nuclear, hydroelectricity, geothermal, wind, and photovoltaic power plants, through life cycle assessments. Miller and Labadie (2003) analyzed the optimization of integrated operation on the regional scale and used the MODFLOW model to calculate the response matrix coefficients. They also used MODSIM as the optimization model.

In this research, the development of the best management scenario was studied to determine the role of the surface and groundwater consumptions and all system factors, such as the variation of efficiencies of irrigation networks through integrated modeling. The goal was to meet the demands, maximize hydroelectricity generation, and set the scene to minimize greenhouse gas emissions in Iran's most critical catchment.

## 2-Materials and methods

The WEAP model was used with an integrated approach to water systems simulation in this research. This model functions based on water balance, and demand-related factors such as consumption patterns, efficiency, costs, and allocation are considered in its equations and resource-related factors such as surface and groundwater flows and reservoirs. Stockholm Environment Institute has been the chief advocate of this model, while it has also been supported by the Hydrological Engineering Center of the American Society of Civil Engineers and the World Bank. In addition, the MODFLOW model developed by the United States Geological Survey was also used to simulate groundwater resources. After linking the two calibrated and validated simulation models and optimizing the objective function, practical scenarios were implemented to optimize water resource allocation and

\* Corresponding author: fathian.h58@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2020.35101.2167

Received 2020-09-19

Accepted 2020-12-01

hydropower. In power plants, the emission factor regarding the mass of the produced pollutants or the combustion gases is expressed in the generated electricity or the generated thermal energy.

The Great Karun basin is a large part of the Persian Gulf catchment and consists of Dez and Karun rivers in the Middle Zagros heights. It is also mainly composed of Khuzestan Plain. Karun basin is located at longitude to East and latitude to North. Karun River is the greatest and has the highest discharge volume of water in Iran in the Persian Gulf and Gulf of Oman basins.

In the study basin, there are several aquifers with a surface area of 9205km<sup>2</sup>. Therefore, the aquifer parameters were entered into the linked software and were simulated.

In the surface water simulations in this research, the data required for modeling the Great Karun basin, including the natural water yield of Dez and Karun rivers, the future and predicted consumptions in different basin areas, specifications of the reservoirs and power plants in the drainage basin, evaporation in the reservoirs, data from the hydrometric stations in the basin, the raw GIS data on the basin, and other minor information are used. After collecting, controlling, and preparing the desired formation, this data was used to model the basin. Figure 1 illustrates the schematic configuration of the integrated water resources model developed in this research.

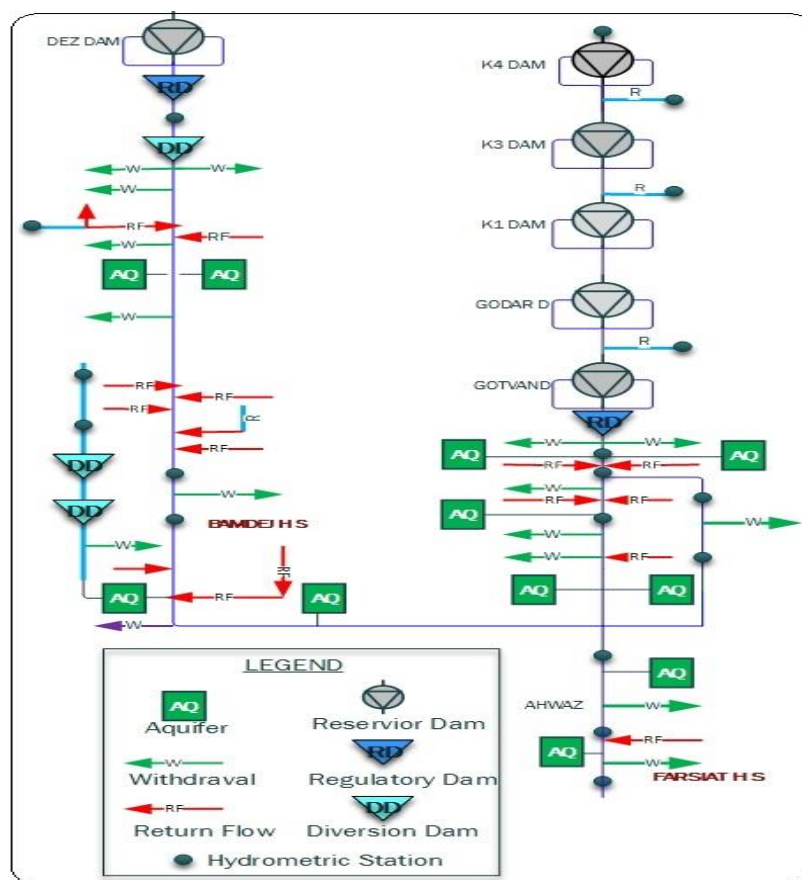


Fig. 1. Schematic configuration of the integrated water resources model of the study basin.

The mathematical model indirectly simulates groundwater flow using a governing equation and series of equations describing hydraulic load and flow along the model boundaries. Hence, the aquifer area's three-dimensional model is the mathematical expression of groundwater flow using the GMS interphase based on MODFLOW 2000. After entering the data into the model, six scenarios were defined to evaluate the integrated model system's objectives.

### 3-Results and discussion

After linking the surface and groundwater resource model, the drainage basin was simulated for the present time. Afterwards, the model's implementation results using the actual data from the downstream hydrometric stations of

the Dez and Karun rivers were compared. The last three years of the statistical period were selected to compare and validate the model. A comparison was also drawn between the rivers' cumulative inflows in the Farsiat hydrometric station downstream of Great Karun. Figure (2) presents the acceptable model performance results in the validation phase by comparing the cumulative discharges observed in Farsiat hydrometric station and the calculated discharge.

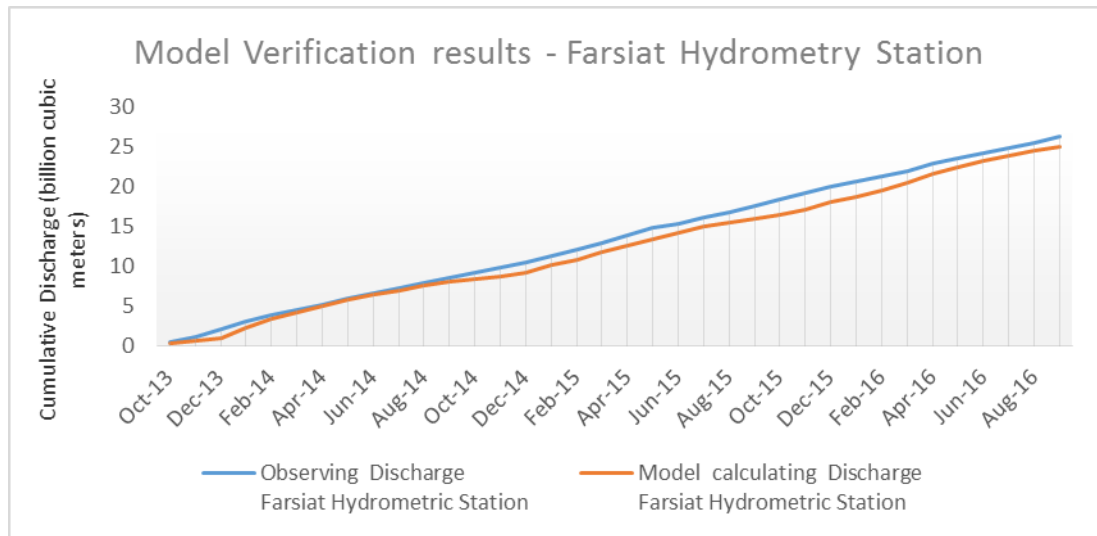


Fig. 2. The comparison of the cumulative discharges in Farsiat hydrometric station.

The validated integrated model was implemented and studied under six management scenarios. These scenarios were designed and compared for the optimum satisfaction of needs and supply of energy, the minimization of greenhouse gas emissions, and the supply of the minimum environmental nodes in the river downstream. In these scenarios, the integrated surface and groundwater resources, the irrigation network efficiencies, and basin drainage are considered the essential components with significant weights. In addition, the sound effect of drought is also considered concerning a decrease in river inflows under the designed scenarios.

According to the results, through the integrated use of resources and only a 5% increase in the networks' efficiency, an almost 172-GWh decrease will be witnessed in the hydroelectricity production despite the seven-billion cubic meters increase the future consumptions in the Great Karun basin. This decrease is hugely more minor than the effect of inter-basin water exchange. It is also equal to a 1.1% decrease in the production of hydroelectricity in the basin.

#### 4-Conclusion

This research's overarching goal was to explore the roles and weights of the hidden and evident determinants of hydroelectricity production and its optimum management. This research suggested that the inter-basin water exchange is the most crucial cause of the decrease in hydropower production in this basin and accounts for 93% of the country's hydroelectricity production. This factor causes the maximum decrease in hydroelectricity generation in the basin and an increase in the emission of greenhouse gases resulting from the alternative energy production methods by reducing the river branch flows. The results from weighting priorities of the components determining hydroelectricity production and greenhouse gas emissions are as follows in the order of importance.

I. According to the model results, inter-basin water exchange with the 1.5 billion cubic meters increases results in a 10% decrease in the annual average hydroelectricity production in the basin. Hence, this component has the highest effect and weight compared to the other parameters in the decrease in energy production (app. 1500 GWh) and the increase in greenhouse gas emissions (1.3 million tons).

II. The second component involves the effect of climate change and the decreased water yield of the rivers, which cause a 5% decrease in the annual hydroelectricity production of the drainage basin.

III. The third component shows the role of an increase in the basin consumptions, which results in a three per cent decrease in the annual production of hydroelectricity in this basin by causing a 7 billion cubic meters to increase in the basin consumptions.

IV. The fourth component mirrors the effect of a 5% increase in irrigation network efficiency. The results revealed that following the increase in the efficiency, the hydroelectricity production increases by 2%, preventing the production of 250,000 tons of greenhouse gases by the alternative power plants.

V. The fourth component is the integrated surface and groundwater resources consumption. The results from the model's implementation revealed that the hydroelectricity production in the drainage basin increases through the integrated management of the operation of water resources, preventing the production of 125,000 tons of greenhouse gases by the alternative power plants.

Since the increase in the basin needs is often inevitable, it is concluded that it is possible to optimally manage hydroelectricity production and meet the future demands through the integrated use of the water resources and a 5% change in the irrigation network efficiency (the best scenario).

Finally, this basin's integrated modeling reflected the high potential of this great basin for preventing an increase in greenhouse gas emissions. These results also mirrored the possibility of obtaining Certified Emission Reductions (CERs) license using the clean development mechanism through proper management.

### Acknowledgements

The authors would like to thank the Khuzestan Water and Power Authority (KWPA) and the Office of Applied Research management for financial support for this research. The authors would also like to thank the deputy of Basic Studies of KWPA for providing the data.

### References

- Amponsah, N.Y., Troldborg, M., Kington, B., Aalders, I., Hough, R.L., 2014. Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39, 461-475.
- Anugrah, P., Setiawan, A.A., Budiarto, R., Sihana, S., 2015. Evaluating micro hydro power generation system under climate change scenario in Bayang Catchment, Kabupaten Pesisir Selatan, West Sumatra. *Energy Procedia* 65, 257-263.
- Dalir, F., Shafiepour Motlagh, M., Ashrafi, K., 2017. A well to wire LCA model development and sensitivity analysis for carbon footprint of combined cycle power plants in Iranian electricity network. *International Journal of Green Energy* 14(5), 499-508.
- Hadded, R., Nouri, I., Alshihabi, O., Maßmann, J., Huber, M., Laghouane, A., Yahiaoui, H., Tarhouni, J., 2013. A decision support system to manage the groundwater of the zeuss koutine aquifer using the WEAP-MODFLOW framework. *Water Resources Management* 27(7), 1981-2000.
- Hondo, H., 2005. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy* 30 (11-12), 2042-2056.
- Miller, S., Labadie, J., 2003. A decision support system for optimal planning of conjunctive use progress. *Journal of American Water Resources Association* 39(3), 517-528.
- Poblete, D., Vicuña, S., Meza, F., Bustos, E., 2012. Water resources modeling under Climate Change scenarios of Maule River Basin (Chile) with two main water intensive and competing sectors: Agriculture and Hydropower Generation. In IWA World Congress on Water, Climate and Energy.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Majedi, H., Fathian, H., Nikbakht-Shahbazi, A., Zohrabi, N., 2022. Simulation and multi-objective optimization of integrated surface and groundwater based on the Clean Development Mechanism and reduction of greenhouse gas emissions. *Adv. Appl. Geol.* 11(4), 903-924.

DOI: 10.22055/AAG.2020.35101.2167

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_16264.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_16264.html?lang=en)

## شبیه سازی و بهینه سازی چندمنظوره تلفیقی آب سطحی و زیرزمینی بر اساس مکانیسم توسعه پاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه ای

حمیدرضا ماجدی

گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

حسین فتحیان\*

گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

علیرضا نیکبخت شهبازی

گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

نرگس ظهراپی

گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۱۱

\*fathian.h58@gmail.com

### چکیده

توسعه آب محور کشورها مستلزم توجه به مقررات مکانیسم توسعه پاک (CDM) با مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) است. شبیه سازی مهمترین حوزه آبریز خاورمیانه با دارا بودن شش سد مخزنی با ظرفیت تجمعی نیروگاهی بیش از ده هزار و پانصد مگاوات در این تحقیق مورد نظر بوده است. شبیه سازی آب زیرزمینی و سطحی جداگانه با دو مدل MODFLOW و WEAP و کوپل کردن آنها با فایل لینکی انجام گردید. فرایند بهینه سازی تابع چندهدفه شامل تامین حداکثری مصارف و انرژی برقایی و حداقل نمودن افت آبخوانها با استفاده از تکنیک الگوریتم ژنتیک NSGA-II انجام شد. در این راستا تمامی مولفه های سیستمی و سیاستی اثرگذار بر سامانه تلفیقی منابع آب ارزیابی گردید. این مولفه ها شامل انتقال آب بین حوضه ای، افزایش مصارف، استفاده تلفیقی منابع آب و تغییر راندمان شبکه های آبیاری و اثر کم آبی بودند که در قالب سناریوهایی مقایسه گردیدند. بر اساس نتایج مدل، انتقال آب بین حوضه ای با سناریو افزایش ۱/۵ میلیارد مترمکعب باعث کاهش حدود ۱۰ درصد از میانگین سالانه تولید انرژی برقایی در حوضه می شود. در نهایت مدل بهترین سناریو در دستیابی به اهداف CDM را ارائه داد.

**کلمات کلیدی:** مکانیسم توسعه پاک، انرژی برقایی، WEAP، MODFLOW، الگوریتم ژنتیک NSGA-II

### مقدمه

می باشد، انتشار گازهای گلخانه ای باید محدود گردد و انتشار گازهای گلخانه ای مازاد بر این مقررات در آینده مشمول جریمه خواهد شد. این مکانیسم شامل پروژه هایی است که کشورهای توسعه یافته جهت تحقق تعهدات خود در کاهش انتشار و همچنین کمک به توسعه پایدار در کشورهای در حال توسعه اجرا می نمایند و به ازای کاهش انتشار گواهی کاهش انتشار دریافت می نمایند. کشور ایران با انتشار حدوداً ۵۳۰ میلیون تن گاز دی اکسید کربن ناشی از احتراق سوخت، رتبه هفتم در بین کشورهای دنیا در انتشار گازهای گلخانه ای را به خود اختصاص داده است. بر اساس گزارش آژانس بین المللی انرژی شدت انتشار دی اکسید کربن در ایران به ازای تولید هزار دلار کالا و خدمات ۱۵ برابر ژاپن، ۱۳ برابر اسپانیا، ۱۰ برابر کره، ۳/۵ برابر ترکیه و ۲/۶ برابر پاکستان می باشد. لذا کشور از پتانسیل

غلظت گازهای گلخانه ای در جو، طی دهه های اخیر ۳۵ درصد و دمای زمین حدود یک درجه سانتی گراد افزایش یافته است (Copenhagen Accord, 2009). بیشترین دلیل افزایش گازهای گلخانه ای، نیاز به افزایش تولید انرژی بوده است. با استناد به هیئت بین الدولی تغییرات آب و هوایی (IPCC)، تقریباً ۲۷ گیگا تن کربن دی-اکسید از منابع مختلف در دنیا منتشر می شود که سهم تولید برق از این مقدار به میزان تقریبی ۱۰ گیگا تن بوده که ۳۷ درصد از انتشار جهانی را شامل می شود. به علاوه، انتظار می رود نیاز به برق طی ۲۰ سال آینده ۴۳ درصد افزایش پیدا کند (Berg, 2011). بر طبق مقررات مکانیسم توسعه پاک (CDM) که از سازوکارهای پروتکل کیوتو (۱۹۹۷)

دارند. Ben Mamo و Chenini (۲۰۱۰) جهت بررسی روند توسعه برداشت از منابع آب زیرزمینی، مدل سازی عددی و GIS را به کمک مدل MODFLOW بکار بردند. Haddad و همکاران (۲۰۰۷) مدل تصمیم گیری حوضه ی تولکرم در فلسطین را با مدل WEAP اجرا کردند. Weisser (۲۰۰۷) نتایج مطالعات اخیر در مورد بررسی انتشار گازهای گلخانه ای از منابع تولید انرژی الکتریکی را که از روش ارزیابی چرخه حیات استفاده کرده اند را مورد مقایسه قرارداد. Hondo (۲۰۰۵) میزان انتشار گازهای گلخانه ای را برای ۹ نوع نیروگاه تولید برق به روش ارزیابی چرخه حیات تخمین زد. Miller و Labadie (۲۰۰۳) بهینه سازی بهره برداری تلفیقی را در مقیاس منطقه ای مورد بررسی قرار دادند. آنها از مدل MODFLOW و MODSIM برای شبیه سازی و بهینه سازی استفاده نمودند. Chang and Chang (2009) از الگوریتم NSGA-II برای شناسایی استراتژی های بهینه بهره برداری در یک سیستم چندمخزنی در تایوان استفاده کردند. نتایج حاکی از این بود که با استفاده از استراتژی های مدیریتی جایگزینی که در جبهه پارتو ارائه شده بود، کمبود آب در سال های خشکسالی می تواند کاهش پیدا کند. الگوریتم ژنتیک مرتب سازی غیرمغلوب (NSGA-II) که در واقع یک الگوریتم ژنتیک چندمنظوره می باشد، در هر گام از گروهی از جواب های محتمل استفاده می کند. این الگوریتم ها در شاخه های متنوع منابع آب مورد استفاده قرار گرفته اند (Fu et al., 2008; Ercan and Goodall, 2016). به خاطر ساختار مناسب مدل و انتخاب حل های غیرمغلوب در هر تکرار از معادلات، این الگوریتم در قیاس با الگوریتم ژنتیک مرسوم، سرعت همگرایی بهتری دارد (Deb et al., 2002; Chang and Chang, 2009).

در این پژوهش ابتدا فرایند پروتکل شبیه سازی مدل سطحی و زیرزمینی و مرتبط ساختن دو مدل به یکدیگر و بهینه سازی تابع هدف انجام گردید. سپس سناریوهای کاربردی با رویکرد تفکیک بهینه تخصیص منابع آب و هیدروانرژی اجرا شد. به عبارت دیگر تفاوت این پژوهش بررسی همزمان میزان تاثیر تمامی عوامل موثر انسانی و طبیعی بر تولید گاز گلخانه ای در یک سیستم منابع آبی بوده است. از جمله عوامل مهم طبیعی اثر کاهش آبدی ناشی از خشکسالی و شبیه سازی توأم آبخوان های دولایه بوده است. از عوامل انسانی نیز نقش انتقال آب بین حوضه ای و اثر راندمان شبکه های آبیاری در سیستم منابع آب حوزه است. فقط با در نظر گرفتن تمامی عوامل اصلی فوق در کنار یکدیگر می توان مدیریت مصارف آبی را با مقررات توسعه پاک هم راستا نمود.

## روش کار

### شبیه سازی و بهینه سازی

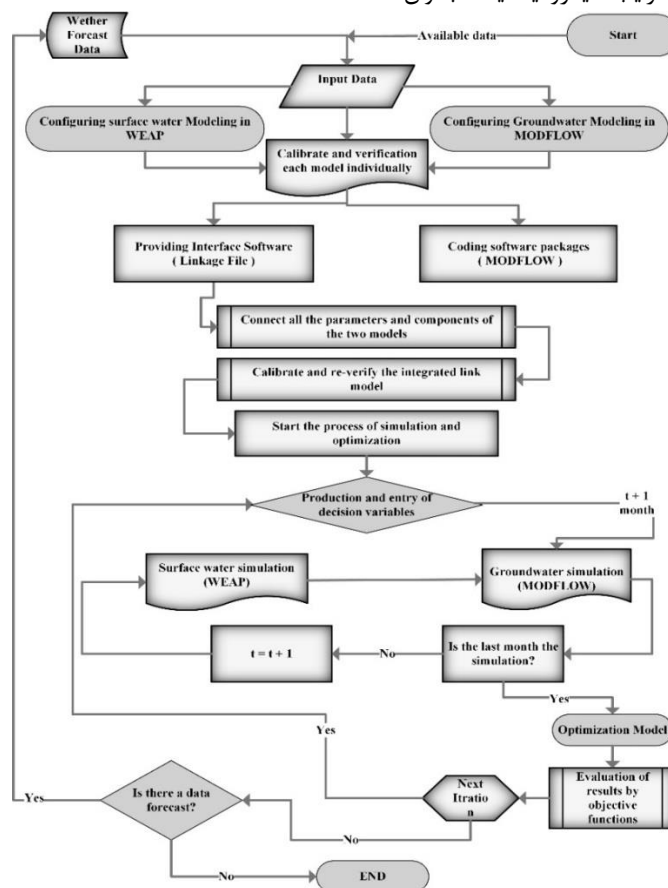
به منظور شبیه سازی مصارف و منابع آب سطحی از مدل WEAP با رویکرد یکپارچه در سامانه های آبی استفاده شده است. این مدل در معادلات خود که بر پایه بیلان آبی عمل می کند مسائل مربوط به نیاز شامل الگوهای مصرف، راندمان، هزینه ها، تخصیص و غیره را همگام به مسائل مربوط به منابع شامل جریان آب سطحی و زیرزمینی و مخازن را

بالایی در کاهش انتشار گازهای گلخانه ای برخوردار است. کنفرانس آب و هوای سال ۲۰۱۵ پاریس شامل مباحثی درباره ی چگونگی استفاده از انرژی برقی در قالب یک انرژی تجدیدپذیر برای کاهش انتشار جهانی گازهای گلخانه ای بود (International Hydropower Association, 2016). بسیاری از کشورها از جمله چین، برزیل و ایالات متحده در حال استفاده از انرژی برقی برای عمل به تعهدات خود مبنی بر کاهش گازهای گلخانه ای می باشند (Jones et al., 2017). انرژی برقی در مرحله بهره برداری تقریباً هیچ گونه گاز گلخانه ای تولید نمی کند و کسری تولیدی بایستی با روش های دیگر جبران گردد. با توجه به میزان دی اکسید کربن معادل تولیدی در هر روش، ضریبی به ازای هر گیگاوات ساعت تغییر در حداقل و حداکثر انرژی برقی لحاظ خواهد شد تا میزان تولید گاز گلخانه ای توسط روش های دیگر به میزان تغییر کل تولید انرژی برقی محاسبه شود. تحقیقات زیادی اخیراً در ایران و جهان در این زمینه انجام شده است. Dalir و همکاران (۲۰۱۷) یک روش مفهومی برای محاسبه رد پای کربن در نیروگاه های سیکل ترکیبی کشور ایران را معرفی کردند. Anugrah و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر تغییر اقلیم بر تولید انرژی برقی نیروگاه های کوچک در یک حوضه آبریز در کشور اندونزی با استفاده از نرم افزار WEAP را تحت سناریوهای تغییر اقلیم IPCC یعنی A2 و B2 ارزیابی کردند. Amponsah و همکاران (۲۰۱۴) نتایج ۷۹ پژوهش که به نوعی با روش ارزیابی چرخه حیات گازهای گلخانه ای و تأثیر انواع نیروگاه های برقی بر انتشار این گازها مرتبط بود را باهم مقایسه و نتایجی را منتشر کردند. Haddad و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از مدل WEAP و MODFLOW به مدیریت آبخوان ژئوس در جنوب غرب تونس پرداختند. Poblete و همکاران (۲۰۱۲) منابع آب حوضه رود مائول در کشور شیلی را با سناریو تغییر اقلیم به وسیله ی WEAP مدل سازی کردند. Raadal و همکاران (۲۰۱۱) دو نوع نیروگاه که کمترین انتشار گازهای گلخانه ای را دارا هستند یعنی نیروگاه های بادی و برقی را مقایسه نمودند Mugatsia (۲۰۱۰) در پژوهش خود به شبیه سازی و سناریو پردازی مدل منابع آب حوضه ای در کشور کنیا با استفاده از مدل WEAP پرداخت. وی یک سامانه پشتیبان تصمیم گیری (DSS) برای این حوضه معرفی می کند که می تواند برای نتایج و کاربری های متفاوتی از آن استفاده شود. Droogers و همکاران (۲۰۰۹) تأثیر تغییر اقلیم را بر تولید انرژی برقی و سود آن در کنیا به وسیله مدل WEAP بررسی کردند. Bharati (۲۰۰۸) یک مدل پیوسته شبیه سازی - بهینه سازی تهیه نمودند که در آن استفاده همزمان از منابع آب سطحی و زیرزمینی در شبکه آبیاری حوضه ولتا در غنا مورد بررسی قرار گرفت. Paul (۲۰۰۶) به منظور بررسی اثر پوشش زمین بر تغذیه مصنوعی سفره های زیرزمینی در شرق چین، مدل های MODFLOW و WETPASS را با هم ترکیب کرده بوده نتایج تحقیقات نشان داد توسعه اراضی شهری اثر کاهشی و اراضی جنگلی اثر مثبت بر حفظ و تغذیه مصنوعی آبخوان و محافظت از اکوسیستم

انجام گردید. در مرحله نهایی آبخوان های کوچک (بیش از ده آبخوان) توسط گره آب زیرزمینی در ویپ و آبخوان اصلی آلودشت و دز غربی از طریق ماژول و درگاه اختصاصی اتصال ویپ به مادفو متصل گردید و پس از لینک کردن دو مدل، یک تابع هدف با رویکرد ماکسیمایز کردن تامین مصارف و تولید انرژی و مینیمایز کردن افت آبخوان ها تعریف و اجرا گردید. در نهایت سناریوهای کاربردی با رویکرد تفکیک بهینه تخصیص منابع آب و هیدروانرژی اجرا شد.

به منظور شبیه سازی صحیح جریان در رودخانه ها آمار آبدهی در طول دوره شبیه سازی در مدل تعریف شد و از ایستگاه ها برای واسنجی مدل و تخمین صحیح جریان در رودخانه ها و سرشاخه ها پس از اتصال دو مدل استفاده شد. فرایند طبیعی سازی دبی رودخانه ها برای وارد کردن مقدار آن در گره سرشاخه ها نیز انجام گردید. مقادیر مصارف شرب، صنعت و کشاورزی در حال و آینده با روابطی مانند محاسبه نرخ رشد جمعیت و توسعه صنایع در نرم افزار وارد شد. نیاز زیست محیطی نیز به روش تنانت و مونتانا محاسبه و در گره مربوطه لحاظ شد. فلوجارت روند شبیه سازی و بهینه سازی جهت دستیابی به تابع هدف در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.

لحاظ نموده است. موسسه محیط زیست استکهلم حمایتگر اصلی این مدل بوده و مرکز مهندسی هیدرولوژی جامعه مهندسين ارتش آمریکا و بانک جهانی آن را حمایت کرده اند (Sieber et al., 2005). این مدل با چهارچوبی انعطاف پذیر و کاربرد دوست طیف وسیعی از مولفه های مورد نیاز شامل تحلیل سیاست های کمی و کیفی، تصمیم گیری و اعمال سناریو ها، مدیریت تقاضای کشاورزی و تحلیل اقتصادی و انرژی را انجام می دهد. این مدل از توابع برنامه ریزی بر پایه نمایش جداگانه محل های توزیع منابع و مصارف آب و ارزش های اقتصادی آن ها پشتیبانی می کند (Sieber et al., 2005). WEAP یک محیط بر پایه GIS فراهم می کند و با تعریف سناریو سیاست های ثانوی برای نمایش شرایط حال و آینده تحت تدابیر توسعه مختلف را ارزیابی می کند. اطلاعات ورودی و خروجی می توانند به وسیله روش های مختلف چارتری و جدولی نمایش داده شوند (Assaf and Saadeh, 2008). جهت شبیه سازی آب زیرزمینی نیز از مدل MODFLOW که توسط سازمان زمین شناسی آمریکا تهیه شده استفاده گردید. فرایند شبیه سازی جداگانه تکمیل و مدلها جداگانه واسنجی و صحت سنجی گردید. بهینه سازی ابتدایی برخی پارامترها در قالب ماژول های مخصوص مانند ماژول PEST در مدل مادللو برای پارامترهای مورد نیاز مانند ضرایب هیدرودینامیک آبخوان



۱- فلوجارت روند شبیه سازی و بهینه سازی تابع هدف و اجرای سناریو ها.

Fig. 1. The flowchart of the simulation and optimization of the objective function and implementation of the scenarios.

## محاسبه میزان انتشار آلاینده‌ها با استفاده از شاخص انتشار در نیروگاه‌ها

در نیروگاه‌ها شاخص انتشار برحسب میزان جرم آلاینده‌های تولیدی یا گازهای حاصل از احتراق برحسب انرژی الکتریکی تولیدی یا انرژی حرارتی مورد استفاده بیان می‌شود. به‌طور کلی معادله تخمین انتشار طبق رابطه ۱ به شرح زیر است (Young et al., 2008):

$$E = A \cdot EF \cdot \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $E$  میزان انتشار آلاینده (مقدار جرم آلاینده)،  $A$  نرخ فعالیت (میزان تولید واحد صنعتی، به‌طور مثال تناژ تولیدی سیمان یا کیلووات ساعت برق تولیدی)،  $EF$  شاخص انتشار (مقدار جرم آلاینده‌ی منتشره به ازای میزان محصول تولیدی یا نرخ فعالیت) و  $ER$  درصد کلی کاهش انتشار بوده و در صورت عدم استفاده از سامانه‌های کاهش آلاینده این مقدار صفر است.

## ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات نیروگاه‌های برق

برای ارزیابی انتشار گازهای گلخانه‌ای فناوری‌های مختلف تولید برق می‌توان از ضریب انتشار گازهای گلخانه‌ای چرخه حیات (LCE) استفاده نمود. مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در کل چرخه حیات تولید یک کیلووات ساعت برق به‌صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود (Weisser, 2007):

$$LCE = \frac{\sum_i GWP_i \cdot (E_{f_i} + E_{C_i} + E_{O_i} + E_{d_i})}{Q} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $E_f$  انتشار مستقیم ایجادشده در اثر احتراق سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌ها،  $E_C$  انتشار زمان ساخت نیروگاه‌ها،  $E_O$  انتشار زمان بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه‌ها،  $E_d$  انتشار در زمان پایان عمر نیروگاه‌ها و از بین بردن نیروگاه‌ها،  $i$  نوع گاز گلخانه‌ای،  $GWP$  ضریب پتانسیل گرمایش جهانی هر یک از گازهای گلخانه‌ای و  $Q$  خروجی خالص در طول عمر نیروگاه است. در این رابطه،  $E_C$  و  $E_d$  اشاره به انتشار غیرمستقیم گازهای گلخانه‌ای دارد. همچنین باید توجه داشت، خروجی خالص برق، مقدار برق تأمین‌شده برای شبکه به‌جز انرژی مصرفی جهت بهره‌برداری از نیروگاه است.

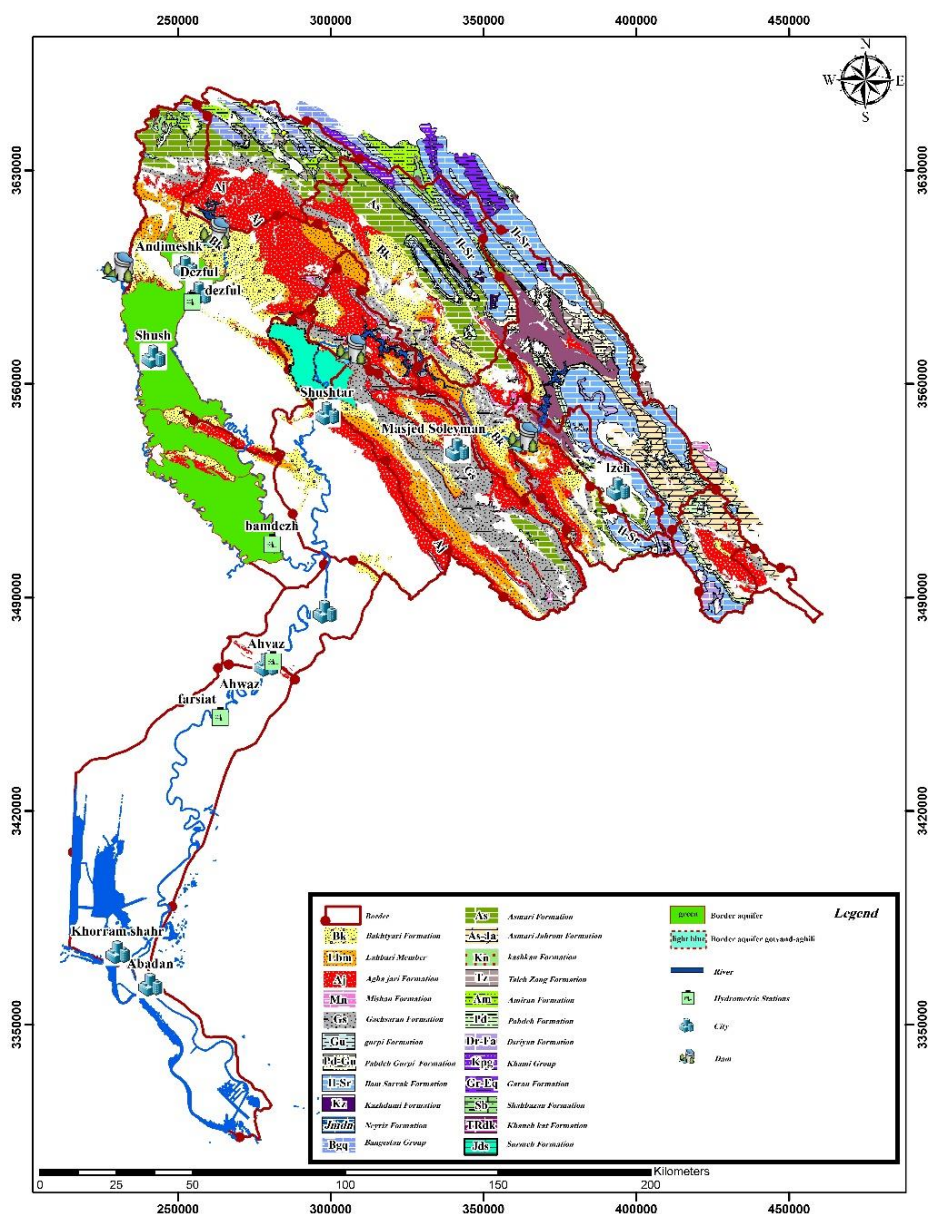
## منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کارون بزرگ بخشی از حوضه آبریز خلیج فارس می‌باشد و بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه ایران به نام کارون و همچنین شاخه دز در آن جریان دارد. شاخه دز از دو شاخه اصلی و مهم به نام‌های سزار و بختیاری تشکیل می‌شود. این حوضه شامل ارتفاعات زاگرس میانی و جلگه خوزستان می‌باشد. حوضه آبریز کارون در محدوده  $48^{\circ}00'$  تا  $52^{\circ}30'$  طول شرقی و  $30^{\circ}00'$  تا  $34^{\circ}05'$  عرض شمالی واقع شده است. این حوضه  $67112$  کیلومترمربع مساحت دارد.  $68$  درصد مساحت حوضه را کوهستان و  $32$  درصد آن را دشت و کوهپایه تشکیل می‌دهد. سهم مناطق کوهستانی و پتانسیل بالای آب، مناسب بودن حوضه برای توسعه نیروگاه‌های برقی را نشان می‌دهد. در **Error!** **Reference source not found.** موقعیت حوضه آبریز کارون بزرگ نمایش داده شده است.

جهت انجام مطالعات هیدرولوژی، دوره آماری  $60$  ساله از  $35-$   $1334$  تا  $94-1393$  به‌عنوان دوره شاخص منطقه انتخاب گردید. آبدهی‌های طبیعی‌شده رودخانه‌های مورد مطالعه در محل‌های موردنظر در مدل وارد شد. بیشترین میزان آورد سالانه در محل سد کارون  $2$  به میزان  $324$  مترمکعب در ثانیه و کمترین مقدار در محل بند قیر کارون در پایین دست به میزان کمتر از  $12$  مترمکعب در ثانیه محاسبه شده است. در حوضه آبریز مورد مطالعه تعدادی آبخوان با وسعت  $9205$  کیلومتر مربع وجود دارد که برخی از آنها با سیستم رودخانه دارای اندرکنش و تبادلات آبی هستند. میزان متوسط حجم کل آبخوان‌ها در حوضه حدود  $31931$  میلیون متر مکعب می‌باشد. میزان زهکشی از آبخوان به رودخانه حدود  $1363$  میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. پارامترهای مورد نیاز این آبخوان‌ها در نرم‌افزار وارد شد و شبیه‌سازی گردید. موقعیت این آبخوان‌ها را بر روی نقشه حوضه آبریز در شکل  $2$  دیده می‌شود.

نیازهای کشاورزی محدوده مورد مطالعه با مشخص نمودن محل برداشت به تفکیک بازه‌ها برای شرایط حال تقریباً  $11$  میلیارد مترمکعب می‌باشد. در مجموع، کل نیاز شرب و صنعت محدوده مورد مطالعه تقریباً  $496$  میلیون مترمکعب می‌باشد. کل نیاز پرورش ماهی محدوده طرح تقریباً معادل  $2$  میلیارد مترمکعب برآورد شده است. علاوه بر نیازهای ذکرشده فوق، در محل ورودی به خلیج فارس، نیاز زیست‌محیطی  $90$  مترمکعب بر ثانیه نیز منظور شده است. در مجموع، کل نیاز کشاورزی تخصیص‌یافته در محدوده مورد مطالعه برای آینده تقریباً  $15/5$  میلیارد مترمکعب می‌باشد.





شکل ۲- نقشه حوضه آبریز کارون بزرگ و موقعیت مخازن و آبخوان‌ها و ایستگاه‌های هیدرومتری شاخص.

Fig. 2. The map of the Great Karoun basin and the location of the reservoirs, aquifers, and the characteristic hydrometric stations.

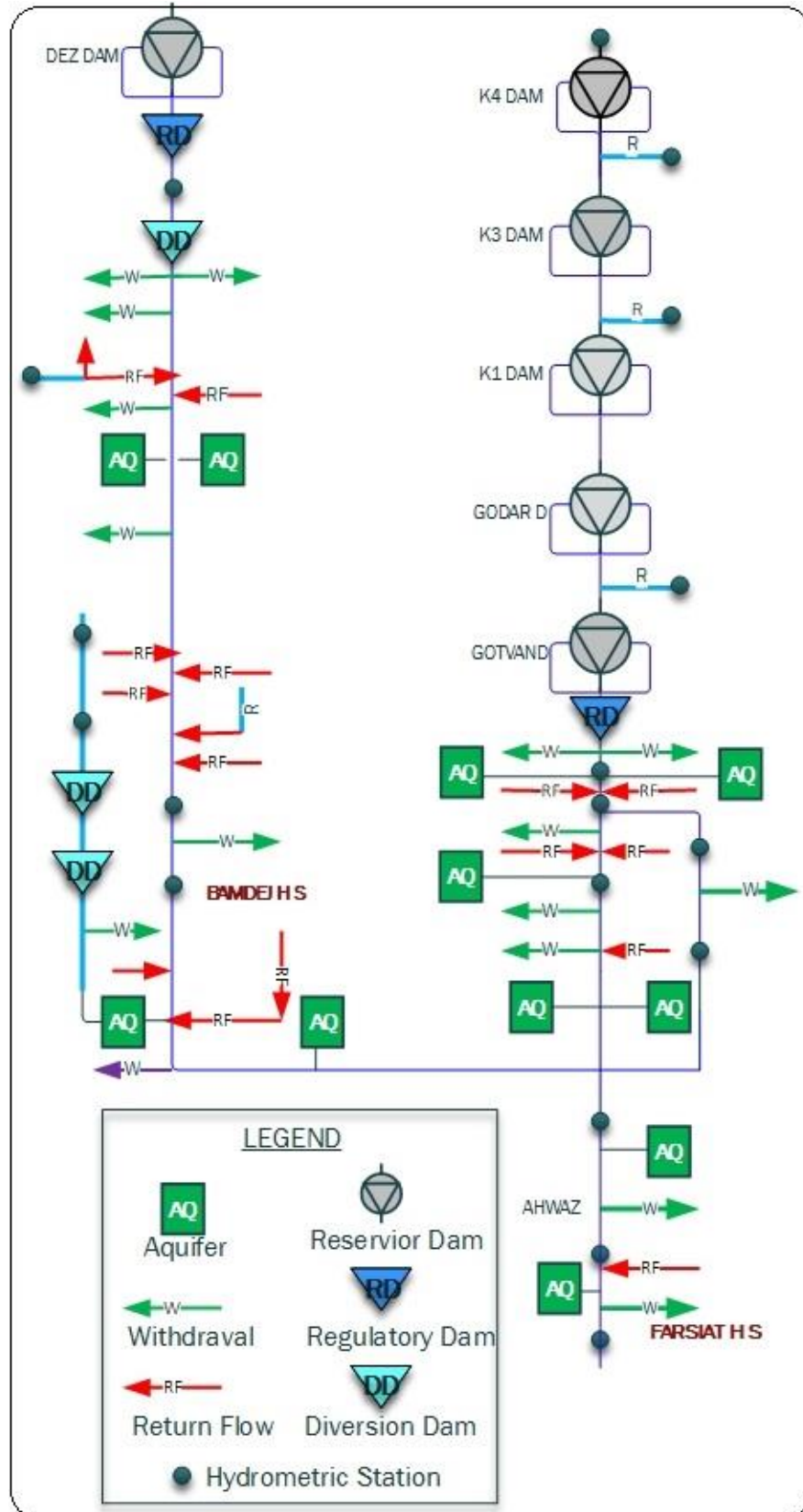
طبیعی رودخانه‌های دز و کارون، مقدار مصارف محدوده‌های مختلف حوضه در شرایط حال و آینده، مشخصات مخازن و نیروگاه‌های موجود در حوضه آبریز، مقدار تبخیر در محل مخازن، داده‌های ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه و بسیاری پارامترهای دیگر پس از کنترل و آماده-سازی با فرمت مورد نیاز برای مدل‌سازی حوضه به کار گرفته شد. شکل شماره ۳ پیکره بندی شماتیک مدل تلفیقی منابع آب حوضه را نشان می‌دهد.

### گام‌های پژوهش

مراحل شبیه‌سازی منابع آب سطحی، زیرزمینی، تلفیق مدل‌ها و بهینه‌سازی تابع هدف و در نهایت سناریوهای اجرا شده طی چهار گام ذیل انجام گردیده است:

### گام اول: شبیه‌سازی آب سطحی در مدل WEAP

در بخش شبیه‌سازی سطحی در این پژوهش، تمامی داده‌های موردنیاز برای مدل‌سازی حوضه آبریز کارون بزرگ از قبیل آبدهی



شکل ۳- پیکره بندی شماتیک مدل تلفیقی منابع آب حوضه آبریز مورد مطالعه.

Fig. 3. The schematic configuration of the integrated water resources model of the study basin.

**گام دوم: شبیه سازی آب زیرزمینی**

با توجه به اینکه  $\frac{\partial h^2}{\partial x} = 2h \frac{\partial h}{\partial x}$  و  $\frac{\partial h^2}{\partial y} = 2h \frac{\partial h}{\partial y}$  است، رابطه ۴ را می توان به صورت ذیل نوشت که یک رابطه غیرخطی است.

(رابطه ۵)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h^2}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h^2}{\partial y} \right) = 2S_y \frac{\partial h}{\partial t} \pm R$$

محققان زیادی این معادله را با روش های عددی که برای حل معادلات غیرخطی طراحی شده اند، حل کردند. Hornberger et al. (1970); Lin (1972; Zucker et al. (1973); Gambolati et al. (1989). معادله مذکور با استفاده از یک مقدار معلوم ضخامت اشباع در مدل عددی به صورت خطی تبدیل می شود که همان روش مورد استفاده در Modflow می باشد (Anderson et al., 2015).  
 کد MODFLOW از المان های تفاضل محدود و شبکه سلول مرکزی برای حل مسایل استفاده می کند. با توجه به وضعیت زمین شناسی، توپوگرافی، نقشه های هم پتانسیل، نقشه منابع آب و وسعت منطقه مورد مطالعه، شبکه ای با سلول هایی به ابعاد ۲۵۰\*۲۵۰ متر مربع شامل ۱۸۷ سطر و ۳۴۶ ستون برای محدوده مورد نظر تهیه شد و پارامترهایی نظیر سنگ کف، ارتفاع سطح زمین، مقادیر هدایت هیدرولیکی، ضریب ذخیره، مقادیر تغذیه سطحی و سطوح ایستابی اولیه به هر یک از سلول های شبکه مدل اختصاص داده شد. از اینرو شبکه بندی مدل مجموعاً شامل ۶۴۷۰۲ سلول بوده است. مدل ریاضی جریان آب زیرزمینی آبخوان برای دو حالت پایدار و ناپایدار تهیه و اجرا شد. در شرایط پایدار یک دوره تنش ۳۶۵ روزه در نظر گرفته شده است. کالیبراسیون مرحله پایدار با روش رگرسیون غیرخطی و با استفاده از MODFLOW-2000 صورت گرفت. طی فرایند تکرار مقادیر اولیه هدایت هیدرولیکی و کانداکتانس مرزها بهینه گردید. شکل ۵ حساسیت مدل نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی را نشان می دهد. مدل شرایط ناپایدار نیز برای یک دوره ده ساله با استرس پریودهای ماهانه تهیه گردید. همچنین صحت سنجی مدل ناپایدار نیز برای سال آبی ۹۳-۱۳۹۲ انجام شده است. فرایند صحت سنجی برای ایجاد اطمینان بین

صحت پاسخ مدل به استرس ها انجام می شود، (Bear, 2010).

شکل ۶ نتیجه نهایی اعمال انواع شرایط مرزی در مدل آب زیرزمینی را نشان می دهد. شکل ۷ نیز نتایج حاصل از واسنجی مدل را در رژیم پایدار در قلمرو مدل نشان می دهد. از مجموع ۷۰ پیژومتر به استثنای چند پیژومتر در بقیه پیژومترها تراز آب مشاهده ای و محاسبه ای در محدوده هدف واسنجی واقع شده اند. شکل ۸ مقادیر باقیمانده (تفاضل مقادیر مشاهده ای و محاسبه ای) را در مقابل مقادیر مشاهده ای و شکل ۹ برازش مقادیر محاسباتی و مشاهداتی برای شرایط پایدار را نشان می دهد.

مدل ریاضی، جریان آب زیرزمینی را توسط یک معادله حاکم به همراه یک سری معادلات که بار هیدرولیکی و جریان را در امتداد مرزهای مدل توصیف می کنند، به طور غیرمستقیم شبیه سازی می کند بنابراین مدل سه بعدی محدوده آبخوان، نمایش ریاضی جریان آب زیرزمینی با استفاده از انترفاز GMS است که از کد Modflow 2000 استفاده می کند. مراحل تهیه یک مدل ریاضی بطور خلاصه شامل تعیین هدف، طراحی مدل مفهومی، انتخاب کد یا برنامه کامپیوتری مناسب و صحت سنجی شده، واسنجی، آنالیز حساسیت و نهایتاً پیش بینی می باشد (Anderson et al., 2015).  
 مهمترین آبخوان در پیکره بندی این پژوهش محدوده دز غربی و آهودشت است که خلاصه ای از آن به عنوان نمونه ارائه شده است. برای تعیین هندسه، نوع، تعداد و مواد تشکیل دهنده آبخوان دو لایه فوق از بررسی های زمین شناسی، لوگ حفاری ۱۲ حلقه چاه اکتشافی، ۴۹ حلقه چاه پیژومتری و ۹۰ حلقه چاه بهره برداری و بررسی های ژئوفیزیکی استفاده شده است. بیش از ۱۳ حلقه از این چاه ها به سنگ کف رسیده اند. این محدوده از دو طرف توسط دو رودخانه دز و کرخه محدود شده است. علاوه بر ضرایب هیدرودینامیک و تغذیه سطحی و زیرزمینی تمامی زهکش های شبکه آبیاری بزرگ منطقه در ماژول DRAIN نرم افزار با مقادیر رسدنی وارد گردید. شکل ۴ مدل مفهومی زیرزمینی بزرگترین آبخوان دولایه شبیه سازی شده محدوده مورد مطالعه را نشان می دهد.

فرم کلی معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی از دیدگاه سیستم جریان عبارت است از:

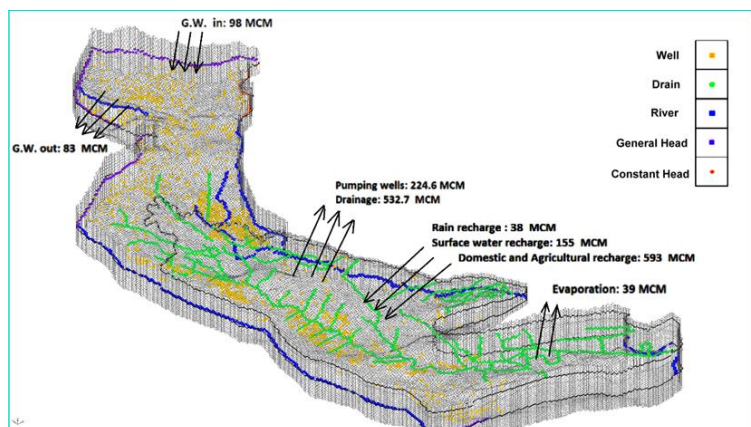
(رابطه ۳)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm R$$

که  $k_x$ ،  $k_y$  و  $k_z$  مؤلفه های تنسور هدایت هیدرولیکی،  $S_s$  ظرفیت ویژه و  $R$  مؤلفه تغذیه کننده یا تخلیه کننده (به ترتیب با علامت مثبت یا منفی) آبخوان می باشند. با توجه به مدل مفهومی، آبخوان در قسمت شمالی از مدل از نوع آزاد و در قسمت جنوبی از دولایه در نظر گرفته شده است. در آبخوان آزاد  $T_x = k_x h$  و  $T_y = k_y h$  که  $T_x$  و  $T_y$  قابلیت انتقال  $h$  ضخامت بخش اشباع آبخوان است. از این رو معادله حاکم بر جریان آب زیرزمینی از دیدگاه آبخوان که به معادله غیرخطی معروف است، به صورت رابطه ۴ می باشد.

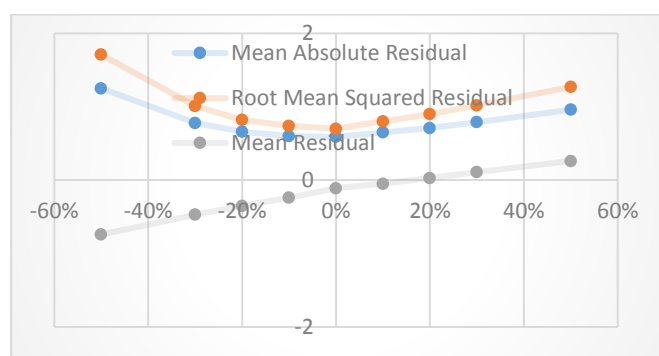
(رابطه ۴)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z h \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm R$$



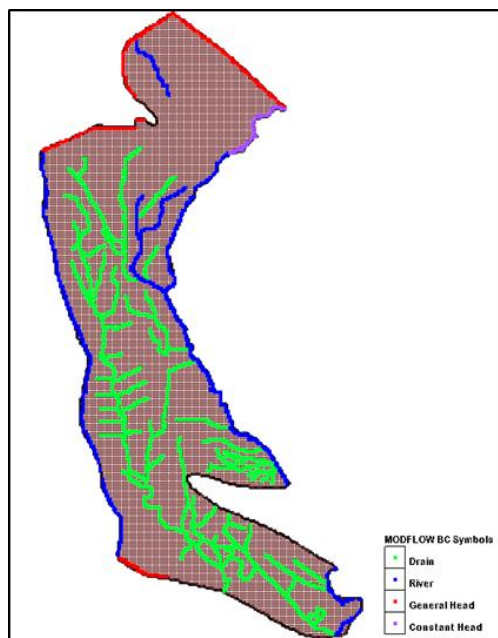
شکل ۴- مدل مفهومی زیرزمینی بزرگترین پهنه آبرفتی دولایه شبیه‌سازی شده.

Fig. 4. The underground conceptual model of the largest simulated two-layer alluvial zone.



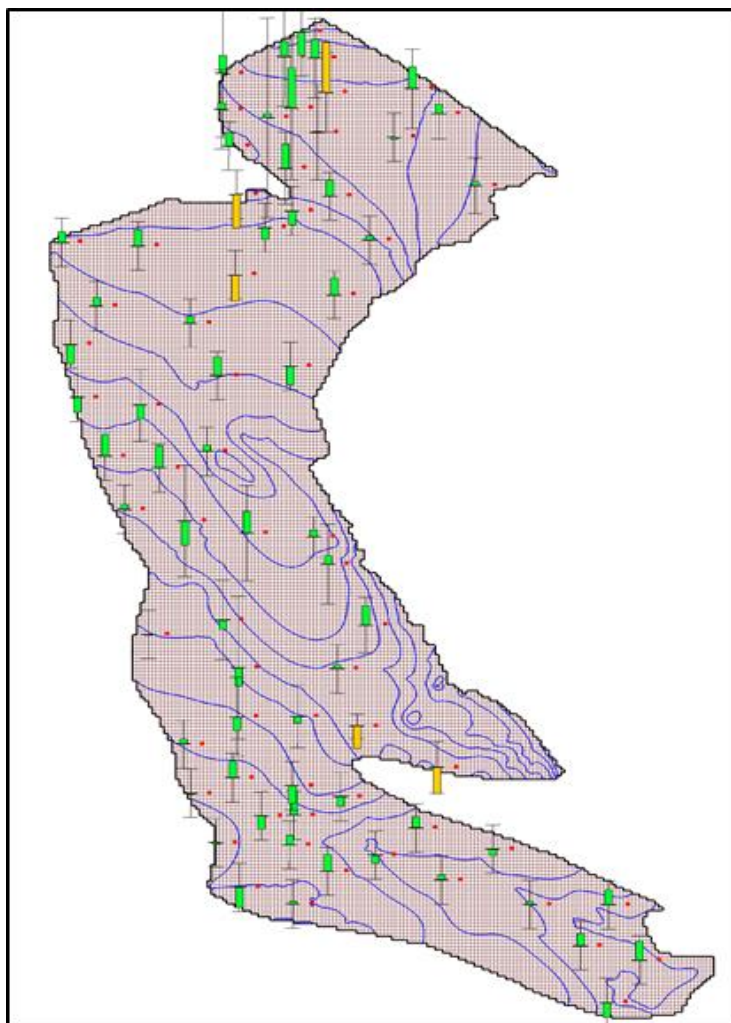
شکل ۵- حساسیت مدل نسبت به تغییرات هدایت هیدرولیکی.

Fig. 5. The model sensitivity to the variations of hydraulic conductivity.



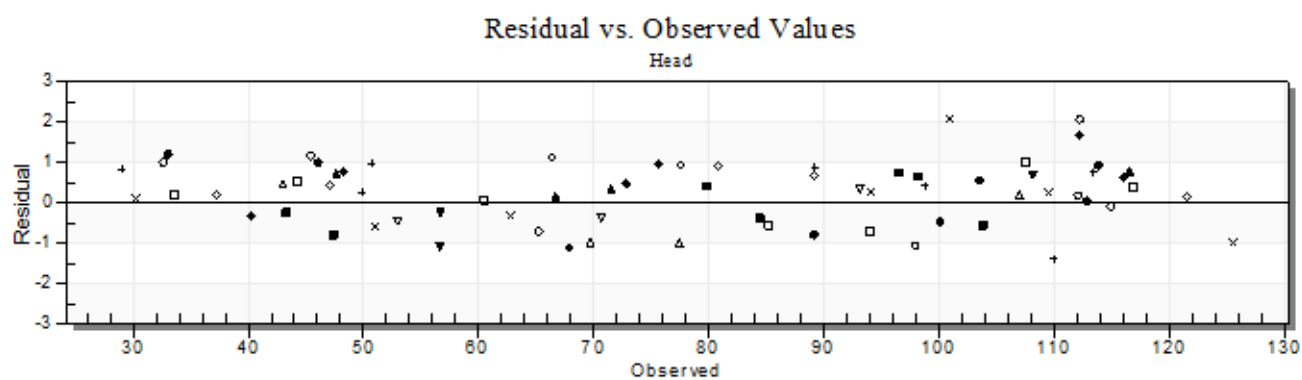
شکل ۶- شرایط مرزی، رودخانه‌ها و زهکش‌های اعمال شده در مدل.

Fig. 6. The boundary conditions, rivers, and drains in the model.



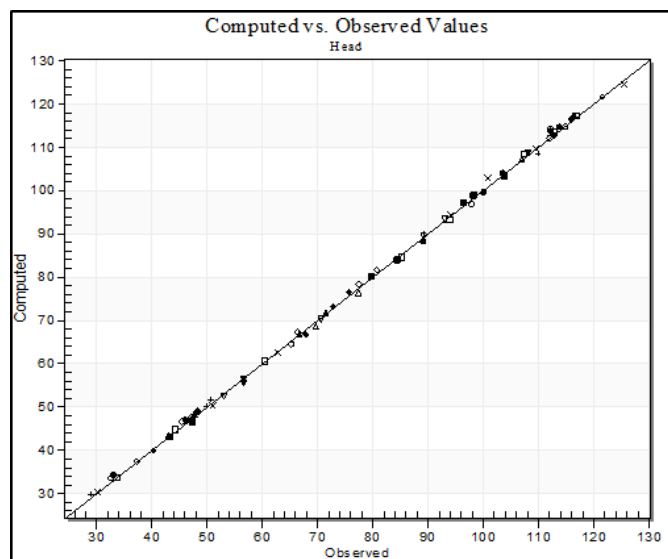
شکل ۷- نتایج حاصل از واسنجی مدل در رژیم پایدار.

Fig. 7. The results of calibrating the model in the steady state.



شکل ۸- مقادیر باقیمانده در مقابل مقادیر مشاهده‌ای برای شرایط پایدار.

Fig. 8. The remainders versus the observed values in the steady state



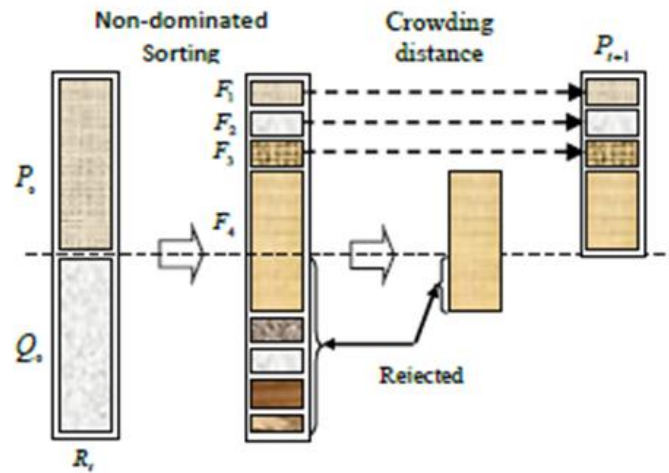
شکل ۹- برازش مقادیر محاسباتی و مشاهداتی برای شرایط پایدار.

Fig. 9. The fit between the calculated and observed values in the steady state

هدف رسم شوند، به عنوان جبهه پارتو شناخته می‌شوند. برای حل معادلات بهینه‌سازی چند هدفه، روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش وزن‌دهی، روش محدودیت، روش آرمانی و الگوریتم‌های تکاملی چند هدفه اشاره کرد. در این تحقیق از الگوریتم تکاملی چند هدفه NSGA-II به دلیل دارا بودن توانایی در حل مسائل پیچیده و ارائه منحنی تبادل بهینه بین اهداف استفاده شد. این مدل به راحتی می‌تواند مسائلی که از پیوستگی خاصی تبعیت نمی‌کنند، فضای تصمیم موجه یکپارچه‌ای ندارند و با توابع هدف آنها دارای پارامترهای تصادفی هستند را حل کند. این مدل توسط Deb و همکاران (۲۰۰۲) برای حل مسائل و مشکلات مدل الگوریتم ژنتیک کلاسیک پیشنهاد گردید. مشکلات عمده مدل‌های بهینه‌سازی چند هدفه پیشین شامل حجم بالای محاسبات در هر تکرار که منجر به افزایش زمان اجرای مدل می‌گردد و عدم نگهداری تعداد مناسب مقادیر برتر در طول اجرای مدل می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد که برتری یک فرآیند مشخص برای بهینه‌سازی نمی‌تواند به طور قطعی در تمام مسائل بهینه‌سازی اثبات شود، و نیاز به مطالعاتی تجربی برای ارزیابی عملکرد NSGA-II در قیاس با دیگر روش‌های بهینه‌سازی استفاده کننده از فرمول بندی مشابه می‌باشد (Wolpert and Macready, 1997; Mansoor et al., 2015). به خاطر مشکلات اشاره شده در رابطه با الگوریتم‌های ژنتیک و همچنین پیچیدگی مسائل و تعداد متغیرهای تصمیم، روش NSGA-II در فرآیند بهینه‌سازی در مطالعه حاضر مورد استفاده قرار گرفت. ساختار اصلی این مدل در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

### گام سوم: تلفیق مدل سطحی و زیرزمینی و بهینه‌سازی تابع هدف

پس از انجام واسنجی و صحت‌سنجی و تخمین ضرایب هیدرودینامیک، بسته‌های مدل آب زیرزمینی (BA6, LPF, DIS, OC, PCG, RIV, MFN, WELL و غیره) با استفاده از مدل ریاضی MODFLOW 2000 جهت اتصال به مدل آب سطحی کدنویسی گردید. این بسته‌ها در درون مسیر و مکان متصل شده به مدل WEAP قرار داده شد. برای انجام این کار از فایل لینکی در محیط GIS استفاده شد و سلولهای شبکه آب زیرزمینی بر محدوده مطالعاتی و لایه متناظر آن در WEAP متصل گردید. در این تحقیق تابع هدف مدل بهره‌برداری به صورت چندهدفه تدوین شد. در مسائل چندهدفه مفهوم بهینگی که در مسائل تک‌هدفه موردنظر بود، دیگر جایگاهی نداشته و جای آن را مفهوم دیگری به نام نامغلوبی (Noninferiority) می‌گیرد (Tang et al., 2002). نامغلوبی، یک پاسخ شدنی در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است، اگر و فقط اگر هیچ جواب شدنی دیگری یافت نشود که در صورت برتری در یکی از توابع هدف نسبت به جواب قبلی، حداقل مقدار یکی از توابع دیگر آن بدتر از جواب شدنی اول نباشد (Cohen, 1978). از آنجا که توابع هدف غالباً با یکدیگر در تعارض می‌باشند، اصطلاح "بهینه" در این نوع مسائل در واقع به معنای یافتن پاسخی است که هر یک از توابع هدف را در سطح قابل قبولی برآورده نمایند (Coello et al., 1999). لذا به کلیه پاسخهای نامغلوب در یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، پاسخهای بهینه پارتو گفته می‌شود. این پاسخهای غیرمغلوب در صورتی که در فضای تابع



شکل ۱۰- ساختار اصلی الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی شده غیر غالب.

Fig. 10. The backbone of the non-dominated sorting genetic algorithm.

زیرزمینی در طول دوره بهره‌برداری قرار می‌گیرد. توابع هدف و قیود در این تحقیق به صورت زیر تعریف شدند.

#### توابع هدف

۱- حداکثر نمودن اطمینان‌پذیری تامین نیازها در دوره  $t$

$$F_1 = \text{Maximize} \left( \sum_{z=1}^{nz} \sum_{s=1}^{ns} \frac{TAW_{tzs}}{DM_{tzs}} \right) \quad (\text{رابطه ۶})$$

یا

$$\text{Minimize} \left( \sum_{z=1}^{nz} \sum_{s=1}^{ns} 100 - \frac{TAW_{tzs}}{DM_{tzs}} \right) \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن  $DM_{tzs}$  نیاز آبی بخش  $s$  در دوره  $t$  از منطقه  $z$ ،  $TAW_{tzs}$  میزان کل آب تخصیص داده شده به بخش  $s$  در دوره  $t$  از منطقه  $z$  است.

۲- حداقل نمودن افت تراز آب زیرزمینی در کل دشت در طول دوره بهره‌برداری.

(رابطه ۸)

$$F_2 = \text{Minimize} \left( \sum_{t=t_1}^{t_n} \sum_{k=1}^n \frac{\text{InitialHead}_{(k,t_1)} - \text{CellHead}_{(k,t_n)}}{\text{InitialHead}_{(k,t_1)} - \text{Bottom}_{(k,t_n)}} \right)$$

محدودیت‌ها:

$$TAW_{tzs} = RS_{tzs} + RG_{tzs}, \quad t = 1, \dots, m \times y, \quad z = 1, \dots, nz, \quad s = 1, \dots, ns \quad (\text{رابطه ۹})$$

(رابطه ۱۰)

$$TSR_t = R_{R(e,w)} + R_{D(e,w)} + R_{ind} + R_{m,e,d,sh} + R_{as} + R_e$$

(رابطه ۱۱)

مراحل اجرای این مدل بهینه‌سازی چند هدفه به صورت زیر است:

۱- تولید نسل والد تصادفی  $P$  به تعداد  $N$ .

۲- مرتب نمودن نسل اولیه والد بر اساس جواب‌های غیر پست.

۳- در نظر گرفتن رتبه متناسب با تراز غیر پست برای هر جواب غیر پست که شامل رتبه یک برای بهترین تراز، رتبه دو برای بهترین تراز بعد از یک و ... می‌باشد.

۴- تولید نسل فرزندان  $Q$  به تعداد  $N$  با استفاده از عملگرهای انتخاب، تزویج و جهش.

۵- با توجه به نسل اول تولیدشده که شامل کروموزوم‌های والد و فرزندان هستند. نسل جدید به صورت زیر تولید می‌شود:

\* ترکیب کروموزوم‌های والد  $P$  و فرزندان  $Q$  و تولید نسل  $R_t$  به تعداد  $2N$ .

\* مرتب‌نمودن نسل  $R_t$  بر اساس روش دسته‌بندی غیر پست و شناسایی و دسته‌بندی جبهه‌های غیر پست  $(F_1, F_2, \dots, F_L)$ .

\* تولید نسل والد برای تکرار بعد  $(Pt+1)$  با استفاده از جبهه‌های غیر پست تولید شده به تعداد  $N$  در این مرحله با توجه به تعداد کروموزوم‌های مورد نیاز برای نسل والد  $(N)$ ، ابتدا تعداد کروموزوم‌های اولین جبهه برای نسل والد انتخاب می‌شود و در صورتی که این تعداد جوابگوی تعداد کل مورد نیاز نسل والد نباشد به ترتیب از جبهه‌های ۲، ۳ و ... برداشت می‌شود تا به میزان کل  $(N)$  دست یابد.

\* اعمال عملگرهای تزویج و جهش روی نسل والد جدید تولد شده  $(Pt+1)$  و تولید نسل فرزندان  $(Qt+1)$  به تعداد  $N$ .

\* تکرار مرحله ۵ تا دست‌یابی به تعداد کل تکرارهای مورد نظر.

همانگونه که ذکر گردید در این تحقیق تابع هدف مدل بهره‌برداری به صورت چند هدفه تدوین شد. به این ترتیب که در آن هدف اول حداکثر نمودن اطمینان‌پذیری تامین نیازهای طرح و انرژی برقایی در طی دوره برنامه‌ریزی در مقابل هدف دوم یعنی حداقل نمودن افت تراز آب

بخش  $s$  در دوره  $t$  از منطقه  $Z$  (با در نظر گرفتن اولویت‌های منابع تامین و اولویت نیاز مصارف)،  $TDF_{tZS}$  حجم کل کمبود آب بخش  $S$  در دوره  $t$  از منطقه  $Z$  و  $G_{t-max}$  حد مجاز برداشت ماهانه از منبع آب زیرزمینی است.

با توجه به تعداد زیاد متغیرهای پیش رو، حجم بالای محاسبات در مدل لینکی و وسعت زیاد منطقه، در بدنه مدل بهینه‌سازی NSGA-II از ضرایب مدیریتی تخصیص استفاده شد. این ضرایب بصورت فصلی (سه ماهه)، در طول ۶۰ ماه دوره بهینه‌سازی در بخش‌هایی که برداشت توام از آب سطحی و زیرزمینی صورت می‌گرفت ارائه شده و به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری (۲۰ متغیر) به مدل معرفی شدند. در این فرآیند، ۲۰ متغیر تصمیم‌گیری در رابطه با عملکرد چندهدفی با استفاده از توابع هدف مورد آزمایش قرار گرفتند. تکرار مکرر مدل نشان داد که به منظور دستیابی به نتایج بهتر، جمعیت اولیه کروموزوم‌ها باید حداقل دو برابر تعداد متغیرهای تصمیم‌گیری باشد. بنابراین، جمعیت اولیه مدل برابر با ۴۰ بود. در مراحل اول، انتخاب یک جمعیت بزرگتر، سرعت هم‌گرایی را به شدت افزایش داد. بنابراین، این مدل با همان جمعیت اجرا شد تا زمان صرفه جویی کند. نتایج نشان داد که در تکرار-های کمتر، هر دو تابع هدف تغییرات قابل توجهی دارند، در حالی که در تکرارهای بیشتر، تابع هدف به حداقل رساندن مقادیر مشاهده شده و تابع هدف دوم مقدار ثابت بیشتری دارد و الگوریتم تقریباً همگرا است. بنابراین، تعداد تکرار الگوریتم برای رسیدن به همگرایی برابر با ۵۰۰ در نظر گرفته شد. در نهایت، پس از پیاده‌سازی الگوریتم تکاملی برای تنظیم مدل، با توجه به اندازه جمعیت ۴۰ و بعد از ۵۰۰ تکرار، مدل با دقت قابل قبول تنظیم شد. علاوه بر این، منحنی تبادل هدف (نمودار پارتو) بین اهداف مورد نظر بدست آمد. نمودار برای تکرارهای ۳۰۰ تا جبهه پارتو نهایی (معادل ۵۰۰ تکرار) در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

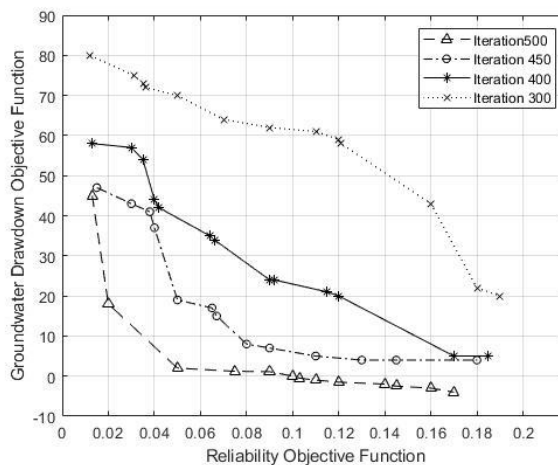
$$ARS_{tZS} = \begin{cases} DM_{tZS} & \text{if } \left( TSR_t - \sum_{z=1}^{Z-1} \sum_{s=1}^S DM_{tZS} - \sum_{z=1}^Z \sum_{s=1}^{S-1} DM_{tZS} \right) \geq DM_{tZS} \\ \left( TSR_t - \sum_{z=1}^{Z-1} \sum_{s=1}^S DM_{tZS} - \sum_{z=1}^Z \sum_{s=1}^{S-1} DM_{tZS} \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$TDF_{tZS} = DM_{tZS} - ARS_{tZS} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

$$(\text{رابطه ۱۳})$$

$$ARG_{tZS} = \begin{cases} TDF_{tZS} & \text{if } (G_{t-max} - \sum_{z=1}^Z \sum_{s=1}^{S-1} TDF_{tZS}) \geq TDF_{tZS} \\ (G_{t-max} - \sum_{z=1}^Z \sum_{s=1}^{S-1} TDF_{tZS}) & \text{otherwise} \end{cases}$$

که در آن  $InitialHead(k, t_1)$  تراز سطح آب زیرزمینی در سلول  $k$  در ابتدای دوره بهره‌برداری،  $CellHead(k, t_n)$  تراز سطح آب زیرزمینی در سلول  $k$  در انتهای دوره بهره‌برداری و  $Bottom(k, t_n)$  تراز سنگ کف آبخوان در سلول  $k$  است.  $RS_{tZS}$  حجم کل آب سطحی تخصیص داده شده به بخش  $s$  در دوره  $t$  از منطقه  $Z$ ،  $RG_{tZS}$  حجم کل آب زیرزمینی تخصیص داده شده به بخش  $s$  در دوره  $t$  از منطقه  $Z$ ، تعداد مناطق نیاز،  $nZ$  تعداد بخش‌های مصرف‌کننده آب در هر منطقه نیاز،  $m$  تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی در هر سال و  $\gamma$  تعداد سال‌های دوره برنامه‌ریزی است. همچنین  $TSR_t$  میزان کل آب سطحی تخصیص داده شده در دوره  $t$ ،  $R_R(e, w)$  حجم آب برداشتی از سدهای تنظیمی توسط کانال‌ها در دوره  $t$ ،  $R_D(e, w)$  حجم آب برداشتی از سدهای انحرافی توسط کانال‌ها در دوره  $t$ ،  $R_{ind}$  حجم آب برداشتی از رودخانه بطور مستقیم برای مصارف صنعتی در دوره  $t$ ،  $R_{m, e, d, sh}$  حجم آب برداشتی از رودخانه برای مصارف طرح‌های نیشکر،  $R_{as}$  حجم آب برداشتی از رودخانه توسط پمپ برای اراضی دارای حقایب‌های سنتی و  $R_e$  آب تخصیص داده شده برای مصارف زیست محیطی است.  $ARS_{tZS}$  میزان کل آب تخصیص داده شده به



شکل ۱۱- منحنی بهینه‌سازی در میان اهداف بهینه‌سازی (منحنی پارتو) در تکرارهای ۳۰۰ تا ۵۰۰.

Fig. 11. The optimization curve of the optimization objectives (the Pareto curve) in the 300th - 500th iteration.



خطای نسبی (MRE) استفاده گردید که در روابط ۱۴ الی ۱۷ نشان داده شده‌اند.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n |Q_{si} - Q_{oi}| \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (Q_{si} - Q_{oi})^2 \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$ARE = \frac{1}{N} \left( \sum_{t=1}^n \frac{|Q_{si} - Q_{oi}|}{Q_{oi}} \right) \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$$MRE = \text{Max} \left( \left| \frac{Q_{si} - Q_{oi}}{Q_{oi}} \right| \right) \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

که در آن  $Q_{si}$  مقادیر دبی جریان محاسباتی،  $Q_{oi}$  مقادیر دبی جریان مشاهداتی و  $N$  تعداد کل داده‌ها است. مقادیر معیارهای آماری برای دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر معیارهای آماری در جدول ۱ می‌توان دریافت که مدل به خوبی واسنجی شده و از دقت قابل قبول برخوردار است.

براساس الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیر غالب، در هر تکرار، بهترین پاسخ براساس ارزیابی توابع هدف و فرآیند ممتاز انتخاب می‌شوند و به عنوان یک مجموعه بهینه برای انتقال به نسل بعدی ذخیره می‌شوند. نقاط تنظیم شده در نمودار پارتو جواب‌های مناسب برای تطبیق با مقادیر مشاهده شده و مقادیر محاسبه شده مدل بهتر هستند. علاوه بر این، محورهای این گراف توابع هدف هستند. در آخرین تکرار مدل، چند پاسخ بهینه ارائه شد که براساس ارزیابی تابع هدف، بهترین پاسخ، که با کمترین مقدار برای دو تابع هدف انتخاب شد، به عنوان پاسخ برتر انتخاب شد و نتایج اجرای آن در مدل آب سطحی و زیرزمینی تلفیقی مورد بررسی قرار گرفت.

به منظور کنترل خطا مقادیر محاسباتی و مشاهداتی در محل ایستگاه‌ها، از معیارهای آماری شامل میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، میانگین خطا نسبی (ARE) و حداکثر

جدول ۱- مقادیر معیارهای آماری مختلف در مدل تلفیقی در نقطه کنترل.

Table 1. The statistical criteria on the integrated model at the control point.

stage	R <sup>2</sup>	MAE (m)	MSE (cms <sup>2</sup> )	ARE	MRE
Calibration	0.96	12.91	22.12	0.21	0.27
Validation	0.94	9.25	11.05	0.13	0.39

### گام چهارم: طراحی سناریوهای چندمنظوره

پس از وارد کردن داده‌ها به مدل، شش سناریو به شرح ذیل جهت ارزیابی اهداف مورد نظر در سامانه مدل تلفیقی تهیه شده تعریف گردید:

۱- افزایش حجم انتقال آب بین حوضه‌ای بالادست رودخانه‌ها، ثابت ماندن مصارف پایین‌دست، ثابت ماندن آبدهی رودخانه‌ها، ثابت ماندن شبکه‌های آبیاری، استفاده تلفیقی از منابع آب زیرزمینی و سطحی.

۲- ثابت ماندن انتقال آب بین حوضه‌ای بالادست رودخانه‌ها، افزایش مصارف پایین‌دست، ثابت ماندن آبدهی رودخانه‌ها، افزایش پنج درصدی راندمان شبکه‌های آبیاری، استفاده تلفیقی از منابع آب زیرزمینی و سطحی.

۳- افزایش حجم انتقال آب بین حوضه‌ای بالادست رودخانه‌ها، افزایش مصارف پایین‌دست، ثابت ماندن آبدهی رودخانه‌ها، ثابت ماندن راندمان شبکه‌های آبیاری، استفاده تلفیقی از منابع آب زیرزمینی و سطحی.

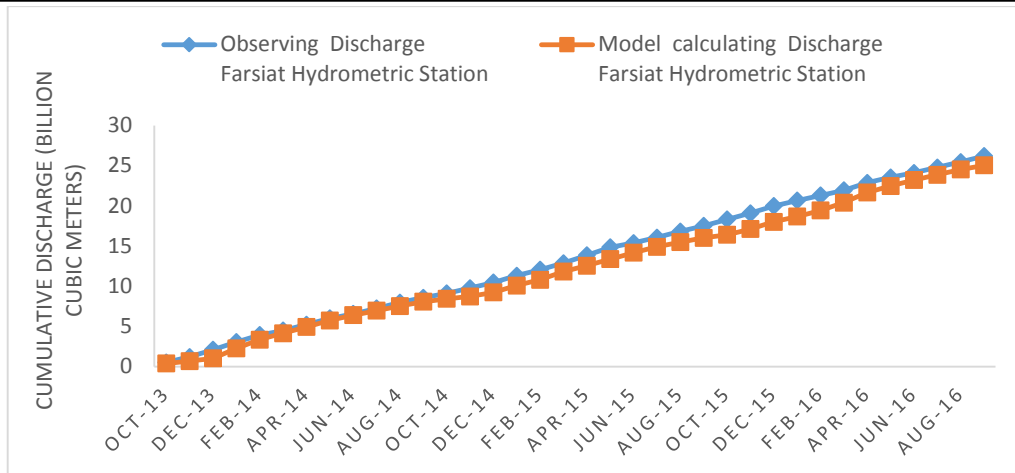
۴- افزایش حجم انتقال آب بین حوضه‌ای بالادست رودخانه‌ها، ثابت ماندن مصارف پایین‌دست، کاهش ۵ درصدی آبدهی رودخانه، افزایش پنج درصدی راندمان شبکه‌های آبیاری، ثابت ماندن برداشت از آبخوان‌ها.

۵- ثابت ماندن انتقال آب بین حوضه‌ای بالادست رودخانه‌ها، افزایش مصارف پایین‌دست، کاهش ۵ درصدی آبدهی رودخانه، ثابت ماندن راندمان شبکه‌های آبیاری، استفاده تلفیقی از منابع آب زیرزمینی و سطحی.

۶- افزایش حجم انتقال آب بین حوضه‌ای بالادست رودخانه‌ها، افزایش مصارف پایین‌دست، ثابت ماندن آبدهی رودخانه‌ها، افزایش پنج درصدی راندمان شبکه‌های آبیاری، استفاده تلفیقی از منابع آب زیرزمینی و سطحی.

### نتایج و تحلیل

نتایج اجرای مدل تلفیقی نهایی با داده‌های واقعی مبتنی بر ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در پایین‌دست رودخانه‌های دز و کارون مقایسه شد. سه سال آخر دوره آماری جهت مقایسه و صحت‌سنجی انتخاب گردید. نتایج قابل قبول عملکرد مدل در مرحله صحت‌سنجی در قالب مقایسه دبی تجمعی مشاهداتی ایستگاه هیدرومتری فارسیات و محاسباتی مدل در شکل ۱۲ ارائه شده است. محل قرارگیری این ایستگاه در حوضه آبریز کارون بزرگ در شکل ۲ آورده شده است.



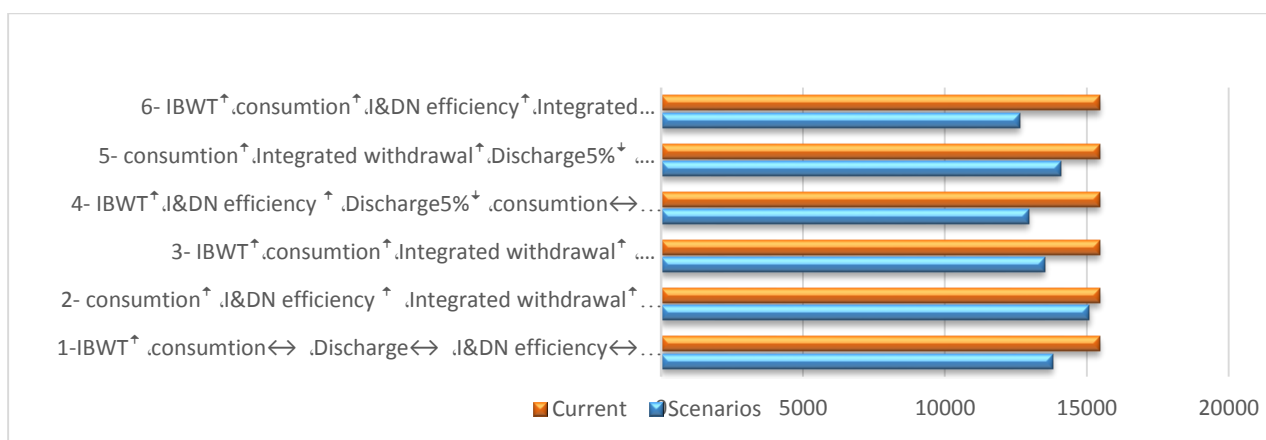
شکل ۱۲- مقایسه دبی تجمعی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در ایستگاه هیدرومتری فارسیات (میلیارد مترمکعب).

Fig. 12. The comparison of the observed and simulated cumulative discharge in Farsiat hydrometric station (billion cubic meters).

است. در این سناریو، میزان انتقال آب بین حوضه‌ای بدون تغییر و مصارف پایین‌دست طبق برنامه‌ی بلندمدت افزایش یافته است. همچنین آبدهی رودخانه‌ها نیز ثابت فرض شده است. در این سناریو با استفاده تلفیقی از منابع آب سطحی و زیرزمینی و افزایش پنج درصدی راندمان شبکه‌های آبیاری بخوبی می‌توان تولید انرژی برقایی را در کنار تامین بهینه مصارف مدیریت نمود. به عبارت دیگر در این سناریو ضمن تامین مصارف و رویکرد زیست‌محیطی در تامین دبی گره زیست‌محیطی رودخانه در پایین‌دست می‌توان افزایش مصارف و توسعه آب محور را مدیریت نمود و در کنار آن با حداکثر تولید انرژی برقایی، تولید گاز گلخانه‌ای را به حداقل رسانید. بر این اساس، مقدار تولید انرژی برقایی تحت شرایط ذکر شده به صورت میانگین تولید ۶۰ ساله در **Error!** **Reference source not found.** ارائه شده است.

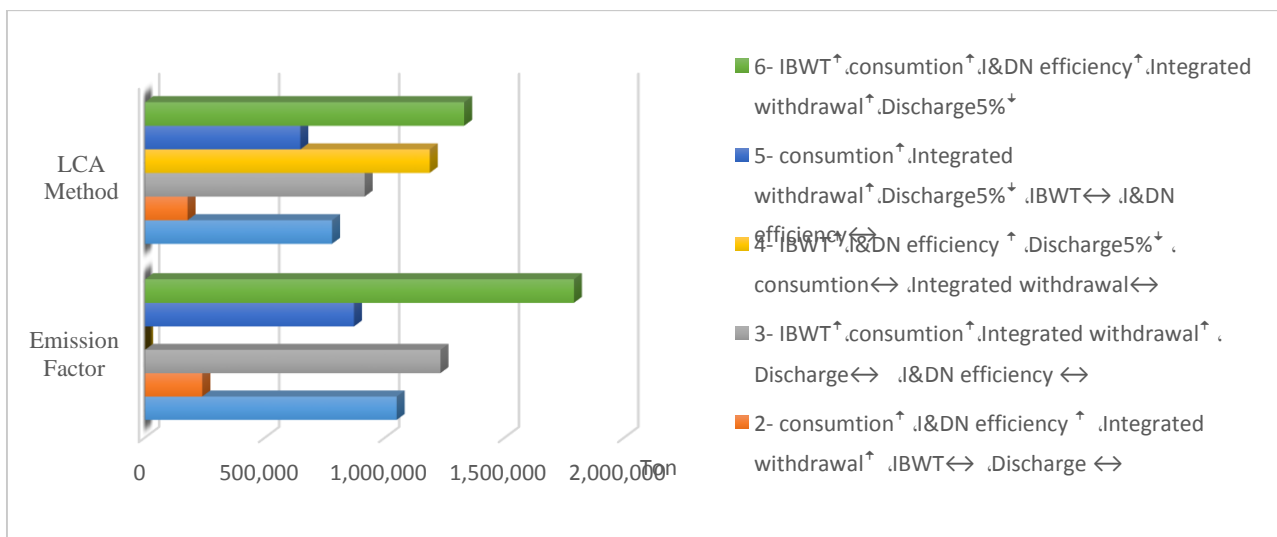
همانگونه که ذکر گردید مدل تلفیقی صحت‌سنجی شده تحت شش سناریو مدیریتی بررسی و اجرا گردیده است. این سناریوها در راستای تامین بهینه مصارف و انرژی و با هدف حداقل‌سازی تولید گاز گلخانه‌ای جهت بررسی میزان تاثیر مولفه‌های سیستمی طبیعی و انسانی ارزیابی شد. شکل شماره ۱۳ نتایج میزان تولید انرژی برقایی در شرایط حال و تحت سناریوهای تعریف شده را مقایسه و نشان می‌دهد. تولید میانگین حوضه آبریز در شرایط حال ۱۵۴۵۴ گیگاوات ساعت می‌باشد.

در شکل ۱۴ نتایج تاثیر سیاست‌های مدیریتی حوضه آبریز کارون بزرگ بر میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تحت سناریوهای مختلف به دو روش مورد مطالعه به صورت خلاصه و در یک نگاه آورده شده است. همانگونه که در شکل ۱۳ و ۱۴ مشهود است مقایسه سناریوها نشان می‌دهد گزینه برتر تحت اثر مولفه‌های در نظر گرفته شده، سناریو دوم



شکل ۱۳ - مقایسه نتایج تولید انرژی برقایی در شرایط حال و تحت سناریوهای مختلف در یک نگاه (گیگاوات ساعت).

Fig. 13. A summary of the comparison of the hydropower generations in the present condition under different scenarios (GWh).



شکل ۱۴- نتایج میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تحت سناریوهای مختلف به دو روش مورد مطالعه بر حسب تن.

Fig. 14. The results of the emission of greenhouse gases under different scenarios using the two study methods (tons).

جدول ۲- مقایسه میانگین تولید انرژی برقایی (گیگاوات ساعت) تحت شرایط حال و آینده در سناریوی برتر.

Table 2. The comparison of the mean hydroelectricity productions in the present and future conditions under the best scenario.

Dam and power plant	Present generation	Future generation	Future -Present	Generation variations (%)
	Mean 60-year generation	Mean 60-year generation	Future generation variations	
Karun 4	2350	2233	-117	-4.97
Karun 3	2740	2737	-3	-0.1
Karun 1	2986	2910	-76	-2.54
Godar	2690	2710	20	0.74+
Gotvand	2806	2805	-1	-0.03
Dez	1882	1887	5	0.26+
Total	15454	15282	-172	-1.1

نشان داد که با استفاده از این الگوریتم، شبیه‌سازی سیستماتیک فضای مطالعه زمان کمتری نسبت به واسنجی دستی دارد و از نظر دقت بسیار رضایت بخش است. مدل با انتخاب جمعیت اولیه ۴۰ و بعد از ۵۰۰ تکرار، همگرا و واسنجی شد. در طول فرآیند بهینه‌سازی، مدل بر تابع هدف تمرکز بسیار خوبی داشت و آنالیز پارامترهای آماری تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهند. در آخرین اجرای این مدل و پس از انتخاب بهترین راه‌حل در بین راه‌حل‌های بهینه پیشنهادی در منحنی تبادل هدف، سناریو نهایی آنالیز گردید. نتایج در دو بخش جداگانه با اهداف مرتبط با این مقاله و اهداف کلی به تفکیک به شرح ذیل می‌باشد:

الف) مهمترین هدف این پژوهش بررسی نقش و میزان تاثیر مولفه‌های آشکار و پنهان موثر بر تولید انرژی پاک برقایی و مدیریت بهینه

نتایج حاکی از آن است با استفاده تلفیقی منابع آب و افزایش فقط پنج درصدی راندمان شبکه‌های آبیاری با وجود افزوده شدن هفت میلیارد مترمکعب به مصارف آینده درون حوضه آبریز کارون بزرگ، فقط شاهد کاهش ۱۷۲ گیگاوات ساعتی تولید انرژی برقایی خواهیم بود که در مقایسه با تأثیر انتقال آب بین حوضه‌های ناچیز است. این مقدار معادل ۱/۱ درصد کاهش تولید انرژی برقایی در حوضه می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق توانایی الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی غیرغالب NSGA-II با تعریف توابع چندهدفه برای واسنجی خودکار مدل تلفیقی WEAP و MODFLOW مورد استفاده قرار گرفت. نتایج

صحیح می‌توان در راستای دریافت گواهی کاهش انتشار تحت مکانیسم توسعه پاک گام برداشت.

ب) نتایج کلی حاصل از بهینه‌سازی سیستمی منابع آب در شرایط بهره‌برداری تلفیقی به شیوه فوق در دوره پیش‌بینی به صورت زیر استخراج شد:

روش الگوریتم ژنتیک مبتنی بر جواب غیربسته به تعداد جمعیت اولیه کروموزوم‌ها حساس است و برای کسب نتایج بهتر و همچنین افزایش سرعت همگرایی باید تعداد جمعیت اولیه حداقل دو برابر تعداد متغیرهای تصمیم باشد. این امر در تحقیقات (Deb et al., 2002) به دلیل حجم کوچک مسائل پیشنهادی، تعداد کم متغیرهای تصمیم (یک یا دو عدد) و امکان انتخاب جمعیت‌های با تعداد زیاد به خوبی نمود پیدا نکرده است.

در فرآیند بهینه‌سازی، در تکرارهای بالاتر دامنه تغییرات تابع هدف اطمینان‌پذیری ثابت شده و تغییرات آن زیاد محسوس نیست و در این شرایط الگوریتم پیشنهادی بر روی کاهش تابع هدف سطح آب زیرزمینی متمرکز می‌شود. به عبارت دیگر با تغییر متغیرهای تصمیم در این تکرارها تغییرات تابع اطمینان‌پذیری کم بوده اما تغییرات تابع هدف سطح آب زیرزمینی تا حصول به نتایج بهتر همچنان ادامه دارد. در آخرین تکرار این تغییرات به حداقل خود می‌رسد طوری که میانگین افت در دشت دز غربی به نیم متر می‌رسد. این در حالی است که میزان اطمینان‌پذیری تامین نیاز این دشت‌ها به حداکثر خود برابر با ۹۶ درصد رسیده است.

در سناریوی بهینه انتخاب‌شده، میزان اطمینان‌پذیری تامین نیاز سایر مصارف طرح اعم از نیازهای داخل دشت، نیازهای پایین‌دست، نیاز زیست محیطی و تامین انرژی بجز اراضی در غربی و شرقی، ۱۰۰ درصد محاسبه شد. در این میان تنها اطمینان‌پذیری تامین نیاز حبابه سنتی ۹۸/۶ درصد محاسبه شد.

برای مقایسه نتایج، یکی از جواب‌های بهینه که هم زمان دارای کمترین افت سطح آب زیرزمینی و بیشترین ضریب اطمینان‌پذیری بود انتخاب شد. در اثر اجرای این سیاست بهینه در دوره ۵ ساله آتی برنامه‌ریزی (۱۴۰۲ تا ۱۳۹۷)، متوسط درصد تخصیص از منابع آب سطحی در منطقه ۸۰ درصد و تخصیص از منابع آب زیرزمینی ۲۰ درصد محاسبه شد. میانگین این درصدها در سناریوی مرجع در محدوده فوق به ترتیب برای آب سطحی ۷۵ و برای زیرزمینی ۲۵ درصد بود.

#### قدردانی

نویسندگان از سازمان آب و برق خوزستان و مدیریت دفتر پژوهش‌های کاربردی برای حمایت مالی برای انجام این پژوهش تشکر می‌نمایند. همچنین از معاونت مطالعات پایه سازمان آب و برق خوزستان به علت در اختیارگذاشتن آمار و اطلاعات قدردانی می‌گردد.

آنها بوده است. بر اساس نتایج حاصل‌شده از این پژوهش، مهم‌ترین عامل کاهش تولید انرژی برقابی در این حوضه که تولید ۹۳ درصد انرژی برقابی کشور ایران را داراست، انتقال آب بین حوضه‌ای است که با کاهش جریان از سرشاخه‌های رودخانه‌های حوضه باعث بیشترین کاهش در تولید انرژی برقابی حوضه و در نهایت افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از روشهای تولید انرژی جایگزین در حوضه می‌گردد. نتایج بررسی میزان تاثیر و نقش مولفه‌های موثر بر تولید انرژی برقابی و در نهایت انتشار گاز گلخانه‌ای به ترتیب اهمیت به شرح ذیل می‌باشد:

I. بر اساس نتایج مدل، انتقال آب بین حوضه‌ای با سناریو افزایش ۱/۵ میلیارد مترمکعب باعث کاهش حدود ۱۰ درصد از میانگین سالانه تولید انرژی برقابی در حوضه می‌شود. لذا این مولفه بیشترین اثر و وزن را در مقایسه با سایر پارامترها بر کاهش تولید انرژی (حدود ۱۵۰۰ گیگاوات ساعت) و در نهایت افزایش انتشار گاز گلخانه‌ای (۱/۳ میلیون تن) دارد.

II. مولفه دوم شامل تاثیر تغییر اقلیم و کاهش آبدی رودخانه هاست که باعث کاهش پنج درصدی تولید سالانه انرژی برقابی حوضه آبریز شده است.

III. مولفه سوم که نقش افزایش مصارف درون حوضه‌ای است نشان می‌دهد با افزایش هفت میلیارد مترمکعبی مصارف درون حوضه آبریز باعث کاهش تقریباً سه درصدی میانگین تولید سالانه انرژی برقابی در این حوضه خواهد شد.

IV. مولفه چهارم شامل تاثیر افزایش پنج درصدی راندمان شبکه‌های آبیاری است. نتایج نشان می‌دهد با ایجاد این افزایش در راندمان به میزان دو درصد تولید انرژی برقابی افزایش خواهد یافت و از تولید ۲۵۰ هزار تن گاز گلخانه‌ای ناشی از نیروگاه‌های جایگزین جلوگیری نمود.

V. مولفه پنجم نقش بهره‌برداری تلفیقی منابع آب سطحی و زیرزمینی در سیستم است. نتایج اجرای مدل در این شرایط نشان می‌دهد با مدیریت تلفیقی بهره‌برداری منابع آب به میزان یک درصد تولید انرژی در حوضه آبریز افزایش خواهد یافت و از تولید ۱۲۵ هزار تن گاز گلخانه‌ای ناشی از نیروگاه‌های جایگزین جلوگیری نمود. با توجه به اینکه افزایش مصارف درون حوضه‌ای معمولاً اجتناب ناپذیر است می‌توان نتیجه‌گیری کرد در صورت جلوگیری از انتقال آب به خارج از حوضه و نیز شرایط ثابت اقلیمی بخوبی می‌توان با استفاده تلفیقی منابع آب و تغییر پنج درصدی راندمان شبکه‌های آبیاری، تولید انرژی برقابی را بصورت بهینه مدیریت نمود و نیاز مصارف آینده را نیز تامین کرد (سناریو برتر).

نتایج مدل‌سازی تلفیقی در این حوضه نشان‌دهنده پتانسیل مستعد و امکان‌پذیر این حوضه بزرگ برای جلوگیری از افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد با استفاده از مدیریت

- Amponsah, N.Y., Troldborg, M., Kington, B., Aalders, I., Hough, R.L., 2014. Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39, 461-475.
- Anderson, M.P., Woessner, W.W., Hunt, R., 2015. *Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, Cambridge, MA.
- Anugrah, P., Setiawan, A.A., Budiarto, R., Sihana, S., 2015. Evaluating micro hydro power generation system under climate change scenario in Bayang Catchment, Kabupaten Pesisir Selatan, West Sumatra. *Energy Procedia* 65, 257-263.
- Assaf, H., Saadeh, M., 2008. Assessing water quality management options in the Upper Litani Basin, Lebanon, using an integrated GIS-based decision support system. *Environmental Modelling & Software* 23(10-11), 1327-1337.
- Berg, B., 2011. Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources. *Environmental Science*.
- Bharati, L., Rodgers, C., Erdenberger, T., Plotnikova, M., Shumilov, S., Vlek, P., Martin, N., 2008. Integration of economic and hydrologic models: exploring conjunctive irrigation water use strategies in the Volta Basin. *agricultural water management* 95(8), 925-936.
- Bear, J., Cheng, A.H.D., 2010. *Modeling groundwater flow and contaminant transport (Vol. 23)*. Springer Science & Business Media.
- Chang, L.C., Chang, F.J., 2009. Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system. *Journal of hydrology* 377(1-2), 12-20.
- Chenini, I., Mammou, A.B., 2010. Groundwater recharge study in arid region: an approach using GIS techniques and numerical modeling. *Computers & Geosciences* 36(6), 801-817.
- Coello, C.A.C., 1999. A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization techniques. *Knowledge and Information systems* 1(3), 269-308.
- Cohen, G., 1978. Optimization by decomposition and coordination: A unified approach. *IEEE Transactions on automatic control* 23(2), 222-232.
- Copenhagen Accord, 2009. Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Dalir, F., Shafiepour Motlagh, M., Ashrafi, K., 2017. A well to wire LCA model development and sensitivity analysis for carbon footprint of combined cycle power plants in Iranian electricity network. *International Journal of Green Energy* 14(5), 499-508.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., 2002. Meyarivan TJItoec. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J], 6(2), 182-97.
- Droogers, P., Butterfield, R., Dyszynski, J., 2009. Climate change and hydropower, impact and adaptation costs: case study Kenya. *FutureWater Report*, 85.
- Ercan, M.B., Goodall, J.L., 2016. Design and implementation of a general software library for using NSGA-II with SWAT for multi-objective model calibration. *Environmental Modelling & Software* 84, 112-120.
- Fu, G., Butler, D., Khu, S.T., 2008. Multiple objective optimal control of integrated urban wastewater systems. *Environmental Modelling & Software* 23(2), 225-234.
- Gambolati, G., Pini, G., Verri, G., 1989. Simulation of regional subsurface flow by finite element models. *Advances in water resources* 12(2), 59-65.
- Haddad, M., Jayousi, A., Hantash, S.A. 2007. Applicability of WEAP as water management decision support system tool on localized area of watershed scales: Tulkarem district in Palestine as case study. 11th International Water Technology Conference, IWTC.
- Hadded, R., Nouiri, I., Alshihabi, O., Maßmann, J., Huber, M., Laghouane, A., Yahiaoui, H., Tarhouni, J., 2013. A decision support system to manage the groundwater of the zeuss koutine aquifer using the WEAP-MODFLOW framework. *Water Resources Management* 27(7), 1981-2000.
- Hondo, H., 2005. Life cycle GHG emission analysis of power generation systems: Japanese case. *Energy* 30(11-12), 2042-2056.
- Hornberger, G.M., Ebert, J., Remson, I., 1970. Numerical solution of the Boussinesq equation for aquifer-stream interaction. *Water Resources Research* 6(2), 601-608.
- International Hydropower Association (IHA), 2016. *International Hydropower Association Sustainability Guidelines*. London: International Hydropower Association.

- Jones, B.A., Ripberger, J., Jenkins-Smith, H., Silva, C., 2017. Estimating willingness to pay for greenhouse gas emission reductions provided by hydropower using the contingent valuation method. *Energy Policy* 111(Supplement C), 362-370.
- Lin, C.L., 1972. Digital simulation of the Boussinesq equation for a water table aquifer. *Water Resources Research* 8(3), 691-698.
- Mansoor, U., Kessentini, M., Langer, P., Wimmer, M., Bechikh, S., Deb, K., 2015. MOMM: Multi-objective model merging. *Journal of Systems and Software* 103, 423-439.
- Miller, S., Labadie, J., 2003. A decision support system for optimal planning of conjunctive use progress. *Journal of American Water Resources Association* 39(3), 517-528.
- Mugatsia, E.A., 2010. Simulation and scenario analysis of water resources management in Perkerra catchment using WEAP model. M.asters Thesis, Department of Civil and Structural Engineering, School of Engineering, Moi University, Kenya, (December).
- Paul, M.J., 2006. Impact of land-use patterns on distributed groundwater recharge and discharge. *Chinese Geographical Science* 16(3), 229-235.
- Poblete, D., Vicuña, S., Meza, F., Bustos, E., 2012. Water resources modeling under Climate Change scenarios of Maule River Basin (Chile) with two main water intensive and competing sectors: Agriculture and Hydropower Generation. In *IWA World Congress on Water, Climate and Energy*.
- Raadal, H.L., Gagnon, L., Modahl, I.S., Hanssen, O.J., 2011. Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), 3417-3422.
- Sieber, J., Swartz, C., Huber-Lee, A.H., 2005. *Water evaluation and planning system (WEAP): User guide*. Stockholm Environment Institute, Boston.
- Tang, L., Liu, J., Rong, A., Yang, Z., 2002. Modelling and a genetic algorithm solution for the slab stack shuffling problem when implementing steel rolling schedules. *International Journal of Production Research* 40(7), 1583-1595.
- Weisser, D., 2007. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy* 32(9), 1543-1559.
- Wolpert, D.H., Macready, W.G., 1997. No free lunch theorems for optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation* 1(1), 67-82.
- Young, G., Shah, B., Kimaite, F., 2008. UN Water Report. Status report on integrated water resources management and water efficiency plans.
- Zucker, M.B., Remson, I., Janet, E., Aguado, E., 1973. Hydrologic studies using the Boussinesq equation with recharge term. *Water Resources Research* 9(3), 586-592.

