



مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۱ ■ شماره ۴ ■ زمستان ۱۴۰۰

صفحه‌های ۸۱۴-۷۹۷

DOI: 10.22059/jwim.2022.330638.925

مقاله پژوهشی:

ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک - بختگان)

حمید عباسی^۱، مجید دلاور^{۲*}، حمید محمدی سه‌دران^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. دانشیار، گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۶

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

چکیده

امروزه منابع آب به‌عنوان یکی از بحرانی‌ترین منابع طبیعی و مسئله آب به‌عنوان یکی از جدی‌ترین چالش‌های جامعه بشری قرن ۲۱ تبدیل شده است. مفهوم ظرفیت برد منابع آب جهت پاسخگویی به این نگرانی‌ها و استفاده بهینه از منابع آب ایجاد شده است. در مطالعه حاضر تلاش شده با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی - بهینه‌سازی، ظرفیت برد منابع آب در یک حوضه پایلوت با در نظرگیری مؤلفه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و منابع آبی در دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و در شرایط تغییر اقلیم (۲۰۴۵-۲۰۱۵) مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا از ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. به‌منظور ارزیابی تغییر اقلیم در این مطالعه از خروجی‌های سه مدل گردش عمومی جو تحت سناریوهای RCP 2.6, 4.5, 8.5 استفاده شده است. نتایج مطالعه بیان‌گر این است که توانایی پشتیبانی منابع آب به واسطه‌ی نوسانات اقلیمی و تغییر اقلیم (در تمام سناریوها) در دوره مورد بررسی (۲۰۴۵-۱۹۸۵) روند نزولی داشته است. از طرف دیگر بارگذاری بر منابع آبی به‌واسطه افزایش سطح زیر کشت افزایش یافته است. کاهش توانایی پشتیبانی منابع آب در کنار افزایش بارگذاری بر منابع آب سبب واردشدن آسیب‌های جدی به منابع آب و محیط‌زیست حوضه شده است از این میان می‌توان به خشک‌شدن کامل دریاچه‌های حوضه اشاره کرد. در راستای مصرف متناسب با ظرفیت برد تحت بدبینانه‌ترین و خوش‌بینانه‌ترین سناریو در شرایط تغییر اقلیم با شرایط مدیریت فعلی حوضه، نیاز به کاهش درآمد ناخالص بخش کشاورزی به‌ترتیب با مقادیر ۴۴/۴۴ و ۳۰ درصد می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم ژنتیک، حوضه آبریز طشک - بختگان، ظرفیت برد منابع آب، مدل SWAT.

Basin's Water Resource Carrying Capacity Assessment in Climate Change Conditions Using Simulation-Optimization Approach; Case Study: Tashk-Bakhtegan basin

Hamid Abbasi¹, Majid Delavar^{2*}, Hamid Mohammadi Sedaran³

1. M.Sc. Graduate, Department of Water Resources Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Department of Water Resources Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

3. M.Sc. Student, Department of Water Resources Engineering and Management, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: September, 16, 2021

Accepted: January, 06, 2022

Abstract

Water resources are one of the essential natural resources of human life and are one of the most important factors limiting the natural environment, the survival of human societies, and development. On the other hand, phenomena such as climate fluctuations, climate change, population growth, mismanagement, etc. have led to a sharp increase in water resource constraints. In this regard, a proper estimation of this resource is required in the context of sustainable development planning and management strategies. The new approaches in this area are to determine the water resources carrying capacity (WRCC). WRCC is a major component of resource and environmental studies and it is a management concept aimed at supporting sustainable socioeconomic development on a regional scale and catchment areas. Failure to pay attention to concepts such as the carrying capacity in the country's planning has led to the ineffectiveness of most programs. For this purpose, in the present study, it has been tried to use the simulation-optimization approach to determine the water resources carrying capacity in a pilot basin (Tashk-Bakhtegan Basin), considering the economic, environmental and Water resources in the historical periods (1985-2014) and terms of climate change (2045-2015) should be considered. In this regard, the Water and Soil Assessment Tool (SWAT) and the Genetic Algorithm are used. For this purpose, the outputs of three general circulation atmosphere models under RCP 2.6, 4.5, 8.5 scenarios have been used to assess climate change in this study. The results of the study indicate overloading of water resources due to increased crop area in all studied periods. Also, the water resources carrying capacity due to climate fluctuations and climate change in the examined period (1985 - 2045) has been declining, and from 2.6 billion cubic meters in the period (1985-2006) to 1.9 billion cubic meters. The most pessimistic climatic conditions are reduced.

Keywords: Genetic algorithm, SWAT model, Tashk-Bakhtegan basin, Water resources carrying capacity.

مقدمه

(Mohammadi Sedaran *et al.*, 2021) و در برگرفته عوامل زیادی مانند جمعیت، اقتصاد، منابع، محیط‌زیست و غیره است (Feng & Huang, 2008). ظرفیت برد منابع آب به دلیل تغییر اقلیم، توسعه اقتصادی و پیشرفت فناوری به طور پویا در حال تغییر است (Yang & Yang, 2021). دما نقش مهمی در چرخه آب ایفا می‌کند (Nogueira, 2019)، که بر توزیع مکانی و زمانی منابع آب تأثیر می‌گذارد (Tukiman & Harun, 2019)، و در نتیجه ظرفیت برد منابع آب تغییر می‌کند (Yang & Yang, 2021). از طرف دیگر، توسعه اقتصادی و پیشرفت فناوری نیز با افزایش مصرف آب و تخلیه فاضلاب بر تعادل آب بر ظرفیت برد منابع آب تأثیر می‌گذارد (Wang *et al.*, 2017). بنابراین مطالعه رفتار پویای ظرفیت برد منابع آب در شرایط متغیر اقلیم، توسعه اقتصادی و تکنولوژیکی اهمیت ویژه‌ای دارد (Yang & Yang, 2021). مفهوم ظرفیت برد به طور ویژه مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته و پژوهش‌گران جهت ارزیابی آن استفاده کرده‌اند، به عنوان مثال روش تجزیه و تحلیل مؤلفه اصلی (Wu *et al.*, 2021)، روش تحلیل سلسله مراتبی (Chi *et al.*, 2019)، ارزیابی جامع فازی (Hou & Tang, 2014) و چارچوب نیرو محرکه- فشار- وضعیت- اثر- پاسخ- مدیریت (DPSIRM) (Yu *et al.*, 2020). اگرچه مطالعات زیادی در مورد ظرفیت برد منابع آب انجام شده است، اما هنوز تعریف (Luo *et al.*, 2017) و یا حتی درک (Kang *et al.*, 2019) مشترکی از این مفهوم وجود ندارد. این مطالعات نشان می‌دهند که ظرفیت برد منابع آب با عوامل اجتماعی، اقتصادی، اکولوژیکی و فنی ارتباط تنگاتنگی دارد و باید از اصل توسعه پایدار اجتماعی و استفاده پایدار از منابع آبی پیروی کند (Ren *et al.*, 2016). جهت هماهنگی توسعه اجتماعی و استفاده پایدار از منابع آب

انسان و تأثیرات انسانی بر روی زیست‌کره با سرعت هشداردهنده‌ای در حال افزایش است (Del Monte- Luna, 2004) این عوامل در کنار تناقض میان توسعه اجتماعی- اقتصادی و افزایش جمعیت با پایداری منابع و محیط‌زیست (Li *et al.*, 2019) به دلیل عدم توجه به محدودیت‌های منابع و محیط‌زیست در برنامه‌ریزی‌ها و سیاست‌های توسعه‌ای (Dou *et al.*, 2015)، پایداری منابع و محیط‌زیست را به یک گلوگاه مهم برای توسعه پایدار منطقه‌ای تبدیل کرده است (Wang, 2018). مفهوم ظرفیت برد رابطه بین منابع، محیط‌زیست و فعالیت‌های انسانی را برای اطمینان از پایداری توصیف می‌کند (Li *et al.*, 2019) و در مقایسه با سایر روش‌های ارزیابی مورد استفاده در پژوهش‌های پایداری، از یک چارچوب جامع‌تر استفاده می‌کند که بر محیط‌زیست، موجودات زنده و تعاملات آن‌ها تمرکز دارد (Ma *et al.*, 2017). این مفهوم به طور ویژه مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته و دامنه پژوهش آن به سرعت گسترش یافته (Bao *et al.*, 2020) و سبب شکل‌گیری مفاهیمی متعددی مانند ظرفیت برد منابع زمین (Zhou *et al.*, 2021)، ظرفیت برد گردشگری (Aguilar *et al.*, 2021)، ظرفیت برد شهری (Cao *et al.*, 2021)، ظرفیت برد منابع و محیط‌زیست (Zou & Ma, 2021) و ظرفیت برد منابع آب (Zhao *et al.*, 2021) شده است.

سیستم منابع آب یک سیستم پیچیده با عدم قطعیت‌های بسیار زیاد است (Yang *et al.*, 2016). ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در کشف تعاملات میان توسعه اجتماعی- اقتصادی و دستیابی به پایداری سیستم منابع آب اهمیت ویژه‌ای دارد (Yang *et al.*, 2015). مفهوم ظرفیت برد منابع آب با توسعه مفهوم ظرفیت برد در علم مدیریت منابع آب ایجاد شده است

ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک-بختگان)

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و داده‌ها

حوضه آبریز طشک-بختگان با مساحت ۲۷۵۲۳ کیلومترمربع در بخش‌هایی از مناطق شمال، مرکز و جنوب شرقی استان فارس به همراه مناطق جزئی از استان کهگیلویه و بویراحمد واقع شده است. بلندترین نقطه آن در غرب حوضه به ارتفاع حدود ۳۹۰۰ متر از سطح دریای آزاد و کم‌ترین آن در حاشیه دریاچه طشک-بختگان به ارتفاع حدود ۱۶۲۰ متر از سطح دریای آزاد قرار دارد. براساس تقسیمات وزارت نیرو، حوضه آبریز طشک-بختگان شامل ۲۲ محدوده مطالعاتی می‌باشد (شکل ۱). از جمله مشکلات این حوضه می‌توان به خشکی دریاچه‌های طشک-بختگان، افت سطح ایستابی سفره‌های آب زیرزمینی، شوری آن‌ها و ... اشاره کرد. در این مطالعه با توجه به اهداف موردنظر، طیف متنوعی از اطلاعات مورد استفاده قرار گرفت. مهم‌ترین داده‌های مورد استفاده به همراه منبع آن‌ها در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است.

تخصیص بهینه منابع آب مورد نیاز است (Ren *et al.*, 2016) از این‌رو، مطالعه ظرفیت برد منابع آب اغلب به تجزیه و تحلیل تخصیص بهینه منابع آب در منطقه نیاز دارند تا بتوانند با توجه به سطح مشخصی از فناوری تولید، بیش‌ترین جمعیت و اقتصاد ممکن را حفظ کنند (Sun & Yang, 2019). بنابراین در مطالعه‌ی حاضر، مفهوم ظرفیت برد منابع آب به‌عنوان رویکردی در بررسی توازن مصارف و ظرفیت آبی حوضه، پایش و شناسایی آستانه شروع تنش‌ها، تخصیص بهینه منابع آب و توسعه هماهنگ سیستم اقتصادی (با تمرکز بر بخش کشاورزی) با محیط زیست و منابع آب پایدار در سیستم منابع آب حوضه آبریز پایلوت (حوضه آبریز طشک-بختگان) مدنظر قرار گرفت. در این مطالعه، مدل SWAT به‌منظور شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی (جریان‌های سطحی، تبخیر و تعرق، آب زیرزمینی) و فعالیت‌های کشاورزی حوضه و الگوریتم ژنتیک به‌منظور بهینه‌سازی مبتنی بر معیارهای منابع آب، اقتصاد و محیط‌زیست مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

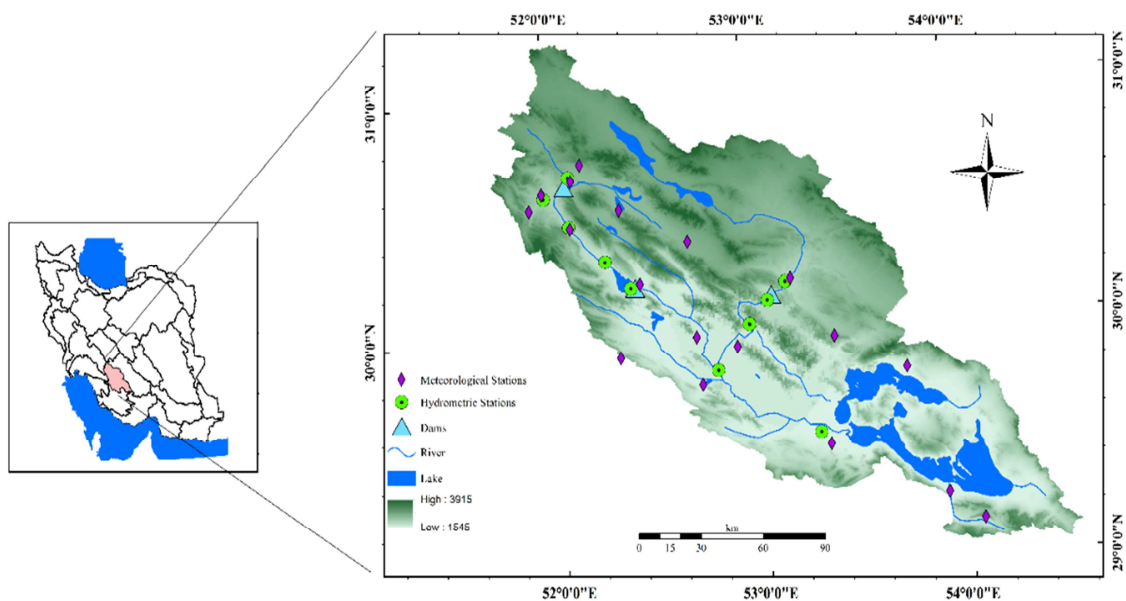


Figure 1. Tashk- Bakhtegan Basin

مدیریت آب و آبیاری

دوره ۱۱ ■ شماره ۴ ■ زمستان ۱۴۰۰

Table 1. Data used in preparation of model

Data	Source
DEM map	DEM map with 30 meter accuracy Aster
Land use map	Forests and rangelands organization in 1383 with 9 user classes and two user maps extracted from LANDSAT 8 satellite images for 1394 and 1366
Soil map	Updated FAO-UNESCO map with 13 soil classes
Daily weather information	Synoptic stations, climatology belonging to the meteorological organization of Iran, information on rain gauge and evaporator stations of the ministry of energy
River hydrometric data	Iran water resources management company
• Agricultural and managerial information	
• Cultivation pattern, planting and harvesting date, irrigation and fertilization planning, water supply source and crop rotation and crop yield by each study area	Comprehensive water plan of the country (2013), agricultural jihad of Fars province and field visits
• 18 irrigated crops (7 horticultural crops and 11 crops)	
• 7 rainfed crops (3 horticultural crops and 4 crops)	
Information on aquifers and changes in groundwater levels and surface storage tanks	Iran water resources management company
Drinking and industrial uses	Iran water resources management company, basin update studies (Farsab Sanat 1393)
Evapotranspiration potential of products in any study area	National water document

روش انجام تحقیق

از آنجاکه مفهوم ظرفیت برد به استفاده منطقی و بهینه از منابع با توجه به آستانه‌های محیط‌زیست تأکید دارد روش انجام این پژوهش در سه گام تنظیم شده است (شکل ۲). در گام اول، با استفاده از مکانیسم حامل- بار آستانه بارگذاری بر منابع آب تعیین شده است. در گام دوم جهت بهینه‌سازی استفاده از منابع آب، یک مدل ترکیبی بهینه‌سازی و شبیه‌سازی جامع حوضه آبریز به کار برده شده است. مدل ارزیابی ظرفیت برد منابع آب نیز در این مرحله با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی- بهینه‌سازی مبتنی بر مکانیسم حامل- بار توسعه داده شده است و در گام سوم مدل توسعه داده- شده جهت ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در شرایط پایه و تغییر اقلیم به کار برده شده است.

تعیین چارچوب ارزیابی ظرفیت برد منابع آب

به دلیل تفسیرهای مختلف از مفهوم ظرفیت برد، پژوهش‌گران جهت ارزیابی این مفهوم رویکردهای مختلفی اتخاذ کرده‌اند (Liao et al., 2020). در این پژوهش جهت ارزیابی ظرفیت برد منابع آب از چارچوب حامل- بار که ریشه در چارچوب فشار- پشتیبانی دارد (Wang et al., 2020) استفاده شده است. براساس این چارچوب، یک سیستم (اکوسیستم، منابع آب و ...) به

حامل‌ها و بارها تقسیم می‌شود، به بیان دیگر فرض می‌شود که در یک سیستم دو نوع نیرو وجود دارد، نیروهای پشتیبانی‌کننده و نیروهای فشار که به ترتیب از حامل و بار ناشی می‌شوند (Wu & Hu, 2020). در این رویکرد، ظرفیت برد سیستم هم به حامل‌ها و هم به بارهایی که آن‌ها حمل می‌کنند (Liao et al., 2020) و هم به رابطه بین آن‌ها (حامل- بار) بستگی دارد (Wang et al., 2020; Zhu et al., 2020). مفهوم ظرفیت برد منابع آب از منظر ساختار حامل- بار در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده است منابع آب حامل نامیده می‌شوند که از بارهای فعالیت‌های انسانی در طی فرایند توسعه منطقه‌ای پشتیبانی می‌کنند به عبارت دیگر فعالیت‌های انسانی (بار) بر سیستم منابع آب منطقه‌ای فشار وارد می‌کند و منابع آب (حامل) فشار را تحمل می‌کنند، از آنجاکه ظرفیت پشتیبانی حامل محدود است، اثر محدودکننده‌ای بر حجم فعالیت‌های انسانی دارند و اگر بار بیش از حد باشد، حامل بیش از حد بارگذاری می‌شود با این وجود این اثر محدودکننده می‌تواند تا حدی قابل تغییر باشد (Liao et al., 2020). هنگامی که بار بر روی حامل نزدیک به آستانه حمل باشد، می‌توان اقدامات نظارتی خاصی را برای تغییر بار یا افزایش حامل اتخاذ کرد، بنابراین می‌توان مشکلات احتمالی اضافه بار را کاهش داد.

ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک-بختگان)

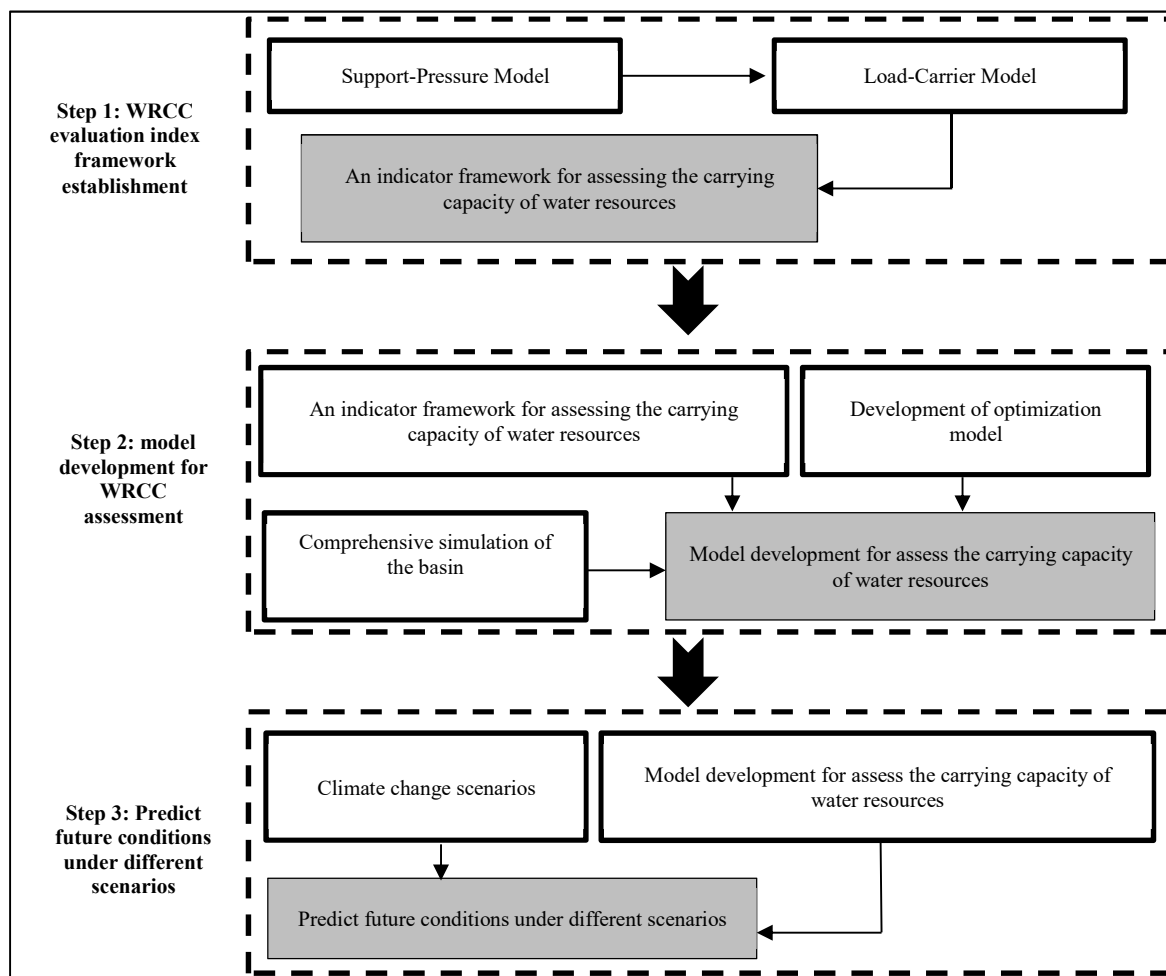


Figure 2. Research methodology

در مصرف آب را می‌توان جهت کاهش بار منابع آب منطقه‌ای و با انجام پروژه‌های انتقال آب می‌توان قابلیت حامل آب را افزایش داد، این نشان می‌دهد که تغییرات حامل‌ها و بارها و تعامل آن‌ها در یک سیستم می‌تواند ظرفیت برد سیستم را تغییر دهد (Liao et al., 2020). بنابراین ظرفیت برد منابع آب را می‌توان به‌عنوان رابطه‌ای بین بارها و حامل‌های محیط زیست در نظر گرفت که به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Zhu et al., 2020):

$$\rho (\text{carrying capacity index}) = \frac{\text{Load}}{\text{Carrier}} \quad (1)$$

در رابطه بالا، بار به اهداف (objects) مختلف مربوط به فعالیت‌های انسانی اشاره دارد؛ حامل، پشتیبان طبیعی یا

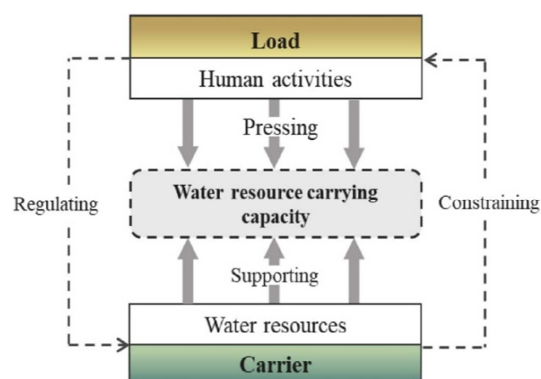


Figure 3. Carrier-load structure to evaluate the carrying capacity of water resources (Liao et al., 2020)

به‌عنوان مثال اقدامات بهینه‌سازی تخصیص و افزایش بهره‌وری استفاده از آب و بهبود فناوری‌های صرفه‌جویی

انسان‌ساز از بار است؛ p به معنی شاخص ظرفیت برد مربوط به حامل است. هرچه مقدار p کم‌تر باشد بیان‌گر عملکرد بهتر ظرفیت برد است، در این رابطه هم حامل‌ها و بارها و هم تعامل بین آن‌ها در ارزیابی ظرفیت برد در نظر گرفته می‌شود (Zhu et al., 2020).

براساس این چارچوب، توانایی پشتیبانی منابع آب (حامل) با کسر نیازهای زیست‌محیطی از حجم منابع آب تجدیدپذیر حوضه و بار برابر با نیازهای صنعت، شرب و کشاورزی قرار داده شد (Liao et al., 2020) (رابطه ۲).

مقدار ۱ در رابطه (۲) بیان‌گر برابری بار با حامل است و هر چقدر مقدار این رابطه از (۱) بیش‌تر شود نشانگر بارگذاری‌های اضافی بر منابع آبی حوضه خواهد بود.

$$p = \frac{\text{Industrial Demands} + \text{Drinking Demands} + \text{Agricultural Demands}}{\text{Renewable water} - \text{Environmental demands (Tashk-Bakhtegan Lake)}} \quad (2)$$

توسعه مدل جهت ارزیابی ظرفیت برد منابع آب

در روند توسعه مفهوم ظرفیت برد در ابتدا صرفاً متوجه مؤلفه‌های بیولوژیکی و بیوفیزیکی بود. اما با شکل‌گیری مفهوم توسعه پایدار اقتصادی و زیست‌محیطی؛ سه معیار اساسی یعنی "رفاه"، "بازده اقتصادی" و "محیط زیست سالم" را به‌عنوان ارکان اصلی توسعه پایدار در مفهوم ظرفیت برد در نظر گرفته شد (Song et al., 2011). در پژوهش حاضر، برای برآورد ظرفیت برد سیستم منابع آب براساس سه معیار بالا، از یک رویکرد «بهینه‌سازی-شبه‌سازی» سه هدفه مبتنی بر شاخص‌های عملکردی هر معیار استفاده شده است. بدین ترتیب، میزان ظرفیت برد حوضه و تغییرات آن به‌واسطه عوامل طبیعی (تغییرات اقلیمی) و انسانی (مانند تغییر کاربری اراضی و احداث سد) در دوره تاریخی براساس سه شاخص زیر برآورد می‌شود:

- درآمد اقتصادی منطقه به‌عنوان نشانگر «رفاه»،

- بهره‌وری آب برای «معیار بازده اقتصادی»
- شاخص‌های پایداری ردپای آب آبی برای «محیط زیست سالم» و مصارف پایدار.

بدین منظور با مدنظر قراردادن شاخص‌های فوق، بارگذاری بر حوضه به شکلی تنظیم می‌شود که حداکثر درآمد اقتصادی و بهره‌وری آب و در عین حال شاخص پایداری آب آبی محقق شود. چنین برنامه‌ریزی نیاز به یک رویکرد شبه‌سازی-بهینه‌سازی دارد که در این مطالعه با تلفیق مدل شبه‌سازی حوضه (SWAT-PARS) و یک الگوریتم بهینه‌سازی (GA) به انجام رسید.

رابطه به‌دست‌آمده در قسمت قبل (رابطه ۲) به‌عنوان محدودیت در مسأله موردبررسی در نظر گرفته شد و بارگذاری‌ها بر منابع آبی را از طریق کاهش سطح زیرکشت بخش کشاورزی به شکلی در نظر گرفته می‌شود که شاخص ظرفیت برد منابع آبی حوضه (p) حداکثر برابر یک شود. این مطالعه به‌منظور پراکنش مکانی مناسب در کاهش سطح زیر کشت در جهت برقراری عدالت اقتصادی در کاهش درآمد ناخالص بخش کشاورزی و هم‌چنین دستیابی به تعادل میان مصارف آبی و آب تجدیدپذیر حوضه، محدودیتی به‌صورت تابع جریمه مدنظر قرار گرفت. طبق این محدودیت، درآمد ناخالص محصولات کشاورزی در حوضه در شرایط اخیر و تغییر اقلیم نباید از ۳۰ درصد کاهش تجاوز نماید (معادله ۳). به‌منظور برآورد درآمد ناخالص نیز از داده‌های قیمت محصولات کشاورزی منتشرشده توسط سازمان جهاد کشاورزی استان فارس در سال ۱۳۹۳ استفاده شد.

$$I_i = \sum_{j=1}^{13} Area_{ij} * Yield_{ij} * Price_{ij} \quad (3)$$

که در رابطه (۳)، I_i بیان‌گر درآمد در منطقه i ، j شماره منطقه محصولات مورد کشت در منطقه (با در نظرگیری کشت غالب) می‌باشد.

ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهبه‌سازی (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک-بختگان)

استفاده شد. در این راستا الگوریتم ژنتیک در ترکیب با مدل شبیه‌سازی SWAT به‌کار برده شد (شکل ۴) در ادامه مراحل مدنظر در این مطالعه به‌ترتیب تشریح خواهند شد.

شبیه‌سازی جامع حوضه آبریز با استفاده از مدل SWAT
در این مطالعه به‌منظور تأمین اطلاعات موردنیاز در ارزیابی ظرفیت برد و تغییرات آن در دوره تاریخی و تغییر اقلیم از مدل SWAT استفاده شد. مدل SWAT، مدلی جامع برای شبیه‌سازی فرایندهای درون حوضه می‌باشد که در مرکز تحقیقات کشاورزی آمریکا توسعه داده شده است. این مدل به‌منظور شبیه‌سازی حوضه، ابتدا آن را به چند زیرحوضه تقسیم نموده و سپس هر زیرحوضه را بسته به میزان تنوع (از منظر شیب، خاک و نوع گیاه) به چند قسمت دیگر با نام واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم می‌نماید (Arnold et al., 1998). در این مطالعه شبیه‌سازی سیستم‌های منابع آب (جریان‌ات سطحی، تبخیر و تعرق و آب زیرزمینی) با استفاده از نسخه اصلاح‌شده مدل SWAT، تحت عنوان SWAT-PARS انجام گرفت (Delavar et al., 2020). از قابلیت‌های این مدل می‌توان به زیربرنامه اعمال تغییرات دینامیک کاربری اراضی اشاره کرد. در این مدل به‌منظور پیکره‌بندی حوضه از لایه DEM با اندازه سلولی ۳۰ متری ASTER استفاده شد و هم‌چنین به‌منظور تطابق بیشتر با شرایط واقعی حوضه، موقعیت رودخانه‌ها، ایستگاه‌های هیدرومتری، محدوده‌های مطالعاتی و سدها نیز در این امر موردتوجه قرار گرفت. از برهمه‌ی لایه‌های DEM، کاربری اراضی (تهیه‌شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع در سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۰۷ و ۲۰۱۵) و لایه خاک (تهیه‌شده توسط FAO)، واحدهای همگن هیدرولوژیکی استخراج شد و داده‌های هواشناسی، بهره‌برداری از سدها، مصارف، مدیریت زراعی و سایر پارامترهای موردنیاز در

بهره‌وری آب (WP_i) نیز به‌عنوان رکن دیگر در ارزیابی ظرفیت برد از تقسیم درآمد حاصل از رابطه (۳) بر آب در دسترس برای بخش کشاورزی تعیین می‌شود (رابطه ۴).

$$WP_i = \quad (4)$$

$$\frac{I_i}{\text{Renewable water-Environmental demands(Tashk-Bakhtegan Lake)}}$$

به‌منظور تحلیل وضعیت پایداری حوضه به‌عنوان شاخص سوم در تعیین ظرفیت برد از شاخص‌ها و «چارچوب پایداری ردپای آب» (Hoekstra et al., 2011) استفاده شده است. بدین منظور، برای بررسی پایداری حوضه از شاخص‌های کمبود آب آبی استفاده شد. در موارد لازم آب آبی با جزئیات بیشتر متشکل از مؤلفه‌های آب سطحی ($WS_{\text{Blue-Env}}$) و آب زیرزمینی (WS_{Black}) بررسی و ارائه شد. این شاخص‌ها نسبت آب مصرف شده از هر منبع (ردپای آب) به منابع آب تجدیدپذیر قابل مدیریت آن را نشان می‌دهد. مقادیر بیش‌تر از «یک» این شاخص‌ها بیانگر استفاده بیش از ظرفیت تجدیدپذیر و مبین ناپایداری بهره‌برداری از آن می‌باشد. مقادیر «کوچک‌تر از یک» نیز بیانگر شرایط پایدار بهره‌برداری از منبع آبی می‌باشد.

براساس آنچه در بالا بدان اشاره شد تابع هدف مسأله بهینه‌سازی بر مبنای حداکثرسازی درآمد، بهره‌وری و پایداری منابع آب می‌باشد که براساس رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Max } Z = WP + I + WS_{\text{Blue-Env}} + WS_{\text{Black}} \quad (5)$$

که در آن Z تابع هدف مسأله بهینه‌سازی، WP میانگین بهره‌وری آب در منطقه، I مجموع درآمد و $WS_{\text{Blue-Env}}$ و WS_{Black} به‌ترتیب شاخص کمبود آب زیرزمینی و نیاز زیست محیطی می‌باشد.

در این مطالعه به‌منظور ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در مقیاس حوضه آبریز از رویکرد شبیه‌سازی-بهبه‌سازی

1992). بهینه‌سازی در این الگوریتم با تولید جمعیت اولیه آغاز می‌شود و با تولید نسل‌های جدید از نسل اولیه تا زمان برقراری شرط توقف، ادامه می‌یابد. در این الگوریتم فرزندان جدید با استفاده از عملگرهای جهش و ترکیب ایجاد شده و با کمک روش‌های انتخاب، نسل جدید تولید می‌شود.

تعیین چشم‌انداز شرایط اقلیمی آینده

به‌منظور شبیه‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم در مدل SWAT، داده‌های ورودی مدل (بارندگی، دما و سطح دی‌اکسیدکربن) متناسب هر سناریو تغییر داده می‌شود. در این راستا با توجه به این‌که داده‌های ورودی مدل SWAT در مقیاس روزانه می‌باشد، نیاز است تا سری زمانی روزانه سناریوهای اقلیمی تولید شود. بدین منظور داده‌های اقلیمی تولیدشده از طریق مدل‌های گردش عمومی جو، ریز مقیاس‌شده و به‌صورت سری زمانی وارد مدل می‌شود. در حال حاضر معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه‌بعدی جفت شده اقیانوس-اتمسفر گردش عمومی جو (AOGCM) می‌باشد (Wilby & Harris, 2006). هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در گزارش پنجم ارزیابی خود از سناریوهای RCP به‌عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت‌های گوناگون گازهای گلخانه‌ای استفاده کرده است. مدل‌های اقلیمی از نتایج سناریوهای RCP به‌منظور نمایش غلظت و انتشار گازهای گلخانه‌ای، میزان آلودگی‌ها و تغییرات کاربری اراضی بهره می‌برند. سناریوهای RCP شامل چهار سناریوی مختلف ۲/۶، ۴/۵، ۶، ۸/۵ می‌باشد که براساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند. این سناریوها ویژگی‌های متفاوت از منظر سطح تکنولوژی، جمعیت، مصرف انرژی، وضعیت اجتماعی و اقتصادی سطوح متفاوت انتشار دی‌اکسیدکربن و غلظت اتمسفری

بخش‌های مختلف اعم از برف، آب زیرزمینی و مخزن وارد مدل شد.

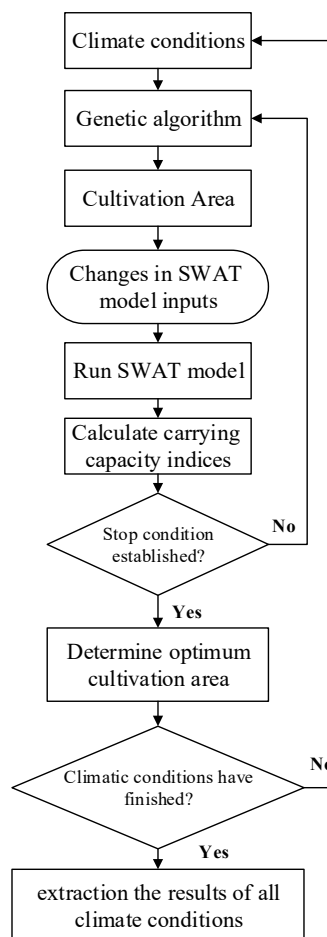


Figure 4. Modeling framework of this study

الگوریتم ژنتیک

این الگوریتم، یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌های فرا ابتکاری در مطالعات برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب می‌باشد. الگوریتم‌های فراابتکاری توانایی بالایی در حل مسائلی با فضای گسسته تصمیم‌گیری، غیرخطی بودن توابع هدف و محدودیت‌ها دارند (Nicklow *et al.*, 2010; Ketabchi & Ataie-Ashtiani, 2015). الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۷۵ توسط هالند ارائه شد که الهام گرفته از نظریه تکاملی داروین و علم ژنتیک می‌باشد (Holland,

تبیین (R^2)، نش ساتکلیف (NS) و ریشه میانگین مجذور خطاها (RMSE) استفاده شد. واسنجی مدل SWAT-PARS به صورت جامع و حتی‌الامکان با توجه به داده‌های مشاهداتی دبی ایستگاه‌های هیدرومتری، تراز آب زیرزمینی، دبی پایه، تبخیر و تعرق پتانسیل و واقعی و عملکرد محصولات در منطقه مطالعاتی انجام گرفت. با توجه به نحوه تنظیم مدل با نقشه‌های کاربری در دسترس و دوره دسترسی داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، دوره شبیه‌سازی مدل بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ در نظر گرفته شد. از این دوره، دو سال اول به عنوان گرم کردن مدل استفاده شد و واسنجی برای دوره ۲۲ ساله اول (۱۹۸۳ الی ۲۰۰۵) و ۹ سال انتهایی دوره (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴) نیز برای اعتبارسنجی عملکرد مدل مدنظر قرار گرفت. تحت واسنجی جریان انجام شده مقدار شاخص NS و R^2 در تمامی ایستگاه‌های آب‌سنجی بیش‌تر از ۰/۵ برآورد شد (شکل ۵) که مطابق با مطالعه *Moriyas et al.* (2007) مطلوب ارزیابی می‌شود. به‌طورکلی نتایج واسنجی جریان در شاخه رودخانه سیوند به دلیل وجود سازندهای سخت (کارستی) در منطقه پایین‌تر از سایر مناطق می‌باشد. هم‌چنین مقدار شاخص‌های R^2 و NS برای واسنجی مدل براساس تغییرات تراز آبخوان‌ها (شکل ۶) به ترتیب در ۸۳ و ۸۷ درصد آبخوان‌ها بالای ۵۰ درصد می‌باشد. نتایج به دست آمده، بیان‌گر عملکرد مطلوب مدل در شبیه‌سازی جریانات سطحی و زیرزمینی در حوضه موردبررسی می‌باشد.

از سال ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ را شرح می‌دهند (*Van Vuuren et al.*, 2011). تحت سناریوی RCP 8.5، آب‌وهوای کره زمین بدون اتخاذ سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم پیش خواهد رفت و بعد از سال ۲۱۰۰ نیز همین روند ادامه خواهد داشت. هم‌چنین تحت سناریوهای 2.6, 4.5, RCP 6 میزان افزایش تولید دی‌اکسیدکربن کاهش خواهد یافت.

در مطالعه حاضر، به منظور بهینه‌سازی پایداری منابع و مصارف آبی حوضه و هم‌چنین ارزیابی ظرفیت برد منطقه مورد مطالعه در شرایط تغییر اقلیم، از ۲۷ سناریوی تغییر اقلیم استفاده شد. این سناریوها از خروجی‌های متغیرهای اقلیمی (دما و بارش) سه مدل سری CMIP5 شامل CanESM2, GFDL-ESM2G و MPI-ESM-LR تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6, RCP4.5 و RCP8.5 به همراه سه روش ریزمقیاس‌نمایی XDS, SDSM و Knn حاصل شده‌اند (جدول ۲) (*Massah et al.*, 2016). در این پژوهش، نتایج خروجی‌های ماهانه دما و بارش در بازه زمانی (۲۰۴۹-۲۰۲۰) استخراج و به مدل SWAT-PARS معرفی شد.

نتایج

واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT-PARS

در مدل SWAT-PARS از روش SUFI-2 به منظور واسنجی و تحلیل عدم قطعیت استفاده شده است. در این راستا از نرم‌افزار SWAT-CUP و توابع آماری ضریب

Table 2. Climate change scenarios

Model CMIP5	Scenario	Exponential microscaling method	Model CMIP5	Scenario	Exponential microscaling method	Model CMIP5	Scenario	Exponential microscaling method
CanESM2	RCP2.6	SDSM	GFDL-ESM2G	RCP2.6	SDSM	MPI-ESM-LR	RCP2.6	SDSM
		XDS			XDS			XDS
		Knn			Knn			Knn
	RCP4.5	SDSM		RCP4.5	SDSM		RCP4.5	SDSM
		XDS			XDS			XDS
		Knn			Knn			Knn
	RCP8.5	SDSM		RCP8.5	SDSM		RCP8.5	SDSM
		XDS			XDS			XDS
		Knn			Knn			Knn

در سند ملی آب می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۶) مشاهده می‌شود به‌غیر از تبخیر و تعرق محصولات گوجه‌فرنگی و لوبیا که به‌طور متوسط مقادیر کم‌تری را نسبت به مقادیر گزارش‌شده ارائه می‌دهند، تبخیر و تعرق سایر محصولات در دامنه چارک اول و سوم مقادیر گزارش شده تغییر می‌کند. این در حالی است که برای تمامی محصولات، متوسط عملکرد شبیه‌سازی‌شده در دامنه چارک اول و سوم مقادیر مشاهداتی می‌باشد و نشانگر تطابق مناسب شبیه‌سازی این متغیر در سطح محدوده‌های مطالعاتی می‌باشد. شرح کامل نحوه و نتایج واسنجی مدل در مرجع (Delavar *et al.*, 2020) در دسترس می‌باشد.

مقادیر شاخص‌های NS و R^2 تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات منتخب در کل حوضه در جدول (۳) نشان داده شده است. شکل (۶) نیز نمودار جعبه‌ای مقادیر مشاهداتی عملکرد و تبخیر و تعرق گزارش شده از سند ملی آب و در مقایسه با متوسط مقادیر شبیه‌سازی‌شده در محدوده‌های مطالعاتی را نشان می‌دهد. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که تطابق قابل‌قبولی بین نتایج مدل و مقادیر گزارش شده وجود دارد. بررسی مقادیر متوسط شبیه‌سازی‌شده تبخیر تعرق محصولات حاکی از میزان تطابق شبیه‌سازی انجام‌شده در مقایسه با دامنه تغییرات حداکثر، حداقل و چارک اول و دوم مقادیر گزارش شده

Table 3. NS and R^2 index values of evapotranspiration and crop yield in the whole basin

Crop		Apple	Peach	Almond	olive	Wheat	barley	Canola	Sugar beet	tomato	potato
Evapotranspiration	R^2	0.98	0.83	-	0.79	0.5	0.41	0.95	0.92	0.89	0.94
	Ns	0.98	0.81	-	0.47	0.67	0.58	0.94	0.92	0.34	0.94
Yield	R^2	0.92	0.83	0.62	0.83	0.66	0.76	0.90	0.60	0.48	0.62
	Ns	0.92	0.80	0.52	0.35	0.27	0.68	0.89	0.61	0.51	0.47

Crop		Alfalfa	Beans	Rice	Sunflower	onion	Lentils	Dry barley	Dry Wheat	Dry figs	Almond dry
Evapotranspiration	R^2	0.93	0.58	0.92	0.84	0.93	-	-	-	-	-
	Ns	0.76	0.36	0.90	0.78	0.92	-	-	-	-	-
Yield	R^2	0.97	0.88	0.92	0.25	0.77	0.99	0.59	0.90	0.86	0.62
	Ns	0.93	0.86	0.91	0.63	0.53	0.47	0.48	0.63	0.84	0.52

Evapotranspiration rates are not reported in the National Water Document.

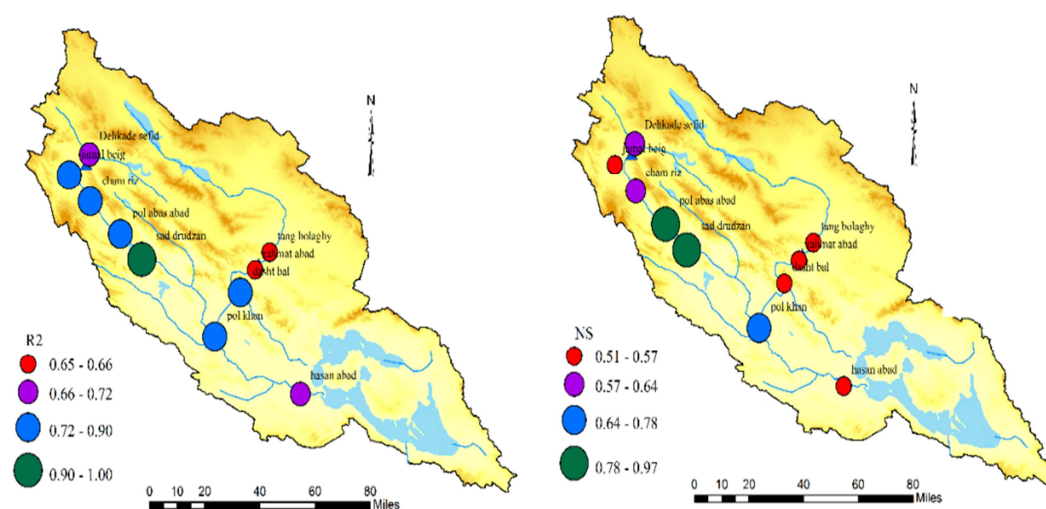


Figure 5. Results of flow calibration and validation at the hydrometric stations (Delavar *et al.*, 2020)

ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک-بختگان)

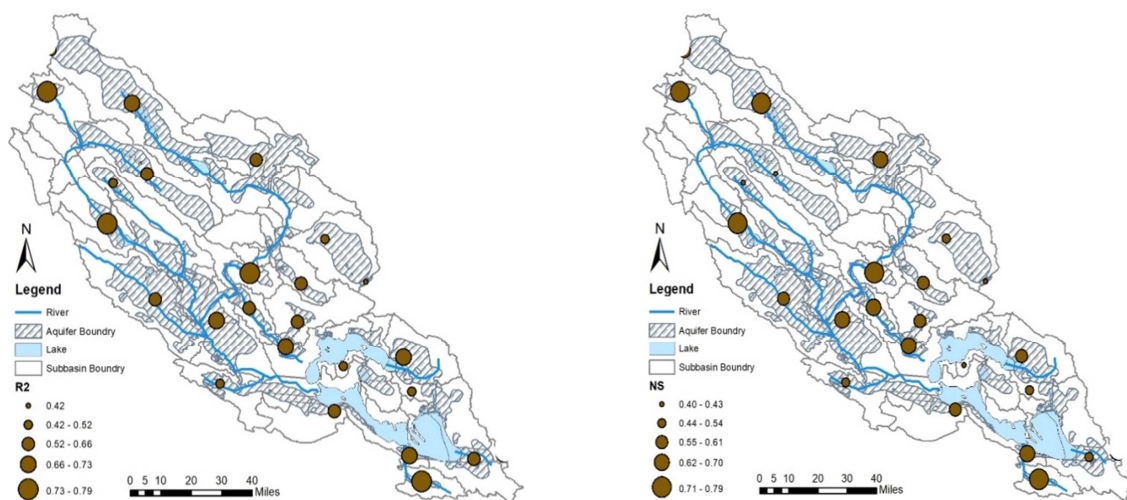


Figure 6. Results of ground water level calibration and validation (Delavar *et al.*, 2020)

میلیارد مترمکعب می‌باشد. از طرفی میزان تبخیر در دوره دوم نسبت به دوره اول ۳ درصد افزایش را نشان می‌دهد که با توجه به کاهش بارش در دوره دوم، می‌توان این افزایش را به افزایش دما و افزایش برداشت بخش کشاورزی (۱۸ درصد افزایش برداشت در دوره دوم نسبت به دوره اول) با توجه به افزایش سطح افتاده در دوره دوم در مقایسه با دوره اول نسبت داد. بررسی مؤلفه جریان ورودی به دریاچه بیان‌گر تأثیرپذیری جریان‌ات سطحی به نوسانات اقلیمی می‌باشد، به نحوی که جریان ورودی به دریاچه در دوره دوم نسبت به دوره اول به میزان ۱۴۳۸ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. همچنین مقدار این مؤلفه در کل دوره برابر با ۷۲۰ میلیون مترمکعب است. متوسط میزان کاهش ذخایر آب زیرزمینی در سطح حوضه برای کل دوره موردبررسی در حدود ۲۴۳ میلیون مترمکعب در سال بوده است. این منابع در دوره ۲۲ ساله اول، افت متوسط ۲۱۰ میلیون مترمکعبی را تجربه نموده، اما در دوره هفت ساله دوم و به دلیل افزایش برداشت و کاهش نسبی بارش، این افت به طور متوسط به ۳۶۷ میلیون مترمکعب در سال افزایش یافته است (شکل ۸).

ارزیابی شرایط تاریخی حوضه آبریز

مطابق با شکل (۷) بعد از سال ۲۰۰۶ تغییرات چشم‌گیری در جریان خروجی از حوضه و به دنبال آن تأمین حقابه دریاچه طشک بختگان ایجاد شده است. این در حالی است که علی‌رغم روند کاهشی بارش در دوره (۲۰۰۷-۲۰۱۷) نسبت به دوره (۱۹۸۵-۲۰۰۶) روند افزایشی تبخیر به چشم می‌خورد. بر این اساس بررسی وضعیت حوضه آبریز، مطابق با نتایج مطالعه Ghotbizadeh *et al.* (2018) در دو دوره (۱۹۸۵-۲۰۰۶) و (۲۰۰۷-۲۰۱۴) انجام گرفت.

در راستای ارزیابی شرایط تاریخی حوضه آبریز، برخی از مؤلفه‌های اصلی بیلان آب حوضه شامل بارش، تبخیر، جریان ورودی به دریاچه به همراه تغییر در ذخایر آب سطحی و زیرزمینی در دوره های زمانی مدنظر در شکل (۷) موردبررسی قرار گرفت. نتایج ارزیابی بیان‌گر مقادیر بارش در دوره اول، دوم و کل دوره به ترتیب برابر با ۱۱/۵۳، ۱۰/۱۹ و ۱۱/۴۱ میلیارد مترمکعب می‌باشد که نشان‌دهنده کاهش ۱۱ درصدی بارش در دوره دوم نسبت به دوره اول است. همچنین ارزیابی تبخیر-تعرق سالانه که بیش‌ترین مقدار خروج آب از حوضه را به خود اختصاص داده در کل دوره موردبررسی برابر با ۸/۹

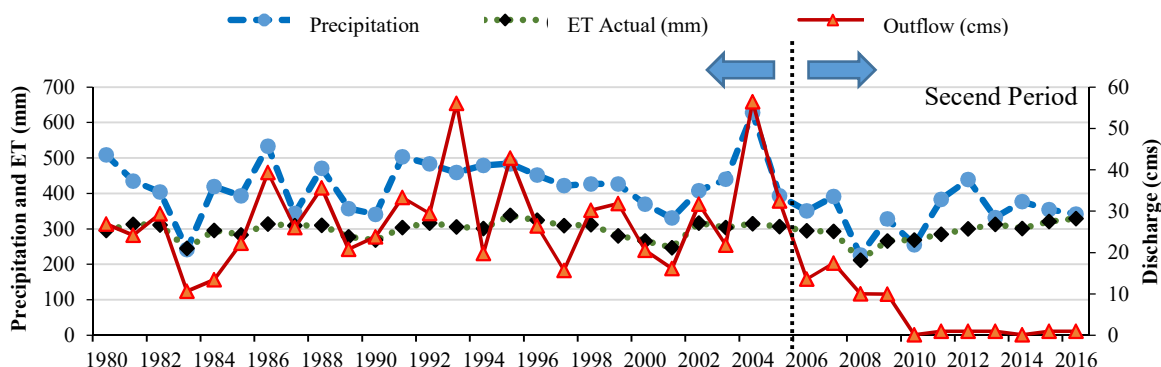


Figure 7. Changes in evaporation, precipitation, discharge, and classification the study period's to the 2 episodes

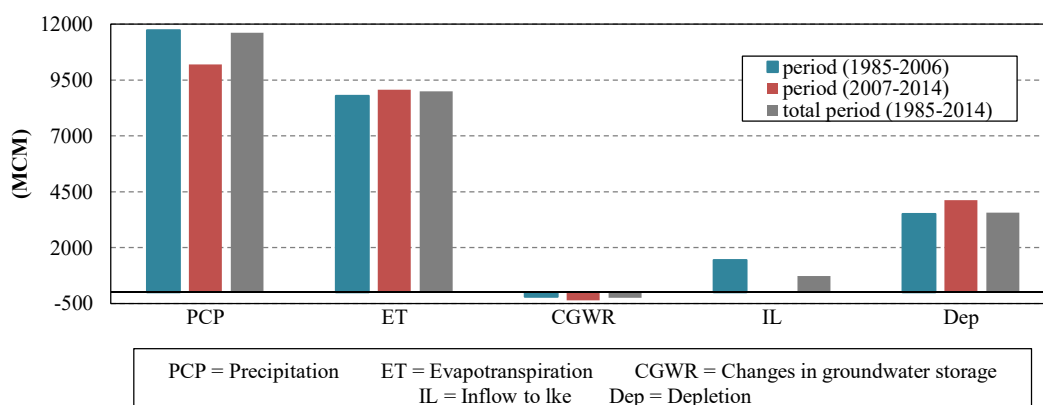


Figure 8. Main components of basin water balance during the study time periods (million cubic meters)

که نسبت به کل دوره پایه با وجود کاهش بارش در سناریوهای اقلیمی، به جز در RCP 2.6 افزایش یافته است. این امر را می‌توان به افزایش دما در سناریوهای RCP و در نتیجه آن افزایش برداشت (به‌طور میانگین افزایش ۱۴ درصدی برداشت) نسبت داد. همان‌طور که اشاره شد، جریان‌ات سطحی تحت تأثیر تغییرات مؤلفه‌های اقلیمی (دما و بارش) قرار دارند که این امر در تغییرات جریان ورودی به دریاچه تحت سناریوهای اقلیمی نیز به وضوح مشخص است. به‌نحوی که جریان ورودی به دریاچه تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب ۵۸/۴، ۶۲/۸ و ۷۲/۵ درصد کاهش می‌یابد. تغییرات ذخایر آب زیرزمینی نیز تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار داشته و با توجه به کاهش ۶ تا ۱۰ درصدی بارش و هم‌چنین افزایش

ارزیابی برخی از مؤلفه‌های بیلان آبی حوضه آبریز در شرایط تغییر اقلیم

در این قسمت تغییرات مؤلفه‌های بیلان ذکر شده در بخش قبل نسبت به کل دوره پایه در شرایط تغییر اقلیم مورد بررسی قرار می‌گیرد. همان‌طور که گفته شد، سری زمانی دما و بارش ریزمقیاس شده مبتنی بر سناریوهای اقلیمی RCP 2.6، 4.5، 8.5 در این مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مطابق با شکل (۹) بارش حوضه در تمامی سناریوهای اقلیمی ذکر شده نسبت به کل دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) کاهش می‌یابد. بیش‌ترین مقدار کاهش در بارش نیز تحت سناریو RCP 2.6 و به مقدار ۹ درصد نسبت به کل دوره پایه اتفاق افتاده است. از طرفی میزان تبخیر-تعرق در سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 به ترتیب برابر با ۸/۸، ۹/۱ و ۹/۱۲ می‌باشد

ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک-بختگان)

تا سال ۱۹۸۸ از میزان حامل یعنی ۲/۶ میلیارد مترمکعب مقدار کم‌تری داشته است پس بنابراین ظرفیت برد منابع آب حوضه در شرایط پایداری ($0.19 < 1$) قرار دارد. اما هم‌زمان با توسعه اراضی زیرکشت و عبور از آستانه ۳۴۰ هزار هکتار، بارگذاری بیش از توان حوضه شده و نقطه آغاز تخریب حوضه رقم می‌خورد. به عبارت دیگر، بارگذاری بر منابع آب بیش از توانایی پشتیبانی آن (حامل) می‌شود. از طرف دیگر در دوره (۲۰۰۶-۱۹۸۵)، از سال ۱۹۹۸ تا انتهای دوره توسعه اراضی کشاورزی ادامه می‌یابد و سطح زیر کشت حوضه به ۴۳۰ هزار هکتار می‌رسد که نشان‌دهنده تشدید بارگذاری‌ها بر حوضه است. به نحوی که مصارف از آب آبی به میزان حدود ۹۳۰ میلیون مترمکعب افزایش یافته و از ۲/۱ به میزان ۳/۰۳ میلیارد مترمکعب می‌رسد. اما نقطه قابل توجه بعد از سال ۲۰۰۶ است که توانایی پشتیبانی منابع آب (حامل) هم کاهش می‌یابد و به ۲/۳ میلیارد مترمکعب می‌رسد. بارگذاری بر منابع آب (بار) نیز بدلیل کاهش منابع تجدیدپذیر (تقلیل از ۳/۴ به ۲/۹ میلیارد مترمکعب) به ناچار کاهش یافته است (به‌طور عمده در قالب کم‌آیاری)، ولی همچنان اختلاف فاحشی بین حامل و بار وجود دارد. تخریب کامل دریاچه‌های حوضه از تبعات این بهره‌برداری بوده است. در شرایط تغییر اقلیم منابع آب تجدیدپذیر نسبت به شرایط اخیر حوضه با افت نسبی مواجه می‌شود (تقلیل از ۲/۹۴ به ۲/۸۱ میلیارد مترمکعب) و به دنبال آن توانایی پشتیبانی منابع آب (حامل) در بهترین شرایط تحت سناریوی RCP 2.6 از ۲/۳ میلیارد مترمکعب در شرایط حال به ۲/۱ میلیارد مترمکعب کاهش می‌یابد. با توجه به موارد گفته شده، عملاً تأمین نیاز آبی سطح زیر کشت فعلی و الگوی مدیریت حوضه در شرایط فعلی و تحت تأثیر تغییر اقلیم با ناپایداری شدید و افزایش روند تخریب سیستم اکولوژیکی و اجتماعی حوضه مواجه خواهد شد و تغییر در مدیریت حوضه را ضروری می‌سازد.

نسبی دما، منجر به کاهش ذخایر آب زیرزمینی بین ۴ تا ۱۲ درصد شده است.

تحلیل حساسیت مدل بهینه‌سازی

یکی از مهم‌ترین مسائل در حل مسأله‌ی بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی تحلیل حساسیت پارامترهای الگوریتم و تعیین مقدار مناسب آن‌هاست. در الگوریتم GA به‌عنوان الگوریتم منتخب این مطالعه، تعیین پارامترهایی نظیر نوع تابع جهش و ترکیب به‌منظور تولید نسل جدید، اندازه‌ی جمعیت و همچنین حداکثر تعداد تولید نسل به‌عنوان شرط خاتمه بهینه‌سازی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل از آنالیز حساسیت، تابع جهش Adaptive feasible به‌همراه تابع ترکیب Scattered با نرخ ترکیب ۰/۸ مناسب تشخیص داده شد (جدول ۴).

Table 4. Genetic algorithm parameters

Crossover fraction	Crossover function	Mutation function	Population Size
0.8	Scattered	Adaptive feasible	50

ارزیابی ظرفیت برد حوضه

در این پژوهش ظرفیت برد منابع آب از منظر حامل-بار و با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی در حوضه آبریز طشک-بختگان مورد ارزیابی قرار گرفت. براساس نتایج حاصل از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی انجام شده، تغییرات ظرفیت برد و مصارف آبی حوضه در شرایط تاریخی و تغییر اقلیم در شکل (۱۰) آورده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است توانایی پشتیبانی منابع آب (حامل) به‌دلیل کاهش منابع آب تجدیدپذیر از ۳/۴ میلیارد مترمکعب در دوره اول (۲۰۰۶-۱۹۸۵) به ۲/۹ میلیارد مترمکعب در دوره دوم (۲۰۱۴-۲۰۰۷) و ۲/۸۱ میلیارد مترمکعب در شرایط تغییر اقلیم (۲۰۴۰-۲۰۱۵)، کاهش یافته است. میزان بارگذاری بر منابع آب (بار)

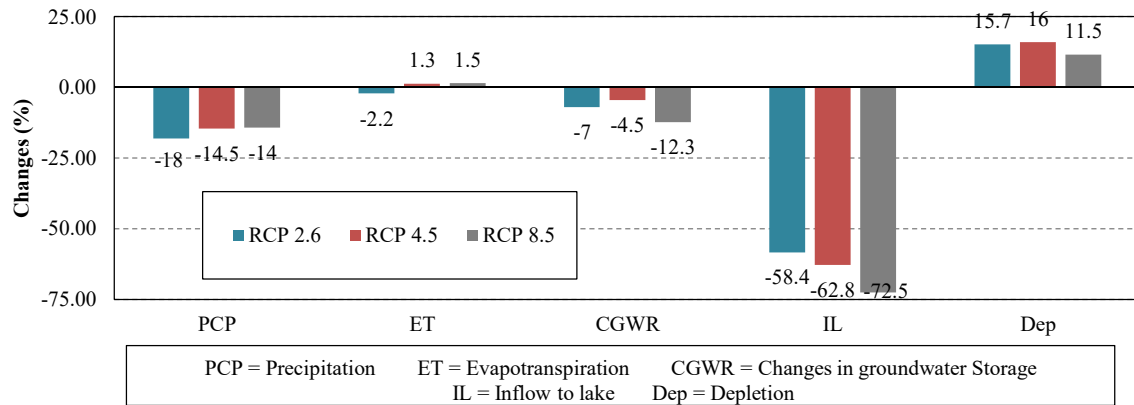


Figure 9. Changes in Basin water balance main components at the climate change conditions compared with base period (million cubic meters)

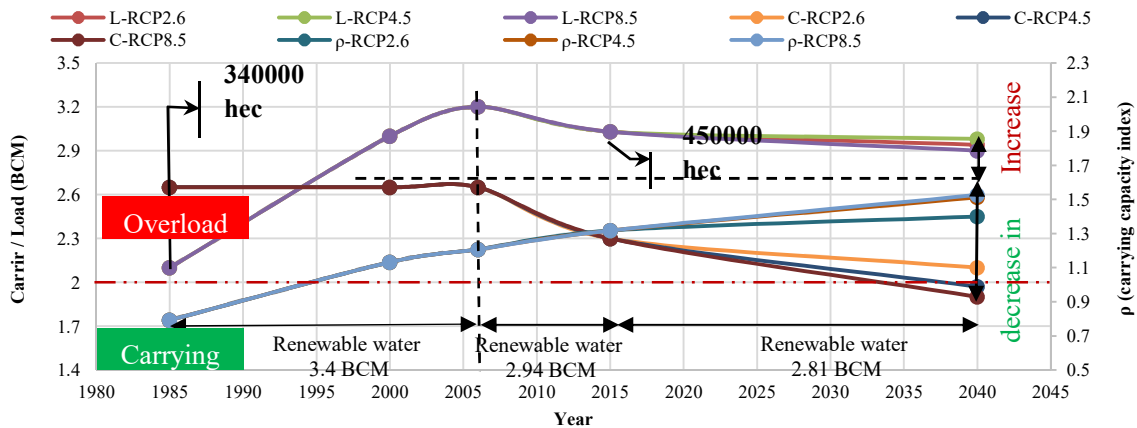


Figure 10. Changes in carrier (C), load (L) and carrying capacity (p) of basin water resources

دما، کاهش بارندگی و سطح زیر کشت ثابت منجر به کاهش درآمد ناخالص شده است. از طرفی کمترین و بیشترین مقدار درآمد ناخالص به ترتیب تحت سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 اتفاق افتاده است که متناسب با میزان مصرف آب تحت این سناریوها ارایه شده در شکل (۱۱) می باشد. مطابق با شکل (۱۱) میزان درآمد ناخالص در تمام دوره های مورد بررسی بیش از ظرفیت درآمدی حوضه بر طبق ظرفیت برد می باشد. کمترین کاهش در درآمد مربوط به دوره (۱۹۸۵-۲۰۰۶) و به میزان ۸/۶ درصد و بیشترین کاهش نیز مرتبط با RCP 8.5 و به مقدار ۴۴/۴۴ درصد می باشد.

تجدیدنظر در مدیریت فعلی حوضه و به دنبال آن کاهش مصرف منابع آب و کاهش سطح زیر کشت منجر به کاهش درآمد بخش کشاورزی خواهد شد. در این راستا نیاز است تا ارزیابی از تغییرات درآمد ناخالص تولیدی در بخش کشاورزی به عمل آید. در شکل (۱۱) تغییرات درآمد ناخالص بخش کشاورزی در دوره های مورد بررسی و شرایط تغییر اقلیم آورده شده است. درآمد ناخالص بخش کشاورزی در دوره (۲۰۰۷-۲۰۱۴) نسبت به دوره (۱۹۸۵-۲۰۰۶) با توجه به بالاتر بودن سطح زیرکشت، مقدار بیشتری را نشان می دهد. همچنین تحت سناریوهای RCP نسبت به دوره (۲۰۰۷-۲۰۱۴) افزایش

ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در شرایط تغییر اقلیم با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک-بختگان)

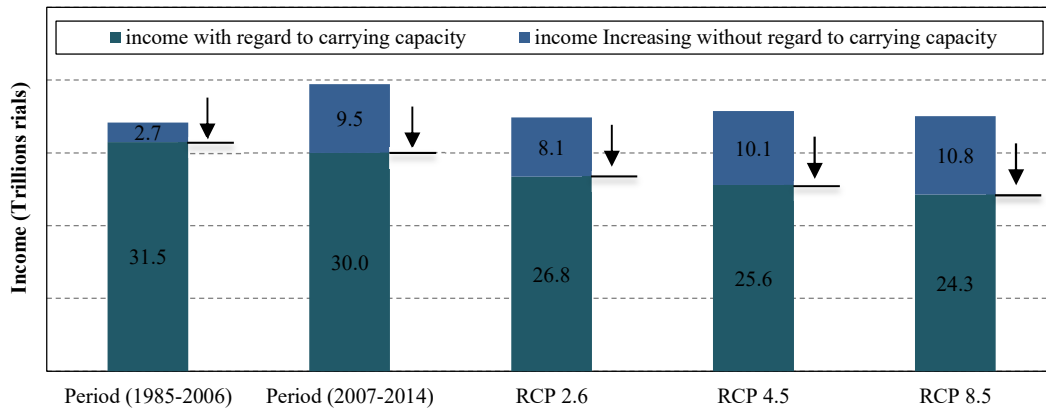


Figure 11. Gross income changes in the agricultural sector considering deferent scenarios, study periods, and carrying capacity

RCP4.5 و RCP8.5 و سه روش ریز مقیاس‌نمایی به مدل SWAT در دوره (۲۰۱۵-۲۰۴۵) به مدل SWAT-PARS معرفی گردید. مؤلفه‌های اصلی بیان آبی حوضه با استناد به نتایج شبیه‌سازی حوضه در دو دوره (۲۰۰۶-۱۹۸۵) و (۲۰۱۴-۲۰۰۷) موردبررسی قرار گرفت. نتایج بیان‌گر افزایش بارگذاری‌ها در دوره دوم نسبت به دوره اول با توجه به افزایش سطح زیر کشت اتفاق افتاده می‌باشد. هم‌چنین کاهش منابع آب تجدیدپذیر در دوره دوم نسبت به دوره اول و عدم اصلاح الگوی مدیریتی حوضه منجر به تشدید این بارگذاری شده است. این عوامل باعث شده است که شاخص ظرفیت برد منابع آب (ρ) از مقدار ۰/۸۹ در دوره اول به مقدار ۱/۲۸ در دوره دوم افزایش یابد که بیان‌گر بارگذاری بیش از ظرفیت منابع آب در دوره دوم می‌باشد و موجب به تخریب کامل دریاچه‌های حوضه شده است. نتایج ارزیابی‌ها در شرایط تغییر اقلیم بیان‌گر کاهش بارش و افزایش دما تحت سناریوهای اقلیمی موردبررسی نسبت به شرایط پایه می‌باشد که منجر به کاهش منابع آب تجدیدپذیر می‌شود. در بدبینانه‌ترین سناریوی تغییر اقلیم، توانایی پشتیبانی منابع آب (حامل) به ۱/۹ میلیارد مترمکعب و در سناریوی خوش‌بینانه به ۲/۱ میلیارد مترمکعب می‌رسد که در مقایسه با شرایط

نتیجه‌گیری

الگوها و سیاست‌های نامناسب بهره‌برداری از منابع آب در کنار نوسانات اقلیمی و تغییر اقلیم فشار فزاینده‌ای را بر منابع آب وارد کرده است. از آنجاکه مفهوم ظرفیت برد منابع آب به‌دنبال یافتن مناسب‌ترین توسعه و استفاده از منابع آب در کنار توجه به آستانه‌ها و محدودیت‌های محیط‌زیست است، می‌تواند برای قضاوت در مورد پایداری سیستم منابع آب و هم‌چنین برنامه‌ریزی مدیریت پایدار آن مورد استفاده قرار گیرد. این مطالعه با هدف ارزیابی ظرفیت برد منابع آب در دوره پایه و در شرایط تغییر اقلیم از منظر حامل- بار انجام شد. در این راستا حوضه آبریز طشک-بختگان به‌عنوان حوضه پایلوت و مدل SWAT-PARS در جهت شبیه‌سازی جامع حوضه مدنظر قرار گرفت. از طرفی الگوریتم ژنتیک نیز به‌منظور بهینه‌سازی پایداری حوضه آبریز با توجه به ملاحظات زیست‌محیطی، اقتصادی و منابع آبی به‌کار برده شد. در جهت ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر ظرفیت برد حوضه آبریز طشک-بختگان، سری‌های زمانی ریزمقیاس‌شده متغیرهای اقلیمی (دما و بارش) حاصل از ترکیب سه مدل AOGCM سری CMIP5 شامل CanESM2، GFDL-ESM2G و MPI-ESM-LR تحت سناریوهای RCP2.6،

منابع

1. Aguilar, P., Mendoza, E., & Silva, R. (2021). Interaction between Tourism Carrying Capacity and Coastal Squeeze in Mazatlan, Mexico. *Land*, 10(9), 900.
2. Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
3. Bao, H., Wang, C., Han, L., Wu, S., Lou, L., Xu, B., & Liu, Y. (2020). Resources and environmental pressure, carrying capacity, and governance: A case study of Yangtze river economic belt. *Sustainability*, 12(4), 1576.
4. Cao, X., Shi, Y., Zhou, L., Tao, T., & Yang, Q. (2021). Analysis of Factors Influencing the Urban Carrying Capacity of the Shanghai Metropolis Based on a Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) Model. *Land*, 10(6), 578.
5. Chi, M., Zhang, D., Fan, G., Zhang, W., & Liu, H. (2019). Prediction of water resource carrying capacity by the analytic hierarchy process-fuzzy discrimination method in a mining area. *Ecological Indicators*, 96, 647-655.
6. Del Monte-Luna, P., Brook, B. W., Zetina-Rejón, M. J., & Cruz-Escalona, V. H. (2004). The carrying capacity of ecosystems. *Global ecology and biogeography*, 13(6), 485-495.
7. Delavar, M., Morid, S., Morid, R., Farokhnia, A., Babaeian, F., Srinivasan, R., & Karimi, P. (2020). Basin-wide water accounting based on modified SWAT model and WA+ framework for better policy making. *Journal of Hydrology*, 585, 124762.
8. Dou, M., Ma, J. X., Li, G. Q., & Zuo, Q. T. (2015). Measurement and assessment of water resources carrying capacity in Henan Province, China. *Water Science and Engineering*, 8(2), 102-113.
9. Feng, L. H., & Huang, C. F. (2008). A risk assessment model of water shortage based on information diffusion technology and its application in analyzing carrying capacity of water resources. *Water resources management*, 22(5), 621.
10. Ghotbizadeh, M., Bagheri, A., & Abbasi, E. (2018). Assessment of local organizations' institutional adaptive capacity to water scarcity in Tashk-Bakhtegan Basin. *Iran-Water Resources Research*, 14(4), 25-31.
11. Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Mekonnen, M. M., & Aldaya, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Routledge.

فعلی حوضه به ترتیب ۰/۴ و ۰/۲ میلیارد مترمکعب کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده حاکی از این است که اگر تغییراتی در مدیریت فعلی حوضه در جهت کاهش مصارف آبی صورت نپذیرد، تشدید تخریب منابع آب و محیط زیست حوضه دور از انتظار نخواهد بود. در راستای مصرف متناسب با ظرفیت برد تحت بدبینانه ترین (RCP 8.5) و خوش بینانه ترین (RCP 2.6) سناریو در شرایط تغییر اقلیم با مدیریت فعلی حوضه نیاز به کاهش درآمد ناخالص بخش کشاورزی به ترتیب با مقادیر ۴۴/۴۴ و ۳۰ درصد می‌باشد. باتوجه به موارد فوق، عملاً تأمین نیاز آبی سطح زیر کشت فعلی و الگوی مدیریت حوضه در شرایط فعلی و تحت تأثیر تغییر اقلیم با ناپایداری شدید و افزایش روند تخریب سیستم اکولوژیکی و اجتماعی حوضه مواجه خواهد شد و تغییر در مدیریت حوضه در جهت کاهش مصارف واقعی آب به واسطه اقداماتی نظیر کاهش سطح کشت، اصلاح الگوی مصرف و کاهش تلفات آبی ضروری می‌سازد. لذا تلاش در حصول به بیشترین بهره‌برداری از منابع اکولوژیکی (از جمله منابع آب) باید با توجه به ظرفیت برد آن در کشور دنبال شود. ظرفیتی که تحت تأثیر تغییر اقلیم کم‌تر می‌شود و سیاست‌ها باید به سمت کاستن از این بارگذاری باشد.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر بخشی از نتایج طرح پژوهشی "تدوین راهبردها و برنامه ملی سازگاری با تغییر اقلیم در بخش آب" به شماره قرارداد ۹۴/۱۰۹۳۷/۷۰۰ با مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو بوده است، که بدین وسیله از مؤسسه تحقیقات آب وزارت نیرو و دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفا وزارت نیرو، تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

12. Holland, J. H. (1992). Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press.
13. Hou, G. Y., & Tang, D. S. (2014). Fuzzy comprehensive evaluation of water resources carrying capacity based on vague method. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 501, 2040-2044). Trans Tech Publications Ltd.
14. Kang, J., Zi, X., Wang, S., & He, L. (2019). Evaluation and optimization of agricultural water resources carrying capacity in Haihe river basin, China. *Water*, 11(5), 999.
15. Ketabchi, H., & Ataie-Ashtiani, B. (2015). Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: a comparative study toward future challenges. *Journal of Hydrology*, 520, 193-213.
16. Li, K., Jin, X., Ma, D., & Jiang, P. (2019). Evaluation of resource and environmental carrying capacity of China's rapid-urbanization areas-a case study of Xinbei district, Changzhou. *Land*, 8(4), 69.
17. Liao, X., Ren, Y., Shen, L., Shu, T., He, H., & Wang, J. (2020). A "carrier-load" perspective method for investigating regional water resource carrying capacity. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122043.
18. Luo, X., Wang, G., Mou, Y., Liu, R., Zhou, H., Si, H., & Chen, Q. (2017). The Analysis of the Water Resource Carrying Capacity in the Shale and Gas Exploration Area, Southwest China Karst Region-A Case Study from Cengcong County. *The Open Civil Engineering Journal*, 11(1), 1-12.
19. Ma, P., Ye, G., Peng, X., Liu, J., Qi, J., & Jia, S. (2017). Development of an index system for evaluation of ecological carrying capacity of marine ecosystems. *Ocean & Coastal Management*, 144, 23-30.
20. Massah, A., Morid, M., & Delavar, M. (2016). *Assessment of climate change impacts on hydrological condition of Tashk-Bakhtegan Basin*. Technical Report, Ministry of Rnergy, Iran (in Persian).
21. Mohammadi sedaran, H., Delavar, M., & Shahbazbegian, M. R. (2021). Assessment of Water Resources Carrying Capacity of the River Basins Using the Simulation Approach and Index-Based Evaluation Method; Case Study: Zarrineh-Roud Basin. *Iran-Water Resources Research*, 17(2), 154-173.
22. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
23. Nicklow, J., Reed, P., Savic, D., Dessalegne, T., Harrell, L., Chan-Hilton, A., ... & ASCE Task Committee on Evolutionary Computation in Environmental and Water Resources Engineering. (2010). State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(4), 412-432.
24. Nogueira, M. (2019). The sensitivity of the atmospheric branch of the global water cycle to temperature fluctuations at synoptic to decadal time-scales in different satellite-and model-based products. *Climate Dynamics*, 52(1), 617-636.
25. Pellicer-Martínez, F., & Martínez-Paz, J. M. (2016). The Water Footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level. *Science of the Total Environment*, 571, 561-574.
26. Pellicer-Martínez, F., & Martínez-Paz, J. M. (2018). Probabilistic evaluation of the water footprint of a river basin: Accounting method and case study in the Segura River Basin, Spain. *Science of the Total Environment*, 627, 28-38.
27. Ren, C., Guo, P., Li, M., & Li, R. (2016). An innovative method for water resources carrying capacity research-metabolic theory of regional water resources. *Journal of environmental management*, 167, 139-146.
28. Song, X.M., Kong, F.Z., & Zhan, C.S. (2011). Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin city of China. *Water Resources Management*, 25(3), 857-873.
29. Sun, B., & Yang, X. (2019). Simulation of Water Resources Carrying Capacity in Xiong'an New Area Based on System Dynamics Model. *Water*, 11(5), 1085.
30. Tukimat, N.N.A., & Harun, S. (2019). Comparative study on the reservoir operation planning with the climate change adaptation. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1-11.
31. Van Vuuren, D. P., Stehfest, E., den Elzen, M. G., Kram, T., van Vliet, J., Deetman, S., ... & van Ruijven, B. (2011). RCP2. 6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 C. *Climatic change*, 109(1), 95-116.
32. Wang, C., Hou, Y., & Xue, Y. (2017). Water resources carrying capacity of wetlands in Beijing: Analysis of policy optimization for urban wetland water resources management. *Journal of Cleaner Production*, 161, 1180-1191.

33. Wang, J., Ren, Y., Shen, L., Liu, Z., Wu, Y., & Shi, F. (2020). A novel evaluation method for urban infrastructures carrying capacity. *Cities*, 105, 102846.
34. Wang, Z. (2018). Land spatial development based on carrying capacity, land development potential, and efficiency of urban agglomerations in China. *Sustainability*, 10(12), 4701.
35. Wilby, R. L., & Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water resources research*, 42(2), 1-12.
36. Wu, F., Zhuang, Z., Liu, H. L., & Shiao, Y. C. (2021). Evaluation of Water Resources Carrying Capacity Using Principal Component Analysis: An Empirical Study in Huai'an, Jiangsu, China. *Water*, 13(18), 2587.
37. Wu, X., & Hu, F. (2020). Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method. *Ecological Indicators*, 113, 106243.
38. Yang, J., Lei, K., Khu, S., & Meng, W. (2015). Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: a case study of Tieling City, China. *Water Resources Management*, 29(3), 885-899.
39. Yang, S., & Yang, T. (2021). Exploration of the dynamic water resource carrying capacity of the Keriya River Basin on the southern margin of the Taklimakan Desert, China. *Regional Sustainability*, 2(1), 73-82.
40. Yang, X. H., Sun, B. Y., Zhang, J., Li, M. S., He, J., Wei, Y. M., & Li, Y. Q. (2016). Hierarchy evaluation of water resources vulnerability under climate change in Beijing, China. *Natural Hazards*, 84(1), 63-76.
41. Yu, X., Xie, J., Jiang, R., Zuo, G., & Liang, J. (2020). Assessment of water resource carrying capacity based on the chicken swarm optimization-projection pursuit model. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(1), 1-14.
42. Zhao, Y., Wang, Y., & Wang, Y. (2021). Comprehensive evaluation and influencing factors of urban agglomeration water resources carrying capacity. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125097.
43. Zhou, W., Elshkaki, A., Zhong, S., & Shen, L. (2021). Study on Relative Carrying Capacity of Land Resources and Its Zoning in 31 Provinces of China. *Sustainability*, 13(3), 1459.
44. Zhu, M., Shen, L., Tam, V. W., Liu, Z., Shu, T., & Luo, W. (2020). A load-carrier perspective examination on the change of ecological environment carrying capacity during urbanization process in China. *Science of the Total Environment*, 714, 136843.
45. Zou, H., & Ma, X. (2021). Identifying resource and environmental carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt, China: the perspectives of spatial differences and sustainable development. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 14775-14798.