



Investigating the Impact of Climate Change on Qanat Discharge (A Case Study of Qanats in Birjand County)

Zahra Akhondi¹ | Amir Khayat² Mostafa Yaghoubzadeh³

1. MSc graduate in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Zabol, Zabol, Iran.
2. PhD student of Irrigation and Drainage, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran.

✉Corresponding Author: Zahra.akhondi523@gmail.com

Received:
05 January 2025

Accepted:
01 February 2025

Published:
19 March 2025

Keywords:

*Qanats,
Water Resources
Management,
Fuzzy Neural Network,
Birjand City,
Climate Change.*

Extended abstract

Introduction

Population growth and increased human activities have led to a reduction in water resources and an intensification of climate change. These changes, particularly in arid and semi-arid regions, have resulted in decreased rainfall and increased temperatures, severely impacting groundwater resources and qanats. Qanats, as ancient irrigation systems and cultural heritage in South Khorasan province, play a vital role in providing water, supporting the economy, and sustaining local communities. However, climate change and human factors such as poor water resource management have led to a decline in qanat discharge. The objective of this research is to thoroughly examine the impact of climate change on qanat discharge in Birjand County and to propose management strategies for the protection and sustainability of these resources.

Materials and Methods

This research was conducted in the Birjand watershed, covering an area of 3155 square kilometers.

Cite this article: Akhondi, Z., Khayat, A. & Yaghoubzadeh, M. (2025). An overview of integrated flood management in Iran: current status and challenges. *Journal of Aquifer and Qanat Title*, 5 (2), 1-18. DOI: <http://doi.org/10.22077/jaaq.2025.8705.1091>.



Copyright: © 2025 by the authors. Licensee Journal of Aquifer and Qanat. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Daily temperature and precipitation data from the Birjand synoptic station were collected and analyzed for the period 1961 to 2005. To predict future climate changes, the SDSM model and climate scenarios were used. Additionally, the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) was used to model and predict qanat discharge. Input data for the ANFIS model included 80% for model calibration and 20% for model validation. Evapotranspiration was also calculated using the Thornthwaite method. The performance of the model was evaluated using statistical indicators such as the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and Nash-Sutcliffe efficiency (NS).

Results and Discussion

The results of downscaling temperature and precipitation using the SDSM model indicated that temperatures in the study area will increase and precipitation will decrease. The evaluation of the ANFIS model showed that it is capable of accurately predicting qanat discharge. Predictions of future qanat discharge indicated that climate change will lead to a reduction in qanat discharge.

Conclusion

Climate change has a negative impact on qanat discharge in Birjand County. Given the importance of qanats in providing water and supporting the region's economy, it is necessary to adopt appropriate management strategies to protect and sustain these resources. It is recommended that water resource policies and planning in the region take into account the effects of climate change, based on the findings of this research. The use of accurate prediction models such as ANFIS can help water resource managers make better decisions regarding water resource management.



بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر روی دبی قنات‌ها (مطالعه موردی قنات‌های شهرستان بیرجند)

زهرآ آخوندی^۱ | امیر خیاط^۲ | مصطفی یعقوب‌زاده^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل، زابل، ایران.
۲. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.
۳. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

✉ نویسنده مسئول: Zahra.akhondi523@gmail.com

چکیده

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی عصر حاضر، تأثیرات عمیقی بر منابع آب به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک از جمله شهرستان بیرجند در استان خراسان جنوبی دارد. باتوجه‌به اینکه قنات‌ها به‌عنوان شاهکار مهندسی آب ایرانیان باستان نقش حیاتی در استان کویری خراسان جنوبی داشته و یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب کشاورزی و شرب شناخته می‌شوند؛ بررسی و تحلیل اثرات تغییر اقلیم در دبی قنات‌ها در دوره‌های آتی از اهمیت بالایی برخوردار است. در این پژوهش برای بررسی اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر دبی قنات‌ها، مطالعه موردی بر روی دبی قنات‌های شهرستان بیرجند واقع در استان خراسان جنوبی صورت گرفته است. در راستای این هدف به‌منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم، ۲۶ پارامتر خروجی مدل گردش عمومی جو کانادا (CanESM2 AR5) تحت سناریوی انتشار RCP4.5 به‌عنوان پیش‌بینی‌کننده استفاده شده است. همچنین به‌منظور ریزمقیاس نمائی داده‌های اقلیمی روزانه جهت تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای از مدل SDSM استفاده گردید. برای بررسی تغییرات و پیش‌بینی دبی قنات‌ها از شبکه عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) بهره گرفته شد. نتایج پژوهش حاکی از سیر نزولی و افت دبی قنات‌ها طی سال‌های آینده تا سال ۲۰۵۰ می‌باشد. این کاهش دبی می‌تواند پیامدهای جدی نظیر کاهش تولیدات کشاورزی، تأثیر منفی بر اقتصاد محلی، تخریب اکوسیستم‌های وابسته به قنات و افزایش تنش‌های آبی که ممکن است منجر به مهاجرت روستاییان به شهرها شود، به‌دنبال داشته باشد. به‌منظور مقابله با این چالش‌ها و کاهش آثار منفی ناشی از کاهش دبی قنات‌ها، ضروری است که برنامه‌های جامع مدیریت منابع آب تدوین شود که به تغییرات اقلیمی توجه داشته و بهره‌وری مصرف آب در بخش‌های مختلف را افزایش دهد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

کلیدواژه‌ها:

قنات،

مدیریت منابع آب،

شبکه عصبی فازی،

شهرستان بیرجند،

تغییر اقلیم.

مقدمه

رشد جمعیت و افزایش سریع فعالیت‌های انسانی از جمله رشد شهرنشینی، رشد صنایع و دیگر فعالیت‌های زراعی و اقتصادی به‌خصوص در کشورهای توسعه‌نیافته و در حال توسعه، منجر به کاهش منابع آب و دیگر منابع زمین گردیده است. رشد و توسعه‌های انجام‌گرفته با افزایش گازهای گلخانه‌ای سبب وقوع تغییر اقلیم شده است. تغییرات اقلیمی، که عمدتاً ناشی از افزایش دی‌اکسید کربن در جو است، منجر به تغییراتی در توزیع زمانی و مکانی بارش و همچنین شدت تغییرات در چرخه هیدرولوژی شده است (Hamzeh et al., 2018). منابع آب زیرزمینی و قنات‌ها بخش عمده‌ای از مصارف را تأمین می‌کنند (Abbas Novinpour et al., 2021) و یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی هستند که تحت تأثیرات تغییر اقلیم قرار گرفته و تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم را ایجاد کرده‌اند. تغییرات اقلیمی در مناطق خشک، که بارش نقش حیاتی در تأمین آب دارد، بسیار چشمگیر بوده است. این تغییرات باعث کاهش شدید بارندگی در بسیاری از این مناطق شده و در برخی مناطق دیگر، شاهد افزایش حجم بارش‌ها بوده‌ایم. این تغییرات به شدت بر منابع آبی مناطق خشک تأثیر گذاشته است (Ahmed, 2020).

تغییر اقلیم به دلیل گرمایش هوا و افزایش تبخیر و تعرق از منابع آب سطحی و همچنین افزایش تقاضای مصرف آب از یک‌طرف و کاهش در میزان بارندگی و تغذیه منابع آب زیرزمینی از طرف دیگر موجب شده تا تنش به منابع آب زیرزمینی افزایش یافته که این امر منجر به افت سطح آب آبخوان‌ها شده است (Mortezaii et al., 2020). گزارش‌های هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، حاکی از رخداد پدیده تغییر اقلیم طی دهه‌های اخیر در ایران بوده است. همچنین پیش‌بینی‌ها، بیانگر شدت بیشتر وقوع و پیامدهای آن در آینده است (Danshgar et al., 2021). لذا بررسی و ارزیابی این وضعیت جهت تصمیم‌گیری در شرایط آبی بسیار حائز اهمیت است. اهمیت این موضوع زمانی مشخص می‌شود که متوسط بارش کشور از میانگین جهانی کمتر و بیشتر حجم بهره‌برداری، از منابع آب زیرزمینی و قنات‌ها است. منابع آب زیرزمینی با توجه به شرایط تخلیه و تغذیه آن، در کوتاه مدت کمتر تحت تأثیر

تغییر اقلیم قرار می‌گیرند اما در دوره‌های میان مدت و بلندمدت تأثیر می‌پذیرند (Amanambu et al., 2020). در کشور ما در زمینه تغییر اقلیم و تأثیر آن بر قنات‌ها متأسفانه تحقیقات بسیار محدودی صورت گرفته است. از این رو، شبیه‌سازی تغییرات دبی قنات‌ها به منظور مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در دوره‌های آتی از اهمیت زیادی برخوردار است. مطالعات متعددی در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر کمیت آب‌های زیرزمینی انجام شده است (Karamouz et al., 2011) به ارزیابی اثر تغییر اقلیم و تغییرات عناصر هواشناسی بر منابع آب زیرزمینی دشت رفسنجان با استفاده از مدل‌های LARS-WG و PMWIN پرداختند. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی حوضه Klela انجام شد. بدین منظور از مدل MODFLOW برای شبیه‌سازی تراز آب زیرزمینی و از سناریوی RCP 4.5 برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر تغذیه آبخوان مورد نظر استفاده شد (Toure et al., 2016). در تحقیقی تأثیر تغییر اقلیم و برداشت از آب‌های زیرزمینی بر نفوذ آب دریا در سفره‌های ساحلی در کانادا را بررسی کردند. بدین منظور از یک مدل سه بعدی از جریان آب‌های زیرزمینی وابسته به چگالی، برای شبیه‌سازی دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۰ استفاده شد. نتایج نشان داد افزایش سطح دریا، کمترین تأثیر را بر نفوذ آب دریا در آبخوان‌های کم عمق و متوسط دارد. تدثیرات کاهش تغذیه در اعماق کم تا متوسط محسوس‌تر است و تأثیرات افزایش نرخ پمپاژ به مناطق نزدیک به چاه‌های بهره‌برداری و در همان عمق محدود است (Lemieux et al., 2015). ضرغامی و همکاران (۲۰۱۱) به مطالعه تغییر اقلیم و اثرات آن بر خشکسالی استان آذربایجان شرقی پرداختند. نتایج مطالعات نشان‌دهنده افزایش دمای استان تا ۵ درجه سانتی‌گراد و کاهش بارش سالانه تا ۶۰ میلی‌متر در سناریوی A2 و مدل HadCM3 در دوره ۲۰۸۰ تا ۲۰۹۹ میلادی خواهد بود (Zarghami et al., 2011). در مطالعه‌ای تأثیر افزایش سطح آب دریاها و تغییرات در نرخ تغذیه‌ی آب زیرزمینی شیرین جزیره کیش را با استفاده از مدل عددی SUTRA بررسی کردند. بدین منظور ۱۲ سناریو برای افزایش سطح آب دریا و تغییرات نرخ تغذیه در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد افزایش سطح آب دریاها بر اثر تغییر اقلیم تأثیر معناداری بر منبع آب زیرزمینی

اشاره نمود که همگی آن‌ها در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی از انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی بهره گرفتند. قنات‌ها، شاهکارهای مهندسی باستانی، برای هزاران سال ستون فقرات سیستم‌های آبیاری در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، به‌ویژه در استان خراسان جنوبی، بوده‌اند. قنات‌ها نه تنها منبع حیاتی آب بلکه نماد هویت فرهنگی و میراث تاریخی استان نیز هستند و بر اقتصاد، اجتماع و محیط زیست جوامع وابسته به خود تاثیر بسزایی دارند.

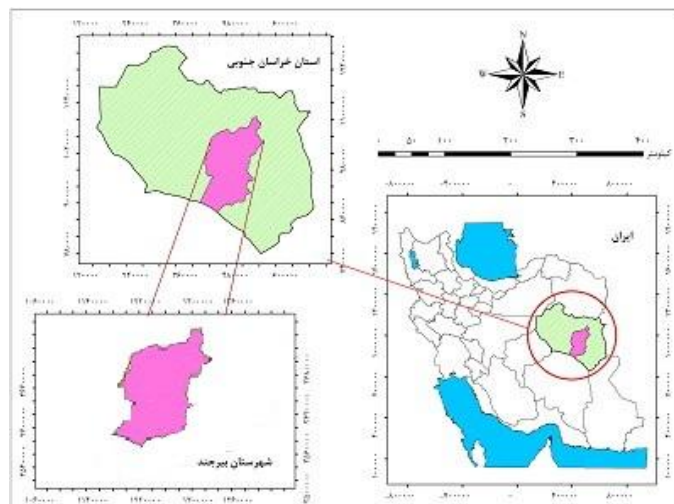
با این حال، در سال‌های اخیر، این سیستم‌های آبیاری ارزشمند با چالش‌های جدی مواجه شده‌اند. تغییرات اقلیمی، از جمله افزایش دما، تغییر الگوهای بارش و خشکسالی‌های مکرر، به کاهش دبی قنات‌ها منجر شده است. عوامل انسانی همچون مدیریت نادرست منابع آب و برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی نیز بر وضعیت قنات‌ها تأثیر منفی گذاشته است. از این رو، درک بهتر تأثیرات تغییرات اقلیمی بر دبی قنات‌ها، برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک امری حیاتی است. این پژوهش با تمرکز بر شهرستان بیرجند، به بررسی دقیق تأثیر تغییرات اقلیمی بر دبی قنات‌ها می‌پردازد تا بتوان راهکارهای مدیریتی مؤثر برای حفاظت و پایداری این میراث ارزشمند را ارائه داد.

مواد و روش

معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز بیرجند دارای وسعت ۳۱۵۵ کیلومترمربع بوده، که ۱۸۴۵ کیلومترمربع دشت و بقیه را ارتفاعات تشکیل می‌دهد. این دشت از شرق به ارتفاعات مؤمن‌آباد و سیستان، از جنوب به کوه‌های باقران و کوه رچ، از شمال به ارتفاعات شاه ناصر و اسفدن و از غرب به ارتفاعات چنگدر و گرونک محدود می‌گردد. دشت بیرجند، طبق طبقه‌بندی کوپن جزء مناطق خشک محسوب می‌شود. از نظر توپوگرافی مرتفع‌ترین نقطه آن مربوط به ارتفاعات شمالی منطقه بند دره با ارتفاع ۲۷۸۷ متر و پست‌ترین نقطه آن در خروجی دشت در روستای فدشک با ارتفاع ۱۱۸۰ متر بالاتر از سطح دریاهای آزاد قرار دارد، که موقعیت مکانی آن در شکل (۱) نشان داده شده است.

شیرین جزیره کیش به خصوص در نواحی پست دارد. به علاوه تغییرات نرخ تغذیه منبع آب زیرزمینی عامل مؤثرتری در مقایسه با افزایش سطح آب دریاهاست (Mahmoodzadeh et al., 2014). نجفی و همکاران بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی آبخوان ساحلی ساری-نکا را انجام دادند. در این راستا، در ابتدا با استفاده از مدل MODFLOW آب زیرزمینی منطقه برای دوره پایه واسنجی شد که ضریب تبیین ۰/۹۸ در حالت غیرماندگار نشان از دقت بالای مدل‌سازی کمی آبخوان داشت. سپس به واسنجی مدل LARS-WG برای دوره پایه پرداخته شد. در ادامه به شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی مذکور برای دوره آینده پرداخته شد. به طور کلی نتایج حاکی از افزایش مقدار بارندگی در اکثر ماه‌های سال و تغییرات اندک مقدار دما در دوره آتی بود (Najafi et al., 2022). در مورد توانایی شبکه‌های عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در سازند سخت در منطقه اورسا در هندوستان تحقیقی انجام شد. آن‌ها انواع شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های آموزشی را مورد آزمون قرار دادند. نتایج حاصله حاکی از دقت بالای شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم پس انتشار خطا در تراز آب زیرزمینی در این سازندها بود (Sethi et al., 2010). در تحقیقی دیگر از روش نروفازی برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی در حوضه رودخانه آماراواتی در جنوب هند استفاده کردند. مدل به کار رفته توانست سطح آب زیرزمینی را با دقت خوبی پیش‌بینی کند (Umamaheswari & Kalamani, 2014). کورتولوس و رازاک با استفاده از مدل‌های فازی و عصبی به بررسی ارتباط بین بارندگی، سطح آب و میزان دبی استحصالی در روزهای قبل با میزان دبی خروجی از آبخوان‌های کارستی در فرانسه پرداختند (Kurtulus & Razack, 2010). تحقیقات مشابه زیادی جهت پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام پذیرفته است. در این زمینه، می‌توان به تحقیقات (Adhikary et al., 2012; Yang et al., 1997; Adamowski & Chan, 2011; Chitsazan et al., 2015)



شکل ۱. موقعیت مکانی استان خراسان جنوبی و شهرستان بیرجند

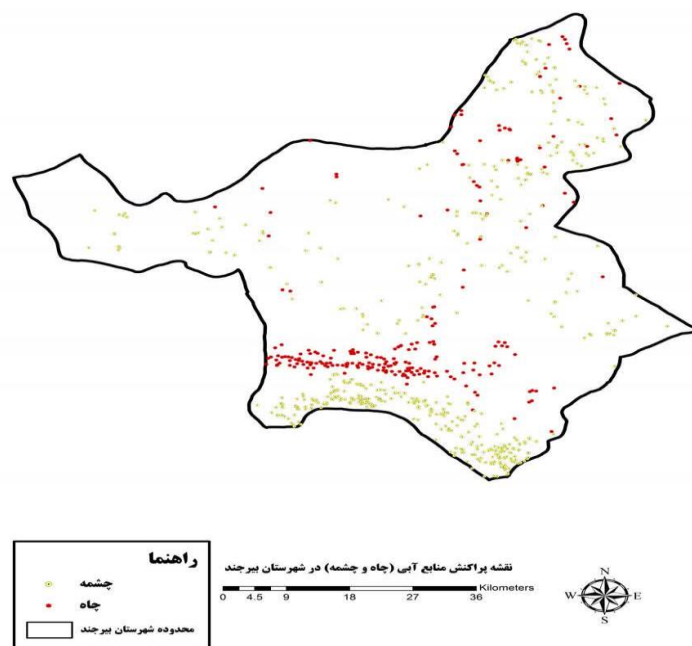
Fig 1. Location of South Khorasan province and Birjand City

سپس قنات‌ها و چشمه‌ها صورت می‌گیرد، به طوری که، از مجموع تخلیه سالیانه کل این محدوده، حدود ۷۵ درصد متعلق به چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و ۲۵ درصد مربوط به قنات‌ها بوده است.

عمده آب زیرزمینی استحصال شده توسط قنات‌ها جهت مصارف کشاورزی بوده که در مجموع تعداد ۱۸۷۵ رشته قنات با مجموع تخلیه سالیانه ۲۳/۳۹ میلیون مترمکعب در سال در شهرستان بیرجند وجود دارد که قسمت اعظم آن در آبرفت‌های میان ارتفاعات قرار دارد. از نظر آبدهی تنها ۱۹ رشته قنات آبدهی بالای ۱۰ لیتر بر ثانیه داشته و بیش از نیمی از این قنات‌ها آبدهی کمتر از ۱ لیتر بر ثانیه دارند. شکل (۳) پراکنش قنات‌ها را در سطح شهرستان بیرجند نشان می‌دهد.

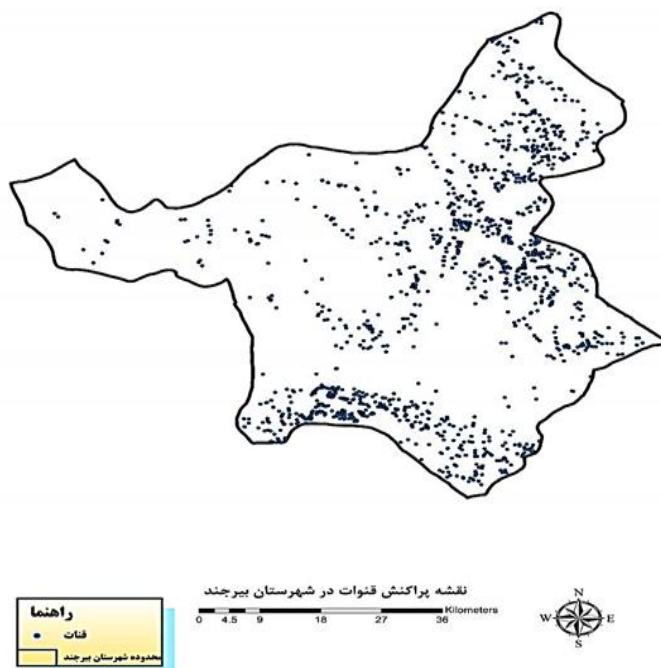
منابع آبی شهرستان بیرجند

استان خراسان جنوبی با داشتن بیش از ۶۹۸۳ رشته قنات، اولین استان در سطح کشور از لحاظ تعداد قنات‌ها می‌باشد و در این میان شهرستان بیرجند دارای بیشترین تعداد قنات در سطح شهرستان‌های استان است، طبق گزارش سیمای منابع آب استان خراسان جنوبی در سال ۱۴۰۳ از نظر منابع آبی، شهرستان بیرجند دارای ۱۸۷۵ رشته قنات، ۲۸۳ حلقه چاه عمیق و نیمه‌عمیق و ۹۲۲ رشته چشمه با تخلیه‌ای بالغ بر ۷۰/۱۷ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد (Regional Water Company, 2024). شکل (۲) پراکنش منابع آبی شهرستان بیرجند را نشان می‌دهد. استحصال آب زیرزمینی در استان خراسان جنوبی عمدتاً از طریق چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق و



شکل ۲. نقشه پراکنش چشمه ها و چاه ها در شهرستان بیرجند

Fig 2. Distribution Map of Springs and Wells in Birjand City



شکل ۳. نقشه پراکنش قنات ها در شهرستان بیرجند

Fig 3. Distribution Map of Qanats in Birjand City

بررسی تغییرات دمای بیشینه و کمینه در بازه زمانی ۲۰۰۵-۱۹۶۱ بیانگر آن است که ماه های ژوئن و دسامبر بیشترین دماهای بیشینه و کمینه را در دوره ی پایه دارند. به منظور بررسی تغییرات جوی در مقیاس

ریز مقیاس نمایی پارامترهای اقلیمی

در این مطالعه ابتدا داده های هواشناسی بیشترین و کمترین دما و بارش با گام زمانی روزانه از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ میلادی از ایستگاه سینوپتیک بیرجند تهیه شد.

توسعه اقتصادی در دهه‌های گذشته مطابقت داشته است و تا حدی تصویری واقع‌بینانه‌تر از آینده را ارائه می‌دهد.

مدل ریزمقیاس نمایی SDSM⁷

محدودیت مدل‌های AOGCM بزرگ مقیاس بودن سلول محاسباتی آنهاست، به همین دلیل استفاده‌ی مستقیم از خروجی این مدل‌ها در اتصال به مدل‌های شبیه‌سازی سامانه‌های مختلف از جمله منابع آب و کشاورزی مناسب نیست و ریزمقیاس کردن خروجی آنها با استفاده از روش‌های مناسب ضروری می‌باشد. در این پژوهش به منظور ریز مقیاس‌نمایی داده‌ها و نیز تولید سناریوهای اقلیمی منطقه‌ای در آینده از مدل ریز مقیاس نمایی آماری (SDSM) استفاده شد. در این مدل سناریوهای تغییر اقلیم برای دما و بارش تولید می‌شوند. SDSM از نوع مدل‌های تابع انتقالی است که در واقع بهترین ترکیبی از مدل‌های رگرسیونی و مدل‌های آماری به حساب می‌آید (Wilby et al., 2002). بررسی‌ها نشان می‌دهد این مدل نسبت به سایر مدل‌های ریزمقیاس نمایی قادر به ارائه نتایج بهتری در ریزمقیاس نمایی می‌باشد (Coulibaly et al., 2005). سه دسته داده به عنوان ورودی مدل SDSM استفاده می‌شود. اولین دسته داده‌های مشاهداتی روزانه پارامتر مد نظر است که از سازمان هواشناسی استان خراسان جنوبی اخذ شد. دومین دسته داده‌های جو بالای (NCEP⁸) هستند که شامل داده‌های روزانه ۲۶ متغیر پیش‌بینی کننده هستند که از بین آنها متغیرهای مستقل انتخاب می‌شوند. دسته سوم شامل داده‌های بزرگ مقیاس مدل گردش عمومی جو CanEM2 تحت سناریوی پنجم انتشار RCP 4.5 هستند. مدل SDSM در اولین مرحله به شناسایی متغیرهای پیش‌بینی کننده‌ی دارای بیشترین ضریب همبستگی با داده‌های مشاهداتی پارامتر مورد نظر می‌پردازد (Wilby, 2004). سپس در مرحله بعد داده‌های مشاهداتی هریک از متغیرهای پیش‌بینی شونده به دو قسمت برای واسنجی ۱۹۹۱-۱۹۶۱ و صحت سنجی ۲۰۰۵-۱۹۹۲ تقسیم و مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از این مرحله، مدل واسنجی شده SDSM با استفاده از

جهانی از مدل‌های گردش عمومی جو^۱ (GCM) استفاده می‌شود. مدل‌های GCM، اقلیم را با شبکه سه بعدی در گستره جهان در نظر می‌گیرند. این مدل‌ها خود شامل دو دسته کلی مدل‌های AGCMs^۲ (که برهم کنش اتمسفر را در نظر می‌گیرند) و مدل‌های OGCMs (که تأثیر متقابل اقیانوس‌ها را در نظر می‌گیرند) می‌باشند و معمولاً مدل‌های گردش عمومی ترکیبی از این دو دسته را شامل شده که به اختصار AOGCM^۳ نامیده می‌شوند. با توجه به مطالعات صورت گرفته معتبرترین ابزار جهت تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های سه بعدی جفت شده گردش عمومی جو- اقیانوس (AOGCM) می‌باشند (Wilby & Harris, 2006). در این تحقیق از پنجمین گزارش مدل گردش عمومی جو- اقیانوس کانادا (CanESM2^۴) تحت سناریوی انتشار RCP 4.5^۵ استفاده گردید. گزارش‌های تغییر اقلیم، سندهای علمی هستند که توسط هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC^۶) منتشر می‌شوند و ارزیابی جامع‌ترین و به‌روزترین اطلاعات علمی، فنی و اجتماعی- اقتصادی در مورد تغییر اقلیم و پیامدهای آن هستند. این گزارش‌ها به‌طور منظم به روزرسانی می‌شوند تا آخرین یافته‌های علمی را در خود جای دهند. در مدل‌سازی‌های اقلیمی، از سناریوهای مختلفی برای پیش‌بینی‌های آینده استفاده می‌شود. این سناریوها، مسیرهای مختلفی را برای انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده نشان می‌دهند که هر کدام به عواملی مانند رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، تغییرات تکنولوژیکی و سیاست‌های اقلیمی بستگی دارد. سناریوها معمولاً با اعداد مشخص می‌شوند (مثلاً RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5) که نشان‌دهنده میزان انتشار تجمعی گازهای گلخانه‌ای تا پایان قرن ۲۱ هستند. اعداد بالاتر نشان دهنده انتشار بالاتر گازهای گلخانه‌ای و افزایش بیشتر دما هستند. در این میان در مقایسه با سناریوهای کم یا زیاد، RCP4.5 تا حد زیادی با روندهای تاریخی انتشار گازهای گلخانه‌ای و

¹ General Circulation Model

² Atmospheric General Circulation Model

³ Atmosphere-Ocean General Circulation Model

⁴ Canadian Earth System Model version 2

⁵ Representative Concentration Pathways

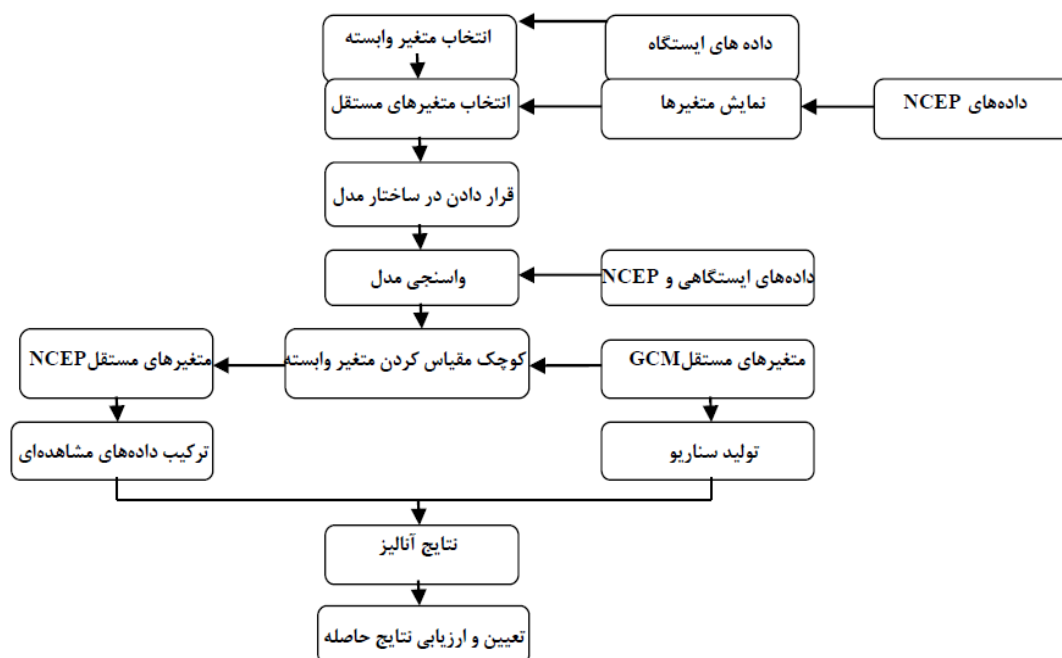
⁶ Intergovernmental Panel on Climate Change

⁷ Statistical Downscaling Model

⁸ National Centers for Environmental Prediction

ریزمقیاس با گام زمانی روزانه بدست می‌آیند. شکل (۴) روند ریزمقیاس‌سازی و تولید سناریوی اقلیمی مدل SDSM را نشان می‌دهد.

NCEP های منتخب و نیز داده‌های مدل گردش عمومی جو- اقیانوس اقدام به پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی مورد نظر می‌کند و در نهایت داده‌های پیش‌بینی شده‌ی



شکل ۴. فرآیند ریزمقیاس‌سازی و تولید سناریوی اقلیمی مدل SDSM. (Wilby et al., 2002)

Fig 4. The Process of Downscaling and Producing the SDSM Model Climate Scenario (Wilby et al., 2002).

روش مدل‌سازی به وسیله سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی مشابه بسیاری از روش‌های متداول می‌باشد. ابتدا ساختار یک مدل با پارامترهای مشخص (تابع و درجه عضویت) فرض می‌شود. سپس یک سری داده ورودی/خروجی به شکلی که قابل استفاده برای آموزش سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی باشد جمع‌آوری می‌گردد. در ادامه به وسیله سیستم استنباط فازی عصبی تطبیقی، مدل سیستم استنباط فازی را با داده‌های موجود آموزش داده، تا با اصلاح پارامترهای تابع درجه عضویت مطابق با حد خطای انتخاب شده، داده‌های حاصل از مدل به مقدار واقعی نزدیک شوند. داده‌های ورودی به مدل شبکه فازی عصبی تطبیقی ۸۰ درصد داده‌ها برای واسنجی مدل و ۲۰ درصد برای صحت‌سنجی مدل به کار گرفته شدند. پس از بررسی کیفی مدل فازی عصبی تطبیقی این مدل برای پیش‌بینی دبی آب قنات‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم در آینده مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور سری‌های زمانی دما و بارش بوسیله ریزمقیاس

شبیه‌سازی دبی قنات‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی دبی آب قنات‌های شهرستان بیرجند با استفاده از داده‌های دما و بارندگی آتی مربوط به سناریوهای تغییر اقلیم از مدل فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) بهره گرفته شد. مدل سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی در برگزیده دو مدل فازی و عصبی در یک ساختار است. بخش فازی رابطه‌ای بین متغیرهای ورودی و خروجی برقرار نموده و پارامترهای مربوط به توابع عضویت بخش فازی به وسیله شبکه عصبی تعیین می‌گردد. در فرآیند استنباط فازی، ۵ مرحله باید صورت گیرد:

- ۱- فازی‌سازی متغیرهای ورودی
- ۲- به کار بردن عملگرهای (و، یا) در بخش مقدمه
- ۳- استنتاج از مقدمه به نتیجه در ساختار
- ۴- ترکیب نتایج قوانین
- ۵- غیرفازی کردن

که در رابطه‌های فوق: Q_{oi} دبی آب مشاهداتی، Q_{si} دبی آب شبیه‌سازی شده در زمان n "تعداد داده‌های مشاهداتی و $\bar{Q}_{oi}$ میانگین دبی آب مشاهداتی می‌باشد.

نتایج و بحث

ریز مقیاس سازی دما و بارش

پس از کالیبراسیون مدل SDSM به منظور ارزیابی عملکرد مدل در ریز مقیاس نمایی، متغیرهای دما و بارش منطقه، مقادیر میانگین ماهانه دما و بارندگی ریزمقیاس شده توسط این مدل در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۹۲) با مقادیر مشاهداتی متناظر ایستگاه مورد مطالعه در همان دوره مقایسه گردید. نتایج بدست آمده در شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) ارائه شده است. شکل (۳) مقایسه میانگین حداکثر دمای روزانه مشاهداتی طی ماه‌های مختلف سال و ریز مقیاس‌سازی شده توسط مدل SDSM را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود مقادیر میانگین درجه حرارت بیشینه ریز مقیاس شده طی ماه‌های ژانویه تا ژوئن از مقادیر مشاهداتی بیشتر می‌باشد. بعبارت دیگر در این ماه‌ها مدل برآورد بیشتری نسبت به مقادیر مشاهداتی دارد. این موضوع برای ماه‌های جولای تا دسامبر دقیقاً برعکس می‌باشد. بعبارت دیگر طی این ماه‌ها مدل مقادیر پایین‌تری برای میانگین حداکثر درجه حرارت پیش بینی می‌نماید.

شکل (۶) مقایسه میانگین حداقل دمای روزانه مشاهداتی طی ماه‌های مختلف سال و ریز مقیاس‌سازی شده توسط مدل SDSM را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود مقادیر میانگین درجه حرارت کمینه ریز مقیاس شده همانند میانگین درجه حرارت بشینه طی ماه‌های ژانویه تا ژوئن از مقادیر مشاهداتی بیشتر می‌باشد. بعبارت دیگر در این ماه‌ها مدل برآورد بیشتری نسبت به مقادیر مشاهداتی دارد. این موضوع برای ماه‌های جولای تا دسامبر دقیقاً برعکس می‌باشد. بعبارت دیگر طی این ماه‌ها مدل مقادیر پایین‌تری برای میانگین حداقل درجه حرارت پیش بینی می‌نماید.

نمایی و تولید سناریو برای آینده ایجاد گردید و پارامتر ورودی تبخیر و تعرق در آینده نیز به روش تورنت وایت تولید شد. از روش تورنت وایت به دلیل سادگی، دقت و قابلیت کاربرد آن در شرایط مختلف اقلیمی استفاده گردید. سپس با استفاده از مدل عصبی فازی تطبیقی آموزش یافته و نیز پارامترهای مورد نیاز آن، دبی آب قنات‌ها در دوره آتی پیش‌بینی گردید. جهت اطلاعات بیشتر از مدل‌های استنتاج تطبیقی عصبی فازی می‌توان به تحقیقات انجام گرفته توسط (Muslimi et al., 2012) و (Vahedi et al., 2015) مراجعه کرد.

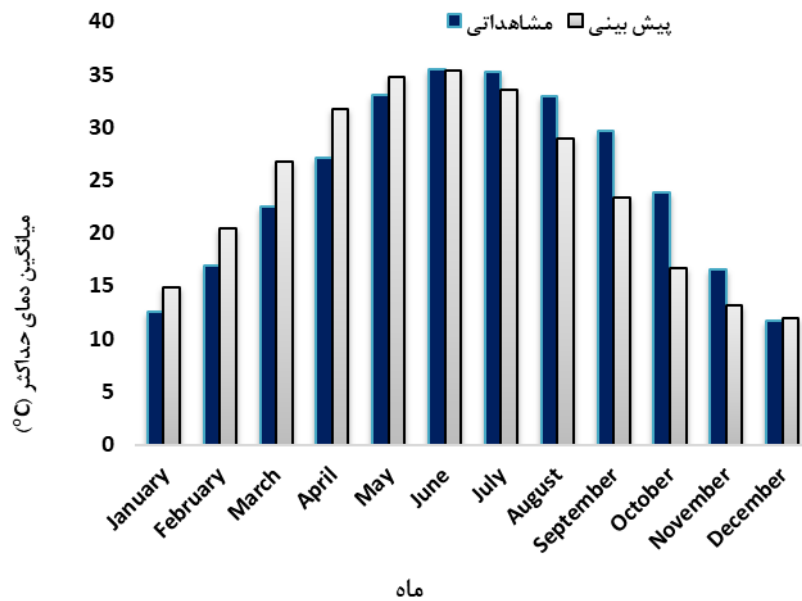
معیارهای ارزیابی مدل

در پژوهش حاضر، از میان شاخص‌های آماری متعدد در دسترس، شاخص‌هایی برای ارزیابی درستی عملکرد مدل انتخاب شده است که با استفاده از آنها میزان خطای موجود در نتایج به دست آمده، میزان همبستگی داده‌ها، پراکندگی آنها و همچنین بالادست یا پایین‌دست بودن نتایج حاصل نسبت به مقادیر واقعی نشان داده شده و ارزیابی شده است. به منظور ارزیابی صحت و کارایی مدل از معیارهای ضریب همبستگی (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) استفاده شد (Hosseinihah et al., 2014). بهترین پیش‌بینی‌ها زمانی رخ می‌دهد که کمیت‌های RMSE کمترین ضریب، NS و R^2 نزدیک به ۱ باشد (Kamal & Masah, 2011). شاخص‌های آماری فوق به ترتیب از رابطه‌های ذیل بدست می‌آیند:

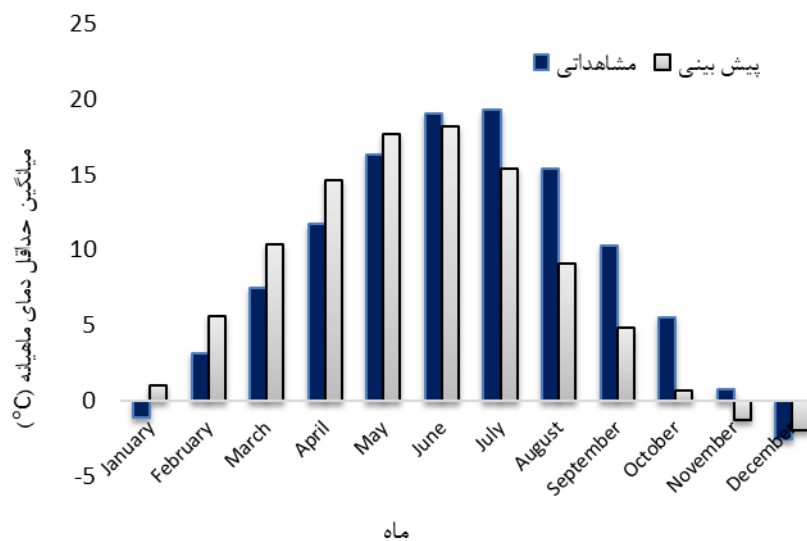
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2} \quad (۲)$$

$$NS = (1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2}) \quad (۳)$$



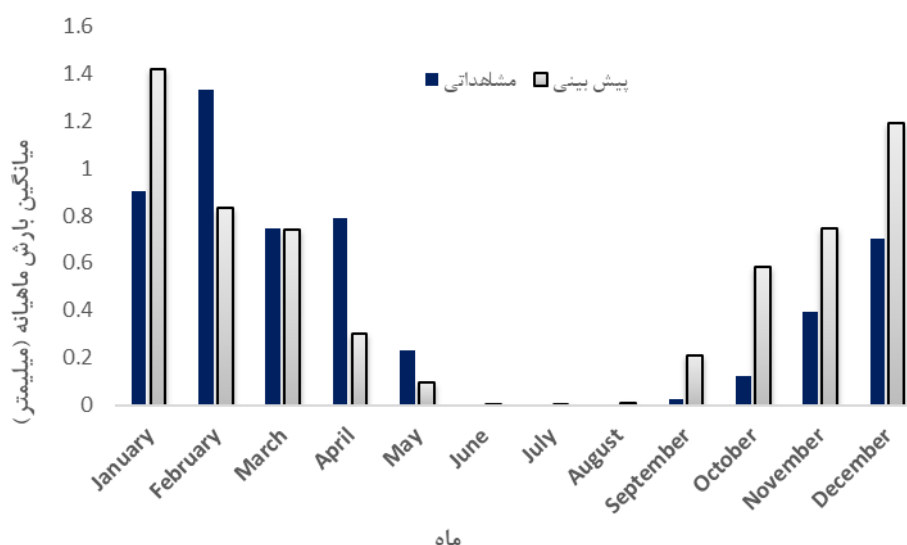
شکل ۵. مقایسه نتایج میانگین دمای حداکثر مشاهده‌ای در دوره پایه با مقادیر ریزمقیاس شده مدل SDSM
 Fig 5. Comparison of the Results of Average Observed Maximum Temperature in the Base Period with the Downscaled Values of the SDSM Model



شکل ۶. مقایسه نتایج میانگین دمای حداقل مشاهده‌ای در دوره پایه با مقادیر ریزمقیاس شده مدل SDSM
 Fig 6. Comparison of the Results of the Average Observed Minimum Temperature in the Base Period with the Downscaled Values of the SDSM Model

دارد. این موضوع برای ماههای سپتامبر تا دسامبر دقیقاً برعکس می‌باشد. عبارت دیگر طی این ماه‌ها مدل مقادیر بالاتری برای میانگین بارندگی پیش‌بینی می‌نماید. همچنین طی ماه‌های ژوئن تا آگوست مقادیر میانگین بارندگی ریزمقیاس شده بالاتر از مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد اما از آنجاییکه مقادیر آن بسیار پایین است نزدیک به صفر نشان داده شده است.

شکل (۷) مقایسه میانگین بارندگی روزانه مشاهده‌ای طی ماه‌های مختلف سال و ریزمقیاس‌سازی شده توسط مدل SDSM را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود مقادیر میانگین بارندگی ریزمقیاس شده در ماه ژانویه از مقادیر مشاهده‌ای بیشتر می‌باشد. و طی ماه‌های فوریه تا می از مقادیر مشاهده‌ای کمتر می‌باشد. عبارت دیگر در این ماه‌ها مدل برآورد کمتری نسبت به مقادیر مشاهده‌ای



شکل ۷. مقایسه نتایج میانگین بارش مشاهده‌ای در دوره پایه با مقادیر ریزمقیاس شده مدل SDSM

Fig 7. Comparison of the Results of the Average Observed Precipitation in the Base Period with the Downscaled Values of the SDSM Model

با داده‌های مشاهداتی داشته‌اند. که نتایج بدست آمده با نتایج (Ansari et al., 2016) مطابقت دارد. مقادیر معیارهای عملکرد مدل CanESM2 AR5 برای ریزمقیاس بارش و دما در جدول (۱) ارائه شده است.

با توجه به شکل‌های (۵)، (۶) و (۷) مشاهده می‌شود که مدل، میانگین دمای حداکثر و حداقل ماهانه را نسبت به میانگین بارش ماهانه، بهتر ریزمقیاس کرده است. و داده‌های درجه حرارت حداکثر و حداقل همبستگی بهتری

جدول ۱. عملکرد مدل SDSM برای ریزمقیاس نمایی پارامترهای اقلیمی دما و بارش

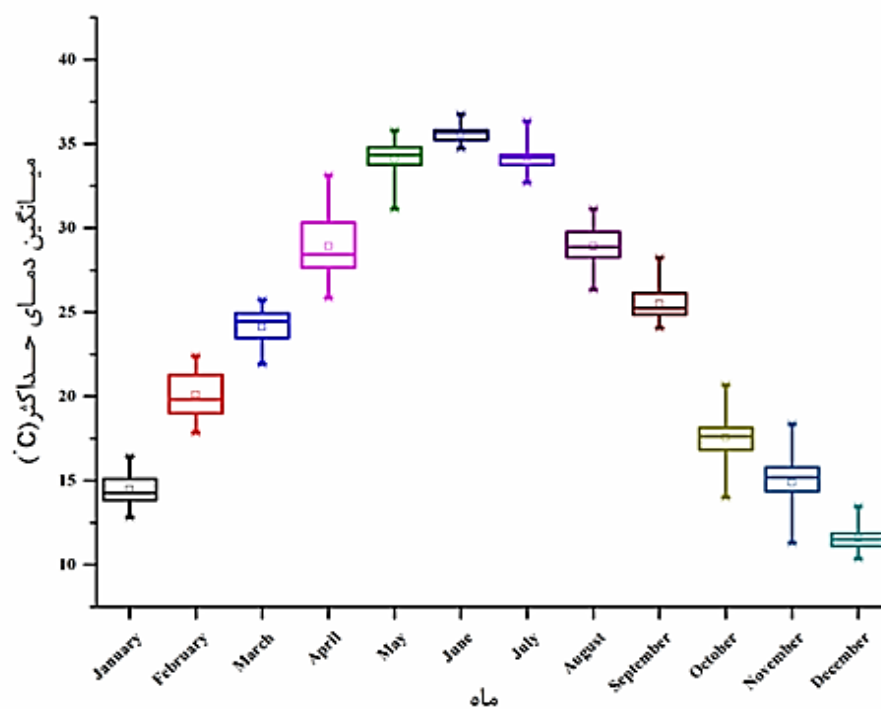
Table 1. Performance of the SDSM Model for Downscaling of Climatic Parameters of Temperature and Precipitation

پارامترهای اقلیمی Climatic parameters	ضریب نش-ساتکلیف NS	ضریب همبستگی R ²	مجزور میانگین مربعات خطا RMSE
بارش (میلیمتر) Prc (mm)	0.37	0.528	0.17
دمای حداکثر (°C) Tmax (°C)	0.787	0.801	1.99
دمای حداقل (°C) Tmin (°C)	0.785	0.804	1.77

در شکل (۸)، (۹) و (۱۰) مشاهده می‌شود، میزان تغییر پذیری (عدم قطعیت) پارامتر درجه حرارت حداقل در ماه‌های اگوست و جولای بیشتر از بقیه ماه‌ها می‌باشد. و درمورد دمای حداکثر عدم قطعیت بیشتر در ماه‌های فوریه و آوریل مشاهده می‌گردد. در مورد پارامتر بارندگی برخلاف دو پارامتر دیگر در بیشتر ماه‌های سال میزان عدم قطعیت بالا می‌باشد.

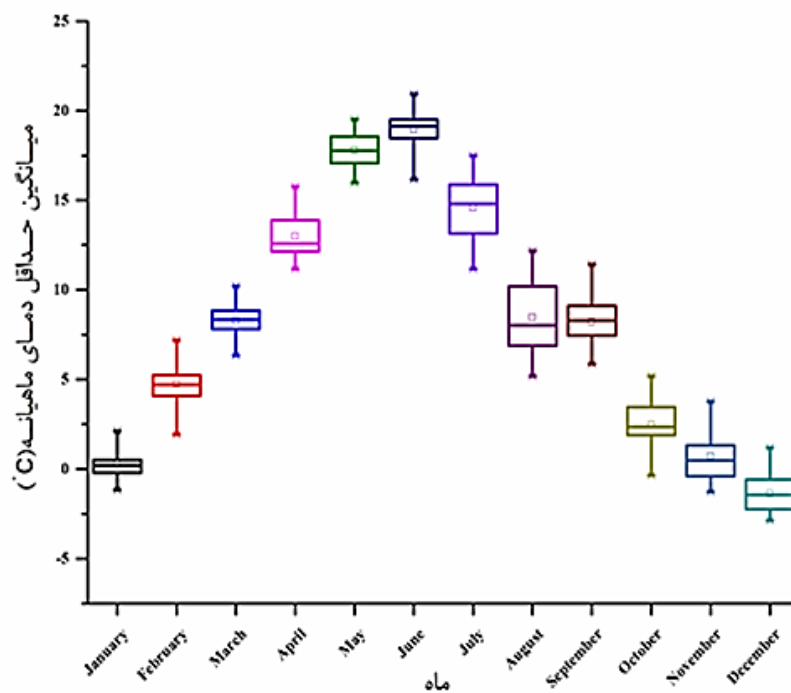
نتایج پارامترهای اقلیمی در دوره آتی

پارامترهای میانگین حداکثر و حداقل دما و میانگین بارش برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ به کمک مدل SDSM ریزمقیاس شد. نتایج بدست آمده براساس نمودار باکس پلات رسم شده در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) نشان می‌دهد که مدل میانگین دمای حداقل و حداکثر را برای دوره آتی بهتر از میانگین بارش ریزمقیاس نموده است.



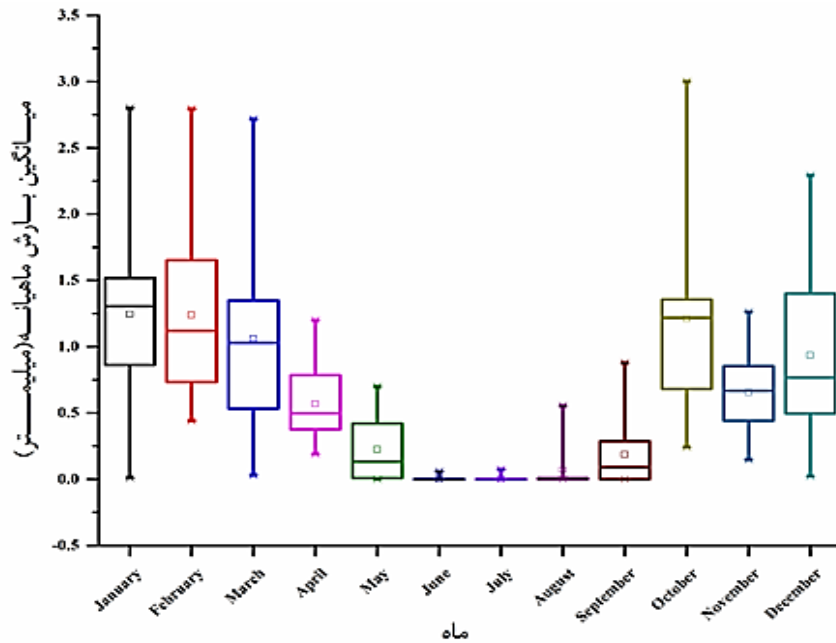
شکل ۸- میانگین دمای حداکثر بین سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰

Figure 8- Average of Minimum Temperature During 2020-2050



شکل ۹- میانگین حداقل دمای ماهانه بین سال های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰

Figure 9- Average of Maximum Temperature During 2020-2050



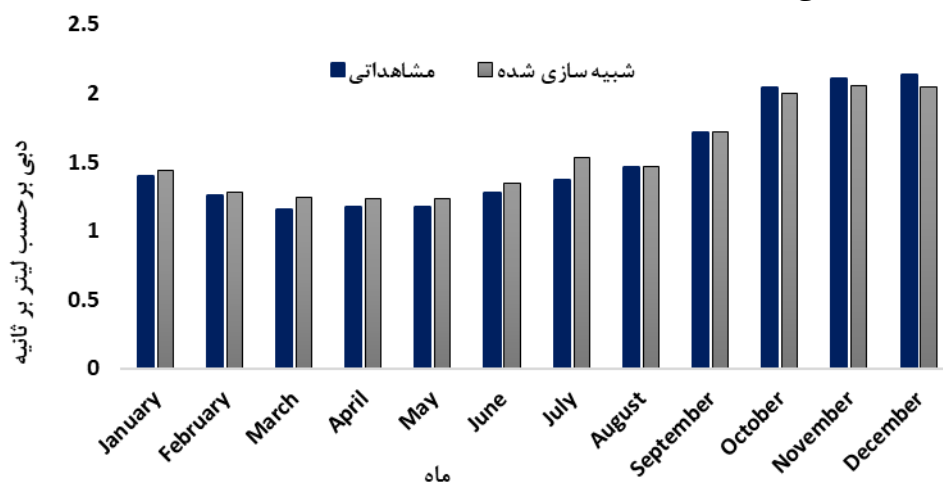
شکل ۱۰- میانگین بارندگی بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰

Figure 10- Average of Precipitation During 2020-2050

خروجی‌های مدل به کمک شبکه عصبی فازی ۷۰ درصد کل داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمون جهت ارزیابی عملکرد شبکه و بررسی دقت پیش‌بینی مدل پیشنهادی استفاده شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان‌دهنده تطابق قابل قبولی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی است و نشان از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی دبی قنات‌ها داشته که با نتایج (Muslimi et al., 2012) و (Nazari et al., 2022) مطابقت دارد.

نتایج شبیه‌سازی دبی قنات‌ها در دوره پایه

در این پژوهش، مدل شبکه عصبی فازی تطبیقی در شبیه‌سازی دبی قنات‌های شهرستان بیرجند مورد استفاده قرار گرفت. اساس آموزش شبکه‌های عصبی بر مبنای آزمون و خطا می‌باشد تا بهترین آرایش شبکه با تغییر تعداد لایه‌های پنهان و نرون‌های آنها، تابع فعالیت، الگوریتم آموزش و تعداد تکرار در مرحله آموزش جهت برآورد پارامتر خروجی مورد نظر ارائه شود (Izadi et al., 2007). به منظور شناسایی ارتباط بین ورودی‌ها و



شکل ۱۱- مقایسه نتایج میانگین دبی مشاهده‌ای در دوره پایه با مقادیر شبیه‌سازی شده مدل ANFIS

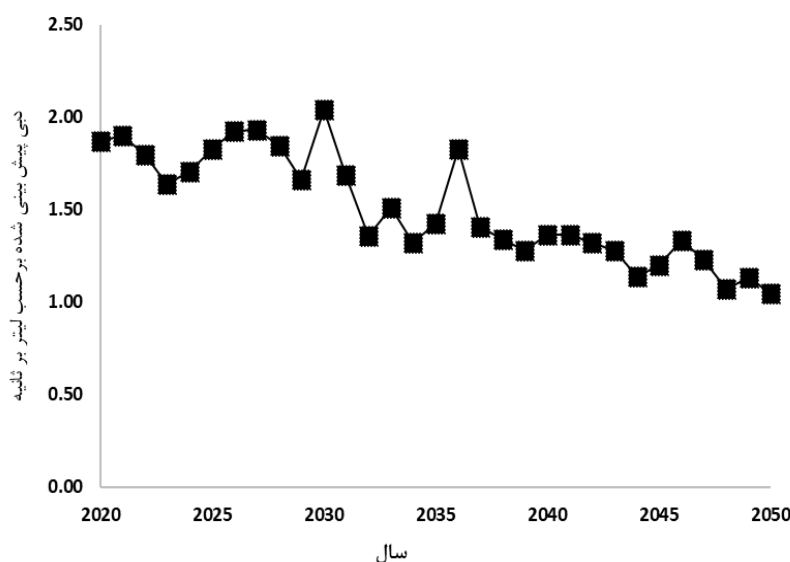
Figure 11 - Comparison of the Results of the Observed Average Discharge in the Base Period with the Simulated Values of the ANFIS Model

نتایج پیش‌بینی دبی قنات‌ها در دوره آتی

نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی دبی آب قنات‌های شهرستان بیرجند به کمک پارامترهای اقلیمی در طی دوره آتی ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰، روند کاهشی دبی قنات‌ها را تا سال ۲۰۵۰ نشان می‌دهد. این کاهش دبی به طور مستقیم با اثرات تغییر اقلیم مانند افزایش دما، کاهش بارندگی و تغییر الگوی بارندگی مرتبط است.

با وجود روند کاهشی کلی، نوسانات قابل توجهی در دبی سالانه قنات‌ها مشاهده می‌شود. این نوسانات ممکن است به عوامل مختلفی مانند تغییرات محلی در بارندگی، تبخیر و نفوذپذیری خاک مرتبط باشد. شدت کاهش دبی در

سال‌های مختلف متفاوت است. در برخی سال‌ها کاهش دبی بیشتر و در برخی سال‌ها کمتر است. این امر نشان می‌دهد که تأثیر تغییر اقلیم بر دبی قنات‌ها به صورت خطی و یکنواخت نیست. دبی قنات‌ها از ۱.۸۷ لیتر بر ثانیه در سال ۲۰۲۰ آغاز و در سال ۲۰۳۰ به اوج ۲.۰۴ لیتر بر ثانیه می‌رسد. پس از این قله، روندی کاهش یافته و تا سال ۲۰۵۰ به ۱.۰۵ لیتر بر ثانیه می‌رسد، که نشان‌دهنده کاهش ۴۴٪ دبی نسبت به سال ۲۰۲۰ است. این روند نشان‌دهنده وضعیت نگران‌کننده‌ای برای مدیریت آب و منابع طبیعی در این منطقه است.



شکل ۱۲- دبی قنات‌های شهرستان بیرجند بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰

Figure 12- Discharge of Qanats in Birjand County Between 2020 and 2050

گذاشته و این روند کاهشی در آینده نیز ادامه خواهد داشت. افزایش دما و تغییر الگوی بارندگی ناشی از تغییر اقلیم، باعث کاهش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و در نتیجه کاهش دبی قنات‌ها شده است. تداوم این روند پیامدهای جدی برای منطقه به همراه خواهد داشت. پیامدهای این بحران تنها به کاهش تولیدات کشاورزی محدود نمی‌شود، بلکه بر اکوسیستم‌های وابسته به قنات‌ها، تنوع زیستی، اقتصاد محلی و حتی مهاجرت روستاییان نیز تأثیرگذار است.

برای مقابله با این چالش‌ها و کاهش اثرات سوء تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی و قنات‌ها، پیشنهاد می‌شود:

تغییرات اقلیمی به وضوح بر منابع آب زیرزمینی تأثیر گذاشته و می‌تواند به تغییرات بارش و افزایش دما مرتبط باشد که منجر به افزایش تبخیر و کاهش ذخایر آب می‌شود. طی سال‌های بررسی، به ویژه بین سال‌های ۲۰۳۷ تا ۲۰۵۰، افت قابل توجهی در دبی قنات‌ها مشاهده می‌شود. در این دوره، شرایط خشکسالی و تغییر الگوهای بارش ابتکار عمل جدی‌ای در مدیریت منابع آبی را ایجاب می‌کند.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش حاکی از آن است که تغییر اقلیم به طور قابل توجهی بر دبی قنات‌ها در منطقه مورد مطالعه تأثیر

Press, 2011, 252 pp, ISBN-10: 0521173159 .In: Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139397>

Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., Oyebamiji, A., & Ochege, F. U. (2020). Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 589, 1251-63.

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125163>

Ansari, S., Massah Bavani, A., & Roozbahani, A. (2016). Effects of climate change on groundwater recharge (Case study: Sefid Dasht plain). *Water and Soil*, 30(2), 416-431 .

<https://doi.org/10.22067/jsw.v30i2.39574>

Chitsazan, M., Rahmani, G., & Neyamadpour, A. (2015). Forecasting groundwater level by artificial neural networks as an alternative approach to groundwater modeling. *Journal of the Geological Society of India*, 85, 98-106 .

<https://doi.org/10.1007/s12594-015-0197-4>

Coulibaly, P., Dibike, Y. B., & Anctil, F. (2005). Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks. *Journal of Hydrometeorology*, 6(4), 483-496 .

<http://doi.org/10.1175/JHM409.1>

Danshgar, H., Bagheri, M., & Mardani, M. (2021). Evaluation of the consequences of climate change and adaptation strategies in Bushkan Plain of Bushehr Province. *Journal of Agricultural Economics and Development*, 35(1), 63-78 .

<https://doi.org/10.22067/jead.2021.17812.0>

Hamzeh, S., Bagherpour, Z., Delghandi, M., & Kardan Moghaddam, H. (2018). Risk assessment of climate change impacts on groundwater level (Case study: Gotvand Aghili aquifer). *Journal of Ecohydrology*, 5(1), 111-122.

<https://doi.org/10.22059/ije.2017.235715.645>

Hosseinikhah, M., Zeinivand, H., Haghizadeh, A., & Tahmasebipour, N. (2014). Validation of global climate models (GCMs) temperature and rainfall simulation in Kermanshah, Ravansar, and West Islamabad stations. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 1(3), 195-206 .

<https://doi.org/10.22059/ije.2014.54223>

Izadi, A., DAVARI, K., ALIZADEH, A., Ghahraman, B., & HAGHAYEGHI, M. S. G. (2007). Water table forecasting using artificial neural networks. <https://sid.ir/paper/131658/en>

Kamal, A. R., & Masah, A. (2011). The uncertainty assessment of AOGCM & Hydrological models for estimating Ghareesu basin temperature, precipitation, and runoff under climate change impact. *Iranian Water Researches Journal*, 5(2), 39-50 .

Karamouz, M., Abolpour, A., & Nazif, S. (2011). Evaluation of the impact of climate change on groundwater resources of Rafsanjan. 4th Iranian conference of water resources management,

• توسعه مدیریت جامع منابع آب با رویکرد مشارکتی: با مشارکت جوامع محلی، کشاورزان و ذینفعان مختلف، برنامه‌های مدیریتی جامع و پایداری برای مدیریت منابع آب با اولویت کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و حفظ نظام‌های قناتی تدوین شود.

• بهبود بهره‌وری آبیاری: با استفاده از روش‌های نوین آبیاری مانند آبیاری قطره‌ای و بارانی، اصلاح الگوی کشت و انتخاب ارقام مقاوم به خشکی، می‌توان به طور قابل توجهی در مصرف آب صرفه‌جویی کرد.

• احیاء و حفاظت از قنات‌ها: با توجه به نقش تاریخی و فرهنگی قنات، احیاء و مرمت قنات‌های قدیمی و حفاظت از قنات‌های فعال، می‌تواند به افزایش بهره‌وری آب و حفظ محیط زیست کمک کند.

• پایش و ارزیابی مستمر: ایجاد سیستم‌های پایش دائمی منابع آب و دبی قنات‌ها با استفاده از داده‌های اقلیم‌شناسی و هیدرولوژیکی برای اتخاذ تدابیر مناسب.

با اجرای این راهکارها می‌توان به بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی، افزایش پایداری قنات‌ها و کاهش اثرات سوء تغییر اقلیم بر جوامع محلی کمک کرد و آینده‌ای پایدارتر برای منطقه رقم زد.

منابع

Abbas Novinpour, E., Sadeghi Aghdam, F., & Kaki, M. (2021). The effect of climate change on surface and groundwater resources in Rozeh Tea Plain. *New Findings in Applied Geology*, 15(29), 15-27.

<https://doi.org/10.22084/nfag.2020.21337.1414>

Adamowski, J & Chan, H. F. (2011). A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *Journal of Hydrology*, 407(1-4), 28-40 .

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.013>

Adhikary, S. K., Rahman, M., & Gupta, A. D. (2012). A stochastic modeling technique for predicting groundwater table fluctuations with time series analysis. *International journal of applied science and engineering research*, 1(2), 238-249 .

<https://doi.org/10.6088/ijaser.0020101024>

Ahmed, M. (2020). Introduction to Modern Climate Change. Andrew E. Dessler: Cambridge University

4_Prediction_of_water_table_depth_in_a_hard_rock_basin_by_using_artificial_neural_network

Toure, A., Diekkrüger, B., & Mariko, A. (2016). Impact of climate change on groundwater resources in the Klela basin, southern Mali. *Hydrology*, 3(2), 17. <https://doi.org/10.3390/hydrology3020017>

Umamaheswari, G., & Kalamani, D. (2014). Fuzzy logic model for the prediction of groundwater level in Amaravathi River Minor Basin. *International Journal of Mathematics Trends and Technology-IJMTT*, 11.

<https://doi.org/10.14445/22315373/IJMTTV11P505>
Vahedi, F., Nadiri, A., & AsghariMoghaddam, A. (2015). *Evaluation of Artificial Neural Network and Fuzzy Logic Models Efficiency in Groundwater Level Prediction* the 1st International Congress on Earth, Space and Clean Energy, <https://civilica.com/doc/456421>

Wilby, R. (2004). Guidelines for the use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. *Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TGCIA*, 27. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.1438319>

Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145-157. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00060-3)

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). <https://doi.org/10.1029/2005WR004065>

Yang, C.-C., Prasher, S. O., Lacroix, R., Sreekanth, S., Patni, N. K., & Masse, L. (1997). Artificial neural network model for subsurface-drained farmlands. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(4), 285-292. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)07339437\(1997\)123:4\(285\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)07339437(1997)123:4(285))

Zarghami, M., Abdi, A., Babaeian, I., Hassanzadeh, Y & Kanani, R. (2011). Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran. *Global and Planetary Change*, 78(3-4), 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.003>

Tehran, Amirkabir University, May 3rd and 4th.(In Persian) ,<https://civilica.com/doc/116949/>
Kurtulus, B., & Razack, M. (2010). Modeling daily discharge responses of a large karstic aquifer using soft computing methods: Artificial neural network and neuro-fuzzy. *Journal of Hydrology*, 381(1-2), 101-111..

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.11.029>

Lemieux, J.-M., Hassaoui, J., Molson, J., Therrien, R., Therrien, P., Chouteau, M., & Ouellet, M. (2015). Simulating the impact of climate change on the groundwater resources of the Magdalen Islands, Québec, Canada. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 400-423.

<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.011>

Mahmoodzadeh, D., Ketabchi, H., Ataie-Ashtiani, B., & Simmons, C. T. (2014). Conceptualization of a fresh groundwater lens influenced by climate change: A modeling study of an arid-region island in the Persian Gulf, Iran. *Journal of Hydrology*, 519, 399-413

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.07.010>

Mortezaii, G., Lotfi, J., Khalighi Sigarodi, S., Saravi, M., & Nazari Samini, A. (2020). Analysis and evaluation of hydrological drought indicators in Kurdistan Province. *Watershed Engineering and Management*, 12(2), 441-453.

<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.123305.1566>

Muslimi, K., Imam Gholizadeh, S., & Karami, G. H. (2012). *Comparison of ANN and ANFIS artificial intelligence systems in predicting groundwater levels in Bastam Plain*, 5th National Conference on Watershed Management and Soil and Water Resources Management, <https://civilica.com/doc/143720>

Najafi, s., Sharafati, A., & Kardan moghaddam, H. (2022). Evaluating the effect of climate change on groundwater level changes in the Sari-Neka coastal aquifer. *Irrigation and Water Engineering*, 13(2), 312-332. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.162660>

Nazari, H., Dehghani, M., Pirkharrati, H., Asadzadeh, F., & Hajizadeh, F. (2022). Monitoring of groundwater quality parameters using adaptive neural-fuzzy inference system (ANFIS) method(Case study: Ardabil plain). *Journal of New Findings in Applied Geology*, 16(31), 1-12. <https://www.magiran.com/paper/2454855>

Regional Water Company, S.K. (2024). *Report on the State of Water Resources in South Khorasan Province*.

https://skhrw.ir/uploaded_files/DCMS/wysiwyg/files/Gozaresh

Sethi, R. R., Kumar, A., Sharma, S., & Verma, H. (2010). Prediction of water table depth in a hard rock basin by using an artificial neural network. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 2(4), 95-102. <https://www.researchgate.net/publication/26647210>

