



## Impact of CMIP5 climate change model in Jamishan dam reservoir simulation under cropping pattern change scenario

Banafshe Rahimi<sup>1</sup> , Maryam Hafezparast Mavadat<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> M. Sc Student of Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: banafshe.rahimy@gmail.com

<sup>2</sup> Corresponding Author, Assistant professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: m.hafezparast@razi.ac.ir

---

### ABSTRACT

---

#### Introduction

Today, increasing the concentration of greenhouse gases has changed the global climate variables and it is anticipated that these changes will continue in the future. With climate change, the hydrological regime of the river and as a result, the frequency of occurrence and intensity of flooding and water quality of the river also changes. Therefore, considering that Iran is located in arid and semi-arid climates, planning and managing water resources in dams and watersheds is of particular importance. Climate change creates one of the most important effects in the hydrological cycle, which occurs due to population increase, increase use of fossil fuels, deforestation, soil erosion and consequently an increase in greenhouse gas. Investigation of climate change parameters plays an important role in predicting surface runoff in order to identify and manage water resources reserves. On the other hand, due to the limitation of freshwater resources, accurate prediction of flow discharge and its changes throughout the year is one of the main pillars of surface water resources planning and management.

#### Methodology

Jamishan Dam basin with an area of 524 square kilometers and semi-humid to semi-arid cold climate, from the north to the Gavehrud basin, from the east to the Khorramrud basin, from the south to the Mariam Negar River basin and from the west to the basins of AliSiah and Gavehrud. Select Station

Sonqor synoptic station was used as the base station for the mean temperature (Celsius) and precipitation (mm) parameters, and Kermanshah synoptic station was used to complete the statistical defects of temperature and precipitation in the study area, and Pirsalman hydrometric station was selected for the discharge parameter (m<sup>3</sup>/s). After completing the statistical parameters, the period 1988-2017 has been selected as the base period.

#### Groundwater Resources

In the study area, 8 million cubic meters is used in the Nazelian network and 24 million cubic meters of groundwater is used in jamishan network.

#### Agricultural Water Uses

In this study, three cropping patterns have been evaluated. Irrigation efficiency for surface irrigation is 30 and for pressurized irrigation is equal to 50%.

#### CROPWAT

This software uses temperature, soil type and plant data to calculate crop water requirement and irrigation requirements. Also, the software is able to calculate the irrigation for managing various conditions and determining the water supply require.

#### Support Vector Machine

SVR method is SVM regression model. In SVR, a function associated with the dependent variable Y, which itself is a function of several x variables, is estimated.

#### Genetic Programming

Gene expression programming which has been developed in the continuation of the evolution of intelligent models is one of the methods of circulatory algorithm, all of which are based on Darwin's theory of evolution.

#### IHACRES Rainfall-Runoff Model

Observational data of rainfall, temperature in the base period are used for calibration of the model, firstly the IHACRES model is calibrated for the study area. For this purpose, observational data of temperature, precipitation and monthly discharge of the base period (1988-2017) will be used.

#### Simulation

WEAP software operates based on the equation of water balance (equation 1) and it can be used in agricultural and urban systems, complex river systems or independent basins. In addition, WEAP can simulates a wide range of engineering and natural components of systems, including base flow, runoff precipitation and groundwater recharge from precipitation.

$$St+1 = St + Qt - Et - Rt - Spill \quad (1)$$

#### Performance Criteria

In order to compare and evaluate the performance of the studied models, the parameters of mean square error (RMSE), absolute mean error (MAE), Nash-Sutcliffe (MSE) and determinant coefficient (R) were used.

#### Results and discussion

Changes in precipitation and temperature under climate change

---

---

Simulation of precipitation results in the HADGEM2\_ES climate model show that rainfall changes in the period 2021-2050 in the HADGEM2\_ES model in the third month of March have the highest rainfall and in the seventh month (July) have the lowest precipitation. Also, the average monthly long-term rainfall under the RCP8.5 scenario increased by 4.6% in the next period compared to the base period. The results of the temperature simulated by the climate model used for Sonqor city show an increasing trend so that this temperature increase is equal to 11.4% compared to the base period and this temperature increase is equal to 1.5 degrees Celsius on average. Also, in this model, the lowest temperature increase is related to the December and the highest temperature increase is related to the seventh month (July).

#### Agricultural water supply

the highest supply was related to the three cropping patterns (cropping pattern with the highest income) and the lowest supply was related to cropping pattern 1 (cropping pattern under existing conditions). Also, the highest deficiency was related to cropping pattern 1 and the lowest deficiency was related to 3 cropping pattern. If the cropping pattern is used, in SVR, IHACRES and GEP models, we are faced with 30, 28.3 and 26.7 percent deficiency, respectively.

#### Reservoir water storage

in all three models of SVR, GEP and IHECRASS, if the cropping pattern (1) is used, the volume of the reservoir is higher than that of the cropping pattern (2) and (3).

#### Conclusions

results show an increase in temperature between 0.1 and 1.4 degrees Celsius in both of the above models, which is consistent with the results of HafezParast et al. (2017). By comparing the simulated runoff in GEP and SVM models, it can be observed that the accuracy of the Support Vector Machine is higher than the gene expression programming model, which is consistent with the results of Solgi et al. (2017) and Ahmadi et al. (2016). The results also show that the SVM model is less accurate than the IHACRES and GEP models in simulating the peak discharge values.

**Keywords:** Climate change, CMIP5 models, Rainfall-Runoff, Support vector regression, Genetic Programming, IHACRES, WEAP, Crop pattern

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 20 June 2021 Revised: 09 July 2021 Accepted: 18 July 2021 ePublished: 20 February 2022

---

**Cite this article:** Rahimi, B., & Hafezparast mavadat, M. (2022). Impact of CMIP5 climate change model in Jamishan dam reservoir simulation under cropping pattern change scenario., *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 1(1), 1-23. DOI: 10.22126/ATWE.2021.6603.1000

Publisher: Razi University

© The Author(s).





## اثرات تغییر اقلیم مدل CMIP5 در شبیه سازی مخزن سدجامیشان تحت سناریوی تغییر الگوی کشت

بنفشه رحیمی<sup>۱</sup> ID، مریم حافظ پرست مودت<sup>۲</sup> ID

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: banafshe.rahimy@gmail.com  
<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: m.hafezparast@razi.ac.ir

### چکیده

امروزه اثرات تغییر اقلیم و گرمایش جهانی به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای در جهان به اثبات رسیده است. وقوع این شرایط، فرآیندهای هیدرولوژیکی را که از منابع اصلی تأمین کننده آب حوضه است را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این تحقیق مقادیر ماهیانه دما، بارش و دبی سد جامیشان در سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۸۸ به‌عنوان دوره پایه در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر پارامترهای بارش و دما در این منطقه از خروجی‌های سناریو RCP8.5 مدل HADGEM2\_ES از سری مدل‌های گزارش پنجم CMIP5 استفاده شد و خروجی این مدل‌ها برای منطقه موردنظر ریزمقیاس شد. در این پژوهش با استفاده از روش عامل تغییر داده‌های مدل اقلیمی ریزمقیاس شده و پارامترهای ماهانه دما و بارش سد جامیشان برای دوره‌های ۲۰۵۰-۲۰۲۱ تولید گردید. به‌منظور بررسی رواناب منطقه موردنظر در اثر تغییر اقلیم به بررسی و مقایسه‌ی مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان‌ژن و آپهکرس پرداخته شد. سپس شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه آبریز سدجامیشان در مدل ویپ با الگوهای کشت موجود در منطقه موردبررسی قرار گرفت. نتایج مدل اقلیمی به‌طور میانگین افزایش دمای ۱/۵ درجه سلسیوس و افزایش بارش ۵ درصد را نشان می‌دهد. به‌طور کلی بررسی نتایج حاصل از پیش‌بینی دبی در هر سه مدل رگرسیون بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان‌ژن و آپهکرس حاکی از کاهش رواناب است که بیشترین کاهش رواناب مربوط به رگرسیون بردار پشتیبان با ۲۱/۶ درصد و کمترین کاهش رواناب مربوط به آپهکرس با ۴ درصد می‌باشد و در این پژوهش مدل‌های آپهکرس و برنامه‌ریزی بیان‌ژن نسبت به روش رگرسیون بردار پشتیبان از دقت مطلوب‌تری برخوردار است. شبیه‌سازی الگوی کشت‌های مختلف در ویپ نشان می‌دهد که بیش‌ترین تأمین برابر با ۷۴/۹ درصد در مدل برنامه‌ریزی بیان‌ژن و کمترین تأمین برابر با ۷۰ درصد در مدل رگرسیون بردار پشتیبان که به ترتیب مربوط به الگوی کشت یک و الگوی کشت سه می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تغییر اقلیم، مدل‌های گزارش پنجم، بارش-رواناب، ماشین بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان‌ژن، آپهکرس، ویپ، الگوی کشت

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۳۰ خرداد ۱۴۰۰ اصلاح: ۱۸ تیر ۱۴۰۰ پذیرش: ۲۷ تیر ۱۴۰۰ چاپ الکترونیکی: ۰۱ اسفند ۱۴۰۰

**استناد:** رحیمی، ب. و حافظ پرست مودت، م. (۱۴۰۰). اثرات تغییر اقلیم مدل CMIP5 در شبیه‌سازی مخزن سدجامیشان تحت سناریوی تغییر الگوی کشت، فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۱(۱)، ۱-۲۳. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2021.6603.1000



## مقدمه

محدودیت منابع آب یکی از چالش‌های عظیم در جهان است و از طرفی تأثیر پدیده تغییر اقلیم و گرمایش جهانی به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای در جهان به اثبات رسیده است. امروزه افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای موجب تغییر متغیرهای اقلیمی کره زمین شده و پیش‌بینی می‌شود که این تغییرات در آینده نیز ادامه یابد. با تغییر اقلیم، رژیم هیدرولوژیکی رودخانه و در نتیجه فراوانی وقوع و شدت سیلاب و کیفیت آب رودخانه نیز تغییر می‌کند (پورمحمدی و همکاران، ۱۳۹۵). بررسی پارامترهای تغییر اقلیم نقش مهمی در پیش‌بینی رواناب سطحی به منظور شناسایی و مدیریت ذخایر منابع آبی دارد. از سوی دیگر، با توجه به محدودیت منابع آب شیرین قابل استحصال، پیش‌بینی هرچه دقیق‌تر دبی جریان و تغییرات آن در طول سال از ارکان اساسی برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب‌های سطحی می‌باشد (نبی زاده و همکاران، ۱۳۹۲).

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

پژوهش‌های مختلفی در راستای بررسی پدیده تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب تحت اثر تغییر اقلیم شده است از جمله: رحیمی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی به بررسی تأثیر تغییر اقلیم با استفاده از خروجی مدل BNU\_ESM تحت سناریو ۸/۵ پرداختند. نتایج حاکی از افزایش دمای ۲/۹ درجه سلسیوس می‌باشد. به‌طور کلی بررسی نتایج حاصل از پیش‌بینی دبی در مدل آیهکرس<sup>۱</sup> حاکی از کاهش ۲۶/۴ درصدی نسبت به دبی مشاهده‌ای می‌باشد. پورخیراله و همکاران (۱۳۹۶) برای مدل‌سازی ارزیابی تغییر اقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی ایستگاه دهلران از خروجی مدل اقلیمی CSIROK3-5-0 تحت سناریوی RCP8.5<sup>۲</sup> استفاده کردند. نتایج حاکی از کاهش میزان متوسط رواناب از ۶/۲۷ مترمکعب بر ثانیه در دوره پایه به ۵/۷۸ مترمکعب بر ثانیه در دوره آتی است. حافظ‌پرست و همکاران (۱۳۹۵) به منظور ارزیابی عدم قطعیت تغییر اقلیم بر آبدهی ورودی سد جامیشان واقع در شمال شرقی استان کرمانشاه، با استفاده از خروجی ۷ مدل اقلیمی تغییرات بارش و دما را در دو دوره مورد مطالعه قراردادند. نتایج حاکی از آن است که در دوره اول بارش و رواناب سالانه کاهش و دمای سالانه افزایش می‌یابد همچنین در دوره دوم تغییرات شدیدتر است و دمای سالانه بین ۲+ و ۰/۶۶- درجه سلسیوس تغییر می‌کند. رحیمی و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی به مقایسه مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان ژن و آیهکرس در پیش‌بینی رواناب ناشی از مدل‌های اقلیمی گزارش پنجم در سد جامیشان پرداختند. در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ رواناب کاهش یافته و دمای مدل‌های اقلیمی بین ۰/۱ تا ۱/۴ درجه سلسیوس افزایش یافته است. مدل‌های آیهکرس و برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به روش رگرسیون بردار پشتیبان از دقت مطلوب‌تری برخوردار است. سلگی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی با استفاده از دو مدل هوشمند برنامه‌ریزی بیان ژن و ماشین بردار پشتیبان به پیش‌بینی بارش ماهانه شهرستان نهاوند پرداختند. عملکرد هردو مدل خوب و مشابه بوده ولی با توجه به بررسی معیارهای ارزیابی مختلف به مدل برنامه‌ریزی بیان ژن عملکرد قابل قبول‌تری داشته است. لطفی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل آیهکرس و داده‌های دبی روزانه ایستگاه خرچینگل در خروجی حوضه و نیز داده‌های بارش و دمای روزانه ایستگاه خلیان در مرکز نقل حوضه شبیه‌سازی کردند. ضریب کارایی مدل نش ساتکلیف (E) و میانگین خطای کل (BIAS) و میانگین خطای نسبی پارامتریک (ARPE) ارائه شد که مقدار به دست آمده E در دوره کالیبراسیون و صحت سنجی به ترتیب ۰/۵۵ و ۰/۴۶ به دست آمد. در پژوهشی جهت پیش‌بینی جریان رودخانه در منطقه‌ای کوهستانی و نیمه‌خشک واقع در شمال غربی چین از ماشین بردار پشتیبان استفاده شد و دریافتند که مدل ماشین بردار پشتیبان عملکردی مناسب جهت پیش‌بینی جریان رودخانه در مناطق کوهستانی نیمه‌خشک داشته و نسبت به شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی از دقت مطلوبی برخوردار است (هی و همکاران، ۲۰۱۴). پناهی و همکاران (۱۳۹۴) در پژوهشی به بررسی مدیریت یکپارچه منابع آب حوضه آبریز در شرایط تغییر اقلیم در سد جامیشان پرداختند. نتایج حاکی از آن است که میانگین دمای سالانه افزایش و نیاز آبی محصولات زراعی در الگو کشت یک (شرایط موجود) دارای بیشترین نیاز آبی و الگوی کشت سه (بیشترین میزان درآمد) دارای کمترین نیاز آبی می‌باشد. مدل‌سازی منابع و مصارف آب نشان داد که شبکه آبیاری جامیشان ۱۰۰ درصد تأمین و شبکه نازلین با ۴۵ درصد کمبود همراه خواهد بود. سلیمی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی با استفاده از دبی ۴۰ ساله رودخانه کمیش در مدل ویپ به شبیه‌سازی مخزن سد هرسین پرداختند. نتایج نشان داد که حالت بهینه نسبت به شبیه‌ساز کمترین هدر رفت آب را داشته است. فاطمی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی مدل‌سازی سیستم منابع و مصارف حوضه سد اکباتان و منبع آب زیرزمینی تأمین‌کننده آب شرب را در مدل ویپ شبیه‌سازی نمودند. نتایج حاکی از آن بود که در سال‌های ۱۴۱۰ و ۱۴۳۰ به ترتیب با کمبود ۱۹/۶ و ۳۴/۳ درصدی مواجه خواهد بود. کلبعی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از مدل باش رواناب

<sup>1</sup> IHACRES Software

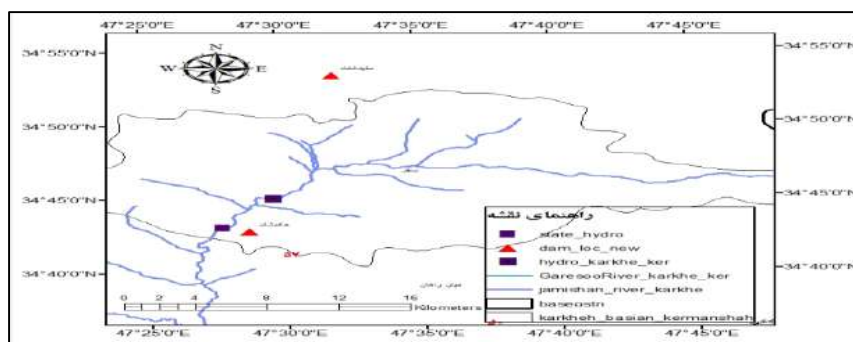
<sup>2</sup> Representative Concentration Pathway

آیهکرس و داده‌های دما، بارش و رواناب ماهیانه در دوره پایه (۱۹۹۴-۲۰۱۰)، میزان رواناب رودخانه قره‌سو در دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ شبیه‌سازی کردند. سپس وضعیت احتمالی تخصیص منابع آب و تأمین نیاز بخش کشاورزی را با استفاده از مدل ویپ مورد ارزیابی قراردادند. در پژوهشی با استفاده از رویکرد مدل‌سازی ویپ<sup>۱</sup> آثار تغییرات جهانی تغییر اقلیم و سناریو توسعه اجتماعی و اقتصادی بر منابع آب هیمالیان<sup>۲</sup> در هند مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد تغییرات اقتصادی و اجتماعی در آینده نسبت به تغییرات آب و هوایی تأثیرات بسیار بیشتری بر منابع آب منطقه موردبررسی خواهد داشت (ماملانچ و همکاران،<sup>۳</sup> ۲۰۲۰). با بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر سیستم تأمین آب دره میدل در آدر مراکش در مدل ویپ، نشان داد که این مدل به‌عنوان نوعی ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری، پیچیدگی مسائل مربوط به آب را موردتوجه قرار می‌دهد (کارمایی و همکاران،<sup>۴</sup> ۲۰۱۹). به‌منظور ارزیابی سناریوهای مختلف برای رسیدن به خودکفایی در بخش آب به کمک مدل شبیه‌ساز ویپ نشان داد اگر با روند فعلی مصرف منابع آب ادامه پیدا کند تا سال ۲۰۲۵ با کمبود ۲۶ درصد در بخش‌های مختلف آب مواجه خواهند بود (موهی و همکاران،<sup>۵</sup> ۲۰۱۶). با استفاده از مدل شبیه‌ساز ویپ به‌منظور ارزیابی وضعیت منابع آب در آینده تحت اثر تغییر اقلیم بر روی دریاچه ژوریس نشان داد کاهش جریان‌های ورودی سبب تشدید رقابت بین بخش شرب، کشاورزی و صنعت خواهد شد (سمبو و همکاران،<sup>۶</sup> ۲۰۱۵). در تحقیق دیگری، به منظور ارزیابی وضعیت منابع آب در حوضه پهنای چین با در نظر گرفتن توسعه شهرنشینی و سناریوهای مختلف، برای استراتژی برنامه‌ریزی شهری و مدیریت منابع آب و تغییر سیاست تخصیص منابع آب، از مدل شبیه‌ساز ویپ استفاده شد. نتایج نشان داد این مدل توانایی خوبی جهت مدل‌سازی استراتژی‌ها و برآورد آن‌ها در دوره‌های زمانی بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت را دارد (خو و همکاران،<sup>۷</sup> ۲۰۱۵).

همان‌طور که اشاره شد، در مطالعات گذشته تاکنون اثرات تغییر اقلیم بر منابع و مصارف سد جامیشان در الگوهای کشت مختلف با مدل‌های گزارش پنجم ارزیابی نشده است و نیز تغییر مقادیر تخصیص به نیازها در مدل ویپ در اثر ورودی‌های سه مدل بارش رواناب برنامه ریزی بیان ژن، آیهکرس و رگرسیون بردار پشتیبان بررسی نشده است که از نوآوری‌های این پژوهش می‌باشد. هدف از این پژوهش به ترتیب در سه مرحله ۱- تعیین تغییرات بارش و دما در دوره آتی توسط مدل اقلیمی گزارش پنجم و سناریوی RCP8.5 ۲- پیش‌بینی رواناب با سه مدل برنامه ریزی بیان ژن، آیهکرس و رگرسیون بردار پشتیبان در اثر تغییر اقلیم و ارزیابی هر یک از مدل‌ها و کارایی آن‌ها در منطقه موردنظر ۳- شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه آبریز در مدل ویپ برای دوره آتی در سه الگوی کشت مختلف و سه روش هیدرولوژیکی مرحله قبل و تحلیل خروجی‌ها و تعیین تغییرات حجم مخزن سد جامیشان مشخص شده است.

## روش پژوهش

حوضه سد جامیشان با مساحت ۵۲۴ کیلومترمربع و اقلیم نیمه مرطوب تا نیمه‌خشک سرد، از شمال به حوضه آبریز گاوهرود، از شرق به حوضه آبریز خرم‌رود، از جنوب به حوضه آبریز رودخانه مریم‌نگار و از غرب به زیر حوضه‌های عالی‌سیاه و گاوهرود منتهی می‌شود. این حوضه در مختصات جغرافیایی ۳۰° ۳۲' الی ۳۴° ۵۳' عرض شمالی و ۲۲° ۴۷' تا ۲۲° ۴۷' طول شرقی است و در زاگرس واقع گردیده است. این محدوده در تقسیمات کشوری در استان کرمانشاه واقع می‌باشد.



شکل ۱. نقشه منطقه مطالعاتی سد مخزنی جامیشان (شهرستان سنقر)

- 1 Weap
- 2 Himalayan
- 3 Mombanch et al
- 4 Middle Draa
- 5 Karmaoui et al
- 6 Mohie
- 7 Sambou et al

## انتخاب ایستگاه

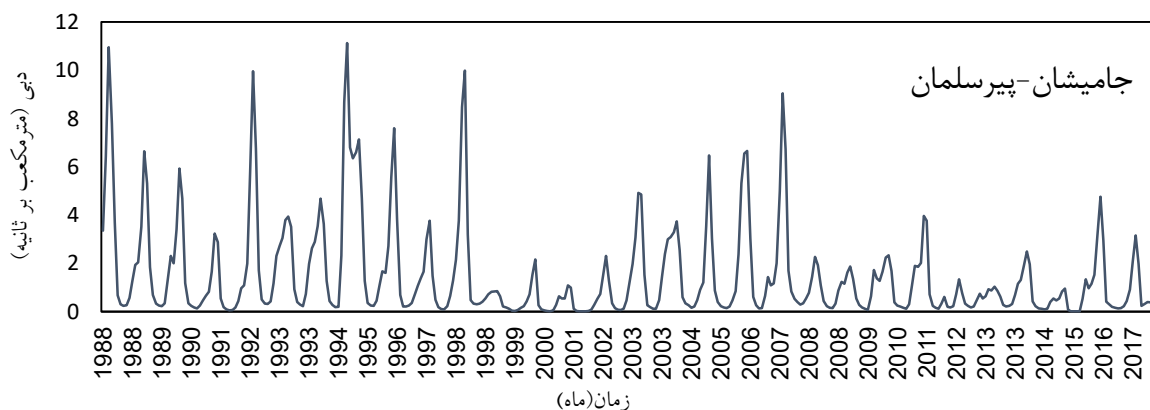
پس از بررسی ایستگاه‌های منطقه و طول آماری موجود، ایستگاه سینوپتیک سنقر به‌عنوان ایستگاه مینا برای پارامترهای دمای میانگین (درجه سلسیوس) و بارش (میلی‌متر) و از ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه نیز برای تکمیل نواقص آماری دما و بارش منطقه مورد مطالعه استفاده شده است و ایستگاه هیدرومتری پیرسلیمان برای پارامتر دبی (مترمکعب بر ثانیه) انتخاب شد. پس از تکمیل پارامترهای آماری مذکور، دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۸ میلادی به‌عنوان دوره پایه انتخاب شده است. مشخصات ایستگاه‌های فوق در جدول ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه هواشناسی و هیدرومتری منطقه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	پارامتر	طول جغرافیایی (درجه و دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه و دقیقه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
سنقر	سینوپتیک	دمای میانگین و بارش	۳۵° ۴۷'	۴۷° ۳۴'	۱۶۸۰
کرمانشاه	سینوپتیک	دمای میانگین و بارش	۴۷° ۹'	۳۴° ۲۱'	۱۳۱۸
پیرسلیمان	هیدرومتری	دبی	۲۷° ۴۷'	۴۳° ۳۴'	۱۵۳۰

## آبدهی رودخانه

در این تحقیق به‌منظور بررسی پتانسیل آبی رودخانه از سری زمانی بلندمدت ۳۰ ساله (۱۹۸۸-۲۰۱۷) ایستگاه پیرسلیمان استفاده شده است. نمودار دبی بلندمدت ۳۰ ساله رودخانه در شکل ۲ آمده است.



شکل ۲. نمودار دبی سی‌ساله جامیشان در ایستگاه پیرسلیمان (۱۹۸۸-۲۰۱۷)

## منابع آب زیرزمینی

با ارزیابی نقشه‌های منابع آب زیرزمینی موردنظر در منطقه مطالعاتی، چنین برداشت می‌شود که به دلیل پراکندگی چاه‌ها در مقایسه با اراضی بخش عمرانی و ارزش‌گذاری سرمایه‌گذاری در طی سال‌های اخیر، نمی‌توان از منابع آب زیرزمینی چشم‌پوشی کرد و این مهم در مطالعات برنامه‌ریزی منابع آب همواره موردتوجه می‌باشد. در حوضه مطالعاتی در شبکه نازلیان ۸ میلیون مترمکعب و در شبکه جامیشان ۲۴ میلیون مترمکعب از آب زیرزمینی استفاده می‌شود.

## مصارف آب کشاورزی

حوضه مطالعه سد جامیشان از بهترین مناطق مساعد باغات و کشاورزی می‌باشد که مصرف آب کشاورزی در این منطقه شامل ۲ شبکه آبیاری جامیشان و نازلیان است. در این تحقیق سه الگوی کشت مورد ارزیابی قرار گرفته است. راندمان آبیاری برای آبیاری سطحی برابر با ۳۰ درصد و برای آبیاری تحت فشار برابر با ۵۰ درصد در نظر گرفته شده است (مطالعات مرحله اول سد جامیشان، ۱۳۸۳).

## نرم‌افزار کراپ وات<sup>۱</sup>

نرم‌افزار کراپ وات یک برنامه دقیق برای کمک به مهندسان آبیاری و کشاورزی و هواشناسان می‌باشد تا با استفاده از آن بتوانند محاسبات نیاز آبیاری، تبخیر و تعرق گیاه و مدیریت آبیاری را به‌سادگی انجام دهند. نرم‌افزار کراپ وات برای محاسبه نیاز آبی محصول زراعی و نیاز آبیاری از دما، نوع خاک و داده‌های گیاهی استفاده می‌کند. همچنین این نرم‌افزار قادر است برنامه آبیاری را برای مدیریت شرایط گوناگون و تعیین برنامه تأمین آب موردنیاز الگوی طرح‌ها را محاسبه کند. داده‌های موردنیاز در نرم‌افزار کراپ‌وات شامل: داده‌های اقلیمی (حداقل و حداکثر دما، سرعت باد، ساعات آفتابی و رطوبت نسبی)، بارش، الگوهای کشت (تاریخ کشت، محصولات و سطح زیر کشت)، محصولات (ضرایب گیاهی، نوع گیاه، حداکثر عمق ریشه و ...)، خاک (حداکثر عمق ریشه، آب قابل‌دسترس، سرعت نفوذ و ...). می‌باشد. در این پژوهش سه الگوی کشت مختلف شامل الگوی وضع موجود، پردرآمد و کم‌مصرف در نظر گرفته شده است (جدول ۲). از آنجایی که تغییر پارامترهای اقلیمی علاوه بر تغییر مقدار منابع آب در دسترس سبب تغییر در نیاز آبیاری گیاهان نیز خواهد شد لذا در دوره و سناریو موردنظر نیاز آبیاری محصولات زراعی منطقه برآورد گردیده است. به این منظور پارامتر ساعات آفتابی برای دوره‌های آتی همانند دوره مشاهده‌ای در نظر گرفته شده و سایر پارامترها (دمای حداقل و حداکثر، دمای متوسط و بارش) با استفاده از مدل HADGEM2\_ES استخراج شده است.

جدول ۲: درصد کشت محصولات در الگوهای مختلف

محصولات	الگوی کشت شماره (۱)	الگوی کشت شماره (۲)	الگوی کشت شماره (۳)
گندم	۲۵	۳۰	۱۵
جو	۲۵	۲۵	۱۵
ذرت دانه‌ای	۶/۷	۴	۴/۱
ذرت علوفه‌ای	۰/۷	۲	۰/۴
یونجه	۴/۳	۳	۲/۶
سویا	۹/۴	۰	۵/۶
کلزا	۰	۱۰	۰
جالیز (هندوانه)	۳/۲	۵	۱۰
چغندر قند	۱۳/۵	۶	۱۵
نخود	۳/۲	۵	۳/۲
باغات میوه	۵	۵	۵
انگور	۴	۵	۱۴/۱
سبزیجات تابستانه	۰	۰	۱۵

## نیاز زیست‌محیطی

در این پژوهش حداقل نیاز زیست‌محیطی (حد قابل قبول) بر اساس میانگین ۳۰ ساله دبی رودخانه جامیشان با استفاده از روش مونتانا استخراج شده که در جدول ۳ آورده شده است (مطالعات مرحله اول سد جامیشان، ۱۳۸۳).

جدول ۳: متوسط ماهیانه نیاز زیست‌محیطی (مترمکعب در ثانیه)

ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئیه	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۱۷

## تغییر اقلیم

به کلیه تغییرات بلندمدت (معنی‌دار) به وجود آمده در پارامتر اقلیمی که ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای می‌باشد، تغییر اقلیم گویند. سناریوهای انتشار بر اساس سطح واداشت تابشی تا سال ۲۱۰۰ شامل ۴ سناریو RCP2.6, RCP4.5, RCP6.5 و RCP8.5 می‌باشد. در این پژوهش از سناریوی RCP8.5 به‌عنوان سناریوی بدبینانه استفاده شده است. برای تبدیل فرمت مدل‌های اقلیمی موردنظر به داده‌های

<sup>۱</sup> CROPWAT Software

منطقه مورد مطالعاتی از نرم افزار GIS استفاده شده است. مدل HADGEM2\_ES به دلیل بیشترین هماهنگی با پارامترهای بارش و دمای تاریخی منطقه مورد نظر انتخاب شده است. ریزمقیاس سازی در این پژوهش به روش عامل تغییر انجام گردید (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۹).

### شبیه سازی بارش - رواناب

به منظور بررسی پارامترهای اقلیمی بر رواناب، استفاده از مدل های بارش-رواناب ضروری است. در این پژوهش، برای تولید رواناب ماهانه از رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVR)، برنامه ریزی بیان ژن (GEP) و آبهکرس (IHACRES) استفاده شده است. لازم به ذکر است که دوره آبی در این مطالعه ۲۰۵۰-۲۰۲۱ در نظر گرفته شده است.

$$f(x) = (w)^t \cdot \phi + b \quad (1)$$

$$Y = f(x) + \text{noise} \quad (2)$$

### ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان یادگیری نظارت شده برای دسته بندی، تخمین و برآورد تابع برازش داده ها به کار می رود، به طوری که کمترین خطا در دسته بندی داده ها و یا تابع برازش رخ دهد. ماشین بردار پشتیبان در سال ۱۹۹۲ توسط وپنیک که یک ریاضیدان روس بود، بر پایه نظریه یادگیری آماری بنا گردیده است. ماشین بردار پشتیبان یک سیستم یادگیری کارآمد بر مبنای تئوری بهینه سازی مقید است که از اصل استقرای کمینه سازی خطای ساختاری استفاده می نماید و به یک جواب بهینه کلی منجر می گردد. در رگرسیون بردار پشتیبان تابعی مرتبط با متغیر وابسته Y که خود تابعی از چند متغیر X است، برآورد می شود. رابطه میان متغیرهای مستقل و وابسته با تابع جبری مانند f(x) به علاوه مقداری اغتشاش (خطای مجاز E) مشخص می شود. چنانچه بردار ضرایب و ثابت مشخصه های تابع رگرسیونی و  $\phi$  نیز تابع کرنل باشد، آنگاه هدف پیدا کردن فرم تابعی برای f(x) است. با آموزش مدل SVM<sup>۴</sup> از طریق مجموعه ای از نمونه ها (مجموع آموزش) تابع f(x) محقق می شود. برای محاسبه w و b لازم است تابع خطا معادله ۳ در مدل SVM با در نظر گرفتن شرایط مندرج (قیود) در معادله ۴ بهینه شود.

$$(w)^t \cdot \phi(X_i) + b - y_i \leq \epsilon + \epsilon_i^* \quad (3)$$

$$\frac{1}{2} (w)^t \cdot w + C \sum_{i=1}^N \epsilon + C \sum_{i=1}^N \epsilon_i^*$$

$$y_i - (w)^t \cdot \phi(X_i) - b \leq \epsilon + \epsilon_i \quad (4)$$

$$\epsilon + \epsilon_i^* \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

در معادلات بالا C عددی صحیح و مثبت است که عامل تعیین جریمه در هنگام رخ دادن خطای آموزش مدل است.  $\phi$ : تابع کرنل، N: تعداد نمونه ها و دو مشخصه  $\epsilon_i$  و  $\epsilon_i^*$  متغیرهای کمبود هستند. در نهایت تابع بردار پشتیبان رگرسیونی را می توان به شکل زیر بازنویسی کرد: که در معادله ۵،  $\bar{\alpha}$  میانگین ضرایب لانگراژ می باشد. محاسبه  $\phi(X)$  در فضای مشخصه آن ممکن است بسیار پیچیده باشد. برای حل این مشکل روند معمول در مدل SVR انتخاب یک تابع کرنل به صورت رابطه ۶ است:

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \bar{\alpha} \phi(X_i)^t \cdot \phi(X_i) + b \quad (5)$$

$$K(X_i, X) = \phi(X_i)^t \cdot \sqrt{b^2 - 4ac} \quad (6)$$

بنابراین برای حل مسئله باید مقادیر C،  $\epsilon$  و پارامترهای مربوط به تابع کرنل انتخابی مشخص باشند که دقت در تعیین آن ها در کاهش خطای مسئله تاثیر گذار است (دیباک و همکاران، ۲۰۰۱). می توان از توابع مختلف کرنل برای ساخت انواع SVM- $\epsilon$  استفاده کرد. انواع توابع

<sup>1</sup> Support Vector Regression

<sup>2</sup> Genetic Expression Programming

<sup>3</sup> Identification of unit Hydrographs And Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data

<sup>4</sup> Support Vector Mashine



کرنل قابل‌استفاده در مدل ماشین بردار پشتیبان رگرسیونی عبارت‌اند از: کرنل چندجمله‌ای با سه مشخصه هدف و کرنل خطی در مطالعات بارش-رواناب عمدتاً از مدل RBF<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. کد نویسی این قسمت توسط زبان برنامه‌نویسی پایتون و کتابخانه اس-کی لیرن<sup>۲</sup> انجام شده است. در این پژوهش برای پیش‌بینی رواناب ماهیانه، داده‌های مشاهده‌ای از سال (۱۹۸۸-۲۰۱۷) مرتب‌شده است که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها به‌عنوان آزمون در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که انتخاب داده‌های آموزش و آزمون در این روش تصادفی بوده است.

### مدل بارش-رواناب آیهکرس

مدل آیهکرس از دو مدل غیرخطی کاهش(تلفات) و مدل خطی هیدروگراف واحد تشکیل می‌شود. از داده‌های مشاهده‌ای بارش، دما و رواناب حوضه در دوره پایه برای واسنجی مدل استفاده می‌شود، در ابتدا مدل آیهکرس برای منطقه مطالعاتی مورد واسنجی قرار می‌گیرد. برای این منظور از داده‌های مشاهده‌ای دما، بارش و دبی ماهانه دوره پایه(۱۹۸۸-۲۰۱۷) استفاده خواهد شد. پس از کالیبراسیون مدل، رواناب ماهانه حوضه برای دو دوره آینده با معرفی داده‌های دما و بارش اصلاح‌شده مدل‌های اقلیمی و برای سناریوهای مختلف پیش‌بینی می‌گردد و در پایان نتایج عملکرد مدل برای مدل‌های اقلیمی مختلف و سناریوهای متفاوت مورد بحث قرار می‌گیرد(خسروانیا، ۱۳۹۲).

### برنامه‌ریزی ژنتیک

برنامه‌ریزی بیان ژن که در ادامه سیر تکاملی مدل‌های هوشمند به وجود آمده است، جزء روش‌های الگوریتم گردشی محسوب می‌شود که مبنای تمامی آن‌ها بر اساس نظریه تکامل داروین استوار است. مزیت برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به مدل‌های دیگر از جمله شبکه عصبی مصنوعی این است که در برنامه‌ریزی بیان ژن، ابتدا ساختار (متغیرهای ورودی، هدف و مجموع توابع) تعریف شده و سپس ساختار بهینه مدل و ضرایب طی فرایند آموزش تعیین می‌شوند، درحالی‌که در شبکه‌های عصبی، ابتدا باید ساختار تعیین شده، فقط ضرایب مدل طی فرایند آموزش حاصل می‌شوند. همچنین این الگوریتم به‌طور خودکار می‌تواند متغیرهای ورودی که در مدل بیش‌ترین تأثیر را دارند، انتخاب کند (سلگی و همکاران، ۱۳۹۶). در این پژوهش برای پیش‌بینی رواناب ماهیانه داده‌های مشاهده‌ای از سال (۱۹۸۸-۲۰۱۷) مرتب‌شده است که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد داده‌ها برای آزمون در نظر گرفته شده است.

### شبیه‌سازی منابع و مصارف حوضه آبریز جامیشان

نرم‌افزار ویپ بر اساس معادله پایه بیلان آبی (معادله ۷) عمل کرده و آن را می‌توان در سیستم‌های کشاورزی و شهری، سیستم رودخانه‌ای پیچیده یا حوضه‌های مستقل به کار گرفت. علاوه بر این، ویپ می‌تواند طیف گسترده‌ای از اجزای مهندسی و طبیعی سیستم‌ها، از جمله جریان پایه، بارش رواناب و تغذیه آب‌های زیرزمینی از بارش را شبیه‌سازی کند. از کاربردهای این مدل می‌توان به تجزیه و تحلیل حبابه‌ها و اولویت تخصیص، حفاظت از آب، بهره‌برداری از مخزن، روند یابی آلودگی و کیفیت آب، تولید انرژی برقایی، ارزیابی آسیب‌پذیری تقاضای منطقه‌ای و الزامات زیست‌محیطی اشاره کرد. مزیت اصلی مدل ویپ در رویکرد یکپارچه در شبیه‌سازی سیستم‌های آبی و جهت‌گیری آن در راستای سیاست‌ها می‌باشد (فاطمی و همکاران، ۲۰۱۶).

$$St+1 = St + Qt - Et - Rt - Spill \quad (7)$$

در معادله بالا  $S_{t+1}$  حجم ذخیره در دوره  $t+1$  و  $S_t$ ،  $Q_t$ ،  $E_t$ ،  $R_t$  و  $Spill$  به ترتیب حجم ذخیره ابتدای دوره  $t$ ، جریان ورودی، میزان تبخیر خالص، حجم رهاسازی و سرریز در همان دوره می‌باشند. مدل ویپ بر اساس روش بهره‌برداری استاندارد SOP عمل می‌کند، در این روش خروجی تابعی از کل آب در دسترس است.

### معیارهای ارزیابی مدل

به‌منظور مقایسه و ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد بررسی از پارامترهای میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای مطلق میانگین (MAE)، نش سائکلیف (MSE)<sup>۴</sup> و ضریب تبیین (R) استفاده شده است. فرمول‌های استفاده‌شده برای این پارامترها به شرح زیر می‌باشد:

<sup>1</sup> Radial Basis Function

<sup>2</sup> Sklearn

<sup>3</sup> Root Mean Square Error

<sup>4</sup> Mean Absolute Error

<sup>5</sup> Mean Square Error

$$R = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 (O_i - \bar{O})^2}} \quad (8)$$

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (9)$$

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)^{0.5} \quad (10)$$

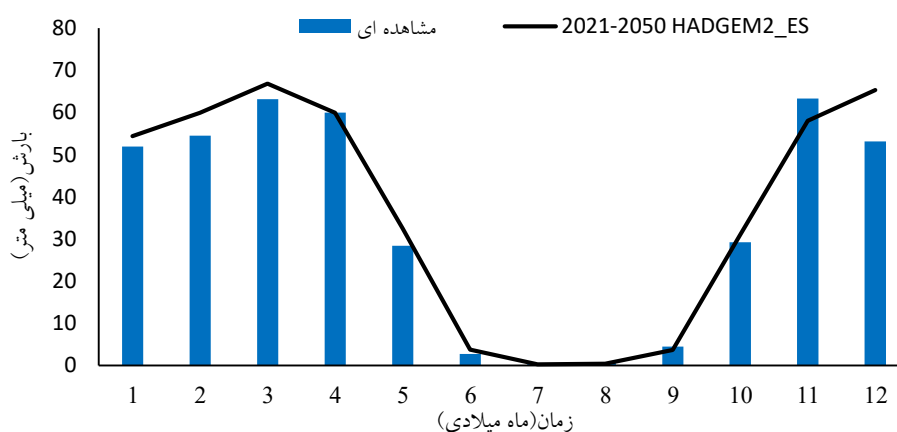
$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \quad (11)$$

در این روابط، N تعداد داده‌ها،  $O_i$  مقادیر مشاهده‌ای،  $P_i$  مقادیر محاسباتی توسط مدل‌ها و  $\bar{O}_i$  و  $\bar{P}$  مقادیر متوسط مشاهده‌ای و محاسباتی توسط مدل می‌باشد.

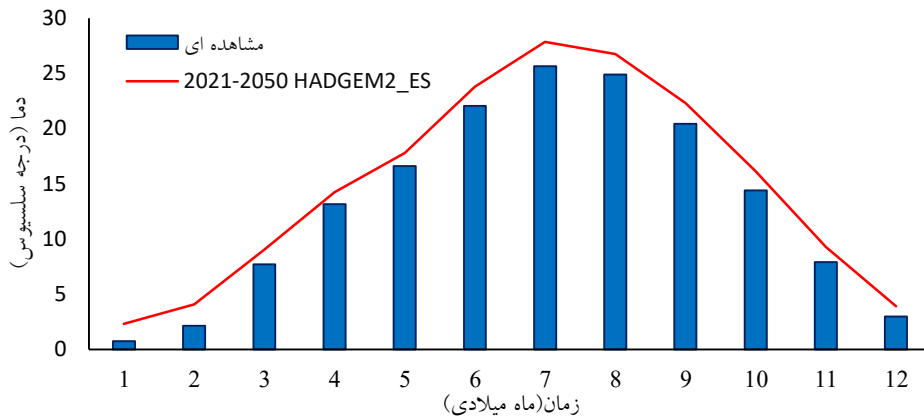
### یافته‌ها

#### نتایج بارش و دمای پیش‌بینی شده مدل‌های اقلیمی

با استفاده از داده‌های بارش و دما در دوره پایه و خروجی مدل‌های گردش عمومی گزارش پنجم نتایج شبیه‌سازی پارامترهای بارش و دما بعد از ریزمقیاس سازی با استفاده از روش عامل تغییر برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ به ترتیب در شکل ۳ و ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۳. بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی تحت سناریو RCP8.5 در دوره آتی و مشاهده‌ای



شکل ۴. دما شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های اقلیمی تحت سناریو RCP8.5 در دوره آبی و مشاهده‌ای

در شکل ۳ نتایج بارش شبیه‌سازی در مدل اقلیمی HADGEM2\_ES نشان می‌دهد تغییرات بارندگی در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در مدل HADGEM2\_ES در ماه سوم میلادی (مارس) دارای بیشترین بارندگی و در ماه هفتم میلادی (جولای) دارای کمترین بارش می‌باشد. همچنین میانگین درازمدت ماهانه بارش تحت سناریوی RCP8.5 در دوره آبی ۴/۶ درصد نسبت به دوره پایه افزایش داشته است. در شکل ۴ نتایج دمای شبیه‌سازی شده توسط مدل اقلیمی مورد استفاده برای شهرستان سنقر یک‌روند افزایشی را نشان می‌دهد به طوری که این افزایش دما نسبت به دوره پایه برابر با ۱۱/۴ درصد می‌باشد و این افزایش دما به طور میانگین برابر با ۱/۵ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین در این مدل، کمترین افزایش دما مربوط به ماه دوازدهم میلادی (دسامبر) و بیشترین افزایش دما مربوط به ماه هفتم میلادی (جولای) می‌باشد. نتایج افزایش دما با پژوهش بیشتر پژوهشگران در زمینه تغییر اقلیم تقریباً به اثبات رسیده است و این موضوع به صورت جهانی تأثیرگذار بوده و این افزایش دما با افزایش تبخیر و تعرق و افزایش نیاز آبی مصرف بیشتر آب را هشدار می‌دهد که در منطقه جامیشان نتایج با پژوهش حافظ پرست و همکاران (۱۳۹۶) و پناهی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. تغییرات بارش تحت تأثیر تغییر اقلیم تاکنون در هیچ پژوهشی به صورت معنادار افزایشی یا کاهش‌ی نبوده و در هر منطقه متناسب با شرایط آن نتایج متفاوتی دارد.

### پیش‌بینی دبی

نتایج کالیبراسیون و صحت‌سنجی و در نهایت پیش‌بینی حاصل از سه مدل برنامه‌ریزی بیان ژن، رگرسیون بردار پشتیبان و آیه‌کرس به ترتیب آورده شده است.

### مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (کالیبراسیون و صحت‌سنجی)

در جدول ۴ مقدار پارامترهای برنامه‌ریزی ژنتیک جهت پیش‌بینی رواناب شامل اندازه سر، تعداد کروموزوم‌ها و... نمایش داده شده است. انتخاب این مقادیر به صورت دستی صورت گرفته و به صورت بازه‌ای با توجه به مطالعات قبلی این مدل در پیش‌بینی دبی انتخاب شده است و تا رسیدن به معیارهای خطای مناسب ادامه یافته است.

جدول ۴. مشخصات پارامترهای برنامه‌ریزی ژنتیک برای پیش‌بینی رواناب

تنظیمات عمومی	مقادیر	عوامل ژنتیک	مقادیر
تعداد کروموزوم‌ها	۴۲	سرعت جهش	۰/۰۴۳
اندازه سر	۸	سرعت وارونگی	۰/۱
تعداد ژن‌ها	۵	سرعت تلاقی با یک نقطه	۰/۲
تعداد تولید جمعیت	۱۰۰۰	سرعت تلاقی با دو نقطه	۰/۲
تابع ارتباط‌دهنده	جمع (+)	سرعت تلاقی ژن	۰/۲
معیار خطای تابع برازش	R	سرعت جابه‌جایی	۰/۱

در جدول ۵ مقدار R، RMSE و MAE برای مدل برنامه ریزی بیان ژن نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، دقت مدل GEP در مرحله صحت سنجی  $R=0.7$  و در مرحله واسنجی  $R=0.62$  می باشد.

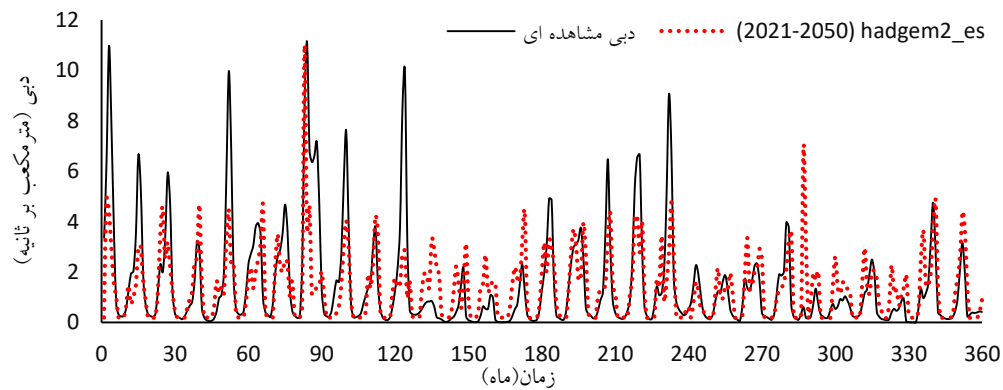
جدول ۵. ضرایب آماری مدل برنامه ریزی بیان ژن در دوره آموزش و آزمون

HADGEM2_ES	شاخص	کالیبراسیون و صحت سنجی
۰/۷	R	آموزش
۰/۰۱	MSE	
۰/۱	RMSE	
۱/۰۹	MAE	
۰/۶۲	R	آزمون
۰/۴۶	MSE	
۰/۶۸	RMSE	
۱/۰۷	MAE	

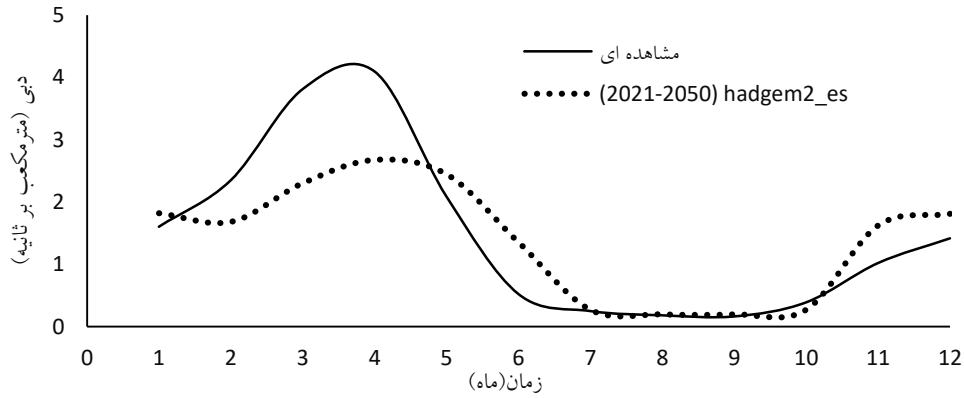
در مدل بیان ژن با ثابت نگاه داشتن ضرایب در قسمت صحت سنجی و با اطمینان به ضرایب خطا، پیش بینی برای دوره آتی صورت گرفته است. مقادیر پیش بینی برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در مقایسه با مقادیر مشاهده ای در شکل ۷ و ۸ ارائه شده است.

### پیش بینی رواناب حاصل از مدل GEP

با استخراج مقادیر رواناب پیش بینی شده توسط مدل اقلیمی ذکر شده، و مقایسه آن با رواناب مشاهداتی نمودارهای مربوط به صورت زیر ترسیم شده است.



شکل ۵. سری زمانی ماهانه دبی مشاهده ای و پیش بینی مدل های اقلیمی در GEP



شکل ۶. میانگین درازمدت دبی مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی در GEP

مقدار پیش‌بینی دبی ماهیانه (نمودار قرمز) در مقایسه با مقدار مشاهداتی (نمودار مشکی) برای مدل HADGEM2\_ES تحت سناریو RCP8.5 روند کاهشی دارد، که این کاهش برابر با ۷ درصد می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل ۶ دبی در ماه‌های پیک کاهش می‌یابد که این کاهش برابر ۳۴/۷ درصد می‌باشد و بیشترین و کمترین تغییر رواناب به ترتیب در ماه چهارم (ماه آوریل) و ماه هشتم (ماه اوت) صورت گرفته است.

### رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (کالیبراسیون و صحت‌سنجی)

پارامترهای این مدل در بازه‌های مختلف تغییر داده شد و بهترین پارامترها در جدول ۶ مشخص شده است.

جدول ۶. مشخصات پارامترهای روش رگرسیون ماشین بردار پشتیبان برای پیش‌بینی رواناب

پارامتر	مقدار
C	۱۰
GAMMA	۲
EPSILON	۲
معیار خطای تابع برازش	R

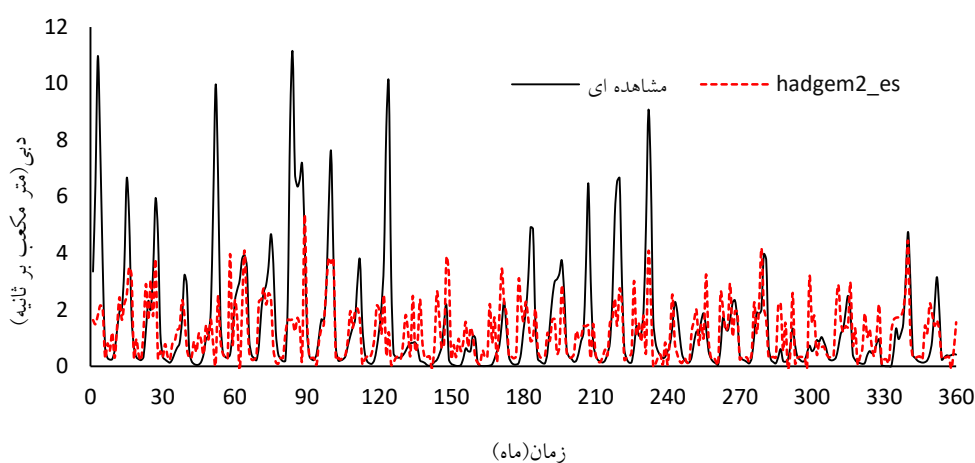
در جدول ۶ مقادیر پارامترهای C، GAMMA، EPSILON و معیار خطای تابع برازش در روش رگرسیون ماشین بردار پشتیبان جهت پیش‌بینی رواناب نمایش داده شده است. در جدول ۷ مقدار R، RMSE و MAE برای روش رگرسیون بردار پشتیبان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت روش رگرسیون بردار پشتیبان در مرحله صحت‌سنجی  $R=0.75$  و در مرحله واسنجی  $R=0.63$  می‌باشد.

### پیش‌بینی دبی با روش رگرسیون بردار پشتیبان (SVR)

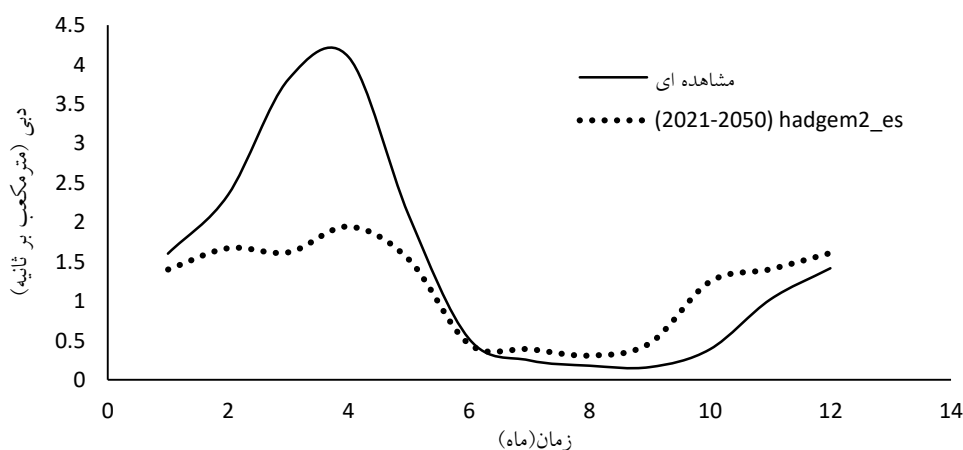
در روش رگرسیون بردار پشتیبان با ثابت نگاه‌داشتن ضرایب در قسمت صحت‌سنجی و با اطمینان به ضرایب خطا، پیش‌بینی برای دوره آبی صورت گرفته است. در شکل ۷ و ۸ تغییرات دبی ماهانه برای مدل‌های اقلیمی آینده و نیز دبی مشاهده‌ای نشان داده شده است.

جدول ۷. ضرایب آماری روش رگرسیون ماشین بردار پشتیبان در دوره آموزش و آزمون

HADGEM2_ES	شاخص	کالیبراسیون و صحت سنجی
۰/۷۵	R	آموزش
۰/۰۱	MSE	
۰/۱۲	RMSE	
۱/۳۵	MAE	
۰/۶۳	R	آزمون
۰/۸۸	MSE	
۰/۹۴	RMSE	
۰/۶۲	MAE	



شکل ۷. سری زمانی دبی مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی در SVR



شکل ۸. میانگین درازمدت دبی مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی در SVR

رواناب پیش‌بینی شده در مدل HADGEM2\_ES تحت سناریوی RCP8.5 نیز روند کاهشی به میزان ۲۱/۶ درصد دارا می‌باشد که این روند کاهشی در پیک‌ها بیشتر است. رواناب پیش‌بینی شده در ۶ ماه اول سال میلادی (ماه‌های ژانویه تا ژوئیه) کمتر از میزان رواناب مشاهده‌ای و در ۶ ماه آخر سال میلادی (ماه‌های جولای تا دسامبر) بیشتر از میزان رواناب مشاهده‌ای است. همچنین در مدل فوق، ماه‌های پیک رواناب پیش‌بینی شده در مقایسه با رواناب مشاهده‌ای با کاهش چشمگیری مواجه شده است. در این مدل تخمین دقیقی برای دبی اوج حاصل نشده است به طوری که دبی پیک برابر با ۱/۹۴ می‌باشد که در مقایسه با رواناب مشاهده‌ای ۵۵ درصد کاهش داشته است.

## پیش‌بینی دبی با مدل آیهکرس

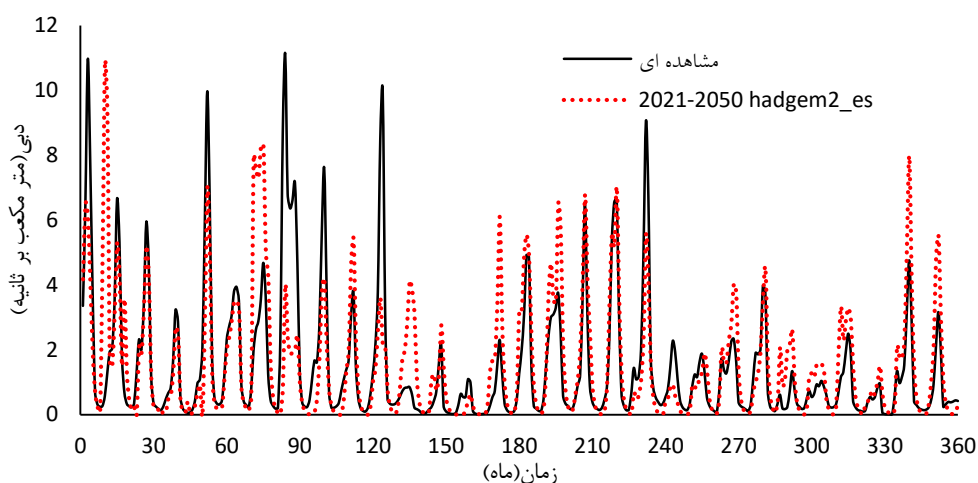
برای واسنجی مدل سال‌های مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفت، نتایج نشان داد که دوره ۲۰۱۷-۱۹۹۶ با ضریب همبستگی (R) و معیارهای خطای ارائه‌شده، بهترین عملکرد را داشته است. پس از واسنجی مدل و کالیبره کردن پارامترهای مدل بارش-رواناب، دوره ۱۹۹۵-۱۹۸۸ برای صحت‌سنجی مدل انتخاب گردید. در جدول ۸ پارامترهای کالیبره مدل آیهکرس نمایش داده شده است. در جدول ۹ مقدار پارامترهای R، RMSE و MAE برای مدل بارش-رواناب آیهکرس نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دقت مدل در مرحله صحت‌سنجی  $R=0.778$  و در مرحله واسنجی  $R=0.776$  می‌باشد. پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل آیهکرس و قابل قبول بودن معیارهای خطا در این مدل پیش‌بینی دبی در دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ برای مدل اقلیمی ذکر شده انجام شده و مقایسه نتایج آن با دبی مشاهده‌ای در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۸. ضرایب کالیبراسیون مدل آیهکرس

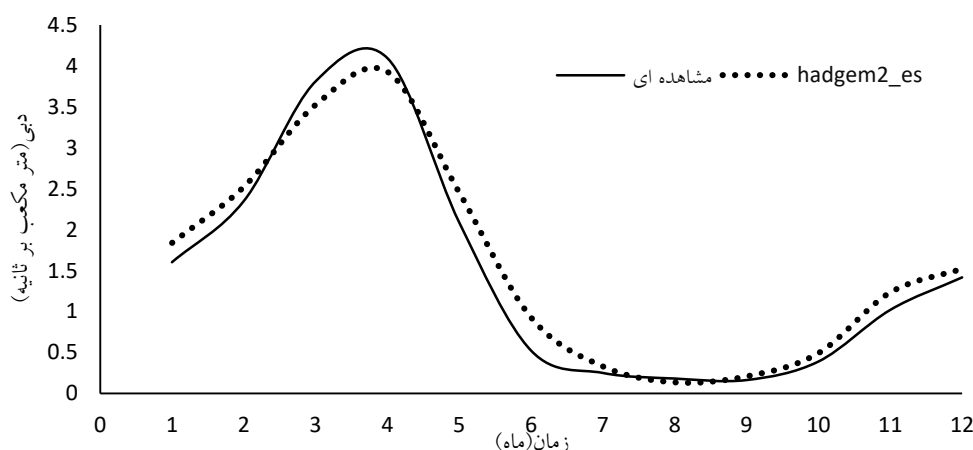
پارامتر	مقادیر بهینه	پارامتر	مقادیر بهینه
ضریب خشکیدگی a(s)	-۰/۶۹۸	زمان خشک شدن T(W)	۴۸
ظرفیت ذخیره رطوبت (C)	۰/۰۰۰۰۴۷	ضریب حرارت حوضه (F)	۴
شاخص بیک B(s)	۰/۳۰۹	ضریب آستانه رطوبت (I)	۰
کاهش جریان آهسته T(s)	۲/۷۵۵	شدت رطوبت خاک (P)	۱
نسبت حجم V(s)	۱		

جدول ۹: ضرایب آماری مدل بارش-رواناب آیهکرس در دوره آموزش و آزمون

FLO_ESM	شاخص	کالیبراسیون و صحت‌سنجی
۰/۷۷۸	R	آموزش
۰/۰۰۶	MSE	
۰/۰۸	RMSE	
۰/۸۱	MAE	
۰/۷۷۶	R	آزمون
۰/۲۱	MSE	
۰/۴۶	RMSE	
۰/۳	MAE	



شکل ۹. سری زمانی ماهانه دبی مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی در آبهکرس



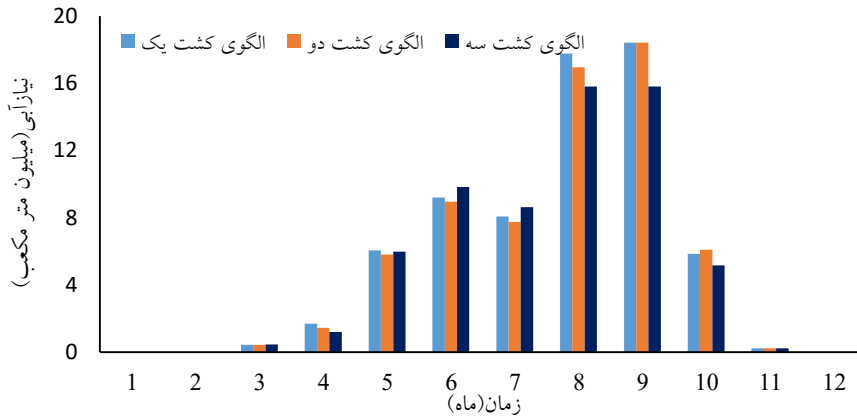
شکل ۱۰. میانگین درازمدت دبی مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل‌های اقلیمی در آبهکرس

در شکل ۹ نمودار پیش‌بینی دبی ماهیانه در مقایسه با دبی مشاهده‌ای در مدل آبهکرس نمایش داده شده است. نتایج کلی حاکی از آن است که در مدل اقلیمی فوق تحت سناریوی RCP8.5 به‌طور کلی انطباق خوبی بین رواناب شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای وجود دارد. در شکل ۱۰ میانگین درازمدت دبی مشاهده‌ای و پیش‌بینی مدل اقلیمی فوق را نمایش داده است که نتایج نشان می‌دهد مدل آبهکرس به‌خوبی زمان وقوع دبی اوج را شبیه‌سازی کرده است. دبی پیش‌بینی شده برای دوره آبی در این روش نیز روند کاهشی را نشان می‌دهد که این کاهش برابر با ۱ درصد می‌باشد. در مدل ذکر شده رواناب پیش‌بینی شده جز در ماه ۶ میلادی (ماه ژوئیه)، در بقیه ماه‌ها مقدار آن کمتر از دبی مشاهده‌ای است. همچنین در ماه‌های پیک، رواناب پیش‌بینی شده در مقایسه با رواناب مشاهده‌ای با کاهش همراه شده است که این کاهش برابر با ۷ درصد می‌باشد. در این بخش دبی پیش‌بینی شده برای دوره آبی با سه روش مختلف محاسبه گردید و با مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده در دو مدل برنامه ریزی بیان ژن و رگرسیون بردار پشتیبان مشاهده می‌شود که دقت ماشین بردار پشتیبان نسبت به مدل برنامه‌ریزی بیان ژن بیشتر است که نتایج حاصل با نتایج سلگی و همکاران (۲۰۱۷) و احمدی و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مدل رگرسیون بردار پشتیبان به ترتیب نسبت به دو مدل آبهکرس و برنامه ریزی بیان ژن در شبیه‌سازی مقادیر دبی اوج از دقت کمتری برخوردار است به‌طوری‌که با افزایش میزان جریان به‌طور میانگین ۴۷ درصد کاهش می‌یابد که این تغییر در میزان دبی با نتایج رحیمی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد.

### برآورد نیاز آبیاری کشاورزی در مدل

در این پژوهش جهت برآورد نیاز آبی محصولات منطقه از نرم‌افزار کراپ وات استفاده شده است. شکل ۱۱ نتایج برآورد نیاز آبیاری را برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نمایش می‌دهد.



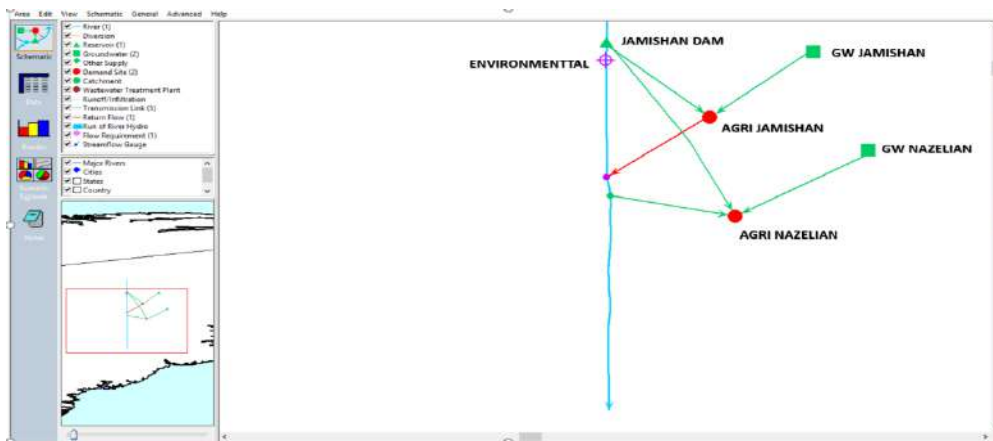


شکل ۱۱. نیاز آبی محصولات زراعی در الگوهای کشت مختلف

شکل ۱۱ نتایج برآورد نیاز آبیاری را برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ نشان می‌دهد که مقدار نیاز آبی الگوی کشت یک بیشترین مقدار و معادل ۶۷/۷۹ میلیون مترمکعب در سال و کمترین نیاز آبی متعلق به الگوی کشت سه معادل ۶۳/۱۵ میلیون مترمکعب در سال است. نیاز آبی در ماه‌های هشت و نه بیش‌ترین مقدار و متوسط تا ۱۸ میلیون مترمکعب می‌رسد از طرفی این ماه‌ها جزء کم بارش‌ترین ماه‌های سال و نیز پرمصرف‌ترین است و مسلماً مدیریت بهره‌برداری از سد می‌تواند نقش بسزایی در تأمین نیازها به‌خصوص نیاز کشاورزی و حفظ راندمان تولید کشاورزان داشته باشد. این موارد با نتایج پناهی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. نیازهای آبی محاسبه‌شده در نرم‌افزار کراپ وات در مدل ویپ وارد شده و نیز آبدهی‌های پیش‌بینی‌شده از هر مدل بارش رواناب سناریوهای مختلف مدیریتی ایجاد می‌کنند.

### نتایج شبیه‌سازی در مدل ویپ برای حوضه جامیشان

به‌منظور تأمین نیازهای پایین‌دست سد جامیشان، شبیه‌سازی منابع و مصارف این سد در مدل ویپ با الگوهای کشت مختلف انجام شد. منابع آب این حوضه آبریز شامل منابع آب زیرزمینی جامیشان و نازلین با حداکثر برداشت مجاز ۲۴ و ۸ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. مصارف آبی حوضه شامل شبکه آبیاری جامیشان، شبکه آبیاری نازلین و نیاز زیست‌محیطی رودخانه با میانگین ۰/۹۵ میلیون مترمکعب در سال می‌باشد. اولویت تأمین برای نیاز کشاورزی جامیشان به ترتیب از آب زیرزمینی، سد جامیشان و آب برگشتی شبکه جامیشان و برای نیاز زیست‌محیطی از سد جامیشان می‌باشد. شماتیک منابع و مصارف حوضه جامیشان در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

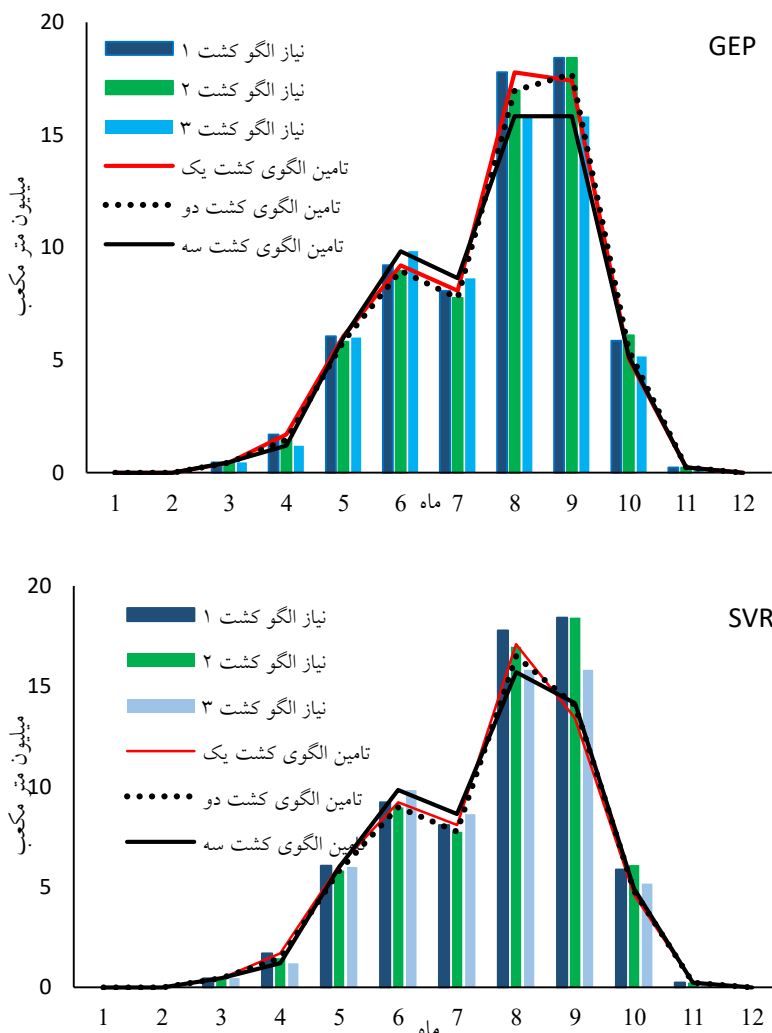


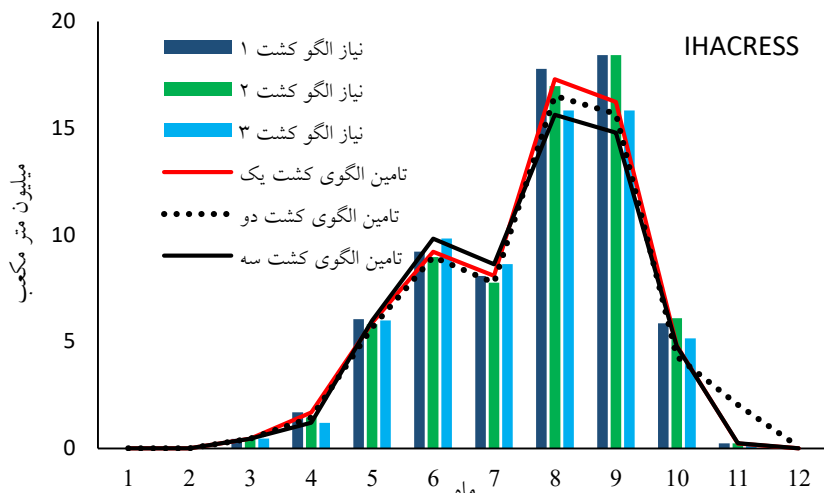
شکل ۱۲. شماتیک منابع و مصارف حوضه

### تأمین نیازهای کشاورزی

در مدل ویپ برای جریان رودخانه به‌عنوان منبع آب سطحی از خروجی‌های مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده گردید. در شکل ۱۳ نتایج تأمین نیازهای کشاورزی منطقه در هر مدل نشان داده شده است که بیشترین تأمین مربوط به الگوی کشت سه (الگوی کشت با بیشترین

میزان درآمد) و کمترین تأمین مربوط به الگوی کشت یک (الگو کشت در شرایط موجود) می‌باشد. همچنین بیش‌ترین کمبود مربوط به الگوی کشت یک و کمترین کمبود مربوط به الگوی کشت سه می‌باشد. در صورتی که از الگوی کشت یک استفاده شود، به ترتیب در مدل رگرسیون بردار پشتیبان، آپهکرس و برنامه ریزی بیان ژن به ترتیب با ۳۰، ۲۸/۳ و ۲۶/۷ درصد کمبود مواجه هستیم. دلیل اینکه در مدل رگرسیون بردار پشتیبان مقدار تأمین کمترین مقدار است زیرا مقدار آبدهی پیش‌بینی‌شده در این مدل نسبت به دو روش دیگر کمتر است. با توجه به این موضوع می‌باید در جهت تغییر الگوی کشت موجود و بهینه‌سازی آن در جهت مصرف کمتر آب و درآمد بیشتر اقداماتی صورت پذیرد. نتایج بهینه‌سازی الگوی کشت با نتایج (عوض یار و همکاران، ۱۳۹۷) به‌منظور صرفه‌جویی در مصرف آب و افزایش درآمد کشاورزان و همچنین (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸) و (امامی فر و همکاران، ۱۳۹۹) در بهینه‌سازی الگوی کشت و استفاده بهینه از آب و اثرات آن بر محیط مطابقت دارد.

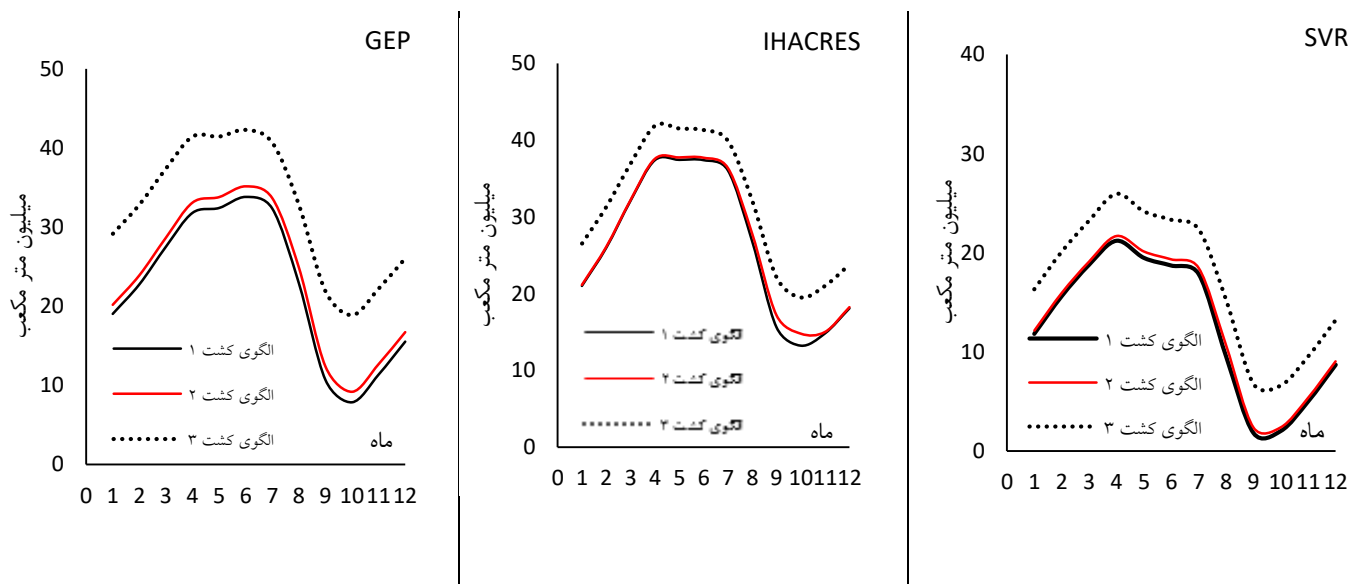




شکل ۱۳: مقایسه میزان تأمین آب شبکه آبیاری جامیشان در مدل ویپ حاصل از رواناب‌های تولیدشده در مدل‌های SVR و آیهکرس و GEP

### تغییرات حجم مخزن

یکی از مهم‌ترین مواردی که در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع و مصارف در حوضه آبریز دارای اهمیت است، تغییرات حجم مخزن پس از شبیه‌سازی در هر سناریو و یا گزینه است. در این پژوهش مدیریت منابع و مصارف در مدل ویپ برای ارزیابی سه الگوی کشت متفاوت و سه نوع آبدهی متفاوت که حاصل از مدل‌های هیدرولوژیکی مختلف است، در نظر گرفته شده است. در این راستا شکل ۱۴ تغییرات حجم مخزن در هر الگوی کشت و هر مدل هیدرولوژیکی را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود در هر سه مدل رگرسیون بردار پشتیبان، برنامه ریزی بیان ژن و آیهکرس در صورتی که از الگوی کشت (۱) استفاده شود، حجم مخزن بیشتر از حالتی است که از الگوی کشت (۲) و (۳) استفاده شده است. با توجه به اینکه الگوی کشت یک بیشترین نیاز آبی را به خود اختصاص داده است، بنابراین بیشترین حجم مخزن مربوط به این حالت می‌باشد. همچنین الگوی کشت سه دارای کمترین نیاز آبی می‌باشد بنابراین حجم مخزن در این حالت نسبت به دو الگوی کشت دیگر کمتر می‌باشد که با نتایج سلیمی و همکاران (۱۳۹۸) و پناهی و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد.



شکل ۱۴: تغییرات بلندمدت ماهانه حجم مخزن تحت سناریوهای تغییر الگوی کشت در مدل‌های هیدرولوژیکی

## بحث

امروزه پیشرفت فناوری، شهرنشینی، افزایش گازهای گلخانه‌ای سبب تغییر شرایط اقلیمی در سراسر جهان شده است. همچنین با توجه به افزایش جمعیت، کمبود و محدودیت شدید در منابع آب یکی از راه‌های اساسی برای مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، شبیه‌سازی و تغییر الگوی کشت می‌باشد. هدف از این تحقیق، بررسی و مقایسه میزان تأثیر تغییر اقلیم بر دبی با استفاده از سه مدل برنامه ریزی بیان ژن، رگرسیون بردار پشتیبان و آیهکرس به منظور مدل‌سازی سیستم منابع و مصرف آبی منطقه می‌باشد. بدین منظور ابتدا منابع و مصارف و محل تأمین نیازها شناسایی شده و سپس با استفاده از مدل شبیه‌سازی ویپ مدل‌سازی شد. در این پژوهش مقادیر ماهیانه بارش، دما و دبی سد جامیشان در سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۸۸ به‌عنوان دوره پایه در نظر گرفته شد و با استفاده از سه مدل فوق به مقایسه و بررسی میزان رواناب در دوره آتی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ با استفاده از مدل HADGEM2\_ES تحت سناریوی RCP8.5 پرداخته شد.

## نتیجه‌گیری

نتایج حاکی از افزایش دمای بین ۰/۱ تا ۱/۴ درجه سلسیوس در دو مدل مذکور می‌باشد که این افزایش دما با نتایج حافظ پرست و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. با مقایسه رواناب شبیه‌سازی شده در دو مدل برنامه ریزی بیان ژن و رگرسیون بردار پشتیبان مشاهده می‌شود که دقت ماشین بردار پشتیبان نسبت به مدل برنامه‌ریزی بیان ژن بیشتر است که نتایج حاصل با نتایج سلگی و همکاران (۲۰۱۷) و احمدی و همکاران (۲۰۱۶) مطابقت دارد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که مدل رگرسیون بردار پشتیبان به ترتیب نسبت به دو مدل آیهکرس و برنامه ریزی بیان ژن در شبیه‌سازی مقادیر دبی اوج از دقت کمتری برخوردار است به طوری که با افزایش میزان جریان به‌طور میانگین ۴۷ درصد کاهش می‌یابد که این تغییر در میزان دبی با نتایج رحیمی و همکاران (۱۳۹۹) مطابقت دارد. به‌طور کلی نتایج نشان می‌دهد در این پژوهش به ترتیب آیهکرس، برنامه ریزی بیان ژن و رگرسیون بردار پشتیبان از دقت مطلوبی برخوردار هستند. برای مدیریت منابع آب در دوره‌های آتی با داشتن سه الگو کشت متفاوت مقادیر نیاز و تأمین به‌دست آمده است. مدل‌سازی و مصارف آب نشان داد که با شبیه‌سازی در ویپ در مدل رگرسیون بردار پشتیبان بیشترین کمبود مربوط به الگوی کشت یک با ۳۰ درصد و کمترین کمبود مربوط به مدل برنامه ریزی بیان ژن در الگوی کشت سه با ۲۴/۶ درصد می‌باشد. همچنین بیشترین میزان پر بودن مخزن مربوط به الگوی کشت سه در مدل آیهکرس و برابر با ۱۳/۶ درصد و بیشترین میزان خالی بودن مخزن مربوط به الگوی کشت یک در مدل رگرسیون بردار پشتیبان و برابر با ۱۰/۵ درصد می‌باشد. به‌طور کلی شبیه‌سازی در مدل ویپ تحت سناریو تغییر اقلیم نشان داد که در دوره آتی با کمبود در تأمین نیازها مواجه هستیم که این کمبود با نتایج مالیر و همکاران (۱۳۹۵) و قندهاری و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. توانایی مدل ویپ در جهت مدل‌سازی استراتژی‌ها و برآورد آن‌ها در دوره‌ای زمانی بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت با پژوهش شو و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت دارد.

## تقدیر و تشکر

در پایان از سازمان هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای استان کرمانشاه که اطلاعات موردنیاز این پژوهش را در اختیار نویسندگان قرار دادند، سپاسگزاری می‌گردد.

## منابع

- احمدی، فرشاد، رادمنش، فریدون، و میر عباسی، رسول (۱۳۹۵). مقایسه عملکرد روش‌های ماشین بردار پشتیبانی و شبکه‌های تجاری در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه باراندوزچای). مجله تحقیقات حفاظت از خاک و آب، ۲۲(۶)، ۱۸۶-۱۸۶
- <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1394.22.6.10.2.171>
- اداره کل امور آب استان کرمانشاه. (۱۳۸۳). مطالعه مرحله اول سد مخزنی جامیشان. نیازها، برنامه‌ریزی منابع آب و بهسازی سد و شبکه، وزارت نیرو، آب منطقه‌ای غرب.
- پناهی، الهه. (۱۳۹۴). مدیریت یکپارچه منابع آب حوضه آبریز از نظر تغییر اقلیم (پایان‌نامه کارشناسی ارشد)، دانشکده کشاورزی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.
- پورخیرالله، زهره، حافظ پرست، مریم، و فاطمی، سید احسان. (۱۳۹۶). تغییر در پارامترهای بارش، دما و دبی تحت سناریوی تابش باعث تابش (منطقه مورد مطالعه: شهر دهلران). دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
- <https://civilica.com/doc/661416>

- پورمحمدی، سمانه، دستورانی، محمد تقی، مساح بوانی، علیرضا، و جعفری، هادی. (۱۳۹۴). بررسی اثرات تغییر اقلیم و باروری ابرها بر رواناب رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه قلقل رود حوضه آبریز تویسرکان)، دهمین سمینار بین المللی مهندسی رودخانه، اهواز. <https://civilica.com/doc/677149>
- حافظ پرست، مریم، بافکار، علی، و پناهی، الهه. (۱۳۹۵). ارزیابی عدم قطعیت تغییر اقلیم و اثرات آن بر احتمال تواتر آبدهی ورودی سد جامیشان. نشریه حفاظت منابع آب و خاک (علمی - پژوهشی)، ۳۶(۳)، ۱۹-۴۲. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517480.1396.6.3.2.3>
- رحیمی، بنفشه، و حافظ پرست، مریم. (۱۳۹۹). مقایسه مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان ژن و آیه‌کرس در پیش‌بینی تغییرات رواناب تحت تاثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: سد جامیشان). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱۰)، ۲۴۸۳-۲۴۹۹. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.303779.668640>
- رحیمی، بنفشه، و حافظ پرست مودت، مریم. (۱۳۹۹). بررسی مدل IHACRES در پیش‌بینی رواناب ناشی از مدل‌های اقلیمی گزارش پنجم (مطالعه موردی: سد جامیشان)، اولین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در صنعت آب و برق، کرمانشاه. <https://civilica.com/doc/1202087>
- سلگی، اباذر، زارعی، حیدر، شهینی دارابی، مهرنوش، علیدادی ده کهنه، صابر. (۱۳۹۷). کاربرد مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و ماشین بردار رگرسیونی جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی بارش ماهانه. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۸(۵۰)، ۹۱-۱۰۳. <http://dx.doi.org/10.29252/jgs.18.50.91>
- سلیمی مستعلی، فاطمه، حافظ پرست، مریم، و سرگردی، فرهنگ. (۱۳۹۹). شبیه‌سازی و بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد تحت سناریوی تغییر الگوی کشت (مطالعه موردی: سد هرسین). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱)، ۱-۱۲. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.282440.668221>
- عوض یار، محمدرضا، احمد پور برازجانی، محمود، و ضیایی، سامان. (۱۳۹۸). تعیین الگوی مطلوب محصول با تأکید برافزایش کارایی آبیاری در زمین‌های سد ملاصدرا در استان فارس. فصلنامه علمی- پژوهشی مهندسی منابع آب، ۱۱(۳۶)، ۲۱-۳۲. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1397.11.36.3.4>
- فاطمی، سید احسان، بهراملو، علی، و ادیب راد، محمدحسین. (۱۳۹۵). سرمایه‌گذاری راه‌حل‌های سازنده و غیر ساختاری برای مدیریت پایدار منابع وات در دشت همدان. جغرافیا و پایداری محیط‌زیست، ۳۶(۳)، ۵۵-۶۷. [https://ges.razi.ac.ir/article\\_631.html](https://ges.razi.ac.ir/article_631.html)
- کلبعلی، الهام، ضیائی، سمان، مردانی نجف‌آبادی، مصطفی، و ذاکری نیا، مهدی. (۱۳۹۸). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر الگوی بهینه کشت محصولات زراعی: مطالعه موردی حوضه قره‌سو استان گلستان. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۵(۳)، ۲۷۱-۲۵۱. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.3.20.1>
- لطفی راد، مرتضی، ادیب، آرش، و حقیقی، علی. (۱۳۹۷). برآورد رواناب روزانه با کمک مدل نیمه مفهومی آیه‌کرس در حوضه آبریز نارود گیلان. نشریه اکوهیدرولوژی، ۲(۵)، ۴۶۰-۴۴۹. <https://dx.doi.org/10.22059/ije.2017.234237.614>
- محمدی، حمید، سرگازی، علیرضا، سارانی، ولی اله. (۱۳۹۸). بررسی تأثیر افزایش کارایی مصرف آب در تغییر الگوی محصولات زراعی با تأکید بر سیاست‌گذاران و اهداف زیست‌محیطی در استان فارس. فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۲۱(۱۰)، ۱۶۰-۱۴۷. <http://dx.doi.org/10.22034/JEST.2019.15616>
- منصوری، افشین، امین نژاد، بابک، و احمدی، حسن. (۱۳۹۶). بررسی تأثیر تغییرات آب و هوایی بر رواناب به مخزن کارون ۴ بر اساس گزارش‌های چهارم و پنجم IPCC. مجله علوم خاک و آب، ۲۲(۲)، ۳۴۵-۳۵۹. <http://dx.doi.org/10.29252/jstnar.22.2.345>
- نبی زاده، مرتضی، مساعدی، ابوالفضل، و دهقانی، امیراحمد. (۱۳۹۱). تخمین هوشمند جریان جریان توسط سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی. مجله مدیریت آب و آبیاری، ۲(۱)، ۸۰-۶۹. <https://dx.doi.org/10.22059/jwim.2012.25093>

## References

- Ahmadi, F., Radmanesh, F., & Mirabbasi, R. (2016). Comparison of the performance of support vector machine methods and business networks in predicting daily river flow (Case study: Barandozchay River). *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 22 (6), 186-171. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1394.22.6.10.2> [In Persian]
- Avaz yar, M., Ahmadpour Borazjani, M., & zyaei, S. (2018). Determine optimal crop pattern with an emphasis on increasing the irrigation efficiency in lands of Mollasadra Dam in Fars province. *Water*

- Resources Engineering, 11(36), 21-32. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1397.11.36.3.4> [In Persian]
- Dibike, Y.B., Velickov, S., Solomatine, D.P., & Abbott, M.B. (2001). Model induction with support vector machines: introduction and applications. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 15(3), 208-216. [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2001\)15:3\(208\)](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2001)15:3(208))
- Fatemi, S.E., Bahramloo, ali & Adebrad, M.H. (2016). Studying the Structural and Non-structural Solutions for Sustainable Water Resources Management of Hamedan-Bahar Plain. *Geography and Environmental Sustainability*, 6(3), 55-67. [https://ges.razi.ac.ir/article\\_631.html](https://ges.razi.ac.ir/article_631.html) [In Persian]
- General Department of Water Affairs of Kermanshah Province. (2004). Study of the first stage of Jamishan reservoir dam. Needs, water resources planning and dam and network improvement, Ministry of Energy, Western Regional Water. [In Persian]
- Hafezparast, M., Bafkar, A., & Panahi, E. (2016). Assessing the uncertainty of climate change and its effects on the likelihood of frequent flooding of the entrance to the Jamishan Dam. *Journal of Water and Soil Conservation*, 6(3), 19-42. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517480.1396.6.3.2.3> [In Persian]
- He, Z., Wen, X., Liu, H., & Du, J. (2014). A comparative study of artificial neural network, adaptive neuro fuzzy inference system and support vector machine for forecasting river flow in the semiarid mountain region. *Journal of Hydrology*, 509, 379-386. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.054>
- IPCC. (2001). *The Scientific Basis of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jakeman, A.J., & Hornberger, G.M. (1993). How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model. *Water Resources Research*, 29(8), 2637-2649. <https://doi.org/10.1029/93WR00877>
- Karmaoui, A., Minucci, G., Messouli, M., Khebiza, M. Y., Ifaadassan, I., & Babqiqi, A., (2019). Climate Change Impacts on Water Supply System of the Middle Draa Valley in South Morocco. Published in *Climate Change, Food Security and Natural Resource Management*, Springer.
- Kalbali, E., Ziaee, S., Mardani Najafabadi, M., & Zakerinia, M. (2019). Assessment of Climate Change Impacts on Optimum Cropping Pattern: A Case Study of Ghareso Basin in Golestan Province. *Iran-Water Resources Research*, 15(3), 251-271. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.3.20.1> [In Persian]
- Lotfirad, M., Adib, A., & Haghighi, A. (2018). Estimation of daily runoff using of the semi- conceptual rainfall-runoff IHACRES model in the Navrood watershed (a watershed in the Gilan province. *Iranian journal of Ecohydrology*, 5(2), 449-460. <https://dx.doi.org/10.22059/ije.2017.234237.614> [In Persian]
- Mansouri, A., Aminnejad, B., & Ahmadi, H. (2018). Investigating the Effect of Climate Change on Inflow Runoff into the Karun-4 Dam Based on IPCC's Fourth and Fifth Report. *JWSS*, 22 (2) ,345-359. <http://dx.doi.org/10.29252/jstnar.22.2.345> [In Persian]
- Mohammadi, H., Sargazi, A., & Sarani, V. (2019). Studying Impact of Increase in Water Usage Efficiency on Cropping Pattern Change with Emphasis on the Policy Makers and Environmental Objectives in Fars Province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(10), 147-160. <http://dx.doi.org/10.22034/JEST.2019.15616> [In Persian]
- Mohie, E. D. O., & Moussa. A. (2016) Water Management in Egypt for Facing the Future Challenges. *Advanced Research*, 7(3), 403-412. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2016.02.005>
- Momblanch, A., Beevers, L., Srinivasalu, P., & Kulkarni, A. (2020). Enhancing production and flow of freshwater ecosystem services in a managed Himalayan river system under uncertain future climate. *Climatic change*, 162, 343-361. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02795-2>
- Nabizadeh, M., Mosaedi, A., & Dehghani, A. (2012). Intelligent estimation of stream flow by Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *Water and Irrigation Management*, 2(1), 69-80. <https://dx.doi.org/10.22059/jwim.2012.25093> [In Persian]
- Panahi, E. (2015). *Integrated water resources management of the catchment area in terms of climate change (B. SC. Thesis)*, Faculty of Agriculture, Department of Water Science and Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. [In Persian]

- Pourkheirolah, Z., Hafezparast, M. & Fatemi, S.A. (2017). Changes in the parameters of precipitation, temperature and Dubai under the radiation scenario caused the radiation (study area: Dehloran city). In: Second National Conference on Hydrology of Iran. Shahrekord University, Shahrekord, Iran. <https://civilica.com/doc/661416> [In Persian]
- Pourmohamadi, S., Dastourani, M., Mesahbovani, A. & Jafari, H. (2015). Investigating the effects of climate change and cloud fertility on river runoff (Case study: Qolqol River River Tuysarkan catchment area). 10th International River Engineering Seminar, Chamran University, Ahvaz, Iran. <https://civilica.com/doc/677149> [In Persian]
- Rahimi, B., Hafezparast Mavaddat, M. (2020). Comparison of SVM, GEP and IHACRES Models in Prediction of Runoff Changes Due to Climate Change (Case Study: Jamishan Dam). Iranian Journal of Soil and Water Research, 51(10), 2483-2499. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.303779.668640> [In Persian]
- Rahimi, B., & Hafezparast, M. (2021). Investigation of IHACRES Model in Predicting Runoff Due To Climatic Models Fifth Report (Case Study: Jamishan Dam). The first national conference on applied research in the water and electricity industry. Kermanshah. Iran. <https://civilica.com/doc/1202087> [In Persian]
- Salimi masteali, F., Hafezparast, M., & Sargordi, F. (2020). Simulation and Optimization of Dam Operation under Changing Cultivation Pattern Scenario (Case Study: Harsin Dam). Iranian Journal of Soil and Water Research, 51(1), 1-12. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.282440.668221> [In Persian]
- Sambou, D., Weihrauch, D., Hellwing, V., Diekkruiger, B., Hollermann, B., & Gaye, A. (2015) Assessment of Water Availability and Demand in Lake Guiers, Senegal. American Geophysical Union Fall meeting, San Francisco. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015AGUFMGC43B1191S/abstract>
- Solgi, A., Zarei, H., Shehndarabi, M. & Alidadi, S. (2017). Predict monthly precipitation using gene expression expression models and support vector machines. Journal of Applied Research in Geographical Sciences. 18(50), 91-103. <http://dx.doi.org/10.29252/jgs.18.50.91> [In Persian]
- Xue, L., Yue, Z., Chunli, Sh., Jian, Sh., Zhong Ling, W., & Yuqia, W. (2015) Application of Water Evaluation and Planning (WEAP) Model for Water Resources Management Strategy Estimation in Coastal Binhai New Area, China, Ocean & Coastal Management, 106, 97-109. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.01.016>.



## The effect of preprocessing and reducing the input dimensions of the flow prediction model on optimized Support Vector Regression by Genetic Algorithm

Seyed Ehsan Fatemi<sup>1</sup> , Sedigheh Darabi Cheghanaleki<sup>2</sup> , Maryam Hafezparast Mavadat<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Corresponding Author, Assistant professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: e\_fatemi78@yahoo.com

<sup>2</sup> M. Sc graduated of Water Resources, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: seddigheh.darabi73@gmail.com

<sup>3</sup> Assistant professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: m.hafezparast@razi.ac.ir

### ABSTRACT

#### Introduction

Accurate and correct prediction of surface water flow plays an important role in the principled planning and proper management of water resources. To achieve this, various prediction models using mathematical relationships based on hydrological information can be used. In recent years, machine learning models have received much attention due to their high accuracy in prediction through black box learning. Therefore, by combining or comparing these methods, more favorable results can be used to increase the accuracy of predictions. In this study, monthly discharge of Polechehr hydrometric station for a 48-year has been used.

#### Methodology

Support Vector Machine (SVM), Feature Selection and Random Forest Technique

The Support Vector Machine (SVM) is a non-statistical binary classifier that has received much attention in recent years and it is supervised learning models with associated learning algorithms that analyze data for classification and regression analysis. The SVM is an algorithm that finds unique linear models and uses them to get the maximum hyper-plane margin. Maximizing the superstructure margin maximizes segregation between classes and improves accuracy in the modeling process. The nearest training points at the edge of the cloud are referred to as support vectors and are used to define boundaries between classes.

Feature Selection (FS) is the process of reducing the number of input variables when developing a predictive model. Feature Selection can be defined as the process of identifying related features and removing unrelated and duplicate features. They are desirable to reduce the number of input variables to both reduce the computational cost of modeling, and in some cases to improve the performance of the model.

Random forests or random decision forests are an ensemble learning method for classification, regression and other tasks that operates by constructing a multitude of decision trees at training time. It is a class of group classification methods designed specifically for decision trees.

#### Results and discussion

The first scenario results

The results of monthly flow prediction in the first scenario, with no-preprocessing on data, two-time series and non-time series approaches and feature selection cases are shown in the Table 1.

**Table 1. Model Evaluation results in scenario1 for different approach and cases**

Exp.Var	Train		Test							
	NSE	RMSE	Exp.Var	NSE	RMSE	C	Epsilon	SVR	Feature Selection	Time Series
0.029	-0.13	46.11	-6.70E-07	-0.046	22.81	1	0.01	Simple	No	Yes
0.063	-0.09	45.32	-1.47E-06	-0.051	22.86	2.181	0.0063	GA	No	Yes
0.115	-0.057	44.61	0.16	0.156	20.5	1	0.01	Simple	Yes	Yes
0.479	0.42	33.02	0.243	0.222	19.67	15.31	0.0063	GA	Yes	Yes
0.03	-0.148	43.67	-1.45E-06	-0.147	45.018	1	0.01	Simple	No	No
0.08	-0.098	42.7	-4.00E-06	-0.147	45.01	2.755	0.0097	GA	No	No
0.121	-0.049	41.73	0.096	-0.053	43.12	1	0.01	Simple	Yes	No
0.505	0.452	30.17	0.234	0.174	38.21	16.97	0.0014	GA	Yes	No

The second scenario results

The results of monthly flow prediction in the second scenario, by applying standardization on data, two-time series and non-time series approaches and feature selection cases are shown in table 2.



**Table 2. Model Evaluation results in scenario 2 for different approach and cases**

Train			Test							
Exp.Var	NSE	RMSE	Exp.Var	NSE	RMSE	C	Epsilon	SVR	Feature Selection	Time Series
0.668	0.66	0.583	1.55E-01	0.105	0.376	1	0.01	Simple	No	Yes
0.787	0.784	0.465	1.77E-01	0.126	0.372	3.965	0.0028	GA	No	Yes
0.55	0.539	0.678	0.019	-	0.404	1	0.01	Simple	Yes	Yes
0.552	0.541	0.677	0.019	0.032	0.404	1.04	0.0063	GA	Yes	Yes
0.704	0.698	0.533	5.56E-01	0.54	0.77	1	0.01	Simple	No	No
0.855	0.854	0.371	6.13E-01	0.604	0.714	8.89	0.009	GA	No	No
0.576	0.567	0.638	0.599	0.58	0.736	1	0.01	Simple	Yes	No
0.599	0.588	0.623	0.609	0.59	0.726	7.31	0.0013	GA	Yes	No

### Conclusions

In the first scenario, without applying preprocessing on data, the results showed that, whether the feature selection is not selected and the whole 12 dimensions are considered, the results of simple and optimized SVR model would be approached to a fixed number for both time series and non-time series approaches. However, by using the model feature selection by the random forest algorithm, the dimensions are reduced from 12 to 1 and monthly flow fluctuations are initially predicted, but the accuracy of the results is still poor. The accuracy of the results in the time series approach has better results than the non-time series approach in similar cases as well. Furthermore, the optimizing effect of genetic algorithm in optimizing the SVR model parameters in the accuracy of results has been significant, but it still had low accuracy in peak flows. In the second scenario, results are significantly improved by applying standardization on data for the all cases. The optimizing effect of the genetic algorithm on the model accuracy was more tangible than the simple SVR when feature selection is not considered to predict peak flood flows. Finally, the best results is for the time series approach no feature selection case. In case, there is no significant difference in the results of the simple SVR model and optimized with the genetic algorithm. As a general conclusion, if there is no any preprocessing on data, time series approach and using feature selection with random forest algorithm will lead to better results in SVR prediction model and also use of genetic algorithm optimizer would be caused a significant effect on improving the results in case. In contrast, by doing the standardization on data, the best results would be achieved by the non-time-series approach and considering feature selection. In case, the genetic algorithm optimization model has not a significant effect on the prediction model accuracy compared to the simple SVR model.

**Keywords:** Discharge Forecasting, Genetic Algorithm, Support Vector Regression, SVM

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 09 July 2021 Revised: 26 July 2021 Accepted: 06 August 2021 ePublished: 20 February 2022

**Cite this article:** Fatemi, S.E., Darabi Cheghabaleki, S., & Hafezparast Mavadat, M. (2022). The effect of preprocessing and reducing the input dimensions of the flow prediction model on optimized Support Vector Regression by Genetic Algorithm., *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 1(1), 24-47, DOI: 10.22126/ATWE.2021.6660.1002

Publisher: Razi University

© The Author(s).





## اثر پیش پردازش و کاهش ابعاد ورودی مدل پیش بینی دبی بر عملکرد مدل رگرسیون بردار پشتیبان بهینه شده الگوریتم ژنتیک

سید احسان فاطمی<sup>۱</sup>، صدیقه دارابی چقالیکی<sup>۲</sup>، مریم حافظ پرست مودت<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: e\_fatemi78@yahoo.com  
<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: seddigheh.darabi73@gmail.com  
<sup>۳</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: maryam.hafezparast@gmail.com

### چکیده

پیش بینی دقیق و صحیح جریان آب های سطحی در برنامه ریزی اصولی و مدیریت صحیح منابع آب نقش بسزایی دارد. برای دست یافتن به این مهم مدل های پیش بینی مختلف که با استفاده از روابط ریاضی بر پایه اطلاعات هیدرولوژی بنا شده اند، می توانند داده های مورد نیاز را با دقت کافی پیش بینی کنند. در این مطالعه از داده های دبی جریان ماهانه ایستگاه هیدرومتری پل چهر در یک دوره آماری ۴۸ ساله (۱۳۹۷-۱۳۹۸) شهر یور-۱۳۵۰ (مهر) استفاده شد. دو سناریوی اصلی با و بدون اعمال پیش پردازش (استانداردسازی) با دو رویکرد سری زمانی یا غیرسری زمانی بررسی شد. همچنین از الگوریتم جنگل تصادفی برای بررسی کاهش ابعاد ورودی مدل استفاده شد. در هر سناریو معیارهای ارزیابی مدل تغییرات واریانس، ضریب ناش-ساتکلیف و مجذور مربعات خطا محاسبه گردید. در همه حالت ها به ترتیب ۸۰ و ۲۰ درصد داده ها برای آموزش و آزمودن مدل در نظر گرفته شده است. مدل نوشته شده به زبان برنامه نویسی پایتون است. از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی پارامترهای روش رگرسیون بردار پشتیبان استفاده شد. نتایج نشان داد که ابتدا استانداردسازی سپس در نظر نگرفتن توالی سری زمانی داده ها، کاهش ابعاد ورودی مدل نیز استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی پارامترهای مدل رگرسیون بردار پشتیبان به ترتیب بیشترین اثر بر دقت پیش بینی را دارد به طوری که بالاترین ضریب NSE برای داده های آموزش برابر ۰/۸۵ و برای آزمودن معادل ۰/۶ است. چنانچه عمل استانداردسازی داده ها صورت نگیرد، منظور نمودن رویکرد سری زمانی و کاهش ابعاد ورودی مدل منجر به نتایج بهتری در پیش بینی مدل SVR خواهد شد و استفاده از بهینه ساز الگوریتم ژنتیک نسبت به مدل ساده آن تأثیر معنی داری بر بهبود نتایج خواهد داشت.

**واژه های کلیدی:** پیش بینی دبی، ماشین بردار پشتیبان، الگوریتم ژنتیک، SVM

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۸ تیر ۱۴۰۰ اصلاح: ۰۴ مرداد ۱۴۰۰ پذیرش: ۱۵ مرداد ۱۴۰۰ چاپ الکترونیکی: ۰۱ اسفند ۱۴۰۰

**استناد:** فاطمی، س.ا.، دارابی چقالیکی، ص.، و حافظ پرست مودت، م. (۱۴۰۰). اثر پیش پردازش و کاهش ابعاد ورودی مدل پیش بینی دبی بر عملکرد مدل رگرسیون بردار پشتیبان بهینه شده الگوریتم ژنتیک. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، (۱)، ۴۷-۲۴. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2021.6660.1002



## مقدمه

در مدل‌سازی دبی رودخانه برای مدیریت منابع آب، مدیریت ریسک مخصوصاً در مناطق کوهستانی به دلیل وابستگی مناطق پایین‌دست به آب موردنیاز برای مصارف و همچنین نیاز به برق تولیدشده اهمیت زیادی دارد؛ همچنین با توجه به ماهیت جریان که فراخور تغییرات مکانی و زمانی دستخوش تغییر می‌شود و ثبات ندارد و همچنین برداشت داده‌های جریان که با استفاده از سری زمانی داده‌های ثبت‌شده از ایستگاه‌های هیدرومتری است و احتمال بروز خطا در آن وجود دارد بنابراین نیاز به یک مدل قوی و جامع برای مدیریت منابع و پیش‌بینی داده‌ها امری ضروری است. طی سال‌های اخیر، مدل‌های یادگیری ماشینی به دلیل دقت بالا در پیش‌بینی از طریق یادگیری به‌صورت جعبه سیاه موردتوجه زیادی قرار گرفته‌اند. از این رو با مطالعه ترکیبی و یا مقایسه‌ای این روش‌ها می‌توان به نتایج مطلوب‌تری برای بالا بردن دقت پیش‌بینی‌ها استفاده کرد.

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

سیوپراگاسم و همکاران (۲۰۰۱) پیش‌بینی بارش باران و رواناب با روش SSA-SVM را بررسی کردند در این مطالعه یک فن پیش‌بینی ساده و کارآمد بر اساس تحلیل طیف مفرد (SSA) همراه با ماشین بردار پشتیبانی (SVM) پیشنهاد شده است. درحالی‌که SSA تجزیه سری زمان اصلی را به مجموعه‌ای از اجزای فرکانس بالا و پایین، SVM در برخورد کارآمد با عملکرد محاسباتی و عمومی‌سازی در یک فضای ورودی با ابعاد بالا کمک می‌کند. فن پیشنهادی برای پیش‌بینی داده‌های آبیگر تریگوارلد (دانمارک) و داده‌های بارش سنگاپور به‌عنوان مطالعات موردی اعمال می‌شود. نتایج با روش پیش‌بینی غیرخطی (NLP) مقایسه می‌شوند. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که دقت فن پیشنهادی به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از فن NLP است. زارع زاده مهریزی و بزرگ حداد (۱۳۸۹) شبیه‌سازی و پیش‌بینی آینده با استفاده از الگوریتم ترکیبی ANN-GA<sup>۱</sup> را بررسی کرده‌اند، در این مطالعات مؤثر بودن یا نبودن هر یک از عوامل دما، بارش، آبدی و تأخیرهای زمانی این پارامترها در شبیه‌سازی و پیش‌بینی آبدی رودخانه موردبررسی قرار گرفته است. به‌منظور دستیابی آسان‌تر به این پارامترها و نیز تعیین ترکیب بهینه پارامترهای مؤثر در واسنجی ضرایب ANN از الگوریتم ژنتیک (GA) به‌عنوان یک ابزار بهینه‌سازی استفاده گردیده است. در این تحقیق تابع هدف کاهش مقدار میانگین مربعات خطای کل در نظر گرفته شد. مقادیر ضریب همبستگی بین آبدی‌های محاسباتی و موجود برای دو مدل شبیه‌سازی و پیش‌بینی به ترتیب برابر با ۰/۸۶ و ۰/۷۹ به دست آمد که بیانگر کارایی الگوریتم ANN-GA در شبیه‌سازی و پیش‌بینی آبدی با دقت مطلوب می‌باشد. همچنین نتایج نشان‌دهنده برتری جواب‌های به‌دست‌آمده از مدل شبیه‌سازی نسبت به مدل پیش‌بینی می‌باشند. از دلایل این برتری می‌توان به وجود عوامل هواشناسی ماه موردنظر در تعیین میزان آبدی اشاره نمود. احمدی و همکاران (۱۳۹۳) روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و ماشین بردار پشتیبان را در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه باراندوزچای بررسی کردند. داده‌های جریان روزانه این رودخانه در ایستگاه دیزج در خلال سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ برای ایجاد مدل استفاده شد که ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد برای آزمودن مدل بکار رفته است. نتایج نشان داد که در هر دو روش، مدل‌های شامل جریان یک، دو و سه روز قبل بالاترین دقت را در مرحله صحت‌سنجی داشتند. همچنین دقت هر دو مدل با افزایش مقادیر دبی کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج دو مدل نشان داد که گرچه دقت روش برنامه‌ریزی ژنتیک با  $R = ۰/۹۷۸$  و  $RMSE^۲ = ۱/۶۶ \text{ m}^3/\text{s}$  نسبت به روش ماشین بردار پشتیبان  $R = ۰/۹۷۶$  و  $RMSE = ۱/۸۰ \text{ m}^3/\text{s}$  اندکی بیشتر بود، اما روش SVM به‌مراتب ساده‌تر از روش

<sup>1</sup> Sivapragasam et al

<sup>2</sup> Singular Spectrum Analysis- Support Vector Machine

<sup>3</sup> Singular Spectrum Analysis

<sup>4</sup>Support Vector Machine

<sup>5</sup> Tryggevalde

<sup>6</sup> Nonlinear programming

<sup>7</sup> Artificial Neural Networks- Genetic Algorithm

<sup>8</sup>Genetic Algorithm

<sup>9</sup> Root Mean Square Error

GP می‌باشد و این روش می‌تواند به‌عنوان یک روش کاربردی برای پیش‌بینی جریان روزانه بکار رود. سیدیان و همکاران (۱۳۹۳) پیش‌بینی دبی جریان رودخانه با استفاده از داده‌کاوی و سری زمانی را بررسی کردند که در آن دبی جریان در سه ایستگاه حاجی‌قوشان، قره‌شور و تمر در حوضه آبخیز گرگان رود برای سال‌های آبی ۹۰-۱۳۸۱ شبیه‌سازی شد. به‌منظور شبیه‌سازی از روش آماری سری زمانی در قالب الگوی اتو رگرسیون (AR) و داده‌کاوی در قالب ماشین بردار پشتیبان (SVM) به دو صورت ماهانه و هفتگی استفاده شد. نتایج در مقیاس ماهانه نشان داد هر دو روش در ایستگاه تمر، دقت کم و در ایستگاه حاجی قوشان، دقت خوبی دارند. در ایستگاه قره‌شور SVM توانست ضریب تعیین سری زمانی ماهانه را به مقدار ۰/۲۹ افزایش و خطای RMSE را ۳۵ درصد کاهش دهد و شبیه‌سازی دقیق‌تری انجام دهد. هر دو روش در ایستگاه‌های تمر و قره‌شور دبی هفتگی را با دقت کمی پیش‌بینی کردند. در ایستگاه حاجی‌قوشان ضریب تعیین روش سری زمانی هفتگی ۰/۹۱ و SVM برابر ۰/۸۶ است. آماره DDR نشان داد در ایستگاه حاجی‌قوشان در مقیاس ماهانه روش SVM نسبت به سری زمانی دارای دقت بیشتری است و در مقیاس هفتگی دقت این دو روش برابر است. نتایج این مطالعه نشان داد که روش SVM در هر دو مقیاس ماهانه و هفتگی دقت بیشتری نسبت به سری زمانی دارد؛ همچنین دقت هر دو روش در مقیاس ماهانه بیشتر از مقیاس هفتگی است. سادھیر و همکاران (۲۰۱۳) پیش‌بینی جریان توسط SVM با بهینه‌سازی ازدحام ذرات رفتار کوانتومی را مطالعه کردند در این مطالعه با بررسی صحت مدل هیبریدی SVM-QPSO (بهینه‌سازی ازدحام ذرات رفتار شده ماشین بردار-کوانتوم) در پیش‌بینی جریان‌های ماهانه پرداخت. مدل پیشنهادی SVM-QPSO در پیش‌بینی مقادیر جریان ایستگاه ویجاواوا و ایستگاه پولواوارام آندرا پرادش در هند به کار گرفته شده است. مدل SVM با ساختارهای ورودی مختلف ساخته شده و بهترین ساختار با استفاده از میانگین خطای مربع نرمال شده (NMSE) و ضریب همبستگی (R) تعیین می‌شود. عملکرد بهینه‌سازی ازدحام ذرات با رفتار کوانتومی بیشتر در این مطالعه برای تعیین مقادیر مطلوب پارامترهای SVM با به حداقل رساندن NMSE اقتباس شده است. بعدها عملکرد مدل SVM-QPSO به‌طور کامل با مدل‌های پیش‌بینی محبوب مقایسه شد. نتایج نشان داد که SVM-QPSO به‌مراتب روش بهتری برای پیش‌بینی جریان‌های ماهانه است، زیرا درجه بالایی از دقت و قابلیت اطمینان را فراهم می‌کند. معینی و همکاران (۱۳۹۴) مدل‌سازی دبی ماهانه ورودی به مخزن سد جامیشان با مدل‌های خود همبسته با میانگین متحرک تجمعی و سامانه استنتاج فازی-عصبی انطباقی را مطالعه نمودند. این مدل‌ها به ترتیب بر پایه روش‌های تصادفی<sup>۱</sup> و هوش مصنوعی (AI) هستند. برای مدل‌سازی تا بیشینه پنج پارامتر برای مدل ARIMA<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده که ۱۲۹۶ مدل تولید و بر سری زمانی برازش داده شده است. برای مدل ANFIS<sup>۳</sup> نیز ۱۴ نوع ترکیب ورودی با استفاده از دبی‌های با تأخیرهای مختلف تعیین گردیده است. دبی‌های ماهانه مدل‌سازی توسط مدل‌های ARIMA و ANFIS به کمک شاخص‌های مختلف از جمله شاخص میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE) با یکدیگر مقایسه شدند که مقدار آن به ترتیب برابر ۰/۳۹۸ و ۰/۸ برای هر مدل به‌دست آمده است. نتایج به‌دست آمده نشان داد مدل ARIMA در مدل‌سازی دبی‌های با مقادیر کم و مدل‌سازی‌های کوتاه‌مدت و درازمدت بسیار توانمندتر از ANFIS است. ناظری تهرودی و همکاران (۱۳۹۵) بررسی دقت مدل‌های ANFIS، SVM و GP در مدل‌سازی مقادیر دبی جریان رودخانه را مطالعه کردند. برای مدل‌سازی دبی ماهانه رودخانه نازلوچای در محل ایستگاه هیدرومتری تپیک واقع در غرب دریاچه ارومیه تحت تأثیر بارش حوضه رودخانه مطالعه شده بررسی و مقایسه شده است. در همه روش‌های یادشده الگوهای M1 تا M5 داده‌های دبی جریان با تأخیر یک تا پنج و الگوهای M6 تا M10 الگوی ترکیبی با داده‌های بارش و دبی و با تأخیرهای یک تا پنج ماه بررسی شدند. برای بررسی مقادیر خطای ناشی از مدل‌سازی از سه روش ضریب تبیین<sup>۴</sup>، مجذور میانگین مربعات خطا و معیار کارایی مدل استفاده شده است. نتایج

<sup>1</sup> Auto-Regressive

<sup>2</sup> Data Driven Regression

<sup>3</sup> Sudheer et al

<sup>4</sup> Stochastic

<sup>5</sup> Artificial Intelligence

<sup>6</sup> Auto Regressive Integrated Moving Average

<sup>7</sup> Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems

بررسی دقت و میزان خطای مدلهای نشان‌داد الگوی ترکیبی فقط در مدل SVM بهترین نتیجه را داده است و در دو مدل GP و ANFIS الگوهای تک سری بهترین نتیجه را ارائه کردند. از بین سه مدل بررسی‌شده، مدل ANFIS با الگوی ورودی چهار و پنج تأخیر بهترین نتیجه را داد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد با به‌کارگیری مدل ANFIS در مدل‌سازی دبی جریان ماهانه رودخانه نازلوچای، خطای مدل نسبت به دو مدل GP و SVM به ترتیب حدود ۲۳ و ۳ درصد (در واحد دبی جریان) کاهش و دقت مدل نیز نسبت به دو مدل GP و SVM به ترتیب حدود ۱۰ و ۴ درصد افزایش پیدا کرده است. نوذری و توکلی (۱۳۹۶) پیش‌بینی جریان با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان بر مبنای سری‌های زمانی دبی و بارش در ایستگاه‌های بالادست (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری تله زنگ) را مطالعه کردند؛ به‌منظور پیش‌بینی جریان ماهانه ایستگاه هیدرومتری تله زنگ از مدل ماشین بردار پشتیبان و بر اساس آمار و اطلاعات ۱۰ ایستگاه هیدرومتری و ۸ ایستگاه باران‌سنجی بالادست حوضه در طول یک دوره آماری ۲۰ ساله (۱۳۷۱-۱۳۹۰) استفاده شده است. به همین منظور و در اولین گام، تأثیر استفاده از سری‌های زمانی میزان جریان، بارش و ترکیبی از این دو پارامتر به‌عنوان ورودی و در گام بعد تأثیر تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی بر نتایج پیش‌بینی، مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج به کمک چهار شاخص آماری: ضریب تبیین (R)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای استاندارد (SE) و درصد خطای مطلق (MAPE) صورت گرفت. نتایج نشان داد میزان ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا، خطای استاندارد و درصد خطای مطلق زمانی که از آمار بارندگی و دبی، به‌عنوان ورودی در مدل استفاده شود به ترتیب برابر است با ۰/۹۸۴، ۳۳/۱۹، ۰/۱۲ و ۰/۱۰۸۵. اگر تنها از سری زمانی بارندگی برای پیش‌بینی میزان جریان استفاده شود، آنگاه مقادیر ضریب تبیین، جذر میانگین مربعات خطا، خطای استاندارد و درصد خطای مطلق به ترتیب برابر با ۰/۵۱۱، ۱۸۴/۹، ۰/۶۸ و ۸۱/۹۵ می‌شود. همچنین با افزایش تعداد ایستگاه‌های هیدرومتری و باران‌سنجی در بالادست، مدل قادر خواهد بود دبی را با دقت بیشتری پیش‌بینی نماید. دهقانی و همکاران (۱۳۹۶) مقایسه عملکرد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه بیزین در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه کشکان) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد هر سه مدل، در ساختاری متشکل از ۱ تا ۵ تأخیر زمانی نتایج بهتری نسبت به سایر ساختارهای تعیین‌شده دارد. همچنین، با توجه به معیارهای ارزیابی مشخص شد که از بین مدل‌های به‌کار رفته، مدل ماشین بردار پشتیبان، بیشترین دقت  $R=0/910$ ، کمترین ریشه میانگین مربعات خطا و  $m^3/s$  داده است  $RMSE=0/002$  کمترین میانگین قدر مطلق خطا  $MAE=0/001 m^3/s$  در مرحله صحت‌سنجی را دارا بوده است. در مجموع، نتایج نشان داده است افزایش تعداد پارامتر مؤثر در مدل‌های مختلف جهت شبیه‌سازی موجب عملکرد بهتر در تخمین دبی جریان می‌شود. همچنین نتایج نشان داده است مدل ماشین بردار پشتیبان عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های شبکه بیزین و برنامه‌ریزی بیان ژن دارد. صمدی و فتح‌آبادی (۱۳۹۷) استفاده از مدل‌های سری زمانی، شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان جهت پیش‌بینی دبی ورودی به سد گرگان را بررسی کردند. بدین منظور از داده‌های هیدرومتری ایستگاه قزاقلی با دوره آماری ۴۷ سال و سه مدل سری زمانی، شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان جهت پیش‌بینی استفاده شد و نتایج مدل‌های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در مدل سری زمانی بر اساس معیارهای آکاییک و شوارتز، مدل  $ARIMA(1,0,0)(1,0,1)$  به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شده است. در مدل شبکه عصبی، شبکه با ورودی ۲ و ۱۰ نرون به‌عنوان شبکه برتر انتخاب شده و در مدل ماشین بردار پشتیبان شبکه با ورودی ۱ به‌عنوان شبکه برتر انتخاب شد. در نهایت با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و با توجه به معیارهای ارزیابی مدل‌ها، مدل ماشین بردار پشتیبان بهترین عملکرد را نسبت به دو مدل دیگر داشت. مقادیر RMSE و MAPE برای مدل ماشین بردار پشتیبان به ترتیب ۵/۳۱ و ۱/۰۷، برای مدل شبکه عصبی به ترتیب ۹/۸۸ و ۲/۷۸ و برای مدل سری زمانی به ترتیب ۸/۸۴ و ۱/۲۰ به‌دست‌آمده آمد. بر اساس نتایج این پژوهش، بهترین مدل برای پیش‌بینی دبی ماهانه ورودی به سد گرگان مدل ماشین بردار پشتیبان می‌باشد. حشمتی و حافظ پرست مودت (۱۳۹۷) پیش‌بینی دبی با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی با مدل SARIMA در شرایط خشکسالی (مطالعه موردی: ایستگاه دبی سنجی پیر سلمان در رودخانه جامیشان) را بررسی کرده و برای این منظور از داده‌های بارندگی ماهانه در یک دوره ۲۵ ساله

<sup>1</sup> Standard Error

<sup>2</sup> Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average

(۱۳۹۰-۱۳۶۵) استفاده شده است. با حذف عوامل نا ایستایی در نهایت پارامترهای مدل غیر فصلی SARIMA با استفاده از نرم افزار MINITAB جهت پیش بینی باران ماهانه محاسبه شده و در انتها مقادیر دبی رودخانه به کمک مدل  $(3,0,1)(3,0,1)_2$  SARIMA نسبت به مدل های دیگر با داشتن میانگین خطای کمتر در پیش بینی برآورد گردیده است.

صمدی و همکاران (۱۳۹۷) پیش بینی دبی ماهانه ورودی به سد بوستان در استان گلستان با استفاده از مدل های داده کاوی و ترکیبی را بررسی کردند؛ مقادیر دبی ماهانه ورودی به سد بوستان برای آینده با استفاده از داده های هیدرومتری ایستگاه تمر و به کارگیری سه مدل سری زمانی، شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان و همچنین، سه مدل ترکیبی پیش بینی شده و سپس، با استفاده از معیارهای ارزیابی اقدام به مقایسه عملکرد هر کدام از مدل ها شده است. با توجه به نتایج به دست آمده در مدل، سری زمانی بر اساس کمینه بودن معیارهای آکاییک و شوارتز، مدل  $(2,0,0)(1,0,1)$  ARIMA به عنوان مدل برتر انتخاب شد. در مدل شبکه عصبی، شبکه با ورودی ۲ و ۴ نرون و در مدل SVM شبکه با ورودی ۹، به عنوان شبکه برتر انتخاب شدند. در نهایت، با توجه به نتایج به دست آمده از معیارهای ارزیابی، مدل سری زمانی بهترین عملکرد را داشته است که مقادیر معیارهای میانگین مربعات خطا، متوسط مقادیر مطلق خطای نسبی، میانگین مطلق خطا و نش-ساتکلیف برای این مدل به ترتیب برابر با  $0/88$ ،  $4/71$ ،  $0/24$  و  $0/36$  به دست آمده آمد. در نتیجه، مدل سری زمانی به عنوان بهترین مدل برای پیش بینی دبی ماهانه در این ایستگاه معرفی شد. زینعلی و همکاران (۱۳۹۷) ارزیابی مدل های هوش مصنوعی در مدل سازی جریان رودخانه گاماسیاب را مورد مطالعه قرار دادند که در آن به ارزیابی سه مدل به نام های، برنامه ریزی بیان ژن (GEP)، شبکه بیزین (BN) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) پرداخته شده است؛ داده های مورد استفاده برای این پژوهش، داده های بارش و جریان روزانه رودخانه گاماسیاب نهادند در یک دوره ۱۰ ساله (۱۳۹۱-۱۳۸۱) می باشد. نتایج نشانگر برتری نسبی مدل برنامه ریزی بیان ژن نسبت به بقیه مدل ها بوده و مدل ماشین بردار پشتیبان (SVM) تقریباً عملکرد بهتری نسبت به شبکه بیزین در مدل سازی جریان روزانه رودخانه داشته است. علاوه بر این، سرعت اجرای مدل برنامه ریزی بیان ژن نسبت به بقیه مدل ها بیشتر بوده و در زمان کوتاهی قادر به ارائه نتایج بوده است. همچنین، مدل SVM در تخمین مقادیر کمینه پایانی نیز دچار بیش برآزش شده است. در نهایت مدل برنامه ریزی بیان ژن با ضریب تبیین  $0/923$  و جذر میانگین مربعات  $0/5867$  در مرحله آموزش و ضریب تبیین  $0/9025$  و جذر میانگین مربعات  $0/4936$  در مرحله آزمودن، به عنوان مدل برتر انتخاب شده است. جلالی و همکاران (۱۳۹۸) انتخاب مدل برتر سری زمانی جهت پیش بینی دبی ورودی رودخانه را مورد مطالعه قرار دادند که در آن آبدهی ماهانه حوضه آبریز جامیشان با استفاده از روش های تحلیل سری زمانی مورد پیش بینی قرار گرفت. در این راستا، از داده های ماهانه دبی ورودی به سد جامیشان در شهرستان سنقر استان کرمانشاه در بازه زمانی ۱۳۶۵-۱۳۹۴ استفاده گردید. آنالیز اولیه داده ها شامل بررسی ترم های قطعی سری (تناوب، روند و پرش) بر روی سری زمانی انجام و پس از اطمینان از حذف این ترم ها، داده ها نرمال و ایستایی داده ها مشخص شد، با توجه به معیار آکاییک، مدل  $(1,1,1)$  ARIMA به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید. صمدی و همکاران (۱۳۹۸) بررسی کارایی مدل های ماشین بردار پشتیبان (SVM) و شبکه عصبی در پیش بینی دبی ورودی به سد گلستان را مطالعه کردند. بدین منظور از داده های هیدرومتری چهار ایستگاه قوچمز، پلکوسه، قره شور و اوغان و دو مدل شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان جهت پیش بینی استفاده شد و نتایج مدل های مختلف مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده و با استفاده از معیارهای ارزیابی، در سه ایستگاه قره شور، پل کوسه و اوغان مدل ماشین بردار پشتیبان عملکرد بهتری را نسبت به مدل شبکه عصبی داشته است. و تنها در ایستگاه قوچمز عملکرد مدل شبکه عصبی بهتر بوده است. بر اساس نتایج این تحقیق، بهترین مدل برای پیش بینی دبی ماهانه ورودی به سد گلستان، مدل ماشین بردار پشتیبان می باشد. علی نژادی و همکاران (۱۳۹۹) روش های برنامه ریزی بیان ژن و رگرسیون های پارامتریک و ناپارامتریک در پیش بینی دبی میانگین روزانه رودخانه کارون (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری ملاثانی) را برای پیش بینی میانگین دبی روزانه رودخانه کارون در محل ایستگاه هیدرومتری ملاثانی طی دوره آماری (۱۳۹۶-۱۳۴۶) مورد مقایسه قرار دادند. ترکیب های مختلفی از داده های ثبت شده

<sup>1</sup> Gene Expression Programming

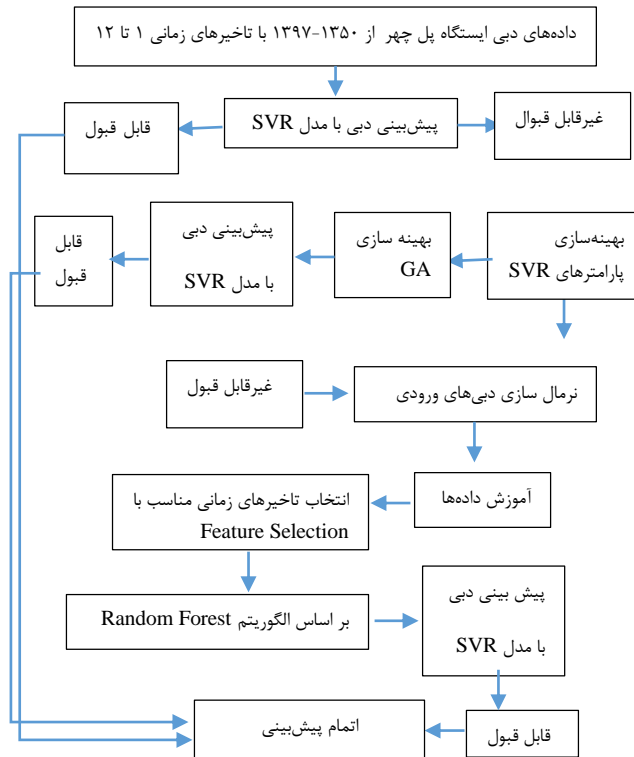
به‌عنوان الگوی ورودی برای پیش‌بینی دبی جریان استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از عملکرد بهتر مدل برنامه‌ریزی بیان ژن با ضریب تبیین ( $R^2 = 0/827$ ) جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE = 59/45$ ) و میانگین خطای مطلق ( $MAE = 26/64$ ) در مرحله صحت‌سنجی برای پیش‌بینی دبی روزانه رودخانه کارون در ایستگاه ملاثانی با تأخیر ۵ روز، در مقایسه با روش‌های LR، NLR و NN-K بوده است. همچنین، ارزیابی عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی مقادیر حداکثر آبدهی جریان نشان داد که همه مدل‌ها میزان جریان را در بیشتر موارد کمتر از مقدار مشاهده‌ای تخمین زده بودند. رحیمی و حافظ‌پرست مودت (۱۳۹۹) مقایسه مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان ژن و آیهکرس را در پیش‌بینی تغییرات رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: سد جامیشان) مورد بررسی قرار دادند و مقادیر ماهانه بارش، دما و دبی سد جامیشان در سال‌های ۲۰۱۷-۱۹۸۸ را به‌عنوان دوره پایه در نظر گرفته‌اند. نتایج حاصل از پیش‌بینی دبی در هر سه مدل رگرسیون بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان ژن و آیهکرس حاکی از کاهش رواناب است که بیشترین کاهش رواناب مربوط به SVM در مدل ESMA\_FLO با ۲۸/۹ درصد و کمترین کاهش رواناب مربوط به GEP در مدل CM5\_CNRM با ۱۴/۱ درصد می‌باشد و در انتها نتایج به‌دست‌آمده حاکی است که مدل‌های آیهکرس و بیان ژن نسبت به روش رگرسیون بردار پشتیبان از دقت مطلوب‌تری برخوردار هستند.

### روش پژوهش

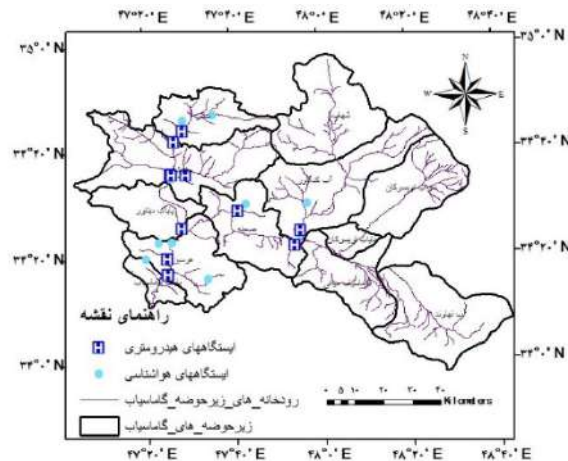
در این پژوهش از داده‌های ماهانه دبی (۵۵۲ گام زمانی) در ایستگاه پل چهر برای پیش‌بینی استفاده شده است که مراحل انجام پژوهش حاضر در نمودار شکل ۱ مشخص شده است.

### منطقه مورد مطالعه

رودخانه گاماسیاب در بخش شمال شرقی حوزه آبریز کرخه جریان دارد. این رودخانه از سراب سنگ سوراخ و چشمه‌سارهای اطراف نهبوند سرچشمه می‌گیرد. در مسیر این رودخانه در رشته‌های فرعی مختلفی به آن ملحق می‌شود. در جنوب بیستون، شاخه فرعی دینور آب به آن پیوسته و به نام گاماسیاب ادامه مسیر می‌دهد و در نزدیکی فرامان به رودخانه قره‌سو متصل شده و پس از آن به نام سیمره وارد خاک لرستان می‌شود و سپس در استان خوزستان به نام کرخه جریان یافته و وارد هورالعظیم می‌شود. رودخانه گاماسیاب یکی از سرشاخه‌های مهم کرخه است و حوزه آبریز آن با مساحتی در حدود ۱۱۶۹۰ کیلومتر مربع بین طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۸ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۸۵ دقیقه شمالی واقع شده است. ارتفاع از سطح دریا در این حوزه بین ۱۲۴۲ تا ۳۵۸۰ متر می‌باشد (جیرانی و همکاران، ۲۰۱۱). شکل ۲ حوزه آبریز گاماسیاب را نشان می‌دهد.



شکل ۱. فلوچارت مراحل انجام پژوهش حاضر



شکل ۲. موقعیت حوضه آبریز گاماسیاب در جنوب غربی کشور، آبراهه‌ها و ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی منطقه



داده‌های دبی ایستگاه هیدرومتری پل چهر به مدت ۴۸ سال (شهریور ۱۳۹۷-۱۳۵۰ مهر) در دسترس است؛ برای مقایسه عملکرد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان ژن در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها؛ ابتدا جریان روزانه مشاهده‌ای این حوضه در ایستگاه هیدرومتری پل چهر جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل‌ها به کار گرفته شد. برای این منظور، در ابتدا ۸۰ درصد از داده‌های جریان روزانه برای واسنجی مدل‌ها انتخاب شده و ۲۰ درصد داده‌ها جهت اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد. معیارهای ضریب همبستگی، ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا برای ارزیابی و نیز مقایسه عملکرد مدل‌ها در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است.

### روش ماشین بردار پشتیبان (SVM)

- ماشین بردار پشتیبان یک طبقه‌بندی کننده دودویی غیر آماری است که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و به اختصار آن را بانام SVM معرفی می‌نمایند (ماترو و همکاران، ۲۰۰۵).
- SVM دارای خواص زیر است (احمدی، ۱۳۹۸):
۱. ایجاد حداکثر تعمیم در طراحی طبقه‌بندی کننده‌ها
  ۲. دارا بودن توانایی یافتن جواب بهینه کلی تابع
  ۳. تهیه خودکار ساختار و سازوکار بهینه در حل مسائل طبقه‌بندی
  ۴. مدل‌سازی توابع غیرخطی با استفاده از کرنل‌های غیرخطی و شیوه حاصل ضرب داخلی در فضاها ی هیلبرت

ماشین بردار پشتیبان الگوریتمی است که مدل‌های خطی منحصربه‌فرد را یافته و با استفاده از آن‌ها حداکثر حاشیه ابر صفحه را حاصل می‌کند. حداکثر شدن حاشیه ابر صفحه، حداکثر شدن تفکیک بین طبقات را حاصل نموده و موجب بهبود دقت در فرآیند مدل‌سازی می‌گردد. به نزدیک‌ترین نقاط آموزشی موجود در حاشیه ابر صفحه، بردارهای پشتیبان اطلاق گردیده و از آن‌ها برای مشخص کردن مرز بین طبقات استفاده می‌شود (شین و همکاران، ۲۰۰۵).

تفاوت اساسی این روش با طبقه‌بندی کننده‌های مرسوم آماری در قابلیت پردازش و طبقه‌بندی داده‌های ابر طیفی بوده و دیگر کاهش تعداد باندها در فرآیندهای مختلف مدل‌سازی نیاز نمی‌باشد. همچنین در این روش با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی تعداد نمونه‌های مورد نیاز برای تشکیل مرزهای کلاس‌ها به دست آمده و یک مرز تصمیم‌گیری خطی بهینه برای جداسازی کلاس‌ها محاسبه می‌شود. اگر داده‌ها به صورت خطی و جدا از هم باشند، SVM با استفاده از ماشین‌های خطی یک سطح بهینه را با کمترین خطا و حداکثر فاصله میان صفحه و نزدیک‌ترین نقاط آموزشی (بردارهای پشتیبان) تفکیک نموده و آموزش می‌دهد (شین و همکاران، ۲۰۰۵).

اگر نقاط آموزشی را به صورت  $[x_i, y_i]$  و بردار ورودی حائز شرط  $x_i \in \mathbb{R}^n$  باشد، در این صورت ارزش هر طبقه به صورت  $y_i \in \{-1, 1\}$   $i=1, \dots, i$  تعریف می‌گردد. آنگاه قواعد تصمیم‌گیری که تعریف می‌شود توسط یک صفحه بهینه که طبقات تصمیم‌گیری باینری را تفکیک می‌کند، به صورت رابطه زیر است:

$$Y = \text{sgn}(\sum_{i=1}^N y_i a_i (X \times X_j) + b) \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $Y$  خروجی رابطه،  $y_i$  ارزش طبقه نمونه  $X_i$  و  $a_i$  و  $b$  پارامترهای تعیین کننده ابر صفحه می باشند. اگر امکان تفکیک داده ها به صورت خطی فراهم نباشد، در این صورت رابطه (۲) به شرح زیر تغییر می یابد.

$$Y = \text{sgn}(\sum_{i=1}^N y_i a_i K(X \times X_j) + b) \quad (2)$$

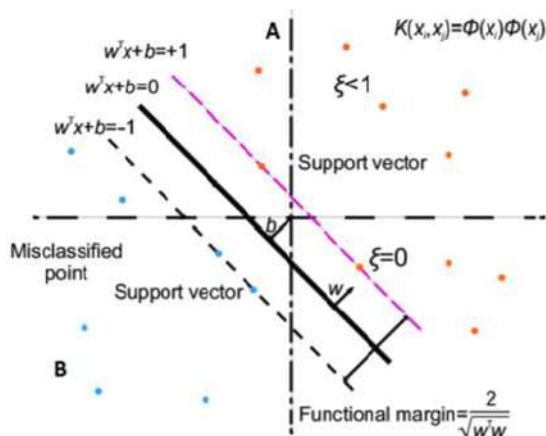
در این رابطه  $K(X \times X_j)$  ماشین های بردار پشتیبان با حالت های مختلف از سطوح تصمیم گیری غیرخطی در فضای داده ها، ضرب های داخلی تولید کرده و بدین منظور نیاز به تعریف معادله خط است. معادله خط در فضای دوبعدی با استفاده از رابطه (۳)، معادله صفحه از رابطه (۴) و معادله صفحه نمایش از رابطه (۵) محاسبه می گردد (چن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$w_1 x_1 + w_2 x_2 + b = 0 \quad (3)$$

$$w_1 x_1 + w_2 x_2 + w_2 x_2 + b = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i x_i + b = 0 \rightarrow w^T x + b = 0, w = \begin{bmatrix} w_1 \\ \dots \\ w_i \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

در شکل (۳) خط پرنگ ممتد با معادله  $w^T x + b = 0$  به عنوان خط تفکیک کننده داده ها در صفحه بوده و آن ها را به دو دسته  $A$  و  $B$  تقسیم نموده است. این خط فضایی را تشکیل می دهد که در آن داده های متعلق به دسته  $A$  عدد مثبت و داده های متعلق به دسته  $B$  عدد منفی به خود بگیرند. اما در  $SVM$  علاوه بر استفاده از خط جداکننده از یک حاشیه اطمینان نیز برای دسته بندی استفاده می شود (شکل ۳). در این حالت هیچ یک از داده ها اجازه قرارگیری در ناحیه میانی را ندارند. با فرض اینکه خط با معادله  $w^T x + b = 0$  نقطه صفر مرزی است بنابراین برای داده ها بسته به موقعیت قرارگیری در کلاس های  $A$  و  $B$  به ترتیب معادلات  $w^T x + b > 1$  و  $w^T x + b < -1$  برقرار است. ضخامت تفکیک کننده در  $SVM$  یک ناحیه را شامل شده و سبب می گردد که فرآیند طبقه بندی در مقابل وجود ریسک برازش اشتباه مقاوم تر شود (فرودی خور و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۳. نمایش گرافیکی بردارهای پشتیبان

در مسائلی که داده‌ها به‌طور خطی تفکیک‌پذیر نباشند، می‌توان با نگاشت داده‌ها به یک فضای ویژگی، آن‌ها را به‌صورت خطی جدا پذیر نمود. در حالت کلی ابعاد این فضا بی‌نهایت بوده، بنابراین انجام محاسبات در فضای ویژگی می‌تواند پرهزینه باشد. برای غلبه بر این مشکل از توابع کرنل استفاده می‌شود، در نتیجه معادله صفحه تفکیک‌کننده برای حالت غیرخطی با دخالت تابع کرنل  $K(x)$  به‌صورت رابطه زیر است (چن و همکاران، ۲۰۰۲).

$$w^T x + b = 0 \rightarrow w^T k(x) + b = 0 \quad (6)$$

که در رابطه فوق تابع  $K(x)$  با انجام نگاشت، داده‌ها را از فضای غیرخطی به یک فضای خطی منتقل می‌نماید. می‌توان این تابع را به‌صورت  $K(x_i, x_j)$  نیز تعریف نموده و به‌وسیله آن فضاها پیچیده‌تری را مورد بررسی قرارداد. به این فرآیند ترفند کرنل اطلاق می‌گردد. در مدل SVM انتخاب تابع کرنل بسیار مهم بوده و در مسائل مختلف با توجه به ماهیت مسئله می‌توان موارد متفاوتی را در نظر گرفت. بنابراین نمی‌توان تابعی را به‌طور قطعی به‌عنوان تابع مناسب برای SVM معرفی کرد. انواع مختلف تابع در جدول (۱) ارائه شده است. تابع کرنل خطی، حالت خاصی از تابع کرنل چندجمله‌ای بوده و در مسائل ساده‌تر کارایی خوبی از خود نشان می‌دهد ولی در مسائل پیچیده تابع کرنل چندجمله‌ای می‌تواند بسیار مفیدتر باشد. در تابع کرنل چندجمله‌ای پارامتر  $d$  باید از طرق آزمون و خطا یا از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی محاسبه شود. تابع کرنل گوسی یا شعاعی (RBF) نوع دیگری از توابع کرنل بوده و معمولاً در مسائلی به‌کاربرده می‌شود که هیچ‌گونه شناختی از نوع و ماهیت داده‌ها در دسترس نباشد. به‌طور کلی در توابع کرنل می‌باید مقادیر بهینه ضرایب  $c$ ،  $\epsilon$ ،  $d$  و  $\gamma$  برآورد گردد (احمدی، ۱۳۹۸).

جدول ۱. توابع کرنل رایج در ماشین‌های بردار پشتیبان

نوع تابع	تابع کرنل
خطی	$k(X_i, X_j) = X_i^T \times X_j$
چند جمله‌ای	$k(X_i, X_j) = (\gamma X_i^T \times X_j)^d$
تانزانته هیپربولیک	$k(X_i, X_j) = \tanh(\gamma X_i^T \times X_j)$
RBF	$k(X_i, X_j) = -\exp(-\gamma  X_i - X_j ^2)$

## الگوریتم ژنتیک

علم ژنتیک، علمی است که در مورد چگونگی توارث و انتقال صفات بیولوژیکی از نسلی به نسل دیگر صحبت به عمل می‌آورد. عامل اصلی صفات بیولوژیکی در موجودات زنده کروموزوم‌ها و ژن‌ها است و نحوه عملکرد آن‌ها به گونه‌ای است که در نهایت ژن‌ها و کروموزوم‌های برتر و قوی‌تر باقی‌مانده و ژن‌های ضعیف‌تر از بین می‌روند. (کزا و همکاران، ۱۹۹۲).

الگوریتم ژنتیک (GA) برای اولین بار توسط هلند<sup>۲</sup> (۱۹۷۵) استفاده و به‌عنوان ابزار قوی بهینه‌سازی توسعه پیدا کرد. GA یک الگوریتم جستجو برگرفته از طبیعت بیولوژیکی و فرآیند انتخاب طبیعی می‌باشد. اساس این روش مبتنی بر نظریه داروین که در محیط متغیر همواره موجوداتی ادامه حیات دارند که از همه پایدارتر ترند، می‌باشد. این الگوریتم از مجموعه‌ای از جواب‌های تصادفی اولیه به نام جمعیت آغاز می‌گردد. هر جمعیت از مجموعه کروموزوم‌ها که هر کدام یک جواب مسئله هستند، تشکیل می‌شود و هر کروموزوم مجموعه‌ای از ژن‌ها و در واقع متغیرهای تصمیم مسئله می‌باشد.

به‌طور کلی در چرخه الگوریتم ژنتیک ابتدا یک جمعیت اولیه از افراد بدون در نظر گرفتن معیار خاصی و به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. برای تمامی کروموزوم‌های نسل صفر مقدار برازش با توجه به تابع هدف تعیین می‌شود. سپس با مکانیسم‌های مختلف تعریف‌شده برای عملگر انتخاب زیرمجموعه‌ای از جمعیت اولیه انتخاب خواهد شد. روی این افراد انتخاب‌شده عملیات برش و جهش در صورت لزوم با توجه به‌صورت مسئله اعمال خواهد شد. حال باید این افراد مکانیسم الگوریتم‌های ژنتیک در موردشان اعمال شده است، با افراد جمعیت اولیه (نسل صفر) از نظر مقدار برازش مقایسه شوند. قطعه انتظار می‌رود که افراد نسل اول با توجه به اعمال الگوریتم‌های ژنتیک روی آن‌ها از شایستگی بیشتری برخوردار باشند. اما لزوماً این چنین نخواهد بود. به‌رحال افرادی باقی خواهند ماند که بیشترین برازش را داشته باشند. چنین افرادی در مقام یک مجموعه به‌عنوان جمعیت اولیه برای مرحله بعدی الگوریتم عمل خواهد کرد. (گلدبرگ، ۲۰۰۳).

هر مرحله تکرار الگوریتم یک نسل جدید را ایجاد می‌کند که با توجه به اصلاحاتی که در آن صورت پذیرفته است، رو به‌سوی تکامل خواهد داشت. لازم به ذکر است که در استفاده از الگوریتم ژنتیک می‌توان برای انتخاب نسل، نوع ترکیب کروموزوم‌ها، چگونگی جهش و مواردی از این قبیل روش‌های متنوع و متفاوتی به کار برد.

الگوریتم ژنتیک مانند سایر روش‌های بهینه‌سازی با معرفی پارامترها، تابع هدف، قیودات، تابع هزینه و هزینه آغاز می‌شود و هم‌چنین خاتمه‌ی آن نیز مانند سایر روش‌های بهینه‌سازی با کنترل همگرایی موردنظر هر مسئله موردنظر است. در این میان اگرچه الگوریتم ژنتیک از نقطه‌نظر آغاز و خاتمه مانند سایر روش‌هاست اما از لحاظ عملکرد داخلی بهینه‌سازی نسبت به سایر روش‌ها بسیار متفاوت است. به‌طور کلی مسیر بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک در شکل زیر نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Koza et al

<sup>2</sup> John Holland

<sup>3</sup> Goldberg

## پیش‌پردازش داده‌ها

عملیاتی که روی داده‌ها قبل از ورود به مدل‌ها انجام می‌شود پیش‌پردازش نام دارد. روش‌های مختلفی برای از بین بردن پرش، تناوب و عدم ایستایی در داده‌ها وجود دارد. نرمال‌سازی داده‌ها به منظور هماهنگ‌تر شدن بهتر داده‌ها و افزایش سرعت اجرای مدل‌ها یکی از روش‌های رایج در مدل‌سازی است که در این روش داده‌ها با استفاده از فرمول زیر استاندارد شده و در ادامه محاسبات در نظر گرفته شده است.

$$Z_{i,T} = \left( \frac{X_{i,T} - \bar{X}_T}{S_T} \right) \quad (7)$$

در این رابطه  $Z_{i,T}$  و  $X_{i,T}$  مقادیر استاندارد شده و اولیه داده‌ها در سال  $T$  و در  $i$  و  $\bar{X}_T$  و  $S_T$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار ماهانه در طول سال‌های مختلف می‌باشد.

## روش انتخاب ویژگی<sup>۱</sup>

انتخاب ویژگی را می‌توان به عنوان فرآیند شناسایی ویژگی‌های مرتبط و حذف ویژگی‌های غیر مرتبط و تکراری باهدف مشاهده زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها که مسئله را به خوبی و با حداقل کاهش درجه کارایی تشریح می‌کنند تعریف کرد. روش‌های انتخاب ویژگی به منظور مواجهه با داده‌های ابعاد بالا، به موافقه‌های جدایی‌ناپذیر از فرآیند یادگیری مبدل شده‌اند. یک انتخاب ویژگی صحیح می‌تواند منجر به بهبود یادگیرنده استقرایی از جهت‌های گوناگون از جمله سرعت یادگیری، ظرفیت تعمیم و سادگی مدل استنتاج شده شود.

## الگوریتم جنگل تصادفی<sup>۲</sup>

جنگل تصادفی یک کلاس از روش‌های دسته‌بندی گروهی می‌باشد که مخصوص درخت تصمیم طراحی گردیده است. روش پوششی مبتنی بر درخت‌های تصادفی به طور گسترده‌ای برای مشخص کردن ویژگی‌های بارز استفاده می‌شود که نقشی اساسی در کیفیت پیشگویی دارد. اهمیت کل ویژگی‌ها بر اساس دقت دسته‌بندی محاسبه می‌شود که این کار در زمانی که تمامی ویژگی‌ها در درخت به صورت تصادفی پخش باشند، انجام می‌شود. یک جنگل جدید به صورت تکرار شونده به وسیله حذف ویژگی‌هایی که در عملکرد بهتر دسته‌بندی نقشی ندارند ساخته می‌شود. این حلقه تکرار تا زمانی که ویژگی برای حذف باقی نمانده باشد ادامه می‌یابد. در نهایت بهترین مجموعه از ویژگی‌ها که کمترین خطا را تولید می‌کند، از جنگل استخراج می‌شود. مدل جنگل‌های تصادفی در مسائل مختلف به صورت گسترده استفاده شده است و این به علت دقت بالای پیشگویی این روش است (بریمان، ۲۰۰۶).

## معیارهای ارزیابی مدل

جهت انتخاب مدل برتر برای انجام پیش‌بینی از معیارهای ارزیابی زیر استفاده شده است:

واریانس تبیین شده (Exp\_Var)، ناش-ساتکلیف (NSE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بین مقادیر مشاهده شده و مدل شده به صورت زیر محاسبه گردید:

<sup>1</sup> Feature Selection

<sup>2</sup> Random Forest

<sup>3</sup> Breiman

$$\text{Exp.Var}(Q, \hat{Q}) = 1 - \frac{\text{Var}(Q_i - \hat{Q}_i)}{\text{var}(Q_i)} \quad (۸)$$

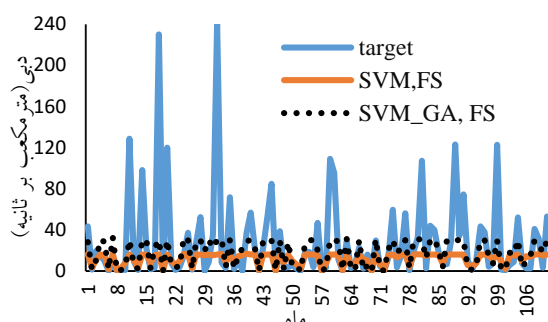
$$\text{NSE}(Q, \hat{Q}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (۹)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2}{n}} \quad (۱۰)$$

که در آن  $Q_i$  مقادیر مشاهده شده،  $\hat{Q}_i$  مقادیر محاسبه شده،  $\bar{Q}_i$  میانگین مقادیر مشاهده شده است.

### یافته‌ها

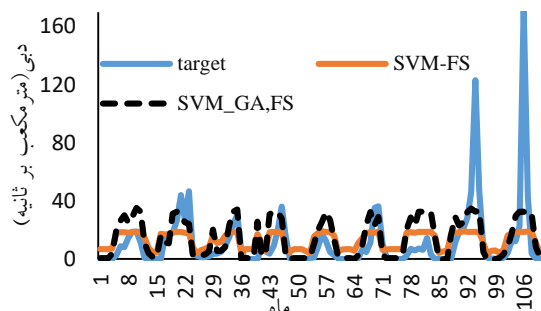
در این مطالعه ابتدا داده‌ها را از یک تا دوازده دوره تأخیر زمانی صورت گرفت و ۱۲ بعد برای پیش‌بینی ترسیم گردید. سپس دو سناریو برای پیش‌بینی سری زمانی دبی، با و بدون اعمال پیش‌پردازش (استانداردسازی) در نظر گرفته شد. در هر سناریو نیز در نظر گرفتن داده‌های آموزش و آزمودن با دو رویکرد سری زمانی یا غیر سری زمانی انجام شد. بدین معنی که توالی داده‌های ماهانه در رویکرد مدنظر قرار گرفته اما در رویکرد غیر سری زمانی این توالی در فرآیند پیش‌بینی مدنظر قرار نگرفته است. در هر رویکرد نیز دو روش با و بدون انتخاب ویژگی مدل بررسی شده است. نهایتاً برای حالت‌های گفته شده از مدل SVR ساده و بهینه شده با الگوریتم ژنتیک در پیش‌بینی استفاده شده است. در همه حالت‌ها به ترتیب ۸۰ و ۲۰ درصد داده‌ها برای آموزش و آزمودن مدل در نظر گرفته شده است. کلیه فرآیند کد نویسی به زبان برنامه‌نویسی پایتون صورت گرفته و از کتابخانه‌های ویژه اس کی لرن<sup>۱</sup> و اپتیمال<sup>۲</sup> نیز استفاده شده است. پیش‌بینی دبی‌های جریان ماهانه در سناریوی اول - بدون پیش‌پردازش (بدون اعمال استانداردسازی داده‌ها) در دو رویکرد سری زمانی و غیر سری زمانی و دو حالت انتخاب ویژگی و بدون انتخاب ویژگی انجام شد. نتایج نشان داد که در سناریوی اول در هر دو رویکرد و برای حالتی که انتخاب ویژگی مدل صورت نگیرد و کل ۱۲ بعد (تأخیرهای ۱ تا ۱۲) مدنظر باشد نتایج مدل SVR ساده و بهینه شده فقط به یک عدد ثابت معطوف شده و دقت لازم برای پیش‌بینی را ندارد. اما در سناریوی اول و با انتخاب ویژگی مدل که تأخیر زمانی ۱ را با حدود ۹۲ درصد خصوصیات از ۱۲ بعد در نظر گرفت، نتایج بهتری حاصل گردید. همان‌طور که در اشکال ۴ و ۵ نشان داده شده نتایج ظاهری و محاسبه معیارهای خطا نشان داد در این حالت (انتخاب ویژگی مدل) نتایج بهتری نسبت به حالت اول حاصل شده اما به نتایج پیش‌بینی‌ها اطمینانی وجود ندارد. و همچنان نتایج بسیار ضعیفی حاصل شده است.



شکل ۴. نتایج مدل پیش‌بینی در سناریو اول- رویکرد غیر سری زمانی، حالت انتخاب ویژگی مدل

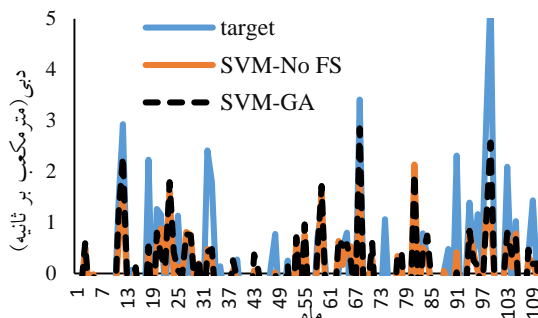
<sup>۱</sup> Sklearn

<sup>۲</sup> Optimal



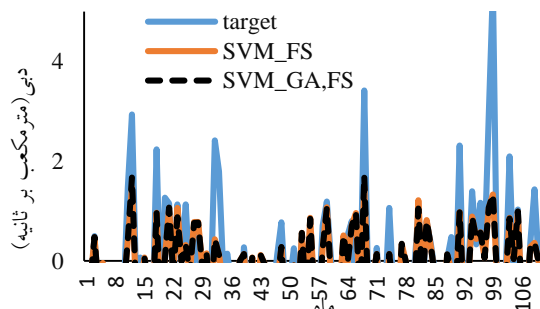
شکل ۵. نتایج مدل پیش‌بینی در سناریو اول- رویکرد سری زمانی، حالت انتخاب ویژگی مدل

دقت نتایج در رویکرد سری زمانی نسبت به رویکرد غیر سری زمانی در حالت‌های مشابه نتایج بهتری داشته است. هرچند در شرایط استفاده از بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی پارامترهای مدل SVR نتایج بهتری حاصل شده است اما در دبی‌های پیک ماه‌های ۹۴ و ۱۰۶ در دوره آزمون مدل دقت پایینی داشته است. نتایج سناریوی دوم با اعمال پیش‌پردازش با عمل استانداردسازی در اشکال ۶ تا ۹ ارائه شده است. نتایج سناریو دو با رویکرد غیر سری زمانی و در حالت عدم اعمال انتخاب ویژگی مدل و منظور نمودن کلیه ۱۲ بعد به‌عنوان ورودی مدل در شکل ۶ نشان داده شده است.



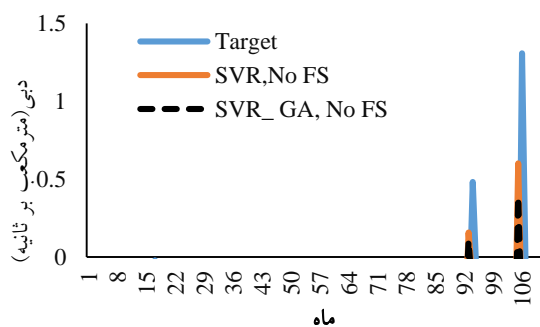
شکل ۶. نتایج مدل پیش‌بینی در سناریو دوم- رویکرد غیر سری زمانی، حالت عدم انتخاب ویژگی مدل

همچنین نتایج سناریو دو با رویکرد غیر سری زمانی در حالت اعمال انتخاب ویژگی مدل که منجر به تأخیرهای ۱ و ۱۲ با حدود ۹۲ درصد خصوصیات ۱۲ بعد گردید، در شکل ۷ ارائه شده است.

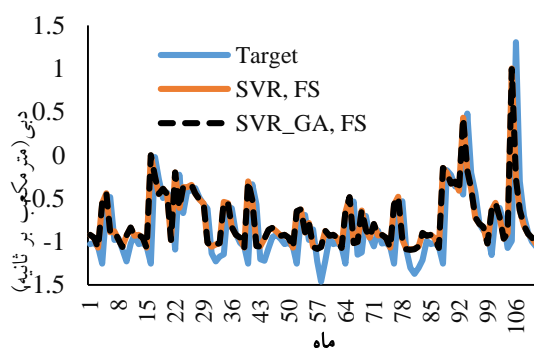


شکل ۷. نتایج مدل پیش‌بینی در سناریو دوم- رویکرد غیر سری زمانی، حالت انتخاب ویژگی مدل

همان‌طور که از اشکال ۶ و ۷ ملاحظه می‌گردد، نتایج پیش‌بینی با اعمال استانداردسازی بر داده‌ها در شرایط مشابه سناریو یک به‌صورت معنی‌داری بهبود یافته است. اثر بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک بر دقت مدل نسبت به SVR ساده در حالت عدم انتخاب ویژگی مدل جهت پیش‌بینی دبی سیلاب بیشتر بوده است. همچنین نتایج مدل در سناریوی دوم رویکرد سری زمانی در دو حالت بدون و با اعمال انتخاب ویژگی مدل در اشکال ۸ و ۹ ارائه شده است.



شکل ۸. نتایج مدل پیش‌بینی در سناریو دوم- رویکرد سری زمانی، حالت عدم انتخاب ویژگی مدل



شکل ۹. نتایج مدل پیش‌بینی در سناریو دوم- رویکرد سری زمانی، حالت انتخاب ویژگی مدل



همان‌طور که از اشکال ۸ و ۹ مشاهده می‌شود بهترین نتایج به‌دست‌آمده در بین همه موارد ذکر شده مربوط به سناریوی دوم و رویکرد سری زمانی است که انتخاب ویژگی مدل اعمال نشده و کلیه ۱۲ بعد در ورودی مدل SVR در نظر گرفته شده است. در این شرایط تفاوت محسوسی در نتایج مدل ساده SVR و بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک ندارد. برای تحلیل بیشتر در جداول ۲ و ۳ شاخص‌های ارزیابی دقت مدل در شرایط آموزش و آزمون مدل SVR در دو سناریوی مطرح‌شده، رویکردهای گوناگون و حالت‌های مختلف ارائه شده است. همان‌طور که از جدول ۲ مشاهده می‌شود، شاخص‌های ارزیابی مدل در دو حالت آموزش و آزمون مدل در حالت بدون انتخاب ویژگی مدل در هر دو رویکرد سری زمانی و غیر سری زمانی نتایج بسیار ضعیفی برای هر دو مدل SVR ساده و بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک حاصل شده است. از طرفی بهترین نتیجه در این سناریو در حالت انتخاب ویژگی مدل در رویکرد سری زمانی با مدل بهینه‌شده SVR توسط الگوریتم ژنتیک اتفاق افتاده و مقادیر پیش‌بینی مدل در محدوده آزمون برای دبی‌های حداقل و میانگین از دقت خوبی برخوردار بوده اما توانایی لازم در پیش‌بینی دبی‌های پیک را نداشته است.

جدول ۲. نتایج ضرایب ارزیابی مدل در سناریوی اول (بدون استانداردسازی) در رویکرد و حالت‌های گوناگون

آموزش			تست			حالت		مدل SVR	انتخاب	رویکرد
Exp.Var	NSE	RMSE	Exp.Var	NSE	RMSE	C	Epsilon			
۰/۰۲۹	-۰/۱۳	۴۶/۱۱	-۶/۷E-۰۷	-۰/۰۴۶	۲۲/۸۱	۱	۰/۰۱	ساده	بدون	با
۰/۰۶۳	-۰/۰۹	۴۵/۳۲	-۱/۴۷E-۰۶	-۰/۰۵۱	۲۲/۸۶	۲/۱۸۱	۰/۰۰۶۳	الگوریتم ژنتیک	بدون	با
۰/۱۱۵	-۰/۰۵۷	۴۴/۶۱	۰/۱۶	۰/۱۵۶	۲۰/۵	۱	۰/۰۱	ساده	با	با
۰/۴۷۹	۰/۴۲	۳۳/۰۲	۰/۲۴۳	۰/۲۲۲	۱۹/۶۷	۱۵/۳۱	۰/۰۰۶۳	الگوریتم ژنتیک	با	با
۰/۰۳	-۰/۱۴۸	۴۳/۶۷	-۱/۴۵E-۰۶	-۰/۱۴۷	۴۵/۰۱۸	۱	۰/۰۱	ساده	بدون	بدون
۰/۰۸	-۰/۰۹۸	۴۲/۷	-۴E-۰۶	-۰/۱۴۷	۴۵/۰۱	۲/۷۵۵	۰/۰۰۹۷	الگوریتم ژنتیک	بدون	بدون
۰/۱۲۱	-۰/۰۴۹	۴۱/۷۳	۰/۰۹۶	-۰/۰۵۳	۴۳/۱۲	۱	۰/۰۱	ساده	با	بدون
۰/۵۰۵	۰/۴۵۲	۳۰/۱۷	۰/۲۳۴	۰/۱۷۴	۳۸/۲۱	۱۶/۹۷	۰/۰۰۱۴	الگوریتم ژنتیک	با	بدون

جدول ۳. نتایج ضرایب ارزیابی مدل در سناریوی دوم (با استانداردسازی) در رویکرد و حالت های گوناگون

آموزش			تست						حالت	رویکرد
Exp.Var	NSE	RMSE	Exp.Var	NSE	RMSE	C	Epsilon	مدل SVR	انتخاب	سری
									ویژگی	زمانی
۰/۶۶۸	۰/۶۶	۰/۵۸۳	۰/۱۵۵	۰/۱۰۵	۰/۳۷۶	۱	۰/۰۱	ساده	بدون	با
۰/۷۸۷	۰/۷۸۴	۰/۴۶۵	۰/۱۷۷	۰/۱۲۶	۰/۳۷۲	۳/۹۶۵	۰/۰۰۲۸	الگوریتم ژنتیک	بدون	با
۰/۵۵	۰/۵۳۹	۰/۶۷۸	۰/۰۱۹	-۰/۰۳۲	۰/۴۰۴	۱	۰/۰۱	ساده	با	با
۰/۵۵۲	۰/۵۴۱	۰/۶۷۷	۰/۰۱۹	-۰/۰۳۲	۰/۴۰۴	۱/۰۴	۰/۰۰۶۳	الگوریتم ژنتیک	با	با
۰/۷۰۴	۰/۶۹۸	۰/۵۳۳	۰/۵۵۶	۰/۵۴	۰/۷۷	۱	۰/۰۱	ساده	بدون	بدون
۰/۸۵۵	۰/۸۵۴	۰/۳۷۱	۰/۶۱۳	۰/۶۰۴	۰/۷۱۴	۸/۸۹	۰/۰۰۹	الگوریتم ژنتیک	بدون	بدون
۰/۵۷۶	۰/۵۶۷	۰/۶۳۸	۰/۵۹۹	۰/۵۸	۰/۷۳۶	۱	۰/۰۱	ساده	با	بدون
۰/۵۹۹	۰/۵۸۸	۰/۶۲۳	۰/۶۰۹	۰/۵۹	۰/۷۲۶	۷/۳۱	۰/۰۰۱۳	الگوریتم ژنتیک	با	بدون

همچنین با توجه به نتایج جدول ۳ مشاهده می گردد که در سناریو ۲ با عمل استانداردسازی به طرز معنی داری نتایج مدل پیش بینی SVR در هر شرایطی نسبت به سناریوی ۱ دقت بالاتری یافته است. در شرایطی که داده ها استاندارد شوند نتایج رویکرد غیر سری زمانی در حالت های مشابه نسبت به سری زمانی بهتر بوده بطوریکه مقادیر NSE و واریانس تبیین محاسبه شده در مرحله آزمون مدل بالای ۵۰ درصد بوده است. در مقایسه حالت انتخاب ویژگی مدل نتایج هر دو مدل SVR ساده و بهینه شده نسبت به عدم انتخاب ویژگی مدل تفاوت معنی داری نسبت به حالت بدون اعمال انتخاب ویژگی مدل نداشته است. این مسئله در خصوص نتایج مدل بهینه شده نسبت به مدل ساده SVR نیز صادق است. در نهایت بهترین نتیجه در این سناریو مربوط به رویکرد غیر سری زمانی و با انتخاب ویژگی مدل توسط مدل SVR بهینه شده با الگوریتم ژنتیک است.

### بحث

در این مطالعه به پیش بینی داده های دبی ماهانه مربوط به ۴۶ سال آمار ایستگاه پل چهر واقع بر رودخانه گاماسیاب با مدل SVR ساده و بهینه شده با الگوریتم ژنتیک پرداخته شد. برای این منظور ابتدا به داده ها از یک تا دوازده دوره تأخیر زمانی داده شد و بدین ترتیب ۱۲ بعد به عنوان ورودی مدل پیش بینی حاصل گردید. به منظور بررسی مقایسه اثر استانداردسازی و تأثیر مدل بهینه ساز الگوریتم ژنتیک بر دقت نتایج مدل SVR حالت های مختلفی مورد ارزیابی قرار گرفت. دو سناریوی اصلی با و بدون اعمال پیش پردازش (استانداردسازی) در نظر گرفته شد. جهت بررسی اثر توالی داده ها بر نتایج پیش بینی در مراحل آموزش و آزمون مدل SVR در هر سناریو نیز دو رویکرد سری زمانی یا غیر سری زمانی در نظر گرفته شد. همچنین به منظور بررسی اثر ابعاد ورودی مدل در دقت پیش بینی مدل نیز در هر رویکرد نیز دو حالت با و بدون انتخاب ویژگی مدل با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی بررسی شده است. در همه حالت ها به ترتیب ۸۰ و ۲۰ درصد داده ها برای آموزش و آزمون مدل در نظر گرفته شده

است. کلیه فرآیند کد نویسی به زبان برنامه‌نویسی پایتون صورت گرفته است. نتایج نشان داد که در سناریوی اول، بدون اعمال پیش‌پردازش (استانداردسازی داده‌ها) در دو رویکرد سری زمانی و غیر سری زمانی در حالتی که انتخاب ویژگی مدل صورت نگیرد و کل ۱۲ بعد (تأخیرهای ۱ تا ۱۲) مدنظر باشد نتایج مدل SVR ساده و بهینه‌شده فقط به یک عدد ثابت نزدیک شده و نوسانات دبی در ماه‌های مختلف را برآورد نکرده لذا دقت لازم برای پیش‌بینی را ندارد. اما با انتخاب ویژگی مدل توسط الگوریتم جنگل تصادفی ابعاد از ۱۲ به ۱ که مربوط به تأخیر زمانی ۱ است کاهش یافته و نوسانات دبی ماهانه پیش‌بینی می‌گردد اما همچنان دقت نتایج ضعیف است. اما در این سناریو دقت نتایج در رویکرد سری زمانی نسبت به رویکرد غیر سری زمانی در حالت‌های مشابه نتایج بهتری داشته است. همچنین اثر بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی پارامترهای مدل SVR در دقت نتایج معنی‌دار شده است ولی همچنان در دبی‌های پیک ماه‌های ۹۴ و ۱۰۶ در دوره آزمون مدل دقت پایینی داشته است.

در سناریوی ۲، با اعمال استانداردسازی بر داده‌ها در شرایط مشابه سناریو یک نتایج به صورت معنی‌داری بهبود یافته است. اثر بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک بر دقت مدل پیش‌بینی نسبت به SVR ساده در حالت عدم انتخاب ویژگی مدل که توسط الگوریتم جنگل تصادفی دو بعد با تأخیرهای ۱ و ۱۲ محاسبه شده‌اند، در پیش‌بینی دبی سیلاب بیشتر بوده است. نهایتاً بهترین نتایج به دست آمده در بین همه موارد ذکر شده مربوط به سناریوی دوم و رویکرد سری زمانی است که انتخاب ویژگی مدل اعمال نشده و کلیه ۱۲ بعد در ورودی مدل SVR در نظر گرفته شده است. در این شرایط تفاوت محسوس در نتایج مدل ساده SVR و بهینه‌شده با الگوریتم ژنتیک ندارد.

### نتیجه‌گیری

به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی چنانچه عمل استانداردسازی بر داده‌ها صورت نگیرد منظور نمودن رویکرد سری زمانی (توالی داده‌ها مدنظر باشد) و کاهش ابعاد ورودی مدل با الگوریتم جنگل تصادفی منجر به نتایج بهتری در مدل پیش‌بینی SVR خواهد شد و استفاده از بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک نسبت به مدل ساده آن تأثیر معنی‌داری بر بهبود نتایج خواهد داشت. در مقابل با انجام عمل استانداردسازی بهترین جواب در رویکرد غیر سری زمانی که توالی داده‌ها در انتخاب دوره‌های آموزش و آزمون مدنظر نیست و حالت کاهش ابعاد ورودی مدل حاصل گردید. در این شرایط مدل بهینه‌ساز الگوریتم ژنتیک تأثیر معنی‌داری بر دقت نتایج پیش‌بینی نسبت به مدل ساده SVR نداشته است.

### تقدیر و تشکر

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمانشاه برای در اختیار گذاشتن اطلاعات موردنیاز این پژوهش اعلام کنند.

### منابع

- احمدی، فرشاد. (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد روش‌های ماشین‌بردار پشتیبان و سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی در پیش‌بینی جریان ماهانه رودخانه‌ها (مطالعه موردی رودخانه‌های نازلو و سزار). تحقیقات آب و خاک ایران، (۳)۵۱، ۶۸۶-۶۷۳.  
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.290994.668356>
- احمدی، فرشاد، رادمنش، فریدون، و میرعباسی نجف‌آبادی، رسول. (۱۳۹۳). مقایسه روش‌های برنامه‌ریزی ژنتیک و ماشین‌بردار پشتیبان در پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه (مطالعه موردی: رودخانه باراندوزچای). نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، (۶)۲۸، ۱۱۷۱-۱۱۶۲.  
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.32406>
- جلالی، محمد نبی، قزلباش نادری، بابک، گویلی، افروز، و بهرامی، جمیل. (۱۳۹۸). انتخاب مدل برتر سری زمانی جهت پیش‌بینی دبی ورودی رودخانه. سومین کنفرانس ملی هیدرولوژی مناطق نیمه خشک با محوریت آب، انسان، طبیعت، سندج. <https://civilica.com/doc/903801>

- جیرانی، فرزین، مرید، سعید. و مریدی، علی. (۱۳۹۰). اثر دقت مکانی نقشه رقومی ارتفاع در واسنجی و برآورد رواناب و رسوب با استفاده از مدل CUP-SWAT. مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، ۱۸(۴)، ۱۰۲-۸۱.  
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1390.18.4.5.5>
- حشمتی، سارا، و حافظ پرست مودت، مریم. (۱۳۹۷). پیش‌بینی دبی با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی با مدل SARIMA در شرایط خشک‌سالی مطالعه موردی: ایستگاه دبی سنجی پیر سلمان در رودخانه جامیشان. مجله علمی سامانه‌های سطوح آبیگر باران، ۶(۱)، ۸۲-۷۳.  
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.24235970.1397.6.1.7.8>
- دهقانی، رضا، یونسی، حجت ...، و ترابی پوده، حسن. (۱۳۹۶). مقایسه عملکرد مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان ژن و شبکه بیزین در پیش‌بینی جریان رودخانه‌ها (مطالعه موردی: رودخانه کشکان). نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک، ۲۴(۴).  
<https://dx.doi.org/10.22069/jwfst.2017.12398.2701>
- رحیمی، بنفشه، و حافظ پرست مودت، مریم. (۱۳۹۹). مقایسه مدل‌های رگرسیون بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی بیان ژن و آیه‌کرس در پیش‌بینی تغییرات رواناب تحت تأثیر تغییر اقلیم (مطالعه موردی: سد جامیشان). مجله تحقیقات آب‌و خاک ایران، ۵۱(۱۰).  
<https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.303779.668640>
- زارع‌زاده مهریزی، محبوبه، و بزرگ حداد، امید. (۱۳۹۸). شبیه‌سازی و پیش‌بینی آبدی با استفاده از الگوریتم ترکیبی ANN-GA. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۴(۵)، ۹۵۴-۹۴۲.  
<https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.5295>
- زینعلی، معصومه، گلابی، محمدرضا، شریفی، محمدرضا، و حافظ پرست مودت، مریم. (۱۳۹۷). ارزیابی مدل‌های هوش مصنوعی در مدل‌سازی جریان رودخانه، مطالعه موردی: رودخانه گاماسیاب. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آب‌خیز، ۱۱(۴)، ۹۵۴-۹۴۱.  
<https://dx.doi.org/10.22092/ijwmse.2018.115870.1370>
- سیدیان، سید مرتضی، سلیمانی، مریم، و کاشانی، مجتبی. (۱۳۹۳). پیش‌بینی دبی جریان رودخانه با استفاده از داده‌کاوی و سری زمانی. نشریه آکو هیدرولوژی، ۱(۳)، ۱۶۷-۱۷۹.  
<https://dx.doi.org/10.22059/ije.2014.54219>
- صمدی، میثم، بهره‌مند، عبدالرضا، و فتح‌آبادی، ابوالحسن. (۱۳۹۷). پیش‌بینی دبی ماهانه ورودی به سد بوستان در استان گلستان با استفاده از مدل‌های داده‌کاوی و ترکیبی. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آب‌خیز، ۱۱(۴)، ۱۰۵۸-۱۰۴۴.  
<https://dx.doi.org/10.22092/ijwmse.2018.108926.1251>
- صمدی، میثم، مسلم، امیر پیام، بیت‌اله پور چهارمحالی، ایمان، کوشافر، لیلا، و فرم‌هینی فراهانی، محمد ایمان. (۱۳۹۸). بررسی کارایی مدل‌های ماشین بردار پشتیبان (SVM) و شبکه عصبی در پیش‌بینی دبی ورودی به سد گلستان. نهمین کنفرانس علمی پژوهشی آب‌خیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، کرمان.  
<https://civilica.com/doc/1007309>
- صمدی، میثم، و فتح‌آبادی، ابوالحسن. (۱۳۹۷). استفاده از مدل‌های سری زمانی، شبکه عصبی و ماشین بردار پشتیبان جهت پیش‌بینی دبی ورودی به سد گرگان. مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، ۴(۴)، ۳۰۹-۲۹۹.  
<https://dx.doi.org/10.22034/jewe.2018.128256.1256>
- علی‌نژادی، مهدی، موسوی، سید فرهاد، و حسینی، خسرو. (۱۳۹۹). مقایسه روش‌های برنامه‌ریزی بیان ژن و رگرسیون‌های پارامتریک و ناپارامتریک در پیش‌بینی دبی میانگین روزانه رودخانه کارون (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری ملاثانی). نشریه علوم آب‌و خاک، ۲۵(۱)، ۴۳-۶۲.  
<http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3999-fa.html>
- فروزی خور، علی، صناعی، مجتبی، و اژدری مقدم، مهدی. (۱۳۹۶). مقایسه سامانه استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و سامانه ماشین بردار پشتیبان (SVM) در تخمین میزان ضریب دبی سرریزهای لبه‌تیز. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۱(۵)، ۷۸۴-۷۷۲.  
[http://idj.iaid.ir/article\\_59839.html](http://idj.iaid.ir/article_59839.html)
- معینی، حمید، بندکداری، حسین، فاطمی، سید احسان، و ابتهاج، عیسی. (۱۳۹۴). مدل‌سازی دبی ماهانه ورودی به مخزن سد جامیشان با مدل‌های خود همبسته با میانگین متحرک تجمعی و سامانه استنتاج فازی-عصبی انطباقی. نشریه دانش آب‌و خاک، ۲۶(۱/۲)، ۲۸۵-۲۷۳.  
[https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article\\_4894.html](https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4894.html)

ناظری تهرودی، محمد، هاشمی، سید رضا، احمدی، فرشاد، و ناظری تهرودی، زهرا. (۱۳۹۵). بررسی دقت مدل‌های ANFIS، SVM و GP در مدل‌سازی مقادیر دبی جریان رودخانه. نشریه آکو هیدرولوژی، ۳(۳)، ۳۶۱-۳۴۷. <https://dx.doi.org/10.22059/ije.2016.60024>

نوذری، حامد، و توکلی، فاطمه. (۱۳۹۶). پیش‌بینی جریان با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان بر مبنای سری‌های زمانی دبی و بارش در ایستگاه‌های بالادست (مطالعه موردی: ایستگاه هیدرومتری تله زنگ). مجله مدل‌سازی در مهندسی، ۱۶(۵۴)، ۹۵-۱۰۴. <https://dx.doi.org/10.22075/jme.2017.11363.1112>

## References

- Ahmadi, F., Radmanesh, F., & Mirabbasi, R. (2016). Comparison between Genetic Programming and Support Vector Machine Methods for Daily River Flow Forecasting (Case Study: Barandoozchay River). *Water and Soil*, 28(6), 1162-1171. <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.32406> [In Persian]
- Ahmadi, F. (2020). Evaluation of Support Vector Machine and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Performance in Prediction of Monthly River Flow (Case Study: Nazlu chai and Sezar Rivers). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(3), 673-686. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2019.290994.668356> [In Persian]
- Alinezhadi, M., Mousavi, S.F., & Hosseini, K. (2021) Comparison of Gene Expression Programming (GEP) and Parametric and Non-Parametric Regression Methods in the Prediction of the Mean Daily Discharge of Karun River (A case Study: Mollasani Hydrometric Station). *JWSS*, 25(1). 43-62. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-3999-fa.html> [In Persian]
- Banzhaf, W., Nordin, P., Keller, R.E., & Francone, F.D. (1998). *Genetic Programming*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA. [https://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14344-1\\_10](https://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14344-1_10)
- Breiman, L., (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324>
- Chen, Q., Dai, G., & Liu, H. (2002). Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), 683-688. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:7\(683\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(683))
- Dehghani, R., Yonesi, H., & Torabi Poudeh, H. (2017). Comparing the performance of Support Vector Machines, Gene Expression Programming and Bayesian networks in predicting river flow (Case study: Kashkan River). *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(4), 161-177. <https://dx.doi.org/10.22069/jwfst.2017.12398.2701> [In Persian]
- Goldberg, D.E. (2002). *The Design of Innovation: Lessons from and for Competent Genetic Algorithms*. Addison-Wesley. Reading, MA, 2002 edition.
- Foroudi Khowr, A., Saneie, M., & Azhdari Moghaddam, M. (2017). Comparison of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) and Support Vector Machines(SVM) for discharge capacity prediction of a sharp-crested weirs. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 11(5), 772-784. [http://idj.iaid.ir/article\\_59839.html](http://idj.iaid.ir/article_59839.html) [In Persian]
- Jalali, M.N., Ghezelbash Naderi, B., Guili, A., & Bahrami, J. (2017). Select the best time series model to predict the river inlet flow. *Third National Conference on Semi-Arid Hydrology with a focus on water, humans, nature, Sanandaj*. <https://civilica.com/doc/903801> [In Persian]
- Jeirani, F., Morid, S., & Moridi, A. (2011). Effect of spatial accuracy of digital elevation map on calibration and estimation of runoff and sediment using CUP-SWAT model. *Journal of Soil Conservation Research*, 18(4), 81-102. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222069.1390.18.4.5.5> [In Persian]
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press. Ann Arbor.

- Heshmati, S., & Hafez Parast Movadat, M. (2018). Flow prediction using time series analysis with SARIMA model in drought conditions Case study: Pir Salman flowmeter station in Jamishan river. *Rainwater catchment systems*, 6(1), 73-82. <http://jircsa.ir/article-1-309-fa.html> [In Persian]
- Koza, J., (1992). *Genetic programming on the programming of computers by natural selection*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Mantero, P., Moser, G., & Serpico, S.B. (2005). Partially supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(3), 559-570. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.467&rep=rep1&type=pdf>
- Moeeni, H., Bonakdari, H., Fatemi, S.A., & Ebtehaj, I. (2016). Modeling the Monthly Inflow to Jamishan Dam Reservoir Using Autoregressive Integrated Moving Average and Adaptive Neuro- Fuzzy Inference System Models. *Water and Soil Science*, 26(1-2), 273-285. [https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article\\_4894.html](https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4894.html) [In Persian]
- Nazeri Tahroudi, M., Hashemi, S., Ahmadi, F., & Nazeri Tahroudi, Z. (2016). Evaluation the Accuracy of ANFIS, SVM and GP Models to Modeling the River Flow Discharge. *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(3), 347-361. <https://dx.doi.org/10.22059/ije.2016.60024> [In Persian]
- Nozari, H., & tavakoli, F. (2018). Stream Flow Prediction Using Support Vector Machine Based on Discharge and Precipitation Time series on Upstream Stations (Case Study: Taleh Zang Hydrometric Station). *Journal of Modeling in Engineering*, 16(54), 95-104. <https://dx.doi.org/10.22075/jme.2017.11363.1112> [In Persian]
- Samadi, M., & Fathabadi, A. (2019). Application of Time Series, ANN, and SVM Models in Forecasting the Gorgan Dam Inflow Rate. *Environment and Water Engineering*, 4(4), 299-309. <https://dx.doi.org/10.22034/jewe.2018.128256.1256> [In Persian]
- Samadi, M., Bahremand, A., & Fathabadi, A. (2019). The Boustan Dam monthly inflow forecasting using data-driven and ensemble models in the Golestan Province. *Watershed Engineering and Management*, 11(4), 1044-1058. <https://dx.doi.org/10.22092/ijwmse.2018.108926.1251> [In Persian]
- Samadi, M., Moslem, A.P, Beitollahpour Chaharmahali, A., Kushafar, L., & Farmahini Farahani, M.A. (2019). Investigating the efficiency of support vector machine (SVM) and neural network models in predicting the inlet flow to Golestan Dam. 9th Scientific Conference on Watershed Management and Management of Water and Soil Resources, Kerman. <https://civilica.com/doc/10073> [In Persian]
- Seyedian, S., Soleimani, M., & Kashani, M. (2014). Predicting streamflow using data-driven model and time series. *Iranian journal of Ecohydrology*, 1(3), 167-179. <https://dx.doi.org/10.22059/ije.2014.54219> [In Persian]
- Shin, K.S., Lee, T.S., & Kim, H.J. (2005). An application of support vector machines in bankruptcy prediction model. *Expert systems with applications*, 28(1), 127-135. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2004.08.009>
- Sivapragasam, C, Shie-Yui Liang, S, Y., & Pasha, M.F.K., (2001). Rainfall and runoff forecasting with SSA-SVM approach. *Journal of Hydro informatics*. 3(3), 141-152. <https://doi.org/10.2166/hydro.2001.0014>
- Sudheer, Ch., Anand, N., Panigrahi B.K., & Mathur, S., (2013). Stream flow forecasting by SVM with quantum behaved particle swarm optimization. *Neuro computing*, 101, 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2012.07.017>
- Rahimi, B., & Hafez Parast Movadat, M. (2020). Comparison of support vector regression models, gene expression programming and IHACRES in predicting runoff changes under the influence of climate

- change (Case study: Jamishan Dam). Iranian Soil and Water Research, 51(10), 2483-2499. <https://dx.doi.org/10.22059/ijswr.2020.303779.668640> [In Persian]
- Zarezadeh, M., & Bozorg Haddad, O. (2010). Inflow Simulation and Forecasting Optimization Using Hybrid ANN-GA Algorithm. Water and Soil, 24(5), 942-954. <https://dx.doi.org/10.22067/jsw.v0i0.5295> [In Persian]
- Zeinalie, M., Golabi, M.R., Sharifi, M.R., & Hafez Parast Movadat, M. (2018). Evaluation of Artificial Intelligence Models in River Flow Modeling, Case Study: Gamasiab River. Journal of Watershed Engineering and Management, 11(4), 941-954. <https://dx.doi.org/10.22092/ijwmse.2018.115870.1370>. [In Persian]



## Identification of transboundary water resources management issues from hydropolitical perspective (Case Study: Harirud River)

Amir Khoshima<sup>1</sup> , Emad Mahjoobi<sup>2✉</sup> 

<sup>1</sup> M. Sc Student of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: [amirkhoshsima@shahroodut.ac.ir](mailto:amirkhoshsima@shahroodut.ac.ir)

<sup>2</sup> Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: [emahjoobi@shahroodut.ac.ir](mailto:emahjoobi@shahroodut.ac.ir)

---

### ABSTRACT

---

#### Introduction

Water as a material and dynamic body in its essence along with politics as a concept of expediency has given rise to a new perspective of hydropolitics. It is predicted that in the Middle East, as a region with increasing water challenges, any country with richer water resources will be able to have a deeper impact on the regional hydropolitical and geopolitical relations. Considering the importance and role of critical role in the development of Middle East, Iran's eastern transboundary rivers need to be carefully considered and their legal status is considered. Harirud is a common river between Afghanistan, Iran and Turkmenistan. A review of previous studies indicates that each researcher has researched the issue of transboundary waters sharing from a specific perspective and has rarely identified and examined all the various issues affecting the management of these resources. Accordingly, the purpose of this article is to investigate the issue of management of transboundary water resources from different aspects of the concept of hydropolitics and the classification of identified factors in an innovative structure is to be used as a plan in interactions and advancement of negotiations. In this respect, Harirud catchment, which is one of the common basins with a lot of complexity and variety of issues, was selected as the study area.

#### Methodology

The study of Harirud catchment and its dams shows that Selma dam on the main branch upstream and Kabgan and Pishdan dams on the tributaries in Afghanistan and Doosti dam on the border of Iran and Turkmenistan on the main river in have been constructed downstream. Iran and the two countries of Afghanistan and Turkmenistan, as stakeholders of the Harirud catchment, have always sought to make maximum use of and maximize their interests from this common resource. The policy of water containment by Afghanistan has led to a sharp decline in the influx of water to Iran. Since the nationalist view has led to the formation of controversial hydropolitical relations between the upstream and downstream countries of this common catchment, achieving the optimal management model of this common catchment is doubly important to achieve their mutual benefits. Identifying issues that affect rivers is critical to the sustainable and successful management of the basin.

Increasing the water needs will cause the current crisis situation to escalate in the future and create the fundamental security, social, political, cultural, economic and environmental consequences of those fundamental challenges. In this study, identification and study of the most important indicators and influential components in Harirud catchment as one of the examples of border water resources management, based on a detailed study of the existing literature in this field, including more than 50 domestic and foreign articles from 2005 to 2020 and also performed using remote sensing and the results are classified into four main areas of hydropolitics.

#### Results and discussion

One of the fundamental measures in the analysis of hydropolitical event in the transboundary intestinal system is to identify the variables that play a role in the importance of transboundary waters for countries. Undoubtedly, recognition and awareness of the issues involved in a water dispute issue is essential in the process of successful and sustainable resolution. It should be noted that some factors directly and some indirectly affect the problem. To resolve common transboundary water source disputes, it is necessary to address all issues directly or indirectly involved in hydropolitics. Direct issues such as political economy, political geography, water and energy economics and national security and indirect issues such as population growth rate, culture and religion, land use change and climate change. These issues are effective in the sustainable management of the catchment to ensure the strategic interests of stakeholders and their true identification will lead to the formation of comprehensive and purposeful negotiation.

Harirud enters Iran from Afghanistan and its catchment area in the global arid and semi-arid belt has made them dependent on this resource to meet their irrigation needs. Afghanistan's development plans have reduced the flow of Harirud water to Iran so that it can lead to a challenge in north - eastern Iran. Therefore, in this study, all issues were identified and based on this, the main area of hydropolitics with a suitable framework were classified into four areas: political, economic, social and environmental. Today, in modern world, water, this vital substance, is still used as a weapon and tool to advance other political goals, especially during the formation of conflicts. Lack of fresh water resources and at the same time the lack of special relationship between water and security by experts and specialists in the field of management of joint transboundary water resources, can be considered as a lasting challenge in international relations. Thus, from a hydropolitical point of view, the political areas were classified into four criteria: political economy, political geography, national security, and international relations. Basically, the existence of a common water source in the transboundary areas is an important factor in the transboundary disputes of countries. Environmental consequences are also seen as a major economic threat; Therefore, the economic variable is a factor in increasing the coefficient of environmental security in a region, so the economic areas from a hydropolitical perspective were classified into five criteria: water economy, energy economics, joint economic plans, transit line capacity, and exports and imports. Due to climatic conditions and water shortage in three countries: Iran, Afghanistan and Turkmenistan Increasing water demand for industries and agriculture along with population growth rate, the trend of hydropolitical relations should be based on the framework of human and social security approach and should stay on away from

---



---

political and security approaches. In the sense that human approaches are legal aspects and precede political boundaries in hydropolitical relations. Therefore, from the hydropolitical point of view, the social area was classified into two criteria: socio-political and socio-cultural. Today, environmental threats are considered as one of the new threats to national security. Growing concerns about the future of mankind and the negative impact of environmental Destruction on life have found environmental problems increasingly important in national and international politics. Therefore, the ecological area in the hydropolitical perspective was classified into three criteria: climate change, land use change and physical and hydrological characteristics of the basin.

#### **Conclusions**

The Harirud common basin, which includes Iran, Afghanistan and Turkmenistan, as stakeholders in shared water resources, has always sought to maximize and maximize its benefits from shared rivers. Afghanistan's policy of controlling water by reservoir dams has reduced the flow of Harirud water to Iran. Currently, supplying a part of Mashhad water through Doosti dam, due to the uncertainties and high risk due to the instability of the flow rate of the Harirud River and the non-negotiation of the three countries over the exploitation of this common water resource has been accompanied and, in the long run, the reliability of water supply will be challenged.

From the studied issues, it can be concluded that the most important criteria defined in the political area are political economy, political geography, national security and international relations; In the economic area are water economics, energy economics, joint economic plans, capacity of transit lines and export and import; In the social area are social, political, culture and health; and in the environmental area, climate change, land use change, physical characteristics and hydrology of the catchment area are of special importance and issues can be directed to these axes in negotiations to achieve desirable results.

**Keywords:** Climate Change, Harirud, Hydropolitics, Water Economy, Water Security.

**Article Type:** Research Article

**Article history:** **Received:** 05 July 2021 **Revised:** 27 July 2021 **Accepted:** 07 August 2021 **ePublished:** 20 February 2022

---

**Cite this article:** Khoshsim, A., & Mahjoobi, E. (2022). Identification of transboundary water resources management issues from hydropolitical perspective (Case Study: Harirud River)., *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 1(1), 48-69. DOI: 10.22126/ATWE.2021.6623.1001

Publisher: Razi University

© The Author(s).





## شناسایی مسائل مدیریت منابع آب مرزی از دیدگاه دیپلماسی آب (مطالعه موردی: رودخانه هریرود)

امیر خوش‌سیما<sup>۱</sup> ID، عماد محجوبی<sup>۲</sup> ID

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود. رایانامه: [amirkhoshsima@shahroodut.ac.ir](mailto:amirkhoshsima@shahroodut.ac.ir)  
<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب و محیط‌زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود. رایانامه: [emahjoobi@shahroodut.ac.ir](mailto:emahjoobi@shahroodut.ac.ir)

### چکیده

منابع آب مشترک موجب بروز تنش‌ها و همچنین همکاری‌هایی در سطح منطقه‌ای تا بین‌المللی شده است. بی‌شک شناسایی عوامل مؤثر در مدیریت چنین منابعی پیش‌نیاز مذاکرات دو یا چندجانبه برای رفع تنش‌های موجود و ایجاد همکاری بین ذی‌نفعان خواهد بود. لذا در این تحقیق سعی شده تا با نگاهی جامع به مسائل مدیریت منابع آب مرزی، پارامترهای مؤثر از دیدگاه هیدروپلیتیک شناسایی و در قالب چارچوبی ابداعی دسته‌بندی شوند. رویکرد مورد استفاده برای رسیدن به این هدف، بررسی عمیق ادبیات موجود در این زمینه و همچنین بهره‌گیری از سنجش‌ازدور برای مطالعه معیارهای مختلف می‌باشد. حوضه آبریز هریرود به‌عنوان یکی از نمونه‌های بارز مسائل آب مرزی درگیر تنش‌های خاص میان سه کشور ایران، افغانستان و ترکمنستان است و می‌تواند انتخاب مناسبی برای پوشش عوامل مختلف در این زمینه باشد. چارچوب ابداعی بر مبنای چهار محور سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به‌عنوان ابعاد اصلی هیدروپلیتیک ارائه شده و بر اساس نظر خبرگان و کارشناسان اولویت‌بندی شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای دستیابی به یک توافق جامع و پایدار در فرآیند مذاکرات دو یا چندجانبه بیشترین تمرکز باید بر روی محورهای سیاسی و اقتصادی و در قالب معیارهای امنیت ملی، روابط بین‌الملل، اقتصاد آب، اقتصاد سیاسی، جغرافیای سیاسی، طرح‌های اقتصادی مشترک و صادرات و واردات معطوف گردد. در این راستا توجه به زیرمعیارهای برتری موقعیت جغرافیایی، مدیریت منابع آب موجود، ثبات حاکمیت سیاسی، مدیریت آب، امنیت غذایی، هیدرولوژی حوضه، تبادلات آب و انرژی، تجارت آب و تعارض منافع راهبردی بیشترین تأثیر را در فرآیند مذاکرات خواهد داشت.

**واژه‌های کلیدی:** امنیت آبی، اقتصاد آب، تغییر اقلیم، هریرود، هیدروپلیتیک

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۴ مرداد ۱۴۰۰، اصلاح: ۰۵ مرداد ۱۴۰۰، پذیرش: ۱۶ مرداد ۱۴۰۰، چاپ الکترونیکی: ۰۱ اسفند ۱۴۰۰

**استناد:** خوش‌سیما، ا.، و محجوبی، ع. (۱۴۰۰). شناسایی مسائل مدیریت منابع آب مرزی از دیدگاه دیپلماسی آب (مطالعه موردی: رودخانه هریرود)، فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، (۱)، ۴۸-۶۹. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2021.6623.1001



©نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

## مقدمه

با وارد شدن مفهوم حوضه آبریز به‌عنوان یک سیستم یکپارچه، دولت‌ها پذیرفتند که در مورد یک رودخانه مشترک باید کل حوضه آبریز، آن را به‌عنوان یک سیستم مشترک موردتوجه قرار دهند. بر این اساس هرگونه تغییر کمی و کیفی در بخشی از حوضه آبریز می‌تواند در بخش‌های دیگر این سیستم تأثیراتی داشته باشد و لذا حق دولت‌ها در این مورد بی‌حدوحد نیست. همچنین علیرغم اینکه بخشی از حوضه آبریز در قلمرو کشوری واقع شده و تحت حاکمیت کامل آن دولت قرار دارد، اما در نحوه استفاده و بهره‌برداری از آن اختیار کامل وجود نداشته و باید حقوق سایر کشورهای واقع در آن حوضه آبریز را محترم شمرد. این نگاه جدید زمینه‌ساز حل بسیاری از چالش‌های بهره‌برداری از آب‌های مشترک میان کشورهای است (عزتی، ۱۳۹۰).

آب یک منبع حیاتی و منحصربه‌فرد است که هیچ‌جانشینی برای آن پیش‌بینی نمی‌شود. در آغاز هزاره‌ی جدید، کمبود آب، تغییر الگوهای مصرف، از بین رفتن منابع طبیعی و توسعه بیابان‌ها، آلودگی و فقدان زیرساخت‌های مناسب، بشر را به‌سوی بحران جهانی آب سوق داده است (پاپلی یزدی و وثوقی، ۱۳۹۰). هیدروپلیتیک در ادبیات جغرافیای سیاسی به‌واکاوای جایگاه منابع آب در مناسبات قدرت واحدهای سیاسی - فضایی در مقیاس فراملی، ملی و فراملی می‌پردازد (کاویانی راد، ۱۳۹۵). منازعه و همکاری در حوضه‌های آبریز بین‌المللی و استفاده چندگانه از منابع آب‌های فرامرزی باعث می‌شود هیدروپلیتیک یکی از موارد پیچیده و متضاد شود که کشورها و جامعه بین‌الملل در حال حاضر با آن مواجه است (متقی، ۱۳۹۷). در عصر حاضر با توجه به مرزبندی‌های سیاسی و کمبود منابع آب، رودخانه‌های بین‌المللی نقش و اهمیت فراوانی یافته‌اند، به‌طوری‌که تحلیلگران سیاسی معتقدند که جنگ‌های آینده بیشتر بر سر آب بوده و منابع آبی، کانون‌های تنش و بحران‌ساز در عرصه روابط بین‌الملل خواهند بود. چراکه به دلیل مشکلاتی مانند تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی، تغییر الگوهای زمانی و مکانی بارش، تغییر الگوی مصرف آب و کاهش تراز آب سفره‌های زیرزمینی و فرونشست زمین در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، آب در جایگاه یکی از حساس‌ترین، مهم‌ترین و تنش‌زاترین مسائل امنیتی قرار گرفته است. افزایش نیازهای آبی باعث می‌شود که این وضعیت در آینده تشدید گردد و تبعات امنیتی، اجتماعی، سیاسی، فرهنگی، اقتصادی و محیط‌زیستی ناشی از آن چالش‌های بنیادی پایداری ایجاد نماید. شواهد نشان می‌دهد که تنش‌های آبی که در برخی موارد به شکل بحران یا حتی جنگ آب متجلی شده‌اند، دیرگاهی است که در مقیاس فراملی و منطقه‌ای آغاز شده است. این در حالی است که برنامه‌ها و زیرساخت‌های موجود، ناتوان از رویارویی با تنش آبی فراگیر کنونی و آینده هستند (مختاری‌هشی و کاویانی راد، ۱۳۹۸).

هیدروپلیتیک ترکیبی متوازن از دو واژه آب و سیاست است و تأثیر آب بر سیاست و تصمیم‌گیری‌های سیاسی در سطوح محلی، منطقه‌ای و فرمانطقه‌ای را که می‌تواند موجب تنش یا همگرایی در این سطوح شود، مورد مطالعه قرار می‌دهد. هیدروپلیتیک به‌واسطه نهادهای ژئوپلیتیکی می‌تواند منابع مشترک آبی را از نظر سیاسی بدون تنش و درگیری بین کشورهای ذی‌نفع به‌صورت پایدار مدیریت کند (رای و همکاران، ۲۰۱۷). برخی از کشورهای جهان برای تأمین آب موردنیاز خود به احداث سد روی رودها و رودخانه‌ها روی آورده‌اند. درعین‌حال بیشتر سدها بر روی رودهایی احداث می‌شود که در چند کشور جریان دارند. بیش از چهار درصد مردم جهان در اطراف رودهایی زندگی می‌کنند که در بیش از دو کشور جریان دارند. در این شرایط بروز درگیری میان کشورهای ذی‌نفع امری اجتناب‌ناپذیر است. کشورهایی که در بالادست رودها قرار دارند معمولاً از موقعیت طبیعی فرادست در استفاده بیشتر از آب رودهای مشترک برخوردارند. در عصر حاضر با پیدایش دولت‌های مدرن و شکل‌گیری مرزهای سیاسی، کارکرد منابع آبی در سمت‌گیری‌های سیاسی نمود بیشتری یافته به‌گونه‌ای که در بهره‌مندی از این منابع شاهد بروز تنش‌های فزاینده به‌ویژه در مناطق کم‌بارش و خشک هستیم. از چنین منظری است که واقع‌گرایان، بنیاد بسیاری از تنش‌های آینده را بحران آب معرفی می‌کنند. به‌طور کل رودخانه‌های مرزی درگیر با مسائل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی متعددی است و می‌تواند منشأ درگیری‌های حاکمیتی باشد. مدیریت صحیح و موفق منابع آب فرامرزی موجب رشد اقتصادی در کنار امنیت ملی و منطقه‌ای می‌شود. این اتفاق می‌تواند احتمال مناقشات بین‌المللی آبی را تعدیل کند (رای و همکاران، ۲۰۱۷). در شرایط عدم همکاری، هر کشور از منابع آب موجود قبل از ورود به کشور همسایه حداکثر بهره‌برداری را می‌کند. به همین دلیل، پتانسیل درگیری و تنش بر سر استفاده از رودخانه‌های مشترک بالا می‌باشد. ضمن اینکه در اغلب موارد مدیریت آب‌های فرامرزی به‌صورت غیر یکپارچه بوده و تنها چند معیار خاص از میان مجموعه مسائل مرتبط را در نظر گرفته است. این امر باعث

<sup>1</sup> Rai et al

بروز ناهماهنگی‌هایی بین موضوعی و مدیریت بین بخشی می‌شود. این مسئله در اغلب معاهدات بین‌المللی آبی قابل مشاهده است؛ چراکه به‌طور معمول فقط تعداد کمی از مسائل و مشکلات و معیارها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند (رای و همکاران، ۲۰۱۹). بخش قابل توجهی از مرزهای ایران درگیر حوضه‌های آبریز مشترک با همسایگان است. در این بین رودخانه‌های مرزی شرق کشور با توجه به اهمیت و نقش حساسی که در توسعه این منطقه دارند، باید به‌طور دقیق و اساسی مورد توجه قرار گرفته و وضعیت حقوقی آن‌ها بررسی گردد. این مناطق شامل قلمرو دو حوضه آبریز قره‌قوم و هامون است. این دو حوضه در قیاس با دیگر نواحی کشور از میزان بارش کمتری برخوردار است. دو رودخانه مهم در این حوضه‌های آبریز، هریرود و هیرمند می‌باشد که هر دو از ارتفاعات افغانستان سرچشمه می‌گیرند. هریرود رودخانه مشترک بین سه کشور افغانستان، ایران و ترکمنستان است.

### مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در حوزه هیدروپلیتیک طی سال‌های اخیر مطالعات و تحقیقات ارزشمندی انجام شده است. سینایی (۱۳۹۰) در پژوهشی با توجه به شرایط کم‌آبی کشورهای ایران، افغانستان و ترکمنستان، رشد جمعیت سه کشور و نیاز رو به رشد به آب در صنعت و کشاورزی، توسعه همکاری‌های منطقه‌ای در مسائل آبی را مستلزم پرهیز از رویکردهای رئالیستی به امنیت و آب و تمرکز بر توجه به این دو مقوله در چهارچوب رویکرد امنیت انسانی دانست. این چهارچوب توسعه می‌تواند به همکاری‌های آبی و طرح‌های مشترک در حوضه هریرود بر اساس اهداف راهبردی و نیاز متقابل مانند مدیریت هماهنگ و یکپارچه منبع آب مشترک، مشاوره مستمر با بهره‌برداران محلی و کنترل رشد جمعیت و مهاجرت منجر شود. زرقانی و لطفی (۱۳۹۰) به‌صورت اسنادی و با روش توصیفی-تحلیلی نقش و تأثیر دوگانه رودخانه مرزی را بر روابط کشورها و با تأکید بر رودخانه مرزی هریرود، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به تحلیل نقش این منبع آبی مشترک در ایجاد همکاری و همگرایی بین دو کشور ایران و ترکمنستان پرداختند. سپس با معرفی ۴ نوع همگرایی سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و ساختاری نشان دادند عوامل اقلیمی می‌تواند نقش بسزایی در تنش‌های منطقه داشته باشد. همچنین از سد دوستی به‌عنوان نمونه‌ای از همکاری و نظام حقوقی بهره‌برداری مشترک بین ایران و ترکمنستان یاد کردند. علیزاده و پیشگاهی فرد (۱۳۹۲) بر این باورند که متغیرهای اقتصادی از مهم‌ترین متغیرهای ایجادکننده همگرایی منطقه‌ای به شمار می‌روند. همچنین از آنجایی که توسعه پایدار، انسان محور است، تهدیدهای زیست‌محیطی به‌عنوان عامل اصلی تهدیدکننده اقتصادی دیده می‌شود. پس متغیر اقتصادی سبب افزایش ضریب امنیت زیست‌محیطی در یک منطقه می‌شود. پالو (۲۰۱۳) تحقیقی در مورد روند جهانی امنیت آب و تهدیدهای ثبات منطقه ای ناشی از منابع آب فرامرزی انجام داد. او ضمن تشریح مسائل منابع آب مرزی افغانستان، به بررسی علل و عوامل بروز درگیری‌های بین‌المللی این کشور با همسایه‌های خود پرداخت و در انتها چارچوبی برای مدیریت درست منابع آب این منطقه ارائه کرد. قندهاری و همکاران (۱۳۹۵) به چگونگی تعامل بین سه کشور ایران، افغانستان و ترکمنستان پرداخته و با استفاده از نظریه بازی‌ها به همراه یک مدل جامع مدیریت منابع آب، اقدام به ارائه ابزاری کارآمد برای ارزیابی سناریوهای مختلف مدیریتی در حوضه آبریز هریرود کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با بهره‌مندی از دانش مدیریت منابع آب می‌توان تهدید منازعات آبی را به فرصتی پرفایده برای کشورها تبدیل کرد. عطاری و آوریده (۱۳۹۶) قراردادهای آبی بین‌المللی مانند معاهدات، پروتکل‌ها و موافقت‌نامه‌های دو یا چندجانبه که موجب کاهش یا شدت اختلافات و مناقشات بین کشورهای ذی‌نفع می‌شود را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به معاهده ۱۲۹۹ ایران با جماهیر شوروی بر سر رودهای شمال شرق ایران و معاهده ۱۳۶۱ رودخانه هیرمند با افغانستان که در آن به پراکندگی زمانی و موضوعی، نحوه تقسیم آب، تبادل داده‌ها و اطلاعات، ساختارهای سازمانی مشترک و حل‌وفصل اختلافات می‌پردازد اشاره داشتند. نتایج آن‌ها نشان داد که بیشتر قراردادهای از نظر وجود مفاد مربوط به تبادل داده و اطلاعات، ساختار سازمانی و حل‌وفصل اختلافات در سطح مطلوبی قرار دارند اما در فاز اجرا موفق نبوده‌اند. مختاری‌هشی و کاویانی‌راد (۱۳۹۸) اذعان داشتند که بحران آب دیرگاهی است که آغاز شده و در آینده نیز فزاینده و گسترده‌تری خواهد داشت. در این میان، دانش جغرافیای سیاسی در قالب گرایش هیدروپلیتیک، این وضعیت را در طیفی از مناسبات قدرت واحدهای سیاسی- فضایی از مقیاس فروملی تا جهانی و از همکاری تا هم‌آوردی واکاوی می‌کند. آن‌ها معتقدند که

<sup>1</sup> Palau

به دلیل پدیده‌هایی مانند دگرگونی آب‌وهوا در مقیاس جهانی و تغییر الگوی بارش در مقیاس منطقه‌ای، کشورهایی که پیش‌ازاین، آب‌وهوای خشک و کم‌بارش داشتند، با برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی، افت سطح آبخوان‌ها و فرونشست زمین روبرو شده‌اند. رای و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی به معرفی ۱۴ معیار تأثیرگذار بر مدیریت آب‌های فرامرزی پرداختند. سپس این معیارها را در حوضه‌ای فرضی با استفاده از دریافت نظرات کارشناسان و خبرگان به روش خوشه‌بندی فازی اولویت‌بندی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که به ترتیب معیارهای امنیت غذایی، سودآوری منصفانه، کیفیت و کمیت جریان آب و هیدروژمونی مهم‌ترین اولویت‌ها برای پیشبرد مذاکرات هستند.

بررسی مطالعات پیشین حاکی از آن است که هر یک از محققین از دیدگاهی خاص مسئله به اشتراک‌گذاری آب‌های مرزی و فرامرزی را موردپژوهش قرار داده و به‌ندرت به شناسایی و بررسی کلیه مسائل مختلف مؤثر در امر مدیریت این منابع پرداخته‌اند. بر این اساس هدف از تحقیق حاضر، بررسی مسئله مدیریت منابع آب مرزی از جنبه‌های مختلف مفهوم هیدروپلیتیک و دسته‌بندی عوامل شناسایی‌شده در قالب ساختاری ابداعی است تا به‌عنوان نقشه راهی در تعاملات و پیشبرد مذاکرات به کار گرفته شود. در این راستا حوضه آبریز هریرود که یکی از حوضه‌های مشترک با پیچیدگی‌ها و تنوع موضوعات بسیار زیاد است به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید.

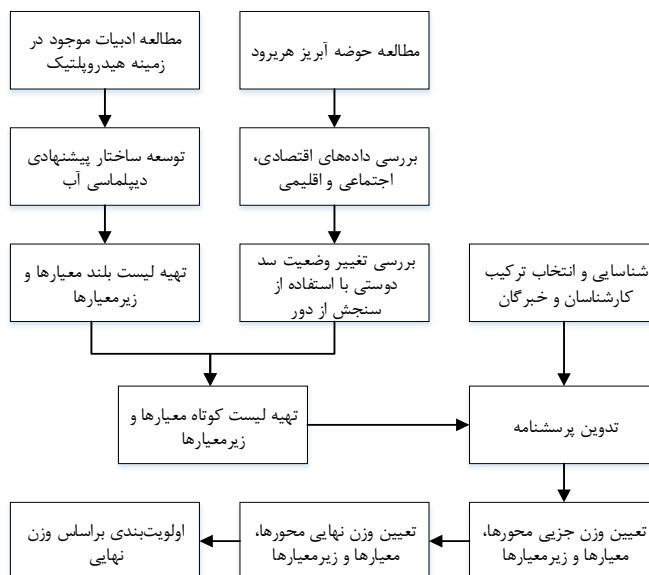
### روش پژوهش

فلوچارت روند انجام تحقیق در شکل ۱ آمده است. بر این اساس با مطالعه ادبیات موجود در زمینه هیدروپلیتیک و نیز مسائل حوضه آبریز هریرود، ساختاری شامل محورها، معیارها و زیرمعیارها به‌عنوان عوامل مؤثر در مدیریت منابع آب مرزی پیشنهادشده و لیست بلند معیارها و زیرمعیارها شناسایی گردید. در این مرحله برای شناخت هر چه بهتر و دقیق‌تر مسئله، اقدام به بررسی اطلاعات اقتصادی، اجتماعی و اقلیمی مرتبط با حوضه آبریز هریرود کرده و سپس با استفاده از سنجش‌ازدور، تغییر وضعیت پیرامونی سد دوستی مورد مطالعه قرار گرفت. بر این اساس لیست کوتاه معیارها و زیرمعیارها تعیین گردید. در ادامه برای تعیین اولویت هر یک از محورها، معیارها و زیرمعیارها نظرات کارشناسان و خبرگان در قالب پرسشنامه‌ای دریافت و وزن نهایی هر یک از آن‌ها محاسبه شد.

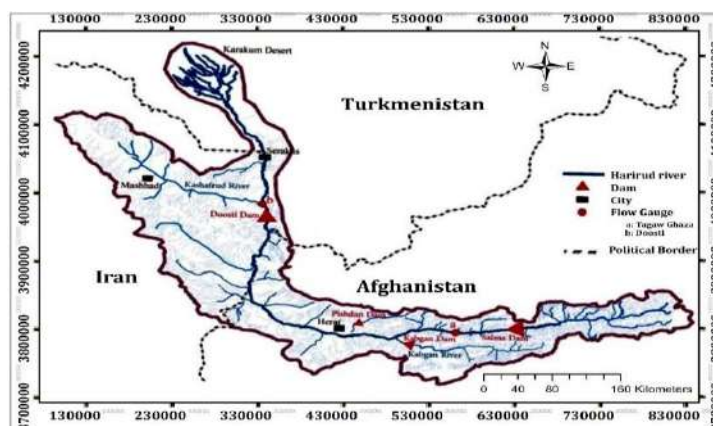
شکل ۲ حوضه آبریز هریرود و سدهای موجود بر روی رودخانه را نشان می‌دهد. این حوضه در ایران شهرهای مشهد، درگز، سرخس، تربت‌جام، فریمان و تایباد را در برمی‌گیرد. هریرود از ارتفاعات هندوکش در افغانستان سرچشمه گرفته و پس از طی ۶۵۰ کیلومتر در نزدیکی شهرستان تایباد به مرزهای افغانستان و ایران می‌رسد. در ایران پس از پیوستن چند رودخانه فصلی به آن تا تنگه ذوالفقار که محل تلاقی مرزهای ایران، افغانستان و ترکمنستان است خط مرزی ایران و افغانستان به طول ۱۵۷ کیلومتر را تشکیل می‌دهد. سپس در پل خاتون با کشف رود تلاقی و از آن به بعد تجن نامیده می‌شود. تجن که ۱۱۷ کیلومتر مرز مشترک ایران و ترکمنستان را تشکیل می‌دهد پس از خروج از مرز در دشت قره‌قوم پخش و در حوالی شهر تجن ترکمنستان محو می‌شود (سینایی، ۱۳۸۹). سد سلما بر روی شاخه اصلی در بالادست، سدهای کبگان و پیشدان در شاخه‌های فرعی در محدوده افغانستان و سد دوستی منطبق بر مرز ایران و ترکمنستان بر روی رودخانه اصلی در پایین‌دست احداث شده‌اند. با توجه به احداث سدهای مختلف بر روی شاخه‌های اصلی و فرعی رودخانه هریرود، مشکلاتی نظیر کوچ اقوام روستایی به مناطق شهری، کمبود آب در حوضه قره‌قوم، کمبود پوشش گیاهی و شور شدن خاک منطقه و نیز کاهش شغل بومی افراد منطقه به وجود آمده است. ایران و دو کشور افغانستان و ترکمنستان به‌عنوان ذینفعان حوضه آبریز هریرود همواره به دنبال استفاده حداکثری و بیشینه کردن منافع خود از این منبع مشترک بوده‌اند.

یکی از مشکلات در تجزیه و تحلیل مناسبات هیدروپلیتیک در سامانه رودخانه‌های بین‌المللی این است که عوامل یکسان مانند کمبود آب و توسعه اقتصادی می‌توانند طیف متنوعی از منازعه یا همکاری ایجاد کنند و حتی یک معیار یکسان ممکن است در هر کشور نقش متفاوتی در ارتباط با سایر متغیرها ایجاد کند (کاویانی راد و همکاران، ۱۳۹۷). سیاست مهار آب توسط افغانستان سبب کاهش شدید ورود آب هریرود به ایران شده است. وضعیت فعلی حاکی از آن است که تأمین بخشی از آب استان خراسان رضوی از طریق سد دوستی، با عدم قطعیت‌ها و ریسک‌های

بالایی به جهت رژیم متغیر آبدهی رودخانه هریرود و عدم مذاکره دو کشور بر سر نحوه بهره‌برداری از این منبع آبی همراه بوده و در درازمدت، اعتمادپذیری تأمین آب را با چالش مواجه می‌سازد. از آنجاکه نگاه ملی‌گرایانه سبب شکل‌گیری مناسبات هیدروپلیتیکی مناقشه آمیز میان کشورهای فرادست و فرودست این حوضه‌ی آبریز شده، دستیابی به الگوی مدیریت بهینه این حوضه‌ی آبریز مشترک از اهمیت مضاعفی برای نیل به منافع متقابل آن‌ها برخوردار است.



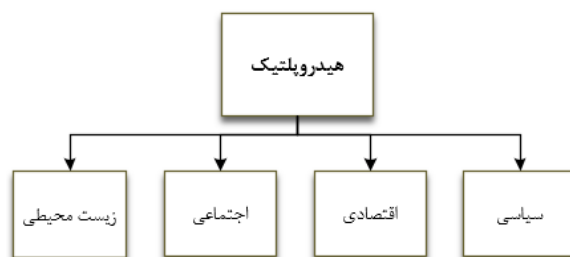
شکل ۱. فلوجارت روند انجام تحقیق



شکل ۲. موقعیت سدهای حوضه آبریز هریرود

مشخص کردن مسائلی که بر روی رودخانه‌ها تأثیر می‌گذارند برای مدیریت پایدار و موفق حوضه یک امر حیاتی است (تیواری و شارما، ۲۰۱۴). قوانین طبیعت و انسان هر دو تأکید بر این امر دارند که منابع آب باید توسط ذی‌نفعان آن به اشتراک گذاشته شود (دلاپنا، ۲۰۰۷).

بی‌شک شناخت و آگاهی از موضوعات دخیل در یک مسئله منازعه‌آبی، در فرآیند حل موفق و پایدار آن امری ضروری است. باید توجه داشت که برخی عوامل به‌صورت مستقیم و برخی به‌صورت غیرمستقیم در مسئله اثرگذار هستند. برای حل منازعات منبع آب مشترک مرزی، نیاز است تمام مسائلی که مستقیم یا غیرمستقیم در هیدروپلیتیک دخیل است، بررسی گردد. مسائل مستقیم نظیر اقتصاد سیاسی، جغرافیای سیاسی، اقتصاد آب و انرژی و امنیت ملی و مسائل غیرمستقیم، مانند نرخ رشد جمعیت، فرهنگ و مذهب، تغییر کاربری اراضی و تغییر اقلیم می‌باشند. این مسائل در مدیریت پایدار حوضه آبریز جهت تأمین منافع راهبردی ذی‌نفعان مؤثرند و شناسایی درست آن‌ها باعث شکل‌گیری مذاکرات جامع و هدفمند خواهد شد (رای و همکاران، ۲۰۱۹). هرچقدر جامعیت شناخت مسئله افزایش یافته و در مذاکرات فی‌مابین لحاظ شود، احتمال موفقیت اجرایی برنامه‌های توافق شده بالاتر می‌رود. ضمن اینکه دسته‌بندی صحیح عوامل شناسایی‌شده می‌تواند بسته‌های کاری مختلف مدیران و تصمیم‌گیران آب را تعریف کرده و از طرفی چارچوبی هدفمند را به‌عنوان نقشه راه مذاکره‌کنندگان فراهم آورد. بر این اساس در این پژوهش کلیه محورهای اصلی هیدروپلیتیک که در شکل ۳ نشان داده شده مورد بررسی قرار گرفته و تلاش شده تا با چارچوبی مناسب، عوامل مختلف شناسایی‌شده در قالب این ساختار دسته‌بندی شوند. بدین ترتیب و درنهایت ۱۴ معیار و ۳۲ زیرمعیار ذیل محورهای اصلی چهارگانه شناسایی و دسته‌بندی شدند.



شکل ۳. محورهای اصلی هیدروپلیتیک

در ادامه جهت اولویت‌بندی مسائل شناسایی‌شده از نظرات ۲۱ خبره به شرح جدول ۱ برای تعیین میزان اهمیت هر یک از آن‌ها استفاده شد. بدین ترتیب که میزان اهمیت هر یک از محورها، معیارها و زیرمعیارها مورد پرسش قرار گرفت. سپس با میانگین‌گیری وزنی از نظرات هر یک از خبرگان در خصوص میزان اهمیت هر محور، معیار و زیر معیار و ضرب وزن جزئی هر زیرمعیار در وزن جزئی هر معیار و هر محور، وزن نهایی هر زیر معیار تعیین گردید.

<sup>1</sup> Tiwari & Sharma

<sup>2</sup> Dellapenna

## جدول ۱. جزییات خبرگان مشورت شده

تعداد	خبرگان
۶	آب منطقه‌ای خراسان رضوی
۳	مسئولین امور آب سرخس
۲	اداره منابع طبیعی خراسان رضوی
۲	سازمان محیط‌زیست خراسان رضوی
۴	کارشناس ارشد و دکتری مدیریت منابع آب
۲	کارشناس ارشد مدیریت دولتی
۲	معاونت سیاسی و امنیتی استانداری خراسان رضوی

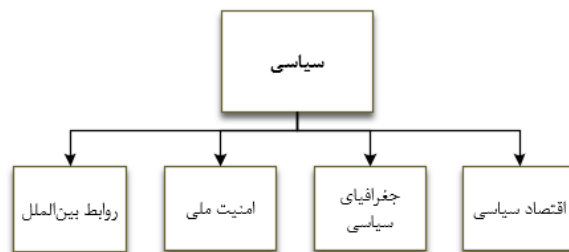
## یافته‌ها

یکی از اقدامات بنیادی در تجزیه و تحلیل مناسبات هیدروپلیتیک در سیستم رودهای فرامرزی، شناخت متغیرهایی است که در اهمیت آب‌های فرامرزی برای کشورها نقش دارند. آب هریرود از افغانستان وارد ایران می‌شود و قرار گرفتن حوضه آبریز آن در نوار خشک و نیمه‌خشک جهانی سبب وابستگی آن‌ها به این منبع برای تأمین نیاز آبی‌شان شده است. برنامه‌های توسعه‌ای افغانستان سبب کاهش ورود آب هریرود به ایران شده به گونه‌ای که می‌تواند زمینه‌ساز چالش در امنیت آبی شمال شرق ایران گردد. از طرفی طرح‌های توسعه کشاورزی دشت قره‌قوم ترکمنستان نیازمند حق آبه قابل توجهی از این منبع مشترک است. بر این اساس دستیابی به یک توافق جامع و پایدار در جهت تأمین اهداف هر یک از سه کشور ذینفع بسیار حائز اهمیت است. بدین منظور و باهدف شناسایی و لحاظ کلیه عوامل مؤثر در این مسئله بسیار پیچیده، با استفاده از مطالعات کتابخانه‌ای و مرور ادبیات، ابتدا معیارهای هر یک از محورهای اصلی هیدروپلیتیک پیشنهاد و سپس زیرمعیارهای مرتبط با آن‌ها مشخص شدند. در ادامه نتایج به دست آمده به همراه ساختار پیشنهادی برای هر یک از محورهای اصلی سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی آمده است.

## محور سیاسی

در دنیای مدرن امروزی همچنان از آب، این ماده حیاتی، به عنوان سلاح و ابزاری برای پیشبرد دیگر مقاصد سیاسی، به خصوص در دوران شکل‌گیری منازعات استفاده می‌شود. کمبود منابع آب شیرین و درعین حال عدم در نظر گرفتن ارتباط ویژه میان آب و امنیت از سوی کارشناسان و متخصصان حوزه مدیریت منابع آب مشترک مرزی و فرامرزی، می‌تواند به عنوان یک چالش پایدار در مناسبات بین‌المللی مطرح شود (صادقی، ۱۳۹۵). ساختار پیشنهادی برای دسته‌بندی موضوعات سیاسی در شکل ۴ آمده است.





شکل ۴. ساختار پیشنهادی محور سیاسی

● **اقتصاد سیاسی:** افغانستان و به‌ویژه شهر هرات در بالادست هریرود به‌سرعت در حال افزایش جمعیت و تقاضای انرژی است. یکی از گزینه‌های این کشور برای تأمین انرژی موردنیاز خود، استفاده از اهرم رهاسازی آب به کشورهای پایین‌دست در ازای دریافت انرژی است؛ بنابراین سیاست آب در برابر انرژی را اتخاذ کرده است. از طرفی ترکمنستان برای آبیاری اراضی کشاورزی دشت قره‌قوم و ایران برای تأمین نیاز آب شرب شهر مشهد و همچنین آبیاری اراضی دشت سرخس نیازمند آب رودخانه هریرود است. با توجه به ذخایر گاز هر دو کشور، امکان تبادل گاز در مقابل آب افغانستان وجود دارد؛ بنابراین در این بین رقابتی بر سر انتقال انرژی از ایران و ترکمنستان به وجود آمده است. این در حالی است که در قالب یک دیپلماسی پایدار می‌توان این فضای رقابتی را به یک فضای همبستگی سیاسی در جهت توسعه اقتصادی و ایجاد زیرساخت‌های تبادلات آب و انرژی نزدیک نمود.

● **جغرافیای سیاسی:** نکته حائز اهمیت درباره سد دوستی آن است که این سد بر روی رودخانه‌ای احداث شده که سرچشمه آن در هیچ‌کدام از دو کشور ایران و ترکمنستان قرار نداشته و برنامه‌ریزی بر روی ذخیره آب این سد بدون توجه به نقش بالادستی کشور افغانستان، ریسک‌های بسیاری را برای این دو کشور فراهم می‌آورد. قطعاً چالش‌های مرتبط با کشور ایران به‌واسطه وابسته کردن نیاز آب شهر استراتژیک مشهد به این منبع آبی بسیار بیشتر و جدی‌تر از کشور ترکمنستان است. وابسته شدن شهرها و مناطق پایین‌دست به آب این سد می‌تواند در شرایط بحران و اضطراری، به‌صورت اهرم فشاری در دست افغانستان قرار گیرد و از این طریق برای دو کشور ایران و ترکمنستان ایجاد وضعیت بحرانی کرده و یا آن‌ها را وادار به دادن امتیاز نماید. بر این اساس، از دیدگاه ژئوپلیتیک احداث این سد موقعیت افغانستان را به‌مراتب مناسب‌تر از ایران کرده و زمینه وابستگی بیشتر کشور را به افغانستان فراهم آورده است. در این بین محصور بودن افغانستان در خشکی و عدم دسترسی به آب‌های آزاد، نقطه‌ضعف جغرافیای سیاسی این کشور بوده و می‌تواند از سوی ایران و ترکمنستان به‌عنوان عاملی برای کنترل اهرم فشار افغانستان بر روی منابع آب به شمار رود. باید توجه داشت که موقعیت ایران از این منظر به‌واسطه دسترسی به دریای عمان به‌مراتب بهتر از ترکمنستان است.

● **امنیت ملی:** امنیت یکی از مباحث محوری در حوزه علم سیاست و حوزه سیاست‌گذاری در هر نظام سیاسی است که همواره از ابعاد مختلفی مورد تهدید قرار می‌گیرد. امنیت پدیده‌ای کیفی است که برحسب درجه‌بندی‌های عمدتاً ذهنی قابل توصیف است. اغلب امنیت به معنای تهدیدات و خطرات تعریف می‌شود (اینگر، ۲۰۰۹). ناامنی و بی‌ثباتی سیاسی، بر روی برنامه‌ریزی دقیق مسئولان و مدیران برای حل مشکلات و مسائل در سطوح ملی و محلی تأثیر می‌گذارد. به‌طوری‌که مانع از برقراری تمرکز بر روی مدیریت منابع آب و بهره‌برداری از آن‌ها شده است. به همین واسطه، اراضی کشاورزی در مرزهای کشور به دلیل عدم همکاری‌های بین‌المللی مناسب بلااستفاده مانده است. این امر مانعی برای پیشبرد منافع ملی در راستای تأمین امنیت غذایی و تولید محصولات باکیفیت کشاورزی است (پاک‌نژاد و عزتی، ۱۳۹۰). علاوه بر این توجه به عملکرد پیشین حکومت افغانستان به‌ویژه در حوضه دریاچه هامون و تحمیل آسیب‌های غیرقابل‌جبران ناشی از قطع آب هیرمند به منطقه سیستان، تأمین پایدار تقاضای آب شهر مشهد از منبع آب هریرود را با ابهامات فراوانی روبرو ساخته است. به‌رحال به نظر می‌رسد امنیت غذایی، اشتغال، تأمین آب شرب و تولید برق برای افغانستان و تأمین آب شرب و کشاورزی برای ایران از جمله مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار در مدیریت بهینه‌ی این حوضه به شمار می‌روند. عدم ثبات حاکمیت در کشور افغانستان و جنگ‌های داخلی و ناامنی ملی یکی دیگر از عللی است که منجر به افت مدیریت داخلی

<sup>1</sup> Engerer

و خارجی شده است. این بی ثباتی حاکمیتی باعث ایجاد نهادهای موازی قدرت شده و تمرکز مذاکره را از بین برده و نیز ضمانت اجرایی تصمیمات و توافقات را با عدم قطعیت‌های بسیاری روبه‌رو خواهد کرد؛ بنابراین تسهیلگری کشورهای دیگر در شکل‌گیری و دوام حاکمیت مرکزی در افغانستان و نیز مصالحه میان گروه‌های مختلف می‌تواند بستر مذاکره درباره منابع آب مشترک را نیز فراهم سازد. به‌طور کلی تفاوت اولویت‌ها در طرح‌ریزی برنامه‌های توسعه اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی کشورها، موجبات بروز تعارضات در منافع راهبردی آن‌ها می‌شود. از طرفی ویژگی‌های ساختاری شاخص‌های قدرت ملی که تعیین‌کننده میزان ثبات حاکمیت سیاسی کشورها است، مؤلفه‌ای اساسی در موضوع امنیت ملی می‌باشد.

• روابط بین‌الملل: آب مرزی به‌عنوان یک منبع طبیعی به‌راحتی می‌تواند تحت تأثیر سیاست‌های جدید بین‌المللی و آب‌وهوایی قرار گیرد. آب از طریق سه مکانیسم اصلی ساختاری، نهادی و زبانی شناخته می‌شود. مکانیسم‌های ساختاری، زیرساخت‌های فیزیکی هستند که برای حفاظت از منابع بااهمیت برای جامعه عمل می‌کنند (فیشندلر، ۲۰۱۳). با این حال، این مکانیسم‌ها بدون مکانیسم‌های نهادی که آن‌ها را اجرا می‌کنند، قابل توجیه نخواهند بود. مکانیسم‌های نهادی ممکن است شامل داشتن نمایندگان نظامی و یا مقامات امور خارجی در ساختار مدیریتی حوضه آبریز جهت تنظیم تفاهم‌نامه‌ها، عمل به آن و پیگیری‌های حقوقی باشد (کتر و فیشندلر، ۲۰۱۱). اقدامات دولت افغانستان در تکمیل و بهره‌برداری از سد سلما بدون هیچ‌گونه توجیهی به مسائل پایین دست، نگرانی‌ها را برای بهره‌برداری مشترک از سد دوستی افزایش داده است (میان‌آبادی، ۱۳۹۲). علاوه بر آن در رفتار این کشور در موارد مشابه دیگر نیز، پایبندی به کنوانسیون‌ها یا قوانین موجود در نظام حقوق بین‌الملل مربوط به رودخانه‌های فرامرزی، مانند قانون هلسینکی، کنوانسیون بین‌المللی حقوق بهره‌برداری از آبراه‌های بین‌المللی برای مقاصد غیر کشتیرانی، کنوانسیون برلین و حتی اصول حقوقی بهره‌برداری از آب‌های مرزی دیده نمی‌شود. از طرفی دو کشور ایران و ترکمنستان نیز از پشتوانه حقوقی لازم برای جلوگیری از خسارات احتمالی برخوردار نیستند. اگرچه در سال‌های اخیر سه کشور تفاهم‌نامه‌ای برای استفاده از منابع آب مشترک داشته‌اند که به امضای رئیس‌جمهور وقت سه کشور رسیده است؛ اما این تفاهم‌نامه ضمانت اجرایی ندارد (شهبازبگیان و همکاران، ۲۰۱۶). ضعف‌ها و کاستی‌های دستگاه دیپلماسی کشور در گذشته، در کنار بخشی نگری و عدم توجه به منافع سرزمینی و نیز اقدامات و نفوذ دولت‌های غربی در جهت ایجاد ناامنی در افغانستان بستر نابسامانی برای پیشبرد موضوعات مشترک ایجاد کرده است. در این شرایط تنها با دیپلماسی فعال در جهت بهبود هر چه بیشتر روابط در زمینه‌های مختلف می‌توان به توافقاتی بر سر این منبع مشترک و رعایت حقوق پایین دست در جهت بهره‌برداری عادلانه دست‌یافت (عزتی، ۱۳۹۰). به‌رحال ایران در حال مذاکره با مقامات افغانستان برای تعیین رژیم حقوقی در حوضه آبریز هریرود و دستیابی به توافق‌نامه مشترک است. این در حالی است که مقامات افغانستان تاکنون برای تعیین رژیم حقوقی مناسب در حوضه‌ی آبریز هریرود راضی نشده است (عراقچی، ۱۳۹۶).

## محور اقتصادی

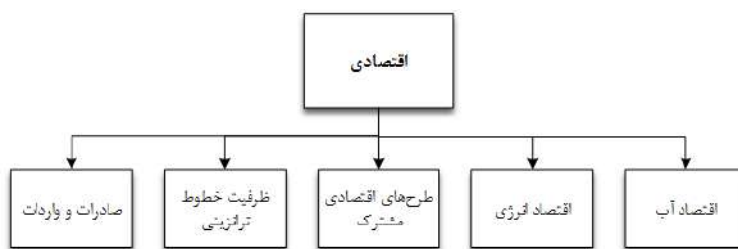
اساساً وجود یک منبع آبی مشترک در مناطق مرزی، عامل مهمی در اختلافات مرزی کشورها به‌حساب می‌آید. همچنین پیامدهای زیست‌محیطی به‌عنوان عامل اصلی تهدیدکننده اقتصادی دیده می‌شود؛ بنابراین متغیر اقتصادی عامل افزایش ضریب امنیت زیست‌محیطی در یک منطقه است (علیزاده و پیشگاهی فرد، ۱۳۹۲). همکاری بین کشورها بر سر منابع آب، به میزان زیادی با روابط اقتصادی و سیاسی آن‌ها ارتباط دارد. زمانی که کشورهای حاشیه رودخانه دیدگاه‌های سیاسی مشترک داشته یا روابط اقتصادی و تجاری گسترده‌ای با یکدیگر داشته باشند، امکان همکاری و رسیدن به توافق افزایش می‌یابد (زرقانی و لطفی، ۱۳۹۰)؛ اما چنانچه کشورهای حاشیه‌ی رودخانه، روابط سیاسی و اقتصادی گسترده‌ای نداشته باشند و یا تاریخچه‌ای از دشمنی میان آن‌ها وجود داشته باشد، این عوامل در نهایت منجر به عدم اعتماد سیاسی شده و احتمال همکاری

<sup>1</sup> Fischhendler

<sup>2</sup> Katz & Fischhendler

<sup>3</sup> Shabbazbegian et al

در بخش آب را نیز کاهش می‌دهد. همچنین تداوم همکاری بین کشورهای حاشیه‌ی رودخانه‌ها، نیازمند دستیابی به توافق تمام کشورهای حاشیه آن و تقسیم‌بندی منصفانه‌ی آب است (زرقانی و لطفی، ۱۳۹۰). ساختار پیشنهادی برای دسته‌بندی موضوعات اقتصادی در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵. ساختار پیشنهادی محور اقتصادی

● **اقتصاد آب:** طبق نظریه دوپلین آب یک کالای اقتصادی است و در عین حال محور توسعه نیز می‌باشد. از این رو جایگاه ویژه اقتصادی آن در تصمیم‌های کلان باید در نظر گرفته شود. در حال حاضر ایران و ترکمنستان آب را در قبال عرضه انرژی به افغانستان مبادله می‌کنند. هزینه خرید آب از افغانستان برای ایران، به ازای هر یک مترمکعب ۳۰۰ تومان برآورد شده در حالی که هزینه انتقال آب شرب از سد دوستی به شهر مشهد به ازای هر مترمکعب ۲۶۵۰ تومان است؛ بنابراین قیمت تمام‌شده آب انتقالی از افغانستان در شهر مشهد برای هر مترمکعب حدود ۲۹۵۰ تومان است (قندهاری، ۱۳۹۵).

● **اقتصاد انرژی:** در حال حاضر جریان آب به سمت مرز مشترک دو کشور ایران و افغانستان، با درصدی از نوسانات مربوط به کاهش نزولات جوی، همراه است. دو کشور ایران و ترکمنستان بخش عمده‌ای از نیازهای انرژی برق افغانستان را با نرخ‌های بسیار نازل تأمین می‌کنند. در تعیین نرخ برق توسط این دو کشور ملاحظات مربوط به روابط همسایگی و همچنین میزان آبی که از رودخانه‌های مرزی برداشت می‌شود تأثیرگذار بوده است. طبق برآوردهای انجام‌شده مقدار برق صادراتی سالانه ایران و ترکمنستان به افغانستان به ترتیب حدود ۱۰۰ مگاوات و ۸۰ مگاوات به ارزش ۲/۵ دلار به ازای هر وات است (قندهاری و همکاران، ۱۳۹۵).

● **طرح‌های مشترک:** یکی از راه‌های مدیریت آب‌های مرزی احداث سد است. همکاری مشترک ایران و ترکمنستان در احداث سد دوستی به منظور بهره‌برداری مشترک از آب‌های مرزی نمونه‌ای خوب از همکاری و همگرایی منطقه‌ای بر رودهای مرزی را نشان می‌دهد. البته نقطه ضعف این پروژه عدم توجه به نقش کلیدی افغانستان در حوضه بالادست سد دوستی است. همین امر باعث شده تا ریسک‌های زیادی به توافق ایران و ترکمنستان وارد شود؛ بنابراین در صورتی که طرح‌های آبی مشترک بین هر سه کشور مورد بحث و مذاکره قرار گیرد احتمال موفقیت آن بالاتر می‌رود.

● **ظرفیت خطوط ریلی و ترانزیتی:** نکته حائز اهمیت برای گسترش روابط و توسعه همگرایی اقتصادی، گسترش شبکه‌های راه‌آهن و خطوط مواصلاتی است. در زمینه ترانزیت و حمل‌ونقل همکاری‌های زیادی بین دو کشور ایران و ترکمنستان صورت گرفته است که می‌توان این همکاری‌ها را با کشور افغانستان نیز انجام داد تا روابط دو کشور ایران و افغانستان نیز باعث افزایش همگرایی اقتصادی شود. در میان این سه کشور تنها بندرها ایران، بین‌المللی بوده و به دریاهای آزادراه دارند. از طرفی ایران دارای ۱۷ فرودگاه بین‌المللی و ۱۲۰۰۰ کیلومتر خطوط ریلی و ۳۶۰۰۰ کیلومتر جاده است. این در حالی است که ترکمنستان تنها ۳ فرودگاه بین‌المللی و حدود ۳۱۱۵ کیلومتر خطوط ریلی و ۲۰۰۰۰ کیلومتر جاده و افغانستان نیز ۳ فرودگاه بین‌المللی و تنها حدود ۱۳۵ کیلومتر خطوط ریلی و ۱۶۲۱ کیلومتر جاده دارد. لذا ایران می‌تواند با توسعه هر چه بیشتر خطوط ریلی و ترانزیتی و برقراری دسترسی‌های مطمئن و متعدد به بندرها و فرودگاه‌های بین‌المللی خود، حداکثر بهره را از این ظرفیت ببرد. علاوه بر این مشارکت در طراحی و توسعه خطوط ریلی و ترانزیتی کشور افغانستان منطبق با طرح‌های شبکه داخلی ایران می‌تواند گام مؤثر دیگری برای ایجاد موقعیت برتر در مذاکره پیرامون منابع آب مشترک را فراهم آورد. بی‌شک توسعه راه‌های مبادلاتی میان کشورهای ذینفع موجبات افزایش رونق اقتصادی را فراهم خواهد آورد.

• **صادرات و واردات:** به باور کارشناسان یکی از عوامل همگرایی بین کشورها، تعاملات تجاری و مبادلات بازرگانی بین آنها است. ایران و ترکمنستان از زمان استقلال ترکمنستان تاکنون مبادلات تجاری روزافزونی داشته‌اند که این مبادلات باعث همکاری‌های بیشتر همچون احداث سد دوستی شده است. طبق آخرین اطلاعات گمرکی ایران، در سال ۱۳۹۶ ارزش صادرات ایران به افغانستان ۲ میلیارد و ۷۹۱ میلیون دلار و به ترکمنستان ۴۱۷ میلیون دلار بوده است. نکته حائز اهمیت آن است که حدود ۳۰ درصد از این صادرات از مبدأ مشهد انجام شده است. این امر اهمیت نقطه استراتژیک گمرکی شهر مشهد در صادرات شرق کشور را نشان می‌دهد. مواد صادراتی ایران به دو کشور افغانستان و پاکستان از قبیل مواد غذایی، مواد نفتی و پتروشیمی، فلزات فراوری شده و دارو بوده است (اتاق بازرگانی، صنایع معادن و کشاورزی تهران، ۱۳۹۶). قطعاً گسترش این مبادلات و تنوع کالاهای مبادله‌ای در تعمیق روابط بین‌المللی و ایجاد حس احترام متقابل بسیار حائز اهمیت است.

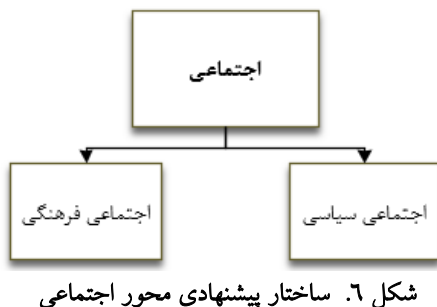
### محور اجتماعی

با توجه به شرایط اقلیمی و کم‌آبی در سه کشور ایران، افغانستان و ترکمنستان و نیاز روزافزون آب به صنایع و کشاورزی توأمان با نرخ رشد جمعیت، روند مناسبات هیدروپلیتیک باید بر چارچوب رویکرد امنیت انسانی و اجتماعی استوار باشد و به‌دوراز رویکردهای امنیتی و سیاسی محض قرار گیرد. به این مفهوم که رویکردهای انسانی جنبه‌های حقوقی و مقدم بر مرزبندی‌های سیاسی در مناسبات هیدروپلیتیک باشد. شاخص پیشرفت انسانی<sup>۱</sup> و امید به زندگی در این رویکرد انسانی قابل بررسی است. مقادیر نزدیک به یک این شاخص حاکی از توان مدیریتی بهتر و قدرت دیپلماسی بالاتر می‌باشد.

چالش کم‌آبی و مدیریت صحیح منابع آب موجود یک کشور مستلزم داشتن مدیریت قوی سیستمی، بالا بودن سطح تحصیلات و روبه‌پیشرفت بودن یک کشور است. با توجه به جدول ۲ ایران در مقایسه با دو کشور افغانستان و ترکمنستان از نظر شاخص پیشرفت انسانی وضعیت بهتری دارد لذا در کنترل منابع آب، رفع مشکلات آبی و قدرت دیپلماسی، توانایی بالاتری دارد. همین موضوع باعث افزایش سن امید به زندگی در ایران نسبت به دو کشور دیگر نیز شده است. ساختار پیشنهادی برای دسته‌بندی موضوعات اجتماعی در شکل ۶ آمده است.

جدول ۲. شاخص‌های اجتماعی مؤثر بر مناسبات هیدروپلیتیک سه کشور ایران، افغانستان و ترکمنستان

کشور	شاخص پیشرفت انسانی	امید به زندگی (سن)
ایران	۰/۷۹۷	۷۶/۵
افغانستان	۰/۴۹۶	۶۴/۵
ترکمنستان	۰/۷	۶۸/۱



• **اجتماعی سیاسی:** طبیعت، تابع مرزهای سیاسی نیست و به هر ناحیه و ملتی، گونه خاصی از منابع را ارزانی کرده است. ریشه ستیز میان اجتماعات انسانی نیز در همین ناهمسانی در پراکنش منابع میان نواحی و ملت‌ها نهفته است؛ به‌ویژه ملت‌هایی که توان مدیریت امور خویش را متناسب با شرایط زیست‌محیطی ندارند. نرخ بالای رشد جمعیت به همراه شهرنشینی شتاب‌آمیز، صنعتی شدن، توسعه کشاورزی، ترابری، تفریحات آبی و تخریب محیط‌زیست، فشار فزاینده‌ای را بر آب‌های شیرین موجود در کشورها تحمیل کرده و این فشارها نیز زمینه‌ساز تنش بر سر منابع آبی را در میان ملت‌ها پروراند است. افغانستان با نرخ رشد جمعیت ۶/۸۴ درصد در مقایسه با نرخ رشد جمعیت ۱/۶ درصدی ایران و ۱/۹۵ درصدی ترکمنستان، به‌طور فزاینده‌ای در جهت افزایش تقاضای آب در حرکت است. بالا بودن نرخ رشد جمعیت در کنار پایین بودن شاخص پیشرفت انسانی افغانستان، نسبت به ایران و ترکمنستان بیانگر ضعف مدیریتی و حکمرانی آنها است، لذا ضعف مدیریت منابع آب مشترک، یکی از چالش‌های

<sup>۱</sup> Human Development Index

مهم این کشور است که باید در مناسبات هیدروپلیتیک در نظر گرفته شود. عدم توافق مناسب و همکاری سازنده میان این کشورها بر سر منابع آبی حوضه هریرود، پیامدهای اجتماعی شگرفی نیز خواهد داشت. چراکه نظیر این ماجرا در حوضه آبریز هیرمند تجربه شده است. رفتار افغانستان در عدم پایبندی به رعایت حق آبه ایران باعث خشک شدن دریاچه هامون و به دنبال آن از دست رفتن فرصت‌های شغلی ساکنین محلی شده است. بیکاری مردم این منطقه علاوه بر مشکلاتی که از بعد روانی ایجاد کرده، باعث توسعه فقر در میان آنان شده است. در این شرایط و در فقدان مدیریت صحیح، گزینه‌های مهاجرت یا روی آوردن به قاچاق کالا و مواد مخدر، انتخاب‌های اول مردم منطقه است. بر این اساس و با توجه به چنین سابقه‌ای، چنانچه توافقنامه جامع و پایداری در حوضه آبریز هریرود منعقد نشود، باید انتظار بروز پدیده‌هایی نظیر بیکاری، فقر، مهاجرت و قاچاق در منطقه خراسان جنوبی و رضوی نیز باشیم (عزتی و همکاران، ۱۳۹۰).

● **اجتماعی فرهنگی:** یکی از فرصت‌های ویژه در جهت‌دهی و هدایت مذاکرات پیرامون مدیریت منابع آب مشترک، توجه به اشتراکات فرهنگی، زبانی، دینی و تاریخی میان این سه کشور است. استفاده صحیح و بجا از این ویژگی‌های مشترک می‌تواند زمینه‌ساز برقراری ارتباطات عمیق و گسترده و درعین‌حال پایدار باشد. البته به‌واسطه خودتربینی و برخی رفتارهای ناصحیح ایرانیان با مهاجران افغانی و قوانین سخت‌گیرانه در قبال شرایط زندگی آن‌ها در ایران در طول چند دهه گذشته، حافظه تاریخی افغانی‌ها پر شده از بی‌مهری‌ها و بی‌عدالتی‌های ایرانیان. این امر لطمات زیادی به روابط بین این دو ملت وارد ساخته به‌طوری‌که حس انتقام‌جویی در عرصه‌های مختلف در آن‌ها ایجاد شده است. این وضعیت، رسیدن به توافق در هر زمینه‌ای و نیز اطمینان از پایبندی به آن را در حاله بزرگی از ابهام برده است. در این خصوص، تغییر اساسی نگرش‌های رفتاری و قانونی و برنامه‌ریزی برای ترمیم روابط اجتماعی- فرهنگی میان دو کشور احساس می‌شود.

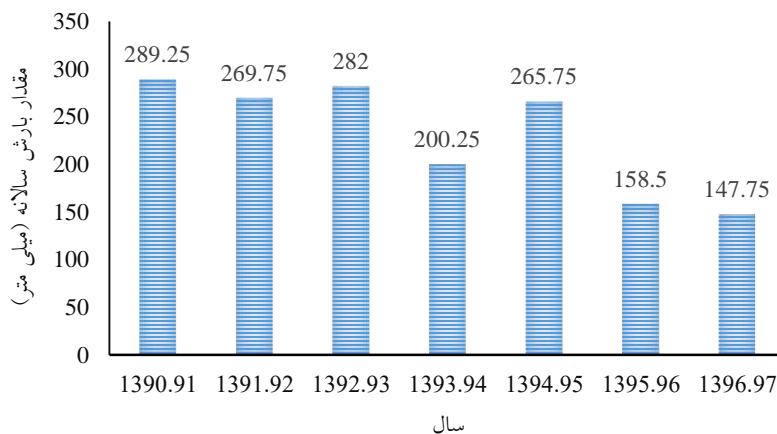
### محور زیست‌محیطی

امروزه از تهدیدات زیست‌محیطی به‌عنوان یکی از تهدیدات نوین امنیت ملی یاد می‌شود. نگرانی فزاینده در مورد آینده بشر و تأثیر منفی تخریب محیط‌زیست بر زندگی باعث شده که مشکلات زیست‌محیطی اهمیتی روزافزون در سیاست ملی و بین‌المللی پیدا کند (صادقی، ۱۳۹۵). ساختار پیشنهادی برای دسته‌بندی موضوعات زیست‌محیطی در شکل ۷ آمده است.



شکل ۷. ساختار پیشنهادی محور زیست‌محیطی

● **تغییر اقلیم:** پراکندگی میزان بارش و توزیع نامناسب در جهان بسیار ناهمگون بوده و این توزیع ناهمگون باعث خشک شدن هوا و تبخیر زیاد آب شده است. از طرفی بررسی مجموع بارش سالانه حوضه آبریز سد دوستی در دهه اخیر بر مبنای میانگین‌گیری داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی سرخس و مشهد و نیز داده‌های ماهواره‌ای سایت <https://www.ncdc.noaa.gov> مربوط به شهر مرزی سرخس ترکمنستان و سایت <https://www.worldweatheronline.com> مربوط به شهر هرات افغانستان به روش چندضلعی‌های تیسن در محیط نرم‌افزار ArcGIS، روند نزولی کاملاً مشخصی را در منطقه نشان می‌دهد (شکل ۸)؛ بنابراین به نظر می‌رسد در کنار عوامل انسانی، تغییرات اقلیمی نیز شرایط مسئله حوضه‌های آبریز مشترک را پیچیده‌تر از قبل نماید.



شکل ۸. مجموع بارش سالانه حوضه آبریز سد دوستی

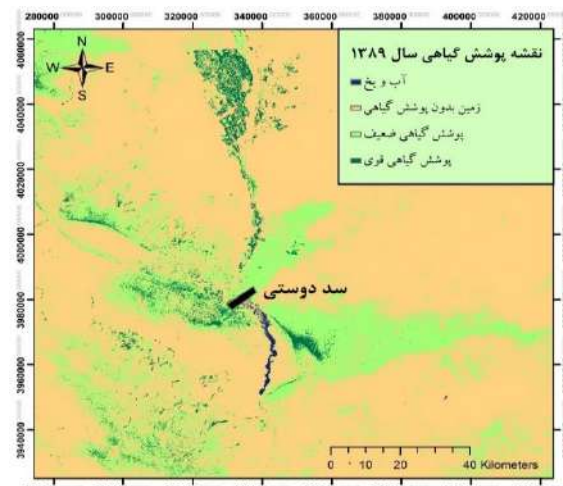
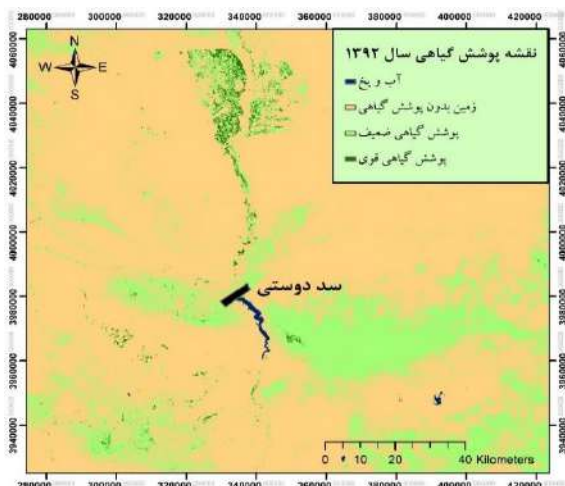
● تغییر کاربری اراضی: یکی از بزرگ‌ترین تهدیدات زیست‌محیطی تغییر کاربری اراضی است. برای بررسی این موضوع اقدام به پردازش تصاویر ماهواره LANDSAT8 و انجام تصحیحات اتمسفری و رادیومتریک و سپس استخراج نقشه‌های شاخص پوشش گیاهی<sup>۱</sup> (NDVI) و شاخص رطوبت خاک<sup>۲</sup> (NDMI) در سال‌های ۱۳۸۹ (قبل از احداث سد سلما) و ۱۳۹۲ (بعد از احداث سد سلما) گردید (شکل‌های ۹ تا ۱۲). برای به دست آوردن نقشه‌های شاخص پوشش گیاهی و شاخص رطوبت خاک از معادلات (۱) و (۲) در محیط نرم‌افزار ENVI با توجه طیف نور و رنگ استفاده شده است. در این روابط NIR: طول موج باند ۴ مادون قرمز نزدیک، RED: طول موج باند ۳ مادون قرمز و SWIRI: طول موج باند ۵ مادون قرمز میانی می‌باشد.

$$\text{شاخص پوشش گیاهی (NDVI)} = \frac{\text{NIR}-\text{RED}}{\text{NIR}+\text{RED}} \quad (۱)$$

$$\text{شاخص رطوبت خاک (NDMI)} = \frac{\text{NIR}-\text{SWIRI}}{\text{NIR}+\text{SWIRI}} \quad (۲)$$

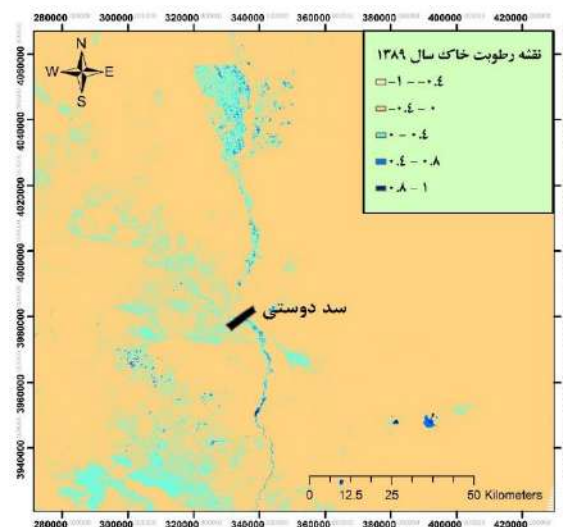
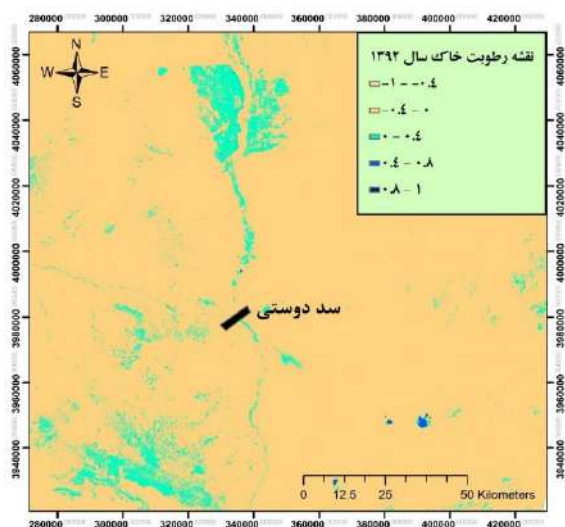
<sup>۱</sup> Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

<sup>۲</sup> Normalized Difference Moisture Index (NDMI)



شکل ۹. نقشه پوشش گیاهی حوضه سد دوستی در سال ۱۳۸۹

شکل ۱۰. نقشه پوشش گیاهی حوضه سد دوستی در سال ۱۳۹۲



شکل ۱۱. نقشه رطوبت خاک حوضه سد دوستی در سال ۱۳۸۹

شکل ۱۲. نقشه رطوبت خاک حوضه سد دوستی در سال ۱۳۹۲

نتایج نشان می‌دهد که در سال ۱۳۸۹ که سد سلما بر روی رودخانه هریرد احداث نشده بود، حجم آب پشت سد دوستی به میزان قابل توجهی بوده است، اما پس از بهره‌برداری از سد سلما در سال ۱۳۹۲ مشاهده می‌شود که ذخیره آب سد، پوشش گیاهی و رطوبت خاک در منطقه کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است.

● **مشخصات فیزیکی و هیدرولوژی حوضه آبریز:** حوضه آبریز قره‌قوم در استان خراسان رضوی در شرق کشور ایران یکی از حوضه‌های کم بارش محسوب می‌گردد. این حوضه به دلیل مواجهه با مسائلی نظیر کاهش نزولات جوی، بروز خشک‌سالی‌های پیاپی، کاهش سرانه منابع آب تجدیدپذیر و سدسازی‌های نامناسب همسایه‌های ایران، از مناطق بحرانی کشور در زمینه منابع آبی می‌باشد. سد دوستی در شمال شرق ایران و در مرز استان خراسان رضوی با ترکمنستان روی رودخانه مرزی هریرد از کوه‌های افغانستان سرچشمه می‌گیرد و حوضه آبریز آن تا محل پل خاتون بالا، ۴۱۹۶۲ کیلومترمربع است که حدود ۲۷۱۱۱ کیلومترمربع آن در افغانستان، ۱۴۴۴۰ کیلومتر آن در ایران و ۴۱۱ کیلومترمربع در

ترکمنستان واقع است؛ بنابراین به‌صورت طبیعی حدود ۶۴/۶ درصد از سطح آبیگر حوضه در افغانستان، ۳۴/۴ درصد در ایران و یک درصد در ترکمنستان واقع شده است. این در حالی است که در موافقت‌نامه فی‌مابین ایران و ترکمنستان، بهره‌برداری از ذخیره مخزن سد دوستی به‌صورت برابر تعریف شده است (طالب‌العلم و همکاران، ۱۴۰۰).

در نهایت ساختار پیشنهادی مسائل شناسایی شده در موضوع مدیریت منابع آب مرزی در جدول ۳ آمده است. وزن هر یک از این مسائل از طریق دریافت نظرات خبرگان و کارشناسان مشخص گردیده و در قالب اعداد داخل پراکنش مشخص شده است. بر این اساس ترتیب اولویت محورهای اصلی دیپلماسی آب به‌صورت سیاسی، اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی است. بدین معنی که در مسئله مدیریت منابع آب مرزی بیشترین تمرکز باید بر روی موضوعات سیاسی و اقتصادی معطوف باشد. در بخش معیارها، امنیت ملی، روابط بین‌الملل، اقتصاد آب، اقتصاد سیاسی، جغرافیای سیاسی، طرح‌های اقتصادی مشترک و صادرات و واردات مهم‌ترین موضوعات مورد دغدغه و تأکید هستند. در پایین‌ترین سطح نیز توجه به زیرمعیارهای برتری موقعیت جغرافیایی، مدیریت منابع آب موجود، ثبات حاکمیت سیاسی، مدیریت آب، امنیت غذایی، هیدرولوژی حوضه، تبادلات آب و انرژی، تجارت آب و تعارض منافع راهبردی بیشترین تأثیر را در فرآیند مذاکرات خواهد داشت.

لازم به توضیح است که در مقایسه با رای و همکاران (۲۰۱۹) باید اشاره کرد که آن‌ها هیدروپلیتیک را در سه محور سیاسی، اقتصادی و زیست‌محیطی تقسیم‌بندی کرده و محور اجتماعی را نادیده گرفتند. ضمن اینکه از میان معیارهای معرفی شده موضوعات مرتبط با محور زیست‌محیطی را در بالاترین اولویت برای مذاکرات قرار دادند. این در حالی است که بر اساس نتایج تحقیق حاضر، توجه به موضوعات پیرامون معیار اجتماعی سیاسی در پیشبرد مذاکرات نقش قابل توجهی دارد. ضمن اینکه معیارهای ذیل محور سیاسی بالاترین اولویت را در حصول به توافق پایدار و جامع دارند.

## بحث

در عصر حاضر، با توجه به مرزبندی‌های سیاسی و کمبود منابع آب، رودخانه‌های بین‌المللی نقش و اهمیت فراوانی یافته‌اند، به‌طوری‌که تحلیلگران سیاسی معتقدند که جنگ‌های آینده بیشتر بر سر آب بوده و منابع آبی کانون‌های تنش و بحران‌ساز در عرصه روابط بین‌المللی خواهد بود. برخی از کشورهای جهان برای تأمین آب موردنیاز خود به احداث سد روی رودها و رودخانه‌ها روی آورده‌اند. درعین‌حال بیشتر سدها بر روی رودهایی احداث می‌شود که در چند کشور جریان دارند. کشورهایی که در بالادست رودها قرار دارند معمولاً از موقعیت طبیعی بهتری در استفاده بیشتر از این منابع مشترک آبی برخوردارند. در عصر حاضر با پیدایش دولت‌های مدرن و شکل‌گیری مرزهای سیاسی، کارکرد منابع آبی در سمت‌گیری‌های سیاسی نمود بیشتری یافته، به‌گونه‌ای که در بهره‌مندی از این منابع شاهد بروز تنش‌های فزاینده به‌ویژه در مناطق کم‌بارش و خشک هستیم.

حوضه مشترک هریرود دربرگیرنده ایران و دو کشور افغانستان و ترکمنستان به‌عنوان ذینفعان منابع آبی مشترک همواره به دنبال استفاده حداکثری و بیشینه کردن منافع خود از رودخانه‌های مشترک بوده‌اند. سیاست مهار آب توسط کشور افغانستان توسط سدهای مخزنی باعث افت ورود آب هریرود به ایران شده است. در حال حاضر تأمین بخشی از آب شهر مشهد به‌واسطه سد دوستی، با عدم قطعیت‌ها و ریسک بالایی به جهت عدم ثبات نرخ آبدهی رودخانه هریرود و عدم مذاکره سه کشور بر سر میزان بهره‌برداری از این منبع آبی مشترک همراه بوده و در بلندمدت، اعتمادپذیری تأمین آب را با چالش مواجه می‌سازد.

## نتیجه‌گیری

در این تحقیق ساختار ابداعی و نقشه راهبردی مسائل هیدروپلیتیک حول چهار محور اصلی مسائل سیاسی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی گردآوری شده است. بررسی‌های انجام‌شده حاکی از آن است که در محور سیاسی، هر چهار معیار امنیت ملی، روابط بین‌الملل، اقتصاد سیاسی و جغرافیای سیاسی اهمیت تقریباً یکسانی دارند. البته موضوعات امنیت ملی و روابط بین‌الملل در اولویت کمی بالاتر قرار گرفته‌اند. در محور اقتصادی، معیار اقتصاد آب بالاترین اولویت را دارد. پس‌از آن معیارهای طرح‌های اقتصادی مشترک و صادرات و واردات در جایگاه دوم قرار دارند. اقتصاد



انرژی و ظرفیت خطوط ترانزیتی نیز در رتبه‌های بعدی هستند. معیارهای تغییر اقلیم، مشخصات فیزیکی و هیدرولوژی حوضه آبریز و تغییر کاربری اراضی نیز به ترتیب اولویت در محور زیست‌محیطی مطرح هستند. علاوه بر این در محور اجتماعی، موضوعات اجتماعی سیاسی از موضوعات اجتماعی فرهنگی اولویت بیشتری دارد.

به‌عنوان جمع‌بندی می‌توان اظهار داشت که با توجه به اولویت‌بندی مسائل شناسایی‌شده، بهترین اقدام تشکیل کارگروه ویژه مدیریت منابع آب مرزی متشکل از کمیته‌های تخصصی مرتبط با معیارها و زیرمعیارهای دارای اولویت در این تحقیق است. این کارگروه می‌تواند ضمن پشتیبانی فنی به پیشبرد دیپلماسی فعال و هدفمند در مدیریت منابع آب مرزی کمک شایانی نماید.

### جدول ۳. چارچوب ابداعی دسته‌بندی مسائل شناسایی‌شده در قالب محورهای هیدروپلیتیک

محور اصلی (وزن)	معیار اساسی (وزن)	زیرمعیار (وزن)
		تبادلات آب و انرژی (۳/۴۹)
	اقتصاد سیاسی (۷/۸۱)	برنامه توسعه اقتصادی (۳/۲۳)
		دسترسی به آب‌های آزاد (۲/۸۸)
	جغرافیای سیاسی (۷/۷۲)	برتری موقعیت جغرافیایی (۳/۸۳)
سیاسی		تعارض منافع راهبردی (۳/۳۶)
(۲۸/۶۲)	امنیت ملی (۷/۹۰)	ثبات حاکمیت سیاسی (۳/۷۰)
		امنیت غذایی (۳/۵۷)
		نهادهای منطقه‌ای (۳/۱۰)
	روابط بین‌الملل (۷/۹۰)	پیگیری‌های حقوقی (۳/۰۶)
		پایبندی به توافقنامه‌ها، معاهدات و قراردادهای دو یا چندجانبه (۳/۳۱)
اقتصادی		تجارت آب (۳/۴۰)
(۲۶/۴۲)	اقتصاد آب (۷/۹۰)	مدیریت آب (۳/۶۶)
		تجارت انرژی (۲/۹۷)
	اقتصاد انرژی (۶/۹۹)	مدیریت انرژی (۳/۱۹)
		مدیریت منابع آب موجود (۳/۷۰)
	طرح‌های اقتصادی مشترک (۷/۱۷)	مدیریت و انتقال انرژی (۳/۲۷)

جاده‌ای (۲/۸۸)		
ریلی (۲/۸۰)	ظرفیت خطوط ترانزیتی (۶/۶۲)	
هوایی (۲/۳۲)		
دریایی (۱/۹۸)		
محصولات کشاورزی (۲/۹۳)	صادرات و واردات (۷/۱۷)	
صنعت (۳/۱۹)		
جمعیت (۲/۷۶)		
شهرنشینی (۳/۰۱)	اجتماعی سیاسی (۶/۸۰)	اجتماعی
بیکاری و اشتغال (۳/۳۱)		(۲۳/۵۸)
مذهب (۲/۴۱)		
ساختار فرهنگی (۳/۰۶)	اجتماعی فرهنگی (۶/۰۷)	
سطح تحصیلات (۲/۵۴)		
تغییرات زمانی و مکانی پارامترهای هواشناسی (۳/۳۱)	تغییر اقلیم (۶/۸۹)	
پوشش گیاهی و تغییر رطوبت خاک (۳/۰۱)	تغییر کاربری اراضی (۶/۳۴)	زیست‌محیطی
توپوگرافی (۳/۲۳)		(۲۱/۳۸)
هیدرولوژی حوضه (۳/۵۳)	مشخصات فیزیکی و هیدرولوژی حوضه آبریز (۶/۷۱)	

## منابع

- اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی تهران (۱۳۹۶). آمار و نمودارهای صادرات و واردات منتهی به اسفند ۱۳۹۶. پاپلی یزدی، محمدحسین، و وثوقی، فاطمه. (۱۳۹۰). نگاهی به دیپلماسی آب ایران. انتشارات پاپلی. پاک‌نژاد متکی، حمیدرضا، و عزتی، عزت‌اله. (۱۳۹۰). هیدروپلیتیک رودخانه اترک فرامرزی و تأثیر آن بر روابط ایران و ترکمنستان چشم‌انداز جغرافیایی ۶ (۱۴). ۳۷-۱۹. [http://jshsp.iurasht.ac.ir/article\\_519548.html](http://jshsp.iurasht.ac.ir/article_519548.html)
- حافظ نیا، محمدرضا. (۱۳۸۵). اصول و مفاهیم ژئوپلیتیک مشهد. انتشارات پاپلی. ۳۳۵-۳۴۰.
- حافظ نیا، محمدرضا. (۱۳۹۹). ضرورت اتخاذ راهبرد ژئوپلیتیک برای حل بحران‌های پاندمیک. فصلنامه بین‌المللی ژئوپلیتیک، ۱۶(۵۸)، ۶-۱.
- [http://journal.iag.ir/article\\_109665.html](http://journal.iag.ir/article_109665.html)
- زرقانی، سید هادی، و لطفی، امین. (۱۳۹۰). نقش رودخانه‌های فرامرزی در همکاری و همگرایی منطقه‌ای - مطالعه موردی: سد هریرود و دوستی جغرافیا و توسعه منطقه‌ای، ۹(۱۶)، ۸۲-۵۷. <https://dx.doi.org/10.22067/geography.v9i16.11029>

- سینایی، وحید. (۱۳۸۹). هیدروپلیتیک حوضه هریرود و تأثیرات آن بر روابط ایران و ترکمنستان و افغانستان. دومین کنفرانس بررسی روابط ایران و کشورهای آسیای میانه، مشهد، ایران. <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1018031.html>
- سینایی، وحید. (۱۳۹۰). هیدروپلیتیک، امنیت و توسعه همکاری آب در روابط ایران و افغانستان و ترکمنستان. مجله روابط خارجی، ۳(۲)، ۲۱۱-۱۸۵. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085419.1390.3.2.5.6>
- صادقی، سید شمس الدین. (۱۳۹۵). هیدروپلیتیک و امنیت ملی (مطالعه موردی: کشورهای خلیج فارس). مجله استراتژی، ۲۵(۴)، ۱۴۴-۱۱۷. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.10283102.1395.25.4.3.9>
- صفوی، سید یحیی. (۲۰۰۶). مقدمه‌ای بر جغرافیای نظامی ایران. انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح.
- عراقچی، سید عباس. (۱۳۹۳). دیپلماسی آب، از منازعه تا همکاری. فصلنامه سیاست جهانی، ۳(۴)، ۹۱-۱۱۹. [https://interpolitics.guilan.ac.ir/article\\_132.html](https://interpolitics.guilan.ac.ir/article_132.html)
- عزتی، عزت‌الله، خضری، محمد حسن، و نیک‌فرجام، محبوبه. (۱۳۹۰). تحلیلی بر هیدروپلیتیک شرق ایران. فصلنامه علمی و پژوهشی نگرش‌های نو در جغرافیای انسانی، ۴(۱)، ۹۵-۱۱۳. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.66972251.1390.4.1.7.9>
- عطاری، جلال، و آواریده، فریبا. (۱۳۹۶). مطالعه تحلیلی قراردادهای آب فرامرزی ایران با همسایگان. مجله مطالعات حقوق انرژی، ۳(۲)، ۳۰۸-۲۸۵. <https://dx.doi.org/10.22059/jrels.2017.226824.105>
- کاویانی راد، مراد. (۱۳۹۲). مجموعه مقالات اکولوژی سیاسی، انتشارات موسسه پژوهشی مطالعات راهبردی.
- قندهاری، احمد، علوی مقدم، سید محمدرضا، و عمرانیان خراسانی، حمید. (۱۳۹۵). مدیریت منابع آب در حوضه آبریز هریرود بر اساس نظریه بازی. مجله آب و توسعه پایدار، ۳(۱)، ۱۲۱-۱۱۵. <https://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v3i1.55039>
- کاویانی راد، م.، متقی، ا.، زرقانی، س.ه.، و صدرانیا، ح. (۱۳۹۷). شناسایی و تحلیل تأثیر متغیرها و شاخص‌های مؤثر در اهمیت راهبردی هریرود برای ایران با رویکرد تحلیل تأثیرات متقابل. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. مجله تحقیقات کاربردی در علوم جغرافیایی، ۱۹(۵۵)، ۲۲-۱۹. <http://dx.doi.org/10.29252/jgs.19.55.11>
- کاویانی راد، مراد، متقی، افشین، زرقانی، سید هادی، و صدرانیا، حسن. (۱۳۹۷). شناسایی و تحلیل عوامل مؤثر در مناسبات هیدروپلیتیک ایران و افغانستان در حوضه آبریز هریرود. مجله مطالعات شبه‌قاره، ۱۰(۳۴)، ۲۵۴-۲۳۵. <https://dx.doi.org/10.22111/jsr.2018.4072>
- مختاری هشی، حسن، و کاویانی راد، مراد. (۱۳۹۸). پردازش مفهوم هیدروپلیتیک. مجله آب و توسعه پایدار، ۶(۲)، ۲۶-۱۵. <https://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v6i2.75117>
- میان‌آبادی، حجت. (۱۳۹۲). مروری بر قوانین بین‌المللی آب. هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. <https://civilica.com/doc/217468>
- یاقوت‌حردانی، هادی. (۱۳۹۱). ارزیابی تأثیر پدیده گردوغبار بر کیفیت زندگی روستاییان: مطالعه موردی روستاهای شهر اهواز (بخش حمیدیه). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- دولتیار، مصطفی، و گری، تیم اس. (۱۳۸۹). سیاست آب در خاورمیانه. انتشارات شرکت چاپ و نشر بین‌الملل.

## References

- Attari, J., & Avarideh, F. (2017). An Analytical Study of Iran's Trans-boundary Water Agreements. *Journal of Researches Energy Law Studies*, 3(2), 285-308. <https://dx.doi.org/10.22059/jrels.2017.226824.105> [In Persian]
- Araghchi, A. (2015). Hydro Diplomacy: From Conflict to Cooperation. *World Politics*, 3(4), 91-119. [https://interpolitics.guilan.ac.ir/article\\_132.html](https://interpolitics.guilan.ac.ir/article_132.html) [In Persian]

- Dellapenna, J.W. (2007). Transboundary water sharing and the need for public management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 133(5), 397-404. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2007\)133:5\(397\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2007)133:5(397))
- Dolatyar, M., & Gray, T. (2010). *Water Policy in the Middle East*. Publications of International Publishing Company. [In Persian]
- Engerer, H. (2009). Security economics: Definition and capacity (No. 5). *Economics of Security Working Paper*.
- Ezati, E., Khezri, M., & Nikfarjam, M. (2011). An Analysis of Hydropolitics in Eastern Iran, 4(1), 95-113. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.66972251.1390.4.1.7.9> [In Persian]
- Fischhendler, I. (2015). The securitization of water discourse: Theoretical foundations, research gaps and objectives of the special issue. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 15(3), 245-255. <https://doi.org/10.1007/s10784-015-9277-6>
- Ghandhari, A., Alavi Moghaddam, S., & Omranian khorasani, H. (2016). Water Resources Management in the Harirud river basin based on game theory. *Journal of Water and Sustainable Development*, 3(1), 115-121. <https://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v3i1.55039> [In Persian]
- Hafeznia, M. (2006). Geopolitical principles and concepts. *Papoli Publications*, 335-340. [In Persian]
- Hafeznia, M. (2017). Demand to adopt a geopolitical strategy to resolve pandemic crises. *Geopolitics Quarterly*, 16(2), 6-1. [http://journal.iag.ir/article\\_109665.html](http://journal.iag.ir/article_109665.html) [In Persian]
- Katz, D., & Fischhendler, I. (2011). Spatial and temporal dynamics of linkage strategies in Arab-Israeli water negotiations. *Political Geography*, 30(1), 13-24. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.polgeo.2010.12.002>
- Kavianirad, M. (2013). *Collection of Political Ecology Articles*, Strategic Studies Research Institute Publications. [In Persian]
- Kavianirad, M., Motaghi, A., Zarghani, H., & Sadrania, H. (2018). Identification and Analysis of Effective Factors in Hydropolitical Relations between Iran and Afghanistan in Harirod Basin. *Journal of Subcontinental Studies*, 10(34), 254-235. <https://dx.doi.org/10.22111/jsr.2018.4072> [In Persian]
- Kaviani Rad, M., Mottaghi, A., Zarghani, H., & Sadrania, H. (2019). Identifying and Analyzing the Effects of Variables and Indicators Effectively on the Strategic Importance of Harirud for Iran with the Interaction Impact Analysis Approach. *Jgs*, 19(55), 1-22. <http://dx.doi.org/10.29252/jgs.19.55.1> [In Persian]
- Mianabadi, H. (2013). An overview of international water laws. 7th National Congress of Civil Engineering, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran. <https://civilica.com/doc/217468> [In Persian]
- Mokhtari Hashi, H., & Kavianirad, M. (2019). Explaining the Hydropolitics Concept. *Journal of Water and Sustainable Development*, 6(2), 15-26. <https://dx.doi.org/10.22067/jwsd.v6i2.75117> [In Persian]
- Paknejad, H., & Ezati, E. (2011). The Hydropolitic of border river Atrak and its effect on Iran's and Turkmenistan's relation. *Journal of Studies of Human Settlements Planning*, 6(14), 19-37. [http://jshsp.iurasht.ac.ir/article\\_519548.html](http://jshsp.iurasht.ac.ir/article_519548.html) [In Persian]
- Palau, R.G., (2013). Water security: Afghanistan transboundary water resources in regional context. *Transboundary*, 5(1), 1-15.
- Papoli Yazdi, M. Vosooghi, F. (2011). *Look at Iranian Water Diplomacy (Hydrogeopolitics)*. Papoli Publications. [In Persian]

- Rai, S.P., Sharma, N., & Lohani, A.K. (2019). Novel approach for issues identification in transboundary water management using fuzzy c-means clustering. *Applied Water Science*, 9(1), 11. <http://dx.doi.org/10.1007/s13201-018-0889-1>
- Rai, S. P., Wolf, A. T., Sharma, N., & Tiwari, H. (2017). *Hydropolitics in transboundary water conflict and cooperation*. In *River System Analysis and Management* (pp. 353-368). Publisher Springer, Singapore.
- Rai, S. P., Young, W., & Sharma, N. (2017). Risk and opportunity assessment for water cooperation in transboundary river basins in South Asia. *Water Resources Management*, 31(7), 2187-2205. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1637-2>
- Sadeghi, S. (2016). *Hydropolitics and National Security (Case Study: In Persian Gulf Countries)*. The scientific Journal of Strategy, 25(81), 117-144. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.10283102.1395.25.4.3.9> [In Persian]
- Safavi, Y. (2006). *Introduction to the military geography of Iran*. Publications of the Geographical Organization of the Armed Forces. [In Persian]
- Shahbazbegian, M.R., Turton, A., & Mousavi Shafae, S.M. (2016). *Hydropolitical Self-Organization theory; system dynamics to analyse hydropolitics of Helmand transboundary river*. *Water Policy*, 18(5), 1088-1119. <https://doi.org/10.2166/wp.2016.204>
- Sinaee, V. (2010). *Hydropolitics of Harirod Basin and its effects on Iran-Turkmenistan-Afghanistan relations*. The second conference to review the relations between Iran and Central Asian countries, Mashhad, Iran. <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1018031.html> [In Persian]
- Sinaee, V. (2011). *Hydropolitics, Security and Development of Water Cooperation in Iran-Afghanistan-Turkmenistan Relations*. *Journal of Foreign Relations*, 3(2), 185-211. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085419.1390.3.2.5.6> [In Persian]
- Talebolelm, A., Khodashenas, S.R., Akhtarpour, A. (2021). *Investigation of Frequently Changes in Degree of Saturation on Physical and Mechanical Characteristics of Core of Soil Dam (Case Study: Doosti Dam)*. *IQBQ*, 21(1), 187-201. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-40097-fa.html>
- Tehran Chamber of Commerce, Industries, Mines and Agriculture (2017). *Exports and Import Statistics and Charts Leading to March 2018*. [In Persian]
- Tiwari, H., & Sharma, N. (2014). *River science research: multidisciplinary to trans disciplinary*. *J Water Resour Eng Manag*, 1(1), 15-19. [https://www.academia.edu/8128969/River\\_Science\\_Research\\_Multidisciplinary\\_To\\_Trans\\_Disciplinary](https://www.academia.edu/8128969/River_Science_Research_Multidisciplinary_To_Trans_Disciplinary)
- Transboundary Waters Assessment Programme (TWAP) (2015), *assessment of governance arrangements for the ocean*, Technical Series 119.
- Yaghout Hardani, H. (2012). *Assessing the effects of dust phenomenon on the quality of life of villagers: A case study of villages in the Ahvaz city (Hamidiyeh ward)*. Master Thesis, Tarbiat Modares University. [In Persian]
- Zarghani, S., & Lotfi, A. (2011). *The Role of international rivers in regional cooperation and convergence, The case of the Harirud and the Dam of Dousti*. *Journal of Geography and Regional Development*, 9(1), 57-82. <https://dx.doi.org/10.22067/geography.v9i16.11029> [In Persian]



## Prediction of the scour depth of bridge pier using artificial neural network model and comparison with empirical equations

Samad Emamgholizadeh<sup>1✉</sup> , Mohammad Ali Rahimi<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Corresponding Author, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email : [s\\_gholizadeh517@shahroodut.ac.ir](mailto:s_gholizadeh517@shahroodut.ac.ir).

<sup>2</sup> M. Sc student of Water structures, Department of Water and Soil, Faculty of Agriculture, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: [mohammadalii906@gmail.com](mailto:mohammadalii906@gmail.com).

### ABSTRACT

#### Introduction

The impact of flow on the bridge piers creates turbulent flows that cause scour around it, and as result collapse of the bridges. Failure and destruction of bridges, in addition to causing financial and sometimes loss of life, may cut off communication routes to flooded areas. Despite to most research which done in this field, but due to the complexity characterizes the behavior of a system and the many parameters involved in this phenomenon, there is still no exact relationship or fundamental solution to predict scour depth. Therefore, using new methods such as artificial intelligence models can be very useful.

#### Methods

In recent years, artificial intelligence models such as artificial neural networks (ANNs) in various fields such as water engineering have been used to predict the studied parameters. ANN biologically inspired computational networks. Among the various types of ANNs, multilayer perceptron (MLPs) with back propagation learning algorithms are famous and was used by many researchers. This model relates the inputs and outputs of a system and it has been successfully used to map non-linear input and output relationships in a wide range of areas. It consists of a layer of input nodes and layer of output nodes, connected by one or more layers of hidden nodes.

In the present study, the scour depth was estimated with ANN model. Also the ability of this model compared with linear and nonlinear regression models, and also empirical relationships. To train and test of these models, the measured data which collected from literature were used.

To estimate the scour depth, several parameters such as flow characteristics, bridge geometric characteristics, etc. are involved. In selecting the next parameters in this research, two reasons were considered: first, the parameters that have a more impact on scour depth and second, that it has been used in the research of other researchers. Effective parameters can be arranged in Eq.1 as follows.

$$D_s = f(v, y, L_p, W_p, \theta, D_{s1}, D_{s2}) \quad (1)$$

In which,  $D_s$  is scour depth,  $P_1$  is the pier length,  $\theta$  is pier angle in degrees,  $W_p$  is the pier width,  $V$  is flow velocity,  $y$  is depth of flow,  $D_{s0}$  is average particle diameter in millimeters,  $D_{s1}$  is diameter of sediment which 84% of the particles have passed through sieve.

By Buckingham's dimensional analysis, the final forms of the dimensionless parameters that define the scour depth was derived as follows:

$$\frac{D_s}{y} = f\left(\frac{L_p}{W_p}, \frac{D_{s1}}{D_{s2}}, \frac{V}{\sqrt{gy}}\right) \quad (2)$$

#### Results

The results of this study showed that the artificial neural network model able to predict scour depth with determination coefficient ( $R^2$ ) equal to 0.99 and 0.81, as well as RMSE error equal to 0.01 m and 0.32, respectively, when data was used with dimension and non-dimension forms. Linear regression model predicted scour depth with  $R^2$  and RMSE error of 0.58, 0.60, 0.20, 0.31, and also nonlinear regression model predicted scour depth with  $R^2$  and RMSE, respectively, equal to 0.60, 0.91 and 0.42 m, 0.20. Also, the empirical equations. Also, the empirical equations of the Colorado State University between the empirical relationships predicted scour depth with  $R^2$  and RMSE error equal to 0.84 and 0.52. Comparison of the results of different models shows that the best results are related to the artificial neural network model and it decreased error of prediction 70, 85.5 and 87.7% compared to linear regression model, nonlinear regression model and the empirical equation of the Colorado State University, respectively.

#### Conclusion

In this study, different methods such as artificial neural network model, linear and non-linear regression model were used to predict scour depth around bridge pier. Also, the performance of these models compared with previous studies. Based on dimensional analysis, dataset were used in two forms of dimension and non-dimension.

Results showed that:

- The artificial neural network (ANN) predicts the scour depth with higher accuracy, when dimensional dataset were used.
- The accuracy of the linear regression model (LR) was better when non-dimensional dataset were used.
- Comparison of different equations from previous studies showed that the Colorado State University relationship estimated the scour depth more accurately.
- Nonlinear regression model (NLR) has better performance compared to linear regression model (LR).
- Comparing ANN, and LR and NLR models with previous studies indicated that the artificial neural network model has a higher ability to predict scour depth.

**Keywords:** Scouring, Bridges, Empirical Relations, Artificial Neural Network

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 29 August 2021 Revised: 02 October 2021 Accepted: 19 October 2021 ePublished: 20 February 2022

**Cite this article:** Emamgholizadeh, S., & Rahimi, M.A. (2022). Prediction of the scour depth of bridge pier using artificial neural network model and comparison with empirical equations., *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 1(1), 70-90. DOI: 10.22126/ATWE.2021.6873.1005





## پیش بینی عمق آبستگی پایه پل با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن با روابط تجربی

صمد امامقلی زاده <sup>۱</sup>✉، محمدعلی رحیمی <sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: [s\\_gholizadeh517@shahroodut.ac.ir](mailto:s_gholizadeh517@shahroodut.ac.ir)  
<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه آب و خاک دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: [mohammadalii906@gmail.com](mailto:mohammadalii906@gmail.com)

### چکیده

برخورد جریان به پایه های پل و تکیه گاه ها جریان های آشفته ای را ایجاد می کند که سبب فرسایش در کنار پایه ها و تکیه گاه های پل شده و در نتیجه تخریب پل ها را در پی دارد. با توجه به پیچیدگی موضوع و پارامترهای زیادی که دخالت دارند هنوز یک رابطه ی دقیق یا راه حل اساسی برای پیش بینی عمق آب شستگی ارائه نشده است. در تحقیق حاضر عمق آب شستگی با استفاده از داده های اندازه گیری شده و با به کارگیری روش شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون خطی و غیرخطی و روابط تجربی برآورد شد. داده ها به دو صورت، با بعد و بدون بعد که با استفاده از آنالیز ابعادی به دست آمد مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد مدل شبکه عصبی مصنوعی توانسته است با به کارگیری پارامترهای تأثیرگذار عمق آب شستگی را با ضریب تبیین برابر با ۰/۹۷ و ۰/۸۱ و همچنین خطای RMSE برابر با ۰/۱۱m و ۰/۳۲ به ترتیب زمانی که داده ها با بعد و بدون بعد استفاده شده اند، پیش بینی کند. همچنین رابطه تجربی دانشگاه ایالتی کلرادو توانسته است عمق آب شستگی را با ضریب تبیین و خطای RMSE برابر با ۰/۵۳ و ۰/۵۲ متر پیش بینی کند. مقایسه نتایج مدل های مختلف نشان می دهد که مدل شبکه عصبی مصنوعی مقدار خطای پیش بینی عمق آب شستگی را به ترتیب ۰/۷، ۸۵/۷ و ۸۷/۷ درصد در مقایسه با مدل رگرسیون خطی، مدل رگرسیون غیرخطی و رابطه تجربی دانشگاه ایالتی کلرادو کاهش داد.

**واژه های کلیدی:** آب شستگی، پایه پل ها، روابط تجربی، شبکه عصبی مصنوعی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۷ شهریور ۱۴۰۰ اصلاح: ۱۰ مهر ۱۴۰۰ پذیرش: ۲۷ مهر ۱۴۰۰ چاپ الکترونیکی: ۰۱ اسفند ۱۴۰۰

**استناد:** امامقلی زاده، ص. و رحیمی، م.ع. (۱۴۰۰). پیش بینی عمق آب شستگی پایه پل با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن با روابط تجربی.، *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، (۱)، ۹۰-۷۰. شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2021.6873.1005



آب شستگی در حقیقت جابه‌جایی ذرات رسوب توسط جریان آب از محل استقرار اولیه آن‌ها به مکان دیگری است. به‌طور کلی آب شستگی در اثر اندرکنش دینامیک، یکی نیروی محرک ناشی از جریان که در راستای جدا کردن ذره از بستر عمل می‌کند و دوم نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک ذرات و وزن ذره که در برابر حرکت ذره مقاومت کرده و مانع جدایی ذره از بستر می‌شود حاصل می‌گردد. با حضور پایه‌های پل در مسیر جریان؛ سرعت موضعی و آشفتگی جریان افزایش می‌یابد و بسته به شکل سازه گردابه‌هایی ایجاد می‌گردند (بی‌نام، ۱۳۹۰). الگوی جریان و آب شستگی در اطراف پایه‌ها به دلیل وجود میدان جریان آشفتنه، در اطراف آن‌ها پدیده پیچیده‌ای ایجاد می‌کند. از برخورد جریان به جلوی پایه و منحرف شدن آن به سمت بستر رودخانه باعث می‌شود که یکسری گرداب‌های چرخشی در اطراف پایه به وجود آید؛ که این گرداب‌ها در پلان مانند نعل اسب می‌باشد. از این رو به آن‌ها گرداب نعل اسبی می‌گویند (ملویل، ۱۹۹۷). الگوی جریان در اطراف پایه به دو صورت، یکی برخورد جریان به پایه و دیگری جدایی جریان از پایه می‌باشد؛ که با جدایی جریان از پایه باعث تشکیل گرداب برخاستگی می‌شود و این گرداب‌ها مانند گرداب عمل کرده و ته‌نشست‌ها را از کنار پایه‌ها جدا کرده و سپس آن‌ها را به سمت پایین دست به حرکت درمی‌آورد (چیو، ۱۹۹۲). گرداب‌های برخاستگی که در پشت پایه فعال‌اند، در صورت نبودن گرداب‌های نعل اسبی حفره‌ای را در پشت پایه به وجود می‌آورند. همچنین گرداب‌های دیگری با جهت چرخش مخالف در جلوی پایه‌ها تشکیل می‌شود که به آن‌ها موج کمانی یا سطحی گفته می‌شود، که در جریان‌های کم عمق دارای اهمیت می‌باشد (رادکیوی و همکاران، ۱۹۹۸). با برخورد جریان به پایه‌ها و تکیه‌گاه‌ها جریان به سمت پایین منحرف می‌شود و با چرخش گرداب اولیه را ایجاد می‌کند؛ یک گرداب ثانویه نیز در اثر چرخش معکوس با گرداب اولیه ایجاد می‌شود. که گرداب ثانویه همراه با گرداب برخاستگی باعث یکسری فعالیت‌های پیچیده‌ای بین آب و بستر می‌شود که دلیل اصلی آب شستگی در تکیه‌گاه‌ها است (دی و همکاران، ۲۰۰۴).

با توجه به نقش بسیار مهمی که پل‌ها از لحاظ عبور از موانع فیزیکی از جمله رودخانه‌ها دارند، امروزه مساله آب شستگی آن یکی از مسائل مهم در علم مهندسی رودخانه و هیدرولیک رسوب می‌باشد، چراکه تخریب آن‌ها می‌تواند خسارت جبران‌ناپذیری ایجاد کند. بررسی پارامترهای مؤثر در ایجاد عمق آب شستگی می‌تواند نقش مهمی در پیش‌بینی آن به‌منظور طراحی ایمن و اقتصادی آن داشته باشد. از سویی دیگر، با توجه به پیچیدگی موضوع و پارامترهای زیادی که در این پدیده دخالت دارند، هنوز یک رابطه‌ی دقیق یا راه‌حل اساسی برای پیش‌بینی عمق آب شستگی ارائه نشده است.

روابط زیادی برای تخمین عمق آب شستگی پای‌های پل بر مبنای داده‌های صحرایی و یا آزمایشگاهی ارائه گردید، که دقت آن‌ها در پیش‌بینی عمق آب شستگی بخصوص روابطی که بر مبنای داده‌های آزمایشگاهی می‌باشند، کم می‌باشد. علاوه بر آن، یکی از دلایل دیگر می‌تواند مربوط به ارتباط غیرخطی بودن پارامترهای هیدرولیکی و یا مشخصات بستر رودخانه با عمق آب شستگی باشد. در سالهای اخیر استفاده از هوش مصنوعی به‌عنوان یک ابزار توانمند برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی پیچیده بخصوص در علم مهندسی هیدرولیک برای پیش‌بینی پارامترهای مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است و استفاده از آن می‌تواند کمک مؤثری در این زمینه نماید. با توجه به اهمیت موضوع، در این تحقیق با استفاده از داده‌های صحرایی اندازه‌گیری شده سعی شد، با به‌کارگیری مدل شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن با روش‌های مرسوم مانند روابط مبتنی بر رگرسیون خطی و غیرخطی و همچنین روابط تجربی، عملکرد آن در پیش‌بینی عمق آب شستگی با استفاده از ضرایب آماری مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. همچنین بر اساس آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مؤثر در ایجاد آب شستگی، عوامل مهمی که می‌تواند در پیش‌بینی عمق آب شستگی مؤثر واقع شوند، معرفی گردید.

<sup>1</sup> Melville

<sup>2</sup> Chiew

<sup>3</sup> Raudkivi et al

<sup>4</sup> Dey



### مبانی نظری و پیشینه پژوهش

ملویل (۱۹۹۷) عواملی چون عمق جریان، اندازه‌ی پایه، شدت جریان، ویژگی‌های رسوب، نوع پایه، شکل و تراز پایه و شکل آبراهه را برای تعیین عمق آب شستگی بررسی کرد. رادکیوی و همکاران (۱۹۸۳) برای به دست آوردن عمق آب شستگی بر روی مشخصات جریان از جمله سرعت و عمق جریان مطالعه‌هایی انجام دادند. نتایج نشان داد که تأثیر عمق جریان بر حداکثر عمق آب شستگی به درجه‌بندی رسوب‌های بستر بستگی دارد. ملویل و همکاران (۱۹۸۸) با استفاده داده‌های آزمایشگاهی برای تعیین حداکثر عمق آب شستگی از پارامترهای چون سرعت، عمق جریان، اندازه‌ی و درجه‌بندی رسوب، اندازه و شکل و تراز پایه مورد مطالعه قراردادند. رئیس و همکاران (۱۳۹۴) با انجام آزمایش‌هایی بر روی انواع قطر پایه و سرعت‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که هر چه سرعت جریان بیشتر باشد عمق آب شستگی بیشتر است. همچنین عدد فرود در بالادست پایه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. کامبکار و همکاران (۲۰۰۳) برای تعیین عمق آب شستگی ناشی از موج در پایه‌های مواردی چون ارتفاع موج، دوره موج، عمق آب، قطر پایه، حداکثر سرعت ذرات موج و حداکثر سرعت برش را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مورد بررسی قراردادند. نتایج نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی نسبت به روابط تجربی عملکرد بهتری دارد. باطنی و همکاران (۲۰۰۷) با مطالعه بر روی داده‌های میدانی مقایسه‌ای را بین شبکه عصبی مصنوعی و استنباط فازی انجام دادند. بررسی‌ها نشان داد که شبکه عصبی مصنوعی نتایج بهتری نسبت به استنباط فازی دارد. بگام و همکاران (۲۰۱۳) دو مدل شبکه مصنوعی MLP و RBF<sup>۴</sup> برای پیش‌بینی حداکثر عمق آب شستگی در اطراف پایه‌ها استفاده کردند. هر دو مدل نتایج خوبی را نشان داد؛ اما عملکرد مدل MLP بهتر از مدل RBF بود. عبدالله محمد<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۱۶) با به‌کارگیری مدل عددی و شبیه‌سازی آزمایشگاهی برای تعیین حداکثر عمق آب شستگی عرض‌های مختلف کانال و زاویه‌های ورود آب در آستانه پل مورد بررسی قراردادند و نشان دادند که عمق آب شستگی با افزایش انقباض در آستانه پل افزایش پیدا می‌کند. چاو و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از یک مدل ترکیبی (GA-SVR) برای پیش‌بینی عمق آب شستگی آبراهه‌ها مورد مطالعه قراردادند و نتایج نشان داد این مدل نسبت به روش‌های تجربی، رگرسیون درختی، مدل‌های طبقه‌بندی و آشکارساز تعامل اتوماتیک تراشه مربع عملکرد بهتری دارد. غضنفری و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان نشان داد که این روش نسبت به روابط تجربی عمق آب شستگی را با دقت بالاتری تخمین می‌زند.

بحث تخمین عمق آب شستگی بحث بسیار مهمی در طراحی سازه‌های پل می‌باشد. بدین منظور محققین روابط تجربی زیادی برای تخمین عمق آبشستگی پایه‌های پل ارائه کرده‌اند (جدول ۱). برخی از این روابط در محیط آزمایشگاهی توسعه داده شدند و دقت آن‌ها در پیش‌بینی‌های واقعی کم می‌باشد (باطنی و همکاران، ۲۰۰۷). علت آن است که در مطالعه‌های تجربی انجام شده تأثیر همه پارامترها مؤثر بر مسئله به‌خوبی در نظر گرفته نشده است (اتما و همکاران<sup>۸</sup>، ۱۹۹۸).

<sup>1</sup> Kambekar et al

<sup>2</sup> Begum

<sup>3</sup> Multi layer perceptron

<sup>4</sup> Raial basis function

<sup>5</sup> Abdallah Mohamed

<sup>6</sup> Chou

<sup>7</sup> Genetic algorithm-support vector regression

<sup>8</sup> Ettema et al

جدول ۱. روابط تجربی ارائه شده برای پیش بینی عمق آب شستگی در اطراف پایه پل

معادله تخمین آب شستگی	نام محقق
$D_s = 1/\sqrt{3} b^{0.72} V^{0.78} - y$	اینگیس (۱۹۴۹)
$\frac{D_s}{b} = 1/\delta (\frac{y}{b})^{0.72}$	لارسن و تاج (۱۹۵۶)
$D_s = 1/\delta \sqrt{3} b^{0.72} v^{0.5} y^{0.5} D_{s0}^{-0.725} - y$	بلنچ (۱۹۶۲)
$D_s = 1/0.5 b^{0.75}$	لاراس (۱۹۶۳)
$D_s = 1/\delta b^{0.72} y^{0.72}$	نیل (۱۹۶۴)
$\frac{D_s}{y} = 1/9.5 (\frac{b}{y})^2 - 1$	آرونچلام (۱۹۶۵)
$D_s = 1/11 b^{0.5} y^{0.5}$	ملویل (۱۹۷۵)
$\frac{D_s}{y} = \sqrt{2} K_1, K_2, K_3 (\frac{b}{y})^{0.725} Fr^{0.72}$	دانشگاه ایالتی کلرادو (۱۹۷۵)
$D_s = 1/4 b$	بروزرس (۱۹۷۷)
$D_s = 0/2 b$	رادکیوی (۱۹۸۶)
$D_s = 2/0.2 (\frac{b}{y})^{0.72} Fr^{0.72} (\frac{D_{s0}}{D_s})^{0.72}$	جانسون (۱۹۹۲)
$\frac{D_s}{b} = \delta \log(\frac{b}{D_{s0}}) - 4; \quad \delta \leq \frac{b}{D_{s0}} \leq 25$	لی و استروم (۲۰۰۹)
$\frac{D_s}{b} = \frac{1/\delta}{(1/0.2 \times \frac{b}{D_{s0}} - 0.72)^2 + 1} + 1/3; \quad 25 < \frac{b}{D_{s0}}$	
$\frac{D_s}{b^{0.72} y^{0.72}} = 1/\sqrt{2} K_1, K_2, K_3 \left[ \tanh\left(\frac{\sqrt{g(G_s - 1)D_{s0}}}{1/9.5 (\frac{D_{s0}}{D_s})^{0.72}}\right) \right]$	HN/GC اصلاح شده (۲۰۱۶)

پارامترهای به کاررفته در این جدول عبارتند از:  $D_s$ : عمق آب شستگی [L]،  $b$ : عرض پایه [L]،  $y$ : عمق جریان در بالادست پایه [L]،  $V$ : سرعت جریان نزدیک شونده به پایه  $[L.T^{-1}]$ ،  $Fr$ : عدد فرود در بالادست پایه،  $D_{s0}$ : قطر متوسط ذرات رسوب [L]،  $D_{s4}$ : قطر ذرات رسوبی که ۸۴ درصد ذرات رسوب از الک عبور کرده اند [L]،  $G_s$ : چگالی نسبی ذرات رسوب،  $K_1$  ضریب تصحیح شکل پایه است که برای پایه های مستطیلی و گرد مقدار آن یک می باشد و  $K_2$  ضریب تصحیح زاویه برخورد جریان با پایه است و از رابطه  $K_2 = (\cos\theta + \frac{L}{b} \sin\theta)^{0.65}$  محاسبه می گردد که در آن  $L$  طول پایه،  $b$  عرض پایه و  $\theta$  زاویه برخورد جریان با پایه است،  $K_3$  ضریب تصحیح شرایط بستر که برای آب زلال مقدار آن  $1/1$  و برای شرایط آب گل آلود مقدار آن بین  $1/1$  تا  $1/3$  است.

### روش پژوهش

پارامترها و نحوه انتخاب داده ها

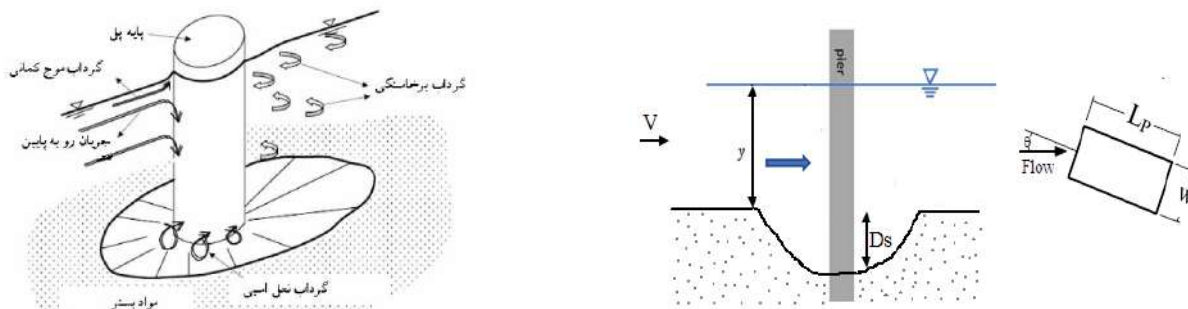
برای تخمین عمق آب شستگی پارامترهای متعددی مانند مشخصات جریان، مشخصات هندسی پل و مشخصات رسوب دخالت دارند. در انتخاب پارامترهای با بعد در این تحقیق مدنظر بود دو دلیل اول اینکه پارامترهایی که تأثیر بیشتری بر عمق آب شستگی دارند و دوم اینکه در تحقیقات سایر محققین مورد استفاده قرار گرفته باشد؛ پارامترهای در نظر گرفته شده شامل موارد زیر است:

$$D_s = f(V, y, L_p, W_p, \theta, D_{50}, D_{84}, \emptyset) \quad (1)$$

که در رابطه (۱)،  $D_s$  عمق آب شستگی [L]،  $L_p$  طول پایه در جهت جریان [L]،  $\theta$  زاویه برخورد جریان با پایه [L]،  $W_p$  عرض پایه [L]،  $V$  سرعت جریان  $[L.T^{-1}]$ ،  $y$  عمق جریان [L]،  $D_{s0}$  قطر متوسط ذرات [L]،  $D_{s4}$  قطری که ۸۴ درصد ذرات از آن عبور کرده اند [L]،  $\emptyset$  فاکتور تأثیر شکل پایه می باشد. با استفاده از آنالیز ابعادی روش باکینگهام می توان رابطه (۲) را برای عمق آب شستگی به دست آورد.

$$\frac{D_s}{y} = f\left(\frac{P_1}{W_p}, \frac{D_{50}}{D_{84}}, \theta, \frac{V}{\sqrt{gy}}, \emptyset\right) \quad (2)$$

با توجه به اینکه در این تحقیق از یک نوع پایه، به شکل مستطیلی دماغه گرد استفاده گردید، لذا پارامتر  $\emptyset$  ثابت می‌باشد و در نتیجه این پارامتر از روابط ۱ و ۲ حذف گردید.



شکل ۱. آب شستگی در اطراف پایه (ملویل، ۱۹۹۷)

### مشخصات داده‌ها

برای بررسی قابلیت مدل شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون خطی و غیرخطی در پیش‌بینی عمق آب شستگی از داده‌های ارائه شده در منبع ریچاردسون و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۹) استفاده گردید. آب شستگی می‌تواند در دو شرایط آب زلال<sup>۲</sup> و آب گل‌آلود اتفاق بیفتد. حالت اول وقتی به وجود می‌آید که سرعت جریان بیشتر سرعت آستانه حرکت است ( $V > V_c$ ), در غیر این صورت شرایط آب گل‌آلود ایجاد می‌شود. در این پژوهش برخی از داده‌ها در شرایط آب زلال و برخی دیگر در شرایط آب گل‌آلود بودند. محدوده‌ی تغییرات داده‌ها به دو صورت با بعد و بدون بعد به ترتیب در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. همان‌طوری که در جدول ۱ آمده است روابط تجربی ارائه شده برای پیش‌بینی عمق آب شستگی در اطراف پایه پل به دو صورت با بعد و بدون بعد ارائه شده‌اند، لذا در این پژوهش داده‌ها به دو صورت با بعد و بدون بعد مورد استفاده قرار گرفتند. در حالت استفاده از داده‌های با بعد در مقایسه با داده‌های با بدون بعد، چون تعدادی از پارامترهای مورد استفاده به صورت ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند، لذا تعداد آن‌ها کاهش می‌یابد. مطالعات سایر محققین مانند امامقلی زاده و همکاران (۲۰۱۳) و باطنی و همکاران (۲۰۰۷) در استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی مانند شبکه عصبی نشان داد، که ترکیب داده‌های ورودی به مدل و همچنین تعداد آن‌ها می‌تواند بر روی عملکرد آن‌ها تأثیر داشته باشد. لذا بدین منظور برای در نظر گرفتن تأثیر آن، داده‌های ورودی به مدل به دو صورت با بعد و بدون بعد مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از کل داده‌های انتخاب شده ۱۰۷ داده (معادل ۸۰ درصد کل داده) برای آموزش مدل و از ۲۵ داده (معادل ۲۰ درصد داده‌ها) برای تست مدل استفاده گردید.

<sup>1</sup> Richardson et al

<sup>2</sup> Clear water scour

<sup>3</sup> Live bed scour

جدول ۳. محدوده‌ی تغییرات پارامترهای بی‌بعد		جدول ۲. محدوده‌ی تغییرات پارامترهای با بعد		
محدوده	پارامترها	محدوده	واحد	پارامترها
۰-۲/۳۳	$\frac{D_s}{y}$	۶/۴۰-۲۴/۹۳	(m)	$L_p$
۰/۰۵-۰/۸۵	$\frac{D_{s_1}}{D_{s_2}}$	۰/۲۸-۳/۰۵	(m)	$W_p$
		۰-۴۳	(deg)	$\Theta$
		۰/۲۴-۴/۴۸	(m/s)	$V$
۳/۶۷-۲۵/۲۶	$\frac{L_p}{W_p}$	۰/۱۲-۹/۴۵	(m)	$y$
۰/۰۴-۸۳	$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$	۰/۱۷-۹۵	(mm)	$D_{s_1}$
		۰/۲۵-۲۳	(mm)	$D_{s_2}$
		۰-۱/۶۸	(m)	$D_s$

### انتخاب پارامترهای ورودی به مدل

به منظور دست‌یابی به ارتباط بین داده‌های ورودی (طول پایه، عرض پایه، سرعت، عمق جریان، زاویه استقرار،  $D_{s_1}$ ،  $D_{s_2}$ ) و خروجی مدل (عمق آب شستگی) ابتدا آزمون همبستگی بین داده‌های مذکور در دو حالت با بعد و بدون بعد با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. نتایج به دست آمده در جدول ۴ آورده شده است؛ همبستگی داده‌ها در دو سطح ۹۵ و ۹۹ درصد مورد بررسی قرار گرفت که علامت \* نشان‌دهنده‌ی سطح ۹۹ و \*\* نشان‌دهنده‌ی سطح ۹۵ می‌باشد. با توجه به جدول ۴ بیش‌ترین همبستگی بین عمق آب شستگی و سرعت جریان  $R = ۰/۵۳$  بوده و کمترین همبستگی بین  $\Theta$  و عمق آب شستگی  $R = ۰/۰۸$  بوده است. با توجه به اینکه همبستگی بین  $\Theta$  و عمق آب شستگی در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار نبود، این پارامتر از داده‌های ورودی به مدل حذف گردید.

همچنین ارتباط بین پارامترها در حالت بدون بعد نیز بررسی شد که نتایج آن در جدول ۵ آورده شده است. با توجه به جدول ۵ بیشترین ضریب همبستگی عمق آب شستگی با عدد فرود ( $F_r = \frac{V}{\sqrt{gy}}$ )  $R = ۰/۶۹$  بوده است.

### مدل شبکه عصبی مصنوعی

داده‌کاوی فرآیند تحلیلی است که برای کاوش داده‌ها صورت می‌گیرد و یافته‌ها با به‌کارگیری الگوهایی احراز اعتبار می‌کنند. هدف اصلی داده‌کاوی پیش‌بینی است. در واقع این سیستم‌ها فرآیندی هستند که با استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی، دانش را از مجموعه‌ای از داده‌ها استخراج می‌کنند. شبکه عصبی مصنوعی (ANN) به‌عنوان یکی از عناصر عملیاتی ساده‌ای ساخته شده که به‌صورت موازی در کنار هم عمل می‌کنند. این شبکه از سه لایه ورودی، خروجی و پردازش تشکیل شده است؛ که هر لایه شامل گروهی از سلول‌های عصبی (نرون) می‌باشد. لایه‌های ورودی به تعداد داده‌های ورودی، لایه‌های خروجی به تعداد داده‌های خروجی و لایه‌های پردازش (پنهان) با صحیح و خطا به دست می‌آید (هانراهان، ۲۰۱۱). در این پژوهش، بر اساس آنالیز همبستگی انجام شده در بخش قبلی، تعداد داده‌های ورودی به مدل در حالت با بعد ۷ پارامتر و در حالت بی‌بعد ۳ پارامتر، برای پیش‌بینی عمق آب شستگی در نظر گرفته شد. همچنین تعداد لایه‌های پنهان با آزمون و خطا به دست آمده

<sup>1</sup> Artificial neural network

<sup>2</sup> Hanrahan

است. تعداد لایه‌های پنهان طوری انتخاب شد که بیشترین ضریب همبستگی  $R^2$ ، کمترین (RMSE) میانگین مربعات خطا و کمترین (MAE) میانگین خطای مطلق را داشته است.

با توجه به اینکه در این تحقیق از یک نوع پایه، به شکل مستطیلی دماغه گرد استفاده گردید، لذا پارامتر  $\theta$  ثابت می‌باشد و در نتیجه این پارامتر از روابط ۱ و ۲ حذف گردید. همچنین بر اساس آنالیز همبستگی که در بخش قبلی آمده است، بنابراین روابط ۱ و ۲ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$D_s = f(V, y, W_p, L_p, \theta, D_{50}, D_{84}) \quad (3)$$

$$\frac{D_s}{y} = f\left(\frac{L_p}{W_p}, \frac{D_{50}}{D_{84}}, \frac{V}{\sqrt{gy}}\right) \quad (4)$$

### رگرسیون خطی

درواقع به رگرسیونی که شامل بیش از یک متغیر مستقل باشد؛ رگرسیون خطی چندگانه گفته می‌شود. در رگرسیون خطی چندگانه تأثیر همزمان خطی دو یا چند متغیر را روی متغیر وابسته‌ای اندازه می‌گیریم و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Y = a + bx_1 + cx_2 + \dots + \varepsilon \quad (5)$$

که به  $Y$  متغیر وابسته و به  $X_1$  و  $X_2$  و... متغیرهای مستقل و نهایتاً به  $\varepsilon$  خطای مطلق گفته می‌شود.

رگرسیون غیرخطی

رگرسیون غیرخطی نیز مانند رگرسیون خطی دارای یک متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل است؛ که به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$Y = A \cdot x_1^a \cdot x_2^b \cdot \dots \quad (6)$$

### یافته‌ها

جدول ۴. ضریب همبستگی بین پارامترهای با بعد

$D_s$	$D_{84}$	$D_{50}$	$y$	$V$	$W_p$	$\theta$	$L_p$	
۰/۲*	۰/۳۷**	۰/۳۶**	۰/۴۷**	۰/۴۷**	۰/۶۸**	-۰/۵۲**	۱	$L_p$
-۰/۰۸	-۰/۳۶**	-۰/۳۷**	-۰/۳۲**	-۰/۳۱**	-۰/۶۲**	۱		$\theta$
۰/۲۴**	۰/۳۶**	۰/۳۸**	۰/۵۷**	۰/۶۰**	۱			$W_p$
۰/۵۳**	۰/۴۵**	۰/۴۷**	۰/۶۴**	۱				$V$
۰/۳۷**	۰/۰۵	۰/۱۰	۱					$y$
۰/۲۲*	۰/۹۹**	۱						$D_{50}$
۰/۲۴**	۱							$D_{84}$
۱								$D_s$

\*\*معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد    \*\*معنی‌داری در سطح ۹۵ درصد

<sup>2</sup> Root mean square error

<sup>3</sup> Mean absolute error

### نتایج حاصل از شبکه عصبی مصنوعی

به منظور تخمین عمق آب شستگی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی داده‌ها به دو صورت در حالت با بعد با چهار تابع محرک شامل گوس، سکانت هیپربولیک، تانژانت هیپربولیک و سیگموئید آموزش داده شد. همچنین تعداد لایه‌های میانی از ۱ تا ۸ تغییر داده شد. بهترین نتایج هر تابع محرک در جدول ۶ آورده شده است.

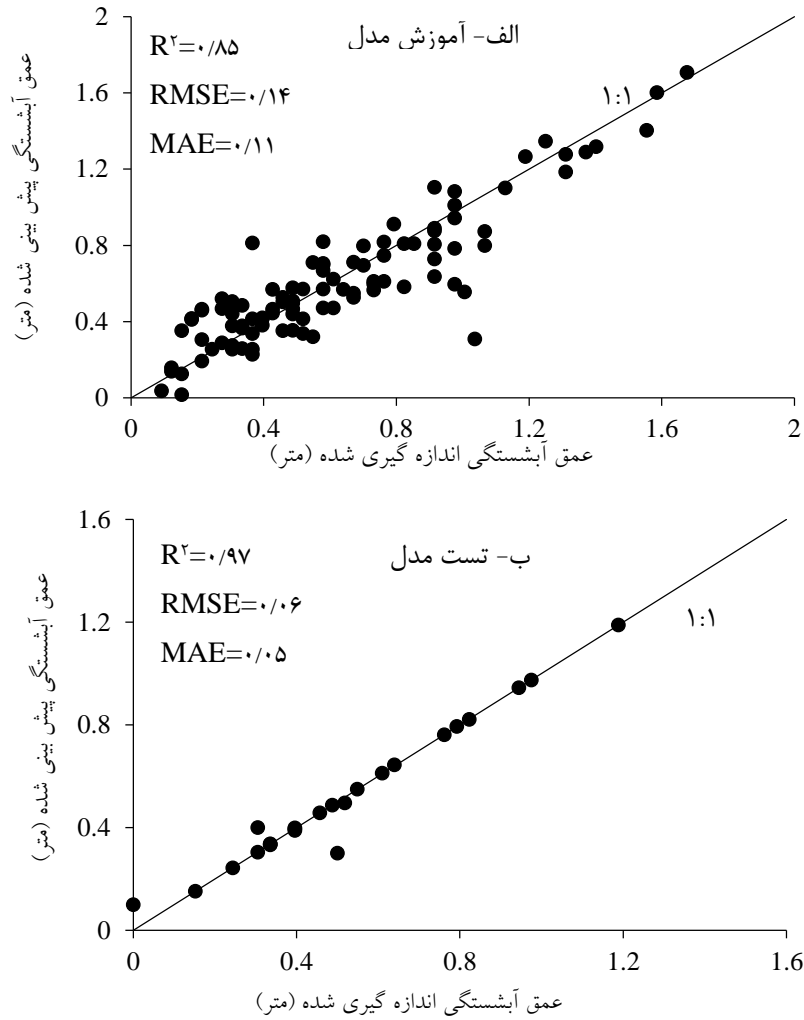
تابع محرک سکانت هیپربولیک با ۶ لایه میانی توانسته که عمق آب شستگی را در مرحله‌ی آموزش با ضریب تبیین ۰/۸۵، RMSE برابر ۰/۱۴، MAE برابر ۰/۱۱ و در مرحله تست ضریب تبیین ۰/۹۹، RMSE برابر ۰/۰۱، MAE برابر ۰/۰۱ پیش‌بینی کند.

در حالت بدون بعد نیز مدل با چهار تابع انتقال (گوس، سکانت هیپربولیک، تانژانت هیپربولیک و سیگموئید) بررسی شد. بهترین نتایج آن در جدول ۶ آورده شده است. تابع محرک تانژانت هیپربولیک با ۲ لایه میانی توانسته است عمق آب شستگی را در مرحله‌ی آموزش با ضریب تبیین ۰/۸۱، RMSE برابر ۰/۲۴، MAE برابر ۰/۱۷ و در مرحله‌ی تست ضریب تبیین ۰/۸۱، RMSE برابر ۰/۳۲، MAE برابر ۰/۲۲ پیش‌بینی کند.

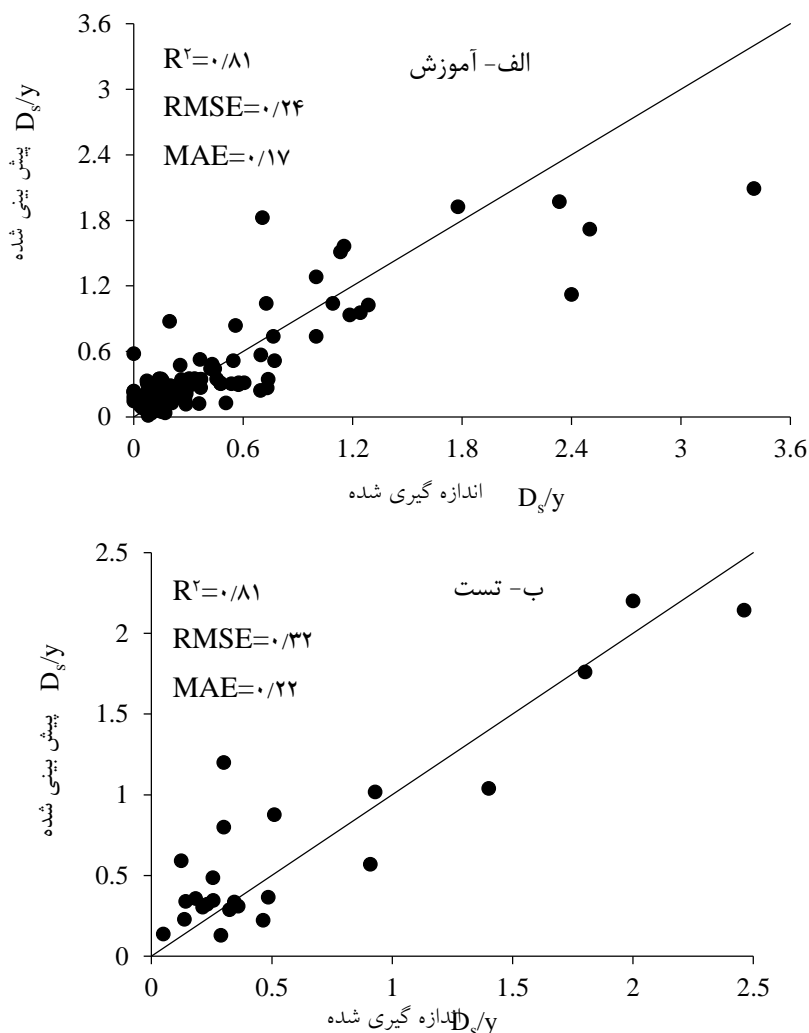
شکل‌های ۲ و ۳ نمودار پراکندگی بهترین نتایج مدل شبکه عصبی مصنوعی را در دو حالت با بعد و بدون بعد در مرحله‌ی آموزش و تست نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌های ۲-الف و ۳-الف در مرحله‌ی آموزش ضریب تبیین حالت با بعد ۴/۹ درصد نسبت به حالت بی‌بعد افزایش پیدا کرده است و خطای RMSE نیز ۴۱/۶۷ درصد نسبت به بی‌بعد کاهش یافته است. همچنین در مرحله‌ی تست که در شکل‌های ۲-ب و ۳-ب نشان داده شده ضریب تبیین حالت با بعد ۲۲/۲۲ درصد نسبت به حالت بی‌بعد افزایش یافته است و خطای RMSE نیز ۹۶/۸۷ درصد نسبت به حالت بی‌بعد کاهش یافته است. از این رو مدل شبکه عصبی مصنوعی در حالت با بعد عمق آب شستگی را با دقت بالاتری نسبت به حالت بی‌بعد پیش‌بینی کرده است.

جدول ۶. بهترین نتایج حاصل از اجرای مدل شبکه عصبی مصنوعی

تست			آموزش			حالت
R <sup>۲</sup>	RMSE	MAE	R <sup>۲</sup>	RMSE	MAE	
	(m)	(m)		(m)	(m)	
۰/۰۱	۰/۴۹	۰/۳۳	۰/۸۷	۰/۱۴	۰/۱	گوسین
۰/۹۹	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۸۵	۰/۱۴	۰/۱۱	شبکه عصبی مصنوعی - داده با
۰/۱۹	۰/۴۱	۰/۲۸	۰/۸۵	۰/۱۴	۰/۱۱	هیپربولیک سکانت
۰/۱۵	۰/۴۵	۰/۲۹	۰/۸۴	۰/۱۵	۰/۱۲	هیپربولیک تانژانت
۰/۱۵	۰/۴۵	۰/۲۹	۰/۸۴	۰/۱۵	۰/۱۲	سیگموئید
۰/۷۲	۰/۳۹	۰/۲۳	۰/۷۴	۰/۲۶	۰/۱۷	شبکه عصبی مصنوعی - داده
۰/۷۴	۰/۳۸	۰/۲۳	۰/۷۸	۰/۲۲	۰/۱۴	هیپربولیک سکانت
۰/۸۱	۰/۳۲	۰/۲۲	۰/۸۱	۰/۲۴	۰/۱۷	هیپربولیک تانژانت
۰/۷۷	۰/۳۷	۰/۲۲	۰/۷۴	۰/۲۶	۰/۱۷	سیگموئید



شکل ۲. پیش‌بینی عمق آب شستگی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی حالت با بعد برای الف) آموزش مدل ب) تست مدل



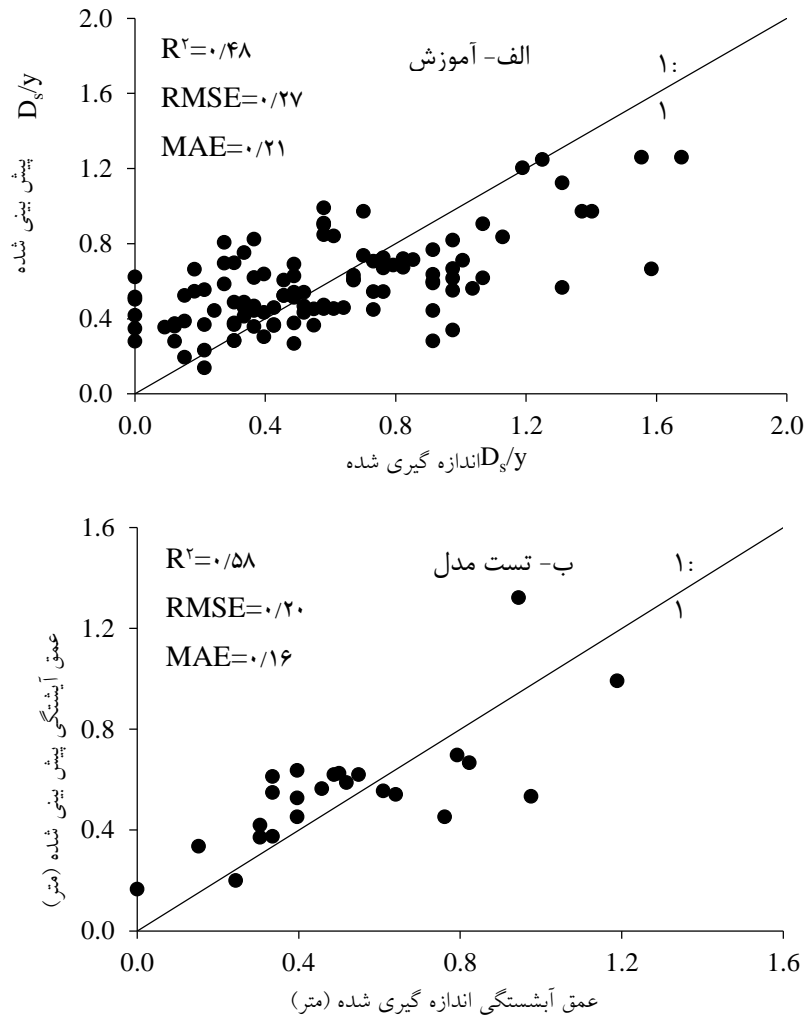
شکل ۳. پیش بینی عمق آب شستگی با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی حالت بدون بعد الف) آموزش مدل ب) تست مدل

### نتایج رگرسیون خطی و غیرخطی

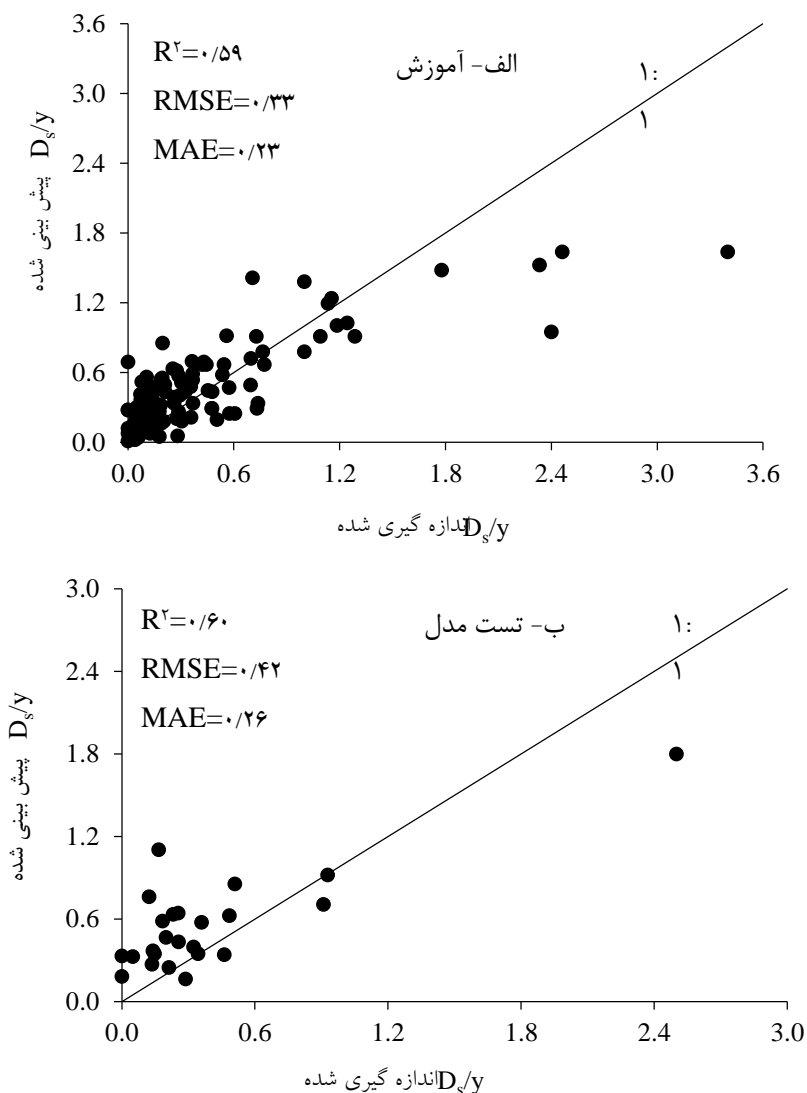
به منظور تخمین عمق آب شستگی نرم افزار SPSS با دو مدل رگرسیون خطی و غیرخطی در دو حالت با بعد و بدون بعد که به ترتیب با ۷ و ۳ ورودی به مدل بررسی شد. نتایج به دست آمده در شکل های ۴ تا ۷ آورده شده است که رگرسیون خطی با بعد عمق آب شستگی را توانسته در مرحله ی آموزش با ضریب تبیین برابر ۰/۴۸،  $RMSE$  برابر ۰/۲۷،  $MAE$  برابر ۰/۲۱ و در مرحله ی تست ضریب تبیین برابر ۰/۵۸،  $RMSE$  برابر ۰/۲۰،  $MAE$  برابر ۰/۱۶ پیش بینی کند. در حالت بدون بعد عمق آب شستگی را در مرحله ی آموزش با ضریب تبیین برابر ۰/۵۹،  $RMSE$  برابر ۰/۳۳،  $MAE$  برابر ۰/۲۳ و در مرحله ی تست ضریب تبیین ۰/۶۰،  $RMSE$  برابر ۰/۴۲،  $MAE$  برابر ۰/۲۶ توانسته پیش بینی کند. دو حالت گفته شده در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است که حالت بی بعد در مرحله ی آموزش، ضریب تبیین ۲۲/۹۲ درصد افزایش یافته و خطای  $RMSE$  به مقدار ۱۸/۱۸ افزایش یافته است. در مرحله ی تست نیز ضریب تبیین، حالت بی بعد ۳/۴۵ درصد نسبت به حالت با بعد افزایش داشته و خطای



RMSE آن ۰/۵۵ درصد افزایش یافته است از این رو رگرسیون خطی بی‌بعد عمق آب شستگی را با دقت بالاتری نسبت به حالت با بعد پیش‌بینی کرده است.

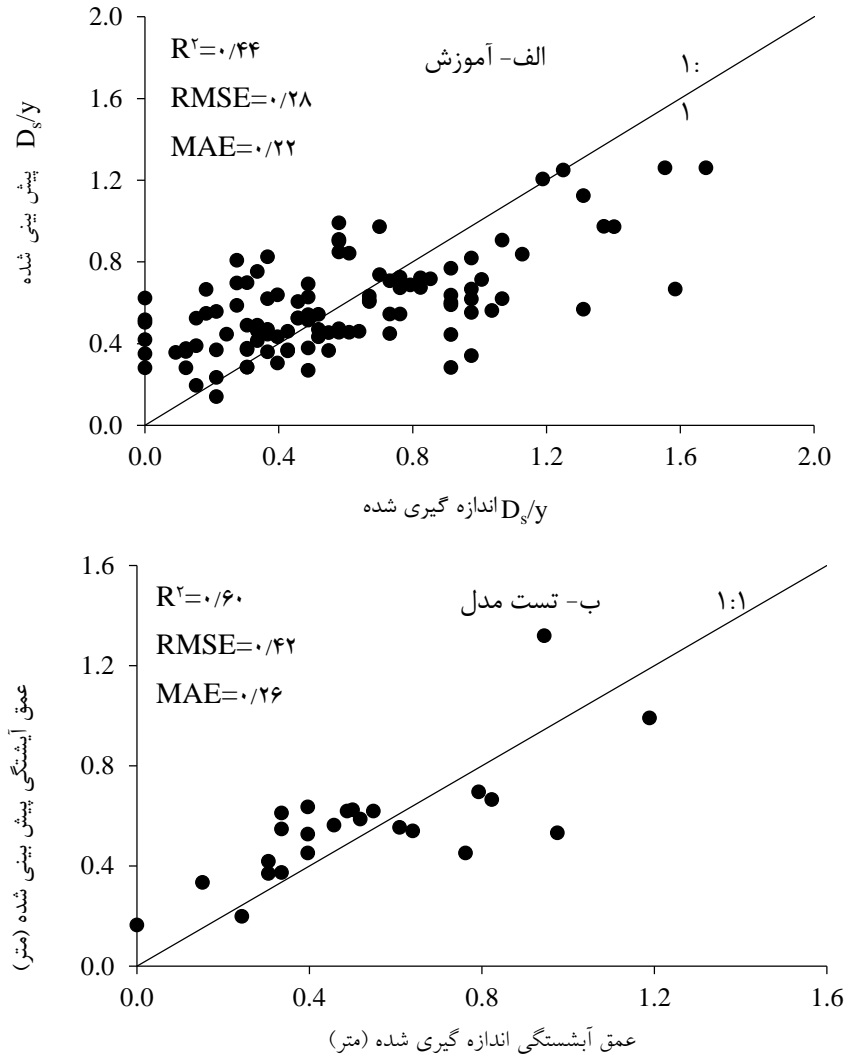


شکل ۴. پیش‌بینی عمق آب شستگی با استفاده از مدل رگرسیون خطی حالت با بعد برای (الف) آموزش مدل (ب) تست مدل

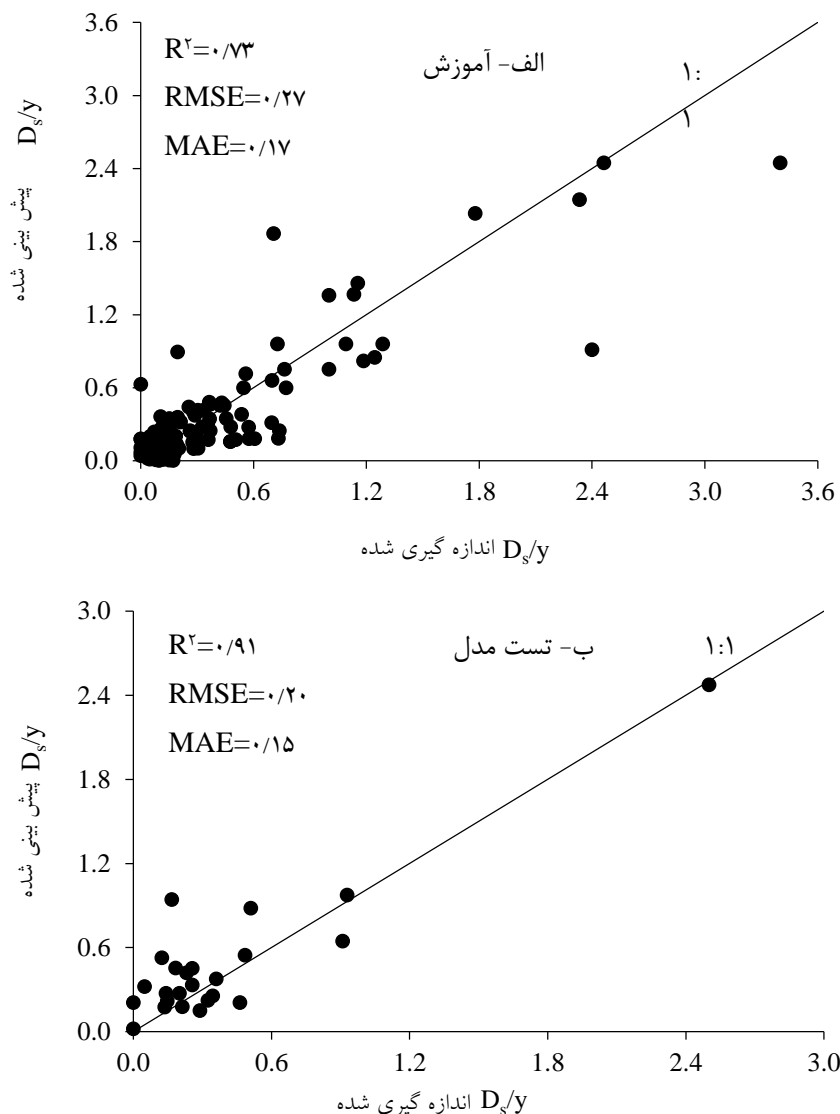


شکل ۵. پیش بینی عمق آب شستگی با استفاده از مدل رگرسیون خطی حالت بدون بعد الف) آموزش مدل ب) تست مدل

رگرسیون غیرخطی در حالت با بعد عمق آب شستگی را در مرحله ی آموزش با ضریب تبیین برابر  $0.44$ ،  $RMSE$  برابر  $0.28$ ،  $MAE$  برابر  $0.22$  و در مرحله ی تست ضریب تبیین  $0.60$ ،  $RMSE$  برابر  $0.42$ ،  $MAE$  برابر  $0.26$  پیش بینی کند. در حالت بدون بعد نیز عمق آب شستگی را در مرحله ی آموزش با ضریب تبیین  $0.73$ ،  $RMSE$  برابر  $0.27$ ،  $MAE$  برابر  $0.17$  و در مرحله ی تست ضریب تبیین  $0.91$ ،  $RMSE$  برابر  $0.2$ ،  $MAE$  برابر  $0.15$  توانسته پیش بینی کند. این نتایج در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است که در مرحله ی آموزش ضریب تبیین  $0.65/0.91$  درصد نسبت به حالت با بعد افزایش یافته و خطای  $RMSE$   $3/6$  درصد کاهش یافته است و در مرحله ی تست ضریب تبیین در حالت بی بعد  $0.51/0.66$  درصد نسبت به حالت با بعد افزایش یافته است و خطای  $RMSE$  آن  $52/38$  درصد کاهش یافته از این رو رگرسیون غیرخطی توانسته است در حالت بی بعد عمق آب شستگی را با دقت بالاتری نسبت به حالت با بعد پیش بینی کند.



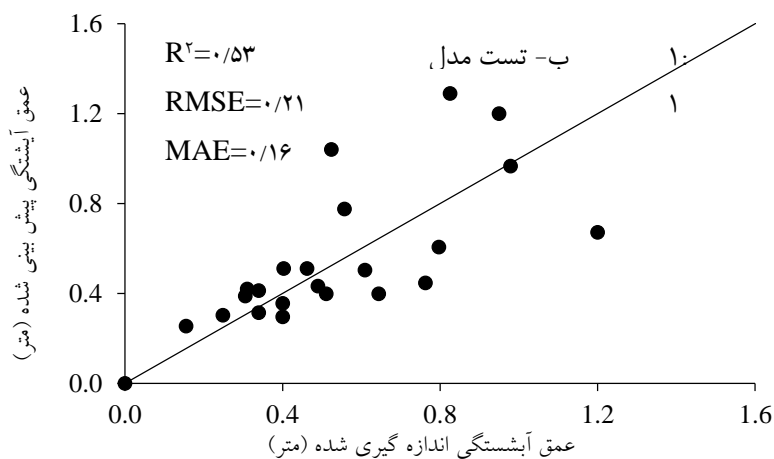
شکل ۶. پیش‌بینی عمق آب شستگی با استفاده از مدل رگرسیون غیرخطی حالت با بعد الف)آموزش مدل ب)تست مدل



شکل ۷. پیش بینی عمق آب شستگی با استفاده از مدل رگرسیون غیرخطی حالت بدون بعد الف) آموزش مدل ب) تست مدل

### نتایج روابط تجربی

برای مقایسه روش های مورد استفاده در این پژوهش با روابط تجربی موجود در منابع (جدول ۷)، در این بخش با استفاده از داده های مورد استفاده به تخمین عمق آب شستگی پرداخته شد از میان ۱۲ رابطه مورد استفاده رابطه دانشگاه ایالتی کلرادو توانسته است عمق آب شستگی را با بالاترین دقت در مرحله ی تست با ضریب تبیین ۰/۵۳،  $RMSE$  برابر ۰/۲۱m،  $MAE$  برابر ۰/۱۶ m پیش بینی کند. نمودار پراکنندگی حاصل از به کار بردن این رابطه در شکل ۸ در مرحله تست نشان داده شده است.



شکل ۸. پیش‌بینی عمق آب شستگی با استفاده از بهترین رابطه تجربی (دانشگاه ایالتی کلرادو) در مرحله تست مدل

جدول ۷. نتایج حاصل از روابط تجربی در پیش‌بینی عمق آب شستگی در مرحله تست

مرحله تست مدل			رابطه تجربی
$R^2$	RMSE (m)	MAE (m)	مقدار پارامتر آماری
۰/۰۶	۲/۴۶	۱/۸۱	اینگلیس (۱۹۴۹)
۰/۲۷	۱/۳	۱/۱۹	لارسن و تاج (۱۹۵۶)
۰/۱۸	۰/۶۶	۰/۵۹	بلنچ (۱۹۶۲)
۰/۰۶	۱/۵۱	۱/۱۲	لاراس (۱۹۶۳)
۰/۱	۵/۷۶	۴/۳۱	نیل (۱۹۶۴)
۰/۴۷	۰/۶۱	۰/۴۶	آرونچلام (۱۹۶۵)
۰/۱۲	۵	۳/۷۲	ملویل (۱۹۷۵)
۰/۵۳	۰/۲۱	۰/۱۶	دانشگاه ایالتی کلرادو - CSU (۱۹۷۵)
۰/۰۷	۳/۹	۲/۸۴	بروزرس (۱۹۷۷)
۰/۰۷	۱/۴۸	۱/۲۶	رادکیوی (۱۹۸۶)
۰/۱۱	۱/۵۵	۱/۰۳	جانسون (۱۹۹۲)
۰/۰۶	۰/۷۱	۰/۸۲	لی و استروم (۲۰۰۹)
۰/۳۱	۱/۱۱	۰/۸۵	HN/GC اصلاح شده (۲۰۱۶)

### مقایسه مدل های مختلف برای پیش بینی عمق آب شستگی

برای بررسی توانایی مدل های مختلف در پیش بینی عمق آب شستگی، مقایسه بین نتایج به دست آمده از آن ها صورت گرفت. در جدول ۸ بهترین نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون خطی، رگرسیون غیرخطی و روابط تجربی نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در مدل ها نشان داده که مدل شبکه عصبی مصنوعی در حالت با بعد، رگرسیون خطی و رگرسیون غیرخطی در حالت بدون بعد عمق آب شستگی را با دقت بالاتری تخمین زدند. با مقایسه بین این سه مدل که نتایج آن ها در جدول ۸ نشان داده شده است، ضریب تبیین در مدل شبکه عصبی مصنوعی ۶۵ درصد نسبت به رگرسیون خطی و ۸/۷۹ درصد نسبت به رگرسیون غیرخطی افزایش یافته و خطای RMSE آن ۹۶/۷۷ درصد نسبت به رگرسیون خطی و ۹۵ درصد نسبت به رگرسیون غیرخطی کاهش پیدا کرده است. از این رو مدل شبکه عصبی مصنوعی در حالت با بعد توانسته با عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل های ذکر شده عمق آب شستگی را پیش بینی کند.

مدل شبکه عصبی مصنوعی با بعد به عنوان برترین مدل انتخاب شد و با مقایسه ای که بین این مدل و بهترین رابطه تجربی مربوطه (دانشگاه ایالتی کلرادو) انجام شد، مقایسه آن ها نشان می دهد که ضریب تبیین ۱۷/۸۵ درصد نسبت به رابطه ای تجربی افزایش و خطای RMSE آن ۹۸/۰۷ درصد کاهش داشته است. از این رو مدل شبکه عصبی مصنوعی با توانایی بیشتری عمق آب شستگی را نسبت به رابطه تجربی تخمین زده است.

جدول ۸. بهترین نتایج مدل ها و روابط تجربی

تست			حالت
$R^2$	RMSE	MAE	
۰/۹۷	۰/۰۶	۰/۰۵	شبکه عصبی مصنوعی با بعد تابع هیپربولیک سکانت
۰/۸۱	۰/۳۲	۰/۲۲	شبکه عصبی مصنوعی بدون بعد تابع هیپربولیک تانژانت
۰/۵۸	۰/۲۰	۰/۱۶	رگرسیون خطی با بعد
۰/۶۰	۰/۴۲	۰/۲۶	رگرسیون خطی بدون بعد
۰/۶۰	۰/۴۲	۰/۲۶	رگرسیون غیرخطی با بعد
۰/۹۱	۰/۲۰	۰/۱۵	رگرسیون غیرخطی بدون بعد
۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۵۳	رابطه تجربی دانشگاه ایالتی کلرادو

### تحلیل حساسیت

به منظور مشخص کردن این که کدام یکی از پارامترهای ورودی بر عمق آب شستگی بیشترین و کمترین تأثیر را دارد، در این بخش به آنالیز حساسیت پارامترهای ورودی پرداخته شد. بدین منظور پارامترهای ورودی به دو صورت با بعد و بدون بعد وارد مدل شبکه عصبی مصنوعی گردید. در حالت با بعد که تابع هیپربولیک سکانت با ۶ لایه میانی عمق آب شستگی را با بیشترین دقت پیش بینی کرده بود برای تحلیل حساسیت پارامترهای با بعد نیز از این تابع استفاده شد که نتایج آن در جدول ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۷ با حذف پارامترهای سرعت جریان (V) و ( $\theta$ ) از پارامترهای ورودی می توان گفت بیشترین و کمترین تأثیر را روی عمق آب شستگی دارند و در حالت بدون بعد تابع محرک

هیپربولیک تانژانت توانسته بود با ۲ لایه میانی عمق آب شستگی را با دقت بالاتری پیش‌بینی کند، حساسیت پارامترها نیز با این تابع انجام شد که نتایج آن در جدول ۸ آورده شده است. با توجه به نتایج جدول ۸ با حذف پارامترهای ورودی  $Fr$  و  $\frac{L_p}{W_p}$  بیشترین و کمترین تأثیر را روی عمق آب شستگی نشان داده است.

جدول ۹. تحلیل حساسیت پارامترهای با بعد

مشخصات آماری	$R^2$	RMSE (m)
$L_p$	۰/۸۳	۰/۰۸۶
$\theta$	۰/۸۵	۰/۰۸۳
$W_p$	۰/۸۲	۰/۰۸۶
$v$	۰/۸۰	۰/۰۹۲
$\gamma$	۰/۸۱	۰/۰۸۸
$D_{\delta}$	۰/۸۴	۰/۰۸۳
$D_{\delta f}$	۰/۸۴	۰/۰۸۲

جدول ۱۰. تحلیل حساسیت پارامترهای بدون بعد

مشخصات آماری	$R^2$	RMSE
$\frac{L_p}{W_p}$	۰/۸۶	۰/۰۵۸
$\frac{D_{\delta}}{D_{\delta f}}$	۰/۸۱	۰/۰۶۶
$Fr$	۰/۴۸	۰/۰۹۸

### بحث

برآورد عمق آب شستگی یکی از پارامترهای مهم در علم هیدرولیک و مسائل مرتبط با مهندسی رودخانه است. در صورت عدم وجود داده‌های واقعی، استفاده از روابط تجربی و یا مدل‌های هوشمند برای تخمین عمق آب شستگی می‌تواند کمک مؤثری به محققین نماید. لذا در این تحقیق استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی در مقایسه با روابط تجربی و روابط رگرسیون خطی برای برآورد عمق آب شستگی مورد استفاده قرار گرفت و عملکرد آن‌ها باهم مورد مقایسه قرار گرفت. بدین منظور بر اساس آنالیز همبستگی بر روی پارامترهای مؤثر در ایجاد عمق آب شستگی، ۷ پارامتر شامل پارامترهای طول پایه در جهت جریان ( $L_p$ )، زاویه برخورد جریان با پایه ( $\theta$ )، عرض پایه ( $W_p$ )، سرعت جریان ( $v$ )، عمق جریان ( $\gamma$ )، قطر متوسط ذرات رسوب ( $D_{\delta}$ )، و قطری که ۸۴ درصد ذرات از آن عبور کرده‌اند ( $D_{\delta f}$ )، برای پیش‌بینی عمق آب شستگی ( $D_s$ )

مورد استفاده قرار گرفت. همچنین بر اساس آنالیز ابعادی به روش باکینگهام، سه پارامتر  $L_p / W_p$ ،  $D_{\Delta} / D_{\Delta f}$  و  $F_r$  به صورت بدون بعد نیز مورد استفاده قرار گرفتند.

## نتیجه گیری

نتایج تحقیق نشان داد مدل شبکه عصبی مصنوعی در حالتی که از داده‌های با بعد استفاده گردید، عمق آب شستگی را با دقت بالاتری نسبت به حالت بدون بعد پیش‌بینی کرد. همچنین همانند مدل شبکه عصبی مصنوعی، استفاده از داده‌های ورودی به مدل رگرسیون خطی و غیرخطی، به دو صورت با بعد و بدون بعد نیز بر روی دقت آن‌ها تأثیر داشت که علت اصلی آن می‌تواند مربوط به بیشتر بودن تعداد داده ورودی به مدل در حالت با بعد (۷ ورودی) در برابر حالت بی‌بعد (۳ ورودی) و در نتیجه ایجاد درجه آزادی بیشتر و انعطاف‌پذیری مدل برای ایجاد رابطه بین پارامترهای ورودی به مدل و خروجی از آن باشد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت انجام‌شده بر روی پارامترهای مؤثر بر عمق آب شستگی نشان داد، وقتی پارامترها به دو صورت بدون بعد و با بعد مورد استفاده قرار گیرند، سرعت جریان (V) و عدد فرود جریان  $F_r$  بیشترین تأثیر را روی عمق آب شستگی دارند. استفاده از ۱۳ رابطه تجربی برای پیش‌بینی عمق آب شستگی نشان داد، رابطه‌ی دانشگاه ایلینوی کلرادو در مقایسه با سایر روابط تجربی توانسته است عمق آب شستگی را با دقت بهتری تخمین بزند و در مقایسه با رگرسیون غیرخطی، نتایج آن‌ها نزدیک به هم بوده است. در مجموع مدل شبکه عصبی توانسته است در مقایسه با روابط تجربی و مدل‌های رگرسیون خطی و غیرخطی عملکرد بهتری از خود نشان دهد، لذا استفاده از آن در پیش‌بینی عمق آب شستگی به‌عنوان یک ابزار مناسب پیشنهاد می‌گردد.

## منابع

- حسونی زاده، هوشنگ. (۱۳۷۰). بررسی روش‌های پیش‌بینی آبشستگی موضعی اطراف پایه پل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه شهید چمران اهواز.
- راهنمای محاسبه‌ی آبشستگی موضعی (نشریه ۵۴۹). معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، تهران.
- رئیس‌ی، نرگس، و قمشی، مهدی. (۱۳۹۴). اثر مقیاس مدل و آزمایش‌های آبشستگی پایه‌های پل. نشریه دانش آب و خاک، (۳) ۲۴۰-۲۲۷. [https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article\\_4032.html](https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4032.html)
- غضنفری هاشمی، سمانه، و اعتماد شهیدی، امیر. (۱۳۹۱). پیش‌بینی عمق آبشستگی اطراف پایه پل با استفاده از ماشین‌های بردار پشتیبان. مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، (۲) ۱۲-۳۶، ۲۳-۳۶. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-5542-fa.html>

## References

- Abdallah Mohamed, Y., Mohamed Abdel-Aal, G., Hemdan Nasr-Allah, T., & shawky, A. (2016). Experimental and theoretical in vestigation of scour at bridge abutment Abdallah. Journal of king saud university Engineering sciences, 28, 32-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2013.09.005>
- Batani, S.M., Borghei, S. M., & Jeng, D.S. (2007). Neural network and neuro-fuzzy assessments for scour depth around bridge piers. Engineering application of artificial intelligence, 20(3), 401-414. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2006.06.012>
- Begum, S.A., Fujail, A.K., & Barbhuiya, M.D. (2012). Artificial neural network to predict equilibrium local scour depth around semicircular bridge abutments. 6<sup>th</sup> International symposium on advances in science and technology. Kuala Lumpur. Malaysia. <https://civilica.com/doc/158958>
- Blench, T. (1962). Discussion, of scour at bridge crossings. By Laursen EM. Transactions of American society of civil Engineers, 127, 180-183.
- Breusers, H.N.C. (1965). Scour around drilling platforms. Bulletin of hydraulic research, 19, 276-286.
- Breusers, H.N.C., Nicollet, G., & shen, H.W. (1997). Local scour around cylindrical piers. Journal of hydraulic research, 15(3), 211-252. <https://doi.org/10.1080/00221687709499645>



- Chiew, Y.M. (1992). Scour protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), 1260-1269. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:9\(1260\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:9(1260))
- Chou, J.S., Pham, A.D. (2014). Hybrid computational model for predicting bridge scour depth near APA pier and abutments. *Automation in construction*, 48, 88-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2014.08.006>
- Dey, S., & Barbhuiya, A.K. (2004). Clear-water scour at abutment in thinly armored beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(2), 622-634. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(10\)60041-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(10)60041-8)
- Emamgholizadeh, S., Bateni, M.F.M., & Jeng, D.S. (2013). Artificial intelligence-based estimation of flushing half-cone geometry. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26 (10), 2551-2558. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2013.05.014>
- Ettema, R., Melville B.W., & Borkdoll, B. (1998). Scale effect of pier-scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 124(6), 639-642.
- Ghazanfari Hashemi, S.G.H., & Etemad-Shahidi, A. (2012) Prediction of Scour Depth Around Bridge Pier by Support Vector Machines. *MCEJ*. 12(2) ,23-36. <http://mcej.modares.ac.ir/article-16-5542-fa.html> [In Persian]
- Guide to calculating local scour (Journal 549). Vice President for Strategic Planning and Oversight, Tehran. [In Persian]
- Hanrahan, G. (2011). *Artificial neural networks in biological and environmental analysis*. CRC Press. Boca raton. <https://doi.org/10.1201/b10515>
- Hassoni Zadeh, H. (1991). Investigation of local scour prediction methods around the bridge pier. Master Thesis of Shahid Chamran University of Ahvaz. [In Persian]
- Inglis, S.C. (1949). Maximum depth of scour at heads of guide banks and groynes, pier noses, and downstream of bridges. *The behavior and control of rivers and canals*. Poona. India.
- Kambekar, A.R., & Deo, M.C. (2003). Estimation of pier group using neural network. *Applied ocean Research* (25), 225-234. <https://dx.doi.org/10.22115/sce.2019.173862.1098>
- Laursen, E. M., & Toch, A. (1956). Scour around bridge piers and abutments. *Bulletin no 4 Iowa highway research board, Ames Iowa us publications*.
- Lee, S.O., & Sturm, T.W. (2009). Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(10), 793-802. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000091](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000091)
- Melville, B.W. (1997). Pier and abutment scour –an integrated approach. *Journal of Hydraulic Engineering*, 123(2), 125-136. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:2\(125\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:2(125))
- Melville, B.W., & Stherland, A.J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:10\(1210\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:10(1210))
- Melville, M.W. (1975). Local scour at bridge sites. University of Auckland. School of Engineering. New Zealand. Project Report No. 117.
- Neill, C. R. (1964). Riverbed scour-A review for engineers. Canadian Good Roads Association Technical Publication. Ottawa, Canada, 23.
- Raeisi, N., & Ghomeshi, M. (2015). Effect of Model Scale in Bridge Piers Scour Experiments. *Water and Soil Science*, 25(3), 227-240. [https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article\\_4032.html](https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_4032.html) [In Persian]
- Raudkivi, A. J. (1998). *Loose Boundary Hydraulics*. <https://doi.org/10.1201/9781003077800>
- Raudkivi, A.J., & Ettema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 338-350. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:3\(338\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:3(338))

Richardson, E.V., & lagasse, P.F. (1999). Stream stability and scour at highway bridges. ASCE Publications.



## Evaluation of the effect of groundwater abstraction on changes in discharges of Sezar river

Simin Khosravi<sup>1</sup> , Hasan Torabi Poodeh<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> M. Sc graduate of Water structures, Department of water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran. Email: [simin.khosravi@gmail.com](mailto:simin.khosravi@gmail.com)

<sup>2</sup> Corresponding author, Associate Professor, Department of water Engineering, Lorestan University, Lorestan, Iran. Email: [\\_torabi.ha@lu.ac.ir](mailto:_torabi.ha@lu.ac.ir)

### ABSTRACT

#### Introduction

Development of water resources due to the very complex nature of climate change and daily, monthly, annual and long-term fluctuations of parameters such as precipitation, temperature, evaporation, etc. and consequently the fluctuations of surface and groundwater flow fluctuations, without statistics and information It is very difficult and almost impossible. On the other hand, the existence of past statistics and data is of little value in itself and is valuable when using this data and setting the values of hydraulic, hydrological and hydrogeological parameters. To plan for the development and exploitation of water resources for short-term, medium-term and long-term periods for the future, to predict the flow in the future, it is necessary to know all the parameters affecting the flow. The basic parameters affecting the surface flow of a river in a particular section include rainfall and the amount of surface and groundwater withdrawals, which can be effective in the occurrence of a significant trend in the discharge of a river.

#### Research Method

The data used include data from 3 hydrometric stations and 15 rainfall stations, information on development plans inside and outside the surface water resources basin and information on the year of drilling and coordinates of water wells in Sezar basin in the statistical period. 1970-1971 to 2007-2008. In this study, first, the linear slope of the Sezar river discharge time series trend at the site of the Sezar strait, which is the last hydrometric station on the Sezar river, was estimated using the TSA method, and then using the TFPW method, the effect of the coefficient. Autocorrelation was removed from the data and finally the changes in the discharge trend were evaluated by Mann-Kendall (MK) test. Decreasing the discharge of this river, three main and effective factors in reducing the discharge of rivers, namely rainfall, increasing the withdrawal of surface water resources in the river basin and increasing the withdrawal of groundwater resources were examined according to the concept of interaction of surface and groundwater.

#### Conclusion

In this study, first, the trend of Sezar river discharge changes in the statistical period of 1970-1970 to 2007-2008 was investigated. Based on the results of the analysis of the flow time trend of the Sezar river at the site of the Sezar strait station in the statistical period, this river has had a significant negative trend at the level of 10%. In the continuation of this study, in order to investigate the causes of significant negative trends in the Sezar river discharge time, three main factors affecting the river discharge flow, namely precipitation, surface water abstraction and groundwater abstraction of the river basin were investigated. The results showed that the existence of a significant negative trend in the discharge of the Sezar river is not related to rainfall and abstraction from surface water resources of the basin, but the reason for this significant negative trend is over-abstraction of groundwater resources. Then the inflow from this river to Dez dam lake was predicted. The results showed that the average predicted flow of Sezar river is about 22.42 (m<sup>3</sup> / s) less than the average discharge time series of this river in the absence of over-abstraction of groundwater resources that does not cause the interaction of surface and groundwater. Therefore, special attention to the status of groundwater resources and combined management of surface and groundwater resources should be considered by managers and planners of water resources in the country. Also, considering that the Sezar river is one of the important tributaries of the Dez river, therefore, considering the changes in the trend and the factors affecting the discharge process of this river in order to optimally exploit the Dez dam reservoir due to its significant potentials and the Dez basin is very important.

**Keywords:** Interaction between surface water and groundwater, Mann-Kendal Test, River long term streamflow forecasting, River streamflow reduction causes, Sezar River, Trend.

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 27 November 2021 Revised: 18 January 2022 Accepted: 28 January 2022 ePublished: 20 February 2022

**Cite this article:** Khosravi, S., & Torabi Poodeh, H. (2022). Assess the impact of groundwater withdrawals on the streamflow of Sezar river and forecast the river streamflow., *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 1(1), 91-107 DOI: 10.22126/ATWE.2022.7430.1011





## بررسی اثر برداشت آب زیرزمینی بر آبدهی رودخانه سزار و پیش‌بینی جریان آن

سیمین خسروی<sup>۱</sup> ID، حسن ترابی پوده<sup>۲</sup> ID

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان. ایمیل: [simin.khosravi@gmail.com](mailto:simin.khosravi@gmail.com)

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه لرستان. ایمیل: [torabi.ha@lu.ac.ir](mailto:torabi.ha@lu.ac.ir)

### چکیده

رودخانه‌ی سزار از سرشاخه‌های اصلی رودخانه‌ی دز می‌باشد و پیش‌بینی جریان آبدهی بلندمدت آن به‌منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز اهمیت دارد. در این پژوهش ابتدا روند آبدهی رودخانه سزار در دوره‌ی آماری ۴۹-۱۳۴۸ الی ۸۷-۱۳۸۶ که یک دوره‌ی بدون روند در بارش حوضه است، با روش TFPW\_MK ارزیابی شد. نتایج نشان داد رودخانه‌ی سزار دارای روند منفی معنادار آبدهی است. سپس به‌منظور ارزیابی علل کاهش آبدهی این رودخانه سه عامل اساسی تأثیرگذار بر آبدهی رودخانه که عبارت‌اند از بارش، برداشت‌های درون و برون حوضه‌ای از منابع آب سطحی حوضه و برداشت از منابع آب زیرزمینی حوضه، مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد علت اصلی کاهش آبدهی این رودخانه برداشت بیش‌ازحد از آب‌های زیرزمینی است. در نهایت جریان بلندمدت آبدهی رودخانه سزار پیش‌بینی گردید نتایج نشان داد میانگین سری زمانی آبدهی پیش‌بینی شده رودخانه سزار در حدود  $(m^3/s)$  ۲۲،۴۲ از میانگین سری زمانی آبدهی این رودخانه در حالت عدم برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی که سبب تعامل آب‌های سطحی و زیرزمینی نمی‌شود، کمتر است. داده‌های مورداستفاده شامل، داده‌های ۳ ایستگاه هیدرومتری و ۱۵ ایستگاه باران‌سنجی حوضه‌ی سزار، اطلاعات طرح‌های توسعه‌ی درون و برون حوضه‌ای منابع آب سطحی و داده‌های مربوط به سال حفر و مختصات چاه‌های آب حوضه مذکور می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آزمون من-کندال، پیش‌بینی جریان بلندمدت رودخانه، تعامل آب‌های سطحی و زیرزمینی، رودخانه سزار، روند، علل کاهش

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۶ آذر ۱۴۰۰ اصلاح: ۲۸ دی ۱۴۰۰ پذیرش: ۰۸ بهمن ۱۴۰۰ چاپ الکترونیکی: ۰۱ اسفند ۱۴۰۰

**استناد:** ترابی پوده، ح، و خسروی، س. (۱۴۰۰). بررسی اثر برداشت آب زیرزمینی بر آبدهی رودخانه سزار و پیش‌بینی جریان آن، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۱(۱)، ۱۰۷-۹۱، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2022.7430.1011



©نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی

## مقدمه

توسعه منابع آب به علت ماهیت بسیار پیچیده تغییرات آب و هوایی و نوسانات روزانه، ماهانه، سالیانه و درازمدت پارامترهایی همچون بارش، دما، تبخیر و... و به تبع آن نوسانات آبدهی جریان‌های سطحی و زیرزمینی، بدون داشتن آمار و اطلاعات امری بسیار مشکل و تقریباً غیرممکن است. از طرف دیگر وجود آمار و داده‌های گذشته به‌خودی‌خود ارزش چندانی ندارد و زمانی ارزش پیدا می‌کند که از این داده‌ها استفاده کرده و مقادیر پارامترهای هیدرولیکی، هیدروژئولوژیکی و هیدروژئولوژیکی را جهت برنامه‌ریزی توسعه و بهره‌برداری از منابع آب برای دوره‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت برای آینده پیش‌بینی نماییم. جهت پیش‌بینی جریان در آینده نیاز به شناخت کلیه پارامترهای مؤثر بر جریان است. پارامترهای اساسی مؤثر بر جریان سطحی یک رودخانه در یک مقطع خاص، شامل بارش و میزان برداشت‌های سطحی و زیرزمینی است، که می‌تواند در بروز روند معنادار در آبدهی یک رودخانه مؤثر باشد. در این پژوهش رودخانه‌ی سزار که به لحاظ مساحت زیر حوضه در حدود ۶۰٪ از مساحت حوضه‌ی دز را تشکیل می‌دهد و سهم آن در آبدهی رودخانه‌ی دز در حدود ۴۴٪ می‌باشد. در نتیجه از سرشاخه‌های اصلی رودخانه‌ی دز بوده و روند تغییرات آبدهی، علل تغییرات آبدهی و پیش‌بینی جریان این رودخانه به‌منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز و مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب حوضه دز و کارون بزرگ که حائز اهمیت است، مورد بررسی قرار گرفته است.

## مبانی نظری و پیشینه پژوهش

از جمله محققینی که مفهوم تعامل آب‌های سطحی و زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند و اظهار داشتند که تشدید توسعه استفاده از آب‌های زیرزمینی برای آبیاری و دیگر مصارف، معمولاً باعث کاهش جریان رودخانه نزدیک به آن می‌شود می‌توان به وینتر و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۸)، سوفوکلئوس<sup>۲</sup> (۲۰۰۲)، ون و چن<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) اشاره کرد. همچنین وبر و پری<sup>۴</sup> (۲۰۰۶) اثرات برداشت از آب‌های زیرزمینی را بر کاهش جریان چشمه‌ها و دبی پایه رودخانه بروف در ایالت فلوریدای آمریکا با روش‌های آنالیز آماری تجزیه و تحلیل کردند، آن‌ها از این تجزیه و تحلیل به این نتیجه رسیدند که عامل اصلی کاهش جریان چشمه‌ها و دبی پایه رودخانه‌ها کاهش سطح آب‌های زیرزمینی ناشی از برداشت بیش‌ازحد است. از جمله محققینی داخلی نیز که پژوهش‌هایی در این زمینه داشته‌اند، می‌توان به لشکری پور و همکاران (۱۳۸۳)، عبدالله‌پور حقیقی و پیری (۱۳۸۸) و یوسفی سنگانی و محمدزاده (۱۳۸۸) اشاره کرد. همچنین جاوید و اصغری مقدم (۱۳۸۵) با آنالیز نتایج اندازه‌گیری دبی رودخانه سنگ سیاه و همچنین بررسی ارتباط هیدرولیکی آن با آبخوان دشت ده گلان به این نتیجه رسیدند که در منطقه تخلیه رودخانه درون سفره‌های آب زیرزمینی، آبدهی آن تحت تأثیر نوسانات برداشت از آب زیرزمینی قرار گرفته و تغییر می‌کند. به این معنی که با افزایش و کاهش برداشت از آب زیرزمینی، آبدهی رودخانه در نقاط مذکور به ترتیب به‌طور نسبی کاهش و افزایش پیدا می‌کند. از دیگر پژوهش‌گرانی که با تکیه بر مفهوم تعامل آب‌های سطحی و زیرزمینی تحقیقاتی را در زمینه‌های هیدرولوژی و مدیریت منابع آب انجام داده‌اند می‌توان به انیاس و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۱)، کیکوچی و همکاران<sup>۶</sup> (۲۰۱۲)، روزی و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۲)، دوجاردین<sup>۸</sup> (۲۰۱۴) و بحرینی و صفوی (۱۳۸۷) اشاره کرد.

<sup>1</sup> Winter et al

<sup>2</sup> Sophocleous

<sup>3</sup> Wen & Chen

<sup>4</sup> Weber & Perry

<sup>5</sup> Anibas et al

<sup>6</sup> Kikuchi et al

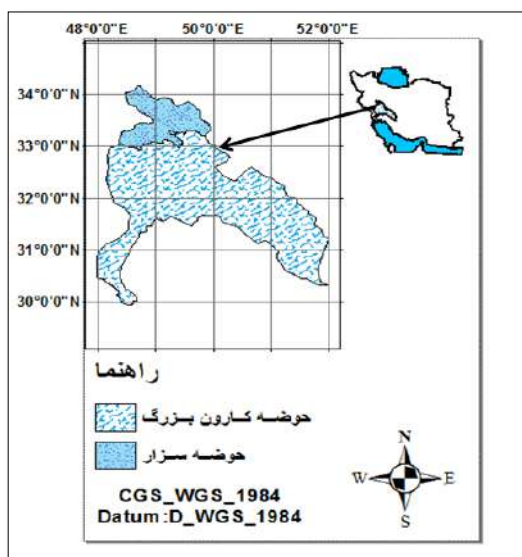
<sup>7</sup> Rossi et al

<sup>8</sup> Dujardin

## روش پژوهش منطقه‌ی مورد مطالعه

داده‌های مورد استفاده شامل، داده‌های ۳ ایستگاه هیدرومتری و ۱۵ ایستگاه باران سنجی، اطلاعات طرح‌های توسعه درون و برون حوضه‌ای منابع آب سطحی و اطلاعات سال حفر و مختصات چاه‌های آب حوضه سزار در دوره‌ی آماری ۴۹-۱۳۴۸ الی ۸۷-۱۳۸۶ است. در این تحقیق ابتدا شیب‌خطی روند سری زمانی آبدهی رودخانه‌ی سزار در محل ایستگاه تنگ پنج سزار که آخرین ایستگاه هیدرومتری بر روی رودخانه‌ی سزار می‌باشد با استفاده از روش TSA تخمین زده شد و سپس با استفاده از روش TFPW اثر ضریب خودهمبستگی از داده‌ها حذف گردید و در نهایت تغییرات روند آبدهی با آزمون من- کندال (MK) مورد ارزیابی قرار گرفت و سپس با توجه به نتایج این بررسی که نشان‌دهنده وجود روند منفی معنادار در آبدهی رودخانه سزار بود، به منظور بررسی علل کاهش آبدهی این رودخانه، سه عامل اصلی و اساسی تأثیرگذار در کاهش آبدهی رودخانه‌ها یعنی بارش، افزایش برداشت از منابع آب سطحی در حوضه آبریز رودخانه و افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی با توجه به مفهوم تعامل آب‌های سطحی و زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت.

حوضه‌ی سزار از زیر حوضه‌های دز و حوضه‌ی دز نیز از زیر حوضه‌های کارون بزرگ می‌باشد (شکل ۱). این رودخانه از سرشاخه‌های اصلی رودخانه دز است که آب رودهای فرعی مناطق کوهستانی شهرستان‌های الیگودرز و ازنا (رودخانه ماربره) و دو رود، اشترینان و بروجرد (رودخانه تیره) را در استان لرستان دریافت می‌کند و در مسیر راه آهن سرا سری به سوی جنوب ایران سرازیر می‌شود.

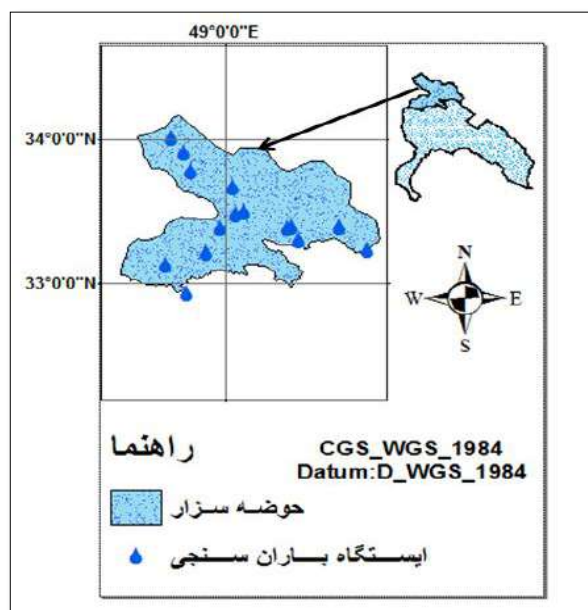


شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز سزار (منطقه مورد مطالعه)

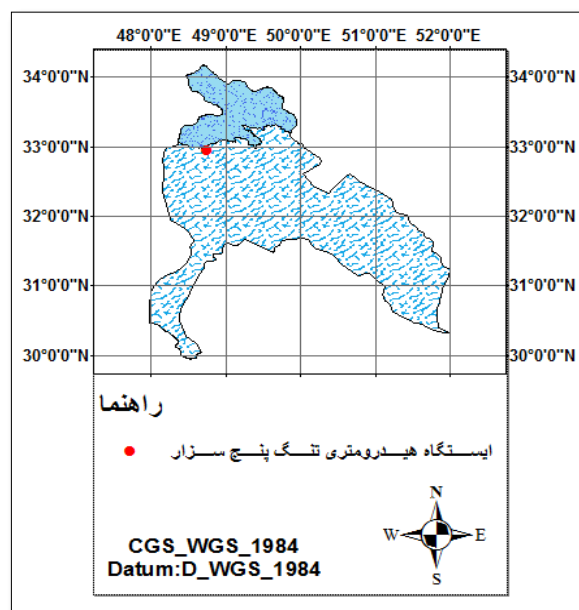
## داده‌های مورد استفاده

### پارامترهای هیدرولوژیکی

پارامترهای هیدرولوژیکی مورد استفاده شامل، داده‌های سری زمانی آبدهی رودخانه سزار در محل ایستگاه هیدرومتری تنگ پنج سزار که آخرین ایستگاه هیدرومتری بر روی رودخانه سزار است (شکل ۲)، و همچنین ۲ ایستگاه هیدرومتری دو رود بر روی رودخانه تیره و دره تخت بر روی رودخانه ماربره و داده‌های ۱۵ ایستگاه باران‌سنجی حوضه سزار در دوره‌ی آماری ۴۹-۱۳۴۸ الی ۸۷-۱۳۸۶ می‌باشد (شکل ۳).



شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های باران‌سنجی حوضه سزار



شکل ۲. موقعیت ایستگاه هیدرومتری تنگ پنج سزار

### اطلاعات طرح‌های توسعه درون و برون حوضه‌ای منابع آب سطحی حوضه سزار

مشخصات طرح‌های بزرگ توسعه آب سطحی درون حوضه‌ای سزار که تا پایان سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ به بهره‌برداری رسیده‌اند در جدول ۱ ارائه شده است. در رابطه با طرح‌های برون حوضه‌ای سزار باید گفت که تا پایان سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ هیچ طرح انتقال آب بین حوضه‌ای از سرشاخه‌های سزار به بهره‌برداری نرسیده است.

جدول ۱. اطلاعات طرح های توسعه ای درون حوضه ای منابع آب سطحی سزار

عنوان طرح	نوع نیاز	مقادیر مصوب (MCM)	سال بهره برداری
هندو در	کشاورزی	۲,۶	۱۳۷۳
دره گرم	کشاورزی	۱,۸	۱۳۷۳
قلعه بابو	کشاورزی	۰,۴	۱۳۶۹
مزرعه قاسم	کشاورزی	۰,۵	۱۳۷۰
کزنار	کشاورزی	۱	۱۳۸۵
مجموع نیازها		MCM ۶,۳	

اطلاعات نقاط برداشت از منابع آب زیرزمینی حوضه سزار

اطلاعات مربوط به چاه های آب حفر شده در حوضه ای سزار از جمله سال حفر چاه و موقعیت آن نسبت به حوضه تا پایان سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ جمع آوری گردید.

روش انجام پژوهش

آزمون تشخیص روند

روند تغییرات سری های زمانی در این پژوهش با آزمون غیر پارامتریک من- کندال (MK) مورد بررسی قرار گرفت. شرط لازم برای استفاده از این آزمون مستقل بودن داده ها و عدم وجود ضریب خودهمبستگی معنی دار در سری زمانی داده ها است. بنابراین در این مطالعه ابتدا با استفاده از روش TFPW، اثر تمام ضرایب خودهمبستگی معنی دار از سری های زمانی حذف و سپس روی سری ها آزمون من- کندال (MK) انجام گرفت. این روش به اختصار TFPW-MK نامیده می شود. روش TFPW-MK جهت شناسایی روند در یک سری زمانی دارای خودهمبستگی توسط یو و همکاران (۲۰۰۲-۲۰۰۳) به صورت زیر ارائه گردید.

پیش سفید کردن با حذف فرآیند روند (TFPW)

۱- شیب روند در داده های نمونه با استفاده از روش تیل- سن<sup>۱</sup> (TSA) به صورت رابطه (۱) برآورد می شود.

$$b = \text{Median} \left( \frac{X_j - X_i}{j - i} \right) \forall 1 < j \quad (1)$$

۲- اگر شیب تقریباً برابر صفر بود آنگاه دیگر نیازی به ادامه انجام آنالیز روند نیست، اما اگر مقدار آن برابر با صفر نبود، آنگاه روند به صورت خطی فرض شده و داده های نمونه به صورت رابطه (۲) نوشته شده و بدون روند می شوند.

$$X'_t = X_t - T_t = X_t - bt \quad (2)$$

۳- ضریب خودهمبستگی مرتبه اول سری بدون روند  $X'_t$  با استفاده از معادله (۳) برآورد می گردد.

<sup>۱</sup>Theil-Sen approach (TSA)



$$r_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} [X'_t - E(X'_t)] [X'_{t+k} - E(X'_t)]}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [X'_t - E(X'_t)]^2} E(X'_t) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X'_t \quad (3)$$

$r_k$  ضریب خودهمبستگی مرتبه  $k$  داده‌های نمونه سری بدون روند  $X'_t$  و میانگین داده‌های نمونه می‌باشد.

۴- پس از محاسبه ضریب خودهمبستگی با مرتبه اول، خودهمبستگی مرتبه اول  $AR(1)$  با استفاده از رابطه (۴) حذف می‌گردد.

$$Y'_t = X'_t - r_1 X'_{t-1} \quad (4)$$

این روش پیش سفید کردن پس از حذف روند از سری‌ها روش پیش سفید کردن بدون روند نامیده می‌شود (TFPW). سری باقیمانده‌ها پس از انجام روش TFPW یک سری مستقل می‌باشد.

۵- روند شناخته شده  $T_t$  و سری باقیمانده‌ها  $Y'_t$  به صورت رابطه (۵) باهم ترکیب می‌گردند. بدیهی است که سری حاصل  $Y_t$  روند واقعی را حفظ کرده و اثر ضریب خودهمبستگی نیز حذف شده است.

$$Y_t = Y'_t + T_t \quad (5)$$

در مرحله‌ی بعد آزمون MK بر روی سری ترکیبی  $Y_t$  جهت برآورد روند واقعی انجام می‌گردد.

### آزمون من‌کندال (MK)

آزمون من-کندال (MK) یکی از پرکاربردترین آزمون‌های غیر پارامتریک برای تحلیل روند داده‌ها است و از این آزمون به طور گسترده در تشخیص روند در سری‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (هیرش و همکاران، ۱۹۸۲) فرض صفر ( $H_0$ ) مستقل بودن و یکنواختی توزیع داده‌های نمونه  $\{X_i, i=1, 2, \dots, n\}$  و فرض مقابل ( $H_1$ ) وجود یک روند یکنواخت در داده‌ها است. جهت انجام این آزمون ابتدا باید آماره  $S$  را با رابطه (۶) محاسبه نمود. که در آن  $x$  مقدار داده  $z$  ام،  $n$  تعداد داده‌ها و  $\text{sgn}(\theta)$  تابع علامت بوده و با رابطه (۷) قابل محاسبه است.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (6)$$

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \quad (7)$$

من (۱۹۴۵) و کندال (۱۹۷۵) نشان دادند که برای  $n \geq 8$  آماره  $S$  دارای توزیع نرمال بوده و میانگین و واریانس آن از رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$E(S) = 0 \quad \text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{m=1}^n t_m(t_m-1)(2t_m+5)}{18} \quad (8)$$

که در آن  $t_m$  تعداد داده‌های یکسان در دسته  $i$  ام می‌باشد. آماره آزمون MK یا  $Z$  با رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

احتمال آماره  $Z$  آزمون MK را می توان با استفاده از توزیع تجمعی نرمال محاسبه نمود. چنانچه مقادیر آماره  $Z$  بزرگتر از ۲٫۵۸ و یا کوچکتر از -۲٫۵۸ باشد روند تغییرات در سطح ۱٪ و یا به عبارت دیگر در سطح احتمال ۹۹٪ معنادار می باشد و چنانچه مقادیر آماره  $Z$  بزرگتر از ۱٫۹۶ و یا کوچکتر از -۱٫۹۶ باشد روند تغییرات در سطح ۵٪ و یا به عبارت دیگر در سطح احتمال ۹۵٪ معنادار می باشد و اگر مقادیر آماره  $Z$  بزرگتر از ۱٫۶۵ و یا کوچکتر از -۱٫۶۵ باشد روند تغییرات در سطح ۱۰٪ و یا به عبارت دیگر در سطح احتمال ۹۰٪ معنادار است.

### روش های مورد استفاده جهت بررسی علل کاهش آبدهی رودخانه سزار

#### محاسبه ی بارش متوسط حوضه ی سزار و بررسی روند تغییرات آن

در این پژوهش به منظور جلوگیری از تأثیر تغییرات روند بارش بر آبدهی، ارزیابی روند آبدهی رودخانه سزار در دوره ی آماری ۴۹-۱۳۴۸ الی ۸۷-۱۳۸۶ که بر اساس بررسی تغییرات روند بارش با استفاده از آزمون من-کندال، یک دوره ی بدون روند در بارش حوضه ی سزار است، انجام شد. باین حال به منظور بررسی دقیق تر تأثیر بارش بر روند

آبدهی این رودخانه و با توجه به این نکته که آبدهی یک رودخانه با بارش مناطق بالادست آن رودخانه در حوضه ی آبریز رودخانه ارتباط مستقیم دارد، روند تغییرات بارش متوسط حوضه ی رودخانه سزار بررسی گردید. به منظور محاسبه بارش متوسط حوضه سزار از داده های ۱۵ ایستگاه باران سنجی استفاده شد و از روش چندضلعی های تیسن بارش متوسط حوضه ی سزار برای دوره آماری ۴۹-۱۳۴۸ الی ۸۷-۱۳۸۶ محاسبه گردید سپس با به کارگیری روش TFPW-MK روند تغییرات بارش متوسط حوضه ی سزار در دوره آماری مذکور ارزیابی شد.

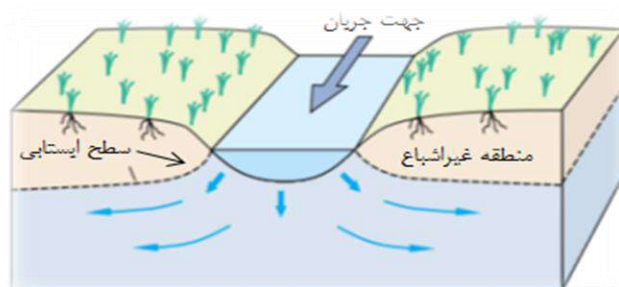
#### طبیعی سازی جریان آبدهی رودخانه سزار

به منظور بررسی تأثیر برداشت از منابع آب سطحی حوضه سزار بر آبدهی رودخانه سزار، توسط طرح های توسعه ی درون و برون حوضه های آب سطحی در این حوضه، کلیه برداشت های آب توسط طرح هایی که در جدول ۱ عنوان شده است با توجه به سال بهره برداری و الگوی مصرف ماهانه آن ها به سری زمانی آبدهی رودخانه سزار در ایستگاه تنگ پنج اضافه شد.

#### بررسی چگونگی تعامل آب های سطحی و زیرزمینی و ارزیابی برداشت های زیرزمینی حوضه سزار

در این پژوهش به منظور بررسی تأثیر برداشت از منابع آب زیرزمینی حوضه سزار بر آبدهی رودخانه سزار، چگونگی تعامل آب های سطحی و زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفت. آب های زیرزمینی و آب های سطحی منابعی مجزا از هم نیستند، بلکه سیستم های پیوسته ای می باشند که به طور دائم باهم در تعامل هستند (سوفوکلئوس، ۲۰۰۲). آبی که در منطقه اشباع است به عنوان آب زیرزمینی و خط بالای منطقه اشباع سطح ایستابی نامیده می شود. در زیر سطح ایستابی فشار آب به اندازه کافی برای وارد شدن به چاه مناسب است، در نتیجه امکان برداشت آب زیرزمینی برای استفاده به وجود می آید. عمق سطح ایستابی بسیار متغیر است و می تواند از رنج صفر برای زمانی که سطح آب هم سطح زمین است تا صدها متر در بعضی از مکان ها تغییر کند. معمولاً، عمق سطح ایستابی در نزدیکی بستر آب های سطحی دائمی مانند رودخانه ها، دریاچه ها و تالاب ها کم است. همه ی انواع جریان های سطحی با آب های زیرزمینی در تعامل هستند. یکی از راه های تعامل این دو منبع این است که رودخانه آب را از

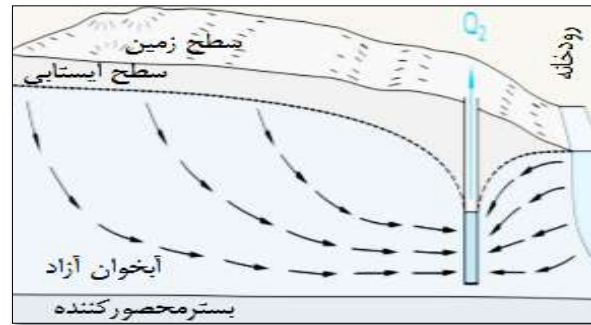
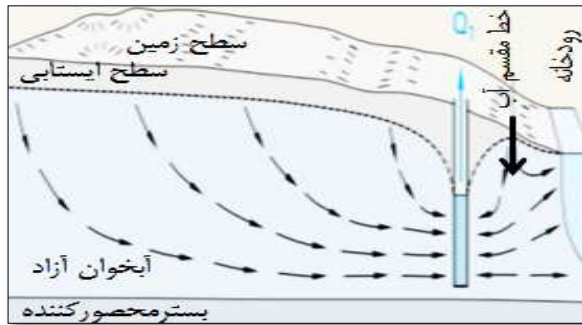
طریق جریان خروجی از بستر خود به آب‌های زیرزمینی می‌دهد. برای نفوذ آب‌های سطحی به آب‌های زیرزمینی، ارتفاع سطح ایستابی در مجاورت جریان باید پایین‌تر از ارتفاع سطح جریان آب باشد (شکل ۴).



شکل ۴. موقعیت سطح ایستابی هنگام نفوذ جریان رودخانه به آبخوان

از جمله عواملی که ممکن است موجب شود سطح ایستابی در مجاورت جریان پایین‌تر از ارتفاع سطح جریان آب قرار گیرد و بر تبادل محلی بین رودخانه و آبخوان‌های کم‌عمق مجاور تأثیرگذار باشد، پمپاژ آب زیرزمینی در نزدیکی رودخانه‌ها می‌باشد. پمپاژ می‌تواند مانع تخلیه آب زیرزمینی به یک رودخانه زاینده شود و یا در نرخ پمپاژ بالاتر می‌تواند جریان را از رودخانه به آبخوان هدایت کند. تحت شرایط پیش از برداشت سیستم آب‌های زیرزمینی دارای یک تعادل پویا است. به‌عنوان مثال، تغذیه سطح ایستابی با تخلیه آب‌های زیرزمینی به رودخانه برابراست. پس از حفر یک چاه که به‌طور مداوم آب را با دبی  $Q_1$ ، پمپاژ می‌کند، یک موقعیت جدید تعادل پویا به دست می‌آید و جریان ورودی به سیستم آب زیرزمینی ناشی از تغذیه برابر می‌شود با جریان خروجی به رودخانه بعلاوه برداشت از چاه، در این تعادل جدید، قسمتی از آب زیرزمینی که می‌توانست به رودخانه تخلیه شود توسط چاه و یک خط مقسم آب (یک خط جداکننده جهت جریان است، که به‌صورت موضعی بین چاه و رودخانه ایجاد می‌شود). جدا می‌گردد (شکل ۵). حال اگر چاه با دبی بیشتری  $Q_2$  پمپاژ شود، بعد از مدتی سیستم به تعادل جدیدی می‌رسد و تحت این شرایط خط مقسم آب زیرزمینی بین چاه و رودخانه کاهش می‌یابد تا جایی که این خط ممکن است از بین برود (شکل ۶). بنابراین پمپاژ شرایط هیدرولوژیکی رودخانه را از فرآیند تخلیه آب‌های زیرزمینی به فرآیند تغذیه آب‌های زیرزمینی تغییر می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر هنگام پمپاژ آب از چاهی واقع در نزدیکی یک بستر جریان سطحی، چاه مقدار آب موردنیاز خود را از ذخیره آبخوان برداشت می‌کند، در نتیجه افت سطح آب زیرزمینی اطراف چاه، یک گرادیان ایجاد می‌شود که مقداری از جریان آب زیرزمینی که در غیر این صورت (در وضعیت بدون پمپاژ) به‌عنوان دبی پایه به رودخانه وارد می‌شود را ضبط می‌کند. در نهایت مخروط افت چاه رودخانه را قطع می‌کند و در نتیجه یک جریان خروجی از رودخانه به داخل آبخوان منحرف می‌شود و افت سطح ایستابی آبخوان متعادل می‌گردد متناسب با نرخ پمپاژ چاه، آبدهی جریان رودخانه کاهش می‌یابد (وینترو و همکاران، ۱۹۹۸).

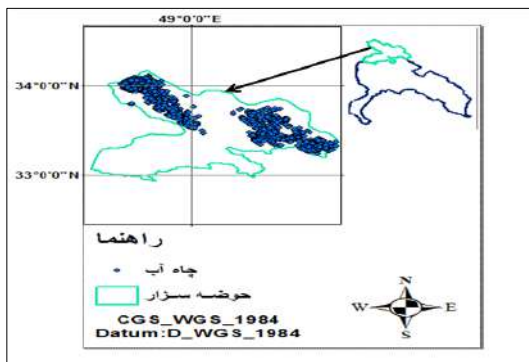
<sup>1</sup> losing stream



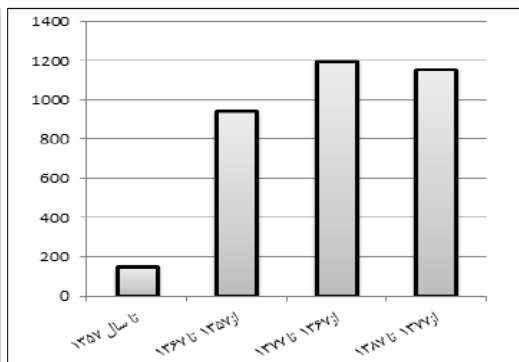
شکل ۵. وجود خط مقسم آب در نرخ پمپاژ پایین

شکل ۶. عدم وجود خط مقسم آب در نرخ پمپاژ بالا

به منظور بررسی این موضوع که آیا در حوضه سزار برداشت بیش از حد از آب های زیرزمینی موجب کاهش آبدهی رودخانهی سزار شده است، تحقیقاتی در رابطه با تعداد چاه ها بر اساس سال حفر و موقعیت قرارگیری آن ها در حوضه انجام شد. نتیجه ی این تحقیقات در شکل های ۷ و ۸ ارائه شده است.



شکل ۸. موقعیت چاه های آب حوضه سزار



شکل ۷. تعداد چاه های آب حوضه سزار برحسب سال حفر

### پیش بینی جریان بلندمدت آبدهی رودخانه سزار

جهت پیش بینی جریان بلندمدت آبدهی رودخانه مراحل زیر انجام شد:

- ۱- شیب روند در داده های سری زمانی آبدهی رودخانه سزار ( $b'$ ) با استفاده از رابطه (۱) که در ارائه شده است، برآورد شد.
- ۲- روند موجود در سری زمانی آبدهی رودخانه سزار به صورت خطی فرض شد و داده های نمونه به صورت رابطه (۲) که در بخش قبل ارائه شده است، نوشته شده و بدون روند شدند.
- ۳- ضریب خودهمبستگی مرتبه اول سری بدون روند  $X_t'$  با استفاده از معادله (۳) که در بخش قبل ارائه شده است، برآورد گردید.
- ۴- پس از محاسبه ضریب خودهمبستگی با مرتبه اول، خودهمبستگی مرتبه اول  $AR(1)$  با استفاده از رابطه (۱۰) حذف گردید.

$$Y_t'' = X_t' - r_1 X_{t-1}' \quad (10)$$

۵- روند شناخته شده  $T_t'$  و سری باقیمانده‌ها  $Y_t''$  به صورت رابطه (۱۱) با هم ترکیب می‌گردند. بدیهی است که سری حاصل  $Y_t'$  روند واقعی را حفظ کرده و اثر ضریب خودهمبستگی نیز حذف شده است.

$$Y_t' = Y_t'' + T_t' \quad (11)$$

۶- مجدداً با استفاده از رابطه‌ی (۱) که در بخش قبل ارائه شده است، شیب روند  $b$  برای سری  $Y_t'$  محاسبه شد.

۷- با استفاده از رابطه (۱۲) سری بدون روند  $Y_t$  به صورت زیر محاسبه شد.

$$Y_t = Y_t' - T_t' = Y_t' - bt \quad (12)$$

۸- اختلاف میانگین سری زمانی آبدهی دارای روند رودخانه‌ی سزار پس از حذف ضرایب خودهمبستگی (سری زمانی  $Y_t'$ ) و میانگین سری زمانی آبدهی بدون روند شده‌ی این رودخانه پس از حذف ضرایب خودهمبستگی (سری زمانی  $Y_t$ ) محاسبه شد.

۹- دو برابر مقدار به دست آمده در مرحله‌ی ۸ را از تمامی مقادیر میانگین سالانه آبدهی بدون روند رودخانه سزار (سری زمانی  $Y_t$ ) کم کرده و سپس با توجه به مقادیر به دست آمده برای میانگین سالانه و نسبت موجود بین مقادیر میانگین آبدهی سالانه و ماهانه در سری زمانی آبدهی رودخانه سزار، سری زمانی پیش‌بینی شده‌ی آبدهی این رودخانه (با فرض ثابت ماندن میزان برداشت‌های زیرزمینی در آینده) به دست آمد.

۱۰- جهت پیش‌بینی جریان بلندمدت آبدهی ورودی از رودخانه سزار به دریاچه سد دز لازم است، علاوه بر برداشت‌های زیرزمینی برداشت‌های سطحی نیز از مقادیر آبدهی سری زمانی  $Y_t$  کسر شوند. بدین منظور مقادیر برداشت آب توسط طرح‌های عنوان شده در جدول ۱ نیز با توجه به الگوی مصرف ماهانه آن‌ها از سری زمانی  $Y_t$  کم شد. لازم به ذکر است که سری زمانی به دست آمده بر اساس نیازها و برداشت‌ها از منابع آب حوضه تا پایان سال آبی ۸۷-۱۳۸۶ می‌باشد و در صورتی که بخواهیم سیستم منابع آب حوضه را در شرایط بعد از این سال مدل کنیم لازم است مقادیر برداشت از منابع آب سطحی حوضه توسط طرح‌هایی که بعد از سال ۸۷-۱۳۸۶ به بهره‌برداری رسیده‌اند نیز مانند طرح انتقال آب بین حوضه‌ای کمال صالح و دیگر طرح‌های توسعه درون حوضه‌ای در مدل شبیه‌سازی منابع آب حوضه و ورودی به دریاچه سد دز، اعمال شود.

## یافته‌ها

### نتیجه تحلیل روند جریان آبدهی رودخانه سزار

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۲ که حاصل آنالیز روند تغییرات آبدهی رودخانه سزار با استفاده از روش TFPW-MK می‌باشد، آبدهی رودخانه سزار در دوره‌ی آماری ۴۹-۱۳۴۸ الی ۸۷-۱۳۸۶ در هر سه مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه دارای شیب روند نزولی است. به گونه‌ای که این شیب منفی در مقیاس ماهانه در مهرماه در سطح احتمال ۹۹ درصد، در شهریورماه در سطح احتمال ۹۵ درصد و در ماه‌های آبان، اسفند و مرداد در سطح احتمال ۹۰ درصد معنادار می‌باشد. در مقیاس فصلی شیب منفی روند در هیچ‌یک از فصول در سطح معناداری قرار نداشته و در مقیاس سالانه نیز شیب منفی روند در سطح احتمال ۹۰ درصد معنادار است. مبنای ارزیابی‌های این تحقیق تغییرات شیب روند آبدهی در مقیاس سالانه می‌باشد، همان‌طور که گفته شد برای رودخانه سزار شیب تغییرات روند در مقیاس سالانه در سطح ۱۰ درصد معنادار است.

### نتایج بررسی دلایل کاهش آبدهی رودخانه سزار

#### نتیجه تحلیل روند بارش متوسط حوضه‌ی سزار

نتایج آنالیز روند سری زمانی بارش متوسط حوضه‌ی سزار در مقیاس سالانه به روش TFPW-MK در دوره‌ی آماری ۴۹-۱۳۴۸ الی ۸۷-۱۳۸۶ نشان داد، مقدار آماره‌ی  $Z$  آزمون من-کندال برای این سری زمانی بارش، برابر با  $-۰,۲۲۶۲۹$  می‌باشد، بر اساس نکاتی که در رابطه با

مقادیر Z گفته شد نه تنها این روند در سطح معناداری قرار ندارد بلکه به دلیل نزدیک بودن این مقدار به عدد صفر، می توان گفت که بارش متوسط حوضه ی سزار در دوره ی آماری مذکور فاقد روند است. بنابراین می توان نتیجه گرفت وجود روند منفی معنادار در آبدهی رودخانه سزار ارتباطی با بارش حوضه نداشته و عوامل دیگری سبب بروز روند منفی معنادار در آبدهی این رودخانه شده است.

### نتیجه تحلیل روند جریان آبدهی طبیعی شده رودخانه سزار

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ که حاصل آنالیز روند آبدهی طبیعی شده ی جریان رودخانه سزار با استفاده از روش TFPW-MK می باشد، آبدهی طبیعی این رودخانه نیز در دوره ی آماری ۴۹-۱۳۴۸ الی ۸۷-۱۳۸۶ در هر سه مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه دارای شیب روند نزولی است. و همانند آنچه در رابطه با آبدهی طبیعی نشده این رودخانه گفته شد می باشد، تنها در مقیاس سالانه، فصلی و ماهانه دارای شیب بسیار ناچیزی شیب نزولی روند کمتر شده است. با توجه بالینکه مبنای ارزیابی های این تحقیق شیب روند آبدهی در مقیاس سالانه می باشد و همان طور که در جدول ۳ دیده می شود برای آبدهی طبیعی شده رودخانه سزار این شیب منفی در سطح ۱۰ درصد معنادار است، بنابراین وجود روند منفی معنادار در آبدهی رودخانه سزار، ارتباطی با برداشت از منابع آب سطحی حوضه آبریز رودخانه سزار در بالادست ایستگاه هیدرومتری تنگ پنج نداشته و بروز این روند منفی بایستی به عامل دیگری وابسته باشد.

#### جدول ۲. نتایج آنالیز روند آبدهی طبیعی نشده رودخانه سزار

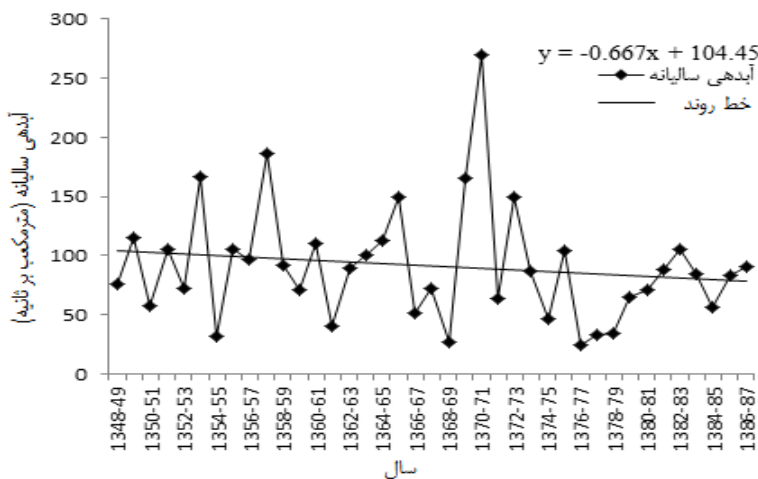
P	Z	پارامترهای آزمون MK
۹۹,۳	-۲,۷	مهر
۹۰,۸	-۱,۷	آبان
۷۳,۱	-۱,۱	آذر
۶۵	-۰,۹	دی
۲۹,۲	-۰,۴	بهمن
۹۴,۵	-۱,۹	اسفند
۸۸,۷	-۱,۶	فروردین
۸۳,۴	-۱,۴	اردیبهشت
۸۳,۴	-۱,۴	خرداد
۶۸,۵	-۱	تیر
۹۰,۲	-۱,۷	مرداد
۹۸,۷	-۲,۵	شهریور
۷۹,۱	-۱,۳	پاییز
۵۵	-۰,۸	زمستان
۸۳,۴	-۱,۴	بهار
۸۶,۳	-۱,۵	تابستان
۹۰,۸	-۱,۷	سال

#### جدول ۳. نتایج آنالیز روند آبدهی طبیعی شده رودخانه سزار

P	Z	پارامترهای آزمون MK
۹۹	-۲,۶	مهر
۹۰,۸	-۱,۷	آبان
۷۳,۱	-۱,۱	آذر
۶۵	-۰,۹	دی
۲۹,۲	-۰,۴	بهمن
۹۴,۵	-۱,۹	اسفند
۸۸,۷	-۱,۶	فروردین
۸۳,۴	-۱,۴	اردیبهشت
۸۰,۸	-۱,۳	خرداد
۶۵	-۰,۹	تیر
۹۰,۲	-۱,۷	مرداد
۹۸,۷	-۲,۵	شهریور
۷۹,۱	-۱,۳	پاییز
۵۵	-۰,۸	زمستان
۸۳,۴	-۱,۴	بهار
۸۶,۳	-۱,۵	تابستان
۹۰,۸	-۱,۷	سال

### نتیجه‌ی ارزیابی تاثیر تعامل آب‌های زیرزمینی و آب‌های سطحی بر آبدهی رودخانه سزار

بر اساس تحلیل نتایج آنالیز روند تغییرات آبدهی رودخانه سزار در دوره‌ی آماری ۴۹-۱۳۴۸ الی ۸۷-۱۳۸۶ می‌توان دریافت که بروز شیب منفی در آبدهی این رودخانه تقریباً از سال آبی ۶۲-۱۳۶۱ به بعد آغاز شده است، که بر اساس نتایج حاصل از آنالیز روند بارش و همچنین مطالعه برداشت از منابع آب سطحی حوضه موردنظر در دوره‌ی آماری مذکور، نمی‌توان بروز روند منفی در آبدهی رودخانه سزار را وابسته به این دو عامل یعنی بارش و افزایش برداشت از منابع آب سطحی دانست. این در حالی است که با توجه به نمودار ستونی شکل ۷، تعداد چاه‌های حفر شده در دهه‌ی ۱۳۵۷-۶۷ تقریباً به میزان ۶,۲۵ برابر تعداد چاه‌های حفر شده تا سال ۱۳۵۷ می‌باشد. با توجه به مطالب ارائه شده در رابطه با تعاملات آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌توان گفت این افزایش قابل ملاحظه تعداد چاه‌ها موجب برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و افت قابل ملاحظه سطح ایستابی و در نتیجه تخلیه جریان رودخانه در آبخوان‌های مجاور گردیده است. نتایج بررسی شیب روند آبدهی رودخانه سزار که در شکل ۹ ارائه شده است، نشان‌دهنده متناسب بودن شیب منفی روند آبدهی این رودخانه با افزایش تعداد چاه‌های آب حوضه سزار مطابق با نمودار شکل ۷ است. همچنین نتایج تحلیل روند تغییرات آبدهی ایستگاه هیدرومتری دره تخت بر روی رودخانه ماربره و ایستگاه هیدرومتری دو رود بر روی رودخانه‌ی تیره که دو سرشاخه‌ی اصلی رودخانه سزار می‌باشند، نشان‌دهنده‌ی وجود روند منفی معنادار آبدهی در این دو رودخانه در سطح ۰.۵٪ است. این در حالی است که بررسی روند بارش متوسط زیر حوضه در بالادست ایستگاه‌های هیدرومتری دره تخت و دو رود نشان داد که تغییرات روند بارش در زیر حوضه‌ی رودخانه‌ی ماربره در سطح معناداری قرار نداشته و در زیر حوضه بالادست ایستگاه دو رود نیز تا حدودی دارای شیب مثبت بوده است. بنابراین وجود شیب منفی معنادار روند در آبدهی رودخانه‌های تیره و ماربره بایستی وابسته به عامل دیگری باشد. با توجه به شکل ۸، اکثریت چاه‌های آب حوضه سزار در اطراف رودخانه‌های ماربره و تیره تمرکز دارند بنابراین می‌توان گفت که برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی باعث بروز روند منفی معنادار در آبدهی رودخانه‌های ماربره و تیره و در نتیجه رودخانه سزار شده است.

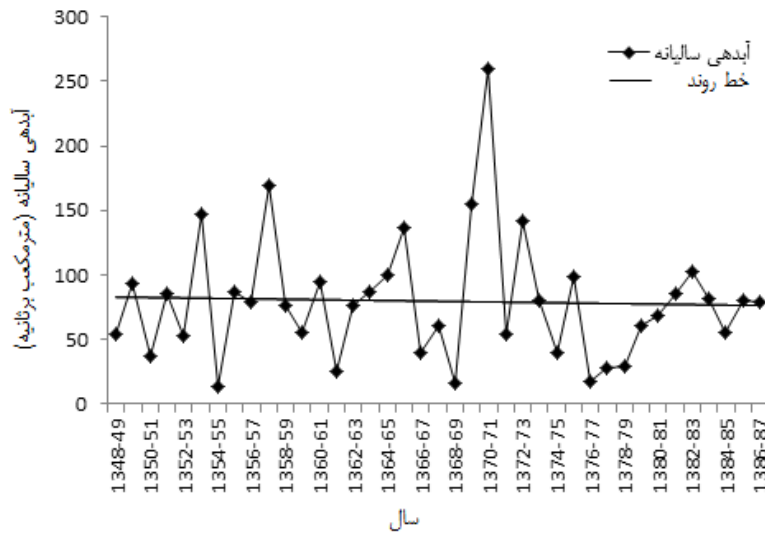


شکل ۹. سری زمانی میانگین آبدهی سالانه رودخانه سزار در ایستگاه تنگ پنج

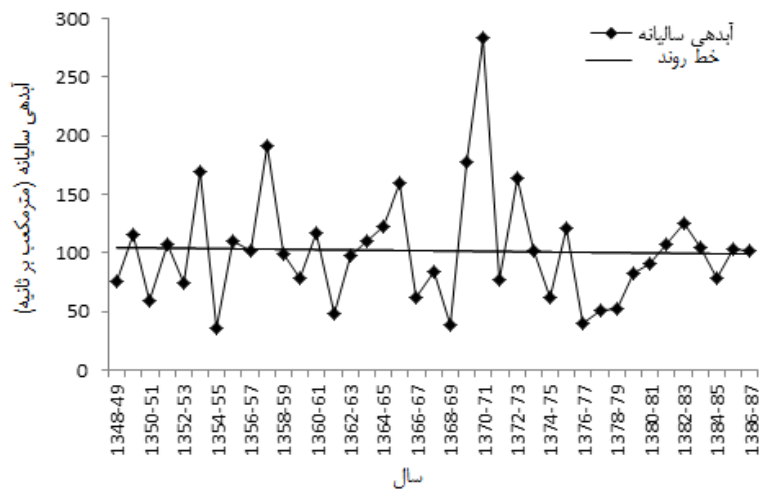
### نتیجه‌ی پیش‌بینی جریان آبدهی رودخانه سزار

نمودار شکل ۹ سری زمانی آبدهی رودخانه سزار را نشان می‌دهد، میانگین آبدهی در این سری زمانی برابر با  $90,95 (m^3/s)$  است. نمودار شکل ۱۰ سری زمانی آبدهی بدون روند را نشان می‌دهد، میانگین آبدهی در این سری زمانی برابر با  $102,16 (m^3/s)$  است و نمودار شکل ۱۱ سری زمانی آبدهی بدون روند را پس از کسر برداشت‌های زیرزمینی نشان می‌دهد، میانگین آبدهی در این سری زمانی برابر با  $79,74 (m^3/s)$  است.

همچنین میانگین سری زمانی آبدهی پیش‌بینی‌شده‌ی رودخانه سزار که پس از کسر برداشت‌های زیرزمینی و سطحی به‌دست‌آمده است برابر با  $79.58 (m^3/s)$  است.



شکل ۱۰. سری زمانی آبدهی بدون روند رودخانه سزار در ایستگاه تنگ پنج



شکل ۱۱. آبدهی بدون روند رودخانه سزار پس از کسر برداشت‌های زیرزمینی



## بحث

در این پژوهش ابتدا روند تغییرات آبدهی رودخانه سزار در دوره آماری ۴۹-۱۳۴۸ الی ۸۷-۱۳۸۶ مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از آنالیز روند سری زمانی آبدهی رودخانه سزار در محل ایستگاه تنگ پنج سزار در دوره آماری مذکور، این رودخانه دارای روند منفی معنادار در سطح ۱۰ درصد بوده است. در ادامه این پژوهش به منظور بررسی علل بروز روند منفی معنادار در سری زمانی آبدهی رودخانه سزار سه عامل اساسی تأثیرگذار بر روی جریان آبدهی رودخانه یعنی بارش، برداشت از منابع آب سطحی و برداشت از منابع آب زیرزمینی حوضه آبریز رودخانه مورد بررسی قرار گرفته. نتایج نشان داد که وجود روند منفی معنادار در آبدهی رودخانه سزار ارتباطی با بارش و برداشت از منابع آب سطحی حوضه ندارد، بلکه علت ایجاد این روند منفی معنادار، برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی حوضه می‌باشد. سپس جریان ورودی از این رودخانه به دریاچه سد دز پیش‌بینی گردید.

## نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که میانگین جریان پیش‌بینی شده رودخانه سزار در حدود  $22,42 \text{ (m}^3/\text{s)}$  کمتر از میانگین سری زمانی آبدهی این رودخانه در حالت عدم برداشت بیش‌ازحد از منابع آب زیرزمینی که سبب تعامل آب‌های سطحی و زیرزمینی نمی‌شود، می‌باشد. بنابراین توجه ویژه به وضعیت منابع آب زیرزمینی و مدیریت توأم منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی بایستی مورد توجه مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب کشور قرار گیرد. همچنین با توجه به اینکه رودخانه سزار از سرشاخه‌های مهم رودخانه دز است، بنابراین توجه به تغییرات روند و عوامل تأثیرگذار در روند آبدهی این رودخانه به منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد دز به دلیل پتانسیل‌های قابل توجه این سد و حوضه آبریز دز، بسیار حائز اهمیت است.

## منابع

- بحرینی، غلامرضا، و صفوی، حمیدرضا. (۱۳۸۷). شبیه‌سازی اندرکنش منابع آب با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و تکنیک سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS). تحقیقات منابع آب ایران، ۴(۳)، ۱۴-۲۶. [http://www.iwrr.ir/article\\_15701.html](http://www.iwrr.ir/article_15701.html)
- جاوید، عباس، و اصغری مقدم، اصغر. (۱۳۸۵). آنالیز نتایج اندازه‌گیری دبی رودخانه سنگ سیاه و بررسی ارتباط هیدرولیکی آن با آبخوان دشت دهگلان، دهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، تهران. <https://civilica.com/doc/28338>
- عبدالهی پورحقیقی، جلیل، و پیری، جمشید. (۱۳۸۸). برهمکنش آب سطحی - آب زیرزمینی و مدلسازی آن، نخستین کنفرانس سراسری آبهای زیرزمینی، بهبهان. <https://civilica.com/doc/75379>
- لشکری پور، غلامرضا، زارع، محمد، و شهابی فرد، فاطمه. (۱۳۸۳). اثرات برداشت آب از آبخوان ایرانشهر بر روی دبی پایه رودخانه بمپور. فصلنامه جغرافیا و توسعه، ۲(۴)، ۱۳۰-۱۱۳. <https://dx.doi.org/10.22111/gdij.2004.3887>
- یعقوب زاده، مصطفی، ایزدپناه، زهرا، برومند نسب، سعید، و سید کابلی، حسام. (۱۳۹۵). مقایسه الگوریتم سیال با مدل SWAP و روش‌های محاسباتی جهت تعیین تبخیر و تعرق. علوم و مهندسی آبیاری، ۳۹(۳)، ۳۹-۴۹. <https://dx.doi.org/10.22055/jise.2016.12341>
- یوسفی سنگانی، کیوان، و محمدزاده، حسین. (۱۳۸۸). تبادل آب سطحی و زیرزمینی و چگونگی اندازه‌گیری نشت آب. دومین کنفرانس سراسری آب، بهبهان، ایران. <https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1015420.html>

## References

- Abdollahi-Pourhaghighi, J., & Piri, J. (2009). The interaction of surface water-groundwater and its modeling. The first national conference on groundwater, Behbahan, Iran. <https://civilica.com/doc/75379> [In Persian]
- Anibas, ch., Buis, K., Verhoeven, R., Meire, P., & Batelaan, O. (2011). A simple thermal mapping method for seasonal spatial patterns of groundwater-surface water interaction. *journal of hydrology*, 397(1-2), 93-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.036>

- Bahreini, G., Safavi, H. (2008). Water Resources Interaction Modeling Using Satellite Images and GIS Techniques. *Iran-Water Resources Research*, 4(3), 14-26. [http://www.iwrr.ir/article\\_15701.html](http://www.iwrr.ir/article_15701.html) [In Persian]
- Dujardin, J., Anibas, C., Bronders, J., Jamin, P., Hamonts, K., Dejonghe, W., Brouyere, S., & Batelaan, O. (2014). Combining flux estimation techniques to improve characterization of groundwater-surface interaction in Zenne River Belgium. *Hydrogeology Journal*, 22, 1657-1668. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-014-1159-4>
- Hirsch, RM., Slack, JM., & Smith, RA. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1), 107-121. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p0107>
- Javid, A., & Asghari Moghaddam, A. (2006). Analysis of the results of measuring the discharge of the Sangsiah River and its hydraulic relationship with the aquifer of Dehgolan plain. 10th Conference of the Geological Society of Iran, Tarbiat Modares University of Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/28338> [In Persian]
- Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods
- Kikuchi, CP., Ferre, TPA., Welker, JM. (2012). Spatially telescoping measurements for improved characterization of groundwater-surface water interactions. *Journal of Hydrology*, 446-447, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.002>
- Lashkaripour, G., Zareh, M., & Shahabeifard, F. (2004). The Effect of Water Extraction from Iranshahr Aquifer on Bampour River Base Flow. *Geography and Development*, 2(4), 113-130. <https://dx.doi.org/10.22111/gdij.2004.3887> [In Persian]
- Mann, HB. (1945). Non-parametric test against trend. *Econometrica*, 13, 245-259. <http://dx.doi.org/10.2307/1907187>
- Rossi, PM., Ala-aho, P., Ronkanen, AK., & Kløve, B. (2012). Groundwater-surface water interaction between an esker aquifer and drained fen. *Journal of Hydrology*, 432-433, 52-60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.026>
- Sen, PK. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389. <https://doi.org/10.2307/2285891>
- Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology journal*, 10(1), 52-67. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-014-1215-0>
- Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I. *Nederlands Akad. Wetensch. Proc.* 53, 386-392. <https://ir.cwi.nl/pub/18448>
- Weber, KA., Perry, RG. (2006). Groundwater abstraction impacts on spring flow and base flow in the Hillsborough River Basin, Florida, USA. *Hydrogeology Journal*, 14(7), 1252-1264. <https://doi.org/10.1007/s10040-006-0040-5>
- Wen, F., & Chen, X. (2006). Evaluation of the impact of groundwater irrigation on streamflow in Nebraska. *Journal of Hydrology*, 327, 603-617. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.016>
- Winter, TC., Harvey, JW., Franke, OL., & Alley, WM. (1998). Ground Water and Surface Water a Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139. <https://doi.org/10.3133/cir1139>
- Yaghobzade, M., Izapanah, Z., Broomand Nasab, S., Seyed kaboli, H. (2016). The Comparison of SEBAL Algorithm with SWAP Model and Computational Method to Determine Evapotranspiration. *Irrigation Sciences and Engineering*, 39(3), 39-49. <https://dx.doi.org/10.22055/jise.2016.12341> [In Persian]

- Yousefisangani, K., & Mohammadzadeh, H. (2009) Surface and groundwater exchange and how to measure water leakage. Second National Water Conference, Behbahan, Iran.  
<https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1015420.html> [In Persian]
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Journal of Hydrology Process*, 16(9), 1807–1829.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.1095>
- Yue, S., Pilon, P., & Phinney, B. (2003). Canadian streamflow trend detection: impacts of serial and crosscorrelation. *Hydrological Sciences Journal*, 48(1), 51-64. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.1.51.43478>
- Zhang, K., Kimball, J.S., & Running, S.W. (2016). A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), 834-853.  
<https://doi.org/10.1002/wat2.1168>



## One-dimensional discharge-stage theory relationship modifying in non-core rock fill dams using laboratory model

Majid Heydari<sup>1</sup> , Zahra Khoda karamian<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Corresponding author, Assistant Professor, Department of Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: [mheydari@basu.ac.ir](mailto:mheydari@basu.ac.ir)

<sup>2</sup> M. Sc graduated of Water structures, Department of Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: [zahra.khodakaram77i@gmail.com](mailto:zahra.khodakaram77i@gmail.com)

### ABSTRACT

#### Introduction

Rock fill dams allow flow to pass through gravels or in some cases, through the porous part. The main purpose of building these dams is to reduce the peak flood discharge, which can reduce the damage to the downstream (Hansen and Garga, 1995). These dams have large pores, so the flow will be turbulent and the Darcy law will not be valid, in other words, the relationship between velocity (V) and hydraulic gradient (i) is nonlinear.

#### Research Methods

In this research, 21 series of experiments were planned on 2 trapezoidal and rectangular sections of rock fill dams in a laboratory flume equipped with an ultrasonic velocity meter with a length of 11 meters, a width and height of 0.5 meters and a fixed slope of 0.003 was done with glass walls and a galvanized bed covered with fiberglass boards. To provide the discharge, a pump was used that supplied the system flow up to 80 liters per second. To measure the depth of flow upstream and downstream of the dam, a depth gauge with an accuracy of one millimeter was used. Three samples of aggregates with medium diameters (D50) of 3, 5 and 7 cm were used for construction of laboratory rock fill dam by sieving method. In order to obtain the correction coefficient of one-dimensional equation  $b_0$  and parameters (b1, b2, b3, b4), multivariate nonlinear regression method and SPSS 23 software were used to fit the equations on the data.

#### Conclusion

Based on the observational results of the experiments, using SPSS 23 statistical software, multivariate nonlinear regression experimental data were fitted and then the parameters of one-dimensional equations were modified. By examining the statistical indicators, the validity of the equations was examined and acceptable results were obtained.

The degree of scatter between computational and observational discharges in the equation resulting from dimensional analysis, due to its proximity to the bisector line of the first quarter and the high value of the  $R^2$  index, is more accurate than the one-dimensional and one-dimensional theory equations, in such a way that its error rate for 30% of the data is equal to 0.107 percent and therefore can be used as a reliable equation. Also, the one-dimensional and modified two-dimensional theory equations were compared with the modified two-dimensional and two-dimensional theory equations.

Finally, the results showed that the two-dimensional equations have high accuracy. This study discusses the importance and need for an equation that can easily estimate discharge with high accuracy, and the proposed correction equations also emphasize this issue. On the other hand, extracting a simple and understandable rating curve relationship also doubles the efficiency, operation and management of rock fill dams.

**Keywords:** Rockfill Dam, One-Dimensional Equation, Laboratory Model, Multivariate nonlinear regression.

**Article Type:** Research Article

**Article history:** Received: 22 December 2021 Revised: 25 January 2022 Accepted: 01 February 2022 ePublished: 20 February 2022

**Cite this article:** Heydari, M., & Khodakaramian, Z. (2022). One-dimensional discharge-stage theory relationship modifying in non-core rockfill dams using laboratory model., *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 1(1), 108-120 DOI: 10.22126/ATWE.2022.7438.1012

**Publisher:** Razi University

© The Author(s).





## اصلاح رابطه تئوری یک بعدی دبی - اشل در سدهای پاره سنگی فاقد هسته با استفاده از مدل آزمایشگاهی

مجید حیدری<sup>۱</sup> ✉، زهرا خداکرمیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. ایمیل: [mheydari@basu.ac.ir](mailto:mheydari@basu.ac.ir)  
<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران. ایمیل: [zahra.khodakaram77i@gmail.com](mailto:zahra.khodakaram77i@gmail.com)

### چکیده

از راهکارهای سازه های که می توان جهت کنترل سیلاب به آن اشاره کرد، سدهای پاره سنگی بدون هسته می باشد. در این سدها دبی پیک سیلاب کاهش و زمان رسیدن به آن افزایش می یابد. جریان عبوری از این سدها آشفته بوده و قانون دارسی معتبر نمی باشد لذا از معادلات مربوط به جریان متلاطم، شامل روابط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک استفاده می شود. از آنجایی که روابط حاکم بر هیدرولیک این سدها غیرخطی است، استخراج یک رابطه دبی-اشل ساده و دقیقی می تواند مدیریت و بهره برداری این سدها را دوچندان کند. به منظور اصلاح معادله تئوری یک بعدی دبی-اشل در سدهای پاره سنگی، آزمایش هایی در یک فلوم آزمایشگاهی انجام شد و از طریق آنالیز ابعادی، کمیت های بی بعد در مسئله عبور جریان از یک سد پاره سنگی استخراج شد. با انتخاب مقاطع مستطیلی و دوزنقه ای با سنگ دانه هایی به قطر ۳، ۵ و ۷ سانتی متر و طول های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متری ۲۱ سری آزمایش، انجام و با اعمال رگرسیون غیرخطی چندمتغیره بر بخش عمده ای از نتایج آزمایشگاهی (۷۰٪)، ۲ معادله اصلاحی ارائه شد. بر اساس شاخص های آماری حاصل از ۳۰٪ داده ها، صحت سنجی معادلات موردبررسی قرار گرفت که نتایج قابل قبولی برای معادلات اصلاحی به دست آمد. نتایج و شاخص های آماری بیانگر آن است که معادله به دست آمده از آنالیز ابعادی، همخوانی بیشتری نسبت به معادلات تئوری یک بعدی و یک بعدی اصلاح شده دارد و درصد خطای آن برای ۳۰٪ از داده ها برابر ۰/۱۰۷ در صد است بنابراین می تواند به عنوان معادله ای مناسب مورد استفاده قرار گیرد. معادلات تئوری یک بعدی و یک بعدی اصلاح شده نیز با معادلات تئوری دویبعدی و دویبعدی اصلاح شده مقایسه شد و نتایج نشان داد که معادلات دویبعدی از دقت بالایی برخوردارند.

**واژه های کلیدی:** سد پاره سنگی، معادله یک بعدی، مدل آزمایشگاهی، رگرسیون غیرخطی چندمتغیره

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۰۱ دی ۱۴۰۰ اصلاح: ۰۵ بهمن ۱۴۰۰ پذیرش: ۱۲ بهمن ۱۴۰۰ چاپ الکترونیکی: ۰۱ اسفند ۱۴۰۰

**استناد:** حیدری، م. و خداکرمیان، ز. (۱۴۰۰). اصلاح رابطه تئوری یک بعدی دبی - اشل در سدهای پاره سنگی فاقد هسته با استفاده از مدل آزمایشگاهی. *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، (۱۱)، ۱۲۰-۱۰۸، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2022.7438.1012



در اغلب موارد، احداث سازه‌های کنترل سیلاب علاوه بر اینکه به تخصص بالایی نیاز دارند، هزینه‌های بالایی را هم در برمی‌گیرند، به همین دلیل مهندسين سعی در توسعه راهکارهایی دارند که استفاده از مصالح ارزان قیمت در این روش‌ها موجب کاهش هزینه‌های احداث می‌شود (رجبی، ۱۳۹۰). با توجه به ساختار ساده سدهای پاره‌سنگی، خصوصیات مصالح سنگی، وفور سنگ در هر ناحیه، سهولت استفاده و ارزان بودن آن و همچنین راندمان خوب این سدها در کاهش پیک سیلاب و به تعویق انداختن آن، احداث این سدها به‌عنوان یک روش مناسب در بین روش‌های کنترل و مهار سیلاب معرفی شده است (حسین زاده طلایی و همکاران، ۱۳۹۰). سدهای پاره‌سنگی تأخیری به جریان اجازه می‌دهد تا از میان سنگریزه‌ها و یا حتی در بعضی اوقات از روی قسمت متخلخل عبور کند. هدف اصلی از ساخت این سدها کاهش دبی پیک سیلاب است که می‌تواند موجب کاهش خسارت وارده به پایین دست شود (هانسن و گارگا، ۱۹۹۵). این سدها دارای خلل و فرج درشت می‌باشند بنابراین در آن‌ها جریان متلاطم خواهد بود و قانون دارسی معتبر نمی‌باشد، به عبارت دیگر رابطه‌ی بین سرعت (V) و گرادیان هیدرولیکی (i) غیرخطی است (استاد علی عسکری و شایان نژاد، ۲۰۱۵).

روابطی که هیدرولیک جریان متلاطم عبوری در محیط متخلخل درشت‌دانه را تبیین می‌کنند به دودسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول، معادلات ارتباط بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان (V - i) و دسته دوم، معادلات ارتباط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک (f - R<sub>e</sub>) می‌باشند.

پرونی (۱۸۰۴) و فرشیمر (۱۹۰۱) روابط غیرخطی بین گرادیان هیدرولیکی و سرعت جریان را به صورت زیر در نظر گرفتند:

$$i = AV^B \quad (۱)$$

$$i = A'V + B'V^2 \quad (۲)$$

که در آن i، گرادیان هیدرولیکی، V، سرعت جریان و A, B, A', B' ضرایبی هستند که بستگی به خصوصیات فیزیکی سیال و محیط متخلخل دارند (لی و همکاران، ۱۹۹۸).

ویلیکینز (۱۹۵۶)، پارکین (۱۹۶۳)، مارتینز (۱۹۹۱)، جانسون (۱۹۶۹) و لپس (۱۹۷۳) در تحقیقات خود از رابطه‌ی (۱) استفاده کردند. همچنین محققین زیادی ضمن پذیرش رابطه‌ی (۲) برای افت بار در محیط‌های متخلخل درشت‌دانه، آن را مورد بررسی قرار دادند که از آن جمله می‌توان به وارد (۱۹۶۴)، آدرین (۱۹۶۵) و احمد و سونادا (۱۹۶۹) اشاره کرد (زاهد و زمردیان، ۱۳۸۹).

محققان دیگر، برای بیان هیدرولیک جریان درون‌گذر در محیط متخلخل درشت‌دانه، روابط بین عدد رینولدز (R<sub>e</sub>) و ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ (f) را به فرم‌های زیر پیشنهاد کردند:

$$f = aR_e^b \quad (۳)$$

$$f = \frac{a}{R_e} + b \quad (۴)$$

که در آن f، ضریب اصطکاک دارسی - ویسباخ، R<sub>e</sub>، عدد رینولدز و a, b, a', b' ضرایبی هستند که بستگی به خصوصیات فیزیکی سیال و محیط متخلخل دارند (استاد علی عسکری و شایان نژاد، ۲۰۱۵).

### مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مطالعات متعددی در زمینه‌ی هیدرولیک جریان در محیط‌های سنگ‌دانه‌ای با استفاده از معادله‌ی یک‌بعدی دبی-اشل سدهای پاره‌سنگی توسط محققین انجام شده است که به برخی از آن‌ها اشاره می‌شود:

<sup>1</sup> Hansen & Garga

میچیپکو و همکاران (۲۰۰۵) به منظور کنترل جریان در رودخانه‌ها احداث سرریزهای پاره‌سنگی نفوذپذیر را پیشنهاد کردند و با در نظر گرفتن جریان یک‌بعدی، دبی عبوری از سرریز پاره‌سنگی به صورت تابعی از پارامترهای مؤثر در هیدرولیک جریان فرموله شد که با نتایج آزمایشگاهی همخوانی مناسبی را نشان داد.

سامانی و همکاران (۱۳۸۰-۱۳۸۱) در تحقیقی ضرایب معادله فرم نمایی ارتباط بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز ( $f-R_e$ ) را در دو حالت یک‌بعدی و دوبعدی برای سنگ‌دانه‌های با قطر متوسط ۱۰-۱ سانتی‌متر به صورت ذیل به دست آمده آوردند.

$$f=54R_e^{-0.077} \quad (۵) \quad \text{برای حالت یک‌بعدی}$$

$$f=80R_e^{-0.034} \quad (۶) \quad \text{برای حالت دوبعدی}$$

سامانی و حیدری (۱۳۸۵) در تحقیقی مدل روند یابی سیل در سدهای پاره‌سنگی متوالی و تأثیرات متقابل این سدها را بر هم بررسی نمودند. نتایج حاصل از مدل، تطابق خوبی با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد. همچنین نتایج نشان داد که کاهش دبی حداکثر هیدرو گراف خروجی به تعداد سدهای پاره‌سنگی متوالی، فاصله آن‌ها، اندازه متوسط مصالح سنگی به کار گرفته شده و ابعاد سدها بستگی دارد. شایان نژاد و اشجازه (۲۰۱۴) با استفاده از مدل آزمایشگاهی و به کارگیری رابطه کسری بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز ( $f-R_e$ ) و معادله‌ی یک‌بعدی دبی-اشل سدهای پاره‌سنگی، به بررسی هیدرولیک جریان درون‌گذر سد پاره‌سنگی دولایه پرداختند. در این تحقیق اثر لایه‌ها به صورت ضخامت آن‌ها و نیز قطر مصالح بکار رفته مورد نظر قرار گرفته است. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که لایه‌بندی اثرات مطلوب‌تری در کاهش تراوش دارد.

استاد علی عسکری و شایان نژاد (۲۰۱۵) در تحقیقی کاربرد سد پاره‌سنگی در نرم‌افزار HEC-RAS به منظور کنترل سیل را مورد بررسی قرار دادند. در این نرم‌افزار از نتایج رابطه‌ی یک‌بعدی دبی-اشل در سدهای پاره‌سنگی، استفاده شده است. مشخص گردید که حضور سد پاره‌سنگی را می‌توان مشابه حضور سازه‌ای مانند یک‌بند در نظر گرفت که در کنترل سیلاب مؤثر است.

حیدری (۱۳۷۹) در تحقیقی مدل ریاضی یک‌بعدی، جهت روند یابی سیل در مخازن چندگانه سد تأخیری پاره‌سنگی را ارائه نمود که از نتایج آن می‌توان به افزایش راندمان کاربرد این سدها، با استفاده از سنگ‌دانه‌های کوچک‌تر اشاره کرد. همچنین با به کارگیری مدل پیشنهادی توانست منحنی‌های دبی-اشل سدهای متوالی پاره‌سنگی را برای شرایط ماندگار به دست آورد.

سامانی و شایان نژاد (۱۳۸۰) معادله دبی-اشل سدهای پاره‌سنگی را به منظور تأخیر در سیلاب ارائه نمودند که با ترکیب معادله داری-ویسباخ و پیوستگی و با استفاده از رابطه کسری بین ضریب اصطکاک و عدد رینولدز ( $f-R_e$ )، معادله‌ی یک‌بعدی دبی-اشل برای سدهای پاره‌سنگی به دست آمده آوردند که ضرایب آن با روش بهینه‌سازی غیرخطی تعیین شده است.

سامانی و حیدری (۱۳۸۷) در تحقیقی تحت عنوان "توسعه و کاربرد مدل ریاضی دوبعدی روند یابی سیل در مخازن سدهای پاره‌سنگی متوالی در حالت درون‌گذر-روگذر" با به کارگیری معادلات دبی-اشل دوبعدی جریان درون‌گذر-روگذر به مقایسه‌ی نتایج حاصله با مشاهدات آزمایشگاهی پرداختند که دقت بسیار خوب مدل را در شبیه‌سازی روندیابی سیل در سیستم سدهای پاره‌سنگی نفوذپذیر متوالی نشان داد. در این تحقیق نشان داده شد که مدل دوبعدی دارای دقت بالاتری نسبت به مدل یک‌بعدی است به نحوی که در شرایط آزمایشگاهی دقت آن ۲۵ درصد بیشتر است. سامانی و همکاران (۱۳۸۷) در طی تحقیقی با عنوان تعیین دبی جریان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای تأخیری پاره‌سنگی با استفاده از آنالیز ابعادی، رابطه‌ای برای برآورد شدت جریان هم‌زمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای تأخیری پاره‌سنگی به صورت تابعی از پارامترهای بدون بعد مورد بررسی را با دقت مطلوبی پیشنهاد کردند.

زاهد و زمردیان (۱۳۸۹) نیز با استفاده از معادله‌ی یک‌بعدی دبی-اشل سدهای پاره‌سنگی برای فرم کسری ارتباط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک ( $f-R_e$ )، به بررسی آزمایشگاهی هیدرو گراف خروجی از سد پاره‌سنگی با مقطع مستطیلی پرداختند. آنچه مشخص است تاکنون تحقیقات متعددی جهت اصلاح ضرایب  $b'$  و  $a'$  در رابطه نمایی بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک داری-ویسباخ ( $f-R_e$ )، صورت گرفته که این ضرایب ( $a', b'$ ) در معادله‌ی یک‌بعدی دبی-اشل در سدهای پاره‌سنگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

<sup>1</sup> Michipku et al

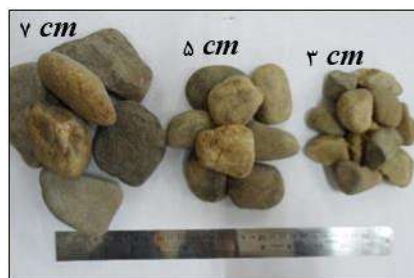
### روش پژوهش

✓ داده‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق، ۲۱ سری آزمایش برنامه‌ریزی شد که بر روی ۲ مقطع دوزنقه‌ای و مستطیلی از سدهای پاره‌سنگی در یک فلوم آزمایشگاهی مجهز به سرعت‌سنج اولتراسونیک به طول ۱۱ متر، عرض و ارتفاع ۰/۵ متر و شیب ثابت ۰/۰۳ با دیواره‌های شیشه‌ای و بستری از جنس گالوانیزه که با تخته‌های فایبرگلاس پوشیده شده، انجام شد. جهت تأمین دبی جریان از پمپی که دبی سیستم را تا ۸۰ لیتر بر ثانیه تأمین می‌کرد، استفاده شد. جهت اندازه‌گیری عمق جریان در بالادست و پایین‌دست سد از عمق‌سنج با دقت یک میلی‌متر استفاده گردید. مشخصات هندسی سدهای پاره‌سنگی در جدول (۱) آورده شده است. سه نمونه سنگدانه با قطرهای متوسط ( $D_{50}$ ) ۳، ۵ و ۷ سانتی‌متر جهت ساخت سد پاره‌سنگی آزمایشگاهی، توسط روش الک کردن مورداستفاده قرار گرفت. جهت نگهداری سنگدانه‌ها در هر یک از مقاطع دوزنقه‌ای و مستطیلی، از سبدهای تور-سیمی زوایای ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه به طول‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سانتی‌متری استفاده شد. قالب‌ها پس از قرارگیری در داخل کانال توسط سنگ‌دانه‌های مذکور جهت انجام آزمایشات پر شد، شکل (۱) و شکل (۲) بیانگر این موضوع هستند.

جدول ۱. مشخصات هندسی سدهای پاره‌سنگی مورداستفاده در آزمایشات

مقطع	$L(cm)$	$H_{dam}(cm)$	$\theta^\circ$	$W(cm)$
مستطیلی	۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰	۴۲	۹۰	۵۰
دوزنقه‌ای	۱۰۰، ۱۵۰	۴۲	۴۵، ۶۰	۵۰



شکل ۱. سنگ‌دانه‌های مصرفی در آزمایشات



شکل ۲. نمایی از جریان درون‌گذر در سد پاره‌سنگی دوزنقه‌ای با مشخصات

$$(\theta = 60^\circ \quad D_{50} = 3\text{cm} \quad L = 1/5 \text{ m})$$



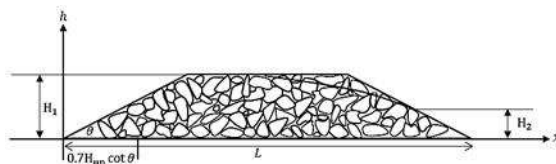
## مدل ریاضی

معادله (۷)، معادله تئوری یک‌بعدی دی-اشل در سد پاره‌سنگی برای فرم نمایی ارتباط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک می‌باشد. لازم به ذکر است طول  $(0.7H_1 \cot \theta)$  در سدهای خاکی به صورت تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این تحقیق سعی در اصلاح رابطه‌ی یک‌بعدی خواهد شد (حیدری، ۱۳۸۵).

$$Q = \alpha'' W \left( \frac{1}{b'+3} \right)^{\frac{1}{b'+2}} \left( \frac{H_1^{b'+3} - H_2^{b'+3}}{L - 0.7H_1 \cot \theta} \right)^{\frac{1}{b'+2}} \quad (۷)$$

$$\alpha'' = \left( \frac{2v^b g}{a'D_{50}^{b-1}} \right)$$

که در آن  $H_1 \cdot H_2 =$  تراز سطح آب در بالادست و پایین‌دست سازه سد  $(L)$ ،  $L =$  طول سد در امتداد جریان  $(L)$ ،  $W =$  عرض سد در راستای عمود بر جهت جریان  $(L)$ ،  $\theta =$  زاویه شیروانی سازه نسبت به افق (بی‌بعد)،  $d_{50} =$  قطر متوسط سنگ‌دانه‌های مصرفی در ساخت سازه  $(L)$ ،  $v =$  لزوجت سینماتیک سیال (آب)  $(L^2 T^{-1})$ ،  $g =$  شتاب ثقل  $(L T^{-2})$ ،  $a' \cdot b' =$  ضرایب معادله نمایی ارتباط بین عدد رینولدز و ضریب اصطکاک (بی‌بعد)، می‌باشد، شکل (۳).



شکل ۳. نمایی از یک سد پاره‌سنگی در محور مختصات (حیدری، ۱۳۸۵)

همان طوری که در مخرج معادله (۷) مشاهده می‌شود، عبارت  $0.7H_1 \cot \theta$  یک مقدار تجربی است که در سدهای خاکی محاسبه شده است. با توجه به ماهیت هیدرولیکی متفاوت سدهای خاکی و سدهای پاره‌سنگی ضروری به نظر می‌رسد که این معادله اصلاح شود تاکنون تحقیقی صورت نگرفته است.

با توجه به آنکه قطر متوسط سنگ‌دانه‌های استفاده شده در آزمایشات در محدوده‌ی قطر سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در آزمایشات  $t$  سامانی و همکاران (۱۳۸۰-۱۳۸۱) بود لذا برای انتخاب ضرایب  $a' \cdot b'$  در معادله (۷) از ضرایب معادله (۵) استفاده شد که نهایتاً به معادله (۸) منتج می‌شود. جهت اصلاح عبارت طولی  $(0.7H_1 \cot \theta)$  در معادله (۸)، ضریب  $b_0$  را در آن اعمال کرده که به صورت معادله (۹) در نظر گرفته می‌شود.

$$Q = \alpha'' W (0.342)^{0.52} \left( \frac{H_1^{2.923} - H_2^{2.923}}{L - 0.7H_1 \cot \theta} \right)^{0.52} \quad (۸)$$

$$Q = \alpha'' W (0.342)^{0.52} \left( \frac{H_1^{2.923} - H_2^{2.923}}{L - b_0 H_1 \cot \theta} \right)^{0.52} \quad (۹)$$

## تحلیل ابعادی

به منظور تبیین رابطه بین پارامترهای مؤثر در معادله یک بعدی دبی-اشل سدهای پاره‌سنگی، از تئوری آنالیز ابعادی باکینگهام استفاده گردید و پارامترهای مؤثر به نسبت‌های بدون بعد تبدیل می‌گردد. بر این اساس متغیرهای دخیل در مسئله  $Q, H_1, H_2, L, D_{50}, g, \theta$  در نظر گرفته شد:

$$f(Q, H_1, H_2, L, D_{50}, g, \theta) = 0 \quad (10)$$

در این رابطه،  $Q$  = دبی جریان،  $H_1, H_2$  = تراز سطح آب در بالادست و پایین دست سازه سد،  $L$  = عرض پی در امتداد جریان،  $D_{50}$  = قطر متوسط مصالح بدنه سد،  $g$  = شتاب ثقل،  $\theta$  = زاویه شیروانی سازه نسبت به افق. با در نظر گرفتن  $H_1$  و  $g$  به عنوان پارامترهای اصلی، رابطه (۱۰) را می‌توان به صورت رابطه بی بعد (۱۱) نوشت.

$$f\left(\theta, \frac{H_1}{D_{50}}, \frac{H_1}{L}, \frac{H_1}{H_2}, \frac{Q^2}{gH_1^5}\right) = 0 \quad (11)$$

با استفاده از روش رالیق (رابطه فوق به فرم معادله (۱۲) به دست می‌آید:

$$\frac{Q^2}{gH_1^5} = \theta^{b_1} \left(\frac{H_1}{D_{50}}\right)^{b_2} \left(\frac{H_1}{L}\right)^{b_3} \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{b_4}$$

$$Q = H_1^{2.5} g^{0.5} \theta^{\frac{b_1}{2}} \left(\frac{H_1}{D_{50}}\right)^{\frac{b_2}{2}} \left(\frac{H_1}{L}\right)^{\frac{b_3}{2}} \left(\frac{H_1}{H_2}\right)^{\frac{b_4}{2}} \quad (12)$$

به منظور به دست آوردن ضریب اصلاحی معادله یک بعدی  $b_0$  در معادله (۹) و پارامترهای  $(b_1, b_2, b_3, b_4)$  در معادله (۱۲)، از روش رگرسیون غیرخطی چندمتغیره و نرم افزار SPSS 23 جهت برازش معادلات بر روی داده‌ها، استفاده شده است.

## یافته‌ها

به منظور تعیین پارامترهای روابط (۹) و (۱۲) و اصلاح نمودن معادله یک بعدی دبی-اشل در سدهای پاره‌سنگی، از ۷۰٪ داده‌های آزمایشگاهی جهت برازش رگرسیون غیرخطی چندمتغیره و از ۳۰٪ مابقی جهت صحت‌سنجی معادلات اصلاحی استفاده شد که مقادیر پارامترها در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲. تخمین پارامترهای معادلات بر اساس ۷۰٪ داده‌ها

معادله (۹)	معادله (۱۲)	
-۱/۳۵۴	—	$b_0$
—	۰/۱۶۶	$b_1$
—	-۱/۰۴۱	$b_2$
—	۰/۴۲۶	$b_3$
—	-۲/۱۶۸	$b_4$

<sup>1</sup> Raleigh's method

با در نظر گرفتن ضرایب جدول (۲) معادلات (۹) و (۱۲) به فرم ذیل درخواهند آمد:

$$Q = \alpha'' W (0.342)^{0.52} \left( \frac{H_1^{2.923} - H_2^{2.923}}{L - (-1.354) H_1 \cot \theta} \right)^{0.52} \quad (۱۳)$$

$$\alpha'' = \left( \frac{2v^{-0.077} n^{0.923} g}{(54)D^{-1.077}} \right)^{0.52}$$

$$Q = H_1^{2.5} g^{0.5} \theta^{0.083} \left( \frac{H_1}{D_{50}} \right)^{-0.5205} \left( \frac{H_1}{L} \right)^{0.213} \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^{-1.084} \quad (۱۴)$$

با داشتن  $H_1, H_2, L, D_{50}$  و  $\theta$  می‌توان دبی عبوری از سدهای پاره‌سنگی را تعیین کرد. در این تحقیق برای صحت‌سنجی معادلات (۱۳) و (۱۴) از ضریب تبیین ( $R^2$ )، میانگین قدر مطلق درصد خطا ( $MAPE$ )، استفاده گردید که نتایج حاصله در جدول (۳) آمده است.

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{i_{obs}} - \bar{Q}_{i_{obs}})(Q_{i_{cal}} - \bar{Q}_{i_{cal}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{i_{obs}} - \bar{Q}_{i_{obs}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{i_{cal}} - \bar{Q}_{i_{cal}})^2}} \right]^2 \quad (۱۵)$$

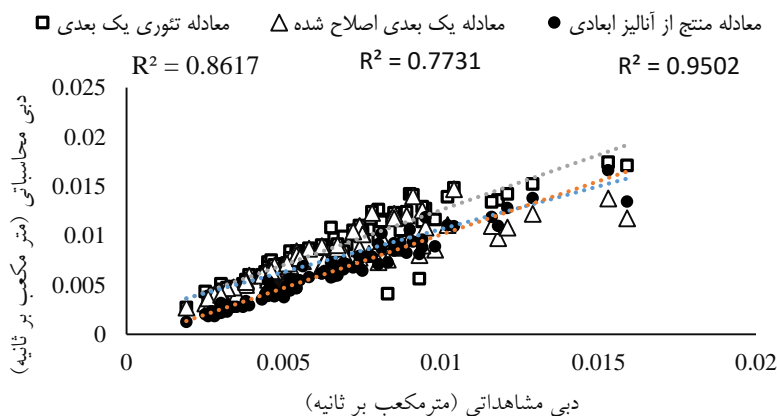
$$MAPE = \frac{1}{n} \times \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{i_{obs}} - Q_{i_{cal}}|}{\sum_{i=1}^n Q_{i_{obs}}} \times 100\% \quad (۱۶)$$

در روابط فوق،  $Q_{i_{obs}}$  و  $Q_{i_{cal}}$  به ترتیب دبی‌های مشاهداتی و محاسباتی،  $\bar{Q}_{i_{obs}}$  و  $\bar{Q}_{i_{cal}}$  به ترتیب مقادیر میانگین دبی‌های مشاهداتی و محاسباتی و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

با مقایسه شاخص‌های آماری حاصل از ۳۰٪ داده‌ها در جدول (۳)، برای معادلات یک‌بعدی اصلاح‌شده و منتج از آنالیز ابعادی، صحت‌سنجی معادلات موردبررسی قرار گرفت و نهایتاً نتایج قابل قبولی برای این معادلات به دست آمد. مطابق با شکل (۴)، با مقایسه نمودارهای حاصله از معادلات که دبی‌های مشاهداتی نسبت به دبی‌های محاسباتی ترسیم‌شده می‌توان نتیجه گرفت که همبستگی بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی در معادله منتج از آنالیز ابعادی نسبت به معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده بیشتر است که به دلیل ماهیت روش تحلیل ابعادی به‌درستی نتیجه می‌توان پی برد. با توجه به پایین بودن مقدار ضریب همبستگی معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده نسبت به معادله تئوری یک‌بعدی می‌توان نتیجه گرفت که بین دبی‌های محاسباتی حاصل از معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده و دبی‌های مشاهداتی همبستگی کمتری نسبت به معادله تئوری یک‌بعدی مشاهده می‌شود. بر اساس جدول (۳)، اگرچه معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده ضریب همبستگی کمتری نسبت به معادله تئوری یک‌بعدی دارد اما درصد خطای آن کمتر است که این کاهش خطابه دلیل اعمال ضریب اصلاحی به‌دست‌آمده می‌باشد. معادله منتج از آنالیز ابعادی در مقایسه با معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده، بهترین معادله بوده و همچنین نسبت به معادله تئوری یک‌بعدی با شاخص‌های آمار ( $MAPE=0.398$  و  $R^2=0.8617$ ) دارای عملکرد بهتری است.

جدول ۳. صحت‌سنجی معادلات یک‌بعدی و منتج از آنالیز ابعادی (۳۰٪ داده‌ها)

R <sup>2</sup>	MAPE (%)	
۰/۸۶۱۷	۰/۳۹۸	معادله تئوری یک‌بعدی
۰/۷۷۳۱	۰/۲۵۱	معادله یک‌بعدی اصلاح‌شده
۰/۹۵۰۲	۰/۱۰۷	معادله منتج از آنالیز ابعادی



شکل ۴. دبی محاسباتی برحسب دبی مشاهداتی برای معادلات یک‌بعدی و منتج از آنالیز ابعادی

با به‌کارگیری ضرایب معادله (۶) در معادله (۷) معادله تئوری دوبعدی دبی-اشل در سد پاره‌سنگی حاصل می‌شود که به فرم ذیل است:

$$Q = \alpha W (0.337)^{0.51} \left( \frac{H_1^{2.966} - H_2^{2.966}}{L - 0.7H_1 \cot \theta} \right)^{0.51} \quad (17)$$

جهت اصلاح معادله تئوری دوبعدی ضریب  $b'_0$  را در معادله فوق اعمال کرده که به‌صورت معادله (۱۸) در نظر گرفته می‌شود:

$$Q = \alpha W (0.337)^{0.51} \left( \frac{H_1^{2.966} - H_2^{2.966}}{L - b'_0 H_1 \cot \theta} \right)^{0.51} \quad (18)$$

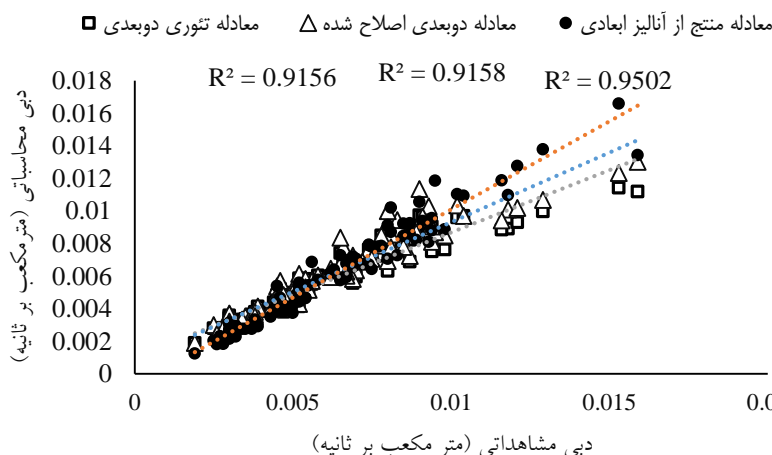
مطابق با اعمال انجام‌شده بر روی معادله (۹) برای معادله (۱۸) انجام‌شده و ضریب  $b'_0$  توسط نرم‌افزار SPSS تخمین زده و مقدار آن ۱/۲۱۹ شد. با در نظر گرفتن این ضریب، معادله (۱۸) به فرم ذیل در خواهد آمد:

برای معادلات تئوری دوبعدی و دوبعدی اصلاح‌شده صحت‌سنجی انجام شد که نتایج در جدول (۴) آمده است.

$$Q = \alpha W (0.337)^{0.51} \left( \frac{H_1^{2.966} - H_2^{2.966}}{L - (1.219)H_1 \cot \theta} \right)^{0.51} \quad (19)$$

جدول ۴. صحت‌سنجی معادلات دو‌بعدی (۳۰٪ داده‌ها)

R <sup>2</sup>	MAPE (%)	
۰/۹۱۵۶	۰/۱۰۲	معادله تئوری دو‌بعدی
۰/۹۱۵۸	۰/۰۹۵	معادله دو‌بعدی اصلاح‌شده



شکل ۵. دبی محاسباتی برحسب دبی مشاهداتی برای معادلات دو‌بعدی و منتج از آنالیز ابعادی

با مقایسه جداول (۳) و (۴) مشاهده می‌شود که معادلات تئوری دو‌بعدی و دو‌بعدی اصلاح‌شده نسبت به معادلات تئوری یک‌بعدی و یک‌بعدی اصلاح‌شده ضریب همبستگی بیشتری دارند. همچنین درصد خطای حاصله از معادلات دو‌بعدی کمتر از معادلات یک‌بعدی می‌باشد. با توجه به شکل (۵)، می‌توان نتیجه گرفت که میزان همبستگی بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی برای معادله منتج از آنالیز ابعادی نسبت به معادلات تئوری دو‌بعدی و دو‌بعدی اصلاح‌شده از پراکندگی کمتری برخوردار می‌باشد و نشان‌دهنده‌ی این است که معادله منتج از آنالیز ابعادی با دقت خوبی می‌تواند دبی متناظر با اشل خود را برآورد نماید. با استناد به نتایج محققینی که در زمینه معادلات یک‌بعدی و دو‌بعدی دبی - اشل سدهای پاره‌سنگی کار کرده‌اند، می‌توان دریافت که همواره مدل دو‌بعدی از دقت بیشتری نسبت به مدل یک‌بعدی برخوردار است.

## بحث

بر اساس نتایج مشاهداتی حاصل از آزمایشات، با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS 23، بر روی داده‌های آزمایشگاهی رگرسیون غیرخطی چندمتغیره برازش داده شد و سپس پارامترهای معادلات یک‌بعدی اصلاح‌شده و منتج از آنالیز ابعادی از جداول خروجی نرم‌افزار به‌دست‌آمده آمد. با بررسی شاخص‌های آماری، صحت‌سنجی معادلات موردبررسی قرار گرفت و نهایتاً نتایج قابل قبولی به‌دست‌آمده آمد. میزان پراکندگی بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی در معادله منتج از آنالیز ابعادی با توجه به نزدیکی بودن به خط نیمساز ربع اول و بالا بودن مقدار شاخص  $R^2$ ، دارای درستی بیشتری نسبت به معادلات تئوری یک‌بعدی و یک‌بعدی اصلاح‌شده می‌باشد به‌طوری‌که درصد خطای آن برای ۳۰٪ از داده‌ها برابر ۰/۱۰۷ درصد است و در نتیجه می‌تواند به‌عنوان معادله‌ای قابل اطمینان مورد استفاده قرار گیرد. همچنین معادلات تئوری یک‌بعدی اصلاح‌شده با معادلات تئوری دو‌بعدی و دو‌بعدی اصلاح‌شده مقایسه شد

## نتیجه گیری

نتایج نشان داد که معادلات دوبعدی از دقت بالایی برخوردارند. در این تحقیق در مورد اهمیت و نیاز به معادله‌ای که بتواند به راحتی دبی را با دقت بالایی تخمین بزند بحث شد و همچنین معادلات اصلاحی ارائه شده مؤکد این موضوع است. از طرفی استخراج یک رابطه دبی-اشل ساده و قابل فهم سبب دوچندان شدن کارایی، بهره‌برداری و مدیریت سدهای پاره‌سنگی نیز می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که معادلات تئوری دوبعدی و دوبعدی اصلاح شده نسبت به معادلات تئوری یک‌بعدی و یک‌بعدی اصلاح شده ضریب همبستگی بیشتری دارند. همچنین درصد خطای حاصله از معادلات دوبعدی کمتر از معادلات یک‌بعدی می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که میزان همبستگی بین دبی‌های محاسباتی و مشاهداتی برای معادله منتج از آنالیز ابعادی نسبت به معادلات تئوری دوبعدی و دوبعدی اصلاح شده از پراکندگی کمتری برخوردار می‌باشد و نشان دهنده‌ی این است که معادله منتج از آنالیز ابعادی با دقت خوبی می‌تواند دبی متناظر با اشل خود را برآورد نماید.

## تشکر و قدردانی

تمامی آزمایشات در آزمایشگاه سازه‌های آبی گروه علوم و مهندسی آب دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا همدان انجام شده است لذا نگارندگان مراتب تقدیر و تشکر خود را از مسئولین محترم دانشگاه اعلام می‌دارند.

## منابع

- حیدری، مجید. (۱۳۸۶). مدل دوبعدی جریان از میان و روی سدهای سنگریزه‌ای و کاربرد آن در کنترل سیل. رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- حیدری، مجید. (۱۳۷۹). مدل ریاضی تک‌بعدی مسیریابی سیلاب در مخازن متعدد سدهای سنگریزه‌ای محبوس. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
- خادمی، فائزه السادات، و اکبری، محمود. (۱۳۹۳). روش های کنترل سیل؛ اقدامات سازه‌ای. دومین کنفرانس ملی مدیریت و مهندسی سیلاب با رویکرد سیلابهای شهری، تهران. <https://civilica.com/doc/384410>
- رجبی، مسعود. (۱۳۹۱). پیش‌بینی توزیع فشار در جریان عبوری سدهای سنگریزه‌ای با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
- زاهد، مجتبی، و زمردیان، سید محمد. (۱۳۹۰). بررسی آزمایشگاهی هیدروگراف خروجی از سد پاره‌سنگی با مقطع مستطیلی. مجله پژوهش آب ایران، ۵(۸)، ۸۸-۸۱. <https://journal.sku.ac.ir/IWRJ/Fa/Paper/1282>
- سامانی، جمال محمد ولی، حیدری، مجید، و مکتبیان، مهرخ. (۱۳۸۸). توسعه و کاربرد مدل ریاضی دو بعدی روندیابی سیل در مخازن سدهای پاره سنگی متوالی در حالت درون-گذر-روگذر، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز. <https://civilica.com/doc/62514>
- سامانی، جمال محمد ولی، و شایان نژاد، محمد. (۱۳۸۲). ارائه معادله دبی-اشل سدهای پاره سنگی به منظور تاخیر در سیال. ششمین سمینار بین المللی مهندسی روستایی، دانشگاه شهید چمران، اهواز، ایران.
- سامانی، جمال محمد ولی، ریاحی مدوار، حسین، و ایوب زاده، سیدعلی. (۱۳۸۸). تعیین دبی جریان همزمان درون و روگذر غیرمستغرق در سدهای تاخیری پاره سنگی. مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۵(۱)، ۶۸-۵۸. [http://www.iwrr.ir/article\\_15734](http://www.iwrr.ir/article_15734)

## References

- Hansen, D., Garga, V.K., & Townsend, D.R. (1995). Selection and application of a one-dimensional non-darcy flow equation for two dimensional flow through rockfill embankments, *Canadian Geotech Journal*, 32, 223-232. <https://doi.org/10.1139/t95-025>

- Heydari, M. (2000). One-dimensional mathematical model of flood routing in multiple reservoirs of detention rockfill dams. Ms. C. Thesis, University of Bu-Ali Sina, Hamedan. [In Persian]
- Heydari, M. (2007). Two-dimensional model of flow through and over the rockfill dams and it's application in flood control. Ph.D. Thesis, University of Tarbiat modarres, Tehran. [In Persian]
- Hosseinzadehtalaei, P., Heydari, M., Fathi, P., Marofi, S., & Tabari, H. (2012). Numerical Model and Computational Intelligence Approaches for Estimating Flow through Rockfill Dam. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(4). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000446](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000446)
- Khademi, F., & Akbari, M. (2014). Flood control methods; structural operations, the 2nd national Conference on Flood Managment and Engineering with Urban Flood Approach, Tehran, Iran. <https://civilica.com/doc/384410> [In Persian]
- Li, B., Garga, V.K., & Davies, M.H. (1998). Relationship for non-Darcy flow in rockfill. *Journal of Hydraulics Division. ASCE*. 124(2). 206-212. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:2\(206\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:2(206))
- Michipku, k., Maeno, S., Furusawa, T., & Haneda, M. (2005). Discharge through a permeable rubble maund weir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(1). <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9429%282005%29131%3A1%281%29>
- OstadAliAskari, K., & Shayannejad, M. (2015). Usage of RockfillDams in the HEC-RAS Software for the Purpose of Controlling Floods. *American Journal of Fluid Dynamics*, 5(1), 23-29. <http://dx.doi.org/10.5923/j.ajfd.20150501.03>
- Rajabi, M. (2012). Prediction of perssure distribution in passing flow of rockfill dams using artificial neural network. Ms. C. dissertation, University of Bu-Ali Sina, Hamedan. [In Persian]
- Samani, H., Samani, J., & Shayannejad, M. (2003). Reservoir routing using steady and unsteady flow through rockfill dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(6), 448-454. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2003\)129:6\(448\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:6(448))
- Samani, J. M. V. and Shayannejad, M. (2003). Presentation of discharge-stage equation for rockfill dams in order to delay the flood. In: *Proceedings of 6th International River Engineering Seminar*, Shahid Chamran University, Ahvaz, Iran. [In Persian]
- Samani, J.M.V., & Heydari, M. (2007). Reservoir Routing through successive Rockfill detention dams. *Journal of agricultural science and Technology*, 9(4), 317-326. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2007.9.4.4.5>
- Samani, J.M.V., Heydari, M., & Mecnatian, M. (2009). Development annd application of two-dimensional mathematical model for flood routing in continuous rockfill dams reservoirs in through and over flows. *Proceedings of 8th International Congress on Civil Engineering*, Shiraz University, Shiraz, Iran. <https://civilica.com/doc/62514> [In Persian]
- Samani, J.M.V., Riahi Madvar, H., & Ayyoubzadeh, S.A. (2009). Experimental Investigation of Erosion and Sedimentation at Unequal Bed Level River Confluence. *Iran-Water Resources Research*, 5(1), 58-68. [http://www.iwrr.ir/article\\_15734](http://www.iwrr.ir/article_15734) [In Persian]
- Samani, J.M.V., Samani, H.M.V & Shayannejad, M. (2004). Reservoir routing with outflow through rockfill dams. *Journal of Hydraulics Research*, 42(4), 435-439. <https://doi.org/10.1080/00221686.2004.9728409>
- Shayannejad, M., & ashjazadeh, S. (2014). A Hydraulic Investigation of Flow through a Two-Layered Rockfill dam Using an Experimental Model. *International Bulletin of Water Resources & Development*, 11(3).

- Zahed, M., & Zomorodian, S.M.A. (2011). Laboratory study of the output hydrograph from rockfill dam with rectangular section. *Journal of Iranian Water Research*, 5(8), 81-88.  
<https://journal.sku.ac.ir/TWRJ/Fa/Paper/1282> [In Persian]
- Zeng, Z., & Grigg, R. (2006). A criterion for non-Darcy flow in porous media. *Transport in porous media*, 63,57-69. <https://doi.org/10.1007/s11242-005-2720-3>