

Detection of discharge trend variations in the headwaters of the Karun River and the influence of regional and global teleconnection patterns

Nezam Tani¹, Kamal Omidvar^{2*}, Ahamad Mazidi³ and Gholamali Mozafari⁴

¹ PhD student, Department of Meteorology, Natural Hazards, Yazd University, Yazd, Iran

² Professor, Department of Meteorology, Yazd University, Yazd, Iran

³ Associate Professor, Department of Meteorology, Yazd University, Yazd, Iran

⁴ Professor, Department of Meteorology, Yazd University, Yazd, Iran

Received: 23 May 2025

Accepted: 18 October 2025

Extended abstract

Introduction

Changes in river discharge fluctuations, whether increases or decreases, can lead to irreversible damage to both human and natural environments. It is now well established that variations in the phases of teleconnection patterns can cause significant increases or decreases in river discharge across different regions of the world, depending on their influence on precipitation cycles, evapotranspiration, and drought occurrence.

Materials and methods

For this study, data on 28 major teleconnection indices affecting Iran's climate were obtained from the NOAA website. In addition, river discharge records from selected hydrometric stations located upstream of the dams on the Karun River (Telezang, Lordegan, Armand, Pataveh, and Kata stations) were collected from the Ministry of Energy for a 30-year period (1993–2022). Following a preliminary assessment of the discharge data, missing values were reconstructed using the multiple regression method to ensure data consistency and reliability. This method was chosen for its ability to preserve the general trend of the dataset while minimizing disturbance to the data. To analyze the trends and magnitude of seasonal and annual discharge variations, the non-parametric Mann–Kendall test and Theil–Sen slope estimator were applied. Furthermore, the relationship between teleconnection indices and river discharge was examined using the Pearson correlation coefficient across three temporal scales: monthly, seasonal, and annual. These correlations were assessed both simultaneously and with time lags of one to three months. Given the large number of indices, only those with statistically significant correlations with discharge were included in the final analyses.

Results and discussion

The results indicated that, overall, the mean discharge exhibited a continuous decreasing trend during the study period. Specifically, the mean discharge in all seasons showed a declining pattern, and at the annual scale, a significant decrease of 11.3 m³/s per year was observed, accompanied by a negative Mann-Kendall statistic ($Z = -4.1$). The correlations between teleconnection patterns and discharge in the study basin were further explored. The findings revealed that, at different temporal scales (monthly, seasonal, and annual), several teleconnection indices—including GLBTS, WHWP, SOI, Solar Flux, TSA, TNA, NINO4, AMO, AMM, MEI v2, PDO, NINO1+2, AAO, Warm Pool, PNA, EPO, WP, TNH, NCP, RMM1, and RMM2—exhibited statistically significant correlations (at the 0.05 and 0.01 confidence levels) with the discharge of the Karun River headwaters, either simultaneously or with lags of one to three months.

Conclusions

Overall, the mean discharge recorded at the selected upstream stations of the Karun River dams demonstrated a decreasing trend. Moreover, the study confirmed the existence of significant simultaneous and lagged correlations between the fluctuations of several teleconnection indices and river discharge. Consequently, it can be concluded that the identified teleconnection patterns exert considerable influence on discharge variations in the basin. Given the predictability of these teleconnection indices and their

* Corresponding author: komidvar@yazd.ac.ir

significant correlations with discharge, future fluctuations of the Karun River discharge can potentially be forecasted at monthly, seasonal, and annual scales based on the findings of this research.

Keywords: Correlation, Lordegan, Multiple regression, Non-parametric Mann–Kendall test, River discharge

Cite this article: Tani, N., Omidvar, K., Mazidi, A., Mozafari, G., 2026. Detection of discharge trend variations in the headwaters of the Karun River and the influence of regional and global teleconnection patterns. *Water. Eng. Manag.* 17(4), 477-497.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



آشکارسازی روند تغییرات دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون و اثرگذاری الگوهای دور پیوند منطقه‌ای و جهانی بر روی آن

نظام تنی^۱، کمال امیدوار^{۲*}، احمد مزیدی^۳ و غلامعلی مظفری^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه آب و هواشناسی، مخاطرات طبیعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۳ دانشیار، گروه آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۴ استاد، گروه آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۲

چکیده مبسوط

مقدمه

تغییر در نوسانات دبی رودخانه‌ها چه به صورت افزایشی یا کاهشی می‌تواند خسارت‌های جبران‌ناپذیری برای محیط‌زیست انسانی و طبیعی داشته باشد. امروزه پذیرفته شده که نوسان در فازهای مختلف الگوهای دور پیوندی می‌تواند افزایش یا کاهش دبی رودخانه‌ها را در مناطق مختلف جهان با توجه به اثرگذاری هر الگو بر دوره‌های بارشی، تبخیر و تعرق و خشکسالی در پی داشته باشد.

مواد و روش‌ها

بدین منظور برای انجام این پژوهش داده‌های دریافتی ۲۸ شاخص مهم دور پیوندی تأثیرگذار بر اقلیم ایران از وب سایت NOAA دریافت شد. همچنین آمار دبی ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب بالادست سدهای مستقر بر روی رودخانه کارون (ایستگاه‌های تل‌زنگ، لردگان، ارمند، پاتاوه و کتا) طی سری زمانی ۳۰ ساله (۱۹۹۳-۲۰۲۲) از وزارت نیرو جهت مطالعه دریافت و مورد بررسی قرار گرفته شد. پس از بررسی اولیه بر روی داده‌های دبی، با استفاده از روش رگرسیون چندگانه جهت برآورد داده‌ها مفقودی از صحت و انسجام داده‌ها اطمینان حاصل شد. این روش به دلیل حفظ روند کلی داده‌ها و کاهش اختلالات داده‌ای انتخاب شد. سپس برای محاسبه روند و شدت تغییرات دبی فصلی و سالانه، از روش ناپارمتری من‌کنندال و تایل سن استفاده شد. در ادامه، ارتباط بین شاخص‌های دورپیوندی و دبی رودخانه با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در سه مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه هم به صورت هم‌زمان و هم با تأخیر یک تا سه ماهه انجام شد. با توجه به تعداد بالای شاخص‌ها، تنها مواردی که دارای همبستگی معنی‌دار با دبی بودند، وارد تحلیل‌های نهایی شدند.

نتایج و بحث

طبق نتایج به دست آمده به طور متوسط روند مجموع میانگین دبی طی دوره مورد مطالعه به طور پیوسته کاهشی بوده است. به طوری که میانگین دبی در تمام فصل‌ها، با روند کاهشی همراه بوده و این مقدار در مقیاس سالانه طی دوره مورد مطالعه با کاهش معنی‌دار ۱۱/۳ مترمکعب در سال با جهش منفی ($Z = -4/1$) همراه بوده است. همچنین ارتباط بین الگوهای

* مسئول مکاتبات: komidvar@yazd.ac.ir

دور پیوند با دبی حوضه مورد مطالعه طی سری زمانی مورد نظر مورد واکاوی قرار گرفت. طبق نتایج به دست آمده طی مقیاس‌های زمانی مختلف (ماهانه، فصلی و سالانه) الگوهای دور پیوند متعددی از جمله الگوهای WHWP, GLBTS, WARMPOOL, AAO, NINO1, PDO, MEIVE2, AMM, AMO, NINO4, TNA, TSA, SOLAR FLUX, SOI, RMM1, NCP, TNH, WP, EPO, PNA و RMM2 به صورت هم‌زمان یا با تأخیر یک تا سه ماهه همبستگی معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱ با دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون طی سری زمانی مورد مطالعه داشته‌اند.

نتیجه‌گیری

در مجموع می‌توان بیان کرد، میانگین دبی ایستگاه‌های منتخب در بالادست سدهای رودخانه کارون روند کاهشی داشته است. همچنین مشخص شد بین نوسانات برخی از الگوهای دور پیوندی با دبی همبستگی معنی‌داری به صورت هم‌زمان و با تأخیر وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که الگوهای دور پیوند ذکر شده می‌توانند بر دبی این حوضه تأثیرگذار باشند. از طرفی با توجه به قابل پیش‌بینی بودن نوسانات الگوهای دور پیوند مورد نظر و وجود همبستگی معنی‌دار با دبی می‌توان میزان نوسانات دبی رودخانه کارون را در آینده به صورت ماهانه، فصلی و یا سالانه با توجه به نتایج این پژوهش پیش‌بینی کرد.

واژه‌های کلیدی: دبی رودخانه، رگرسیون چندگانه، روش ناپارمتری من‌کنندال، لردگان، همبستگی

مقدمه

رودخانه‌ها به عنوان رگ‌های حیاتی کره زمین، تأمین‌کننده اصلی آب شیرین برای کشاورزی، صنعت و مصارف خانگی هستند. تغییرات در میزان آبدی رودخانه‌ها می‌تواند عواقب جدی برای محیط‌زیست و جامعه داشته باشد. یکی از عوامل مهمی که بر نوسانات دبی رودخانه‌ها تأثیر می‌گذارد، الگوهای دور پیوندی هستند. این الگوها با تغییر الگوهای بارندگی، دما و دیگر عناصر اقلیمی به طور مستقیم بر میزان جریان آب در رودخانه‌ها اثر می‌گذارند (Hurrell, 1995). الگوهای دور پیوندی مطالعه ارتباط هم‌زمان بین نوسانات عناصر اقلیمی یک مکان با تغییرات الگوهای فشار و دمای سطح دریا در یک نقاط جغرافیایی دیگر است (Guzzler, 1981) Wallace and (Wallace and). بررسی نوسانات مقیاس جهانی و نیمکره‌ای فشار سطح دریا، تاریخی نسبتاً طولانی دارد و به یک قرن پیش باز می‌شود (Broecker, 1987).

بنابراین جریان رودخانه به عنوان یکی از متغیرهای مهم هیدرولوژی و منابع آب در ارتباط متقابل با عناصر اقلیمی است (Maroofi and Tabari, 2011). همچنین اطلاع از میزان ورود آب به مناطق مربوط به حوزه آبخیز یک رودخانه دارای اهمیت زیادی برای کشاورزی، خطرات بالقوه بر زندگی انسان و حیوانات، صنایع و غیره است. این مقدار آب که از نقطه مشخصی مانند رودخانه، کانال آب،

دریچه و یا هر سازه دیگر در واحد مترمکعب در ثانیه می‌گذرد، دبی نام دارد (Mehrani, 2022). همچنین مطالعات فراوانی در مورد روند دبی رودخانه‌ها و ارتباط آن‌ها با الگوهای دور پیوند جوی اقیانوسی انجام شده است برای مثال Lee and Williams, (2008) به مطالعه اثر تغییر اقلیم بر حوزه‌های آبخیز لبنان پرداختند. نتایج نشان داد، افزایش دو درجه سلسیوس دما باعث می‌شود دبی بیشینه دو ماه زودتر رخ دهد.

همچنین در یک مطالعه Sarmiento and Palanisami, (2011) ارتباطات بین الگوهای دور پیوند و نوسانات حوضه رودخانه مکنزی را بررسی کردند. طبق نتایج الگوی دور پیوند PNA نقش معنی‌داری بر دبی نیمه جنوبی این حوضه دارد. در مقابل، الگوی PDO با وجود داشتن نوسانات بزرگ، نقش کمی در نوسانات دبی این رودخانه داشته است.

Jiang et al., (2019) نیز با بررسی ارتباط بارش با نوسان ال‌نینو حوضه رودخانه وی در کشور چین نشان دادند، این نوسانات اثرات آب و هوایی منفی را بر وقایع شدید بارشی این حوضه داشته است. علاوه بر این، Dong et al., (2020) با مطالعه ارتباط الگوهای دور پیوند و بارش در حوضه بالادست سه رود چین نشان دادند تغییرات بارش با شاخص‌های مختلف دور پیوندی در زمان‌های مختلف سال معنی‌دار است. همچنین نتایج مطالعات et

روند تغییرات بارندگی و دبی رودخانه‌های حوضه کارون بزرگ توسط Shakerian et al., (2019) نشان داد، در مقیاس ماهانه ۸۷ درصد ماه‌های سال، دارای روندی کاهشی و ۶۳ درصد ماه‌ها روندی کاهشی معنی‌دار بوده است

Mirzaei Hasanlu et al., (2020) به مطالعه تأثیر الگوهای دور پیوند بر بارش و خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص NAO بیشترین تأثیر را بر بارش و خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه داشته است. همچنین دو شاخص EA و SOI همبستگی منفی و معکوس با بارش و خشکسالی داشته‌اند. Khoramian, (2024) در یک مطالعه با ارزیابی روند بارش سالانه و فصلی حوضه رودخانه کارون طی سری زمانی ۶۰ ساله نشان داد، در بازه زمانی ۱۹۵۵ تا ۲۰۱۹ روند معنی‌داری در بارندگی سالانه مشاهده نمی‌شود، اما در دوره ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۹ یک‌روند کاهشی سالانه از نظر آماری در سطح معنی‌داری دیده می‌شود که شیب آن برابر با ۶/۶- است. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده تغییر به سمت شرایط خشک‌تر در بخش پایانی دوره مطالعه باشد. همچنین Rafiei et al., (2024) با بررسی ارتباط الگوهای دور پیوند و خشکسالی هیدرولوژیکی دشت سفیددشت نشان داد که شاخص‌های دور پیوند NAO و IOD بالاترین همبستگی معنی‌دار را با بارش منطقه داشته است.

جمع‌بندی مطالعات مختلف در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهد که دبی رودخانه‌ها تحت تأثیر عناصر مختلفی از جمله دما، بارش، رطوبت و ذوب پوشش برفی قرار دارد. همچنین، به‌طور مکرر ثابت شده که الگوهای دور پیوند بر عناصر اقلیمی ذکر شده تأثیر دارد و به دنبال آن، منابع هیدرولوژی نیز دچار نوسان می‌شوند. از طرفی مطالعات کمتری در ایران به تأثیرگذاری الگوهای دور پیوندی بر نوسانات دبی رودخانه‌ها از جمله مجموع دبی ایستگاه‌های منتخب بالادست رودخانه مهم و راهبردی کارون پرداخته است. بر همین مبنا در پژوهش حاضر بررسی اثرات نوسانات دور پیوندی و ارتباط آن‌ها با

Hussain al., (2020) در رابطه با تغییرات رواناب در پاسخ به پارامترهای جوی و اقیانوسی سرچشمه رود سند نیز نشان داد رواناب ارتباط قوی‌تری با عوامل محیطی منطقه‌ای نسبت به الگوهای دور پیوند جهانی دارد.

Uereyen et al., (2022) به تجزیه و تحلیل چندوجهی روند فصلی دبی حوضه‌های رودخانه هندو-گانگتیک پرداختند. نتایج نشان داد بارش و دما به‌عنوان محرک‌های مهم تغییرات مکانی-زمانی دبی رودخانه هندو-گانگتیک هستند. Wang et al., (2022) به مطالعه ارتباط تغییرات رواناب با شاخص‌های دور پیوند جوی در بخش میانی رودخانه یانگ‌تسه پرداختند. نتایج نشان داد، رواناب در مناطق شمالی و جنوبی به‌طور ناگهانی از سال ۲۰۰۰ تغییر کرده و همبستگی‌های قابل‌توجهی با شاخص‌های پیوندازدور EP/NP, PDO, NINO3.4 و MEIV2 مشاهده شد. علاوه بر این، نتایج مطالعه Wang et al., (2023) بر روی رودخانه زرد نشان داد که تأثیر الگوهای دور پیوندی به‌ویژه نوسان جنوبی^۱ را نمی‌توان در شکل‌گیری کاهش روند دبی نادیده گرفت.

بررسی روند تغییرات رواناب در حوزه آبخیز خررود قزوین توسط Rahbar et al., (2005) طی دوره سی‌ساله نشان داد که ارتفاع رواناب نسبت به بارش سالانه روندی فزاینده و معنی‌دار دارد. همچنین در یک مطالعه توسط Ghasemi and Khalili, (2008) ارتباط بین الگوهای جوی منطقه‌ای و جهانی با بارش زمستانی ایران بررسی شد. نتایج نشان داد، قوی‌ترین شاخص‌ها الگوی دریای شمال-خزر^۲ و نوسان مدیترانه غربی^۳ است. همچنین Abghari et al., (2013) به مطالعه روند جریان رودخانه‌ها در غرب ایران طی دوره ۴۰ ساله با تأثیر تغییرپذیری بارش پرداختند. نتایج نشان داد، روابط قوی بین دبی رودخانه‌ها و بارش در مقیاس سالانه و ماهانه بوده است. Naseri et al., (2016) در یک مطالعه به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه بهشت‌آباد، کارون شمالی پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین دمای سالانه در تمامی دوره‌ها تحت کلیه سناریوها با افزایش چشمگیری همراه بوده و به دنبال آن رواناب برای دوره‌های نزدیک و دور نیز دچار افت شدند. نتایج مطالعه

¹ ENSO

² NCP

³ WeMO

در ثانیه است (Khodabakhsh, 2015). ارزیابی دقیق و مستقیم دبی رودخانه کارون با توجه به دخالت عوامل انسانی (مانند سدها) در حوضه پایین دست سدها می تواند نتایج مطالعات دبی رودخانه ها را با چالش عدم قطعیت و احتمال خطا همراه کند.

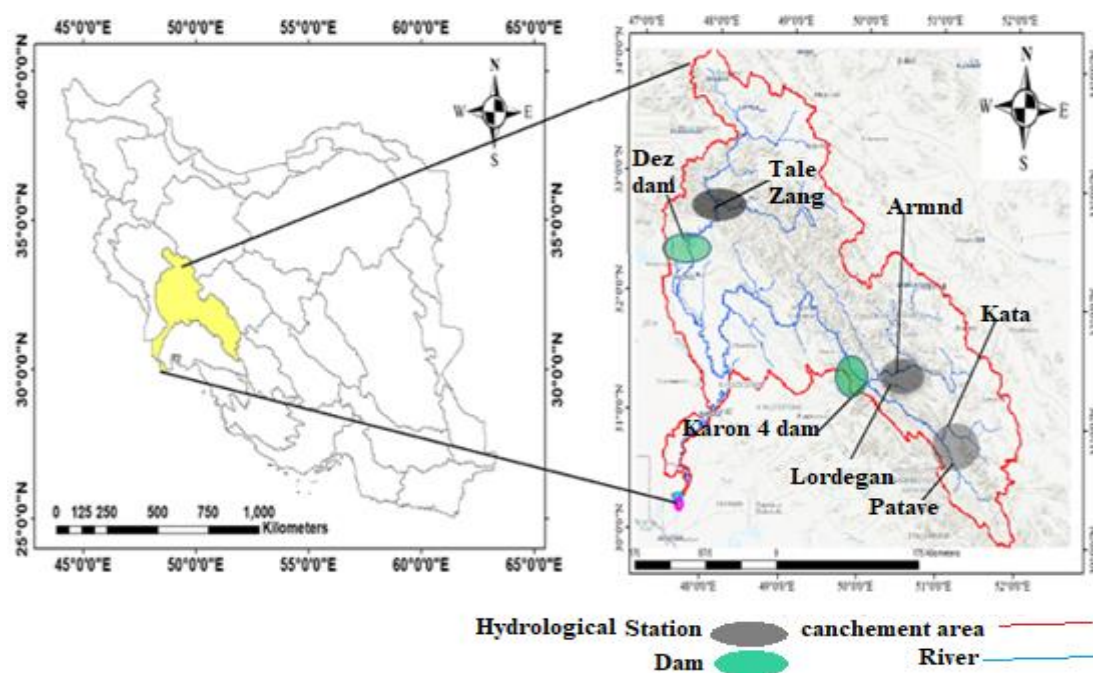
برای حل این مسأله جمع ماهانه دبی ایستگاه های هیدرومتری حوزه آبخیز کارون (تله زنگ، لردگان، ارمند، پاتاوه و کتا) با موقعیت مناسب در بالادست سدهای تأثیرگذار بر دبی رودخانه کارون با طول دوره آماری مناسب (۳۰ ساله) به عنوان نماینده دبی این رودخانه انتخاب شد. هدف از انتخاب این ایستگاه ها، کاهش خطای ناشی از نوسانات خروجی سدها و عوامل انسانی برای ثبت دقیق جریان طبیعی رودخانه کارون است (جدول ۱).

نوسانات سرشاخه های رودخانه کارون به صورت همزمان و با تأخیر مورد مطالعه قرار گرفته شده است.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه: حوزه آبخیز رودخانه کارون بزرگ در حدفاصل $32^{\circ}33'00''$ تا $32^{\circ}49'18''$ طول شرقی و $47^{\circ}59'00''$ تا $50^{\circ}49'28''$ عرض شمالی قرار دارد. این حوضه در جنوب باختری ایران واقع شده و بخش های وسیعی از استان های چهارمحال و بختیاری، خوزستان، یاسوج، کهگیلویه و بویراحمد، اصفهان، لرستان و همدان را پوشش می دهد (شکل ۱).

کارون بزرگ رودخانه ای دائمی با ۸۹۰ کیلومتر طول، ۶۷۲۵۵ کیلومتر مربع وسعت حوزه، شیب متوسط ۰/۳ درصد و میانگین آبدهی سالانه ۱۸۷۰۰ میلیون مترمکعب



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه آبخیز کارون
Fig. 1. Geographic location of the Karun Watershed

داده های مورد مطالعه: برای انجام این پژوهش، ابتدا داده های روزانه دبی مربوط به پنج ایستگاه هیدرومتری تله زنگ، لردگان، ارمند، پاتاوه و کتا برای یک دوره زمانی ۳۰ ساله (۱۹۹۳-۲۰۲۲) از وزارت نیرو دریافت و به صورت ماهانه تنظیم شد. همچنین، داده های الگوهای دور پیوند نیز طی سری زمانی ۳۰ ساله (۱۹۹۳-۲۰۲۲) به صورت

جدول ۱- مشخصات عمومی ایستگاه های هیدرومتری مورد مطالعه

Table 1. General characteristics of studied hydrometric stations

Station	Code	Latitude	Longitude
Tale Zang	21-295	32°49'18"	48°46'03"
Lordegan	21-235	31°30'34"	50°49'28"
Ormand	21-231	31°40'14"	50°46'14"
Pataveh	21-215	30°57'21"	51°15'19"
Kata	21-223	31°19'11"	51°15'32"

ناپارامتری ساده‌ای که توسط سنس توسعه داده شده برآورد نمود. ابتدا باید شیب هر جفت داده متوالی سری را از رابطه (۵) به دست آورد (Vivekanandan, 2007).

$$Q = \frac{(x_i - x_k)}{j - k} \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

در این رابطه، x_k و x_i به ترتیب مقادیر داده‌ها در زمان‌های j و k است که باهم یک واحد زمانی اختلاف دارند. Q مقادیر میانه n برآورد شده شیب نمودار سن است. همچنین مقدار B بیانگر شیب تغییرات میانگین در دبی رودخانه و مقادیر Q نیز بیانگر تخمین شیب یک‌روند خطی طی یک دوره زمانی مد نظر است. برای محاسبه شیب خط روند با روش تخمینگر سن در آزمون من-کندال و شیب خط روند سری داده‌ها با روش تخمینگر Sen بر اساس رابطه ناپارامتری زیر محاسبه شد.

$$\beta = \text{Median} \left[\frac{x_j - x_i}{j - i} \right] (i < j) \quad (6)$$

که در آن، β برآوردگر شیب خط روند X_i ، X_j به ترتیب مقادیر مشاهداتی i ام و j ام هستند. مقادیر مثبت نشان‌دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی نشان‌دهنده روند کاهشی در سری زمانی داده‌ها است (Mirabbasi and Dinpejough, 2010).

در ادامه رابطه بین ۲۸ الگوی دور پیوند (جدول ۲) مورد مطالعه و جمع ماهانه دبی به صورت ماهانه، فصلی و سالانه با استفاده از روش همبستگی پیرسون در محیط نرم‌افزار SPSS به صورت همبستگی هم‌زمان و با تأخیر یک، دو و سه ماهه انجام شده است. ضریب همبستگی پیرسون زمانی به کار می‌رود که مقیاس اندازه‌گیری هر دو متغیر مستقل و وابسته در سطح فاصله‌ای یا نسبی باشد.

این ضریب، میزان ارتباط خطی میان دو متغیر کمی را اندازه‌گیری می‌کند و مقدار آن در بازه‌ای از -۱ تا +۱ قرار دارد (Mukaka, 2012). بنابراین در این مطالعه، برای تحلیل تأثیر الگوهای دور پیوند بر دبی، از رگرسیون چندمتغیره بهره گرفته شد و از بین ۲۸ الگوی دور پیوند مورد مطالعه در این تحقیق تنها نتایج الگوهایی که رابطه معنی‌دار داشته‌اند، تحلیل شده است.

ماهانه از وب سایت سازمان ملی اقیانوسی و جوی آمریکا^۱ دریافت شد.

با توجه به این که سدهای کارون و دز تأثیر قابل توجهی بر رژیم جریان رودخانه کارون دارند، داده‌های جمع ماهانه دبی ایستگاه‌های بالادست این سدها به عنوان نماینده شرایط طبیعی رودخانه کارون در نظر گرفته شده‌اند. در ادامه برای تصحیح داده‌های گمشده، از روش رگرسیون چندگانه برای برآورد داده‌ها دبی استفاده شد.

محاسبه روند و شیب روند: برای مطالعه روند تغییرات دبی از روش ناپارامتری من‌کندال استفاده شد. این روش را نخستین بار (Mann, 1945) ارائه داده و سپس (Kendall, 1975) بهبود داده است. این روش بر پایه مرتبه داده‌ها در یک سری زمانی استوار است. این آزمون در سال ۱۹۸۸ به وسیله سازمان جهانی هواشناسی پیشنهاد شد.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

آزمون آماره‌های S میانگین صفر دارد و واریانس آن نیز از رابطه (۳) محاسبه شد.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(n+1) - \sum_{t=1}^n t(t-1)(t+1)}{n} \quad (3)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad (4)$$

بنابراین، در آزمون دوطرفه اگر رابطه $|Z| \leq Z_{\alpha/2}(n)$ در سطح اطمینان ۰/۹۵ برقرار باشد، باید فرضیه H_0 (قبول تصادفی بودن سری داده‌ها) را پذیرفت و در غیر این صورت باید فرضیه H_1 (وجود روند) را قبول کرد (Zang et al., 2003). بنابراین مقادیر Z مثبت روند صعودی و مقادیر Z منفی نشان‌دهنده روند نزولی دبی رودخانه است.

اگر روند در سری داده‌ها مشاهده شد، شیب واقعی (میزان تغییر در واحد زمان) را می‌توان با استفاده از روش

¹ <https://psl.noaa.gov/data/climateindices>

جدول ۲- شاخص‌های دور پیوند مورد مطالعه در این پژوهش طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۳-۲۰۲۲) (Omidvar, 2020)

Table 2. Studied Teleconnection Indices in this Research during the 30-Year Period (1993-2022) (Omidvar, 2020)

Abbreviation	Teleconnection Index	Abbreviation	Teleconnection Index
NOA	North Atlantic Oscillation	SOI	Southern Oscillation Index
EA	East Atlantic Pattern	PBO	Pacific-Basin Oscillation
WP	Western Pacific Pattern	PDO	Pacific Decadal Oscillation
WHWP	Western Hemisphere Warm Pool	ONI	Oceanic Niño Index
PNA	Pacific-North American Pattern	NINO3.4	Niño 3.4 Region Index
SCA	Scandinavia-Caspian Sea Pattern	NINO4	Niño 4 Region Index
TNH	Tropical-Northern Oscillation	NINO3.1	Niño 3.1 Region Index
AAO	Antarctic Annular Mode	NINO1	Niño 1 Region Index
WARMPOOL	Tropical Warm Pool Pattern	MEI.v2	Multivariate ENSO Index (Version 2)
SOLAR_FLUX	Solar Radiative Flux	ESPI	Eastern Pacific SST Index
GMSST	Global Mean Sea Surface	EPO	Eastern Pacific Oscillation
AMO	Atlantic Oscillation		
AMM	Atlantic Meridional Mode	RMM1	Convective Anomalies in the Indian
TSA	Tropical South Atlantic Index	RMM2	Convective Anomalies in the Indian-Pacific
TNA	Tropical North Atlantic Index		Region (90° phase shift)

نتایج و بحث

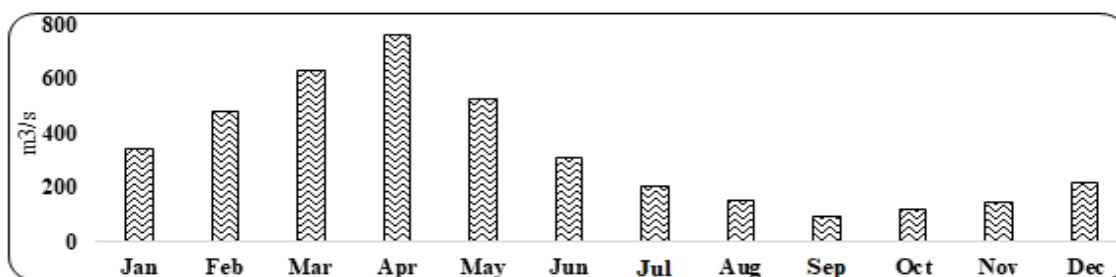
توصیف وضعیت آبدهی ایستگاه‌های مورد مطالعه:

به‌طور میانگین تغییرات دبی ایستگاه‌های تله‌زنگ، لردگان، ارمند، پاتاوه و کتا به‌عنوان ایستگاه‌های حوضه بالادست سدهای مستقر بر رودخانه کارون نشان از نوسانات قابل‌توجه طی سری زمانی سی‌ساله (۲۰۲۲ تا ۱۹۹۳) دارد. این نوسانات عمدتاً به‌دلیل تغییرات در میزان بارندگی، ذوب برف و تبخیر، به‌دلیل نوسانات الگوهای دور پیوند منطقه‌ای و جهانی رخ می‌دهد.

به‌طور میانگین دبی سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه برابر با ۳۳۱ مترمکعب در ثانیه بوده که حداکثر آن در ماه آوریل برابر با ۷۶۰ مترمکعب و حداقل آن در ماه سپتامبر به میزان ۹۵ مترمکعب در ثانیه است (شکل ۲). بنابراین در طول سال، دبی ماه آوریل ۱۹ درصد و ماه سپتامبر نیز در حدود دو درصد از حجم سالانه دبی را به خود

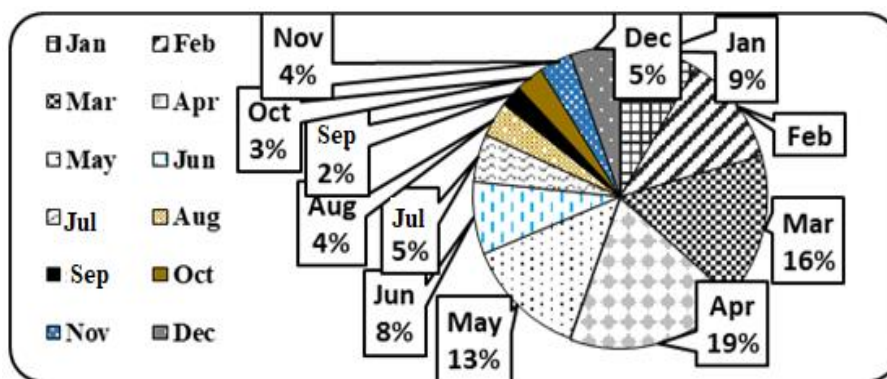
اختصاص داده است. ماه‌های مارس، می و فوریه نیز در رده بعدی بیشترین دبی قرار دارند (شکل ۳). در سایر ماه‌های سال با توجه به دوری دوره بارشی و افزایش تبخیر و تعریق دبی بسیار کاهش می‌یابد.

بررسی فصلی دبی نیز نشان داد که در ایستگاه‌های مورد مطالعه مجموع دو فصل تابستان و پاییز دبی پایین‌تری ثبت شده به‌طوری‌که میانگین آن به‌ترتیب به ۱۵۰ و ۱۶۱ مترمکعب در ثانیه با مجموع ۲۳ درصد دبی سالانه رسیده است. همچنین در فصل بهار دبی برابر با ۵۳۳ مترمکعب در ثانیه به مقدار ۴۰ درصد از دبی سالانه است. در فصل زمستان نیز دبی ایستگاه موردنظر با توجه به قرارگیری زاگرس در فصل بارشی خود مقادیر بالایی را به ثبت رسانده و به ۴۸۳ مترمکعب در ثانیه می‌رسد و این مقدار برابر با ۳۷ درصد از حجم دبی سالانه است (شکل ۳).



شکل ۲- جمع ماهانه دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون (ایستگاه‌های تله‌زنگ، لردگان، ارمند، پاتاوه و کتا) طی سری زمانی ۱۹۹۳-۲۰۲۲

Fig. 2. Monthly discharge of the Karun River's main tributaries (Telezang, Lordegan, Armand, Pataveh, and Kata) during the 1993-2022 time series



شکل ۳- درصد ماهانه دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون (تله‌زنگ، لردگان، ارمند، پاتاوه و کتا) طی سری زمانی ۱۹۹۳-۲۰۲۲
 Fig. 3. Monthly percentage of discharge for the Karun River's main tributaries (Telezang, Lordegan, Armand, Pataveh, and Kata) during the 1993-2022 time series

در فصل تابستان به دلیل کاهش وسعت پوشش برفی و همچنین دور شدن حوزه آبخیز کارون از دوره‌های بارشی میانگین دبی طی دوره مورد مطالعه بسیار کاهش یافته و به طور میانگین در این فصل دبی برابر با $150/3$ مترمکعب در ثانیه است که نسبت به میانگین سالانه بسیار پایین است. حداکثر دبی ثبت شده در فصل تابستان مربوط به سال ۱۹۹۳ به میزان 348 مترمکعب در ثانیه و حداقل آن مربوط به سال 2021 به میزان 87 مترمکعب در ثانیه است. اما همچنان روند کاهشی دبی در این فصل با جهش منفی ($Z=-3/71$) با کاهش سالانه $3/8$ مترمکعب در ثانیه مشهود است (جدول ۳ و شکل ۴).

با آغاز دوره بارشی در فصل پاییز در حوضه مورد مطالعه و همچنین کاهش دما به طور میانگین دبی در فصل پاییز نسبت به فصل تابستان افزایش یافته و به 161 مترمکعب در ثانیه رسیده است. اما همچنان نتایج نشان دهنده روند کاهشی دبی این فصل همانند دیگر فصل‌های سال است که با جهش منفی ($Z=-3/7$) و کاهش $2/9$ مترمکعب در ثانیه دبی در هر فصل همراه بوده است (جدول ۳ و شکل ۴). در یک مطالعه با بررسی روند تغییرات آبدهی رودخانه‌های شمال حوضه دز نشان داد در مقیاس سالانه در بیش از ۷۰ درصد از ایستگاه‌ها روند دبی نزولی و در مقیاس فصلی بیشترین و کمترین تغییرات منفی روند مربوط به فصل بهار و زمستان است (Torabi and Emamgholizadeh, 2015).

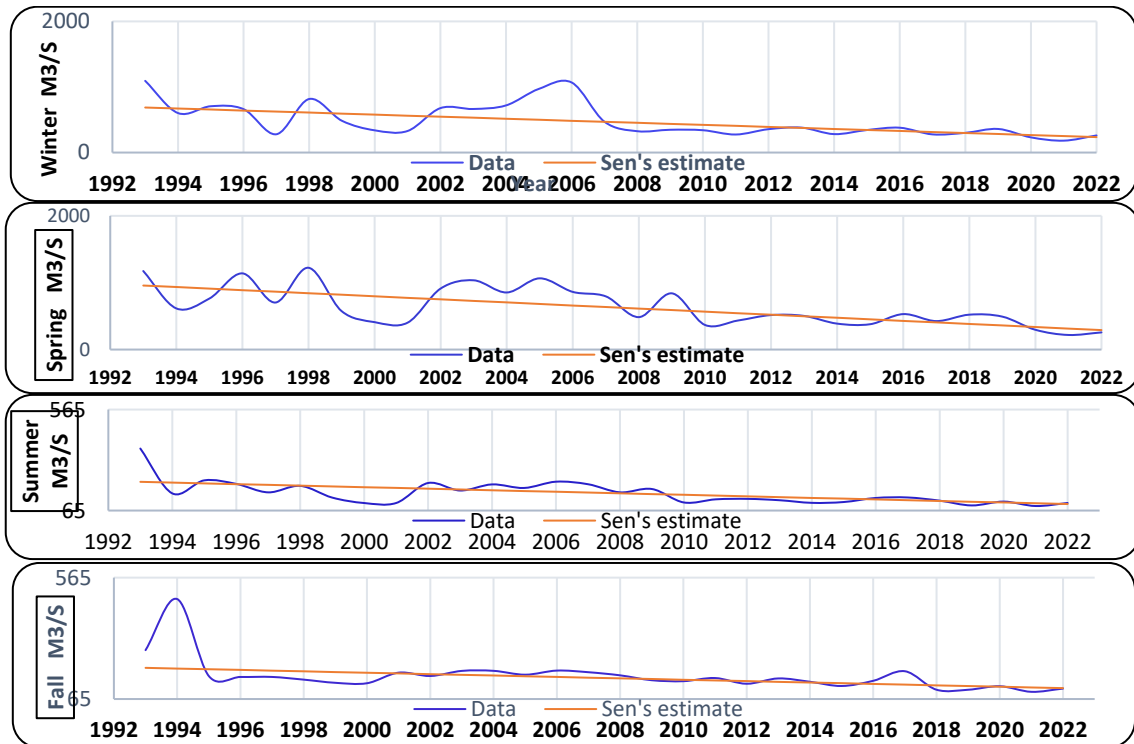
طبق نتایج به دست آمده مجموع متوسط دبی فصل زمستان در سرشاخه‌های رودخانه کارون (تله‌زنگ، لردگان، ارمند، پاتاوه و کتا) برابر با 483 مترمکعب در ثانیه است. حداکثر آن به طور متوسط در سال ۱۹۹۳ به 1093 مترمکعب در ثانیه و حداقل آن در سال ۱۹۹۷ به 279 مترمکعب در ثانیه رسیده است. این شرایط تأییدکننده نوسان شدید دبی این فصل طی سری زمانی مورد مطالعه است. بررسی نتایج روند من‌کندال نشان داد، به طور میانگین دبی در این فصل با جهش منفی ($-3/53$) و کاهش $15/5$ مترمکعب در ثانیه با توجه به خروجی تایل سن (Q) در هر سال همراه بوده است (جدول ۳ و شکل ۴).

فصل بهار یکی از پر نوسان‌ترین فصل‌های سال در رابطه با میانگین متوسط دبی در سرشاخه‌های رودخانه کارون است. با توجه به نزدیکی این فصل به دوره بارشی و نیز افزایش میانگین دما و شروع ذوب گستره پوشش برفی در ارتفاعات حوزه آبخیز، دبی رودخانه مقدار بالایی را ثبت کرده است. به طور کلی میانگین دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون در این فصل در حدود 639 مترمکعب بر ثانیه رسیده است. همچنین، حداکثر دبی ثبت شده برابر با 1223 مترمکعب بر ثانیه در سال ۱۹۹۸ و حداقل آن در سال 2021 برابر با 218 مترمکعب بر ثانیه بوده است. اختلاف بسیار شدید بین حداکثر و حداقل دبی، تأییدکننده نوسان شدید دبی در فصل بهار است. در این فصل نیز روند دبی با جهش منفی ($Z=-3/9$) و کاهش $22/9$ مترمکعب در ثانیه (Q) در هر سال مشخص است (جدول ۳ و شکل ۴).

جدول ۳- نتایج روند دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون در فصل‌های مختلف با روش من‌کندال و تایل سن طی سری زمانی (۱۹۹۳-۲۰۲۲)

Table 3. Trend analysis results of headwater discharge of Karun River in different season using Mann-Kendall and Sen's slope estimator methods during the time series (1993-2022)

Time series	Test Z	Sig.	Q	B
Winter	-3.53	*	-15.5	514
Spring	-3.9	*	-22.9	957
Summer	-3.71	*	-3.8	183
Fall	-3.7	*	-2.9	192



شکل ۴- برازش نمودار خط سن دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون طی سری زمانی (۱۹۹۳-۲۰۲۲) در فصل‌های زمستان، بهار، تابستان و پاییز (به ترتیب از بالا به پایین)

Fig. 4. Fitting of discharge-age trend lines for the headwater tributaries of the Karun River over the time series (1993-2022) in winter, spring, summer, and autumn (from top to bottom, respectively)

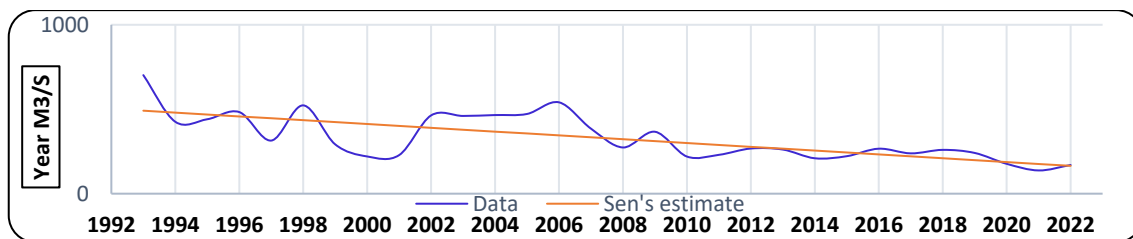
بررسی همبستگی الگوهای دور پیوندی و دبی در ماه‌های فصل زمستان: ارتباط بین الگوهای دور پیوند با مجموع دبی ایستگاه‌های منتخب بالادست رودخانه کارون طی سری زمانی مورد مطالعه مورد واکاوی قرار گرفت طبق نتایج بین برخی از الگوهای دور پیوند و دبی همبستگی وجود دارد. از جمله این موارد در ماه ژانویه گرایش الگوی دور پیوند EA به فاز مثبت که با تقویت سیستم پرفشار سیبری و افزایش توده‌های هوای سرد و خشک بر روی آسیای شرقی همراه است.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که جمع میانگین دبی سالانه سرشاخه‌های رودخانه کارون در طول دوره مورد مطالعه، مشابه سری زمانی فصلی، دارای نوسانات شدیدی در طول سال بوده است. به طور کلی، روند سالانه دبی همانند سری زمانی ماهانه و فصلی در سرشاخه‌های رودخانه کارون نشان‌دهنده روند منفی معنی‌داری ($Z = -4/1$) با کاهش $11/3$ مترمکعب بر ثانیه دبی در هر سال همراه بوده است. مقدار بالای شیب روند ($B = 534$) مترمکعب بر ثانیه بیانگر شدت بالای نوسانات سالانه دبی در حوضه مورد مطالعه است. (جدول ۴ و شکل ۵).

جدول ۴- نتایج روند سالانه دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون با روش من‌کندال و تایل سن طی دوره (۱۹۹۳-۲۰۲۲)

Table 4. Results of the annual trend of Karun River tributary discharge using the Mann-Kendall and Theil-Sen methods during the period (1993-2022)

Time series	Test Z	Signific.	Q	B
Annual Variations in River Discharge	-4.1	*	-11.3	534



شکل ۵- برازش نمودار خط سن سالانه دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون طی سری زمانی (۱۹۹۳-۲۰۲۲)

Fig. 5. Trend line fitting of the annual discharge of Karun River tributaries during the 1993-2022 time series

ماه فوریه داشته است. بنابراین گرایش شاخص GMSST و الگوی WARMPOOL به فاز مثبت با کاهش دبی در حوزه آبخیز سرشاخه‌های کارون همراه است (جدول ۵). در ماه مارس نیز بین الگوهای دور پیوند GMSST به صورت هم‌زمان و با تأخیر سه ماهه، بین الگوهای دور پیوند نوسان جنوبی SOI و TNH با تأخیر یک ماهه با دبی حوضه مورد مطالعه همبستگی منفی معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ دارد. بنابراین نوسانات دمای سطح دریا در سطح جهانی (GMSST) و نوسانات جوی در مناطق گرمسیری (SOI و TNH) با گرایش به فاز مثبت، می‌توانند بر کاهش دبی در ماه مارس به صورت هم‌زمان و با تأخیر تأثیر نسبتاً قوی داشته باشد.

همچنین در این ماه بین الگوی دور پیوند WARMPOOL با دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون همبستگی منفی با تأخیر سه ماهه در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ ($p < 0.01$) مشاهده شد. به عبارت دیگر، تغییرات در الگوی سه ماه قبل، به طور معنی‌داری با تغییرات دبی سرشاخه رودخانه کارون در این ماه رابطه منفی دارد. در رابطه با الگوی PDO همبستگی معنی‌دار به صورت هم‌زمان در سطح اطمینان ۰/۰۱ و با تأخیر یک ماهه در سطح اطمینان ($p < 0.05$) در ماه مارس مشاهده شد.

بنابراین تغییرات PDO در ماه قبل، به طور معنی‌داری با تغییرات دبی این ماه ارتباط دارد. در رابطه با الگوی MEVE2 همبستگی مثبت معنی‌دار به صورت هم‌زمان در سطح معنی‌داری ($p < 0.01$) و با تأخیر یک و دو ماهه در سطح معنی‌داری ($p < 0.05$) مشاهده شد. بنابراین تغییرات MEVE2 به صورت هم‌زمان و با تأخیر دو ماهه، به طور معنی‌داری با تغییرات افزایشی دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون در این ماه ارتباط مثبت دارد (جدول ۵).

با تأخیر سه ماهه همبستگی مثبت معنی‌داری در سطح اطمینان ۰/۰۵ دارد که به دنبال آن بر روی رژیم هیدرولوژیکی سرشاخه‌های رودخانه کارون تأثیر افزایشی دارد. همچنین بین الگوی دور پیوند اقیانوس آرام-آمریکای شمالی (PNA) با تأخیر یک ماهه، با الگوهای EPO (تغییرات دمای سطح آب در اقیانوس آرام شرقی) و MEVE2 (نوسانات فشار در منطقه مدیترانه شرقی) با تأخیر سه ماهه در سطح اطمینان ۰/۰۵ همبستگی مثبت معنی‌دار مشاهده شد.

از طرفی در ماه ژانویه الگوهای دور پیوند PNA، AMO، EPO، و MEVE2 با تأخیر سه ماهه، WARMPOOL با تأخیر یک و دو ماهه، GMSST (میانگین دمای سطح دریا در سطح جهانی) با تأخیر یک تا سه ماهه، SOI (شاخص نوسانات جنوبی) با تأخیر دو ماهه، RMM2 با تأخیر یک ماهه در سطح اطمینان ۰/۰۵ و الگوهای دور پیوند WARMPOOL با تأخیر دو و سه ماهه و الگوی دور پیوند RMM2 به صورت هم‌زمان در سطح اطمینان ۰/۰۱ همبستگی منفی بسیار قوی و معنی‌داری با دبی رودخانه کارون داشته است. بنابراین تغییر در این الگوها و گرایش به فاز مثبت خود، مجموع دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون کاهشی می‌شود. طبق نتایج در ماه ژانویه الگوهای دور پیوند با تأخیر سه ماهه بیشترین تأثیرگذاری را با دبی داشته است (جدول ۵).

در ماه فوریه تعداد الگوهای دور پیوند که با دبی همبستگی معنی‌داری داشته است به حداقل رسیده و به صورت هم‌زمان بین شاخص دور پیوند EPO و با تأخیر دو ماهه با شاخص RMM2 در سطح اطمینان ۰/۰۵ همبستگی منفی معنی‌داری مشاهده می‌شود. بنابراین گرایش به فاز مثبت EPO و RMM2 نیز دبی کاهش می‌یابد. اما در سطح اطمینان ۰/۰۱ در این ماه بین الگوی دور پیوند WARMPOOL با تأخیر دو و سه ماهه و شاخص GMSST با دبی همبستگی منفی معنی‌داری در

جدول ۵- همبستگی بین شاخص‌های دور پیوند با دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس طی سری زمانی (۱۹۹۳-۲۰۲۲) به‌صورت هم‌زمان و با تأخیر یک تا سه ماه

Table 5. Correlation between teleconnection indices and headwater discharge of Karun River in January, February, and March during the time series (1993-2022) simultaneously and with a lag of 1 to 3 months.

With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	Mar	With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	Feb	With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	Jan	Teleconnection
0.07	0.17	0.24	-0.2	-0.04	0.27	0.18	0.22	.37*	0.16	0.34	0.10	EA
0.09	-0.2	0.18	0.31	-0.3	0.32	-0.2	0.17	-.40*	-0.	.39*	-0.3	PNA
-.56**	-0.34	-0.10	-0.1	-.50**	-.46**	-.39*	-0.26	-.67**	-.50**	-.45*	-.44*	WARM
-.38*	-0.3	-0.20	.39*	-.47**	-0.30	-0.36	-0.2	-.38*	-.46*	-.42*	-0.3	GMSST
-0.10	-0.10	-0.05	0.07	-0.02	-0.13	-0.1	-0.09	-.37*	-0.2	-0.3	-0.1	AMO
-0.12	-0.30	-.55**	-0.	-0.12	-0.2	-0.1	-0.27	-0.35	-0.34	-.39*	-0.3	SOI
-0.03	0.19	0.25	0.30	-0.09	-0.12	0.01	.376*	.39*	0.35	0.31	0.35	EPO
-0.21	-0.3	0.14	0.1	-0.2	-.37*	-0.34	-0.01	-0.06	-0.11	-.40*	-.54**	RMM2
-0.17	-0.24	-.44*	0.24	-0.23	-0.03	-0.3	-0.18	0.01	-0.04	0.02	-0.2	TNH
0.14	0.25	.37*	.48*	0.12	0.13	0.22	0.29	0.28	0.21	0.25	0.20	PDO
-0.12	0.33	0.35	.36*	0.07	0.06	0.15	0.16	0.25	0.25	0.23	0.22	ONI
-0.01	.41*	.45*	.47*	0.20	0.13	0.28	0.29	.39*	0.35	0.31	0.35	MEVE2

* Significant at the 0.05 level, and ** significant at the 0.01 level

ماهه و بین الگوی SOI با تأخیر یک ماهه همبستگی منفی معنی‌داری وجود دارد (جدول ۶).

بنابراین اگر در ماه می، الگوهای ذکرشده مقادیر بالایی داشته باشند، انتظار می‌رود دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون در این ماه کاهش یابد. از طرفی تأثیر الگوی SOI بر دبی رودخانه با یک ماه تأخیر رخ می‌دهد. به‌عبارت‌دیگر وضعیت الگوی SOI در ماه قبل آوریل پیش‌بینی‌کننده دبی حوضه مورد مطالعه در ماه می است. این شرایط در سطح اطمینان ۰/۰۱ برای الگوهای NCP با تأخیر دو ماهه، الگوی GOLBAL به‌صورت هم‌زمان و با تأخیر یک و دو ماهه نیز همبستگی منفی معنی‌داری داشته است.

بنابراین، احتمال اینکه همبستگی‌ها به‌صورت تصادفی رخ داده باشند، بسیار کم است. همچنین در این ماه بین الگوهای دور پیوند PNA با تأخیر یک ماهه، بین الگوی EPO به‌صورت هم‌زمان و تأخیر سه ماهه و با الگوی RMM1 همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شد.

نتایج تحلیل‌های آماری در ماه ژوئن، نشان داد که همبستگی مثبت و معنی‌داری بین دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون و برخی از الگوهای دور پیوند در سطح اطمینان ۰/۰۵ مانند الگوهای EA و MEVE2 به‌صورت هم‌زمان وجود دارد. علاوه بر این، با یک ماه تأخیر، بین الگوهای NCP، PDO، ONI، NINO3.4، MEVE2 و RMM1 نیز تأثیر مشابهی مشاهده شد. وجود ارتباط قوی

بررسی همبستگی الگوهای دور پیوندی و دبی در

ماه‌های فصل بهار: در ماه آوریل مشخص شد بین الگوی دور پیوند TNH با تأخیر دو ماهه، بین الگوی دور پیوند GOLBAL (دمای سطح دریاهای جهانی) به‌صورت هم‌زمان و تأخیر یک ماهه و بین الگوی SOI به‌صورت هم‌زمان همبستگی منفی معنی‌داری در سطح اطمینان ۰/۰۵ با دبی سرشاخه‌های اصلی حوزه آبخیز کارون مشاهده می‌شود. بنابراین مقدار شاخص‌های ذکرشده (SOI، GOLBAL و TNH) در فاز مثبت خود با کاهش دبی همراه می‌شود و بالعکس گرایش این شاخص‌ها به فاز منفی با افزایش دبی همراه است.

همچنین در این ماه الگوهای NONO1 با تأخیر دو ماهه و نوسانات الگوی MEVE2 به‌صورت هم‌زمان و تأخیر سه ماهه با دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون همبستگی مثبت معنی‌داری در سطح اطمینان ۰/۰۵ داشته است. به‌عبارت‌دیگر افزایش در مقدار NONO1 در دو ماه قبل از آوریل با افزایش دبی همراه خواهد شد. همچنین اگر مقدار شاخص MEVE2 در همین ماه و یا سه ماه قبل به فاز مثبت گرایش پیدا کند، انتظار می‌رود دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون در این ماه افزایش یابد و برعکس، اگر مقدار این شاخص‌ها کاهش یابد، انتظار می‌رود دبی نیز کاهش یابد. همچنین در ماه می به‌صورت هم‌زمان در سطح اطمینان ۰/۰۵ بین دبی و الگوهای WARMPOOL به‌صورت هم‌زمان و با تأخیر دو و سه

یک تا سه ماهه داشته است. علاوه بر این، شاخص SOI نیز با تأخیر دو ماهه همبستگی منفی معنی‌داری مشاهده شده است. از طرفی در سطح اطمینان ۰/۰۱ نیز الگوهای دور پیوند NCP با تأخیر سه ماهه و شاخص GLOBAL به صورت هم‌زمان و با تأخیر یک تا سه ماهه، بالاترین همبستگی منفی معنی‌دار را در میان شاخص‌های دور پیوند مورد بررسی با دبی این ماه به ثبت رسانده‌اند. به عبارت دیگر همبستگی منفی آن نشان می‌دهد که افزایش فعالیت این الگو می‌تواند منجر به کاهش جریان در سرشاخه‌های رودخانه کارون شود (جدول ۶).

و مثبت در سطح اطمینان ۰/۰۱ با الگوی PDO به صورت هم‌زمان نیز مشاهده شد. به عبارت دیگر، نتایج به دست آمده حاکی از آن است که تغییرات الگوهای دور پیوند ذکر شده به فاز مثبت، چه به صورت هم‌زمان و چه با تأخیر زمانی، نقش قابل توجهی در نوسانات افزایشی دبی در این بازه زمانی ایفا می‌کنند (جدول ۶).

بررسی‌ها نشان داد که برخی از الگوهای دور پیوند نیز همبستگی منفی معنی‌داری با دبی سرشاخه‌های رود کارون در سطح اطمینان ۰/۰۵ دارند. از جمله این الگوها می‌توان به شاخص WARMPOOL اشاره کرد که همبستگی منفی معنی‌داری به صورت هم‌زمان و با تأخیر

جدول ۶- همبستگی بین شاخص‌های دور پیوند با دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون در ماه‌های آوریل، می، ژوئن طی سری زمانی (۲۰۲۲-۱۹۹۳) به صورت هم‌زمان و با تأخیر یک تا سه ماه

Table 6. Correlation between teleconnection indices and headwater discharge of Karun River in April, May, and June during the time series (1993-2022) simultaneously and with a lag of 1 to 3 months

With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	Jun	With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	May	With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	Apr	Teleconnection
-0.10	0.04	-0.1	.39*	0.32	-0.12	0.14	0.01	0.09	0.26	-0.20	0.17	EA
0.09	.45*	0.36	0.11	0.15	-0.02	.432*	0.17	-0.08	0.06	-0.07	0.35	PNA
-.74**	0.10	.38*	0.1	0.10	-.54**	0.11	0.2	0.08	0.10	-0.15	0.1	NCP
0.21	-0.02	0.18	0.28	-0.22	0.17	0.03	0.18	-0.10	-.36*	-0.03	0.08	TNH
-.44*	-.44*	-.46*	-.39*	-.42*	-.37*	-0.34	-.42*	-0.35	-0.18	-0.20	-0.18	WARMPOOL
-.52**	-.52**	-.51**	.52**	-0.32	-.53**	-.48**	-.47**	-0.34	-0.16	-.43*	-.39*	GOLBAL
-0.21	-.45*	-0.35	-0.1	-0.13	-0.2	-.44*	-0.3	-0.31	-0.21	-0.30	-.38*	SOI
0.21	0.26	.39*	.47**	0.13	0.16	0.22	0.33	0.21	0.27	0.30	0.28	PDO
0.24	0.32	.38*	0.33	0.18	0.22	0.29	0.35	0.25	0.25	0.27	0.30	ONI
0.19	0.28	.36*	0.25	0.19	0.17	0.24	0.32	0.25	0.26	0.21	0.22	NINO3.4
0.15	0.10	0.10	0.11	0.23	0.13	0.14	0.21	0.36	.366*	0.28	0.15	NONO1
0.27	0.34	.43*	.42*	0.28	0.25	0.31	0.35	.365*	0.34	0.34	.371*	MEVE2
0.16	0.09	0.32	0.15	.459*	0.15	0.13	.374*	0.20	0.31	0.35	-0.01	EPO
0.30	0.36	.45*	0.20	0.27	0.35	0.27	.434*	0.16	0.31	0.26	0.29	RMM1

* Significant at the 0.05 level, and ** significant at the 0.01 level

با تأخیر یک و دو ماهه، با الگوی PNA با تأخیر دو و سه ماهه و با الگوهای NCP، PDO و با الگوی ONI با تأخیر دو ماهه مشاهده شد. همچنین در سطح اطمینان ۰/۰۱ بین الگوی دور پیوند PDO به صورت هم‌زمان و با تأخیر یک ماهه همبستگی مثبت معنی‌داری مشاهده شد. از طرفی همبستگی مثبت معنی‌داری در سطح اطمینان ۰/۰۵ بین دبی و شاخص‌های دور پیوند ماه ژوئیه به صورت هم‌زمان با شاخص EPO و با تأخیر یک و دو ماهه با شاخص MEVE2، با تأخیر دو و سه ماهه برای شاخص PNA و همچنین با تأخیر دو ماهه برای شاخص‌های NCP، PDO و ONI تأیید شده است (جدول ۷).

این نتایج تأییدکننده نقش قابل توجه فاز مثبت این شاخص‌ها در تأثیرگذاری افزایشی دبی بر سرشاخه‌های

بررسی همبستگی الگوهای دور پیوندی و دبی در ماه‌های فصل تابستان: نتایج به دست آمده برای ماه ژوئیه نشان داد که در سطح اطمینان ۰/۰۵ همبستگی منفی معنی‌داری بین دبی و برخی از الگوهای دور پیوندی از جمله WARMPOOL به صورت هم‌زمان و با تأخیر یک تا سه ماهه و با الگوی SOI با تأخیر سه ماهه مشاهده شد. علاوه بر این، در سطح اطمینان ۰/۰۱ نیز شاخص GMSST بالاترین میزان همبستگی منفی را به صورت هم‌زمان و با تأخیر یک تا سه ماهه داشته است.

به عبارت دیگر فاز منفی این شاخص‌ها منجر به کاهش دبی سرشاخه‌های کارون در حوزه آبخیز مورد مطالعه می‌شود. همچنین در این ماه همبستگی مثبت معنی‌دار در رابطه با الگوی EPO به صورت هم‌زمان، با الگوی MEVE2

با تأخیر یک و دو ماهه و با الگوی دور پیوند TSA با تأخیر یک ماه تأیید شده است.

در نهایت، همبستگی‌های منفی نشان می‌دهند که تغییرات در الگوهای دور پیوند ذکر شده می‌توانند باعث کاهش دبی در سرشاخه‌های حوزه آبخیز رودخانه کارون در ماه سپتامبر شود. همچنین همبستگی مثبت معنی‌دار بین الگوهای دور پیوند EA که به نوسانات جو و اقیانوس اطلس مربوط می‌شود به صورت هم‌زمان، با الگوی WP که مربوط به مناطق گرمسیری است با تأخیر یک ماهه، با الگوی PDO مربوط به نوسانات دمای اقیانوس آرام با تأخیر یک و سه ماهه و با الگوی EPO مربوط به نوسانات اقیانوس آرام شرقی با تأخیر یک و دو ماهه مشاهده شد از طرفی در سطح اطمینان ۰/۰۱ نیز الگوهای دور پیوند PDO با تأخیر دو ماهه و EPO با تأخیر یک ماهه همبستگی مثبت معنی‌داری را ثبت کرده‌اند. به عبارت دیگر با گرایش به فاز مثبت، این الگوها دبی نیز افزایش پیدا می‌کند. این تأثیرات فوری الگو برافزایش دبی به دلیل تقویت سیستم‌های بارشی و حرارتی منطقه است. (جدول ۷).

بررسی همبستگی الگوهای دور پیوندی و دبی در ماه‌های فصل پاییز: در ماه‌های فصل پاییز مقادیر همبستگی بین الگوهای دور پیوندی و دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون به شدت افزایش یافته است. در ماه اکتبر در سطح اطمینان ۰/۰۵ همبستگی مثبت و معنی‌داری بین الگوی دور پیوند WP (تغییرات دمای مناطق گرمسیری اقیانوس‌های اطلس و آرام) به صورت هم‌زمان و با تأخیر دو ماهه، با الگوی نوسانات قطبی جنوب (AAO) که بر الگوهای جوی و بارش‌ها تأثیر دارد با تأخیر دو ماهه و با شاخص تغییرات فعالیت خورشیدی (SOLAR) به‌ویژه در زمینه تابش‌های خورشیدی با تأخیر یک ماهه همبستگی معنی‌دار ایجاد شده است. همچنین در این ماه در سطح اطمینان ۰/۰۱ همبستگی مثبت معنی‌داری با نوسانات مادن-جولیان (RMM1) که به تغییرات فصلی و الگوهای بارشی در مناطق استوایی مرتبط است مشاهده شد.

در مجموع، تغییر در الگوهای دور پیوند ذکر شده ماه اکتبر به فاز مثبت موجب افزایش دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون در این ماه می‌شود. همچنین در ماه اکتبر همبستگی منفی معنی‌داری در سطح اطمینان ۰/۰۵ بین

رودخانه مورد مطالعه دارد. اما در ماه آگوست، بین دبی و الگوهای دور پیوند PNA (الگوی نوسانات اقیانوس آرام شمالی) به صورت هم‌زمان، با الگوی WARMPOOL و TS (الگوی نوسانات منطقه گرمسیری) به صورت هم‌زمان و با تأخیر یک و سه ماهه، بین الگوی GMSST با تأخیر دو ماهه و با الگوی SOI با تأخیر یک ماهه همبستگی منفی معنی‌داری در سطح اطمینان ۰/۰۵ داشته است.

همچنین در سطح اطمینان ۰/۰۱ همبستگی منفی معنی‌دار بین الگوی GMSST به صورت هم‌زمان و با تأخیر یک و سه ماهه، بین الگوی TSA با تأخیر دو ماهه و با الگوی نوسان جنوبی SOI با تأخیر سه ماهه همبستگی منفی بسیار قوی مشاهده گردید. بنابراین این الگوها با گرایش به فاز مثبت خود تأثیر معکوسی بر کاهش دبی داشته‌اند. همچنین الگوی دور پیوند EA با تأخیر یک و دو ماهه، الگوی NCP به صورت هم‌زمان و الگوی دور پیوند RMM1 با تأخیر سه ماهه در سطح اطمینان ۰/۰۵ و الگوهای دور پیوند RMM1 به صورت هم‌زمان و RMM2 با تأخیر سه ماهه همبستگی مثبت معنی‌داری را با دبی حوزه آبخیز مورد مطالعه ثبت کرده‌اند (جدول ۷).

بنابراین الگوهای دور پیوند RMM1 و RMM2 در فاز مثبت خود هم به صورت هم‌زمان و هم با تأخیر ۳ ماهه با دبی افزایشی سرشاخه حوزه آبخیز کارون همراه می‌شود. این نشان‌دهنده دو نوع تأثیر، کوتاه‌مدت و بلندمدت، از نوسانات مادن-جولیان بر دبی رودخانه حوزه مورد مطالعه است به عبارت دیگر همبستگی مثبت معنی‌دار نشان می‌دهد که گرایش شاخص‌های ذکر شده به فاز مثبت باعث افزایش دبی می‌شود. این موضوع بیانگر تأثیر مستقیم و هم‌جهت این الگوها بر جریان آب در سرشاخه‌های رودخانه کارون است.

در ماه سپتامبر مقادیر همبستگی منفی بین دبی و الگوهای دور پیوند در سطح اطمینان ۰/۰۱ به حداکثر مقدار خود در طول ماه‌های گرم سال رسیده است به صورتی که الگوهای دور پیوند WARMPOOL به صورت هم‌زمان و با تأخیر یک ماهه، الگوی GMSST به صورت هم‌زمان و با تأخیر یک تا سه ماهه، با الگوهای AMO و TNA به صورت هم‌زمان با دبی همبستگی منفی داشته است. همچنین در سطح اطمینان ۰/۰۵ همبستگی منفی معکوسی در رابطه با نوسانات الگوهای دور پیوند WARMPOOL با تأخیر دو و سه ماهه، با الگوی AMO

همچنین در سطح اطمینان ۰/۰۱ همبستگی منفی بسیار قوی در رابطه با الگوهای دور پیوند PNA به صورت همزمان و با الگوی GMSST با تأخیر دو ماهه مشخص شده است. همبستگی منفی بسیار قوی این شاخص‌ها نشان‌دهنده ارتباط مستقیم و قدرتمند با کاهش دبی رودخانه در این ماه است. (جدول ۸).

دبی و الگوهای دور پیوند از جمله PNA با تأخیر یک و دو ماهه، الگوی WARMPOOL با تأخیر یک تا سه ماهه، شاخص GMSST با تأخیر یک و سه ماهه، با الگوی AMO با تأخیر دو و سه ماهه، الگوی TSA به صورت همزمان و با تأخیر یک تا سه ماهه و با شاخص نوسان جنوبی (SOI) با تأخیر سه ماهه همبستگی معنی‌دار تأیید شد.

جدول ۷- همبستگی بین شاخص‌های دور پیوند با دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون در ماه‌های ژوئیه، آگوست، سپتامبر طی سری زمانی (۱۹۹۳-۲۰۲۲) به صورت همزمان و با تأخیر یک تا سه ماه

Table 7. Correlation between teleconnection indices and headwater discharge of Karun River in July, August, and September during the time series (1993-2022) simultaneously and with a lag of 1 to 3 months

With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	Sep	With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	Aug	With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	July	Teleconnection
0.36	0.16	0.2	.40*	0.20	.42*	.42*	0.10	0.03	0.00	0.36	0.17	EA
0.18	0.13	.40*	-0.01	0.23	0.34	0.01	0.30	-0.04	0.32	0.15	0.10	WP
0.09	0.04	-0.3	-0.15	0.24	-0.34	0.04	-.43*	.45*	.36*	0.10	0.06	PNA
0.07	-0.2	0.2	0.10	-0.15	0.09	0.04	.39*	0.09	.38*	0.08	-0.23	NCP
-.40*	-.43*	-.50**	-.55**	-.40*	-0.3	-.41*	-.45*	-.42*	-.46*	-.37*	-.41*	WARMPOOL
-.52**	-.55**	-.58**	-.67**	-.54**	-.43*	-.54**	-.52**	-.50**	-.51**	-.52**	-.54**	GMSST
-0.08	-.36*	-.43*	-.57**	-0.04	0.06	-0.12	-0.21	-0.23	-0.25	-0.08	-0.35	AMO
-0.32	-0.24	-.37*	-0.12	-.44*	-.48**	-.42*	-.45*	-0.19	-0.32	-0.26	-0.16	TSA
-0.18	-0.21	-0.3	-.47**	0.05	-0.09	0.01	-0.10	-0.03	-0.07	-0.16	-0.20	TNA
-0.01	-0.30	-0.29	-0.20	-.57**	-0.09	-.41*	-0.36	-.45*	-0.34	-0.05	-0.32	SOI
.43*	.49**	.46*	0.33	0.29	0.34	0.32	0.21	0.25	.34*	.47**	.55**	PDO
0.26	0.15	0.13	0.10	0.22	0.23	0.25	0.24	0.32	.36*	0.30	0.20	ONI
0.35	0.30	0.20	0.23	0.17	0.29	0.35	0.30	0.34	.43*	.30*	0.32	MEVE2
0.09	.40*	.41*	.51**	0.15	0.09	0.04	0.31	0.08	0.31	0.15	.39*	EPO
0.16	0.03	0.10	0.06	.40*	0.28	-0.02	.48**	0.36	.46*	0.19	-0.01	RMM1
0.27	0.09	0.04	0.09	.49**	0.24	0.19	0.21	0.05	0.20	0.24	0.14	RMM2

* Significant at the 0.05 level, and ** significant at the 0.01 level

الگوی PNA با تأخیر سه ماهه و با الگوهای AMO، AMM و TNA به صورت همزمان تأیید شده است. در مجموع، این همبستگی‌های منفی معنی‌دار در ماه نوامبر نشان‌دهنده ارتباط قوی بین تغییرات اقلیمی در سطوح مختلف جهانی و کاهش دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون است. همچنین در سطح اطمینان ۰/۰۱ بین الگوهای دور پیوند WP با تأخیر سه ماهه و الگوی دور پیوند EPO با تأخیر دو و سه ماهه همبستگی مثبت و معنی‌داری مشاهده شده است. به عبارت دیگر بین الگوهای ذکر شده یک رابطه مستقیم و قوی ایجاد شده است بدین معنی که گرایش الگوهای موردنظر به فاز مثبت به شدت با افزایش دبی در ماه نوامبر ارتباط دارد (جدول ۸).

در ماه نوامبر، بیشترین تعداد همبستگی منفی معنی‌دار در سطح اطمینان ۰/۰۱ در طول سال در رابطه با الگوهای دور پیوند WARMPOOL، الگوی WHWP (نوسانات اقلیمی غربی اقیانوس آرام)، و شاخص GMSST که به تغییرات دمای سطح دریاهای مختلف مربوط هستند به طور همزمان و با تأخیرهای یک تا سه ماهه مشاهده شد. این تغییرات دمایی می‌توانند با کاهش بارش یا افزایش تبخیر در نواحی خاص دبی را کاهش دهند. همچنین بین نوسانات دمای اقیانوس اطلس (AMO) و الگوی TNA (نوسانات دمای اقیانوس گرمسیری شمالی) و الگوی AMM (نوسانات میان مدت اقیانوس‌ها) با تأخیر یک ماهه همبستگی معنی‌داری مشاهده شد. از طرفی در سطح اطمینان ۰/۰۵ همبستگی منفی معنی‌داری بین

الگوی WARMPOOL به‌صورت هم‌زمان و با تأخیرهای یک تا سه ماهه تأیید شد (جدول ۸).

همچنین بین الگوی AMO با تأخیر سه ماهه، الگوی AMM با تأخیر دو ماهه، الگوی TNA با تأخیر دو و سه ماهه و با الگوی RMM1 به‌صورت هم‌زمان همبستگی معنی‌دار مشاهده شد. نتایج نشان می‌دهد که کاهش دبی سرشاخه‌های اصلی رودخانه کارون در زمان فاز مثبت الگوها با همبستگی‌های منفی قوی و بسیار قوی، چه هم‌زمان و چه با تأخیر، تأیید می‌شود.

همچنین رابطه مثبت معنی‌دار در سطح ۰/۰۵ در این ماه با الگوهای دور پیوند TNH با تأخیر دو ماهه و الگوی دور پیوند MEVE2 تأیید شده است. وجود همبستگی مثبت نشان می‌دهد که افزایش مقادیر شاخص این الگوهای دور پیوندی می‌تواند منجر به افزایش دبی شود. این تأثیرات از طریق افزایش بارندگی، تقویت جریان‌های رطوبتی یا کاهش شرایط تبخیر در منطقه اعمال می‌شوند (جدول ۸).

در ماه دسامبر همبستگی منفی معنی‌دار بین دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون و الگوهای دور پیوند PNA با تأخیر ۱ ماهه، با الگوی GMSST با تأخیر یک تا سه ماهه، با الگوی AMO با تأخیر دو ماهه، با الگوی AMM با تأخیر یک و سه ماهه، با الگوی WHWP به‌صورت تأخیر سه ماهه و با الگوی دور پیوند TNA به‌صورت هم‌زمان مشاهده شد. همبستگی منفی معنی‌دار تأیید شده نشان‌دهنده آن است که گرایش به فاز مثبت این الگوها با کاهش دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون مرتبط است.

به‌عبارت‌دیگر، تغییرات دمایی و اقلیمی ناشی از این الگوها باعث تغییر در بارش، تبخیر و درنهایت کاهش منابع آبی منطقه می‌شود. تأثیر این الگوها در بازه‌های زمانی مختلف (هم‌زمان و با تأخیر) نشان‌دهنده پیچیدگی روابط برای پیش‌بینی تغییرات آینده دارد. همچنین در سطح اطمینان ۰/۰۱ همبستگی منفی بسیار قوی در رابطه با الگوهای دور پیوند PNA با تأخیر سه ماهه، با

جدول ۸- همبستگی بین شاخص‌های دور پیوند با دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون در ماه‌های اکتبر، نوامبر، دسامبر طی سری زمانی (۱۹۹۳-۲۰۲۲) به‌صورت هم‌زمان و با تأخیر یک تا سه ماه

Table 8. Correlation between teleconnection indices and headwater discharge of Karun River in October, November, and December during the time series (1993-2022) simultaneously and with a lag of 1 to 3 months

With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	Dec	With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	Nov	With a 3-month delay	With a 2-month delay	With a 1-month delay	Oct	Teleconnection
-0.11	0.19	0.16	0.11	.62**	-0.08	0.14	-0.01	0.02	.44*	0.13	.46*	WP
-.55**	-0.17	-.38*	0.13	-.40*	-0.34	-0.13	-0.32	-0.22	-.38*	-.45*	.47**	PNA
-0.24	-0.14	-0.14	-0.06	0.27	0.06	-0.09	0.01	0.10	-0.01	-0.03	-0.23	NCP
-0.01	.36*	-0.02	0.20	-0.16	0.24	0.15	0.01	0.03	0.06	0.04	0.00	TNH
-0.17	-0.19	-0.14	0.07	0.29	-0.24	0.02	-0.14	-0.04	.42*	-0.12	-0.19	AAO
-.56**	.60**	.51**	.50**	-.62**	-.68**	-.83**	-.78**	-.38*	-.39*	-.43*	-0.32	WARMPOOL
-.45*	-.42*	-.39*	-0.33	-.74**	-.76**	-.68**	-.72**	-.44*	-.54**	-.39*	-0.28	GMSST
-.52**	-.37*	-0.16	-0.29	-.54**	-.62**	-.57**	-.40*	-.36*	-.39*	-0.30	-0.12	AMO
-.41*	.48**	-.37*	-0.31	-0.13	-.45*	-.48**	-.41*	0.02	-0.15	-0.17	-0.04	AMM
-.45*	-0.34	-0.33	-0.11	-.57**	-.53**	-.48**	-.49**	-0.27	-.36*	-0.34	-0.19	WHWP
-0.33	-0.27	-0.08	-0.09	-.45*	-0.29	-0.28	-0.04	-.43*	-.42*	-.43*	-.36*	TSA
-.54**	.49**	-0.29	-.38*	-.37**	-.51**	-.49**	-.36*	-0.31	-0.31	-0.34	-0.17	TNA
-0.13	-0.09	-0.15	-0.16	-0.11	-0.22	-0.15	-0.15	0.20	0.27	.42*	0.35	SOLAR
-0.35	-0.33	-0.20	-0.32	-0.35	-0.33	-0.30	-0.22	-.44*	-0.35	-0.24	0.02	SOI
0.28	.36*	0.28	0.25	0.22	0.29	0.36	0.28	0.30	0.30	0.29	0.09	MEVE2
0.27	0.08	-0.35	0.10	.53**	.51**	0.22	-0.18	0.07	0.27	0.14	0.16	EPO
0.03	0.05	0.28	.51**	0.13	-0.02	0.01	-0.02	-0.13	.481**	-0.10	0.28	RMM1

* Significant at the 0.05 level, and ** significant at the 0.01 level

سرشاخه‌های رودخانه کارون به‌صورت فصلی و سالانه ایفا کرده‌اند بنابراین مشخص شد در فصل زمستان همبستگی بین الگوها و دبی بسیار متفاوت است. در این

بررسی فصلی و سالانه همبستگی الگوهای دور پیوندی و دبی طبق نتایج به‌دست‌آمده الگوهای دور پیوند اقلیمی اقیانوسی نقش مهمی در تغییرات دبی

از تأثیر مثبت تغییرات در این الگوها بر دبی تابستانه است. همچنین وجود همبستگی منفی معنی‌دار بین الگوهای WARMPOOL و AMO و در سطح اطمینان ۰/۰۱ با الگوی GMSST و دبی تابستانه نشان داد که با افزایش شدت این الگوها به فاز مثبت خود، دبی حوزه مورد مطالعه کاهش می‌یابد (جدول ۹). همچنین در فصل پاییز همبستگی منفی معنی‌دار با الگوهای WARMPOOL و GMSST در سطح اطمینان ۰/۰۱ نشان می‌دهد که افزایش شدت در الگوهای ذکر شده با کاهش دبی سرشاخه‌های رود کارون همراه است. به عبارت دیگر، گرم شدن آب‌های سطحی اقیانوس آرام گرم و اقیانوس هند که به ترتیب با الگوهای WARMPOOL و GMSST مرتبط هستند به کاهش دبی فصل پاییز منجر در حوزه مورد مطالعه می‌شود. همبستگی منفی معنی‌دار با الگوهای AMO و TNA نیز نشان‌دهنده تأثیر منفی تغییرات در الگوهای AMO و TNA بر دبی پاییزی کارون است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات در الگوهای دور پیوند ذکر شده تأثیر قابل توجهی بر کاهش دبی در فصل پاییز دارد. (جدول ۹).

نتایج همبستگی سالانه نیز تأییدکننده ارتباط بسیار قوی الگوهای دور پیوند WARMPOOL، GMSST و شاخص نوسان جنوبی (SOI) در سطح اطمینان ۰/۰۱ به صورت همبستگی منفی با دبی سالانه است. همبستگی قوی ثبت شده بدان معناست که گرایش به فاز مثبت این الگوها به طور مستقیم با کاهش دبی سالانه ارتباط دارد. این نتایج ثابت می‌کند که نوسانات آب و هوایی در مقیاس بزرگ، به ویژه در اقیانوس آرام و هند، در مقیاس زمانی طولانی مدت، تأثیر کاهشی قابل توجهی بر رژیم هیدرولوژیکی سالانه در حوزه مورد مطالعه دارد. همچنین همبستگی مثبت معنی‌داری در سطح اطمینان ۰/۰۱ در رابطه با الگوهای سالانه MEVE2 و EPO وجود دارد.

این بدان معناست که با احتمال بسیار بالا، فازهای مثبت یا مقادیر بالاتر این الگوها با افزایش دبی رودخانه کارون همراه است و فازهای منفی یا مقادیر پایین تر آن‌ها با کاهش دبی ارتباط دارد. در سطح اطمینان ۰/۰۵ رابطه معنی‌داری با الگوهای EA و PDO و دبی سرشاخه‌های

فصل، الگوهای دور پیوند مانند نوسانات اقلیمی نیمکره شمالی (NCP)، نوسانات دمای سطح دریاهای جهانی (GMSST) و شاخص نوسان جنوبی (SOI) با مجموع دبی ایستگاه‌های بالادست رودخانه کارون همبستگی منفی و معنی‌داری داشته است. این همبستگی منفی بیانگر آن است که با گرایش به فاز مثبت الگوهای مذکور، دبی کاهش می‌یابد. در عین حال، الگوی نوسانات اقلیمی میان مدت (MEVE2) با دبی همبستگی مثبت و معنی‌داری داشته است. این همبستگی مثبت نشان‌دهنده تأثیر فاز مثبت این الگو بر افزایش دبی رودخانه است. (جدول ۹).

در فصل بهار نیز همبستگی منفی معنی‌دار در رابطه با الگوهای دور پیوند WARMPOOL و SOI با دبی مشاهده شد. همچنین در سطح اطمینان ۰/۰۱ همبستگی بسیار قوی با الگوی دور پیوند GMSST مشاهده شد. همبستگی منفی با WARMPOOL و SOI در بهار نشان‌دهنده این است که تغییرات در دما و فشار در نواحی گرمسیری اقیانوس آرام و نوسانات جوی می‌تواند بر عناصر اقلیمی تأثیر منفی گذاشته و به دنبال آن باعث کاهش دبی در سرشاخه‌های آبخیز کارون شود. همچنین همبستگی منفی الگوی GMSST که به تغییرات اقلیمی و دمایی جهانی اشاره دارد با گرایش به فاز مثبت خود می‌تواند بر جریان آب منطقه اثر منفی داشته باشد. (جدول ۹).

در فصل بهار، علاوه بر همبستگی‌های منفی که بین دبی و برخی الگوهای دور پیوند مشاهده شد، همبستگی مثبت معنی‌داری نیز با الگوی دور پیوندی PDO (نوسانات اقیانوس آرام شمالی) و MEVE2 (شاخص نوسانات اقلیمی) مشاهده شد. این همبستگی مثبت نشان‌دهنده افزایش دبی در زمان افزایش نوسانات الگوهای مرتبط است. در فصل تابستان نیز رابطه بین الگوهای مورد نظر با دبی نشان از همبستگی مثبت با الگوهای EA و دبی تابستانه سرشاخه‌های کارون نشان داد فاز مثبت الگوی EA به طور مستقیم بر افزایش دبی در فصل تابستان رابطه دارد.

به عبارت دیگر، هرچه شدت الگوی EA بیشتر باشد، انتظار می‌رود دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون نیز افزایش یابد. همچنین همبستگی مثبت بین الگوهای PDO و EPO با دبی تابستان در سطح ۰/۰۱ نیز حاکی

رودخانه کارون وجود دارد. این یافته نشان می‌دهد که دبی رودخانه کارون در ارتباط هستند (جدول ۹).
نوسانات این دو الگو نیز به شکل معناداری با تغییرات

جدول ۹- همبستگی فصلی و سالانه بین شاخص‌های دور پیوند با دبی رودخانه کارون

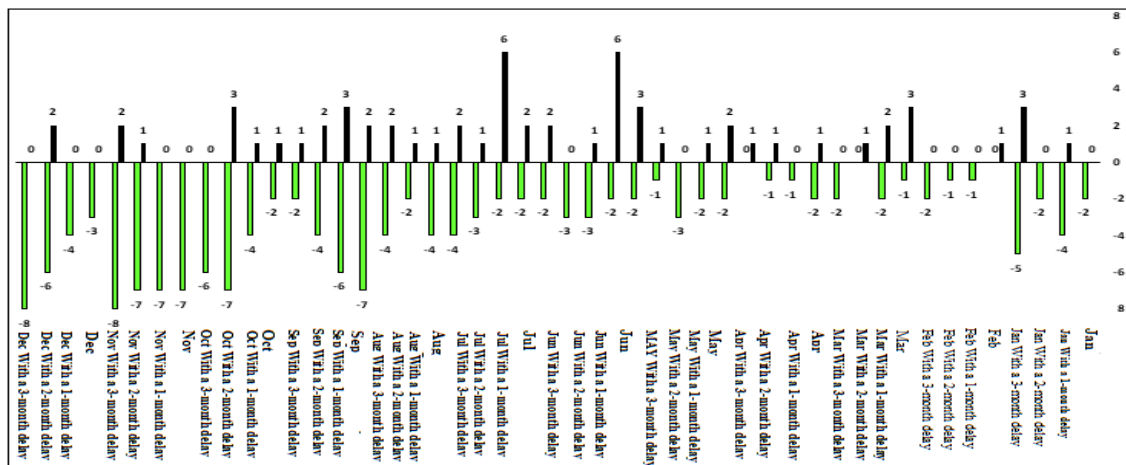
Table 9. Annual and Seasonal Correlation between Teleconnection Indices and Karun River Discharge.

Annual Discharge	Fall Discharge	Summer Discharge	Spring Discharge	Winter Discharge	Teleconnection
.448*	0.36	.392*	0.28	0.23	EA
-0.30	-0.23	0.06	0.12	-.435*	NCP
-.527**	-.654**	-.453*	-.384*	-0.28	WARMPOOL
-.591**	-.473**	-.646**	-.487**	-.388*	GMSST
-0.33	-.380*	-.441*	-0.15	-0.08	AMO
-0.12	-.398*	-0.19	0.02	-0.07	AMM
-0.23	-0.34	-.411*	-0.05	0.12	WHWP
-0.23	-.420*	-0.31	-0.26	-0.02	TNA
-.476**	-0.33	-0.28	-.388*	-.373*	SOI
.412*	-0.10	.489**	.372*	0.34	PDO
.466**	0.31	0.26	.419*	.404*	MEVE2
.478**	-0.08	.649**	0.23	0.33	EPO
0.22	-0.31	0.02	0.34	0.27	RMM1
-0.29	-0.01	0.10	0.23	-0.33	RMM2

* Significant at the 0.05 level, and ** significant at the 0.01 level

است. همچنین بیشترین تعداد همبستگی مثبت مربوط به ماه ژوئیه با تأخیر یک و دو ماهه با شش مورد است. به‌طور کلی، بیشترین فراوانی تکرار همبستگی بین الگوهای مورد مطالعه و دبی مربوط به ماه‌های اکتبر تا دسامبر و کمترین فراوانی تعداد همبستگی‌ها نیز مربوط به ماه‌های فوریه تا ژوئن رخ داده است.

در شکل ۶، تعداد همبستگی مشاهده شده بین الگوهای دور پیوند به‌صورت هم‌زمان و با تأخیر یک، دو و سه ماهه با دبی سرشاخه‌های رود کارون مشاهده می‌شود. با توجه به تقسیم همبستگی‌ها به‌صورت مستقیم (مثبت) و معکوس (منفی) بیشترین تعداد همبستگی بین الگوهای مورد مطالعه، مربوط به نوامبر و دسامبر با تأخیر سه ماهه با هشت مورد همبستگی منفی مشاهده شده



شکل ۶- تعداد همبستگی مشاهده شده بین الگوهای دور پیوند به‌صورت هم‌زمان و با تأخیر یک، دو و سه ماهه با دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون

Fig. 6. A count of observed correlations between teleconnection patterns and the discharge of Karun River tributaries, considering both simultaneous and lagged relationships (1, 2, and 3 months)

مقیاس سالانه، هشدار جدی نسبت به تغییرات بلندمدت در منابع آب سطحی حوزه مورد مطالعه محسوب می‌شود. از آنجاکه این حوزه سهم عمده‌ای در

به طور کلی نتایج این پژوهش از منظر علمی و مدیریتی حائز اهمیت قابل توجهی است. روند کاهشی معنادار دبی در سرشاخه‌های رودخانه کارون، به‌ویژه در

مقیاس‌های فصلی و سالانه روند کاهشی با جهش منفی داشته به‌طوری‌که بیشترین روند دبی در سری فصلی مربوط به فصل تابستان و کمترین روند در فصل پاییز بوده است.

همچنین نتایج ارتباط الگوهای دور پیوند اقیانوسی جوی بر مجموع دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون نشان داد به‌صورت ماهانه بین بسیاری از الگوهای مورد مطالعه رابطه معنی‌داری به شکل مثبت یا منفی به‌صورت هم‌زمان و باتأخیر ثبت شده است. برای مثال در فصل زمستان، با توجه به همبستگی منفی معنی‌دار، افزایش شدت الگوهایی نظیر نوسانات اقلیمی نیمکره شمالی (NCP)، میانگین دمای سطح دریاهای جهان (GMSST) و شاخص نوسان جنوبی (SOI) با گرایش به فاز مثبت خود با کاهش دبی همراه شده است.

نتایج نشان می‌دهد درحالی‌که فاز مثبت الگوی MEVE2 به‌واسطه‌ی همبستگی مثبت و معنادار با دبی، با افزایش جریان رودخانه همراه بوده، در فصل بهار، فاز مثبت شاخص‌های SOI، WARMPOOL و GMSST به دلیل همبستگی منفی و معنی‌دار با دبی که منعکس‌کننده افزایش دما و کاهش بارش هستند موجب کاهش دبی شده است. اما شاخص‌هایی نظیر PDO و MEVE2 در فاز مثبت خود با توجه به همبستگی مثبت معنی‌دار با افزایش دبی ارتباط دارد. بررسی‌های انجام‌شده در فصل تابستان نیز نشان می‌دهد که شاخص‌های EA، PDO و EPO دارای همبستگی مثبت و معنی‌دار با دبی حوزه بوده‌اند. در مقابل، نوسانات شاخص‌های AMO، WARMPOOL و GMSST که دارای همبستگی منفی معنادار با دبی است در فاز مثبت خود با کاهش دبی همراه شده است. همچنین نتایج در فصل پاییز نشان داد که الگوهایی نظیر WARMPOOL و GMSST بیشترین تأثیر منفی را در فاز مثبت خود بر کاهش دبی این فصل داشته است.

همچنین اثرات منفی الگوهای AMO و TNA با گرایش به فاز مثبت در این فصل بر دبی مشهود است. درنهایت، نتایج همبستگی سالانه نشان داد که گرایش الگوهای WARMPOOL، GMSST و SOI به فاز مثبت خود که به‌طور معنی‌دار با دما و بارش در ارتباط هستند با کاهش دبی سالانه ارتباط بسیار قوی دارند، اما

تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت جنوب غرب کشور دارد، استمرار چنین روندی می‌تواند تهدیدی برای امنیت آبی منطقه باشد. از سوی دیگر، شناسایی الگوهای دورپیوندی مؤثر بر نوسانات دبی (ازجمله NINO4، PDO، AMO، MJO و...) نشان می‌دهد که رفتار هیدرولوژیکی حوزه مورد مطالعه، تا حدی تابع شرایط اقلیمی فرامنطقه‌ای است.

این ارتباط معنادار، فرصتی ارزشمند برای پیش‌بینی و مدیریت آینده‌نگر منابع آب فراهم می‌کند. کاربردهای این نتایج می‌تواند در چند محور اصلی از جمله برنامه‌ریزی منابع آب در حوزه کارون برای تنظیم بهره‌برداری سدها با توجه به نوسانات پیش‌بینی‌پذیر دبی؛ همچنین سیاست‌گذاری در حوزه مدیریت خشکسالی با تکیه بر شاخص‌های دورپیوندی به‌عنوان ابزار هشدار زودهنگام و در نهایت، ارتقاء درک علمی از تعامل بین فرآیندهای اقلیمی و هیدرولوژیکی در مناطق کوهستانی جنوب غرب ایران، به‌ویژه در چارچوب تغییر اقلیم جهانی باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق با رویکرد ویژه آن، برای نخستین بار تغییرات روند دبی سرشاخه‌های بالادست سدهای مستقر بر رودخانه کارون (تله زنگ، لردگان، ارمند، پاتاوه و کتا) را طی سری زمانی ۳۰ ساله (۲۰۲۲-۱۹۹۳) مورد مطالعه قرار داده است. همچنین نوسانات ۲۸ الگوی دور پیوندی اقیانوسی-جوی را در رابطه با نوسانات مجموع دبی سرشاخه‌های رودخانه کارون (نماینده‌ی شرایط هیدرولوژیکی رودخانه کارون) مورد مطالعه قرار داده است. نتایج نشان داد که دبی در تمامی فصول سال روند کاهشی معنی‌داری را طی دوره آماری داشته است.

بیشترین روند کاهشی دبی مربوط به فصل زمستان با نرخ ۱۵/۵ مترمکعب در سال و کمترین آن در فصل پاییز با نرخ ۲/۹ مترمکعب بر ثانیه در هر سال مشاهده شده است. به‌طور کلی، میانگین کاهش سالانه دبی نیز برابر با ۱۱/۳ مترمکعب بر ثانیه در هر سال با جهش منفی ($Z = -4/1$) نشان‌دهنده کاهش قابل توجه جریان آبی می‌باشد. نتایج یک مطالعه بر روی دبی رودخانه ایستگاه کوه سوخته نیز نشان داد که دبی در

الگوهای MEVE2، EPO، EA و PDO در فاز مثبت خود تأثیر مثبتی و افزایش با دبی داشته‌اند. همچنین در یک مطالعه نتایج تغییرات رواناب و ارتباط آن با گردش‌های جوی مقیاس بزرگ در حوزه رودخانه هیله، شمال غربی چین نشان داد رواناب در این حوزه با شاخص‌های AO، NAO، PDO و AMO دارای تناوب قابل توجه و همبستگی با تأخیر یک تا ۴۸ ماهه است. به‌طور خلاصه، نتایج این مطالعه دیدگاه‌های نوینی در مورد هیدرولوژی در حال تغییر سرشاخه‌های رودخانه کارون و عوامل مؤثر بر آن ارائه و ابزارها و دانش ارزشمندی را با توجه به نتایج قابل قبول بین الگوهای دور پیوند و دبی را فراهم کرده است. با عنایت به اینکه الگوهای دور پیوندی در مقیاس‌های زمانی مختلف دارای قابلیت پیش‌بینی‌پذیری هستند، شناسایی ماهیت و تأخیر زمانی همبستگی هر الگو با نوسانات دبی، امکان پیش‌بینی جریان آبی رودخانه را با دقت بیشتری فراهم می‌آورد. چنین قابلیت پیش‌بینی پیشرفته‌ای برای پیاده‌سازی راهبردهای مدیریت منابع آب به‌صورت پیشگیرانه و آگاهانه، امری ضروری محسوب می‌شود؛ به‌ویژه با توجه به چالش‌های هیدرولوژیکی قابل توجهی که حوزه آبریز مورد مطالعه با آن مواجه است.

منابع مورد استفاده

- Abghari, H., Tabari, H., Talaee, P.H., 2013. River flow trends in the west of Iran during the past 40 years: impact of precipitation variability. *Global Planet. Change* 101, 52-60.
- Broecker, W.S., 1987. The biggest chill. *Natural History Magazine*, October, 74-82.
- Cheng, Q., Zuo, X., Zhong, F., GAO, L., Xiao, S., 2019. Runoff variation characteristics, association with large-SCALE circulation and dominant causes in the Heihe River Basin, Northwest China. *Sci. Total Environ.* 688, 361-379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.397>.
- Dong, Y., Zhai, J., Zhao, Y., Li, H., Wang, Q., Jiang, S., Ding, Z., 2020. Teleconnection patterns of precipitation in the Three-River Headwaters region, China. *Environ. Res. Letters* 15(10), 104050.
- Emam Gholizadeh, S., Torabi Pude, H., 2014. Examination of the trends in river flow changes in Lorestan province using the TFPW-MK method. *Appli. Res. Geograph. Sci.* 14(35), 73-93.
- Ghasemi, A.R., Khalili, D., 2008. The association between regional and global atmospheric patterns and winter precipitation in Iran. *Atmospheric Res.* 88(2), 116-133.
- Hurrell, J.W., 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Sci.* 269(5224), 676-679.
- Hussain, A., Cao, J., Ali, S., Ullah, W., Muhammad, S., Hussain, Zhou, J., 2022. Variability in runoff, responses to land, and oceanic parameters in the source region of the Indus River. *Ecolo. Indicator.* 140, 109014.
- Jiang, R., Wang, Y., Xie, J., Zhao, Y., Li, F., Wang, X., 2019. Assessment of extreme precipitation events and their teleconnections to El Niño Southern Oscillation, a case study in the Wei River Basin of China. *Atmosph. Res.* 218, 372-384.
- Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*. Griffin.
- Khodabakhsh, N., Pourkarami, A., Motakan, M., Cherchi, A., 2015. Active tectonics of the Karun River basin. *Earth Sci.* 24(95).
- Khoramian, A., 2024. Assessing annual and seasonal precipitation trends in the Karun River Basin using Co-Kriging: An Over 60-Year Analysis. *Water Harvest. Res.* 7(2), 301-313.

تشکر و قدر دانی

این پژوهش با پشتیبانی دانشگاه یزد انجام شده است. نویسنده مراتب سپاس‌گزاری خود را نثار استاد کمال امیدوار به جهت رهنمودهای ارزنده و پشتیبانی بی‌دریغ در تمام مراحل مطالعه حاضر می‌نماید. همچنین از همکاری وزارت نیرو بابت ارائه داده‌های دبی صمیمانه تشکر می‌کنم. نویسندگان قدردان داوران محترم و هیئت تحریریه مجله مهندسی و مدیریت آبخیز هستند که با نظرات دقیق و ارزشمند خود به ارتقای کیفیت این مقاله کمک شایانی نمودند. در پایان، این سپاس به تمامی دست‌اندرکاران و عزیزانی که به‌طور مستقیم و غیرمستقیم در به ثمر رسیدن این پژوهش نقش داشتند، تقدیم می‌شود.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان قرار دارد.

- Lee, R., Williams, G., 2008. Investigating the impacts of climate change on watersheds in the Lebanon Basin. *Water Wastewater J.* 31-36.
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Economet.* 13(3), 245-259.
- Maroofi, S., Tabari, H., 2011. Detection of trends in the discharge of the Maroun River using parametric and non-parametric methods. *Geograph. Res.* 26(2), 125-146.
- Mehrani, A., 2022. Forecasting the discharge of the Zayandeh Rud River at the Qaleh Shahrokh station using deep learning techniques. *J. Water Engin.* 10(3).
- Mirabbasi Najafabadi, R., Dinpejough, Y., 2010. Analysis of the trend of changes in the discharge of northwestern Iran rivers in the last three decades. *Water Soil* 24(4).
- Mirzaei Hasanlu, A., Abghari, H., Iraniyan, M., 2020. The impact of teleconnection patterns on precipitation and drought in the Urmia Lake basin. *Geophy. Space Physic.* 46(3), 537-559. doi: 10.22059/jesphys.2020.292304.1007175.
- Mukaka, M.M., 2012. A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. *Malawi Medical J.* 24(3), 69-71.
- Naseri, E., Shahidi, A., Farzaneh, M.R., 2016. The assesment of climate change on run-off by SWAT Model. *J. Rainwater Catch. Sys.* 3(4), 27-38.
- Rafiei, T., Nasr Asfahani, M.A., Najaf Abadi, H., 2024. Study of the characteristics of meteorological and hydrological droughts and their relationship with remote meteorological link patterns (White Plain, Chaharmahal and Bakhtiari Province). *Iran. Water Res.* 18(1).
- Rahbar, E., Pakpour, M., Masoudi, M., Jokar, L., 2005. Trends of runoff changes in the Khorr River basin. *Iran. Res. Rangeland. Deserts* 12(4), 357-375.
- Rezaei, M., Omidipour, R., Rezaei, A., Nedaft, M., 2022. Comparison of the impact of land use trend changes and precipitation on annual discharge, case study of the Kiar Watershed. *Int. Watershed Manage.* 2(2), 62-74. doi: 10.22034/iwm.2022.556854.1038.
- Sarmiento, S., Palanisami, A., 2011. Coherence between atmospheric teleconnections and Mackenzie River Basin lake levels. *J. Great Lakes Res.* 37(4), 642-649.
- Shakerian, S., Torabi Poudeh, H., Shahi Nejad, B., Naqavi, H., 2019. Investigation of precipitation and streamflow trends in the Greater Karun Basin using the TFPW-MK method. *Iranian J. Water Resour. Res.* 15(3), 272-282.
- Torabi Poudeh, H., Emamgholizadeh, S., 2015. Trend analysis of streamflow changes in the northern part of the Dez River Basin using the TFPW-MK method. *J. Water Soil Conserv. Res.* 22(3), 39-55.
- Uereyen, S., Bachofer, F., Klein, I., Kuenzer, C., 2022. Multi-faceted analyses of seasonal trends and drivers of land surface variables in Indo-Gangetic river basins. *Sci. Total Environ.* 847, 157515.
- Vivekanandan, N., 2007. Analysis of trend in rainfall using nonparametric statistical methods, international symposium on rainfall rate and radio wave propagation. *American Insti. Physic.* 101-113.
- Wallace, J.M., Guzzler, D.S., 1981. Teleconnections in the geo-potential height field during the northern hemisphere winter. *Month. Weather Rev.* 109, 784-812.
- Wang, F., Lai, H., Li, Y., Feng, K., Tian, Q., Guo, W., Yang, H., 2023. Spatio-temporal evolution and teleconnection factor analysis of groundwater drought based on the GRACE mascon model in the Yellow River Basin. *J. Hydrol.* 626, 130349.
- Wang, W., Yang, P., Xia, J., Zhang, S., Cai, W., 2022. Coupling analysis of surface runoff variation with atmospheric teleconnection indices in the middle reaches of the Yangtze River. *Theoret. Appl. Climatol.* 148(3), 1513-1527.
- Zang, H., 2003. A nonparametric test for trend in time series data. *J. Environ. Statistic.*