



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 5, No. 19, Autumn 2024



Evaluation of long-term changes in the characteristics of drought and flood risks in the basin of southeastern Iran

Abdolreza Kashki^{1*}, Hossein Ghorbani²

¹ Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran,
Email: a.kashki@hsu.ac.ir

² Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran,
Email: armanneshin@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2024-6-4
Accepted: 2024-7-23

Keywords:
SDI index
extreme events
run theory
climate change

ABSTRACT

In recent decades, extreme hydrological events such as drought and flood have been increased in arid and semi-arid regions as a result of climate change. Hence, it is of significance to evaluate their changes in terms of intensity, duration and frequency and the interaction between them. The current study analyzed the characteristics of severity, duration and number of occurrences of drought and flood hazards during the period 1983-2022 using the long-term streamflow data in the basins South Baluchistan, Hamun-e Jaz Murian and Hamun-Mashkel. The results indicated that Southern Baluchistan has experienced larger magnitude, more severe and longer duration of hydrological floods and droughts over the last four decades. Flood magnitude at Bahot, Kehir, Pirsohrab and Kariani stations in this basin increased from 217 m³/s, 225 m³/s, 191 m³/s and 244 m³/s in the first decade to 255 m³/s, 291 m³/s, 291 m³/s and 554 m³/s in the third decade. Similar results were observed for Hamun-e Jaz Murian and Hamun-Mashkel basins. However, the number of flood occurrence in Hamun-e Jaz Murian and Hamun-Mashkel basins has been decreased. The results also showed an increasing trend for drought intensity and the number of occurrence changing from 1.3, 5.7 units in the first decade to 1.6, 4.3 units in the fourth decade, respectively. The duration of drought also increased from 7.5 months in the first decade to 14 months in the last decade. These results refer to the fact that the south-eastern regions of Iran have been affected by the integrated effects of floods and droughts, especially during the last decade. Regarding to the economic and social consequences of the increasing flood and drought risks, the appropriate planning and taking actions by the relevant authorities and institutions would be needed for adaption and reduction of the undesirable effects.

Cite this article: Kashki, A.R., Ghorbani, H. (2024). Evaluation of long-term changes in the characteristics of drought and flood risks in the basin of southeastern Iran. Journal of the Climate Change Research, 5 (19), 55-74.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2024.461031.1224



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال پنجم / شماره مسلسل نوزدهم / پاییز ۱۴۰۳ / صفحات: ۷۴-۵۵



ارزیابی تغییرات بلند مدت مشخصه‌های مخاطرات خشکسالی و سیل در حوضه‌های آبریز جنوب شرق ایران

عبدالرضا کاشکی^{۱*}، حسین قربانی^۲

^۱ دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران، رایانامه: a.kashki@hsu.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران، رایانامه: armanneshin@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲</p> <p>واژه‌های کلیدی: شاخص SDI رویدادهای حدی تئوری ران تغییرات اقلیمی</p>	<p>در دهه‌های اخیر، پدیده‌های حدی هیدرولوژیکی مانند خشکسالی و سیلاب به دلیل وقوع پدیده تغییرات اقلیمی در مناطق خشک و نیمه خشک تشدید یافته است. از این‌رو، ارزیابی روند تغییرات آن‌ها از نظر شدت، مدت و فراوانی وقوع و بررسی اندرکنش آنها طی سالیان گذشته می‌تواند حائز اهمیت باشد. پژوهش حاضر به بررسی و ارزیابی مشخصه‌های شدت، مدت و تعداد وقوع مخاطرات خشکسالی و سیلاب طی دوره‌ی آماری ۲۰۲۲-۱۹۸۳، با استفاده از داده‌های بلند مدت آبسنجی در حوضه‌های آبریز بلوچستان جنوبی، هامون-جازموریان و هامون-مشکیل پرداخت. نتایج نشان داد حوضه بلوچستان جنوبی در طی چهار دهه اخیر خشکسالی‌ها و سیلاب‌های بزرگ‌تر، شدیدتر و طولانی‌تر را تجربه کرده است بطوری‌که بزرگی سیلاب برای ایستگاه‌های باهوت، کهپر، پیرسهراب و کاریانی در این حوضه به ترتیب از ۲۱۷، ۲۲۵، ۱۹۱ و ۲۴۴ مترمکعب بر ثانیه در دهه‌ی اول به ۲۵۵، ۲۹۱، ۲۹۱ و ۵۵۴ مترمکعب بر ثانیه در دهه‌ی سوم افزایش یافته است. این شرایط تقریباً برای حوضه‌های هامون - جازموریان و هامون-مشکیل نیز صادق بوده است، با این تفاوت که تعداد وقوع سیلاب در دو حوضه هامون-جازموریان و هامون-مشکیل روند کاهشی داشته است. خروجی حاصل از پایش مشخصه‌های خشکسالی^۱ SDI حوضه‌های مذکور حاکی از روند افزایشی آن دارد؛ بطوریکه نمایه‌های شدت و تعداد وقوع به ترتیب از مقدار ۱/۳، ۳ واحد در دهه اول به ۶/۱، ۴/۳ واحد در دهه‌ی چهارم تغییر یافتند. مدت خشکسالی نیز از ۷/۵ ماه در دهه اول تا ۱۴ ماه در دهه پایانی افزایش پیدا کرد. از این لحاظ مناطق جنوب شرقی کشور تحت تاثیر اثرات ترکیبی و افزایشی سیلاب و خشکسالی به ویژه در دهه اخیر قرار گرفته است. با توجه به پیامدهای اقتصادی و اجتماعی روند افزایشی این مخاطرات بر منطقه، لزوم برنامه‌ریزی و اقدامات مناسب توسط مسئولان و نهادهای مربوطه جهت سازگاری و کاهش اثرات مخرب، بیش از پیش احساس می‌شود.</p>

استناد: کاشکی، عبدالرضا؛ قربانی، حسین. (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات بلند مدت مشخصه‌های مخاطرات خشکسالی و سیل در

حوضه‌های آبریز جنوب شرق ایران. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۵ (۱۹)، ۷۴-۵۵.

Doi: 10.30488/CGR.2024.461031.1224

ناشر: دانشگاه گلستان

© نویسندگان



مقدمه

وقوع رویدادهای شدید در چرخه هیدرولوژیکی دغدغه اصلی هیدرولوژیست‌ها، سیاست‌گذاران و مدیران آب در قرن بیست و یکم است. سیل و خشکسالی دو چالش اصلی جهانی در این زمینه محسوب می‌شوند، زیرا تأثیرات اقتصادی، زیست‌محیطی، و اجتماعی قابل توجهی داشته و وقوع آن‌ها به ویژه در کشورهای در حال توسعه که آمادگی و انعطاف کمتری در برابر چنین بلایای طبیعی دارند، محتمل‌تر است (Wang et al., 2021). مطالعات متعدد حاکی از آن است که تغییرات اقلیمی، به‌ویژه تشدید رویدادهای حادی با بازتوزیع منابع آب منجر به تغییرپذیری الگوی زمانی و مکانی و همچنین تفاوت در بزرگی و فراوانی رویدادهای خشکسالی و سیلاب در جهان خواهد شد. این امر می‌تواند هزینه‌های سنگینی را بر اکوسیستم‌های آبی و زمینی، جوامع انسانی و اقتصاد تحمیل کند (Yin et al., 2023). تغییرات زمانی و مکانی در مشخصه‌های سیل و خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک که منابع آب در آن‌ها محدود است، بیشتر مشاهده می‌شود (Byakatonda et al., 2018).

کشور ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان قرار گرفته و از منابع رطوبتی بسیار دور می‌باشد. از این‌رو، سامانه‌های باران‌آور زمانی به ایران می‌رسند که بخش قابل توجهی از رطوبت خود را از دست داده و توان کافی برای ایجاد بارش در بخش‌های مرکزی، شرق و جنوب‌شرقی ایران را ندارند. از سوی دیگر تغییرپذیری و نوسان شدید بارش از سالی به سال دیگر سبب شده که وقوع بارش در ایران به ویژه در این نواحی از کشور کاملاً تصادفی و نامنظم باشد (رضیعی، ۱۳۹۴). در مواجهه با مخاطرات ذکر شده، حوضه‌های آبریز جنوب‌شرقی یکی از آسیب‌پذیرترین حوضه‌های ایران به شمار می‌آیند. این مناطق با توجه به موقعیت جغرافیایی از یک طرف تحت تأثیر جریان‌های جوی متعدد مانند جریان‌ات هوا از سوی شبه قاره هند و به تبع آن باران‌های موسمی تابستانه اقیانوس هند است. از طرف دیگر تحت تأثیر عوامل

مختلفی نظیر حاکمیت زبانه پرارتفاع جنب حاره‌ای، شدت بری بودن و جابجایی مسیر سیستم‌های کم فشار باران‌زای عرض‌های میانه قرار دارد که گرمای شدید و بارندگی ناچیز مهم‌ترین ویژگی‌های مشهود اقلیمی آن است (زارع‌ابیانه و همکاران، ۱۳۹۴). تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر منجر به افزایش وقوع سیلاب‌های ناگهانی و خشکسالی‌های طولانی‌مدت در این منطقه شده است (رودری و همکاران، ۱۴۰۰) و مشخصه‌های آن را تغییر داده است، هرچند تأثیر این نتایج به مناطق، فصول و معیارهای خشکسالی یا سیل در نظر گرفته شده، بستگی دارد (Cook et al., 2020; Alfieri et al., 2017). بررسی رفتار وقوع دوره‌های خشک و مرطوب در مقیاس‌های زمانی مختلف در این محدوده برای سه دهه‌ی گذشته نشان می‌دهد که فراوانی، مدت و شدت دوره‌های خشک (ویژگی‌های خشکسالی) به تدریج در این منطقه افزایش یافته‌اند (زارع‌ابیانه و همکاران، ۱۳۹۴). مطالعات انجام شده برای افق آینده نیز حاکی از تغییر در مقادیر متغیرهای اقلیمی و به تبع آن افزایش شدت و مدت خشکسالی‌ها در این محدوده است (فرزانه و همکاران، ۱۴۰۱). موقعیت جغرافیایی حوضه‌های واقع در جنوب‌شرق و قرارگیری آن در عرض‌های جغرافیایی پایین و وجود رودخانه‌های طغیانی، باعث شده تا این منطقه در سال‌های اخیر نیز مورد هجوم سیل‌های مخرب و ناگهانی قرار گیرد. به‌طوری‌که در ۶ اسفند ۱۴۰۲، حدود ۷۶ درصد بارش سالانه منطقه طی ۴۸ ساعت بارید و منجر به شکسته شدن بستر رودخانه‌ها و سرازیر شدن سدها و وقوع سیل شد (پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۴۰۲). رویداد مشابهی در دیماه ۱۳۹۸ اتفاق افتاد و در پی بارش‌های سنگین در ۲۴ ساعت، دبی در ایستگاه‌های باهوکللات و پیرسهراب به بیش از ۳۰۰۰ مترمکعب بر ثانیه افزایش یافت. وقوع سیل علاوه بر تلفات جانی، خسارات جدی به زیرساخت‌های بخش‌های زیربنایی، کشاورزی و واحدهای مسکونی شهری و روستایی منطقه وارد و دسترسی به ۵۰۰ روستا را قطع کرد. پژوهش‌های انجام شده دو عامل «تغییرپذیری آب و هوا» و

«تغییرات اقلیمی» را علت تغییر الگوی بارش‌ها و بارش‌های شدید و در نتیجه وقوع رخداد‌های حدی هیدرولوژیکی در این منطقه معرفی کردند (پژوهشکده سوانح طبیعی، ۱۳۹۸).

در سال‌های اخیر تمرکز اصلی پژوهش‌ها در کشور بر روی ارزیابی سیل یا خشکسالی بصورت منفرد نسبت به تغییرات اقلیمی بوده است. پورکریمی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی حوضه زربینه رود پرداختند. خروجی‌ها نشان داد میانگین بیشترین وقوع و تداوم خشکسالی کل حوضه در آینده نسبت به دوره پایه، مربوط به شاخص هیدرولوژیکی (SRI^۱) است. همچنین ارزیابی رابطه‌ی خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژی در دشت سیستان توسط رودری و همکاران (۱۳۹۸) انجام شد و خروجی‌ها نشان داد شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژی با یکدیگر تطابق ندارند و خشکسالی هیدرولوژی به دلیل حجم کم بارش و ضریب تغییرات بالای آن و نقش حیاتی جریان‌های سطحی در تامین منابع آب دشت، وضعیت خشکسالی را نسبت به خشکسالی هواشناسی بهتر نشان می‌دهد. رحیمی‌بندرآبادی و همکاران (۱۴۰۲) به پایش خشکسالی هیدرولوژیکی در حوضه آبخیز دریای خزر پرداختند. نتایج بیانگر آن است که در فاصله سال‌های ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۰، در اکثر ایستگاه‌ها شدیدترین و طولانی‌ترین خشکسالی‌ها اتفاق افتاده است. پیش‌بینی خشکسالی‌ها تحت تغییر اقلیم در آبریز سد میناب نشان داد که مقادیر خشکسالی هیدرولوژیکی و هواشناسی در گذشته دارای روند افزایشی بوده اما در آینده در اکثر سناریوها روند خشکسالی رو به کاهش خواهد بود که عموماً از نظر آماری فاقد روند معنی‌دار است. در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر مشخصه‌های سیلاب نیز پژوهش‌هایی انجام شده است. به عنوان نمونه ایمانی و همکاران (۱۴۰۱) تاثیر تغییر اقلیم بر

حجم و دبی پیک سیلاب در زیرحوضه قران تالار را با به کارگیری ۲۲ مدل و تحت دو سناریوی انتشار مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد در شرایط تغییر اقلیم (بسته به سناریو) مقدار دبی و حجم سیلاب حدود ۳۵ تا ۱۱۰ درصد افزایش خواهد یافت. در مطالعه‌ای دیگر علیپور و همکاران (۱۴۰۰) به تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر شدت و بزرگی سیلاب در دوره‌های آتی پرداختند. این مطالعه در حوضه آبریز امامه برای دو دوره (۲۰۵۵-۲۰۱۱) و (۲۰۵۶-۲۱۰۰) و تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 انجام شد. نتایج نشان داد دبی اوج شبیه‌سازی شده تحت سناریوهای مذکور در دوره اول نسبت به مقادیر مشاهداتی آنها به ترتیب با ۱۰/۶٪- و ۲۳/۴٪- کمتر خواهد بود در حالی که در دوره دوم تحت سناریوی RCP8.5 برخلاف RCP2.6 دبی اوج شبیه‌سازی شده نسبت به دبی اوج سیل مشاهداتی دارای مقادیر بیشتری می‌باشد.

همانطور که سابقه پژوهش نشان داد بررسی همزمان تغییرات آب و هوایی بر مشخصه‌های خشکسالی و سیلاب در ایران کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. از آنجایی که اثرات مخاطرات اقلیمی بر روی مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار بیشتر از سایر مناطق اقلیمی می‌باشد (نادری، ۱۳۹۹)، مقابله با رویدادهای هیدرولوژیکی شدید، به ویژه سیل و خشکسالی، مستلزم برنامه‌ریزی برای این مناطق به منظور جلوگیری از افزایش خسارات وارده و سازگاری با اقلیم و اجرای عملیات مخازن مختلف و راهبردی توسعه است. این مطالعه سعی دارد با کمی‌سازی مشخصه‌های سیل و خشکسالی که از دهه ۱۹۸۳ رخ داده است، بینشی در مورد مکانیسم‌های آب و هوایی حاکم بر این رویدادهای شدید جوی ارائه دهد. دانش به‌دست‌آمده پتانسیل افزایش قابلیت‌های پیش‌بینی آینده را دارد و در نهایت انعطاف‌پذیری این مناطق را در برابر شرایط آب و هوایی افزایش می‌دهد.

^۱ Standardized Runoff Index

داده و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: محدوده مورد مطالعه بخشی از حوضه‌های آبریز شرق، فلات مرکزی و دریای عمان و خلیج فارس است که با وسعتی معادل ۱۵۴۴۰۶ کیلومترمربع در جنوب شرق کشور واقع شده است. از نظر جغرافیایی این منطقه بین عرض‌های ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۲۹ درجه و ۵۷ دقیقه شمالی و طول شرقی ۵۸ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۲۱ دقیقه قرار گرفته و شامل حوضه‌ی هامون - مشکیل، هامون - جازموریان و سیستان جنوبی است (شکل ۱). قسمت اعظم این حوضه‌ها در استان سیستان و بلوچستان قرار دارد که در دهه‌های اخیر سیلاب و

خشکسالی‌ها خسارات شدیدی را بر منابع آب‌های زیرزمینی و سطحی وارد کرده است. براساس داده‌های اقلیمی از سال ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۲، میانگین بارندگی سالانه حوضه کمتر از ۶۵ میلی‌متر بوده است و میزان تبخیر در آن به بیش از ۵۰۰۰ میلی‌متر در سال می‌رسد. وزش بادهای ۱۲۰ روزه نیز که از اواخر بهار تا پایان تابستان می‌وزد در تشدید خشکی محیط موثر است. با توجه به پایین بودن بارش و عدم وجود منابع برفی کوهستانی اکثر جریان‌ات رودخانه‌ای، موقتی و فصلی بوده از اینرو اکثر سیل‌ها در این محدوده از نوع ناگهانی می‌باشد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۲).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

داده‌های آماری در یک بازه زمانی طولانی مدت صورت گرفته است. برای محاسبه آزمون من‌کنندال پارامترهای اقلیمی از داده‌های دما و بارش ایستگاه‌های سینوپتیک (سروان، چابهار، جیرفت، نیک‌شهر و ایرانشهر) در محدوده‌ی مورد مطالعه برای بازه زمانی مذکور نیز استفاده شد.

جهت انجام این پژوهش، داده‌های روزانه آب‌سنجی مربوط به ایستگاه‌های اسفندک، کهنک، بمپور، کهیر، کاریانی، باهوکلان و پیرسهراب طی بازه زمانی ۱۹۸۳-۲۰۲۲ از شرکت مدیریت منابع آب ایران دریافت گردید. مشخصات و موقعیت ایستگاه‌های فوق در جدول و شکل ۱ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که انتخاب این ایستگاه‌ها براساس دارا بودن

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های آب‌سنجی مورد استفاده

حوضه	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
هامون - مشکیل (حوضه مرزی شرق)	اسفندک	۶۲°۵۰'	۲۷°۰۷'	۹۶۸
	کهنک	۵۷°۷۶'	۲۸°۳۳'	۵۴۰
هامون - جازموریان (حوضه فلات مرکزی)	بمپور	۶۰°۳۵'	۲۷°۱۱'	۵۲۰
	کهریز	۶۰°۰۷'	۲۵°۲۲'	۴۹
بلوچستان جنوبی (حوضه دریای عمان و خلیج فارس)	کاریانی	۵۹°۳۷'	۲۵°۷۳'	۳۷۸
	باهوکلالت	۶۱°۴۱'	۲۵°۷۲'	۶۲
	پیرسهراب	۶۰°۸۸'	۲۵°۷۵'	۵۷

روش تحقیق

آزمون‌های روندیابی: بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی در هیدرولوژی امکان فهم بهتر از الگوهای تغییرات در مقادیر بارش، دما و رطوبت را فراهم می‌کند. این اطلاعات به ما کمک می‌کنند تا به طور دقیق‌تر پیش‌بینی کنیم که چگونه این تغییرات بر جریان‌های آب، سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها تأثیر می‌گذارد. در این آزمون فرض صفر آزمون من-کندال بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد. در این روش ابتدا اختلاف بین هر یک از مشاهدات با تمام مشاهدات پس از آن محاسبه شده و پارامتر S مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

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

که n تعداد مشاهدات سری و x_k و x_j به ترتیب داده‌های زام و k ام سری می‌باشند. تابع sgn نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\begin{aligned} \text{sgn} &= (x_j - x_k) = +1 \quad \text{for}(x_j - x_k) > 0 \\ \text{sgn} &= (x_j - x_k) = 0 \quad \text{for}(x_j - x_k) = 0 \\ \text{sgn} &= (x_j - x_k) = -1 \quad \text{for}(x_j - x_k) < 0 \end{aligned}$$

در مرحله بعد محاسبه واریانس S توسط یکی از روابط زیر محاسبه شد:

$$\text{For } n > 10$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

$$\text{For } n < 10$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

که n و m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله (تعداد گره‌ها) می‌باشد. در نهایت نیز آماره z به کمک یکی از روابط زیر استخراج می‌شود:

$$\text{For } S > 0 \quad z = \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}$$

$$\text{For } S = 0 \quad z = 0$$

$$\text{For } S < 0 \quad z = \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}$$

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر برقرار باشد:

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2}$$

که α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی‌داری α می‌باشد که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، $\alpha/2$ استفاده شده است. در بررسی حاضر این آزمون برای سطوح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ به کار گرفته شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود (Mann, 1945). برای محاسبه شیب واقعی که میزان تغییر در واحد زمان است از آزمون ناپارامتریک تخمین‌گر شیب Sen استفاده شد (Sen, 1967). این آزمون در جایی به کار می‌رود که فرض خطی بودن روند پذیرفته و به صورت رابطه‌ی زیر بیان شود:

$$f(t) = Q_t + B$$

Q و B عبارتند از شیب و ثابت خط یا همان عرض از مبدا. شیب هر جفت از داده‌های متوالی سری از رابطه زیر برآورد گردید:

$$Q_{jk} = \frac{x_j - x_k}{j - k}, \quad j > k$$

اگر N فرد باشد، برآوردگر شیب سن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \frac{Q[N+1]}{2}$$

و اگر N زوج باشد از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$Q = \frac{1}{2} \left(Q \frac{N}{2} + Q \frac{N+2}{2} \right)$$

جدول ۲- نمایه‌های سیلاب (Qu et al., 2019)

شاخص	معادله	توضیحات
مدت	$FDi = \frac{Di}{FFi}$ $FDI = \frac{\sum_{i=1}^N FDi}{N}$	FDi: مدت سیلاب در هر سال آبی Di: تعداد روزهایی که سیلاب رخ می‌دهد (جریان بزرگتر یا مساوی با سیل ۱۰ ساله) در سال i ام FFi: تعداد رویداد سیل در سال آبی i ام N: تعداد کل سال‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه FDI: متوسط مدت سیلاب در بازه زمانی مورد مطالعه
بزرگی	$FMj = \frac{\sum_{m=1}^n Qm}{n}$ $FMi = \frac{\sum_{j=1}^k FMj}{k}$ $FM = \frac{\sum_{i=1}^N FMi}{N}$	FMj: متوسط جریان روزانه در رویداد سیل j ام Qm: جریان روزانه در روز m ام n: تعداد کل روز در یک رویداد سیل FMi: متوسط بزرگی سیلاب در سال آبی i ام k: تعداد کل رویداد های سیلاب در سال آبی i ام FM: متوسط بزرگی سیلاب در بازه زمانی مورد مطالعه N: تعداد کل سال‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه
فراوانی	$FFI = \frac{\sum_{i=1}^N FFi}{N}$	FFi: تعداد رخداد های سیلاب در سال آبی i ام N: تعداد کل سال‌ها در دوره مورد مطالعه FFI: متوسط فراوانی سیلاب در بازه زمانی مورد مطالعه

جریان روزانه ثبت شده در ایستگاه‌های آب‌سنجی حوضه‌های مورد مطالعه (۲۰۲۲-۱۹۸۳) محاسبه شد. شاخص بزرگی سیل (FMI^۱) نشان‌دهنده‌ی میزان نسبی بزرگی رویدادها در مقایسه با سیلاب ۱۰ ساله است. برای محاسبه این شاخص ابتدا باید میانگین جریان روزانه را برای هر سیل تعیین نمود، سپس میانگین بزرگی سیلاب‌های اتفاق افتاده را در یک سال بدست آورد و در ادامه متوسط آن را برای دوره‌ی زمانی مورد مطالعه محاسبه کرد. شاخص مدت زمان سیل (FDI^۲) عبارت است از تعداد روزهای متوالی جاری شدن سیل در یک رویداد به طوری که دبی جریان بیشتر از سیلاب ۱۰ ساله باشد. در این روش، ابتدا میانگین مدت سیلاب در یک سال آبی محاسبه، سپس متوسط این مقادیر برای بازه ۲۰۲۲-۱۹۸۳ استخراج می‌شود.

ارزیابی تغییرات نمایه‌های سیلاب: در دهه‌های اخیر تعداد، شدت و بزرگی سیلاب در سرتاسر جهان با توجه به تغییرات اقلیمی، تغییر در الگوهای بارش و افزایش سطح دریا افزایش چشمگیری داشته که خسارات جانی و مالی فراوانی را به جای گذاشته است. این مسئله برای حوضه‌های جنوب شرق ایران به دلیل همجواری با دریای عمان و تأثیرپذیری گسترده از بارش‌های موسمی بسیار حائز اهمیت است. به همین دلیل در تحقیق حاضر برای بررسی روند تغییرات بلندمدت مشخصه‌های اصلی سیلاب، از تعاریف به کار برده شده برای شدت، مدت و فراوانی وقوع در شاخص کنترل سیلاب (Logsdon & Chaubey 2013) استفاده شد. طبق این تعریف یک رخداد سیل به معنای روز یا روزهای متوالی‌ای است که در آنها دبی جریان، بزرگتر از دبی سیلاب با دوره بازگشت ۱۰ ساله باشد. در پژوهش حاضر هر یک از مشخصه‌های سیلاب به صورت مجزا با استفاده از

1. Flood Magnitude Index
2. Flood Duration Index

جدول ۳- طبقه‌بندی خشکسالی هیدرولوژیکی (SDI)

وضعیت خشکسالی	محدوده
فاقد خشکسالی	$0 \geq SDI$
خشکسالی ملایم	$-1 \leq SDI < 0$
خشکسالی متوسط	$-1.5 \leq SDI < -1$
خشکسالی شدید	$-2 \leq SDI < -1.5$
خشکسالی خیلی شدید	$SDI < -2$

که در آن SDI شاخص هیدرولوژیکی، V_i حجم آورد تجمعی رودخانه (مترمکعب بر ثانیه) برای هر سال آماری در بازه زمانی (۶ ماهه و ۱۲ ماهه)، S و V به ترتیب انحراف معیار و میانگین حجم آورد تجمعی رودخانه در طول دوره آماری بلند مدت، i سال هیدرولوژیکی، z ماه (مثلا برای ماه مهر $z=1$ و برای ماه شهریور $z=12$)، K دوره زمانی و Q دبی می‌باشد. مقادیر مثبت SDI شرایط مرطوب و مقادیر منفی، خشکسالی هیدرولوژیکی را نشان می‌دهد. SDI پنج حالت می‌تواند داشته باشد که در جدول ۳ طبقات تعریف شده است (Nalbantis & Tsakiris., 2009).

تحلیل روند و ویژگی‌های خشکسالی: یکی از روش‌های متداول تحلیل خشکسالی، تئوری ران (Runs) می‌باشد. با استفاده از این تئوری، سه ویژگی مهم خشکسالی (مدت، شدت و فراوانی) را می‌توان تعریف نمود (Yevjevich, 1976). مدت خشکسالی بیانگر مدت زمان وقوع یک سطح مشخص از خشکسالی، از شروع تا پایان آن است. شدت به میانگین مقادیر SDI در طول یک دوره خاص از رویداد خشکسالی اشاره دارد و فراوانی خشکسالی را نیز می‌توان به عنوان نسبت تعداد رویدادهای خشکسالی به کل تعداد سال‌های دوره‌ی مورد مطالعه تعریف کرد. در مطالعه حاضر، مدت، شدت و فراوانی خشکسالی برای دوره‌ی ۱۹۸۳-۲۰۲۲ محاسبه گردید.

در نهایت شاخص فرکانس یا فراوانی (FFI^1) از طریق محاسبه میانگین تعداد سیلاب در یک سال آبی در طول دوره‌ی آماری بدست می‌آید (جدول ۲).

شاخص خشکسالی جریان‌های رودخانه‌ای (SDI): در زمینه خشکسالی هیدرولوژی تاکنون شاخص‌های متعددی ($PHDSI^3$, $SWSI^2$) پیشنهاد گردیده که به دلیل محاسبات زیاد و پیچیدگی، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا جهت حل این مشکل می‌توان از شاخصی شبیه شاخص بارش استاندارد تحت عنوان شاخص دبی جریان (SDI) استفاده نمود که براساس متوسط جریان ماهانه می‌باشد. در پژوهش حاضر برای پایش خشکسالی هیدرولوژی حوضه‌های آبریز جنوب‌شرق از شاخص جریان رودخانه‌ای استفاده شد. در این شاخص که برای اولین بار توسط (Nalbantis & Tsakiris, 2009) معرفی شد، فرض می‌شود سری‌های زمانی حجم جریان‌های رودخانه‌ای ماهانه بصورت Q_{ij} در دسترس است که در آن اندیس i سال هیدرولوژیکی، اندیس j ماه مربوط به سال هیدرولوژیکی و k دوره زمانی می‌باشد. بر مبنای این سری‌ها، حجم تجمعی جریان رودخانه بصورت زیر خواهد بود:

$$SDI_{j,k} = \frac{(V_{j,k} - V_K)}{S_K}$$

$$V_{j,k} = \sum_{j=1}^{jk} Q_{i,j}$$

$$i = 1, 2, \dots; k = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, 12$$

1. Flood Frequency Index
2. Surface water supply index
3. Palmer hydrologic drought index

نتایج و بحث

آشکارسازی روند سالانه پارامترهای اقلیمی: جدول ۴ به ارائه خلاصه‌ای از وضعیت اقلیمی چهار دهه گذشته در حوضه‌های جنوب شرق ایران می‌پردازد. محاسبات انجام شده در بازه زمانی ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهند که حوضه بلوچستان جنوبی، به دلیل قرارگیری در عرض‌های جنوبی تر و تاثیر

بارش‌های موسمی، با میانگین دمای ۲۷/۹ درجه سانتی‌گراد و بارش ۱۳۶ میلی‌متر، بالاترین مقادیر دما و بارش را داراست. در مقابل، حوضه هامون - مشکیل با ارتفاع بالاتر، دارای میانگین دمای ۲۲/۵ درجه سانتی‌گراد و بارش ۱۰۱ میلی‌متر است که کمترین مقادیر متوسط دما و بارش را دارد.

جدول ۴- وضعیت اقلیمی حوضه‌های جنوب شرق ایران (۱۹۸۳-۲۰۲۲)

بارش (میلی‌متر)			دما (سانتی‌گراد)			پارامتر
متوسط	حداقل	حداکثر	متوسط	حداقل	حداکثر	حوضه
۱۳۶	۰	۱۱۰	۲۷/۹	۱۰/۹	۴۱/۳	بلوچستان جنوبی
۱۰۱	۰	۷۹	۲۲/۵	-۱	۳۷/۶	هامون-مشکیل
۱۱۰	۰	۵۶	۲۳/۴	-۶	۴۳/۸	هامون - جازموریان

جنوب شرقی افزایشی است و این روند در سطوح ۰/۹۵ و ۰/۹۹ معنادار می‌باشند. مطابق با ضرایب آماری Z و شیب سن در محدوده‌ی مورد مطالعه، متوسط بارش سالانه و فراوانی تعداد روزهای بارشی بیش از ۱۰ میلی‌متر به ترتیب دارای روند کاهشی و افزایشی است، هرچند این روند معنادار نیست. در مجموع نتایج این بخش نشان دهنده‌ی روند افزایشی و معنادار دما و کاهش بارش در هر سه حوضه مذکور است.

آشکارسازی روند سالانه در سری‌های مشاهداتی متوسط دما، بارش و فراوانی تعداد روزهای بارشی بیش از ۱۰ میلی‌متر طی دوره ۱۹۸۳-۲۰۲۲، با استفاده از آزمون تعیین روند من‌کنندال برای سه حوضه‌ی مورد مطالعه انجام شد. نتایج محاسبه‌ی آماره‌ی Z آزمون من-کنندال در سطوح اطمینان ۰/۹۵ و ۰/۹۹ در جدول ۵ نشان داده شده است. خروجی‌ها بیانگر آن است که روند متوسط دما در حوضه‌های واقع در

جدول ۵- تحلیل روند سالانه متوسط دما، بارش و فراوانی تعداد روزهای بارشی بیش از ۱۰ میلی‌متر (۱۹۸۳-۲۰۲۲)

حوضه			آماره	پارامتر
هامون - جازموریان	هامون-مشکیل	بلوچستان جنوبی		
۱/۷۸*	۲/۸۷**	۳/۷**	من‌کنندال	متوسط دما (°C)
۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲	شیب سن	
-۰/۲۰	-۰/۲۱	-۰/۱۴	من‌کنندال	بارش (mm)
-۰/۰۹	-۰/۲۳	-۰/۳۵	شیب سن	
۰/۷۹	۰/۴۷	۰/۴۱	من‌کنندال	بارش بیش از ۱۰ (mm)
۰/۰۱	۰/۱	۰/۲۱	شیب سن	

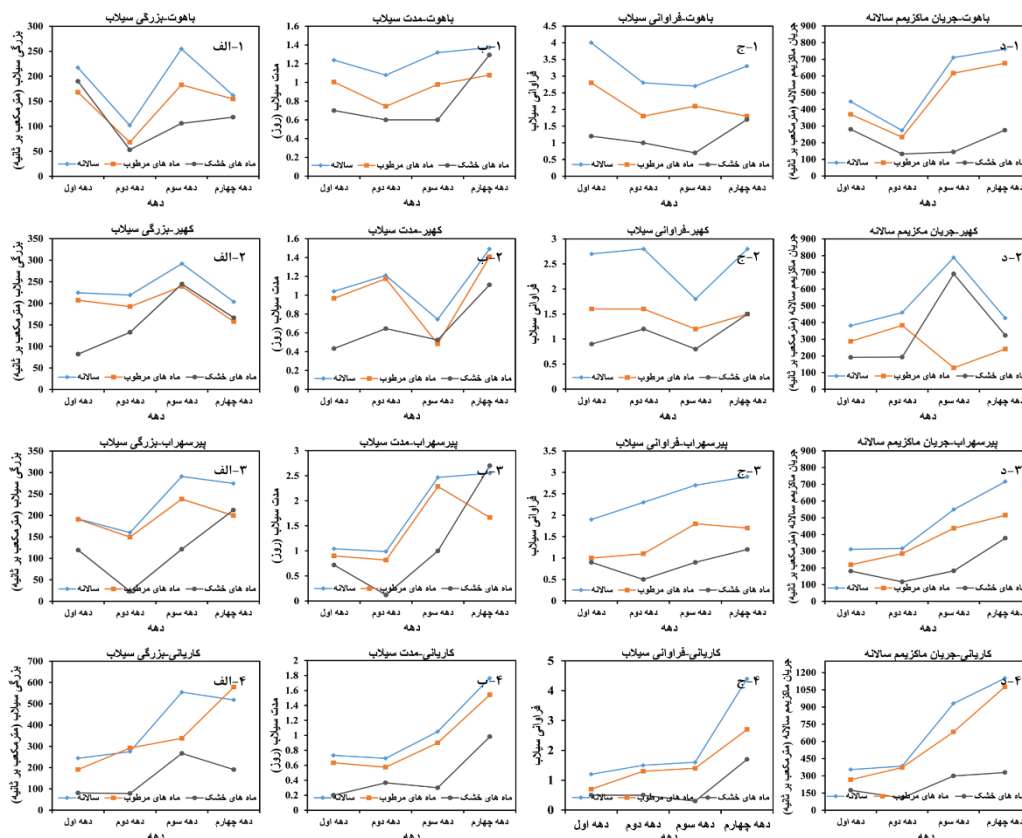
* در سطح ۰/۰۵ معنی‌دار، ** در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار

رویدادهای حدی نیز روندهای مشابهی را در حوضه‌های جنوب شرق ایران نشان دادند. همانطور که در شکل ۲ (۱-الف تا ۴-الف) قابل مشاهده است

بررسی تغییرات نمایه‌های رویدادهای حدی (سیل و خشکسالی) در حوضه‌ی بلوچستان جنوبی: پس ارزیابی تغییرات دما و بارش، واکاوی

(شکل ۲، ۱-ب تا ۴-ب). همچنین براساس خروجی‌های آماری متوسط سیلاب در ایستگاه‌های باهوت، کهیر، پیرسهراب و کاریانی در دهه‌ی اول به ترتیب از ۱/۲، ۱، ۱/۱ و ۰/۷ روز به ۱/۴، ۱/۵، ۲/۵ و ۱/۸ روز در دهه‌ی چهارم افزایش یافته که پیرسهراب بیشترین افزایش را به خود اختصاص داده است. یافته‌های حاصل از تحلیل متوسط تعداد وقوع سیل طی دوره‌ی آماری مذکور نشان می‌دهد که در بیشتر ایستگاه‌های مطالعاتی بیشترین تعداد وقوع رخدادها در دهه‌ی چهارم اتفاق افتاده و کمترین آن مربوط به دهه اول است (شکل ۲، ۱-ج تا ۴-ج). به طوریکه نمایه فوق از ۱/۲ تا ۲/۷ روز در دهه‌ی اول به ۲/۸ تا ۴/۴ روز در دهه‌ی چهارم رسیده و ایستگاه کاریانی با افزایش ۳/۲ درصدی بیشترین افزایش را تجربه کرده است.

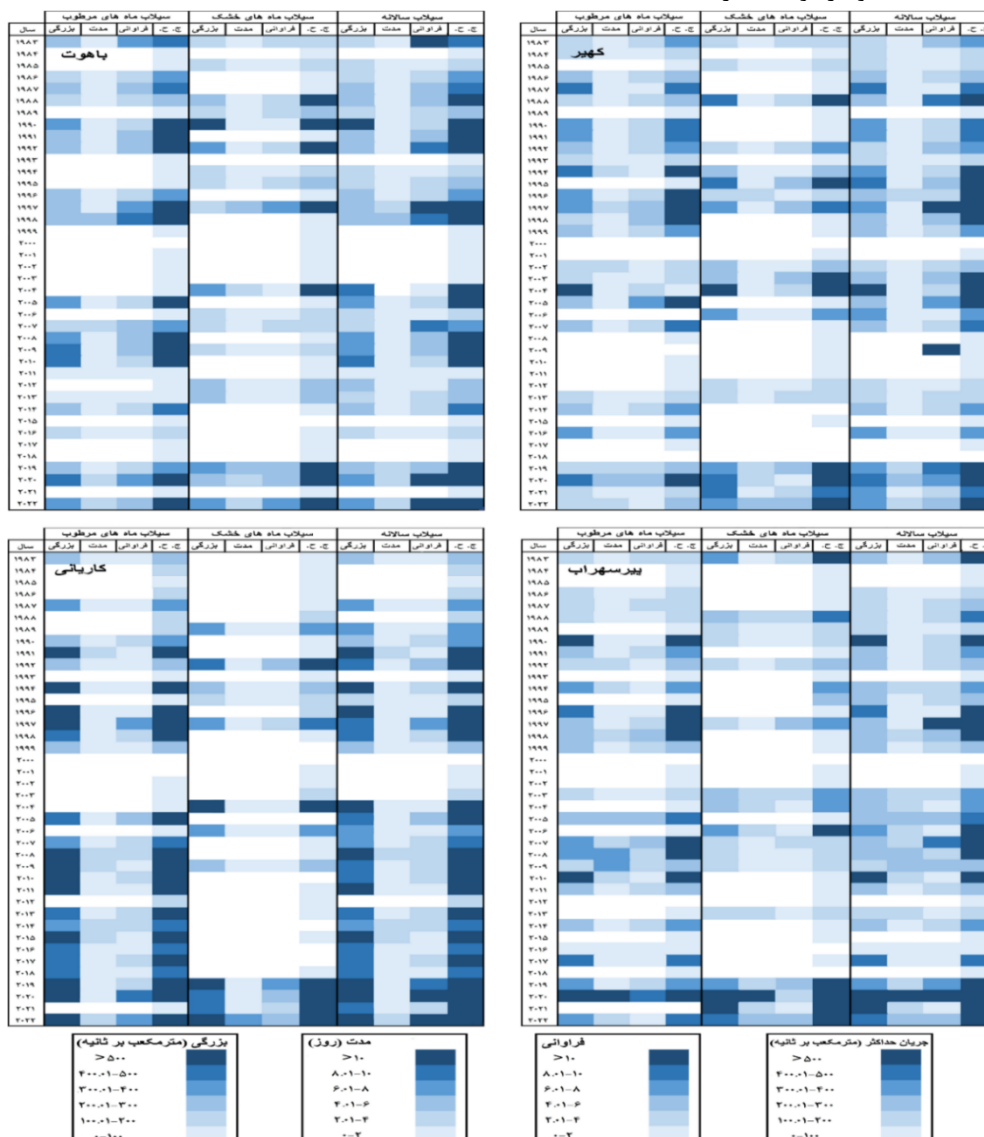
شاخص بزرگی سیلاب در ایستگاه‌های باهوت، کهیر، پیرسهراب و کاریانی واقع در بلوچستان جنوبی در بازه زمانی مورد مطالعه، افزایشی است. بیشترین افزایش در بزرگی سیلاب برای تمامی ایستگاه‌های در دهه سوم رخ داده است. بطوری‌که متوسط سالانه مقدار شاخص برای ایستگاه‌های باهوت، کهیر، پیرسهراب و کاریانی به ترتیب از ۲۱۷، ۲۲۵، ۱۹۱ و ۲۴۴ مترمکعب بر ثانیه در دهه‌ی اول به ۲۵۵، ۲۹۱، ۲۹۱ و ۵۵۴ مترمکعب بر ثانیه در دهه‌ی سوم افزایش یافته است. از نظر ایستگاهی بیشترین افزایش در بزرگی سیلاب مربوط به کاریانی به مقدار ۳۱۰ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. بررسی سیلاب‌های فصلی و سالانه از نظر مدت نشان می‌دهد که متوسط مدت سیلاب در بازه زمانی ۲۰۲۲-۱۹۸۳ بطور پیوسته در تمامی ایستگاه‌ها در حال افزایش بوده و طولانی‌ترین رخدادها در دوره‌های مورد مطالعه مربوط به دهه‌ی چهارم است



شکل ۲- روند تغییرات مشخصه‌های سیلاب در حوضه بلوچستان جنوبی طی چهار دهه اخیر

علاوه بر این، تغییرات سال به سال مشخصه‌های فوق در شکل ۳ نیز نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تمامی ایستگاه‌های حوضه‌ی بلوچستان جنوبی در فاصله سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۲ شاهد بالاترین نمایه‌های مدت، بزرگی و تعداد وقوع بوده‌اند و در این بین ایستگاه کاریانی سیل‌های بزرگتر، طولانی‌تر و با تعداد وقوع بیشتری را نسبت به سایر ایستگاه‌ها تجربه کرده است. از نظر فصلی بیشترین رخداد سیل در دوره‌ی سرد سال و همزمان با ورود سامانه‌های جوی از غرب و جنوب شرق کشور رخ داده است (احدی و همکاران، ۱۳۹۹).

همچنین بررسی حداکثر دبی روزانه در سال نشان می‌دهد که به جز ایستگاه کهیر سایر ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی پیوسته هستند. مشابه با نمایه‌های بزرگی و تعداد وقوع، ایستگاه کاریانی بیشترین افزایش در دبی حداکثری را به خود دیده است (شکل ۲، ۱-د تا ۴-د). در مجموع نتایج نشان می‌دهد شاخص‌های مذکور طی دوره‌ی مورد بررسی از یک روند افزایشی تبعیت می‌کنند. همچنین از نظر فصلی دو نمایه بزرگی و مدت در فصل خشک تغییرات بزرگتری را در مقایسه با فصل مرطوب تجربه کرده‌اند. این در حالی است که مقدار تغییرات در شاخص تعداد وقوع سیلاب بین دوره‌های خشک و مرطوب کمتر است.

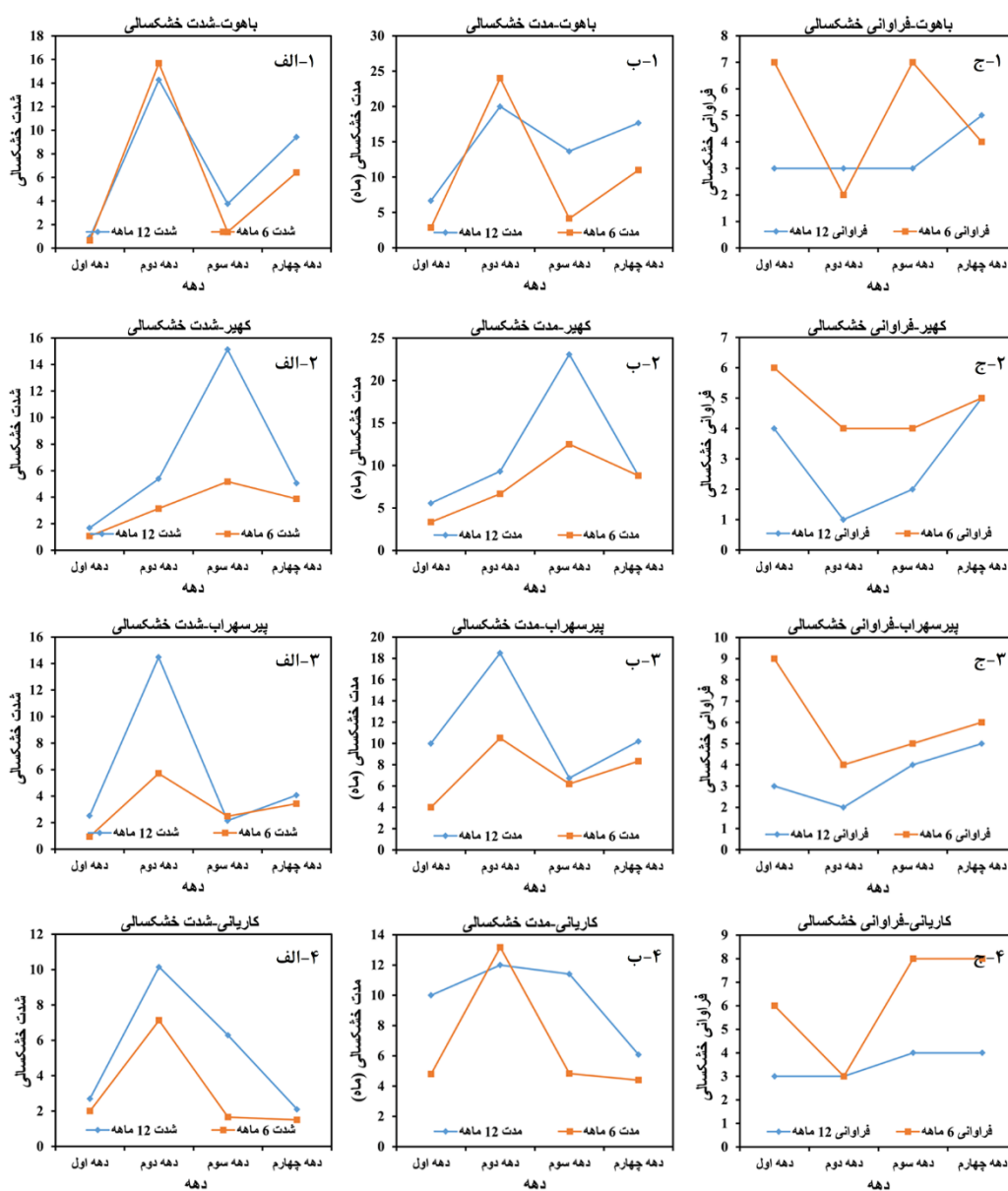


شکل ۳- تغییرات سال به سال مشخصه‌های بزرگی، مدت و تعداد وقوع سیلاب در حوضه بلوچستان جنوبی

نیز بیشترین تغییرات در مدت خشکسالی را نیز به خود دیده است (شکل ۴، ۱-الف و ۱-ب). در حالی که کمترین تغییرات در نمایه‌های فوق به ایستگاه کاربانی با مقادیر ۰/۵ و ۰/۶ در شدت و ۴ در مدت و در مقیاس ۶ و ۱۲ ماهه تعلق دارد.

روند نمایه تعداد وقوع خشکسالی متفاوت با دو شاخص دیگر است. در این شاخص تعداد خشکسالی‌ها در مقیاس ۱۲ ماهه روند صعودی و برعکس در مقیاس ۶ ماهه روند کاهشی در دهه‌ی چهارم نسبت به دهه‌ی اول دارد (شکل ۴، ۱-ج تا ۴-ج).

نتایج حاصل از پایش دهه‌ای مشخصه‌های خشکسالی SDI در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه برای حوضه بلوچستان جنوبی که در شکل ۴ ارائه شده است، حکایت از آن دارد که در همه‌ی ایستگاه‌ها بجز کاربانی شدت و مدت خشکسالی در دهه‌ی چهارم در مقایسه با دهه‌ی اول افزایش قابل توجهی داشته است. باهوت با افزایش شدت خشکسالی به میزان ۵/۸ و ۸/۵ به ترتیب در مقیاس زمانی ۶ و ۱۲ ماهه بیشترین تغییرات در شدت را داشته و از طرفی با ۱۱ و ۸ ماه افزایش در مدت خشکسالی‌های ۶ و ۱۲ ماهه

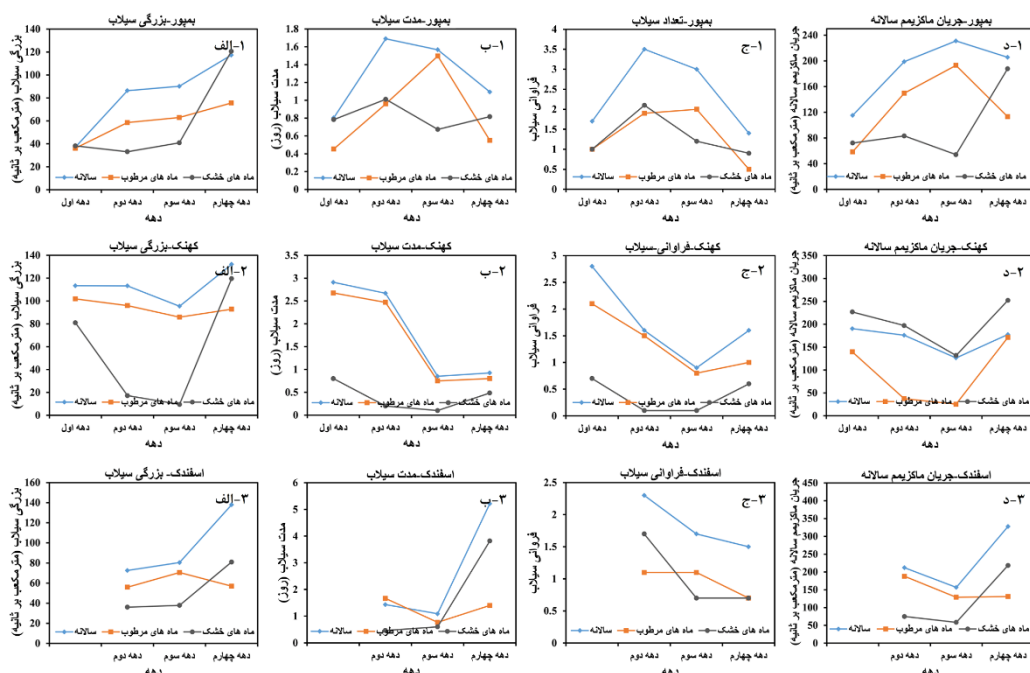


شکل ۴- روند تغییرات مشخصه‌های خشکسالی در حوضه بلوچستان جنوبی طی چهار دهه اخیر

در حالی که در ایستگاه کهنک مدت زمان وقوع سیلاب از ۲/۹ روز در دهه اول به ۰/۹ روز در دوره پایان کاهش یافته است (شکل ۵، ۱-ب تا ۳-ب). همچنین خروجی‌ها نشان می‌دهد که حوضه‌ی آبریز هامون - مشکیل تغییرات قابل توجه ۳/۸ روز را در مدت زمان وقوع سیلاب تجربه کرده است (شکل ۵ ب). نتایج روند برای شاخص تعداد وقوع سیلاب در حوضه کاهشی می‌باشد با این استثنا که در ایستگاه بمپور روند کاهشی این شاخص از دهه‌ی دوم شروع شده و در دهه‌ی چهارم به اوج خود می‌رسد. کهنک بیشترین کاهش را با ۱/۵ تعداد وقوع در بین ایستگاه‌ها به خود اختصاص داده است (شکل ۵، ۱-ج تا ۳-ج). در مجموع روند تغییرات بلندمدت مشخصه‌های سیلاب در دو حوضه‌ی هامون - جازموریان و هامون - مشکیل مشابه یکدیگر و حاکی از افزایش بزرگی و کاهش مدت و تعداد وقوع سیلاب بوده است.

بررسی تغییرات نمایه‌های رویدادهای حدی در حوضه‌ی هامون - جازموریان و هامون - مشکیل: شکل ۵ نمایشگر تحولات دهه‌ای ویژگی‌های سیلاب در دو حوضه‌ی هامون - جازموریان و هامون - مشکیل است. نتایج نشان می‌دهد که متوسط سالانه بزرگی سیلاب در دهه چهارم نسبت به دهه‌ی اول در هر سه ایستگاه بمپور، کهنک و اسفندک افزایش یافته است. بمپور و کهنک به ترتیب با ۸۰ و ۲۰ مترمکعب بر ثانیه بیشترین و کمترین افزایش در بزرگی سیلاب را در ۴۰ سال اخیر به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۵، ۱-الف تا ۳-الف).

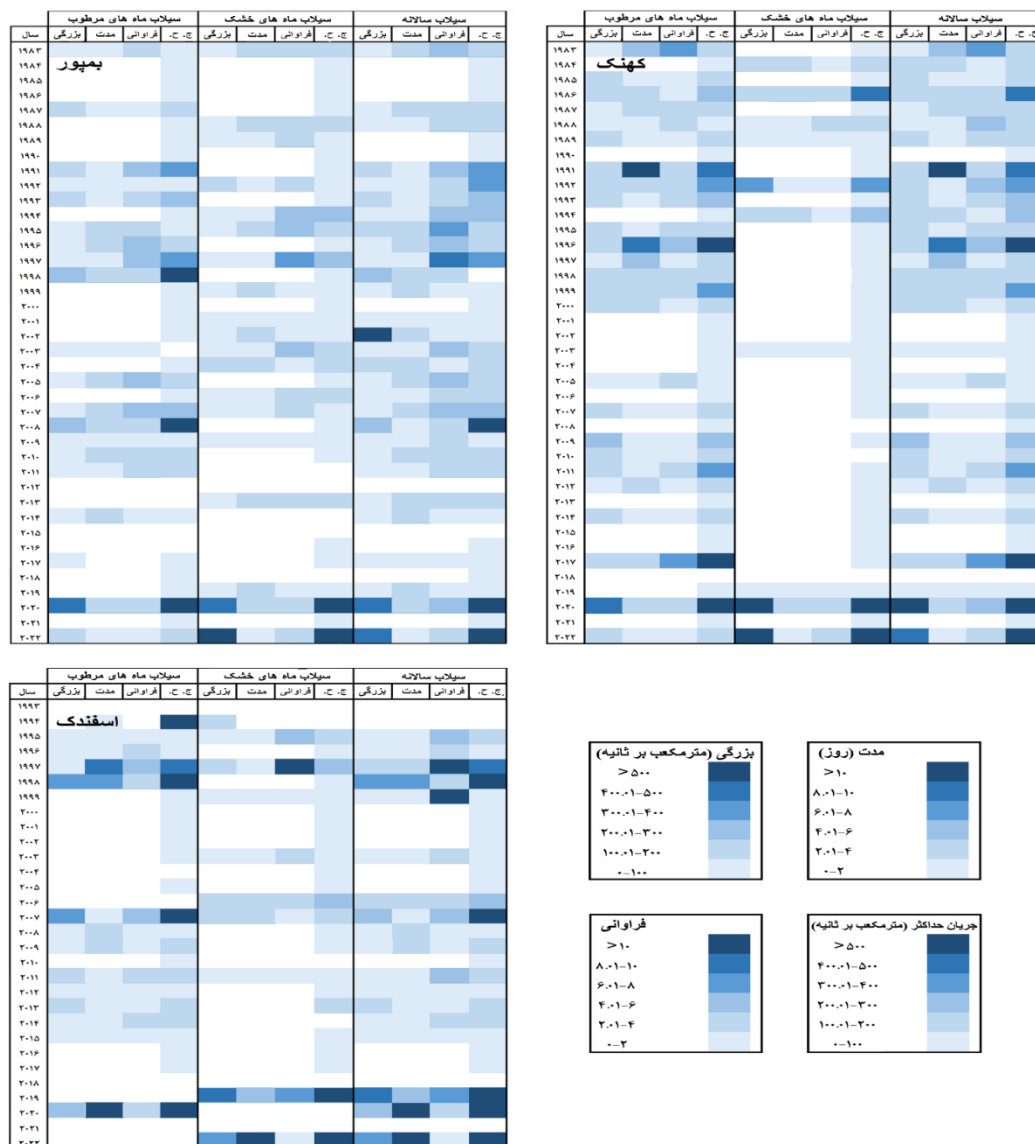
مقایسه روند شاخص مدت، بیانگر سیر کاهشی آن در حوضه هامون - جازموریان و روند افزایشی در هامون - مشکیل است. مدت زمان سیلاب در ایستگاه بمپور و اسفندک به ترتیب از ۰/۸ و ۱/۴ روز در دهه اول به ۱/۱ و ۵/۲ روز در دهه‌ی چهارم افزایش یافته



شکل ۵- روند تغییرات مشخصه‌های سیلاب در حوضه‌های هامون-جازموریان و هامون-مشکیل طی چهار دهه اخیر

سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۹ نسبت به سال‌های قبل در هر سه ایستگاه بمپور، کهنک و اسفندک می‌باشد. این مساله بیانگر اثر تغییرات اقلیمی بر نمایه‌های سیلاب در دهه‌ی اخیر بوده که سبب تغییر رژیم بارش و شدت آن در مناطق خشک و نیمه خشک شده است.

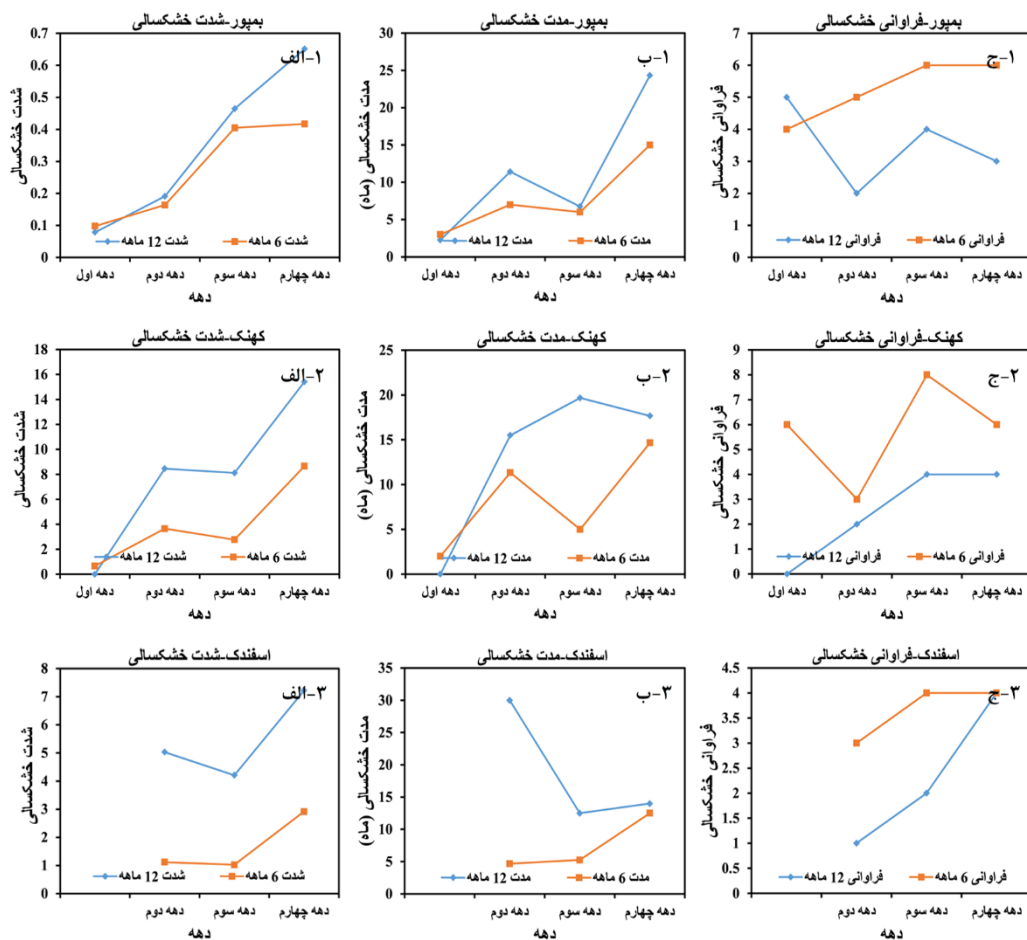
مطابق شکل ۶ نیز که تغییرات سال به سال مشخصه‌های سیلاب در حوضه‌های مذکور را نشان می‌دهد، بزرگی، مدت و فراوانی وقوع در سال‌های مختلف بسته به شرایط اقلیمی متفاوت است. آنچه که مسلم است افزایش قابل توجه ویژگی‌های سیلاب طی



شکل ۶- تغییرات سال به سال مشخصه‌های بزرگی، مدت و تعداد وقوع سیلاب در حوضه‌های هامون-جازموریان و هامون-مشکیل

شدت خشکسالی در ایستگاه کهنک به میزان ۵/۲، در مدت خشکسالی در ایستگاه بمپور به میزان ۲۲ و در تعداد وقوع رخداد در ایستگاه اسفندک به مقدار ۳ رخ داده است. این نتایج نشان می‌دهد که در برخی موارد، تغییرات در شدت، مدت و تعداد وقوع خشکسالی می‌تواند در یک منطقه خاص نسبت به دیگری متفاوت باشد، که این مسأله ممکن است به عوامل محلی مرتبط با آب و هوا، زمین‌شناسی و سایر عوامل محیطی ناشی شود (Raposo et al., 2023).

شکل ۷ تغییرات زمانی متوسط شدت، مدت و تعداد وقوع خشکسالی در دو مقیاس زمانی ۶ و ۱۲ ماهه را در سه ایستگاه بمپور، کهنک و اسفندک نشان می‌دهد. براساس نتایج در هر سه ایستگاه، مشخصات فوق در طول زمان در هر دو مقیاس زمانی ۶ و ۱۲ ماهه در حال افزایش است. با این حال، در برخی موارد، این روند افزایشی دارای استثناهایی است. به عنوان مثال، شاخص مدت در ایستگاه اسفندک و شاخص تعداد وقوع در ایستگاه بمپور، ممکن است از این الگوی کلی متمایز شوند. بیشترین افزایش در



شکل ۷- روند تغییرات مشخصه‌های خشکسالی در حوضه‌های هامون-جازموریان و هامون-مشکیل طی چهار دهه اخیر

در حوضه‌های بلوچستان جنوبی، هامون - مشکیل و جازموریان - هامون به ترتیب ۸۳/۷، ۸۹/۲ و ۷۸/۴ به دست آمده که خود نشان دهنده افزایش قابل توجه مخاطره سیل در این محدوده است. از طرفی ضرایب یاد شده برای مشخصه شدت خشکسالی نیز برابر ۰/۹، ۰/۴ و ۰/۷ می‌باشد که گویای حاکمیت خشکسالی‌ها در منطقه است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت منطقه مورد مطالعه در چهار دهه‌ی گذشته با افزایش بزرگی سیلاب و خشکسالی مواجه بوده است. این نتایج با خروجی پژوهش علوی‌نیا و زارعی (۱۴۰۰) که تغییرات بلندمدت دما و بارش را در جنوبشرق ایران مورد بررسی قرار دادند و به روند افزایشی رویدادهای حدی دمایی و بارشی در این منطقه اشاره کردند، همخوانی دارد. همچنین میان‌آبادی و همکاران (۲۰۲۲) که با استفاده از داده‌های بزرگ

بحث

پژوهش حاضر نشان می‌دهد که تغییر در مشخصه‌های سیلاب و خشکسالی در حوضه‌های جنوبشرق کشور می‌تواند یکی از پیامدهای تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر باشد. به طور کلی، حوضه بلوچستان جنوبی طی دوره‌ی ۱۹۸۳-۲۰۲۲ تغییرات قابل ملاحظه‌ای را در شدت و وقوع رویدادهای حدی سیلاب و خشکسالی به خود دیده است. از سوی دیگر اگرچه شدت سیلاب و خشکسالی برای حوضه‌های هامون - جازموریان و هامون - مشکیل روند افزایشی داشته اما به لحاظ مدت و تعداد وقوع سیلاب در دو حوضه یاد شده شاهد تغییرات کاهشی بوده‌ایم. این مسئله در ارزیابی تغییرات سالانه شاخص‌های مورد بررسی نیز نمایان است به عبارت دیگر مقدار ضریب رگرسیونی در ارزیابی بزرگی سیلاب طی دوره ۴۰ ساله

حوضه در سال ۱۳۷۹ دچار خشکسالی شدید بوده و این مساله منجر به افزایش بزرگی سیلاب به میزان ۷۵٪ در آن سال نسبت به سال مرطوب ۱۳۶۹ شده است.

پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهد که ارتباط قوی بین افزایش مشخصه‌های سیلاب و خشکسالی و افزایش میانگین دمای زمین وجود دارد (Talafre & Knabe., 2009). این یافته‌ها تأیید می‌کنند که رویدادهای سیلاب و خشکسالی به دلیل استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی و سایر فعالیت‌های انسانی که گازهای گلخانه‌ای را آزاد می‌کند، در حال افزایش است. ژو و فن (۲۰۲۱) نشان دادند که تغییر اقلیم و الگوی کلی افزایش دما منجر به افزایش تعداد وقوع مخاطرات طبیعی مانند سیلاب و خشکسالی در چین شده است (Zhu & Fan., 2021). فرانچی و همکاران نتیجه‌گیری کردند که رابطه مستقیم قابل توجه بین افزایش شدت خشکسالی و بزرگی و فراوانی سیلاب در حوضه آبریز لیمپوبو در آفریقای جنوبی وجود دارد (Franchi et al., 2024). خروجی این مطالعه نیز نشان داد محدوده‌ی جنوب‌شرق کشور با تغییرات افزایشی در شدت سیلاب روبه‌رو بوده و با توجه به روند افزایشی آن در ۱۰ سال اخیر احتمالاً شاهد تغییرات آن‌ها در آینده باشیم. این مسئله در مورد خشکسالی نیز صادق است همانطور که در جدول ۶ نشان داده است بررسی وضعیت خشکسالی منطقه در دوره‌ی مورد مطالعه نشان دهنده‌ی این است که در دهه‌ی اول هر سه حوضه هیچگونه خشکسالی نداشته و در دهه‌ی چهارم خشکسالی متوسط را تجربه کرده است. افزایش دما در حوضه‌های مذکور و تغییرات قابل توجه بارش می‌تواند شرایط را به سمت خشکسالی‌های شدید و خیلی شدید طی دوره‌های آینده سوق دهد.

مقیاس^۱ CHIRPS به بررسی خشکسالی‌های جنوب‌شرق پرداختند نیز نشان دادند اگرچه مدت و شدت خشکسالی‌های کوتاه‌مدت (۳، ۶ و ۹ ماهه) کاهش داشته ولی بزرگی آن‌ها افزایش یافته است. علاوه بر آن نتایج پژوهش فرزانه و همکاران (۱۴۰۰) در این محدوده درباره‌ی ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی برای دهه‌های آتی نیز نشان داد که افزایش دما و کاهش بارش در منطقه موجب افزایش روزهای خشک و افزایش بارش‌های حدی و در نتیجه افزایش رویدادهای خشکسالی و سیلاب می‌شود. این مساله منطقه را در معرض اثرات ترکیبی سیلاب و خشکسالی قرار می‌دهد. تأثیرات ترکیبی سیلاب و خشکسالی می‌تواند عواقب جدی‌تری نسبت به اثرات منفرد یکی از این پدیده‌ها داشته و سبب کاهش تأمین منابع آبی، کاهش کیفیت آب، خسارت‌های اقتصادی و اجتماعی بیشتری شود (Yan et al., 2019). بنابراین، مدیریت منابع آب و توسعه راهکارهایی برای سازگاری با این تغییرات اقلیمی در این مناطق اهمیت زیادی دارد. از اینرو در مواردی که حدی‌های دمایی رخ می‌دهد، تداوم دمای بالا همراه با خشکسالی در مراحل اولیه منجر به سخت شدن خاک به دلیل از دست دادن آب و افزایش شماره منحنی خاک می‌شود که می‌تواند باعث افزایش قابل توجه رواناب و افزایش بزرگی سیلاب گردد (Masroor et al., 2022; Zhang et al., 2023). از طرف دیگر جو گرم‌تر زمین، سرعت تبخیر آب را در دوره‌های خشک افزایش می‌دهد، این جو، بخار آب بیشتری را در خود نگه می‌دارد که افزایش بارندگی‌های شدید را در پی دارد. این پیامد با نتایج حاصل از پژوهش عبدی و همکاران (۱۴۰۲) همسو می‌باشند. آنان به تحلیل شاخص خشکسالی SPI در حوضه آبریز دهک در حوضه‌ای مجاور با محدوده مورد مطالعه پرداختند. این

۱. Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station

جدول ۶- مقایسه مقادیر شاخص خشکسالی SDI در دهه‌ی اول و چهارم

حوضه				مقادیر شاخص	
هامون - جازموریان		هامون - مشکیل			
دهه اول	دهه چهارم	دهه اول	دهه چهارم	دهه اول	دهه چهارم
*		*		*	
*		*		*	

نتیجه‌گیری

ارزیابی اثرات تغییرات آب و هوایی بر مشخصات خشکسالی و سیلاب از جنبه‌های گوناگون حائز اهمیت می‌باشد. زیرا در بسیاری از برنامه‌های بلند مدت آبریزداری و مدیریت منابع آب لازم است که چشم‌اندازی دقیق از وضعیت آینده این تغییرات به لحاظ شدت، مدت و فراوانی وقوع، ترسیم گردد. به دلیل پیامدهای ترکیبی مخرب و زیانبار سیلاب و خشکسالی بر محیط زیست منطقه جنوب شرق، در پژوهش حاضر سعی گردید تغییرات بلند مدت مشخصه‌های آن‌ها طی دوره ۲۰۲۲-۱۹۸۳ مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان داد روند متوسط دما در حوضه‌های واقع در جنوب شرقی افزایشی است و این روند در سطوح ۰/۹۵ و ۰/۹۹ معنادار می‌باشند. مطابق با ضرایب آماری Z و شیب سن در محدوده‌ی مورد مطالعه، متوسط بارش سالانه و فراوانی تعداد روزهای بارشی بیش از ۱۰ میلی‌متر نیز به ترتیب دارای روند کاهشی و افزایشی بود. این روندها بر وضعیت رویدادهای حدی تأثیر گذاشته و موجب گردیده بیشترین تعداد وقوع سیل طی دوره‌ی آماری در حوضه بلوچستان جنوبی در دهه‌ی چهارم اتفاق افتد. به طوری‌که نمایه فوق از ۱/۲ تا ۲/۷ روز در دهه‌ی اول به ۲/۸ تا ۴/۴ روز در دهه‌ی چهارم رسیده است. این وضعیت در بیشتر ایستگاه‌های حوضه‌ی هامون - جازموریان و هامون - مشکیل نیز به همین صورت است. با توجه به روند افزایشی این مشخصه‌ها در منطقه به ویژه در دهه‌های اخیر و تداوم آن برای دهه‌های آتی بنظر می‌رسد این محدوده در آینده با

بحران کم‌آبی و در مواردی افزایش بزرگی سیلاب و خشکسالی روبرو شود. با وجود اینکه این نتایج نشان‌دهنده روند نگران‌کننده‌ای در حوضه‌های هامون - جازموریان و هامون - مشکیل است، اما به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های کافی در این مطالعه، تکمیل و تأیید دقیق این یافته‌ها نیازمند بررسی‌های بیشتر با حجم وسیع‌تر از اطلاعات می‌باشد. لازم به ذکر است که یکی از مشکلات کلیدی این مطالعه، عدم امکان بررسی کامل حوضه آبخیز به دلیل محدودیت‌های سیاسی بود. جمع‌آوری داده‌های هیدرومتری و بارشی در بخش‌هایی از حوضه که در خارج از مرز منطقه قرار داشتند، امکان‌پذیر نبود. این موضوع منجر به تجزیه و تحلیل حوضه آبخیز بر اساس مرزهای سیاسی موجود گردید. بنابراین جمع‌آوری داده‌های مکانی با وضوح بالا در کل حوضه آبخیز، استفاده از یک مدل هیدرولوژیکی پیشرفته برای شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در کل حوضه از جمله مواردی است که موجب به دست آمدن نتایج قابل اعتمادتری از پژوهش می‌گردد. از طرف دیگر با توجه به جمعیت بالا و فعالیت‌های کشاورزی در این حوضه که منبع اصلی در آمد ساکنان است و نیز حساسیت منطقه به تغییرات آب و هوایی و تشدید رویدادهای حدی هیدرولوژیکی، توسعه راهکارهای پیشگیرانه برای کاهش این اثرات نامطلوب بر سیلاب و خشکسالی در این مناطق، توصیه می‌شود که مسئولان و مدیران به طور جدی از طرح‌های کنترل سیلاب بهره‌برداری کنند. این طرح‌ها می‌توانند شامل روش‌های سازه‌ای مانند سدهای مخزنی، سیل‌بندها،

باید به منظور کاهش خسارات و سازگاری با شرایط اقلیمی آینده اتخاذ شوند تا بتوان اثرات خشکسالی و سیلاب را به حداقل رساند.

کانال‌های هدایت آب و سازه‌های بازدارنده سیلاب و همچنین روش‌های غیرسازه‌ای مانند پروژه‌های پخش سیلاب و احیای پوشش گیاهی باشند. این اقدامات

منابع

۱. احدی، مهیار، زینالی، بتول، حسینی صدر، عاطفه، سیه‌سرانی، امیر (۱۳۹۹). تحلیل همدیدی بارش سنگین منجر به سیلاب روز ۱۱ ژانویه ۲۰۲۰ در جنوب استان سیستان و بلوچستان. جغرافیای طبیعی، ۱۳(۵۰)، ۱-۱۴.
۲. ایمانی، تکتم، دلقدی، مهدی، امامقلی‌زاده، صمد، گنجی نوروژی، زهرا (۱۴۰۱). تأثیر تغییر اقلیم بر حجم و دبی بیک سیلاب (مطالعه موردی: زیرحوضه قران تالار). اکوهیدرولوژی، ۹(۱)، ۲۵۹-۲۷۲.
۳. پورکریمی، زهره، مقدسی، مهنوش، محسنی موحد، سیداسداله، و دلاور، مجید. (۱۳۹۷). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خصوصیات خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی حوضه زرنه‌رود با استفاده از شاخص‌های SRI و SSWI و مدل SWAT. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۴۹(۵)، ۱۱۴۵-۱۱۵۷.
۴. رحیمی بندرآبادی، سیما، بهرام ثقفیان، بهرام، رضیئی، طیب. (۱۴۰۲). پایش خشکسالی هیدرولوژیکی در حوزه آبریز دریای خزر، مهندسی و مدیریت آبریز، ۱۵(۴)، ۵۸۷-۵۷۰.
۵. رضیئی، طیب. (۱۳۹۴). بررسی ویژگی‌های خشکسالی در منطقه خشک و نیمه خشک ایران. نشریه علمی-پژوهشی مهندسی و مدیریت آبریز، شماره ۴، ۳۶۳-۳۷۸.
۶. رودری، آرتیس، حسن پور، فرزاد، یعقوب زاده، مصطفی، و دلاور، مجید. (۱۳۹۸). بررسی رابطه خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژی در دشت سیستان. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱(۶ (پیاپی ۸۵))، ۳۳-۴۴.
۷. زارع ابیانه، حمید، سبزی‌پرور، علی‌اکبر، معروفی، صفر، قیامی، فرشته، میرمسعودی، آزاده. (۱۳۹۴). تحلیل و پایش خشکسالی هواشناسی منطقه سیستان و بلوچستان. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۱۷(۱)، ۴۹-۶۱.
۸. عبدی، مصطفی، نهتانی، محمد، دهقانی، مرتضی، خاک سفیدی، عباس. (۱۴۰۲). تعیین تغییرات سیل‌خیزی ناشی از دوره‌های خشکسالی در حوزه آبریز دهک
- استان خراسان جنوبی. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۱)، ۱۶۴-۱۴۶.
۹. علوی‌نیا، حسن، زارعی، مهدی (۱۴۰۰). آنالیز روند تغییر اقلیم با استفاده از شاخص‌های فرین داده‌های بلند مدت بارش و دما در جنوب شرق ایران. فصلنامه علمی برنامه‌ریزی منطقه‌ای، ۱۱(۴۴)، ۱۱۹-۱۳۴.
۱۰. علی‌پور، حسن، سلاجقه، علی، مقدم‌نیا، علیرضا، خلیقی سیگارودی، شهرام، نساجی زواره، مجتبی. (۱۴۰۰). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر شدت و بزرگی سیلاب در دوره‌های آتی. محیط زیست و مهندسی آب، ۷(۴)، ۶۱۴-۶۰۱.
۱۱. فرزانه، مهسا، ملبوسی، شراره، حمیدیان‌پور، محسن (۱۴۰۱). پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی استان سیستان و بلوچستان تحت شرایط سناریوهای واداشت تابشی RCP. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۱(۵۱)، ۱۴۸-۱۲۹.
۱۲. کریمی، مرتضی، یزدانی، محمدحامد، نادری، افشین. (۱۳۹۲). تأثیر بادهای ۱۲۰ روزه بر امنیت منطقه سیستان، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۴(۲)، ۱۲۸-۱۱۱.
۱۳. گزارش سیلاب اسفندماه ۱۳۹۸ و ۱۴۰۲ استان سیستان و بلوچستان، پژوهشکده‌ی سوانح طبیعی (۱۳۹۸ و ۱۴۰۲).
۱۴. نادری، مصطفی. (۱۳۹۹). مخاطرات سیل و خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک تحت شرایط تغییر اقلیم: شمال استان فارس. پژوهش آب ایران، ۱۴(۱)، ۸۵-۹۷.
15. Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., de Roo, A., Salamon, P., & Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5(2), 171-182.
16. Byakatonda, J., Parida, B. P., & Kenabatho, P. K. (2018). Relating the dynamics of climatological and hydrological droughts in semiarid Botswana. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 105, 12-24.

- world water development report 3: water in a changing world, World Water Assessment Programme special report
27. Wang, H., Zhou, J., Tang, Y., Liu, Z., Kang, A., & Chen, B. (2021). Flood economic assessment of structural measure based on integrated flood risk management: A case study in Beijing. *Journal of Environmental Management*, 280, 111701.
 28. Xu, X., Wang, Y.C., Kalcic, M., Muenich, R. L., Yang, Y. E., & Scavia, D. (2019). Evaluating the impact of climate change on fluvial flood risk in a mixed-use watershed. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104031.
 29. Yang, Y., Weng, B., Bi, W., Xu, T., Yan, D., & Ma, J. (2019). Climate change impacts on drought-flood abrupt alternation and water quality in the Hetao Area, China. *Water*, 11(4), 652.
 30. Yevjevich, V. (1967). An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, in *Hydrology Papers No. 23* (Fort Collins, CO: Colorado State University).
 31. Yin, J., Gentine, P., Slater, L., Gu, L., Pokhrel, Y., Hanasaki, N. & Schlenker, W. (2023). Future socio-ecosystem productivity threatened by compound drought-heatwave events. *Nature Sustainability*, 6(3), 259-272.
 32. Zhang, Y., You, Q., Ullah, S., Chen, C., Shen, L., & Liu, Z. (2023). Substantial increase in abrupt shifts between drought and flood events in China based on observations and model simulations. *Science of the Total Environment*, 876, 162822.
 33. Zhu, M., & Fan, B. (2021). Exploring the relationship between rising temperatures and the number of climate-related natural disasters in China. *International journal of environmental research and public health*, 18(2), 745.
 17. Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 8(6), e2019EF001461.
 18. Franchi, F., Mustafa, S., Ariztegui, D., Chirindja, F. J., Di Capua, A., Hussey, S., & Comte, J. C. (2024). Prolonged drought periods over the last four decades increase flood intensity in southern Africa. *Science of the Total Environment*, 924, 171489.
 19. Logsdon, Rebecca A. & Chaubey, Indrajeet, (2013). A quantitative approach to evaluating ecosystem services, *Ecological Modelling*, Elsevier, vol. 257(C), pages 57-65.
 20. Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water resources management*, 23, 881-897.
 21. Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
 22. Masroor, M., Sajjad, H., Rehman, S., Singh, R., Rahaman, M. H., Sahana, M., & Avtar, R. (2022). Analysing the relationship between drought and soil erosion using vegetation health index and RUSLE models in Godavari middle sub-basin, India. *Geoscience Frontiers*, 13(2), 101312.
 23. Mianabadi, A., Salari, K., & Pourmohamad, Y. (2022). Drought monitoring using the long-term CHIRPS precipitation over Southeastern Iran. *Applied Water Science*, 12(8), 183.
 24. Raposo, V. D. M. B., Costa, V. A. F., & Rodrigues, A. F. (2023). A review of recent developments on drought characterization, propagation, and influential factors. *Science of the Total Environment*, 165550.
 25. Sen, P.K. (1968). Estimate of the regression coefficients based on Kendall's tau. *J. Am. Pharm. Assoc.* 63: 1379-1389.
 26. Talafre, J., Knabe, F., (2009). Climate change and water: an overview from the

