

تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از برون داد مدل های CMIP6 (مطالعه موردی: دشت شهرکرد)

فرهاد بهزادی^۱، سامان جوادی^{۲*}، حسین یوسفی^۳، علی مریدی^۴، سید مهدی هاشمی شاهدانی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده های ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده های ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۴. استادیار، گروه مهندسی منابع آب، دانشکده عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۰۸؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۱/۳۰؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۲/۱۱)

چکیده

آب زیرزمینی همواره از باارزش ترین منابع آبی در هر منطقه به شمار می رود و در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک جهان نظیر کشور ایران، اصلی ترین منبع برای تأمین نیازهای شرب و کشاورزی محسوب می شود. در سالیان اخیر، با افزایش جمعیت، افزایش برداشت از آبخوان ها و تغییرات اقلیمی، بسیاری از آبخوان های کشور در شرایط وخیم قرار دارند و این شرایط در بسیاری از آبخوان های کشور ادامه دار بوده یا شرایط در حال بدتر شدن است. در این پژوهش به منظور تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی آب زیرزمینی آبخوان دشت شهرکرد، از برون داد مدل های CMIP6 و شاخص های خشکسالی SPI و GRI استفاده شده است. شبیه سازی های مدل GFDL-ESM4 نشان می دهد متوسط بارندگی تا سال ۲۰۵۰ در دشت شهرکرد، تحت سناریوی SSP1-2.6 ۴/۸۵ میلی متر افزایش و تحت سناریوی SSP5-8.5 ۲۱/۳۴ میلی متر کاهش می یابد. در ادامه، به منظور تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر آبخوان دشت شهرکرد از رابطه رگرسیونی میان دو شاخص SPI و GRI در شش پیرومتر منتخب استفاده شده است. نتایج نشان می دهد خشکسالی هایی با شدت و مدت بیشتر در منطقه به وقوع خواهد پیوست و بیش از ۶۰ درصد از دوره آینده آبخوان دشت شهرکرد در شرایط خشکسالی قرار خواهد داشت و شدیدترین خشکسالی تحت سناریوی SSP1-2.6 ۵۲ ماه دوام داشته و شدت آن ۵۹/۳۲ خواهد بود و تحت سناریوی SSP5-8.5 ۷۰ ماه دوام داشته و شدت آن ۸۶/۵۹ خواهد بود.

کلمات کلیدی: آب زیرزمینی، تغییر اقلیم، خشکسالی، SPI، GRI.

مقدمه

تغییر اقلیم از اصلی‌ترین معضلات جهان کنونی است و تأثیراتی منفی بر محیط زیست می‌گذارد و معضلات آن روزبه‌روز در حال افزایش است و در مناطق گسترده‌ای از جهان دیده شده است [۱]. در سالیان اخیر، مطالعات زیادی در جهان صورت گرفته که نشان می‌دهد تغییر اقلیم منجر به افزایش خشکسالی در سرتاسر جهان شده و شدت، مدت و فراوانی این پدیده در سالیان اخیر افزایش یافته است [۲-۴]. خشکسالی از پیچیده‌ترین حوادث طبیعی است که خسارت‌های زیادی بر کشاورزی، منابع آبی، اکوسیستم، محیط زیست و اقتصاد منطقه وارد می‌کند [۵-۱۰]. به دلیل تنوع مکانی و زمانی بالا، فرایند فیزیکی پیچیده، اثرات غیر ساختاری و تعاریف مختلف، شناسایی، پیش‌بینی و کاهش خشکسالی بسیار چالش‌برانگیز است. با کاهش بارندگی در یک منطقه، افزایش دما، افزایش تقاضا برای آب و افزایش جمعیت، پیش‌بینی می‌شود خشکسالی‌های شدیدتر با فراکنس بالاتر در منطقه رخ دهد و عدم قطعیت در دسترسی به آب افزایش یابد [۱۱ و ۱۲]. در این میان، از اصلی‌ترین منابع آبی جهان که تحت تأثیر آثار سوء تغییر اقلیم قرار می‌گیرد، آب زیرزمینی است که در بسیاری از نقاط جهان به عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین نیازهای شرب، کشاورزی و صنعت محسوب می‌شود. به‌تازگی پروژه مقایسه مدل‌های فاز ششم (CMIP6)^۱ تحت گزارش ششم تغییر اقلیم (AR6)^۲ منتشر شده است که شبیه‌سازی‌های پیشرفته‌ای را در اختیار ما قرار می‌دهد [۱۳]. در گزارش ششم تغییر اقلیم هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC)^۳ از سناریوهای جدیدی تحت عنوان خط سیر اجتماعی-اقتصادی (SSP)^۴ استفاده شده است. این سناریوها از ترکیب سناریوهای گزارش پنجم تغییر اقلیم (AR5)^۵ موسوم به سناریوهای واداشت تابشی (RCP)^۶ با مباحث رشد جمعیت، فناوری و اقتصاد که همگی منجر به انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند، طراحی شده است.

بررسی تأثیر تغییرات آب‌وهوایی بر آب‌های زیرزمینی کاری بسیار دشوار است. برای این منظور، معمولاً به یک

مدل عددی پیچیده نیاز است که بتوان یک سامانه آب زیرزمینی را همراه با شرایط مرزی، میزان تغذیه و تخلیه را در آن شبیه‌سازی کرد. با کالیبراسیون چنین مدلی، پیش‌بینی شرایط آینده بسیار پیچیده و دشوار است و بار محاسباتی بالایی دارد و پژوهشگران را به محدود کردن تعداد دوره‌ها و سناریوها برای تجزیه و تحلیل راحت‌تر وادار می‌کند. برای غلبه بر چنین مشکلاتی، روش‌ها و رویکردهای مختلفی پیشنهاد شده است که بسیار کارآمد بوده و در راستای کمک به فرایند تصمیم‌گیری و مدیریت منابع آب زیرزمینی توسعه داده شده‌اند [۱۵-۲۳]. در سال‌های گذشته، بسیاری از پژوهشگران به منظور پیش وضعیت آب زیرزمینی، رابطه میان سطح آب زیرزمینی با متغیرهای اقلیمی نظیر بارندگی و دما را مد نظر قرار داده‌اند. از اصلی‌ترین رویکردها در این زمینه، بررسی کردن شاخص‌هایی است که وضعیت آب زیرزمینی و وضعیت بارندگی را مد نظر قرار می‌دهد. در همین راستا، عباس‌نیا و همکاران (۱۴۰۰) به منظور تحلیل و مقایسه خشکسالی هواشناسی و آب‌های زیرزمینی دشت مهران از شاخص بارش استاندارد شده (SPI)^۷ و شاخص آب زیرزمینی (GRI)^۸ استفاده کرده‌اند [۲۴]. در پژوهشی دیگر، میراکبری و همکاران (۱۳۹۷) به منظور بررسی تأثیر خشکسالی هواشناسی بر منابع آب سطحی و آب زیرزمینی از شاخص‌های SPI^۹، SDI^{۱۰} و SPEI^{۱۰} و GRI بهره گرفته‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داده است شاخص SPI در مقیاس ۹ و ۱۲ ماهه دارای بیشترین همبستگی با شاخص SDI است و شاخص SPEI در مقیاس ۲۴ و ۴۸ ماهه با سه ماه تأخیر نسبت به GRI بیشترین همبستگی را دارد که بیانگر تأثیرگذاری خشکسالی هواشناسی بعد از گذشت دو سال و بیشتر بر سطح آب زیرزمینی است [۲۵]. شاکر سوره و اسدی (۱۳۹۸) به منظور تعیین ارتباط خشکسالی هواشناسی با خشکسالی هیدرولوژیکی در دشت سلماس، از سه شاخص SPI، SRI و GRI استفاده کرده‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان می‌دهد ارتباط بین شاخص SPI و سطح آب زیرزمینی قابل توجه بوده و می‌توان گفت که این شاخص تقریباً شاخص مناسبی برای بررسی اثرات

1. Coupled Model Intercomparison Project
2. Sixth Assessment Report
3. Intergovernmental Panel on Climate Change
4. Shared Socioeconomic Pathways
5. Fifth Assessment Report
6. Representative Concentration Pathway

7. Standardized Precipitation Index
8. Groundwater Resource Index
9. Streamflow Drought Index
10. Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

آب و زمین شناسی با درجات بالا در منابع آب زیرزمینی این منطقه رخ داده است. به منظور بررسی شدت وابسته بودن آب های زیرزمینی از نظر کمی و کیفی با پدیده خشکسالی هواشناسی، ضریب همبستگی بین میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی، شاخص GRI و شاخص هدایت الکتریکی معیارشده (SECI) با شاخص SPI در مقیاس های زمانی مختلف، با اعمال و بدون اعمال تأخیر زمانی، طی دوره ۱۳۷۲-۱۳۸۸ محاسبه شده است. با توجه به دستاوردها، شاخص SPI در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه بدون تأخیر زمانی (SPI48)، با میانگین ارتفاع سطح آب زیرزمینی، شاخص GRI و شاخص SECI رابطه معناداری را در سطح ۹۹ درصد نشان می دهد تأثیر پذیری مستقیم کمی و کیفی آب های زیرزمینی منطقه را از خشکسالی در این دشت تأیید می کند [۲۸].

نوآوری این پژوهش، استفاده از برون داد مدل های CMIP6 و شاخص های خشکسالی برای پیش بینی خشکسالی های آینده منطقه و تعیین در دسترس بودن آب های زیرزمینی تا سال ۲۱۰۰ است. اگرچه در تحقیقات زیادی از شاخص های SPI برای تعیین خشکسالی هواشناسی و شاخص GRI به منظور تعیین خشکسالی آب زیرزمینی استفاده شده، اما در این پژوهش از این دو شاخص جهت تعیین خشکسالی های آینده استفاده شده و خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی در منطقه همراه با تغییرات بارندگی و دما مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش ها

منطقه مطالعه شده

محدوده مطالعاتی شهرکرد یکی از محدوده های مطالعاتی حوضه آبریز کارون بزرگ با وسعت ۱۲۴۴ کیلومتر مربع است که در قسمت شرق حوضه و شمال استان چهارمحال و بختیاری واقع شده است. این محدوده تحت پوشش سازمان آب منطقه ای چهارمحال و بختیاری قرار دارد. ۵۴۱ کیلومتر مربع از وسعت محدوده را دشت و ۷۰۳ کیلومتر مربع از وسعت محدوده را ارتفاعات تشکیل می دهد. دشت شهرکرد بین عرض جغرافیایی شمالی ۳۲ درجه و ۷ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۳۵ دقیقه و طول شرقی ۵۰ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۱۰ دقیقه قرار دارد. ارتفاع این دشت از سطح

خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی است. نتایج به دست آمده از پژوهش یاد شده نشان دهنده رابطه بین شاخص SPI دوازده ماهه (SPI-12) و شاخص SRI یک ماهه (SRI-1) در مقیاس کوتاه مدت با شاخص GRI است. نتایج بیانگر آن است که خشکسالی هواشناسی با خشکسالی آب زیرزمینی رابطه معناداری با تأخیر فاز زمانی یک ماهه GRI در مقیاس زمانی میان مدت دارد و خشکسالی هیدرولوژیکی نسبت به خشکسالی آب زیرزمینی با تأخیر شش ماهه GRI در مقیاس کوتاه مدت ارتباط بسیار خوبی دارد [۲۶]. نوشادی و احدی (۱۳۹۸) در راستای تحلیل رفتار پیزومترها و تعیین تأخیر زمانی تأثیر بارندگی بر نوسان های عمق آب زیرزمینی آبرفت شیراز، از شاخص های SPI و GRI بهره گرفته اند. در پژوهش یاد شده به منظور تحلیل رفتار پیزومترها، از روش همبستگی متقاطع پیرسون بین شاخص های SPI و GRI به منظور تعیین تأخیر زمانی یاد شده استفاده شده است [۲۷]. Khan et al. (2008) به منظور تعیین تأثیر خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی آب زیرزمینی، همبستگی میان شاخص SPI و نوسان های آبخوان را در آبخوان مورادارلینگ در استرالیا مورد بررسی قرار داده اند. نتایج پژوهش آن ها نشان می دهد شاخص SPI دارای همبستگی مناسبی با نوسان های آب زیرزمینی در این منطقه است، اما در مناطقی نیز این همبستگی پایین بوده که عموماً این مناطق جزء مناطقی بودند که برداشت آب برای آبیاری در آن ها بسیار زیاد بوده است [۱۵]. Bloomfield و Marchant (۲۰۱۳) به منظور تعیین تأثیر خشکسالی هواشناسی بر خشکسالی آب زیرزمینی، همبستگی میان دو شاخص SPI و SGI را در ۱۴ نقطه از کشور انگلستان مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داده است که رابطه ای قوی میان دو شاخص خشکسالی هواشناسی و آب زیرزمینی در منطقه وجود دارد [۱۶]. صیف و همکاران (۱۳۹۱) در راستای ارزیابی تأثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی آبخوان دشت فسا با استفاده از شاخص های SECI^۱، SPI و GRI استفاده کرده اند. نتایج پژوهش یاد شده نشان می دهد مقدار شاخص GRI روند کاهشی داشته و در سال های ۱۳۸۲، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ خشکسالی

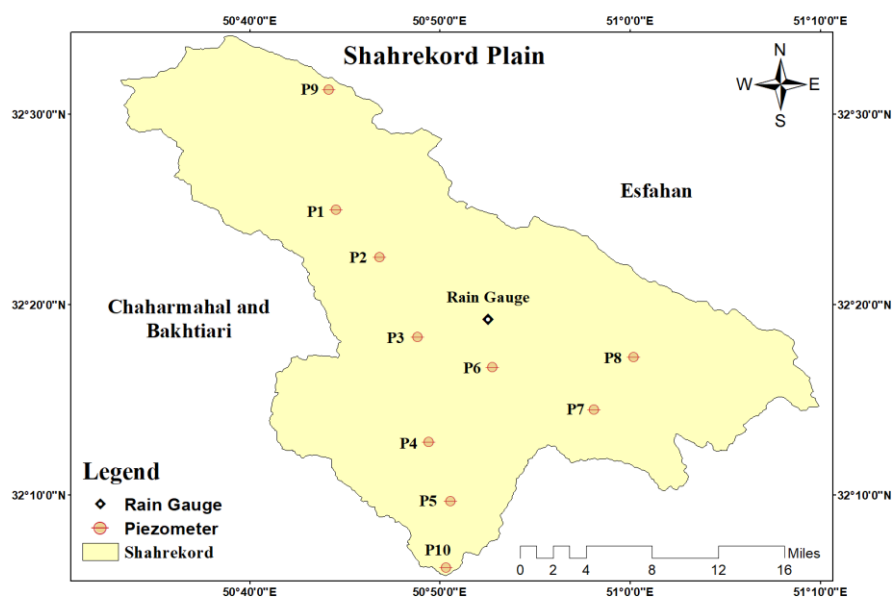
1. Standardized Electrical Conductivity Index

زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه شده است. موقعیت جغرافیایی دشت شهرکرد و پیزومترهای استفاده شده در این پژوهش در شکل ۱ نشان داده شده است.

داده‌ها و مدل‌های استفاده شده

در این پژوهش به منظور تعیین وضعیت بارندگی و دمای دشت شهرکرد در دوره پایه، از داده‌های ایستگاه سینوپتیک دشت شهرکرد طی دوره مشاهداتی ۱۳۷۰-۱۳۹۷ استفاده شده است. همچنین، به منظور تعیین شرایط کنونی آب زیرزمینی در منطقه، از داده‌های تراز آب زیرزمینی ۱۰ پیزومتر در سطح دشت که مشخصات آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده، استفاده شده است.

آزاد دریا بین حداقل ۱۹۹۶ متر در بخش‌های خروجی حوضه و حداکثر ۳۲۶۰ متر در ارتفاعات آن است. مسیل‌های واقع در این محدوده دائمی هستند و زهکش اصلی این محدوده را رودخانه جهان‌بین تشکیل می‌دهد. مهم‌ترین رودخانه در این محدوده رودخانه جهان‌بین (خرود) بوده که یکی از شاخه‌های مهم رودخانه کیار است. از ۵۴۱ کیلومترمربع از وسعت محدوده را دشت و ۳۷۵/۲ کیلومترمربع را آبخوان آبرفتی تشکیل می‌دهد. دشت شهرکرد در سال‌های اخیر با خشکسالی‌های پی‌درپی و شدید مواجه بوده که باعث ایجاد خسارت به بخش‌های مختلف شده است. این خشکسالی‌ها باعث کاهش منابع آب سطحی و به دنبال آن، افزایش برداشت از منابع آب



شکل ۱. موقعیت مکانی دشت شهرکرد، ایستگاه باران‌سنجی و پیزومترها

جدول ۱. موقعیت مکانی پیزومترهای منتخب در دشت شهرکرد

Selected Piezometers			
Piezometer ID	Name	Lon	Lat
1	Nafech-Pirbaloot	50.74	32.41
2	Chaleshtar	50.78	32.37
3	Serahe Hafshajan	50.81	32.31
4	NoAbad	50.82	32.21
5	ShamsAbad	50.84	32.16
6	Shahrak	50.88	32.28
7	Shoorabche	50.96	32.24
8	Broujen-Esfahan	51	32.28
9	Shahed Bon	50.74	32.52
10	Kharaji	50.84	32.10

جدول ۲. مدل های CMIP6 استفاده شده

Institute	Country	Model	ID
Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization	Australia	ACCESS-CM2	1
Beijing Climate Center Ocean-atmosphere Coupled Model	China	BCC-CSM2-MR	2
Canadian Earth System Model	Canada	CanESM5	3
The Whole Atmosphere Community Climate Model with thermosphere and ionosphere extension	USA	CESM2-WACCM	4
Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System	China	FGOALS-f3-L	5
National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	USA	GFDL-ESM4	6
third Hadley Centre Global Environment Model in the Global Coupled configuration	UK	HadGEM3-GC31-MM	7
Indian Institute of Tropical Meteorology ESM	India	IITM-ESM	8
National Institute of Meteorological Sciences/Korea Meteorological Administration	South Korea	KACE-1-0-G	9
Korea Institute of Ocean Science and Technology	South Korea	KIOST-ESM	10

جدول ۳. شاخص های اقلیمی استفاده شده

نمایه	نام شاخص	تعریف
CDD	روزهای خشک متوالی	تعداد روزهای متوالی با بارش کمتر از یک میلی متر
SDII	نمایه ساده شدت روزانه	این شاخص از تقسیم مجموع کل بارش سالانه بر تعداد روزهای بارانی (حداقل یک میلی متر) به دست می آید
Rx1Day	حداکثر بارش یک روزه	بیشینه مقدار بارش یک روزه
Rx10mm	روزهایی با بارش سنگین	تعداد روزهایی با بارش بیش از ۱۰ میلی متر

جدول ۴. رتبه بندی مدل ها بر اساس عملکرد در شبیه سازی دوره پایه

Ranking of CMIP6 models in terms of performance						
Rank	Model	IA	Model	RMSE	Model	BIAS
1	GFDL-ESM4	0.51	GFDL-ESM4	0.41	IITM-ESM	32.01
2	CanESM5	0.41	ACCESS-CM2	0.41	GFDL-ESM4	33.30
3	FGOALS-g3	0.35	IITM-ESM	0.43	ACCESS-CM2	33.70
4	ACCESS-CM2	0.35	CESM2-WACCM	0.46	CESM2-WACCM	36.03
5	BCC-ESM1	0.32	BCC-ESM1	0.50	BCC-ESM1	39.57
6	IITM-ESM	0.31	KACE-1-0-G	0.53	KACE-1-0-G	42.43
7	KIOST-ESM	0.31	HadGEM3-GC31-MM	0.58	HadGEM3-GC31-MM	47.88
8	HadGEM3-GC31-MM	0.31	CanESM5	0.59	CanESM5	48.78
9	KACE-1-0-G	0.28	FGOALS-g3	0.61	FGOALS-g3	54.19
10	CESM2-WACCM	0.23	KIOST-ESM	0.73	KIOST-ESM	65.28

یک روزه (Rx1Day)^۳ و روزها با بارش سنگین (Rx10mm)^۴ برای دوره مشاهداتی و دوره تاریخی مدل ها استفاده شده است که جزئیات مدل های مورد استفاده در جدول ۲، جزئیات شاخص های اقلیمی مورد استفاده در جدول ۳ و نتایج رتبه بندی مدل ها در هر یک از شاخص های نام برده شده در جدول ۴ مشخص شده است.

همچنین، به منظور تصحیح سوگیری و ریزمقیاس نمایی داده های مدل انتخاب شده، از روش

به منظور تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر دشت شهرکرد و تعیین خشکسالی های دوره آینده در این دشت از شبیه سازی های مدل های CMIP6 بهره گرفته شده است. به این منظور، برون داد بارش و دمای ۱۰ مدل CMIP6 مورد بررسی قرار گرفته و به منظور تعیین برترین مدل جهت شبیه سازی متغیرهای اقلیمی در دشت شهرکرد، از مقایسه نتایج شاخص های اقلیمی نظیر روزهای خشک متوالی (CDD)^۱، نمایه ساده شدت روزانه (SDII)^۲، حداکثر بارش

3. Max 1-Day Precipitation Amount
4. Number of Days with Precipitation > 10mm

1. Consecutive Dry Days
2. Simple Daily Intensity

$\Gamma(\alpha)$ تابع گاما [۳۲] است. به منظور برآزش پارامترهای شکل‌پذیری و مقیاس‌پذیری از تخمین حداکثر درست‌نمایی استفاده شده که مطابق معادلات ۳ و ۴ است [۳۱]:

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), A = \ln(\bar{x}) - n^{-1} \sum \ln(x) \quad (3)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (4)$$

با توجه به معادلات ۲، ۳ و ۴، تابع احتمال تجمعی گاما به صورت معادله ۵ محاسبه می‌شود. توزیع گاما برای $x=0$ تعریف نشده است، بنابراین با مثبت در نظر گرفتن احتمال بارش صفر $b=p(x=0)$ ، تابع احتمال تجمعی با معادله ۶ محاسبه می‌شود [۳۱].

$$g(x) = \frac{1}{\hat{\beta}^{\hat{\alpha}} \Gamma(\hat{\alpha})} \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-x/\hat{\beta}} dx \quad (5)$$

$$H(x) = b + (1-b)G(x) \quad (6)$$

محاسبه این شاخص با برآزش و برآورد پارامترهای تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی کل برای یک ایستگاه است. پس از محاسبه احتمال تجمعی، تغییر شکل تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف معیار یک اعمال می‌شود [۲۹]. جدول ۵ طبقه‌بندی شاخص SPI را نشان می‌دهد.

جدول ۵. طبقه‌بندی شاخص SPI و GRI

SPI value	Class
≥ 2	Extremely wet
1.5 to 1.99	Very wet
1 to 1.49	Moderately wet
-0.99 to 0.99	Near normal
-1.49 to -1	Moderately dry
-1.99 to -1.5	Severely dry
≤ -2	Extremely dry

شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI)

شاخص (GRI) توسط مندسیو و همکاران به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای پایش و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی برای منطقه مدیترانه پیشنهاد شده است. معادله ۷ شاخص GRI را نشان می‌دهد [۱۶]:

$$GRI_{y,m} = \frac{D_{y,m} - \mu_{y,m}}{\sigma_{y,m}} \quad (7)$$

نگاشت چندک (QM)^۱ استفاده شده است. روش نگاشت چندک با استفاده از چندک پیش‌بینی به اصلاح پیش‌بینی‌ها با توجه به مشاهدات تاریخی می‌پردازد. برای این منظور، تابع احتمال تجمعی (CDF)^۲ پیش‌بینی‌ها و همچنین، CDF تجربی مشاهدات (داده‌های تاریخی) تعیین می‌شود. در نهایت، زمانی که پیش‌بینی جدید موجود است، مقدار چندک پیش‌بینی از CDF تاریخی پیش‌بینی‌ها به دست می‌آید و بعد عدد معادل چندک به دست آمده در CDF پیش‌بینی‌ها به عنوان داده تصحیح شده لحاظ می‌شود [۳۳-۳۵]. اگر Y_i و Z_i به ترتیب داده خام و تصحیح شده باشند و F_{Si} و F_{Oi}^{-1} به ترتیب نشان‌دهنده CDFهای پیش‌بینی خام و مشاهداتی باشند، رابطه ۱ نشان دهنده نگاشت چندک برای تصحیح متغیر پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد:

$$Z_i = F_{Oi}^{-1}(F_{Si}(Y_i)) \quad (1)$$

شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI)

شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) توسط McKee و همکاران (۱۹۹۳) توسعه داده شده و شاخصی بسیار کارآمد برای پایش وضعیت (شدت و مدت) خشکسالی است [۲۹]. برای محاسبه این شاخص خشکسالی تنها به داده‌های بلندمدت بارندگی در یک منطقه نیاز است و می‌توان این شاخص را در مقیاس‌های زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) محاسبه کرد [۳۰]. برای محاسبه این شاخص ابتدا یک توزیع احتمالی مناسب (معمولاً توزیع گاما و پیرسون تیپ ۳) بر داده‌ها برآزش داده می‌شود و در ادامه، تابع توزیع تجمعی از طریق احتمالات برابر به توزیع نرمال تبدیل می‌شود. در نهایت، داده‌های تبدیل شده به توزیع نرمال برای محاسبه مقادیر SPI استفاده می‌شود. مقادیر مثبت SPI بیشتر از میزان متوسط بارندگی و مقادیر منفی کمتر از آن هستند. معادله ۲ تابع توزیع چگالی احتمال گاما را نشان می‌دهد [۳۱]:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, x > 0 \quad (2)$$

که در معادله ۲، α پارامتر شکل‌پذیری و β پارامتر مقیاس‌پذیری است و هر دو بزرگ‌تر از صفر هستند و

1. Quantile Mapping
2. Cumulative Distribution Function

محاسبه شاخص های SPI و GRI برای دوره آینده پس از انتخاب مدل CMIP6، بارندگی به عنوان یکی از برون دادهای مدل، بارندگی تا سال ۲۱۰۰ شبیه سازی شد. با در اختیار داشتن مقادیر بارندگی در دشت شهرکرد تا سال ۲۱۰۰، شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) تا سال ۲۱۰۰ محاسبه می شود. اما به منظور محاسبه شاخص منبع آب زیرزمینی برای دوره آینده، ابتدا برای دوره مشاهداتی (۱۳۷۰-۱۳۹۷) شاخص SPI محاسبه شده و شاخص منبع آب زیرزمینی (GRI) نیز برای هر یک از پیژومترها محاسبه می شود. در ادامه، تحلیل همبستگی صورت می گیرد و با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون (R)، همبستگی میان شاخص های SPI و GRI برای هر یک از پیژومترها تعیین شده و با استفاده از رگرسیون خطی، رابطه بین شاخص SPI و GRI برای هر یک از پیژومترها تعیین می شود. با مشخص شدن رابطه میان این دو شاخص، شاخص GRI تا سال ۲۱۰۰ شبیه سازی می شود.

بحث و نتایج

شرایط کنونی

با استفاده از داده های ماهانه بارندگی ایستگاه شهرکرد، وضعیت بارندگی در دشت شهرکرد به صورت سالانه و فصلی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در جدول ۶ و شکل ۲ قابل مشاهده است.

همان طور که مشاهده می شود، میانگین بارندگی سالانه در منطقه دارای یک روند نزولی با شیب کم است و بارندگی سالانه از سال ۱۳۷۰ تا ۱۳۹۷ کاهش یافته و میانگین بارندگی سالانه در منطقه ۲۹۶ میلی متر است و سال های ۱۳۷۲، ۱۳۷۵، ۱۳۷۷، ۱۳۷۸، ۱۳۷۹، ۱۳۸۱، ۱۳۸۶، ۱۳۸۹، ۱۳۹۴ و ۱۳۹۶ بارشی کمتر از میانگین داشته اند. وضعیت دمای حداقل و حداکثر در دشت شهرکرد نیز مورد بررسی قرار گرفته و نتایج در جدول ۷ مشخص شده است. همان طور که نشان داده شده است، متوسط دمای حداقل و حداکثر در دشت شهرکرد در دوره مشاهداتی در دشت شهرکرد به ترتیب ۲/۶۳ و ۱۹/۹۶ درجه سانتی گراد است.

که در آن، $D_{y,m}$ تراز آب زیرزمینی در ماه m و سال y ، میانگین تراز آب زیرزمینی ماه m برای D سال و $\sigma_{y,m}$ انحراف از معیار تراز آب زیرزمینی ماه m برای D سال است. طبقه بندی شاخص GRI نیز مانند شاخص SPI است و برای طبقه بندی آن می توان از جدول ۵ استفاده کرد. در محاسبه این شاخص نیز مانند محاسبه شاخص SPI ابتدا میانگین متحرک جمعی در گام های زمانی مختلف (۳، ۶، ۱۲، ۲۴، ۳۶، ۴۸ ماهه) ایجاد شده و در ادامه، تابع توزیع گاما بر داده ها برازش داده می شود و سپس، تابع توزیع جمعی از طریق احتمالات برابر به توزیع نرمال تبدیل می شود. در نهایت، داده های تبدیل شده به توزیع نرمال برای محاسبه مقادیر GRI استفاده می شود.

شاخص های آماری

در این پژوهش به منظور تعیین دقت مدل های GCM^۱ در شبیه سازی دوره آینده، از سه معیار آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)^۲، آماره اریب (BIAS) و نمایه IA جهت انتخاب مناسب ترین و نزدیک ترین مدل به داده های واقعی کشور استفاده شده و به منظور تعیین میزان همبستگی بین شاخص بارندگی استاندارد شده و منبع آب زیرزمینی در دوره پایه، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده و به منظور تعیین عملکرد مدل رگرسیونی از ضریب نش-ساتکلیف و خطای RMSE بهره گرفته شده است.

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

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

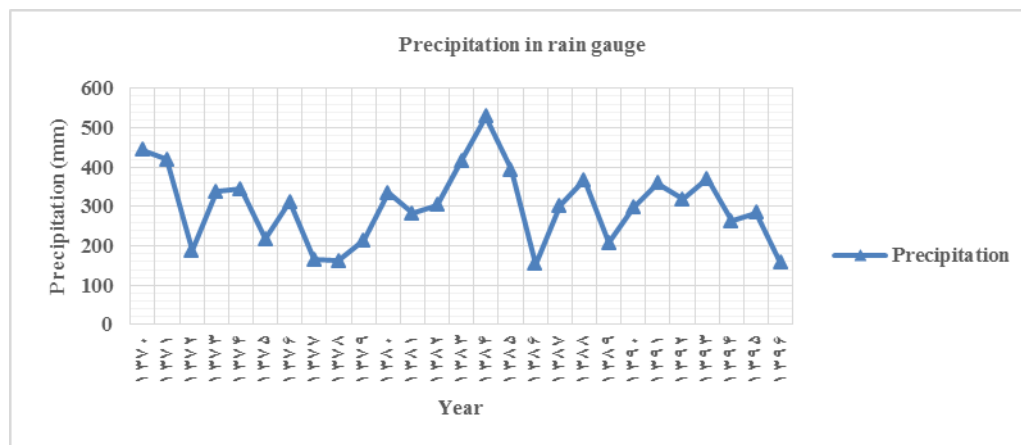
$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

جدول ۶. بارندگی فصلی و سالانه در دشت شهرکرد (دوره پایه)

Average precipitation in rain gauge (mm)				
Autumn	Winter	Spring	Summer	Yearly
91.42	133.19	75.34	1.79	296.15



شکل ۲. بارندگی به همراه میانگین ۲۷ ساله دشت شهرکرد (دوره پایه)

جدول ۷. دمای حداقل و حداکثر فصلی و سالانه در دشت شهرکرد (دوره پایه)

	Average temperature (c)				
	Autumn	Winter	Spring	Summer	Yearly
Tmin	1.61	-5.94	3.74	11.12	2.63
Tmax	19.58	7.71	20.55	31.99	19.96

داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده، بیشترین همبستگی در پیرومترها میان دو شاخص در مقیاس ۴۸ ماهه رخ داده است. در این پژوهش به منظور تجزیه و تحلیل بیشتر، از میان ۱۰ پیرومتر تنها شش پیرومتر نافج- پیربلوط، چالستر، نوآباد، شمس‌آباد، شاهد بن و خراجی (به دلیل ضریب رگرسیون بالاتر) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پایین بودن سطح ضریب همبستگی در برخی از پیرومترها نشان‌دهنده وجود عوامل بسیار تأثیرگذار دیگر در محدوده نظیر برداشت بی‌رویه در روند خشکسالی است.

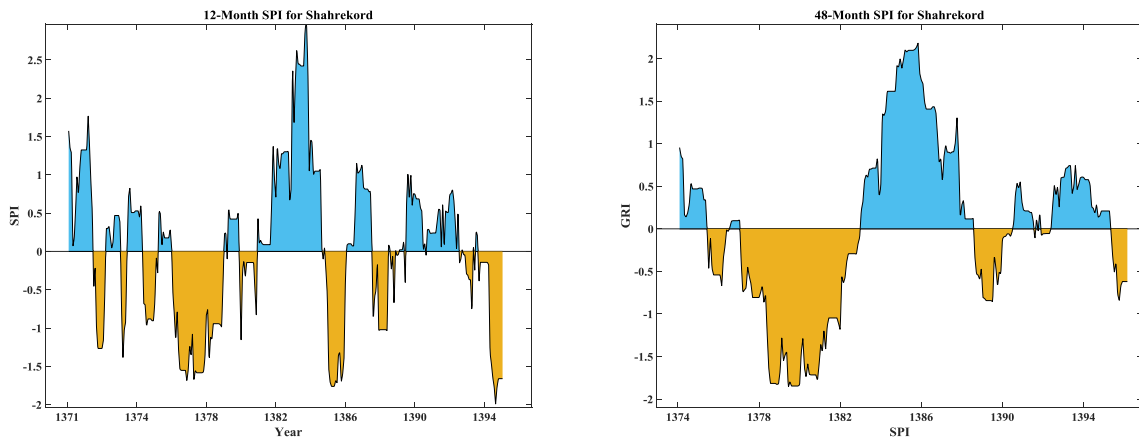
همچنین، نقشه رنگی ضریب همبستگی پیرسون میان شاخص SPI و GRI با زمان تأخیرهای مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. ارتباط بین دو شاخص SPI و GRI به صورت هم‌زمان و با تأخیر ۲۶ گام رو به جلو با استفاده از تابع همبستگی متقاطع بررسی شد که نتایج آن در شکل ۵ ارائه شده است.

در شکل ۵ نقاط زردرنگ نشان‌دهنده همبستگی بالاتر

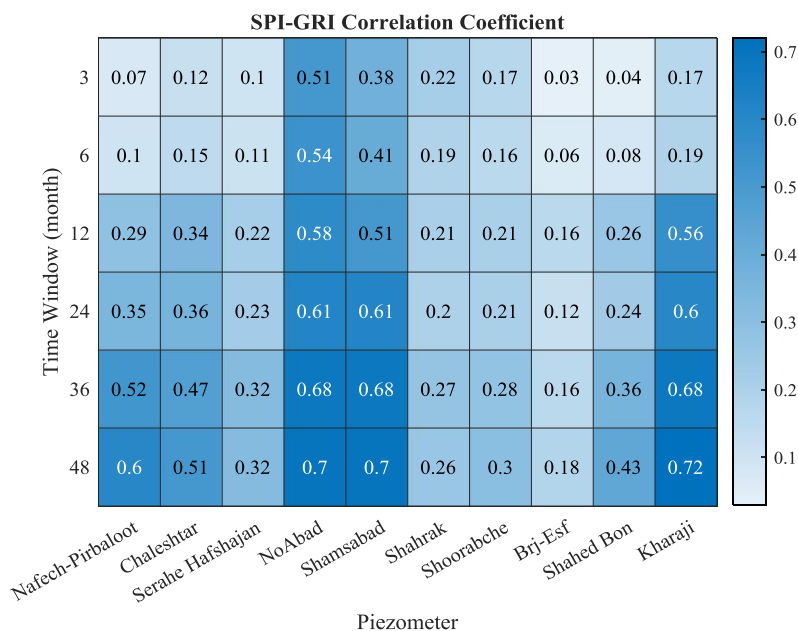
همچنین به منظور تعیین خشکسالی هواشناسی در دشت شهرکرد در دوره مشاهداتی (۱۳۷۰-۱۳۹۷)، شاخص SPI در مقیاس ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ماهه محاسبه شده است که در شکل ۳ این شاخص در مقیاس ۱۲ و ۴۸ ماهه نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، طبق شاخص SPI در مقیاس ۱۲ ماهه، طولانی‌ترین خشکسالی هواشناسی رخ داده در منطقه ۳۷ ماه دوام داشته است و در سال‌های آبی ۱۳۷۷-۱۳۷۸ تا ۱۳۸۰-۱۳۸۱ رخ داده و بزرگ‌ترین شدت خشکسالی نیز مربوط به همین دوره بوده و شدت آن ۴۵/۷۷ است. همچنین، شاخص GRI در مقیاس زمانی مقیاس ۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ برای هر یک از پیرومترهای منتخب در سطح دشت شهرکرد محاسبه شده است. به منظور تحلیل همبستگی میان شاخص‌های SPI و GRI، ضریب همبستگی پیرسون میان این دو شاخص در شش بازه زمانی (۳، ۶، ۹، ۱۲، ۲۴، ۳۶ و ۴۸ ماهه) تعیین شده است که در شکل ۴ نقشه رنگی این همبستگی نشان

تأخیر، در پیزومتر ۲ در مقیاس ۴۸ ماهه و با ۷ ماه تأخیر، در پیزومتر ۳ در مقیاس ۴۸ ماهه و با ۲۱ ماه تأخیر، در پیزومتر ۴ در مقیاس ۳ ماهه و با ۵ ماه تأخیر، در پیزومتر ۵ در مقیاس ۴۸ ماهه و با ۵ ماه تأخیر، در پیزومتر ۶ در مقیاس ۴۸ ماهه و با ۲۷ ماه تأخیر، در پیزومتر ۷ در مقیاس ۴۸ ماهه و با ۲۷ ماه تأخیر، در پیزومتر ۸ در مقیاس ۴۸ ماهه و با ۲۷ ماه تأخیر، در پیزومتر ۹ در مقیاس ۴۸ ماهه و با ۵ ماه تأخیر و در پیزومتر ۱۰ در مقیاس ۴۸ ماهه و با ۷ ماه تأخیر رخ داده است. همچنین، شاخص GRI در مقیاس ۴۸ ماهه در دوره پایه برای ۱۰ پیزومتر در شکل ۶ نشان داده شده است.

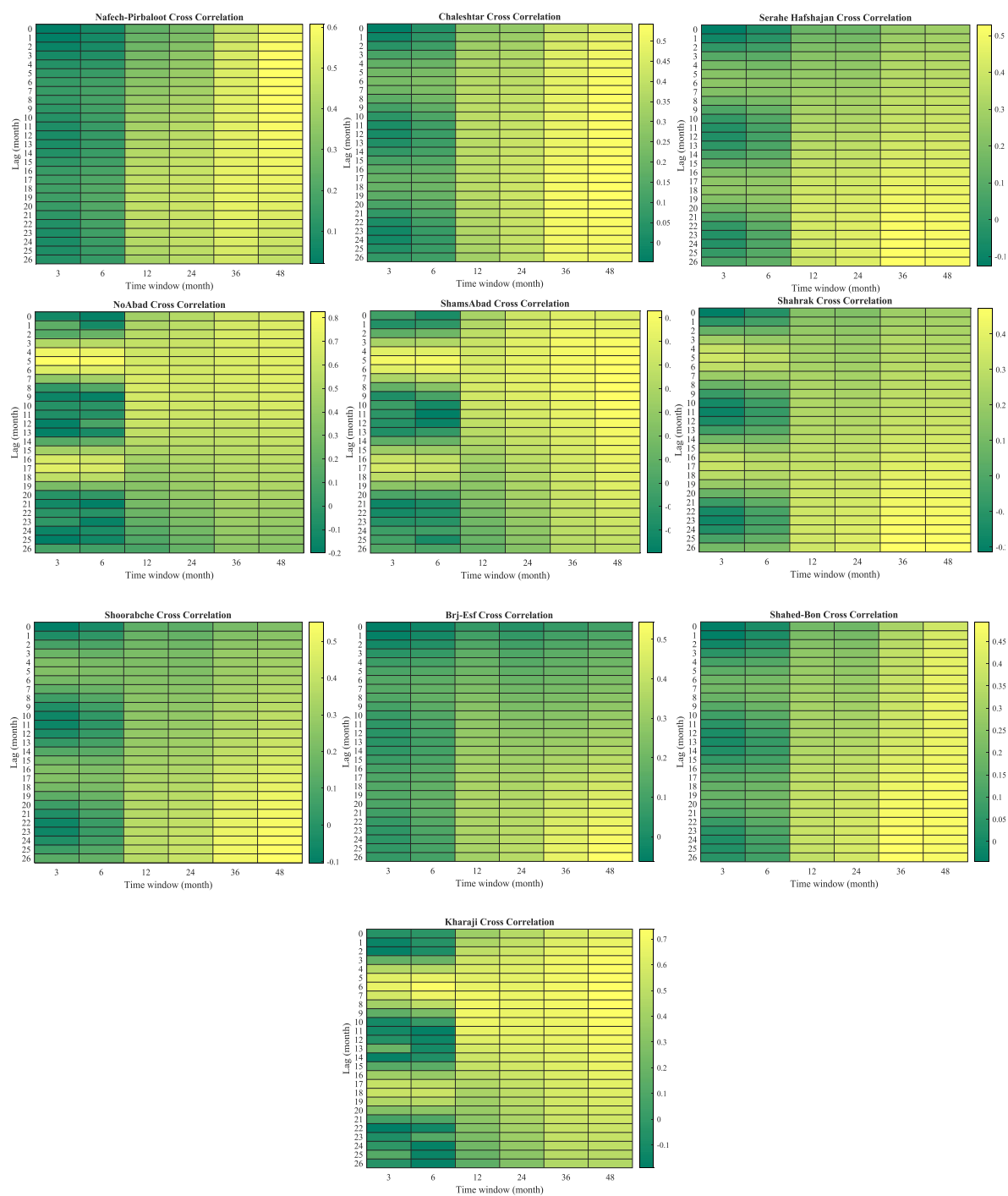
و نقاط سبزرتر نشان دهنده نبود همبستگی میان دو شاخص است. طبق این شکل مشخص است که هر چه مقیاس زمانی محاسبه دو شاخص افزایش می یابد، همبستگی میان دو شاخص بیشتر می شود که با نتایج Mendicino et al. (2008) تطابق دارد [۱۶]. همچنین، هرچه زمان تأخیر شاخص GRI نسبت به شاخص SPI بیشتر می شود، میزان همبستگی نیز بیشتر می شود. در همین راستا، بیشترین میزان همبستگی در هر پیزومتر در مقیاس زمانی و همراه با زمان تأخیر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد در پیزومتر ۱، حداکثر میزان همبستگی شاخص GRI با شاخص SPI در مقیاس ۴۸ ماهه و با پنج ماه زمان



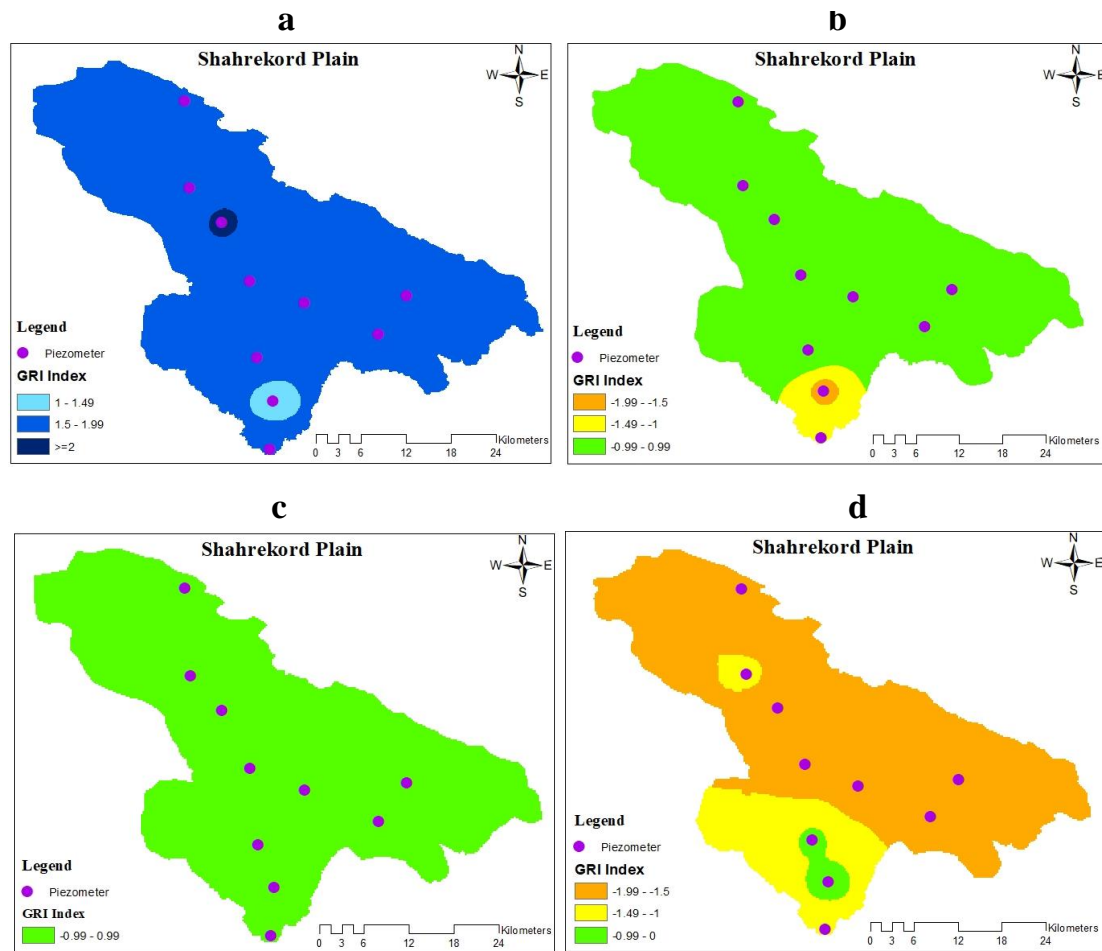
شکل ۳. شاخص SPI در مقیاس ۱۲ و ۴۸ ماهه دشت شهرکرد (دوره پایه)



شکل ۴. نقشه رنگی ضریب همبستگی پیرسون میان شاخص SPI و GRI در دشت شهرکرد (دوره پایه)



شکل ۵. نقشه رنگی ضریب همبستگی بیرون میان شاخص SPI و GRI با ۲۶ زمان تأخیر یک‌ماهه در دشت شهرکرد (دوره پایه)



شکل ۶. شاخص GRI در مقیاس ۴۸ ماهه منتهی به (a) سال آبی ۱۳۷۳-۱۳۷۴، (b) سال آبی ۱۳۸۱-۱۳۸۲، (c) سال آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ و (d) سال آبی ۱۳۹۶-۱۳۹۷ پیزومتر مورد مطالعه در دشت شهرکرد (دوره پایه)

شرایط دوره آینده

با توجه به نتایج درج شده در جدول ۴ مشخص می شود مدل GFDL-ESM4 برترین مدل در شبیه سازی بارندگی در دشت شهرکرد است. از همین رو، این مدل به عنوان مدل برگزیده انتخاب شده و بارندگی تا سال ۲۱۰۰ شبیه سازی می شود. در همین راستا، بارندگی استخراج شده از مدل تحت دو سناریوی SSP1-2.6 (خوشبینانه) و SSP5-8.5 (بدبینانه) تا سال ۲۱۰۰ در شکل ۷ و جدول ۸ نشان داده شده است. طبق نتایج شبیه سازی ذکر شده در جدول ۸ مشخص می شود که متوسط بارندگی تحت سناریوی SSP1-2.6 با افزایش و در سناریوی SSP5-8.5 با کاهش روبه رو می شود و از مقدار ۲۹۶/۱۵ به ترتیب به ۳۰۱/۰۵ و ۲۷۴/۸۱ افزایش و کاهش پیدا می کند. مطابق نتایج درج شده در جدول ۹ نتایج دمای شبیه سازی شده توسط مدل GFDL-ESM4 تا سال ۲۰۵۰ نشان می دهد تحت سناریوی SSP1-

2.6 دمای حداقل ۰/۱۸ درجه سانتی گراد افزایش و دمای حداکثر ۰/۳۳ درجه کاهش می یابد و تحت سناریوی SSP5-8.5، دمای حداقل ۱/۵۳ درجه سانتی گراد افزایش و دمای حداکثر ۱/۴۹ درجه سانتی گراد افزایش می یابد. همچنین، به منظور بررسی خشکسالی هواشناسی در دوره آینده (۲۰۲۲-۲۱۰۰)، از شاخص SPI در مقیاس ۱۲ و ۴۸ ماهه استفاده شده که در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. طبق شاخص SPI ۱۲ ماهه، نتایج نشان می دهد در سناریوی خوشبینانه SSP1-2.6، طولانی ترین خشکسالی رخ داده در منطقه ۵۲ ماه دوام داشته و شدیدترین خشکسالی نیز در همین دوره رخ می دهد و اندازه آن ۵۹/۳۲ است که در سال ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۹ رخ می دهد. همچنین، در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، ۷۰ ماه دوام داشته و بزرگترین شدت خشکسالی نیز با اندازه ۸۶/۵۹ در همین دوره و در سال های ۲۰۲۹ تا ۲۰۳۵ رخ می دهد.

پیزومترهایی که دارای بالاترین ضریب رگرسیون بودند، انتخاب شدند که نتایج رابطه رگرسیونی دو شاخص SPI و GRI برای آن‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

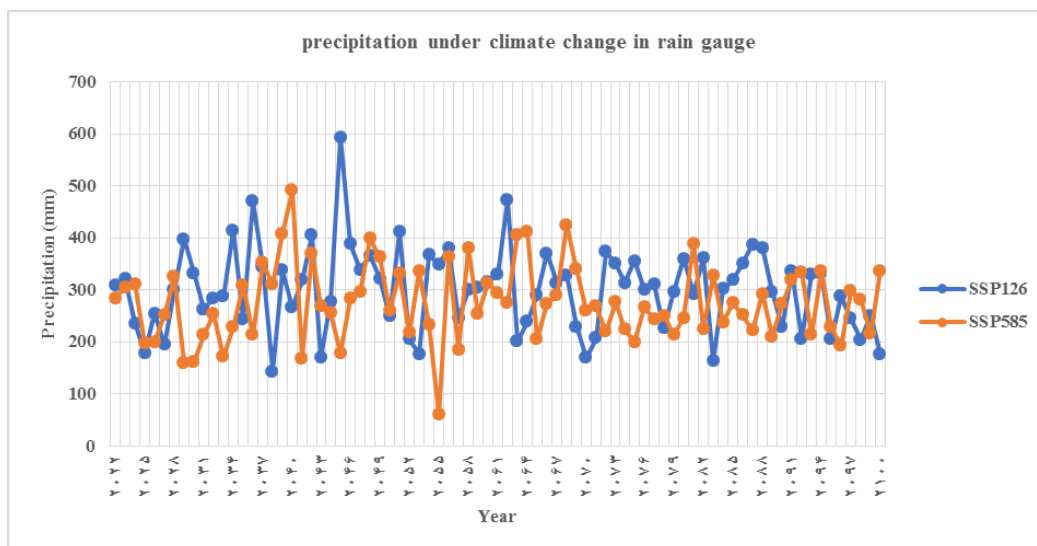
در ادامه با استفاده از نتایج شاخص‌های SPI و GRI و رگرسیون خطی، رابطه میان شاخص SPI و GRI برای پیزومترهای منتخب در دوره پایه تعیین شد و

جدول ۸. بارندگی فصلی و سالانه در دشت شهرکرد تحت شرایط تغییر اقلیم (تا سال ۲۱۰۰)

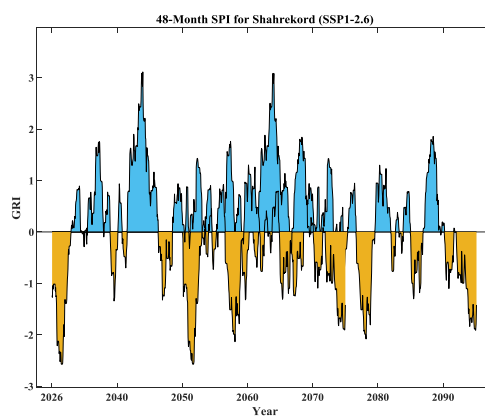
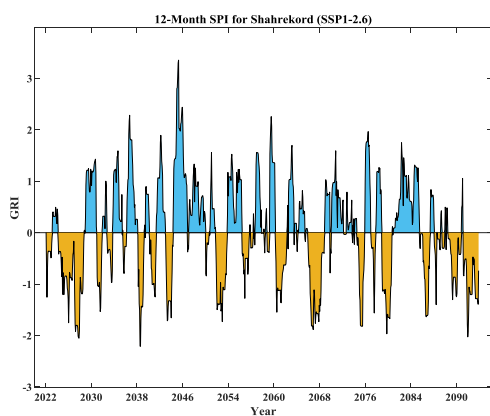
Average precipitation in rain gauge (mm)					
	Autumn	Winter	Spring	Summer	Yearly
SSP1-2.6	89.96	118.18	91.89	1.03	301.05
SSP5-8.5	88.84	111.06	74.06	0.85	274.81

جدول ۹. دمای حداقل و حداکثر فصلی و سالانه در دشت شهرکرد تحت شرایط تغییر اقلیم (تا سال ۲۱۰۰)

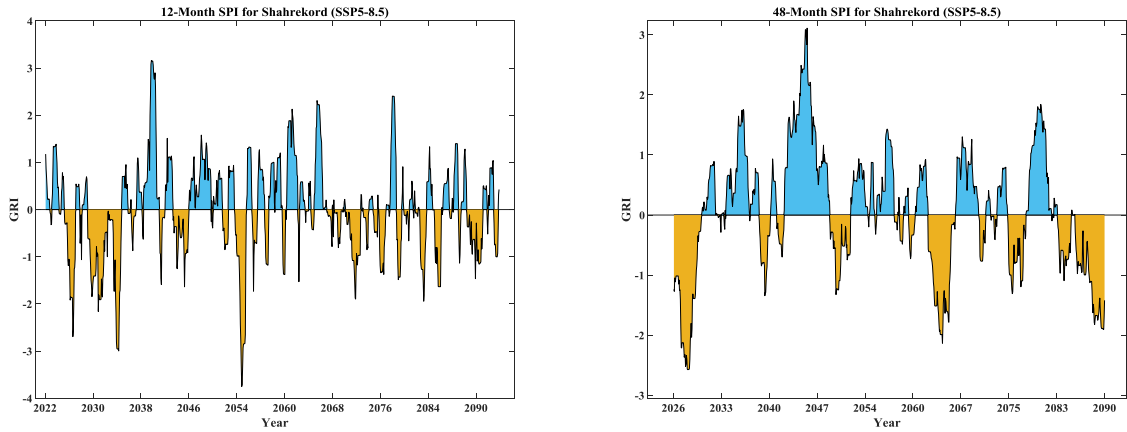
Average temperature (c)						
		Autumn	Winter	Spring	Summer	Yearly
SSP1-2.6	Tmin	2.09	-5.41	2.28	12.29	2.81
	Tmax	19.48	8.01	18.4	32.65	19.63
SSP5-8.5	Tmin	3.44	-4.16	3.38	13.97	4.16
	Tmax	21.35	9.61	20.28	34.55	21.45



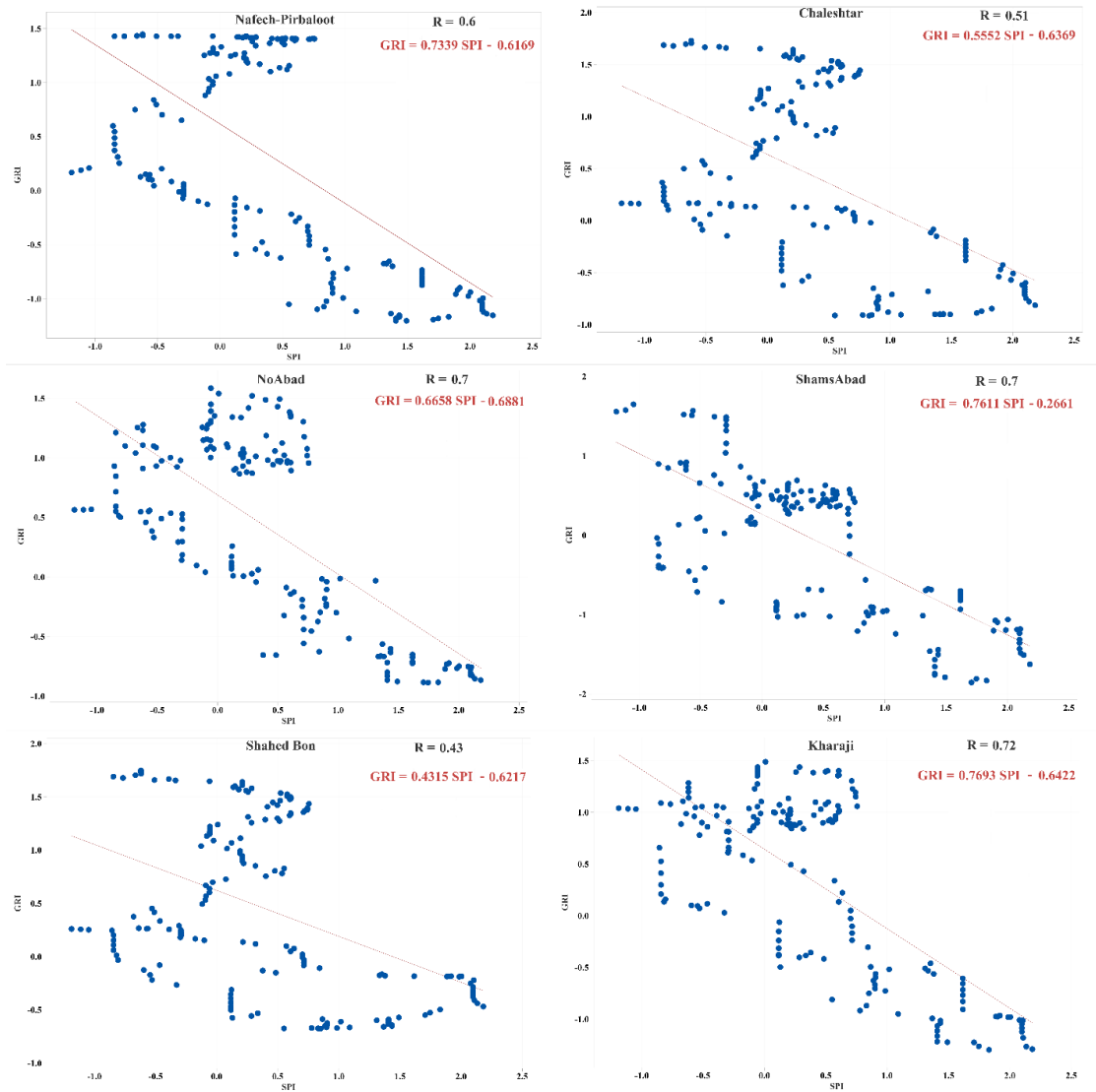
شکل ۷. بارش سالانه در شهرکرد تحت سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 (تا سال ۲۱۰۰)



شکل ۸. شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ ماهه تحت سناریوی SSP1-2.6 (تا سال ۲۱۰۰)



شکل ۹. شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ و ۴۸ ماهه تحت سناریوی SSP5-8.5 (تا سال ۲۱۰۰)



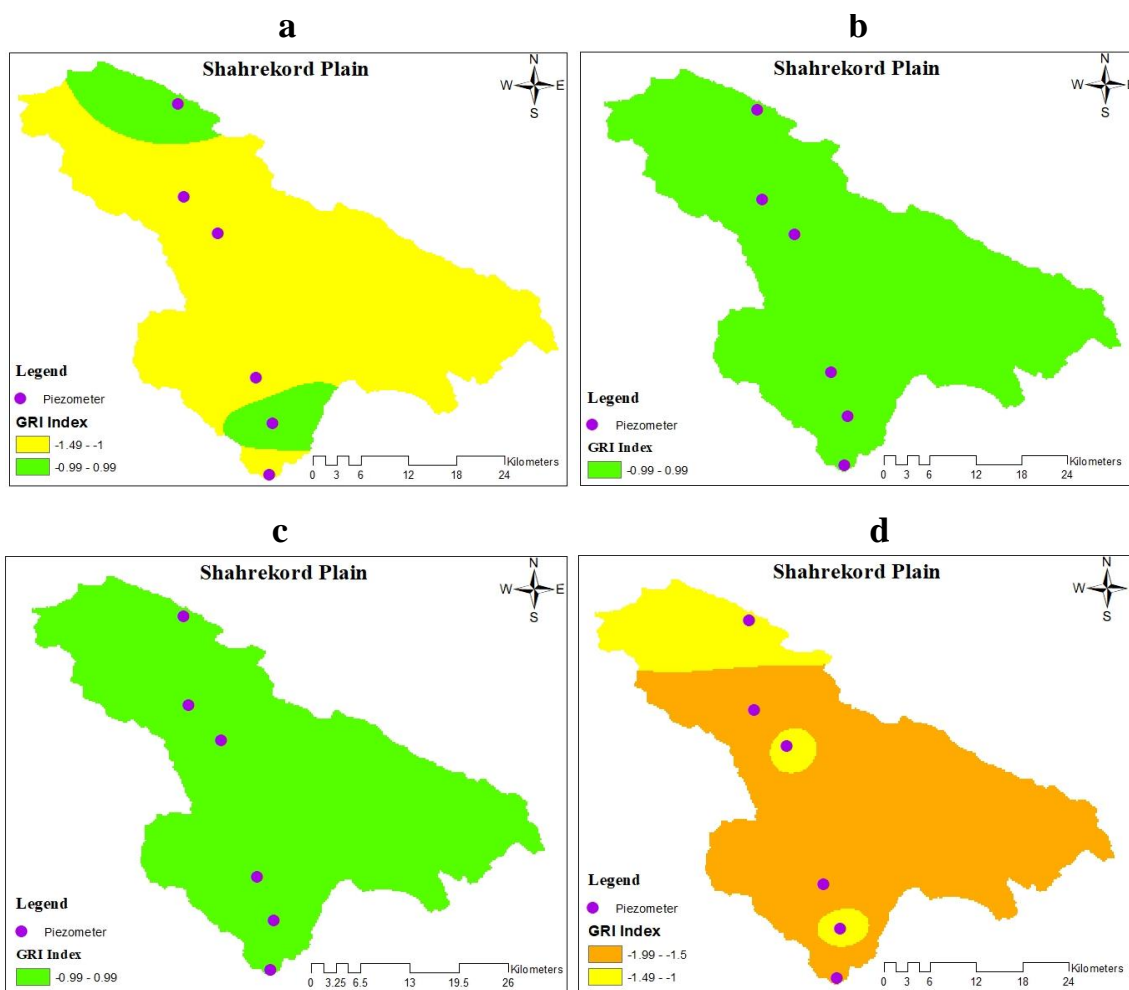
شکل ۱۰. رگرسیون خطی میان شاخص SPI و GRI در شش پیزومتر منتخب (دوره پایه)

با مشخص شدن رابطه خطی میان شاخص SPI و GRI در دوره پایه، شاخص GRI برای شش پیزومتر منتخب تحت سناریوی SSP1-2.6 (سناریوی خوشبینانه) و SSP5-8.5 (سناریوی بدبینانه) تا سال ۲۱۰۰ محاسبه شد که نتایج شاخص GRI در مقیاس ۴۸ ماهه منتهی به سال ۲۰۲۲، ۲۰۵۰، ۲۰۷۵ و ۲۱۰۰ تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

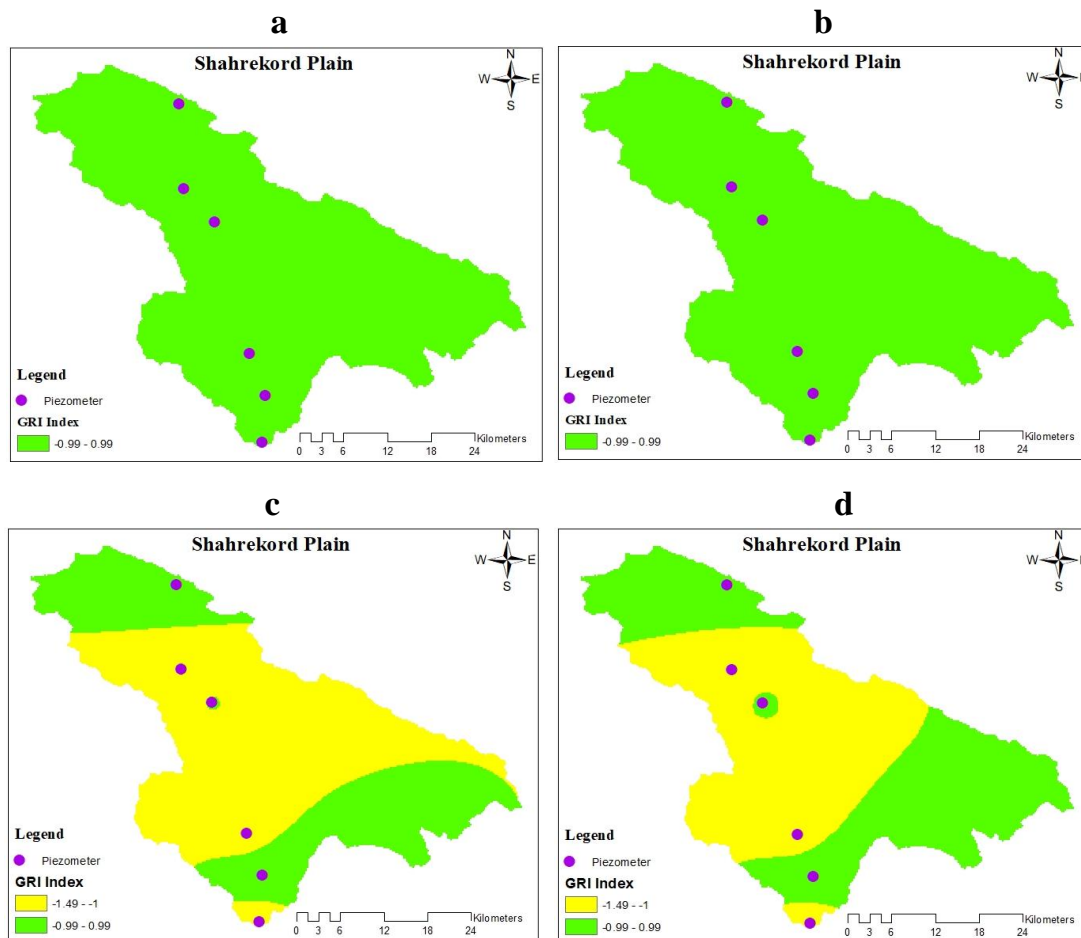
به منظور بررسی عملکرد مدل رگرسیونی جهت شبیه‌سازی شاخص خشکسالی منبع آب زیرزمینی GRI در دوره آینده با استفاده از شاخص خشکسالی هواشناسی SPI، از خطای RMSE و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شده است و نتایج این دو معیار در جدول ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که نشان داده شده است، رابطه رگرسیونی مورد استفاده از عملکرد مناسبی برخوردار است.

جدول ۱۰. عملکرد مدل رگرسیونی در تخمین شاخص GRI از شاخص SPI

Performance of regression model		
Piezometers ID	RMSE	NSE
1	1.23	0.39
2	1.25	0.38
4	1.30	0.36
5	0.78	0.61
9	1.24	0.39
10	1.24	0.38



شکل ۱۱. شاخص GRI در مقیاس ۴۸ ماهه منتهی به (a) سال ۲۰۲۲، (b) ۲۰۵۰، (c) ۲۰۷۵ و (d) برای شش پیزومتر منتخب تحت سناریوی SSP1-2.6 (تا سال ۲۱۰۰)



شکل ۱۲. شاخص GRI در مقیاس ۴۸ ماهه منتهی به (a) سال ۲۰۲۲، (b) ۲۰۵۰، (c) ۲۰۷۵ و (d) برای شش پیزومتر منتخب تحت سناریوی SSP5-8.5 (تا سال ۲۱۰۰)

وجود دارد. عدم قطعیت ناشی از تغییرپذیری داخلی پارامترسازی های سناریوهای SSP، شبیه سازی های مدل های GCM و انتخاب شاخص خشکسالی و روش و فرایند محاسبه آن نیز عدم قطعیت های این پژوهش را تشکیل می دهند. در این پژوهش تنها شاخص خشکسالی SPI و GRI مورد بررسی قرار گرفته است.

نتیجه گیری

با بررسی شرایط فعلی مشخص شد که دشت شهرکرد با میانگین بارندگی سالانه ۲۹۶/۱۵، از بارندگی بالاتری از متوسط بارندگی در ایران برخوردار است. همچنین، با محاسبه شاخص SPI در دوره پایه، مشخص شد در دوره آماری ۱۳۷۰ — ۱۳۷۱ تا ۱۳۹۶ — ۱۳۹۷، شدیدترین خشکسالی منطقه ۳۷ ماه دوام داشته و شدت آن ۴۵/۷۷ بوده است و در سال های در سال های آبی ۱۳۷۷ — ۱۳۷۸ تا

نتایج شبیه سازی شده دو شاخص SPI و GRI نشان می دهد خشکسالی های آینده دارای شدت و مدت بیشتر هستند. طبق شاخص SPI، ۶۰ درصد از دوره آینده تحت شرایط خشکسالی قرار دارد. در نهایت باید اشاره کرد در این مطالعه، تأثیر تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی دشت شهرکرد با استفاده از برون داد مدل GFDL-ESM4 که یکی از مدل های CMIP6 است و تحت دو سناریوی گزارش ششم تغییر اقلیم با نام های SSP1-2.6 و SSP5-8.5 صورت گرفته است. مدل انتخاب شده توانمندی زیادی در شبیه سازی پارامترهای اقلیمی نظیر بارش دارد و به طور بالقوه ای با استفاده از برون داد این مدل می توان خشکسالی را پیش کرد. اما ذکر این نکته حائز اهمیت است که عدم قطعیت های مختلف تقریباً در تمام مطالعاتی که وضعیت آینده را در نظر می گیرند یا آینده را شبیه سازی می کنند،

منابع

- ۱۳۸۰-۱۳۸۱ رخ داده است. در ادامه با تعیین شرایط دوره پایه، به منظور پیش‌بینی دوره آینده، ۱۰ مدل GCM مورد بررسی قرار گرفت که از میان تمامی مدل‌ها، مدل GFDL-ESN4 به دلیل دقت زیاد در پیش‌بینی دوره پایه، به عنوان برترین مدل انتخاب شد و همچنین، مشخص شد که نتایج این مدل به‌تنهایی از ترکیب تمامی مدل‌ها با یکدیگر از دقت قابل قبول‌تری برخوردار است. با تعیین مدل برتر، بارندگی در منطقه تحت دو سناریوی SSP1-2.6 (سناریوی خوشبینانه) و SSP5-8.5 (سناریوی بدبینانه) تا سال ۲۱۰۰ شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد متوسط بارندگی سالانه در دشت شهرکرد تحت سناریوی SSP1-2.6 افزایش و تحت سناریوی SSP5-8.5 کاهش پیدا خواهد کرد و به ترتیب برابر با ۳۰۱/۰۵ و ۲۷۴/۸۱ خواهد شد. همچنین، به منظور بررسی خشکسالی هواشناسی در دوره آینده، دوباره شاخص SPI برای دوره آینده در سه مقیاس ۳، ۶ و ۱۲ ماهه محاسبه شد. طبق شاخص SPI ۱۲ ماهه، نتایج نشان می‌دهد در سناریوی خوشبینانه SSP1-2.6، طولانی‌ترین خشکسالی رخ داده در منطقه ۵۲ ماه خواهد بود و شدیدترین خشکسالی نیز در همین دوره رخ می‌دهد و اندازه آن ۵۹/۳۲ خواهد بود که در سال ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۹ رخ می‌دهد. همچنین در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، ۷۰ ماه دوام خواهد داشت و بزرگ‌ترین شدت خشکسالی نیز با اندازه ۸۶/۵۹ در همین دوره و در سال‌های ۲۰۲۹ تا ۲۰۳۵ به وقوع خواهد پیوست. در ادامه به منظور تعیین خشکسالی آب زیرزمینی در دشت شهرکرد، از شاخص GRI استفاده شد. با محاسبه شاخص GRI در دوره پایه، همبستگی میان دو شاخص SPI و GRI در پی‌زومترهای دشت شهرکرد با استفاده ضریب همبستگی پیرسون تعیین شد. با انتخاب پی‌زومترهایی که دارای بیشترین میزان همبستگی بودند، با استفاده از رگرسیون خطی، شاخص GRI در منطقه تا سال ۲۱۰۰ تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد بیش از ۶۰ درصد از بازه دوره آینده (۲۰۲۲-۲۱۰۰) دشت شهرکرد در شرایط خشکسالی آب زیرزمینی قرار خواهد داشت و این دشت بارها با خشکسالی‌هایی با شدت و مدت زیاد روبه‌رو خواهد شد. در صورت نبود مدیریت پایدار و مناسب در منطقه و افزایش برداشت از دشت شهرکرد، عواقب جبران‌ناپذیری به آب زیرزمینی در منطقه وارد خواهد شد.
- [1]. Jiménez Cisneros BE, Oki T, Arnell NW, Benito G, Cogley JG, Doll P, Jiang T, Mwakalila SS. Freshwater resources, 2022.
- [2]. Dai A, Trenberth KE, Qian T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*. 2004 Dec 1;5(6):1117-30..
- [3]. Sheffield J, Andreadis KM, Wood EF, Lettenmaier DP. Global and continental drought in the second half of the twentieth century: severity–area–duration analysis and temporal variability of large-scale events. *Journal of Climate*. 2009 Apr 15;22(8):1962-81.
- [4]. Change IP. *Climate Change 2007: the physical science basis*. Agenda. 2007 May 31;6(07):333.
- [5]. Portela MM, dos Santos JF, Silva AT, Benitez JB, Frank C, Reichert JM. Drought analysis in southern Paraguay, Brazil and northern Argentina: regionalization, occurrence rate and rainfall thresholds. *Hydrology Research*. 2015 Oct;46(5):792-810.
- [6]. Al-Kaisi MM, Elmore RW, Guzman JG, Hanna HM, Hart CE, Helmers MJ, Hodgson EW, Lenssen AW, Mallarino AP, Robertson AE, Sawyer JE. Drought impact on crop production and the soil environment: 2012 experiences from Iowa. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2013 Jan 1;68(1):19A-24A.
- [7]. Zhang Z, Chen X, Xu CY, Hong Y, Hardy J, Sun Z. Examining the influence of river–lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake basin. *Journal of Hydrology*. 2015 Mar 1;522:510-21.
- [8]. Bond NR, Lake PS, Arthington AH. The impacts of drought on freshwater ecosystems: an Australian perspective. *Hydrobiologia*. 2008 Mar;600(1):3-16.
- [9]. Ding Y, Hayes MJ, Widhalm M. Measuring economic impacts of drought: a review and discussion. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*. 2011 Aug 30.
- [10]. Van Dijk AI, Beck HE, Crosbie RS, de Jeu RA, Liu YY, Podger GM, Timbal B, Viney NR. The Millennium Drought in southeast Australia (2001–2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society. *Water Resources Research*. 2013 Feb;49(2):1040-57.
- [11]. Trenberth KE, Dai A, Van Der Schrier G, Jones PD, Barichivich J, Briffa KR, Sheffield J. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*. 2014 Jan;4(1):17-22.

- [12]. Smith AB, Katz RW. US billion-dollar weather and climate disasters: data sources, trends, accuracy and biases. *Natural hazards*. 2013 Jun;67(2):387-410.
- [13]. Eyring V, Bony S, Meehl GA, Senior CA, Stevens B, Stouffer RJ, Taylor KE. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*. 2016 May 26;9(5):1937-58.
- [14]. O'Neill BC, Tebaldi C, Van Vuuren DP, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque JF, Lowe J, Meehl GA. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 2016 Sep 28;9(9):3461-82.
- [15]. Khan S, Gabriel HF, Rana T. Standard precipitation index to track drought and assess impact of rainfall on watertables in irrigation areas. *Irrigation and Drainage Systems*. 2008 Jun;22(2):159-77.
- [16]. Mendicino, G., Senatore, A., & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 282-302.
- [17]. Bloomfield JP, Marchant BP, McKenzie AA. Changes in groundwater drought associated with anthropogenic warming. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2019 Mar 11;23(3):1393-408.
- [18]. Kumar R, Musuza JL, Van Loon AF, Teuling AJ, Barthel R, Ten Broek J, Mai J, Samaniego L, Attinger S. Multiscale evaluation of the Standardized Precipitation Index as a groundwater drought indicator. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2016 Mar 15;20(3):1117-31.
- [19]. Leelaruban N, Padmanabhan G, Oduor P. Examining the relationship between drought indices and groundwater levels. *Water*. 2017 Feb;9(2):82.
- [20]. Soleimani Motlagh M, Ghasemieh H, Talebi A, Abdollahi K. Identification and analysis of drought propagation of groundwater during past and future periods. *Water resources management*. 2017 Jan;31(1):109-25.
- [21]. Nearing MA, Polyakov VO, Nichols MH, Hernandez M, Li L, Zhao Y, Armendariz G. Slope-velocity equilibrium and evolution of surface roughness on a stony hillslope. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2017 Jun 30;21(6):3221-9.
- [22]. Labarrere CA, Woods JR, Hardin JW, Campana GL, Ortiz MA, Jaeger BR, Reichart B, Bonnin JM, Currin A, Cosgrove S, Pitts DE. Early prediction of cardiac allograft vasculopathy and heart transplant failure. *American Journal of Transplantation*. 2011 Mar;11(3):528-35.
- [23]. Guo M, Yue W, Wang T, Zheng N, Wu L. Assessing the use of standardized groundwater index for quantifying groundwater drought over the conterminous US. *Journal of Hydrology*. 2021 Jul 1;598:126227.
- [24]. Abbasinia A, Morshedi J, Zohorayan M, Ghorbaniyan J. Analysis and Comparison of SPI and GRI Indices in Assessing Meteorological Drought and Groundwater, Case Study: Mehran Plain, Ilam Province. *Physical Geography Quarterly*. 2021 Mar 21;14(Physical Geography Quarterly):95-114. [Persian]
- [25]. Mirakbari M, Mortezaie FG, MOHSENI SM. Investigation of the effect of meteorological drought on surface and ground water resources by Indices SPI, SPEI, SDI and GRI. [Persian]
- [26]. Shaker Sureh F, Asadi E. Meteorological and hydro-logical drought communication in Salmas Plain. *Desert Ecosystem Engineering Journal*. 2019 Jun 10;8(22):89-100. [Persian]
- [27]. Noshadi M, Ahadi A. Analyzing Piezometers' Behavior to Determine the Lag Time of the Rainfall Effects on the Groundwater Level Fluctuations in the Alluvial Plain of Shiraz by Using SPI and GRI Indices. *JWSS-Isfahan University of Technology*. 2020 Feb 10;23(4):299-312. [Persian]
- [28]. Seyfi M, MOHAMMAD ZH, Mosaedi A. Evaluating the impacts of drought on groundwater resources in fasa aquifer using SPI, GRI and SECI. [Persian]
- [29]. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology 1993* Jan 17 (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- [30]. Hayes MJ, Svoboda MD, Wihite DA, Vanyarkho OV. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American meteorological society*. 1999 Mar;80(3):429-38.
- [31]. Guenang GM, Kanga FM. Computation of the standardized precipitation index (SPI) and its use to assess drought occurrences in Cameroon over recent decades. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2014 Oct;53(10):2310-24.
- [32]. Lloyd-Hughes B, Saunders MA. A drought climatology for Europe. *International Journal of*

- Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society. 2002 Nov 15;22(13):1571-92.
- [33]. Gudmundsson L, Bremnes JB, Haugen JE, Engen-Skaugen T. Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations—a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2012 Sep 21;16(9):3383-90.
- [34]. Lee D, Lee G, Kim S, Jung S. Future runoff analysis in the Mekong River Basin under a climate change scenario using deep learning. *Water*. 2020 Jun;12(6):1556.
- [35]. Yang X, Wood EF, Sheffield J, Ren L, Zhang M, Wang Y. Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for China from CMIP5 models. *Journal of Hydrometeorology*. 2018 Mar;19(3):609-23.