



ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی تالاب جازموریان با بهره‌گیری از مدل CanESM2

زهره ابراهیمی خوسفی^{۱*}، مریم میراکبری^۲

۱. استادیار، دانشکده منابع طبیعی، گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه جیرفت، جیرفت، ایران.

۲. فارغ التحصیل دکتری بیابان‌زدایی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: Zohrebrahimi2018@ujiroft.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۲/۱۸

چکیده

تالاب‌ها یکی از مهم‌ترین بوم‌نظام‌های (اکوسیستم) طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که در دهه اخیر بیابان رطوبتی آن‌ها به دلیل تأثیر نامطلوب تغییر اقلیم و خشکسالی‌ها دچار نوسان منفی شده است. بنابراین لازم است اثر چنین رویدادی در بوم‌نظام‌های مختلف، به‌ویژه این بوم‌نظام‌های ارزشمند مورد ارزیابی قرار گیرد. در پژوهش حاضر وضعیت خشکسالی آینده تالاب جازموریان در شرایط افزایش دما با بهره‌گیری از خروجی مدل گزارش پنجم IPCC ارزیابی شد. به این منظور شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد شده و شاخص شناسایی خشکسالی که تأثیر افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم آینده را بر خشکسالی در نظر می‌گیرند، استفاده شد. همچنین تأثیر افزایش دما بر خطر خشکسالی بر پایه دوره بازگشت بررسی شد. نتایج نشان داد شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد شده نسبت به شاخص شناسایی خشکسالی بهتر توانسته تأثیر تبخیر تعرق و افزایش دما را بر خشکسالی نشان دهد. بنابراین، شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد شده برای ارزیابی خشکسالی‌های آینده با سناریوهای RCP به کار گرفته شد. بر پایه سری‌های زمانی خشکسالی مشخص شد که با افزایش دما، خشکسالی‌های بلندمدت آینده دارای شدت و مدت بیشتری نسبت به دوره گذشته خواهند بود. تحلیل خطر خشکسالی نشان داد خطر خشکسالی به ترتیب در مقیاس‌های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، روند کاهشی خواهد داشت. همچنین در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 خطر خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مورد بررسی روند افزایشی خواهد داشت. ب یافته‌های حاصل از پژوهش حاضر می‌تواند برای ارزیابی تغییر عناصر اقلیمی و همچنین ارائه راهکارهای مناسب مدیریت منابع آب در مناطق خشک مفید باشد.

واژگان کلیدی: من- کندال؛ مدل اقلیمی؛ شاخص بارش-تبخیر تعرق استاندارد شده؛ شاخص شناسایی خشکسالی

■ مقدمه

یکی از مهم‌ترین علت خشک شدن بستر تالاب‌ها و افزایش انتشار ذرات گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های اخیر می‌باشد (۷). کمبود رطوبت ناشی از وقوع خشکسالی‌ها موجب ایجاد مشکل‌های اقتصادی-اجتماعی و عدم تعادل در وضعیت هیدرولوژیک این مناطق شده است. خشکسالی به‌عنوان بلایی طبیعی و پدیده‌ای خزنده توصیف می‌شود که برخلاف دیگر وقایع هیدرولوژیک مانند سیل، تعیین زمان شروع و خاتمه آن دشوار است. تأثیر ناشی از خشکسالی در مقایسه با دیگر بلایای طبیعی در محدوده مکانی وسیع‌تری دیده می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد ۲۲٪ از کل خسارات و ۳٪ از مرگ‌ومیر ناشی از بلایای طبیعی در جهان، مربوط به خشکسالی می‌باشد (۳۸).

در مقیاس جهانی شدت، مدت و فراوانی خشکسالی‌ها در دهه‌های اخیر افزایش یافته است که شدت وقوع آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک بیشتر از دیگر مناطق اقلیمی می‌باشد (۳۰). خشکسالی‌ها بیشتر توسط دما و بارندگی کنترل می‌شود. رابطه متقابل بین بارندگی و دما و سهم آن‌ها در وقوع خشکسالی بسیار پیچیده است. مطالعات متعددی وابستگی خشکسالی را به تغییرات دما نشان می‌دهند (۳۷). بر پایه گزارش‌های IPCC^۱، فراوانی و شدت این بلای طبیعی در اواخر قرن ۲۰ به دلیل تغییرات اقلیمی رو به افزایش می‌باشد (۳۲). طبق گزارش پنجم ارزیابی هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم AR5^۲ دمای سطح زمین در پایان قرن ۲۱ به اندازه‌ی ۱/۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ افزایش خواهد یافت (۱۵). مدل‌های گزارش پنجم از سناریوهای جدید انتشار با عنوان خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای RCP^۳ استفاده می‌کنند (۲۶). این سناریوها دارای چهار خط سیر اساسی به نام‌های RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 هستند که بر پایه مقدار واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰

نام‌گذاری شده‌اند (۱۳). مدل‌های گردش عمومی جو GCM^۴ از ابزارهای اصلی برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در آینده می‌باشند. این مدل‌ها دارای تفکیک مکانی بین ۲۵۰ تا ۶۰۰ کیلومتر می‌باشند و به همین دلیل استفاده از این مدل‌ها در مطالعات اقلیمی کوچک‌مقیاس امکان‌پذیر نیست (۱۱). به همین دلیل خروجی مدل‌های گردش عمومی جو باید توسط روش‌های مناسب به مقیاس محلی ریزمقیاس شوند. بدین منظور روش‌های متعددی وجود دارد که از بین آن‌ها، روش ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM^۵ کاربرد بیشتری دارد. در این روش برپایه ارتباط خطی میان متغیرهای پیش‌بینی کننده و داده‌های مشاهداتی، خروجی مدل بزرگ‌مقیاس گردش عمومی جو در مقیاس ایستگاه مورد مطالعه ریزمقیاس می‌شود. تعیین روند گسترش زمانی و مکانی خشکسالی‌ها با بهره‌گیری از شاخص‌های خشکسالی امکان‌پذیر می‌باشد (۱۲). در واقع استفاده از این شاخص‌ها، امکان کمی‌سازی ناهنجاری‌های اقلیمی را فراهم می‌کند (۳۸). مهم‌ترین شاخص‌های خشکسالی عبارتند از شاخص خشکسالی مؤثر EDI^۶، شدت خشکسالی پالمر PDSI^۷، شاخص شناسایی خشکسالی RDI^۸، بارش استاندارد شده SPI^۹، بارش-تبخیر تعرق استاندارد شده SPEI^{۱۰}. در این میان شاخص‌های RDI و SPEI علاوه بر بارندگی، دما را نیز برای محاسبه خشکسالی در نظر می‌گیرند. لذا در این مطالعه دو شاخص SPEI و RDI به دلیل حساسیت پذیری به دما و توانایی در محاسبه تأثیر گرمایش جهانی بر خشکسالی، برای تحلیل و پایش خشکسالی استفاده شدند. به عبارت دیگر این دو شاخص اثر افزایش تبخیر تعرق بر اثر افزایش دما در آینده را بر روی خشکسالی بررسی می‌کنند. پژوهش‌های متعددی در زمینه تأثیر تغییرات اقلیمی بر خشکسالی هواشناسی در جهان و ایران انجام شده است که حاکی از افزایش

^۴ General Circulation Model

^۵ Statistical Downscaling Model

^۶ Effective Drought Index

^۷ Palmer Drought Severity Index

^۸ Reconnaissance Drought Index

^۹ Standardized Precipitation Index

^{۱۰} Standardized Precipitation - Evapotranspiration Index

^۱ Intergovernmental Panel on Climate Change

^۲ Fifth Assessment Report

^۳ Representative Concentration Pathway

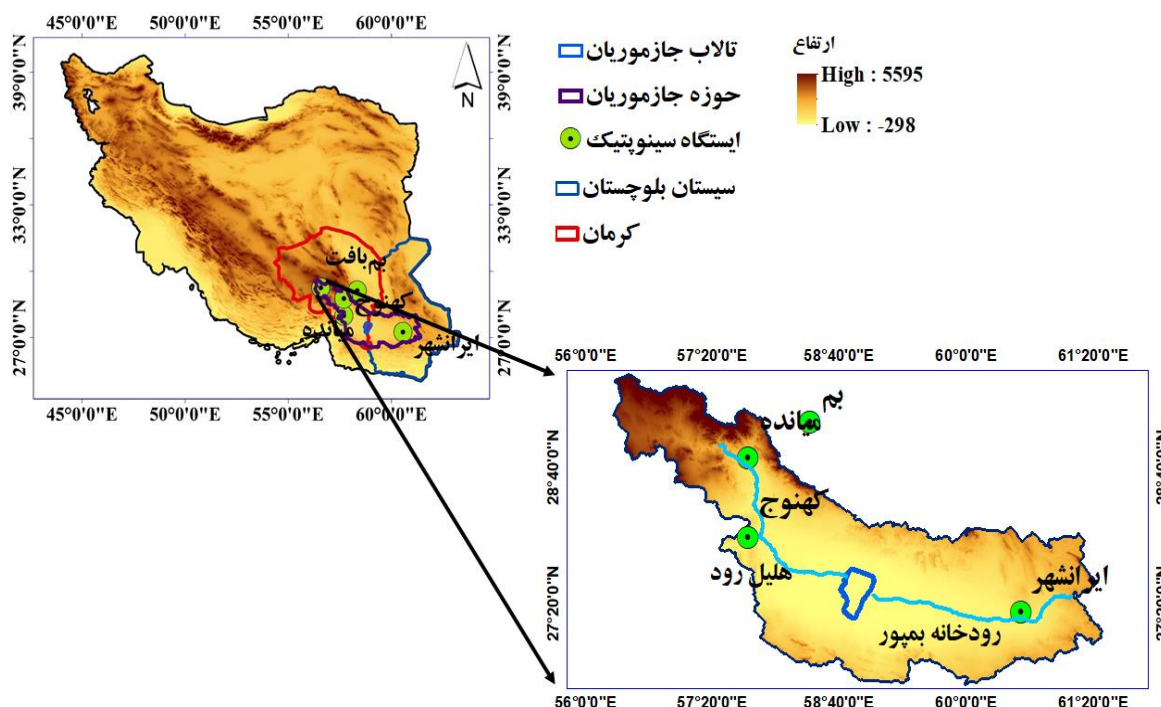
زیادی به پدیده فرسایش بادی دارد و به‌عنوان یکی از منابع اصلی تولید گردوغبار در جنوب شرق ایران شناخته شده است (۲۹). بنابراین طی مرور منابع انجام شده، مطالعات چندانی در زمینه بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های تالاب جازموریان یافت‌نشده. لذا هدف پژوهش حاضر تحلیل مشخصه‌های خشکسالی هواشناسی تالاب جازموریان برپایه شاخص‌های SPEI و RDI در دوره‌های حال و آینده با استفاده از مدل اقلیمی است. همچنین تحلیل ریسک ناشی از خشکسالی برپایه دوره بازگشت هریک از مشخصه‌های خشکسالی به‌منظور بررسی اثرات خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم آینده یکی دیگر از اهداف اصلی این پژوهش است.

■ مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی پژوهش حاضر، تالاب جازموریان در جنوب شرق ایران است که با مساحتی معادل ۱۰۸۲ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی 27° و 9° تا 27° و $40'$ عرض شمالی و 58° و $34'$ تا 59° و $9'$ طول شرقی و مابین استان‌های سیستان بلوچستان و کرمان واقع شده است (شکل ۱). این منطقه دارای اقلیم بیابانی و گرم و خشک است. میانگین بارندگی سالانه در این منطقه در نواحی مرتفع شمالی ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر، در بخش شرقی در شرق ایرانشهر بیش از ۱۵۰ میلی‌متر و در نواحی جنوب غربی کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر است. ۹۱ رودخانه کوچک و بزرگ دائمی و فصلی در این حوضه جریان دارند که بخش عمده‌ای از زهکشی حوضه رودخانه هلیل رود و بمپور را به عمل می‌آورند و در پایان به تالاب جازموریان تخلیه‌میشوند. به‌طور کلی برپایه داده‌های هواشناسی در دوره ۵۵ ساله میانگین بارندگی $105/7$ میلی‌متر و دمای میانگین $27/5$ درجه سانتی‌گراد است. همچنین میانگین تبخیر سالانه بین 1300 تا 3750 میلی‌متر متغیر است (۱۹).

خشکسالی‌ها در سال‌های اخیر است (۲، ۴، ۳۹). به‌عنوان نمونه خشکسالی هواشناسی استان یزد برپایه خروجی مدل CanESM2 توسط شاخص‌های SPEI و SPEI ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد خشکسالی‌های شدیدتری در آینده به وقوع خواهد پیوست (۲۰). تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی آینده در حوضه دزفول برپایه شاخص SPEI و ۱۵ مدل GCM و سناریوهای A1B, A2, B1 بررسی شده است (۱۴). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد مدت خشکسالی‌های شدید روند افزایشی دارد در حالیکه مدت خشکسالی‌های میانگین بر طبق تمام سناریوها از الگوی تغییرات کاهشی تبعیت می‌کند. نتیجه تحلیل خشکسالی‌های آینده در کره جنوبی با بهره‌گیری از شاخص‌های RDI و SPEI و سناریو RCP8.5 نشان داد که بر پایه شاخص SPEI، اقلیم این منطقه مرطوب‌تر خواهد شد؛ ولی بر پایه شاخص RD شرایط خشک‌تری را تجربه خواهدکرد (۱۶). تأثیر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های خشکسالی با استفاده از مدل HadGEM2 AO از سری مدل‌های CMIP5 AR5 در دشت وانگا کره شمالی نشان‌دهنده وقوع خشکسالی‌های شدیدتر در آینده، در شرایط تغییر اقلیم می‌باشد. ویژگی‌های شدت، تداوم، بزرگی، فاصله و فراوانی خشکسالی برپایه شاخص شناسایی خشکسالی RDI در هشت ایستگاه هم‌دیدگی (سینوپتیک) اصفهان، اهواز، تهران، بابلسر، تبریز، خرم‌آباد و مشهد طی سال‌های ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۰ ارزیابی شد (۲۵). نتایج این بررسی نشان می‌دهد در این مناطق خشکسالی‌های بهاره شدیدتر می‌باشند و در بسیاری از ایستگاه‌ها شدت خشکسالی‌های ماه‌های اردیبهشت و فروردین ماه در سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۰ نسبت به سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۸۰ افزایش بیشتری داشته است. اکثر نقاط ایران، از جمله جنوب شرق کشور، دارای درجه بالای خشکی و تغییرپذیری بارندگی هستند که این ویژگی منجر به افزایش حساسیت‌پذیری این مناطق نسبت به خشکسالی شده است. یکی از مهم‌ترین تالاب‌های واقع در این منطقه، تالاب بین‌المللی جازموریان است که حساسیت



شکل ۱. پراکنش ایستگاه‌های هم‌دید در محدوده منطقه مورد بررسی.

داده‌های مورد استفاده

برای ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی تالاب جازموریان دو سری داده مورد نیاز بود. (۱) داده‌های مشاهداتی بارندگی و دمای متوسط، (۲) داده‌های مدل گردش عمومی CanESM2. داده‌های بارندگی و دمای میانگین روزانه نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هم‌دید به تالاب جازموریان (کهنوج و ایرانشهر)، از سازمان هواشناسی ایران^۱ IMO به ترتیب برای دوره‌های آماری ۱۹۶۴ تا ۲۰۱۸ و ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۸ گرفته شد. خروجی‌های مدل CanESM2 و سه سناریو RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 برای دوره‌های گذشته و آینده که در این پژوهش به ترتیب ۲۰۰۵-۱۹۶۱ و ۲۰۲۰-۲۱۰۰ در نظر گرفته شده‌اند، از منبع دسترسی داده‌ها (۴۲) تهیه شدند.

ریزمقیاس‌نمایی مدل CanESM2

مدل CanESM2^۲ نسل دوم مدل کانادایی سامانه زمین است که توسط CCCma^۳ ارائه شده است. داده‌های CanESM2 سری‌های زمانی روزانه بلندمدت

استاندارد شده هستند که بر پایه طول و عرض جغرافیایی هر ایستگاه قابل استخراج هستند (۲۲). در پژوهش حاضر داده‌های مدل CanESM2 که شامل ۲۶ متغیر برای طول و عرض جغرافیایی ایستگاه‌های ایرانشهر و کهنوج است، برگرفته شد. به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن داده‌های مدل، ریزمقیاس‌نمایی با به‌کارگیری روش آماری SDSM برای متغیرهای بارندگی و دمای متوسط در ایستگاه‌های مورد بررسی انجام شد. خروجی مدل CanESM2 بر پایه داده‌های روزانه بارندگی و دمای میانگین در دوره آماری پایه در ایستگاه‌های مطالعاتی ریزمقیاس شدند. دوره آماری پایه برای ریزمقیاس‌نمایی ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ و ۱۹۶۴ تا ۲۰۰۵ به ترتیب در ایستگاه‌های کهنوج و ایرانشهر در نظر گرفته شد. به‌طور کلی روش SDSM خروجی مدل GCM را در پنج مرحله ریزمقیاس می‌کند که شامل کنترل کیفیت داده‌ها، بررسی و انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، واسنجی مدل، صحت‌سنجی مدل، شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی تحت سناریوهای RCP می‌باشد (۲۲). واسنجی و صحت‌سنجی مدل به ترتیب پایه ۷۰ و ۳۰ درصد داده‌های مشاهداتی انجام شد. در پژوهش حاضر، داده‌های مربوط به دوره‌های آماری ۱۹۹۹-۱۹۸۵ و ۱۹۹۳-۱۹۶۴ به ترتیب برای ایستگاه-

^۱ Iran Meteorological Organization

^۲ Canadian Earth System Model (second generation)

^۳ Canadian Center for Climate Modeling and Analysis

بر پایه اختلاف بین بارندگی و تبخیر تعرق تجمعی در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه و با استفاده از روابط ۴ و ۵ محاسبه شد (۳۷). اختلاف بین بارندگی و تبخیر تعرق اشاره به بیلان آبی اقلیم دارد. روش‌های زیادی برای برآورد مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل وجود دارد. یکی از روش‌های ساده و کاربردی که بر مبنای متغیرهای دما و عرض جغرافیایی، تبخیر و تعرق را برآورد می‌کند، روش تورنت وایت است (۳۵). در پژوهش حاضر از نرم‌افزار DrinC1.7 برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد.

$$SPEI = \left[w - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right], \quad w = (-\ln(P))^{0.5} \quad P \leq 0.5 \quad (4)$$

$$\begin{cases} 0 < H(x) \leq 0.5 & t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \\ 0.5 < H(x) \leq 1 & t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2}\right)} \end{cases}, \quad H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (5)$$

در این روابط q احتمال صفر بودن بارندگی و G مقدار احتمال تجمعی تابع گاما و P احتمال بیشتر شدن مقادیر تعیین شده D است. همچنین $C_1 = 0.802853$, $C_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.18929$, $d_3 = 0.001308$ و $C_0 = 2.515517$ می‌باشند.

شاخص شناسایی خشکسالی (RDI)

شاخص RDI اولین بار توسط ساکیریس معرفی شد (۳۶). این شاخص همانند SPEI بر پایه رابطه بین بارندگی و تبخیر تعرق پتانسیل است که در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت تا بلندمدت محاسبه می‌شود. به منظور محاسبه RDI، در آغاز شاخص خشکسالی پتانسیل از نسبت بارندگی به تبخیر تعرق بر پایه رابطه ۶ محاسبه و مقدارهای شاخص شناسایی خشکسالی نرمال شده RDI_n با بهره‌گیری از رابطه ۷ محاسبه شد. در پایان مقدار استاندارد شده شاخص شناسایی خشکسالی RDI_{st} با فرض اینکه α^i از توزیع لوگ نرمال پیروی کند (۳۵)، بر پایه رابطه ۸ برآورد شد.

های کهنوج و ایرانشهر برای واسنجی مدل و دوره‌های آماری ۲۰۰۵-۲۰۰۰ و ۲۰۰۵-۱۹۹۴ برای صحت‌سنجی انتخاب شدند.

ارزیابی کارایی مدل CanESM2 در منطقه مورد بررسی

ارزیابی کارایی مدل CanESM2 در منطقه مورد بررسی با بهره‌گیری از سه معیار ضریب تبیین R^2 ، ناش-ساتکلیف NSE، و مجذور مربعات خطا RMSE برای متغیرهای دمای میانگین و بارندگی در دوره آماری ۱۹۶۴ تا ۲۰۰۵ و ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۵ انجام شد (رابطه ۱ تا ۳). بر پایه این معیارها، کارایی مدل زمانی قابل قبول خواهد بود که مقدار ضریب تبیین و ناش-ساتکلیف به ترتیب ۰/۶ تا ۰/۷ و ۰/۵ تا ۰/۶۵ باشد. همچنین معیار مجذور مربعات خطا نیز باید دارای کمترین مقدار باشد (۱).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - \bar{x}_{obs})(y_{mod} - \bar{y}_{mod})}{\sqrt{\left(\sum_{t=1}^T (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2\right) \left(\sum_{t=1}^T (y_{mod} - \bar{y}_{mod})^2\right)}} \right]^2 \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - y_{mod})^2}{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - \bar{x}_{obs})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \left(\frac{\sum_{t=1}^T (x_{obs} - y_{mod})^2}{T} \right) \quad (3)$$

که در رابطه‌های مذکور X_{obs} داده‌های مشاهده‌ای، \bar{X}_{obs} میانگین داده‌های مشاهده‌ای، Y_{obs} داده‌های ریزمقیاس شده، \bar{Y}_{obs} میانگین مقادیر ریزمقیاس شده و T تعداد مشاهدات می‌باشند.

شاخص خشکسالی بارش - تبخیر تعرق استاندارد شده

SPEI

شاخص SPEI، اصلاح شده شاخص بارش استاندارد شده است که برای اندازه‌گیری خشکسالی بر پایه تغییرپذیری بارندگی و دما استفاده می‌شود. این شاخص

محاسبه شدند. بدین منظور مناسب‌ترین تابع توزیع تجمعی به مقادیر شدت خشکسالی در تداوم‌های مختلف بر پایه فراوانی برآزش داده شد. فراوانی خشکسالی بر پایه دوره بازگشت تک متغیره طبق رابطه (۹) توصیف می‌شود. برطبق این رابطه، دوره بازگشت خشکسالی توسط میانگین فاصله زمانی بین وقایع خشکسالی و تابع توزیع تجمعی شدت خشکسالی محاسبه شد. دوره بازگشت در واقع میانگین فاصله زمانی بین وقوع یک پدیده است که چندین بار در طول زمان تکرار می‌شود و برای توصیف شدت و فراوانی خشکسالی کاربرد دارد (۱۷). میانگین فاصله زمانی بین وقایع خشکسالی بر طبق رابطه (۱۰) محاسبه شد:

$$T_x = \frac{E(L)}{1 - F_x(x)} \quad F_x(x) \Pr[X \geq x] \quad (9)$$

$$E(L) = N/n \quad (10)$$

که در این روابط، $E(L)$ میانگین فاصله زمانی خشکسالی، $FX(X)$ تابع توزیع تجمعی شدت خشکسالی، N طول زمان یک واقعه و n تعداد وقایع می‌باشند.

ارزیابی خطر خشکسالی

به منظور بررسی تأثیر افزایش دمای ناشی از تغییر اقلیم، خطر خشکسالی‌های آینده در پژوهش حاضر تخمین زده شد. یکی از روش‌های ارزیابی خطر خشکسالی بر پایه دوره بازگشت است (۴۱). به طوریکه با محاسبه احتمال شدیدترین خشکسالی با دوره بازگشت T سال (رابطه ۹)، خطر خشکسالی برای یک دوره متوالی n سال با بهره‌گیری از رابطه (۱۱) محاسبه شد. به بیان دیگر خطر خشکسالی در منطقه مطالعاتی با در نظر گرفتن فراوانی خشکسالی‌ها تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 ارزیابی گردید.

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \quad (11)$$

که در آن، T دوره بازگشت خشکسالی و n طول دوره است.

$$\alpha^i = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET} \quad (6)$$

$$RDI_n^i = \frac{\alpha^i}{\bar{\alpha}} - 1 \quad (7)$$

$$RDI_{st}^i = \frac{y^i - \bar{y}}{\sigma_y} \quad y^i = \ln(\alpha^i) \quad (8)$$

در رابطه‌های مذکور P_{ij} بارندگی ماه Z ام از سال i ام، PET_{ij} تبخیرتقرق پتانسیل ماه Z ام از سال i ام، α مقدار اولیه شاخص RDI ، $\bar{\alpha}$ میانگین حسابی α ، \bar{y} میانگین حسابی y^i ، σ_y انحراف معیار y^i ، i سال و Z ماه می‌باشند.

پس از محاسبه شاخص شناسایی خشکسالی، مشخصه‌های شدت، مدت و فراوانی خشکسالی با استفاده از تئوری ران^۱ (۴۰) استخراج شدند و سطح آستانه شروع خشکسالی $SPEI/RDI < 0$ در نظر گرفته شد. بر پایه تئوری ران، شدت خشکسالی برابر با مجموع مقادیر $RDI/SPEI$ است که زیر سطح آستانه قرار می‌گیرد. مدت زمانی که مقدار $RDI/SPEI$ به طور پیوسته زیر سطح آستانه قرار گرفته به عنوان مدت خشکسالی و تعداد وقایعی که مقدار شاخص زیر سطح آستانه قرار گرفته به عنوان فراوانی خشکسالی در نظر گرفته می‌شود (۲۱).

منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی SDF

برای بررسی تغییرات خشکسالی در دوره‌های گذشته و آینده، منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی SDF^2 برای مقادیر $SPEI3$ ، $SPEI6$ و $SPEI12$ ماهه تهیه شدند. منحنی شدت-مدت-فراوانی، شدت و مدت خشکسالی را با توجه به فراوانی‌های آن توصیف می‌کند. برای تهیه منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی، شدت خشکسالی برای تداوم‌های ۱ تا ۳ ماه، ۴ تا ۷ ماه، ۸ تا ۱۰، ۱۱ تا ۱۴ ماه و بر پایه فراوانی‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال

¹ Run

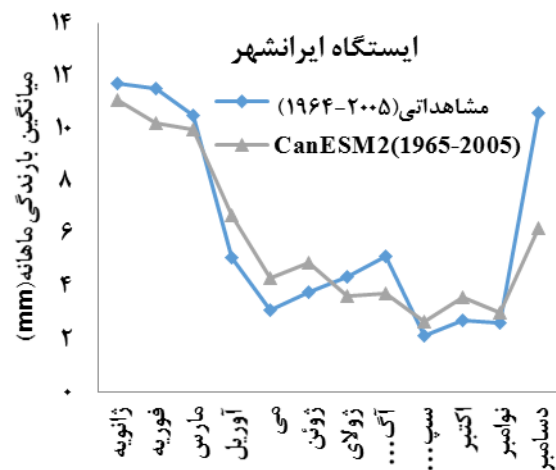
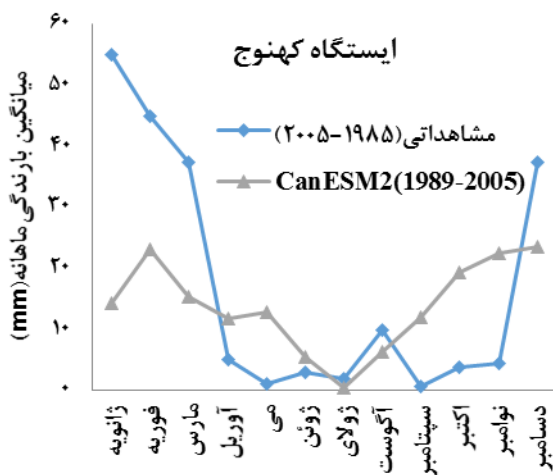
² Severity Duration Frequency

نتایج و بحث

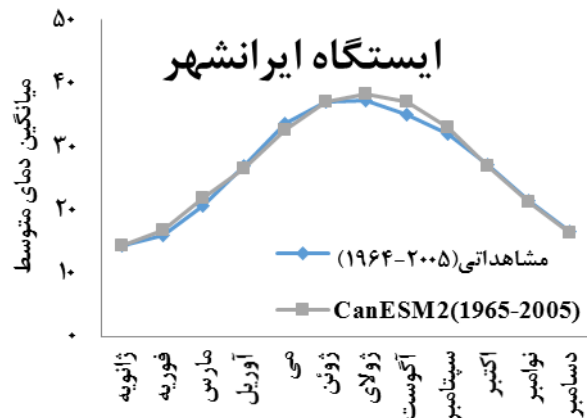
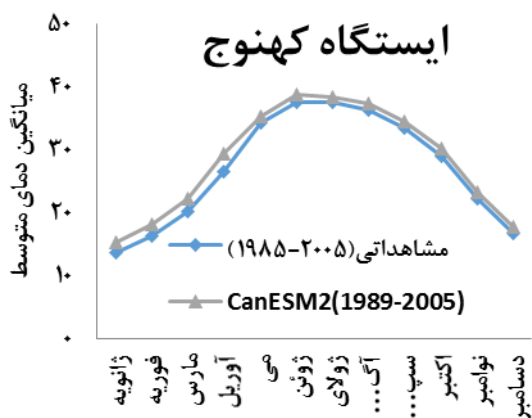
ارزیابی مدل CanESM2

پس از کنترل کیفیت داده‌های مشاهداتی، متغیرهای پیش‌بینی کننده‌ای که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی بارندگی و دمای متوسط در ایستگاه‌های کهنوج و ایرانشهر داشتند، برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل CanESM2 انتخاب شدند. فهرست متغیرها در جدول ۱ ارائه شده‌اند. نتایج حاصل از ارزیابی کارایی مدل بر پایه ضریب‌های تبیین، ناش-ساتکلیف و مجذور میانگین مربعات خطا نیز در جدول ۲ آورده شده‌اند. نتایج نشان داد کارایی مدل CanESM2 در ایستگاه کهنوج برای پارامتر بارندگی قابل قبول نبود (جدول ۲). بر پایه

مقادیر ریزمقیاس‌شده مدل CanESM2، بارندگی در ایستگاه کهنوج در ماه‌های دسامبر تا مارس کمتر از بارندگی مشاهداتی بود در حالی که در ماه‌های آوریل تا سپتامبر همبستگی بیشتری با مقادیر مشاهداتی داشت (شکل ۲). همچنین بر پایه معیارهای ارزیابی مدل CanESM2 در ایستگاه ایرانشهر، بارندگی ریزمقیاس‌شده در تمام ماه‌های سال انطباق خوبی با داده‌های مشاهداتی نشان داد (جدول ۲). نتایج ارزیابی کارایی مدل CanESM2 برای متغیر دمای میانگین نشان داد برخلاف بارندگی، داده‌های ریزمقیاس‌شده دما تطابق خوبی با داده‌های مشاهداتی در تمامی ایستگاه‌ها داشتند (شکل ۳، جدول ۲).



شکل ۲. مقایسه مقادیر ریزمقیاس‌شده و مشاهداتی بارندگی در ایستگاه‌های مطالعاتی



شکل ۳. مقایسه مقادیر ریزمقیاس‌شده و مشاهداتی دمای متوسط در ایستگاه‌های مطالعاتی

مدل می‌شود (۲۲). بر پایه نتایج حاصل، مدل CanESM2 در ایستگاه ایرانشهر از کارایی قابل قبولی برخوردار بود و به همین دلیل برای ارزیابی وضعیت خشکسالی آینده در منطقه مطالعاتی در نظر گرفته شد. کارایی مدل CanESM2 برای پیش‌بینی تغییرات آینده متغیرهای اقلیمی بارندگی، دما، سرعت باد توسط دیگر محققان نیز تأیید شده است (۲۰، ۲۱).

بر پایه داده‌های ریزمقیاس‌شده‌ی مدل CanESM2 مشخص شد که کارایی این مدل در شبیه‌سازی بارندگی کمتر از دما بوده است. یکی از علل احتمالی آن ارتباط ضعیف بین تغییرات بارندگی و گازهای گلخانه‌ای است (۸). همچنین وجود تعداد زیاد داده‌های صفر در سری‌های زمانی بارندگی منجر به عدم تبعیت داده‌ها از تابع توزیع نرمال می‌شود و این موجب افزایش عدم قطعیت

جدول ۱. متغیرهای دارای بیشترین همبستگی با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های ایرانشهر و کهنوج

ایستگاه	داده مشاهداتی	متغیر NCEP
ایرانشهر	بارندگی	cepp500gl ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰ هکتوپاسکال
		cepprcpgl بارندگی تجمعی
		ceps850gl رطوبت ویژه سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال
		cepslumgl رطوبت ویژه سطحی
کهنوج	دمای میانگین	cepptempgl دمای سطح در ارتفاع ۲ متری
		cepp500gl فشار متوسط سطح دریا
	بارندگی	cepprcpgl سرعت باد سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
		ceps850gl سرعت ناحیه ای سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
	دمای میانگین	cepp500gl ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال
		cepptempgl سرعت باد سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال

جدول ۲. نتایج ارزیابی کارایی مدل CanESM2 برای متغیرهای بارندگی و دمای میانگین ماهانه در ایستگاه‌های مورد بررسی

ایستگاه	پارامتر	پیش‌بینی کننده	NSE	RMSE	R ²
کهنوج	بارندگی	CanESM2	۰/۳	۵/۱۷	۰/۲۱
	دما	CanESM2	۰/۹۷	۱/۲۱	۰/۹۸
ایرانشهر	بارندگی	CanESM2	۰/۶۲	۱/۴	۰/۸
	دما	CanESM2	۰/۹۸	۰/۴۱	۰/۹۹

برای برخی دیگر از مناطق خشک جهان نیز گزارش شده است (۸، ۲۸).

تحلیل دوره‌های خشکسالی توسط شاخص‌های SPEI و RDI

در پژوهش حاضر مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه برای ارزیابی وضعیت خشکسالی بر طبق شاخص‌های SPEI و RDI استفاده شدند که به ترتیب بیانگر خشکسالی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت هستند (۲۴، ۳۷). سری‌های زمانی SPEI و RDI به ترتیب توسط نرم‌افزار متلب و درینک^۱ برای دوره ۱۹۶۴ تا ۲۱۰۰ محاسبه شدند. در این مطالعه تابع لجستیک لگاریتمی برای محاسبه SPEI (۴۱) و تابع گاما (۴) برای محاسبه RDI مورد استفاده قرار گرفت. بر پایه میانگین سالانه SPEI12، SPEI6، SPEI3 در دوره گذشته، شدیدترین خشکسالی‌ها در ایستگاه ایران شهر به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۶، ۱۹۶۸ و ۱۹۷۱، ۱۹۶۹ و ۱۹۷۱ با مقدار ۱/۰۵، ۱/۰۳، ۱/۶۴، ۱/۶۲، ۲/۲۱ و ۱/۸۱- به وقوع پیوسته است. همچنین بر پایه میانگین RDIst استاندارده شده شدیدترین خشکسالی‌ها برای هر سه مقیاس زمانی در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ با مقادیر ۰/۹-، ۰/۷۵، ۰/۹۲، ۰/۷۷، ۰/۹۱- و ۰/۸۳- اتفاق افتاده است.

نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات بارندگی و دمای میانگین بر پایه آزمون من- کندال جدول ۳، عدم وجود روند معنی‌دار پارامتر بارندگی را در ایستگاه ایران شهر نشان داد. مقایسه مقدار تغییرات بارندگی در آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۰) نسبت به دوره گذشته (۲۰۱۸-۱۹۶۴) تحت سناریوهای RCP نشان داد که مقدار بارندگی در منطقه مؤرد بررسی در آینده کاهش خواهد یافت که مقدار کاهش تحت سناریو RCP4.5 نسبت به RCP2.6 و RCP8.5 بیشتر برآورد شد. دما در دوره مشاهداتی دارای روند کاهشی معنی‌دار در منطقه مطالعاتی بود در حالی که در آینده تحت سناریوهای RCP دارای روند افزایشی معنی‌دار خواهد بود.

بر پایه میانگین سالانه دما طی دوره آماری ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ بیشترین و کمترین مقدار تغییرات دما نسبت به دوره گذشته به ترتیب تحت سناریوهای RCP8.5 و RCP2.6 رخ خواهد داد. کاهش بارندگی و افزایش دمای آینده در برخی از مناطق ایران از جمله برای استان قزوین نیز گزارش شده است (۲، ۲۱) که می‌تواند مؤید نتایج پژوهش حاضر باشد. با توجه به اینکه پیش‌بینی شد تالاب جازموریان در آینده با کاهش بارندگی و افزایش دما نسبت به دوره گذشته مواجه خواهد شد، انتظار می‌رود خشکسالی‌های شدیدتری نسبت به دوره گذشته در این منطقه از کشور اتفاق بیافتد. چنین پیش‌بینی‌هایی

جدول ۳. مقادیر آماره آزمون روند من- کندال در دوره گذشته و آینده تحت سناریوهای RCP

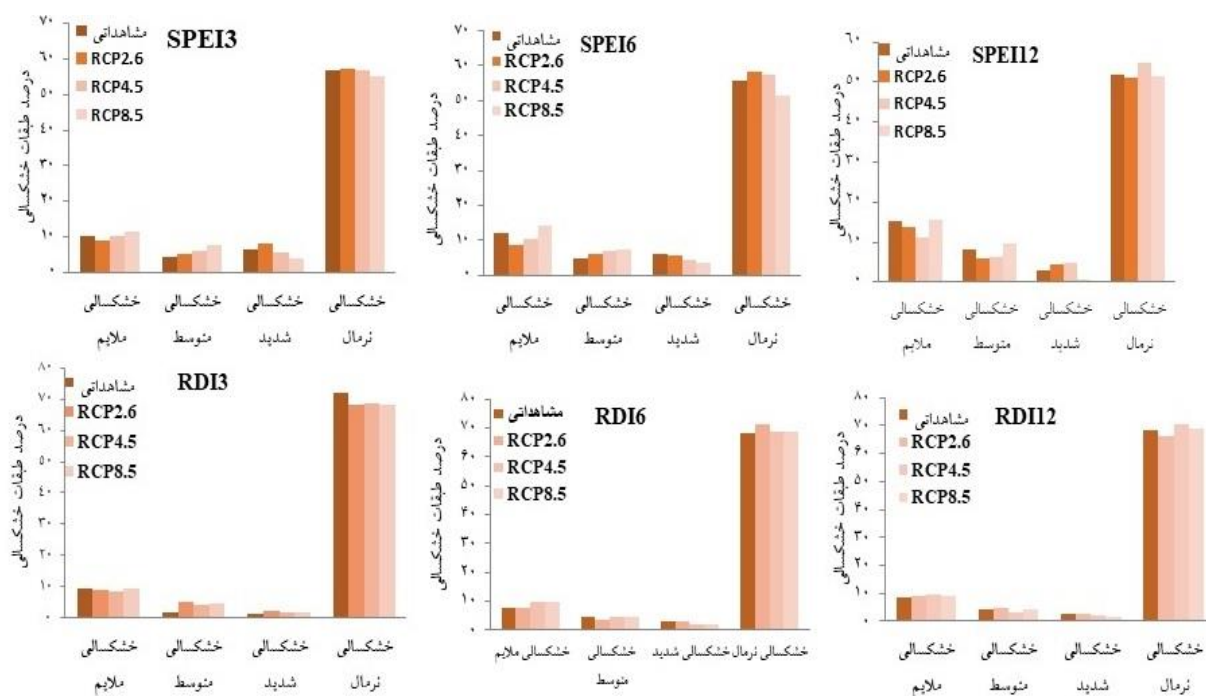
ایستگاه	متغیر	Z	P-value	درصد تغییرات
بارندگی	مشاهداتی	۰/۹۸	۰/۱۸	-
	RCP2.6	-۰/۳۳	۰/۳۷	-۳۲/۴
	RCP4.5	۰/۷۶	۰/۲۲	-۳۲/۹
	RCP8.5	-۱/۰۳	۰/۱۵	-۲۵
دما	مشاهداتی	-۱/۸۸	۰/۰۲	-
	RCP2.6	۱/۵۲	۰/۰۶	۶/۳۱
	RCP4.5	۸/۱	۰/۰۰۰	۸/۳۱
	RCP8.5	۸/۵۴	۰/۰۰۰	۱۱/۵۱

^۱ DrinC

و خشکسالی شدید در هر دو دوره مطالعاتی بودند (شکل ۴). همچنین تعداد دوره‌های خشک (خشکسالی ملایم، خشکسالی متوسط، خشکسالی شدید) بر پایه این طبقه‌بندی نسبت به دوره مرطوب در حال و آینده بیشتر بود. نتایج طبقه‌بندی دوره‌های خشکسالی بر پایه RDI3، RDI12، RDI6 نیز نشان‌داد بیشترین درصد خشکسالی‌ها به ترتیب دارای شرایط نرمال، میانه، میانگین و شدید بودند. برخلاف SPEI، فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب تقریباً برابر بود و خشکسالی‌های با درجه‌های شدید بر پایه RDI درصد کمتری داشتند. افزایش فراوانی طبقات خشکسالی در آینده برای استان‌های بیابانی ایران که دارای اقلیمی مشابه با منطقه مطالعاتی بوده توسط دیگر محققان نیز گزارش شده است (۳).

بر پایه مقادیر خشکسالی‌های بدست آمده از SPEI و RDI، اختلاف قابل توجهی بین مقادیر این دو شاخص وجود داشت. بنابراین به منظور تعیین شاخص مناسب‌تر برای ارزیابی مشخصه‌های خشکسالی در شرایط افزایش دما در آینده رابطه شاخص‌های خشکسالی با تبخیر تعلق بررسی شد.

سری‌های زمانی SEPI سالانه در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۰) نشان‌داد شدیدترین خشکسالی برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه تحت سناریو RCP2.6 به ترتیب ۱/۵۶-، ۲/۱۴- و ۲/۶۳-، تحت سناریو RCP4.5 به ترتیب ۱/۶۵-، ۲/۱۱-، ۲/۲-، تحت سناریو RCP8.5 به ترتیب ۱/۲۸-، ۱/۷۷-، ۱/۹۲- خواهند بود. بر طبق مقدار میانگین سالانه سری‌های RDI برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه شدیدترین خشکسالی‌ها تحت سناریو RCP2.6 به ترتیب ۰/۷۵-، ۰/۷۹- و ۰/۶۷-، تحت سناریو RCP4.5 به ترتیب ۰/۶۸-، ۰/۶۴- و ۰/۶۲-، سناریو RCP8.5 به ترتیب ۰/۷۹-، ۰/۸۱- و ۰/۷۶- خواهد بود. همانند دوره گذشته، RDI_{st} خشکسالی را در آینده با مقدار کمتری نسبت به SPEI برای هر سه سناریو پیش‌بینی کرد. بر پایه نتایج سری‌های زمانی خشکسالی، SPEI خشکسالی‌های بزرگ‌تر و با فراوانی بالاتر را نسبت به RDI_{st} در هر سه مقیاس زمانی نشان داد. تخمین خشکسالی‌های بزرگ‌تر توسط شاخص SPEI نیز در مطالعات پیشین گزارش شده است (۲۷، ۳۳). نتایج طبقه‌بندی خشکسالی‌ها تحت سناریوهای RCP نشان‌داد بیشترین فراوانی بر پایه SPEI3، SPEI6، SPEI12 به ترتیب دارای وضعیت نرمال، خشکسالی میانه



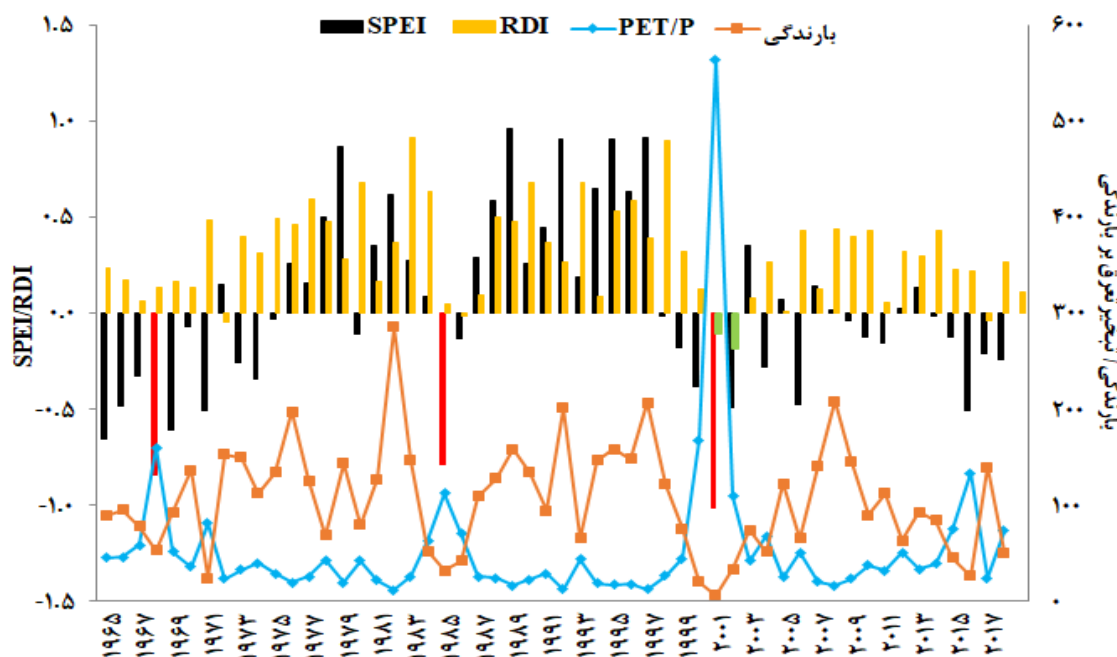
شکل ۴. درصد طبقات خشکسالی بر پایه شاخص‌های SPEI و RDI برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه

(۴۱). بنابراین چنین می‌توان استنباط کرد که شاخص SPEI تأثیر تغییرات دما را بر خشکسالی در زمان افزایش دما به خوبی نشان داده‌است. درحالی‌که بر پایه شاخص RDI رابطه معنی‌داری بین خشکسالی‌ها و تبخیر تعرق وجود نداشت. بنابراین در پژوهش حاضر از شاخص SPEI برای ارزیابی خشکسالی‌های آینده استفاده شد.

استخراج مشخصه‌های خشکسالی توسط شاخص SPEI

یافته‌های حاصل از بررسی شدت و مدت خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه نشان داد که مشخصه‌های شدت و مدت خشکسالی تحت سناریوهای RCP در دوره آینده نسبت به دوره گذشته افزایش خواهند یافت (شکل ۶). بر پایه SPEI3 میانگین شدت خشکسالی‌ها در آینده نسبت به دوره گذشته تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 افزایش و تحت سناریو RCP2.6 کاهش خواهند یافت. میانگین مدت خشکسالی تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP2.6 نسبت به دوره گذشته کاهش و در سناریو RCP8.5 افزایش خواهد یافت. میانگین شدت و مدت خشکسالی بر پایه SPEI6 و SPEI12 در آینده در هر سه سناریو RCP نسبت به دوره گذشته دارای روند افزایشی خواهد بود (جدول ۴).

در این راستا نسبت بین تبخیر تعرق پتانسیل به بارندگی PET/P با مقادیر بارندگی و هریک از شاخص‌های RDI و SPEI سالانه مقایسه شد. خطوط قرمز و سبز در شکل (۵) خشکسالی‌های شدید را به ترتیب بر پایه میانگین SPEI و RDI سالانه در دوره گذشته نشان می‌دهد و خط‌های آبی ممتد نسبت PET/P است. همان‌طور که مشخص است بر پایه SPEI خشکسالی‌های شدید، زمانی اتفاق افتاده است که نسبت تبخیر تعرق به بارندگی در بیشتری مقدار بوده‌است. به‌عنوان نمونه سال ۲۰۰۱ دارای بیشترین مقدار SPEI بود که متناظر با کمترین مقدار بارندگی در دوره آماری است (شکل ۵). کاهش مقدار بارندگی و افزایش دما در سال ۲۰۰۱ نیز توسط دیگر محققان در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور گزارش شده‌است (۶). لذا چنین انتظار می‌رود در سال ۲۰۰۱ با افزایش دمای متوسط، مقدار تبخیر تعرق بیشتر شود و نسبت PET/P به دلیل کمتر بودن مقدار بارندگی نسبت به دیگر سال‌ها بیشتر باشد. به عبارت دیگر با افزایش دما و افزایش تبخیر تعرق نسبت به بارندگی احتمال وقوع خشکسالی بیشتر شده‌است. دیگر بررسی‌ها نیز نشان دادند زمان وقوع خشکسالی‌های شدید متناظر با افزایش تبخیر تعرق ناشی از افزایش دما است



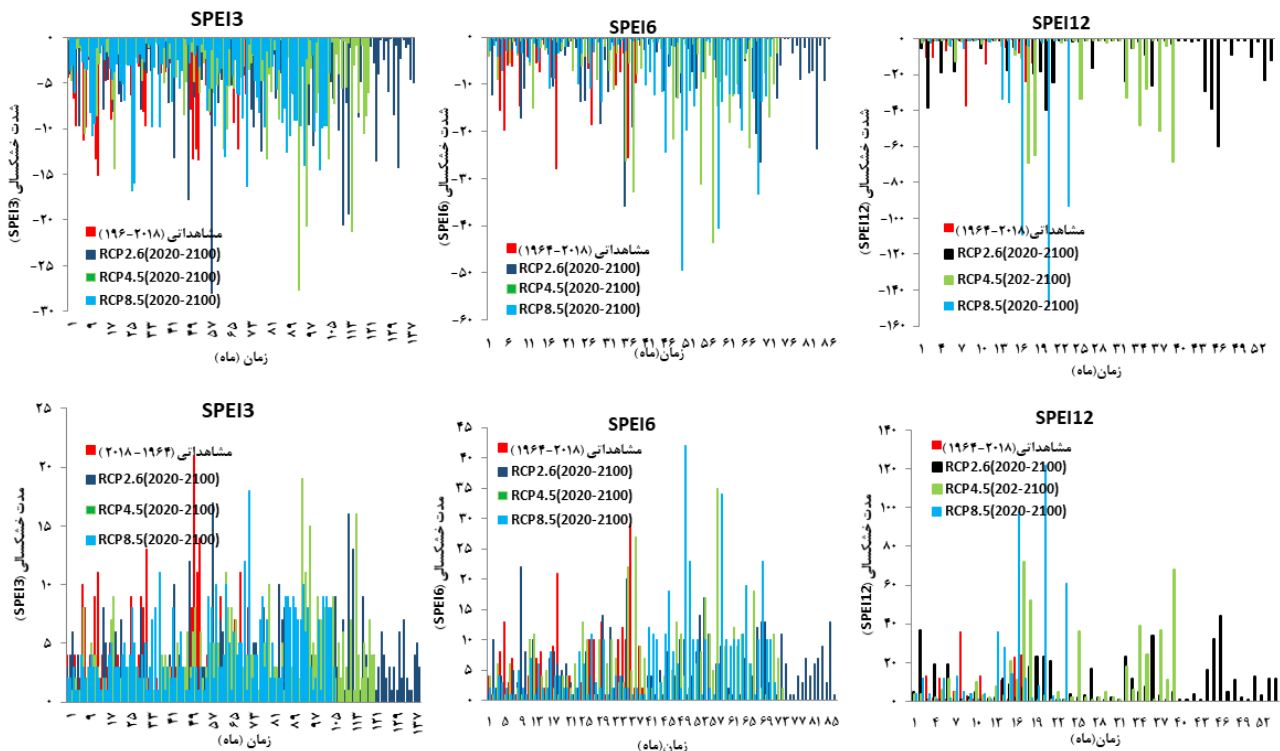
شکل ۵. رابطه تبخیر تعرق و خشکسالی بر پایه شاخص‌های SPEI و RDI در دوره گذشته

منطقه مطالعاتی نظیر استان یزد توسط سایر پژوهشگران نیز تأیید شده است (۲۱، ۳۱). در این بررسی‌ها کاهش یا افزایش دما و بارندگی به علت پدیده تغییر اقلیم به‌عنوان عامل اثرگذار بر مشخصه‌های خشکسالی در آینده بیان شده است.

تحلیل منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی

منحنی‌های شدت-مدت- فراوانی خشکسالی بر پایه دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ سال و با بهره‌گیری از توابع توزیع برازش یافته به مقادیر شدت خشکسالی در فواصل زمانی مختلف که شامل ۳-۱ ماه، ۷-۴ ماه، ۱۰-۸ ماه، ۱۴-۱۱ ماه و بیشتر از ۱۴ ماه است، برای SPEI3، SPEI6، SPEI12 در دوره‌های گذشته و آینده تهیه شدند (شکل ۷). بر پایه این نتایج مشخص شد با افزایش مدت خشکسالی، شدت خشکسالی به‌طور معنی‌داری در دوره بازگشت‌های مختلف افزایش می‌یابد. به بیان دیگر شدت خشکسالی‌ها در گذشته و آینده با افزایش تداوم و فراوانی خشکسالی افزایش می‌یابد.

بنابراین بر پایه مقادیر میانگین SPEI در ایستگاه اراشهر، خشکسالی‌ها در آینده در شرایط افزایش دما روند افزایشی خواهند داشت. به بیان دیگر خشکسالی‌های میان‌مدت و بلندمدت که در زمان طولانی‌تری نسبت به کوتاه‌مدت نمایان شدند، در آینده شدت بیشتری خواهند داشت. به‌طور کلی نتایج نشان داد افزایش خشکسالی‌ها در آینده تحت سناریو RCP8.5 بیشتر از دو سناریو دیگر بود. بر پایه ضریب همبستگی بین شدت و مدت خشکسالی، وجود همبستگی مثبت میان مشخصه‌های شدت و مدت خشکسالی نیز به اثبات رسید. این بدان معناست که با افزایش شدت خشکسالی، تداوم و ماندگاری آن نیز افزایش یافته و تأثیرات جدی‌تر را بر منطقه خواهد گذاشت. با این وجود رابطه مستقیم کاملاً خطی بین شدت و مدت وجود نداشت. نتایج پژوهش حاضر همچنین نشان داد که شدیدترین واقعه خشکسالی دارای بیشترین مدت نبوده است. مقیاس زمانی نیز در مشخصه‌های خشکسالی اثرگذار است به‌طوری‌که با افزایش مقیاس زمانی، شدت و مدت خشکسالی تحت فراوانی آن کاهش می‌یابد. تشدید خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم در آینده برای مناطقی با اقلیم مشابه



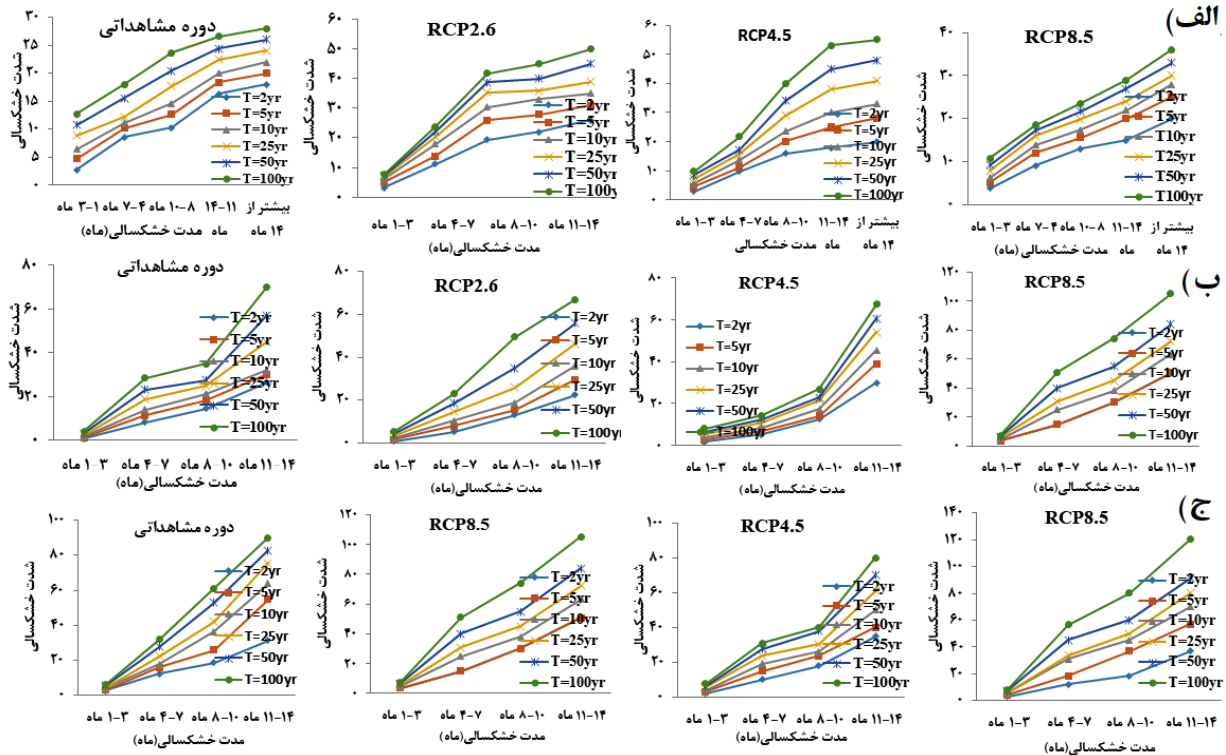
شکل ۶. مقادیر شدت و مدت مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بر پایه SPEI3، SPEI6، SPEI12 تحت سناریوهای RCP

جدول ۴. مقادیر میانگین و بیشینه شدت و مدت خشکسالی‌ها در دوره گذشته و آینده با سناریوهای RCP

ضریب همبستگی	حداکثر		میانگین		سری زمانی	
	مدت	شدت	مدت	شدت		
۰/۸۶	۲۱	-۱۵/۱۲	۴/۴۱	-۴/۳۱	مشاهداتی	SPEI3
۰/۸۷	۱۷	-۲۸/۱	۳/۵۳	-۳/۸۳	RCP2.6	
۰/۹	۱۹	-۲۷/۷	۳/۹۳	-۴/۱۱	RCP4.5	
۰/۸۱	۱۸	-۳۶/۷	۴/۴۴	-۴/۸۳	RCP8.5	
۰/۹۱	۲۹	-۲۷/۷	۵/۸۳	-۵/۸	مشاهداتی	SPEI6
۰/۸۷	۲۲	-۳۵/۷	۶	-۶/۱۱	RCP2.6	
۰/۹۳	۳۵	-۴۳/۵	۶/۹	-۷/۱۲	RCP4.5	
۰/۹۷	۴۲	-۴۹/۳۸	۷/۲۰	-۷/۶۷	RCP8.5	
۰/۹۲	۳۶	-۳۷/۱۶	۹/۱	-۷/۳۷	مشاهداتی	SPEI12
۰/۹۵	۴۴	-۶۰/۰۸	۹/۷۶	-۹/۹۵	RCP2.6	
۰/۹۷	۷۲	۶۹	۱۳/۹	-۱۳/۲	RCP4.5	
۰/۹۸	۱۲۲	-۱۴۹/۲	۲۳/۷۷	-۲۵/۰۷	RCP8.5	

نسبت به دوره گذشته خواهد داشت. بالاتر بودن شدت خشکسالی‌ها تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به RCP4.5 توسط سایر پژوهشگران نیز به اثبات رسیده است (۱۶) که با نتایج ارائه شده در پژوهش حاضر همخوانی داشت.

افزایش شدت و مدت خشکسالی در نتیجه افزایش فراوانی در مقیاس ۱۲ ماهه تحت سناریو RCP8.5 نسبت به دیگر مقیاس‌ها و سناریوها بیشتر بود. همچنین تحت سناریو RCP8.5 شدت و مدت خشکسالی در آینده برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه افزایش بیشتری



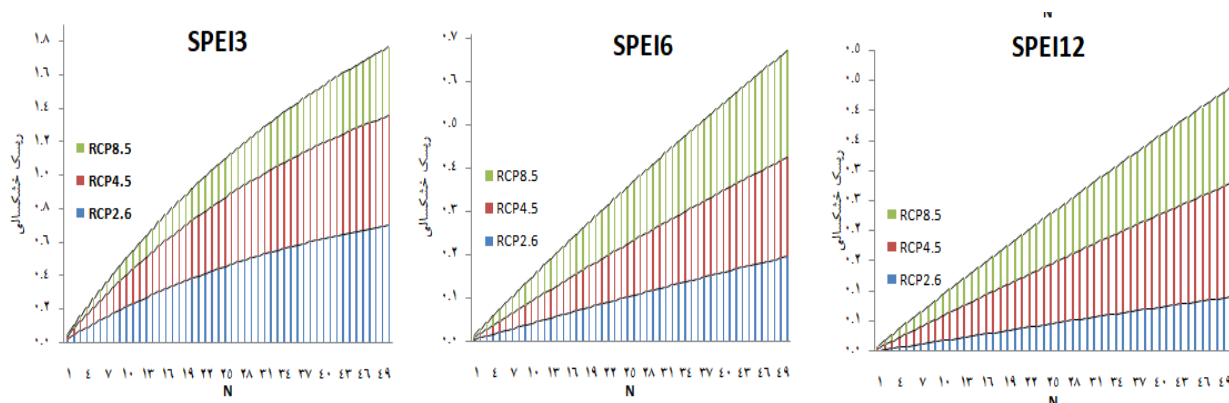
شکل ۷. منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی در دوره مشاهداتی (۱۹۶۴-۲۰۱۸) و آینده (۲۰۲۰-۲۱۰۰) (الف: SPEI3، ب: SPEI6، ج: SPEI12)

تالاب‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. وقوع پدیده خشکسالی در سال‌های اخیر سبب شده خطر ناشی از آن بر بوم نظام تالاب‌های مناطق خشک افزایش یابد. لذا ارزیابی خطر خشکسالی در آینده تحت شرایط تغییر اقلیم می‌تواند در ارائه راهکارهای مؤثر در برای کاهش اثرات مخرب آن کمک کند. بدین منظور در پژوهش حاضر، خطر خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم آینده با استفاده از مدل اقلیمی CanESM2 تحت سناریوهای مختلف RCP انجام شد. نتایج نشان داد که مقدار بارندگی در این منطقه به مقدار ۲۵ تا ۳۳ درصد کاهش و مقدار میانگین دما به مقدار ۶ تا ۱۱ درصد نسبت به گذشته افزایش خواهد یافت. بنابراین بر پایه نتایج حاصل از پیش‌بینی بارندگی و دمای میانگین در محدوده مطالعاتی چنین می‌توان استنباط کرد که احتمال کاهش دسترسی به منابع آبی در محدوده تالاب جازموریان به دلیل کاهش بارندگی و افزایش تبخیر/تعرق ناشی از افزایش دما، بیشتر خواهد شد. ارزیابی و مقایسه مقادیر نسبت تبخیر/تعرق به بارندگی و شاخص‌های SPEI و RDI در دوره آماری موردبررسی نشان داد SPEI نسبت به RDI بهتر می‌تواند دوره‌های خشکسالی را برآورد کند. به بیان دیگر SPEI نسبت به RDI بهتر می‌تواند اثر افزایش دما را بر تبخیر/تعرق و کاهش بیلان رطوبتی خاک نشان دهد. به‌طوریکه بر پایه سری‌های زمانی به‌دست‌آمده دو شاخص، SPEI خشکسالی‌های بزرگ‌تر با فراوانی بیشتری را نسبت به RDI نشان داد.

ارزیابی خطر خشکسالی تحت سناریوهای تغییر اقلیم
 برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خطر خشکسالی، احتمال وقوع خشکسالی با استفاده از رابطه ۹ برای شدیدترین مقدار شدت، محاسبه شد و خطر خشکسالی طی دوره ۵۰ ساله در آینده با سناریوهای RCP توسط رابطه ۱۱ به‌دست آمد. مقدارهای حاصل از بررسی خطر خشکسالی بر پایه بزرگ‌ترین واقعه خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه تحت سناریوهای RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 در شکل ۸ نشان داده شده است. نتایج نشان داد خطر خشکسالی در سه مقیاس زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، تحت سناریوهای RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 روند کاهشی در آینده خواهد داشت. بر پایه نتایج حاصل از خطر خشکسالی می‌توان این‌گونه بیان کرد که با افزایش مقدار شدت، خشکسالی‌ها با دوره بازگشت بزرگ‌تری به وقوع پیوسته‌اند و در نتیجه خطر ناشی از این واقعه در آینده کمتر خواهد بود. به عبارت دیگر مقدار خطر خشکسالی در آینده تحت سناریو RCP85 نسبت به RCP26 کمتر خواهد بود. برای مثال بر پایه SPEI3 خشکسالی با شدت ۲۸/۱ و ۳۶/۷ تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب دارای دوره بازگشت ۴۱ و ۹۵ سال بوده که خطر ناشی از آن‌ها به ترتیب ۰/۷ و ۰/۳۲ برآورد شد.

نتیجه‌گیری

ارزیابی و پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های مختلف خشکسالی در بوم‌نظام‌های مختلف و به‌ویژه



شکل ۸. خطر خشکسالی بر پایه سری‌های SPEI3، SPEI6، SPEI12 تحت سناریوهای RCP

کشور شود. لذا اجرا بردهای مدیریتی و اجرایی مناسب برای مدیریت بهینه منابع آب و خاک در این منطقه و مناطق اقلیمی مشابه، می‌تواند گامی مؤثر برای کاهش تأثیر نامطلوب ناشی از خشکیدگی بستر تالاب‌ها و افزایش پایداری این بوم‌نظام‌ها مهم باشد. لازم به ذکر است علاوه بر تأثیر تغییر متغیرهای اقلیمی بر نوسان سطح آب تالاب‌ها، فعالیت‌های انسانی همچون برداشت‌های بی‌رویه از منابع آبی سطحی و زیرزمینی و تغییر کاربری اراضی نیز می‌توانند تأثیر زیادی بر کاهش سطح آب و خشکیدگی تالاب‌ها داشته باشند. لذا پیشنهاد می‌گردد علاوه بر بررسی تأثیر تغییر متغیرهای اقلیمی، تأثیر این عوامل نیز بررسی شود تا به‌توان اقدام‌های مدیریتی مناسبی را در این راستا ارائه کرد.

■ سپاسگزاری

پژوهش حاضر مستخرج از طرح پژوهشی به شماره ۹۸-۹۸-۴۸۱۲ است که با حمایت مالی دانشگاه جیرفت انجام شده است. بدین وسیله نویسندگان از معاونت آموزشی و پژوهشی این دانشگاه کمال تشکر و قدردانی را دارند.

■ References

1. Aghakhani Afshar, A., Hassanzadeh, Y., Besalatpour, A., & Pourreza-Bilondi, M. 2016. Annual assessment of Kashafrud watershed basin climate components in future periods using fifth report of intergovernmental panel on climate change. *Water and Soil conversation*, 2 (6), 217- 233 (in Farsi).
2. Ahmed, K., Shahid, S., Sachindra, D., Nawaz, N., & Chung, E.S. (2019). Fidelity assessment of general circulation model simulated precipitation and temperature over Pakistan using a feature selection method. *Hydrology*, 573, 281-298 .
3. Akbari, M., Najafi Alamdarlo, H., & Mosavi, S.H. 2019. Impact of climate change and drought on income risk and rop pattern in Qazvin plain irrigation network. *Water Research in Agriculture (Soil and Water Science)*, 33(2), 265- 281.
4. Asadi Zarch, M. A., Malekinezhad, H., Mobin, M. H., Dastorani, M. T., & Kousari, M .R. (2011). Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. *Water resources management*, 25(13), 3485 .
5. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. New York.
6. Ebrahimi Khusfi, Z., Roustaei, F., Ebrahimi Khusfi, M., & Naghavi, S. (2019). Investigation of the relationship between dust storm index, climatic parameters, and normalized difference vegetation index using the ridge regression method in arid regions of Central Iran. *Arid land research and management*, 1-25.

خشکسالی‌ها میانگین کوتاه‌مدت SPEI3 و میان‌مدت SPEI6 و خشکسالی‌های شدید بلندمدت SPEI12 در آینده در سناریوهای RCP نسبت به دوره تاریخی افزایش می‌یابند. این در حالی است که RDI خشکسالی‌ها با شدت کمتری را نسبت به SEPI تخمین می‌زند. درحالی‌که انتظار می‌رود با افزایش معنی‌دار دما در آینده و کاهش بارندگی تحت سناریوهای RCP خشکسالی‌های با شدت بیشتری در منطقه اتفاق بیفتد. نتایج تحلیل خطر خشکسالی نشان‌داد با افزایش دوره بازگشت خشکسالی‌های شدید، خطر کاهش می‌یابد. به‌طوریکه خشکسالی‌های کوتاه‌مدت تحت سناریو RCP2.6 دارای بیشترین خطر و خشکسالی‌های بلندمدت در سناریو RCP8.5 دارای کمترین خطر می‌باشند.

به‌طور کلی بر پایه نتایج حاصل از پژوهش حاضر چنین استنباط گردید که تالاب جازموریان خشکسالی‌های شدیدتری را در آینده تجربه خواهد کرد و این می‌تواند تهدید جدی برای این منطقه از کشور باشد. زیرا اگر حقایق این تالاب بین‌المللی ارزشمند تأمین نشود و یا راهکارهای مدیریتی مناسبی برای بهبود مدیریت منابع آب و افزایش بهره‌وری آن در نظر گرفته نشود، ممکن است منجر به تشدید انتشار ذرات گردوغبار و ایجاد بحران‌های محیط‌زیست جدیدی در جنوب شرق

7. Ebrahimi Khuusfi, Z., Khosroshahi, M., Roustaei, F., & Mirakbari, M. (2020). Spatial and seasonal variations of sand-dust events and their relation to atmospheric conditions and vegetation cover in semi-arid regions of central Iran. *Geoderma*, 365, 114225.
8. Fauchereau, N., Trzaska, S., Rouault, M., & Richard, Y. (2003). Rainfall variability and changes in southern Africa during the 20th century in the global warming context. *Natural hazards*, 29(2), 139-154.
9. Ghiami-Shamami, F., Sabziparvar, A. A., & Shinoda, S. (2019). Long-term comparison of the climate extremes variability in different climate types located in coastal and inland regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(3-4), 875-897.
10. Gonzólez, J., & Valdñs, J. B. (2003). Bivariate drought recurrence analysis using tree ring reconstructions. *Hydrologic Engineering*, 8(5), 247-258.
11. Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., & Aureli, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Hydrology*, 4(3-4), 532-560.
12. Guttman, N. B. (1998). Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. *Water Resources Association*, 34(1), 113-121.
13. Ho, C. K., Stephenson, D. B., Collins, M., Ferro, C. A., & Brown, S. J. (2012). Calibration strategies: a source of additional uncertainty in climate change projections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(1), 21-26.
14. Hosseinizadeh, A., SeyedKaboli, H., Zareie, H., Akhondali, A., & Farjad, B. (2015). Impact of climate change on the severity, duration, and frequency of drought in a semi-arid agricultural basin. *Geoenvironmental Disasters*, 2(1), 23.
15. Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). (2013). Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The physical science basis-summary for policymakers. Intergovernmental Panel of Climate Change, Stockholm.
16. Jang, D. (2018). Assessment of meteorological drought indices in Korea using RCP 8.5 scenario. *Water*, 10(3), 283.
17. Lee, S.H., Yoo, S.H., Choi, J.Y., & Bae, S. (2017). Assessment of the impact of climate change on drought characteristics in the Hwanghae Plain, North Korea using time series SPI and SPEI: 1981–2100. *Water*, 9(8), 579.
18. Liu, L., Yang, H., Jonathan, L., Rachel, R., Bin, Y., Zengxin, Zh., James, H., & Mark, Sh. (2013). Climatological Drought Analyses and Projection Using Spi and Pdsi: Case Study of the Arkansas Red River Basin. *Hydrologic Engineering*, 18(7), 809-16.
19. Lotfinasab Asal, S., Gohar Dost, A., Khosroshahi, M. (2018). Assessment and application of geostatistics in identifying and analyzing drought characteristics of Jazmourian watershed. *Watershed management research*, 1(18), 12-25 (in Farsi).
20. Mesbahzadeh, T., Mirakbari, M., Mohseni Saravi, M., Sardoo, F. S., & Miglietta, M. M. (2019). Meteorological drought analysis using copula theory and drought indicators under climate change scenarios (RCP). *Meteorological Applications*.
21. Mesbahzadeh, T., Mirakbari, M., Mohseni Saravi, M., Khosravi, H., & Mortezaie, Gh. (2019). Study of current and future meteorological drought conditions using the CMIP5 model under RCP scenarios. *Iran watershed management science and engineering*, 13(46), 11-21 (in Farsi).
22. Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., Mohseni Saravi, M., Khosravi, H., & Mortezaie, Gh. (2018). Performance evaluation of CMIP5 series model in projection and simulation of climatic variables of precipitation, temperature and wind speed, case study: Yazd province. *Natural geography research*, 50(3), 593-609 (in Farsi).
23. Mirgol, B., & Nazari, M. (2018). Possible Scenarios of Winter Wheat Yield Reduction of Dryland Qazvin Province, Iran, Based on Prediction of Temperature and Precipitation Till the End of the Century. *Climate*, 6(4), 78.

24. Mishra, A., Desai, V., & Singh, V. (2007). Drought forecasting using a hybrid stochastic and neural network model. *Hydrologic Engineering*, 12(6), 626-638 .
25. Mosaedi, A., Mohammadi Moghaddam, S., & Kavakebi, Gh. (2016). Drought characteristics based on Reconnaissance Drought Index and its variations in different time periods and regions of Iran. *Water and soil conservation*, 23(6), 27-52 (in Farsi).
26. Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., & Kram, T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747 .
27. Potop, V., & Mozny, M. (2011). The application a new drought index–standardized precipitation evapotranspiration index in the Czech Republic. *Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostredí*, 2, 2-14 (in Cesko).
28. Qutbudin, I., Shiru, M. S., Sharafati, A., Ahmed, K., Al-Ansari, N., Yaseen, Z. M., & Wang, X. (2019). Seasonal Drought Pattern Changes Due to Climate Variability: Case Study in Afghanistan. *Water*, 11(5), 1096 .
29. Rashki, A., Arjmand, M., & Kaskaoutis, D. (2017). Assessment of dust activity and dust-plume pathways over Jazmurian Basin, southeast Iran. *Aeolian Research*, 24, 145-160 .
30. Saadat, S., Khalili, D., Kamgar-Haghighi, A. A., & Zand-Parsa, S. (2013). Investigation of spatio-temporal patterns of seasonal streamflow droughts in a semi-arid region. *Natural Hazards*, 69(3), 1697-1720 .
31. Sayari, N., Bannayan, M., Alizadeh, A., & Farid, A. (2013). Using drought indices to assess climate change impacts on drought conditions in the northeast of Iran (case study: Kashafrood basin). *Meteorological Applications*, 20(1), 115-127 .
32. Sharma, S., & Mujumdar, P. (2017). Increasing frequency and spatial extent of concurrent meteorological droughts and heatwaves in India. *Scientific reports*, 7(1), 15582 .
33. Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *Climatology*, 35(13), 4027-4040 .
34. Thomas, K. A., & Redsteer, M. H. (2016). Vegetation of semi-stable rangeland dunes of the Navajo Nation, Southwestern USA. *Arid Land Research and Management*, 30(4), 400-411 .
35. Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94 .
36. Tsakiris ,G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), 3-11 .
37. Vicente-Serrano, S. M ., Beguena, S., & Lypez-Moreno, J. I. (2010). A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Climate*, 23(7), 1696-1718 .
38. Wilhite, D. A., Svoboda, M. D., & Hayes, M. J. (2007). Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water resources management*, 21(5), 763-774 .
39. Ye, L., Shi, K., Zhang, H., Xin, Z., Hu, J., & Zhang, C. (2019). Spatio-Temporal Analysis of Drought Indicated by SPEI over Northeastern China. *Water*, 11(5), 908 .
40. Yevjevich, V. M. (1967). Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts, *Hydrology papers (Colorado State University)*, 23.
41. Yoo, J., Kwon, H.H., Lee, J.H., & Kim, T.W. (2016). Influence of evapotranspiration on future drought risk using bivariate drought frequency curves. *Civil Engineering*, 20(5), 2059-2069 .
42. <http://climate-scenarios.canada.ca/page=pred-canesm2> (available at 2020)

Assessment the Impact of Climate Change on the Drought of Jazmourian Wetland Using CanESM2 Model

Z. Ebrahimi Khusfi^{1*}, M. Mirakbari²

1. Assistant Professor, Faculty of Natural Resources, Department of Natural Science, University of Jiroft, Jiroft, Iran.
 2. PhD, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran.
- * Corresponding Author: Zohreebrahimi2018@ujiroft.ac.ir

Received date: 08/01/2020

Accepted date: 08/03/2020

Abstract

Wetlands are one of the most important natural ecosystems in arid and semi-arid regions that their moisture content has decreased in recent years due to the adverse effects of climate changes and droughts. It is necessary to evaluate the impact of such events on different ecosystems, especially these valuable ecosystems. In this study, the future drought status of Jazmourian wetland under elevated temperature was evaluated using the output of the IPCC Fifth Report Model. For this purpose, the standardized precipitation-evapotranspiration index and reconnaissance drought index, which take into account the impact of rising temperatures due to future climate change on droughts, were used. The effect of increasing of temperature on drought risk was studied by using the return period of drought. Results showed that the standardized precipitation- evapotranspiration index was better able to show the effect of increasing of the evapotranspiration and temperature on drought than the reconnaissance drought index. Therefore, Standardized precipitation-evapotranspiration was used to evaluate the future droughts under RCP scenarios. Based on the drought time series, by increasing temperatures, the future long-term droughts might be more intense and longer period than the historical period. Analysis of drought showed that drought risk would decrease on 3, 6 and 12-monthly time scales, respectively. Under the RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, the risk of drought will increase at all study time scales. In general, these results can be useful for assessing climate change and managing of water resources in arid regions.

Keywords: Mann-Kendall; Climate model; Standardized Precipitation - Evapotranspiration Index; Reconnaissance Drought Index