مقاله پژوهشی

نشریه علمی تحقیقات جنگل و صنوبر ایران
جلد ۳۱ شماره ۲، صفحه ۱۲۵-۱۱۳، (۱۴۰۲)

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/ijfpr.2023.361731.2097
شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.17350883.1402.31.2.2.5

پیش‌نگری روند خشک‌سالی در ذخیره‌گاه جنگلی ارس کیگوران با استفاده از شاخص استانداردشده بارش و تبخیر- تعرق

سمیرا بیرانوند [۱]، پدرام عطارد [۲*]، ویلما بایرام‌زاده [۳]، کامبیز پورطهماسی [۴]، مهدی نادی [۵] و توماس گرنت پیپکر [۶]

۱- دانشجوی دکتری علوم زیستی جنگل، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲*- نویسنده مسئول، استاد، گروه جنگل‌داری و اقتصاد جنگل، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. پست الکترونیک: attarod@ut.ac.ir

۳- دانشیار، گروه چوب و کاغذ، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۴- استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۵- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

۶- استاد، گروه علوم منابع طبیعی، دانشگاه تامسون ریورز، کملوپس، کانادا

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۰

چکیده

خشک‌سالی، پیامدهای منفی بر پوشش گیاهی و تسریع روند کاهش آن دارد. در سطح جهانی، فراوانی و بزرگی خشک‌سالی به دلایل طبیعی و نیز انسانی در حال افزایش است. این پژوهش با هدف بررسی روند و شدت خشک‌سالی‌ها در گذشته و آینده با استفاده از شاخص استانداردشده بارش و تبخیر- تعرق (SPEI) در ذخیره‌گاه جنگلی ارس در کیگوران از توابع استان لرستان انجام شد. با استفاده از داده‌های روزانه بارش و دمای ایستگاه همدیدی الیگودرز طی دوره آماری ۳۳ ساله (۲۰۱۹-۱۹۸۷) شاخص SPEI محاسبه شد. سپس، فراوانی و شدت خشک‌سالی‌ها در مقیاس‌های زمانی سه، شش، نُه و ۱۲ ماهه برای دوره‌های پایه (۲۰۱۹-۱۹۸۷) و آینده (۲۰۶۰-۲۰۳۰) با استفاده از مدل NorESM2-LM و تحت سناریوهای SSP126، SSP370 و SSP585 محاسبه شد. نتایج نشان داد که در گذشته، طولانی‌ترین دوره‌های خشک‌سالی در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۱، ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ رخ داده است. همچنین، شدیدترین خشک‌سالی‌ها برای سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۱۳، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ ثبت شد. براساس یافته‌ها، تعداد دوره‌های خشک‌سالی در آینده (۲۰۶۰-۲۰۳۰) تحت سناریوهای SSP126 و SSP585 (شش، نُه و ۱۲ ماهه) کاهش و تحت سناریوی SSP370 (سه، نُه و ۱۲ ماهه) افزایش خواهند یافت. به‌رغم پیش‌بینی کاهش فراوانی خشک‌سالی‌ها براساس شاخص SPEI در آینده، شدت و مدت خشک‌سالی‌های بسیار شدید افزایش خواهند یافت، بنابراین رویشگاه مورد مطالعه، خشک‌سالی‌های شدیدتری را در آینده تجربه خواهد کرد که تأثیر قابل‌توجهی بر زادآوری درختان ارس خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: ارس، تغییر اقلیم، سناریو، کیگوران، SPEI.

مقدمه

خشک‌سالی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین بلایای طبیعی همواره بقای انسان‌ها و توسعه پایدار جوامع را تحت تأثیر جدی قرار داده است. این پدیده، یک محدودیت رطوبتی است که از بارندگی کمتر از حد متوسط، دمای زیاد و یا هر دو ناشی می‌شود و نشان‌دهنده انحراف از «آب‌وهوای

متوسط» یک منطقه است. خشک‌سالی‌های مکرر و شدیدتر، آب‌وهوای متوسط را تغییر می‌دهند (Hayes *et al.*, 2011). این پدیده اغلب ازطریق مسیرهای غیرمستقیم بر چرخه زیست‌زمین‌شیمیایی جنگل تأثیر می‌گذارد. بسیاری از درختان تحت تنش خشکی، مستعد حمله حشرات گیاه‌خوار و عوامل بیماری‌زای قارچی هستند که می‌تواند حرکت عناصر ضروری مانند نیتروژن (N) و فسفر (P) را از گیاهان به خاک تغییر دهد. علاوه‌براین، خشک‌سالی شدید با افزایش احتمال آتش‌سوزی سبب رهاسازی عناصر ضروری از مواد آلی زنده و مرده بوم‌سازگان‌ها به جوّ و رواناب‌ها می‌شود. به‌طورکلی، خشک‌سالی بلندمدت بر توزیع گونه‌ها، تنوع زیستی، حیات‌وحش، تولید اولیه خالص و تقریباً همه کالاها و خدمات ارائه‌شده توسط بوم‌سازگان جنگل تأثیر می‌گذارد (Clark *et al.*, 2016).

خشک‌سالی را می‌توان براساس تأثیر آن بر چرخه آب‌شناختی به چندین نوع طبقه‌بندی کرد که شامل خشک‌سالی هواشناسی (کمبود بارندگی نسبت به میانگین اقلیمی برای یک دوره و منطقه معین)، خشک‌سالی کشاورزی (کمبود رطوبت خاک سبب محدودیت آب برای محصولات کشاورزی می‌شود)، خشک‌سالی آب‌شناختی (کاهش جریان آب باعث پایین آمدن سطح آب در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها یا مخازن می‌شود) و درنهایت، خشک‌سالی اقتصادی- اجتماعی هستند (Bhunia *et al.*, 2020). با پیامدهای عملی انواع خشک‌سالی‌های فوق، عرضه و تقاضای برخی کالاها و خدمات اقتصادی و درنتیجه، کیفیت زندگی انسان، تحت تأثیر قرار می‌گیرد (Spinoni *et al.*, 2015).

امروزه، شاخص‌های خشک‌سالی به‌عنوان ابزاری مناسب برای پایش و تعیین شدت خطر خشک‌سالی شناخته شده‌اند. برای پایش خشک‌سالی هواشناسی، شاخص‌های مختلفی مانند شاخص بارش استانداردشده (SPI)، شاخص دهک‌ها (DPI)، شاخص منطقه خشک‌سالی (DAI)، درصد نرمال (PN)، شاخص شدت خشک‌سالی پالمر (PDSI)، شاخص چین (CZI)، شاخص خشک‌سالی مؤثر (EDI)، شاخص خشک‌سالی شناسایی (RDI) و شاخص جدیدی به‌نام شاخص استانداردشده بارش و تبخیر- تعرق (SPEI: Standardized precipitation evapotranspiration index) معرفی شده‌اند. این شاخص‌ها به‌طور معمول با استفاده از سری‌های زمانی بارش و یا دما محاسبه می‌شوند (Kim & Jehanzaib, 2020). در دهه‌های اخیر، SPI و SPEI به‌عنوان شاخص‌های اصلی برای تعیین فراوانی، شدت و مدت خشک‌سالی پیشنهاد شده‌اند (Nedealcov *et al.*, 2015). در سال ۲۰۰۹، سازمان هواشناسی جهانی، SPI را به‌عنوان شاخص اصلی خشک‌سالی هواشناسی توصیه کرد که کشورها باید از آن برای نظارت و پیگیری شرایط خشک‌سالی استفاده کنند (Hayes *et al.*, 2011). این شاخص فقط با استفاده از داده‌های بارش، شدت خشک‌سالی را برآورد می‌کند. علاوه‌بر سادگی در محاسبه، SPI در همه رژیم‌های آب‌وهوایی قابل‌استفاده است (Stagge *et al.*, 2017). SPEI، شاخص جدیدی‌تری بر پایه SPI است که با کاربرد بارندگی و نیز دما برای ارزیابی خشک‌سالی استفاده می‌شود. به‌کارگیری دما باتوجه‌به اهمیت الگوی فزاینده تبخیر به‌دلیل گرمایش جهانی، یکی از نقاط قوت این شاخص محسوب می‌شود (Mathbout *et al.*, 2018)، بنابراین برای پایش خشک‌سالی، SPEI نسبت به SPI اولویت دارد. این دو شاخص خشک‌سالی برای اندازه‌گیری بهره‌وری کشاورزی، احتمال وقوع آتش‌سوزی، شناسایی سطح آب و تجمع بارندگی، اهمیت زیادی دارند (NOAA, 2021).

قرارگیری ایران در یکی از خشک‌ترین مناطق جهان به‌همراه وضع ناهمواری‌ها و اقلیم به‌وضوح در به وجود آمدن خشک‌سالی و ویژگی‌های بیابانی آن تأثیر گذاشته است (Masoodian & Kaviani, 2008). متوسط بارندگی ایران ۲۵۲ میلی‌متر است و به‌دلیل پتانسیل زیاد تبخیر در کشور، ۱۷۹ میلی‌متر آن به‌طور مستقیم تبخیر می‌شود (Zandi *et al.*, 2021). رشته‌کوه‌های زاگرس با ممانعت از ورود توده‌های هوای مرطوب از منابع رطوبتی مجاور به بخش‌های داخلی ایران به‌عنوان یک عامل تغییرپذیری

فضایی بارش سالانه در ایران معرفی شده‌اند. به همین دلیل، مقدار بارش سالانه در اغلب دامنه‌های داخلی زاگرس در مقایسه با بخش‌های غربی آن به‌مقدار قابل‌توجهی کمتر است (Alijani, 2008). تغییرات فصلی آب‌وهوا در منطقه زاگرس مرکزی، اثرات شدیدی بر پوشش گیاهی، منابع آبی، کشاورزی، صنعت و جنبه‌های دیگر زندگی ساکنان محلی دارد. در سال‌های اخیر، تغییرات زیاد در اقلیم زاگرس مرکزی به‌صورت کاهش بارندگی سالانه و خشک‌سالی‌های شدید، هم به جنگل‌های محلی و هم به کشاورزی آسیب رسانده‌اند.

پایش خشک‌سالی، امکان ارزیابی خشک‌سالی‌ها را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف به‌منظور مدیریت و برنامه‌ریزی فراهم می‌کند. بدین‌منظور، پیش‌بینی‌های قابل‌اعتماد از تغییرات خشک‌سالی‌های آینده، امری ضروری است. سناریوهای اقلیمی آینده مبتنی‌بر مدل‌های گردش عمومی جوّ (GCMs) می‌توانند تشدید خشکی مناطق مختلف را پیش‌بینی کنند (Dai, 2013). آن‌ها، مدل‌هایی عددی و پیشرفته‌تر هستند که برای شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی در جوّ، اقیانوس، یخ‌کره و سطح زمین کاربرد دارند (Moss *et al.*, 2010). مدل‌های GCMs مبتنی‌بر قوانین فیزیکی هستند که توسط رابطه‌های ریاضی بیان می‌شوند. این رابطه‌ها در یک شبکه سه‌بعدی در سطح کره‌زمین حل می‌شوند. در مدل‌های مذکور، مؤلفه‌های اصلی سامانه اقلیمی کره‌زمین (جوّ، سنگ‌کره، زیست‌کره و آب‌کره) در مدل‌های فرعی جداگانه مانند انتقال گرما و رطوبت در مقیاس‌های بزرگ شبیه‌سازی می‌شوند. مدل‌های GCMs در قالب پروژه جهانی مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP)، ابزاری مناسب برای ارائه چشم‌اندازی از اقلیم و ارائه پیش‌آگاهی از شرایط خشک‌سالی و نیز مدیریت ریسک اقلیمی ناشی از آن هستند (Moss *et al.*, 2010). هدف پژوهش پیش‌رو، بررسی روند، فراوانی و شدت خشک‌سالی برای یک مقیاس زمانی معین در ناحیه رویشی زاگرس مرکزی با استفاده از شاخص SPEI بود. به‌علاوه، با استفاده از خروجی یکی از مدل‌های GCMs، روند خشک‌سالی برای سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۶۰ در زاگرس مرکزی پیش‌نگری شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش پیش‌رو، ذخیره‌گاه جنگلی ارس (*Juniperus excelsa* M.Bieb.) کیگوران است که در جنوب شرقی استان لرستان در زاگرس مرکزی قرار دارد. این منطقه در عرض جغرافیایی ′۷ و°۳۳ شمالی و طول ′۲۲ و °۴۸ شرقی واقع شده است. ذخیره‌گاه جنگلی ارس کیگوران با میانگین بارش سالانه حدود ۷۰۰ تا ۷۲۰ میلی‌متر و متوسط دمای ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد، اقلیم سرد و معتدل دارد (Alipoor *et al.*, 2018). در پژوهش پیش‌رو، برای تخمین و روندیابی SPEI در بازه‌های زمانی سه، شش، نُه و ۱۲ ماهه از داده‌های ۳۳ ساله (۲۰۱۹–۱۹۸۷) روزانه بارندگی و دما ایستگاه هواشناسی همدیدی (Synoptic) الیگودرز استفاده شد (جدول ۱). شاخص خشک‌سالی SPEI نیز با مجموعه داده‌های ۳۳ ساله محاسبه شد (Bera *et al.*, 2021).

روش پژوهش

شاخص SPEI

شاخص SPEI به‌عنوان یک شاخص خشک‌سالی بهبودیافته برای بررسی اثر گرمایش جهانی بر شدت خشک‌سالی ارائه شده است. این شاخص اغلب براساس پارامترهای بارش و تبخیر- تعرق پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). در محاسبه شاخص SPEI، تعادل اقلیمی بیلان آبی مدنظر قرار می‌گیرد. بدین‌صورت که به‌جای بارش، تفاوت بین بارش و تبخیر- تعرق پتانسیل به‌عنوان ورودی در معادله استفاده می‌شود (Mathbout *et al.*, 2018). Vicente-Serrano و همکاران (۲۰۱۰) از ساده‌ترین روش که توسط Thornthwaite (۱۹۴۸) معرفی شده بود، برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل استفاده کردند. اولین‌گام برای برآورد SPEI،

محاسبه اختلاف بین مقدار بارش (P_i) و تبخیر- تعرق پتانسیل (PET_i) برای ماه iام (D_i) است (رابطه ۱):

$$D_i = P_i - PET_i$$ رابطه (۱)

برای محاسبه SPEI به یک توزیع سه‌پارامتری نیاز است. بنابراین از $f(x)$ رابطه (۲) به عنوان تابع توزیع استفاده می‌شود:

$$f(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^{\beta}\right]^{-1}$$ رابطه (۲)

در توزیع سه‌پارامتری معادله مذکور، α پارامتر مقیاس، β پارامتر شکل و γ پارامتر اصلی برای مقدار D در محدوده $\gamma > D < \infty$ است. درنهایت می‌توان به‌راحتی SPEI را از مقادیر استانداردشده براساس رابطه (۳) محاسبه کرد:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}$$ رابطه (۳)

مقدار W به صورت $W = \sqrt{-2Ln\,(p)}$ (به شرط $P \leq 0.5$، اگر $P \geq 0.5$ باشد؛ در معادله W، P با $1 - P$ جایگزین می‌شود و علامت SPEI حاصل معکوس می‌شود) محاسبه می‌شود. مقادیر C_0، C_1 و C_2 و نیز d_1 ، d_2 و d_3 ثابت هستند. مجموع مقادیر منفی SPEI شدت خشک‌سالی را نشان می‌دهد، درحالی‌که کمینه مقدار SPEI بیانگر شدت اوج خشک‌سالی است. مجموع ماه‌های متوالی با SPEI منفی نیز نشان‌دهنده مدت خشک‌سالی است (Mouatadid *et al.*, 2018). طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی برای SPEI مطابق SPI است (جدول ۱). مقدار منفی شاخص‌ها، نشان‌دهنده وضعیت خشک و مقدار مثبت، بیانگر وضعیت مرطوب است.

جدول ۱- طبقه‌بندی خشک‌سالی براساس شاخص SPI

Table 1. Classification of drought based on SPI index

وضعیت Status	SPI
ترسالی بسیار شدید Extremely wet	≥2
ترسالی شدید Severely wet	1.5-1.99
ترسالی متوسط Moderately wet	1-1.49
نزدیک به نرمال Mildly wet	(–0.99) - 0.99
خشک‌سالی متوسط Moderately drought	(–1) - (–1.49)
خشک‌سالی شدید Severely drought	(–1.5) - (–1.99)
خشک‌سالی بسیار شدید Extremely drought	≤-2

آزمون من‌کندال با مقدار تخمینگر شیب‌سن

در پژوهش پیش‌رو از آزمون من‌کندال با مقدار تخمینگر شیب‌سن برای تعیین روند داده‌های اقلیمی استفاده شد. این آزمون به‌طور گسترده‌ای برای تعیین روند افزایش یا کاهش هر متغیر اقلیمی استفاده می‌شود و توسط سازمان جهانی هواشناسی (WMO) توصیه شده است (Liu *et al.*, 2016). ازآنجایی‌که این آزمون، ناپارامتریک است، بنابراین به مجموعه داده با توزیع نرمال نیاز ندارد. در پژوهش پیش‌رو، همه محاسبه‌های آماری و تعیین روند به‌کمک آماره من‌کندال به‌ترتیب با استفاده از بسته‌های SPEI و trend در نرم‌افزار R-Studio انجام شد. در نرم‌افزار R فرمان‌ها به‌صورت واژه‌هایی هستند که با نوشته شدن در خط فرمان اجرا می‌شوند. محاسبه‌های آماری اولیه با دستورها و کدهای مشخص انجام شد. به‌دنبال‌آن، مقادیر SPEI در بازه‌های زمانی متفاوت برآورد شد. درنهایت، روند خشک‌سالی‌ها با استفاده از فرمان‌های مربوطه و مقایسه مقادیر Z، من‌کندال و شیب‌سن مشخص شد.

پیش‌نگری شاخص SPEI با استفاده از GCMs

برای بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر شاخص‌های اقلیمی در دوره‌های آینده از خروجی مدل‌های GCMs استفاده می‌شود. این مدل‌های عددی و پیشرفته برای شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی در جوّ، اقیانوس، یخ‌کره و سطح زمین کاربرد دارند (Moss *et al.*, 2010). در این پژوهش، مدل اقلیمی مورد استفاده، NorESM2-LM است. این مدل، نسخه دوم مدل نروژی سامانه کره‌زمین از نسل دوم مدل‌های جفت‌شده کره‌زمین است که توسط مرکز اقلیم‌شناسی نروژ (NCC) توسعه یافته است. باتوجه‌به وسعت محدوده پیش‌بینی متغیرها و تفکیک مکانی کم در این مدل‌ها، لازم است که خروجی‌های GCMs پیش از استفاده، ریزمقیاس شوند. در این پژوهش از یکی از روش‌های ریزمقیاس نمایی آماری به‌نام نگاشت چندک (Quantile Mapping) بهره برده شد. نگاشت چندک به‌عنوان روشی ناپارامتریک بدون هیچ‌گونه پیش‌فرضی، همه توزیع‌های احتمالی بارش را برآورد می‌کند. چندک به نام‌های نگاشت احتمالاتی (Probability Mapping) و نگاشت توزیعی (Distribution Mapping) نیز شناخته می‌شود. علی‌رغم اینکه تاکنون روش‌های مختلفی برای حذف اریب از داده‌ها ارائه شده است، اما نگاشت چندک به‌علت اثربخشی زیاد و محاسبه‌های کم به‌عنوان یکی از روش‌های کارآمد برای تصحیح اریبی مطرح شده است (Gupta *et al.*, 2019).

روش نگاشت چندک براساس توابع توزیع تجمعی (CDF_S) و با جایگزینی مقدار پیش‌بینی‌شده با مقدار مشاهده‌شده در چندک مشابه موجب حذف اریبی می‌شود. در شرایطی که P_0^* و P_f به‌ترتیب به‌عنوان بارش مشاهده‌شده و بارش پیش‌بینی‌شده در نظر گرفته شوند، رابطه (۴) می‌تواند برای تبدیل CDF پیش‌بینی‌ها به CDF مشاهده‌ها استفاده شود:

$$P_0^* = F_0^{-1}\left(F_f\left(P_f\right)\right) \qquad \text{رابطه (۴)}$$

در رابطه (۴)، F_f معرف CDF متناظر با بارش پیش‌بینی شده و معکوس CDF متناظر با مشاهده‌های P_0^* است (Gupta *et al.*, 2019).

سناریوها و رویکردهای مشترک اجتماعی- اقتصادی (SSP) براساس پنج رویکرد بنیادین توسعه پایدار، رقابت منطقه‌ای، نابرابری، توسعه سوخت‌های فسیلی و توسعه مبتنی‌بر سیاست‌های بینابین توصیف شده‌اند. این سناریوها در پنج دسته قرار گرفته‌اند که با عنوان SSP1 تا SSP5 شناخته می‌شوند. فرض‌های SSP1 شامل مصرف پایدار، رشد کم جمعیت، افزایش راندمان انرژی، جایگزینی سریع‌تر انرژی‌های تجدیدپذیر و همکاری بیشتر جهانی است. فرض‌های SSP2 بیانگر شرایط حدواسط است. به‌طوری‌که توسعه اجتماعی- اقتصادی همگام با شرایط معمول است. سناریوی SSP3 مبتنی‌بر دنیایی با چالش‌های زیاد برای سیاست‌های مرتبط با تعدیل ازجمله رشد زیاد جمعیت است که به افزایش تقاضای برای مواد غذایی و انرژی و رقابت منطقه‌ای منجر می‌شود. چنین شرایطی مانع توسعه اجتماعی می‌شود. فرض‌های SSP4، نابرابری در قدرت‌های اقتصادی

و سیاسی را منعکس می‌کند که افزایش نابرابری در داخل و خارج کشورها در طی قرن بیست و یکم را به‌دنبال دارد. از فرض‌های دیگر این سناریو می‌توان به افزایش درگیری و ناآرامی و روند فزاینده توسعه فناوری پیشرفته و سیستم‌های متنوع انرژی اشاره کرد. درنهایت، فرض‌های سناریو SSP5 شامل دنیایی پیشرفته و درعین‌حال با سوخت فسیلی است که در آن شیوه‌های زندگی پرانرژی به‌کار گرفته می‌شوند. سناریوهای SSP منتخب در پژوهش پیش‌رو شامل SSP126، SSP370 و SSP585 بودند که هریک، معرف یکی از رویکردهای یادشده هستند. به‌طوری‌که عدد صدگان (۱، ۳ و ۵)، سناریوها و رویکردهای مشترک اجتماعی- اقتصادی را نشان می‌دهد (SSP1، SSP3 و SSP5).

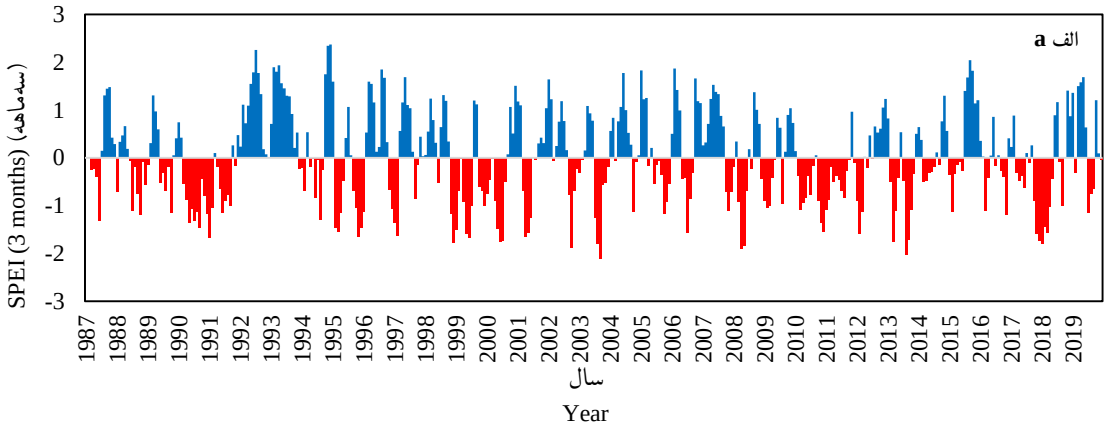
نتایج

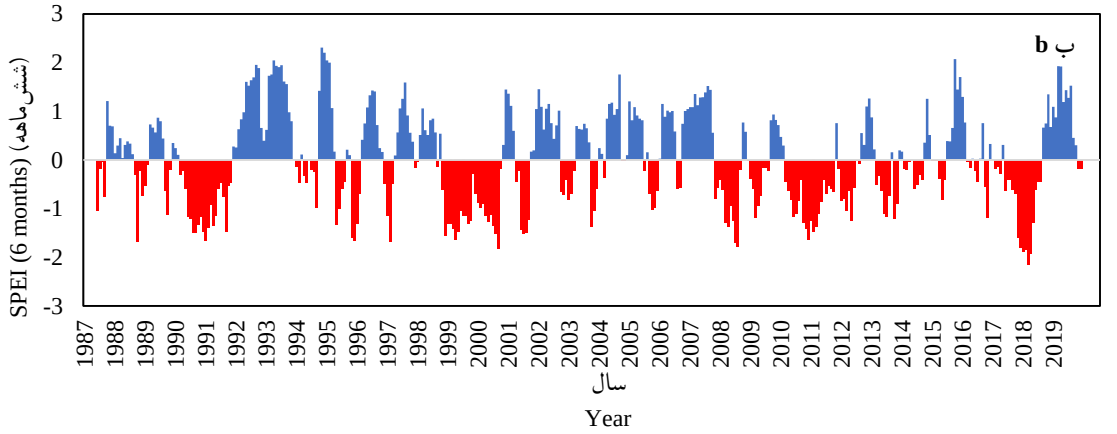
بارش و دمای سالانه

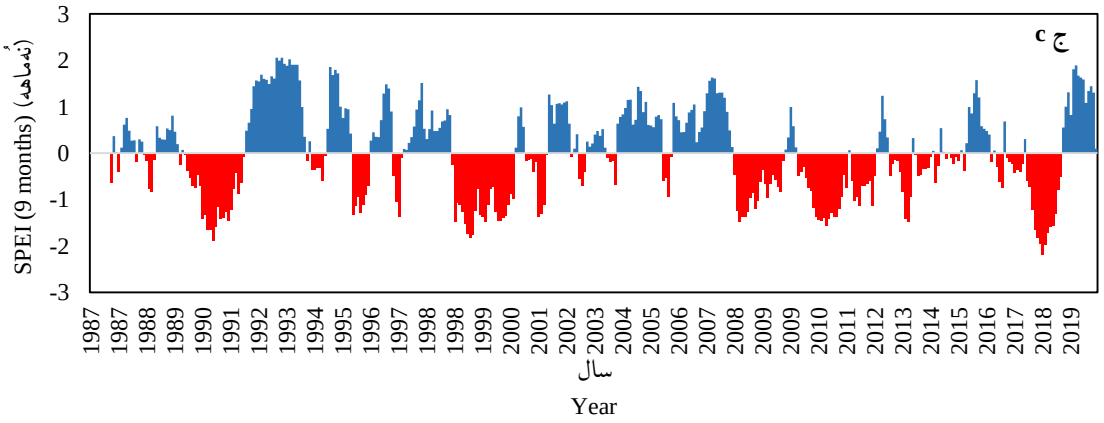
میانگین بارش و دمای سالانه طی دوره آماری ۳۳ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۹) در منطقه مورد مطالعه به‌ترتیب ۴۲۶ میلی‌متر (انحراف معیار: ۱۱۲ میلی‌متر) و ۱۲/۷ درجه سانتی‌گراد (انحراف معیار: یک درجه سانتی‌گراد) ثبت شد. تغییرات دمای متوسط سالانه ثبت‌شده در ایستگاه همدیدی الیگودرز در طی مذکور، روندی معنی‌دار را نشان نداد. بیشینه و کمینه میانگین سالانه دماهای مشاهده‌شده به‌ترتیب در سال‌های ۲۰۱۰ و ۱۹۹۲ با مقادیر ۱۴/۶ و ۹/۸ درجه سانتی‌گراد ثبت شد. بیشینه (۶۴۰/۵ میلی‌متر) و کمینه بارش سالانه (۱۸۵/۷ میلی‌متر) نیز به‌ترتیب در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۵ رخ داد. براساس نتایج آزمون من‌کندال، روند بارش سالانه در ایستگاه الیگودرز معنی‌دار نبود.

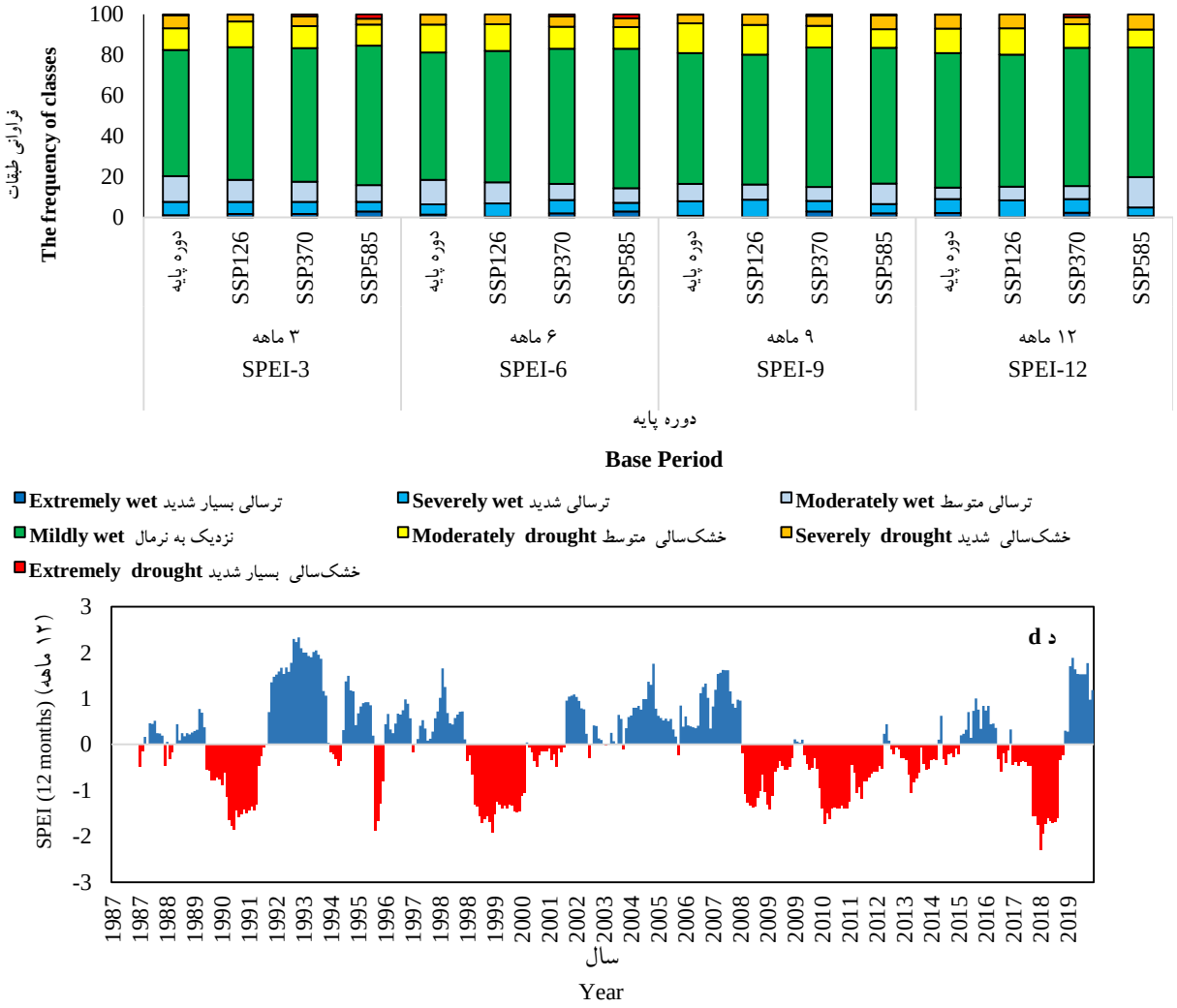
تغییرات زمانی و روند شاخص SPEI

باتوجه‌به طبقه‌بندی مقدار شاخص خشک‌سالی SPEI، ۲۹ دوره خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی سه و شش‌ماهه و ۱۸ و ۱۳ دوره خشک‌سالی به‌ترتیب در مقیاس‌های نُه و ۱۲ ماهه با شدت‌های متفاوت رخ داده است (شکل ۱). شاخص SPEI در مقیاس سه‌ماهه بیانگر وجود دو دوره خشک‌سالی بسیار شدید با مقادیر کمتر از ۲- طی سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۳ است. همچنین، طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی در دو رخداد و طی ۱۲ ماه متوالی، در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۱ و ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۱ به‌ترتیب با شدت ۱۲/۹- (متوسط: ۱/۱-) و ۹/۱- (متوسط: ۰/۸-) به ثبت رسیده است (شکل ۱-الف). تغییرات زمانی SPEI شش‌ماهه نشان می‌دهد که طی سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ یک دوره خشک‌سالی بسیار شدید (کمتر از ۲-) در یک بازه زمانی ۱۵ ماهه ثبت شده است، درحالی‌که این منطقه در سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰، شاهد طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی به‌مدت ۲۴ ماه و با شدت ۲۷/۳- (متوسط: ۱/۱-) بوده است (شکل ۱-ب). براساس SPEI نُه‌ماهه، همچون مقیاس شش‌ماهه، فقط یک دوره خشک‌سالی بسیار شدید (۱۴ ماه) در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ با شدت ۱۹/۵- رخ داده است. طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی با شدت ۳۰/۶- (متوسط: ۱/۲-) طی ۲۵ ماه بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ به‌وقوع پیوسته است (شکل ۱- ج). بررسی تغییرات زمانی مقادیر SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه نشان داد که از میان ۱۳ دوره خشک‌سالی رخ‌داده طی دوره آماری مشخص، فقط یک دوره خشک‌سالی بسیار شدید (۲۰۱۸-۲۰۱۷) با شدت ۲۳- به‌مدت ۲۱ ماه رخ داده است. طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی نیز مربوط به ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ به‌مدت ۳۳ ماه و با شدت ۲۹/۸- (متوسط: ۰/۹-) بود (شکل ۱- د). درمجموع، بررسی دوره‌های خشک‌سالی با استفاده از شاخص SPEI نشان می‌دهد که بیشترین (۶۴ درصد) و کمترین (۰/۳ درصد) تعداد رخداد خشک‌سالی به‌ترتیب مربوط به بازه نزدیک به نرمال (۰/۹۹ تا ۰/۹۹-) و خشک‌سالی بسیار شدید (کمتر از ۲-) بوده است.


الف a
SPEI (3 months) (سه‌ماهه)
3
2
1
0
-1
-2
-3
1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019
سال
Year


ب b
SPEI (6 months) (شش‌ماهه)
3
2
1
0
-1
-2
-3
1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019
سال
Year


ج c
SPEI (9 months) (نُه‌ماهه)
3
2
1
0
-1
-2
-3
1987 1987 1988 1989 1990 1991 1992 1993 1994 1995 1996 1997 1998 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019
سال
Year



شکل ۱- تغییرات زمانی **SPEI** در مقیاس‌های زمانی سه (الف)، شش (ب)، نُه (ج) و ۱۲ ماهه (د) در ایستگاه همدیدی الیگودرز

رنگ‌های قرمز و آبی به‌ترتیب نمایانگر دوره‌های خشک‌سالی و ترسالی هستند.

Figure 1. Temporal changes of SPEI in time scales of 3 (a), 6 (b), 9 (c) and 12 months (d) at the Aligudarz synoptic station, Iran

Red and blue colors represent the drought and wet periods, respectively.

شکل ۲- درصد فراوانی طبقه‌های خشک‌سالی براساس شاخص **SPEI** در ایستگاه همدیدی الیگودرز در دوره پایه (۲۰۱۹-۱۹۸۷) و دوره آینده (۲۰۶۰-۲۰۳۰) تحت سناریوهای **SSP126**، **SSP370** و **SSP585**

Figure 2. The percentage of frequency of drought classes based on SPEI index in Aliguderz synoptic station, Iran in the base (1987-2019) and future periods (2030-2060) under scenarios of SSP126, SSP370 and SSP585

پیش‌نگری رخدادهای حدی با استفاده از شاخص SPEI

درصد فراوانی طبقه‌های مختلف خشک‌سالی براساس شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف (سه، شش، نُه و ۱۲ ماهه) طی دوره آماری پایه (۲۰۱۹-۱۹۸۷) و دوره آینده (۲۰۶۰-۲۰۳۰) تحت سه سناریوی SSP126، SSP 370 و SSP585 محاسبه شد (شکل ۲). در هر دوره پایه و آینده تحت سه سناریو مذکور، بیشترین درصد فراوانی SPEI مربوط به طبقه نزدیک به نرمال بود. تغییر در تعداد

رخدادهای خشک‌سالی و ترسالی سبب تغییرات جزئی این طبقه در دوره آینده نسبت به دوره پایه خواهد شد (شکل ۲).

بررسی شاخص SPEI برای مقایسه رخدادهای حدی در دوره آینده نشان داد که در مقیاس سه‌ماهه، درصد رخدادهای ترسالی بسیار شدید تحت سناریوهای SSP126 و SSP370 یک درصد کاهش و در سناریوی SSP585 دو درصد افزایش خواهند یافت (شکل ۲). براساس سناریوهای SSP126 و SSP585، رخدادهای ترسالی در دوره آینده نسبت به دوره پایه در مقیاس‌های زمانی شش و نه‌ماهه به‌مقدار یک درصد افزایش را نشان دادند. همچنین در مقیاس ۱۲ ماهه تحت سناریوهای مذکور به‌ترتیب افزایش و کاهش یک‌درصدی پیش‌نگری می‌شود (شکل ۲). رخدادهای خشک‌سالی بسیار شدید با استفاده از شاخص SPEI و تحت سناریو SSP126 در دوره آینده فقط در مقیاس سه‌ماهه، تغییر افزایشی (یک درصد) خواهد داشت. نتایج حاصل از سناریو SSP370 نیز نشان داد که درصد فراوانی خشک‌سالی بسیار شدید در مقیاس‌های زمانی شش، نُه و ۱۲ ماهه، یک درصد افزایش خواهد داشت، اما در مقیاس سه‌ماهه، بدون تغییر خواهد بود. در مقیاس‌های زمانی سه، شش و نُه‌ماهه و تحت سناریو SSP585، درصد فراوانی رخدادهای خشک‌سالی بسیار شدید به‌ترتیب به‌مقدار یک، دو و یک درصد افزایش خواهد داشت، اما در مقیاس ۱۲ ماهه، بدون تغییر خواهد بود (شکل ۲).

مقایسه خشک‌سالی‌ها در دوره‌های پایه و آینده

مقایسه فراوانی و شدت دوره‌های خشک‌سالی (متوسط، شدید و بسیار شدید) در دوره آماری ۲۰۳۰ تا ۲۰۶۰ تحت سناریو SSP126 نسبت به دوره پایه (۲۰۱۹–۱۹۸۷) نشان داد که در دوره آینده نسبت به دوره پایه در مقیاس‌های زمانی شش‌ماهه (نُه دوره خشک‌سالی)، نُه و ۱۲ ماهه (شش دوره خشک‌سالی) دوره‌های خشک‌سالی کاهش خواهد یافت و دوره خشک‌سالی بسیار شدید رخ نخواهد داد. اگرچه در مقیاس سه‌ماهه، افزایش جزئی (یک دوره خشک‌سالی) در تعداد دوره‌های خشک‌سالی مشاهده می‌شود، اما پیش‌بینی شد که در دوره ۲۰۳۰ تا ۲۰۶۰، فقط یک دوره خشک‌سالی بسیار شدید در مدت کوتاه‌تر و با شدت کمتر رخ خواهد داد. نتایج سناریو SSP370 نشان داد که تعداد دوره‌های خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی سه، نُه و ۱۲ ماهه افزایش خواهد یافت، درحالی‌که در مقیاس شش‌ماهه، دوره‌های خشک‌سالی کم خواهند شد. گفتنی است که در همه مقیاس‌های زمانی در آینده نسبت به دوره پایه براساس سناریوی مذکور، تعداد، شدت و مدت دوره‌های خشک‌سالی بسیار شدید افزایش خواهند یافت. نتایج محاسبه شاخص SPEI تحت سناریو SSP585 نشان داد که علی‌رغم کاهش تعداد دوره‌های خشک‌سالی در مقیاس شش، نُه و ۱۲ ماهه در دوره آینده نسبت به دوره پایه، تعداد دوره خشک‌سالی بسیار شدید افزایش خواهد یافت.

بحث

روند خشک‌سالی‌ها در دوره پایه

محاسبه شاخص SPEI در پژوهش پیش‌رو بیانگر وقوع خشک‌سالی در همه مقیاس‌های زمانی گذشته از ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۹ است. تا پیش از سال ۲۰۰۰، خشک‌سالی بسیار شدید (۲- و کمتر از آن) ثبت نشد. این خشک‌سالی طی سال‌های اخیر (۲۰۱۷ و ۲۰۱۸) رخ داده است. اولین خشک‌سالی بسیار شدید نیز برای سال ۲۰۰۳ ثبت شد. نتایج پژوهش‌های پیشین نشان دادند که در فاصله سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۱۰، خشک‌سالی‌های مکرر در بیشتر نقاط دنیا و نیز جنوب غرب آسیا ثبت شده است (Spinoni *et al.*, 2015). بررسی روند خشک‌سالی‌های هواشناسی و کشاورزی در ایران نشان داد که شدیدترین خشک‌سالی در سراسر کشور بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ رخ داده است (Golian *et al.*, 2015). به‌طوری‌که حدود ۸۰ درصد از کشور، خشک‌سالی استثنایی را تجربه کرده است (کمتر از دو درصد احتمال وقوع) (Golian *et al.*, 2015). همچنین، براساس تحلیل خشک‌سالی‌های ایران در نیم قرن گذشته، شدیدترین دوره‌های خشک‌سالی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا

۲۰۱۰ رخ داده است (Doostan, 2015). این خشک‌سالی سبب کاهش مداوم سطح دریا در شرق اقیانوس آرام و افزایش دمای سطح دریا در هند- آرام غربی شد (Golian *et al.*, 2015). ازاین‌رو، به‌دلیل ماهیت خزشی و مزمن بودن خشک‌سالی، بسیاری از بوم‌سازگان‌های طبیعی تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. در شرق زاگرس (شامل ایستگاه‌های مرکز و شرق زاگرس: شهرستان‌های خرم‌آباد، اراک و اصفهان) از اواخر دهه ۹۰ و اواخر ۲۰۰۰ میلادی، دوره‌های خشک‌سالی واقعی و شدید اتفاق افتاده است. پیامدهای این پدیده اقلیمی در مناطق مختلف شامل کاهش شدید سطح سفره‌های آبی و شوری آن‌ها (Daneshvar Vousoughi *et al.*, 2012; Afsharinia & Panahi, 2021)، کاهش منابع آب سطحی در بسیاری از مناطق ایران و زوال جنگل‌های بلوط در غرب زاگرس (Doostan, 2015) هستند.

نتایج پژوهش پیش‌رو نشان داد که در مقیاس سه‌ماهه، طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۱ ثبت شده است. نتایج برخی پژوهش‌ها نشان دادند که طولانی‌ترین دوره خشک‌سالی در مقیاس‌های شش و نُه‌ماهه بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ و در مقیاس ۱۲ ماهه طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ رخ داده است (Golian *et al.*, 2015; Pirnia *et al.*, 2018). در پژوهش‌های دیگری، طولانی‌ترین خشک‌سالی‌ها در مقیاس‌های مختلف کوتاه و بلندمدت برای سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ گزارش شدند (Golian *et al.*, 2015; Sharafi & Mohammadi Ghaleni). محاسبه شاخص خشک‌سالی در مقیاس کوتاه‌مدت (یک و سه‌ماهه) برای پایش اولیه خشک‌سالی، مقیاس میان‌مدت (شش‌ماهه) برای پایش اثرات کشاورزی و مقیاس بلندمدت (۱۲، ۱۸، ۲۴ ماهه) اغلب برای بررسی اثرات آب‌شناختی مفید است (Bhunia *et al.*, 2020)، بنابراین به‌نظر می‌رسد که باتوجه‌به دوره رویش گیاهان در مناطق معتدل (بیشتر از سه تا چهار ماه)، بهتر است برای ارزیابی خشک‌سالی از مقیاس کوتاه‌مدت استفاده نشود.

فراوانی و شدت خشک‌سالی‌ها در دوره‌های پایه و آینده

شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت (سه‌ماهه) و بلندمدت (۱۲ ماهه) به‌ترتیب بیشترین و کمترین تعداد دوره خشک‌سالی در دهه‌های گذشته (۲۰۱۹-۱۹۸۷) را نشان دادند. در مقیاس طولانی‌تر، تعداد دوره‌های خشک‌سالی کمتر، اما تداوم و شدت آن‌ها بیشتر است. این نتایج با یافته‌های Pirnia و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد.

محاسبه شاخص SPEI تحت سه سناریو مورد مطالعه نشان داد که فراوانی خشک‌سالی‌های بسیار شدید تحت سناریوی SSP126 (به‌جز سه‌ماهه) تغییر نخواهد کرد، درحالی‌که این خشک‌سالی‌ها تحت سناریوهای SSP370 (شش، نُه و ۱۲ ماهه) و SSP585 (سه، شش و نُه‌ماهه) در دوره آینده، افزایش خواهند یافت. پایش خشک‌سالی‌های آینده (۲۰۴۰-۲۰۱۱) در ایستگاه همدیدی همدان برمبنای شاخص SPEI و سناریوهای انتشار A1B، A2 و B1 با اجرای گروهی داده‌های پنج مدل GCMs نشان داد که تعداد دوره‌های خشک به‌دلیل نوسان‌های اقلیمی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت یک و سه‌ماهه افزایش می‌یابند (Zare Abyaneh *et al.*, 2015). بااین‌حال، در مقیاس‌های زمانی بلندمدت (شش، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه) از تعداد این دوره‌ها کاسته می‌شود، اما طول دوره خشک و ماندگاری شرایط خشک‌سالی بیشتر خواهد شد (Zare Abyaneh *et al.*, 2015). افزایش فراوانی خشک‌سالی‌های شدید در آینده نسبت به دوره مشاهده‌شده، نشانه کمبود آب در منطقه به‌دلیل بارندگی کمتر از حد میانگین توأم با دمای زیاد است (Shirmohammadi Chelan *et al.*, 2022)، بنابراین به‌علت محدودیت دسترسی پوشش گیاهی به منابع رطوبتی، درختان مستعد تنش خشکی خواهند بود. بررسی دوره‌های خشک‌سالی آینده در شهرستان قائم‌شهر طی مقیاس‌های شش، ۱۲ و ۲۴ ماهه با استفاده از سه مدل گردش کلی CanESM2، CNRM-CM5 و CESM1-WACCM و تحت سناریوهای RCP8.5 و RCP2.6 نشان داد که تداوم دوره‌های خشک‌سالی در فاصله سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۴۰ افزایش خواهد یافت (Rajaei, 2022). همچنین، ارزیابی مدل HadCM3 تحت دو سناریو A1B و A2 در ۲۷ ایستگاه همدیدی در ایران نشان داد که در مقیاس‌های زمانی

مختلف، شدت خشک‌سالی کوتاه‌مدت (سه‌ماهه) در غرب کشور طی دهه‌های آینده افزایش خواهد داشت، اما برای دوره‌های میان‌مدت (۱۲ ماهه) و بلندمدت (۲۴ ماهه)، تغییر چشم‌گیری در شدت تجمعی وزنی خشک‌سالی منطقه غرب پیش‌بینی نمی‌شود (Alvankar *et al.*, 2014). محاسبه شاخص SPEI در پژوهش پیش‌رو حاکی از آن است که در آینده، خشک‌سالی‌های بسیار شدید با شدت و تداوم بیشتر رخ خواهند داد. یکی از پیامدهای خشک‌سالی‌های دهه اخیر، خشکیدگی و کاهش زادآوری درختان ارس در ذخیره‌گاه جنگلی ارس در منطقه کیگوران بوده است. ادامه روند خشک‌سالی‌ها در آینده می‌تواند سبب از بین رفتن این درختان و کاهش کمی و کیفی پوشش گیاهی این منطقه شود. براین‌اساس، ارزیابی اثرات خشک‌سالی بر پوشش گیاهی و انتخاب شاخص مناسب برای ارزیابی دقیق‌تر آن‌ها بسیار مهم است.

منابع مورد استفاده

- Afsharinia, M. and Panahi, F., 2021. Effect of climatic drought on surface soil salinity in Kashan Plain. Water and Soil Management and Modelling, 1(2): 36-46 (In Persian with English summary)
- Alijani, B., Ghohroudi, M. and Arabi, N., 2008. Developing a climate model for Iran using GIS. Theoretical and Applied Climatology, 92: 103-112.
- Alipoor, M., Raeini Sarjaz, M., Pourtahmasi, K. and Nadi, M., 2018. The effect of climatic variables on annual tree-rings width of Persian juniper trees in Kyguran habitat of Lorestan province. Journal of Forest and Wood Products, 70(4): 599-608 (In Persian with English summary).
- Alvankar, S.R., Nazari, F. and Fattahi, E., 2016. The intensity and return periods of drought under future climate change scenarios in Iran. Journal of Water Engineering, 3(2): 99-120 (In Persian with English summary).
- Bera, B., Kumar Shit, P., Sengupta, N., Saha. S. and Bhattacharjee, S., 2021. Trends and variability of drought in the extended part of Chhota Nagpur plateau (Singbhum Protocontinent), India applying SPI and SPEI indices. Environmental Challenges, 5: 100310.
- Bhunia, P., Das, P. and Maiti, R., 2020. Meteorological drought study through SPI in three drought prone districts of West Bengal, India. Earth Systems and Environment, 4: 43-55.
- Clark, J.S., Iverson, L., Woodall, C.W., Allen, C.D., Bell, D.M., Bragg, D.C. and Zimmermann, N.E., 2016. The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States. Global Change Biology, 22(7): 2329-2352.
- Shirmohammadi Chelan, B. S., Rostami, M., Moosavi, V., Varamesh, S. and Semiromi, M. T. (2022). Projection of Meteorological Drought under a Changing Climate in the Urmia Lake Basin, Iran. PREPRINT (Version 1) available at Research Square [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1827250/v1]
- Dai, A., 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. Nature Climate Change, 3: 52-58.
- Daneshvar Vousoughi, F., Dinpashoh, Y. and Aalami, M.T., 2012. Effect of drought on groundwater level in the past two decades (Case study: Ardebil plain). Soil and Water Science, 4: 165-179 (In Persian with English summary).
- Doostan, R., 2015. Analysis of the Iran droughts in the past half century. Journal of Climate Research, 6: 1-18 (In Persian with English summary).
- Golian, S., Mazdiyasni, O. and AghaKouchak, A., 2015. Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran. Theoretical and Applied Climatology, 119: 679-688.
- Gupta, R., Bhattarai, R. and Mishra, A., 2019. Development of climate data bias corrector (CDBC) tool and its application over the agro-ecological zones of India. Water, 11(5): 1102.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N. and Widhalm, M., 2011. The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. Bulletin of the American Meteorological Society, 92(4): 485-488.
-Kim, T.W. and Jehanzaib, M., 2020. Drought risk analysis, forecasting and assessment under climate change. Water (Basel) 12 (7), 12.
- Liu, Z., Wang, Y., Shao, M., Jia, X. and Li, X., 2016. Spatiotemporal analysis of multiscalar drought characteristics across the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 534: 281-299.
- Masoodian, S.A. and Kaviani, M.R., 2008. Climatology of Iran. Esfahan University Press, Esfahan, Iran, 182p (In Persian).
- Mathbout, S., Lopez-Bustins, J.A., Martin-Vide, J., Bech, J. and Rodrigo, F.S., 2018. Spatial and temporal analysis of drought variability at several time scales in Syria during 1961–2012. Atmospheric Research, 200: 153-168.
-Mouatadid, S., Raj, N., Deo, R. C., & Adamowski, J. F. (2018). Input selection and data-driven model performance optimization to predict the Standardized Precipitation and Evaporation Index in a drought-prone region. Atmospheric research, 212, 130-149.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Van Vuuren, D.P. and Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change

147: 941-957.
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J.V. and Barbosa, P., 2015. The biggest drought events in Europe from 1950 to 2012. Journal of Hydrology: Regional Studies, 3: 509-524.
- Stagge, J.H., Kingston, D.G., Tallaksen, L.M. and Hannah, D.M., 2017. Observed drought indices show increasing divergence across Europe. Scientific Reports, 7: 14045.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38: 55-94.
- Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S. and Lopez-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, 23: 1696-1718.
- Zandi, R., Entezari, A., Baaghide, M. and Khosravian, M., 2021. Evaluation of drought and its effects on vegetation in southern regions of Iran. Researches in Earth Sciences, 12(2): 36-49 (In Persian with English summary).
- Zare Abyaneh, H., Ghabaei Sough, M. and Mosaedi, A., 2015. Drought monitoring based on standardized precipitation evaoptranspiration index (SPEI) under the effect of climate change. Journal of Water and Soil, 29(2): 384-392 (In Persian with English summary).

research and assessment. Nature, 463: 747-756.
- Nedealcov, M., Răileanu, V., Sirbu, R. and Cojocari, R., 2015. The use of standardized indicators (SPI and SPEI) in predicting droughts over the Republic of Moldova territory. Present Environment and Sustainable Development, 2: 149-158.
- NOAA, 2021.Drought Report. http://ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/drought/202106 (accessed on 14 Jul. 2021).
- Pirnia, A., Golestan, M., Bigonah, S. and Solaimani, K., 2018. Investigating the drought characteristics of Tamar basin (upstream of Golestan Dam) using SPI and SPEI indices under current and future climate conditions. Iranian Journal of Ecohydrology, 5(1): 215-228 (In Persian with English summary).
- Rajaei, F., 2022. Drought forecasting under the approach of future climate change (Case study: Qarakhil). Journal of Environmental Sciences Studies, 7(2): 4990-5001 (In Persian with English summary).
- Sharafi, S. and Mohammadi Ghaleni, M., 2022. Spatial assessment of drought features over different climates and seasons across Iran. Theoretical and Applied Climatology,

Prediction of future drought in the Keygooran Juniper forest reserve of Iran using standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI)

S. Beiranvand [1], P. Attarod [2*], V. Bayramzadeh [3], K. Pourtahmasi [4], M. Nadi [5] and Th.G. Pypker [6]

1- Ph.D. Student of Forest Biology, Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2*- Corresponding author, Prof., Department of Forestry and Forest Economics, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. E-mail: attarod@ut.ac.ir
3- Associate Prof., Department of Wood and Paper, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran
4- Prof., Department of Wood & Paper Science and Technology, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
5- Assistance Prof., Department of Irrigation, Faculty of Natural Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
6- Prof., Department of Natural Resource Sciences, Thompson Rivers University, Kamloops, Canada

Received: 09.03.2023 Accepted: 10.06.2023

Abstract

Drought is a major threat to vegetation and can cause its decline. Due to natural and human factors, droughts are becoming more frequent and intense around the world. This research examines the trend and severity of droughts in the past and future using the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) for a Juniper forest reserve in Keygooran, Lorestan Province, Iran. The SPEI index was calculated using daily precipitation and temperature data from the Aligudarz synoptic station for a 33-year period (1987-2019). The frequency and severity of droughts were assessed for the recent past (1987-2019) and the future (2030-2060) using the NorESM2-LM model under the SSP126, SSP370 and SSP585 scenarios. The results showed that the longest droughts occurred in 1990-1991, 1998-2000 and 2010-2012. Moreover, 2003, 2013, 2017 and 2018 were the years with the most severe droughts. In the future (2030-2060), drought periods will be projected to decrease under the SSP126 and SSP585 scenarios (6, 9 and 12 months) and increase under the SSP370 scenario (3, 9 and 12 months). The intensity and duration of extremely severe droughts will be projected to increase in the future despite the decrease in drought frequency based on SPEI. Therefore, the Juniper forest reserve will face more severe droughts in the future, which will affect the reproduction of juniper trees significantly.

Keywords: Climate change, juniper, scenario, SPEI.