

## پیش بینی تغییرات نقطه‌ای مقادیر نسبی دما و بارش در اثر تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی آینده نزدیک و آینده دور و بررسی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI در دشت قزوین، ایران

سیده مریم بنی‌هاشمی<sup>۱</sup>، سید سعید اسلامیان<sup>۱</sup> و بیژن نظری<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۴/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۵/۷)

### چکیده

تغییرات اقلیمی آشکار پیش رو، تبدیل به دغدغه‌ای جدی برای جامعه بشری شده است. این پژوهش برای بررسی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای دما و بارندگی در دشت قزوین در قالب ۵ مدل اقلیمی بزرگ مقیاس Hadcm3، CSIRO-MK3، GFDL، CGCM3 و MICRO3.2 و ۳ سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای AIB، A2 و B1 و ترکیب سناریوهای مختلف در دو دوره زمانی ۳۰ ساله آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و آینده دور (۲۰۵۱-۲۰۸۰) انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد که به‌طور میانگین در ۴ ایستگاه مورد بررسی تا پایان سال ۲۰۵۰ بارندگی بین دو نسبت ۰/۵ و ۱/۴ برابر مقدار بارش دوره مشاهداتی تغییر کرده و میانگین دما به اندازه ۰/۱- تا ۱/۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره مشاهداتی تغییر خواهد داشت و تا پایان سال ۲۰۸۰ بارندگی بین دو نسبت ۰/۵ و ۱/۷ برابر مقدار بارش دوره مشاهداتی در نوسان بوده و میانگین دما افزایشی بین ۰/۶ تا ۲/۶ درجه سانتی‌گراد را تجربه خواهد کرد. هر دو شاخص خشکسالی SPI و SPEI در آینده نزدیک و دور، افزایش تعداد دوره‌های خشک را در همه ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. اما مقدار مجموع توالی‌های منفی با توجه به بازه‌های ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در سطح ایستگاه‌ها متفاوت بود. از دیدگاه شاخص SPEI نسبت به دوره پایه، مجموع توالی‌های منفی خشکسالی و تعداد دوره‌های خشک در آینده ۳ ایستگاه آوج، باغ کوثر و نیروگاه افزایش و در ایستگاه قزوین کاهش خواهد داشت اما از دیدگاه شاخص SPI ایستگاه باغ کوثر از نظر مجموع توالی‌های منفی و تعداد دوره‌های خشک در آینده نسبت به دوره پایه، افزایش و ۳ ایستگاه دیگر بیشتر از نظر تعداد دوره‌های خشکسالی با افزایش روبه‌رو هستند و مجموع توالی‌های منفی کاهش نشان می‌دهد. نتایج نشان داد در آینده رخدادهای خشکسالی به‌سمت شدید شدن و همچنین رخدادهای ترسالی به‌سمت فرین شدن پیش می‌روند.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، دشت قزوین، دما، بارندگی، خشکسالی، شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. گروه علوم آب و مهندسی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.banihashemi@ag.iut.ac.ir

## مقدمه

گرمایش جهانی به عنوان یک حقیقت در سال‌های اخیر پذیرفته شده و تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین موارد مورد پژوهش است. به نسبت افزایش دما در جهان، ظرفیت نگهداشت آب و انتقال بخار آب در اتمسفر نیز افزایش می‌یابد (۲۴). رابطه بین بارندگی و دما بستگی به رژیم اقلیمی و مقیاس دمایی در نظر گرفته شده دارد و همچنین تغییر در چرخه هیدرولوژیک و بارندگی در امتداد تغییر در دما رخ می‌دهد (۲۶). گنجایش تروپوسفر برای نگهداری بخار آب به ازای هر یک درجه سانتی‌گراد به اندازه حدود ۷ درصد (طبق رابطه کلاوسیوس-کلپیرون) افزایش می‌یابد. این بخار آب به نوبه خود به عنوان گاز گلخانه‌ای به سمت گرم شدن عمل می‌کند. هر چند تغییرات مشاهداتی و مدل‌سازی شده در بارندگی، به دلیل اصل بقای انرژی (محدود شده به خاطر در دسترس بودن رطوبت) و پروسه چگالش، از رابطه نرخ بخار آب اشباع با دما تبعیت نمی‌کند (۱۵). بارندگی و دمای سطحی متغیرهایی وابسته به یکدیگرند و هر دوی این متغیرها، به عنوان پاسخی به دینامیک اتمسفر و روابط ترمودینامیکی ذاتی آن و بازخورد بین آنها هستند. در مطالعات اقلیمی، بررسی متغیر دما و بارندگی به صورت هم‌دید می‌کند که تأثیرهای متنوعی در کشاورزی و محیط زیست و همین‌طور تأثیرات اجتماعی دارد (۱۳ و ۱۴). گرمایش جهانی با تأثیر بر چرخه‌های هیدرولوژیک کره زمین، الگوهای بارش را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. نتایج اکثر پیش‌بینی‌ها نشان داده است که میانگین بارش جهان در شرایط اقلیمی آینده تا حدودی افزایش می‌یابد، ولی این افزایش بیشتر در عرض‌های جغرافیایی شمالی بوده و مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان با کمبود جدی بارش مواجه خواهند بود (۱۴). در شرایط تغییر اقلیم نیاز آبی برای کشت محصولات افزایش می‌یابد، بنابراین بشر نیازمند استراتژی‌هایی برای تطبیق با این شرایط است (۵). تغییرات آب و هوا بر مدیریت منابع آبی و مدیریت کشاورزی منطقه تأثیرگذار است و بایستی برای دستیابی به کشاورزی پایدار و مدیریت اجتماعی صحیح، در

سیستم تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های بخش کشاورزی، پویایی‌ها و تغییرات شاخص‌های گیاهی در وضعیت تغییر اقلیم را مدنظر قرار دهد. همان‌طور که هه و همکاران (۱۱) گزارش کردند تأثیر نسبی تغییرات آب و هوا در تاریخ گلدهی، طول دوره رشد رویشی و زایشی و فصل رشد سویا در چین بیشتر از تأثیر شیوه‌های مدیریت محصول بوده و میانگین دما عامل اقلیمی غالب تشخیص داده شده که بیشتر مراحل فنولوژی سویا را تحت تأثیر قرار داده است و یا ژانگ و همکاران (۳۱) که شروع، پایان و طول فصل رشد چمن‌زارهای آلپی را در تبت شمالی متأثر از فرایند تغییر اقلیم دانسته و تحقیق در زمینه تغییرات فنولوژیکی گیاهان در اثر تغییر اقلیم را لازم دانستند. چن و همکاران (۶) نیز اعلام داشتند که با در نظر گرفتن برهم‌کنش کلیه تغییرات اقلیمی و همچنین با در نظر گرفتن اثر CO<sub>2</sub>، در ازای افزایش یک درجه سانتی‌گرادی دمای میانگین فصل رشد، عملکرد ذرت حدود ۳ درصد در حوضه رودخانه یانگ‌تسه کاهش خواهد یافت. امروزه تخمین‌های تغییرات اقلیم در آینده اساساً توسط مدل‌های گردش عمومی جو (AOGCM) انجام می‌شود. این مدل‌ها می‌توانند میانگین‌های بزرگ مقیاس اقلیم آینده را به خوبی شبیه‌سازی کنند (۲۵). گزارش چهارم هیأت بین دول تغییر اقلیم (IPCC) میانگین افزایش دمای جهان برای سال ۲۰۵۰ را در حدود ۳ درجه سانتی‌گراد و در پایان قرن حاضر حدود ۴/۵ درجه سانتی‌گراد برآورد کرده است (۱۳ و ۱۴). عدم قطعیت موجود در پیش‌بینی‌های اقلیمی که ناشی از تفاوت در شرایط اولیه و یا چگونگی پارامتری کردن مدل است باید به منزله عدم قطعیت در اثرات آن قلمداد شده و مورد توجه قرار گیرد. خروجی AOGCM‌ها نیاز به روش‌ها و تکنیک‌های متعدد خرد مقیاس‌سازی دارد. یکی از تکنیک‌های خرد مقیاس‌سازی برای تولید سناریوهای اقلیمی روزانه یک مکان خاص، استفاده از مولد آب و هوایی (Weather Generator) تصادفی است (۲۲). یک مولد آب و هوایی، مدلی است که پس از واسنجی متغیرهای ویژه آن مکان با استفاده از داده‌های

متوسط در آینده در اثر تغییر اقلیم، دمای ماهانه بین ۱/۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و نسبت به گذشته بارندگی بین ۱۱ تا ۳۱ درصد کاهش خواهد یافت. با توجه به حساسیت و اهمیت پدیده تغییر اقلیم و قرار گرفتن ایران در موقعیتی که از این پدیده تأثیر زیادی خواهد گرفت، لازم است به این مسئله از زوایای مختلف و به تفکیک هر منطقه پرداخته شود که این مسئله موضوع پژوهش حاضر است. کشاورزی در دشت قزوین مبتنی بر آب سطحی انتقالی از سد طالقان و آب زیرزمینی بوده و در حال حاضر با افت شدید سطح آبخوان روبه‌رو بوده و نسبت به تغییرات اقلیمی که بر روی منابع آبی آن اثرگذار هستند حساس است و لازم است نسبت به شناسایی این تغییرات در هر مقیاسی پرداخته شود. در این پژوهش تغییر اقلیم در دشت قزوین به صورت جامع مورد بررسی مکانی قرار گرفته و تغییرات دمایی و بارشی و روند خشکسالی مبتنی بر بارش و دما در آینده در سطح تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک موجود بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

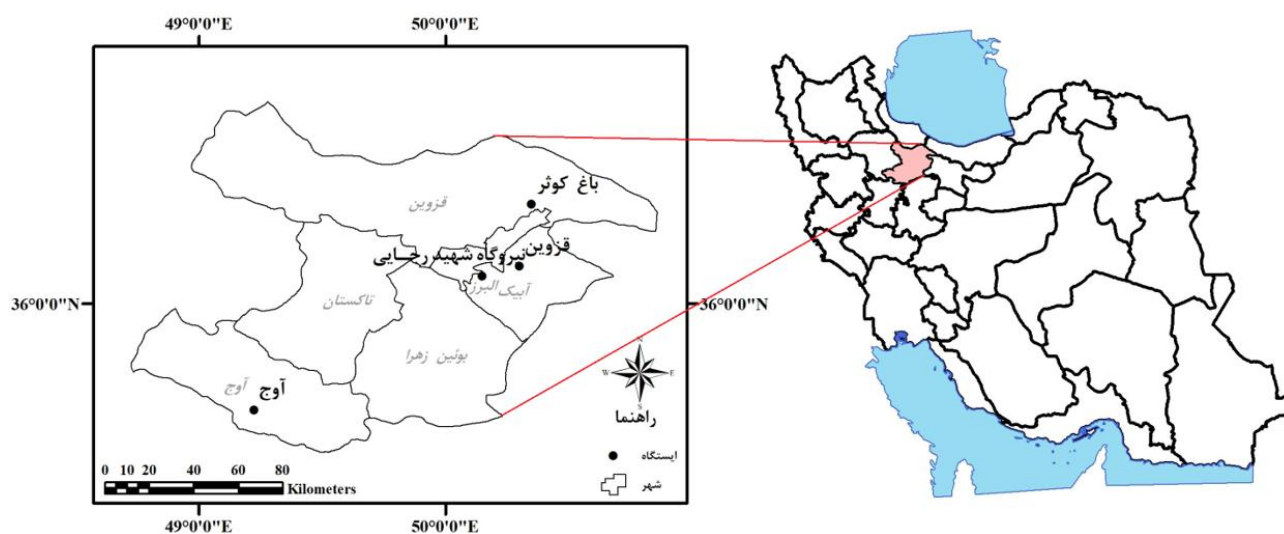
محدوده مورد مطالعه، استان قزوین در کشور ایران در موقعیت  $35^{\circ}19'43''$  تا  $49^{\circ}10'14''$  تا  $50^{\circ}41'06''$  طول شرقی و  $36^{\circ}30'49''$  عرض شمالی واقع شده است. حداکثر ارتفاع حوزه برابر ۲۹۷۱ متر و حداقل آن برابر ۱۱۰۰ متر از سطح دریا است. مساحت کل حوضه آبریز قزوین برابر با ۹۵۴۶ کیلومتر مربع است که ۵۰۵۹ کیلومتر مربع آن (۵۳٪) دشت و ۴۴۸۷ کیلومتر مربع آن (۴۷٪) را ارتفاعات تشکیل داده‌اند. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک استان قزوین در جدول ۱ آمده است و موقعیت محدوده مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

این ایستگاه‌ها در دوره مشاهداتی مدنظر این پژوهش، از آمار تقریباً کاملی برخوردار بوده و داده‌های گمشده از طریق رابطه رگرسیون با دیگر ایستگاه‌ها تکمیل شد. سری‌های زمانی بارش از نظر تصادفی بودن از طریق آزمون Run-Test با

مشاهداتی در ایستگاه مورد بررسی، توانایی شبیه‌سازی سری زمانی آب و هوای روزانه‌ای را خواهد داشت که از نظر آماری این سری زمانی روزانه با داده‌های مشاهداتی مشابه باشند. به طور گسترده از متغیرهای خروجی مولدهای آب و هوایی برای تغییرات اقلیمی پیش‌بینی شده AOGCMها برای تولید سری‌های بلندمدت داده‌های اقلیمی آینده استفاده می‌شوند که برای ارزیابی ریسک‌های کشاورزی و هیدرولوژیک مناسب است (۱۷). تغییر اقلیم بسته به موقعیت جغرافیایی هر مکان، به نحو متفاوتی اثرات خود را بروز می‌دهد (۱). برخی پژوهش‌های انجام شده برای اثرات تغییر اقلیم در ایران و نتایج گزارش شده توسط آنها، ماهیت پیچیده و متفاوت تغییر اقلیم را در هر محل نشان می‌دهد. در پژوهش کوچکی و همکاران (۱۴) تأثیر تغییر جهانی اقلیم بر شاخص‌های اقلیمی کشاورزی ایران برای سال ۲۰۵۰ میلادی (۱۳۳۰ خورشیدی) بر اساس سناریوی استاندارد IPCC توسط دو مدل گردش عمومی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این پژوهشگران نشان داد که میانگین دمای سالانه مناطق مختلف کشور تا سال ۲۰۵۰ بین ۳/۵ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد در حالی که میانگین بارش سالانه بین ۷ تا ۱۴ درصد کاهش خواهد یافت. افزون بر آن، این تغییرات را از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور شدیدتر پیش‌بینی کردند. بابائیان و کوهی (۲) میزان افزایش دما در انتهای قرن حاضر در ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه در شمال شرقی ایران را به ترتیب بین ۳/۳، ۲/۴ و ۳/۶ درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی کرده و همچنین گزارش کردند که در حالی که در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰ و ۲۰۶۹-۲۰۴۰ در ایستگاه تربت حیدریه و سبزوار افزایش بارش پیش‌بینی شده است اما در همین دوره ایستگاه مشهد شاهد کاهش بارش نسبت به دوره پایه خواهد بود و نتایج مدل‌سازی در رابطه با کاهش بارش در سومین دوره مدل‌سازی ۲۰۹۹-۲۰۷۰ در سه ایستگاه با هم هماهنگ بوده و در هر سه ایستگاه کاهش است. گوهری و همکاران (۱۰) در بررسی دشت رودخانه زاینده‌رود ایران (مرکز ایران) به این نتیجه رسیدند که به‌طور

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک محدوده طرح

نام ایستگاه	دوره آماری	نوع ایستگاه	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
قزوین	۱۹۵۶-۲۰۱۰	سینوپتیک	۱۲۷۹/۲	۴۳۷۰۲۹/۹	۴۰۰۰۸۱۳
آوج	۱۹۹۶-۲۰۰۹	سینوپتیک	۲۰۳۴/۹	۳۳۹۰۱۵/۷	۳۹۳۷۳۴۹
باغ کوثر	۱۹۸۶-۲۰۰۸	سینوپتیک	۱۲۲۵	۴۴۱۷۱۳/۹	۴۰۲۸۵۱۲
نیروگاه شهید رجایی	۱۹۸۶-۲۰۰۸	سینوپتیک	۱۲۸۵	۴۲۳۴۹۷/۲	۳۹۹۶۴۸۴



شکل ۱. موقعیت استان قزوین به همراه ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

آمده بین ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ و برای سری بارش بین ۰/۶۴ تا ۰/۹۶ به دست آمد که با توجه به سطوح معنی داری ضریب همبستگی  $R^2$  این مقادیر معنی دار و نتایج قابل قبول است. سناریوهای انتشار مورد استفاده در این پژوهش سناریوهای A1B، B1 و A2 بوده و برای هر یک از ۴ ایستگاه سینوپتیک، از داده‌های بزرگ مقیاس شامل میانگین‌های دمای بیشینه، دمای کمینه، دمای متوسط و بارش در دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ و دوره‌های آینده نزدیک ۲۰۵۰-۲۰۲۱ و آینده دور ۲۰۸۰-۲۰۵۱ (دوره‌های ۳۰ ساله) در موقعیت جغرافیایی هر یک از ایستگاه‌ها از وبسایت IPCC استفاده شد. از آنجایی که هر یک از این AOGCMها در قالب یک سلول ۴ نقطه‌ای میانگین‌های بزرگ مقیاس متغیرهای اقلیمی را مورد بررسی می

نرم‌افزار SPSS و از نظر همگن بودن از طریق رسم منحنی جرم مضاعف مورد بررسی و تأیید قرار گرفت.

#### مطالعات اقلیمی

در این پژوهش از مدل‌های اقلیمی CSIRO-MK3، Hadcm3، GFDL، CGCM3 و MICROC3.2 بهره گرفته شد تا با استفاده از میانگین خروجی این مدل‌ها بتوان به اجماع نظر و دید کاملی از آینده منطقه طرح رسید (۳، ۱۰ و ۳۰). برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده توسط مدل‌های اقلیمی، بین سری شبیه سازی شده دما و بارش در دوره مشاهداتی و سری داده‌های مشاهداتی در تمام ایستگاه‌ها خط رگرسیون برازش داده شد و در مورد سری دما در تمام ایستگاه‌ها، ضریب همبستگی به دست

سناریوی انتشار، در هر ایستگاه و هر دوره زمانی، در بین ۵ مدل AOGCM مورد مقایسه قرار می‌گیرد و حالتی که در آن مقدار باران کمتر و مقدار افزایش دما بیشتر باشد به‌عنوان سناریوی بحرانی در نظر گرفته می‌شود که کران بالای تغییرات و خیم اقلیمی در منطقه مورد مطالعه را به‌دست می‌دهد. حالتی که در آن افزایش دما کمتر و بارش بیشتر باشد به‌عنوان سناریوی ایده‌آل تغییرات اقلیمی آینده شمرده شده و کران پایین و خامت شرایط اقلیمی آینده را نشان می‌دهد و حالت میانی، شرایطی بین این دو حالت را دارد (۳). به این ترتیب نسبت میانگین‌های متغیرهای اقلیمی آینده به دوره مشاهداتی برای ساختن سناریوهای جدید برای پیش‌بینی شرایط احتمالی ایده‌آل، بحرانی و میانی برای تعریف سناریو در نرم‌افزار LARS-WG به‌دست می‌آید. با این کار، ۷۲ حالت بررسی از ترکیب سه سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای در کنار سه سناریوی احتمالاتی (از ترکیب احتمال وقوع هر یک از مقادیر متغیرهای دما و بارش از برون‌داد ۵ مدل اقلیمی) در دو دوره زمانی برای ۴ ایستگاه مورد مطالعه به‌دست می‌آید. این سناریوهای طراحی شده وضعیت‌های میانه و حدی انتشار گاز گلخانه‌ای در آینده را تخمین می‌زنند. داده‌های مشاهداتی واقعی در دوره پایه نیز به‌صورت سری ۳۰ ساله برای معرفی شرایط واقعی منطقه به نرم‌افزار LARS-WG تهیه شد. LARS-WG یک مولد آب و هوایی تصادفی است که داده‌های اقلیمی آینده را از روی داده‌های ثبت شده یک ایستگاه، شبیه‌سازی می‌کند. اولین نسخه این مدل به‌عنوان ابزاری برای خرد مقیاس‌نمایی آماری در ارزیابی ریسک کشاورزی در بوداپست مجارستان در سال ۱۹۹۰ ابداع شد و از آن پس نسخه‌های جدید آن توسط سمف توسعه یافت. این مولد از یک توزیع نیمه‌تجربی یا SED برای تقریب زدن تابع توزیع احتمالاتی سری‌های خشک و تر، بارندگی، دمای حداقل و حداکثر و تابش خورشیدی روزانه استفاده می‌کند (۲۱).

خروجی‌ها شامل سری داده‌های دمای بیشینه، دمای کمینه، بارش برای دو دوره زمانی آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۵۰ و آینده

دهند لازم است به شیوه صحیح این ۴ عدد را تبدیل به یک عدد واحد کرد. در این پژوهش وزن تأثیر مقدار عددی هر متغیر در هر یک از ۴ نقطه سلول بزرگ مقیاس روی میانگین همان متغیر در موقعیت هر ایستگاه به نسبت فاصله‌ای که از موقعیت جغرافیایی ایستگاه موردنظر داشته، در نظر گرفته شده است. رابطه محاسبه فاصله بین نقاط سلول مدل AOGCM و ایستگاه و وزن‌دهی آن به‌صورت روابط ۱ و ۲ بوده است (۳):

$$D = \sqrt{(\text{latitude}(\text{GCM})_i - \text{latitude}(\text{station})_i)^2 + (\text{longitude}(\text{GCM})_i - \text{longitude}(\text{station})_i)^2} \quad (1)$$

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{GCM}} \times \frac{1}{D_i}}{\sum \frac{1}{D_i}} \quad (2)$$

که در آن D مقدار فاصله و T وزن تأثیر هر یک از ۴ نقطه سلول متغیرهای اقلیمی بزرگ‌مقیاس است. با این روش مقادیر بزرگ‌مقیاس دمای بیشینه، دمای کمینه، دمای متوسط و مقدار بارش از حالت ۴ مقادیر یک سلول AOGCM به یک عدد واحد تبدیل شدند. این کار برای تمام AOGCM‌ها در تمام سناریوهای انتشار گاز CO<sub>2</sub> و برای هر سه دوره زمانی و هر ۴ ایستگاه انجام شد و میانگین‌های ماهانه متغیرهای اقلیمی ۱۲۰ سری داده بزرگ‌مقیاس را تشکیل دادند. داده‌های بزرگ‌مقیاس میانگین دما و بارش دو دوره آینده در تمامی مدل‌ها و سناریوهای انتشار با همان داده‌ها در دوره مشاهداتی در همان مدل‌ها و سناریوها نسبت گرفته شد که در روابط ۳ و ۴ آمده است:

$$\Delta T = T_{\text{future}} - T_{\text{base}} \quad (3)$$

$$\Delta P = \frac{P_{\text{future}}}{P_{\text{base}}} \quad (4)$$

که در آن  $\Delta T$ ، مقدار تغییرات میانگین دمای بزرگ‌مقیاس در دوره آینده نسبت به دوره پایه و  $\Delta P$  تغییرات میانگین بارش بزرگ‌مقیاس در دوره آینده نسبت به دوره پایه را در هر یک از AOGCM‌ها و سناریوهای انتشار نشان می‌دهد. برای تهیه فایل ورودی نرم‌افزار LARS-WG، سناریوسازی انجام شد به این صورت که مقادیر به‌دست آمده دمای میانگین و بارش در هر

شاخص SPI از تابع چگالی توزیع گاما و گاهی از تابع پیرسون برای برازش داده‌های بلندمدت بارش استفاده می‌شود که پس از انجام محاسبات لازم و تعیین متغیرهای مربوطه شاخص SPI به صورت مقادیر مثبت و منفی بیان می‌شود (۱۲ و ۲۹). شاخص بارش - تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد شده SPEI توسط وینسنته-سرانو و همکاران (۲۸) ارائه و به عنوان یک شاخص خشکسالی اقلیمی معرفی شد. این شاخص مبتنی بر محاسبه بیلان آب اقلیمی بوده و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای هوا نیاز دارد. معادله بیلان آب اقلیمی به صورت زیر است:

$$D = P_i - PET_i \quad (5)$$

که در آن P و PET به ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل، D تفاوت آنها و i شماره ماه است. پس از محاسبه مقادیر D یک توزیع احتمال مناسب بر سری تجمعی آن برازش داده می‌شود و توزیع لوگ-لجستیک سه پارامتری کارایی مناسبی در مدل سازی این سری دارد (۳). در این پژوهش برای محاسبه تبخیر و تعرق از روش تورنت وایت استفاده شده و برای محاسبه شاخص‌های SPI و SPEI از برنامه R بهره گرفته شد. در جدول ۲ طبقه‌بندی خشکسالی برای این شاخص‌ها آورده شده است.

### نتایج و بحث

در این پژوهش به جز متغیر بارش روزانه در ماه سپتامبر ( $P \text{ value} = 0/0002$ )، دمای بیشینه ماهانه در ماه می ( $P \text{ value} = 0/009$ ) و دسامبر ( $P \text{ value} = 0/026$ ) در ایستگاه باغ کوثر، متغیر بارش روزانه در ماه آگوست ( $P \text{ value} = 0/03$ )، متغیر دمای کمینه ماهانه در ماه آوریل ( $P \text{ value} = 0/01$ ) و ماه می ( $P \text{ value} = 0/034$ ) و متغیر دمای بیشینه ماهانه در ماه آوریل ( $P \text{ value} = 0/001$ ) در ایستگاه قزوین و متغیر بارش روزانه در ماه سپتامبر در ایستگاه نیروگاه (به دلیل عدم بارش در این ماه در دوره مشاهداتی) مدل نتوانسته شبیه‌سازی خوبی داشته باشد اما بقیه شبیه‌سازی‌ها، به خوبی انجام شدند.

دور ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و دوره پایه بود. آزمون‌های آماری به کار گرفته شده برای مقایسه میانگین و انحراف معیار توزیع‌های احتمال و ارزیابی قابلیت مدل، آزمون کلموگروف اسمیرنوف (برای آزمون نرمال بودن داده‌ها) و آزمون تی استیودنت (برای ارزیابی میزان هم قوارگی میانگین نمونه‌ای با میانگین جامعه) بوده که توسط خود مدل انجام شد. در هر یک از آزمون‌ها فرض صفر یکسان بودن دو توزیع مشاهداتی و محاسباتی در سطح احتمال ۹۵ یا ۹۹ درصد محاسبه شدند و اگر مقدار این احتمال خیلی کوچک و کمتر از سطح معنی داری (۰/۰۵ یا ۰/۰۱) باشد، فرض صفر رد شده و نتیجه‌گیری می‌شود که داده‌های شبیه‌سازی شده تولیدی و داده‌های واقعی از نظر آماری یکسان نیستند (۷).

### شاخص خشکسالی SPI و SPEI

شاخص بارش استاندارد شده یا SPI به وسیله مک‌کی و همکاران (۱۸) به منظور پایش وضعیت خشکسالی در کلورادو ارائه شد. در این روش برای تعیین خشکی و تری در هر ایستگاه یک سیستم طبقه‌بندی معینی برای مقادیر به دست آمده SPI تعیین و معرفی شده است که بیانگر شدت‌های متفاوتی از خشکسالی در یک منطقه است. ویژگی دیگر این شاخص این است که بر اساس این روش می‌توان آستانه خشکسالی را برای هر دوره زمانی تعیین کرد. بنابراین بر اساس این شاخص علاوه بر شدت خشکسالی، مدت آن را نیز می‌توان تعیین کرد. شاخص بارش استاندارد شده بر اساس احتمال بارش برای هر بازه زمانی است. این شاخص برای کمی کردن کمبود بارش در بازه‌های زمانی چندگانه طراحی شده است. مقیاس‌های زمانی متفاوت در نظر گرفته شده در این شاخص، اثرات ویژه خشکسالی را روی قابلیت دسترسی به منابع آبی مختلف بیان می‌کنند به نحوی که شرایط رطوبتی خاک، نسبت به ناهنجاری‌های کوتاه‌مدت بارندگی واکنش نشان می‌دهد و با SPI سه‌ماهه بررسی می‌شود در صورتی که آب‌های سطحی و زیرزمینی تحت تأثیر ناهنجاری‌های درازمدت قرار دارند و با SPI‌های ۲۴ ماهه و طولانی‌تر سر و کار دارد. برای محاسبه

جدول ۲. ضرایب شاخص خشکسالی SPI و SPEI

مقادیر SPI و SPEI	فراوانی تجمعی (درصد)	وضعیت
۲- و کمتر	کمتر از ۲/۳	فرین
-۱/۹۹ تا -۱/۵۰	۲/۳ تا ۶/۷	شدید
-۱ تا -۱/۴۹	۱۵/۹ تا ۶/۸	متوسط
۰/۹۹ تا ۰/۹۹	۸۳/۹ تا ۱۶	نرمال
۱ تا ۱/۴۹	۸۴ تا ۹۳/۲	متوسط
۱/۹۹ تا ۱/۵۰	۹۷/۷ تا ۹۳/۳	شدید
۲ و بیشتر	بیش از ۹۷/۷	فرین

در ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در تمام ایستگاه‌ها به جز باغ کوثر، سناریوی ترکیبی A2 ایده‌آل و فقط در ایستگاه باغ کوثر سناریوی ترکیبی AIB ایده‌آل، بیشترین افزایش نسبت بارندگی را که بالای ۱/۴ برابر نسبت به دوره مشاهداتی بوده است را پیش‌بینی کرده است و سناریوی ترکیبی AIB بحرانی بیشترین میزان تغییرات کاهشی بارندگی که در حدود نصف دوره مشاهداتی بوده را گزارش کرده است. بارندگی در دوره زمانی ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نیز در تمام ایستگاه‌ها، در سناریوی ترکیبی A2 ایده‌آل، بیشترین افزایش نسبت بارندگی را که در حدود ۱/۷ برابر نسبت به دوره مشاهداتی بوده است را پیش‌بینی کرده و بیشترین میزان تغییرات کاهشی بارندگی در تمام ایستگاه‌ها در سناریوی ترکیبی AIB بحرانی و A2 بحرانی بوده که این مقدار کاهش بارندگی در حدود نصف دوره مشاهداتی بوده است. بنا بر مدل‌سازی و مشاهدات، بیشترین افزایش بارندگی برابر با ۱/۷۷ برابر دوره مشاهداتی در دوره زمانی ۲۰۵۱-۲۰۸۰ در سناریوی ترکیبی A2 ایده‌آل در ایستگاه آوج پیش‌بینی شده و بیشترین کاهش بارندگی نیز برابر با ۰/۴۹ مقدار دوره مشاهداتی در دوره زمانی ۲۰۵۱-۲۰۸۰ در سناریوی A2 بحرانی در ایستگاه قزوین انتظار می‌رود. در کل در مورد متغیر بارندگی دوره زمانی ۲۰۵۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ افزایش ۳۰ درصدی بیشترین افزایش بارندگی محتمل را در تمام سناریوهای ترکیبی نسبت به دوره مشاهداتی نشان می‌دهد. برای دما در دوره زمانی ۲۰۵۱-۲۰۸۰ در تمام

در جدول‌های ۳ و ۴ پیش‌بینی‌های احتمالاتی تغییرات در سناریوهای ترکیبی مختلف از دو متغیر اقلیمی دما و بارش در ۴ ایستگاه در سطح استان قزوین در دو دوره زمانی ۳۰ ساله تا سال ۲۰۸۰ ارائه شده است. این تغییرات در مورد متغیر دما به صورت تغییرات مطلق نسبت به دوره مشاهداتی گزارش شده و برای متغیر بارش به صورت نسبی، نسبت به دوره مشاهداتی نشان داده شده است. در دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در تمام ایستگاه‌ها برای متغیر بارش، در کمترین حالت پیش‌بینی شده از بین ۵ مدل اقلیمی به کار گرفته شده در سناریوی انتشار گاز گلخانه‌ای AIB، نسبت بارندگی دوره آینده به دوره مشاهداتی برابر با ۰/۵۳ بوده و در بیشترین حالت پیش‌بینی شده در سناریوی انتشار گاز گلخانه‌ای A2، در ایستگاه آوج این نسبت به ۱/۴۷ می‌رسد. همچنین متغیر دما در بین ۵ مدل اقلیمی نام برده در دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در سناریوی انتشار گاز گلخانه‌ای AIB، در بدترین حالت (بیشترین افزایش در این سناریو) ۱/۶۸ درجه سانتی‌گراد افزایش نشان داده و در بهترین حالت B1 ایده‌آل از بین ۵ مدل اقلیمی ۰/۱۱ - درجه سانتی‌گراد کاهش نشان داده است. در همه ایستگاه‌ها در هر دو دوره زمانی، مقدار متغیر بارش در سناریوی ایده‌آل در حالت بیشینه خود از دو سناریوی میانگین و بحرانی به نسبت دوره مشاهداتی بیشتر بوده و متغیر دما در سناریوی ایده‌آل، کمترین میزان افزایش خود را نسبت به دوره مشاهداتی به نسبت دو سناریوی میانگین و بحرانی تجربه کرده است. در متغیر بارندگی در دوره زمانی

جدول ۳. میزان نسبت تغییرات دما و بارندگی در سناریوهای مختلف در ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره زمانی آینده نزدیک ۲۰۵۰-۲۰۲۱

بارندگی				دما				ایستگاه	سناریوها								
آوج	قزوین	باغ کوثر	نیروگاه	آوج	قزوین	باغ کوثر	نیروگاه										
کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه										
۰/۹۵	۰/۵۳	۰/۹۳	۰/۵۳	۰/۹۳	۰/۵۷	۰/۹۴	۰/۵۵	۱/۶۸	۰/۹۸	۱/۵۹	۰/۹۷	۱/۴۴	۰/۸۸	۱/۵۳	۰/۹۴	بحرانی	A1B
۱/۳۳	۰/۹۵	۱/۴۱	۰/۹۶	۱/۴۱	۰/۹۶	۱/۳۷	۰/۹۶	۱/۱۱	۰/۳۵	۱/۱۳	۰/۳۶	۱/۰۴	۰/۳۳	۱/۰۹	۰/۳۴	ایده آل	A1B
۱/۰۵	۰/۸۹	۱/۰۵	۰/۸۸	۱/۰۴	۰/۸۸	۱/۰۴	۰/۸۹	۱/۳۸	۰/۷۶	۱/۲۹	۰/۷۲	۱/۱۸	۰/۶۶	۱/۲۴	۰/۷۱	میانگین	A1B
۰/۹۸	۰/۶۳	۰/۹۹	۰/۶۳	۰/۹۹	۰/۶۵	۰/۹۹	۰/۶۴	۱/۵۷	۰/۶۷	۱/۴۵	۰/۶۷	۱/۳۲	۰/۶۱	۱/۳۶	۰/۶۴	بحرانی	A2
۱/۴۷	۰/۹۹	۱/۴۳	۱	۱/۳۶	۱	۱/۴۱	۰/۹۹	۱/۱۱	۰/۴۲	۱/۰۶	۰/۳۸	۰/۹۷	۰/۳۴	۱/۰۲	۰/۳۷	ایده آل	A2
۱/۱۲	۰/۸۹	۱/۰۵	۰/۹۱	۱/۰۵	۰/۹۱	۱/۰۵	۰/۹	۱/۲۹	۰/۵۷	۱/۲۱	۰/۵۵	۱/۱۱	۰/۵۱	۱/۱۷	۰/۵۳	میانگین	A2
۰/۹۸	۰/۵۹	۰/۹۷	۰/۵۶	۰/۹۷	۰/۵۹	۰/۹۷	۰/۵۸	۱/۳۴	۰/۷۵	۱/۲۴	۰/۷۳	۱/۱۳	۰/۶۷	۱/۱۹	۰/۷۱	بحرانی	B1
۱/۱۹	۱/۰۱	۱/۲۲	۱/۰۲	۱/۲۱	۱/۰۲	۱/۲۱	۱/۰۲	۰/۹۵	-۰/۰۹	۰/۸۲	-۰/۱۱	۰/۷۳	-۰/۰۹	۰/۸۱	-۰/۰۹	ایده آل	B1
۱/۰۵	۰/۸۴	۱/۰۵	۰/۸۳	۱/۰۵	۰/۸۴	۱/۰۵	۰/۸۴۷	۱/۱۲	۰/۶۱	۱/۰۹	۰/۵۷	۰/۹۹	۰/۵۲	۱/۰۵	۰/۵۵	میانگین	B1
۱/۴۷	۰/۵۳	۱/۴۳	۰/۵۳	۱/۴۱	۰/۵۷	۱/۴۱	۰/۵۵	۱/۶۸	-۰/۰۹	۱/۵۹	-۰/۱۱	۱/۴۴	-۰/۰۹	۱/۵۳	-۰/۰۹	کل	

جدول ۴. میزان نسبت تغییرات دما و بارندگی در سناریوهای مختلف در ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره زمانی آینده ۲۰۸۰-۲۰۵۱

بارندگی				دما				ایستگاه	سناریوها								
آوج	قزوین	باغ کوثر	نیروگاه	آوج	قزوین	باغ کوثر	نیروگاه										
کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه	بیشینه										
۰/۹۲	۰/۵۳	۰/۹۳	۰/۵۱	۰/۹۳	۰/۵۳	۰/۹۳	۰/۵۲	۲/۷۵	۱/۶۷	۲/۶۱	۱/۶۵	۲/۳۸	۱/۵۱	۲/۵۲	۱/۵۸	بحرانی	A1B
۱/۴۹	۰/۹۴	۱/۴۹	۰/۹۷	۱/۴۳	۰/۹۷	۱/۴۷	۰/۹۷	۱/۹۱	۱/۰۸	۱/۸۱	۱/۱۱	۱/۶۴	۱	۱/۷۵	۱/۰۶	ایده آل	A1B
۱/۰۳	۰/۷۶	۱/۰۳	۰/۷۸	۱/۰۲	۰/۸۱	۱/۰۳	۰/۷۹	۲/۳۱	۱/۴۳	۲/۱۳	۱/۴۲	۱/۹۴	۱/۳۱	۲/۰۶	۱/۳۷	میانگین	A1B
۰/۹۹	۰/۵۳	۰/۹۸	۰/۴۹	۰/۹۸	۰/۵۳	۰/۹۸	۰/۵۲	۲/۶۸	۱/۵۸	۲/۶۳	۱/۵۷	۲/۳۹	۱/۴۴	۲/۵۳	۱/۵۱	بحرانی	A2
۱/۷۷	۰/۹۵	۱/۷۳	۰/۹۷	۱/۶۳	۰/۹۸	۱/۷۱	۰/۹۷	۱/۹۲	۱/۰۳	۱/۸۵	۱	۱/۶۸	۰/۹۱	۱/۷۹	۰/۹۶	ایده آل	A2
۱/۰۶	۰/۸۱	۱/۰۶	۰/۸۲	۱/۰۵	۰/۸۲	۱/۰۶	۰/۸۲	۲/۳۲	۱/۴۱	۲/۱۸	۱/۴۱	۱/۹۸	۱/۲۹	۲/۱۱	۱/۳۵	میانگین	A2
۰/۹۸	۰/۵۶	۱	۰/۵۱	۱	۰/۵۵	۱	۰/۵۴	۲/۱۵	۱/۱۶	۱/۸۵	۱/۱۲	۱/۶۹	۱	۱/۷۸	۱/۰۶	بحرانی	B1
۱/۳۴	۰/۹۴	۱/۳۱	۰/۹۹	۱/۳۱	۱	۱/۲۹	۰/۹۷	۱/۳۹	۰/۶۵	۱/۳۱	۰/۶۷	۱/۱۷	۰/۶۲	۱/۲۵	۰/۶۴	ایده آل	B1
۱/۱۲	۰/۸۶	۱/۱۱	۰/۸۵	۱/۰۸	۰/۸۵	۱/۱۱	۰/۸۶	۱/۶۸	۱/۰۲	۱/۵۶	۰/۹۶	۱/۴۲	۰/۸۸	۱/۵۱	۰/۹۳	میانگین	B1
۱/۷۷	۰/۵۳	۱/۷۳	۰/۴۹	۱/۶۳	۰/۵۳	۱/۷۱	۰/۵۲	۲/۷۵	۰/۶۵	۲/۶۳	۰/۶۷	۲/۳۹	۰/۶۲	۲/۵۳	۰/۶۴	کل	



افزایش نسبی در حد ۱/۴۷ برابر مقدار مشاهداتی نیز به‌دست آمد ولی همان‌طور که ایشان پیش‌بینی کرده بودند که این تغییرات از غرب به شرق و از شمال به جنوب کشور شدیدتر باشد این مسئله با توجه به موقعیت جغرافیایی استان قزوین همخوانی دارد. نتایج این پژوهش مطابق نتایج پژوهش بابائیان و کوهی (۲) است که پیش‌بینی کردند که در انتهای قرن حاضر دما به اندازه ۳/۳، ۲/۴ و ۳/۶ درجه سانتی‌گراد در ایستگاه‌های مشهد، سبزوار و تربت حیدریه افزایش خواهد یافت البته در ایستگاه‌های مورد بررسی در دشت قزوین این افزایش در بیشترین حالت خود به‌اندازه ۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد در ایستگاه آوج تخمین زده شد و مطابق با نتایج ایشان که در مورد ایستگاه‌های تربت حیدریه و سبزوار اثر افزایش بارندگی و در ایستگاه مشهد اثر کاهش بارندگی پیش‌بینی کرده بودند در پژوهش حاضر نیز هم افزایش و هم کاهش بارندگی در دوره‌های آینده بسته به سناریوها مورد انتظار است. همچنین همان‌گونه که گوهری و همکاران (۱۰) در دشت رودخانه زاینده رود به این نتیجه رسیدند که به‌طور متوسط در آینده در اثر تغییر اقلیم، دمای ماهانه بین ۱/۱ تا ۱/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت در دشت قزوین نیز در بیشترین حالت بین ۱/۶۸ درجه سانتی‌گراد تا انتهای سال ۲۰۵۰ و ۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد تا انتهای سال ۲۰۸۰ افزایش خواهد یافت ولی در مورد وضعیت بارندگی نتایج این پژوهش با نتایج گوهری و همکاران (۱۰) تا حدی متفاوت بود چرا که ایشان کاهش بارندگی بین ۱۱ تا ۳۱ درصد در دشت رودخانه زاینده‌رود تخمین زده بودند اما در پژوهش حاضر (دشت قزوین) در ایستگاه‌ها در برخی سناریوها کاهشی تا ۰/۴۹ و افزایشی تا ۱/۷۷ نسبت به دوره مشاهداتی تخمین زده شد. در کل در پژوهش حاضر دما روندی افزایشی را نشان داده اما بارش مانند دما الگوی مشخصی نداشته است. پیش‌بینی افزایش بارندگی در برخی سناریوهای پژوهش حاضر برابر با نتایج برخی پژوهشگران است که افزایش بارش در عرض‌های جغرافیایی بالا را در اثر تغییر اقلیم پیش‌بینی کرده‌اند. از طرفی پدیده بارش

ایستگاه‌ها، در سناریوی ترکیبی AIB بحرانی و سناریوی A2 بحرانی، بیشترین افزایش مقدار برابر بین ۲/۵۲ تا ۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به میانگین دوره مشاهداتی پیش‌بینی شده و کمترین میزان تغییرات افزایشی دما در تمام ایستگاه‌ها در سناریوی ترکیبی B1 ایده‌آل نشان داده شده است که برابر با ۰/۶۲ درجه سانتی‌گراد بیشتر از میانگین دوره مشاهداتی بوده است. بنا بر پژوهش انجام شده، بیشترین افزایش دما در ایستگاه آوج و در دوره زمانی ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و در سناریوی ترکیبی AIB بحرانی به اندازه ۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد و کمترین تغییرات دما در ایستگاه قزوین و در سناریوی B1 ایده‌آل در دوره زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۱ برابر با ۰/۱ درجه سانتی‌گراد کمتر از مقدار میانگین آن در دوره مشاهداتی پیش‌بینی شده است.

در کل، دوره زمانی ۲۰۸۰-۲۰۵۱ دما نسبت به دوره زمانی ۲۰۵۰-۲۰۲۱ افزایش ۶۵ درصدی بیشترین افزایش دمای محتمل در تمام سناریوهای ترکیبی نسبت به دوره مشاهداتی را نشان داده است. حتی کمترین دماهای تخمین زده شده در تمامی سناریوها و ایستگاه‌ها در دوره زمانی دوم نسبت به دوره زمانی اول افزایش نشان داده است. با تکیه بر نتایج پژوهش حاضر، افزایش دما در آینده محتمل است هرچند که بارندگی در برخی سناریوها در آینده افزایش حتی تا ۱/۷۷ برابر نسبت به دوره مشاهداتی را نشان می‌دهد از طرفی در برخی سناریوها کاهشی تا ۰/۴۹ مقدار آن در دوره مشاهداتی را نشان می‌دهد. این نتیجه همسو با پژوهش کوچکی و همکاران (۱۴) در مورد متغیر دما بوده که ایشان افزایشی برابر با ۳/۵ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد برای میانگین دمای سالانه مناطق مختلف کشور تا سال ۲۰۵۰ انتظار داشتند که در پژوهش حاضر نیز تا پایان سال ۲۰۵۰ در بیشترین حالت در ایستگاه آوج افزایش دمایی به اندازه ۱/۶۸ درجه سانتی‌گراد به‌دست آمد اما کوچکی و همکاران (۱۴) در مورد متغیر بارش، کاهشی ۷ تا ۱۴ درصد پیش‌بینی کرده بودند که در پژوهش حاضر تا پایان سال ۲۰۵۰ بسته به هر سناریو و ایستگاه هم اثر کاهشی و هم افزایشی مشاهده شد به‌نحوی که در بیشترین حالت در ایستگاه آوج

بلندمدت، کاهش نشان داده و فقط در مورد ایستگاه نیروگاه در بازه ۳ ماهه مقدار مجموع توالی‌های منفی نسبت به دوره پایه افزایش داشته است. برعکس در ایستگاه باغ کوثر مقدار مجموع توالی‌های منفی در همه بازه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت افزایش نشان داده است. بنابراین با توجه به نتایج جدول ۵ و با در نظر گرفتن شاخص SPI در ایستگاه باغ کوثر تعداد رویدادهای خشکسالی و بزرگی آن در آینده نسبت به دوره مشاهداتی در حال افزایش است و به‌خصوص در آینده نزدیک بیشینه تداوم دوره‌های خشک هم در بازه یک‌ساله افزایش زیادی نشان می‌دهد. اما در ایستگاه آوج و قزوین نوع خشکسالی محتمل به سمت افزایش تعداد رویدادهای خشکسالی و پرتکرار شدن این واقعه می‌رود اما در مقدار بزرگی خشکسالی حتی کاهش نیز دیده می‌شود. در ایستگاه نیروگاه خشکسالی‌ها در بازه‌های کوتاه‌مدت هم از نظر تکرار وقوع و هم از نظر بزرگی مقدار، افزایش دارد اما در بازه‌های بلندمدت خشکسالی بیشتر از بابت تعداد رخداد افزایش نشان می‌دهد و مجموع توالی‌های منفی با کاهش اندکی نیز روبه‌رو است. به‌عنوان نمونه شکل ۲ روند خشکسالی و ترسالی به‌دست آمده از شاخص SPI را در آینده ایستگاه آوج نشان می‌دهد.

با بررسی شاخص SPEI با توجه به جدول ۶ که هر دو متغیر اثر بارندگی و تبخیر و تعرق را همزمان در نظر می‌گیرد تعداد دوره‌های خشک در تمام ایستگاه‌ها در هر دو دوره آینده نسبت به مشاهداتی افزایش یافته به‌جز ایستگاه قزوین که در بازه‌های بلندمدت کاهش نشان داده است. بیشینه تداوم دوره‌های خشک در همه ایستگاه‌ها در بازه کوتاه‌مدت در آینده تقریباً ثابت بوده به‌جز ایستگاه نیروگاه که کاهش تا نصف را نشان داده است اما در بازه‌های بلندمدت در تمام ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه نیروگاه بیشینه تداوم دوره خشکسالی کاهش یافته است و فقط در ایستگاه نیروگاه این مقدار در بازه ۲۴ ماهه در افق ۲۰۸۰ با افزایش روبه‌رو است. میانگین شدت خشکسالی در تمام ایستگاه‌ها در بازه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت تقریباً ثابت است. مجموع توالی‌های منفی در تمام ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه قزوین در تمام بازه‌های کوتاه و بلندمدت در دوره‌های آینده

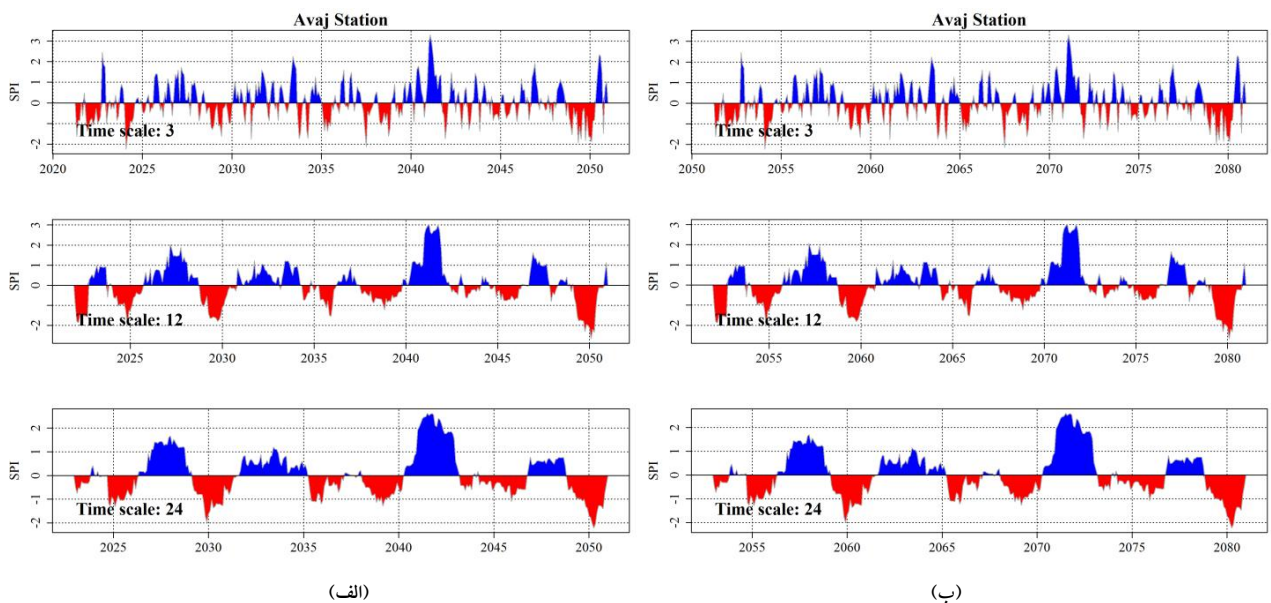
به مسائل دیگری نیز ارتباط دارد که تأثیر پیچیده‌ای بر آن می‌گذارد از آن جمله می‌توان به در دسترس بودن رطوبت و فرایند چگالش اشاره کرد. زمانی که شاخص SPI و SPEI دارای توالی‌های منفی باشد یعنی خشکسالی رخ داده است و هرچه مقدار آن منفی‌تر باشد یعنی خشکسالی رخ داده بزرگ‌تر بوده است. بنابراین با بررسی تداوم و مجموع توالی‌های منفی در هر دوره می‌توان وضعیت خشکی رخ داده را بررسی کرد.

با بررسی شاخص SPI که فقط متغیر بارندگی را در نظر می‌گیرد تعداد دوره‌های خشک در تمام ایستگاه‌ها در بازه ۳ ماهه در هر دو دوره آینده افزایش نشان داده است فقط در ایستگاه قزوین و باغ کوثر، این مقدار افزایش در تعداد دوره‌های خشک در آینده دور کمتر از آینده نزدیک بوده است. تعداد دوره‌های خشک در تمام ایستگاه‌ها در بازه ۱۲ ماهه افزایش نشان داده و در بازه ۲۴ ماهه، مقدار افزایش در تعداد دوره‌های خشک در آینده دور کمتر از آینده نزدیک بوده است ولی روند افزایشی در تمام ایستگاه‌ها نسبت به دوره مشاهداتی دیده می‌شود و نشان‌دهنده افزایش رویدادهای خشکسالی در آینده این دشت است. بیشینه تداوم دوره‌های خشک در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت و بلندمدت روندی متفاوت در ایستگاه‌ها دارد. بیشینه تداوم دوره‌های خشک در بازه ۳ ماهه در ایستگاه‌های باغ کوثر و قزوین در دو دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی کاهش داشته و در ایستگاه نیروگاه ثابت بوده اما در ایستگاه آوج افزایش نشان داده است اما در همین ایستگاه در بازه‌های طولانی‌مدت ۱۲ و ۲۴ ماهه بیشینه تداوم دوره‌های خشک با کاهش مواجه شده است. بیشینه تداوم دوره‌های خشک در ایستگاه باغ کوثر در بازه ۱۲ ماهه در آینده نزدیک افزایشی و در آینده دور کاهش است ولی این مقدار در ایستگاه نیروگاه در هر دو بازه ۱۲ و ۲۴ ماهه در هر دو دوره آینده روندی کاهش نشان داده است. میانگین شدت خشکسالی در تمام ایستگاه‌ها و بازه‌های ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه روندی کاهش نسبت به دوره مشاهداتی نشان داده است. مجموع توالی‌های منفی کل دوره در ۳ ایستگاه آوج، قزوین و نیروگاه در دوره‌های آینده به نسبت دوره مشاهداتی در بازه‌های کوتاه‌مدت و

جدول ۵. مقایسه تغییرات متغیرهای خشکسالی شاخص SPI در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و آینده دور (۲۰۵۱-۲۰۸۰) ایستگاه‌های مورد

بررسی نسبت به دوره مشاهداتی

نام ایستگاه	دوره زمانی	تعداد دوره‌های خشک (ماه)			بیشینه تداوم دوره خشک (ماه)			میانگین شدت خشکسالی			مجموع توالی‌های منفی در کل دوره		
		۳ماهه	۱۲ماهه	۲۴ماهه	۳ماهه	۱۲ماهه	۲۴ماهه	۳ماهه	۱۲ماهه	۲۴ماهه	۳ماهه	۱۲ماهه	۲۴ماهه
آوج	دوره مشاهداتی	۱۶۷	۱۵۲	۱۵۸	۱۵	۴۳	۵۱	-۰/۸	-۰/۹	-۰/۸	-۱۳۳/۴	-۱۳۴/۳	-۱۳۰/۸
	سناریوی A2-mean (۲۰۵۰-۲۰۲۱)	۱۸۴	۱۷۷	۱۸۴	۲۰	۲۸	۳۱	-۰/۷	-۰/۷	-۰/۷	-۱۲۶/۳	-۱۳۰/۵	-۱۲۸/۹
	سناریوی A2-mean (۲۰۸۰-۲۰۵۱)	۱۸۵	۱۷۷	۱۷۸	۲۰	۲۷	۳۱	-۰/۷	-۰/۷	-۰/۷	-۱۲۶/۵	-۱۳۰/۷	-۱۲۸/۴
	دوره مشاهداتی	۱۲۵	۱۲۲	۱۲۲	۱۰	۳۲	۶۵	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۷	-۹۲	-۹۹/۶	-۹۷/۹
باغ کوثر	سناریوی A2-mean (۲۰۵۰-۲۰۲۱)	۱۷۲	۱۸۴	۱۵۸	۱۰	۵۵	۶۳	-۰/۷	-۰/۷	-۰/۷	-۱۲۵/۶	-۱۳۵/۹	-۱۳۶/۹
	سناریوی A2-mean (۲۰۸۰-۲۰۵۱)	۱۷۷	۱۸۸	۱۷۵	۱۱	۲۳	۷۵	-۰/۷	-۰/۷	-۰/۷	-۱۲۴/۸	-۱۳۱/۸	-۱۲۸/۵
	دوره مشاهداتی	۱۶۸	۱۶۹	۱۵۵	۱۲	۳۴	۶۰	-۰/۹	-۰/۸	-۰/۹	-۱۴۳/۳	-۱۴۰	-۱۳۷/۵
	سناریوی A2-mean (۲۰۵۰-۲۰۲۱)	۱۸۴	۱۸۲	۱۷۸	۱۴	۳۴	۷۲	-۰/۷	-۰/۷	-۰/۷	-۱۳۷/۲	-۱۲۹/۹	-۱۲۵/۳
قزوین	سناریوی A2-mean (۲۰۸۰-۲۰۵۱)	۱۷۳	۱۸۱	۱۵۲	۹	۲۲	۳۸	-۰/۸	-۰/۷	-۰/۸	-۱۴۱/۱	-۱۲۹/۸	-۱۲۷/۵
	دوره مشاهداتی	۱۲۲	۹۶	۱۰۲	۱۱	۳۷	۶۰	-۱/۶	-۰/۹	-۱/۴	-۱۰۶/۱	-۱۵۰/۲	-۱۳۹/۵
	سناریوی A2-mean (۲۰۵۰-۲۰۲۱)	۱۵۲	۱۵۸	۱۴۹	۱۱	۲۴	۳۶	-۰/۹	-۰/۹	-۰/۸	-۱۲۰/۶	-۱۴۸/۲	-۱۳۷/۹
	سناریوی A2-mean (۲۰۸۰-۲۰۵۱)	۱۴۶	۱۴۶	۱۴۲	۱۱	۲۷	۳۶	-۰/۸	-۱	-۱	-۱۲۳	-۱۴۹/۱	-۱۳۷/۷



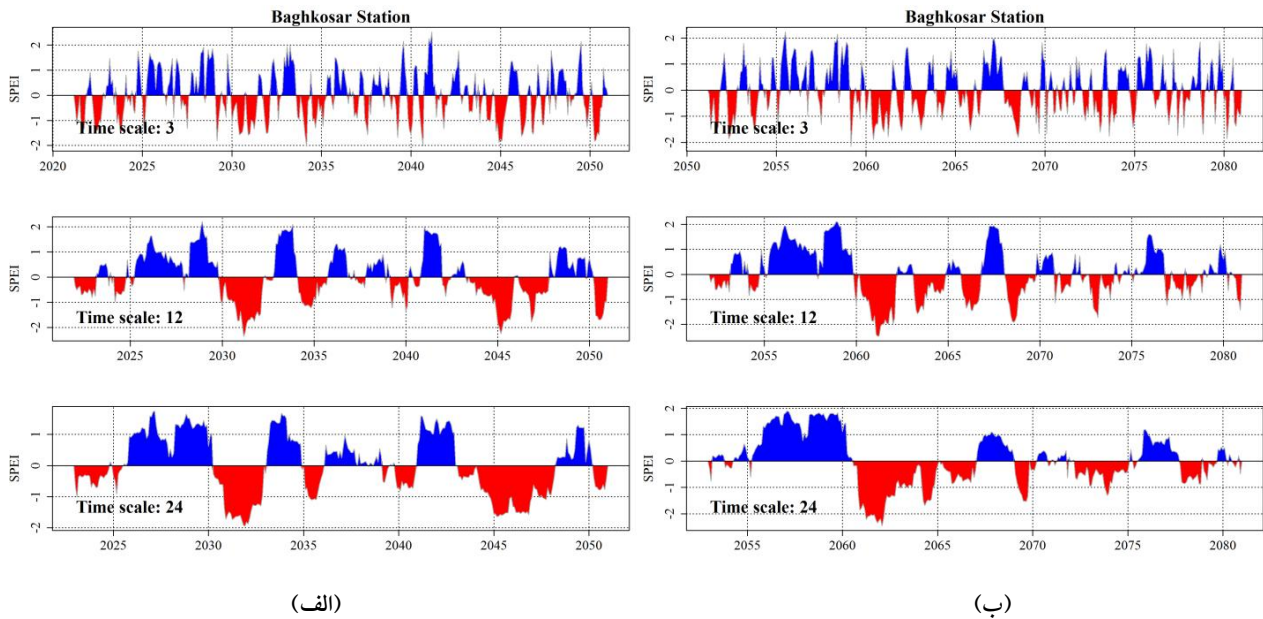
شکل ۲. روند خشکسالی و ترسالی شاخص SPI در ایستگاه آوج در: الف) آینده نزدیک و ب) آینده دور

جدول ۶. مقایسه تغییرات متغیرهای خشکسالی شاخص SPEI در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و آینده دور (۲۰۵۱-۲۰۸۰) ایستگاه‌های مورد بررسی نسبت به دوره مشاهداتی

نام ایستگاه	دوره زمانی	تعداد دوره‌های خشک (ماه)			بیشینه تداوم دوره خشک (ماه)			میانگین شدت خشکسالی			مجموع توالی‌های منفی در کل دوره
		۱۲ ماهه	۲۴ ماهه	۳ ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه	۳ ماهه	۱۲ ماهه	۲۴ ماهه	۳ ماهه	
آوج	دوره مشاهداتی	۱۸۰	۱۶۸	۱۷۱	۱۸	۴۳	۴۷	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۸	-۱۲۹/۵
	سناریوی A2-mean (۲۰۵۰-۲۰۲۱)	۱۸۰	۱۷۳	۱۷۳	۲۰	۲۷	۳۱	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۸	-۱۳۴/۶
	سناریوی A2-mean (۲۰۸۰-۲۰۵۱)	۱۸۱	۱۷۲	۱۶۹	۲۱	۲۷	۳۱	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۸	-۱۳۴/۳
باغ کوثر	دوره مشاهداتی	۱۴۰	۱۳۲	۱۲۸	۱۴	۴۷	۷۶	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۸	-۱۰۴/۵
	سناریوی A2-mean (۲۰۵۰-۲۰۲۱)	۱۸۲	۱۷۹	۱۷۱	۱۰	۳۱	۶۲	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۸	-۱۴۱/۴
	سناریوی A2-mean (۲۰۸۰-۲۰۵۱)	۱۸۲	۱۷۲	۱۷۴	۱۴	۲۴	۵۴	-۰/۷	-۰/۸	-۰/۸	-۱۳۰/۴
قزوین	دوره مشاهداتی	۱۷۷	۱۷۹	۱۶۵	۱۶	۵۰	۶۸	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۸	-۱۴۴/۸
	سناریوی A2-mean (۲۰۵۰-۲۰۲۱)	۱۸۳	۱۷۳	۱۵۷	۱۵	۳۳	۳۷	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۸	-۱۳۰
	سناریوی A2-mean (۲۰۸۰-۲۰۵۱)	۱۸۴	۱۶۸	۱۶۳	۱۶	۲۲	۳۸	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۸	-۱۳۲/۴
نیروگاه	دوره مشاهداتی	۱۴۸	۱۴۰	۱۳۷	۴۲	۴۴	۴۴	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۸	-۱۰۹/۳
	سناریوی A2-mean (۲۰۵۰-۲۰۲۱)	۱۷۵	۱۷۷	۱۵۹	۲۰	۲۶	۳۶	-۰/۹	-۰/۸	-۰/۸	-۱۳۵/۸
	سناریوی A2-mean (۲۰۸۰-۲۰۵۱)	۱۷۴	۱۸۰	۱۶۵	۲۱	۲۹	۵۳	-۰/۸	-۰/۸	-۰/۸	-۱۳۱/۹

شد که روند شاخص SPEI در دوره ۲۰۱۴-۱۹۵۱ در بخش وسیعی از کشور افزایشی است به نحوی که روند دما و بارش در اکثر ایستگاه‌ها به ترتیب افزایشی و کاهش‌ی است. این پژوهشگران شاخص SPEI را به عنوان ابزار مفیدی در زمینه پایش و پیش‌آگاهی خشکسالی در ایران دانستند. شکل ۳ روند خشکسالی و ترسالی به دست آمده از شاخص SPEI را در ایستگاه باغ کوثر نشان می‌دهد.

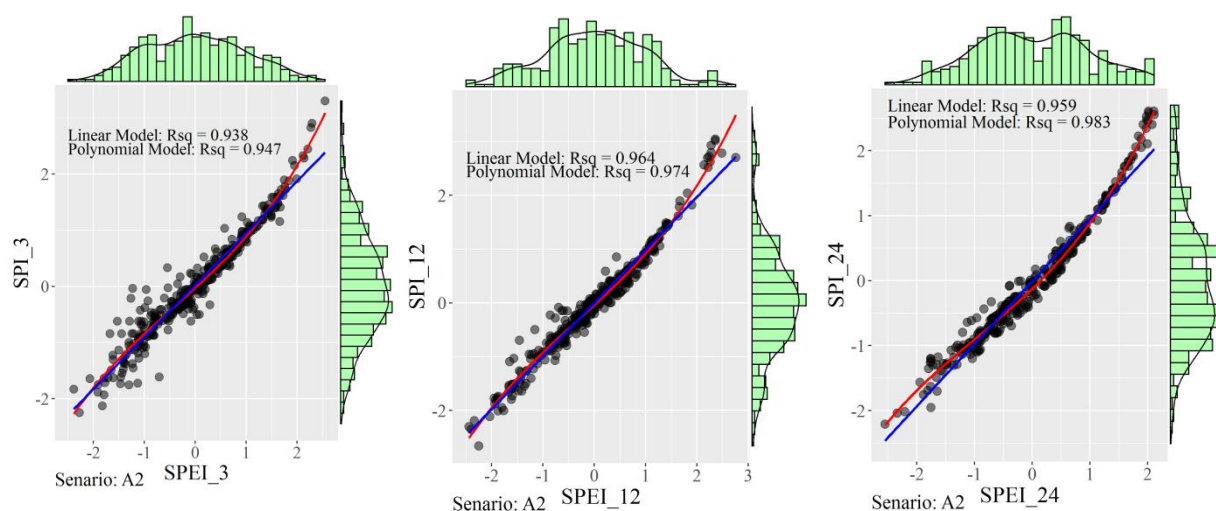
نسبت به مشاهداتی افزایش نشان داده و فقط در ایستگاه قزوین این مقدار کاهش نشان داده است. بدین معنی که در ۳ ایستگاه آوج، باغ کوثر و نیروگاه، خشکسالی به سمت بزرگ تر شدن و پرتکرارتر شدن پیش می‌رود ولی در ایستگاه قزوین از بابت شاخص SPEI خشکسالی از بابت تعداد و بزرگی در دوره‌های آینده نسبت به دوره مشاهداتی کاهش نشان می‌دهد. در پژوهش اقتدارنژاد و همکاران (۸) گزارش



شکل ۳. روند خشکسالی و ترسالی شاخص SPEI در ایستگاه باغ کوثر در: الف) آینده نزدیک و ب) آینده دور

روبه‌رو است. در کل بین هر دو شاخص خشکسالی SPEI و SPI یک همبستگی مناسب وجود داشته و می‌توان با دقت مناسبی در جاهایی که دسترسی به داده دما وجود ندارد از شاخص SPI به جای SPEI استفاده کرد ولی مناسب است که در شرایطی که هر دو سری داده دما و بارش وجود دارند از شاخص SPEI برای بررسی خشکسالی استفاده کرد. در این میان باید در نظر داشت که تنوع در روش محاسبه تبخیر و تعرق می‌تواند پاسخ‌های متفاوتی را نیز به دست دهد و لازم است چنانچه ایستگاه‌های متفاوتی با یکدیگر مقایسه می‌شوند به روش محاسبه تبخیر و تعرق نیز دقت شود چرا که در محاسبه تبخیر و تعرق در ساده‌ترین حالت می‌توان فقط از داده دما استفاده کرد و در پیچیده‌ترین حالت در روش پنمن مانیت، متغیرهای باد، رطوبت، تابش خورشیدی و ... نیز لحاظ می‌شوند. شکل ۴ نشان‌دهنده ارتباط بین دو شاخص SPEI و SPI در این پژوهش است. همان‌گونه که دیده می‌شود این دو شاخص با ضریب همبستگی خوبی در تمامی ایستگاه‌ها و در تمامی بازه‌های ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه با یکدیگر مرتبط هستند و فقط در ایستگاه نیروگاه در بازه ۱۲ ماهه این ارتباط معنی‌دار نشد. با دقت به شکل ۴ مشخص می‌شود که فقط در ترسالی‌های فرین (از ۲ به بالا) نمودار از حالت خطی خارج

بین نتایجی که از شاخص SPEI و SPI گرفته می‌شود اندکی تفاوت وجود دارد که این از ماهیت این دو شاخص برمی‌آید. در شاخص SPI، خشکسالی فقط از بابت روند بارش بررسی می‌شود اما در SPEI، خشکسالی با توجه به روند موجود بودن آب در دسترس اقلیمی بررسی می‌شود بدین معنی که در شاخص SPEI هم تغییرات بارندگی و هم تغییرات دمایی همزمان در نظر گرفته می‌شود و تغییرات دمایی از بابت تأثیر بر میزان تبخیرکنندگی جو و نیاز تبخیر و تعرق هم دخالت داده می‌شود و می‌تواند اثر همزمان تغییرات بارندگی و دما را بر رخداد خشکسالی نشان دهد. با این تفسیرها اگر فقط شاخص SPEI در نظر گرفته شود ایستگاه قزوین روندی متفاوت از ۳ ایستگاه دیگر را در آینده نسبت به دوره مشاهداتی از بابت خشکسالی نشان می‌دهد و بزرگی خشکسالی در آینده این ایستگاه نسبت به دوره پایه کاهشی است و برعکس ۳ ایستگاه دیگر از بابت بزرگی و تکرار دوره‌های خشک نسبت به دوره پایه دچار افزایش خواهند بود. اما اگر فقط روند بارندگی بر خشکسالی ملاک عمل باشد فقط ایستگاه باغ کوثر از نظر بزرگی و تعداد دوره‌های خشک در آینده نسبت به دوره پایه با افزایش روبه‌رو است و ۳ ایستگاه دیگر بیشتر از نظر تعداد دوره‌های خشکسالی با افزایش روبه‌رو هستند و بزرگی خشکسالی‌های محتمل با کاهش



شکل ۴. بررسی همانندی دو شاخص SPEI و SPI در ایستگاه آوج در هر سه بازه ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه در آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱)

SPI در بازه‌های ۳ ماهه که از منظر کشاورزی دارای اهمیت هستند از خشکسالی‌های فرین و متوسط در دوره‌های زمانی آینده نسبت به دوره مشاهداتی کاسته شده و خشکسالی‌های در طبقه شدید افزایش نشان داده است و از طرفی ترسالی‌های متوسط در آینده نسبت به دوره پایه کاهش داشته و رخدادهای ترسالی شدید و ترسالی فرین افزایش نشان داده است اما از دیدگاه شاخص SPEI در همین شرایط مشابه ۳ ماهه در ایستگاه آوج مشاهده شد که خشکسالی فرین کاهش یافته اما رخدادهای خشکسالی متوسط و شدید افزایش داشته است و این افزایش در مورد خشکسالی‌های متوسط بیشتر از خشکسالی‌های شدید بوده است و این نتیجه برعکس شاخص SPEI بوده است همچنین مشابه شاخص SPI ۳ ماهه در این ایستگاه، ترسالی متوسط کاهش یافته اما ترسالی شدید افزایش نشان داده است. در همین جا می‌توان اثر دما را در نتیجه‌گیری در مورد مشخصات خشکسالی‌های احتمالی به‌وضوح دید به‌صورتی که هرچند هر دو شاخص‌ها افزایش خشکسالی را نشان می‌دهد اما اینکه مشخصات این خشکسالی چگونه است بستگی به رویکرد ما دارد بدین صورت که از منظر کشاورزی با افزایش دما و افزایش نیاز تبخیر و تعرق، خشکسالی متوسط بیشتر دیده می‌شود در حالی که بدون لحاظ کردن اثر دما و فقط در نظر گرفتن اثر بارش، خشکسالی متوسط در دوره‌های آینده

شده و شاخص SPI به‌دلیل در نظر نگرفتن اثر دما از خط نیمساز فاصله گرفته است و شرایط را ترسالی شدید معرفی کرده است ولی شاخص SPEI با لحاظ کردن اثر دما بر تبخیر و تعرق به خط نیمساز نزدیک مانده است. مطابق پژوهش بذرافشان و همکاران (۴) روند خشکسالی در سواحل جنوبی ایران حاکی از افزایش خشکسالی است که با افزایش مقیاس زمانی شیب روند شاخص SPEI نسبت به SPI قوی‌تر می‌شود. این پژوهشگران نیز پیشنهاد کردند برای بررسی خشکسالی در اقلیم های خشک و فراخشک بیابان ساحلی به‌دلیل نقش دما به‌عنوان عامل محدود کننده رطوبت از شاخص SPEI برای پایش مؤثر و دقیق خشکسالی‌ها استفاده شود و شاخص SPI برای پایش خشکسالی کافی نیست. مصطفی‌زاده و ذبیحی (۱۹) در مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI گزارش کردند شاخص SPEI دوره‌های طولانی‌تر خشکی را در اکثر ایستگاه‌ها مشخص کرده است و ضریب همبستگی پایین بین شاخص‌های SPI و SPEI در ایستگاه سقز (استان کردستان) ناشی از افزایش تبخیر و تعرق در فصل‌های بهار و تابستان بوده است و پژوهش ایشان تأثیر دما در محاسبه SPEI را عامل تفاوت قابل توجه بین مقادیر شاخص استاندارد مبتنی بر بارش و شاخص تبخیر و تعرق مبتنی بر دما، نشان داد. با توجه به جدول ۷، در ایستگاه آوج از دیدگاه شاخص

جدول ۷. طبقه‌بندی خشکسالی و ترسالی با استفاده از دو شاخص SPI و SPEI در دوره‌های زمانی آینده نزدیک و دور در ایستگاه‌ها

ایستگاه شاخص خشکسالی	دوره مشاهداتی										دوره زمانی ۲۰۵۱-۲۰۸۰					دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰						
	ترسالی متوسط	ترسالی شدید	ترسالی فرین	نرمال	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی فرین	ترسالی متوسط	ترسالی شدید	ترسالی فرین	نرمال	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی فرین	ترسالی متوسط	ترسالی شدید	ترسالی فرین	نرمال	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی فرین	
SPI3	۲/۰	۴/۰	۸/۴	۶۸/۵	۱۲/۴	۳/۲	۱/۴	۰/۶	۴/۲	۷/۳	۱۰/۱	۲۲/۳	۱۰/۱	۳/۴	۲/۲	۰/۶	۴/۵	۷/۰	۷۱/۸	۱۰/۱	۳/۹	۲/۲
SPEI3	۲/۶	۲/۰	۹/۵	۶۹/۷	۹/۸	۴/۶	۱/۷	۰/۸	۳/۶	۱۳/۷	۶۴/۵	۹/۵	۶/۱	۱/۷	۶/۱	۰/۸	۳/۹	۱۳/۴	۶۴/۵	۸/۹	۶/۷	۱/۷
SPI12	۳/۰	۴/۷	۸/۰	۶۶/۸	۱۳/۱	۳/۳	۱/۲	۲/۰	۶/۰	۷۳/۶	۹/۲	۳/۴	۱/۱	۳/۴	۱/۱	۳/۴	۲/۰	۶/۰	۷۳/۴	۸/۳	۲/۳	۳/۴
SPEI12	۳/۳	۲/۱	۹/۸	۶۹/۱	۱۰/۱	۳/۶	۲/۱	۱/۴	۶/۳	۴/۹	۶۹/۱	۱۱/۷	۱/۴	۳/۲	۱/۴	۱/۴	۳/۲	۶/۳	۶۸/۲	۱۲/۶	۱/۴	۳/۲
SPI24	۴/۰	۴/۶	۸/۶	۶۵/۸	۱۳/۸	۳/۱	۰/۰	۰/۹	۵/۳	۱۱/۰	۷۱/۸	۶/۵	۳/۶	۴/۵	۳/۶	۴/۵	۰/۹	۲/۱	۷۱/۵	۶/۵	۳/۶	۴/۵
SPEI24	۲/۵	۶/۵	۸/۳	۶۶/۲	۸/۶	۷/۷	۰/۳	۰/۹	۵/۳	۷۰/۰	۷/۴	۷/۴	۵/۹	۱/۸	۵/۹	۱/۸	۰/۹	۵/۹	۷۰/۶	۷/۷	۵/۹	۱/۸
SPI3	۲/۶	۳/۷	۶/۳	۷۲/۰	۱۰/۴	۳/۴	۱/۵	۰/۶	۳/۱	۳/۱	۶۹/۸	۱۱/۵	۴/۵	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۶/۴	۷۰/۴	۱۰/۶	۶/۱	۱/۱
SPEI3	۱/۵	۳/۴	۱۲/۷	۶۵/۷	۹/۳	۶/۰	۱/۵	۰/۶	۶/۱	۱۱/۲	۶۴/۲	۱۱/۷	۴/۷	۱/۴	۴/۷	۱/۴	۰/۳	۵/۳	۶۴/۸	۱۱/۰	۷/۰	۰/۶
SPI12	۱/۲	۷/۳	۷/۳	۶۹/۱	۷/۳	۴/۶	۰/۸	۳/۴	۵/۴	۳/۴	۷۲/۲	۸/۳	۱/۱	۶/۰	۶/۰	۸/۳	۲/۰	۵/۴	۷۱/۶	۷/۲	۳/۷	۴/۰
SPEI12	۰/۰	۵/۴	۱۲/۷	۶۲/۲	۱۱/۶	۸/۱	۰/۰	۱/۴	۶/۹	۶۷/۹	۹/۲	۷/۲	۰/۹	۷/۲	۷/۲	۰/۹	۱/۴	۵/۲	۶۸/۵	۸/۶	۷/۲	۰/۶
SPI24	۰/۰	۳/۲	۱۵/۸	۶۶/۴	۵/۳	۸/۵	۰/۸	۴/۲	۵/۰	۷/۱	۶۴/۴	۱۷/۵	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۰/۰	۰/۹	۲/۴	۷۱/۸	۲/۷	۱۱/۳	۱/۲
SPEI24	۰/۰	۳/۶	۱۱/۷	۶۲/۳	۱۷/۴	۴/۹	۰/۰	۰/۰	۸/۶	۵۹/۶	۱۸/۱	۵۹/۶	۴/۲	۴/۲	۴/۲	۰/۰	۳/۶	۳/۳	۷۰/۶	۶/۲	۹/۸	۰/۰
SPI3	۳/۱	۴/۷	۸/۴	۷۰/۱	۹/۲	۲/۲	۲/۵	۲/۲	۲/۲	۳/۱	۷۱/۲	۸/۱	۱۰/۱	۳/۱	۳/۱	۳/۱	۲/۲	۲/۲	۶۷/۳	۱۰/۹	۴/۵	۱/۷
SPEI3	۱/۷	۳/۴	۱۲/۰	۶۷/۹	۸/۹	۳/۹	۲/۲	۳/۹	۴/۷	۹/۲	۶۶/۲	۱۲/۳	۴/۷	۴/۷	۴/۷	۱/۷	۰/۶	۴/۷	۶۴/۰	۱۱/۵	۵/۳	۱/۷
SPI12	۵/۲	۴/۳	۵/۴	۶۸/۲	۵/۴	۴/۳	۰/۰	۰/۳	۴/۰	۷۵/۱	۶/۳	۲/۹	۳/۴	۲/۹	۲/۹	۳/۴	۰/۹	۵/۷	۷۴/۸	۷/۲	۲/۹	۴/۰
SPEI12	۱/۱	۵/۷	۸/۰	۶۶/۸	۱۰/۶	۷/۷	۰/۰	۰/۶	۵/۷	۱۰/۶	۶۹/۹	۷/۴	۳/۲	۲/۶	۳/۲	۰/۶	۰/۶	۵/۷	۶۸/۵	۱۲/۰	۳/۴	۲/۹
SPI24	۳/۶	۴/۷	۸/۳	۷۰/۰	۹/۲	۳/۹	۰/۳	۰/۳	۲/۷	۱۲/۲	۷/۶	۰/۹	۰/۳	۶/۸	۰/۳	۰/۹	۰/۶	۴/۵	۶۸/۸	۱۳/۶	۱/۵	۳/۹
SPEI24	۰/۰	۵/۶	۱۵/۱	۵۸/۸	۱۶/۹	۳/۶	۰/۰	۲/۴	۳/۳	۱۲/۵	۷۰/۹	۳/۹	۲/۱	۳/۹	۲/۱	۵/۰	۰/۳	۵/۳	۶۵/۹	۱۵/۴	۷/۷	۳/۰
SPI3	۲/۷	۲/۳	۱۰/۷	۶۸/۵	۱۰/۷	۲/۳	۱/۰	۴/۰	۳/۴	۷۳/۷	۴/۵	۱۰/۱	۴/۵	۱/۴	۳/۱	۳/۱	۲/۲	۲/۲	۶۱/۸	۷۱/۸	۳/۹	۱/۷
SPEI3	۰/۷	۴/۷	۱۱/۷	۶۵/۴	۱۰/۴	۶/۴	۰/۷	۶/۴	۵/۳	۹/۸	۶۷/۳	۹/۵	۵/۳	۲/۰	۲/۰	۵/۳	۰/۸	۵/۰	۶۵/۶	۱۱/۲	۵/۳	۲/۰
SPI12	۱۳/۱	۲/۸	۴/۸	۶۶/۱	۱۳/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۳	۶۹/۳	۴/۳	۱۴/۶	۱/۷	۱/۷	۱/۷	۰/۰	۸/۳	۳/۲	۶۵/۹	۱۶/۹	۱/۷	۰/۳
SPEI12	۰/۰	۱۱/۸	۸/۳	۶۶/۴	۹/۰	۱/۷	۲/۸	۰/۹	۷/۴	۸/۹	۶۲/۲	۱۶/۰	۴/۰	۰/۶	۰/۶	۴/۰	۰/۹	۷/۲	۶۴/۸	۸/۶	۳/۴	۱/۷
SPI24	۸/۷	۲/۵	۴/۰	۷۵/۸	۹/۰	۰/۰	۰/۰	۴/۷	۳/۰	۷/۷	۶۸/۰	۱۳/۶	۲/۷	۲/۷	۲/۷	۰/۳	۷/۱	۳/۰	۱۲/۲	۷۱/۲	۳/۳	۰/۰
SPEI24	۰/۴	۸/۷	۷/۹	۷۰/۴	۴/۰	۷/۲	۱/۴	۳/۰	۴/۵	۷۰/۰	۸/۳	۸/۰	۴/۷	۱/۵	۴/۷	۱/۵	۲/۴	۵/۳	۷۰/۰	۹/۲	۳/۰	۳/۰

کاهش نشان می‌دهد همچنین خشکسالی‌های متوسط نیز کم شده و به تعداد خشکسالی‌های شدید اضافه می‌شود. در بازه ۲۴ ماهه که از منظر هیدرولوژیک دارای اهمیت است شاخص SPI نشان از افزایش خشکسالی‌های متوسط و همچنین ترسالی‌های شدید و فرین دارد درحالی که شاخص SPEI فقط از افزایش خشکسالی

کاهش داشته و فقط خشکسالی‌های شدید افزایش اندک نشان داده است. شاخص SPI در بازه‌های زمانی ۱۲ ماهه در ایستگاه آوج روندی مشابه بازه ۳ ماهه داشته اما شاخص SPEI در بازه ۱۲ ماهه برعکس بازه ۳ ماهه در مورد ترسالی‌های متوسط و فرین در افق زمانی ۲۰۸۰ افزایش و در مورد ترسالی‌های شدید،

نشان داده می‌شود و همچنین رخدادهای خشکسالی از بازه متوسط به شدید گرایش پیدا می‌کند. در مورد شاخص SPEI ۱۲ ماهه نیز روندی مشابه وجود دارد با این تفاوت که خشکسالی‌های فرین نیز که در دوره پایه وجود نداشتند محتمل می‌شوند. شاخص SPEI در بازه ۲۴ ماهه این ایستگاه در تمام طبقه‌ها به جز خشکسالی فرین در افق‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ افزایش نشان می‌دهد در حالی که شاخص SPEI از افزایش ترسالی و خشکسالی متوسط و خشکسالی و ترسالی فرین خبر می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

در پایان سال ۲۰۵۰ بیشترین افزایش میزان بارندگی در ایستگاه آوج برابر ۱/۴۷ برابر مقدار مشاهداتی و بیشترین تغییرات کاهش نسبی بارندگی در ایستگاه قزوین و برابر با ۰/۵۳ مقدار آن در دوران مشاهداتی نشان داده شد. در همین دوره زمانی بیشترین افزایش دما در ایستگاه آوج و برابر با ۱/۶۸ درجه سانتی‌گراد و کمترین تغییرات دما در ایستگاه قزوین و برابر با ۰/۱ درجه سانتی‌گراد کاهش پیش‌بینی شده است. در پایان سال ۲۰۸۰ بیشترین افزایش میزان بارندگی در ایستگاه آوج برابر ۱/۷۷ برابر مقدار مشاهداتی و بیشترین تغییرات کاهش نسبی بارندگی در ایستگاه قزوین و برابر با ۰/۴۹ مقدار آن در دوران مشاهداتی پیش‌بینی شد. در همین دوره زمانی تخمین زده شده است که بیشترین افزایش دما در ایستگاه آوج و برابر با ۲/۷۵ درجه سانتی‌گراد و کمترین افزایش دما در ایستگاه باغ کوثر و برابر با ۰/۶۲ درجه سانتی‌گراد باشد. به‌طور میانگین در مورد تمام ایستگاه‌های بررسی شده این پژوهش در پایان سال ۲۰۵۰ بارندگی بین دو نسبت ۰/۵۵ و ۱/۴۳ برابر مقدار بارش دوره مشاهداتی تغییر خواهد کرد و میزان دما به اندازه ۰/۹۳- تا ۱/۵۶ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره مشاهداتی افزایش خواهد داشت و به‌طور میانگین در پایان سال ۲۰۸۰ بارندگی بین دو نسبت ۰/۵۲ و ۱/۷ برابر مقدار بارش دوره مشاهداتی در نوسان خواهد بود و دما افزایشی بین ۰/۶۵ تا ۲/۵۸ درجه سانتی‌گراد را تجربه خواهد کرد. با توجه به شاخص SPEI و با لحاظ کردن فقط متغیر بارندگی،

متوسط و ترسالی فرین گزارش می‌دهد. باید توجه داشت این مقادیر افزایش و کاهش در مورد شاخص SPEI به نسبت شاخص SPI روند ملایم‌تری دارد. در مورد ایستگاه باغ کوثر، شاخص SPI در تمام بازه‌ها به جز ترسالی فرین در بازه ۳ ماهه در آینده نسبت به دوره پایه افزایش رخدادهای ترسالی و خشکسالی را در همه طبقه‌ها نشان می‌دهد. شاخص SPEI ۳ ماهه نیز روندی مشابه دارد با این تفاوت که فراوانی خشکسالی‌های متوسط و فرین کم شده و به فراوانی خشکسالی‌های شدید افزوده شده است. در بازه ۱۲ ماهه و ۲۴ ماهه در این ایستگاه هر دو شاخص نشان‌دهنده این مسئله است که رخدادهای ترسالی و خشکسالی به سمت حالت‌های حدی حرکت کرده است و بر درصد فراوانی خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فرین و شدید افزوده شده است بدین گونه که طبق شاخص SPEI در دوره مشاهداتی اصلاً ترسالی و خشکسالی فرین دیده نشده بود اما در افق‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ این رخدادهای دیده می‌شود. در ایستگاه قزوین در بازه ۳ ماهه هر دو شاخص SPI و SPEI در آینده افزایش خشکسالی و ترسالی متوسط و ترسالی شدید را نشان می‌دهند با این تفاوت که شاخص SPEI نشان‌دهنده افزایش خشکسالی شدید در این ایستگاه نیز هست. در بازه‌های طولانی مدت ۱۲ ماهه در این ایستگاه شاخص SPI و SPEI نشان‌دهنده کاهش ترسالی‌ها و افزایش خشکسالی متوسط و شدید است ولی رخدادهای حدی خشکسالی و ترسالی فرین به ترتیب کاهش و افزایش داشته است. بازه ۲۴ ماهه روندی مشابه ۱۲ ماهه داشته با این تفاوت که در شاخص SPEI درصد فراوانی خشکسالی فرین افزایش داشته در حالی که در دوره پایه چنین رخدادی نبوده است. شاخص SPI در ایستگاه نیروگاه در بازه ۳ ماهه نشان‌دهنده افزایش ترسالی‌ها و خشکسالی‌های شدید و فرین است به نحوی که خشکسالی‌های متوسط کم شده و به درصد فراوانی خشکسالی‌های شدیدتر افزوده شده است. شاخص SPEI ۳ ماهه نیز در مورد خشکسالی‌ها روندی مشابه دارد. در بازه ۱۲ ماهه نیز شاخص SPI حکایت از افزایش ترسالی‌ها دارد به نحوی که ترسالی شدید و فرین که در دوره پایه وجود نداشته در آینده



تعداد دوره‌های خشک در تمام ایستگاه‌ها در بازه ۳ ماهه، ۱۲ ماهه و ۲۴ ماهه در هر دو دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی افزایش نشان داده است. بیشینه تداوم دوره‌های خشک از منظر کشاورزی در ایستگاه‌های باغ کوثر و قزوین که در ارتفاع حدود ۱۲۰۰ متری قرار دارند در دو دوره آینده نسبت به دوره مشاهداتی کاهش داشته و در ایستگاه نیروگاه ثابت بوده اما در ایستگاه آوج که مرتفع‌ترین ایستگاه مورد بررسی است (۲۰۳۵ متر) افزایش داشته اما از منظر هیدرولوژیک در تمام ایستگاه‌ها روندی کاهشی دارد. بنابراین در بازه‌های کوتاه‌مدت در نقاط مرتفع محدوده یعنی حاشیه جنوب غربی منطقه با افزایش تداوم دوره‌های خشک مواجه خواهیم بود و هرچه به سمت شمال و شرق منطقه می‌رویم تداوم دوره‌های خشک کاهش نیز می‌یابد. میانگین شدت خشکسالی در تمام ایستگاه‌ها و بازه‌های ۳، ۱۲ و ۲۴ ماهه روندی کاهشی نسبت به دوره مشاهداتی نشان داده است. مجموع توالی‌های منفی کل دوره در ۳ ایستگاه آوج، قزوین و نیروگاه در دوره‌های آینده به نسبت دوره مشاهداتی در بازه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، کاهش نشان داده و برعکس در ایستگاه باغ کوثر مقدار مجموع توالی‌های منفی در همه بازه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت افزایش نشان داده است. بنابراین در ایستگاه باغ کوثر (شمال منطقه و کم‌ارتفاع‌ترین ایستگاه مورد بررسی) تعداد رویدادهای خشکسالی و بزرگی آن در آینده نسبت به دوره مشاهداتی در حال افزایش است و به‌خصوص در آینده نزدیک بیشینه تداوم دوره‌های خشک هم در بازه یک‌ساله افزایش زیادی نشان می‌دهد. اما در ایستگاه آوج و قزوین (جنوب و مرکز منطقه) نوع خشکسالی محتمل به سمت افزایش تعداد رویدادهای خشکسالی و پرتکرار شدن این رخداد می‌رود ولی در مقدار بزرگی خشکسالی حتی کاهش نیز دیده می‌شود. با توجه به شاخص SPEI و با لحاظ کردن هر دو متغیر اثر بارندگی و دما، تعداد دوره‌های خشک در تمام ایستگاه‌ها در هر دو دوره آینده نسبت به مشاهداتی مشابه شاخص SPI افزایش یافته به‌جز ایستگاه قزوین (مرکز منطقه) که در بازه‌های بلندمدت کاهش نشان داده است. بیشینه تداوم دوره‌های خشک در همه ایستگاه‌ها در بازه کوتاه‌مدت در آینده تقریباً ثابت بوده به‌جز ایستگاه نیروگاه که

کاهش تا نصف را نشان داده است. در بازه‌های بلندمدت در تمام ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه نیروگاه بیشینه تداوم دوره خشکسالی کاهش یافته است که این نتیجه در مقایسه با شاخص SPI اندکی متفاوت است. میانگین شدت خشکسالی در تمام ایستگاه‌ها در بازه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت با شاخص SPEI تقریباً ثابت است در حالی که در شاخص SPI روندی کاهشی دارد. مجموع توالی‌های منفی در شاخص SPEI در تمام ایستگاه‌ها به‌جز ایستگاه قزوین در تمام بازه‌های کوتاه و بلندمدت در دوره‌های آینده نسبت به مشاهداتی افزایش نشان داده و فقط در ایستگاه قزوین این مقدار کاهش نشان داده است که این نتیجه با شاخص SPI متفاوت است که کاهش توالی‌های منفی را نشان می‌داد. با در نظر گرفتن شاخص SPEI ایستگاه قزوین (شرق منطقه) متفاوت از ۳ ایستگاه دیگر (محور جنوب‌غربی به شمال‌شرقی)، کاهش بزرگی خشکسالی را در آینده نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد و ۳ ایستگاه دیگر از بابت بزرگی و تکرار دوره‌های خشک نسبت به دوره پایه دچار افزایش خواهند بود. اما شاخص SPI در مورد ایستگاه باغ کوثر (کم‌ارتفاع‌ترین ایستگاه و شمال منطقه) از نظر بزرگی و تعداد دوره‌های خشک در آینده نسبت به دوره پایه افزایش نشان داده و ۳ ایستگاه دیگر بیشتر از نظر تعداد دوره‌های خشکسالی با افزایش روبه‌رو هستند و بزرگی خشکسالی‌های محتمل با کاهش روبه‌رو است. نتایج نشان داد بین هر دو شاخص خشکسالی SPEI و SPI همبستگی مناسب وجود داشته ولی مناسب است که در شرایطی که هر دو سری داده دما و بارش وجود دارند از شاخص SPEI برای بررسی خشکسالی استفاده کرد تا دید بهتری از جزئیات خشکسالی منطقه طرح به‌دست بدهد. بررسی خشکسالی در دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت (۳ ماهه) و بلندمدت (۱۲ و ۲۴ ماهه) بیانگر بررسی واکنش‌های متفاوت نسبت به پدیده خشکسالی است. دوره‌های کوتاه‌مدت (۳ ماهه) که بیشتر بر رطوبت خاک و مسئله کشاورزی تأثیر خود را نشان می‌دهد، فراوانی وقوع بیشتری نسبت به دوره‌های بلندمدت (۱۲ و ۲۴ ماهه) در کلیه ایستگاه‌ها داشته در حالی که تداوم دوره‌های خشکسالی بلندمدت (۱۲ و ۲۴ ماهه) نسبت به کوتاه‌مدت (۳ ماهه) بیشتر است و این نشانگر این

خشکسالی شدید و ترسالی متوسط اشاره دارد و هرچه به سمت بازه‌های بلندمدت می‌رود ترسالی و خشکسالی به سمت شدید و فرین شدن پیش می‌رود. در ایستگاه قزوین (مرکز منطقه) از دیدگاه شاخص SPI در بازه‌های کوتاه‌مدت خشکسالی متوسط و ترسالی شدید افزایش می‌یابد و هرچه به سمت بازه‌های بلندمدت می‌رود ترسالی‌های فرین نیز افزایش زیادی نشان می‌دهند. از دیدگاه شاخص SPEI در بازه‌های کوتاه‌مدت به سمت افزایش خشکسالی شدید و ترسالی شدید و فرین تمایل پیدا کرده و هرچه به سمت بازه‌های بلندمدت می‌رود خشکسالی‌های متوسط افزایش یافته و ترسالی‌های فرین نمایان می‌شوند. در ایستگاه نیروگاه، از دیدگاه شاخص SPI خشکسالی و ترسالی متوسط در بازه‌های کوتاه‌مدت افزایش یافته و هرچه به سمت بازه‌های بلندمدت می‌رود به درصد فراوانی خشکسالی‌های شدید و متوسط اضافه شده و همچنین ترسالی‌های فرین نیز محتمل می‌شوند اما از منظر شاخص SPEI خشکسالی‌های شدید و متوسط در بازه‌های کوتاه‌مدت افزایش یافته و هرچه به سمت بازه‌های بلندمدت می‌رود رخدادهای حدی خشکسالی و ترسالی فرین نمایان می‌شوند. آنچه که واقعاً در آینده اتفاق خواهد افتاد بستگی به الگوی رفتاری امروزی جوامع درخصوص تولید گازهای گلخانه‌ای دارد.

مسئله است که اثر منفی کمبود بارش در ایستگاه‌های مورد بررسی بر آب‌های زیرزمینی، جریان رودخانه‌ها و ذخایر منابع آبی بیشتر است و جبران خسارات خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژی در این ایستگاه‌ها که به کمبود بارش در دوره‌های بلندمدت وابسته است، زمان طولانی‌تری می‌طلبد. در ایستگاه آوج (مرتفع‌ترین ایستگاه) در جنوب غربی منطقه از دیدگاه شاخص SPI در بازه‌های کوتاه‌مدت افزایش خشکسالی و ترسالی شدید و ترسالی فرین مشاهده می‌شود و هرچه به سمت بازه‌های طولانی‌مدت می‌رویم بر مقدار فراوانی خشکسالی‌های شدید و متوسط و همچنین ترسالی‌های شدید و فرین افزوده می‌شود. از دیدگاه شاخص SPEI در بازه‌های کوتاه‌مدت خشکسالی متوسط و شدید و ترسالی شدید افزایش نشان داده و هرچه به سمت بازه‌های بلندمدت می‌رویم خشکسالی شدید دارای فراوانی بیشتر شده و همچنین ترسالی‌های فرین افزایش می‌یابند. در ایستگاه باغ کوثر (کم ارتفاع‌ترین) و در شمال شرق منطقه از دیدگاه شاخص SPI در بازه کوتاه‌مدت نشانگر افزایش درصد فراوانی رخدادهای خشکسالی و ترسالی شدید و فرین بوده و هرچه به سمت بازه‌های بلندمدت می‌رود بر فراوانی رخدادهای حدی خشکسالی و ترسالی افزوده می‌شود. از دیدگاه شاخص SPEI نیز در بازه‌های کوتاه‌مدت بر افزایش

### منابع مورد استفاده

1. Ababaei, B., T. Sohrabi, F. Mirzaei, V. R. Verdinejad and B. Karimi. 2010. Climate change impact on wheat yield and analysis of the related risks: (Case Study: Esfahan Ruddasht region). *Journal of Water and Soil Science* 20(3): 135-150. (In Farsi).
2. Babaeian, A. and M. Kouhi. 2012. Agroclimatic indices assessment over some selected weather stations of Khorasan Razavi province under climate change scenarios. *Journal of Water and Soil* 26(4): 953-967. (In Farsi).
3. Banihashemi, S. M., S. S. Eslamian and B. Nazari. 2020. The impact of climate change on wheat, barley, and maize growth indices in near-future and far-future periods in Qazvin plain, Iran. *International Journal of Plant Production* 15(1): 45-60. (In Farsi).
4. Bazrafshan, O., F. Mahmudzadeh and J. Bazrafshan. 2017. Evaluation of temporal trends of the SPI and SPEI drought indices in the Southern Coast of Iran. *Desert Management* 8: 54-69. (In Farsi).
5. Bocchiola, D., E. Nana and A. Soncini. 2013. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po Valley of Italy. *Journal of Agricultural Water Management* 116: 50-61.
6. Chen, X., L. Wang, Z. Niu, M. Zhang, C. Li and J. Li. 2020. The effects of projected climate change and extreme climate on maize and rice in the Yangtze River Basin, China. *Agricultural and Forest Meteorology* 282-283: 1-14.
7. Daneshfaraz, R. and H. Razzaghpour. 2014. Evaluation of climate change impacts on potential evapotranspiration in the West Azerbaijan province. *Journal of Geographical Space* 14(46): 199-211. (In Farsi).
8. Eghtedar Nezhad, M., O. Bazrafshan and J. Bazrafshan. 2017. Spatio-temporal variations of meteorological drought using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index in Iran. *Journal of Agricultural Meteorology* 5(2): 35-46. (In Farsi).

9. Estrella, N. and A. Menzel. 2013. Recent and future climate extremes rising from changes to the bivariate distribution of temperature and precipitation in Bavaria, Germany. *Journal of Climatology* 33: 1687-1695.
10. Gohari, A., S. Eslamian, J. Abedi-Koupaei, A. Massah Bavani, D. Wang and K. Madani. 2013. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud river basin. *Journal of Science of the Total Environment* 442: 405-419.
11. He, L., N. Jin and Q. Yu. 2020. Impacts of climate change and crop management practices on soybean phenology changes in China. *Science of the Total Environment* 707: 1-11.
12. Hejazi Zade, Z., E. Fattahi and H. Ghaemi. 2002. Drought monitoring by using the standardized precipitation index, Case study: Chaharmahal Bakhtiari province. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences* 1: 23-45. (In Farsi).
13. IPCC. 2007. Climate Change 2007. Cambridge University Press, New York.
14. Koochaki, A., M. Nassiri Mahallati and L. Jafari. 2016. Evaluation of climate change effect on agricultural production of Iran: I. predicting the future agroclimatic conditions. *Iranian Journal of Field Crop Research* 13(4): 651-664. (In Farsi).
15. Li, G. Q., S. P. Harrison, P. J. Bartlein, K. Izumi and I. C. Prentice. 2013. Precipitation scaling with temperature in warm and cold climates: an analysis of CMIP5 simulations. *Journal of Geophysical Research Letters* 40: 4018-4024.
16. López-Moreno, J. I., S. M. Vicente-Serrano, E. Morán-Tejeda, J. Lorenzo-Lacruz, A. Kenawy and M. Beniston. 2011. Effects of the North Atlantic Oscillation (NAO) on combined temperature and precipitation winter modes in the Mediterranean mountains: observed relationships and projections for the 21st century. *Journal of Global and Planetary Change* 77: 62-76.
17. Mavromatis, T. and J. Hansen. 2001. Interannual variability characteristics and simulated crop response of four stochastic weather generators. *Journal of Agriculture and Forest Meteorology Research* 109: 283-296.
18. Mckee, T. B., N. J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim, California: 179-184.
19. Mostafazadeh, R. and M. Zabihi. 2016. Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province). *Journal of the Earth and Space Physics* 42(3): 632-643. (In Farsi).
20. Palazzoli, I., S. Maskey, S. Uhlenbrook, E. Nana and D. Bocchiola. 2015. Impact of prospective climate change on water resources and crop yields in the Indrawati Basin, Nepal. *Journal of Agricultural Systems* 133: 143-157.
21. Semenov, M. and P. Stratonovitch. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Journal of Climate Research* 41: 1-14.
22. Semenov, M. 2007. Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. *Journal of Agriculture and Forest Meteorology Research* 144: 127-138.
23. Semenov, M. and E. Barrow. 1997. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Journal of Climate Change* 35: 397-414.
24. Sun, S., P. Wu, Y. Wang, X. Zhao, J. Liu and X. Zhang. 2013. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China. *Journal of Science of the Total Environment* 444(2): 498-507.
25. Sun, S. K., Y. B. Wang, J. Liu, H. J. Cai, P. T. Wu, L. J. Xu and Q. L. Geng. 2016a. Sustainability assessment of regional water resources under the DPSIR framework. *Journal of Hydrology* 532: 140-148.
26. Trenberth, K. E. 2011. Changes in precipitation with climate change. *Journal of Climate Research* 47: 123-138.
27. Trigo, R. and J. Palutikof. 2001. Precipitation Scenarios over Iberia: a Comparison between Direct GCM Output and different downscaling techniques. *Journal of Climate* 14: 4422-4446.
28. Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería and J. I. López-Moreno. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate* 23(7): 1696-1718.
29. Yaghmaei, L., S. Soltani, R. Jafari, H. Bashari and H. Jahanbazi. 2017. An investigation on impact of drought on rangeland and forest vegetation changes in Chaharmahal & Bakhtiari province using MODIS satellite data. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research* 15(1): 91-108. (In Farsi).
30. Zareian, M. J., S. S. Eslamian and H. R. Safavi. 2016. Investigating the effects of sustainability of climate change on the agriculture water consumption in the Zayandeh-Rud River basin. *Journal of Water and Soil Science (Science and Technology of Agriculture and Natural Resources)* 75(20): 113-128. (In Farsi).
31. Zhang, X., X. Du, J. Hong, Z. Du, X. Lu and X. Wang. 2020. Effects of climate change on the growing season of alpine grassland in Northern Tibet, China. *Global Ecology and Conservation* 23: 1-12.

## Prediction of Local Alterations in the Relative Amounts of Temperature and Precipitation Caused by Climate Change in Near and Far Future, and Drought Investigation Using SPI and SPEI Indices in Qazvin Plain, Iran

M. Banihashemi<sup>1</sup>, S. S. Eslamian<sup>1</sup> and B. Nazari<sup>2</sup>

(Received: July 6-2020; Accepted: July 28-2020)

### Abstract

The upcoming climate change has become a serious concern for the human society. These changes, caused and aggravated by the industrial activities of the international community and the increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere, are seen as a threat to the food security and environment. Temperature change and precipitation are studied in the form of different probabilistic scenarios in order to have an outlook for the future. The present study was conducted to address the effects of climate changes on temperature and precipitation in Qazvin plain in the form of five AOGCMs including Hadcm3, CSIRO-MK3, GFDL, CGCM3 and MICRO3.2, and 3 greenhouse gas emission scenarios of A1B, A2 and B1, based on different possible scenario combinations in the next 30 years, 2021-2050 and 2051-2080 (near and far future). On basis of the study results, all 4 target stations, on average, will have experienced a change between two ratios of 0.5 and 1.4 of the observed precipitation period by the end of 2050, and the mean temperature will have had a change between -0.1 to 1.6 °C, relative to the observed period. By the end of 2080, the precipitation will also have fluctuated between the two proportions of 0.5 and 1.7 times of the observed precipitation period and the mean temperature will touch an increase between 0.6 and 2.6 °C. Both SPI and SPEI indices suggest the increment in the number of dry periods in the near and far future. However, the total number of negative sequences differed considering the 3, 12 and 24-month intervals at the stations level. Given the SPEI index, as compared to the base period, the total negative sequences of drought and number of dry periods will increase at 3 stations of Avaj, Bagh-Kowsar and Shahid-rajaei-powerhouse and decrease at Qazvin station in the future; however, SPI gives different results, such that for Bagh-Kowsar, there will be an increase in both total negative sequences of drought and number of dry periods, as compared to the baseline period; three other stations will have more dry periods, specifically, but less total negative sequences. The results reported that the drought events would become severe, and the wet events would become extreme in the future.

**Keywords:** Climate Change, Qazvin Plain, Temperature, Precipitation, drought, Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI).

1. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2. Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture & Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Corresponding author, Email: m.banihashemi@ut.ac.ir