

## پیش‌نگری و تحلیل زمانی و مکانی خشکسالی استان تهران تحت مدل گردش عمومی جوی اقیانوسی CanESM2 بر اساس شاخص SPEI

محمدحسین جهانگیر<sup>۱\*</sup>، فراز رحیمی<sup>۲</sup>، مهناز ابوالقاسمی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۵/۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۲

### چکیده

تغییر اقلیم بر سیستم‌های مختلف تأثیرات متفاوتی داشته است که به دلیل نقش حیاتی آب در زندگی انسان، بررسی تأثیرات منفی آن بر شدت و فراوانی وقوع خشکسالی یک منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا به منظور پیش‌نگری پارامترهای اقلیمی با احتساب تغییرات در انتشار گازهای گلخانه‌ای، سناریوهای متعددی معرفی شده‌اند. در این پژوهش به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی استان تهران در دوره‌های آتی با استفاده از شاخص خشکسالی بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده SPEI پرداخته شده است. در این راستا، ابتدا با استفاده از مقادیر دمای کمینه، دمای بیشینه، دمای میانگین و بارندگی روزانه ۸ ایستگاه سینوپتیک در دوره پایه (۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷)، با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و با در نظر گرفتن مدل گردش عمومی جو بر اساس گزارش پنجم هیئت بین‌الدول و سناریوهای انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مقادیر بارش و دما تا سال ۲۱۱۲ پیش‌نگری شد. پس از آن با استفاده از پارامترهای پیش‌نگری شده، خشکسالی SPEI محاسبه شد و در نهایت ویژگی‌های زمانی و مکانی خشکسالی مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی کلی نتایج نشان می‌دهد که شدیدترین خشکسالی در ایستگاه آبعلی در سال ۲۰۷۳ در ماه ژولای برابر با ۶/۶۳- خواهد بود. همچنین بر اساس نتایج بهدست آمده، شهر تهران نسبت به سایر مناطق استان تهران از تنش خشکسالی بیشتری در سال‌های آینده برخوردار خواهد بود. شایان ذکر است که با بررسی‌های سری زمانی خشکسالی‌های آتی، فراوانی خشکسالی در ماه‌های آینده یک عقب‌نشینی ۴ ماهه خواهد داشت و از ماه سپتامبر به ماه می انتقال پیدا خواهد کرد.

**کلیدواژه‌ها:** استان تهران، پیش‌نگری، تحلیل زمانی و مکانی، سناریوهای تغییر اقلیم، شاخص خشکسالی SPEI.

۱. دانشیار گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، نویسنده مسئول، mh.jahangir@ut.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی‌ارشد رشته اکوهیدرولوژی، گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۳. دانشجوی کارشناسی‌ارشد رشته اکوهیدرولوژی، گروه انرژی‌های نو و محیط‌زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

\* این مقاله برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه تهران است.

## مقدمه

افزایش گازهای گلخانه‌ای باعث تشدید پدیده تغییر اقلیم شده که اثرات منفی آن بر جوامع بشری یکی از دغدغه‌های مهم بشر در قرن بیست و یکم به شمار می‌رود. تغییر اقلیم یکی از گسترش‌یافته‌ترین موضوعات مرتبط با افزایش گازهای گلخانه‌ای است که در دو دهه اخیر مورد بحث قرار گرفته است. طبق گزارش ارزیابی تغییر اقلیم هیئت بین دول تغییر اقلیم، پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیم جهانی برای قرن بیست و یکم نشان می‌دهند که گرمایش جهانی به شتاب خود ادامه خواهد (کیم<sup>۱</sup> و جهان‌زب، ۲۰۲۰). از مهم‌ترین نتایج تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی خشکسالی است؛ خشکسالی از جمله پدیده‌های طبیعی بسیار خطرناک است که حتی منجر به از بین رفتن یک نسل حیاتی در منطقه مورد وقوع خواهد می‌شود اما با مدیریت و پیش‌بینی زمانی و مکانی صحیح خشکسالی، می‌توان از خسارات احتمالی، به مقدار قابل توجهی کاست (تورینس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۴).

در این بین، مدل‌های بسیاری بر اساس گردش عمومی جو تحت عنوان GCM<sup>۳</sup> با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای پیش‌بینی اقلیم معرفی شده است. پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی با استفاده از این مدل‌ها تحت سناریوهای مختلف از جمله اساس کار برنامه‌ریزی برای آینده هر منطقه است (راسی فقیهی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). از آنجا که مدل‌های گردش عمومی دیتاها را در واحدهای چند ده کیلومتری ارائه و پیش‌بینی می‌کنند، لازم است تا به منظور پیش‌بینی تغییر اقلیم در سطح ایستگاهی از مدل‌های ریزمقیاس‌کننده استفاده شود.

اخیراً تلاش‌های زیادی از طرف مجامع اقلیم‌شناسی برای توسعه روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی و آماری برای بیان تغییر اقلیم در یک مقیاس محلی و منطقه‌ای صورت گرفته است. مدل‌های RCM<sup>۵</sup> (مدل اقلیمی منطقه‌ای) نمونه‌ای از مدل ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی است. مدل‌های دینامیکی منطقه‌ای

دارای دقت فضایی مناسبی برای ارزیابی‌های اقلیمی بوده و همچنین فرایندهای ریزمقیاس جوی و اقلیمی تا حد ممکن در آن‌ها لحاظ می‌شود. اما مدل RCM هنوز دارای چند اشکال است؛ برای مثال این مدل‌ها به مساحت مورد مطالعه و میزان تفکیک‌پذیری وابسته هستند و از لحاظ محاسباتی پیچیده بوده و انعطاف لازم را ندارند (کوپلا<sup>۶</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). به‌عنوان جانشینی برای مدل‌های منطقه‌ای دینامیکی، مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری توسعه یافته‌اند. این مدل‌ها بر اساس وضعیت اقلیم منطقه‌ای که نتیجه وضعیت اقلیم در مقیاس بزرگ است، پایه‌ریزی شده است (ویلیبی و دوسن<sup>۷</sup>، ۲۰۱۳). روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری به‌طور کلی به سه طبقه تقسیم می‌شوند: ۱. روش رگرسیونی؛ ۲. خوشه‌بندی الگوهای آب‌وهوایی؛ ۳. مولدهای سری‌های زمانی آب‌وهوایی (پاچاوری<sup>۸</sup>، ۲۰۱۴) (IPCC<sup>۹</sup>). یکی از فواید بزرگ این روش‌ها در مقایسه با مدل‌های منطقه‌ای دینامیکی، ساده و ارزان بودن آن‌ها از لحاظ محاسباتی و کاربرد آن‌ها برای خروجی‌های مختلف GCM برای سناریوهای مختلف است (ونگ<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۲۰؛ IPCC). از بهترین روش‌های ریزمقیاس‌نمایی که به‌صورت گسترده بین محققان رواج پیدا کرده و کارایی بالایش تأیید شده، مدل SDSM<sup>۱۱</sup> (مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری) می‌باشد که ترکیبی از مولد تصادفی آب‌وهوا و روش‌های رگرسیونی است (IPCC, 2007). برای نمونه صمدی و همکاران (۲۰۱۱) داده‌های هواشناسی را برای ۴۱ ایستگاه به‌کمک مدل SDSM پیش‌بینی کردند. نتایج نشان داد که این مدل توانایی خوبی برای شبیه‌سازی پیش‌بینی حداقل و حداکثر دما و بارش دارد و با خطاهای بحرانی ۰/۵ تفاوت معنی‌داری وجود ندارد. دهقان و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل SDSM خشکسالی هواشناسی را در ایران پیش‌نگری کردند؛ آن‌ها با توجه به نتایج دوره‌های اعتبارسنجی و معیارهای کارایی، پیشنهاد کردند که SDSM یک ابزار مناسب برای پیش‌بینی خشکسالی در مناطق

6. Coppola  
7. Wilby and Downson  
8. Pachauri  
9. Intergovernmental Panel on Climate Change  
10. Wang  
11. Statistical Down Scaling Model

1. Kim and Jehanzaib  
2. Trenberth  
3. Global Climate Models  
4. Rasifaghihi  
5. Regional Climate Model

خشکسالی شدیدتر و با تکرار بیشتر رخ خواهد داد. نمونه‌ای از پژوهش در مورد بررسی خشکسالی (SPEI) تحت تأثیر تغییر اقلیم در ایران توسط نصرتی و همکاران (۲۰۱۴) انجام شد؛ ایشان همچنین به پیش‌نگری و بررسی درجه حرارت‌های کمینه، میانگین و بیشینه حوزه آبریز خررود با استفاده از سناریوهای RCPs مدل CanEMS2 بر اساس گزارش پنجم پرداختند. آنان نتیجه گرفتند که دمای هوا تا سال ۲۰۸۰ متوسط ۱/۱ درجه افزایش پیدا خواهد کرد؛ همچنین میانگین دمای هوا در پاییز بیشترین و در زمستان کمترین افزایش را خواهد داشت. نجفی‌نژاد و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی سهم عدم قطعیت در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم تحت سناریوهای (RCP) در منطقه البرز جنوبی پرداختند. نتایج نشان داد که برای دمای میانگین در سری‌های زمانی مختلف تحت همه سناریوهای RCP افزایش دمای منظمی در منطقه برای دوره ۲۰۱۱ تا ۲۰۴۰ وجود دارد، درحالی‌که نتایج، کاهش بارندگی نسبت به دوره پایه تحت تمام سناریوها در منطقه مورد مطالعه را نشان دادند. نوده فراهانی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های دوره آتی حوزه دشتگان پرداختند. از خروجی سه مدل گردش کلی MPI-ESM-LR، BCC-CSM1-1 و NORESM1-M تحت سناریوهای انتشار RCP4.5 و RCP8.5 در پژوهش خود استفاده کردند و خروجی مدل‌ها توسط نرم‌افزار LARS-WG ریزمقیاس شد. نتایج نشان داد تحت سناریوی RCP4.5 و در مقیاس‌های ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه به ترتیب ۱۷/۱۶، ۱۴/۷۰ و ۱۸/۷۴ درصد از کل ماه‌ها در دوره آتی دارای وضعیت خشک و تحت سناریوی RCP8.5 در دوره آتی در مقیاس‌های ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه به ترتیب ۱۶/۴۵، ۱۷/۰۳ و ۱۵/۲۱ درصد از ماه‌ها دارای وضعیت خشک هستند. مصطفی‌زاده و ذبیحی (۲۰۱۶) به تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPEI و SPI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی با استفاده از نرم‌افزار R (بررسی موردی: استان کردستان) پرداختند. هدف از پژوهش آن‌ها، مقایسه الگوی وقوع خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPEI و SPI به علت ماهیت چندمقیاسی بودن و قابلیت تحلیل خشکسالی در مقیاس‌های زمانی بوده است. نتایج روشن ساخت که ضمن وجود تفاوت در الگوی وقوع دوره‌های

خشک و نیمه‌خشک است.

پدیده تغییر اقلیم می‌تواند بر سیستم‌های مختلف تأثیرات متفاوتی داشته باشد که به دلیل نقش حیاتی آب در زندگی انسان، بررسی تأثیرات منفی آن بر شدت و فراوانی وقوع خشکسالی یک منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از این رو پیش‌بینی، پایش و تحلیل خشکسالی، یکی از نیازهای اصلی مدیریت منابع آب است (حسن‌یزدانی و همکاران، ۲۰۲۱). به همین سبب، مدل‌ها و شاخص‌های متعدد خشکسالی از جمله شاخص بارش استاندارد شده<sup>۱</sup> (SPI)، شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده<sup>۲</sup> (SPEI)، ویسنت سرانو<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۱، شاخص شدت خشکی پالم<sup>۴</sup> (PDSI)، شاخص ناهنجاری بارش<sup>۵</sup> (RAI)، شاخص رطوبت محصول<sup>۶</sup> (CMI)، شاخص بالم و مولی<sup>۷</sup> (BMI)، شاخص تقاضای آب سطحی<sup>۸</sup> (SWSI)، شاخص خشکسالی جامع<sup>۹</sup> (ADI)، شاخص خشکسالی هیبریدی<sup>۱۰</sup> (HDI)، در طی سالیان اخیر ارائه شده است.

یکی از محدودیت‌های شاخص‌های رایج مانند شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) عدم لحاظ بیلان آب بر اساس میزان تبخیر و تعرق است (نصرتی و همکاران، ۲۰۱۴). لذا محققان بسیاری به منظور برطرف کردن این نقص و بالا بردن کارایی پایش‌های خشکسالی از شاخص SPEI که بر اساس بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل و بیلان آب را در محاسبه شاخص خشکسالی لحاظ می‌کند، استفاده کرده‌اند (لورنزو<sup>۱۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). کیم و همکاران (۲۰۱۳) به مطالعه اثر پیش‌بینی تغییر اقلیم با استفاده از سناریوهای RCP<sup>۱۲</sup>s بر خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI پرداختند؛ آن‌ها نتیجه گرفتند که در سال‌های آتی بارندگی افزایش خواهد یافت، اما به دلیل افزایش دما از شدت تبخیر و تعرق نیز بالا خواهد رفت

1. Standardized Precipitation Index
2. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
3. Vicente-Serano
4. Palmer Drought Severity Index
5. Rainfall anomaly index
6. Product moisture index
7. Balm and Molly Index
8. Surface Water Supply Index
9. Comprehensive drought index
10. Hybrid drought index
11. Lorenzo
12. Representative Concentration Pathway

درجه و ۳۴ دقیقه و ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است (فرجی راد و همکاران، ۲۰۰۹). تهران اقلیم‌های متنوع دارد، در شمال آب‌وهوای معتدل و کوهستانی و در جنوب آب‌وهوای نیمه‌خشک را شامل می‌شود. متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۳۳ میلی‌متر و دمای منطقه بین میانگین کمینه و بیشینه ۱۱/۹ و ۲۲/۷ درجه سلسیوس برآورد شده است. از دید ناهمواری‌های طبیعی، تهران به دو ناحیه دشتی و کوهپایه‌ای البرز تقسیم می‌شود و گستره کنونی آن از ارتفاع ۹۰۰ تا ۱۸۰۰ متری از سطح دریا امتداد یافته است. با توجه به اینکه پایتخت کشور در این منطقه واقع شده و روند جمعیت در این استان رو به رشد است، تأمین منابع آبی و بررسی کمبودهای آبی برای این منطقه از موضوعات مهم استان به شمار می‌رود. شهر تهران از نظر دسته‌بندی اقلیمی کوپن در منطقه  $B_{Sh}$  واقع شده و از نظر پهنه‌بندی اقلیمی ایران در گروه ۵-۲ اقلیم نسبتاً سرد نیمه‌گرم و خشک قرار می‌گیرد (اسکندری، ۲۰۱۶).

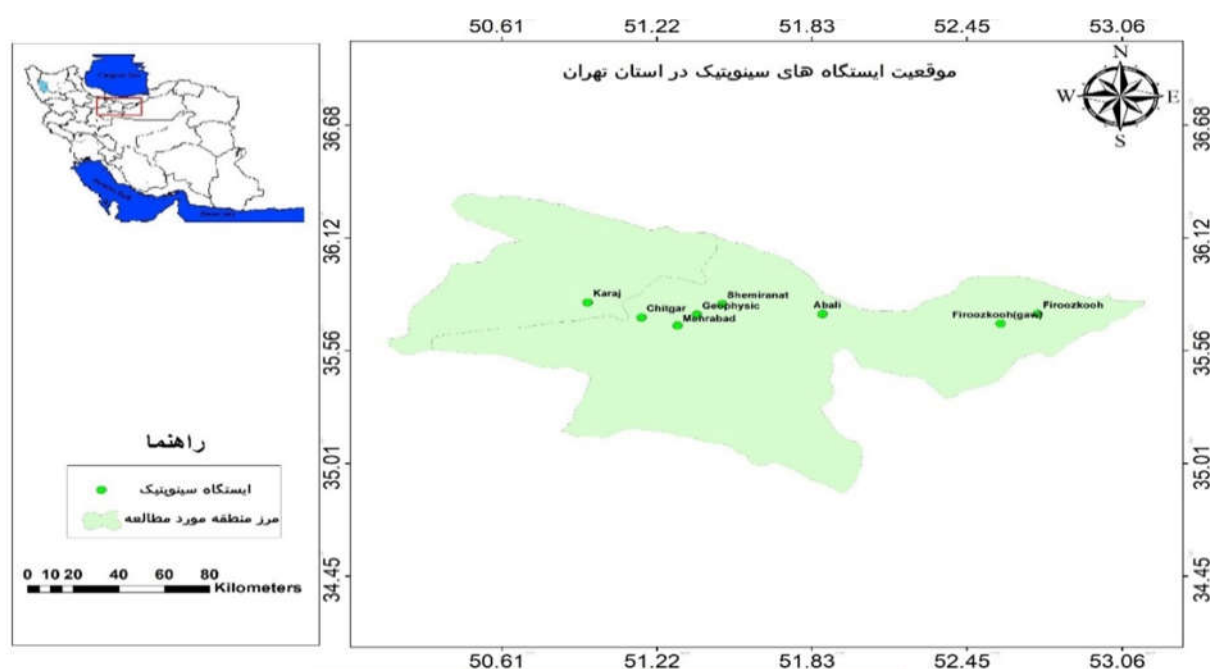
در شکل (۱) و جدول (۱) موقعیت استان تهران به همراه ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعاتی آورده شده است.

ترسالی و خشکسالی SPI و SPEI، شاخص دوره‌های طولانی‌تر خشکی را در اکثر ایستگاه‌ها مشخص کرده است. با توجه به تحقیقات صورت‌گرفته فوق، مدل SDSM دقت قابل قبولی در ریزگردانی داده‌های اقلیمی دارد. از طرفی با توجه به اهمیت ایستگاه یاسوج و قرارگیری آن در حوضه آبریز کارون و لزوم برنامه‌ریزی‌ها به منظور مدیریت منابع آبی در این حوضه، تحقیق حاضر با استفاده از خروجی CanESM2 که یکی از مدل‌های تغییر اقلیم جفت‌شده CMIP5 و بر اساس گزارش پنجم IPCC می‌باشد، متغیرهای اقلیمی دما و بارش را در ایستگاه یاسوج از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۶۷ شبیه‌سازی و مورد بررسی قرار می‌دهد. در این پژوهش بارش، بیشینه و کمینه دمای ایستگاه سینوپتیک تهران با استفاده از خروجی مدل CanESM2، تحت سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 از ریزگردان آماری SDSM، برای سه دوره ۱۰ ساله از ۲۰۵۰ تا ۲۰۸۰ شبیه‌سازی شده است.

## مواد و روش

### منطقه مورد مطالعه

استان تهران با وسعتی حدود ۱۲۹۸۱ کیلومتر مربع، در ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های سینوپتیک استفاده‌شده

Figure (1): Location of the study area and used synoptic stations

جدول (۱): اطلاعات ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان تهران

Table (1): Information about the stations in Tehran province

ایستگاه	نوع ایستگاه	طول دوره آماری	طول جغرافیایی (درجه، دقیقه)	عرض جغرافیایی (درجه، دقیقه)
آبعلی	سینوپتیک	۱۹۹۵-۲۰۱۷	۵۱-۵۳	۳۵-۴۵
فیروزکوه	سینوپتیک	۱۹۹۵-۲۰۱۷	۵۲-۵۰	۳۵-۵۵
فیروزکوه (gaw)	سینوپتیک	۱۹۹۵-۲۰۱۷	۵۲-۲۴	۳۵-۴۳
شمیرانات	سینوپتیک	۱۹۹۵-۲۰۱۷	۵۱-۳۷	۳۵-۴۷
ژئوفیزیک	سینوپتیک	۱۹۹۵-۲۰۱۷	۵۱-۲۳	۳۵-۴۴
مهرآباد	سینوپتیک	۱۹۹۵-۲۰۱۷	۵۱-۱۹	۳۵-۴۱
چیتگر	سینوپتیک	۱۹۹۵-۲۰۱۷	۵۱-۰۸	۳۵-۴۲
کرج	سینوپتیک	۱۹۹۵-۲۰۱۷	۵۰-۵۴	۳۵-۵۵

مربوط نیز در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول (۲): مشخصات مدل CanESM2 (گیرمدین و همکاران ۲۰۱۸)

Table (2): CanESM2 Model Specifications (Gebremedhin et al., 2018)

دقت مکانی داده‌های اقلیمی		دقت مکانی داده‌های اقیانوسی	
طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)
۱/۴۰۶۲۵	۱/۱۴۰۷ و ۰/۹۳۰۳	۲/۸۱۲۵	۲/۷۹۰۶

مدل SDSM یک مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری است که قابلیت توسعه سریع و کم‌هزینه داده‌های ریزمقیاس‌شده در مقیاس ایستگاهی به صورت روزانه، ماهانه، فصلی یا سالانه را دارد (مانزاس<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). این نسخه برای اولین بار توسط ویلی ارائه شد (ویلی و همکاران، ۲۰۰۲). از آن زمان تاکنون این مدل پنج بار تحت بازنگری قرار گرفته است؛ آخرین نسخه این مدل SDSM 5/2 می‌باشد که در ژوئای ۲۰۱۳ در اختیار محققان قرار گرفته است. این نرم‌افزار داده‌های روزانه هواشناسی ایستگاه مورد نظر را به‌عنوان ورودی گرفته و در هفت مرحله، خروجی مدل GCM را بر اساس داده‌های روزانه در منطقه مورد مطالعه، ریزمقیاس می‌کند: ۱. کنترل کیفی و تبدیل داده‌ها؛ ۲. بررسی و انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده؛ ۳. برازش مدل؛ ۴. تولید داده‌های آب‌وهوایی؛ ۵. تحلیل داده‌ها؛ ۶. تحلیل گرافیکی؛ ۷. تولید سناریو.

### ریزمقیاس‌نمایی آماری

مدل‌های گردش عمومی در واقع حل معادلات حاکم بر جو بر اساس قوانین نیوتن و ترمودینامیک هستند (چومان<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴). در خصوص این مدل‌ها دو دیدگاه عمده وجود دارد: ۱. دیدگاهی که هدف آن استفاده از این گونه مدل‌ها برای پیش‌بینی فصلی (از یک ماه آینده تا کمتر از یک سال) است؛ ۲. دومین دیدگاه استفاده از این مدل‌ها برای پیش‌نگری اقلیم در مقیاس دهه تا سده می‌باشد که نمونه‌های آن در مراکز مختلف اقلیمی در حال اجرا می‌باشد و اقلیم کره زمین را تا سال ۲۳۰۰ میلادی با استفاده از همین مدل‌ها شبیه‌سازی کرده‌اند (کیم و همکاران، ۲۰۱۳). برای ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی دما و بارش از مدل گردش عمومی CanESM2 که در گزارش پنجم IPCC آمده، تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در این پژوهش استفاده شده است. علت انتخاب مدل فوق کاربرد وسیع آن در مطالعات تغییر اقلیم و سهولت دسترسی به اطلاعات آن‌ها می‌باشد. این مدل دارای شبکه‌بندی با ابعاد ۱۲۸×۶۴ سلول (طول × عرض جغرافیایی) است. طول جغرافیایی دارای رزولوشن ۲/۸۱۲۵° و عرض جغرافیایی نیز دارای رزولوشن ۲/۸۱۲۵° است. داده‌های تاریخی مدل NCEP<sup>۲</sup> از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ و داده‌های سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 نیز برای سال ۲۰۰۶ تا ۲۱۰۰ از سایت [cccsn.ec.gc.ca](http://cccsn.ec.gc.ca) دانلود شده است. جزئیات مربوط به این مدل در جدول (۲) و مشخصات سناریوهای

1. Chaumont  
2. Nation cholesterol education program

3. Manzanos

جدول (۳): معرفی سناریوهای مدل گردش عمومی CanESM2 (ونو و همکاران، ۲۰۱۰)

Table (3): Introduces CanESM2 General Circulation Model Scenarios (Vano et al., 2009)

RCP8.5	RCP4.5	RCP2.6
در این سناریو سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیمی در نظر گرفته نشده است. میزان واداشت تابشی به ۸/۵ وات بر متر مربع تا سال ۲۱۰۰ خواهد رسید.	واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای تا قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر متر مربع ثابت است.	مطابق این سناریو واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ وات بر متر مربع رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ میلادی می‌رسد. برای رسیدن به این سطح واداشت تابشی بایستی گازهای گلخانه‌ای به میزان قابل توجهی کاهش یابند.

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{x-y}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[ 1 + \left( \frac{x-y}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (2)$$

که در آن  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و مبدأ و  $x$  سری تجمعی مقادیر  $D$  در پنجره زمانی معین است. پارامترهای این تابع با استفاده از روش گشتاور  $L$  از معادلات زیر به دست می‌آیند:

پس از محاسبه مقادیر  $D$  از رهیافتی همانند شاخص بارش استاندارد SPI برای محاسبه SPEI استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا مجموع مقادیر متوالی سری  $D$  در پنجره‌های زمانی مختلف محاسبه می‌شود. اگر  $x$  سری تجمعی  $D$  در پنجره زمانی معین باشد، در مرحله بعد یک توزیع احتمال مناسب بر سری  $x$  برازش می‌یابد. طبق بررسی‌های ویسته سرانو و همکاران (۲۰۱۱)، توزیع لوگ-لجستیک<sup>۳</sup> سه پارامتری کارایی مناسبی در مدل‌سازی سری  $x$  دارد. فرم تابع چگالی احتمال توزیع مذکور به صورت زیر بیان شده است:

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)} \quad (4)$$

$$y = w_0 - \alpha\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)\Gamma\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \quad (5)$$

که  $\Gamma(\cdot)$  تابع گاما و  $w_0$ ،  $w_1$  و  $w_2$  گشتاورهای وزنی احتمال هستند و از معادله زیر محاسبه می‌شوند:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_1)^s D_i \quad (6)$$

که  $F$  تابع توزیع تجربی،  $N$  تعداد کل داده‌ها،  $i$  شماره ردیف در

### معرفی شاخص خشکسالی SPEI

شاخص بارش-تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد SPEI نخستین بار توسط ویسته سرانو و همکاران (۲۰۱۱) معرفی شد. این شاخص چندکمیته است و در آن داده‌های بارش و دما ترکیب می‌شوند. نحوه محاسبه آن همانند شاخص SPI است اما در شاخص SPEI مقادیر اختلاف بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل PET مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص مبتنی بر محاسبه ترازمندی آب اقلیمی است و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای هوا نیاز دارد. معادله ترازمندی آب اقلیمی در رابطه (۱) تعریف شده است.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

در این رابطه،  $P$  و  $PET$  به ترتیب بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل،  $D$  اختلاف آن‌ها و  $i$  شماره ماه مورد نظر است. بر اساس نتایج ماوروماتیس<sup>۱</sup> (۲۰۱۲) مبنی بر تشابه روش‌های ساده و پیچیده برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، ویسته سرانو و همکاران (۲۰۱۱) از روش تورنت‌وایت بدین منظور استفاده کرده‌اند. معادلات مختلفی برای محاسبه  $PET$  وجود دارد که در استفاده از هر یک از آن‌ها محدودیتی برای SPEI ندارد. در نسخه نخست SPEI از روش ساده تورنت‌وایت استفاده شد، ولی در نسخه دوم آن (در صورت عدم محدودیت داده) توصیه شده است که از روش پنمن-مانتیث فائو استفاده شود (داگنس<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۰).

1. Mavromatis  
2. Duggins

3. Log-Logistic

جدول (۴): طبقات شاخص SPEI (ویسنت سرانو، ۲۰۱۰)

Table (5): SPEI Index Classes (Vicente-Serrano et al., 2010: 10)

توصیف وضعیت	طبقات شاخص
رطوبت بسیار شدید	بیشتر از ۲
رطوبت شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹
رطوبت متوسط	۱ تا ۱/۴۹
خشکسالی متوسط	-۱ تا -۱/۴۹
خشکسالی شدید	-۱/۵ تا -۱/۹۹
خشکسالی بسیار شدید	کمتر از -۲

## نتایج

### تحلیل زمانی

تحلیل زمانی خشکسالی یکی از ابعاد مشخصات خشکسالی است که از تجزیه و تحلیل دقیق آن، اطلاعات بسیار مفیدی در رابطه با شدت و مدت و فراوانی به دست خواهد آمد. همان طور که در جدول (۵) قابل ملاحظه است، بر اساس سناریو RCP2.6 ایستگاه ژئوفیزیک در دهه پایانی قرن ۲۱ خشکسالی برابر با ۴/۳- را تجربه خواهد کرد. از سوی دیگر نیز ایستگاه فیروزکوه بر اساس سناریو RCP4.5، شدیدترین خشکسالی در دوره آتی برابر با ۴/۹- را در پیش رو دارد. در آخر نیز بر اساس سناریو RCP8.5، ایستگاه آبعلی با مقدار بسیار تعجب‌برانگیز ۶/۶۳- شدیدترین خشکسالی را در کل دوره پیش‌بینی در تمامی سناریوها در در دهه پایانی قرن ۲۱ به خود اختصاص داده است. از نکات بسیار قابل تأمل فراوانی خشکسالی بر اساس هر سناریو نیز می‌توان به این موضوع اشاره کرد که بر اساس سناریو RCP2.6، فراوانی خشکسالی در دهه‌های ۶ و ۷ قرن ۲۱ بسیار بیشتر از سایر دهه‌هاست. این قضیه در سناریوهای دیگر نیز به‌خصوص در سناریو RCP8.5 به‌وضوح قابل تشخیص است.

بر اساس نمودارهای میانگین ماهانه مشاهداتی و پیش‌بینی شده در هر ایستگاه بر اساس هر سناریو، می‌توان ادعا کرد که پدیده خشکسالی در سال‌های آتی در حال حرکت رو به عقب است؛ به‌تعبیری دیگر، در سال‌های مشاهداتی اغلب ایستگاه‌ها ماه‌های سپتامبر و اکتبر را به‌عنوان خشک‌ترین ماه‌های سال قلمداد کرده است اما بر اساس سناریوهای تغییر اقلیمی، ماه‌های می، ژوئن و ژولای، نماد ماه‌های دارای خشکسالی با فراوانی بالا در سال‌های آتی هستند. با توجه به اینکه ماه‌های تابستان بارش قابل ملاحظه‌ای در ایستگاه‌های مورد نظر وجود

داده‌های مرتب‌شده صعودی و s مرتبه گشتاور است و در اینجا برابر صفر، ۱ و ۲ در نظر گرفته می‌شود. مقدار F از تابع تجربی هاسکینگ (۱۹۹۰) محاسبه می‌شود (دای<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۳)

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \quad (7)$$

پس از تعیین پارامترهای توزیع، نوبت به محاسبه تابع توزیع تجمعی لوگ-لجستیک x می‌رسد که فرم ریاضی آن به‌صورت زیر است (جهانگیر و همکاران، ۲۰۱۹):

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{x - y} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (8)$$

حال می‌توان هر مقدار تجمعی x را در سطوح هم احتمال از توزیع تجمعی لوگ-لجستیک به توزیع نرمال استاندارد (با میانگین صفر و واریانس یک) تبدیل کرد. به‌کمک تقریب ابرموتز و استگان<sup>۲</sup> (۱۹۶۵)، معادله تبدیل‌کننده توزیع لوگ-لجستیک به توزیع نرمال استاندارد معادله SPEI به‌صورت زیر خواهد بود:

$$SPEI = w - \frac{C_0 + C_1w + C_2w^2}{1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3} \quad (9)$$

که در آن:

$$w = \sqrt{-2\ln(P)} \quad \text{for } P \leq 0.5 \quad (10)$$

و  $P=1-F(x)$  اگر  $P>0.5$  باشد،  $1-P$  جایگزین  $P$  در معادله می‌شود. ثابت‌های معادله SPEI عبارت‌اند از:

$$C_0 = 2.515517 \quad C_1 = 0.802853 \quad C_2 = 0.010328$$

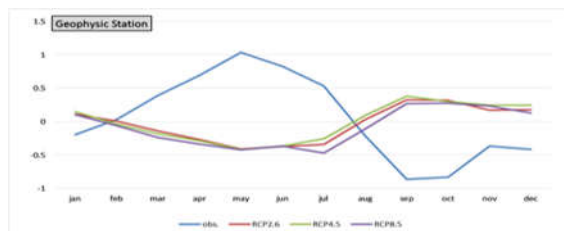
$$d_1 = 1.432788 \quad d_2 = 0.189269 \quad d_3 = 0.001308$$

این شاخص می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشکسالی هنگامی شروع می‌شود که مقدار شاخص به منفی یک یا برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد. طبقه‌بندی SPEI همانند SPI است و برای طبقه‌بندی مقادیر آن می‌توان از آستانه‌های مندرج در جدول (۴) استفاده کرد.

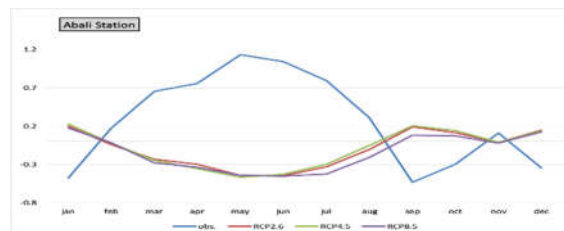
1. Dai
2. Abramowitz and Santiago

داشته که از سپتامبر به می تغییر یافته است. شکل های (۲) تا (۹) گویای این تغییرات هستند.

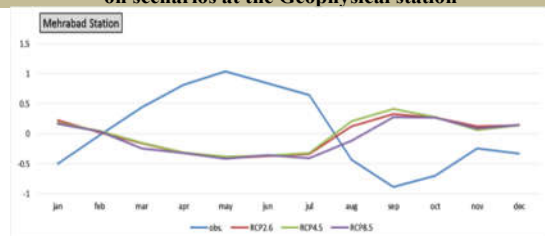
ندارد، لذا خشکسالی خیلی شدید (مثلاً در ماه جولای) پیامد شدیدی نخواهد داشت. ماه های تر نیز در سال های مشاهداتی نسبت به ماه های پیش بینی یک تغییرات زمانی حدود ۴ ماهه



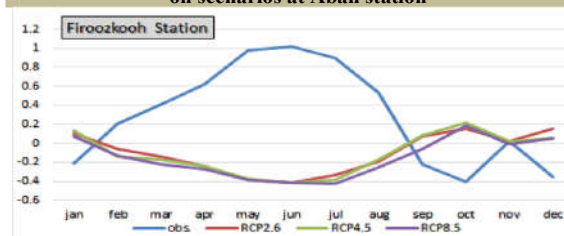
شکل (۳): نمودار خشکسالی مشاهداتی و پیش بینی شده بر اساس سناریوها در ایستگاه ژئوفیزیک  
Figure (3): Observed and predicted drought diagrams based on scenarios at the Geophysical station



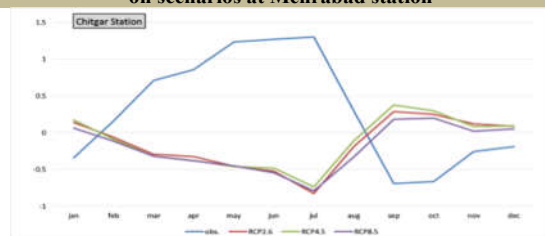
شکل (۲): نمودار خشکسالی مشاهداتی و پیش بینی شده بر اساس سناریوها در ایستگاه آبعلی  
Figure (2): Observed and predicted drought diagrams based on scenarios at Abali station



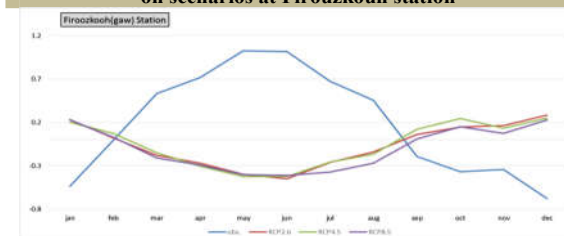
شکل (۵): نمودار خشکسالی مشاهداتی و پیش بینی شده بر اساس سناریوها در ایستگاه مهرآباد  
Figure (5): Observed and predicted drought diagrams based on scenarios at Mehrabad station



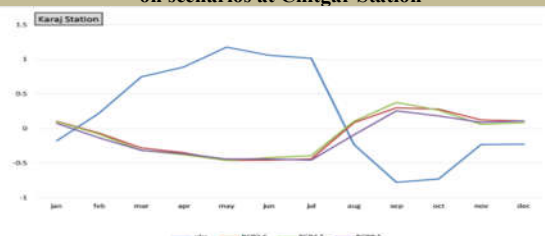
شکل (۴): نمودار خشکسالی مشاهداتی و پیش بینی شده بر اساس سناریوها در ایستگاه فیروزکوه  
Figure (4): Observed and predicted drought diagrams based on scenarios at Firozkooh station



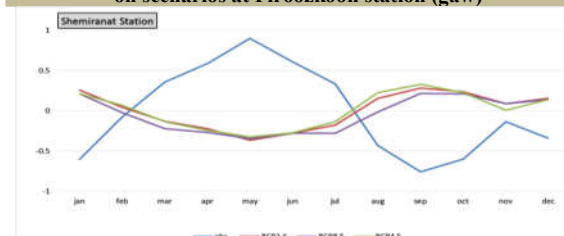
شکل (۷): نمودار خشکسالی مشاهداتی و پیش بینی شده بر اساس سناریوها در ایستگاه چیتگر  
Figure (7): Observed and predicted drought scenarios based on scenarios at Chitgar Station



شکل (۶): نمودار خشکسالی مشاهداتی و پیش بینی شده بر اساس سناریوها در ایستگاه فیروزکوه (gaw)  
Figure (6): Observed and predicted drought diagrams based on scenarios at Firozkooh station (gaw)



شکل (۹): نمودار خشکسالی مشاهداتی و پیش بینی شده بر اساس سناریوها در ایستگاه کرج  
Figure (9): Observed and predicted drought scenarios based on scenarios at Karaj station



شکل (۸): نمودار خشکسالی مشاهداتی و پیش بینی شده بر اساس سناریوها در ایستگاه شمیرانات  
Figure (8): Observed and predicted drought diagrams based on scenarios at Shemiranat station



جدول (۵): مشخصات و فراوانی‌های طبقات خشکسالی بر اساس هر سناریو در هر ایستگاه

Table (5): Characteristics and frequencies of drought classes according to each scenario at each station

مقدار شدیدترین خشکسالی	دهه‌ی مربوط به شدیدترین خشکسالی	طبقات خشکسالی					ایستگاه‌ها	سناریو	
		خشکسالی بسیار شدید	خشکسالی بسیار	خشکسالی متوسط	رطوبت متوسط	رطوبت شدید			
-۳/۵۵	۲۰۸۰-۲۰۷۰	۱۰	۳۶	۸۲	۵۹	۲۳	۷	آبعلی	RCP2/6
-۳/۹۱	۲۰۶۰-۲۰۵۰	۱۶	۳۶	۸۰	۶۰	۱۹	۱۰	فیروزکوه	
-۴/۲۲	۲۰۷۵-۲۰۶۵	۱۴	۳۲	۸۵	۶۱	۲۸	۷	فیروزکوه (gaw)	
-۳/۶۰	۲۰۷۰-۲۰۶۰	۱۵	۳۸	۷۲	۶۸	۳۹	۱۱	شمیرانات	
-۴/۳۰	۲۰۷۵-۲۰۶۵	۱۶	۴۴	۷۳	۶۹	۳۵	۱۲	ژئوفیزیک	
-۳/۳۹	۲۰۷۰-۲۰۶۰	۲۲	۳۹	۷۴	۸۲	۳۵	۱۰	مهرآباد	
-۴/۱۷	۲۰۵۵-۲۰۴۵	۲۷	۴۳	۸۸	۵۳	۲۶	۹	چیتگر	
-۳/۱۷	۲۰۷۰-۲۰۶۰	۱۵	۳۸	۷۹	۶۷	۲۲	۱۱	کرج	RCP4/5
-۳/۴۶	۲۰۸۰-۲۰۷۰	۱۰	۳۴	۷۵	۵۳	۲۱	۸	آبعلی	
-۴/۹۰	۲۰۷۰-۲۰۶۰	۱۷	۳۷	۸۲	۶۱	۲۶	۴	فیروزکوه	
-۴/۶۸	۲۰۷۰-۲۰۶۰	۱۲	۳۰	۶۹	۵۳	۲۶	۱۰	فیروزکوه (gaw)	
-۴/۵۶	۲۰۷۰-۲۰۶۰	۱۱	۳۹	۷۴	۷۹	۲۹	۱۳	شمیرانات	
-۳/۴۲	۲۰۸۰-۲۰۷۰	۱۸	۳۴	۶۸	۶۶	۴۳	۸	ژئوفیزیک	
-۴/۶۲	۲۰۶۰-۲۰۵۰	۱۳	۴۵	۹۰	۶۹	۴۴	۱۳	مهرآباد	
-۴/۱۲	۲۰۶۰-۲۰۵۰	۱۷	۴۰	۱۰۰	۶۸	۳۰	۸	چیتگر	RCP8/5
-۳/۳۴	۲۰۸۰-۲۰۷۰	۱۵	۳۶	۸۶	۶۳	۲۷	۷	کرج	
-۶/۶۳	۲۰۷۰-۲۰۶۰	۱۵	۳۴	۸۵	۴۴	۲۶	۷	آبعلی	
-۴/۴۷	۲۰۸۰-۲۰۷۰	۲۲	۳۳	۸۸	۵۰	۱۹	۶	فیروزکوه	
-۴/۵۱	۲۰۷۰-۲۰۶۰	۱۹	۳۱	۷۴	۵۳	۳۳	۶	فیروزکوه (gaw)	
-۲/۹۹	۲۰۸۰-۲۰۷۰	۱۷	۴۱	۸۸	۷۷	۳۷	۱۱	شمیرانات	
-۴/۲۳	۲۰۸۰-۲۰۷۰	۱۷	۴۳	۷۶	۷۴	۲۹	۴	ژئوفیزیک	
-۳/۷۱	۲۰۷۰-۲۰۶۰	۲۷	۳۶	۸۲	۶۹	۳۴	۱۷	مهرآباد	
-۲/۸۰	۲۰۸۰-۲۰۷۰	۱۸	۵۳	۱۰۴	۵۴	۳۰	۴	چیتگر	
-۳/۱۰	۲۰۸۰-۲۰۷۰	۱۶	۳۶	۱۰۰	۶۷	۲۷	۵	کرج	

### تحلیل مکانی

است؛ لذا با تحلیل دقیق‌تر این مبانی می‌شود به راهکار تخصیص عادلانه آب بر اساس تنش‌های خشکی پیش رو قدم برداشت. در سه بخش پیش رو به تحلیل مکانی احتمال وقوع

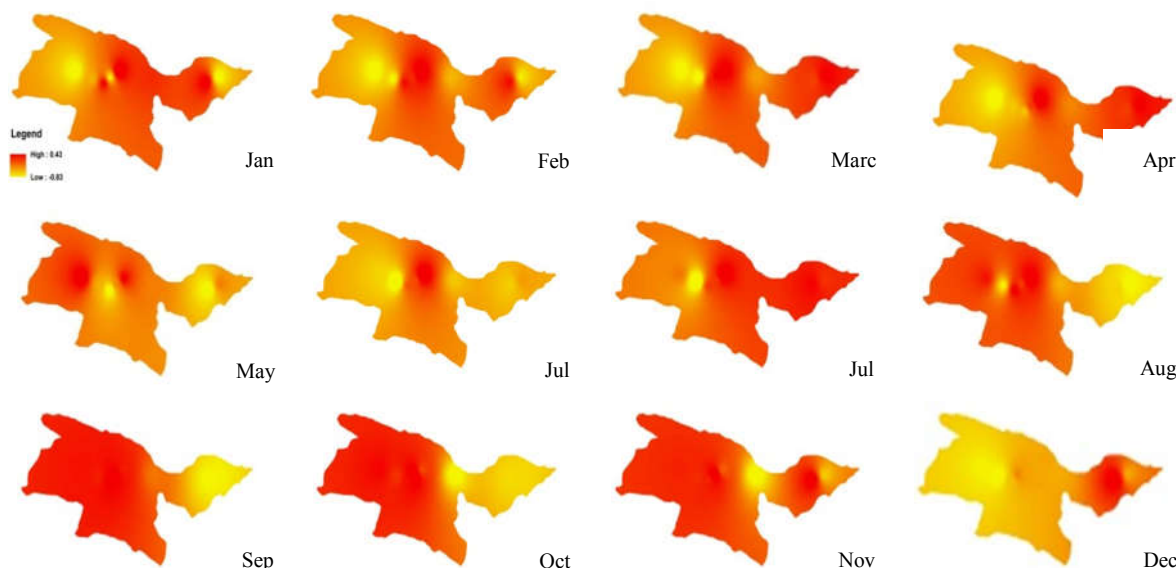
تحلیل مکانی احتمال وقوع خشکسالی، از جمله مهم‌ترین تحلیل‌ها به منظور مدیریت منابع آبی در سطح خرد و کلان

سمت غرب به سمت شرق استان شیفت پیدا می‌کند اما دوباره از ماه آگوست تا ژانویه به‌جز ماه دسامبر در غرب استان تهران متمرکز می‌شود. از جمله نکات قابل توجه در این نقشه‌ها، اثر پایین خشکسالی بر ایستگاه ابعلی بوده است. شایان ذکر است منطقه شرق استان تهران، فراوانی خشکسالی بسیار کمتری نسبت به سایر نواحی استان را در آینده بر اساس سناریو اقلیمی مذکور خواهد داشت. در آخر، نکته قابل تأمل در نقشه‌های حاضر، فراوانی و گستردگی بسیار بالای خشکسالی در ماه‌های سپتامبر تا نوامبر است. نقشه پهنه‌بندی خشکسالی‌های پیش‌بینی شده به تفکیک هر ماه بر اساس سناریو RCP 2.6 در شکل (۱۰) آورده شده است.

خشکسالی بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم پرداخته شده است. به دلیل عدم قطعیت بالای مدل‌سازی‌ها و اینکه مدل‌های CMIP توسط سناریوهای IPCC آغازگری شده‌اند، باید به این نکته توجه کرد که مقادیر خشکسالی فوق ممکن است به سال خاصی تعلق نداشته باشد ولی در مجموع آن را می‌توان به‌عنوان مشخصه اقلیمی انتهای قرن بیست و یکم در نظر گرفت.

### تحلیل مکانی بر اساس سناریو ۲/۶

در اولین نگاه می‌توان به این نکته اشاره داشت که در تمامی ماه‌های سال، مرکز استان تهران که برابر به شهر تهران می‌شود، دچار تنش آبی و بحران خشکسالی خواهد بود. از سوی دیگر، بر اساس تصاویر حاصل شده، خشکسالی به‌طور جالبی در طی ماه‌های ژانویه تا ژولای، روند متحرک داشته است به طوری که از



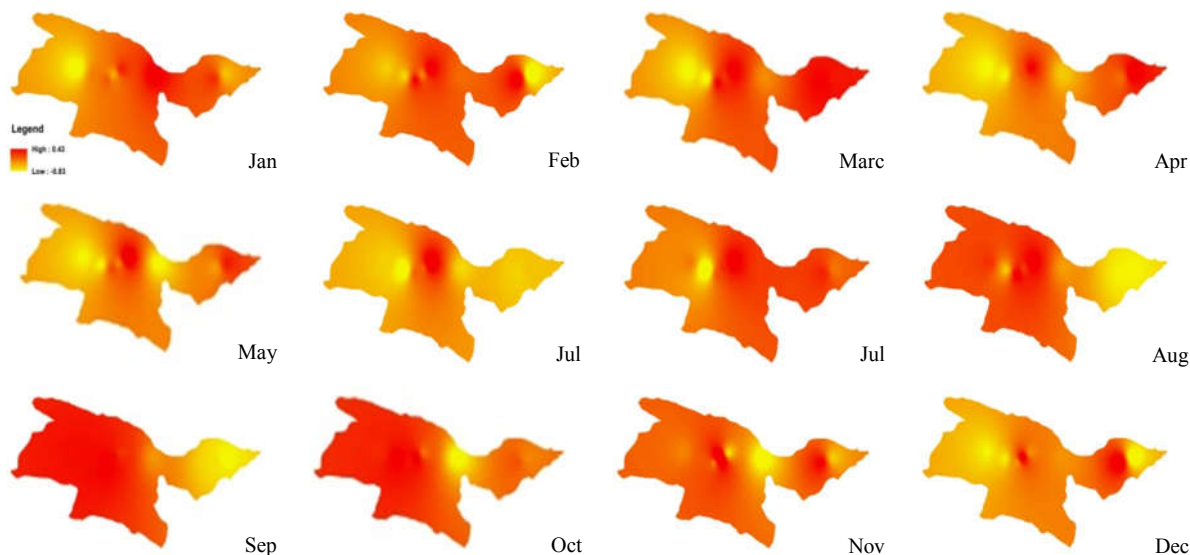
شکل (۱۰): پراکنش خشکسالی پیش‌بینی شده بر اساس سناریو ۲/۶ در ماه‌های سال

Figure (10): Forecasted drought distribution based on scenario 2.6 per month

نسبت به سناریو ۲/۶ نیز می‌توان به موضوع عدم حرکت خشکسالی در ماه‌های ذکر شده در تحلیل مکانی سناریو ۲/۶ اشاره کرد. گفتنی است که ماه‌های سپتامبر و اکتبر، خشکسالی بسیار گسترده‌ای در سال‌های آتی را تجربه خواهند کرد. نقشه پهنه‌بندی خشکسالی‌های پیش‌بینی شده به تفکیک هر ماه بر اساس سناریو RCP 4.5 در شکل (۱۱) آورده شده است.

### تحلیل مکانی بر اساس سناریو ۴/۵ در هر ماه

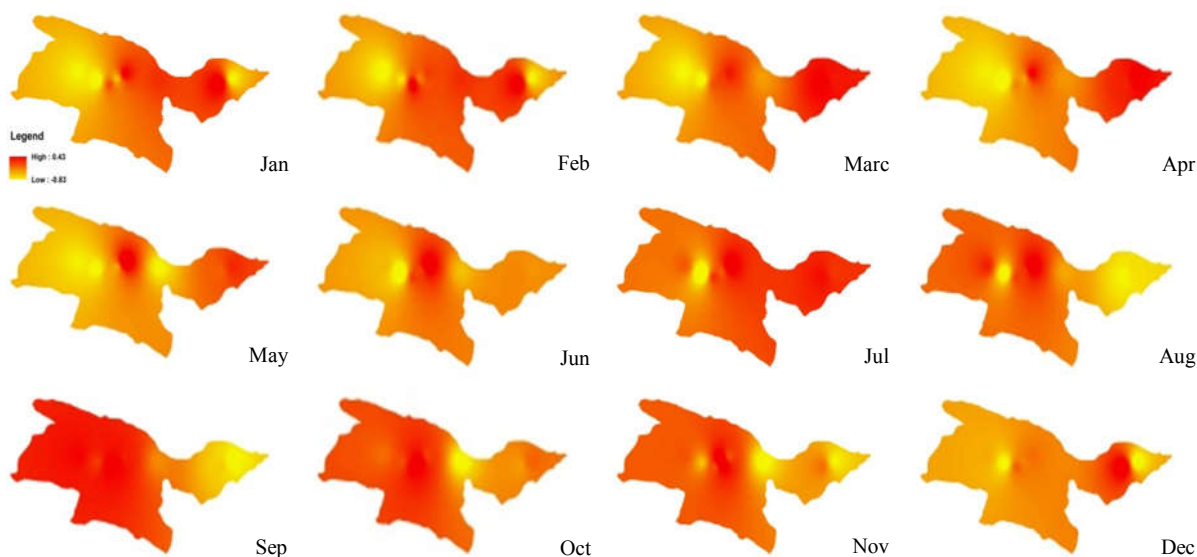
سناریو ۴/۵ نسبت به سناریو ۲/۶ از تغییرات اقلیمی شدیدتری خبر داده است. نکته قابل توجه در تصاویر به‌دست آمده، استمرار فراوانی خشکی در مرکز استان تهران یا به عبارتی همان شهر تهران است. در نقشه‌های به‌دست آمده همچنین فراوانی خشکسالی در غرب تهران بسیار کاسته شده و یک توازن بین غرب و شرق برقرار شده است. بر اساس سناریوی مذکور



شکل (۱۱): پراکنش خشکسالی پیش‌بینی شده بر اساس سناریو ۴/۵ در ماه‌های سال  
**Figure (11): Predicted drought distribution based on scenario 4.5 in the months of the year**

شرق نیز کمتر است و این داستان تقریباً عکس سناریو ۲/۶ است. این نکته را نیز باید متذکر شد که ماه سپتامبر که برابر با ماه مهر است، گسترده‌ترین خشکسالی را در بین ماه‌های موجود بر اساس سناریوی مذکور تجربه خواهد کرد. نقشه پهنه‌بندی خشکسالی‌های پیش‌بینی شده به تفکیک هر ماه بر اساس سناریو RCP 8.5 در شکل (۱۲) آورده شده است.

**تحلیل مکانی بر اساس سناریو ۸/۵ در هر ماه**  
 سناریو ۸/۵ تغییراتی متفاوت‌تر در خصوص پراکنندگی مناطق مستعد خشکسالی در سال‌های آینده را نسبت به سناریوهای تغییر اقلیم قبلی نشان داده است. از جمله نکات تأمل‌برانگیز در این بخش، کاهش بسیار چشمگیر فراوانی خشکسالی در غرب استان تهران است. فراوانی این بخش حتی از بخش مرکز و



شکل (۱۲): پراکنش خشکسالی پیش‌بینی شده بر اساس سناریو ۸/۵ در ماه‌های سال  
**Figure (12): Predicted drought distribution based on scenario 8.5 in the months of the year**

CANESM2 در تهران پرداخته است. در ایستگاه تهران، بیشینه و کمینه دما نسبت به ژئوپتانسیل در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال و

**بحث و نتیجه‌گیری**  
 این مقاله به بررسی ریزگردانی اقلیمی با استفاده از سناریوهای

مقدار دمای بیشینه دوره‌ها نسبت به دوره پایه، در ماه‌های نوامبر و آوریل رخ داده است به طوری که در نوامبر ۵/۴۵ و آوریل ۶/۳۲ درجه سانتی‌گراد افزایش دما خواهیم داشت. همچنین ماه جولای دوره ۲۰۷۰ تا ۲۰۸۰، بالاترین دمای بیشینه برآوردی در کل سال‌های آبی مورد مطالعه در این ایستگاه پیش‌بینی شده است که ۴۴/۴ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی RCP4.5 خواهد بود.

با بررسی و مقایسه سال‌های مشاهده‌ای و سال‌های پیش‌بینی بر اساس سناریوهای مختلف می‌توان ادعا کرد که به‌حتم، فراوانی خشکسالی در دوره آبی بر اساس هر سه سناریو افزایش خواهد یافت و همچنین استان تهران در دهه ۷ قرن ۲۱ میزبان شدیدترین و فراوان‌ترین خشکسالی‌ها خواهد بود. لذا می‌بایست تدابیری صحیح برای این موضوع اندیشیده شود. همچنین بر اساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان اذعان داشت که احتمال وقوع خشکسالی در ماه‌های سال‌های مشاهده‌ای نسبت به پیش‌بینی شده تغییراتی دارد و از یک عقب‌نشینی فصلی چه درباره خشکسالی و چه درباره ترسالی خبر می‌دهد. در آخر نیز با توجه به آنالیزهای مکانی می‌توان اشاره داشت که شهر تهران به نسبت سایر مناطق استان تهران، از تنش دما و بارش بیشتری (خشکسالی منظور) برخوردار است.

میانگین دما در ارتفاع ۲ متری حساس بوده و بارش به فشار سطح دریا، سرعت مداری سطحی، واگرایی سطحی و سرعت مداری در ارتفاع ۸۵۰ هکتوپاسکال حساس است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد بارش در سال‌های آبی مورد مطالعه، یک بی‌هنجاری افزایشی را نشان خواهد داد که این بی‌هنجاری افزایشی در دوره اول تندتر و در دوره‌های پایانی کندتر است. بیشترین میزان بارندگی در فصل زمستان و سپس بهار خواهد بود. دوره بررسی شده ۲۰۷۰ تا ۲۰۸۰ نسبت به دو دوره دیگر خشک‌تر خواهد شد و بیشترین برآورد میزان بارش مربوط به سناریوی RCP2.6 ماه فوریه است و کمترین برآورد مربوط به سناریوی RCP4.5 در ماه آگوست. دمای کمینه نیز در سال‌های آبی روند افزایشی دارد و بیشترین تغییرات دمای کمینه مربوط به فصل پاییز و بهار است. بیشترین تغییرات دمای کمینه نسبت به دوره پایه در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ تجربه خواهد شد. به‌طور کلی با توجه به نتایج به‌دست‌آمده به‌طور متوسط تغییرات سناریوی RCP2.6 نسبت به دوره پایه بیشتر و در سناریوی RCP8.5 تغییرات کمتر خواهد بود. دمای بیشینه نیز در سال‌های آبی روند افزایشی دارد و بیشترین تغییرات دمای بیشینه مربوط به فصل بهار دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ است که بیشینه دمای بیشینه در این فصل نسبت به دوره پایه ۵/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش را نشان می‌دهد. همچنین در بررسی تغییرات ماهانه، بیشترین

## منابع

1. Abramowitz, M., & Stegun, I. A. 1965. Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical table. US Department of Commerce; National Bureau of Standards Applied Mathematics Series, 55.
2. Chaumont, D. 2014. A guidebook on climate scenarios: Using climate information to guide adaptation research and decisions.
3. Coppola, E., Nogherotto, R., Ciarlo, J. M., Giorgi, F., van Meijgaard, E., Kadyrov, N. and Wulfmeyer, V. 2021. Assessment of the European climate projections as simulated by the large EURO-CORDEX regional and global climate model ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(4), e2019JD032356.
4. Dehghan, S., Salehnia, N., Sayari, N. and Bakhtiari, B. 2020. Prediction of meteorological drought in arid and semi-arid regions using PDSI and SDSM: a case study in Fars Province, Iran. *Journal of Arid Land*, 12(2), 318-330.
5. Dai, A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature climate change*, 3(1), 52-58.
6. Duggins, J., Williams, M., Kim, D. Y. and Smith, E. 2010. Change point detection in SPI transition probabilities. *Journal of hydrology*, 388(3-4), 456-463.
7. Eskandari, H., Borji, M., Khosravi, H., & Mesbahzadeh, T. 2016. Desertification of forest, range and desert in Tehran province, affected by climate change. *Solid Earth*, 7(3), 905-915.
8. Farajirad, A. Seyyednasiri, S.Z. winter (2009). Tehran Tourism Geography and the Role of Urbanism and Architecture in its Development, *Journal of New attitudes in human geography (human geography) Volume 2, Issue 1; page 71 - 84. (in Farsi)*
9. Gebremedhin, M. A., Abraha, A. Z. and Fenta, A. A. 2018. Changes in future climate indices using Statistical Downscaling Model in the upper Baro basin of Ethiopia. *Theoretical and applied*

- climatology*, 133(1-2), 39-46.
10. Hasan Yazdani, M., Amininia, K., Safarianzengir, V. and Soltani, N. 2021. Analyzing climate change and its effects on drought and water scarcity (case study: Ardabil, Northwestern Province of Iran, Iran). *Sustainable Water Resources Management*, 7(2), 1-
  11. IPCC, 2007. Climate change: The Physical Scientific Basis. Contribution of working Group to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental Panel on climate change. Cambridge Univ, Perss.1-18.
  12. Jahangir, M. and Abolghasemi, M. 2019. Determining the most appropriate probability distribution function for calculate and compare the SPEI and SPI drought index in Tehran. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 8(23), 1-16. [magiran.com/p2005097](http://magiran.com/p2005097)
  13. Kim, B., Sung, J. H., Lee, B. H. and Kim, D. J. 2013. Evaluation on the impact of extreme droughts in South Korea using the SPEI and RCP8. 5 climate change scenario. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(2), 97-109.
  14. Kim, T. W. and Jehanzaib, M. (2020). Drought risk analysis, forecasting and assessment under climate change. Volume4, Issue 1; page 7 - 8.
  15. Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M. and Cuadrat, J. M. 2010. The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, 386(1-4), 13-26
  16. Manzanas, R., Brands, S., San-Martín, D., Lucero, A., Limbo, C. and Gutiérrez, J. M. 2015. Statistical downscaling in the tropics can be sensitive to reanalysis choice: a case study for precipitation in the Philippines. *Journal of Climate*, 28(10), 4171-4184.
  17. Mavromatis, T. 2007. Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(7), 911-924.
  18. Mostafazadeh, R. and Zabihi, M. 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), 633-643.
  19. Najafinejad A. Mirdashtvan ,M, Malekianband A. Sa'doddina, 2017, Downscaling the contribution to uncertainty in climate-change assessments: representative concentration pathway (RCP) scenarios for the South Alborz Range, Iran, Royal Meteorological Society.
  20. Nodeh Farahani, M.; Rasekhi, A.; And Keshvari, A., Fall 1397, Investigation of the effects of climate change on temperature, rainfall and droughts in the future Dashtegan Basin, Water Resources Science and Engineering Association, Volume 14, Number 3, pp. 125-139.
  21. Nosrati, K. Mohsenisaravi, M. Shahbazi, R. spring and summer 2014. Comparison and application of two standardized precipitation indexes and standardized precipitation, evapotranspiration and transpiration for assessing drought weather conditions in Tehran Province, *Desert Management Journal*, No. 3, page 77-90. (in Farsi)
  22. Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... and Dubash, N. K. 2014. *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 151). Ipcc.
  23. Rasifaghihi, N., Li, S. S. and Haghghat, F. 2020. Forecast of urban water consumption under the impact of climate change. *Sustainable Cities and Society*, 52, 101848.
  24. Samadi, S., Ehteramian, K. and Sarraf, B. S. 2011. SDSM ability in simulate predictors for climate detecting over Khorasan province. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 19, 741-749.
  25. Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R. and Sheffield, J. 2014. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17-22.
  26. Vano, J. A., Scott, M. J., Voisin, N., Stöckle, C. O., Hamlet, A. F., Mickelson, K. E., ... and Lettenmaier, D. P. 2010. Climate change impacts on water management and irrigated agriculture in the Yakima River Basin, Washington, USA. *Climatic Change*, 102(1-2), 287-317.
  27. Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Drumond, A., Gimeno, L., Nieto, R., Morán-Tejeda, E., ... and Zabalza, J. 2011. Effects of warming processes on droughts and water resources in the NW Iberian Peninsula (1930– 2006). *Climate Research*, 48(2-3), 203-212.
  28. Wang, X., Zhuo, L., Li, C., Engel, B. A., Sun, S., & Wang, Y. (2020). Temporal and spatial evolution trends of drought in northern Shaanxi of China: 1960–2100. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(3), 965-979.
  29. Wilby, R. L., Dawson, C. W. and Barrow, E. M. 2002. SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145-157.
  30. Wilby, R. L. and Dawson, C. W. 2013. The statistical downscaling model: insights from one decade of application. *International Journal of Climatology*, 33(7), 1707-1719.

## SPEI-based Projection and Analysis of Drought's Spatiotemporal Characteristics Using GCM (CanESM2)

Mohammad Hossein Jahangir<sup>1\*</sup>, Farzam Rahimi<sup>2</sup>, Mahnaz Abolghasemi<sup>3</sup>

Received: 31/07/2019

Accepted: 02/01/2022

### Extended Abstract

#### Introduction

Climate change conditions have been deteriorated in recent years due to increasing emissions of greenhouse gases, whose negative effects on human societies are one of the major concerns in 21<sup>st</sup> century, leading to introduction of several scenarios for predicting the climate parameters affected by increasing emissions of greenhouse gases. Therefore, this study sought to investigate the effects of climate change on prospective drought in Tehran province using the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI). To this end, daily climate parameters (T-min, T-max, T-mean, and precipitation) of eight synoptic stations were predicted in for the study period (1996-2017), using GCM-based emission Scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) extracted from the IPCC's Fifth report until 2112. Then, the drought's SPEI was calculated based on the predicted parameters, followed by the evaluation of the spatiotemporal characteristics of the drought. A general review of the results showed that the most severe drought would occur in Abali station in July 2073, which would be almost unprecedented in its kind. Moreover, Tehran city would experience more drought stress than other parts of the Tehran province in the coming years. It should be noted that according to the analysis of future drought's time series, "Very dry" months in future would have a 4-month displacement to the backward and would be shifted from September to May than what had been recorded in terms of time period.

**Materials and Methods:** This study attempted to predict the precipitation and temperature data at the synoptic station level based on climate change scenarios using SDSM exponential microscopy technique. The section 2 of the article introduces the study area and the stations concerned, the climate change scenarios, the SDSM microscopy model, SPEI drought index, and regional zoning model. In Section 3, the regional drought will be calculated and spatially analyzed based on SPEI index using the predicted data. Finally, the last section of the study is devoted to the summary and general conclusions. Based on the monthly average observational charts and forecasts at each station based on each scenario, it can be claimed that the drought phenomenon is moving backwards in the coming years. In other words, most of the stations are predicted to experience their driest year from September to October. However, according to climate change scenarios, May, June, and July are symbols of high drought months in the coming years.

### Results

#### Temporal Analysis

As one of the dimensions of drought characteristics, the detailed drought analysis offers very useful information regarding the intensity, duration, and frequency of drought. According to average monthly observation charts and forecasts prepared for each station in each scenario, it can be argued that the drought phenomenon is moving backwards in the coming years, according to which most stations are predicted to experience their driest years, especially in September and October of each year. However, the climate change scenarios revealed that May, June, and July would be the symbols of high-drought months in the years to come.

1. Associate Professor Faculty of New Sciences and Technologies, Tehran; mh.jahangir@ut.ac.ir

2. M.Sc. Student Faculty of New Sciences and Technologies

3. M.Sc. Student Faculty of New Sciences and Technologies

DOI: 10.22052/deej.2021.10.33.1

**Spatial analysis based on scenario 2.6**

At first glance, it could be said that in all months of the year, the Tehran city would suffer water stress and drought crisis. On the other hand, according to the images obtained, the drought would have a moving trend from January to July, shifting from the west to the east of the province. However, the trend would be concentrated in the west of Tehran province from August to January, except for the December.

**Spatial analysis based on scenario 4.5 per month**

Scenario 4.5 reported more severe climate change than Scenario 2.6. The remarkable point in the obtained images was the frequent continuation of drought in the center of Tehran province, i.e., Tehran city.

**Spatial analysis based on Scenario 8.5 per month**

Scenario 8.5 shows more different changes in the distribution of drought-prone areas in the coming years than previous climate change scenarios. One of the points to consider in this regard is the significant reduction in the frequency of droughts in the west of Tehran province, which is even lower than those of the center and east parts of the province, being almost the opposite of what was found in the 2.6 scenario.

**Discussion and Conclusion**

The comparison of data found for the observation years and the what was predicted for the upcoming years based on different scenarios shows that the frequency of droughts in the coming period. Therefore, if looked more closely, it could be found that the most severe and frequent droughts have occurred throughout the 7<sup>th</sup> decade of the 21<sup>st</sup> century, for which proper measures should be devised. The study's results also indicate that the probability of drought in the observation months will change more than what is anticipated, suggesting a seasonal retreat both in drought and wet season. Finally, according to the spatial analysis, it could be said that Tehran city will have higher temperature and precipitation stress (drought) than other parts of Tehran province. On the other hand, with the increase in altitude and the decrease in temperature, the severity of drought will decrease, whose effect on high altitude stations in this study was totally evident.

**Keywords:** Climate Change Scenarios, Forecasting, SPEI Drought Index, Spatiotemporal Analysis, Tehran Province.