

پایش خشکسالی هواشناسی آینده با استفاده از مدل تغییر اقلیم سری

CMIP5 و زنجیره مارکوف

مریم حیدرزاده^{۱*}، احمد نوحه گر^۲

۱- استادیار گروه مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی میناب، دانشگاه هرمزگان

۲- استاد دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

چکیده

خشکسالی یکی از گسترده‌ترین بلایای فضایی است که جوامع با آن روبرو هستند. با وجود فوریت برای تعیین استراتژی‌های کاهش، تحقیقات کمی در مورد خشکسالی‌های مربوط به تغییرات آب و هوایی انجام شده است. هدف از این تحقیق (۱) بررسی وضعیت خشکسالی با استفاده از مدل‌های جهانی (GCM) ریزمقیاس شده آماری برای شرایط فعلی؛ (۲) ارزیابی و احتمال خصوصیات خشکسالی‌های حال و آینده در منطقه تحت مسیرهای غلظت نماینده (PRC) ۴/۵ و ۸/۵ است. از مدل MPI-ESM-MR که جز مدل‌های جهانی تغییر اقلیم مدل‌های (CMIP5) استفاده شد. شاخص بارش استاندارد (SPI) و زنجیره مارکوف برای خشکسالی‌ها زمان پایه ۱۹۸۲-۲۰۰۵ و زمان آینده ۲۰۱۶-۲۰۴۵ محاسبه شد. نتایج نشان داد که منطقه خشکسالی شدیدتری را در آینده نسبت به دوره‌های تاریخی مبتنی بر SPI تحت هر دو سناریو RCP تجربه می‌کند. با افزایش زمان بندی SPI، مدت زمان تمام کلاس‌های خشکسالی تحت سناریوهای PRC در آینده کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج احتمال زنجیره مارکوف برای دوره پایه و آینده نشان داد احتمال کلاس مرطوب تا خشک برای فصول بهار، تابستان و زمستان برای دوره پایه و آینده طبق سناریو ۴/۵ و ۸/۵ به ترتیب برابر با ۵۷، ۶۰ و ۶۰؛ برای تابستان برابر ۷۷/۸، ۶۷ و ۵۰ و برای زمستان به ترتیب ۶۶، ۷۵ و ۷۵ درصد است. برای پاییز در دوره پایه از حالت مرطوب به حالت نرمال با احتمال ۸۹٪، درصد کلاس خشک به عادی دوره آینده طبق سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵ به ترتیب برابر با ۸۹ و ۹۰٪ است. بررسی احتمال خشکسالی با زنجیره مارکوف نشان داد هر طبقه تمایل به انتقال طبقه نزدیک خود دارد. طبق هر دو سناریو بیشترین احتمال مربوط به طبقه نرمال است. انجام برنامه‌ریزی‌ها و مدیریت موفق، نیاز به شناخت صحیح پدیده خشکسالی و علت‌های پیدایش آن دارد. بنابراین مسئله تغییر اقلیم نیازمند توجه بیشتری است.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، سناریو RCP، خشکسالی، احتمالات مارکوف، بندرعباس

مقدمه

تغییر اقلیم ناشی از فعالیت های انسانی و تأثیرات اقتصادی اجتماعی آن، از نگرانی های اصلی بشر است. شدت، تداوم و گسترش مکانی تأثیرات تغییر اقلیم در مقیاس منطقه ای و حتی محلی بسیار متغیر می باشد. به طوری که تأثیرات سریع تغییر اقلیم توسط تغییرات تدریجی دما و بارندگی قابل مشاهده نیست بلکه این تأثیرات در قالب وقایع حدی همانند خشکسالی نمایان می شوند (Farjad و همکاران، ۲۰۱۵؛ Pulwarty و Sivakumar، ۲۰۱۴؛ Quevauviller، ۲۰۱۱). خشکسالی در ایران یکی از مهم ترین مخاطرات اقلیمی است که هر ساله در بخش هایی از آن رخ داده و خسارت های زیادی را به همراه دارد. چنانکه پیامدهای آن امروزه در بخش های مختلفی از جمله منابع آبی، محیط زیست، خشک شدن تالابها، دریاچه ها، قنات ها و چشمه ها در مناطق مختلف ایران مشهود است (دوستان، ۱۳۹۴). تعیین مشخصه های خشکسالی بصورت عینی بسیار مشکل است از این رو شاخص های خشکسالی برای ارزیابی ارائه شده اند. با توجه به تعاریفی که برای خشکسالی وجود دارد معرفی یک شاخص واحد و جهانی برای آن بسیار مشکل است (Heim، ۲۰۰۲). شاخص SPI در مقیاس های زمانی مختلف بیانگر انواع خشکسالی می باشد. مقیاس زمانی کوتاه مدت مربوط به رطوبت خاک که بیانگر خشکسالی کشاورزی می باشد، مقیاس زمانی متوسط خشکسالی هیدرولوژیکی و بلند مدت خشکسالی آب زیرزمینی را توصیف می کند (Edwards و McKee، ۱۹۹۷). مصباح زاده و همکاران، ۱۳۹۸ به بررسی وضعیت خشکسالی هواشناسی در حال و آینده با استفاده از مدل های جهانی تغییر CMIP5، مدل CanESM2 تحت سناریو های ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ برای استان یزد با استفاده از دو شاخص SPI و SPEI پرداختند. نتایج حاصل نشان داد طبق شاخص SPI منطقه مطالعاتی در آینده تحت سه سناریو RCP خشکسالی های شدیدتری را نسبت به دوره تاریخی مشاهده می کند در حالی که براساس شاخص SPEI تحت سناریوهای RPC2.6 و RPC 4.5 مشخصه های خشکسالی در آینده نسبت به دوره تاریخی کاهش می یابد و براساس سناریو RCP 8.5 شدت و مدت خشکسالی روند افزایشی خواهد داشت. براساس نمودارهای شدت - فراوانی و مدت - فراوانی، با افزایش دوره

بازگشت، شدت و مدت خشکسالی نیز افزایش می یابد. به طوری که خشکسالی های طولانی تر با شدت و دوره بازگشت بالاتری نسبت به خشکسالی های کوتاه تر اتفاق می افتد. بلهکه و همکاران، ۱۳۹۶ به بررسی اثر تغییر اقلیم بر ویژگی های دوره های ترسالی و خشکسالی مطالعه موردی: ایستگاه های ارازکوسه و تمر در استان گلستان پرداختند. برای این منظور اقدام به تجزیه و تحلیل شدت، مدت و فراوانی ترسالی و خشکسالی در دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) و آینده نمودند و از مدل ریزمقیاس نمایی SDSM با در نظر گرفتن مدل گردش عمومی جو و سناریو انتشار RPC2.6، RPC4.5 و RPC8.5 سری زمانی بارش در دوره ۲۰۳۱-۲۰۵۰ و ۲۰۵۱-۲۰۷۱ استفاده شد و از زنجیره مارکوف برای تعیین احتمال خشکسالی آینده استفاده شد. نتایج نشان داد دو ایستگاه ارازکوسه و تمر احتمال خشکسالی آینده افزایش می یابد همچنین تداوم طبقات طبق هر سه سناریو افزایش خواهد داشت. از طرف دیگر با افزایش پنجره زمانی شاخص استاندارد از شدت ترسالی و خشکسالی ها کاهش می یابد. مطالعه و شناسایی رفتار خشکسالی در ایران یکی از ضروریات محققان و کشور بوده تا بتوان با مدیریت صحیح و اصولی در مناطق مختلف ایران، خسارت های ناشی از این پدیده را کاهش داد. یکی از اولین اقدامات در بحث مدیریت ریسک خشکسالی شناخت رفتار فضایی (پراکندگی فضایی) این پدیده می باشد. هدف از انجام این مقاله بررسی اثرات تغییر اقلیم بر پارامتر بارش طی فصل های مختلف با استفاده از مدل های خروجی پروژه CMIP5 و دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ در منطقه جنوب ایران و شهر بندرعباس است. داده های ایستگاه سینوپتیک بندرعباس طی سال های ۱۹۸۲-۲۰۰۵ به عنوان دوره پایه و شامل بارش روزانه است که برای پیش یابی در بازه زمانی آینده ۲۰۱۶-۲۰۴۵ مورد استفاده قرار گرفته است.

مواد و روش ها

موقعیت جغرافیایی منطقه پژوهش

شهر ساحلی بندرعباس مرکز استان هرمزگان و در جنوب ایران قرار دارد. این شهر به صورت نواری ساحلی در شمال تنگه ی هرمز واقع شده است (حیدرزاده، ۱۳۹۶). مختصات منطقه شامل $27^{\circ}11'$ تا $27^{\circ}30'12''$ شمالی $56^{\circ}20'$ تا 56°

G (۰) میانگین‌گیری از تمام کالیبراسیون‌های انتخاب شده GCMها، SE, ST, O (۰) نشان دهنده میانگین‌گیری از تمام فصل‌ها (SE)، ایستگاه‌ها (ST) و مشاهدات (O) است. زمانی که MRE بالاتر از یک شود روش ریزمقیاس‌نمایی خطای بیشتری نسبت به GCM خام معرفی می‌کند؛ هنگامی که MRE برابر یک شود روش ریزمقیاس‌نمایی مشابه داده‌های خام GCM انجام شده است و زمانی که صفر شود روش ریزمقیاس‌نمایی شبیه توزیع مشاهداتی است (Wang و همکاران، ۲۰۱۶). RMSE و MAE به ترتیب طبق معادله (۲) و (۳) محاسبه می‌گردد. در این روابط y_i و x_i به ترتیب مقادیر محاسبه شده و مشاهداتی؛ و N تعداد دوره آماری است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - x_i| \quad (3)$$

محاسبه شاخص SPI

شاخص استاندارد بارش در این مطالعه توسط McKee و همکاران ارائه شده است و به طور گسترده ای برای ارزیابی شدت خشکسالی بارش مورد استفاده قرار گرفته است (Huang و همکاران ۲۰۱۷، Liu و همکاران ۲۰۱۶، Lorenzo-Lacruz و همکاران ۲۰۱۷). همچنین توسط سازمان هواشناسی جهانی (Svoboda و همکاران ۲۰۱۲) به عنوان شاخص ارجح برای توصیف خشکسالی‌های هواشناسی ذکر شده است. SPI براساس داده‌های بارندگی طولانی مدت است که می‌تواند طبق مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه شود. پس از اطمینان از همگن بودن داده‌های ماهانه، سری‌های زمانی با مقیاس ۶، ۹ و ۱۲ ماهه تشکیل شد. هر یک از سری‌های زمانی با توزیع‌های مختلف برازش داده شد و در نهایت توزیع‌های گاما و پیرسون تیپ سه به عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد. توزیع آماری گاما برازش خوبی با سری زمانی بارندگی داشته و تابع این توزیع به صورت تابع چگالی احتمال یا فراوانی در رابطه (۴) تعریف شده است (Mckee و همکاران ۱۹۹۳، Angelidis و همکاران، ۲۰۱۲، Stagge و همکاران، ۲۰۱۵)

$$\frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \text{ for } : x > 0 \quad (4)$$

۲۱° ۵۶ شرقی با مساحت ۰/۹۱۳ کیلومتر مربع است. نمایی از منطقه مورد مطالعه در شکل (۱) آمده است. داده‌های ایستگاه سینوپتیک بندرعباس با مشخصات ۱۵° ۲۷ شمالی و ۱۵° ۵۶ شرقی با ارتفاع ۱۰ متر از سطح دریا مورد استفاده قرار گرفت. طبق داده‌های تاریخی متوسط بارندگی سالانه طی یک دوره آماری ۵۷ ساله (۱۳۳۶ الی ۱۳۹۲) در بندرعباس ۱۷۲/۶ میلی-متر است. در طول فصل مرطوب (آبان تا فروردین ماه) میزان بارندگی ۹۴٪ میزان بارندگی سالانه است. در فصل خشک، میزان بارندگی ۶ درصد از میزان بارش سالانه را تشکیل می‌دهد.

روش کار

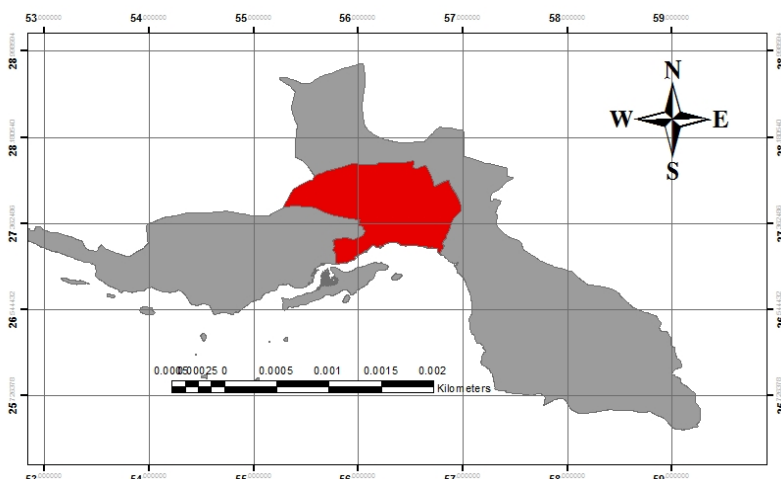
در این تحقیق جهت تولید داده‌های بارش برای دوره آینده از خروجی پروژه CMIP5 که شامل داده‌های روزانه بودند، مدل MPI-ESM-MR مد نظر قرار گرفت این مدل توسط مرکز تحقیقات آب و هوایی ماکس پلانک آلمان با قدرت تفکیک مکانی $1.875^*1.85$ (Lon*lat) تهیه و توسعه یافته است. جهت ریزمقیاس‌نمایی مدل از دو روش تجربی آماری BC-Mean و Change Factor-variance (Wang و همکاران، ۲۰۱۶) برای بارش استفاده شد (حیدرزاده و همکاران، ۱۳۹۹). داده‌های مشاهداتی برای دوره پایه از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۵ شامل بارش روزانه و داده‌های آینده برای دوره زمانی ۲۰۱۶ تا ۲۰۴۵ می‌باشد. از سناریوهای انتشار ۴/۵ و ۸/۵ در شرایط متوسط و بد آینده استفاده شده است. به منظور ارزیابی کارایی روش‌های ریزمقیاس‌نمایی از میانگین خطای نسبی^۱ (MRE)، جذر میانگین مربع خطا^۲ (RMSE) به دلیل کاربرد زیاد آن (قهرمان و همکاران ۲۰۱۵؛ Loo و همکاران، ۲۰۱۵) و MAE (Venkataraman و همکاران، ۲۰۱۶) جهت تعیین کمیّت تشابه تجربی بین مشاهدات و ریزمقیاس‌نمایی استفاده شده است. رابطه MRE در معادله ۱ آمده است.

$$MRE_p = \frac{ABS(X'_p - X_p^O)_G}{ABS(X_p^{Raw} - X_p^O)_{G, SE, ST, O}} \quad (1)$$

که در آن X'_p و X_p^O pامین صدک از ریزمقیاس‌نمایی و توزیع شبه مشاهداتی؛ X_p^{Raw} pامین صدک از ردیف پروژه GCM، $P=0, \dots, 100$ ؛ ABS نشان دهنده ارزش‌های مطلق؛

2. Root Mean Square Error

1. mean relative error



شکل ۱- منطقه مورد بررسی

مناسب به روش حداکثر درست‌نمایی، معادلات زیر (رابطه ی ۵ و ۶) را ارائه نمودند.

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \text{ و } \beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (5)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (6)$$

تجمعی برای یک ماه مشخص در طی دوره آماری. طبقه‌بندی شاخص شدت خشکسالی SPI توسط مک‌کی و همکاران در سال ۱۹۹۵ در جدول شماره ۱۱ آمده است.

که در آن n : تعداد مشاهدات بارندگی، \bar{x} : میانگین بارندگی که در آن $\alpha > 0$ پارامتر شکل، $\beta > 0$ پارامتر مقیاس، $x > 0$ مقدار بارندگی و $f(x)$ تابع گاما است. محاسبه شاخص بارش استاندارد شده در رابطه با برازش تابع چگالی احتمال گاما بر توزیع فراوانی بارندگی برای یک ایستگاه معین می‌باشد. پارامترهای α و β از تابع چگالی گاما برای هر ایستگاه و برای هر یک از سری‌های زمانی برآورد شدند. با استفاده از روش حداکثر درست‌نمایی می‌توان مقادیر بهینه α و β را بر اساس معادلات زیر برآورد کرد (Mckee و همکاران ۱۹۹۳) و Ntale و همکاران (۲۰۰۳) برای تخمین

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی بر اساس مک‌کی

طبقه بندی	مقدار شاخص SPI	احتمال
(Extremely dry) بسیار شدید	< -2	۲/۳
(Severely dry) شدید	$-1/99 \text{ _ } -1/49$	۴/۴
(Moderate dry) متوسط	$-1/49 \text{ _ } -1$	۲/۹
(Near Normal) نزدیک نرمال (ملایم)	$0/99 \text{ _ } -0/99$	۲/۶۸
(Moderate wet) بدون خشکسالی	$1/49 \text{ _ } 1$	۲/۹
(Very wet) مرطوب	$1/99 \text{ _ } 1/5$	۴/۴
(Extremely wet) بسیار مرطوب	> 2	۲/۳

شرح روند تصادفی و ارائه اطلاعات احتمال در مورد انتقال از یک حالت به حالت دیگر است (Hsu و Yeh، ۲۰۱۹). در این زنجیره توزیع احتمالی وضعیت آینده فقط براساس وضعیت فعلی آن استوار است و از وقایع قبلی در سریال‌های

زنجیره مارکوف

زنجیره مارکوف برای اولین بار در مقاله‌ای در سال ۱۹۰۶ نوشت که توسط ریاضی‌دان روسی آندره آندریویچ مارکوف

مدل سازی اقلیم توسط مدل‌های بزرگ مقیاس با دوره آماری بلندمدت نیاز به ریزمقیاس‌نمایی دارد. از این رو واسنجی و صحت‌سنجی خروجی بارش روزانه مدل MPI-ESM-MR با داده‌های ایستگاه سینوپتیک بندرعباس (۱۹۸۲-۲۰۰۵) طبق روش ریزمقیاس‌نمایی BC-Mean و Change Factor-variance براساس سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵ با استفاده از ضرایب آماری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن در جدول شماره (۲) آمده است.

پایش خشکسالی در دوره پایه و آینده

نتایج روش‌های ریزمقیاس‌نمایی نشان داد که روش CF-variance تحت دو سناریوی انتشارهمبستگی بهتر و خطای کمتری نسبت به داده‌های مشاهداتی دارد. از این رو از نتایج روش منتخب جهت پیش‌یابی مقایره بارش برای دوره‌ی آینده ۲۰۱۶ تا ۲۰۴۵ استفاده شد. مجموع مقادیر بارش طی دوره زمانی آینده برای هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ در شکل ۲ آمده است.

زمانی مستقل است. موارد زیر به طور خلاصه تئوری زنجیره مارکوف را شرح می‌دهد:

$$P \{X_{t+1}=j | X_0, X_1, X_2, \dots, X_t\} \\ = P \{X_{t+1}=j | X_t=i\} \forall i, j \in S, t \in T \\ P_{ij} = P \{X_{t+1}=j | X_t=i\}$$

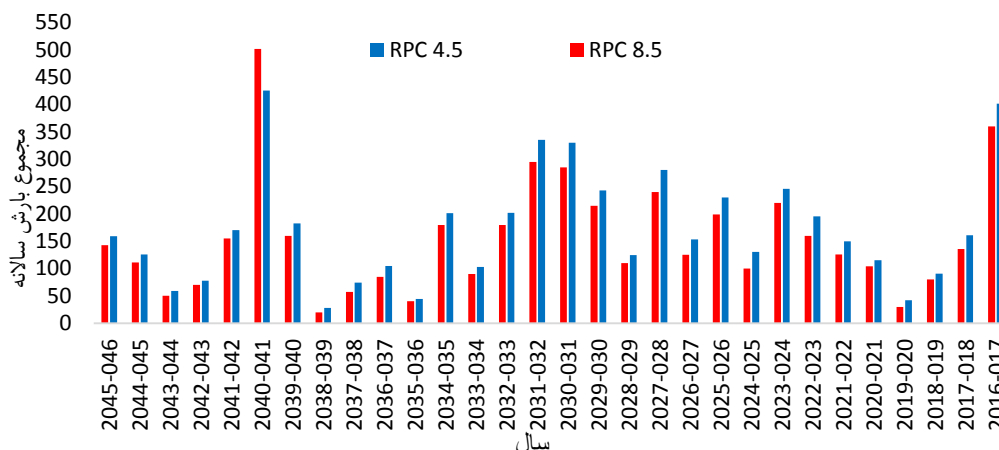
در این معادله X_{t+1} وضعیت سیستم در یک گام زمانی آینده و X_t وضعیت سیستم در زمان حال است. احتمال شرطی P_{ij} احتمال انتقال مرتبه اول از حالت i به حالت j نامیده می‌شود. با محاسبه تمام حالت‌های انتقال ماتریس احتمال انتقال P تشکیل می‌گردد. احتمال انتقال، احتمالات وقوع هر یک از حالات ممکن در مرحله بعد است که آنها را می‌توان بصورت ماتریس احتمال انتقال نشان داد. برای حالتی که K وضعیت وجود داشته باشد ماتریس احتمال انتقال برای زنجیره مارکوف مرتبه اول دارای $K \times K$ درایه است (Bhat and Miller, 2002) در عمل با شمارش تعداد گام‌های زمانی n_{ij} که مقادیر شاخص بارش استاندارد در وضعیت i بوده و به وضعیت j انتقال پیدا کرده احتمال انتقال \widehat{P}_{ij} با استفاده از معادله (۷) بدست می‌آید (بلهکه و همکاران، ۱۳۹۶).

$$\widehat{P}_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}} \quad (7)$$

نتایج و بحث

جدول ۲- نتایج ریزمقیاس‌نمایی براساس مدل MPI-ESM-MR طبق سناریو ۴/۵ و ۸/۵

ضرایب آماری مدل		ضرایب آماری ایستگاه		ضرایب آماری دوره مشاهداتی			روش	پارامتر	سناریو
MEAN	MAX	MEAN	MAX	MAE	RMSE	MRE			
۰/۴۷	۹۸/۱۷	۰/۵	۱۰۷	۰/۰۵	۰/۳۶	۰/۰۲	CF-variance	بارش	۴/۵
۰/۴۹	۱۰۴/۸	۰/۵	۱۰۷	۰/۰۱۰	۰/۰۸۶	۰/۰۰۱	CF-variance	بارش	۸/۵
۱/۱۸	۷۴/۸۹	۰/۵	۱۰۷	۱/۶۳	۵/۷۵	۰/۲۵	BC-Mean	بارش	۴/۵
۰/۷۶	۱۶۰/۵	۰/۵	۱۰۷	۰/۲۵	۲/۱۱	۰/۰۶	BC-Mean	بارش	۸/۵



شکل ۲- مجموع بارش سالانه پیش یابی شده طبق مدل MPI-ESM-MR

به نرمال برای پاییز و تابستان به ترتیب با مقادیر ۸۸/۸ و ۶۰ درصد و حالت تر به خشک برای زمستان و بهار به ترتیب با مقادیر ۶۶/۷ و ۵۷/۱ بالاترین درصد احتمال را دارند.

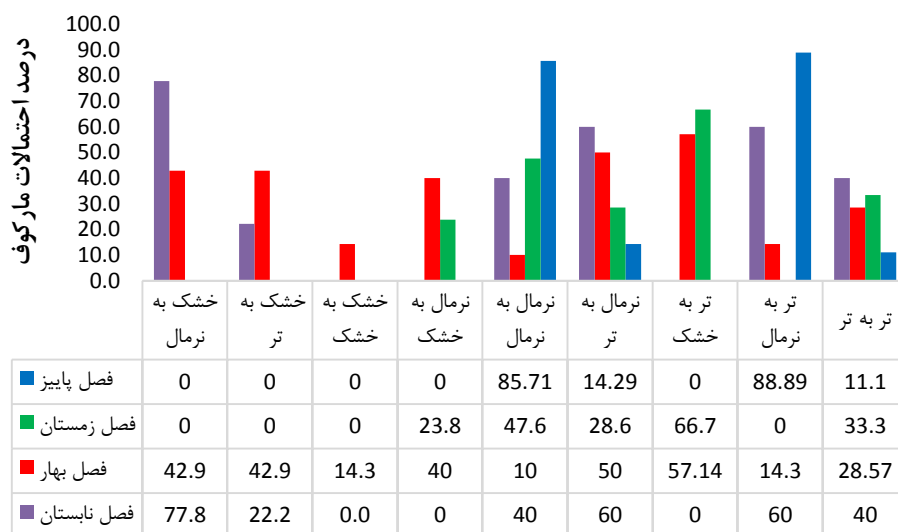
براساس شاخص SPI منطقه مطالعاتی خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تری را در آینده طبق هر دو سناریو مدل گردش عمومی جو نسبت به دوره تاریخی تجربه خواهد کرد.

طبق شاخص SPI براساس سناریو ۴/۵ در شکل ۴ قسمت الف، فصل پاییز در تمام سال‌های آینده دارای کلاس ملایم تا مرطوب است. فصل زمستان و بهار روندی از ملایم به خشکی متوسط را نشان می‌دهد. در فصل تابستان کلاس نرمال بیشترین فراوانی را دارد و دارای روندی از نرمال به خشکسالی متوسط است. در قسمت ب از شکل ۴، با افزایش مقیاس زمانی SPI شدت خشکسالی کاهش یافته به طوری که براساس SPI ۶ ماهه خشکسالی دارای شدت ۱/۸۳- و طبق SPI سالانه دارای شدت ۱/۶۶- است. در دوره ۶ ماهه کلاس خشکی متوسط و دوره ۹ و ۱۲ ماهه کلاس نرمال تا مرطوب بیشترین فراوانی را دارد.

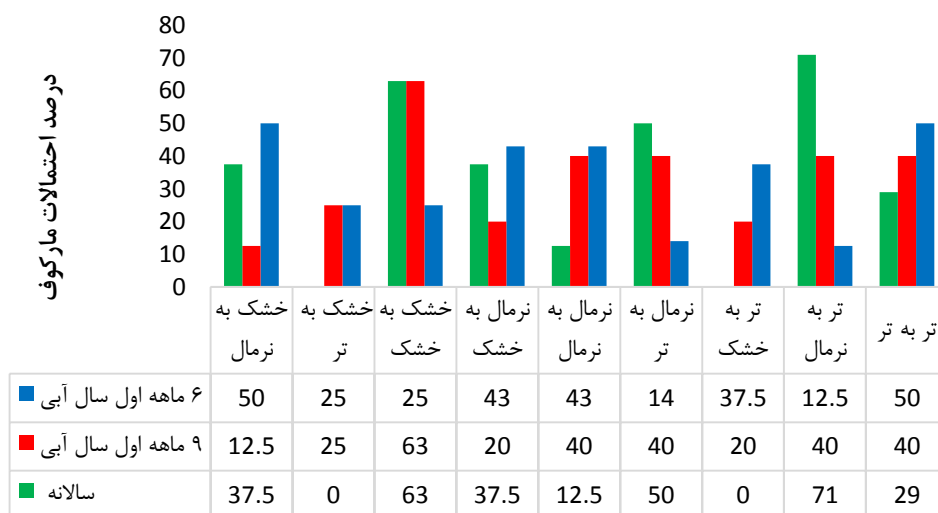
محاسبه سری های زمانی SPI و مارکوف

در دوره تاریخی و آینده

سری‌های زمانی SPI و مارکوف در سه مقیاس ۶، ۹ و ۱۲ ماهه برای دوره مشاهداتی و آینده محاسبه شدند. مشخصه‌ی شدت و درصد احتمال آن برای هر یک از دوره‌های ۶، ۹ و ۱۲ ماهه بدست آمد. مقادیر منفی SPI بیانگر دوره‌های است که بارندگی ماهانه از میانگین طولانی مدت آن کمتر و SPI مثبت، بارندگی ماهانه بیشتر از میانگین طولانی می‌باشد. در شکل ۳ درصد احتمالات مارکوف ایستگاه در طول دوره پایه برای سری زمانی ۶، ۹ و ۱۲ ماهه و تمامی فصل‌ها آمده است. طبق طبقه‌بندی شدت خشکسالی (جدول ۱) ۹ حالت برای هر سری زمانی و فصل‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. طبق این شکل بیشترین احتمال خشکی مربوط به حالت خشک به نرمال فصل تابستان و خشک به تر یا نرمال به ترتیب با مقدار ۷۷/۸ و ۴۲/۹ درصد است. برای حالت نرمال بیشترین حالت مربوط به کلاس نرمال به نرمال فصل پاییز و زمستان به ترتیب با مقادیر ۸۵/۷ و ۴۷/۶ درصد است و کلاس نرمال به تر برای فصل‌های بهار و تابستان با مقدار عددی ۵۰ و ۶۰ درصد نمایان است. در کلاس تر حالت تر



الف

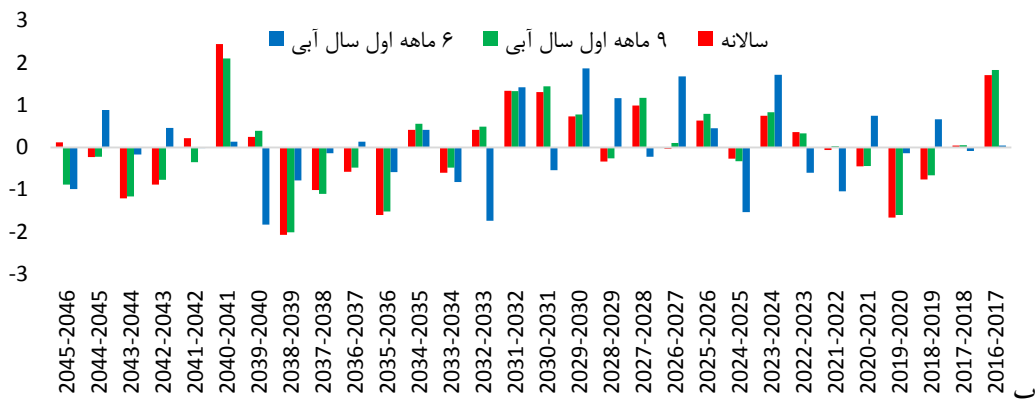


ب

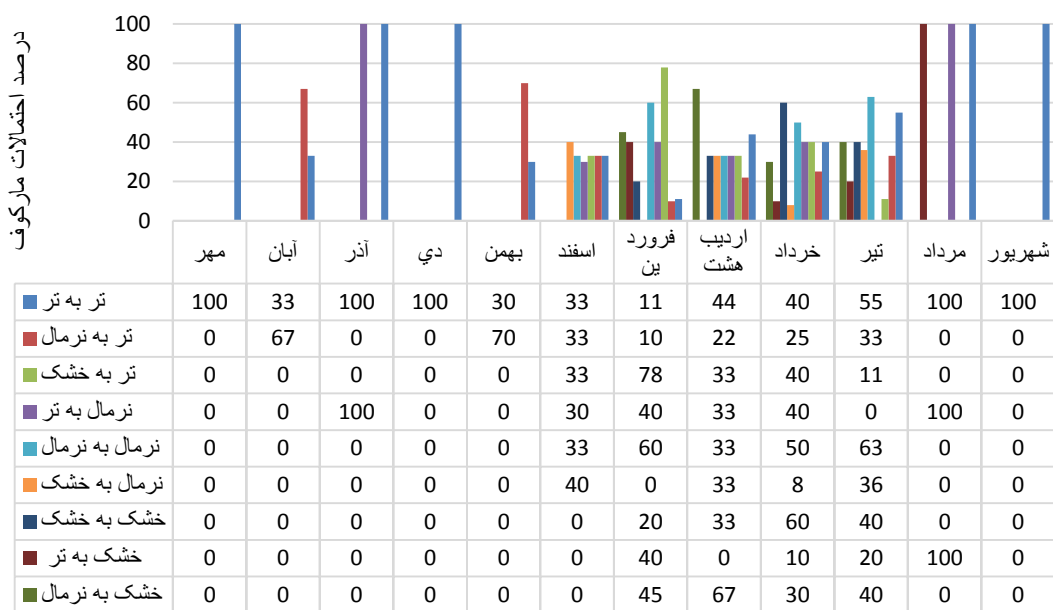
شکل ۳- مقادیر احتمالات مارکوف برای ایستگاه پایه، الف: در طول چهار فصل؛ ب: سری زمانی ۹، ۶ و ۱۲ ماهه



الف



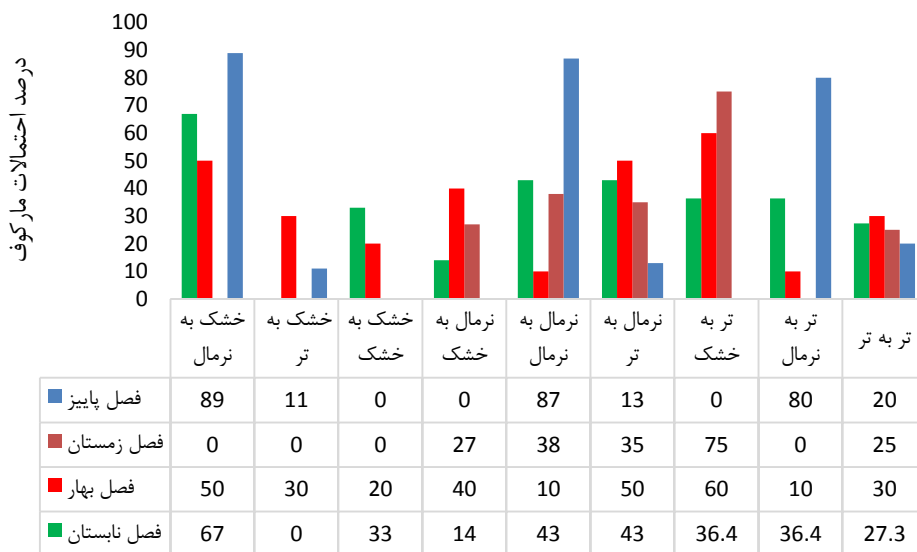
شکل ۴- مقادیر SPI سناریو ۴/۵



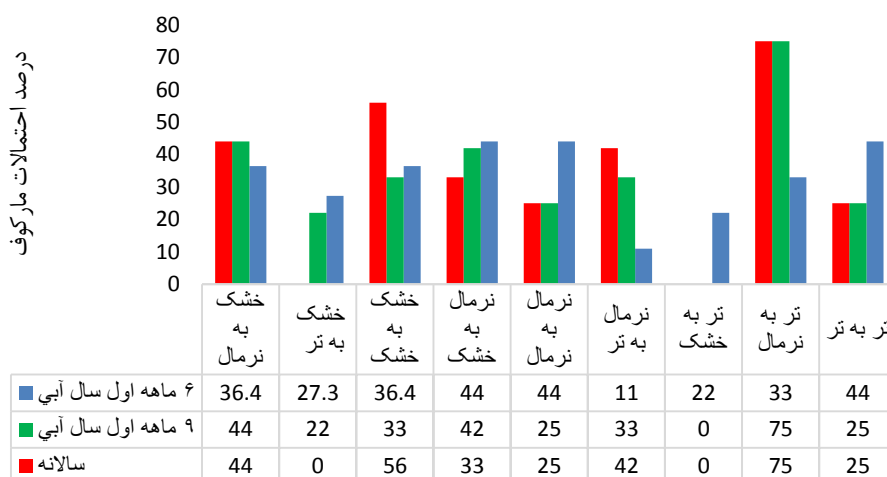
شکل ۵- درصد احتمالات مارکوف براساس ماه طبق سناریو ۴/۵

فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیر است. در برخی از ماه‌ها تنها شاهد یک کلاس هستیم به عنوان مثال در ماه های مرداد، شهریور، دی و مهرماه احتمال حالت تر به تر در تمام طول دوره ی آینده تخمین زده شده است.

شکل ۵ نشان دهنده متوسط تعداد ماه‌هایی است که گروه‌های خشکسالی با شدت معلوم به گروه ترسالی انتقال یافته و خشکسالی خاتمه می‌یابد. با توجه به شکل ۵، بیشترین حالت گذر از کلاس‌های مختلف مربوط به ماه‌های اسفند،



الف

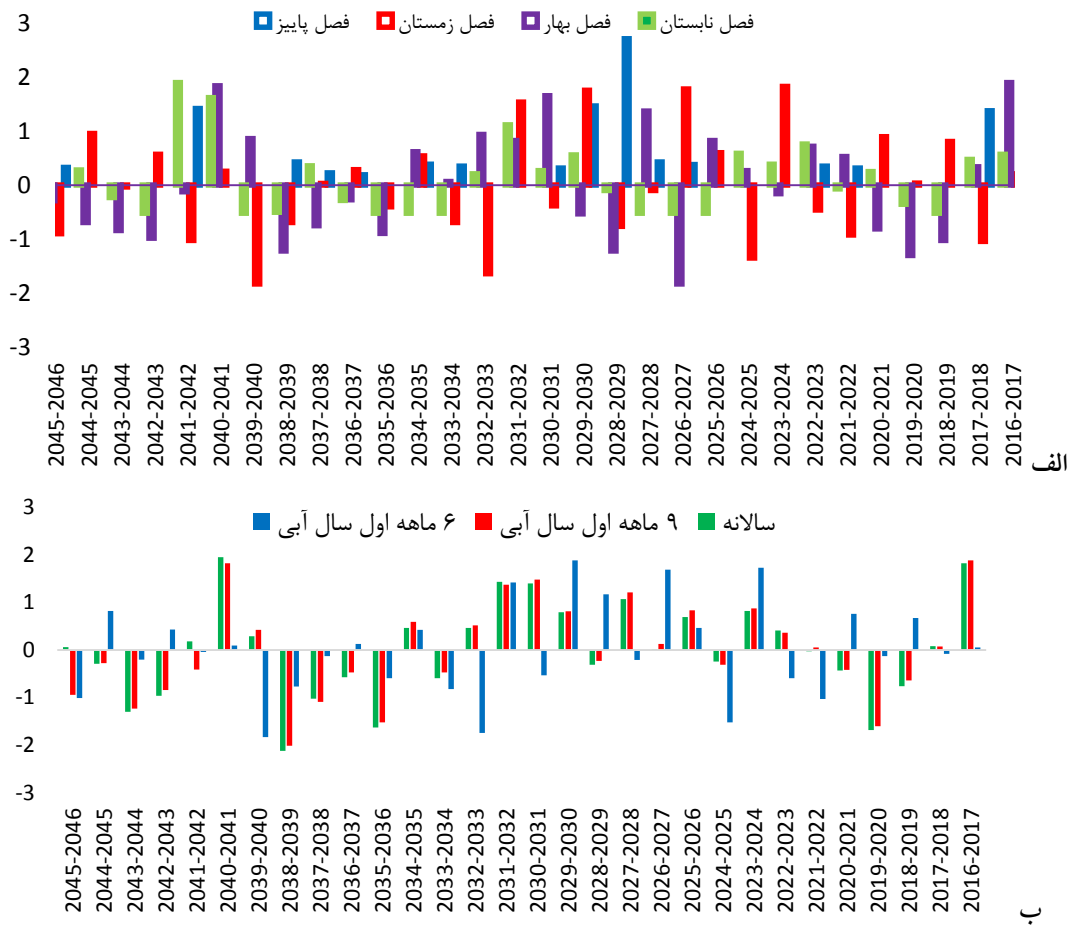


ب

شکل ۶- درصد احتمالات مارکوف براساس الف: فصل‌ها، ب: دوره‌های مختلف طبق سناریو ۴/۵

دریافت که طبق سناریو ۴/۵ در دوره زمانی ۶ ماهه حالت گذر از خشک به نرمال به میزان ۱۴ درصد کاهش یافته و حالت خشک به خشک حدود ۱۱ درصد افزایش نشان می‌دهد.

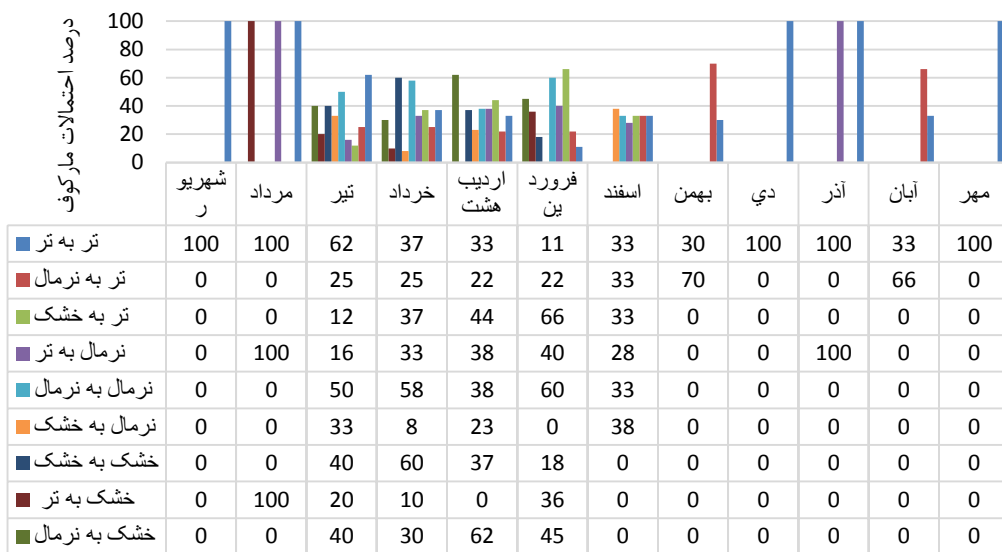
براساس شکل ۶ قسمت الف، بیشترین احتمالات در طول فصل‌های مختلف مربوط به حالت‌های خشک به نرمال، نرمال به نرمال و تر به خشک است. البته استثناهایی هم وجود دارد مانند فصل پاییز که احتمال حالت تر به نرمال بیشتر است. همچنین با مقایسه قسمت "ب" نمودار ۳ و ۶ می‌توان



شکل ۷- مقادیر SPI طبق سناریو ۸/۵

خشکی نوسان دارد. در قسمت ب دوره زمانی های ۶، ۹ و ۱۲ ماهه شاخص در کلاس نرمال تا بدون خشکی نوسان دارد.

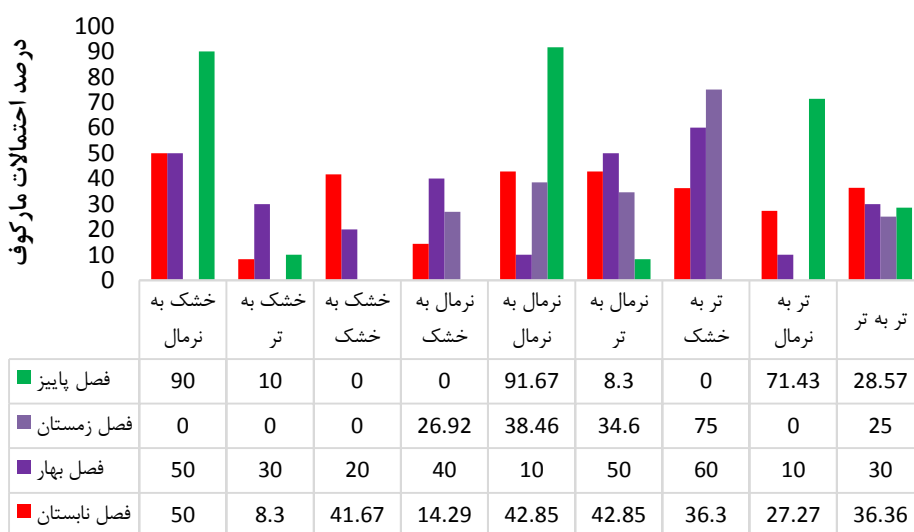
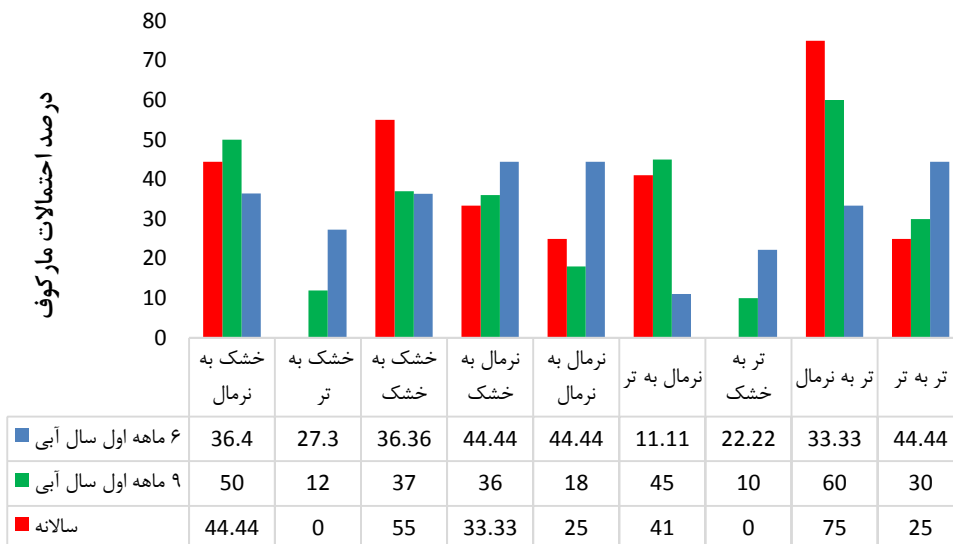
طبق شکل ۷ قسمت الف براساس طبقه بندی SPI، فصل پاییز و تابستان در کلاس نزدیک نرمال (ملایم) قرار دارد. فصل زمستان و بهار بین محدوده‌ی خشکی شدید تا بدون



شکل ۸- درصد احتمالات مارکوف برای ماه های مختلف طبق سناریو ۸/۵

های مختلفی هستیم. که این نتایج مشابه با سناریو ۴/۵ است که برای چندین ماه بطور متوسط در کلاس نرمال احتمالات بیشتری نشان می‌دهد.

طبق شکل ۸، درصد احتمال مارکوف برای ماه‌هایی که یک کلاس دارند، از کلاس خشک به تر افزایش می‌باید. در سایر ماه‌ها مانند فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیر شاهد احتمالا



شکل ۹- درصد احتمالات مارکوف براساس الف: فصل‌ها، ب: دوره‌های مختلف طبق سناریو ۸/۵

نتایج نشان داد که احتمال زنجیره مارکوف برای فصل پاییز در دوره پایه از تر به نرمال با احتمال ۸۹ درصد به کلاس خشک به نرمال برای دوره آینده طبق سناریو ۴/۵ و ۸/۵ به ترتیب برابر با ۸۹ و ۹۰ درصد است. نتایج حاصل از دوره زمانی های ۶، ۹ و ۱۲ ماهه نشان داد احتمال وقوع کلاس های زنجیره مارکوف برای سناریو ۴/۵ و ۸/۵ مشابه همدیگر با کمی درصد احتمال متفاوت است. به عنوان مثال احتمال

مقایسه نتایج احتمال زنجیره مارکوف برای دوره پایه و آتی نشان داد که احتمال وقوع کلاس تر به خشک برای فصل‌های بهار، تابستان و زمستان بیشتر است بطوری که احتمال وقوع این کلاس برای دوره پایه و آینده طبق سناریو ۴/۵ و ۸/۵ به ترتیب برای فصل بهار برابر با ۵۷، ۶۰ و ۶۰ درصد است. برای فصل تابستان به ترتیب برابر با ۷۷/۸، ۶۷ و ۵۰ درصد است و برای فصل زمستان به ترتیب ۶۶/۷، ۷۵ و ۷۵ است.

تغییر اقلیم است. براین اساس در این پژوهش با استفاده از داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP5 و طبق دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ با استفاده از شاخص SPI خشکسالی بررسی شد و احتمالات آن برای دوره های پایه و آینده با استفاده از زنجیره مارکوف محاسبه گردید. نتایج شاخص SPI نشان داد منطقه مطالعاتی در آینده خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تری را نسبت به دوره تاریخی تحت هر دو سناریو تجربه می‌کند. همچنین با افزایش مقیاس زمانی SPI فراوانی دوره‌های خشک کاهش می‌یابد که این کاهش با افزایش شدت و مدت خشکسالی توأم می‌باشد. شاخص SPI در طول بازه زمانی- های طولانی مدت شدت کمتری دارد این مطابق با یافته‌های مصباح زاده و همکاران (۱۳۹۸) است. همچنین با افزایش شدت خشکسالی براساس شاخص SPI، احتمال وقوع گروه‌های خشکسالی کاهش می‌یابد. این مطابق با نتایج قبیل Paulo و Pereira (۲۰۰۷) و بلهکه و همکاران (۱۳۹۶) است. نتایج احتمالات مارکوف برای هر دو سناریو نشان داد که درصد احتمال وقوع گروه ترسالی برای ماه‌ها مورد بررسی مشابه یکدیگر می‌باشد. طبق احتمالات مارکوف متوسط زمان رسیدن گروه‌های خشکسالی با شدت معلوم به گروه ترسالی براساس شاخص SPI، با افزایش سری زمانی مورد بررسی (از ۶ ماهه به ۱۲ ماهه) افزایش می‌یابد این موافق با یافته‌های بنی‌مهد و خلیلی، ۱۳۹۳ است. از آنجا که خشکسالی پدیده‌ای خزشی و مزمن بوده، بخش‌های مختلف اکوسیستم‌های ایران را به مرور ضعیف و نابود کرده است. بنابراین برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک و بحران برای کاهش پیامدهای خشکسالی‌ها ضروری است تا برنامه‌ریزان و مدیران به جای برنامه‌ای استانی برای مدیریت خشکسالی، برنامه و طرح‌های منطقه‌ای کاهش پیامدهای خشکسالی طرح‌ریزی کنند. چرا که با توجه به توانمندی‌های طبیعی، اقلیمی، اقتصادی، کشاورزی، صنعتی و انسانی هر منطقه برنامه خشکسالی مناسب برای همان منطقه در ارتباط با کاهش اثر خشکسالی ضروری و اولویت خواهد

وقوع کلاس تر به نرمال برای هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ به ترتیب برابر با ۷۵ و ۶۰ درصد است در دوره ی ۹ ماهه پایه احتمال وقوع کلاس خشک به خشک با ۶۳ درصد تخمین زده شده است. در بازه زمانی ۱۲ ماهه احتمال کلاس تر به نرمال پیش‌یابی شده که درصد احتمال برای دوره پایه و آتی و طبق هر دو سناریو ۴/۵ و ۸/۵ به ترتیب برابر با ۷۱، ۷۵ و ۷۵ است. نتایج سناریوهای بکارگرفته شده اختلاف کمی با یکدیگر دارند این بدان معنی است که تفاوت زیادی در نتایج سناریوهای مختلف مشاهده نشده است که این موافق با نتایج (Vasiliades et al., 2009؛ بلهکه و همکاران، ۱۳۹۶) است. در بررسی احتمال خشکسالی با زنجیره مارکوف مشاهده گردید که هر طبقه تمایل دارد به طبقه نزدیک خود انتقال پیدا کند. مشابه این مسئله در پژوهش‌های (Moreira et al., 2006; Paulo and Pereira, 2007; Yeh et al., 2014) در بررسی خشکسالی با استفاده از زنجیره مارکوف گزارش شده است. طبق شکل‌های ارائه شده برای هر دو سناریو بیشترین احتمال مربوط به طبقه نرمال است. طبق نتایج با افزایش شدت ترسالی و خشکسالی از احتمال ایستایی ضعیف کاسته شده است. (Shahnoushi et al., 2010) در پژوهش خود در ایستگاه گنبد دریافتند که در دوره‌های آتی از احتمال وقوع ترسالی کاسته شده و احتمال وقوع خشکسالی افزایش خواهد یافت.

نتیجه گیری

کشور ایران از لحاظ موقعیت جغرافیایی در وضعیتی قرار دارد که بخش اعظم آن را مناطق خشک و فراخشک فراگرفته، و جزو کشورهایی است که ضریب تأثیرپذیری آن از تغییرات اقلیمی، بالا می‌باشد. کاهش یا افزایش پارامترهای اقلیمی همانند بارندگی و دما بر روی وقایع حدی از جمله خشکسالی تأثیر گذار خواهد بود. پیش بینی صحیح تغییر اقلیم مهمترین گام در مقابله با کاهش اثرات منفی ناشی از

- models in estimation potential evapotranspiration changes under RCP scenarios (Case Study: Mashhad plain). *Journal of Earth and SPACE Physics*, **42**(3)
10. Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., Ma, L. (2017). The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors. *J. Hydrol.* **547**, 184–195. [[CrossRef](#)]
11. Heim, R. R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83: 1149–1165.
12. Heydarzadeh, M, A. Nohegar, A. Malekian, A.A. Khurani. (2020). Assessing the Impact of Future Climate Change on Precipitation and Temperature Meteorological Parameters: A Case Study of Bandar Abbas. *Desert Ecosystem Engineering Journal*.27:107-121 (in Persian)
13. Heydarzadeh, M. (2017). The Impacts of Climate Change on Peak Discharge and Flood Prone Areas of Urban Estuaries (Case Study: Parts of Bandar Abbas City). Ph.D. Thesis. PP 236 (in Persian)
14. Liu, B., Zhou, X., Li, W., Lu, C., Shu, L. (2016). Spatiotemporal characteristics of groundwater drought and its response to meteorological drought in Jiangsu Province, China. *Water*, **8**, 480. [[CrossRef](#)]
15. Lorenzo-Lacruz, J., Garcia, C., Morán-Tejeda, E. (2017). Groundwater level responses to precipitation variability in Mediterranean insular aquifers. *J. Hydrol.* **552**, 516–531. [[CrossRef](#)]
16. Loo, Y. Y., Billa, L., Singh, A. (2015). Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia. *Geoscience Frontiers*, **6**
17. Mckee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales 8 Conf, Applied climatology. *In Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, USA, 17–22 January
- داشت. انجام برنامه‌ریزی‌ها و مدیریت موفق، نیاز به شناخت صحیح پدیده خشکسالی و علت‌های پیدایش آن دارد. بنابراین مسئله تغییر اقلیم بسیار اهمیت دارد و نیازمند توجه بیشتری در این زمینه است.

منابع

1. Agnew, C.T. (2000). Using the SPI to identify drought, *Drought Network News*, **12**(1), winter 1999–Spring 2000
2. Angelidis, P., Maris, F., Kotsovinos, N., Hrissanthou, V. (2012). Computation of drought index SPI with alternative distribution functions. *Water Resource Management* **26**: 2453-2473.
3. Bhat, U. N., Miller, G. K. (2002). Element of applied stochastic processes. *Wiley Interscience*, 488 pages.
4. Banimahd, S.A., Khalili, D. (2014). Drought Class Transition Analysis by Markov Chains and Log Linear Models: Approach for Early Drought Warning. *Iran Watershed Management Science and Engineering*, **8**:37-56(in Persian)
5. Bahlake, M., Fathabadi, A., Rouhani, H., Seyedian, S. M. (2017). The effect of climate change on wet and dry spells' characteristics (Case study: Arazkuse and Tamar stations in Golestan Province). *Journal of Agricultural Meteorology*, **5**(2), 11-23 (in Persian)
6. Doostan, R. (2015). Analysis of the Iran droughts in the Past half century. *Journal of Climate research*, **23**:1-18(in Persian)
7. Edwards, D.C., McKee, T. B. (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report*. P 97.
8. Farjad, B., Gupta, A., Marceau, D. J. (2015). Hydrological Regime Responses to Climate Change for the 2020s and 2050s Periods in the Elbow River Watershed in Southern Alberta, Canada. In: *Environmental Management of River Basin Ecosystems*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. 65–89
9. Ghahreman, N., babaeian, I., Tabatabaei, M. R. (2016). Evaluation the post processed outputs of dynamic

- Agricultural Water Resources in Golestan Province (A Case of Gonbad-e-Kavous County). *National Conference on Sustainable Development Patterns in Water Management*. The Academy of Sciences Islamic Republic of Iran. (In Persian)
28. Venkataraman, K., Spandana Tummuri, S., Medina, A., Perry, J. (2016). 21st century drought outlook for major climate divisions of Texas based on CMIP5 multimodel ensemble: Implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 534. 300-316 doi:10.1016
 29. Vasiliades, L., Loukas, A., Patsonas, G. (2009). Evaluation of a statistical downscaling procedure for the estimation of climate change impacts on droughts. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 879-894
 30. Wang, L., Ranasinghe, R., Maskey, S., Van Gelder, P. H. A. J. M. K., Vrijling, J. K. (2016). Comparison of empirical statistical methods for downscaling daily climate projections from CMIP5 GCMs: a case study of the Huai River Basin. *International Journal of Climatology*, 36(1), 145-164
 31. Yeh, H.F., Hsu, H. L. (2019). Using the Markov Chain to Analyze Precipitation and Groundwater Drought Characteristics and Linkage with Atmospheric Circulation. *Sustainability*, 11, 1817; doi: 10.3390/su11061817
 32. Yeh, C. F., Wang, J., Yeh, H. F., Lee, C.H. (2014). SDI and Markov Chains for Regional Drought Characteristics. *Sustainability*, 7: 10789-10808.
 18. McKee, T.B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales, Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology. *American Meteorological Society*, Boston, 233-236.
 19. Mesbah Zadeh, T., Mirakbari, M., Mohseni Saravi, M., Khosravi, H., Mortezaie Farizhendi, G. H. (2019). Study of Current and Future Meteorological Drought Conditions Using the CMIP5 Model under RCP Scenarios. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 13:1-21(in Persian)
 20. Moreira, E.E., Paulo, A.A., Pereira, L. S., Mexia, J. T. (2006). Analysis of SPI drought class transitions using loglinear models. *Journal of Hydrology*, 331(1-2): 349-359.
 21. Ntale, H.K., Thian, M. Y. G. (2003). Drought index and Their Application to East Africa. *Int. J. Climatol.* 23: 1335-1357.
 22. Paulo, A., Pereira, L. (2007). Prediction of SPI drought class transitions using Markov chains. *Water Resources Management*, 21(10): 1813-1827.
 23. Pulwarty, R.S., Sivakumar, M. V. (2014). Information systems in a changing climate: Early warnings and drought risk management. *Weather and Climate Extremes* 3:14-21
 24. Quevauviller, P. (2011). Adapting to climate change: reducing water-related risks in Europe – EU policy and research considerations. *Environmental Science and Policy*. 14:722-729.
 25. Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., Stahl, K. (2015a). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal Climatology* 35:4027-4040
 26. Svoboda, M., Hayes, M., Wood, D. A. (2012). Standardized Precipitation Index User Guide; Tech. Rep. WMO-No. 1090; *World Meteorological Organization*: Geneva, Switzerland, 2012
 27. Shahnoushi, N., Shahhosseini Dastjerdi, S., Darijani, A., Davari, K. (2010). Drought Risk Management for Sustainable Use of