



فصلنامه علوم محیطی، دوره بیستم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱

۹۹-۱۱۶

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی خشک‌سالی سواحل دریای خزر با تأثیر تغییر اقلیم

مهدی بروغنی^{۱*}، الهام فهیمی‌نژاد^۲ و ایمان پژوهان^۳

^۱ مرکز پژوهشی علوم جغرافیا و مطالعات اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
^۲ گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
^۳ گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۷

بروغنی، م. ا. فهیمی‌نژاد و ا. پژوهان. ۱۴۰۱. پیش‌بینی خشک‌سالی سواحل دریای خزر با تأثیر تغییر اقلیم. فصلنامه علوم محیطی. ۲۰(۲): ۹۹-۱۱۶.

سابقه و هدف: پدیده تغییر اقلیم می‌تواند بر سیستم‌های مختلف اثرهای متفاوتی داشته باشد که به‌دلیل نقش حیاتی آب در زندگی انسان، بررسی تأثیرهای منفی آن بر وقوع، شدت و تداوم خشک‌سالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این تحقیق اثرهای تغییر اقلیم بر خشک‌سالی‌های سواحل جنوبی خزر در دوره‌های آتی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه سه استان شمالی گیلان، مازندران و گلستان را در برمی‌گیرد و به‌طور کلی از نظر مساحت ۴ درصد و از نظر جمعیت ۱۲ درصد از نظر کل ایران را شامل می‌شود. در این مطالعه، تأثیرات تغییرات آب‌وهوا بر خشک‌سالی در سواحل جنوبی دریای خزر در دوره‌های آینده ارزیابی خواهد شد. برای این منظور، داده‌های بارشی از مدل گردش عمومی HadCM3-A2 برای دوره‌های آینده (۲۰۷۰-۲۰۹۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹، ۲۰۳۹-۲۰۱۰) از نظر آماری و با در نظر گرفتن عدم قطعیت نوسانات آب و هوایی در سری ۲۰، مقیاس بندی شده‌اند. در ابتدا بارش روزانه تولید شد، سپس سنجه بارش استاندارد برای دوره پایه و دوره‌های آینده محاسبه شد. سرانجام، متغیرهای ریز مقیاس شده منطقه با متغیرهای مشاهده شده مقایسه شده و پس از اطمینان از توانایی مدل HadCM3 در کاهش دما و متغیرهای بارش منطقه، سری زمانی روزانه بارش و دما و متغیرهای مقیاس بزرگ از مدل HadCM3 در دوره‌های (۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹) از مدل SDSM استخراج می‌شود.

نتایج و بحث: نتایج به‌دست‌آمده از خروجی سنجه در دوره نظارت و دوره‌های آینده با مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد که شدت خشک‌سالی در دهه‌های آینده نسبت به دوره نظارت افزایش خواهد یافت. این افزایش برای شرق دریای خزر شدیدتر است، به‌طوری‌که شدت خشک‌سالی دهه ۲۰۸۰ سه برابر دوره مشاهده خواهد بود. نتایج نشان داد که تغییرات آب و هوایی منجر به افزایش فراوانی و شدت خشک‌سالی در منطقه مورد مطالعه می‌شود. علی‌رغم وجود تنوع در مقدار SPI برای مدت کمتر از ۹ ماه در حال اجرا، برای دوره‌های طولانی‌تر از ۱ تا ۲ سال در مقایسه با دوره تاریخی حدود ۲۳/۵ و ۲۵ درصد افزایش یافته است. ناسازگاری خشک‌سالی شبیه‌سازی شده در آینده با دوره مشاهده در ایستگاه گرگان با

*Corresponding Author: Email Address. m.boroughani@hsu.ac.ir

<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2022.1038>

<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1401.20.2.12.3>

چهار ایستگاه باقی مانده از مناطق جنوبی دریای خزر باید مورد توجه قرار گیرد. این وضعیت ممکن است به دلیل اختلاف در منابع بارش در سواحل شرقی و غربی دریای خزر و واکنش متفاوت دو منطقه در برابر گرم شدن کره زمین باشد. مطالعات مختلف (Alijani (1991 نشان داد که سواحل غربی دریای خزر بیشتر از سواحل شرقی آن تحت تأثیر جریان‌های شمالی سیستم پرفشار سیبری قرار دارند و در صورت ایجاد فشار زیاد بر دریای خزر، بارندگی در غرب دریای خزر بالاتر از منطقه شرقی آن خواهد بود. با توجه به این واقعیت که پدیده گرم شدن کره زمین به‌طور کلی منجر به تضعیف سیستم پرفشار سیبری شده است، بنابراین میزان کاهش بارش در منطقه‌های مرکزی و غربی دریای خزر به نسبت بیشتر از منطقه‌های شرقی آن مانند ایستگاه گرگان خواهد بود.

نتیجه‌گیری: وقوع خشک‌سالی‌های پی‌درپی و افزایش شدت خشک‌سالی‌های دهه‌های آینده منطقه‌های ساحلی جنوب خزر منابع آبی را کاهش داده و اقتصاد مبتنی بر کشاورزی منطقه را با بحران شدیدتری مواجه می‌نماید، در این صورت مدیریت منابع آبی و تدوین سند راهبردی آبیاری و الگوی کشت منطقه‌ای سازگار با روندهای اقتصادی - اجتماعی و اقلیمی ضروری به نظر می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، سنجه بارش استاندارد، ریزمقیاس نمایی آماری، سواحل دریای خزر.

مقدمه

کاهش خسارت‌های خشک‌سالی آمادگی لازم را به وجود آوردند. این پدیده در واقع از ویژگی‌های اصلی و تکرار شونده اقلیم‌های متفاوت به‌شمار می‌آید؛ و اثرهای آن تنها به نواحی خشک و نیمه‌خشک محدود نمی‌شود، بلکه خشک‌سالی هم در نواحی خشک و هم در نواحی مرطوب به وقوع می‌پیوندد (Abbasi et al., 2020).

ویژگی‌های خشک‌سالی از قبیل فراوانی، شدت و تداوم خشک‌سالی از مکانی به مکان دیگر متفاوت است. خشک‌سالی‌ها گرچه زیان‌های اقتصادی، خسارت‌های محیطی و اجتماعی زیادی را سبب می‌شوند، نسبت به سایر پدیده‌های هواشناسی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، زیرا تعریف، تبیین و پایش آن‌ها مشکل است (Helmi et al., 2020).

دانشمندان علم آب و هواشناسی به منظور ارزیابی و پایش خشک‌سالی، سنجه‌های زیادی را ارائه داده‌اند که هر یک براساس به‌کارگیری متغیرهای هواشناسی و روش‌های محاسباتی متفاوتی طراحی شده‌اند. با توسعه روش‌های عددی در علم هواشناسی، افق جدیدی در پیش‌بینی‌های چندروزه، فصلی و دهه‌ای پدید آمد. در این روش معادلات حرکت هوا با یکسری ساده‌سازی‌ها، به روش تفاضل محدود و روی یک شبکه گسترده سه‌بعدی در سیستم مختصات کروی حل می‌شوند.

افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر و افزایش دمای ناشی از آن سبب برهم خوردن تعادل سیستم اقلیمی زمین شده و تغییرات گسترده‌ای را در بیشتر نواحی کره زمین موجب شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که پدیده تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف از جمله منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست، بهداشت، صنعت و اقتصاد اثرهای منفی دارد و کمترین میزان تغییر بارش و درجه حرارت ضربه‌های شدیدی به بخش‌های مختلف اقتصادی می‌زنند (Gohari et al., 2013).

با توجه به اینکه که آب یکی از منابعی است که در معرض خطرهای ناشی از تغییرات اقلیم قرار دارد، بررسی تغییرات اقلیمی در دوره‌های آینده می‌تواند راهگشای بحران‌هایی چون خشک‌سالی، سیلاب ناگهانی و ... باشد.

خشک‌سالی‌ها پدیده‌هایی بلندمدت هستند که منطقه‌های وسیعی را تحت تأثیر قرار می‌دهند و سبب رکود شدید بیشتر فعالیت‌های اقتصادی و اجتماعی می‌شوند. شناخت این پدیده، و ویژگی‌های آن، آگاهی از امکانات، توانمندی‌ها و استعدادهای منطقه‌ها از یک طرف و ارائه راهکارهای کوتاه‌مدت و بلندمدت از طرف دیگر، مدیران منابع سطحی را بر آن می‌دارند تا به منظور

داده شده، ترکیبی از دو روش تولید داده‌های آب و هوایی استوکستیک و روش رگرسیون خطی است. تاکنون الگوریتم ریزمقیاس‌نمایی SDSM در مطالعات محیط زیستی، هیدرولوژیکی و هواشناسی در سرتاسر دنیا نظیر اروپا، آمریکای شمالی و آسیای جنوب شرقی کاربرد گسترده‌ای داشته است.

در حال حاضر بیشتر تحقیق‌های انجام‌گرفته در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر وقایع متوسط مانند رواناب می‌باشند (Chamaille-Jammes *et al.*, 2006; Dubrovsky *et al.*, 2007; Kothavala, 1999; Loukas *et al.*, 2008; Robera *et al.*, 2005) که در بررسی آن‌ها از خروجی مدل‌های گردش عمومی اقیانوس - اتمسفر استفاده شده است. در مقایسه با مطالعات در زمینه خاک، آب‌وهوا، کاربری زمین‌هایی که نیازمند اطلاعات ورودی زیادی برای مدل‌های هواشناسی، هیدرولوژی و مدیریت منابع آب می‌باشند، تحقیق‌های وقایع حدی با داده‌های ورودی اندکی قابل انجام می‌باشند (Hisdal *et al.*, 2001; Labedzki, 2006; Mavromatis, 2007). با وجود تحقیق‌های بی‌شماری که بر رواناب صورت گرفته است، تحقیق‌های اندکی در زمینه وقایع حدی بویژه خشک‌سالی در سطح دنیا انجام‌گرفته است (Booij, 2005; Fowler and Kilsby, 2007; McKee *et al.*, 1993). دلیل این امر اعتبار نداشتن خروجی مدل‌های گردش عمومی جو در مقیاس روزانه و از طرف دیگر دشواری کوچک مقیاس‌سازی خروجی این مدل‌ها برای مطالعات وقایع حدی هست. در صورت استفاده از روش مناسب و معتبر در کوچک‌مقیاس‌سازی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو، این مدل‌ها ابزار مناسبی برای پیش‌بینی وقایع حدی می‌باشند، از سوی دیگر این مدل‌ها قادر به تولید سری‌های زمانی طولانی‌مدت هستند که می‌توان به کمک آن‌ها به آنالیز تغییرات احتمالی وقایع حدی در دوره‌های آینده نیز پرداخت (McKee *et al.*, 1993).

استفاده از این روش هم‌اکنون در بیشتر مراکز پیش‌بینی جهانی با قدرت تفکیک کمتر از ۱۰ کیلومتر به موضوعی روزانه و عادی تبدیل شده است؛ اما استفاده از آن در مقیاس دهه‌ای و بالاتر به دلیل محدودیت‌های محاسباتی و زمانی و هزینه‌بر بودن آن، با مشکل‌هایی مواجه است، به‌طوری‌که در این مقیاس زمانی، محدودیت جدی برای قدرت تفکیک مکانی مدل‌ها وجود دارد. هم‌اکنون قدرت تفکیک برای مدل‌های گردش عمومی جو در حد چند صد کیلومتر است. مدل‌های گردش عمومی جو، شرایط توپوگرافی و پوشش سطحی و شرایط اقلیمی یکسانی را برای یک شبکه با ابعاد صد کیلومتری در نظر می‌گیرند، درحالی‌که ممکن است شرایط واقعی زمین در محدوده مورد بحث به‌طور کامل متفاوت باشد (Babaiean and Najafi, 2006).

برای فائق آمدن به کاستی تفکیک مکانی کم مدل‌های گردش عمومی، دو راهکار وجود دارد که عبارت‌اند از ریزمقیاس‌نمایی آماری با استفاده از مدل‌های آماری و به‌کارگیری مدل‌های دینامیکی منطقه‌ای. استفاده از مدل‌های دینامیکی برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل گردش جو با محدودیت زمانی اجرای مدل مواجه است؛ اما در روش آماری و در عرض چند ثانیه می‌توان ریزمقیاس‌نمایی آماری را برای یک سایت و ایستگاه مشخص برای چندین ده سال انجام داد. روش‌های آماری در مقایسه با روش‌های دینامیکی، بویژه در مواقعی که هزینه کمتر و ارزیابی سریع‌تر عامل‌های مؤثر بر تغییرات آب و هوایی مورد نیاز باشد، از مزیت‌ها و قابلیت‌های بیشتری برخوردار است. از جمله مدل‌هایی که در روش‌های آماری استفاده می‌شوند، می‌توان به LARS -WG CLIMGEN, GEM, USCLIMATE و WGEN و SDSM، اشاره کرد (Babaiean *et al.*, 2009).

مدل SDSM که توسط (Wilby *et al.*, 2002) توسعه

در بین این وقایع حدی خشک‌سالی‌ها به دلیل گستره قابل توجه همواره به صورت ویژه مورد توجه محققان در کشورهای مختلف جهان بوده است.

(Golmohamadi *et al.* (2011) با بررسی وضعیت خشک‌سالی حوضه قره‌سو در دوره ۲۰۶۹ - ۲۰۴۰، تحت تأثیر تغییر اقلیم به این نتیجه رسیدند که این منطقه نسبت به سال‌های (۲۰۰۱ - ۱۹۷۱)، کمتر دچار نوسان‌های اقلیمی خواهد شد و شدت و فراوانی وقوع خشک‌سالی‌ها کاهش می‌یابد.

(Salehi Tabas *et al.* (2020) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی خشک‌سالی در خراسان جنوبی پرداختند. نتایج گویای آن است که در آینده دور شدت و مدت خشک‌سالی افزایش می‌یابد.

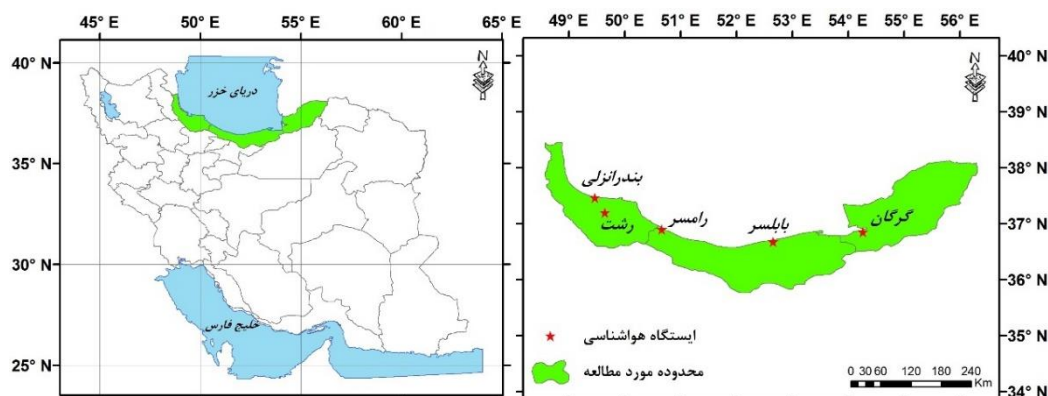
(Helmi *et al.* (2020) به مدل‌سازی و پیش‌بینی خشک‌سالی هواشناسی با استفاده از مدل سری زمانی SARIMA در نمونه‌های اقلیمی مختلف ایران پرداختند. نتایج نشان داد که در اقلیم‌های فراهشک معتدل (زاهدان) احتمال خشک‌سالی شدید خواهد بود. اقلیم نیمه‌خشک سردسیر (مشهد) احتمال رخ دادن خشک‌سالی متوسط است. اقلیم نیمه‌خشک فرا سرد (همدان) وضعیت نرمالی دارد؛ و در نهایت اقلیم معتدل (رامسر و بندر انزلی) احتمال رخداد ترسالی ملایم دارد. (Loukas *et al.* (2008) در بررسی اثرهای تغییرات اقلیم بر شدت خشک‌سالی در منطقه تسالی، یونان نشان دادند که شدت خشک‌سالی سالانه برای تمام نواحی هیدرولوژیک و مقیاس‌های زمانی SPI افزایش یافته و با سناریوهای اقتصادی و اجتماعی SRES A2 شدیدتر می‌شود.

به دلیل وابستگی شدید اقتصاد سواحل جنوبی دریای خزر به تولیدهای کشاورزی و با توجه به اثرهای وسیع اقتصادی و اجتماعی تغییر اقلیم بر جوامع، آگاهی از چگونگی بروز چنین تغییراتی در برنامه‌ریزی‌های محیطی بسیار ارزشمند خواهد بود. از رو در این پژوهش با هدف شبیه‌سازی چگونگی تغییرات آب و

هوایی و تأثیر آن بر وقوع، شدت و تداوم خشک‌سالی‌های دهه‌های آینده انجام گرفته است تا با اتکا به نتایج آن بتوان با اتخاذ تدابیر لازم، ایجاد طرح‌های آمادگی و مدیریت منابع آب، اثرهای منفی تغییر اقلیم را کاهش داد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، جلگه‌ای است با مساحت ۶۵۹۱۲ کیلومترمربع در جنوب دریای خزر و در شمال ایران واقع شده است. این منطقه سه استان شمالی ایران شامل گیلان، مازندران و گلستان را در بر گرفته و در مجموع ۴ درصد مساحت و ۱۲ درصد جمعیت کل کشور را شامل شده است (پایگاه ملی داده‌های علوم زمین). میانگین بارش سالیانه بین ۱۸۱۵ در بندر انزلی تا ۶۰۰ میلی‌متر در گرگان دارای نوسان است. سفیدرود با آبدهی سالیانه ۳۹۹۸.۴ میلیون مترمکعب پرآب‌ترین رودخانه منطقه است. از رودهای مهم دیگر می‌توان به هراز، نکا، بابل، چالوس، ارس و تالار اشاره کرد. وجود این رودها به همراه آب‌وهوای معتدل و خاک‌های حاصلخیز آبرفتی زمینه‌ای مناسب برای فعالیت‌های کشاورزی فراهم آورده است به گونه‌ای که این منطقه در تولید برخی محصولات نظیر برنج، چای، مرکبات، زیتون و دانه‌های روغنی رتبه اول کشور را داراست و ۸.۶ درصد کل زمین‌های کشاورزی در حال بهره‌برداری را در خود جای داده است (Salehi Tabas *et al.*, 2020). پس از بررسی و کنترل کیفی داده‌ها، از میان ایستگاه‌های سینوپتیک سواحل جنوبی دریای خزر تعداد ۵ ایستگاه که در دوره پایه ۱۹۹۰ - ۱۹۶۱، دارای آمار بدون نقص بودند، انتخاب شدند. ایستگاه‌های منتخب با طول دوره آماری ۳۰ ساله واقع در سواحل جنوبی دریای خزر عبارت‌اند از گرگان، بابلسر، رامسر، رشت و بندرانزلی. در شکل ۱ منطقه مورد مطالعه و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های آن دیده می‌شود.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه و موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی
 Fig. 1- Study area and geographical location of meteorological stations

مواد و روش‌ها

برونداد مدل گردش عمومی HadCM3 شامل داده‌های پیش‌بینی کننده روزانه در دوره ۲۰۹۹ - ۱۹۶۱ هستند که نسبت به دوره ۱۹۹۰ - ۱۹۶۱ نرمالیزه شده و شامل دو سری داده تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 هستند.

سنجه بارش استاندارد

این سنجه به‌وسیله Mcee, Doesken, Jan kleist, اعضای مرکز اقلیمی کلرادو در سال ۱۹۹۳ با توجه به بررسی تأثیرهای متفاوت کمبود بارش روی آب‌های زیرزمینی، ذخیره‌ها و منابع آب سطحی، رطوبت خاک و جریان آبراهه ارائه شده است. سنجه بارش استاندارد، سنجه‌ای است که براساس احتمال بارش برای مقیاس‌های زمانی متفاوت به‌کاربرده می‌شود همچنین رخداد شرایط خشک‌سالی را قبل از وقوع پیش‌بینی می‌کند و به تخمین شدت خشک‌سالی کمک کرده و نسبت به سنجه پالمز از پیچیدگی کمتری برخوردار هست. همچنین بسیاری از برنامه ریزان و تصمیم‌گیرندگان و طراحان خشک‌سالی چندمنظوره بودن سنجه بارش استاندارد را درک کرده و به اهمیت زیاد آن پی برده‌اند. محاسبه سنجه بارش استاندارد شده برای هر منطقه براساس ثبت داده‌های بارش در بلندمدت برای یک دوره دلخواه استوار هست این گزارش‌ها (بارش) در بلندمدت با یک توزیع احتمال متناسب شده‌اند، بنابراین متوسط بارش استاندارد شده برای هر منطقه و برای هر دوره دلخواهی صفر و انحراف معیار آن یک است (McKee et al., 1993).

سه نوع داده در این تحقیق که شامل: متغیرهای بزرگ مقیاس مدل گردش عمومی HadCM3 در دو دوره گذشته (۱۹۹۰ - ۱۹۶۱) و آینده (۲۰۹۹ - ۲۰۱۰) متغیرهای بزرگ مقیاس باز تحلیل از مرکز پیش‌بینی‌های محیطی آمریکا NCEP در دوره گذشته (۱۹۹۰ - ۱۹۶۱) و داده‌های دیدبانی بارش روزانه ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد استفاده قرار گرفتند.

در این تحقیق از نرم‌افزار ریزمقیاس نمایی SDSM استفاده شد. نرم‌افزار بیان شده روابط آماری را بر مبنای روش رگرسیون خطی چندگانه بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس (پیش‌بینی کننده‌ها) و محلی (پیش‌بینی شونده‌ها) محاسبه می‌کند (Wilby et al., 2002). این روابط براساس داده‌های دیدبانی و بازتحلیل NCEP در دوره گذشته (۱۹۹۰ - ۱۹۶۱) به‌صورت ماهانه تهیه شدند. فرض بر این است که این روابط برای آینده نیز صادق است. هر دو داده‌های دیدبانی و مدل نسبت به دوره ۱۹۹۰ - ۱۹۶۱ نرمالیزه گردید. پیش‌بینی کننده‌های دیدبانی بزرگ مقیاس از داده‌های بازتحلیل NCEP به-دست می‌آیند (Fowler and Kilsby, 2007). طول دوره داده‌های NCEP ۲۰۰۱ - ۱۹۶۱ است که شامل ۴۱ سال داده‌های پیش‌بینی کننده روزانه هستند که قبل از نرمالیزه شدن در شبکه سلول‌هایی مشابه با ابعاد مدل گردش عمومی HAdCM3 درون‌یابی شده‌اند.

McKee *et al.* (1993) همچنین معیارهایی را برای رخداد یک خشک‌سالی در مقیاس‌های زمانی متفاوت تعریف کرده‌اند به‌طوری‌که آن‌ها بیان کردند که یک خشک‌سالی زمانی اتفاق می‌افتد که سنجه بارش استاندارد منفی تداوم داشته باشد و همچنین وقوع یک خشک‌سالی زمانی شدید است که سنجه بارش استاندارد ۱- یا کمتر باشد و در صورتی که SPI مثبت شود، رخداد خشک‌سالی به پایان خواهد رسید. SPI به دو صورت کوتاه‌مدت (۱،۳،۶) و ماهه و به صورت بلندمدت (۱۲،۲۴، ۴۸) ماهه محاسبه می‌شود. SPI در بازه زمانی کوتاه‌مدت شرایط رطوبت خاک را منعکس می‌کند. این مدل حساسیت بیشتری به شرایط رطوبت نشان داده و با کوچک‌ترین تغییر در بارندگی ماهانه، به سرعت به بالای صفر و یا زیر صفر نوسان می‌کند. در مقابل SPI بلندمدت خشک‌سالی‌های هیدرولوژیک را بهتر منعکس می‌کند و مقادیر SPI در این مقیاس زمانی با سیل‌ها، کاهش سطح آب در سطح‌ها و منابع آب زیرزمینی مرتبط است.

ریزمقیاس‌نمایی آماری

اساس مدل SDSM استفاده ترکیبی از روش‌های رگرسیونی و تولید داده‌ای آب‌وهوای مصنوعی برای ریزمقیاس‌نمایی هست. در این مدل اقلیم محلی توسط اقلیم بزرگ‌مقیاس منطقه به شکل $R=F(X)$ بیان می‌شود. در اینجا R نشان‌دهنده متغیر محلی است که کوچک‌مقیاس شده است، X مجموعه‌ای از متغیرهای اقلیمی بزرگ‌مقیاس است و F یک تابع تعیین مشروط به X است که براساس آموزش و اعتبارسنجی داده‌های تاریخی به دست می‌آید (Wilby *et al.*, 2002). برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل SDSM، در ابتدا متغیرهای شبکه‌ای بزرگ‌مقیاس NCEP مشاهده‌های منطقه مورد مطالعاتی در مقیاس روزانه در دوره ۱۹۹۰ - ۱۹۶۱ را به‌عنوان متغیر مستقل و بارندگی و دمای روزانه مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی منطقه در همین دوره، به‌عنوان متغیرهای وابسته به‌طور جداگانه وارد مدل می‌شوند؛

سپس نتایج به دست آمده از مدل با مقادیر مشاهده‌شده مقایسه و نحوه عملکرد مدل ارزیابی می‌شود. پس از واسنجی مدل SDSM، در ادامه به منظور بررسی توانایی مدل HadCM3 در شبیه‌سازی متغیرهای بارش و دما منطقه، متغیرهای بزرگ‌مقیاس شبیه‌سازی شده توسط مدل HadCM3 در دوره ۱۹۹۰ - ۱۹۶۱ به مدل SDSM (واسنجی شده در مرحله قبل) وارد شده و متغیرهای دما و بارش منطقه برای این دوره کوچک مقیاس می‌شوند. در نهایت متغیرهای کوچک‌مقیاس شده منطقه با متغیرهای مشاهداتی مقایسه می‌شوند و پس از کسب اطمینان از توانایی مدل HadCM3 در کوچک‌مقیاس کردن متغیرهای دما و بارش منطقه، سری زمانی دو متغیر با معرفی متغیرهای بزرگ‌مقیاس مدل HadCM3 در دوره‌های (۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰، ۲۰۹۹-۲۰۷۰) به مدل SDSM (واسنجی شده از مرحله قبل) برای دوره‌های آتی شبیه‌سازی می‌گردند. در این تحقیق به منظور شناسایی نوسان‌ها و رخداد‌های خشک‌سالی در دوره‌های آتی با استفاده از مدل SDSM، به تولید ۲۰ سری زمانی بارش برای دوره‌های (۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰، ۲۰۹۹-۲۰۷۰) میلادی اقدام شد.

نتایج و بحث

هدف این تحقیق، برآورد بارش ماهانه با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری و پس‌از آن بررسی اثرهای تغییرات آب و هوایی بر خشک‌سالی است؛ بنابراین با استفاده از داده‌های بارندگی خروجی مدل SDSM در دوره‌های (۲۹۹-۲۰۷۰، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۳۹-۲۰۱۰) و همچنین دوره‌دیده بانی (۱۹۹۰-۱۹۶۱)، تحت سناریوی انتشار A2 و B2 از مدل HadCM3 یک مدل GCM (جفت شده جو-اقیانوسی) از گزارش پنجم IPCC وضعیت خشک‌سالی ۵ ایستگاه منتخب در سواحل جنوبی دریای خزر شامل: گرگان، بابلسر، رامسر، رشت و انزلی برای دهه‌های آینده بررسی گردید. با اعمال

غالب، برای ریزمقیاس نمایی بارش روزانه ایستگاه‌ها در نظر گرفته می‌شوند. پس از تعیین متغیرهای بزرگ‌مقیاس مؤثر بر بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه، دوره‌های مختلفی از داده‌های بزرگ‌مقیاس بارش در دوره ۱۹۹۰ - ۱۹۶۱، برای واسنجی و صحت سنجی مدل مورد آزمون قرار گرفتند.

برای تعیین میزان سنجه بارش استاندارد (SPI) در دهه‌های آتی، در ابتدا لازم است توانمندی روش مورداستفاده در شبیه‌سازی بارش در دوره دیدبانی مورد بررسی و واسنجی قرار گیرد. نتایج آزمون واسنجی مدل برای متغیرهای بارش در جدول (۲) آورده شده است.

سری‌های زمانی بارندگی تولیدشده، سنجه SPI برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه برای دوره‌های آتی محاسبه شد.

نتایج واسنجی و کارایی مدل

برای واسنجی، در ابتدا لازم است تا از بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس، متغیرهایی که بیشترین ارتباط را با بارش منطقه دارند انتخاب شوند. با بررسی و انتخاب متغیرهای بزرگ‌مقیاس مختلف، بهترین متغیرها که دارای همبستگی آماری بزرگتر و معنی‌داری با بارش هستند مشخص می‌شوند. در جدول (۱) متغیرهای بزرگ‌مقیاس که بیشترین نقش کنترلی و همبستگی معنی‌دار با بارش را دارند، مشخص شده‌اند. این متغیرها به‌عنوان متغیر

جدول ۱- متغیرهای بزرگ غالب در ریزمقیاس کردن بارش روزانه
Table 1. Large variables prevailing in subsampling daily rainfall

ایستگاه Station	بارش Rainfall
گرگان Gorgan	واگرایی سطحی ۸۵۰ هکتوپاسکال Surface divergence 850 hPa
	سرعت نصف النهاری Meridional velocity
	رطوبت نسبی در ۸۵۰ هکتوپاسکال Relative humidity at 850 hPa
بابلسر Babolsar	فشار متوسط سطح دریا Mean sea level pressure
	حالت گردابی در سطح زمین Surface vorticity
	سرعت نصف النهاری سطحی Surface meridional velocity
رامسر Ramsar	ارتفاع ژئوپتانسیل ۸۵۰ هکتوپاسکال Geopotential height 850 hPa
	رطوبت نسبی در ۸۵۰ هکتوپاسکال Relative humidity at 850 hPa
	رطوبت ویژه در سطح Surface specific humidity
رشت Rasht	فشار متوسط سطح دریا Mean sea level pressure
	حالت گردابی در سطح زمین Surface vorticity
	قدرت جریان هوای سطحی Surface airflow strength
انزلی Anzali	ارتفاع ژئوپتانسیل ۸۵۰ هکتوپاسکال Geopotential height 850 hPa
	رطوبت نسبی در ۸۵۰ هکتوپاسکال Relative humidity at 850 hPa
	رطوبت نسبی سطح زمین Near surface relative humidity

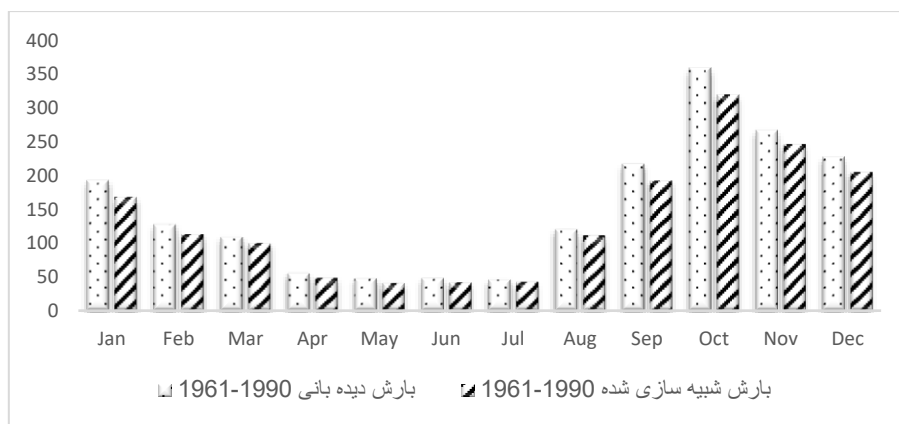
جدول ۲- مقادیر بارش فصلی شبیه‌سازی‌شده دوره دیدبانی و سه دوره آتی و درصد خطا مدل تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 برونداد مدل گردش عمومی HadCM3

Table 2. Simulated seasonal precipitation values of the observation period and the next three periods and the error percentage of the model under the emission scenarios A2 and B2 output of the HadCM3 general circulation model

انزلی Anzali	رشت Rasht	رامسر Ramsar	بابلسر Babolsar	گرگان Gorgan	1961-90	بارش Rainfall
211.9	225.75	179.12	117.8	177.7	دیدبانی Observed	بهار (مارس، آوریل و می) Spring (March, April and May)
189.3	194.4	158.3	99.55	156.24	شبیه‌سازی Simulating	
10.66	13.66	11.6	15.46	12.1	خطا (%) Error	
214.22	152.21	146.3	106.82	81.74	دیدبانی Observed	تابستان (ژوئن، جولای و اوت) Summer (June, July and August)
195.4	130.22	140.14	93.26	70.7	شبیه‌سازی Simulating	
8.8	14.61	14.7	12.7	13.54	خطا (%) Error	
842.4	543.26	598.33	246.33	176.6	دیدبانی Observed	پاییز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) Autumn (September, October and November)
757	464.95	515.5	310	158	شبیه‌سازی Simulating	
10.17	14.41	13.84	14.94	10.56	خطا (%) Error	
530	415.02	275.4	284.5	173.92	دیدبانی Observed	زمستان (دسامبر، ژانویه و فوریه) Winter (December, January and February)
470	366.66	248.46	242.7	156.6	شبیه‌سازی Simulating	
11.38	11.65	9.78	14.7	9.96	خطا (%) Error	

انتخاب شدند. مقایسه داده‌های کوچک‌مقیاس شده بارش با داده‌های مشاهداتی بارش در دوره زمانی ۱۹۹۰-۱۹۶۱ توانایی مدل HadCM3 در تولید سناریوهای بارش برای دوره‌های آینده را مشخص می‌کند (شکل ۲).

در فرایند انتخاب متغیرهای بزرگ مقیاس تأثیرگذار بر ریزمقیاس نمایی بارش و دما از نمودار پراکنش و ضریب همبستگی جزئی استفاده می‌شود. در ریزمقیاس نمایی بارش به دلیل پیچیدگی پدیده بارندگی متغیر بیشتری



شکل ۲- مقایسه بارش دیدبانی با مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SDSM در دوره ۱۹۹۰ - ۱۹۶۱ (ایستگاه انزلی)

Fig. 2- Comparison of observation precipitation with the values simulated by the SDSM model in the period 1961-1990 (Anzali station)

شبیه‌سازی محدوده نوسانات و تحلیل عدم قطعیت بارش به تولید ۲۰ سری زمانی بارش از این متغیر در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۹۹، ۲۰۱۰-۲۰۶۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ اقدام شد.

پس از واسنجی مدل SDSM و استخراج داده‌های بزرگ‌مقیاس مناسب، داده‌های بارش مدل HadCM3 برای دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۱۰، ۲۰۹۹-۲۰۶۹، ۲۰۷۰-۲۰۴۰ توسط مدل SDSM ریزمقیاس شدند. به‌منظور

جدول ۳- توانمندی مدل SDSM در شبیه‌سازی میانگین بارش در دوره دیدبانی
Table 3. Capability of SDSM model in simulating average rainfall during the observation period

انزلی Anzali	رشت Rasht	رامسر Ramsar	بابلسر Babolsar	گرگان Gorgan	1961-90	رخداد حدی Event
1816.4	1350.4	1226.4	883	616	دیدبانی Watchtower	
1627	1169	1070.7	753.5	546.7	شبیه‌سازی Simulating	میانگین بارش Average rainfall
10.4	13.4	12.7	14.7	11.2	خطا (%) Error	

ایستگاه‌ها میانگین بارش دوره‌های آتی نسبت به دوره دیدبانی کاهش یافته است. بیشترین کاهش بارش سالانه در ایستگاه بندر انزلی و به میزان ۳۵ درصد خواهد بود. همچنین میزان انحراف معیار سالانه در سه دهه آینده نسبت به دوره دیده بانی افزایش یافته است.

در جدول (۴)، میانگین بارش سالانه پنج ایستگاه موردبررسی شامل گرگان، بابلسر، رامسر، رشت و بندر انزلی در سه دوره آتی ۲۰۳۹-۲۰۱۱، ۲۰۶۹-۲۰۴۰ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ تحت دو سناریوی انتشار A2 و B2 آمده و با میانگین بارش دوره دیدبانی مقایسه شده است. در تمام

جدول ۴- مقادیر بارش سالانه دوره دیدبانی و سه دوره آتی تحت سناریوهای انتشار A2 و B2 برون‌داد مدل گردش عمومی HadCM3
Table 4. Annual precipitation values of the observation period and the next three periods under the emission scenarios A2 and B2 output of the HadCM3 public circulation model

2099-2070		2069-2040		2039-2011		1990-1961	Station
B2	A2	B2	A2	B2	A2		
568	529	577	580	574	601	616	انزلی Anzali
357	436	409	547	481	665	883	رشت Rasht
990	997	941	5/923	908	937	1226.4	رامسر Ramsar
909	882	977	978	1018	1058	1350	بابلسر Babolsar
1252	1258	1256	1335	1329	1378	1816	گرگان Gorgan

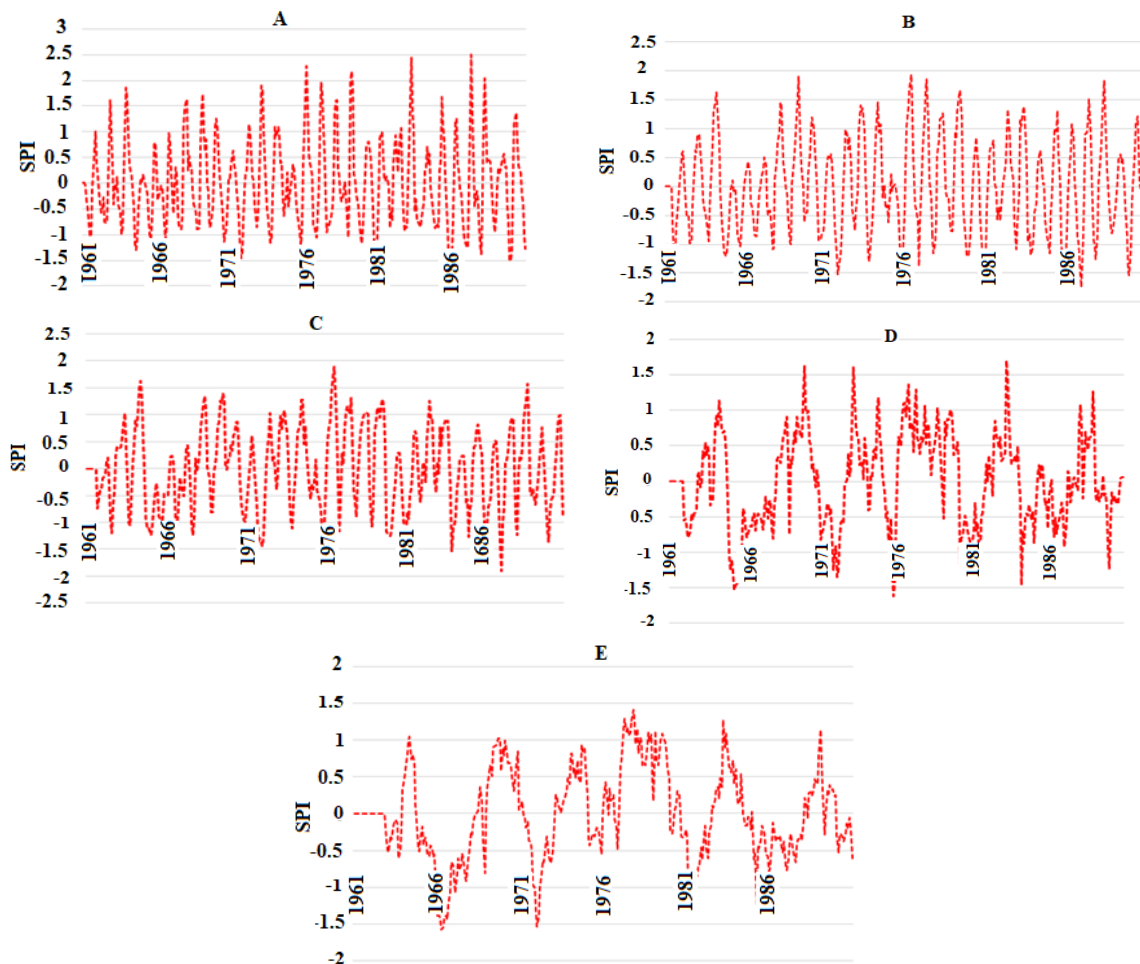
به‌دست‌آمده از خروجی برنامه‌ی SPI و شکل (۳) می‌بینیم که دوره‌های زمانی کوتاه‌مدت (۳ و ۶ ماهه) مقادیر سنجه بارش استاندارد شده دارای نوسان‌های زیادی است، به-عبارتی دیگر دوره‌های خشک و مرطوب از تداوم زیادی برخوردار نبوده بلکه شدیداً تحت تأثیر بارش‌های روزانه می‌باشد. تحلیل سری‌های زمانی SPI، ۳ ماهه و ۶ ماهه دوره‌دیده بانی انزلی نشان می‌دهد حداقل مقدار SPI به-ترتیب در ماه سپتامبر ۱۹۷۱ ($SPI = -1/36$) و ماه اکتبر

تحلیل سری زمانی سنجه SPI دوره دیده بانی

نمونه‌ای از مقادیر استخراج‌شده از سنجه متوسط خشک‌سالی بارش استاندارد برای منطقه مورد مطالعه در شکل (۳) به‌صورت نمودار نشان داده شده است. در این شکل‌ها مشخص است که با افزایش طول مدت مقیاس زمانی، دوره‌هایی با مقادیر منفی و مثبت، از نظر تعداد یا فراوانی کاهش ولی از نظر تداوم یا طول مدت ترسالی یا خشک‌سالی افزایش می‌یابند. با توجه به نتایج

مورد خشک‌سالی‌های هیدرولوژیکی (آب‌های زیرزمینی و سطحی) ماه‌ها زمان نیاز است درحالی‌که برای بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت ۳ و ۶ ماهه (خشک‌سالی‌های کشاورزی و رطوبت خاک) بارش‌های روزانه می‌تواند شرایط را تعدیل نموده و به حالت نرمال برگشت نماید. شاخص SPI برای ایستگاه‌های بابلسر و گرگان با ۲۵ ماه متوالی خشک، بیشترین تداوم خشک‌سالی را طی دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱ را داشته‌اند. همچنین سنجه متوسط خشک‌سالی با بازه زمانی ۲۴ ماهه دوره دیده‌بانی نشان می‌دهد که ایستگاه‌های انزلی، گرگان و رشت به ترتیب با -۱.۷۹، -۱.۷۴ و -۱.۶۳ شدت خشک‌سالی بیشتری را نسبت به ایستگاه‌های بابلسر و رامسر تحمل کرده‌اند.

۱۹۷۴ (SPI=-۱/۷۵) مشاهده شده است. سنجه متوسط شدت خشک‌سالی ۳ ماهه دوره‌دیده بانی نشان می‌دهد که ایستگاه‌های گرگان، رشت و انزلی به ترتیب با -۱/۵۴، -۱/۳۹ و -۱/۳۶ شدت خشک‌سالی بیشتری را نسبت به ایستگاه‌های بابلسر و رامسر تحمل کرده‌اند. درحالی‌که دوره‌های زمانی طولانی‌تر (بازه‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه) واکنش کندتری نسبت به تغییرات بارش نشان می‌دهند. همچنین فراوانی وقوع دوره‌های خشک در مقیاس زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه نسبت به بازه‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه خیلی بیشتر هست. در نتیجه زمان برگشت به اوضاع نرمال هر یک از انواع خشک‌سالی‌ها (کشاورزی، هواشناسی و هیدرولوژی) متفاوت هست؛ بنابراین برای برگشت به وضعیت نرمال در



شکل ۳- مقایسه سری زمانی سنجه خشک‌سالی بارش استاندارد شده برای دو دوره پایه (۱۹۹۰ - ۱۹۶۱) در مقیاس‌های زمانی (A) ۳ ماهه، (B) ۶ ماهه، (C) ۹ ماهه، (D) ۱۲ ماهه، (E) ۲۴ ماهه

Fig. 3- Comparison of standardized rainfall drought index time series for two base periods (1961-1990) in time scales a) 3 months, b) 6 months, c) 9 months, d) 12 months, and e) 24 months

خشک (۴۱ ماه) داشته است، یعنی ۱۱/۴ درصد ماه‌های دوره دیده‌بانی با خشک‌سالی مواجه بوده است. از تعداد کل خشک‌سالی‌های رامسر ۵۹ درصد خشک‌سالی متوسط، ۳۲ درصد با خشک‌سالی شدید و ۱۰ درصد با خشک‌سالی‌های خیلی شدید گذرانده است. بابلسر و انزلی به ترتیب بیشترین و کمترین ماه با خشک‌سالی متوسط (۴۹٪ و ۷۸٪) را داشته‌اند. انزلی و رشت به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار خشک‌سالی شدید (۳۶٪ و ۱۶٪) و رشت و بابلسر به ترتیب بیشترین و کمترین تعداد ماه خشک با خشک‌سالی‌های خیلی شدید (۱۴٪ و ۲٪) را داشته‌اند.

جدول ۵- تعداد ماه‌های خشک ($SPI < 1$) مقیاس زمانی SPI ، ۱۲ ماهه دوره‌دیده بانی برای طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی در منطقه سواحل جنوبی دریای خزر

Table 5. Number of dry months ($SPI > 1$) SPI time scale, 12 months observation period to classify the severity of drought in the southern coastal region of the Caspian Sea

نام ایستگاه Station	خشک‌سالی متوسط Moderate drought		خشک‌سالی شدید Severe drought		خشک‌سالی خیلی شدید Very severe drought		تعداد کل Total number ماه‌های خشک Dry months
	تعداد Number	درصد Percent	تعداد Number	درصد Percent	تعداد Number	درصد Percent	
	انزلی Anzali	22	49	16	36	7	
رشت Rasht	44	70	10	16	9	14	63
رامسر Ramsar	24	59	13	32	4	10	41
بابلسر Babolsar	49	78	13	21	1	2	63
گرگان Gorgan	30	60	16	32	4	8	50

B2 نشان می‌دهد که تعداد ماه‌های خشک دوره‌های آینده در تمام ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد. بررسی وضعیت خشک‌سالی‌ها در آینده با استفاده از خروجی مدل و محاسبه سنجه SPI (دوازده‌ماهه) نشان می‌دهد که در تمامی ایستگاه‌ها خشک‌سالی‌های متوسط نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابند و میانگین شدت خشک‌سالی‌های شدید و خیلی شدید در دوره‌های آینده نیز افزایش می‌یابد. تنها در ایستگاه رشت تعداد ماه‌های خشک دهه ۲۰۲۰ با هر دو سناریوی نسبت به دوره دیده بانی کاهش می‌یابد. میزان وقوع خشک‌سالی‌های شدید و خیلی شدید در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه افزایش بیشتری

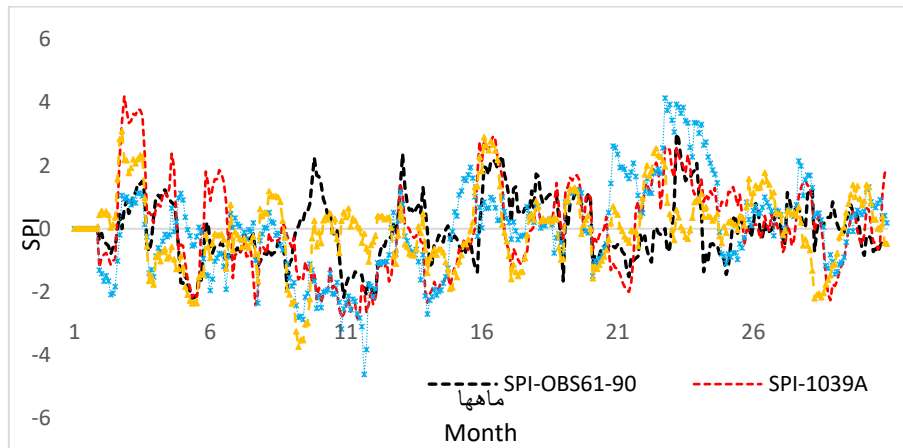
برای مطالعه و ارزیابی خشک‌سالی منطقه مورد مطالعه، تعداد ماه‌های خشک هر ایستگاه از لحاظ مقدار SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف به خشک‌سالی متوسط ($-1 < SPI < -1/49$)، خشک‌سالی شدید ($-1/5 < SPI < -1/99$)، خشک‌سالی خیلی شدید ($SPI < -2$) تقسیم می‌شوند.

جدول (۵) تعداد ماه‌های خشک ($SPI < 1$) مقیاس زمانی SPI ، ۱۲ ماهه دوره دیده‌بانی برای طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی در منطقه سواحل جنوبی دریای خزر را نشان می‌دهد. رشت و بابلسر بیشترین تعداد ماه‌های خشک ۶۳ ماه با $-1 < SPI$ داشته‌اند. رامسر کمترین تعداد ماه‌های

تأثیرهای تغییر اقلیم بر شدت خشک‌سالی دوره‌های آینده با استفاده از داده‌های بارندگی خروجی مدل SDSM در دوره‌های (۲۰۷۰-۲۰۹۹)، (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و (۲۰۳۹-۲۰۱۰) وضعیت خشک‌سالی ۵ ایستگاه سواحل جنوب دریای خزر مطالعه گردید. ارزیابی سنجه خشک‌سالی با مقیاس زمانی مختلف در دوره‌های آتی نشان می‌دهد که شدت خشک‌سالی نسبت به دوره دیده‌بانی افزایش می‌یابد. به این ترتیب در سال‌های آینده بیشتر شاهد تغییر و افزایش سنجه خشک‌سالی خواهیم بود (جدول ۶). جدول (۷) تعداد ماه‌های خشک با $SPI < -1$ برای ۵ ایستگاه سواحل جنوب دریای خزر با دو سناریوی A2 و

بانی و سه دوره‌ی آینده (۲۰۷۰-۲۰۹۹)، (۲۰۴۰-۲۰۶۹) و (۲۰۳۹-۲۰۱۰) نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌بینیم که شدت خشک‌سالی دوره‌های آینده نسبت به دوره دیده‌بانی افزایش یافته است. نتیجه به‌دست آمده در این تحقیق با نتایج تحقیقات همچون *et al.*, (2020) و *Salhi* و *Shahoei et al.*, (2020) هم‌خوانی دارد.

نسبت به خشک‌سالی‌های متوسط دارد. همچنین می‌توان سری زمانی SPI محاسبه شده را برای ایستگاه‌های بیان شده به تصویر کشید. این سری‌های زمانی نشان‌دهنده دوره‌های مرطوب، خشک و میزان تغییر شدت خشک‌سالی در دوره‌های آینده است. با توجه به شکل (۴) سری‌های زمانی SPI محاسبه شده ۱۲ ماهه در دوره‌دیده



شکل ۴- مقایسه سری زمانی سنجه بارش استاندارد شده با مقیاس زمانی SPI، ۱۲ ماهه ایستگاه انزلی برای

دوره دیده بانی و سه دوره آینده با سناریوی A2

Fig. 4- Comparison of standardized rainfall index time series with SPI me scale, 12-month Anzali station for observation period and future three periods with scenario A2

جدول ۶- تعداد ماه‌های خشک دوره دیده‌بانی و دوره‌های آینده با سناریوی A2 و B2

Table 6. Number of dry months of the monitoring period and future periods with scenarios A2 and B2

SPI-3 months	ایستگاه Station	1961-1990 OBS	2010-2039 A2	2010-2039 B2	2069- 240A2	2040- 2069B2	2070- 2099 A2	2070- 2099 B2
3 months	انزلی Anzali	48	51	54	62	51	48	50
	بابلسر Babolsar	59	49	63	67	57	60	62
	رامسر Ramsar	27	48	56	52	59	58	48
	رشت Rasht	58	65	62	57	58	65	70
	گرگان Gorgan	65	81	91	93	90	91	90
6 months	انزلی Anzali	72	67	75	66	63	66	65
	بابلسر Babolsar	66	60	73	68	66	57	63
	رامسر Ramsar	48	75	78	69	71	72	74
	رشت Rasht	66	77	83	54	79	72	68
	گرگان Gorgan	54	91	82	88	99	94	92

ادامه جدول ۶- تعداد ماه‌های خشک دوره دیده‌بانی و دوره‌های آینده با سناریوی A2 و B2
 Table 6. ont. Number of dry months of the monitoring period and future periods with scenarios A2 and B2

SPI- ۹ ماهه 9 months	ایستگاه Station	1961-1990 OBS	2010-2039 A2	2010-2039 B2	2069- 240A2	2040- 2069B2	2070- 2099 A2	2070- 2099 B2
	انزلی Anzali	63	72	81	73	75	67	69
	بابلسر Babolsar	59	70	83	79	95	78	76
	رامسر Ramsar	56	78	88	77	76	66	70
	رشت Rasht	63	83	87	65	90	85	72
	گرگان Gorgan	54	97	98	99	97	114	97
SPI- ۱۲ ماهه 12 months	ایستگاه Station	1961-1990 OBS	2010-2039 A2	2010-2039 B2	2069- 240A2	2040- 2069B2	2070- 2099 A2	2070- 2099 B2
	انزلی Anzali	46	94	92	90	67	61	90
	بابلسر Babolsar	65	92	72	90	110	80	106
	رامسر Ramsar	46	71	100	95	77	65	58
	رشت Rasht	64	86	80	67	76	86	80
	گرگان Gorgan	50	110	106	110	98	126	115
SPI- ۲۴ ماهه 24 months	ایستگاه Station	1961-1990 OBS	2010-2039 A2	2010-2039 B2	2069- 240A2	2040- 2069B2	2070- 2099 A2	2070- 2099 B2
	انزلی Anzali	59	91	120	82	73	69	83
	بابلسر Babolsar	61	82	45	101	102	87	93
	رامسر Ramsar	62	87	117	86	95	45	70
	رشت Rasht	55	102	94	61	71	65	80
	گرگان Gorgan	43	114	102	104	127	139	118

جدول ۷- تعداد ماه‌های خشک SPI، ۱۲ ماهه و طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی با دو سناریو برای دهه‌های آینده (A) (خشک‌سالی متوسط)، B (خشک‌سالی شدید)، C (خشک‌سالی خیلی شدید)، D (کل)

Table 7. Number of SPI dry months, 12 months and drought severity classification with two scenarios for the coming decades (A: Moderate drought; B: Severe drought; C: Very severe drought; D: Total)

	تعداد ماه‌های خشک Number of dry months	1961-1990		GA 2010-2039		GB2010-2039		GA 2040-2069		GB 2040-2069		GA 2070-2099		GB 2070-2099	
		Number	Percentage of changes	Number	Percentage of changes	Number	Percentage of changes	Number	Percentage of changes	Number	Percentage of changes	Number	Percentage of changes	Number	Percentage of changes
انزلی Azzali	A	22	30	36	41	86	30	36	17	23-	26	18	34		
	B	16	33	106	23	44	23	44	17	6	13	19-	18	13	
	C	7	27	286	26	271	34	386	32	357	20	186	37	429	
	D	7	27	286	26	271	34	386	32	357	20	186	37	429	
رشت Rasht	A	44	36	-18	32	-27	33	-25	44	0	35	-20	39	-11	
	B	10	17	70	13	30	10	0	12	20	22	120	19	90	
	C	9	31	244	31	244	1	-89	1	-89	25	178	19	111	
	D	63	84	33	76	21	44	-30	57	-10	82	30	77	22	
رامسر Ramsar	A	24	25	-17	28	17	37	54	21	-13	22	-8	12	-50	
	B	13	16	23	29	123	20	54	25	92	17	31	22	69	
	C	4	31	675	42	950	37	825	31	675	25	525	23	475	
	D	41	67	63	99	141	94	129	77	88	64	56	57	39	
بابلسر Babol-sar	A	49	40	-18	22	-55	34	-31	29	-41	38	-22	32	-35	
	B	13	13	0	11	-15	25	92	27	108	17	31	34	162	
	C	1	37	3600	39	3800	30	2900	51	5000	23	2200	37	3600	
	D	63	90	43	72	14	89	41	107	70	78	24	103	63	
گرگان Gorgan	A	20	23	15	28	40	37	85	37	85	50	150	33	65	
	B	12	24	100	24	100	24	100	32	167	35	192	29	142	
	C	10	66	560	48	380	40	300	54	440	50	400	55	450	
	D	42	113	169	100	138	101	140	123	193	135	221	117	179	

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به ارزیابی اثرهای تغییر اقلیم بر وضعیت خشک‌سالی سواحل جنوبی خزر در دوره‌های آتی با استفاده از سنجه بارش استاندارد SPI پرداخته شد. در این راستا بارش حاصل از مدل گردش عمومی جو HadCM3-A2 برای دوره‌های آتی (۲۰۹۹-۲۰۷۰، ۲۰۴۰-۲۰۶۹، ۲۰۱۰-۲۰۳۹) به روش آماری کوچک‌مقیاس گردیده و با در نظر گرفتن عدم قطعیت نوسانات اقلیمی منطقه به تولید ۲۰ سری زمانی بارش روزانه پرداخته شد. سپس سنجه SPI برای دوره‌ی دیده‌بانی و دوره‌های آتی محاسبه و ارزیابی گردید. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که تغییر اقلیم موجب افزایش فراوانی و افزایش شدت خشک‌سالی‌ها در منطقه مورد مطالعه خواهد شد و به‌این‌ترتیب که تعداد رخداد

در بین تمام بلایای طبیعی، خشک‌سالی گسترده‌ترین آن‌ها محسوب شده و از ویژگی‌های اصلی و تکرارشونده اقلیم‌های متفاوت به شمار می‌آید. خشک‌سالی یک پدیده حادی است که اثرهای آن در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی و منابع آب به‌طور کامل مشهود است. با در نظر گرفتن تغییر اقلیم هم‌زمان با خشک‌سالی اثرهای شدیدتری بسته به موقعیت و شرایط محیطی قابل‌درک است؛ بنابراین ضرورت ارزیابی اثرهای خشک‌سالی برای مدیریت منابع آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. سنجه‌های زیادی خشک‌سالی را تشخیص و کمی‌سازی می‌کنند. یکی از این سنجه‌ها که در مطالعات خشک‌سالی به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته، سنجه SPI هست.

کاهش منابع آب و تهدید اقتصاد کشاورزی منطقه، ضروری است. راهکارها و اقدام‌های لازم در این زمینه پیش‌بینی و اجرا گردد که از مهمترین آن‌ها می‌توان به مواردی چون انتخاب وارسته‌های جدید با نیاز آبی کمتر و افزایش بهره‌وری با استفاده از روش‌های نوین آبیاری اشاره کرد.

پی‌نوشت‌ها

¹ AOGCM

² National Center for Environmental Prediction

³ Standardized Precipitation Index

Abbasi, A., Khalili, K., Behmanesh, J. and Shirzad, A., 2020. Application of support vector machine and bayesian network in agricultural drought prediction. *Journal of Watershed Engineering and Management*. 12, 107-124. (In Persian with English abstract)

Babaiean, A., Najafi Nik, Z., Zabol Abasi, F., Habibi Novkhandan, M., Adab, H. and Malbosi, S.H., 2009. Evaluation of the country's climate change in the period 2039-2010 using the exponential microscale of the ECHO-G general circulation model data. *Geography and development Iranian Journal*. 16, 135-152. (In Persian with English abstract)

Babaiean, A. and Najafi Nik, Z., 2006. Introduction and evaluation of LARS-WG model for modeling meteorological parameters of Khorasan province statistical period (1961-2003). *Nivar*. 62, 49-65. (In Persian with English abstract)

Booij, M.J., 2005. Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *Journal of Hydrology*. 303, 176-198.

Chamaille-Jammes, S., Frits, H. and Murindagomo, F., 2006. Detecting climate change of concern in highly variable environments: Duantile regressions reveal that drought worsen in Hwange National Park, Zimbabwe. *Journal of Arid*

خشک‌سالی‌های متوسط دهه‌های آینده نسبت به دوره دیده‌بانی کاهش یافته درحالی‌که فراوانی خشک‌سالی‌های شدید و خیلی شدید افزایش قابل‌توجهی را نشان می‌دهد این نتایج با بسیاری از تحقیق‌های انجام گرفته در منطقه-های مختلف جهان هم‌جهت است (Leander and Bouishand, 2006; McKee *et al.*, 1993; Silva and Takahashi, 2007). بنابراین با توجه به وقوع پدیده تغییر اقلیم و اثرهای اجتناب‌ناپذیر آن بر تشدید خشک‌سالی‌ها،

منابع

Enviornment. 71, 321-326.

Dubrovský, M., Hayes, M., Duce, P., Trnka, M., Svoboda, M. and Zara, P., 2014. Multi-GCM projections of future drought and climate variability indicators for the Mediterranean region. *Regional Environmental Change*. 14, 1907-1919. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0562-z>.

Fowler, H.J. and Kilsby, C.G., 2007. Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Climate Change*. 80, 337-367.

Fowler, H.J. and Kilsby, C.G., 2007. Using regional climate model data to simulate historical and future river flows in northwest England. *Climate Change*. 80, 337-367.

Gohari, A., Eslamian, S., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, A., Wang, D. and Madani, K., 2013. Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment*. 1, 405-419.

Golmohamadi, M. and Masah Bovani, A., 2011. Investigation of changes in the severity and return period of droughts in Qarasu Basin in future periods affected by climate change. *Journal of Water and Soil*. 25, 315-326. (In Persian with English abstract)

- Helmi, M., Bakhteari, B. and Ghaderi, K., 2020. Meteorological drought modeling and forecasting using SARIMA time series model in different climatic samples of Iran. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 14, 1079-1090. (In Persian with English abstract)
- Hisdal, H., Stahl, K., Tallaksen, L.M. and Demuth, S., 2001. Have stream flow droughts in Europe more severe of frequent. *International Journal of Climatology*. 21, 317-333.
- Khorsandi, N., Mahdean, M.H., Pazira, E. and Nikkami, D., 2011. Determining the appropriate index of rain erosion in two semi-arid and very humid climates, Caspian watershed. *Quarterly Journal of Agricultural Science and Technology and Natural Resources. Soil and Water Sciences*. 15, 117-125. (In Persian)
- Kothavala, Z., 1999. The duration and severity of drought over eastern Australia simulated by a coupled ocean atmosphere GCM with a transient increase in CO₂. *Environmental Modelling and Software*. 14, 243-252.
- Labeledzki, L., 2006. Estimation of Local Drought Frequency in Central Poland using the Standardized Precipitation Index SPI. *Irrigation and Drainage*. 56, 67-77.
- Leander, R. and Bouishand, T.A., 2006. Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of hydrology*. 332, 487-496.
- Loukas, A., Vasiliades, L. and Tzabiras, J., 2008. Climate change effects on drought severity. *Advances in Geosciences*. 17, 23-29.
- Mavromatis, T., 2007. Drought index evaluation for assessing future wheat production in Greece. *International Journal of Climatology*. 27, 911-924.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kliest, J., 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. In *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology*, 17th-22th January, Anaheim, CA. American Meteorological Society. Boston, MA. pp.179-184.
- Robera, N., Hardenberg, J.V. and Provenzale, A., 2005. Rainfall downscaling and flood forecasting: a case study in the Mediterranean area. *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*. 6, 611-619.
- Salehi Tabas, M., Yaghobzadeh, M., Zamani, G.H. and Amir Abadi Zadeh, M., 2020. The effect of climate change on the severity and frequency of drought in South Khorasan. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 14, 482-497. (In Persian with English abstract)
- Shahoei, S.V., Fahiminezhad, E. and Fatehi, Z., 2020. Impact of global climate change on climate data in RavansarSanjabji Basin, Kermanshah Province. *Environmental and Water Engineering*. 6, 45-57. (In Persian with English abstract)
- Silva, Y., Takahashi, K., 2007. Chavez RDry and wet seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Advances in Geosciences*. 14, 261-264.
- Wilby, R.L., Conway, D. and Jones, P.D., 2002. Prospects for downscaling seasonal precipitation variability using conditioned weather generator parameters. *Hydrological processes*. 16, 1215-1234.





Environmental Sciences Vol.20 / No.2 / Summer 2022

99-116

Original Article

Predicting drought impact on the Caspian Sea coast affected by climate change

Mahdi Boroughani,^{1*} Elham Fahiminejad² and Iman Pazhouhan³

¹Research Center for Geoscience and Social Studies, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

²Department of Hydrometeorology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

³Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resource and Environment, Malayer University, Malayer, Iran

Received: 2021.04.15 Accepted: 2022.02.26

Boroughani, M., Fahiminejad, E. and Pazhouhan, I., 2022. Predicting drought impact on the Caspian Sea coast affected by climate change. *Environmental Sciences*. 20(2): 99-116.

Introduction: The phenomenon of climate change can have different effects on different systems. Due to the vital role of water in human life, the study of its negative effects on the occurrence, severity and duration of drought is of particular importance. In this study, the effects of climate change on droughts on the southern shores of the Caspian Sea in future periods will be evaluated.

Material and methods: The region under study covers three northern provinces in Iran i.e., Gilan, Mazandaran, and Golestan and covers four percent in terms of area and 12 percent in terms of population of the whole country. In this study, the effects of climate change on droughts on the southern shores of the Caspian Sea in future periods was evaluated. For this purpose, precipitation data from the HadCM3-A2 general circulation model for future periods (2099-2070, 2069-2040, 2039-2010) have been scaled statistically, while considering the uncertainty of climate fluctuations in the 20 series. At first, daily precipitation was produced. Then the standardized precipitation index was calculated for the monitoring period and future periods. Finally, the downscaled variables of the region were compared with the observed variables and after ensuring the ability of the HadCM3 model in downscaling temperature and precipitation variables of the region, observed daily time series of precipitation and temperature and large-scale variables from HadCM3 model in the periods of 2010-2039, 2040-2069, and 2070-2099) were fed to the SDSM model.

* Corresponding Author: *Email Address*. m.boroughani@hsu.ac.ir
<http://dx.doi.org/10.52547/envs.2022.1038>
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.17351324.1401.20.2.12.3>

Results and discussion: The results obtained from the output of this index in the monitoring period and future periods with different time scales show that the intensity of drought in the coming decades will increase compared to the monitoring period. This increase is more severe for the east of the Caspian Sea, so that the intensity of the drought in the 2080s will be three times more than the observation period. The results indicated that the climate change results in an increase in the frequency and severity of drought in the studied region. Findings of the present research indicate that in spite of the existence of variability in the SPI lower than 9 months, it has increased 25 and 23.5% in longer periods of 1 to 2 year periods in comparison with the historical period. The incompatibility of drought simulated in the future with observation period in Gorgan station with four remaining stations of the southern regions of the Caspian Sea should be noted. This situation may be due to differences in the resources of precipitation in the eastern and western coasts of the Caspian Sea and different response of two regions against the global warming. Previous studies indicated that the Caspian Sea west coasts are more affected by the northerly flows of Siberian high pressure system than its east coasts, and in case of the establishment of the high pressure over Caspian Sea, precipitations in the west of the Caspian Sea will be higher than its eastern region. The phenomenon of global warming has resulted in weakening of the Siberian high pressure system in general. Therefore, degree of the reduction in precipitations in central and western regions of the Caspian Sea will be relatively higher than in its eastern regions such as Gorgan station.

Conclusion: Occurrence of successive droughts and increasing drought intensity in the coming decades of the southern Caspian coastal areas will reduce water resources and the region-based economy will face a more severe crisis, in which case water resources management and development of strategic irrigation document and cultivation pattern a region compatible with socio-economic and climatic trends seems absolutely necessary.

Keyword: Climate change, SPI, Statistical exponential microscale, Caspian Sea coast.