

## تحلیل و بررسی مخاطرات جوی آتی مناطق شهری جنوب شرق ایران

نعمت‌الله صفرزایی<sup>۱\*</sup>، علیرضا انتظاری<sup>۲</sup>، بهزاد صاحب‌زاده<sup>۳</sup>

۱. دکتری اقلیم‌شناسی شهری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

۲. دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.

۳. عضو هیات علمی دانشگاه زابل، زابل، ایران.

DOI:10.22034/mpsh.2023.379557.1030

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹

### چکیده

امروزه تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای موجب افزایش رخدادهای حدی و مخاطرات جوی شده است. هدف از این پژوهش، تحلیل و بررسی آینده اقلیم بر مخاطرات جوی محدوده جنوب شرق ایران است. در این مطالعه جهت شبیه‌سازی داده‌های کمینه و بیشینه دما از داده‌های مدل CanESM2 تحت سه سناریوی (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) با ریزگردانی آماری SDSM و جهت شبیه‌سازی داده‌های بارش از مدل Hadcm3 تحت سناریوهای (A1B, A2, B1) با ریزگردانی آماری LARS-WG استفاده شده است. بدین منظور، پس از انجام واسنجی، صحت‌سنجی و مدل‌سازی داده‌ها در ایستگاه‌های منتخب، کارایی مدل از نظر میزان انطباق داده‌های پایه دما (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و بارش (۱۹۸۶-۲۰۱۵) با مقادیر شبیه‌سازی (۲۰۲۲-۲۰۴۱) در سطح اطمینان معنی‌داری مورد ارزیابی قرار گرفتند. جهت انطباق داده‌های پایه با داده‌های شبیه‌سازی شده از سه معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R2) و میانگین مربعات خطا (MSE) استفاده شده است. با توجه به داده‌های شبیه‌سازی شده چهار مخاطره مهم جوی خشکسالی، بارش‌های حدی، یخبندان و امواج گرمایی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بیشترین رخداد پدیده خشکسالی در مرکز استان و در محدوده شهرستان‌های خاش، ایرانشهر و زاهدان اتفاق خواهد افتاد. بالاترین بارش‌های حدی در محدوده شهرستان ایرانشهر و سراوان مشاهده می‌گردد و شهرستان‌های زاهدان و خاش بارش‌های شدید و حدی بسیار کمی را تجربه خواهند کرد. بیشترین یخبندان سالانه در شهرستان خاش، زاهدان و پیرامون آن مشاهده می‌گردد. شدیدترین امواج گرمایی سالانه در شهرستان زابل و پیرامون آن رخ خواهد داد و به تدریج در مناطق جنوبی‌تر از شدت آن کاسته می‌شود.

**واژگان کلیدی:** تغییر اقلیم، مخاطرات جوی، مدل CanESM2، مدل Hadcm3، جنوب شرق ایران.

nematsafarzaee@yahoo.com

\*نویسنده مسئول: نعمت‌الله صفرزایی

### مقدمه

در دهه‌های اخیر افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی وقایع حدی آب و هوایی را متأثر ساخته و باعث تغییراتی در آب‌وهوای زمین گردیده است. تغییر اقلیم موجب تغییر دما، تغییر در الگوی زمانی بارش و میزان بارندگی می‌شود. عواقب این تغییرات در درازمدت موجب تغییر مقدار آب و افزایش رخدادهای حدی می‌گردد. مخاطرات جوی که خود از زیرمجموعه مخاطرات طبیعی محسوب می‌گردند با منشأ جو عمل می‌کنند. هدف از انجام پژوهش، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر مخاطرات جوی محدوده جنوب شرق ایران می‌باشد تا با شناخت آن‌ها و برنامه‌ریزی‌های مناسب از خسارات آن‌ها جلوگیری به عمل آید. رخدادهای حدی زمانی مخاطره تلقی می‌گردند که سطح حداقلی از ضرر و زیان را بر جوامع انسانی و دارایی‌ها و اموالشان تحمیل نمایند (اسمیت، ۱۹۹۷: ۳۰۴). با توجه به تنوع بسیار زیاد مخاطرات جوی و حجم بسیار زیاد تحقیقات

انجام شده در این زمینه در ادامه تنها به برخی از پژوهش‌ها اشاره خواهد شد. وستال<sup>۱</sup> (۱۹۷۱: ۶۵۰) زمان وقوع اولین و آخرین یخبندان‌ها را برای دوره سرد سال در ایالات متحده آمریکا گزارش نمود. هنریکوزو<sup>۲</sup> (۱۹۹۸: ۱۹) در پرتغال به منظور تحلیل خشکسالی‌ها یک مدل توزیع منطقه‌ای به کار گرفت و نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی و منحنی‌های شدت، مساحت و فراوانی خشکسالی را ترسیم کرد. دلازیوس<sup>۳</sup> و همکارانش (۲۰۰۰: ۷۵۱) بر اساس تحلیل منحنی‌های شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی نقشه‌های هم‌شدت خشکسالی را برای یونان ترسیم نمودند و به این نتیجه دست یافتند که نواحی شمالی یونان نسبت به نواحی جنوبی آن از خشکسالی‌های شدیدتری برخوردار است. مدلین<sup>۴</sup> و بلتراندو (۲۰۰۵) پراکنندگی مکانی یخبندان‌های دیررس بهاره و عوامل تأثیرگذار بر روی آن را در ناحیه تاکداری شمال فرانسه مورد مطالعه قرار دادند. های هوی<sup>۵</sup> (۲۰۱۰: ۶۲) در پژوهشی، مرگ‌ومیر ناشی از امواج گرمایی را در شیکاگو مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که اگر موج گرمایی مشابه موج گرمایی ۲۰۰۳ اروپا در سال‌های آینده در شیکاگو رخ دهد فقط در چند هفته میزان مرگ‌ومیر ناشی از گرما به بیش از ده برابر می‌رسد. آیم<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۱۱: ۷۲) به بررسی ساختار فضایی و زمانی روندهای حال و آینده شاخص‌های حدی اقلیمی در کشور کره جنوبی طی دوره ۱۹۷۱ تا ۲۱۰۰ پرداختند و نتیجه گرفتند که شاخص‌ها بر اساس دمای حداقل تغییر قابل ملاحظه‌ای به سمت گرم شدن دارند در حالی که شاخص‌ها بر اساس دمای حداکثر روند قابل توجهی را نشان نمی‌دهند. سنگام شریستا<sup>۷</sup> و همکارانش (۲۰۱۷: ۲۸۵) در تحقیقی با عنوان تشخیص خطر سیل تحت سناریوهای تغییر اقلیم در حوزه رودخانه یانگ تایلند به این نتیجه دست یافتند که با تدوین برنامه‌های مؤثر برای جلوگیری از اثرات منفی سیل‌ها می‌توان فعالیت‌های گسترده و استفاده بهینه‌ای از زمین‌های متنوع در حوزه رودخانه یانگ در تایلند داشت. پابلو جارامیل<sup>۸</sup> و همکارانش (۲۰۱۷: ۹۱۷) طی مطالعاتی در محدوده مقیاس کوچکی از شهرهای کانادا به این نتیجه رسیدند که تغییر اقلیم و به تبع آن آلودگی و ریزش‌های نابهنگام جوی باعث کاهش امنیت آب‌های شهری شده است. در ایران نیز مطالعاتی در این زمینه صورت گرفته از جمله سلطانی و سعادت (۱۳۸۶: ۶۴) به پهنه‌بندی خشکسالی در استان اصفهان با استفاده از شاخص SPI<sup>۹</sup> پرداخت و به این نتیجه دست یافتند که به‌طور عمده خشکسالی‌های متوسط و شدید در محدوده ایستگاه داران و فریدون‌شهر واقع در غرب استان اصفهان به وقوع می‌پیوندد. گل محمدی و مساح (۱۳۹۰: ۳۱۵) با شبیه‌سازی بارش با مدل HadCM3<sup>۱۰</sup> تحت سناریوی A2 در دوره ۲۰۴۰-۲۰۶۹ میلادی برای حوزه آبریز قرسو، وضعیت خشکسالی این حوزه را در این دوره برای دوره بازگشت‌های مختلف مشخص کردند و نتیجه گرفتند که طی این دوره شاهد افزایش بارش و به تبع آن کاهش شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه خواهد بود. بابائیان و کوهی (۱۳۹۱: ۹۵۳) با ارزیابی شاخص‌های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در ایستگاه‌های منتخب خراسان رضوی نشان دادند که در دوره‌های ۲۰۳۹-۲۰۶۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ طول دوره رشد در دو ایستگاه مشهد و سبزوار افزایش و در تربت حیدریه کاهش می‌یابد. اسماعیل نژاد و همکاران (۱۳۹۲: ۳۱) با شناسایی امواج گرمایی به این نتیجه رسیدند که موج‌های گرمایی کوتاه‌مدت رخداد بیشتری داشته‌اند. همچنین امواج گرمایی در دوره آماری روند افزایشی داشته و در سال‌های اخیر پررخدادتر بوده‌اند. بخش‌های کوهستانی شمال خراسان از جهت فراوانی وقوع رخداد‌های مخاطرات جوی جزء پرمخاطره‌ترین مناطق محسوب می‌گردند در حالی که بخش‌های غربی و جنوبی خراسان از کمترین میزان خطرپذیری برخوردارند (مفیدی، ۱۳۹۲: ۱۴). کوزه‌گران و موسوی بایگی (۱۳۹۴: ۷۵۰) با

1-Vestal

2- Henriques

3- Delazios

4-Madelin

5- Hayhoe

6- IM

7- Sangamonshrestha

8- PabloJaramill

1-Standardized Precipitation Index

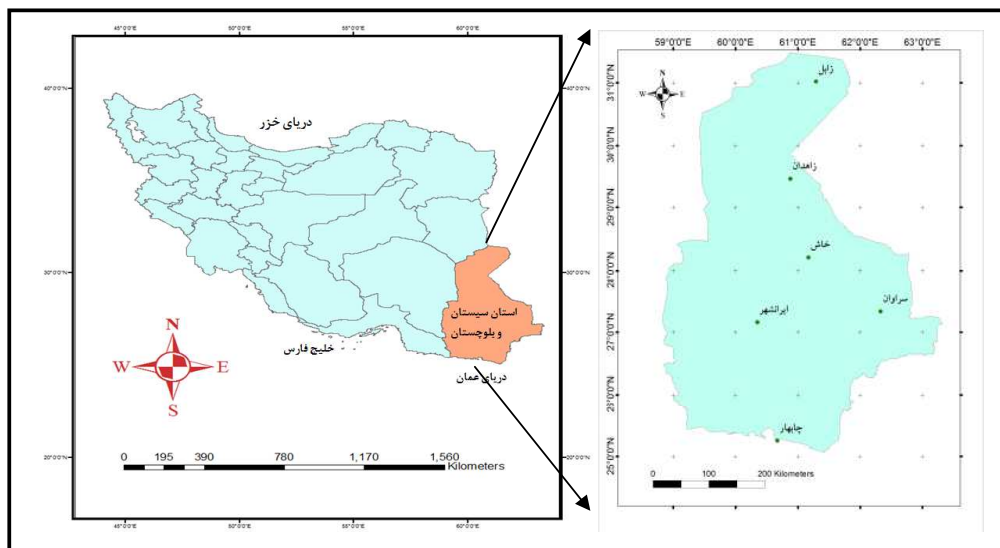
2-Hadley Center Model, version 3

بررسی روند رویدادهای حدی اقلیمی در شمال شرق ایران به این نتیجه دست یافتند که شاخص‌های حدی گرم روند افزایشی دارند و شاخص‌های حدی سرد روند کاهشی دارند. افزایش دما در چند سده اخیر به گونه‌ای است که به ازای هر صدسال دمای جهان حدود نیم درجه سانتی‌گراد و دمای ایران دو درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد (مسعودیان، ۱۳۹۲: ۹۵). مولودی و همکاران (۱۳۹۵: ۱) با بررسی اثر تغییر اقلیم بر امواج گرمایی سواحل شمالی خلیج فارس نشان داد که امواج گرمایی کوتاه‌مدت رخداد بیشتری دارند و امواج گرمایی در دوره پایه دارای روند افزایشی معنی‌دار بوده‌اند به طوری که فراوانی آن‌ها در سال‌های اخیر بیشتر شده است. باعقیده و همکاران (۱۳۹۵: ۱۳) در تحقیقی با عنوان ارزیابی مخاطرات دمایی منطقه جنوب شرق ایران نشان دادند که بالاترین رخداد مخاطره امواج گرمایی شدید در شمال استان سیستان و بلوچستان در منطقه زابل و زهک رخ داده است. بنابراین با توجه به این که منطقه جنوب شرقی ایران هر ساله خسارات هنگفت مالی را در نتیجه وقوع انواع مخاطرات جوی متحمل می‌شود لذا شناخت دقیق مخاطرات جوی این منطقه می‌تواند اطلاعات مناسب و با ارزشی را در جهت پیشگیری و یا کنترل این بلایا و برنامه‌ریزی‌های آبی و کاهش خسارات آن‌ها مورد شناسایی قرار دهد.

### روش تحقیق

#### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی (استان سیستان و بلوچستان) با مساحت ۱۸۱۷۸۵ کیلومتر مربع در جنوب شرقی ایران و در مختصات جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۸ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۱۹ دقیقه طول شرقی واقع شده است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (منبع، نگارندگان)

### داده‌های تحقیق

در مطالعه حاضر از داده‌های روزانه کمینه و بیشینه دما و بارش ایستگاه هواشناسی زابل، زاهدان، خاش، ایرانشهر، سراوان و چابهار استفاده شده است (جدول ۱). آمار لازم برای دوره آماری (۱۳۹۴-۱۳۶۱) از اداره کل هواشناسی استان سیستان و بلوچستان تهیه و تنظیم گردید.

جدول ۱. موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی (منبع، نگارندگان)

ردیف	متغیر ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
۱	زابل	۶۱/۲۹	۳۱/۰۲	۴۸۹
۲	زاهدان	۶۰/۸۸	۲۹/۴۵	۱۳۸۲
۳	خاش	۶۱/۱۷	۲۸/۲۱	۱۴۳۳
۴	سراوان	۶۲/۳۳	۲۷/۳۳	۱۱۹۰
۵	ایرانشهر	۶۰/۳۵	۲۷/۱۶	۵۴۲
۶	چابهار	۶۰/۶۵	۲۵/۲۳	۸

## روش انجام تحقیق

معتبرترین ابزار برای بررسی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر سامانه‌های گوناگون، استفاده از متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده با مدل‌های گردش عمومی جفت شده جوی-اقیانوسی است. این مدل‌ها قادرند پارامترهای جوی و اقیانوسی را برای یک دوره بلندمدت با استفاده از سناریوهای تأیید شده IPCC<sup>۱</sup> مدل‌سازی کنند (بابائیان و همکاران، ۱۳۸۸: ۱۳۷). برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس ریزمقیاس نمایی مدل‌های مختلف آماری و دینامیکی ابداع شده‌اند که قادرند خروجی مدل‌های عددی را تا حد مقیاس ایستگاه مدل کنند. مدل SDSM<sup>۲</sup> یک مدل رگرسیونی چند متغیره برای تولید داده‌های آب و هوایی به وسیله تکنیک‌های ریزمقیاس آماری است. به منظور ریزمقیاس نمایی داده‌های دمای کمینه و بیشینه از نرم‌افزار SDSM و از نسخه ۵/۲ استفاده شده است. این نرم‌افزار روابط آماری را بر مبنای روش رگرسیون خطی چندگانه بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس (پیش‌بینی کننده‌ها) و محلی (پیش‌بینی شونده‌ها) محاسبه می‌کند (ویلیبی<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۹: ۶۷). برای ریزمقیاس نمایی داده‌های دمای کمینه و دمای بیشینه از مدل گردش عمومی CanESM2<sup>۴</sup> در فاز CMIP5<sup>۵</sup>، فراسنج‌های بزرگ مقیاس باز تحلیل از مرکز پیش‌بینی‌های محیطی محلی آمریکا NCEP<sup>۶</sup> در دوره ۲۰۰۵-۱۹۶۱ و داده‌های دیدبانی دمای حداقل و حداکثر روزانه ایستگاه‌های هواشناسی استان سیستان و بلوچستان (۲۰۰۵-۱۹۷۶) استفاده شده است. بررسی شرایط اقلیمی آینده تحت سه سناریوی RCP2.6, RCP8.5, RCP4.5) برای دوره ۲۰۴۱-۲۰۲۲، شبیه‌سازی گردید. سناریوهای RCP نشان‌دهنده محرکه‌های تابشی هستند و در میان آن‌ها سناریوی RCP2.6، سناریوهای انتشار و محرکه‌های تابشی کم تقریباً با سناریوی B1 یا B2 مطابقت دارد، سناریوی RCP8.5 محرکه‌های تابشی با سناریوهای انتشار زیاد (تقریباً با سناریوهای A1 یا A2) و سناریوی RCP4.5 حالت متوسط دارند (مرنگو<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). واسنجی و صحت‌سنجی مدل به ترتیب طی دوره‌های ۱۹۹۵-۱۹۷۶ و ۲۰۰۵-۱۹۹۶ مبتنی بر داده‌های کوچک مقیاس شده حاصل از پیش‌بینی‌های مشاهداتی صورت گرفت. همچنین جهت ریزمقیاس نمایی داده‌های بارش از نرم‌افزار LARS-WG<sup>۸</sup> و مدل Hadcm3 تحت سناریوهای A1B, A2, B1 طی بازه زمانی ۲۰۴۱-۲۰۲۲ استفاده شده است. تولید داده توسط مدل طی سه مرحله واسنجی، ارزیابی و شبیه‌سازی یا تولید داده‌های هواشناسی دهه‌های آینده صورت گرفت. LARS-WG یکی از معروف‌ترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است که برای تولید مقادیر بارش، تابش،

- 1- Inter-Governmental Panel on Climate Change
- 2- Statistical Downscaling model
- 3- Wilby
- 4- Canadian Earth System Model
- 5- Coupled Model Intercomparison Project 5
- 6- National Center for Environmental Prediction
- 7- Representative Concentration Pathways
- 8- Marengo
- 9- Long Ashton Research Station Weather Generator

درجه حرارت در یک ایستگاه برای اقلیم حاضر و آینده به کار می رود (سمونوف<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۲: ۱۷۷). استفاده از مدل لارس در این پژوهش به علت عملکرد مطلوب آن برای شبیه سازی داده های بارش در مقایسه با مدل های دیگر است. در مدل لارس شدت کاهش و افزایش بارش نسبت به دوره پایه، کمتر می باشد. برای داده های دوره پایه از داده های دیدبانی بارش روزانه ایستگاه های هواشناسی استان سیستان و بلوچستان (۲۰۱۵-۱۹۸۶) استفاده شده است. سناریوی A1B دارای ویژگی های رشد اقتصادی، بیشینه رشد جمعیت در نیم قرن و پس از آن روند کاهشی، رشد سریع فن آوری های نوین، سناریوی A2 دارای رشد سریع جمعیت جهان، اقتصاد ناهمگن و همسو با شرایط منطقه ای در سراسر جهان و سناریوی B1 دارای مشخصات همگرایی جمعیت در سطح جهان می باشد (اشرف و همکاران، ۱۳۹۰: ۹۴۹). با توجه به داده های شبیه سازی چهار مخاطره مهم جوی در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۲).

جدول (۲). روش های محاسبه یا حدود تشخیص انواع مخاطرات جوی (مفیدی، ۱۳۹۲: ۹).

مخاطرات جوی	روش کار
خشکسالی	جهت محاسبه خشکسالی از شاخص SPI استفاده شد. با استفاده از داده های بارش ماهانه طبق رابطه (۱) میزان آن محاسبه می گردد. در این رابطه مقادیر 2 و بالاتر به عنوان ترسالی بسیار شدید و مقادیر ۲- و کمتر به عنوان خشکسالی بسیار شدید در نظر گرفته شده است. در این پژوهش از SPI سالانه و ۶ ماهه استفاده می شود. رابطه (۱) $q! = \sigma \cdot \frac{X_{ijk} - \bar{x}}{\sigma}$ انحراف از معیار داده های i امین ایستگاه، $X_{ijk}$ = مقادیر بارندگی برای i امین ایستگاه و k امین مشاهده، $\bar{x}$ = متوسط بارندگی ایستگاه i ام.
بارش های شدید و حدی	بارش شدید و حدی بر اساس روش آستانه درصدی و با استفاده از داده های بارش روزانه استخراج می شوند. در این روش برای هر یک از ایستگاه های منطقه مورد مطالعه مقادیر آستانه بارش شدید و حدی بر اساس ۵/۰ و ۱۰ درصد از مقادیر متوسط سالانه آن ایستگاه تعیین می گردد.
یخبندان	از داده های حداقل دمای روزانه ماه های اکتبر تا می استفاده می شود و دمای صفر درجه و کمتر در نظر گرفته شده است.
امواج گرمایی	از داده های حداکثر دمای روزانه برای ایستگاه منطقه مورد مطالعه استفاده می شود بر اساس تعریف سازمان هواشناسی جهانی، در صورتی که برای ۵ روز متوالی دمای حداکثر در یک ایستگاه، ۵ درجه سانتی گراد بالاتر از میزان درازمدت دمای حداکثر آن ماه بود به عنوان یک موج گرمایی لحاظ گردید (گلیکمن، ۲۰۰۰؛ فریچو همکاران ۲۰۰۲: ۷). برای این بخش از تحقیق، داده های دوره گرم سال (آوریل تا اکتبر) مورد استفاده قرار گرفته است.

### معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

پیش بینی شاخص های عملکردی مختلفی جهت ارزیابی و تحلیل عملکرد مدل وجود دارد که در این پژوهش، معیارهای مجذور مربعات میانگین خطا<sup>۲</sup> (RMSE)، میانگین مربعات خطا<sup>۳</sup> (MAE) و ضریب تعیین<sup>۴</sup> ( $R^2$ ) به کار گرفته شده است.

۱- مجذور مربعات میانگین خطا: نشان دهنده میزان خطای مدل می باشد که بهترین مقدار آن ها برابر صفر می باشد و از طریق رابطه زیر محاسبه می شوند.

رابطه (۱)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n}{n}}$$

در روابط فوق  $A_t$  متغیر مشاهداتی،  $F_t$  مقادیر شبیه سازی شده و  $n$  تعداد داده ها می باشد.

۲- ضریب تعیین: بهترین مقدار آن برابر یک می باشد. رابطه (۲) نحوه محاسبه آن را نشان می دهد.

رابطه (۲)

10- Semenov

1- Root Mean Square Error

2- Mean Absolute Error

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{O}_i)]^2}{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2 + \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

در روابط فوق  $O_i$  داده‌های شبیه‌سازی شده،  $\bar{O}$  متوسط داده‌های شبیه‌سازی شده،  $S_i$  داده‌های مشاهده‌ای،  $\bar{S}$  متوسط داده‌های مشاهده‌ای و  $n$  برابر تعداد داده‌ها می‌باشد.

۳- میانگین مربعات خطا: جهت محاسبه آن از رابطه (۳) استفاده می‌شود که می‌تواند از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت تغییر کند.

رابطه (۳)

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n [(A_t - F_t)]^2}{n}$$

در روابط فوق  $A_t$  متغیر مشاهده‌ای،  $F_t$  مقادیر شبیه‌سازی شده و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

در این مطالعه به منظور ارزیابی کارایی و دقت عملکرد مدل‌های CanESM2 و Hadcm3 در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی مقادیر حاصل از خروجی مدل‌ها در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۷۶، ۲۰۱۵-۱۹۸۶) با مقادیر مشاهده‌ای متناظر با استفاده از سه شاخص آماری مجذور مربعات میانگین خطا (RMSE)، میانگین مربعات خطا (MAE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول ۳). نتایج حاصل از شاخص آماری مجذور مربعات میانگین خطا (RMSE) نشان‌دهنده دقت نسبتاً بالای مدل در شبیه‌سازی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش می‌باشد. همچنین شاخص مذکور مبین این واقعیت است که مدل، داده‌های کمینه و بیشینه دما را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کرده است. نتایج حاصل از شاخص میانگین مربعات خطا (MAE) نیز نشان داد که مدل استفاده‌شده در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی کارایی مناسبی دارد. همچنین مقادیر حاصل از ضریب تعیین ( $R^2$ ) نیز بیانگر همبستگی مناسبی بین مقادیر اقلیمی (به‌ویژه داده‌های دما) مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده توسط مدل می‌باشند (جدول ۳). ترسیم نقشه‌ها از نرم‌افزار Gis و با استفاده از میانبایی به روش کریجینگ انجام گرفته است.

جدول (۳). ارزیابی عملکرد مدل با استفاده از آماره‌های واسنجی (SDSM- LARS.WG)

ایستگاه هواشناسی	متغیر	MSE	RMSE	$R^2$
زابل	دمای کمینه	۱۷/۹۹	۳/۲	۰/۸۸
	دمای بیشینه	۱۸/۶	۳/۶	۰/۸۵
	بارش	۲۲/۴	۴/۳	۰/۷۳
زاهدان	دمای کمینه	۲۳/۴	۴/۲	۰/۷۸
	دمای بیشینه	۲۰	۳/۳	۰/۸۴
	بارش	۳/۱	۲/۴	۰/۷۲
خاش	دمای کمینه	۱۹/۹	۴/۴	۰/۸۶
	دمای بیشینه	۱۸/۹	۴/۲	۰/۸۷
	بارش	۱۶/۲	۳/۷	۰/۷۱
سراوان	دمای کمینه	۲۵/۸	۵/۳	۰/۷۹
	دمای بیشینه	۲۴/۹	۴/۹	۰/۸۸
	بارش	۱۴/۴	۳/۸	۰/۷۳
ایران شهر	دمای کمینه	۱۷/۳	۴/۲	۰/۸۵
	دمای بیشینه	۳۲/۱	۴/۶	۰/۸۴
	بارش	۱۱/۴	۵/۴	۰/۷۶
چابهار	دمای کمینه	۹/۴	۳	۰/۷۸
	دمای بیشینه	۱۰/۶	۳/۲	۰/۷۸
	بارش	۲۰/۴	۴/۵	۰/۶۷

## مخاطرات جوی

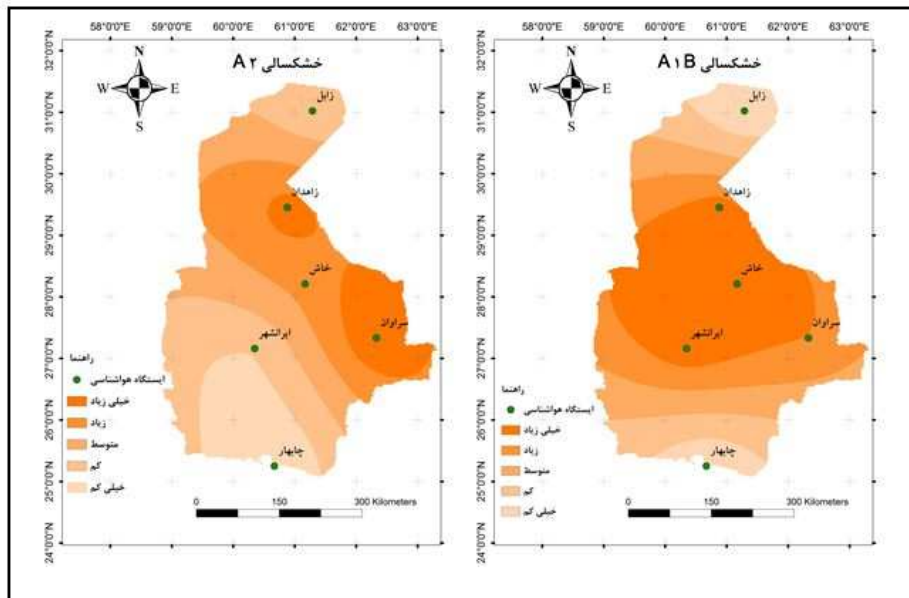
### خشکسالی

جهت محاسبه خشکسالی از شاخص SPI استفاده شده است که با استفاده از داده‌های بارش ماهانه طبق رابطه (۱) میزان آن محاسبه گردیده است. در این رابطه مقادیر 2 و بالاتر به عنوان ترسالی بسیار شدید و مقادیر ۲- و کمتر به عنوان خشکسالی بسیار شدید در نظر گرفته شده است (جدول ۴).

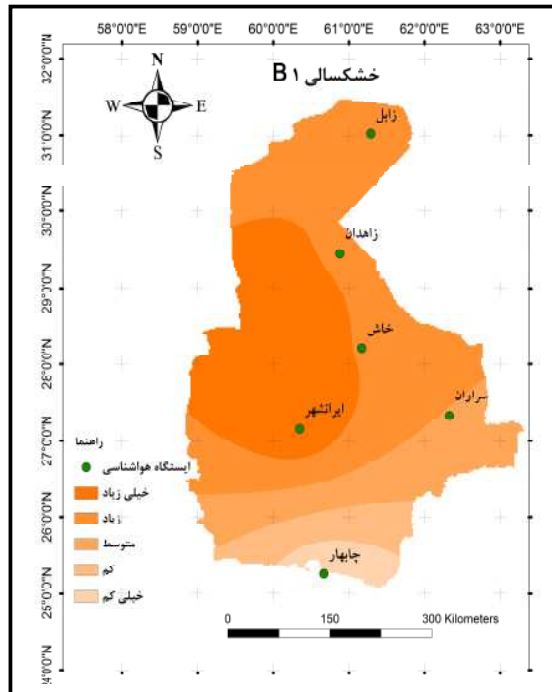
جدول (۴). طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPI (ورگنی و تودیسکو، ۲۰۱۱: ۳۰۵).

SPI	طبقه خشکسالی
$\geq 2$	ترسالی بسیار شدید
۱/۵ - ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱ - ۱/۴۹	ترسالی متوسط
-۰/۹۹ تا +۰/۹۹	وضعیت نرمال
-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
$\leq -2$	خشکسالی بسیار شدید

در پژوهش حاضر از SPI سالانه تحت سه سناریوی انتشار A1B، A2، B1 طی بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۴۱ استفاده شده است. با توجه به سناریوی A1B بیشترین رخداد خشکسالی در مرکز استان و در محدوده خاش، ایرانشهر و زاهدان رخ خواهد داد (شکل ۲). این در حالی است که کمترین رخداد خشکسالی در چابهار و زابل اتفاق خواهد افتاد. همچنین مناطق جنوبی ایرانشهر و سراوان، مناطق شمالی چابهار، محدوده شمال شرقی زاهدان و مناطق جنوب غربی زابل دارای شرایط متوسط هستند (شکل ۲). با توجه به سناریوی A2 شدیدترین پدیده خشکسالی در محدوده سراوان و زاهدان رخ خواهد داد و ضعیف‌ترین پدیده خشکسالی در چابهار و نیمه جنوبی ایرانشهر اتفاق خواهد افتاد (شکل ۲) و محدوده‌های زابل و ایرانشهر دارای شرایط متوسط و معمولی هستند. بر اساس خروجی سناریوی B1 بیشترین رخداد پدیده خشکسالی در محدوده شهرستان ایرانشهر و مناطق غربی شهرستان‌های خاش و ایرانشهر مشاهده می‌گردد.



شکل (۲). پراکنش خشکسالی سالانه تحت سناریوی A1B (سمت راست)، A2 (سمت چپ) (۲۰۲۲-۲۰۴۱).

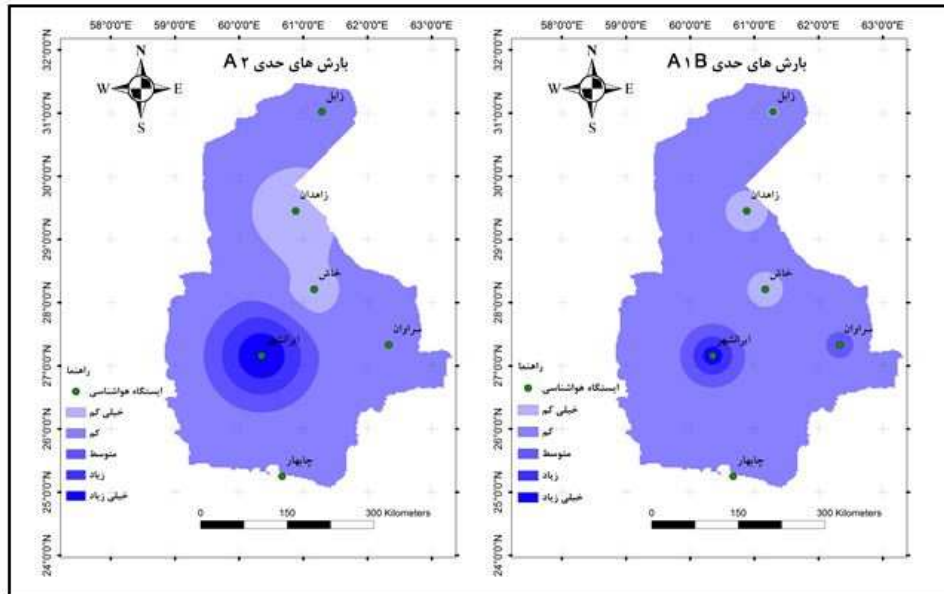


شکل (۳). پراکنش خشکسالی سالانه تحت سناریوی B1 (۲۰۲۲-۲۰۴۱).

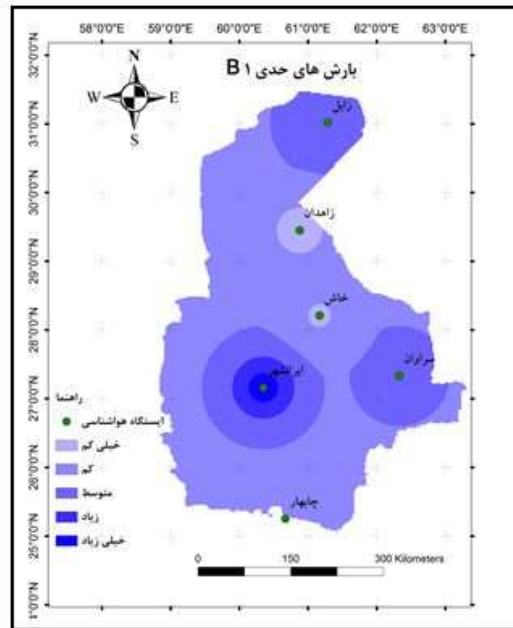
### بارش‌های شدید و حدی

بارش شدید و حدی بر اساس روش آستانه درصدی و با استفاده از داده‌های بارش روزانه به دست می‌آیند. در این روش برای هر یک از ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه مقادیر آستانه بارش شدید و حدی بر اساس ۱۰ درصد از مقادیر متوسط سالانه ایستگاه تعیین می‌گردد (جدول ۲). شکل (۴) پراکنش بارش‌های شدید و حدی سالانه تحت دو سناریوی A1B، A2 طی بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۴۱ را نشان می‌دهد. در سناریوی A1B بیشترین فراوانی بارش‌های حدی در محدوده شهرستان ایرانشهر و سراوان مشاهده می‌گردد و در شهرستان‌های زاهدان و خاش بارش‌های شدید و حدی بسیار کمی رخ خواهد داد. همچنین شهرستان‌های زابل، زاهدان و محدوده‌های گسترده‌ای از مناطق مورد بررسی دارای شرایط متوسط بارش‌های حدی خواهند بود. با توجه به سناریوی A2 شدیدترین بارش‌های حدی در ایرانشهر و اطراف آن رخ خواهد داد و شهرستان خاش و محدوده‌هایی از شهرستان زاهدان دارای بارش‌های حدی بسیار کمی خواهند بود. علاوه بر این، شهرستان‌های سراوان، زابل، چابهار و محدوده‌های وسیعی از مناطق طبیعی استان بارش‌های حدی متوسط را تجربه خواهند کرد (شکل ۴). بر اساس سناریوی B1 در شهرستان‌ها و حومه‌های ایرانشهر، سراوان و زابل بیشترین رخداد بارش‌های حدی مشاهده می‌گردد و شهرستان خاش، شهرستان زاهدان با حومه‌اش دارای بارش‌های حدی بسیار کمی خواهند بود (شکل ۵).





شکل (۴). پراکنش بارش های حدی سالانه تحت دو سناریوی A1B (سمت راست)، A2 (سمت چپ) (۲۰۲۲-۲۰۴۱)

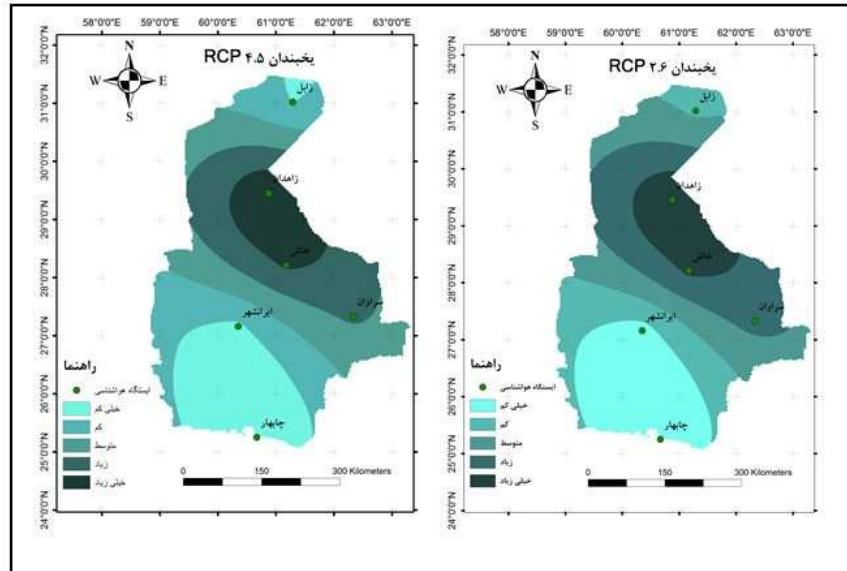


شکل (۵). پراکنش بارش های حدی سالانه تحت سناریوی B1 (۲۰۲۲-۲۰۴۱)

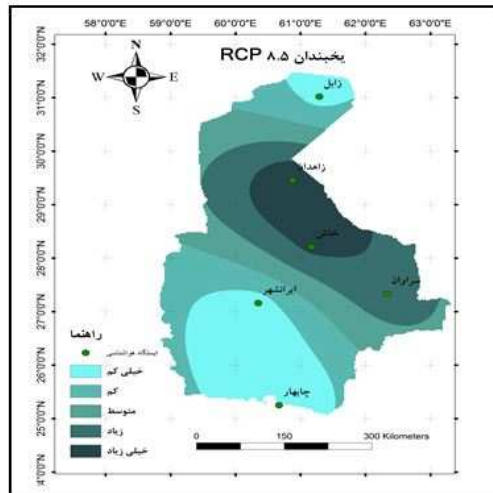
### یخبندان

روزی که دمای هوا در یک شبانه‌روز به صفر یا زیر صفر درجه برسد یخبندان گفته می‌شود (جدول ۲). شکل (۶) شدت روزهای یخبندان سالانه را تحت دو سناریوی RCP2.6، RCP4.5 طی بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۴۱ نشان می‌دهد. بیشترین یخبندان سالانه تحت سناریوی انتشار RCP2.6 در خاش، زاهدان و پیرامون آن مشاهده می‌گردد و شهرستان‌های زابل، ایرانشهر و چابهار و حومه آن فراوانی یخبندان خیلی کمی را تجربه خواهند کرد. همچنین با توجه به این سناریو شهرستان سراوان، شمال شهرستان ایرانشهر، غرب و شمال غرب شهرستان زاهدان و جنوب غربی زابل شرایط متوسطی را از نظر فراوانی یخبندان دارا خواهند کرد. بر اساس برون داد RCP4.5 نیز بیشترین یخبندان‌ها در محدوده‌های شهرستان زاهدان و خاش رخ خواهد داد و کمترین آن نیز در شهرستان‌های چابهار، ایرانشهر و نیمه شمال زابل اتفاق خواهد افتاد (شکل ۶). با توجه به خروجی RCP8.5 بیشترین یخبندان‌ها در

مناطق مرکزی استان و به ویژه در شهرستان‌های زاهدان و خاش مشاهده می‌گردند (شکل ۷). همچنین بر مبنای این سناریو مانند سناریوهای فوق‌الذکر کمترین شدت یخبندان در قسمت شمالی و جنوبی استان (زابل، چابهار، ایرانشهر) رخ خواهد داد.



شکل (۶). پراکنش یخبندان سالانه تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP4.5 (۲۰۲۲-۲۰۴۱)

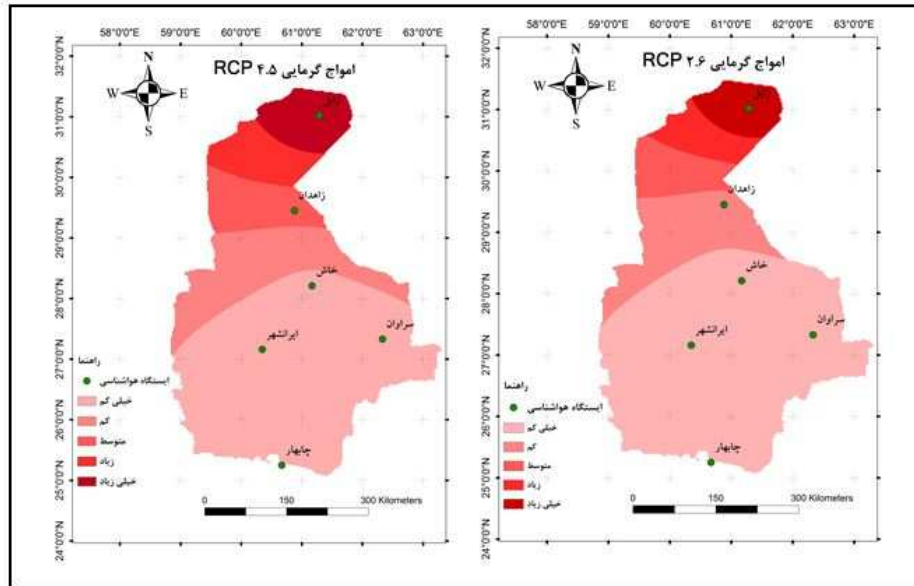


شکل (۷). پراکنش یخبندان سالانه تحت سناریوی RCP8.5 (۲۰۲۲-۲۰۴۱)

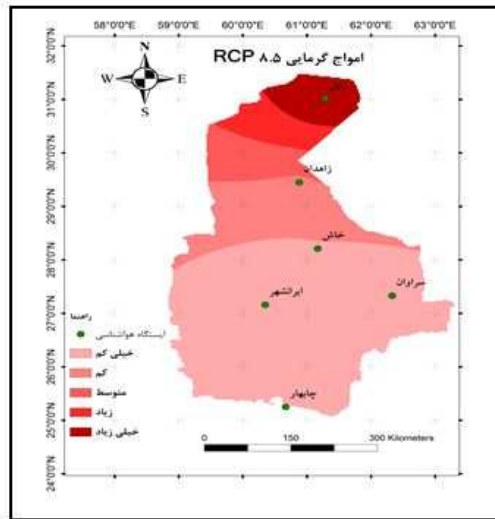
### امواج گرمایی

بر اساس تعریف سازمان هواشناسی جهانی، در صورتی که برای ۵ روز متوالی دمای حداکثر در یک ایستگاه، ۵ درجه سانتی‌گراد بالاتر از میزان درازمدت دمای حداکثر آن ماه بود به‌عنوان یک موج گرمایی لحاظ می‌گردد (جدول ۲). شکل (۸) شدت امواج گرمایی سالانه را تحت دو سناریوی RCP2.6، RCP4.5 طی بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۴۱ نشان می‌دهد. بیشترین امواج گرمایی سالانه تحت سناریوی انتشار RCP2.6 در شهرستان‌های ایرانشهر و چابهار به‌حداقل می‌رسند. همچنین با توجه به این سناریو جنوبی‌تر از شدت آن کاسته می‌شود و در شهرستان‌های ایرانشهر و چابهار به‌حداقل می‌رسند. همچنین با توجه به این سناریو شهرستان‌های زاهدان، نیمه جنوبی زابل و نیمه شمالی خاش شرایط متوسطی را از نظر شدت امواج گرمایی تجربه خواهند کرد. بر اساس خروجی RCP4.5 نیز بیشترین امواج گرمایی در محدوده‌های شهرستان‌های زابل رخ خواهد داد و کمترین آن در شهرستان‌های چابهار و ایرانشهر اتفاق خواهد افتاد (شکل ۸). با توجه به خروجی RCP8.5 بیشترین امواج گرمایی در نیمه شمالی استان و به ویژه

در شهرستان‌های زابل مشاهده می‌گردند (شکل ۹). همچنین بر مبنای این سناریو کمترین شدت امواج گرمایی در نیمه جنوبی استان (سراوان، چابهار، ایرانشهر) رخ خواهند داد.



شکل (۸). پراکنش امواج گرمایی سالانه تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP4.5 (۲۰۲۲-۲۰۴۱)



شکل (۹). پراکنش امواج گرمایی سالانه تحت سناریوی RCP8.5 (۲۰۲۲-۲۰۴۱)

### نتیجه‌گیری

امروزه تغییر اقلیم و پیامدهای آن به خاطر افزایش گازهای گلخانه‌ای امری اثبات شده‌اند. یکی از پیامدهای اقلیم و تغییرات آن مخاطرات جوی هستند. هدف از این مطالعه بررسی تغییر اقلیم بر مخاطرات جوی در جنوب شرق ایران است. برای انجام این مطالعه از داده‌های روزانه کمینه و بیشینه و بارش ایستگاه‌های هواشناسی استان سیستان و بلوچستان، داده‌های شبیه‌سازی شده کمینه و بیشینه دما از نرم‌افزار SDSM و مدل CanESM2 تحت انتشار سه سناریوی RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5 و داده‌های شبیه‌سازی شده بارش از نرم‌افزار LARS-WG و مدل Hadcm3 تحت سناریوهای انتشار A1B, B1, A2 طی بازه زمانی ۲۰۴۱-۲۰۲۲ استفاده شده است. نتایج کالیبراسیون و صحت‌سنجی در شبیه‌سازی داده‌ها نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل‌ها در برآورد داده‌ها برای محدوده مورد پژوهش است. چهار مخاطره مهم جوی ناشی از داده‌های شبیه‌سازی شده شامل خشکسالی، بارش‌های

شدید و حدی، یخبندان و امواج گرمایی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که تحت سناریوی A1B در منطقه مورد مطالعه بیشترین رخداد خشکسالی در مرکز استان و در محدوده خاش، ایرانشهر و زاهدان و کمترین رخداد خشکسالی در چابهار و زابل اتفاق خواهد افتاد. همچنین تحت سناریوی A2 شدیدترین خشکسالی در محدوده سراوان و زاهدان و ضعیف ترین پدیده خشکسالی در چابهار و نیمه جنوبی ایرانشهر رخ خواهد داد. بر اساس خروجی سناریوی B1 بیشترین رخداد پدیده خشکسالی طی بازه زمانی مورد مطالعه در محدوده شهرستان ایرانشهر و مناطق غربی شهرستان های خاش و ایرانشهر مشاهده می گردد. بیشترین فراوانی بارش های حدی تحت سناریوی A1B در محدوده شهرستان ایرانشهر و سراوان مشاهده می گردد و شهرستان های زاهدان و خاش بارش های شدید و حدی بسیار کمی را تجربه خواهند کرد. همچنین با توجه به سناریوی A2 شدیدترین بارش های حدی در ایرانشهر و اطراف آن رخ خواهد داد و شهرستان خاش و محدوده هایی از شهرستان زاهدان دارای بارش های حدی بسیار کمی خواهند بود. بر اساس سناریوی B1 در شهرستان و حومه های ایرانشهر، سراوان، زابل بیشترین رخداد بارش های حدی رخ خواهد داد و شهرستان خاش، شهرستان زاهدان و حومه شهرستان زاهدان بارش های حدی بسیار کمی را تجربه خواهند کرد. بیشترین یخبندان سالانه تحت سناریوی انتشار RCP2.6 در خاش و زاهدان و پیرامون آن مشاهده می گردد. همچنین شهرستان های زابل، ایرانشهر و چابهار و حومه آن شدت یخبندان خیلی کمی را تجربه خواهند کرد. بر اساس برون داد RCP4.5 نیز بیشترین یخبندان ها در محدوده های شهرستان زاهدان و خاش رخ خواهد داد و کمترین آن نیز در شهرستان های چابهار، ایرانشهر و نیمه شمال زابل اتفاق خواهد افتاد. علاوه بر این، بر اساس خروجی RCP8.5 بیشترین یخبندان ها در مناطق مرکزی استان و به ویژه در شهرستان های زاهدان و خاش مشاهده می گردد. تحت سناریوی انتشار RCP2.6 بیشترین امواج گرمایی سالانه در شهرستان زابل و پیرامون آن مشاهده می گردد و به تدریج در مناطق جنوبی تر از شدت آن کاسته می شود به طوری که در شهرستان های ایرانشهر و چابهار به حداقل می رسد. بر اساس خروجی RCP4.5 نیز بیشترین امواج گرمایی در محدوده های شهرستان زابل رخ خواهد داد و کمترین آن در شهرستان های چابهار و ایرانشهر اتفاق خواهد افتاد. با توجه به خروجی RCP8.5 بیشترین امواج گرمایی در نیمه شمالی استان و به ویژه در شهرستان های زابل مشاهده می گردد. همچنین بر مبنای این سناریو کمترین شدت امواج گرمایی در نیمه جنوبی استان (سراوان، چابهار، ایرانشهر) رخ خواهد داد.

### منابع و مآخذ

- اشرف، بتول، موسوی بایگی، محمد، داوری، کامران (۱۳۹۰). پیش بینی تغییرات فصلی پارامترهای اقلیمی در ۲۰ سال آتی با استفاده از ریزمقیاس نمایی آماری داده های مدل HADCM3. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره ۴، صص ۹۵۷-۹۴۷.
- اسماعیل نژاد، مرتضی، خسروی، محمود، علیجانی، بهلول، مسعودیان، سید ابوالفضل (۱۳۹۲). شناسایی امواج گرمایی ایران، فصلنامه جغرافیا و توسعه، شماره ۳۳، صص ۵۳-۳۹.
- بابائیان، ایمان، کوهی، منصوره (۱۳۹۱). ارزیابی شاخص های اقلیم کشاورزی تحت سناریوهای تغییر اقلیم در ایستگاه های منتخب خراسان رضوی، نشریه آب و خاک، شماره ۴، صص ۹۶۷-۹۵۳.
- بابائیان، ایمان، نجفی نیک، زهرا، زابل عباسی، فاطمه، حبیبی نوخندان، مجید، ادب، حامد، ملبوسی، شراره (۱۳۸۸). ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۳۹-۱۰۱۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده های مدل گردش عمومی جو ECHO-G، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۱۶، صص ۱۵۲-۱۳۵.
- باعقیده، محمد، احمدی، حمزه، صفرزایی، نعمت اله (۱۳۹۵). ارزیابی مخاطرات دمایی منطقه جنوب شرق ایران، نشریه امداد و نجات، شماره ۴، صص ۱۵-۱.
- سلطانی، سعید، سعادت، سیده سارا (۱۳۸۶). پهنه بندی خشکسالی در استان اصفهان با استفاده از نمایه استاندارد بارش (SPI)، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، شماره ۲، صص ۶۷-۶۴.
- کوزه گران، سعیده، موسوی بایگی، محمد (۱۳۹۴). بررسی روند رویدادهای حدی اقلیمی در شمال شرق ایران، نشریه آب و خاک، شماره ۳، صص ۷۶۴-۷۵۰.
- گل محمدی، مریم، مساح بوانی، علیرضا (۱۳۹۰). بررسی تغییرات شدت و دوره بازگشت خشکسالی حوضه قره سو در دوره های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم، نشریه آب و خاک، شماره ۲، صص ۳۲۶-۳۱۵.

مسعودیان، سید ابوالفضل (۱۳۹۲). آب و هوای ایران، مشهد: شریعه توس.

مفیدی، عباس، حسین زاده، سیدرضا، محمدیاریان، محمد (۱۳۹۲). پهنه بندی مخاطرات جوی منطقه‌ی شمال شرق ایران، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۶، صص ۱۶-۱.

مولودی، گلاله، خورانی، اسداله، مرادی، عباس (۱۳۹۵). اثر تغییر اقلیم بر امواج گرمایی سواحل شمالی خلیج فارس، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، شماره ۱، صص ۱۴-۱.

Dalezios, N.R., Loukas, A., Vasilades, L, Liakopoulos, E (2000). Severity-Duration-Frequency analysis of drought and wet periods in Greece. Hydrological Sciences Journal,5, pp 751-769.

Frich, P., Alexander, L.V., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Klein-Tank, A.M.G., and Peterson, T.(2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. Climate Research 19,pp 193-212.

Glickman, Todd S., (2000), Glossary of Meteorology. Boston, American Meteorological Society, ISBN 1-878220-7-49.

Henriques, A.G., and Santas, M.J. (1998). Regional drought distribution model. Physics and Chemistry of the Earth, 1,pp19-22.

Hayhoe, K., Sheridan, S., Kalkstein, L., and Greene, S (2010). Climate change, heat waves, and mortality projections for Chicago. Journal of Great Lakes Research, 69: 62-73.

Im E. S., Jung I. W., Bae D. H., (2011), the temporal and spatial structures of recent and future trends in extreme indexed over Korea from a regional climate projection, International of Climatology, 31(1): 72-86

Madelin, M., and Beltrando, G (2005). Spatial Interpolation-Based Mapping of the Spring Frost Hazard in the Champagne Vineyards. Meteorological applications, 12(1): 51-56.

Marengo JA, Chou SC, Torres RR, Giarolla A, Alves LM, Lyra A (2014). Climate change in centraland South America: Recent trends, futureprojections, and impacts on regional agriculture.2014.Working Paper No 73.

Sangam. Shrestha; Worapong Lohpaisankrit (2017). Flood hazard assessment under climate change scenarios in the Yang River Basin, Thailand, International Journal of Sustainable Built Environment,2, pp 285-298.

Smith, K. (1997). Climatic Extremes as a Hazard to Humans. In: Applied climatology, principals and practice, Russell D. Thompson and Allen Perry, Rutledge (London), pp304-316.

Semenov, M.A., and Barrow, E.M (2002). A stochastic weather generator foruse in climate impact studies. UserManual: Hertfordshire, UK. Taulis, M.E., & Milke, M.W. 2005, Estimationof WSIM weathersimulation parametersin arid climates, Ecological Modeling, 184,pp 177-191.

Pablo. Jaramill;Ali. Nazemi, (2018). Assessing urban water security under changing climate: Challenges and ways forward,Sustainable Cities and Society, 41, pp 907-918.

Vestal, C.K (19971). First and last occurrences of Low temperatures during the cold season, Monthly Weather Review, 8, pp 650-652.

Vergni, L. and F. Todisco (2011). Spatio- temporal variability of precipitation, temperature and agricultural drought indices in Central Italy, Agricultural and Forest Meteorology, 3, pp 301-311.

Wilby, L.R., Hay, L.E. and G.H. Leavesley(1999). A comparison of downscaled and raw GCM output: Implications for climate change scenarios in the San Juan River Basin, Colorado, Journal of Hydrology, 2, pp 67-91.