

پیش‌نگری ویژگی‌های خشکسالی آبی تحت سناریوهای RCP در چند

نمونه‌ی اقلیمی ایران

منصوره کوهی*

استادیار، پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم

چکیده

در این پژوهش، به منظور ارزیابی ویژگی‌های آبی خشکسالی ابتدا میزان توانمندی سه مدل اقلیمی در شبیه‌سازی دما و بارش برای دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۷۶) برای چهار نمونه اقلیمی ایران (اهواز، بندر انزلی، شهرکرد و کرمان) بررسی شد و در ادامه رویدادهای حدی خشکسالی ($SPEI \leq -1$) از سری ماهانه برای دو دوره پایه و ۲۰۵۰-۲۰۲۱ تحت سناریوهای خط سیر گازهای گلخانه‌ای (RCP)، شناسایی و ویژگی‌های شدت، سختی و مدت استخراج شد. نتایج نشان داد مدل‌های اقلیمی بجز بندر انزلی، در سایر ایستگاه‌ها، از مهارت مناسبی در شبیه‌سازی متغیرهای دما، بارش، فراوانی طبقات $SPEI-1$ برخوردار هستند. بر اساس پیش‌نگری انجام شده، در اهواز تحت سناریوی $RCP4.5$ ، فراوانی طبقه متوسط (۶۴ رویداد) و تحت سناریوی $RCP8.5$ ، فراوانی طبقه شدید $SPEI-1$ (۳ رویداد) بیش از دوره پایه (به ترتیب ۵۸ و ۱ رویداد) خواهد بود. به ازای دوره‌های بازگشت یکسان، مقادیر شدت خشکسالی‌های حدی تحت سناریوی $RCP8.5$ با دوره پایه تفاوت قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. برای دوره بازگشت ۵۰ سال، شدت این بلیه تحت سناریوی $RCP8.5$ ، ۳/۴ خواهد بود در حالیکه دوره پایه دارای شدت ۲/۶ می‌باشد. تحت سناریوی $RCP4.5$ ، شدت (۲/۴) برای دوره بازگشت ۵۰ سال) نسبت به دوره پایه اندکی کاهش نشان می‌دهد. برای شهرکرد، فراوانی طبقه متوسط نمایه خشکسالی تحت دو سناریو نسبت به دوره پایه کاهش و در مقابل فراوانی انواع شدید آن افزایش نشان می‌دهد. با بررسی تغییرات تابع چگالی احتمال (PDF) توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV) برای ایستگاه شهرکرد نشان داده شد که میانگین و تغییرپذیری شدت مقادیر حدی این پدیده تحت دو سناریوی افزایش می‌یابد. در ایستگاه کرمان، فراوانی مقادیر شدید $SPEI-1$ تحت سناریوی $RCP4.5$ نسبت به دوره پایه افزایش نشان داد. تحت سناریوی $RCP8.5$ ، به ازای دوره‌های بازگشت یکسان، انتظار بروز خشکسالی‌های حدی ضعیف‌تر نسبت به دوره پایه وجود دارد.

کلید واژه‌ها: تئوری مقادیر حدی، تغییر اقلیم، خشکسالی، شدت، سختی

¹ Representative Concentration Pathways

² Probability Density Function

³ Generalized Extreme Value Distribution

مقدمه

تغییر اقلیم چه ناشی از واداشتهای طبیعی و چه ناشی از فعالیت‌های انسانی، منجر به تغییراتی در احتمال وقوع و یا شدت رویدادهای حدی هواشناسی (بارش حدی) و اقلیمی (مانند خشکسالی) شده است (IPCC, 2013). با افزایش پیش‌بینی شده دما در مقیاس جهانی، این توافق کلی وجود دارد که احتمالاً چرخه‌ی جهانی هیدرولوژیکی تشدید شده و رویدادهای حدی سیل و خشکسالی با فراوانی بیشتری رخ دهد. احتمالاً گرمایش جهانی رخ داده، منجر به تداوم تغییر در الگوهای بارش در مقیاس منطقه‌ای و یا محلی شده است (IPCC, 2001). به عبارتی دیگر، خطرناک‌ترین نتیجه ناشی از گرمایش جهانی تغییر در میانگین‌ها نیست بلکه احتمال افزایش همه‌جانبه در رویدادهای حدی است (WMO, 2009).

خشکسالی بلایی طبیعی است که منجر به صدمات و خسارات گسترده اقتصادی، اجتماعی و محیطی می‌گردد. در تعریف این پدیده، به طور کلی می‌توان گفت کمبود آب در یک دوره زمانی پیوسته در مقایسه با شرایط نرمال است بطوریکه این شرایط برای چندین هفته، ماه و حتی سال استمرار می‌یابد و منطقه بزرگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. خشکسالی در دامنه‌ی وسیعی از مقیاس‌های زمانی رخ می‌دهد از خشکسالی‌های سریع در مقیاس هفته (Otkin et al., 2018) تا کمبود بارش در مقیاس چند ساله و دهه‌ای (Garreaud et al., 2017). تغییر در بزرگی و فراوانی این بلیه، دارای اثرات شدیدی بر مدیریت آب، کشاورزی و اکوسیستم‌های آبی است. بر مبنای تغییرات رخ داده در قرن ۲۱ و گرمایش جهانی پیش‌بینی شده، این پدیده احتمالاً شدیدتر خواهد شد (Dai, 2011). رویدادهای خشکسالی شدید و مستمر که از دهه ۱۹۷۰ مشاهده شده و این تغییرات با افزایش دما و کاهش بارش مرتبط هستند (Sheffield et al. 2010) در پژوهش دیگری ویژگی‌های خشکسالی طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۹۹ برای منطقه

جنوب آسیا با استفاده از مدل‌های CMIP6 بررسی شد. پیش‌نگری‌ها نشان داد فراوانی و میانگین مدت خشکسالی طی دوره‌های آبی افزایش خواهد یافت (Zhia et al., 2020). با توجه به گرمایش جهانی و اثرات آن بر رویدادهای فرین، مهم است که شدت، مدت و رفتار آماری دوره‌هایی با کمبود آب یا خشکسالی‌ها شناسایی و پیش‌بینی شود. با کاربرد تئوری مقدار حدی^۱ (EVT) می‌توان ویژگی‌های خشکسالی‌های حدی را کمی کرد. تئوری مقدار حدی، مکمل نمایه‌های توصیفی حدی است که به منظور ارزیابی شدت و فراوانی رویدادهای حدی نادری که در دم‌های توزیع احتمال متغیرهای هواشناسی قرار دارند استفاده می‌شود (WMO, 2009). در تئوری مقدار حدی بر خلاف تئوری حد مرکزی، به جای مدل‌سازی ارزش‌های مرکزی، بر دم توزیع تمرکز می‌شود. به عبارت دیگر، زمانی که بیشینه یک متغیر تصادفی مدل‌سازی می‌شود، نظریه مقدار حدی همان نقش پایه‌ای را بر عهده دارد که نظریه حد مرکزی در مدل‌سازی متغیرهای تصادفی ایفا می‌کند. در دو حالت، این نظریه‌ها به ترتیب توزیع حدی ماکزیمم‌ها و مجموع متغیرهای تصادفی را تعیین می‌کنند (زمانی و همکاران، ۱۳۹۲). از این تئوری همچنین می‌توان جهت ارزیابی توانمندی مدل‌های اقلیمی در استخراج ویژگی‌های ماه‌های خشک استفاده نمود و در گام بعدی، اثرات تغییر اقلیم ناشی از گرمایش جهانی را بر تغییر احتمال، شدت و فراوانی این پدیده بررسی و پیش‌بینی کرد (Sousa et al. 2011).

از تئوری مقدار حدی در تعدادی از پژوهش‌ها به منظور تحلیل مقادیر حدی رویدادهای اقلیمی چون سیل و خشکسالی استفاده شده است. به عنوان نمونه به منظور تجزیه و تحلیل تغییرات زمانی-مکانی شرایط خشکسالی از برآزش تابع مقادیر حدی تعمیم یافته بر مقادیر منطقه‌ای بیشینه و کمینه داده‌های نمایه شدت خشکسالی پالمر^۲ (PDSI) و خود کالیبره شده این

² Palmer Drought Severity Index

¹ Extreme Value Theory

تا اکنون پژوهش‌هایی در رابطه با بررسی مقادیر رویدادهای حدی نادر بارش و خشکسالی در ایران انجام شده است. عساکره (۱۳۹۱) تغییر توزیع فراوانی بارش‌های حدی شهر زنجان را با استفاده از روش توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته برای دوره ۲۰۰۶-۱۹۶۱ مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که فراوانی و مقدار بارش‌های سنگین و سبک کاهش می‌یابد. زاهدیان‌فر (۱۳۹۳) در استان گلستان اقدام به تحلیل فراوانی خشکسالی طی دوره‌ی آماری ۴۵-۱۳۴۴ الی ۸۹-۱۳۸۸ نمود بدین منظور، ابتدا مقدار شدت خشکسالی در پنجره‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه براساس نمایه بارش استاندارد محاسبه شد، سپس مقادیر حدی آن‌ها انتخاب شد. مقایسه نتایج تحلیل فراوانی مقادیر حدی نشان داد که روش حد آستانه‌ها در دوره بازگشت‌های مختلف، مقادیر بالاتری را نسبت به روش حداکثر سالانه ارائه می‌کند. مظفری و شفیعی (۱۳۹۵) با هدف مطالعه شناسایی و تحلیل روند بارش‌های حدی مناطق غربی ایران از داده‌های بارش ۶۹ ایستگاه همدیدی و اقلیم‌شناسی (شامل استان‌های کرمانشاه، همدان، ایلام، لرستان و کردستان)، طی دوره آماری (۲۰۱۰-۱۹۶۱) استفاده کردند و آستانه سالانه بارش‌های حدی غرب کشور به روش توزیع تعمیم یافته حدی برای این مناطق بدست آوردند. در پژوهشی دیگر، سلاجقه و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه خود، از روش حد آستانه ثابت (Q90, Q70) به منظور بررسی خشکسالی هیدرولوژیک در حوزه آبخیز سد کرج استفاده نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد تابع مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV) بهترین برازش را بر ویژگی‌های خشکسالی دارد.

از آنجایی که در تعریف مدیریت خطرپذیری، فرآیند شناسایی یعنی پایش و پیش‌بینی خطرات طبیعی بالقوه (نظیر سیل و خشکسالی) نقش مهمی ایفا می‌کند، لذا پژوهش حاضر در نظر دارد ضمن ارائه دورنمایی از میزان تغییرات ویژگی‌های این

نمایه^۳ (scPDSI) در منطقه مدیترانه استفاده شده است (Sousa et al., 2011). نتایج نشان داد که کاهش چشم‌گیری در مقادیر مطلق حدی در مناطق مرکزی (ایتالیا و بالکان) وجود دارد. احتمال تغییرات در گستره‌ی مکانی، دوره و فراوانی خشکسالی با استفاده از چهار نمایه‌ی^۴ SPI،^۵ SRI،^۶ SPEI و^۷ SDDI بر مبنای برنوداد ۱۵ مدل CMIP5^۸، نیز انجام شده است (Touma et al., 2014). در این پژوهش، اقلیم حاضر با اقلیم شبیه‌سازی شده تحت سناریوی RCP8.5 مقایسه شد. یافته‌ها نشان داد که بجز نواحی حاره‌ای و جنب حاره‌ای، در بقیه مناطق جهان، افزایشی در وقوع و مدت خشکسالی رخ خواهد داد که در بسیاری مناطق، افزایش در هر دو این ویژگی‌ها بدست آمد. در پژوهش‌های مشابه (Dia et al., 2010; Shiffelds et al. 2013) نشان دادند که گرمایش جهانی ناشی از فعالیت‌های بشر مسئول تشدید خشکسالی هواشناسی به دلیل افزایش نیاز تبخیری و تغییر گردش مونسونی بر روی مناطقی مانند آسیا و آفریقا خواهد بود. احتمال خشکسالی بر روی انگلستان طی قرن ۲۰ و پتانسیل تغییرات آبی به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ی نیز با استفاده از تئوری مقدار حدی بررسی شده است (Burke et al., 2010). در پژوهشی دیگر (Kim et al., 2016) با استفاده از SPEI تغییرات ویژگی‌های خشکسالی و تحلیل فراوانی مقادیر حدی آن تحت سناریوی RCP8.5 برای کره جنوبی بررسی شده است. ویژگی‌های خشکسالی با استفاده از روش آستانه‌ای تعیین و تغییرات در شدت و سختی با استفاده از تحلیل فراوانی بررسی گردید. نتایج نشان داد نمودار تابع توزیع چگالی GEV شدت و سختی خشکسالی، برای سال‌های آتی، به سمت دم بالایی جابجا شده است. همچنین پیش‌بینی شد که میانگین سختی این پدیده در آینده بیش از اقلیم فعلی خواهد بود. این توزیع در پروژه اروپایی^۸ CIRCE نیز استفاده شده است.

⁷ Coupled Model Intercomparison Project

⁸ Climate Change and Impact Research the Mediterranean Environment

³ Self-Calibrated Palmer Drought Severity Index

⁴ Standardized Precipitation Index

⁵ Standardized Runoff Index

⁶ Supply-Demand Drought Index

خشکسالی طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و انجام تحلیل فراوانی این رویداد است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

در این پژوهش، از اطلاعات هواشناسی چهار ایستگاه منتخب از نمونه‌های اقلیمی ایران شامل بندر انزلی، کرمان، اهواز و شهرکرد استفاده شده است. علت انتخاب این ایستگاه‌ها، قابل اعتماد بودن داده‌های اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه، در دسترس بودن متغیرهای اقلیمی برای دوره آماری طولانی مدت و کامل بودن سری داده‌ها بود. این ایستگاه‌ها، نماینده اقلیم‌های مختلف کشور محسوب می‌گردند (جدول ۱).

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های هم‌دیدی مورد بررسی

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه-دهم درجه)	عرض جغرافیایی (درجه-دهم درجه)	ارتفاع (m)	میانگین دمای هوا (°C)	میانگین سالانه بارش (mm)	نوع اقلیم
اهواز	۴۸/۷	۳۱/۳	۲۲/۵	۲۵/۴	۲۰۹/۲	خشک گرم
بندر انزلی	۴۹/۵	۳۷/۵	-۲۳/۶	۱۶/۳	۱۸۳۰/۵	بسیار مرطوب معتدل
شهرکرد	۵۰/۸	۳۲/۳	۲۰۴۸/۹	۱۱/۷	۳۲۱/۸	نیمه خشک فراسرد
کرمان	۵۶/۹	۳۰/۳	۱۷۵۴	۱۵/۹	۱۴۸	خشک سرد

پژوهش، از داده‌های مشاهداتی میانگین ماهانه دمای کمینه و بیشینه روزانه (درجه سلسیوس) و بارش ماهانه (میلی‌متر) به صورت نقطه‌ای (ایستگاهی) و برون‌داد مدل‌های اقلیمی مقیاس‌کاهی شده سری CMIP5 با روش تصحیح اریبی^۲ (Reclamation, 2013) به منظور بررسی تغییرات در ویژگی‌های خشکسالی طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) استفاده شده است.

داده‌های مورد استفاده

طی سال ۱۳-۲۰۱۲، برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی^۱ (WCRP)، پیش‌نگری‌های جهانی اقلیم بر اساس فاز پنجم پروژه هم‌سنج مدل جفت شده (CMIP) را در اختیار جامعه علمی قرار داد (Taylor et al. 2012). مزیت CMIP5 نسبت به نسخه قبلی، قدرت تفکیک بالاتر مدل‌های استفاده شده در آن، تعداد بیشتر مدل‌ها و مجموعه غنی‌تری از میدان‌های خروجی (علاوه بر دما و بارش) است (جدول ۲). در این

جدول ۲- مدل‌های اقلیمی جهانی مورد بررسی در این پژوهش

نام مدل	نوع	قدرت تفکیک	گروه مدل‌سازی	کشور
---------	-----	------------	---------------	------

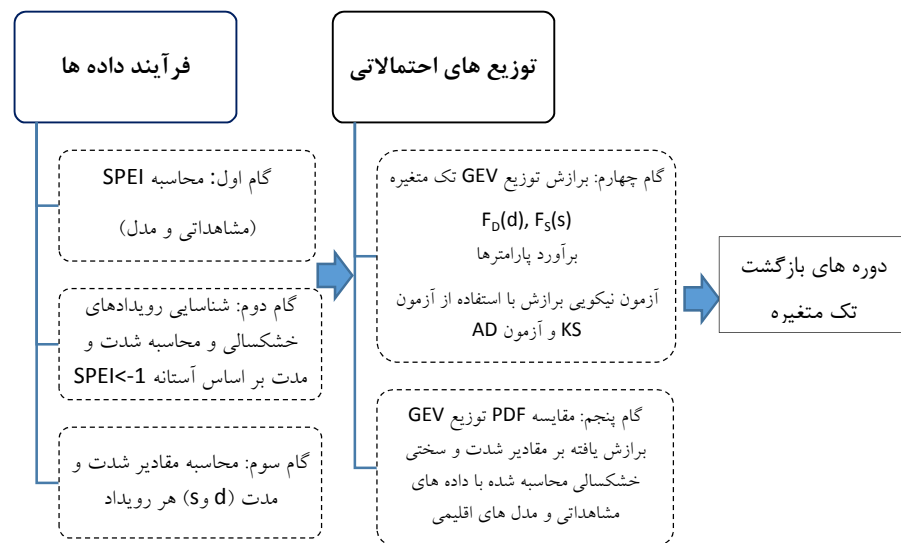
¹ World Climate Research Programme

² Bias Correction and Statistical Downscaling (BCSD)

انگلیس	دفتر هواشناسی	$1^{\circ} \times 1^{\circ}$	AO	^۱ HadGEM
فرانسه	موسسه پیر-سیمون لاپلاس	$1/8^{\circ} \times 3/8^{\circ}$	ChemESM	^۲ IPSL-CM5A-LR
ایالات متحده آمریکا	دانشگاه میامی	$0/9^{\circ} \times 1/25^{\circ}$	AO	^۳ CCSM4

و ادداشت تابشی RCP8.5 نشان دهنده‌ی روند فعلی انتشار گازهای گلخانه‌ای است و RCP2.6 بیشترین حد محدودیت است که زمین می‌تواند هنوز تاب‌آوری داشته باشد. دو سناریوی دیگر (RCP4.5 و RCP6.5) شرایطی را نشان می‌دهند که کاهش گازهای گلخانه‌ای تا حدی تحقق می‌یابد (IPCC, 2014). مراحل تجزیه و تحلیل داده‌ها در شکل (۱) آورده شده است.

در مدل‌های سری CMIP5، از سناریوهای RCP استفاده شد که شامل چهار سناریوی RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 می‌باشند که بر اساس میزان و ادداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند. برای ارزیابی توانمندی مدل‌های اقلیمی، دوره‌ی پایه، دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶ میلادی در نظر گرفته شد. پیش‌نگری‌های بارش و دما و تغییرات در ویژگی‌های خشکسالی برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ انجام شد. سناریوی



شکل ۱- چارچوب الگوریتم تحلیل فراوانی خشکسالی بکار رفته در این پژوهش

نمایه‌هایی مشابه SPI، RDI و SPEI، نمایه‌های استاندارد شده (SIs) نامیده می‌شوند که قادرند ناهنجاری‌های متغیر خشکسالی مد نظر را نسبت به وضعیت میانگین رطوبت یک منطقه، ارائه دهند. نمایه SPEI به عنوان نمایه‌ای که نسبت به

محاسبه خشکسالی

خشکسالی با واژه‌های نسبی و مطلق تعیین و تعریف می‌شود که امکان مقایسه مقدار و مدت را میسر می‌سازد. (Dai et al., 2014, Trenberth et al. 2014). در مطالعات خشکسالی،

¹ The Hadley Centre Global Environment Model version 2

² Institute Pierre Simon Laplace Climate Model

³ The Community Climate System Model

در این رابطه، k مقیاس زمانی تحلیل و n ماه مورد استفاده برای محاسبه است. مقادیر منفی SPEI نشان دهنده شرایط خشک می باشد. یک رویداد خشکسالی زمانی آغاز می شود SPEI < -1 شود و زمانی پایان می پذیرد که SPEI > -1 شود. با توجه به مقیاس زمانی مورد نظر (k)، مقدار تجمعی متغیر D محاسبه شده (رابطه ۲) و تابع چگالی احتمال لوگ لوجستیک سه پارامتره بر مقادیر D تجمعی برازش داده شده، سپس مقادیر $F(x)$ به مقادیر نرمال استاندارد تبدیل و شاخص SPEI محاسبه می شود. برای نحوه محاسبه این نمایه به Vicente-Serrano et al., 2009) مراجعه شود. طبقات نمایه خشکسالی در جدول (۳) آورده شده است.

گرمایش جهانی حساس است شناخته می شود (Beguería et al., 2009, Tuma et al., 2015) لذا در این پژوهش از این نمایه استفاده شده است. این نمایه بر اساس اختلاف دو متغیر بارش و تبخیر-تعرق محاسبه می شود. با توجه به کامل نبودن سری تشعشع در ایستگاه‌های مورد بررسی، برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه از روش هارگریوز-سامانی استفاده شد (Hargreaves & Samani, 1982). پس از محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل، اختلاف آن با بارش ماهانه محاسبه می شود (رابطه ۱).

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

P بارش ماهانه (mm)، PET تبخیر-تعرق پتانسیل (mm) و i ماه می باشد.

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-i} - PET_{n-i} \quad (2)$$

جدول ۳- طبقه بندی خشکسالی بر اساس SPEI (اصلاح شده مکی، ۱۹۹۳)

SPEI	طبقات خشکسالی
≤ -1	خشکسالی متوسط
≤ -2	خشکسالی شدید
≤ -3	خشکسالی خیلی شدید

ویژگی‌های خشکسالی

رابطه‌ی (۳) (Shiau., 2006) را برای محاسبه دوره بازگشت تک متغیره ویژگی‌های خشکسالی ارائه دادند. بر این اساس، دوره‌های بازگشت بر مبنای تنها یک متغیر (شدت، مدت یا سختی) محاسبه می گردد.

$$T(X \geq x) = \frac{E(L)}{1 - F_X(x)} \quad (3)$$

در رابطه (۳)، دوره‌های بازگشت برای متغیر تصادفی X (شدت، مدت و یا سختی) بزرگ تر یا مساوی یک مقدار ممکن x بدست می آید. در این روابط، L ، فاصله زمانی بین دو خشکسالی متوالی بوده و $E(L)$ فواصل زمانی مورد انتظار

به طور کلی، بزرگی اثرات، به زمان شروع کمبود بارش، شدت این کمبود و مدت رویداد بستگی دارد. مدت (Duration) عبارت است از مدت زمانی که در آن مقادیر نمایه کمتر از آستانه ۱- باشد. شدت (Severity) به صورت مقدار تجمعی نمایه (SPEI < -1) طی مدت رخداد محاسبه می گردد. سختی (Intensity) حاصل تقسیم شدت بر مدت و فراوانی وقوع نیز تعداد کل رویدادهای خشکسالی در دوره مورد بررسی است (Thoma et al. 2014).

دوره بازگشت و تحلیل فراوانی

که در این رابطه x متغیر تصادفی، μ پارامتر مکان، σ پارامتر مقیاس و ξ پارامتر شکل است. عبارت $1 + \xi \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) > 0$ می‌باشد. در این معادله پارامتر μ (موقعیت) برحسب واحد متغیر و گویای میانگین آن است. پارامتر مقیاس (σ) بدون بعد است و با میزان پراکندگی، توزیع را کنترل می‌کند. پارامتر شکل ξ طبیعت و چگونگی دنباله توزیع را بیان می‌دارد. به منظور برآورد پارامترهای توزیع‌های بکار رفته در این پژوهش، از روش بیشینه درست‌نمایی^۳ استفاده شده است.

بحث و بررسی نتایج

ارزیابی توانمندی مدل‌های اقلیمی در دوره

پایه

از آنجایی که در برآورد SPEI از داده‌های دما و بارش استفاده می‌شود ضروری است توانمندی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی این متغیرها مورد بررسی قرار گیرد. در این راستا، از نمودار جعبه‌ای، نمودار تیلور، تغییرات PDF و تابع توزیع تجمعی^۴ (CDF) توزیع گامای برازش یافته بر مقدار سالانه بارش استفاده شد.

(امید ریاضی) بین رویدادهای متوالی می‌باشد (Ge et al. 2016).

توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته

اگرچه تئوری چند متغیره زمانی-مکانی که قادر به مدل کردن توزیع مقادیر حدی در سامانه‌ی پیچیده‌ای مانند اقلیم زمین باشد وجود ندارد اما تئوری EVT قادر است تحلیل آماری ساده‌ای مرتبط با رویدادهای حدی ارایه می‌دهد. اگرچه این تئوری در سال ۱۹۲۸ بنیان‌گذاری شده (Fisher & Tippett, 1928)، اما بیشتر کاربردهای آن تا این اواخر بیشتر در زمینه‌های مالی بوده است. تا زمان گزارش سوم IPCC^۱ تنها یک گزارش در ارتباط با تحلیل رویدادهای اقلیمی با استفاده از EVT منتشر شده است (Katz, 1999) و از آن زمان تا کنون مقالات متعددی منتشر شده است. هدف از استفاده از انواع توزیع GEV^۲ (گامبل (یا نوع اول)، فریسه (یا نوع دوم) و وایبل (یا نوع سوم))، مدل کردن نالیستایی فراوانی و بزرگی رویدادهای حدی می‌باشد. توزیع GEV برای مدل کردن انواع رفتارهای فرین با سه پارامتر توزیع (ξ, σ, μ) = θ بسیار منعطف می‌باشد (رابطه ۴).

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \quad (4)$$

جدول ۴-ضرایب همبستگی مقدار ماهانه بارش چهار مدل با داده‌های مشاهداتی برای دوره پایه

مدل اقلیمی	HadGEM	IPSL ^۵	CCMS4
اهواز	۰/۵۳	۰/۴۹	۰/۵۴
شهر کرد	۰/۳۶	۰/۳۱	۰/۲۹
کرمان	۰/۴۴	۰/۳۵	۰/۳۸
بندر انزلی	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱

توانمند است. بررسی مقدار ضریب همبستگی برای بندر انزلی نشان داد مدل‌های مذکور، مهارت کافی در شبیه‌سازی بارش ماهانه در این ایستگاه را ندارند برای بررسی اریبی‌های ماهانه بارش در ایستگاه‌های تحت بررسی، از نمودار جعبه‌ای استفاده شد (شکل ۲). بررسی‌ها نشان داد هر سه مدل در برآورد بارش در ماه‌های بارشی و خشک بویژه در

بارش

میزان ضریب همبستگی ساده بین دو سری بارش ماهانه ایستگاهی و سه مدل منتخب محاسبه شد (جدول ۴). مدل HadGEM دارای بیشترین همبستگی در سه ایستگاه بوده و می‌توان نتیجه گرفت این مدل در برآورد الگوی زمانی متغیر

⁴ Cumulative Distribution Function

⁵

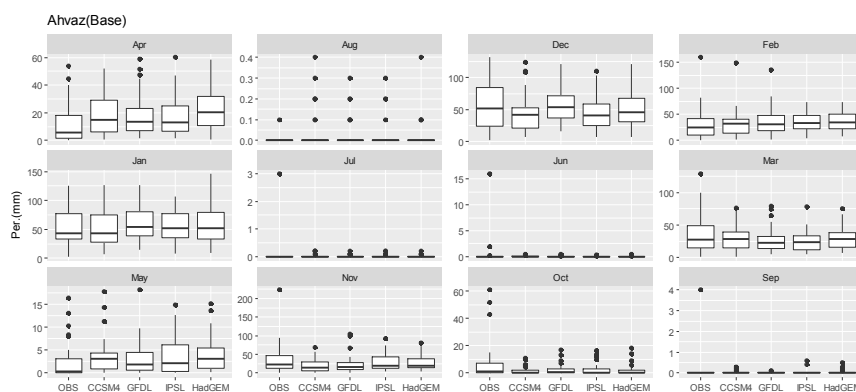
¹ Intergovernmental Panel on Climate Change

² Generalized Extreme Value

³ Maximum Likelihood

ایستگاه اهواز عملکرد مناسبی دارند. در این ایستگاه، بیشترین تفاوت بارش بین مقدار مشاهداتی و چهار مدل در ماه دسامبر مشاهده می‌شود. مقدار بارش در این ماه ۶۲/۳ میلی‌متر می‌باشد که در سه مدل CCSM4, HadGEM, IPSL (به ترتیب ۴۵/۶، ۵۲/۹ و ۴۷/۱ میلی‌متر) کم برآورد شده است. در ماه آوریل نیز دو مدل CCSM4 (با میانگین ماهانه ۱۹/۵mm) و HadGEM (به میزان ۲۲/۷ mm) مقدار بارش را بیش برآورد کرده‌اند (مقدار میانگین مشاهداتی ماه آوریل

۱۶/۶ میلی‌متر). در کل، میانگین سالانه بارش اهواز در مدل‌های IPSL, HadGEM و CCSM4 به ترتیب ۲۱۲، ۲۳۶، ۲۰۷ میلی‌متر بدست آمد که نسبت به مقدار مشاهداتی آن (۲۵۰ میلی‌متر) کم برآورد شده است. از آنجایی که مقدار نسبت تفاوت بین میانه و دامنه‌ی داده‌ها در ایستگاه اهواز در اکثر ماه‌ها کمتر از ۳۳٪ می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت در این ماه‌ها، تفاوت قابل ملاحظه‌ای در میزان بارش سه مدل اقلیمی با مقادیر نقطه‌ای در این ایستگاه وجود ندارد.



شکل ۲- مقایسه مقادیر بارش ماهانه (mm) مشاهداتی اهواز با مقادیر برآورد شده سه مدل اقلیمی

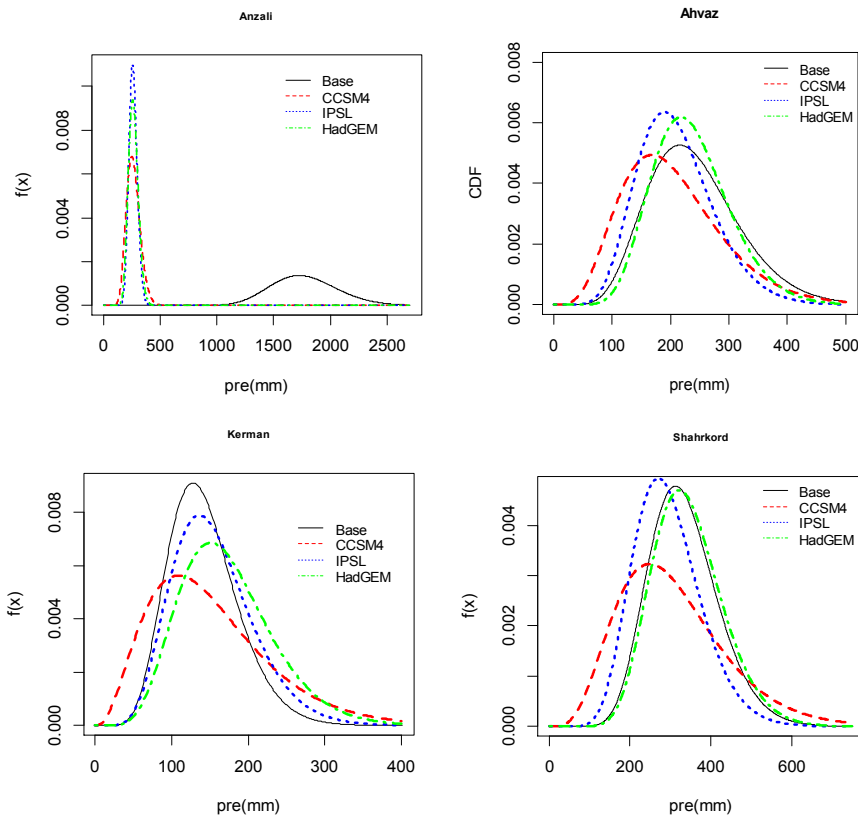
در ایستگاه کرمان، بیشترین تفاوت در مقدار بارش در ماه می بین مقادیر مشاهداتی و دو مدل CCSM4 و HadGEM مشاهده شد. میانگین این ماه در داده‌های بارش مشاهداتی به میزان ۷/۷ میلی‌متر و در مدل CCSM4 و HadGEM به ترتیب به میزان ۱۷ و ۱۴ میلی‌متر بدست آمد. در ایستگاه شهر کرد کم برآورد مقدار بارش در ماه دسامبر، فوریه و مارس در سه مدل مشاهده شد بطوریکه مقدار میانگین بارش دسامبر در سه مدل IPSL, HadGEM, CCSM4 به میزان ۳۶/۷، ۴۵/۱ و ۳۷/۹ بدست آمد. میزان بارش در این ماه در مقادیر مشاهداتی ۶۴/۵ میلی‌متر می‌باشد. بارش ماه اکتبر توسط دو مدل HadGEM و IPSL، بارش آوریل در دو مدل CCSM4 و HadGEM و بارش می در هر سه مدل بیش از مقدار مشاهداتی برآورد شده است. میانگین بارش در ماه آوریل در مقادیر مشاهداتی ۳۰/۹ میلی‌متر و در دو مدل

HadGEM و CCSM4 به میزان ۵۸/۳ و ۵۰/۹ میلی‌متر بدست آمد. در ماه‌های خشک (جون، جولای و آگوست) هر سه مدل مقدار بارش را بیش از مقدار مشاهداتی بدست آورده‌اند. در این ایستگاه، در دوره مشاهداتی، این ماه‌ها فاقد بارش بوده و چند مورد بارش به صورت داده‌های پرت (دایره سیاه) ثبت شده است. به عنوان نمونه در ماه جون، دو مورد بارش ۷ و ۱۳ میلی‌متر طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶ در این ایستگاه ثبت شده است (نمودارهای آورده نشده‌اند).

در ادامه، تغییرات در تابع چگالی احتمال PDF و تابع توزیع تجمعی CDF توزیع گاما برازش یافته بر مقادیر بارش سالانه مشاهداتی و سه مدل منتخب مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳ و ۴). در ایستگاه کرمان، اگرچه PDF توزیع گامای برازش یافته بر مقدار بارش سالانه مدل IPSL با افزایش دو پارامتر مکان و مقیاس به سمت راست نمودار PDF مشاهداتی

شهرکرد، بیشترین تشابه رفتاری PDF دو توزیع در مدل HadGEM مشاهده می‌شود. در سه ایستگاه مورد بررسی، نوسان‌پذیری بارش سالانه در مدل CCSM4 بیش از مقادیر مشاهداتی برآورد شده است.

جابجا شده است اما در کل دارای نزدیک‌ترین رفتار با آن می‌باشد. در ایستگاه اهواز PDF به رغم کاهش پارامتر مقیاس، توزیع گامای مدل HadGEM دارای انطباق کامل بر تابع چگالی احتمال مقادیر مشاهداتی است. در ایستگاه

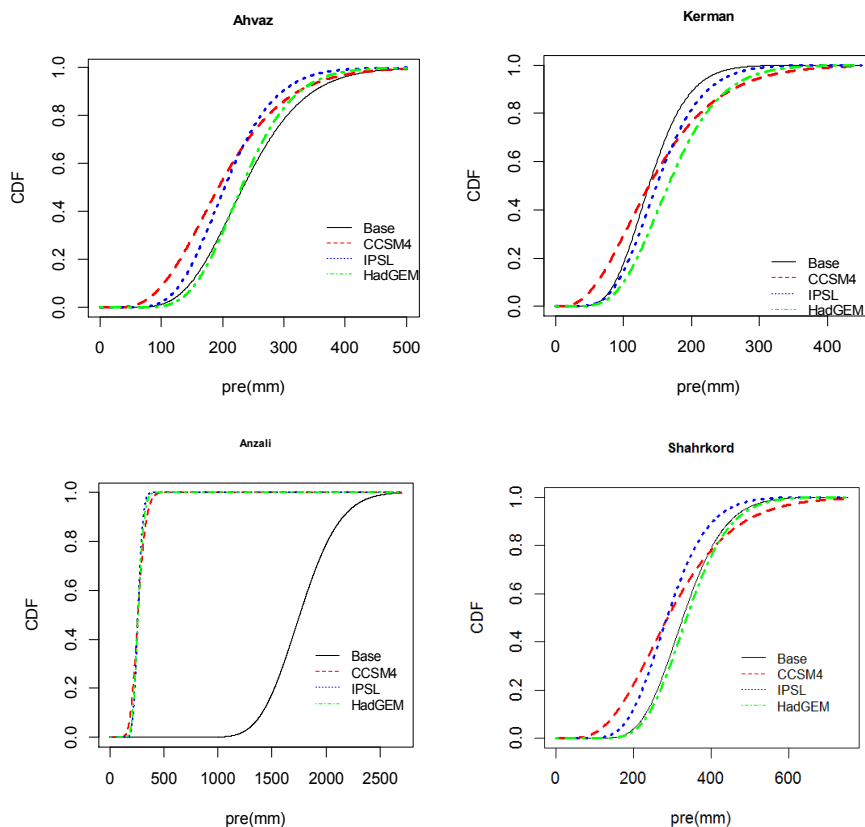


شکل ۳- بررسی رفتار PDF توزیع گاما برازش یافته بر بارش سالانه مشاهداتی سه ایستگاه و سه مدل اقلیمی طی دوره پایه

را با مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهند. به عبارتی دیگر ویژگی‌های احتمالاتی بارش سالانه در مدل‌های مذکور تشابه بیشتری با بارش مشاهداتی دارد. مقایسه CDF مقادیر بارش سالانه مشاهداتی و مدل‌های اقلیمی مورد بررسی برای ایستگاه بندرانزلی نشان می‌دهد که این دو نمونه به دو جامعه متفاوت از نظر آماری تعلق دارند و لذا با توجه به عدم توانمندی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی بارش، از بررسی این ایستگاه صرف نظر شد.

در ایستگاه بندر انزلی، مقایسه PDFs مدل‌های اقلیمی با PDF مشاهداتی نشان می‌دهد هیچ کدام از مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی مناسب رفتار بارش در این ایستگاه نیستند که در مطالعات قبلی نیز به این موضوع اشاره شده است (کوهی، ۱۳۹۶).

در شکل ۴ تابع توزیع تجمعی مدل‌های اقلیمی مورد بررسی در مقایسه با CDF بارش سالانه مشاهداتی ترسیم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ایستگاه‌های اهواز و شهرکرد مدل HadGEM و برای کرمان مدل IPSL مشابه‌ترین الگو



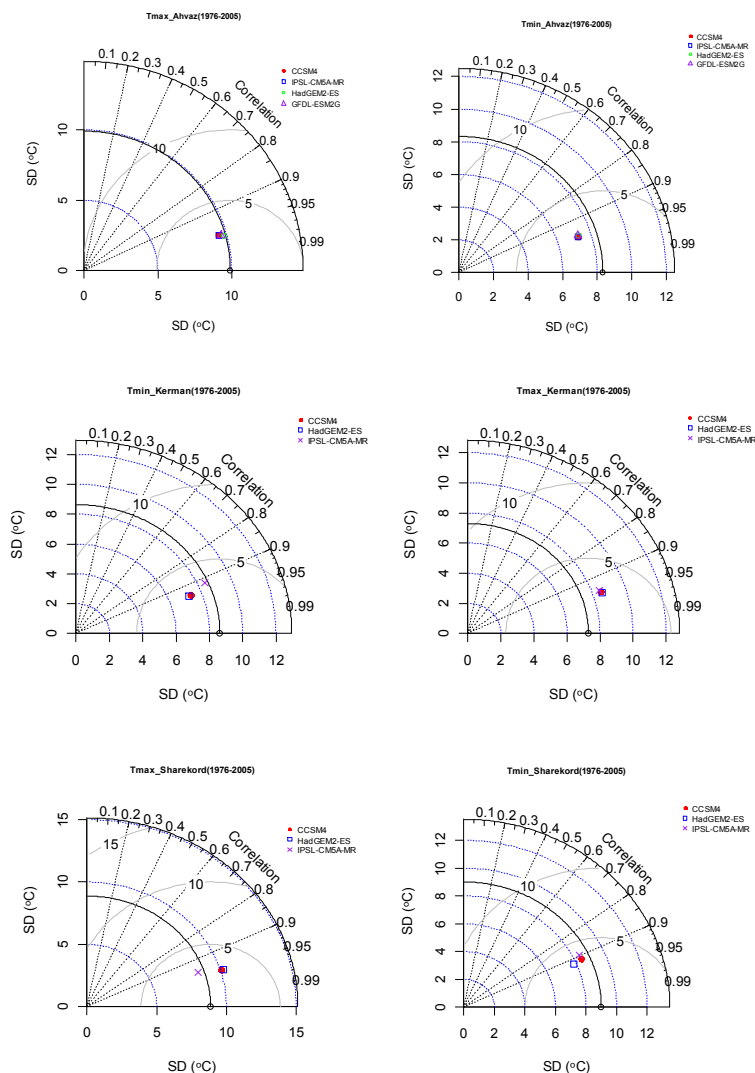
شکل ۴- بررسی CDF توزیع گاما بارش سالانه مشاهداتی چهار ایستگاه در مقایسه با مقادیر شبیه سازی شده سه مدل اقلیمی طی دوره

پایه

بین الگوی ایستگاهی و مدل‌های اقلیمی متناسب با فاصله نقطه تا دایره توخالی بر روی محور X (به عنوان داده ای ایستگاهی) می باشد. در دو ایستگاه اهواز و کرمان مقدار ضریب همبستگی برای هر دو متغیر بیش از ۹۵ درصد بدست آمد. در شهرکرد این مقدار برای دمای کمینه ۹۰٪ محاسبه شد. بیشترین مقدار RMSE نیز برای این متغیر در شهرکرد بدست آمد. مدل IPSL در این ایستگاه، توانمندی بیشتری در شبیه سازی دمای کمینه داراست. در ایستگاه کرمان، مدل IPSL مهارت کمتری در شبیه سازی دمای کمینه دارد (شکل ۵).

دما

با توجه به امکان بررسی سه معیار دقت مرکزی بطور همزمان در نمودار تیلور، از این ابزار، برای بررسی میزان انطباق الگوهای دمای ماهانه مدل‌های اقلیمی با داده های مشاهداتی نقطه ای (ایستگاهی) استفاده شد. در شکل ۵ نمودار تیلور مربوط میانگین ماهانه دمای بیشینه و کمینه هر ایستگاه آمده است. دمای مشاهداتی با دایره توخالی روی محور X و دمای مدل‌های منتخب با شکل‌های هندسی نشان داده شده است. در نمودار تیلور، تفاوت میانگین مربعات خطا



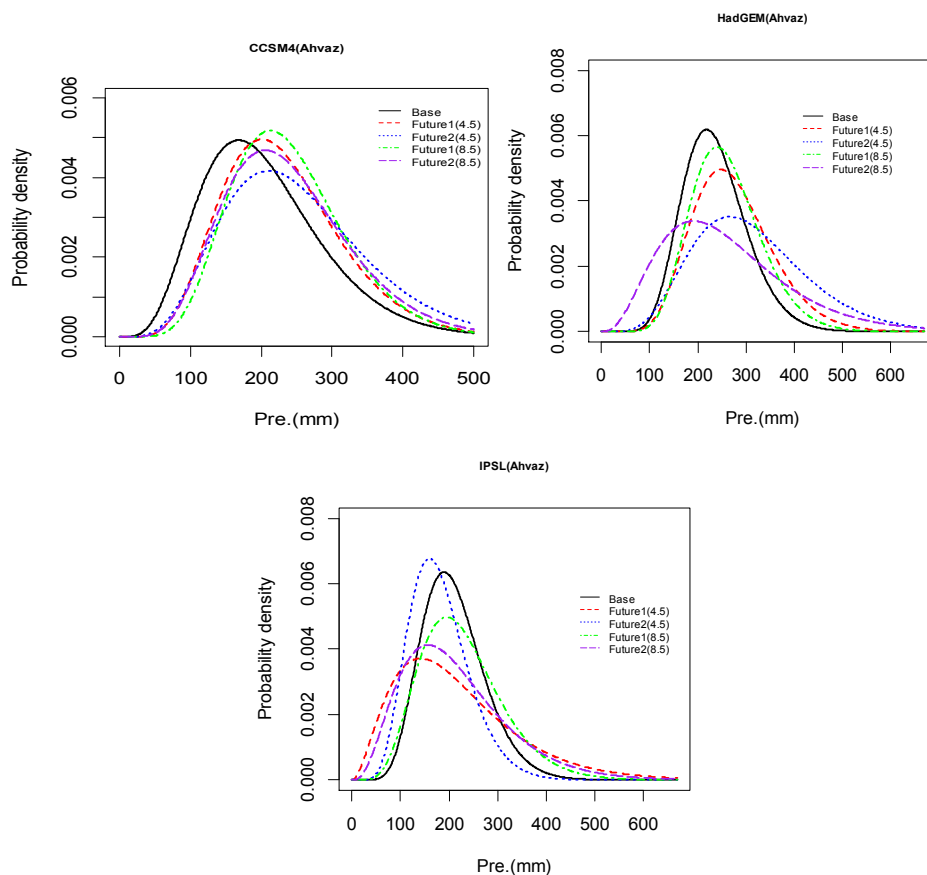
شکل ۵- مقایسه میانگین دمای ماهانه کمینه و بیشینه مشاهداتی با مدل‌های اقلیمی در سه ایستگاه منتخب (۱۹۷۶-۲۰۰۵)

پیش‌نگری‌های بارش و دما برای دوره‌های آبی

۶ مشاهده می‌شود در ایستگاه اهواز، مدل CCSM4 برای دو دوره و تحت دو سناریو افزایش میانگین و نوسان پذیری بارش را نسبت به دوره پایه پیش‌بینی کرده است. در مدل HadGEM2 نوسان پذیری در هر چهار حالت افزایش می‌یابد. میانگین بارش دوره ۲۰۸۰-۲۰۵۱ تحت RCP8.5 کاهش و در سه مورد دیگر افزایش نشان می‌دهد. مدل IPSL، برای دوره آینده نزدیک تحت سناریوی ۴/۵ و آینده میانی تحت RCP8.5، کاهش بارش و نوسان پذیری را پیش‌بینی کرده است (افزایش فراوانی بارش‌های حدی). فراوانی بارش‌های سالانه بیش از ۴۰۰ میلی متر به جز در دوره آینده میانی و

بررسی دو متغیر دمای کمینه و بیشینه نشان داد این متغیرها در سه ایستگاه و طی دو دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۸۰) دارای روند افزایشی معنی‌دار می‌باشند. برای بررسی تغییرات مقادیر بارش برآوردی سه مدل اقلیمی برای دو دوره آبی تحت دو سناریو، از بررسی رفتار PDF توزیع گامای برازش یافته بر مقادیر بارش سالانه استفاده شده است. همانطور که در شکل

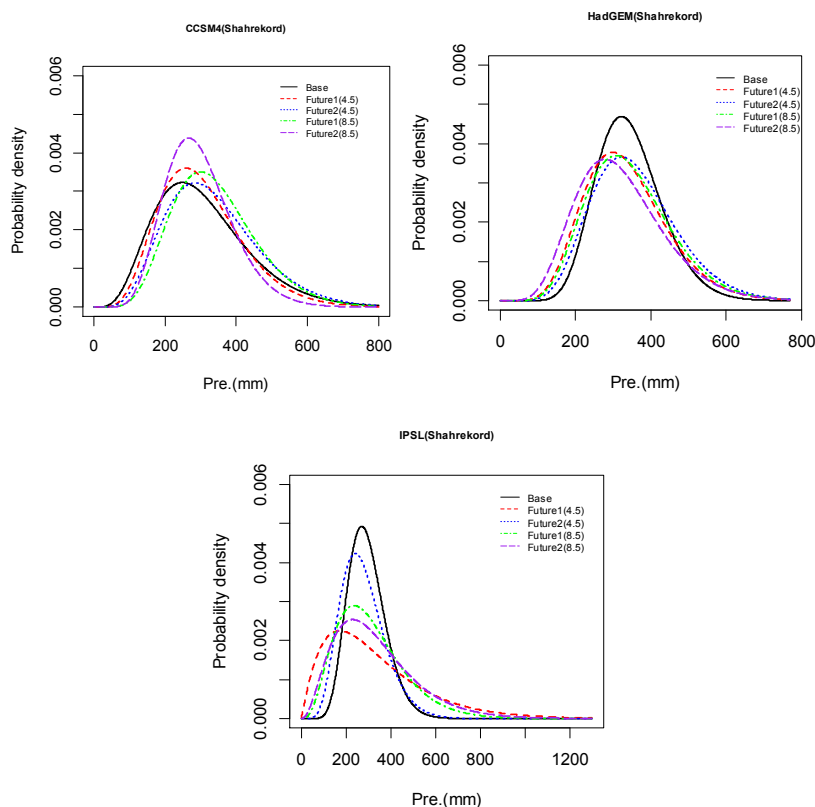
تحت سناریوی RCP4.5، در سه مدل منتخب و تحت دو سناریو برای دو دوره نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد.



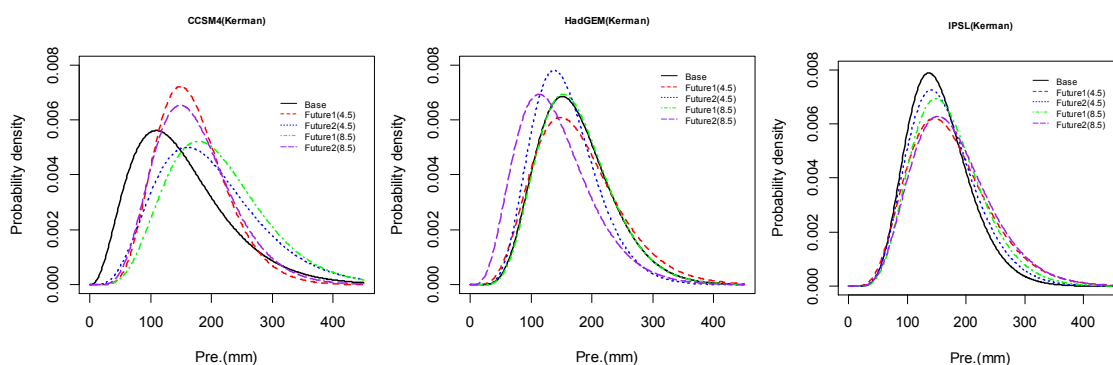
شکل ۶- PDF تابع گاما برازش یافته بر بارش سالانه سه مدل اقلیمی طی دوره پایه، دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۸۰) تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5- اهواز

وضعیت مورد بررسی (دو دوره تحت دو سناریو)، نوسان-پذیری بارش سالانه افزایش نشان می‌دهد. در مدل IPSL (بجز آینده میانی تحت RCP4.5 که کاهش بارش را نشان می‌دهد) با افزایش پارامتر مقیاس و کاهش پارامتر شکل، رخداد بارش سالانه بیش از ۶۵۰ و کمتر از ۲۰۰ میلی متر با فراوانی بیشتر نسبت به دوره پایه قابل انتظار خواهد بود که این امر به معنی افزایش فراوانی سال‌های پربارش و کم بارش نسبت به دوره پایه خواهد بود.

در ایستگاه شهرکرد، در مدل CCSM4، میانگین بارش سالانه طی دوره آینده میانی و نزدیک به ترتیب تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 افزایش می‌یابد. به جز دو مورد اخیر، هر سه مدل، افزایش نوسان‌پذیری و کاهش میانگین این متغیر را برای دوره‌های آتی نشان می‌دهند. در مدل HadGEM، کاهش میانگین بارش برای دوره ۲۰۸۰-۲۰۵۱ تحت RCP8.5 پیش‌بینی شده است. در هر چهار



شکل ۷- PDF تابع گاما برازش یافته بر بارش سالانه سه مدل اقلیمی طی دوره پایه، دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۸۰) تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5- شهرکرد



شکل ۸- PDF تابع گاما برازش یافته بر بارش سالانه سه مدل اقلیمی طی دوره پایه، دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) و آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۸۰) تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5- کرمان

در ایستگاه کرمان، مدل CCSM4 افزایش بارش را برای دو دوره و تحت دو سناریو و افزایش نوسان‌پذیری را برای دوره آینده میانی تحت سناریوی RCP8.5 و دوره آینده نزدیک تحت سناریوی RCP4.5 پیش‌بینی کرده است. در

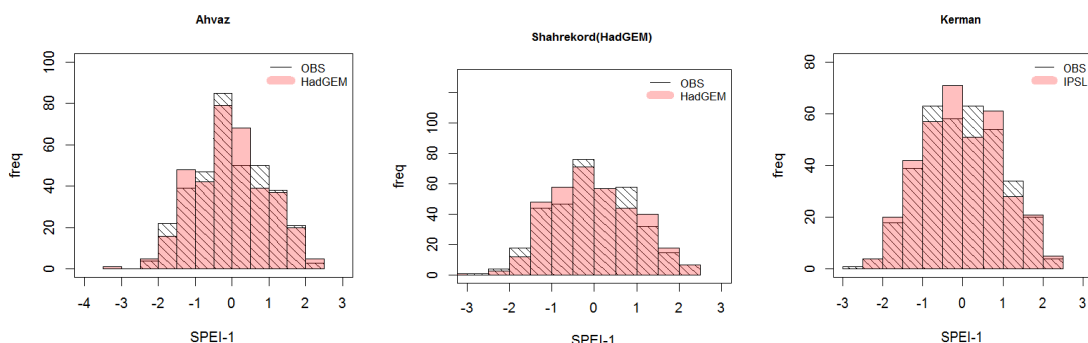
سالانه مدل‌های اقلیمی مورد بررسی، مدل HadGEM به منظور تحلیل خشکسالی در دو ایستگاه اهواز و شهرکرد و مدل IPSL برای ایستگاه کرمان انتخاب شد. در شکل ۹ فراوانی نمایه SPEI-1 مشاهداتی در طبقات جدول (۳) با سه مدل منتخب طی دوره پایه مقایسه شده است. اگر چه تفاوت‌هایی در فراوانی طبقات این نمایه بین مقادیر مشاهداتی و مدل وجود دارد با این وجود، این سه مدل با نمایش الگوی مشابه با مقادیر مشاهداتی، دارای مهارت خوبی در شبیه‌سازی طبقات و فراوانی مقادیر متوسط ($-2 < \text{SPEI} \leq -1$) و شدید (-) ($3 < \text{SPEI} \leq 2$) این نمایه در سه ایستگاه می‌باشند. در ایستگاه اهواز مدل منتخب، مقادیر نمایه $\text{SPEI} \leq -3$ نیز برآورد شده است که در مقادیر مشاهداتی این طبقه مشاهده نمی‌شود.

مدل HadGEM کاهش بارش در دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰ تحت دو سناریو پیش‌بینی شده است. تحت دو سناریو، رفتار PDF توزیع گامای بارش دوره آینده نزدیک، مشابه دوره پایه خواهد بود. افزایش نوسان‌پذیری در مدل IPSL برای چهار حالت مورد بررسی پیش‌بینی شده است.

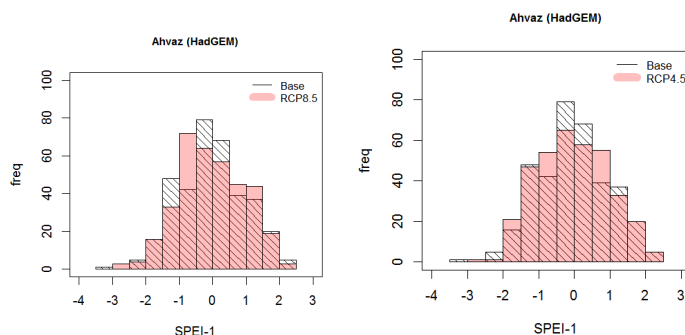
بررسی توانمندی مدل‌های منتخب اقلیمی در

نمایش فراوانی و توزیع طبقات SPEI-1

بدین منظور، مقدار ماهانه نمایه (SPEI-1) با استفاده از داده‌های بارش، دمای کمینه و بیشینه سه مدل منتخب برای دوره پایه و دوره آتی (آینده نزدیک) تحت دو سناریوی RCP8.5 و RCP4.6 محاسبه شد. با توجه به نتایج مربوط به مقایسه دمای شبیه‌سازی شده توسط سه مدل اقلیمی و ارزیابی رفتارهای احتمالاتی و مقادیر کمی دو سری بارش ماهانه و



شکل ۹- مقایسه فراوانی و توزیع طبقات SPEI-1 مدل‌های منتخب با مقادیر مشاهداتی در سه ایستگاه طی دوره پایه



شکل ۱۰- فراوانی طبقات نمایه SPEI-1 طی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ در ایستگاه اهواز بر اساس پرونداد مدل اقلیمی منتخب تحت دو سناریوی و داشت تابشی

پیش‌نگری ویژگی‌های خشکسالی بر مبنای

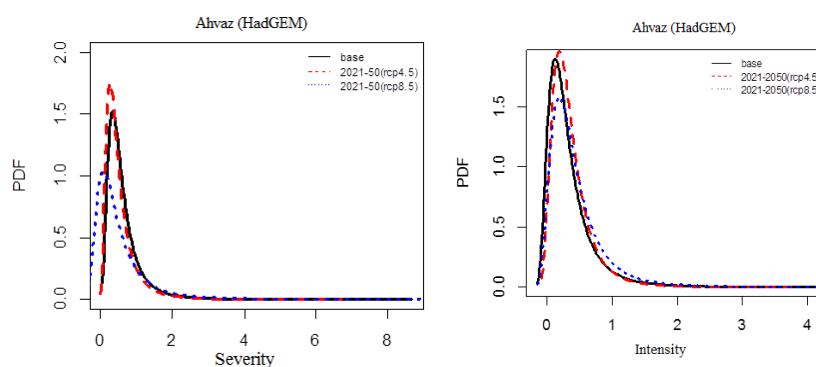
SPEI-1

اهواز

در این بخش، از سری SPEI-1 محاسبه شده با برونداد مدل اقلیمی منتخب (HadGEM) برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5، مقادیر شدت، سختی و مدت رویدادهای خشکسالی با آستانه $SPEI \leq -1$ استخراج شد. در شکل ۱۰ مقایسه‌ای بین فراوانی طبقات SPEI-1 پیش‌نگری شده برای دوره آبی در ایستگاه اهواز تحت دو سناریوی منتخب در مقایسه با دوره پایه مدل آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تحت سناریوی RCP4.5، فراوانی نمایه در طبقه متوسط ($-2 < SPEI \leq -1$) با ۶۴ رویداد بیش از دوره پایه (۵۸ رویداد) می‌باشد. تحت سناریوی RCP8.5، طبقه $-3 < SPEI \leq -2.5$ دارای فراوانی ۳ است در حالیکه در دوره پایه این طبقه دارای فراوانی ۱ می‌باشد. تحت دو سناریو، مقادیر نمایه در طبقه خیلی شدید ($SPEI \leq -3$)، طی دوره آبی رخ نخواهد داد.

در ادامه، تابع توزیع GEV بر مقادیر شدت و سختی، برازش و پارامترهای توزیع دست آمد. شکل ۱۱ PDF توزیع GEV در اقلیم حاضر و اقلیم آبی (۲۰۲۱-۲۰۵۰) این ایستگاه را نشان می‌دهد. همانطور که ذکر شد در این پژوهش، مقادیر مطلق شدت و سختی خشکسالی در نظر گرفته شده که هر دو این متغیرها دارای دم راست سنگین بوده که نشان دهنده‌ی تابعیت این دو متغیر از تابع نوع II توزیع GEV (تابع Frechet) می‌باشد.

بررسی PDF توزیع GEV شدت نشان داد تحت دو سناریوی مورد بررسی، در مورد شدت رویدادهای خشکسالی، با افزایش پارامتر مقیاس نسبت به دوره پایه، نوسان‌پذیری شدت طی دوره آبی افزایش می‌یابد. تحت سناریوی RCP8.5، با کاهش پارامتر مکان، میانگین این متغیر طی دوره آبی کاهش خواهد یافت. با افزایش پارامتر شکل، دم راست سنگین‌تر شده و فراوانی خشکسالی‌های شدید تحت این سناریو نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱- پیش‌نگری PDF توزیع GEV برای شدت (سمت چپ) و سختی (سمت راست) SPEI-1 بر اساس برونداد مدل

HadGEM در ایستگاه اهواز

توزیع GEV برازش یافته بر سختی، به ترتیب میانگین و احتمال رخداد خشکسالی‌های با سختی بالا افزایش خواهد

همانطور که در شکل ۱۱ (سمت راست) مشاهده می‌شود تحت سناریوی RCP8.5 با افزایش پارامتر مکان و شکل

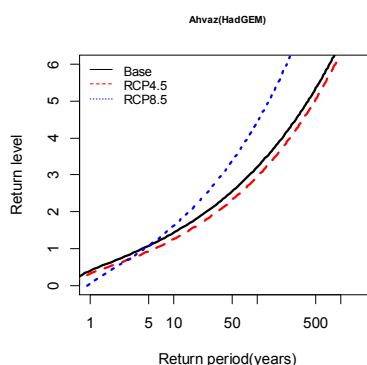
در سناریوی RCP4.5، شدت ۲/۴ برآورد شده است که نشان دهنده کاهش این ویژگی تحت سناریوی مذکور می‌باشد.

شهرکرد

همانطور که ذکر شد HadGEM بیشترین توانمندی را در شبیه‌سازی بارش و دما برای این ایستگاه داشته است لذا تحلیل فراوانی خشکسالی این ایستگاه نیز با استفاده از این مدل انجام شده است.

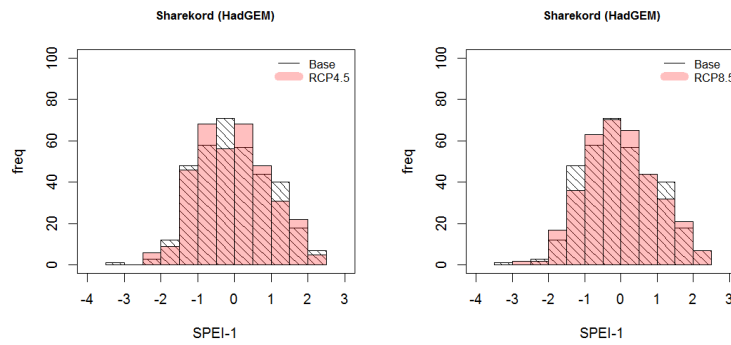
شکل ۱۳ نشان می‌دهد فراوانی طبقات $1 < SPEI < 2$ تحت سناریو RCP8.5 نسبت به دوره پایه کاهش و فراوانی طبقه $2 < SPEI < 3$ افزایش خواهد داشت. در مقابل فراوانی مقادیر شدید این نمایه تحت دو سناریو افزایش نشان می‌دهد. تغییرات PDF توزیع GEV برای دو ویژگی سختی (سمت راست) و شدت (سمت چپ) خشکسالی طی دوره‌ی آتی در شکل ۱۴ آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود دو پارامتر مکان و مقیاس توزیع GEV برازش یافته بر مقدار شدت خشکسالی‌هایی با آستانه‌ی $1 < SPEI < 2$ تحت دو سناریو افزایش خواهد یافت که نشان دهنده افزایش میانگین و نوسان‌پذیری شدت خواهد بود. همچنین فراوانی رویدادهای خشکسالی شدیدتر تحت سناریوی RCP8.5 افزایش خواهد یافت. در مورد سختی خشکسالی، با بزرگتر شدن پارامتر مکان تحت دو سناریو، میانگین سختی افزایش می‌یابد. تحت سناریوی RCP8.5، احتمال رخداد خشکسالی‌هایی با مقادیر بالاتر سختی، افزایش خواهد یافت. در این ایستگاه، سه پارامتر توزیع GEV افزایش نشان می‌دهند.

یافت که این امر احتمالاً یا به دلیل ناهنجاری‌های بارش یا تداوم بیشتر دما خواهد بود. به منظور تحلیل فراوانی خشکسالی و برآورد دوره‌های بازگشت با استفاده از رابطه ۳، دوره بازگشت به ازای مقادیر متفاوت شدت خشکسالی برای دو دوره پایه و آتی محاسبه و نمودار مربوطه ترسیم شد. در شکل ۱۲ ارتباط بین دوره بازگشت تک متغیره شدت خشکسالی با آستانه $1 < SPEI < 2$ برای دوره آینده تحت دو سناریو با دوره پایه برای ایستگاه اهواز آمده است.

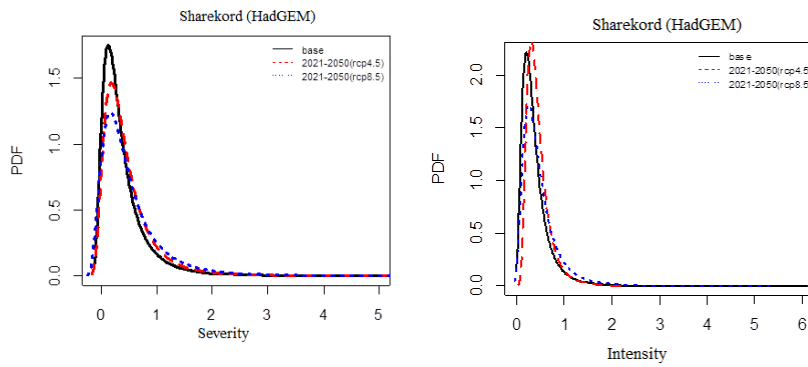


شکل ۱۲- دوره بازگشت خشکسالی حدی به ازای مقادیر متفاوت شدت

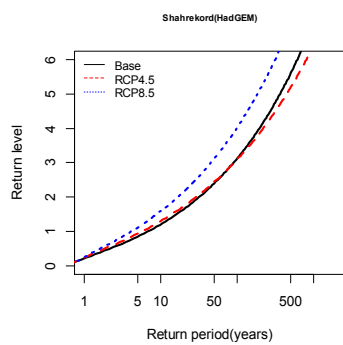
محاسبات نشان داد به ازای دوره‌های بازگشت یکسان (بیش از ۵ سال)، مقادیر شدت خشکسالی تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه تفاوت قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت که این اختلاف با افزایش دوره بازگشت، افزایش می‌یابد. به عنوان مثال برای دوره بازگشت ۵۰ سال، شدت این بلیه تحت سناریوی RCP8.5، ۳/۴ خواهد بود در حالیکه دوره پایه دارای شدت ۲/۶ می‌باشد. برای این دوره بازگشت،



شکل ۱۳ - فراوانی طبقات SPEI-1 طی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ برای ایستگاه شهر کرد بر اساس برونداد مدل اقلیمی منتخب تحت دو سناریوی وداشت تابشی



بر اساس برونداد مدل SPEI-1 برای شدت (سمت چپ) و سختی (سمت راست) GEV توزیع PDF شکل ۱۴- پیش‌نگری در ایستگاه شهر کرد HadGEM



شکل ۱۵- دوره بازگشت خشکسالی حدی به ازای مقادیر متفاوت شدت رویدادها (شهر کرد)

همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود به ازای دوره‌های بازگشت یکسان، شدت رویدادهای خشکسالی تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال، برای دوره بازگشت ۱۰ ساله، شدت خشکسالی طی دوره پایه ۱/۲ و طی دوره آبی تحت سناریوی RCP8.5 به میزان ۱/۶ برآورد شده است. تحت سناریوی RCP4.5، مقدار شدت خشکسالی به ازای دوره‌های بازگشت کمتر از ۲۵ سال افزایش و به ازای دوره‌های بازگشت بیش از ۱۰۰ سال، کاهش نشان می‌دهد.

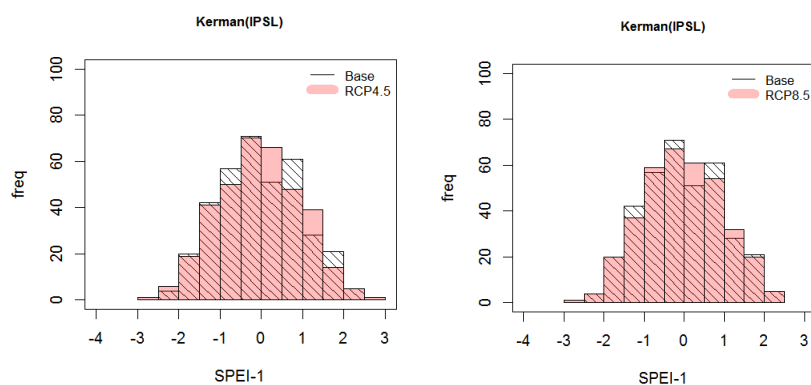
RCP8.5). فراوانی این نمایه در طبقه شدید $(-3 < SPEI \leq -2)$ تحت سناریو RCP4.5 نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد.

غیر PDF توزیع GEV طی دوره آبی بر اساس برونداد این مدل نیز در شکل ۱۷ آمده است. رفتار تابع چگالی احتمال توزیع GEV برای شدت خشکسالی تحت سناریوی RCP4.5، کاهش تغییرپذیری و میانگین و افزایش پارامتر شکل را نشان داد که به معنی افزایش فراوانی رویدادهای حادی خشکسالی نسبت به دوره پایه می‌باشد. تحت سناریوی دیگر، میانگین شدت افزایش یافته است. رفتار PDF توزیع GEV مربوط به سختی خشکسالی نشان از افزایش پارامتر شکل تحت سناریوی RCP4.5 دارد. در سناریوی RCP8.5، پارامتر مکان افزایش یافته است که به معنی جابجایی میانگین به سمت مقادیر بالاتر سختی طی دوره آبی می‌باشد.

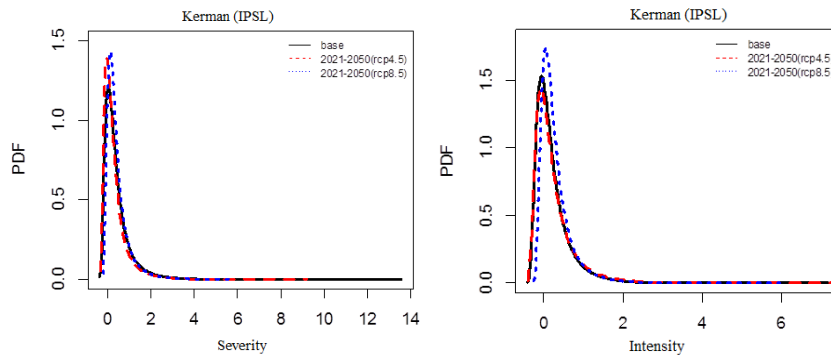
همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود به ازای دوره‌های بازگشت یکسان، شدت رویدادهای خشکسالی تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال، برای دوره بازگشت ۱۰ ساله، شدت خشکسالی طی دوره پایه ۱/۲ و طی دوره آبی تحت سناریوی RCP8.5 به میزان ۱/۶ برآورد شده است. تحت سناریوی RCP4.5، مقدار شدت خشکسالی به ازای دوره‌های بازگشت کمتر از ۲۵ سال افزایش و به ازای دوره‌های بازگشت بیش از ۱۰۰ سال، کاهش نشان می‌دهد.

کرمان

در شکل ۱۶ فراوانی طبقات SPEI-1 محاسبه شده با برونداد مدل IPSL نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود الگوی فراوانی دوره‌های تر و خشک طی دوره آبی با دوره پایه مشابه است. مقایسه فراوانی $-1 < SPEI \leq -2$ تحت دو سناریوی با دوره پایه نشان می‌دهد طبقات متوسط این نمایه، از فراوانی کمتری برخوردار خواهند بود (بویژه تحت



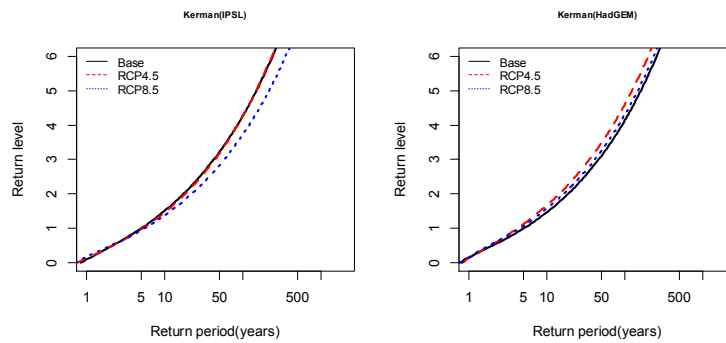
شکل ۱۶ - فراوانی طبقات SPEI-1 طی ۲۰۲۱-۲۰۵۰ برای ایستگاه کرمان بر اساس برونداد مدل اقلیمی منتخب تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5



شکل ۱۷- پیش‌نگری PDF توزیع GEV برای شدت SPEI-1 بر اساس برونداد مدل IPSL (ایستگاه کرمان)

ضعیف‌تر نسبت به دوره پایه (بیش از ۱۰ سال) وجود دارد. به عنوان مثال شدت رویداد خشکسالی با دوره بازگشت ۵۰ سال تحت سناریوی RCP8.5 ۲/۸ بدست آمد در حالیکه برای دوره پایه ۳/۳ بوده است. با توجه به این موضوع، تحلیل فراوانی با استفاده از شدت محاسبه شده با مدل HadGEM (همانند دو ایستگاه دیگر) نیز انجام شد که نتیجه مشابهی بدست آمد.

در این ایستگاه، همانطور که در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود شدت خشکسالی در مدل IPSL تحت سناریوی RCP8.5 برای دوره‌های بازگشت کمتر از ۱۰ سال نسبت به دوره پایه اندکی افزایش و به ازای دوره‌های بازگشت بیش از آن، کاهش خواهد یافت. بر این اساس، بر خلاف دو ایستگاه دیگر، برای دوره آینده نزدیک، تحت سناریوی RCP8.5، به ازای دوره‌های بازگشت یکسان، انتظار بروز خشکسالی‌های حدی



شکل ۱۸- دوره بازگشت خشکسالی حدی به ازای مقادیر متفاوت شدت رویدادها (کرمان)

نتیجه‌گیری

و هم افزایش خواهند داشت. تنها در ایستگاه شهر کرد تحت سناریوی RCP8.5 سه پارامتر برای شدت و سختی خشکسالی نسبت به دوره پایه افزایش نشان داد. بر اساس پژوهش انجام شده و بر خلاف باور عمومیت یافته ناشی از بارش‌های حدی اواخر سال ۱۳۹۷ و اوایل ۱۳۹۸ و همچنین بارش‌های رخ داده در سال ۱۳۹۹، اگر روند فعلی انتشار گازهای گلخانه‌ای (فرض شده در سناریوی RCP8.5) ادامه یابد در ایستگاه اهواز، مقادیر SPEI-1 متوسط تا شدید (به ترتیب تحت سناریوی RCP4.5 و RCP8.5) با فراوانی بیشتری طی دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) رخ خواهند داد. که این امر به رغم افزایش بارش پیش‌بینی شده، با افزایش دما مرتبط خواهد بود.

پیشنهاد می‌شود پژوهش مشابه با برون‌داد مدل‌های اقلیمی CMIP6 و مقایسه نتایج با پژوهش حاضر انجام شود. همچنین پیش‌نگری‌هایی تحت دو سناریوی RCP2.6 و RCP6.5 که به ترتیب با فرض‌های بیشترین حد محدودیت انتشار گازهای گلخانه‌ای با لحاظ تاب آوری زمین و تحقق حدودی کاهش گازهای گلخانه‌ای طراحی شده اند نیز صورت پذیرد. به منظور کاهش عدم قطعیت نیز پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های مشابه با تعداد بیشتر مدل‌های اقلیمی به صورت ایستگاهی و منطقه‌ای انجام شود.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از نتایج طرح "تغییرات آبی مقادیر حدی خشکسالی‌ها تحت سناریوهای RCP در چند نمونه‌ی اقلیمی ایران" می‌باشد که طی سال ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در پژوهشکده اقلیم‌شناسی و تغییر اقلیم انجام شده است. بدینوسیله از این پژوهشکده قدردانی می‌شود.

منابع

1. Asakareh, H. (2012). Frequency Distribution Change of Extreme precipitation in Zanjan City, Geography and

با توجه به افزایش رویدادهای حدی در اقلیم در حال تغییر، در این پژوهش، با استفاده از برون‌داد مدل‌های اقلیمی، پیش‌نگری میزان تغییر دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ویژگی‌های خشکسالی برای چهار ایستگاه بندرانزلی، کرمان، اهواز و شهرکرد (به ترتیب نماینده اقلیم بسیار مرطوب معتدل، اقلیم خشک سرد، اقلیم خشک گرم و اقلیم نیمه خشک فراسرد) انجام شد. تحلیل فراوانی ویژگی‌های خشکسالی (شدت و سختی) با برازش توزیع GEV بر این متغیرها و تخمین دوره‌های بازگشت صورت گرفت. نتایج ارزیابی مدل‌های اقلیمی در نمونه‌های اقلیمی ایران نشان داد این مدل‌ها از مهارت کافی در شبیه‌سازی بارش برای بندر انزلی برخوردار نیستند لذا از بررسی این ایستگاه صرف نظر شد. پیش‌نگری‌ها نشان داد ویژگی‌های بارش از جمله نوسان پذیری و میانگین بارش در دو ایستگاه اهواز و کرمان طی دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ افزایش می‌یابد. بر اساس تحلیل فراوانی، در دو ایستگاه شهرکرد و اهواز همانطور که انتظار می‌رود به ازای دوره‌های بازگشت یکسان، شدت خشکسالی تحت سناریوی RCP8.5 نسبت به سناریوی دیگر افزایش یابد. خورانی و جمالی (۱۳۹۵) نیز در پژوهش خود نشان دادند شدت خشکسالی (بجز سناریو B1) در ایستگاه شهرکرد طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۱۱ افزایش خواهد یافت. در کرمان به رغم افزایش بارش پیش‌بینی شده در مدل IPLS، شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه تغییری نخواهد داشت. در این ایستگاه، فراوانی طبقه شدید SPEI-1 تحت سناریوی RCP4.5 نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد. نتایج تحلیل فراوانی نشان داد، شدت خشکسالی به ازای دوره‌های بازگشت یکسان تحت سناریوی RCP8.5 کاهش خواهد داشت. بررسی نحوه تغییر پارامترهای توزیع GEV برازش یافته بر مقادیر شدت و سختی خشکسالی‌هایی با آستانه $SPEI \leq -1$ ، نشان داد سه پارامتر مقیاس، مکان و شکل در سه ایستگاه تحت دو سناریو نسبت به دوره پایه هم کاهش

- Combining Multi Model Climate Projections, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
13. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
 14. IPCC. *Climate Change*. (2014). Synthesis report. In *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; IPCC: Geneva, Switzerland, 2014.
 15. Katz, R. W. (1999). Extreme value theory for precipitation: sensitivity analysis for climate change. *Advances in water resources*, 23(2), 133-139.
 16. Khorani, A., Jamali, Z. (2016). Effects of Climate Change on Drought Duration and Severity in Arid and Semi-arid Stations (Bandarabbassand Shahrekord), Based on HADCM3 Model, Vol.20, No. 57, pp. 115-131.
 17. Kim, B. S., Chang, I. G., Sung, J. H., & Han, H. J. (2016). Projection in future drought hazard of South Korea based on RCP climate change scenario 8.5 using SPEI. *Advances in Meteorology*, 2016.
 18. Kouhi, M., 2017, *Drought Analysis under Climate Change using Copula Functions*, Ph.D. Dissertation, Ferdowsi University of Mashad.
 19. McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to Time scales, Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, 179-184, 17-22.
 20. Mozaffari, Gh. Shafiei, Sh. (2017). *Temporal-Spatial Analysis of Rainfall Days Frequency Trend of Western Iran Regions*, Vol.13, No. 52, pp. 77-94.
 21. Otkin, J. A., Svoboda, M., Hunt, E. D., Ford, T. W., Anderson, M. C., Hain, C., & Basara, J. B. (2018). Flash droughts: a review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(5), 911-919.
 22. Reclamation. (2013). *Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate Projections: Release of Downscaled CMIP5 Climate Projections, Comparison with Preceding Information, and Summary of User Needs*. U.S. Environmental Planning, Vol. 23, No.1, pp. 51-66.
 2. Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, I., & Angulo-Martínez, M. (2009). A global dataset of multiscalar drought indices (SPI and SPEI). In 9th EMS Annual Meeting, 9th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) Abstracts, held Sept. 28-Oct. 2, 2009 in Toulouse, France. <http://meetings.copernicus.org/ems2009/>, id. EMS2009-93..
 3. Burke, E. J., Perry, R. H., & Brown, S. J. (2010). An extreme value analysis of UK drought and projections of change in the future. *Journal of Hydrology*, 388(1-2), 131-143.
 4. Dai, A. (2011). Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900-2008. *Journal of Geophysical Research*, 116, D12115.
 5. Dai, A. (2013). Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 3: 52-58.
 6. Dai, A. and Zhao T. (2016). Uncertainties in historical changes and future projections of drought. Part I: estimates of historical drought changes, *Clim. Change*, published online, pp 1-15.
 7. Fisher, R. A., & Tippett, L. H. C. (1928, April). Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. In *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 24, No. 2, pp. 180-190.
 8. Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Pablo Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., ... & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010-2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation.
 9. Ge, Y., Cai, X., Zhu, T., Ringler, C. (2016). Drought frequency change: An assessment in northern India palins. *Agricultural Water Management*, 176: 111-121.
 10. Hargreaves G. H., Samani, Z. A. (1982). Estimating Potential Evapotranspiration, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108, pp 225-230.
 11. IPCC (2001) *Climate change 2001: the scientific basis*. World Meteorological Organization, Geneva, p 883
 12. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2010). *Meeting Report, IPCC Expert Meeting on Assessing and*

- hindsight on foresight. WCDMP, 63:11075-6.
33. Zahedianfar, F., 2014, Frequency Analysis of Flood and Meteorological Drought base on Extreme Value Theory, M.Sc. Dissertation, Gorgan University of Agricultural Science and Natural Resources.
 34. Zamani Sabzi, M., Saeeddi, A., Hassani, M. (2013). Debt Capacity ,Securities Market Approach (Evidence from Tehran Stock Exchange), Quarterly Journal of Securities Exchange, Journal of Geography and Planning, Vol. 12, NO. 46, pp. 101-126. Doi: 10.22034/jse.2019.111157.
 35. Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... & Uddin, M. J. (2020). Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. Atmospheric Research, 246, 105111.
 - Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado, 116 p., available at: http://gdo-dcp.ucllnl.org/downscaled_cmip_projection_s/techmemo/downscaled_climate.pdf.
 23. Salajeghe, A., Mesbahzade, T., Soleimani Sardoo, F., Alipour, N. (2018). Assessment of Hydrological Drought Using Constand Treshold Level, Iranian Journal of Watershed Management science, Vol. 11, No. 39.
 24. Sheffield, J., Wood, E. F., Roderick, M. L. (2010). Little change in global drought over the past 60 years, Nature, 491, 435-440.
 25. Shiau, J.T. (2006). Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. Water Resources Management 20, 795-815.
 26. Sousa, P.M., Trigo, R. M., Aizpurua, P., Nieto, R., Gimeno, L., Garcia-Herrera, R. (2011). Trends and extremes of drought indices throughout the 20th century in the Mediterranean, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 33-51. doi:10.5194/nhess-11-33-2011.
 27. Taylor, K.E., Stouffer, R.J., Meehl, G.A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. Bulletin of the American Meteorological Society. 93: 485-498.
 28. Touma, D., Ashfaq, M., Nayak, M., Kao, S.C., Diffenbaugh, N.S. (2014). A Multi-model and Multi-index Evaluation of Drought Characteristics in the 21st Century, Journal of Hydrology, In Press. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.12.011.
 29. Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought, Nat. Clim. Change, 4, pp 17-22.
 30. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of climate, 23(7), 1696-1718.
 31. WMO. Experts agree on a universal drought index to cope with climate risks. WMO Press Release. (2009). No. 872. Available online: http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/agm/meetings/wies09/documents/872_en.pdf (accessed on 17 July 2018).
 32. World Meteorological Organization. (2011). Weather extremes in a changing climate: