

Projection of summer monsoon rains in Southeast Iran based on Ensembl model

Mohammad Reza Salari Fanoodi¹, Mahmood Khosravi^{2*}, Taghi Tavousi³,
Mohsen Hamidianpour⁴

¹PhD student of Climatology, University of Sistan and Baluchestan, Daneshgah Ave., Zahedan, Iran

²Professor Dept. of Climatology, Faculty of Geography, University of Sistan and Baluchestan, Daneshgah Ave. Zahedan, Iran, Email: khosravi@gep.usb.ac.ir

³Professor Dept. of Climatology, Faculty of Geography, University of Sistan and Baluchestan, Daneshgah Ave., Zahedan, Iran.

⁴Associate Professor Dept. of Climatology, Faculty of Geography, University of Sistan and Baluchestan, Daneshgah Ave., Zahedan, Iran

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2023-3-26
Accepted: 2023-7-27

Keywords:
Forecasting
Modeling
climate change
global warming
artificial neural network

ABSTRACT

Projection of summer monsoon rains in Southeast Iran based on Ensemble model the precipitation factor has a variable and random nature and has a different behavior in terms of space and time. Therefore, the prediction of precipitation has more uncertainty compared to other meteorological variables. In the current study, the data output of Cordex database and CMIP5 models were used using the neural network method to reduce the uncertainty and estimate precipitation properly. The results showed that due to the high correlation of temperature, humidity and air pressure with precipitation, the use of these variables is beneficial in reducing the uncertainty of precipitation forecast. In addition, the non-linear method of artificial neural networks can be used to bias the rainfall data of Cordex database and CMIP5 to forecast the rainfall in the southeast of the country. Another result of this research is the increasing trend of rainfall in the southeast of Iran, especially in the coastal areas. This can be considered as a result of the increase in the level under the influence of rains affected or simultaneous with the southwest monsoon of India. The increasing trend of precipitation in the southern coasts is also related to the increase in the storage capacity of moisture content. The interannual variability of India's monsoon rainfall also shows a steady positive trend under continued global warming. Since both the increase in the duration of monsoon rains and the increase in interannual variability in the future are seen in most models, we can be confident in these predicted trends. Indian summer monsoon rainfall is also predicted to be higher under global warming in the 2050s compared to the baseline.

Cite this article: Salari Fanoodi, M.R., Khosravi, M., Tavousi, T., Hamidianpour, M. (2023). Adaptive evaluation and comparison of SMDI, SPI and RDI drought indices in Zarghan Region, Fars Province. *Journal of the Climate Change Research*, 4 (14), 1-22.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2023.390406.1123



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال چهارم / شماره مسلسل چهاردهم / پاییز ۱۴۰۲ / صفحات: ۲۲-۱

پیش‌نمایی بارش‌های تابستانه مونسونی جنوب شرق ایران مبتنی بر مدل همدادی

محمدرضا سالاری فنودی^۱، محمود خسروی^{۲*}، تقی طاوسی^۳، محسن حمیدیان‌پور^۴

دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۱استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی (اقلیم‌شناسی)، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران، رایانامه: khosravi@gep.usb.ac.ir

^۲استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی (اقلیم‌شناسی)، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۳دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی (اقلیم‌شناسی)، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	عنصر بارش ماهیت متغیر و تصادفی دارد و به لحاظ مکانی و زمانی دارای رفتاری متفاوت است.
مقاله کامل علمی	لذا پیش‌نمایی بارش در مقایسه با دیگر متغیرهای هواشناسی دارای عدم قطعیت بیشتر است. در پژوهش حاضر برای کاهش عدم قطعیت و تخمین مناسب بارش، از برون‌داد داده‌های پایگاه کوردکس و مدل‌های CMIP5 از روش شبکه عصبی استفاده شد. نتایج نشان داد با توجه به همبستگی بالای دما، رطوبت و فشار هوا با بارش، کاربست این متغیرها در کاهش عدم قطعیت پیش‌نمای بارش سودمند است. ضمن اینکه می‌توان از روش غیرخطی شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت ارباب سازی داده‌های بارش پایگاه کوردکس و CMIP5 جهت آینده‌نگری بارش در جنوب شرق کشور استفاده کرد. از دیگر نتایج این پژوهش روند افزایشی بارش‌های جنوب شرق ایران به‌ویژه نواحی ساحلی می‌باشد. این امر را می‌توان ناشی از افزایش سطح تحت تأثیر بارش‌های متأثر یا هم‌زمان با مونسون جنوب غرب هند دانست. روند افزایشی بارش در سواحل جنوبی بی‌ارتباط با افزایش ظرفیت نگهداشت محتوای رطوبتی نیز نمی‌باشد. تغییرپذیری بین بارش سالانه باران‌های موسمی هند نیز نشان‌دهنده یک‌روند مثبت ثابت تحت گرمایش جهانی بی‌وقفه است. از آنجاکه هم افزایش مدت بارندگی‌های موسمی و هم افزایش تنوع بین سالی در آینده در بیشتر مدل‌ها دیده می‌شود، می‌توان به این روندهای پیش‌بینی‌شده اطمینان خاطر داد. همچنین پیش‌بینی می‌شود که بارش باران‌های مونسون تابستان هند در شرایط گرم شدن کره زمین در دهه ۲۰۵۰ در مقایسه با زمان پایه بیشتر باشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۶	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۵/۵	
واژه‌های کلیدی:	
پیش‌نگری	
مدل‌سازی	
تغییر اقلیم	
گرمایش جهانی	
شبکه عصبی مصنوعی	

استناد: سالاری فنودی، محمدرضا؛ خسروی، محمود؛ طاوسی، تقی؛ حمیدیان‌پور، محسن. (۱۴۰۲). ارزیابی و مقایسه تطبیقی شاخص‌های خشکسالی SMDI، SPI و RDI در منطقه زرقان، استان فارس. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴ (۱۴)، ۲۲-۱

Doi: 10.30488/CCR.2023.390406.1123

ناشر: دانشگاه گلستان

© نویسندگان.



مقدمه

گرمایش جهانی، تراز تابشی مثبت و افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو، شواهدی مبنی بر نفوذ انسان در سامانه آب‌وهوایی زمین را نشان می‌دهد. از سال ۱۹۵۱ تا سال ۲۰۱۰، افزایش گازهای گلخانه‌ای باعث گرم شدن سطح زمین بین ۰/۵ تا ۱/۳ درجه سلسیوس شد. ادامه انتشار گازهای گلخانه‌ای موجب گرم شدن بیشتر و دگرگونی در آرامش سامانه آب‌وهوایی خواهد شد (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۳).^۱ بیشترین احتمال بروز رویدادهای تند و سخت آب‌وهوایی در آینده در مناطق تحت تأثیر مونسون صورت می‌گیرد که از سیلاب‌های تند و خشک‌سالی تحت شرایط آب‌وهوایی گرم‌تر ناشی می‌شود (وانگ و همکاران، ۲۰۲۳). باین‌حال، واکنش مناطق گوناگون مونسونی به تغییرات اقلیم، ممکن است به دلیل موقعیت خشکی و اقیانوس، توپوگرافی و سامانه‌های اقلیمی منطقه‌ای متفاوت نیز باشد (ترنر و آنامالی، ۲۰۱۲).

باران‌های موسمی تابستان جنوب آسیا در بازه‌های زمانی کوتاه و طولانی بر زندگی بیش از یک میلیارد انسان تأثیر می‌گذارد. درک چگونگی دگرگونی باران‌های موسمی در مواجهه با گرمایش زمین یک چالش برای دانش اقلیم است. با افزایش جمعیت و فشار بر امنیت غذایی، درک چگونگی دگرگونی بارندگی باران در آینده یک چالش اساسی برای علم آب‌وهوا است (سپرر و همکاران، ۲۰۱۳).

اهمیت بادهای موسمی و چشم‌انداز آن برای پیش‌بینی اولیه در مطالعات متعددی در چند دهه گذشته مورد توجه قرار گرفته است. بارندگی دریافتی در طول دوره موسمی تابستان حدود ۸۰ درصد بارندگی سالانه است که فعالیت‌های کشاورزی تا حد زیادی به بارش خالص در این دوره وابسته است (موهانتی و همکاران، ۲۰۲۳). وابستگی شدید اجتماعی-اقتصادی به کشاورزی، هند را نسبت به تغییرات سال‌به‌سال بارش باران‌های موسمی حساس می‌کند، بنابراین

پیش‌بینی و درک چنین تغییراتی از ارزش بالایی برخوردار است (سونسون و همکاران، ۲۰۲۲).

مطالعات متعددی برای آزمایش مهارت پیش‌بینی GCMs ها برای پیش‌بینی فصلی موسمی تابستان هند انجام شده است و مشخص شد که مدل‌ها همبستگی ضعیفی با مشاهدات دارند (اقبال و همکاران، ۲۰۲۱؛ موهانتی و همکاران، ۲۰۲۱، رگان، ۲۰۱۹، ...). مهارت و دقت پیش‌بینی باران‌های موسمی با استفاده از یک مدل جهانی یک موضوع جدی و حتی نگران‌کننده بوده و به تناوب مطالعات موردی در شبیه‌سازی موسمی تابستانی با استفاده از GCMs به شکست ختم شده است. (گادگیل، ۲۰۰۵). به طور مثال کار و همکاران (۲۰۱۲) از داده‌های مرکز ملی پیش‌بینی آب‌وهوا در برد متوسط (NCMRWF)^۲ استفاده کرد و دریافت که مهارت مدل در محدوده کوتاه و دامنه متوسط رضایت‌بخش است؛ اما عملکرد مدل در مقیاس فصلی ضعیف بود (کار و همکاران، ۲۰۱۲). موهانتی و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای باهدف اثربخشی مدل منطقه محدود RegCM در تنظیم دقیق پیش‌بینی‌های مقیاس فصلی از مدل CFSv انجام دادند. نتایج نشان داد RegCM داد RegCM برای فصل موسمی ضعیف، عملکرد بسیار خوبی دارد، اما برای فصول نرمال و بیش از نرمال موسمی میزان بارندگی را بیش از حد برآورد می‌کند (موهانتی و همکاران، ۲۰۲۳).

اگرچه پیش‌بینی شروع موسمی تابستانی هند (ISM) برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی در شبه قاره هند از اهمیت حیاتی برخوردار است، اما پیش‌بینی پذیری بلندمدت (به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی فصلی) کمی مورد بررسی قرار گرفته و چالش‌برانگیز است. روش مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی توسط میتسویی و همکاران (۲۰۲۱) پیشنهاد شد که پیش‌بینی‌های بلندمدت مناسبی (بیش از ۳ ماه) از شروع ISM ارائه کرد. نتایج نشان داده که گرادیان دمای تروپوسفر نصف‌النهار در فصل

زمستان شمالی حاوی سیگنال‌های موردنیاز برای پیش‌بینی شروع ISM در فصل تابستان بعدی است (میتسویی و همکاران: ۲۰۲۱).

بادهای موسمی تابستان هند رفتارهای مشخصی در فاز اولیه و اواخر خود دارد. عوامل اقلیمی مؤثر نیز متفاوت است. ساها و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از یک شبکه عصبی عمیق رمزگذار خودکار انباشته (SADNN)^۱ نشان دادند که می‌توان میزان بارندگی کشور هند را پیش‌بینی نمود. همچنین موسمی دیررس را با دقت بالاتری نسبت به بارش‌های موسمی اولیه می‌توانند پیش‌بینی کرد (ساها و همکاران: ۲۰۱۶). سه رویکرد هوش مصنوعی شامل نزدیک‌ترین همسایه (KNN)^۳ شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۴ و ماشین یادگیری حدی (ELM)^۵ برای پیش‌بینی فصلی باران‌های موسمی تابستان (ژوئن - سپتامبر) و پس از موسمی (اکتبر - دسامبر) در مطالعه داش و همکاران (۲۰۱۸) استفاده شد. بارندگی از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ برای ایالت کرالای هند و عملکرد این تکنیک‌ها در مقایسه با مشاهدات ارزیابی شد. تمامی تکنیک‌های فوق به‌طور معقولی خوب عمل کرده و در مقایسه، تکنیک ELM عملکرد بهتری با حداقل میانگین درصد خطای مطلق برای باران‌های موسمی تابستان (۳/۰۷۵) و پس از موسمی (۳/۱۴۹) نسبت به تکنیک‌های KNN و ANN نشان داد (داش و همکاران، ۲۰۱۸). سین در سال ۲۰۱۸ مطالعه‌ای را برای تهیه مدلی بر اساس مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی برای پیش‌بینی بارندگی موسمی تابستان هند انجام داد. مجموعه داده‌های سری زمانی ISMR را برای مدل‌سازی به دو بخش طبقه‌بندی نمود: مجموعه داده‌های آموزشی (۱۹۶۰-۱۸۷۱) و مجموعه داده‌های آزمایشی (۲۰۱۴-۱۹۶۱). با توجه به ماهیت پویای ISMR، در مطالعه خود استفاده از سه فن، یعنی مجموعه فازی (Fuzzy)، آنتروپی (Entropy) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) را پیشنهاد کرد. بر اساس این

تکنیک‌ها، یک مدل جدید پیش‌بینی سری زمانی ISMR برای مقابله با ماهیت پویای ISMR طراحی شده است. این مدل با مجموعه داده‌های آموزشی و آزمایشی تأیید شدند (سین و همکاران، ۲۰۱۸). پیش‌بینی دقیق بادهای موسمی تابستانی آسیای شرقی (EASM)^۵ برای تولید وزندگی میلیاردها نفر مفید است. تانگ و همکاران (۲۰۲۱)، یک شبکه عصبی با پیچیدگی (CNN)^۶ و تابع انتقال برای پیش‌بینی EASM استفاده کرد. نتایج مدل رگرسیون CNN ساخته شده نشان داد که پیش‌بینی مدل رگرسیون CNN با مجموعه داده‌های تحلیل مجدد^۷، با ضریب همبستگی ۰/۷۸، بسیار سازگار است. مدل CNN می‌تواند EASM یک سال آینده را با سطح اطمینان بالای ۰/۹۵ پیش‌بینی کند (تانگ و همکاران: ۲۰۲۱). برای شبیه‌سازی بادهای موسمی زمستانی آسیای شرقی (EAWM) در زمستان ۲۰۱۱-۲۰۲۰، هسو و همکاران (۲۰۲۱) از مدل پیش‌بینی در مقیاس‌ها (MPAS) استفاده کردند. نتایج ارزیابی نشان داد که MPAS می‌تواند ویژگی‌های اقلیمی EAWM را با بایاس دمای مثبت سطحی ۰/۴٪ و بایاس بارش مثبت ۰/۹٪ در شرق آسیا به‌طور منطقی شبیه‌سازی کند (هسو و همکاران، ۲۰۲۱).

در معیشت، کشاورزی و محیط‌زیست جنوب شرق ایران به‌ویژه نواحی جنوبی، بارش‌های تابستانه مونسون نقش بسزایی دارد. اما این بارش‌ها در اثر تغییرات اقلیمی دچار نوسان شده‌اند. این نوسان سبب برهم خوردن نظم بارش‌ها و بالطبع معیشت و کشاورزی این مناطق شده است. از طرفی در زمینه منابع آب نیز نوسان این بارش‌ها باعث تغییر در ذخیره سدها شده که از این حیث برنامه ریزان دچار سردرگمی شده‌اند. پژوهش حاضر به دنبال آن است که با استفاده از داده‌های تخمینی و مدل‌سازی شده میزان عملکرد سامانه‌های مونسونی را شبیه‌سازی نموده و در مدیریت منابع آب و طرح‌های توسعه‌ای (از جمله طرح عظیم توسعه سواحل مکران) مدنظر قرار گیرد. بررسی

1. Stacked autoencoder deep neural network
3. K-nearest neighbor
3. Artificial neural network
4. Extreme learning machine

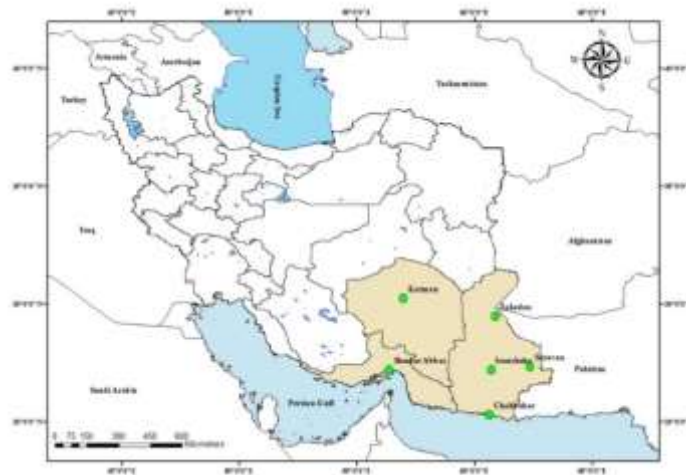
5. East Asian summer monsoon
6. Convolutional Neural Network
7. Reanalysis dataset

۱۳۹۹)، میزان نفوذپذیری سامانه مونسون برای کشور طی سال‌های آینده مدل‌سازی و بررسی‌شده و تغییرات دوره‌ای آن مورد تحلیل قرار گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

دلیل‌گزینش منطقه مورد مطالعه در جنوب شرق کشور ایران این بود که در دوره گرم سال در قلمرو نفوذ سامانه گرم و مرطوب موسمی هند قرار می‌گیرد و به سه استان سیستان و بلوچستان، هرمزگان و کرمان محدود می‌شود. موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی در شکل (۱) و مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد ناحیه جنوب شرق کشور محل اصلی اثرگذاری مونسون جنوب غرب هند می‌باشد با این وجود کمتر مورد توجه اقلیم‌شناسان قرار گرفته است و بررسی‌چندانی در خصوص آینده‌نگری و چشم‌انداز آن انجام نشده است. در همین راستا و اهمیت اطلاع از پیش‌بینی‌ها و آینده‌نگری رفتار این سامانه بزرگ‌مقیاس در منطقه جهت مدیریت و برنامه‌ریزی بهتر و حتی دگرگونی برخی نگرش‌ها، هدف از این تحقیق بررسی تغییرات رفتار سامانه مونسون در جنوب شرق ایران بر اساس سناریوهای دگرگونی اقلیم است. در این تحقیق پس از بررسی و ارزیابی خروجی مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی دوره تاریخی بازه ۲۰۱۴-۱۹۸۵ (سالاری و همکاران،



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد بررسی

جدول ۲- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مطالعه (منبع سازمان هواشناسی)

ردیف	ایستگاه	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)
۱	زاهدان	همدید	۶۰/۸۸	۲۹/۴۷	۱۳۷۰
۲	کرمان	همدید	۵۶/۹۷	۳۰/۲۵	۱۷۵۴
۳	بندرعباس	همدید	۵۶/۳۷	۲۷/۲۲	۹/۸
۴	چابهار	همدید	۶۰/۶۲	۲۵/۲۸	۸
۵	ایران‌شهر	همدید	۶۰/۷۰	۲۷/۲۰	۵۹۹/۱
۶	سراوان	همدید	۶۲/۳۳	۲۷/۳۳	۱۱۸۲

داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش از دو سری داده استفاده شد. سری اول: هفت پارامتر ماهانه دمای سطح، دمای سطح

۸۵۰ هکتوپاسکال، فشار سطح، ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال، رطوبت سطحی، رطوبت ویژه سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال، ساعات آفتابی در یک دوره آماری ۲۷

ساله (۲۰۰۵-۱۹۷۹) از داده‌های شبکه‌ای پایگاه کوردکس^۱ استخراج گردیدند و با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی به برآورد بارش ماهانه شش ایستگاه همدید زاهدان، کرمان، بندرعباس، چابهار، ایرانشهر و سراوان (سازمان هواشناسی، ۱۴۰۰) و داده‌های تاریخی پنج مدل اقلیمی CanESM2، MIROC5، GFDL_ESM2M، CSIRO_Mk و NorESM1_M پرداخته شد و در سری دوم: از پنج پارامتر ماهانه دمای سطح، فشار سطح، ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال، رطوبت سطحی، ساعات آفتابی در دوره زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۸ و با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی به برآورد بارش ماهانه شش ایستگاه همدید زاهدان، کرمان، بندرعباس، چابهار، ایرانشهر و سراوان در چهار مدل اقلیمی CSIRO_Mk، GFDL_ESM2M، MIROC5 و NorESM1_M بر اساس RCP4.5 و RCP8.5 پرداخته شد و در نهایت داده‌های بازتولیدی با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌منظور توانایی و ارزیابی صحت خروجی این مدل‌ها با یکدیگر با استفاده از میانگین مربعات خطا، مجذور میانگین مربعات خطا، میانگین مطلق خطا و ضریب همبستگی مقایسه شدند.

پس از بررسی عملکرد شبکه عصبی مصنوعی برای دوره تاریخی ۱۹۷۹-۲۰۰۵ و نتایج قابل قبول، برای دوره آماری ۱۳ ساله (۲۰۰۶-۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های غیر بارش (رطوبت، دما و ...) و همچنین بارش ماهیانه مشاهداتی، با کمک الگوریتم گرگ خاکستری (GWO)^۲ بررسی خروجی‌ها و تعیین بهترین مدل با بالاترین همبستگی و کمترین خطا میزان بارش پیش‌بینی و با بهترین شبکه (تعداد نرون ها و تعداد لایه پنهان)، همبستگی‌های مناسبی حاصل شد (سالاری و همکاران، ۱۴۰۰).

بهینه‌سازی، یکی از مسائل اصلی و حیاتی بشر محسوب می‌شود. از این رو الگوریتم‌های بهینه‌سازی گوناگونی با رویکرد فراابتکاری (Metaheuristics) معرفی شدند. الگوریتم GWO یکی از جدیدترین

الگوریتم‌های فرا ابتکاری به شمار می‌رود که توسط میرجلیلی و همکارانش (۲۰۱۴) ارائه شده است. این الگوریتم در گروه الگوریتم‌های هوش جمعی قرار دارد و مانند خیلی از الگوریتم‌های فراابتکاری دیگر الهام گرفته از طبیعت است و اساس آن ساختار سلسله‌مراتبی است که رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری را در زمان شکار، مدل‌سازی می‌کند (امامی و همکاران، ۱۳۹۷).

بدین منظور از داده‌های ایستگاهی و مدل‌سازی پایگاه کوردکس استفاده شد. از آنجایی که داده‌های پس از ۲۰۰۵ در پایگاه کوردکس به‌صورت پیش‌بینی در سناریوهای مختلف ارائه شده است داده‌های پارامترهای ذکر شده را دو سناریوی^۳ خوش‌بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5 در بانک‌های مجزا آماده کرده و با بارش مشاهداتی موجود تا سال ۲۰۱۸ مجدد موردبررسی و تهیه مدل شبکه عصبی مناسب با کمترین خطا و بیشترین همبستگی قرار داده شد. تا این سال داده‌های مشاهداتی بارش وجود داشته و امکان بررسی همبستگی آن با داده‌های خروجی شبکه عصبی وجود دارد تا بهترین مدل و حتی مناسب‌ترین سناریو در انواع سناریوهای RCP انتخاب شود. با استفاده از مدل شبکه عصبی تهیه شده و RCP مناسب (امکان بررسی هر دو RCP هم هست) و استفاده از داده‌های سناریوی پایگاه کوردکس برای سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ (که داده بارش مشاهداتی وجود ندارد و به داده خروجی مدل منتخب اطمینان خواهد شد) پیش‌نمایی بارش ماهانه شش ایستگاه هواشناسی در پنج مدل اقلیمی (CSIRO-Mk، GFDL-ESM2M، MIROC5 و NorESM1-M) انجام شده و تحلیل‌ها انجام می‌شود. در این مرحله به‌جای پیش‌بینی در یک مرحله (با استفاده از آمار ۲۰۰۶ تا ۲۰۵۰ برای پیش‌بینی ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰) و جهت کاهش خطای پیش‌بینی بلندمدت، در نخستین گام بارش ۱۴ سال (۲۰۰۶ تا ۲۰۱۹) به‌عنوان ۷۰ درصد آموزش و سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۳ به‌عنوان ۳۰ درصد به‌عنوان دوره آزمون (تست)، در نظر گرفته و بارش پیش‌بینی

1. www.esgf-data.dkrz.de/projects/cordex-dkrz

2. Gray Wolf Optimization

۳. Representative Concentration Pathway

ادامه پیدا کرد و دوره مدنظر تحقیق (۲۰۵۰) پوشش داده شد (جدول ۳).

شد. درگام دوم از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۳ به‌عنوان ۷۰ درصد آموزش و ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۸ به‌عنوان ۳۰ درصد تست، بارش پیش‌بینی شد. این کار در ۵ گام تا ۲۰۵۸

جدول ۳- مراحل و گام‌های زمانی شبکه عصبی مصنوعی

سال شروع	سال پایان	70	30	شروع پیش‌بینی	انتهای پیش‌بینی
2006	2019	14	4	2020	2023
2006	2023	18	5	2024	2028
2006	2028	23	7	2029	3035
2006	3035	30	10	2036	2045
2006	2045	40	13	2046	2058

با توجه به تعداد کم ایستگاه‌های با دوره آمار کامل از طریق Geostatic روش‌های جبری و زمین‌آماری مقایسه گردید که روش‌های زمین‌آماري مانند کریجینگ توزیع فضای مناسب‌تری را نسبت به روش‌های جبری نشان داد. مقایسه خطاها و سمی واریوگرام نیز، مناسب‌ترین روش را کریجینگ عمومی^۱ (uk) نشان داد.

نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش روش و اهداف مطالعه بیان شد هدف اصلی پژوهش حاضر پیش‌نمایی بارش جنوب شرق ایران است. بدین منظور در ادامه در بخش‌های مختلف تلاش شده است تصویری تقریبی بر اساس خروجی مدل‌ها ارائه شود. در تمامی مقایسه‌ها دوره آماری تاریخی (۲۰۲۰-۱۹۷۹) و دوره آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است داده‌های خروجی در یک مرحله اصلاح بایاس انجام شده (سالاری و همکاران، ۱۳۹۹) و تغییرپذیری بارش و رژیم خاص آن در جنوب شرق ایران می‌تواند دلیل واریانس بالای این خروجی‌ها باشد.

پیش‌نمایی تغییرات بارش سالانه نسبت به دوره تاریخی: پس از بررسی بارش‌های مدل و مشاهداتی دوره تاریخی بازه ۲۰۱۴-۱۹۸۵ (سالاری و همکاران، ۱۳۹۹)، نتایج مدل‌سازی بارش سالانه بندرعباس

با توجه به پیچیدگی سامانه اقلیم، توصیف کافی از تغییر اقلیم با یک مدل غیرممکن است. برای کاهش عدم قطعیت، میانگین و یا ترکیبی از نتایج چندین مدل در پیش‌نگری‌های اقلیمی استفاده می‌شود. از رویکرد همادی می‌توان برای درک بهتر و کاهش عدم قطعیت در مطالعات تغییر اقلیم استفاده کرد. بیشاپ و آبراموویتز (۲۰۱۳) یک روش میانگین وزنی با رویکرد مستقل ایجاد کردند که وابستگی بین مدل‌های تعریف شده را با استفاده از کوواریانس خطاهای مدل نشان می‌دهد. در این مطالعه از IWM برای همادی کردن مدل‌های منتخب استفاده شد. روش IWM در حقیقت ترکیب خطی یک مجموعه از شبیه‌سازی‌های مدل است که میانگین اختلاف مربع را با توجه به مشاهدات به کمینه می‌رساند (زرین و همکاران، ۱۴۰۰). این روش بر اساس رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

(۷)

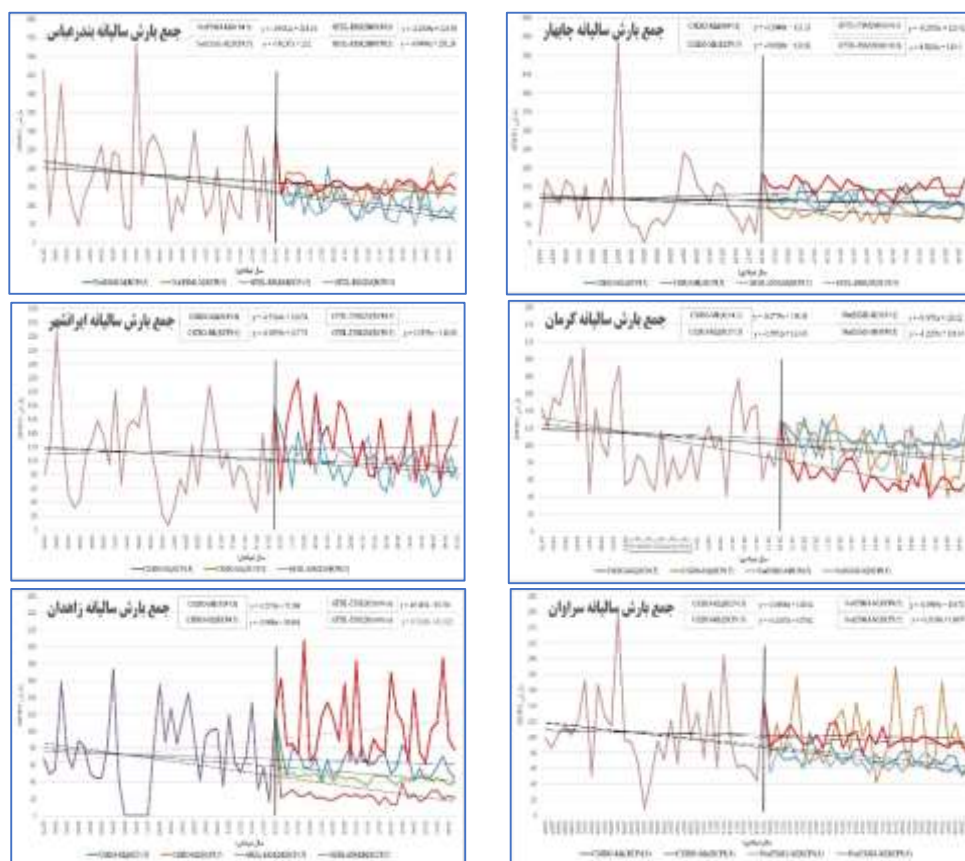
$$\sum_{j=1}^J (\mu_e^j - y^j)^2 \text{ where } \mu_e^j = w^T x^j = \sum_{k=1}^K w_k x_k^j$$

در رابطه ۷ (۱،...، j،...، J) گام‌های زمانی مقادیر هست که در اینجا داده‌های ماهانه دمای سطح دریای عمان بوده است. مقادیر (۱،...، k،...، K) مدل‌های منتخب CMIP6 می‌باشد. μ_e^j مقدار دمای همادی شده چندمدلی و jth گام زمانی است. y_i نشان‌دهنده jth گام زمانی در دوره مشاهداتی است. w وزن هر مدل از مجموعه مدل‌های همادی است که جمع آن ۱ خواهد بود. سرانجام xj ضریب مدل در ترکیب خطی است (بای و همکاران، ۲۰۲۲).

۱. Universal Kriging

یابد. بارش سالانه استان کرمان در همه مدل‌ها و تحت همه سناریوها طی سه دهه آتی کاهش است. لیکن شدت کاهش بارش سالانه در مدل CSIRO-MK و تحت سناریو RCP8.5 بیشتر از دیگر مدل‌ها و سناریوها خواهد بود. در سراوان نیز در همه مدل‌ها و سناریوها بارش سالانه کاهش می‌یابد لیکن در سناریو RCP4.5 بارش سالانه با شیب تندتری کاهش می‌یابد. بارش سالانه زاهدان در مدل CSIRO-MK و تحت سناریو RCP8.5 طی سه دهه اخیر افزایش خواهد یافت ولی در سایر مدل‌ها و سناریوها تغییرات مجموع بارش سالانه روند کاهش خواهد داشت. بیشترین اندازه کاهش بارش سالانه در مدل GFDL-ESM2M و تحت سناریو RCP8.5 اتفاق خواهد افتاد (شکل ۳).

نشان می‌دهد که طی ۳۰ سال آتی مجموع بارش این ایستگاه کاهشی است. این کاهش تحت سناریو RCP4.5 بیشتر و شدیدتر خواهد بود. لیکن در مجموع این ایستگاه بارش کمتری طی سه دهه آتی دریافت خواهد نمود. بارش سالانه ایستگاه چابهار در مدل CSIRO-MK و تحت سناریو RCP8.5 افزایش مجموع بارش را نشان می‌دهد. لیکن در مدل GFDL-ESM2M تحت این سناریو مجموع بارش کاهش خواهد یافت و در دیگر مدل‌ها تغییرات محسوس نخواهد بود. مجموع بارش ایرانشهر تحت مدل CSIRO-MK و تحت سناریو RCP8.5 افزایش را نشان می‌دهد و در دیگر مدل‌ها و سناریوها پیش‌بینی شده است که مجموع بارش سالانه کاهش



شکل ۳- تغییرات بارش سالانه (۲۰۲۰-۲۰۵۰) در مدل‌های NorESM1-M و GFDL-ESM2M

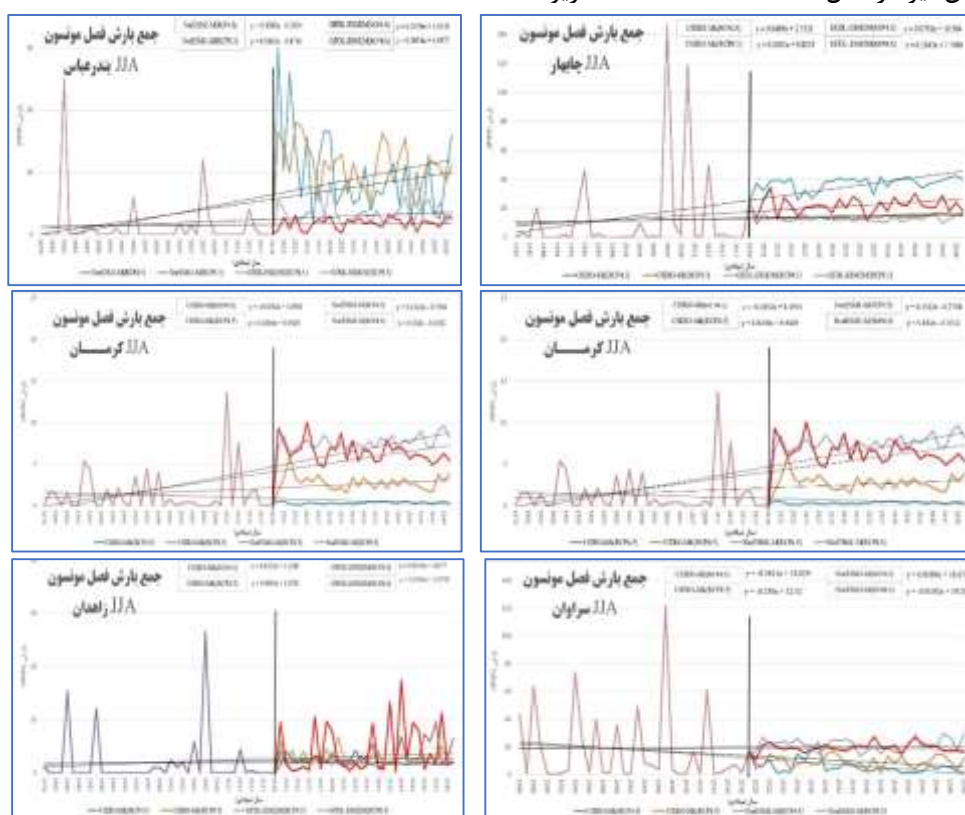
تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 با داده‌های CORDEX

درحالی‌که افزایش بارش JJA در سناریو RCP4.5 شیب بسیار ملایم و نامحسوسی را نشان می‌دهد. بارش سه‌ماهه JJA در ایستگاه چابهار نیز طی سه دهه

مقایسه تغییرات مجموع بارش تابستانه: در ایستگاه بندرعباس تحت سناریو RCP8.5 بارش شیب تندی افزایش را در سه‌ماهه JJA نشان می‌دهد

RCP4.5 اتفاق خواهد افتاد. بارش سه‌ماهه JJA ایستگاه سراوان در مدل CSIRO-MK تحت هر دو سناریو دگرگونی محسوسی را نشان نمی‌دهد. لیکن در مدل NorESM1 و تحت هر دو سناریو RCP با شیب نسبتاً تندی روند کاهشی را نشان می‌دهد. بارش سه‌ماهه JJA ایستگاه زاهدان در همه مدل‌ها و سناریو برای سه دهه آتی افزایش بارش با شیب بسیار ملایمی را پیش‌بینی کرده است که در مدل CSIRO-MK تحت سناریو RCP8.5 با شیب تندتری افزایش خواهد یافت (شکل ۴).

اخیر افزایش خواهد یافت. میزان افزایش بارش در مدل CSIRO-MK تحت سناریو RCP8.5 با شیب تندتری نسبت به سناریو RCP4.5 مدل CSIRO-MK اتفاق خواهد. بارش سه‌ماهه JJA در ایستگاه ایرانشهر به جزء در مدل GFDL-ESM2M و تحت سناریو RCP8.5 در دیگر مدل‌ها و سناریوها کاهش خواهد یافت. بارش سه‌ماهه JJA ایستگاه کرمان به جزء در مدل NorESM1 و تحت سناریو RCP4.5 که با شیب بسیار ملایمی روند کاهشی را نشان می‌دهد در دیگر مدل‌ها و سناریوها افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش بارش نیز در مدل CSIRO-MK تحت سناریو



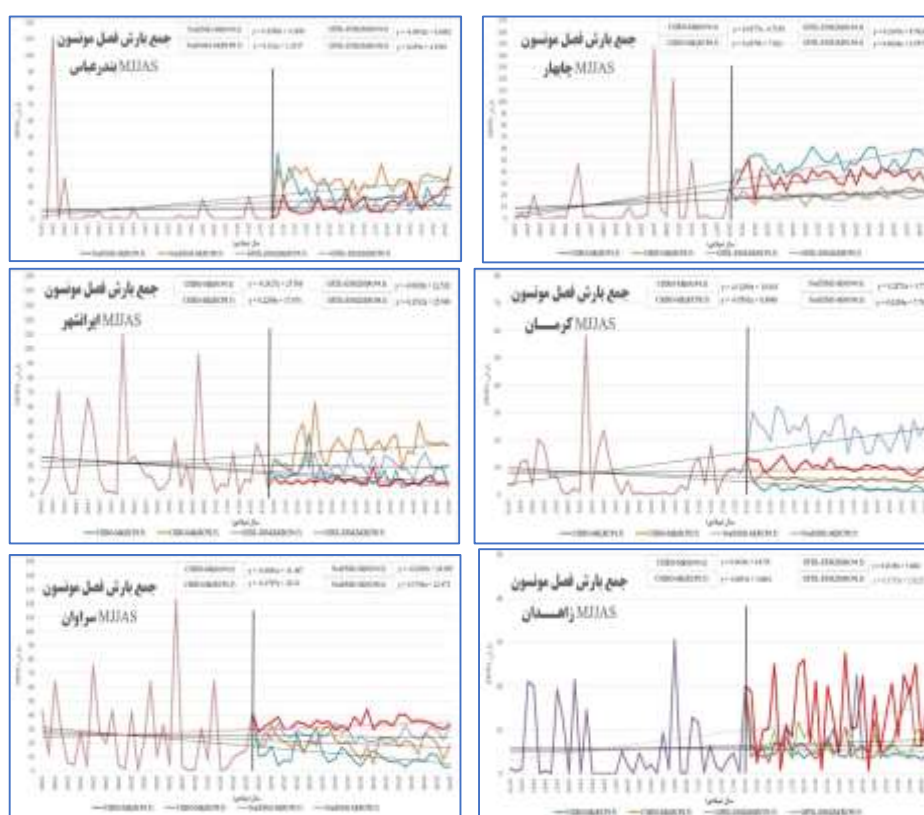
شکل ۴- تغییرات بارش JJA (۲۰۲۰-۲۰۵۰) بندرعباس در مدل‌های GFDL-ESM2M و NorESM1-M تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5

آتی افزایش را نشان می‌دهد. همه مدل‌ها و سناریوها مؤید افزایش بارش طی این سه دهه پیش‌روی هستند. بیشترین افزایش برآورد بارش نیز توسط مدل CSIRO-MK و تحت سناریو RCP4.5 خواهد بود. بارش فصل مونسون در ایستگاه ایرانشهر شرایط متفاوتی دارد. در این ایستگاه مدل CSIRO-MK

مقایسه تغییرات مجموع بارش MJJAS: بارش ایستگاه بندرعباس طی ۵ ماه فعالیت سامانه مونسون در همه مدل‌های اقلیمی و سناریوها افزایش خواهد یافت بیشترین اندازه افزایش در مدل NorESM1 و تحت سناریو RCP8.5 خواهد بود. در ایستگاه چابهار نیز حجم بارش طی فعالیت مونسون تا طی سه دهه

مدل NorESM1 و تحت سناریو RCP8.5 افزایش بارش را با شیب ملایم شبیه‌سازی نموده است لیکن در سناریو RCP4.5 دگرگونی نامحسوس بارش مونسونی و دیگر مدل‌ها و سناریوها کاهش بارش با شیب ملایم را پیش‌بینی کرده است. در ایستگاه زاهدان به جزء در مدل CSIRO-MK تحت سناریو RCP8.5 که دگرگونی محسوسی در بارش فصل مونسون را نشان نمی‌دهد در دیگر مدل‌ها و سناریوها بارش مونسونی دارای شیب افزایشی ملایم تا تند است (شکل ۵).

تحت سناریو RCP8.5 افزایش بارش، مدل GFDL-ESM2M دگرگونی نامحسوس بارش مونسونی و دیگر مدل‌ها و سناریوها کاهش بارش با شیب ملایم را پیش‌بینی کرده‌اند. شرایط بارش فصل مونسون در ایستگاه کرمان تا حدودی به ایستگاه ایرانشهر شباهت دارد. در این ایستگاه مدل CSIRO-MK تحت سناریو RCP4.5 افزایش بارش، مدل NorESM1 و تحت سناریو RCP8.5 دگرگونی نامحسوس بارش مونسونی و دیگر مدل‌ها و سناریوها کاهش بارش با شیب ملایم را پیش‌بینی کرده‌اند. در سراوان بارش مونسون‌ها در



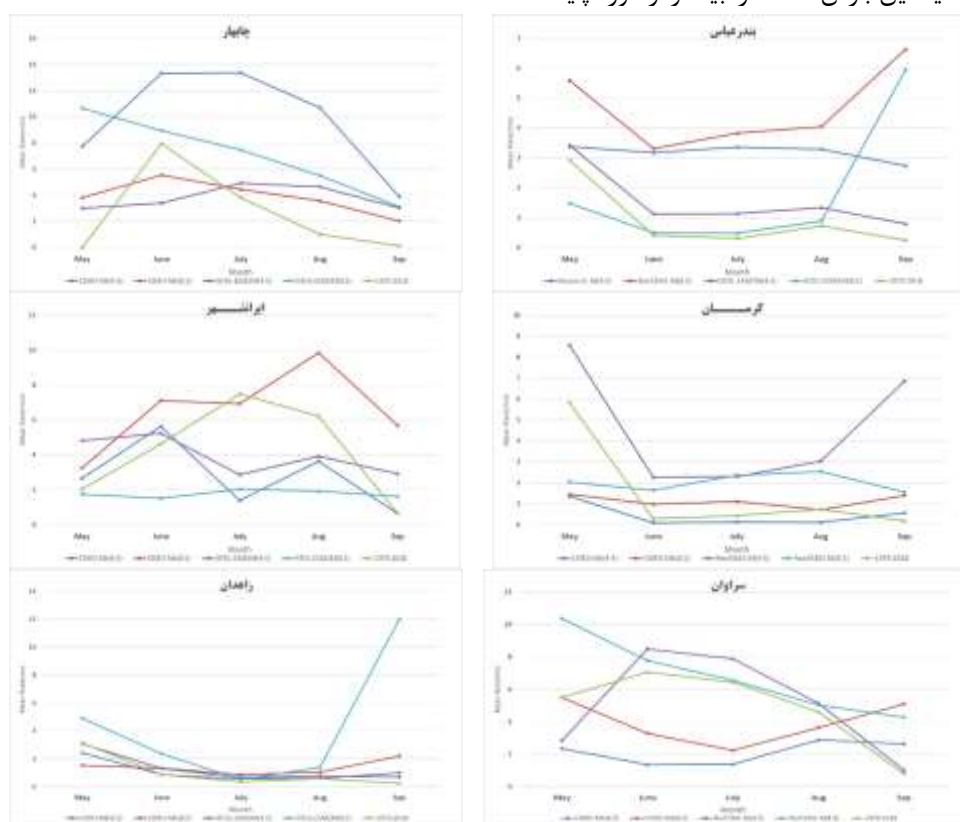
شکل ۵- تغییرات بارش MJJAS (۲۰۵۰-۲۰۲۰) در مدل‌های GFDL-ESM2M و NorESM1-M تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5

و مدل GFDL-ESM2M تحت سناریو RCP4.5 میانگین بارش ماهانه کمتر از دوره پایه برآورد شده است و در دیگر ماه‌ها به‌طور آشکاری میانگین بارش ماهانه افزایش را نشان می‌دهد. بیشترین افزایش در مدل CSIRO-MK تحت سناریو RCP4.5 اتفاق خواهد افتاد. همچنین بیشترین افزایش میانگین بارش در ماه‌های می و اوت اتفاق خواهد افتاد. در سراوان میانگین بارش در مدل NorESM1-M تحت هر دو

تغییرات میانگین بارش ماه‌های MJJAS: مقایسه میانگین بارش ماهانه و مدل‌سازی شده در ایستگاه بندرعباس نشان‌دهنده افزایش میانگین بارش ماهانه طی سه دهه پیش رو است. بیشترین افزایش در مدل NorESM1 و تحت سناریو RCP8.5 مشاهده می‌شود. از طرفی بیشترین دگرگونی مثبت میانگین بارش در ماه سپتامبر خواهد بود. در چابهار فقط در ماه ژوئن و آن‌هم برای مدل CSIRO-MK تحت سناریو RCP8.5

برآورد کرده‌اند. بیشترین افزایش برآورد نیز برای ماه سپتامبر خواهد بود. نتایج مدل CSIRO-MK تحت سناریو RCP4.5 به جزء در ماه سپتامبر میانگین بارش ماهانه کمتری نسبت به دوره پایه نشان داد. در ایستگاه ایرانشهر به جزء مدل CSIRO-MK تحت سناریو RCP8.5 که میانگین بارش را بیشتر از دوره پایه برآورد کرده در دیگر مدل‌ها و سناریوها میانگین بارش ماهانه نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. بیشترین کاهش میانگین بارش در ماه ژوئیه اتفاق خواهد افتاد (شکل ۶).

سناریو RCP بیشتر از دوره پایه و در مدل CSIRO-MK تحت هر دو سناریو RCP به جزء ماه سپتامبر کمتر از میانگین بارش دوره پایه برآورد شده است. در ایستگاه زاهدان میانگین بارش شبیه‌سازی‌شده ماهانه برای مدل GFDL-ESM2M و تحت سناریو RCP8.5 بیشتر از میانگین بارش ماهانه دوره پایه پیش‌بینی شده است که بیشترین افزایش در ماه سپتامبر خواهد بود. در دیگر مدل‌ها و سناریوها میانگین بارش ماه‌ها تغییرات محسوسی نسبت به دوره پایه را نشان نمی‌دهد. در ایستگاه کرمان چیره مدل‌ها و سناریوها میانگین بارش ماهانه را بیشتر از دوره پایه



شکل ۶- تغییرات میانگین بارش ماه‌های MJJAS (۲۰۲۰-۲۰۵۰) مدل‌های GFDL-ESM2M و NorESM1-M تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5

همبستگی بین پیش‌بینی و مشاهدات به دست آورد. با توجه به این‌که بررسی داده‌های آینده‌نگری و روند تغییرات بارش سال‌های آتی خروجی مدل‌های اقلیمی متفاوت، دید کامل و مشخصی را در ارتباط با مونسون منطقه نمی‌دهد و استفاده از برون داد مستقیم مدل‌های منفرد باعث افزایش عدم قطعیت در نتایج شد. لذا جهت به دست آوردن یک دیدگاه یکسان و

همادی مدل‌های اقلیمی^۱: ترکیب برون‌داد چندین مدل با بهره‌گیری از نقاط قوت هر مدل برای دستیابی به پیش‌بینی‌هایی با قابلیت اطمینان بیشتر می‌تواند در مطالعات دیگر مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین ترتیب با بهره‌گیری از تعداد اعضای همادی بیشتر و ترکیب برون‌داد چندین مدل با فیزیک و ساختارهای مختلف انتظار می‌رود بالاترین

کاهش عدم قطعیت‌ها مدلی ترکیبی (اسمبل شده) از مدل‌های مطرح و استفاده شده (۷ مدل اقلیمی شامل ۴ مدل از پایگاه کوردکس و سه مدل از مدل‌های CMIP5) را در دو سناریوی خوش‌بینانه (Rcp4.5) و بدبینانه (Rcp8.5) ارائه داده و بر اساس آن تحلیل‌ها آماری تهیه شد.

بررسی بارش ماهانه دو دوره زمانی گذشته و آینده مبتنی بر برون‌داد همادی شده: میانگین بارش شش شهر مهم منطقه مورد مطالعه و دو شهر با

میانگین بالای بارش تابستانه نشان می‌دهد که ماه‌های شش و هفت میلادی دارای تمرکز بیشتر بارش‌ها در منطقه بوده و پس‌از آن از این مقادیر کاسته می‌شود. ناگفته نماند بارش‌های ماه پنجم را مطابق بازمان آغاز بارش‌ها در شبه‌قاره هند، نمی‌توان بارش با خاستگاه مونسونی قلمداد نمود. هرچه از سواحل فاصله گرفته می‌شود میانگین بارش‌ها کاسته می‌شود اما شاخصه ارتفاع عامل کاهشی دوری از سواحل را تعدیل می‌کند (جدول ۳).

جدول ۳ - میانگین بارش ماهانه (میلی‌متر) شهرهای مورد مطالعه در دوره آماری ۱۹۸۹-۲۰۱۸ مبتنی بر برون‌داد همادی شده

	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	JJA
زاهدان	2.7	1.1	0.1	0.3	0.3	1.5
بندرعباس	0.2	0.5	0.4	0.1	0.3	0.5
کرمان	5.4	0.3	0.4	0.8	0.2	2.5
چابهار	0.0	9.0	3.7	1.0	0.1	17.3
ایران‌شهر	1.1	5.8	6.5	5.7	0.8	11.1
سراوان	5.7	5.9	5.5	4.9	0.9	9.3
نیکشهر	9.5	14.4	8.3	6.2	3.9	29.0
سرباز	7.5	3.7	1.1	5.8	4.0	10.6

جدول ۴ - میانگین بارش ماهانه (میلی‌متر) شهرهای مورد مطالعه در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۵۰ مبتنی بر برون‌داد همادی شده

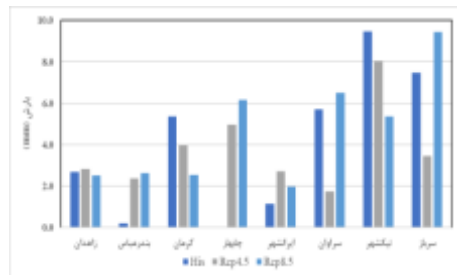
	RCP	می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	JJA
زاهدان	4.5	2.8	1.7	1.2	1.6	1.5	8.7
	8.5	2.5	1.5	0.8	1.1	5.2	2.8
بندرعباس	4.5	2.4	1.6	2.0	1.6	1.7	5.2
	8.5	2.6	1.4	1.5	1.8	4.6	4.6
کرمان	4.5	4.0	1.1	1.3	1.6	2.7	4.0
	8.5	2.5	1.3	1.8	1.5	1.7	4.6
چابهار	4.5	5.0	7.0	7.6	6.8	2.8	25.4
	8.5	6.1	5.7	4.3	3.3	2.9	13.3
ایران‌شهر	4.5	2.7	4.1	2.4	3.4	1.7	9.9
	8.5	2.0	4.3	4.5	5.1	3.0	13.8
سراوان	4.5	1.7	4.1	3.7	3.4	2.0	11.2
	8.5	6.5	5.4	5.1	5.0	4.0	15.5
نیکشهر	4.5	8.0	11.6	9.9	6.5	4.7	12.2
	8.5	5.3	11.0	9.4	6.0	4.4	15.6
سرباز	4.5	3.4	9.5	7.4	6.0	5.5	15.0
	8.5	9.4	9.2	6.5	5.3	4.8	16.9

بررسی میانگین‌های بارش برای بازه آینده تغییرات محسوسی بخصوص در ماه‌های دارای بارش نشان می‌دهد. در جدول (۴) و نمودارهای مقایسه‌ای نشان می‌دهد برای ماه پنجم در سواحل افزایش و در کرمان، زاهدان و نیکشهر کاهش خواهد یافت. این تغییرات

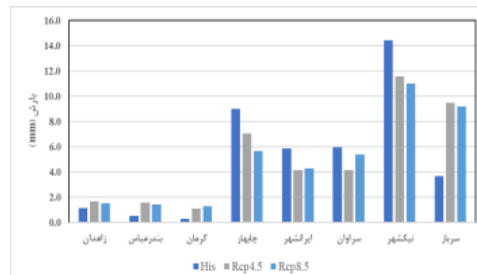
برای ماه ششم که آغاز بارش‌های موسمی در دهه گذشته قلمداد می‌شود، کاهش محسوسی را نشان می‌دهد. دلیل این کاهش را می‌توان در بررسی ماه‌های بعدی فصل تابستان بیشتر درک کرد. ماه‌های هفتم و هشتم و نهم میلادی که طبق آمار قبلی روند کاهش

جابه‌جایی و حتی افزایش بازه زمانی فصل مونسون جنوب غرب هند باشد. طبق مطالعات قبلی (شوکلا، سابیرالی، ...) دوره بارش مونسون را تا ۱۰۰ روزه نامیده‌اند که بر طبق این پژوهش در منطقه از ۱۲۰ روز فراتر می‌رود.

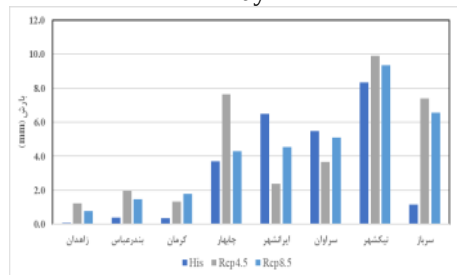
بارش‌ها را شاهد بوده‌ایم، اما روند کاملاً محسوس و چشمگیر می‌باشد. جابه‌جایی فصل مونسون از ماه‌های ششم و هفتم (جون و ژوئیه) به ماه‌های هفتم و هشتم و حتی نهم را می‌توان در نمودارهای میانگین بارش‌ها (شکل ۷) مشاهده کرد. گرمایش جهانی و گرمای آب‌های آزاد اقیانوس هند می‌تواند دلیل اصلی این



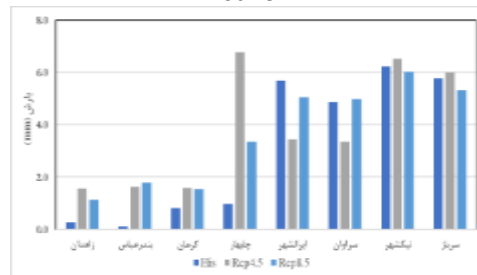
May



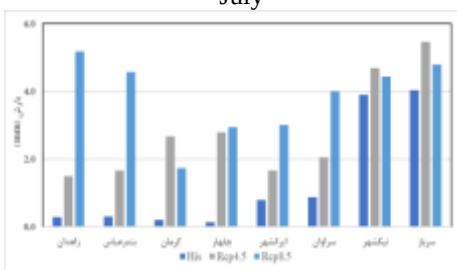
June



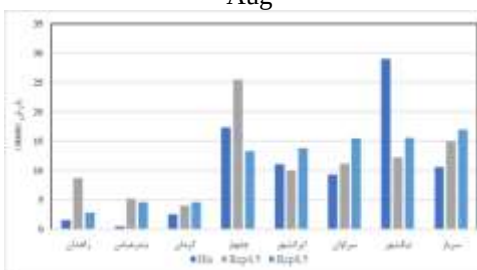
July



Aug



Sep



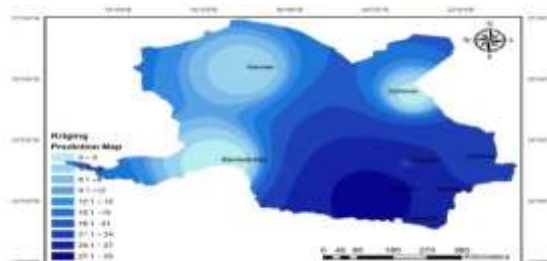
JJAs

شکل ۷- نمودار مقایسه‌ای میانگین بارش برای شهرهای مورد مطالعه در دوره‌های آماری ۱۹۸۹-۲۰۱۸ و ۲۰۲۱-۲۰۵۰ مبتنی بر پرونداد همادی شده

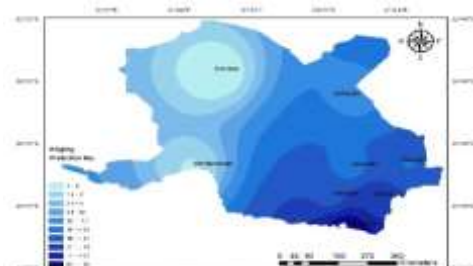
جدول ۵- تغییرات سطح بارش‌های منطقه مورد مطالعه در دو دوره آماری گذشته و آینده مبتنی بر پرونداد همادی شده

درصد از منطقه مورد مطالعه			بازه بارش (میلی‌متر)
2021-2050		1989-2018	
RCP4.5	RCP8.5		
2.4	3.7	33.0	۰-۵
58.8	65.0	43.0	۵/۱-۱۰
33.2	26.8	15.2	۱۰/۱-۱۵
4.4	4.5	7.1	۱۵/۱-۲۰
20.6	0	54.6	۲۰/۱-۲۵
0.6	0	0.8	۲۵/۱-۳۰

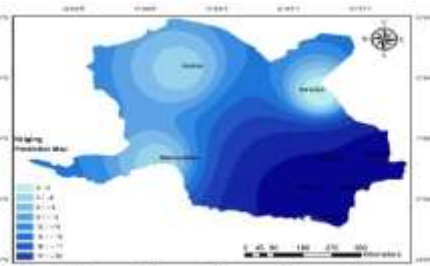
1989-2018



2021-2050



RCP4.5



RCP8.5

شکل ۸- میانگین بارش JJA شهرهای مورد مطالعه در دو دوره آماری گذشته (۱۹۸۹-۲۰۱۸) و آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) مبتنی بر پرونداد همادی شده

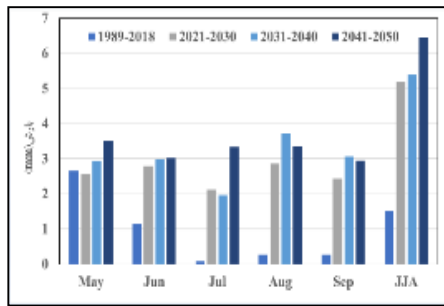
می‌شود. در بررسی تفکیکی و ماهانه بارش برای شهر زاهدان (جدول ۶) با توجه به اینکه بافاصله زیادی از سواحل داشته و نمی‌توان تغییرات بارشی محسوسی را متصور شد اما بررسی میانگین‌های آماری برای سه دهه آینده در هر دو سناریوی ۴.۵ و ۸.۵ افزایش مشاهده می‌شود (نمودار شکل ۹) این افزایش در سناریوی ۴.۵ چشمگیر می‌باشد.

بررسی بارش‌ها بر اساس دهه‌های آماری: آمار بارش گذشته و آینده هر کدام به سه دهه آماری بخش شده و مورد مقایسه قرار گرفت. دهه نخست ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۸، دهه دوم ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۸ و دهه سوم از داده‌های تاریخی از ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ تفکیک شد. در داده‌های آینده‌نگری سه دهه آماری ۲۰۲۱ الی ۲۰۳۰ و ۲۰۳۱ الی ۲۰۴۰ و ۲۰۴۱ الی ۲۰۵۰ مشخص شد. جهت نمونه سه شهر زاهدان، چابهار و بندرعباس بیان

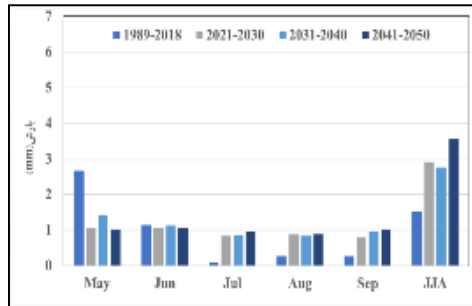
جدول ۶- مقایسه آماری میانگین بارش زاهدان در سه دهه گذشته (۱۹۸۹-۲۰۱۸) و سه دهه آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) مبتنی بر پرونداد همادی شده

زاهدان		می	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	JJA
HIS	1989-1998	3.6	0.0	0.0	0.1	0.4	0.1
	1999-2008	0.9	3.4	0.2	0.2	0.3	3.9
	2009-2018	3.5	0.0	0.0	0.5	0.1	0.5
RCP 4.5	2021-2030	2.6	2.8	2.1	2.9	2.4	5.2
RCP 8.5		1.1	1.0	0.8	0.9	0.8	2.9
RCP 4.5	2031-2040	2.9	3.0	2.0	3.7	3.1	5.4
RCP 8.5		1.4	1.1	0.8	0.8	1.0	2.8
RCP 4.5	2041-2050	3.5	3.0	3.3	3.3	3.0	6.4
RCP 8.5		1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	3.6
HIS	1989-2018	2.7	1.1	0.1	0.3	0.3	1.5
RCP 4.5	2021-2050	3.0	2.9	2.5	3.3	2.8	5.5
RCP 8.5		1.2	1.1	0.9	0.9	0.9	3.3

زاهدان



Rcp4.5



Rcp8.5

شکل ۹- تغییرات میانگین بارش زاهدان در سه دهه گذشته (۱۹۸۹-۲۰۱۸) و سه دهه آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) مبتنی بر پرونداد همدادی شده

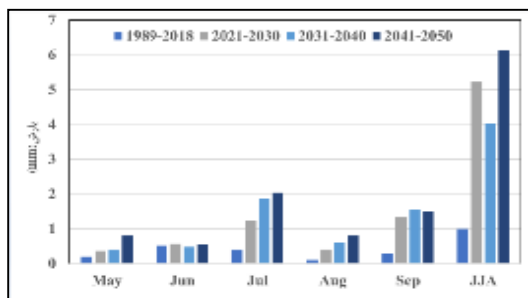
سناریوی ۴.۵ بیشتر از سناریوی ۸.۵ میانگین بارش‌ها افزایش دیده می‌شود (شکل ۱۵).

در مناطق ساحلی به‌خصوص بندرعباس، خروجی‌ها و بررسی‌ها متفاوت بوده و افزایش و کاهش متفاوتی دیده می‌شود (جدول ۱۲). جمع بارش JJA در

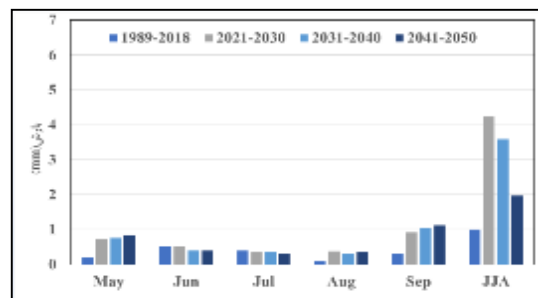
جدول ۱۲- مقایسه آماری میانگین بارش بندرعباس در سه دهه گذشته و سه دهه آینده مبتنی بر پرونداد همدادی شده

بندرعباس		مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	JJA
HIS	1989-1998	0.5	0.0	0.6	0.1	0.0	0.7
	1999-2008	0.0	1.4	0.3	0.2	0.0	1.8
	2009-2018	0.2	0.2	0.3	0.0	0.9	0.5
RCP 4.5	2021-2030	0.4	0.6	1.2	0.4	1.3	5.2
RCP 8.5		0.7	0.5	0.3	0.4	0.9	4.2
RCP 4.5	2031-2040	0.4	0.5	1.9	0.6	1.5	4.0
RCP 8.5		0.8	0.4	0.4	0.3	1.1	3.6
RCP 4.5	2041-2050	0.8	0.5	2.0	0.8	1.5	6.1
RCP 8.5		0.9	0.4	0.3	0.3	1.1	2.0
HIS	1989-2018	0.2	0.5	0.4	0.1	0.3	1.0
RCP 4.5	2021-2050	0.5	0.5	1.7	0.6	1.5	4.6
RCP 8.5		0.8	0.4	0.3	0.4	1.0	3.8

بندرعباس



Rcp4.5



Rcp8.5

شکل ۱۵- تغییرات میانگین بارش بندرعباس در سه دهه گذشته و سه دهه آینده مبتنی بر پرونداد همدادی شده

در سناریوی ۴.۵ و کاهش در سناریوی ۸.۵ در جمع بارش JJA دیده می‌شود (شکل ۱۶).

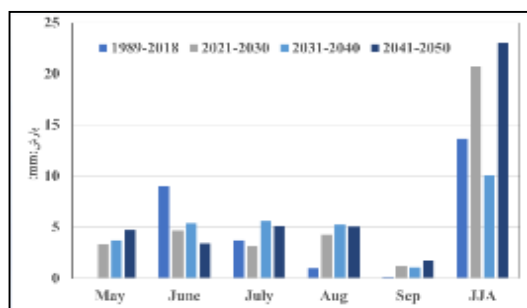
مشابه شهر ساحلی بندرعباس اما با شدت کمتر را می‌توان در چابهار مشاهده کرد (جدول ۱۳). تغییرات نامحسوس در ماه‌های تابستان و افزایش قابل‌ملاحظه

جدول ۱۳- مقایسه آماری میانگین بارش چابهار در سه دهه گذشته و سه دهه آینده مبتنی بر پرونداد همدادی

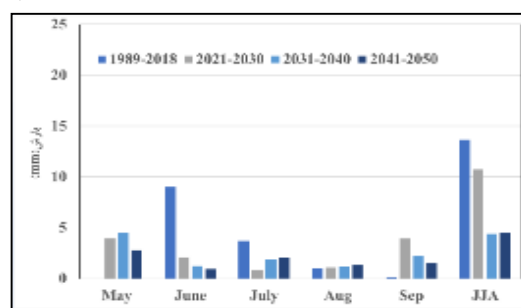
۱۴۰۲

چابهار		مه	ژوئن	ژوئيه	اوت	سپتامبر	JJA
HIS	1989-1998	0.0	0.2	5.3	1.6	0.0	7.1
	1999-2008	0.0	14.6	1.0	1.1	0.4	16.6
	2009-2018	0.0	12.1	4.9	0.3	0.0	17.3
RCP 4.5	2021-2030	3.4	4.7	3.1	4.3	1.3	20.8
RCP 8.5		3.9	2.1	0.8	1.1	3.9	10.8
RCP 4.5	2031-2040	3.7	5.4	5.6	5.2	1.1	10.0
RCP 8.5		4.5	2.5	0.8	0.8	3.4	11.0
RCP 4.5	2041-2050	4.7	3.4	5.1	5.0	1.7	23.0
RCP 8.5		3.9	2.3	0.9	0.9	3.5	11.5
HIS	1989-2018	0.0	9.0	3.7	1.0	0.1	13.7
RCP 4.5	2021-2050	3.9	4.5	4.6	4.9	1.4	22.6
RCP 8.5		4.1	2.3	0.9	0.9	3.6	11.0

چابهار

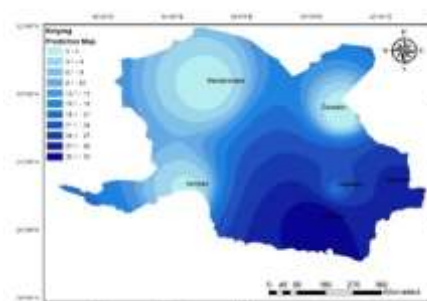


Rcp4.5

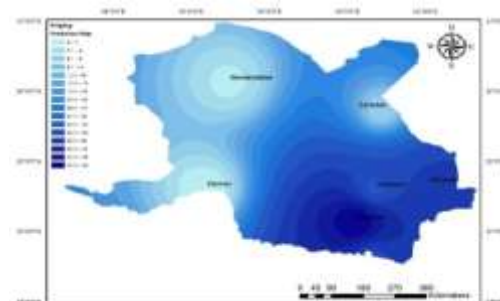


Rcp8.5

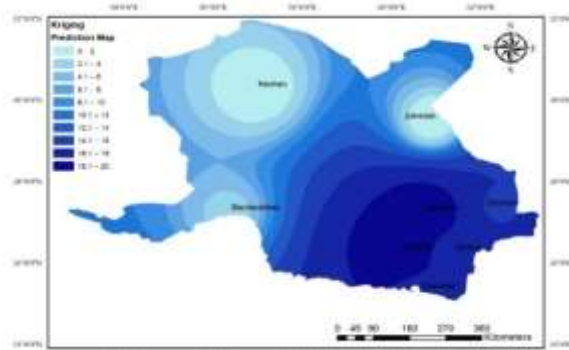
شکل ۱۶- تغییرات میانگین بارش چابهار در سه دهه گذشته و سه دهه آینده مبتنی بر پرونداد همدادی شده



1989-1998



1999-2008



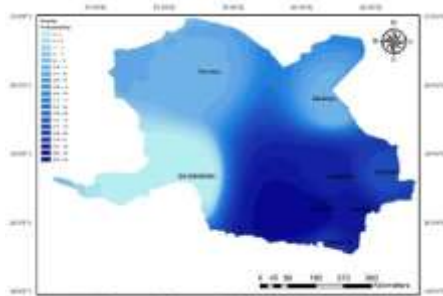
2009-2018

شکل ۱۷- نقشه پهنه‌بندی میانگین بارش (به میلی‌متر) در سه دهه گذشته

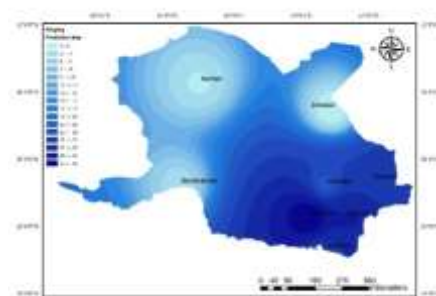
بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی: بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی میانگین بارش JJA و همچنین جدول تغییرات درصد سطح تحت تأثیر مقادیر بارشی برای سه دهه گذشته نشان می‌دهد که علاوه بر افزایش میانگین بارش‌ها در دهه دوم بازه زمانی گذشته

در سه دهه آینده نیز مقادیر متفاوتی را نسبت به گذشته ثبت کرده است. میانگین بارش‌ها در دهه نخست افزایشی بوده و در دهه‌های بعدی کاهش را نشان می‌دهد (شکل ۱۷ و ۱۸).

دهه نخست آینده‌نگری 2021-2030

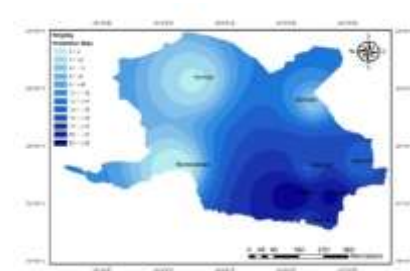


RCP4.5

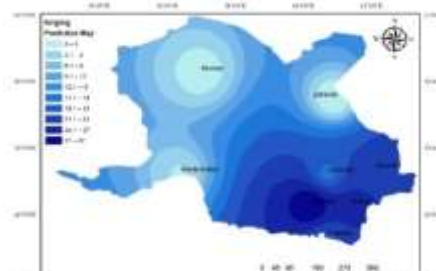


RCP8.5

دهه دوم آینده‌نگری 2031-2040

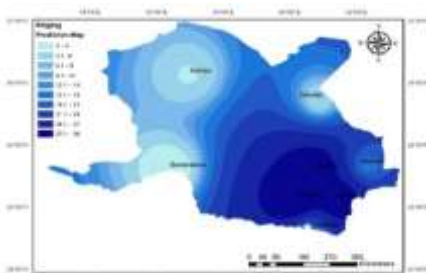


RCP4.5

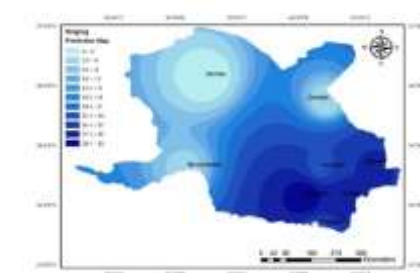


RCP8.5

دهه سوم آینده‌نگری 2041-2050



RCP4.5



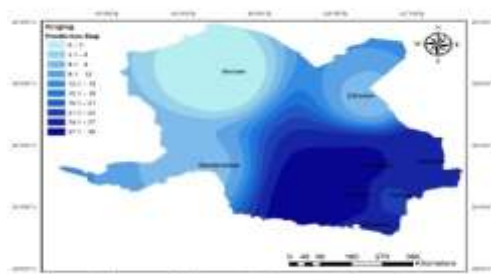
RCP8.5

شکل ۱۸- نقشه پهنه‌بندی میانگین بارش JJA در سه دهه آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱) مبتنی بر پرونداد همادی شده

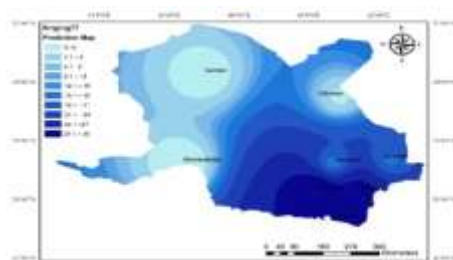
جدول ۱۴- تغییرات سطح بارش‌های منطقه مورد مطالعه در دو دوره آماری گذشته و آینده به تفکیک دهه‌ها مبتنی بر برآورد همادی شده

درصد از منطقه مورد مطالعه									بازه بارش (میلی متر)
2021-2050						1989-2018			
RCP4.5			RCP8.5			1989-1998	1999-2008	2009-2018	
2021-2030	2031-2040	2041-2050	2021-2030	2031-2040	2041-2050				
18.3	5.8	0.5	3.1	5.0	8.8	36.7	11.8	46.2	۰-۵
53.4	62.6	47.0	57.8	55.7	53.2	34.8	42.0	35.3	۵/۱-۱۰
10.5	23.2	36.5	21.3	17.1	16.6	11.8	15.7	16.4	۱۰/۱-۱۵
5.5	6.7	11.1	14.2	16.6	17.2	10.0	11.2	2.1	۱۵/۱-۲۰
7.1	1.5	4.6	2.3	3.4	3.2	4.8	12.9	0.0	۲۰/۱-۲۵
2.0	0.2	0.3	0.7	1.6	0.8	1.4	3.3	0.0	۲۵/۱-۳۰
1.6	0	0	1.0	0.6	0.3	0.4	1.5	0.0	۳۰/۱-۳۵
1.7	0	0	3.1	0	0	0	0.7	0.0	۳۵/۱-۴۰

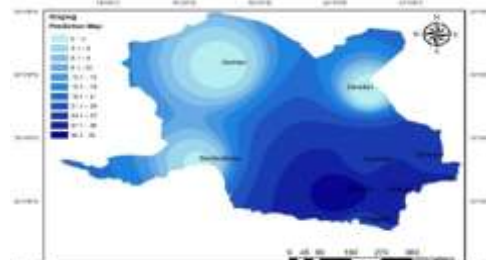
1989-2018



2021-2050



RCP4.5

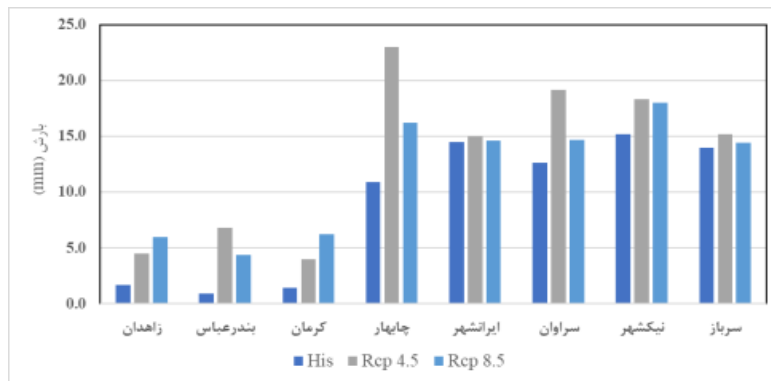


RCP8.5

شکل ۱۹- نقشه پهنه‌بندی میانگین بارش JJA در سه دهه گذشته و آینده مبتنی بر برآورد همادی شده

جدول ۱۵- تغییرات سطح بارش‌های منطقه مورد مطالعه در دو دوره آماری گذشته و آینده به تفکیک دهه‌ها مبتنی بر برآورد همادی شده

درصد از منطقه مورد مطالعه			بازه بارش (میلی‌متر)
2021-2050		1989-2018	
RCP4.5	RCP8.5		
2.0	4.1	68.3	۰-۵
56.0	54.2	5.2	۵/۱-۱۰
27.1	20.3	11.5	۱۰/۱-۱۵
8.3	17.3	9.9	۱۵/۱-۲۰
6.0	3.0	134.9	۲۰/۱-۲۵
12.9	0.9	4.3	۲۵/۱-۳۰
00	0.2	00	۳۰/۱-۳۵



شکل ۲۰- نسبت بارش تابستانه (JJA) به بارش سالیانه به میلی‌متر در دوره آماری گذشته و

آینده مبتنی بر برون‌داد همادی شده

میانگین بارش‌ها وجود خواهد داشت. این افزایش برای چابهار و بندرعباس دو شهر بندری چشمگیر بوده و به سمت شمال این نسبت، کمتر می‌شود.

نسبت بارش تابستانه به بارش سالیانه: بررسی

نسبت بارش تابستانه (JJA) به بارش سالیانه طی سه دهه گذشته (۱۹۸۹-۲۰۱۸) و سه دهه آینده (جدول ۶ و شکل ۲۰) نشان می‌دهد در هر دو سناریو افزایش

جدول ۱۶- نسبت بارش تابستانه (JJA) به بارش سالیانه در دو دوره آماری گذشته و آینده مبتنی بر برون‌داد همادی شده

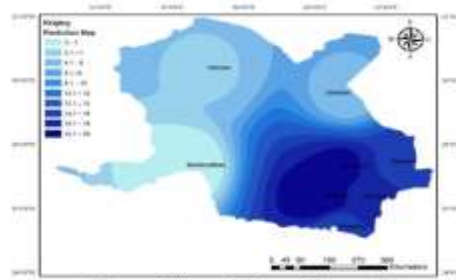
دوره آماری	1989-2018		2021-2050	
	His	RCP4.5	RCP8.5	
شهر				
زاهدان	1.7	4.5	5.9	
بندرعباس	0.9	6.8	4.4	
کرمان	1.4	4.0	6.2	
چابهار	10.9	23.0	16.2	
ایرانشهر	14.5	15.0	14.6	
سراوان	12.6	19.2	14.7	
نیکشهر	15.2	18.3	18.0	
سرباز	14.0	15.2	14.4	

گرمایش جهانی و بالا آمدن سطح آب‌های آزاد، بارش‌ها در سواحل از شدت بیشتری برخوردار است و با افزایش فاصله از سواحل دریای عمان، میانگین بارش‌ها کاهشی است.

بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی نسبت بارش تابستانه

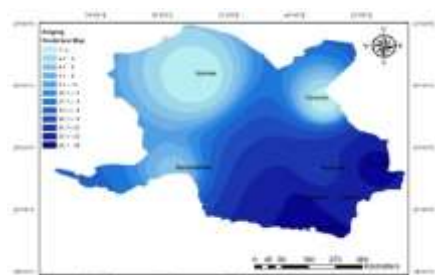
به سالیانه دوره گذشته (۱۹۸۹-۲۰۱۸) تمرکز بارش‌ها را در جنوب شرق کشور نشان می‌دهد (شکل ۲۱). در هر دو سناریو این تمرکز را نیرومند نشان می‌دهد. چنان‌که بر پایه پژوهش‌های دیگر نیز با توجه به

1991-2020

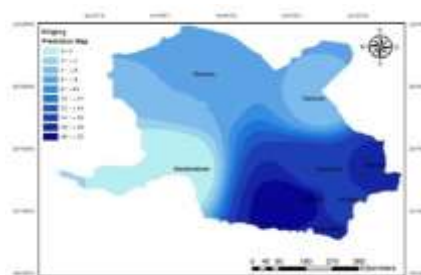


2021-2050

۱۴۰۲



RCP4.5



RCP8.5

شکل ۲۱- نقشه پهنه‌بندی نسبت بارش تابستانه (JJA) به بارش سالیانه در دوره آماری گذشته و

آینده مبتنی بر پرونداد همادی شده

سطوح تحت تأثیر بارش‌ها را تا افق ۲۰۵۰ نشان می‌دهد.

بررسی تغییرات سطح در بارش‌های منطقه در بحث نسبت بارش تابستانه به بارش سالیانه (جدول ۱۷) نیز افزایش مقادیر نسبیتی و همچنین توسعه

جدول ۱۷- تغییرات نسبت بارش تابستانه به سالیانه در منطقه مورد مطالعه در دو دوره آماری گذشته و آینده مبتنی بر پرونداد همادی شده

2021-2050		1989-2018	بازه نسبت بارش
RCP4.5	RCP8.5		
2.4	17.7	69.5	۰-۵
56.8	51.3	7.3	۵/۱-۱۰
23.6	21.2	22.0	۱۰/۱-۱۵
16	9.8	1.2	۱۵/۱-۲۰
1.2	0.0	0.0	۲۰/۱-۲۵

می‌رود مساحت و بارش و شدت باران‌های موسمی جهانی افزایش یابد. هم‌زمان، تجزیه و تحلیل دقیق چندین بارندگی موسمی نشان می‌دهد که پخش بارش باران از اوایل به اواخر فصل بارندگی منتقل می‌شود (ست و همکاران، ۲۰۱۳). تغییرپذیری بین بارش سالانه باران‌های موسمی هند نیز گویای یک‌روند مثبت ثابت تحت گرمایش جهانی بی‌وقفه است. از آنجاکه هم افزایش مدت بارندگی‌های موسمی و هم افزایش تنوع بین سالی در آینده در بیشتر مدل‌ها دیده می‌شود، می‌توان به این روندهای پیش‌بینی‌شده اطمینان خاطر داد (منون و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین پیش‌بینی می‌شود که بارش باران‌های مونسون تابستان هند در شرایط گرم شدن کره زمین در دهه ۲۰۸۰ در مقایسه با زمان پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰) ۹ تا ۱۶ درصد بیشتر باشد. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که روزهای بارانی در مرکز

نتیجه‌گیری

نتایج پژوهش نشان داد تغییرات میانگین بارش‌ها نشان از پیامد تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی بر سامانه بزرگ‌مقیاس مونسون جنوب غرب هند کاملاً مشهود بوده است. بررسی منابع و پژوهش‌های دیگر نیز مؤید همین باور است. برای نمونه برخی افزایش میانگین بارش باران‌های موسمی هند و همچنین تنوع بین سالیانه تحت افزایش گرمایش را بیان می‌کنند (میهل و واشینگتون^۱، ۱۹۹۳؛ کیتو^۲ و همکاران، ۱۹۹۷؛ هو و همکاران، ۲۰۰۰؛ لال و همکاران، ۲۰۰۱؛ کوباش و همکاران، ۲۰۰۱؛ می، ۲۰۰۲؛ فن و همکاران، ۲۰۱۲). تجزیه و تحلیل CMIP5 نشان می‌دهد که با افزایش واکنش سامانه اقلیم به واداشت انسان زایی، انتظار

1. Meehl and Washington
2. Kitoh

ژوئن و ژوئیه ماه‌های مرطوب خواهند بود. با توجه به نتایج پژوهش در بخش تغییرات ماهانه محدوده گسترش و حجم بارش در ایستگاه‌های هواشناسی منتخب، نواحی تحت تأثیر سامانه مونسونی تغییر چندانی نداشته و تغییراتی هم اگر باشد غالباً در حجم بارش و توزیع زمانی بارش خواهد بود. با آنکه تمرکز بارش‌ها در سواحل می‌باشد اما افزایش رطوبت و همچنین آب قابل بارش ابرها باعث پیشرفت ابرهای باران‌زا به ارتفاعات و نواحی مرکزی استان می‌شود. این عامل با عدم تغییر ملموس محدوده بارش‌ها باعث افزایش شدت رگبارهای کوتاه است که خود عامل سیل‌های سریع (Flash Flood) می‌شود. تخلیه سامانه‌های بارشی به این صورت باعث محدود شدن سطح تحت تأثیر بارش‌های موسمی خواهد شد. با توجه به گستردگی محدوده جنوب شرق کشور نمی‌توان به‌طور روشن تعیین نمود که طول دوره مونسون در چه مناطقی بیشتر و در چه مناطقی کمتر خواهد شد ولی از سویی نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد که در برخی ایستگاه‌های هواشناسی دوره مرطوب در ماه‌های می و سپتامبر و در برخی ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت است. لذا به نظر می‌رسد که رژیم بارش تابستانه این مناطق دست‌خوش تغییر خواهد شد.

هند کمتر و شدیدتر باشد (کریشناکومار و همکاران، ۲۰۱۱). برای مثال طی بارش‌های مونسون سال گذشته و سال جاری بارش‌های رگباری ثبت شد. در آمار بارش مونسون ۲۰۲۱ روز ۱۴ ژوئیه به میزان ۳۴/۵ میلی‌متر برای چابهار و ۲۰ میلی‌متر برای سرباز که به‌صورت رگباری ثبت شده است. تغییر سطح بازه‌های بارشی بالاتر در نقشه‌های آینده‌نگری نشان می‌دهد که شدت بارش‌ها ارتقا یافته و برای مثال در برخی نقاط غالب بارش‌ها از بازه ۵-۰ میلی‌متری به طبقات ۱۰-۱۵ میلی‌متری ارتقا یافته است (سازمان هواشناسی کشور). بر اساس روند چیره بارش تابستانه در مدل‌های اقلیمی در پایگاه CORDEX و CMIP5 روند بارش تابستانه در ایستگاه‌های هواشناسی بندرعباس، چابهار، زاهدان و تا حدودی سراوان مثبت خواهد بود و در ایستگاه‌های ایرانشهر و کرمان روند بارش تابستانه منفی خواهد بود که این تغییرات روند در گستره سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار هستند. از طرفی تغییرات بارش ماهانه فصل مونسون در ایستگاه‌های منتخب متفاوت است. در بندرعباس، کرمان و زاهدان ماه‌های سپتامبر و می طی سه دهه آتی مرطوب‌تر خواهند بود و ماه‌های دیگر (ژوئن، ژوئیه و اوت) شرایط خشک‌تری دارند. در ایرانشهر و چابهار ماه‌های مرطوب‌تر شامل ژوئن، ژوئیه و اوت خواهند بود و در سراوان ماه‌های می،

منابع

۱. امامی، سمیه، چوپان، یحیی و سلماسی، فرزین. (۱۳۹۷). ارائه روشی مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌ساز گرگ خاکستری و رقابت استعماری در فرآیند بهره‌برداری بهینه از مخزن سد. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، ۵۲(۵)، ۱۰۲۷-۱۰۴۶.
 ۲. سالاری فنودی، محمدرضا، خسروی، محمود؛ طاوسی، تقی و حمیدیان پور، محسن. (۱۳۹۹). مقایسه و ارزیابی دقت داده‌های شبکه‌ای بارش تابستانه پایگاه CORDEX با داده‌های ایستگاهی (موردکاوی: بارش تابستانه جنوب شرق ایران، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، شماره ۴۰، ۱۱، (۴۳)، ۳۲-۱۵).
 ۳. سالاری فنودی، محمدرضا، (۱۴۰۰)؛ آینده‌نگری تغییرات بارش مونسون تابستانه هند در جنوب شرق
- ایران، رساله مقطع دکترا، دانشگاه سیستان و بلوچستان
4. Dash, Y., Mishra, S. K., & Panigrahi, B. K. (2018). Rainfall prediction for the Kerala state of India using artificial intelligence approaches. *Computers & Electrical Engineering*, 70, 66-73.
 5. Gadgil S, Rajeevan M & Nanjundiah R. (2005). Monsoon prediction-why yet another failure?. *Current Science*. 88
 6. Hsu, L. H., Chen, D. R., Chiang, C. C., Chu, J. L., Yu, Y. C., & Wu, C. C. (2021). Simulations of the East Asian winter monsoon on subseasonal to seasonal time scales using the model for prediction across scales. *Atmosphere*, 12(7), 865.

14. Saha, M., Mitra, P., & Nanjundiah, R. S. (2016). Predictor discovery for early-late Indian summer monsoon using stacked autoencoder. *Procedia Computer Science*, 80, 565-576.
15. Singh, P. (2018). Indian summer monsoon rainfall (ISMR) forecasting using time series data: a fuzzy-entropy-neuro based expert system. *Geoscience Frontiers*, 9(4), 1243-1257.
16. Sperber, K. R., Annamalai, H., Kang, I. S., Kitoh, A., Moise, A., Turner, A., ... & Zhou, T. (2013). The Asian summer monsoon: an intercomparison of CMIP5 vs. CMIP3 simulations of the late 20th century. *Climate dynamics*, 41, 2711-2744.
17. Swenson, E. T., Straus, D. M., & Das, D. (2022). Indian Monsoon Teleconnections and the Impact of Correcting Tropical Diabatic Heating. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 79(5), 1445-1458
18. Tang, Y., & Duan, A. (2021). Using deep learning to predict the East Asian summer monsoon. *Environmental Research Letters*, 16(12), 124006.
19. Turner, A., Annamalai, H. (2012), Climate change and the South Asian summer monsoon. *Nature Clim Change* 2, 587-595
20. Wang, L., Zhang, F., Nepal, S., Xiang, Y., Tang, H., Shi, X., ... & Yu, Z. (2023). Response of runoff processes to temperature rise in basins with different glacier ratios in the monsoon-influenced southern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 45, 101299.
7. Iqbal, Z., Shahid, S., Ahmed, K., Ismail, T., Ziarh, G. F., Chung, E. S., & Wang, X. (2021). Evaluation of CMIP6 GCM rainfall in mainland Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 254, 105525.
8. Kar, S. C., Acharya, N., Mohanty, U. C., & Kulkarni, M. A. (2012). Skill of monthly rainfall forecasts over India using multi-model ensemble schemes. *International Journal of Climatology*, 32(8), 1271-1286.
9. Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61.
10. Mitsui, T., & Boers, N. (2021). Seasonal prediction of Indian summer monsoon onset with echo state networks. *Environmental Research Letters*, 16(7), 074024.
11. Mohanty, M. R., Pradhan, M., Maurya, R. K. S., Rao, S. A., Mohanty, U. C., & Landu, K. (2021). Evaluation of state-of-the-art GCMs in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133, 1429-1445.
12. Mohanty, M. R., & Mohanty, U. C. (2023). Inter-comparison of two regional climate models (RegCM and WRF) in downscaling CFSv2 for the seasonal prediction of Indian summer monsoon. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(1), 99-114.
13. Regan, E. (2019). Evaluating forecasts for Indian Summer Monsoon precipitation using the Navy Earth System Model. In 99th American Meteorological Society Annual Meeting. AMS.