

Projection of the Wind Field in the Future Based on the CMIP5 and CMIP6 Climate Models in Sistan and Baluchestan Province

Fatemeh Rajaei ^{1*}, Ebrahim Ahmadisharaf ²

¹ Assistant Professor, Department of Environmental Sciences, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran

² Ph. D, Department of Civil and Environmental Engineering, Florida A&M University, Florida, United States

Extended Abstract

Introduction

Renewable energy plays a crucial role in reducing greenhouse gas emissions and combating global climate change. Among the various renewable energy sources, wind energy stands out due to its production capacity and rapid technological advancement. This study aims to evaluate the capabilities and uncertainties of CMIP5 and CMIP6 models under two scenarios—RCP4.5 and RCP8.5 for CMIP5, and SSP2-4.5 and SSP5-8.5 for CMIP6—in simulating wind speed. Additionally, it will forecast future changes in wind speed (2014-2100) at six synoptic stations in Sistan and Baluchestan, focusing on the differences between CMIP5 and CMIP6 reports regarding wind energy. This research is the first to examine future wind characteristics in Iran using CMIP6 model outputs while comparing the performance of both CMIP5 and CMIP6 in simulating wind speed in the study area. Wind energy is highly sensitive to climate change, as future alterations in wind flow characteristics will significantly impact electricity generation potential. Therefore, understanding future climate scenarios, especially under varying global warming conditions, is vital for estimating changes in wind energy resources over the coming decades.

Materials and Methods

Wind speed data were obtained from six synoptic stations operated by the I.R. of Iranian Meteorological Organization (IRIMO), covering the period from 1990 to 2014, with all stations maintaining continuous data records throughout this timeframe. The data from the CMIP5 and CMIP6 climate models were downloaded from the respective websites. This study selected outputs from six general circulation models for the historical period (1990-2014) and the future period (2014-2100) under the emission scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5 for CMIP6 and RCP4.5 and RCP8.5 for CMIP5. The ability of the CMIP6 and CMIP5 climate models to simulate historical wind speed was evaluated against observational data from Sistan and Baluchestan using statistical criteria, including bias, correlation, and standard deviation. This evaluation determined the capability and accuracy of the models and assessed the uncertainty in their wind speed simulations before applying them to future climate forecasts. A multi-model averaging approach was employed to reduce uncertainties associated with individual models, utilizing the CDFT package in RStudio for downscaling and output bias correction based on the cumulative distribution function transformation.

Results and Discussion

Most CMIP models simulated wind speed effectively. The CanESM5 model in CMIP6 demonstrated improved performance compared to CMIP5, yielding results closer to observational data. In contrast, the CMCC-ESM2 and CNRM-CM6-1 models in CMIP6 were less efficient than their CMIP5 counterparts. CMIP5 indicated a decrease in wind speed, while CMIP6 suggested an increase in annual projection, although these changes were not statistically significant. The projected average wind speeds by 2100 are 3.58 m/s and 3.57 m/s for the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, respectively, while the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios predict averages of 3.1 m/s and 3.2 m/s, respectively. The baseline average wind speed from observational data is 3.49 m/s. CMIP5 indicated a decrease in wind speed across all months under both scenarios, with the most significant reductions occurring in spring (-0.47 m/s) and the least in autumn (-0.29 m/s). Conversely, CMIP6 projected increases in wind speed across all seasons, with the highest increase in spring (0.49 m/s) and the lowest in summer (0.32 m/s) under the SSP2 scenario. Under the SSP5 scenario, the highest increase was observed in winter (0.43 m/s) and the lowest in summer (0.37 m/s). The annual average for CMIP5 models showed a decrease in wind speed at all stations compared to the baseline period, particularly at Khash and Zabul stations. In CMIP6, all stations except Chabahar exhibited increased wind speeds, with Chabahar recording the highest average wind speed and other stations showing minimal differences. The results indicate varying model performance in simulating climate variables, with the historical wind speed uncertainty in CMIP5 models potentially attributed to differences in grid resolution, atmospheric components, and convection scheme parameterization.

Conclusion

Given the observed biases in the models, future research should involve a comprehensive study utilizing additional models from the CMIP6 and CMIP5 families. These findings are significant for assessing the potential of the wind energy sector in Sistan and Baluchestan, a region known for its wind resources, which may inform future development strategies. It is also recommended that similar assessments be conducted in other regions of Iran to determine whether identified sites with suitable wind power may experience future resource fluctuations.

Keywords: Downscaling, Wind speed, Sistan and Balochestan, CMIP models.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We express our sincere gratitude to the University of Zanjan for their financial and logistical support throughout this research project, identified by code 1174-2-1402.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

Datasets are available upon reasonable request to the corresponding author.

Authors' Contribution

Fatemeh Rajaei: Formal analysis and investigation, Software; **Ebrahim Ahmadisharaf:** Writing and manuscript editing.

*Corresponding Author, E-mail: Rajaei_Fatemeh@znu.ac.ir

Citation: Rajaei, F., & Ahmadisharaf, E. (2025). Projection of the Wind Field in the Future Based on the CMIP5 and CMIP6 Climate Models in Sistan and Baluchestan Province. *Water and Soil Management and Modeling*, 5(2), 219-233.

doi:10.22098/mmws.2024.15772.1493

Received: 02 September 2024, Received in revised form: 09 October 2024, Accepted: 13 October 2024.,
Published online: 22 June 2025

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 2, pp. 219-233.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





پیش‌نگری میدان باد در آینده بر اساس مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 در استان سیستان و بلوچستان

فاطمه رجائی^{۱*}، ابراهیم احمدی شرف^۲

^۱ استادیار، گروه علوم محیط‌زیست، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

^۲ پسا دکتري، گروه مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه M&A فلوریدا، فلوریدا، ایالات متحده امریکا

چکیده

بین تمام منابع انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده برای تولید برق، انرژی باد یکی از پیشگامان از نظر ظرفیت تولید و سرعت رشد تکنولوژی است. بنابراین، تخمین چگونگی تغییرات منابع انرژی بادی تحت گرمایش جهانی آینده ضروری است. اهداف این مطالعه ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP5 و CMIP6 در دوره تاریخی و نیز شبیه‌سازی تغییرات آینده سرعت باد (۲۰۱۴-۲۱۰۰) در شش ایستگاه همدیدی استان سیستان و بلوچستان است. همچنین، تمرکز روی تفاوت‌های پیش‌نگری‌های مدل‌های CMIP5 و CMIP6 خواهد بود. ارزیابی عملکرد نسل جدید مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 برای پیش‌نگری سرعت باد برای دوره تاریخی، نسبت به داده‌های مشاهداتی با توجه به معیارهای آماری ارزیابی شد. از بسته CDFT در نرم‌افزار RStudio برای ریزمقیاس‌نمایی آماری و تصحیح اریب خروجی مدل‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد اکثر مدل‌های CMIPs، تغییرپذیری سرعت باد را به خوبی شبیه‌سازی کردند. شبیه‌سازی مدل‌های CanESM5 در CMIP6 نسبت به CMIP5 بهبود یافته است و نتایج بهتری نسبت به داده‌های مشاهداتی پیش‌نگری نموده است، اما پیش‌نگری مدل‌های CMCC-ESM2 و CNRM-CM6-1 در CMIP6 در مقایسه با CMIP5 کارایی کم‌تری را در شبیه‌سازی نشان داد. پیش‌نگری سالانه سرعت باد (میانگین ایستگاه‌های مورد بررسی) در دوره آینده توسط CMIP6 و CMIP5 به‌ترتیب افزایش و کاهش را نشان می‌دهد. روند سرعت باد در دوره آینده توسط CMIP6 و CMIP5 به‌ترتیب افزایش و کاهش در پیش‌نگری‌های سالانه را نشان می‌دهد. در هر دو گروه از مدل‌ها بیش‌ترین سرعت باد در تابستان و سپس بهار و کم‌ترین سرعت باد در پاییز مشاهده شد. در CMIP5 همه ایستگاه‌ها کاهش سرعت باد و در CMIP6 (جزء در ایستگاه چابهار) افزایش سرعت باد مشاهده شد. در میان ایستگاه‌های مورد مطالعه، چابهار دارای بیش‌ترین میانگین سرعت باد است و در سایر ایستگاه‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد.

واژه‌های کلیدی: ریزمقیاس‌نمایی، سرعت باد، سیستان و بلوچستان، مدل‌های CMIPs.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Rajaei_Fatemeh@znu.ac.ir

استناد: رجائی، فاطمه، و احمدی شرف، ابراهیم (۱۴۰۴). پیش‌نگری میدان باد در آینده بر اساس مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 در استان سیستان و بلوچستان. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۲)، ۲۱۹-۲۳۳.
doi: 10.22098/mmws.2024.15772.1493



تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱
مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۲۱۹ تا ۲۳۳.
ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان

۱- مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر نقش اساسی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییر اقلیمی جهانی دارند. از بین تمام منابع انرژی تجدیدپذیر مورد استفاده برای تولید برق، انرژی باد یکی از پیشگامان از نظر ظرفیت تولید و سرعت رشد تکنولوژی است. انرژی باد به تغییر اقلیم بسیار حساس است، زیرا تغییرات آنی در ویژگی‌های جریان باد به‌طور قابل توجهی پتانسیل تولید برق را تغییر می‌دهد. بنابراین، برای تخمین چگونگی تغییر منابع انرژی بادی در دهه‌های آینده، آگاهی از وضعیت اقلیمی آینده به‌ویژه طبق سناریوهای مختلف گرمایش جهانی، بسیار مهم است (et al., 2017). لازم به توضیح است که فقط ۰/۴ درصد از انرژی الکتریکی ایران از انرژی باد تولید می‌شود (Fadaei et al., 2007). کشور ایران سرشار از منابع تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر است. موقعیت جغرافیایی کشور ایران موجب شده است که منبع بسیار بزرگی از انرژی‌های بادی و خورشیدی در آن موجود باشد. استان سیستان و بلوچستان، واقع در جنوب شرق ایران، تحت تأثیر بادهای شدیداً پایدار شمال غربی تا شمال شرقی است که به «باد ۱۲۰ روزه» معروف است (Alizadeh-Choobari et al., 2013) که به سمت غرب و کوه بابا و هندوکش در سمت شمال شرقی منطقه تشدید می‌شوند.

هم اکنون در مراکز بین‌المللی از مدل‌های متعددی با سناریوهای انتشار، پارامترهای فیزیکی و محاسباتی گوناگون برای شبیه‌سازی اقلیم دهه‌های آینده کره زمین استفاده می‌شود که پژوهش‌گران را در زمینه انتخاب نوع مدل گردش عمومی^۱ برای مطالعات کمی تغییر اقلیم با مشکل مواجه نموده است. برای حل این مشکل در سال ۱۹۹۵ هیات بین‌الدول تغییر اقلیم^۲ با گرد آوردن نمایندگان مراکز فعال در زمینه مدل‌سازی‌های تغییر اقلیم، پروژه استانداردسازی استفاده از مدل‌های جفت شده جوی-اقیانوسی را راه اندازی نمود که ثمره آن پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اقلیمی^۳ بود. برآوردهای اخیر از گرمایش جهانی با استفاده از داده‌های پروژه CMIP دقیق‌تر شده است که این امر منجر به افزایش اعتماد به صحت پروژه مذکور شده است. در مرحله پنجم پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اقلیمی (CMIP5)، مجموعه جدیدی از سناریوهای انتشار به نام نماینده خط سیر غلظت^۴ (RCP) استفاده شده است (Sun and Chen., 2015). در حال حاضر، CMIP در مرحله ششم خود (CMIP6) است و جدیدترین سناریوهای اقلیمی آینده را تشکیل می‌دهد (Eyring et al., 2016). CMIP6، شرایط جدیدی از انتشار گازهای گلخانه‌ای

(کمیت نیروی تشعشعی ناشی از فرآیند طبیعی یا ناشی از انسان)، دخیل نمودن نیروی آتروسول (از جمله خواص نوری)، سناریوهای استفاده از زمین و نیز سناریوهای جدید مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک^۵ را نسبت به نسخه CMIP5 در پیش‌نگری‌های اقلیمی آینده توسعه داده است (Eyring et al., 2016).

تاکنون مطالعات متعددی به مقایسه مدل‌های CMIP6 و CMIP5 پرداخته‌اند. بیش‌ترین کاهش در چگالی نیروی باد در بریتانیا، ایرلند و شمالی‌ترین مناطق قاره (نروژ شمالی و فنلاند) در محدوده ۲۰ تا ۳۵ درصد پیش‌نگری شده است. همچنین، کاهش سرعت باد تا ۲۵ درصد نیز در دریای مدیترانه، طبق مدل‌های CMIP5 پیش‌نگری می‌شود (Reyers et al., 2016). از سوی دیگر، یک مطالعه اخیر کاهش سرعت باد در آینده برای مناطق شمال استوا با استفاده از مدل MRI-AGCM3.2S (Kamranzad and Mori, 2019) را پیش‌نگری نموده است. پژوهش Jung (2018) و Schindler and نیز نشان دادند بسیار محتمل است که سرعت باد در اکثر نقاط برزیل، آفریقای جنوبی و استرالیا شرقی افزایش یابد، در حالی که کاهش سرعت باد برای بخش‌های وسیعی از ایالات متحده آمریکا و روسیه شرقی پیش‌نگری شد. پژوهش et al. (2019) Voldoire بهبود پیش‌نگری‌های بارندگی و دمای سطح دریا در مدل CNRM-CM6 در CMIP6 را نسبت به CNRM-CM5 در CMIP5 را گزارش نمودند. از طرف دیگر، شبیه‌سازی‌های دما و بارش در استرالیا با استفاده از مدل‌های CMIP6 و CMIP5 نشان می‌دهد که دقت CMIP5 بیش‌تر از CMIP6 است (Gros et al., 2020). پژوهش Krishnan and Bhaskaran (2020) با استفاده از CMIP5 و CMIP6 در خلیج بنگال نشان داد که سرعت باد در نواحی جغرافیایی شمالی خلیج بنگال افزایش و برای مناطق مرکزی و جنوبی سرعت باد (۰/۲ تا ۰/۸ متر بر ثانیه) کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر، مطالعه Chen (2020) پیشنهاد نمودند که اریب مدل‌ها در فلات تبت هنوز در CMIP6 وجود دارد. در پژوهش دیگر، Song et al. (2021) در عرض‌های جغرافیایی میانه در مورد تغییرات میدان‌های بادی دریافتند که اریب باد منطقه‌ای شبیه‌سازی شده از CMIP5 به CMIP6 کاهش یافته است. همچنین، تفاوت‌ها و عدم قطعیت‌های مکانی-زمانی در پیش‌نگری‌های بارش و دما در کره جنوبی نشان داد که عدم قطعیت در پیش‌نگری‌های بارش و دما در CMIP6 بیش‌تر از CMIP5 است. همچنین، بررسی بر تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع

⁴ Representative Concentration Pathways (RCP)

⁵ Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)

¹ General Circulation Model (GCM)

² Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

³ Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)

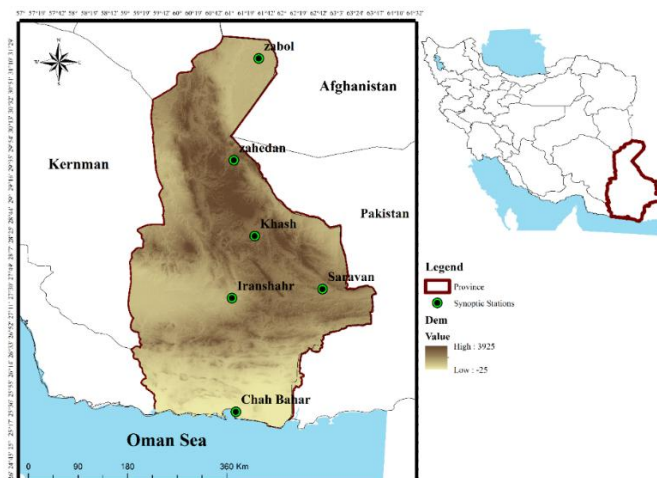
بنابراین، از اهداف این مطالعه ۱- ارزیابی توانایی و عملکرد مدل‌های CMIP5 و CMIP6 (طبق دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در مدل‌های CMIP5 و SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در مدل‌های CMIP6) در پیش‌نگری سرعت متوسط باد جهت تسهیل در انتخاب زیرمجموعه مناسب از مدل‌های با بالاترین صحت پیش‌نگری ۲- پیش‌نگری تغییرات زمانی و مکانی سرعت متوسط باد دوره آینده (۲۰۱۴-۲۱۰۰) براساس همادی مدل‌های منتخب در شش ایستگاه همدیدی استان سیستان و بلوچستان است. همچنین، تمرکز بر روی تفاوت‌های پیش‌نگری‌های مدل‌های CMIP5 و CMIP6 برای انرژی بادی خواهد بود. این مطالعه، اولین مطالعه ارزیابی تغییرات ویژگی‌های سرعت باد آینده در ایران با استفاده از خروجی‌های مدل‌های CMIP5 و CMIP6 است.

۲- داده‌ها و روش کار

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

استان سیستان و بلوچستان با مساحت ۱۸۷۵۰۲ کیلومتر مربع و جمعیت ۱/۷ میلیون نفر، در جنوب شرقی ایران واقع شده است و ۱۱ درصد از مساحت کشور را در بر می‌گیرد (شکل ۱). استان سیستان و بلوچستان از لحاظ طبقه‌بندی اقلیمی در ناحیه اقلیمی بیابانی و خشک است (Farzaneh et al., 2022). غلبه جریانات فصلی پرفشار حاره‌ای بر بخش عظیمی از استان و نیز قرار گرفتن بیابان‌های بزرگ در داخل آن سبب تنوع اقلیمی در استان شده است. در شمال استان میزان تبخیر سالانه بیش از ۴ متر در سال می‌رسد و بیش از ۲۰ سال از وقوع خشکسالی در این منطقه به‌دلیل کمبود بارندگی و کاهش ورودی آب رودخانه هیرمند می‌گذرد و نیز به‌دلیل وزش بادهای ۱۲۰ روزه با سرعت ۱۰۰ و حتی ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت مشهور است. مناطق جنوبی استان با توجه به مجاورت با دریای عمان از بادهای موسمی بهره می‌گیرد که این بادهای عمدتاً بادهای کم سرعت‌تری هستند (Alizadeh-Choobari et al., 2014).

انرژی بادی دریایی اروپا با استفاده از مدل‌های CMIP5 کاهش منابع انرژی بادی فراساحلی روی اروپا را نشان داد، به استثنای برخی از مناطق (شمال اروپا، بخش شمال غربی شبه جزیره ایبری، خلیج لیون، تنگه جبل‌الطارق و سواحل شمال غربی ترکیه) که هیچ تغییر باد را نشان نمی‌دهند (Carvalho et al., 2021). در مطالعه دیگر، تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر شبه جزیره ایبری و منابع انرژی بادی اقیانوسی با استفاده از داده‌های CORDEX، کاهش کلی منابع انرژی بادی را در اکثر مناطق خشکی و فراساحلی شبه جزیره ایبری نشان داد، به جزء برخی از مناطق مانند گالیسیا، سواحل اقیانوس اطلس گالیسیا و شمال پرتغال. همچنین، در مطالعه Martinez and Iglesias (2021) در مورد روند انرژی باد در اروپا طبق مدل‌های CMIP6 به این نتیجه دست یافتند که طبق سناریوی SSP5-8.5، کاهش در چگالی نیروی باد اروپا پیش‌نگری می‌شود. مطالعه Hamed et al. (2022) نشان دادند که مدل‌های CMIP6 برخلاف سایر نقاط کره زمین به جزء در مورد بارندگی عملکرد بهتری نسبت به CMIP5 در منطقه جنوب شرق آسیا ندارد. همان‌طور که مرور مقالات نشان داد، مطالعات محدودی به مقایسه توانایی CMIP5 و CMIP6 در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی به‌ویژه سرعت باد پرداخته‌اند. همچنین، با توجه به عدم قطعیت در توانایی مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 در پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی، صحت‌سنجی عملکرد برون‌دادهای مدل‌های اقلیمی CMIPs با داده‌های مشاهداتی ضروری است. این امر می‌تواند سبب افزایش اعتماد بیش‌تر در استفاده از مدل‌های گردش عمومی در مطالعات اقلیمی شود (Khaje Amiri Khaledi et al., 2022). با توجه به اینکه مدل‌ها ممکن است مهارت‌های متفاوتی در مناطق و دوره‌های زمانی مختلف داشته باشند، میانگین‌گیری ساده از مدل‌های اقلیمی جهت پیش‌نگری اقلیم آینده می‌تواند سبب افزایش عدم قطعیت در پیش‌نگری‌های اقلیمی گردد. بنابراین پیش‌نگری‌های اقلیمی با استفاده از همادی مدل‌های با توان عملکرد بالا ضروری است (Monerie et al. 2017, 2020).



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های همدیدی
Figure 1- Location of the study area and synoptic stations

۲-۲- پایگاه داده

داده‌های سرعت باد از شش ایستگاه همدیدی شکل ۱ بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ از سازمان هواشناسی کل کشور اخذ شد. لازم به ذکر است که تمامی ایستگاه‌ها دارای رکورد داده‌های پیوسته برای کل دوره زمانی مذکور بودند. داده‌های مدل‌های اقلیمی سری CMIP5 و CMIP6 از وب سایت (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>) و (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) دانلود و در سیستم اطلاعات جغرافیایی نسخه ۱۰.۸ استخراج شد. قابل ذکر است مدل‌های منتخب براساس موجود بودن اطلاعات سرعت باد در مدل‌های

داده‌های سرعت باد از شش ایستگاه همدیدی شکل ۱ بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ از سازمان هواشناسی کل کشور اخذ شد. لازم به ذکر است که تمامی ایستگاه‌ها دارای رکورد داده‌های پیوسته برای کل دوره زمانی مذکور بودند. داده‌های مدل‌های اقلیمی سری CMIP5 و CMIP6 از وب سایت (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip5/>) و (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) دانلود و در سیستم اطلاعات جغرافیایی نسخه ۱۰.۸ استخراج شد. قابل ذکر است مدل‌های منتخب براساس موجود بودن اطلاعات سرعت باد در مدل‌های

جدول ۱- مشخصات مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 (Hamed et al., 2021)

Table 1. Characterization of Climate models of CMIP5 and CMIP6

Abbreviation	Model	Country/institution	N (Lon × Lat) Resolution
CANESM	CanESM2 (CMIP5)	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)	128 × 64
	CanESM5 (CMIP6)	Canadian Earth System Model version 5, Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)	128 × 64
CMCC	CMCC (CMIP5)-CESM	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici (Italy)	182 × 149
	CMCC-ESM2 (CMIP6)	Euro-Mediterranean Centre on Climate Change coupled climate model, Italy	362 × 292
CNRM	CNRM-CM5 (CMIP5)	Centre National de Recherches Meteorologiques/Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (France)	362 × 292
	CNRM-CM6- 1 (CMIP6)	Centre National de Recherches Meteorologiques/Centre Europeen de Recherche et Formation Avancees en Calcul Scientifique (France)	256 × 128
IPSL_CM_LR	IPSL-CM5AL (CMIP5)	Institut Pierre-Simon Laplace (France)	182 × 149
	IPSL-CM6AL (CMIP6)	Institut Pierre-Simon Laplace (France)	362 × 332
MPI_ESM_LR	MPI-ESM-LR (CMIP5)	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) (Germany)	256 × 220
	MPI-ESM1- 2-LR (CMIP6)	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) (Germany)	256 × 220

شده در ایستگاه باشد. F_{Gh} و F_{Sh} به ترتیب CDF های متغیر مورد نظر از GCM (G) و از یک ایستگاه معین (S) در یک دوره کالیبراسیون تاریخی (h) تعریف می‌شود (رابطه ۱ و ۲). فرض است که T تبدیل F_{Gh} به F_{Sh} را انجام می‌دهد.

$$T(F_{Gh}(x)) = F_{Sh}(x). \quad (1)$$

$$xT(u) = F_{Sh}(F_{Gh}^{-1}(u)) \quad (2)$$

با فرض ثابت بودن T در زمان، تبدیل را می‌توان برای F_{Gf} اعمال کرد. CDF در مقیاس بزرگ متغیر اقلیمی در یک دوره اعتبارسنجی یا آینده f ، برای تولید F_{Sf} ، CDF در محل ایستگاه برای مدت مشابه CDF- t در این مطالعه برای تصحیح توزیع‌های آماری بزرگ مقیاس به مقیاس محلی استفاده شده است. از این نظر، تغییر مقیاس فضایی را انجام می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک رویکرد ریزمقیاس نمایی در نظر گرفته شود.

$$T(F_{Gf}(x)) = F_{Sf}(x), \quad (3)$$

$$F_{Sf}(x) = F_{Sh}(F_{Gh}^{-1}(F_{Gf}(x))). \quad (4)$$

CDF- t تغییر در مقیاس محلی را قبل از ایجاد مقادیر اقلیمی (دما، باد و بارش) تخمین می‌زند. هنگامی که F_{Sf} از رابطه ۴ تعیین شد، یک رویکرد چندکی (QQ, quantile-quantile) بین F_{Gf} و F_{Sf} برای تولید سری‌های زمانی در مقیاس محلی انجام می‌شود. رویکرد CDF- t مقادیر کمی را از طریق QQ که بین F_{Gf} و F_{Sf} انجام می‌شود، تولید می‌کند. همچنین، سبب تولید بین مقادیر تولید شده در مقیاس محلی مطابق با F_{Sf} در تطابق زمانی با شبیه‌سازی‌های بزرگ مقیاس "آینده" می‌شود.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP5 و CMIP6

اکثر مدل‌های اقلیمی گردش کلی در درجه اول به دلیل توصیف ناکافی مدل‌ها از فرآیندهای فیزیکی که اقلیم و سناریوهای اقلیمی را شبیه‌سازی می‌نمایند، درجه زیادی از عدم قطعیت را در خود جای می‌دهند، (Gao et al., 2019; Hamed et al., 2021a; Weigel et al., 2010). پیش‌نگری صحیح رویدادهای اقلیمی را دارند. بنابراین، جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های گردش کلی در پیش‌نگری اقلیم آینده ضروری است ابتدا داده‌های دوره تاریخی مدل‌های CMIPs با داده‌های مشاهداتی مقایسه و ارزیابی شوند. این ارزیابی به منظور تعیین توانایی مدل‌ها در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی انجام می‌شود. در این مطالعه، عملکرد مدل‌های CMIP5 و CMIP6 با ایستگاه‌های همدیدی مشاهداتی مستقر در استان سیستان و بلوچستان به عنوان داده‌های مطابق شکل ۱ ارزیابی شد

۲-۳- ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در پیش‌نگری سرعت باد توانایی نسل جدید مدل‌های اقلیمی CMIP6 و CMIP5 برای شبیه‌سازی سرعت باد در دوره تاریخی، نسبت به داده‌های مشاهداتی بر سیستان و بلوچستان با توجه به معیارهای آماری شامل اریب، ضریب همبستگی (R^2) و انحراف معیار ارزیابی شد. ضریب تعیین (R^2) که به عنوان مقدار مجذور ضریب همبستگی پیرسون تعریف می‌شود، از ۰ تا ۱ متغیر است. مقادیر R^2 نزدیک به یک، نشان دهنده رابطه قوی بین دو متغیر است و مقادیر بیش‌تر از ۰/۵ قابل قبول تلقی می‌شوند (Vara Prasad et al., 2005). انحراف معیار نیز یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به طور میانگین داده‌ها چه مقدار از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند. میزان اریب نیز به فاصله بین مقدار پیش‌بینی شده با مقدار واقعی اشاره دارد. در حالتی که بایاس زیاد است، به احتمال زیاد، پیش‌بینی‌ها در یک مسیر دور از مقادیر واقعی، تغییر جهت داده است. به این ترتیب، با استفاده از مقادیر آماری اشاره شده قابلیت و دقت مدل‌های استفاده شده تعیین و عدم قطعیت شبیه‌سازی آن‌ها برای متغیر باد قبل از استفاده در پیش‌نگری‌های اقلیمی آینده مشخص شد. همچنین، از رویکرد میانگین چند مدلی^۱ یا همادی مدل‌ها برای پیش‌نگری‌های اقلیمی دوره آتی استفاده شد. رویکرد میانگین چندمدلی به طور گسترده در مطالعات مدل‌سازی اقلیمی به منظور کاهش عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌ها استفاده می‌شود (Gusaina et al., 2020).

۲-۴- ریزمقیاس نمایی داده‌های پیش‌نگری شده با

روش تبدیل توابع توزیع تجمعی^۲ (CDFT)

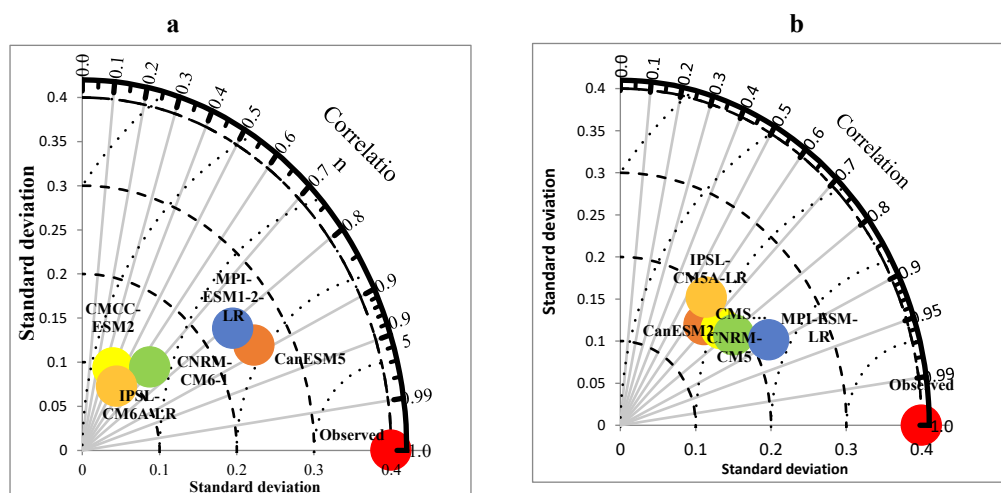
از بسته CDFT در نرم‌افزار RStudio برای ریزمقیاس نمایی آماری و تصحیح اریب خروجی مدل‌ها بر اساس تبدیل توابع توزیع تجمعی استفاده شد (Gusaina et al., 2020). هدف این رویکرد، ارتباط تابع توزیع تجمعی یک متغیر اقلیمی (مثلاً باد) در مقیاس بزرگ (مثلاً از داده‌های GCM) به CDF این متغیر در مقیاس محلی (مثلاً در یک ایستگاه) است. CDF- t را می‌توان به عنوان نوعی روش تصحیح چندکی در نظر گرفت که می‌تواند از هر دو روش ناپارامتریک یا تناظرهای پارامتریک بین چندک‌های پیش‌نگری کننده و پیش‌نگری شونده استفاده نماید. در رویکرد CDF- t ، یک تبدیل T به CDF در مقیاس بزرگ اعمال می‌شود تا CDF جدید حد امکان نزدیک به CDF اندازه‌گیری

² Cumulative Distribution Functions Transformation (CDFT)

¹ Multi-Model Ensemble (MME)

پیش‌نگری نموده‌اند. برخلاف نتایج این پژوهش (2020) Krishnan and Bhaskaran در ارزیابی توانایی شبیه‌سازی سرعت باد با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 در خلیج بنگال به این نتیجه دست یافتند که مدل‌های CMIP6 عملکرد بهتری نسبت به CMIP5 دارند. از سوی دیگر مطالعه Oudar et al., (2020) در مورد تغییرات میدان‌های بادی در عرض‌های جغرافیایی میانه دریافتند که اریب باد منطقه‌ای از CMIP5 به CMIP6 کاهش یافته است. همچنین Hamed et al., (2022) نشان دادند که CMIP6 فقط در مورد متغیر بارش در منطقه جنوب شرق آسیا بهتر از CMIP5 عمل نموده است و در مورد سایر متغیرهای اقلیمی CMIP5 نتایج بهتری را ارائه می‌دهد.

(Taylor et al., 2012). توانایی مدل‌های CMIP5 و CMIP6 برای تخمین سرعت باد فصلی به صورت نمودارهای تیلور ارائه شده است (شکل ۲). شبیه‌سازی مدل‌های CanESM5 در CMIP6 نسبت به CMIP5 بهبود یافته است و نتایج بهتری نسبت به داده‌های مشاهداتی پیش‌نگری نموده است، اما شبیه‌سازی مدل‌های CNRM-CM6-1 و CMCC-ESM2 در CMIP6 در مقایسه با CMIP5 کارایی کمتری را در شبیه‌سازی نشان داد و نیز تغییرات محسوسی در توانایی شبیه‌سازی دو مدل IPSL-CM6A-LR و MPI-ESM1-2- در LR در CMIP6 نسبت به CMIP5 مشاهده نشد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد CMIP5 و CMIP6 به خوبی سرعت باد را



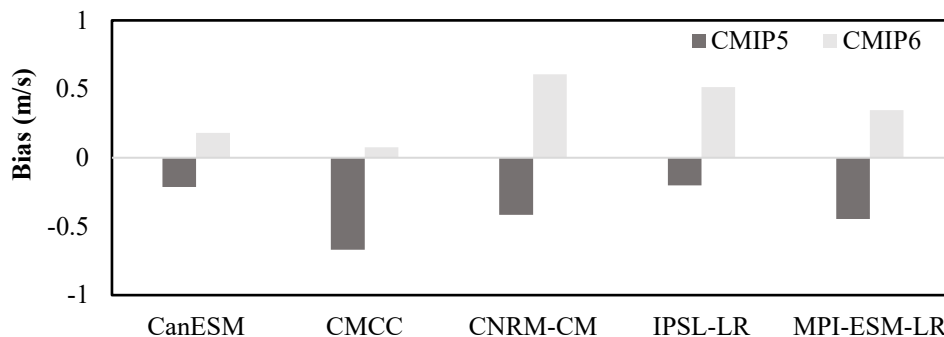
شکل ۲- (الف) نمودار تیلور مدل‌های CMIP5 و داده‌های مشاهداتی و (ب) مدل‌های CMIP6 و داده‌های مشاهداتی
Fig 2- Taylor diagrams of CMIP5 and observation data (a), CMIP6 and observation data (b)

پارامترسازی همرفتی، گنجاندن دینامیک چرخه کربن، میزان یخ قطب شمال و جنوب و جریانات داخلی)، مازول‌های جفت شده، اختلاف وضوح شبکه‌بندی، مؤلفه‌های جوی به کار گرفته شده، فرآیندهای بیوژئوشیمیایی (تجزیه مواد آلی، مقادیر مواد معدنی، کلیاتیت خاک و ...) وابسته باشند (Eyring et al., 2016; Gusain et al., 2020). همچنین، عدم قطعیت‌ها می‌تواند به مؤلفه‌های جوی به کار گرفته شده در مدل‌ها برای شبیه‌سازی سرعت باد و نیز عدم تصحیحات بین جو و اقیانوس مرتبط باشد (Muthige 2018). علاوه بر این، پیش‌بینی‌های آتی در سناریوهای RCP که تحت پروژه CMIP5 توسعه یافته‌اند، تغییرات آتی کاربری زمین-پوشش زمین (LULC) را در نظر نمی‌گیرند (Kulkarni and Huang 2014) که می‌تواند باعث ایجاد اریب در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی گردد این‌درحالی است که در مدل‌های سری CMIP6 از داده‌های کاربری زمین-پوشش زمین به روز شده LUH2 استفاده می‌شود. از سایر ارزش

شکل ۳ اریب داده‌های شبیه‌سازی شده دوره تاریخی مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 را در مقایسه با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. به‌طور کلی، اریب در مدل‌های CMIP6 متفاوت از CMIP5 است. همه مدل‌ها در CMIP5 سرعت باد را کمتر از داده‌های مشاهداتی تخمین زده‌اند. مدل CanESM2 و IPSL CM5A-LR در CMIP5 تفاوت کمی با داده‌های مشاهداتی و مدل CMCC-ESM2 در مدل‌های CMIP6 نزدیک‌ترین داده‌ها نسبت به داده‌های مشاهداتی را شبیه‌سازی نمودند و مدل CNRM-CM6-1 کمترین شباهت نسبت به داده‌های مشاهداتی را نشان داد. همچنین، مدل‌ها مهارت‌های متفاوتی در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دارند. مهارت بهتر نشان داده شده توسط برخی مدل‌ها می‌تواند به پیشرفت‌های انجام شده در فیزیک فرایندهای زیربنایی (مانند

مدل‌های CMIP5 اشاره نمود که می‌تواند از دلایل اختلاف پیش‌نگری مدل‌های سری CMIP6 و CMIP5 باشد (Lun et al., 2021).

افزوده مدل‌های CMIP6 در مقایسه با CMIP5، می‌توان به مسیرهای اجتماعی-اقتصادی متفاوت در سناریوهای CMIP6، تمرکز بر کاهش اریب مدل‌ها، وضوح بالاتر مدل‌ها و نیز در نظر گرفتن فرآیندهای پیچیده‌تر در مدل‌های CMIP6 در مقایسه با



شکل ۳- عملکرد CMIP5 و CMIP6 در پیش‌نگری سرعت باد تاریخی بر اساس میزان اریب
Fig 3- Performance of CMIP5 and CMIP6 in simulating historical wind speed based on Bias

مناطق اقیانوس هند را پیش‌نگری نمود که به‌ترتیب بین ۳/۵ و ۶/۵ درصد برای RCP 4.5 و RCP 8.5 متغیر است.

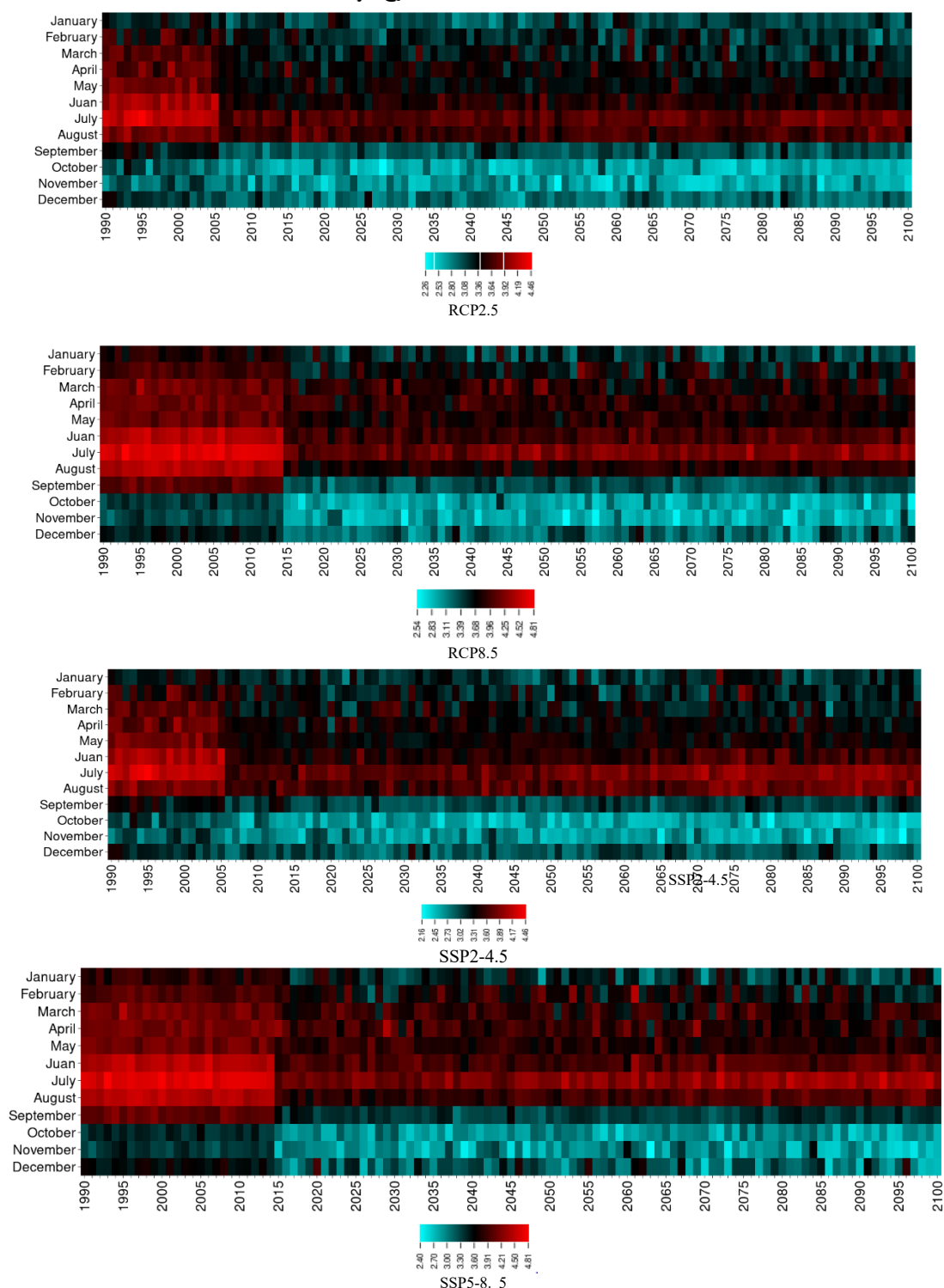
در داده‌های مشاهداتی و مدل‌های CMIP5 و CMIP6، بیش‌ترین سرعت باد در تابستان و سپس بهار و کم‌ترین سرعت باد در پاییز مشاهده شد. ماه اگوست بیش‌ترین میانگین سرعت باد و ماه‌های دسامبر و نوامبر کم‌ترین میانگین ماهانه سرعت باد را دارا بودند. پژوهش‌های (Roshan et al., 2014) نیز نشان داد دو فصل بهار و تابستان بیش‌ترین میانگین نیروی باد و فصل پاییز کم‌ترین نیروی باد در کشور را دارد. در CMIP5 کاهش سرعت باد در همه ماه‌ها طبق هر دو سناریو مشاهده شده است. بیش‌ترین تغییرات سرعت باد شبیه‌سازی شده آینده نسبت به دوره مشاهداتی طبق سناریوی RCP4.5 در بهار (۰/۴۷-) و کم‌ترین در پاییز (۰/۲۹-) متر در ثانیه بوده است و نیز طبق سناریوی RCP8.5 کاهش سرعت باد در فصل بهار حداکثر (۰/۴۷-) متر بر ثانیه و در فصل پاییز حداقل (۰/۲۸-) متر بر ثانیه است. در مدل‌های CMIP6 در تمامی فصول افزایش سرعت باد مشاهده شد به‌طوری‌که طبق سناریو SSP2 بیش‌ترین افزایش سرعت باد در فصل بهار (۰/۴۹) متر بر ثانیه و کم‌ترین افزایش در فصل تابستان (۰/۳۲) متر بر ثانیه و طبق سناریو SSP5 بیش‌ترین افزایش سرعت باد در فصل زمستان (۰/۴۳) متر بر ثانیه و کم‌ترین افزایش سرعت باد در تابستان (۰/۳۷) متر بر ثانیه مشاهده شد. براساس این مطالعه تغییرات سرعت باد در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی در فصل بهار بیش‌تر از سایر فصول است. نتایج مطالعه (Martinez and Iglesias, 2021) در مورد سیر تکاملی انرژی بادی در مدیترانه مرکزی طبق سناریوی SSP2-4.5 در شبه جزیره ایبری و اقیانوس اطلس در آینده بلندمدت، کاهش کلی سرعت باد در بهار و پاییز را پیش‌نگری نمودند و طبق سناریو SSP5-8.5 افزایش جزئی در انرژی باد از اکتبر تا آوریل

۳-۲- توزیع زمانی تغییرات پیش‌بینی شده سرعت باد

شکل ۴ روند تغییرات ماهانه و سالانه سرعت باد توسط CMIP5 و CMIP6 را نشان می‌دهد. CMIP5 کاهش سرعت باد و CMIP6 افزایش سرعت باد در پیش‌بینی‌های سالانه، طبق هر دو سناریو را نشان می‌دهد. هر چند تغییرات قابل توجه است. میانگین سالانه سرعت باد تا ۲۱۰۰، برای سناریوهای - SSP2 و ۴.۵ و ۸.۵ - SSP5 به‌ترتیب ۳/۵۸ متر بر ثانیه و ۳/۵۷ متر بر ثانیه پیش‌نگری می‌شود و طبق سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 میانگین سالانه سرعت باد ۳/۱ متر بر ثانیه و ۳/۲ متر بر ثانیه پیش‌نگری می‌شود. این در حالی است که میانگین سالانه سرعت باد ایستگاه‌های مشاهداتی در دوره پایه ۳/۴۹ متر بر ثانیه است. اثرات تغییر اقلیمی بر انرژی بادی ایالات متحده با استفاده از همادی مدل‌های CMIP5 نشان داد قدرت باد در مناطق وسیعی از سواحل خشکی و فراساحلی غربی و شرقی ایالات متحده کاهش خواهد یافت، اگرچه مرکز ایالات متحده افزایش سرعت باد را تجربه خواهد نمود (Costoya et al., 2020). از سوی دیگر بررسی تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع انرژی بادی دریایی با استفاده از مدل‌های CMIP5 در شمال غربی آفریقا، یک افزایش در منبع انرژی باد در سواحل گینه را نشان داد (Soares et al., 2019). مطالعه دیگر بر روی منبع انرژی باد ساحلی جنوب غربی آفریقا با استفاده از داده‌های مدل‌های CMIP5، نشان داد که منابع بادی دریایی برای نامیبیا و سواحل غربی آفریقای جنوبی افزایش و برای مناطق ساحلی آنگولا کاهش خواهد یافت (Lima et al., 2021). از سوی دیگر، مطالعه Kamranzad and Mori (2019) با استفاده از مدل MRI-AGCM3.2S طبق سناریوی RCP 8.5 تضعیف بادهای موسمی زمستانی در بیش‌تر

دیگر توسط Chen (2020) با استفاده از داده‌های CMIP5 روی تغییرات آینده در منابع باد آمریکای شمالی پیش‌نگری نمودند که قدرت باد در دشتهای جنوبی در طول بهار و تابستان افزایش قابل توجه (تا ۲۰ درصد) و در دشتهای شمالی و غرب میانه در زمستان و بهار افزایش کمی در قدرت باد (در حدود ۱۰ درصد) رخ خواهد داد.

در مناطق با عرض جغرافیایی میانی و بالایی پیش‌نگری شد. همچنین، مطالعات دیگر بر اساس پیش‌نگری‌های اقلیمی CMIP5 افزایش منابع باد فصول زمستان در شمال اروپا و کاهش سرعت باد در تابستان در جنوب اروپا را گزارش نمودند (Reyers et al., 2016 Barthelmie et al., 2010). پژوهش



شکل ۴- نقشه تغییرات زمانی همادی مدل‌های CMIP5 و CMIP6 در دوره تاریخی و آینده

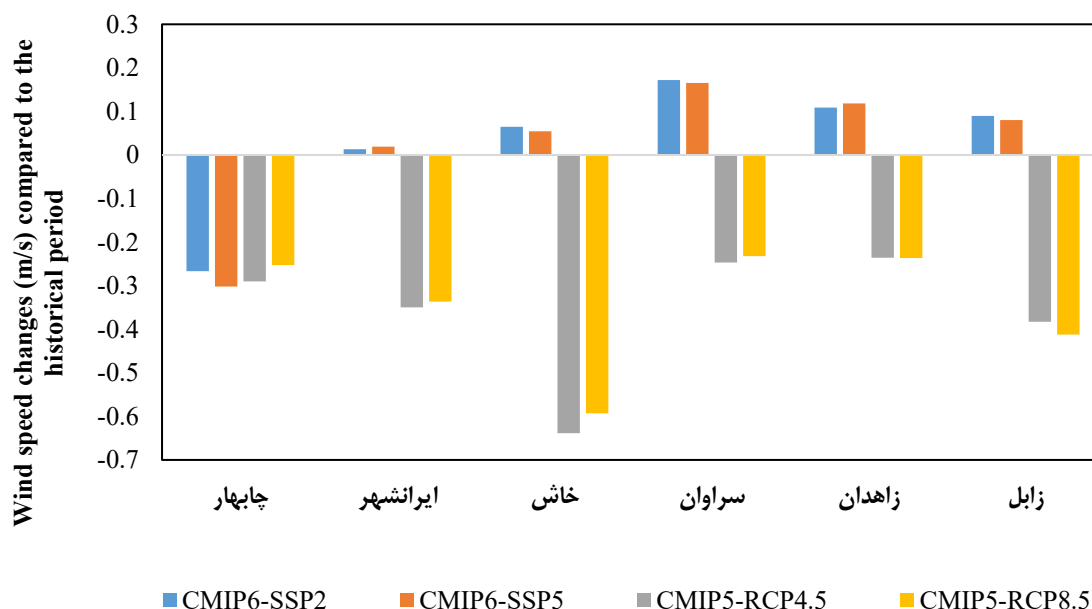
Fig 4- The temporal maps of MME models in the historical and projected climate using the CMIP5 and CMIP6

۳-۳- توزیع مکانی تغییرات پیش‌نگری شده سرعت باد

در شکل ۵ میانگین تغییرات سرعت باد شش ایستگاه همدیدی (دوره آینده نسبت به میانگین دوره تاریخی) با استفاده از همادی مدل‌های اقلیمی طبق مدل‌های CMIP5 و CMIP6 نشان داده شده است. میانگین سالانه مدل‌های CMIP5 نسبت به دوره پایه، در همه ایستگاه‌ها کاهش سرعت باد را نشان می‌دهد. در CMIP5 طبق هر دو سناریو، ایستگاه خاش و زابل بیش‌ترین کاهش سرعت باد نسبت به سایر ایستگاه‌ها را داشتند. این در حالی است که در CMIP6 جزء در ایستگاه چابهار در سایر ایستگاه‌ها افزایش سرعت باد مشاهده شد. همچنین، تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین دو سناریو در هر دو مدل‌های CMIP5 و CMIP6 مشاهده نشد.

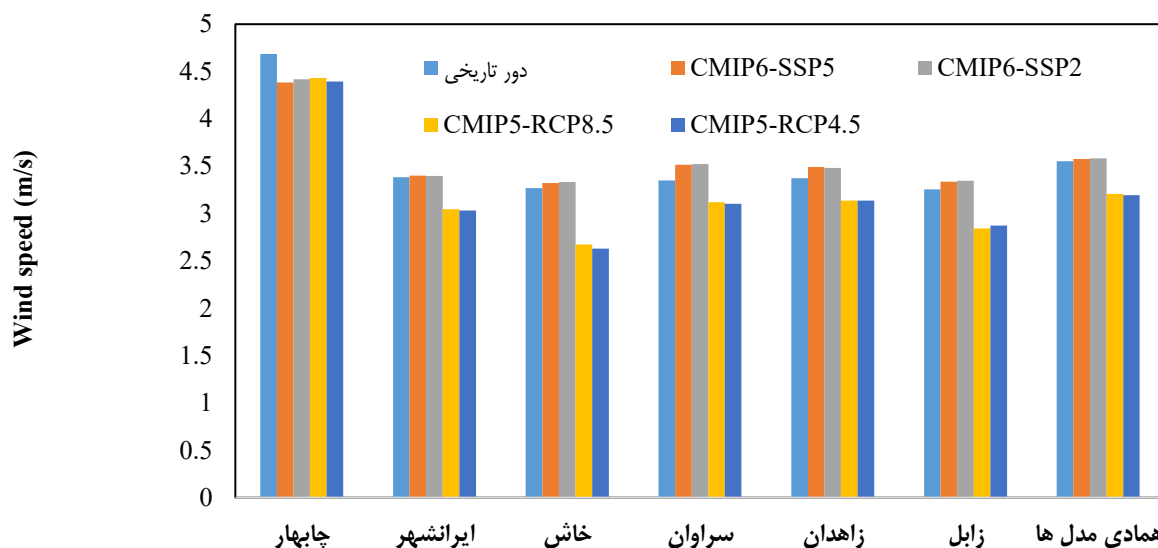
در میان ایستگاه‌های مورد مطالعه، چابهار دارای بیش‌ترین میانگین سرعت باد است و سایر ایستگاه‌ها تفاوت قابل ملاحظه‌ای را نشان ندادند (شکل ۶). مناطق جنوبی استان با توجه به مجاورت با دریای عمان از بادهای موسمی بهره می‌گیرد. بادهای فراساحلی می‌توانند بخش عمده‌ای از واکنش جهانی به تغییر اقلیمی و گرم شدن کره زمین باشند (Jung and Schindler 2018). انرژی باد فراساحلی به‌طور قابل توجهی بالاتر از مناطق خشکی است که می‌تواند به‌دلیل فقدان ارتفاع‌های طبیعی و غیر طبیعی باشد و نیز انرژی باد در مناطق دریا و اقیانوس پایدارتر است (Carta et al., 2009). همچنین، این تفاوت در ایستگاه‌ها می‌تواند به‌دلیل

ورود توده‌های مختلف هوا از جهات مختلف، توزیع فشار هوا در سطح دریا، الگوهای هوا در سطوح مختلف جو و از سوی دیگر به تنوع محیط‌زیستی استان مربوط شود. همچنین، الگوهای متفاوت باد ممکن است به‌دلیل ویژگی‌های محلی مؤثر بر باد باشد. تفاوت عرض جغرافیایی بین بخش شمالی و جنوبی استان، وجود چین خوردگی‌ها، قله‌ها و دره‌های فراوان و ترکیبی از جبهه‌های مختلف که از سرزمین‌های مختلف سرچشمه می‌گیرند منابع مختلف باد در استان را باعث می‌شود. به‌طوری که خاش و سراوان در بین رشته کوه‌های سیاهان و تفتان و شهر زاهدان مانند یک چاله در بین چند رشته کوه قرار گرفته است. ایستگاه زابل، در شمال، دشت سیستان، تشکیل شده از آبرفت هیرمند و نیز ایستگاه چابهار در مجاورت دریای عمان قرار دارد. این اختلاف تغییرات باد در موقعیت‌های مکانی متفاوت در مطالعات مختلف نیز مشاهده شده است به طوری که در بررسی تغییرات اقلیمی بر منابع بادی دریایی اروپا با استفاده از مدل‌های CMIP5 کاهش منابع بادی در مناطق فراساحلی مشاهده شد اما در مناطق شمال اروپا، بخش شمال غربی شبه جزیره ایبری، خلیج لیون و تنگه جبل الطارق تغییراتی در سرعت باد مشاهده نشد (Carvalho et al., 2021). همچنین، (Kamranzad and Mori., 2019) نیز بر تغییرات سرعت باد در موقعیت‌های مکانی متفاوت تاکید نمودند به طوری که در برزیل و آفریقای جنوبی افزایش و در شرق روسیه و بخش‌هایی از آمریکا کاهش سرعت باد را پیش‌نگری نمودند.



شکل ۵- تغییرات سرعت باد دوره آینده نسبت به دوره تاریخی

Figure 5- Wind speed change in the future period compared to the historical period



شکل ۶- میانگین سرعت باد در ایستگاه‌های هم‌دیدی
Figure 6 - Average wind speed at synoptic stations

پیشنهاد می‌شود ۱- برای سایر نقاط ایران این مطالعه نیز صورت پذیرد و ارزیابی شود آیا مکان‌هایی که در حال حاضر دارای نیروی بادی مناسب تشخیص داده شده‌اند ممکن است در آینده شاهد کاهش منابع باد باشند یا بالعکس؟ ۲- همچنین، پیشنهاد می‌شود داده‌های میانگین سرعت با بارش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی بررسی و مقایسه شود. ۳- تداوم و حداکثر سرعت باد در مقیاس روزانه جهت ایجاد نیروگاه‌های بادی در استان بررسی شود. ۴- با توجه به خشک شدن تالاب هامون در منطقه سیستان، ارتباط سرعت متوسط با بارش‌های منطقه بررسی گردد. همچنین، پیشنهاد می‌شود روش‌های مختلف تصحیح خطا و نیز ریزمقیاس‌نمایی مورد بررسی قرار گیرند و بهترین روش پیشنهاد شود. از سوی دیگر استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به جای داده‌های مشاهداتی و مقایسه نتایج آن‌ها می‌تواند به‌عنوان پیشنهاد پژوهشی دیگر مد نظر قرار گیرد.

سپاسگزاری

مقاله مستخرج از طرح داخلی به شماره شناسه ۱۱۷۴ و کد طرح ۱۴۰۲-۳ دانشگاه زنجان است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه تأثیر تغییر اقلیم را بر ویژگی‌های سرعت باد آینده با استفاده از GCM های توسعه یافته طبق پروژه CMIP6 و CMIP5 در استان سیستان و بلوچستان را بررسی نمود. مقایسه داده‌های سرعت باد دوره تاریخی شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های CMIP6 و CMIP5 با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های هم‌دیدی نشان داد هر دو CMIP6 و CMIP5 در پیش‌نگری سرعت باد عملکرد مناسبی دارند و CMIP6 عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های CMIP5 را نشان نداد. سرعت باد پیش‌نگری شده برای آینده، روند کاهشی در CMIP5 و در CMIP6 روند افزایشی نشان داد هر چند تغییرات جزئی است. توزیع فضایی سرعت باد در همه ایستگاه‌ها طبق CMIP5 کاهش سرعت باد و در CMIP6 افزایش سرعت باد را نشان داد. ماه اگوست بیش‌ترین میانگین سرعت باد و ماه‌های دسامبر و نوامبر کم‌ترین میانگین ماهانه سرعت باد را دارا بودند. در CMIP5 کاهش سرعت باد در همه ماه‌ها طبق هر دو سناریو مشاهده شده است. در مدل‌های CMIP6 در تمامی فصول افزایش سرعت باد مشاهده شد. براساس این مطالعه تغییرات سرعت باد در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی در فصل بهار بیش‌تر از سایر فصول است. این نتایج در ارزیابی پتانسیل بخش انرژی بادی در استان سیستان و بلوچستان که جز استان‌های بادخیز کشور است جالب توجه است، که انتظار می‌رود در چارچوب تصمیمات آتی برای این منطقه توسعه بیش‌تری یابد و به‌عنوان یک مرجع عمل نماید بنابراین

مشارکت نویسندگان

فاطمه رجائی: نگارش نسخه اولیه مقاله، مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري؛ **ابراهیم احمدی شریف:** ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج.

منابع

خواجهمیری، چکاوک، خسروی، محمود، طاوسی، تقی، حمیدیان‌پور، محسن، و کیانی‌مقدم، منصور (۱۴۰۱). صحت‌سنجی عملکرد برون‌داد مدل اقلیمی CMIP6 با داده‌های مشاهداتی کرانه‌های مکران. *هواشناسی و علوم جو*، ۵ (۱)، ۴۱-۲۲. doi:10.22034/jmas.2023.379448.1193

روشن، غلامرضا، قنقرمه، عبدالعظیم، و شاهکونی، اسماعیل (۱۳۹۳). ارزیابی پتانسیل تولید انرژی بادی در ایستگاه‌های منتخب ایران. *برنامه‌ریزی منطقه‌ای*، ۴ (۱۴)، ۳۰-۱۳. کپخامقدم، پریسا، و دلیری، معصومه (۱۳۹۶). ارزیابی امکان بهره‌گیری از انرژی باد در استان سیستان و بلوچستان. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۴۹ (۳)، ۴۴۱-۴۵۵. فرزانه، مهسا، ملبوسی، شراره، و حمیدیان‌پور، محسن (۱۴۰۱). پیش‌نگری تغییرهای اقلیمی استان سیستان و بلوچستان تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۱۳ (۵۱)، ۱۴۸-۱۲۹. doi:10.30495/sarzamin.2023.22861

References

- Alizadeh Choobari, O., Zawar-Reza, P., Sturman, A., (2013). Low level jet intensification by mineral dust aerosols. *Ann. Geophys.* 31, 625–632. doi:10.5194/angeo-31-625-2013.
- Alizadeh-Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The “wind of 120 days” and dust storm activity over the Sistan Basin. *Atmospheric Research*, 143, 328-341. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.02.004.
- Carta, JA., Ramirez, P., & Velazquez, S. (2009). Are view of wind speed probability distributions used in wind energy analysis: case studies in the Canary Islands. *Renew Sustain Energy Rev*, 13, 933–55. doi: 10.1016/j.rser.2008.05.005
- Carvalho A., Rocha X., Costoya M., deCastro M (2021). Wind energy resource over Europe under CMIP6 future climate projections: What changes from CMIP5 to CMIP6 D. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 151:111594.
- Carvalho, A., Rocha, X., Costoya, M., & deCastro, M. G. (2021). Wind energy resource over Europe under CMIP6 future climate projections: What changes from CMIP5 to CMIP6. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111594. doi: 10.1016/j.rser.2021.111594
- Carvalho, D. C., Rocha A., Gomez-Gesteira, M., & Silva Santos, C. (2017). Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections. *Renew Energy*, 101, 29–40. doi: 10.1016/j.renene.2016.08.036
- Chaturvedi, R. K. J., Joshi, M., Jayaraman, G., Bala, & Ravindranath, N. H. (2012). Multi-Model Climate Change Projections for India under. *Representative Concentration Pathways, Current Science*, 103, 791-802. doi: 10.1016/j.agwat.2024.108673.
- Chen, HP., & Sun, JQ. (2015). Assessing model performance of climate extremes in China: An intercomparison between CMIP5 and CMIP3. *Climatic Change*, 129(1-2), 197–211. doi:10.1029/2005JD006290
- Chen, L. (2020). Impacts of climate change on wind resources over North America based on NA-CORDEX. *Renew Energy*, 135, 1428 – 38. doi: 10.1016/j.renene.2020.02.090
- Christopher, J., Schindler, D. (2019). Climate Changing wind speed distributions under future global Energy. *Conversion and Management*, 198, 111841. doi: 10.1016/j.enconman.2019.111841.
- Costoya, X., deCastro, M., & Carvalho, D. G. (2020). On the suitability of offshore wind energy resource in the United States of America for the 21st century. *Appl Energy*, 262, 114537. doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114537.
- Eyring, V., Bony, S., & Meehl, G. A. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937–58. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- Fadaei, D., (2007): The feasibility of manufacturing wind turbines in Iran, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.11, PP.536 – 542. doi: 10.1016/j.rser.2005.01.012.
- Farzaneh M., Malbosi Sh., Hamidian Poor M (2022). Prediction of climate variable in Sistan and Baluchestan province under RCPs scenarios. *Climatology Research*. 13 (51): 129-148. doi: 10.30495/sarzamin.2023.22861 [In Persian]
- Gao, J., Sheshukov, A.Y., Yen, H., Douglas-Mankin, K.R., White, M.J., & Arnold, J.G. (2019). Uncertainty of hydrologic processes caused by bias-corrected CMIP5 climate change projections with alternative historical data sources. *Journal of Hydrology* . 568, 551–561. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.041
- Grose, M. R., Narsey, S., Delage, F. P., Dowdy, A.J., Bador, M., Bosch, G., Chung, C., Kajtar, J.B., Rauniyar, S., Freund, M.B., Lyu, K., Rashid, H., Zhang, X., Wales, S., Trenham, C., Holbrook, N.J., Cowan, T., Alexander, L., Arblaster, J. M., & Power, S. (2020). Insights from CMIP6 for

- Australia's Future climate. *Earth's Fut*, 8. doi:10.1029/2019EF001469.
- Gusaina, S., & Ghoshb, S. (2020). Added value of CMIP6 over CMIP5 models in simulating Indian summer monsoon rainfall. *Karmakar Atmospheric Research*, 232, 104680.
- Hamed, M. M., Nashwan, M. S., & Shahid, S. b. (2021). Performance evaluation of reanalysis precipitation products in Egypt using fuzzy entropy time series similarity analysis. *Climatol*. 41, 5431–5446. doi: 10.1002/joc.7286
- Hamed, M., Salem Nashwan, M., & Shahid, Sh. (2022). In consistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia. *Tarmizi Atmospheric Research*, 265, 105927. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105927
- Hung, M. J. L., Lin, W., Wang, D., Kim, T., Shinoda, & Weaver. S. (2013). MJO and Convectively Coupled Equatorial Waves Simulated by CMIP5 Climate Models. *Journal of Climate*, 26, 6185-6214. doi:10.1175/JCLI-D-12-00541.1
- 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. *Atmos Res*, 254, 639-105525. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105525
- Jung, C., & Schindler, D. (2018). 3D statistical mapping of Germany's wind resource using WSWs. *Energy Convers Manage*, 159, 96–108. doi:10.1016/j.enconman.2017.12.095
- Kamranzad, B. (2019). Nobuhito Mori Future wind and wave climate projections in the Indian Ocean based on a super high-resolution MRI-AGCM3.2S model projection. *Climate Dynamics*, 53:2391–2410. doi:10.1007/s00382-019-04861-7.
- Kamranzad, B., & Mori, N. (2019). Future wind and wave climate projections in the Indian Ocean based on a super-high-resolution MRI-AGCM3.2S model projection. *Clim Dyn*, 53(3–4), 2391–2410. doi:10.1007/s00382-019-04861-7.
- Khaje Amiri Khaledi, Ch; Khosravi, M.; Taosi, T. (2022). Validation of CMIP6 climate model output performance with observational data of Makran coast. *Meteorology and Atmospheric Sciences*, 5 (1)1, 22-41. doi: 10.22034/jmas.2023.379448.1193 [In Persian]
- Krishnan, A., & Bhaskaran, P. (2020). Skill assessment of global climate model wind speed from CMIP5 and CMIP6 and evaluation of projections for the Bay of Bengal. *Climate Dynamics*, 55, 2667–2687. doi: 10.1007/s00382-020-05406-.
- Kulkarni, S., & Huang, H. P. (2014). Changes in surface wind speed over North America from CMIP5 model projections and implications for wind energy. *Adv Meteorol*, 292763. doi: 10.1155/2014/292768
- Lima, DCA., Soares, PMM., Cardoso, RM., Semedo, A., Cabos, W., & Sein, DV. (2021). The present and future offshore wind resource in the Southwestern African region. *Clim Dynam*, 56, 1371 – 88. doi: 10.1175/2010BAMS2946.1
- Lun, Y., Liu, L., Cheng, L., Li. X., Li. H., & Xu. Z. (2021). Assessment of GCMs simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 41, 3994 – 4018. doi: 10.1002/joc.7055.
- Martinez, G., & Iglesias, A. (2021). Wind resource evolution in Europe under different scenarios of climate change characterised by the novel Shared Socioeconomic Pathways. *Energy Conversion and Management*, 234, 11396. doi: 10.1016/j.enconman.2021.113961.
- Moghadam, P., Delbari, M. (2016). Evaluating the possibility of using wind energy in Sistan and Baluchestan province. *Natural Geography Research*, 49 (3), 441-455. [In Persian]
- Monerie, P.A., Sanchez-Gomez, E., Pohl, B., Robson, J., Dong, B., 2017. Impact of internal variability on projections of Sahel precipitation change. *Environ. Res. Lett.* 12 114003. doi: 10.1016/j.ifacol.2017.07.155.
- Monerie, P.A., Wainwright, C.M., Sidibe, M., Akinsanola, A.A., 2020. Model uncertainties in climate change impacts on Sahel precipitation in ensembles of CMIP5 and CMIP6 simulations. *Clim. Dyn.* 55 (5-6), 1385-1401. doi: 10.1016/j.agwat.2020.108673.
- Muthige, M. S. (2018). Projected changes in tropical cyclones over the South West Indian Ocean under different extents of global warming *Environ. Re, Lett.* 13 065019. doi: 10.1088/1748-9326/aabc60.
- O'Neill, BC., Tebaldi, C., van, Vuuren D. P., et al. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9, 3461–82. doi: 10.5194/gmd-9-3461-2016.
- Ouarda TBMJ, Charron C, Shin J-Y, Marpu PR, Al-Mandoos AH, Al-Tamimi MH, et al. (2020). Probability distributions of wind speed in the UAE. *Energy Convers Manage*.93:414–34. doi: 10.1016/j.wace.2020.100303
- Pryor, S. C., & Barthelmie, R. J. (2010). Climate change impacts on wind energy: a review. *Renew Sustain Energy Re*, 14(1), 430 – 7. doi: 10.1016/j.rser.2009.07.028
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E., (2009 b). AquaCrop the FAO crop model to simulate yield response to water: II: main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101, 438 – 447. doi: 10.2134/agronj2008.0140s.

- Reyers, M., Moemken, J., & Pinto, J. G. (2016). Future changes of wind energy potentials over Europe in a large CMIP5 multi model ensemble. *International Journal of Climatology*, 36(2), 783–96. doi: 10.1002/joc.4382.
- Roshan Gh.R., Qanqormeh, Gh., & Shahkoui, A. (2014). Evaluation of wind energy production potential in selected stations of Iran. *Regional Planning*, 4 (14), 13-30. [In Persian]
- Sansom, P.G., Stephenson, D.B., Ferro, C.A., Zappa, G., & Shaffrey, L. (2013). Simple uncertainty frameworks for selecting weighting schemes and interpreting multimodel ensemble climate change experiments. *J. Clim.* 26 (12), 4017–4037. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00462.1
- Soares, PM., Lima, D., Semedo, A., Cabos, W., & Sein, D. V. (2019). Climate change impact on Northwestern African offshore wind energy resources. *Environ Res Lett*, 14, 124065. doi: 10.1088/1748-9326/ab5731
- Song, Y.H., Chung, E.-S., & Shahid, S. a. (2021). Spatiotemporal differences and uncertainties in projections of precipitation and temperature in South Korea from CMIP6 and CMIP5 general circulation models. *International Journal of Climatology*. 41, 13, 5899-5919. doi: 10.1002/joc.7159
- Taylor KE. (2012). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J Geophys Res Atmos*; 106:7183–92. doi: 10.1007/978-3-030-29639-1_2.
- Vara Prasad, P., Allen Jr, L., & Boote, K. (2005). Crop responses to elevated carbon dioxide and interaction with temperature: grain legumes. *Journal of Crop Improvement*, 13, 113 – 155. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104680
- Voldoire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., et al. (2019). Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1. *J Adv. Model Earth Syst*, 11, 2177–2213. doi: 10.1029/2019ms001683.
- Weigel, A.P., Knutti, R., Liniger, M. A., & Appenzeller, C. (2010). Risks of model weighting in multimodel climate projections. *J. Clim.* 23, 4175–4191. doi: 10.1175/2010JCLI3594.1.
- Yanlin Yue, a., Dan Yan, b. c., Qun Yue, a., Guangxing Ji, d., & Zheng Wang, a, e. (2021). Future changes in precipitation and temperature over the Yangtze River Basin in China based on CMIP6 GCMs. *Atmospheric Research*, 264, 105828. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105828.