Shahid Beheshti University

Researches in Earth Sciences

Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir

Research Article

Investigating the performance of the deterministic and probabilistic versions (multi-member ensemble) of the ERA5 dataset in estimating Iran's temperature

Aboulfazl Heydari[1], Azar Zarrin[*1], Abbasali Dadashi-Roudbari[1]

1-Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Received: 11 Feb 2023 Accepted: 06 Sep 2023

Extended Abstract

Introduction: Temperature is a key atmospheric variable and has a direct effect on other atmospheric variables including precipitation. The average global temperature has increased in recent decades, which causes an increase in evapotranspiration, an increase in climate extremes, drought, and wildfires. Examining the performance of different versions of ERA5 can help in choosing the best version of ERA5 in climate studies of the country. This research examines Iran's temperature based on deterministic and probabilistic versions of the ECMWF-ERA5 reanalysis, which replaces the previous releases.

Materials and methods: The data used in this study is the average monthly air temperature which we examined in two ERA5 deterministic and probabilistic datasets. To investigate the impact of horizontal resolution on temperature estimation, two horizontal resolutions of 0.25º and 0.5º from the deterministic and probabilistic versions of ERA5 have been used. Also, the multi-member Ensemble of Data Assimilations (EDA) version with a horizontal resolution of 0.5º has been used to compare ERA5 probabilistic dataset versus its deterministic version. Before evaluating the data of three different versions of ERA5, a multi-member ensemble dataset was generated from 10 different members of the probabilistic version of ERA5, which are presented as Member0 to Member9.

Results and discussion: The results showed that ERA5 correctly estimates the spatial distribution of average temperature in Iran. However, in Iran's higher latitudes and regions with complex topography, the performance of ERA5 in temperature estimation is worse than in arid and semi-arid interior regions. In addition to the complex topography, the ERA5 performance is affected by certain complex geographical features such as the southern coast of the Caspian Sea. The worse performance of ERA5 temperature in the coastal areas of the north of the country and Zagros may reflect some shortcomings in the accurate representation of the geographical features of these areas, such as the air-sea interaction and the simultaneous interaction of local moist currents with the coastline and the complex topography of Alborz and Zagros.

Conclusion: Comparing different versions of ERA5 with observational data showed that the deterministic version of ERA5 with a resolution of 0.5º systematically underestimates the temperature in Iran, which is -7.41% for the area-averaged of the country. On the other hand, the deterministic version with a resolution of 0.5º overestimates the temperature of Iran by 12.01% in the area-averaged of the countryExamining three different versions of the ERA5 dataset for two deterministic and probabilistic versions showed that the deterministic version of ERA5 with a horizontal resolution of 0.25º with an area-averaged bias of 1.07 ºC and a percentage of bias of 9.36% shows the best estimate of Iran's temperature. The monthly distribution of Iran's average temperature based on the ERA5 deterministic version with a resolution of 0.25º showed that the minimum temperature of Iran is -10.49 ºC in January and the maximum temperature is 39.83 ºC in July. The temperature in all months and the annual average follow the topography in Iran. The minimum temperature is negative in 5 months of the year (January, February, March, November, and December) in Iran.

Keywords: Iran, Temperature, ERA5 dataset, Multi-member ensemble.

Citation: Aboulfazl Heydari, Azar Zarrin, Abbasali Dadashi-Roudbari (2023). Investigating the performance of the deterministic and probabilistic versions, *Res. Earth. Sci:* 14(4), (1-16) DOI: 10.48308/ESRJ.2023.103874

* Corresponding author E-mail address: zarrin@um.ac.ir

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

پژوهشهای دانش زمین
Journal homepage: https://esrj.sbu.ac.ir

بررسی کارایی نسخه‌های قطعی و احتمالاتی (چند عضوی همادی) مجموعه داده ERA5 در برآورد دمای ایران

ابوالفضل حیدری[۱]، آذر زرین*[۱]، عباسعلی داداشی رودباری[۱]

۱-گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۲ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۵

چکیده گسترده

مقدمه: دما یکی از اصلی‌ترین متغیرهای جوی است و تأثیری مستقیم بر سایر متغیرهای جوی از جمله بارش دارد. میانگین دمای کره زمین در دهه‌های اخیر افزایش یافته است. افزایش دما باعث افزایش تبخیر- تعرق، افزایش فرین‌های اقلیمی، خشکسالی و آتش‌سوزی جنگل‌ها می‌شود. بررسی کارایی نسخه‌های مختلف REA5 می‌تواند نقش مؤثری در انتخاب صحیح بهترین نسخه از ERA5 در مطالعات اقلیمی کشور داشته باشد. این پژوهش دمای ایران را براساس نسخه‌های قطعی و احتمالاتی مجموعه داده باز تحلیل ECMWF-ERA5 که جایگزین بازتحلیل ERA-Interim است را مورد بررسی قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها: داده‌های مورد استفاده در این مطالعه میانگین ماهانه دمای هوا در دو گروه قطعی و احتمالاتی است. برای بررسی تاثیر تفکیک افقی در برونداد داده‌های ERA5، از دو تفکیک ۰/۲۵ و ۰/۵ درجه قوسی از نسخه‌های قطعی و احتمالاتی ERA5 برای بررسی میانگین دمای هوا بر روی کشور ایران استفاده شده است. همچنین از نسخه EDA چند عضوی با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی نیز برای مقایسه نسخه مجموعه داده‌های احتمالاتی ERA5 با نسخه قطعی آن استفاده شده است. پیش از درستی سنجی داده‌های سه نسخه مختلف ERA5 از ۱۰ عضو متفاوت نسخه احتمالاتی ERA5 که تحت عنوان Member0 تا Member9 ارائه می‌شوند، یک مجموعه داده همادی چند عضوی تولید شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد ERA5 توزیع فضایی میانگین دما را در ایران به درستی برآورد می‌کند. با این‌حال در عرض‌های جغرافیایی بالا و مناطقی با توپوگرافی پیچیده کارایی ERA5 در برآورد دما نسبت به مناطق خشک و نیمه‌خشک داخلی کمتر است. علاوه بر توپوگرافی پیچیده مناطق خاص جغرافیایی همانند سواحل جنوبی دریای خزر بر کارایی ERA5 تأثیر می‌گذارند. کارایی پایین‌تر دمای ERA5 در مناطق ساحلی شمال کشور و زاگرس ممکن است منعکس‌کننده برخی کاستی‌ها در نمایش دقیق ویژگی‌های جغرافیایی این مناطق همانند همانند برهمکنش هوا- دریا و همزمان برهمکنش جریانات مرطوب محلی با خط ساحلی و توپوگرافی پیچیده البرز و زاگرس باشد.

نتیجه‌گیری: ارزیابی متغیر دمای نسخه‌های مختلف ERA5 با داده‌های مشاهداتی نشان داد که نسخه قطعی ERA5 با تفکیک ۰/۵ درجه قوسی به‌طور سیستماتیک دارای کم‌برآوردی برای دما است که این مقدار برای متوسط پهنه‌ای کشور ۷/۴۱- درصد است. در مقابل نسخه قطعی ERA5 با تفکیک ۰/۵ درجه قوسی دمای ایران را در متوسط پهنه‌ای کشور ۱۲/۰۱ درصد بیش‌تر برآورد می‌کند. بررسی سه نسخه متفاوت از مجموعه داده ERA5 برای دو نسخه قطعی و احتمالاتی نشان داد که نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی با متوسط پهنه‌ای اریبی ۱/۰۷ درجه سلسیوس و درصد اریبی ۹/۳۶ درصد بهترین برآورد از دمای ایران را ارائه می‌دهد. پراکنش ماهانه دمای میانگین ایران براساس برونداد قطعی ERA5 با تفکیک ۰/۲۵ درجه قوسی نشان داد که کمینه دمای ایران با ۱۰/۴۹- درجه سلسیوس در ماه ژانویه و بیشینه آن با ۳۹/۸۳ درجه سلسیوس در ماه ژولای اتفاق می‌افتد. دما در تمامی ماه‌ها و میانگین سالانه از آرایش توپوگرافی در ایران پیروی می‌کند. به‌طوری که کمینه دمایی ایران در ۵ ماه سال (ژانویه، فوریه، مارس، نوامبر و دسامبر) منفی است.

واژگان کلیدی: ایران، دما، مجموعه داده ERA5، همادی چند عضوی.

استناد: ابوالفضل حیدری، آذر زرین، عباسعلی داداشی رودباری (۱۴۰۲). بررسی کارایی نسخه‌های قطعی و احتمالاتی (چند عضوی همادی)، پژوهشهای دانش زمین: ۱۴(۴)، (۱۶-۱)، DOI: 10.48308/ESRJ.2023.103874

* نویسنده مسئول: E-mail: zarrin@um.ac.ir

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY). license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقدمه

دما یکی از اصلی‌ترین متغیرهای جوی است و تأثیری مستقیم بر سایر متغیرها از جمله بارش دارد (Trenberth, 2011). دمای کره زمین در دهه‌های اخیر افزایش یافته است. افزایش دما باعث افزایش تبخیر- تعرق، افزایش فرین های اقلیمی، خشکسالی و آتش‌سوزی جنگل‌ها شده است (Carvalho et al, 2022). همچنین افزایش دما سبب تغییرات عملکرد محصولات کشاورزی، کاهش آسایش اقلیمی و در نتیجه رکود صنعت گردشگری در بسیاری از عرصه‌های جغرافیایی و کاهش کارآمدی نیروی کار در بخش صنعت و معدن می‌شود (راوند و همکاران، ۱۳۹۹). بدون تردید فعالیت‌های انسانی سبب تشدید گرمایش جهانی و به‌تبع آن تغییر اقلیم شده است. به طوری که از سال ۱۹۵۰ به بعد و در چهار دهه گذشته، به‌طور متوالی هر دهه گرم‌تر از دهه پیش از خود بوده است (IPCC, 2021). کشور ایران با روند افزایشی دما (Zarrin et al, 2021; Rahimzadeh et al, 2009) و تنش شدید آبی شناخته شده است. در دهه‌های گذشته افزایش بی‌سابقه دما به همراه افزایش قابل توجه جمعیت در ایران منجر با رخداد خشکسالی‌های شدید، افزایش مصرف آب و برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی همراه بوده است. افزایش دما پیامدهای پیچیده‌ای از جمله تلف شدن دام‌ها و از بین رفتن محصولات کشاورزی، معضلات مرتبط با بهداشت، تغذیه، از دست دادن معیشت و مهاجرت‌های اجباری اقلیمی و منازعات بین‌المللی به خصوص برای آب‌های مرزی و کشورهای بالادست رودها به همراه داشته است (Barlow et al, 2016). شناخت صحیح از متغیرهای اقلیمی و وردایی آن‌ها می‌تواند نقشی مؤثر در نظام برنامه ریزی هر کشور ایفا نماید. چه آنکه میزان تولید محصولات کشاورزی به عنوان یکی از مؤلفه‌های اصلی امنیت غذایی، تبخیر-تعرق به‌عنوان عاملی در میزان دسترسی به منابع آب و همچنین آسایش اقلیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین مؤلفه‌های سلامت و گردشگری، همه و همه ریشه در اقلیم و تغییرات آن دارد. ازاین رو با توجه به افزایش مخاطرات اقلیمی طی دهه‌های گذشته در سرتاسر کره زمین و خاصه گستره سرزمینی ایران که بخش عمده‌ای از آن متأثر از افزایش دما است، بررسی دقیق آن در سال های اخیر در گام نخست و پیش‌نگری آن در مراحل بعدی بیش از پیش ضروری است. پژوهشگران عموماً برای بررسی متغیرهای اقلیمی و به‌طور خاص دما از داده‌های مختلفی استفاده می‌کنند که می‌توان به داده‌های ایستگاه‌های همدید، محصولات ماهواره ای، خروجی مدل‌های اقلیمی و همچنین داده‌های بازتحلیل اشاره کرد. بررسی کارایی این داده‌ها برای بازسازی وردایی و روند گذشته و همچنین تغییرات آینده یکی از حوزه‌های مورد علاقه پژوهشگران علوم جوی و به خصوص اقلیم‌پژوهان در سال‌های اخیر بوده است. از بین داده‌های در دسترس، داده‌های بازتحلیل ماحصل برونداد مدل‌های پیش‌بینی عددی وضع جوی (NWP)، داده‌های ایستگاه‌های زمینی، داده‌های جو بالا، داده‌های رادار و لیدار، محصولات ماهواره‌ای و همچنین بویه‌های دریایی و اقیانوسی هستند. یکی از داده‌های بسیار پرکاربرد بازتحلیل در سطح جهانی، نسخه پنجم (ERA5) داده‌های مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت جو (ECMWF) است. این مجموعه داده از سال ۲۰۱۶ عملیاتی شد و جایگزین نسخه ERA-Interim گردید. این مجموعه داده ماحصل یک دهه پیشرفت در فیزیک و دینامیک هسته مدل‌ها، سامانه‌های داده‌گواری و تفکیک افقی بالاتر بوده است که سبب شده کارایی آن به شکل قابل‌توجهی افزایش‌یابد (Hersbach et al, 2020). در مقایسه با ERA-Interim، تفکیک افقی ERA5 به شکل قابل توجهی افزایش یافته است (۳۱ کیلومتر در مقایسه با ۸۰ کیلومتر). علاوه برآن، این مجموعه داده برخلاف نسخه قبلی در دو نسخه قطعی (Deterministic) و احتمالاتی (Probabilistic) ارائه شده است. نسخه احتمالاتی ERA5 برای ۱۰ عضو (Member) (با تفکیک افقی ۶۳ کیلومتر) در دسترس است (Bandhauer et al, 2022). نسخه احتمالاتی این اجازه را به کاربران می‌دهد تا اندازه‌گیری عدم قطعیت متغیرهای مختلف اقلیمی را که در نسخه‌های پیشین در دسترس نبوده، امکان‌پذیر کند (Vitolo et al, 2020). مطالعات مختلفی داده‌های ERA5 را در سطح جهانی مورد بررسی قرار داده‌اند. از این مطالعات می‌توان پژوهش‌های انجام شده در منطقه السورث جنوبگان (Tetzner et al, 2019)، در سطح جهانی (Gualtieri, 2020)، آمریکای شمالی (Sheridan et al, 2020) و قاره قطب جنوب (Zou et al, 2022) اشاره کرد. نتایج کلی این مطالعات کارایی بالای داده‌های ERA5 در برابر داده‌های ایستگاهی را در مناطق

مختلف جهان تأیید کردند. با این‌حال برخی از مطالعات همچون (Tetzner et al, 2019) و (Gualtieri, 2020) نشان دادند که کارایی داده‌های ERA5 در مناطق ساحلی نسبت به سایر مناطق کمتر است. گروهی دیگر از مطالعات انجام شده به بررسی نسخه‌های مختلف بازتحلیل‌های ECMWF-ERA5 و همچنین تفاوت بین نسخه های مختلف آن پرداختند (Hersbach et al, 2020; Vitolo et al, 2020; Munoz-Sabater et al, 2021; Karaman and Akyürek, 2023; Yilmaz, 2023). برای نمونه ویتالو و همکاران (Vitolo et al, 2020) کارایی نسخه‌های مختلف همادی چند عضوی، میانگین همادی و نسخه قطعی ERA5 را برای آتش سوزی جنگل در سطح جهانی مورد بررسی قرار دادند. در تحقیق دیگر کارامن و آکیورک (Karaman and Akyurek, 2020) با بررسی چندین نسخه از مجموعه داده ERA5 به این نتیجه رسید که کارایی نسخه‌های مختلف این مجموعه بسته به نوع منطقه و فصل متفاوت است. پژوهش‌هایی همچون وانلا و همکاران (Vanella et al, 2022) با بررسی جامع متغیرهای اقلیمی همچون تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت نسبی، تندی باد و تبخیر-تعرق مرجع داده‌های بازتحلیل ERA5 در ایتالیا نشان دادند که دما با دقت بالاتری نسبت به سایر متغیرها برآورد شده است. در مطالعه‌ای دیگر ژو و همکاران (Zou et al, 2022) با بررسی کارایی مجموعه داده ERA5 در کشور چین نشان دادند که این مجموعه داده تغییرات روزانه، ماهانه و همچنین نوسانات دما را به درستی نشان می‌دهد. در ایران نیز از مجموعه داده‌های ECMWF و نسخه‌های مختلف آن همانند ERA5، ERA5-Land و AgERA5 برای متغیرهای مختلف همانند بارش (عزیزی مبصر و همکاران، ۱۳۹۹؛ Zarrin and Dadashi-Roudbari, 2022) و فرین‌های بارشی (اسدی رحیم بیگی و همکاران، ۱۴۰۰)، فشار، تندی باد و دمای نقطه شبنم (سام خانیانی و محمدی، ۱۴۰۱) و دمای هوا (کدخدا و همکاران، ۱۴۰۱؛ اخلاقی و همکاران، ۱۴۰۲) استفاده شده است. مطالعات دیگری همچون محمدی قلعه نی و شرفی (۱۴۰۱) به مقایسه چندین متغیر از مجموعه داده ERA5 با سایر داده‌های بازتحلیل پرداختند و نشان دادند که ERA5 به طورکلی از کارایی بالاتری برخوردار است. بررسی مطالعات انجام شده از کارایی بازتحلیل‌ها در سطح جهانی و ایران نشان می‌دهد که این مجموعه داده‌ها به دلیل کارایی مناسب به شکل وسیعی در حوزه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال کارایی مجموعه داده ERA5 و نسخه‌های مختلف آن در ایران مورد بررسی دقیق قرار نگرفته است و در مطالعات انجام شده در کشور تنها از داده‌هایی با بالاترین تفکیک افقی (۰/۲۵ درجه قوسی) و نسخه قطعی ERA5 استفاده شده است. لذا این پژوهش برعکس مطالعات انجام شده پیشین در کشور که تنها یک نسخه از این مجموعه داده را با یک تفکیک افقی مورد بررسی قرار داده‌اند، کارایی نسخه‌های مختلف ERA5 را مورد بررسی قرار داده که نقش مؤثری در انتخاب صحیح بهترین نسخه از ERA5 در مطالعات آتی اقلیمی کشور خواهد داشت. بکارگیری توامان نسخه‌های مختلف می‌تواند درک بهتری از تغییرات دمای ایران و عدم قطعیت آن در مناطق مختلف اقلیمی کشور ارائه دهد.

منطقه مورد مطالعه

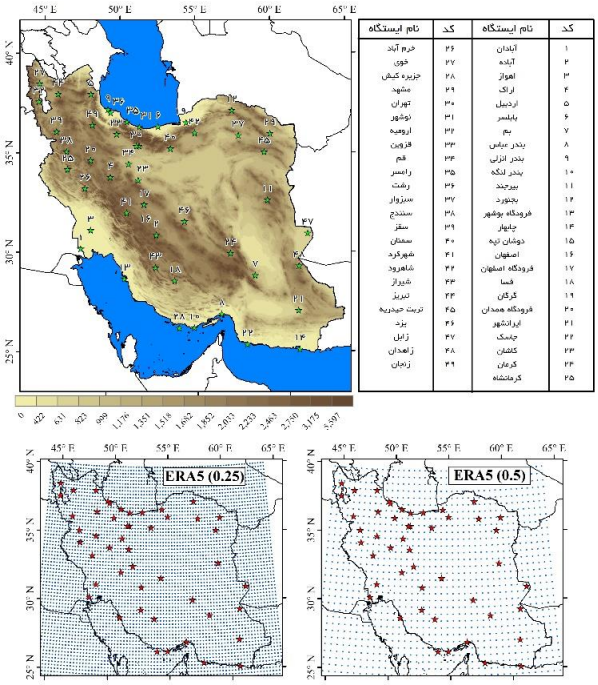
ایران کشوری در غرب آسیا با اقلیمی غالباً خشک و نیمه‌خشک است. تنوع اقلیمی گسترده شامل اقلیم بیابانی، نیمه بیابانی و کوهستانی از ویژگی‌های بارز سرزمینی ایران است (شکل ۱).

در سال‌های اخیر افزایش دما و افزایش تبخیر- تعرق و کاهش منابع آبی، یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیطی در کشور بوده است. نظر به اینکه در این پژوهش از داده‌های ERA5 با دو تفکیک ۰/۲۵ و ۰/۵ درجه قوسی استفاده شده است، پراکندگی نقطه شبکه‌های این داده‌ها و ایستگاه‌های همدید مورد استفاده در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

مواد و روش‌ها

داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های همدید)

به منظور درستی‌سنجی داده‌های ERA5 و مقایسه میانگین بلندمدت سالانه دمای کشور از میانگین دمای ماهانه ۴۹ ایستگاه همدید استفاده شد. دوره زمانی داده‌های مشاهداتی، یک دوره ۴۰ ساله از ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ در نظر گرفته شده تا ضمن مقایسه با داده‌های بازتحلیل یک دوره اقلیم‌شناسی بلندمدت را ارائه داده باشد.



کد	نام ایستگاه	کد	نام ایستگاه
۱	آبادان	۲۶	خرم آباد
۲	آباده	۲۷	خوی
۳	اهواز	۲۸	جزیره کیش
۴	اراک	۲۹	مشهد
۵	اردبیل	۳۰	تهران
۶	بابلسر	۳۱	زنجان
۷	بم	۳۲	ارومیه
۸	بندر عباس	۳۳	قزوین
۹	بندر انزلی	۳۴	قم
۱۰	بندر لنگه	۳۵	رامسر
۱۱	بیرجند	۳۶	رشت
۱۲	بجنورد	۳۷	سبزوار
۱۳	فرودگاه بوشهر	۳۸	سنندج
۱۴	چابهار	۳۹	سقز
۱۵	دوشان تپه	۴۰	سمنان
۱۶	اصفهان	۴۱	شهرکرد
۱۷	فرودگاه اصفهان	۴۲	شاهرود
۱۸	فسا	۴۳	شیراز
۱۹	گرگان	۴۴	تبریز
۲۰	فرودگاه همدان	۴۵	تربت حیدریه
۲۱	ایرانشهر	۴۶	یزد
۲۲	جاسک	۴۷	زابل
۲۳	کاشان	۴۸	زاهدان
۲۴	کرمان	۴۹	زنجان
۲۵	کرمانشاه		

شکل ۱: منطقه مورد مطالعه به همراه موقعیت ایستگاه‌های همدید مورد استفاده (ردیف بالا)؛ نقطه شبکه‌های ۰/۲۵ و ۰/۵ درجه قوسی ERA5 (ردیف پایین).

داده‌های بازتحلیل ECMWF-ERA5

مجموعه داده ERA5، نسل پنجم از بازتحلیل‌های ECMWF است که از سال ۲۰۱۶ در دسترس قرار گرفته است. سری زمانی داده‌های این مجموعه از ژانویه ۱۹۵۰ تاکنون را پوشش می‌دهد. مجموعه داده ERA5 برآوردهای ساعتی تعداد زیادی از متغیرهای جوی، خشکی و اقیانوسی را ارائه می‌دهد. این مجموعه داده با استفاده از سامانه داده گواری 4D-Var و مدل Cy41r2 از سامانه پیش‌بینی یکپارچه (IFS) در ۱۳۷ تراز هیبریدی سیگمایی/فشاری ارائه می‌شود. مجموعه داده ERA5 جایگزین داده‌های بازتحلیل ERA-Interim شده است. مقایسه دو نسخه ERA-Interim و ERA5 نشان می‌دهد که بهبود قابل‌توجهی در کاهش عدم قطعیت‌ها صورت گرفته است (Hersbach et al, 2020). مجموعه داده ERA5 شامل دو گروه داده قطعی (Deterministic) و احتمالاتی (Probabilistic) یا همادی داده‌گواری (EDA)[1] است. مجموعه داده قطعی ERA5 در دو تفکیک افقی ۰/۲۵ و ۰/۵ درجه قوسی و در مقابل مجموعه داده احتمالاتی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی ارائه می‌شود. سری داده‌های EDA از مجموعه داده ERA5 برای سامانه های داده‌گواری مورد نیاز است که برآوردهای نسبی از عدم قطعیت داده‌ها در گام‌های مختلف زمانی و مقیاس‌های مختلف مکانی ارائه می‌دهد. به‌طورکلی، هر دو گروه داده ERA5 در گام‌های زمانی ساعتی، روزانه و ماهانه در دسترس هستند که دو بار در روز در ساعات هماهنگ جهانی ۰۶ و ۱۸ بازتولید می شوند. داده‌های همادی ERA5 شامل ده عضو (Member) است که امکان برآورد مقدار خطای داده واقعی را فراهم می‌کنند (Hamill, 2021). علاوه بر داده‌های نامبرده در بالا از مجموعه داده ERA5، داده دیگری نیز از این مجموعه داده در دسترس است که تنها به ارائه متغیرهای نزدیک به سطح زمین می‌پردازد. این محصول که با عنوان مدل زمین (ERA5-LAND) شناخته می‌شود؛ محصول بازتحلیل مقیاس‌کاهی شده ECMWF است که در سال ۲۰۱۹ منتشر شده است (Muñoz-Sabater et al, 2021). این مجموعه داده تنها متغیرهای نزدیک به سطح را با تفکیک افقی ۰/۱درجه قوسی (~ ۹ کیلومتر) فراهم می‌کند (Stefanidis et al, 2022; Yilmaz, 2023). همانند پوشش زمانی مجموعه داده‌های ERA5، داده‌های ساعتی ERA5-Land از سال ۱۹۵۰ تاکنون در دسترس هستند. این مجموعه داده توسط مدل پیش بینی عددی وضع جوی (NWP) سطح زمین ECMWF موسوم به HTESSEL خروجی گرفته شده است.

همچنین تصحیحاتی همچون تصحیح توپوگرافی و ترمودینامیکی نیز در این مجموعه داده انجام شده است (Muñoz-Sabater et al, 2021). هر چند که ERA5-LAND تفکیک افقی بسیار مناسبی را ارائه می‌دهد اما به دلیل تفاوت‌های بسیاری که این داده با نسخه‌های قطعی و احتمالاتی از جمله مدل به کار رفته، تصحیحات انجام شده و تفکیک افقی دارد، در این تحقیق از این مجموعه داده استفاده نشده است. چرا که هدف این تحقیق بررسی برونداد مستقیم نسخه‌های قطعی و احتمالاتی ERA5 بوده است. داده‌های مورد استفاده در این مطالعه میانگین ماهانه دمای هوا در نسخه قطعی و احتمالاتی است. برای بررسی تاثیر تفکیک افقی در برونداد داده‌های ERA5، از دو تفکیک ۰/۲۵ و ۰/۵ درجه قوسی از نسخه‌های قطعی و احتمالاتی ERA5 برای بررسی میانگین دمای هوا در ایران استفاده شده است. همچنین از نسخه EDA چند عضوی با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی نیز برای مقایسه نسخه‌های مجموعه داده‌های احتمالاتی ERA5 با نسخه قطعی آن استفاده شده است. پیش از درستی سنجی داده‌های سه نسخه مختلف ERA5 از ۱۰ عضو متفاوت نسخه احتمالاتی ERA5 که تحت عنوان Member 0 تا Member 9 ارائه می‌شوند، یک مجموعه داده همادی چند عضوی تولید شد. در این نسخه از ERA5 برای هر روز ۱۰ عدد مختلف ارائه می‌شود. برای مثال طی دوره ۴۰ ساله مورد بررسی با در نظر گرفتن سال‌های کبیسه در نسخه‌های قطعی ERA5، ۱۴۶۱۰ روز وجود دارد. اما در نسخه‌های احتمالاتی که از آن به عنوان EDA نیز نامبرده می‌شود ۱۴۶۱۰۰ روز وجود دارد.

درستی‌سنجی داده‌های بازتحلیل قطعی و احتمالاتی ERA5 برای دمای ایران

برای درستی‌سنجی داده‌های دمای سه نسخه ERA5 از سنجه‌های اریبی (BIAS)، درصد اریبی (PBIAS)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و کارایی کلینگ-گوپتا (KGE) استفاده شده است. سنجه BIAS، اریبی یا تورش یک داده برآورد شده را نسبت به داده مشاهداتی نشان می دهد. به عبارت دیگر سنجه اریبی اختلاف بین داده‌های مدل یا بازتحلیل و مقدار واقعی متغیر است که می‌تواند دقت مجموعه داده مورد بررسی را نشان دهد. سنجه PBIAS درصد اریبی را نسبت به بزرگ‌تر یا کوچک‌تر بودن از مقادیر مشاهداتی اندازه‌گیری می‌کند. همچنین RMSE انحراف ریشه میانگین مربعات یا تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط بازتحلیل با مقدار واقعی است. در نهایت سنجه KGE ترکیبی از سه سنجه همبستگی، اریبی و نسبت واریانس‌ها یا ضریب تغییرات است که برخلاف دو سنجه BIAS و RMSE متأثر از بزرگی خود متغیر نیست. مقدار این سنجه بین صفر تا ۱ در نوسان است و نزدیک‌تر بودن مقدار آن به یک نشان‌دهنده کارایی بالاتر است (Syed et al, 2022). روابط محاسباتی این چهار سنجه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: سنجه‌های آماری درستی سنجی مورد استفاده

نام سنجه	نام کامل	رابطه آماری
BIAS	Bias	$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)}{n}$
KGE	Kling-Gupta Efficiency	$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2}$
PBIAS	Percent Bias	$PBIAS = \sum_{i=1}^{n} \frac{(P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \times 100$
RMSE	Squared Error-Mean-Root	$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i) - (O_i)^2}}{n}$

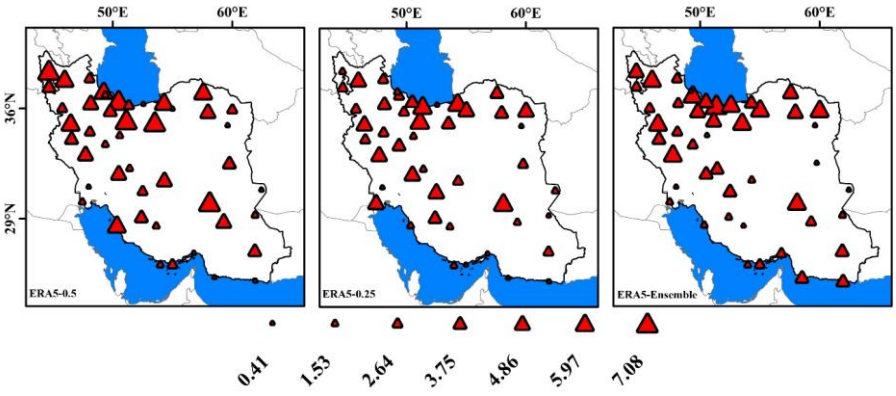
روش ترسیم نقشه‌های میانگین دمای ایران

برای ترسیم نقشه میانگین ماهانه و سالانه دما با داده‌های ERA5، از روش درون‌یابی کریجینگ (Kriging) استفاده شد. برآوردگر کریجینگ یکی از مهم‌ترین برآوردگرهای خطی ناریب است، زیرا اولاً بدون خطای سامانمند است و ثانیاً واریانس برآورد آن حداقل است. به عبارت دیگر، این روش در برآورد کمیت مجهول با مختصات معلوم، مقدار واریانس را به حداقل می‌رساند. هموارسازی تغییرات یک متغیر در پهنه جغرافیایی هنگام درون‌یابی از ویژگی‌های روش کریجینگ است؛ بدین معنا که واریانس نمونه‌های برآورد شده نسبت به نقاط واقعی تغییرات کمتری دارد (Yao et al, 2013).

بحث و نتایج

درستی سنجی نسخه‌های مختلف قطعی و احتمالاتی ERA5 در برآورد دمای ایران

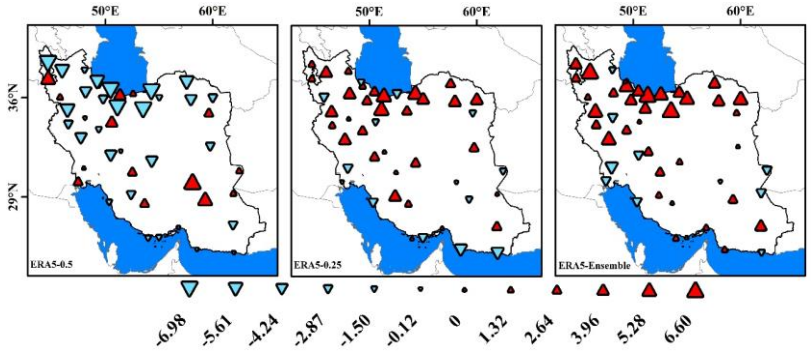
نتایج درستی سنجی نسخه‌های مختلف ERA5 در برابر داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد که کارایی نسخه‌های مختلف مجموعه داده ERA5 به شدت به شرایط اقلیمی، توپوگرافی و ویژگی‌های جغرافیایی محلی آن بستگی دارد. به طور کلی نسخه قطعی ERA5-0.5º به‌طور سیستماتیک در بیش‌تر مناطق اقلیمی کشور نسبت به نسخه احتمالاتی با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی دارای کم برآوردی است. در یک بررسی کلی کارایی داده‌های ERA5 در مناطق ساحلی شمال کشور و کوهستانی نسبت به مناطق خشک و نیمه‌خشک کاهش پیدا می‌کند (شکل ۲). بررسی سنجه RMSE نشان می‌دهد که ERA5 در مناطق کوهستانی و ساحلی ایران خطای زیادی در برآورد دما دارد. به طور کلی مقدار RMSE نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی نسبت به همین داده با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی کمتر است. به طوری که مقدار RMSE در متوسط پهنه‌ای ایران برای ERA5-0.25º و ERA5-0.5º به ترتیب ۱/۹۳ و ۲/۱۲ درجه سلسیوس به دست آمده است. کمینه RMSE در متوسط پهنه‌ای کشور مربوط به ERA5-0.25º با مقدار ۰/۴۱ درجه سلسیوس و بیشینه آن با مقدار ۷/۰۸ درجه سلسیوس در نسخه قطعی ERA5-0.5º مشاهده می‌شود که می‌توان اذعان داشت نسخه قطعی ERA5-0.5º دارای خطای بسیار بیشتری است. بررسی تأثیر توپوگرافی بر کارایی مجموعه داده ERA5 و نسخه‌های مختلف آن در ایران نشان می‌دهد که ارتفاعات در ایجاد خطا در برآورد دما در این داده بازتحلیل نقش دارند. ژاو و هااو (Gao and Hao, 2014) با بررسی رابطه بین داده‌های بازتحلیل ERA-Interim و ارتفاع ایستگاه‌ها نشان دادند که ارتفاع می‌تواند بر کارایی داده‌ها به ویژه در مناطقی با ارتفاعات زیادتر تاثیر بگذارد. این نتیجه یافته‌های گوالتری (Gualtieri, 2021) را در سطح جهانی تایید می‌کند. همانطور که در شکل‌ها نیز دیده می‌شود، بالاترین مقادیر RMSE برای نسخه‌های مختلف ERA5 با تغییرات نسبتاً بیشتری در ارتفاعات همراه است. برای ایستگاه‌هایی با ارتفاع زیر ۱۰۰۰ متر، توافق خوبی بین نسخه‌های مختلف ERA5 و داده‌های مشاهداتی دیده می‌شود (شکل ۲). از سوی دیگر خطای زیاد ERA5 در مناطق مرتفع و کوهستانی ایران می‌تواند در ارتباط با پوشش برف باشد. این عامل زمانی از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد شد که در طول فصل گرم با افزایش دما و ذوب برف و تغییر پوشش آن، برآورد دمای منطقه‌ای به دلیل تفاوت‌های سپیدایی و گرمایی به شدت تغییر می‌کند (Zhu et al, 2021) و همین عامل باعث افزایش خطا می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که کارایی محصولات مختلف بازتحلیل به عوامل مختلفی از جمله توپوگرافی و شرایط اقلیمی مرتبط است.



شکل ۲: درستی سنجی نسخه‌های مختلف احتمالاتی و قطعی ERA5 در ایران با سنجه RMSE

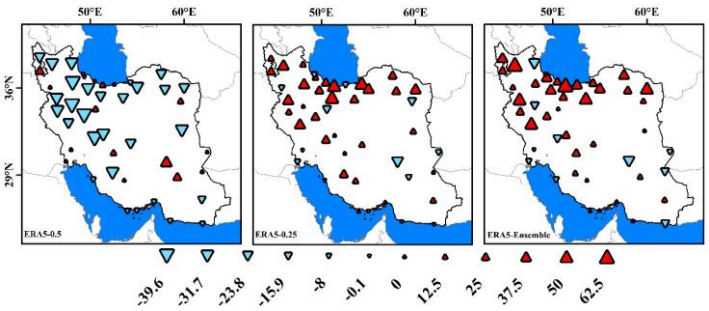
بررسی سنجه اریبی (Bias) نشان می‌دهد که نسخه قطعی ERA5-0.25º پایین‌ترین مقدار اریبی را با مقدار متوسط پهنه‌ای ۰/۰۷ درجه سلسیوس در برآورد دمای کشور دارد. این مجموعه داده در سواحل جنوبی ایران واقع در مکران و خلیج فارس به‌طور سیستماتیک دارای کم‌برآوردی و در مناطق داخلی و شمالی کشور دارای بیش برآوردی است. به دلیل پیچیدگی بسیار زیاد زمین در سواحل جنوبی دریای خزر، نمی‌توان یک الگوی کلی برای ارزیابی این

منطقه از ایران ارائه کرد. به طوری که گرگان در خزر شرقی بیش برآوردی و بابلسر در بخش میانی سواحل دریای خزر و بندر انزلی در خزر غربی کم‌برآوردی دارند. اریبی گرم (بیش‌برآوردی) در ایستگاه‌های داخلی، شمالی (به غیر از بابلسر و انزلی) و غربی در نسخه‌های قطعی ERA5 بیشتر از نسخه احتمالاتی است. مطالعاتی همچون (Fréville et al, 2014) اریبی گرم بازتحلیل‌ها را در ارتباط با برآورد بیش از حد شار گرمای محسوس (SHF) دانسته‌اند. مقدار بالای اریبی در سواحل جنوبی دریای خزر می‌تواند در ارتباط با چندین عامل باشد. یکی از مهم‌ترین عوامل برهمکنش هوا-دریا-خشکی در نزدیکی ساحل است که لحاظ نمودن دقیق این عامل برای مدل سطح زمین (HTESSEL) و سامانه داده‌گواری (IFS-Cy41r2) مجموعه داده ERA5 (Hersbach et al, 2020; Tarek et al, 2020; Yilmaz, 2023) دشوار است. از سوی دیگر مقدار زیاد اریبی در مناطق کوهستانی ایران می‌تواند در نتیجه فقدان ایستگاه اندازه‌گیری با پراکنش مناسب در این مناطق باشد که در نتیجه آن سامانه داده‌گواری ERA5 (IFS-Cy41r2) (Hersbach et al, 2020) به درستی نتوانسته است تغییرات دما را در این مناطق برآورد کند.



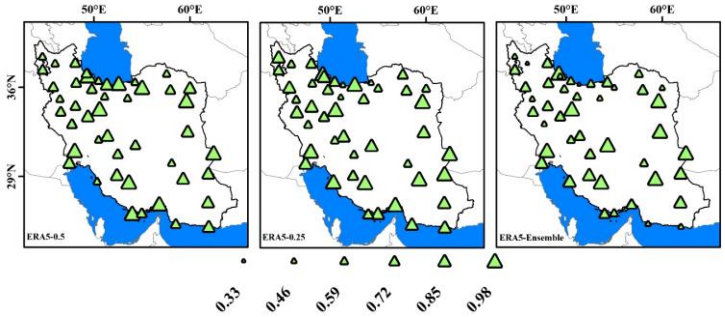
شکل ۳: درستی سنجی نسخه‌های مختلف احتمالاتی و قطعی ERA5 در ایران با سنجه Bias

درصد اریبی (PBIAS) یک سنجه مهم در ارزیابی مدل‌ها و داده‌های بازتحلیل است زیرا اطلاعاتی در مورد اینکه آیا متغیر در یک منطقه دارای بیش برآوردی یا کم برآوردی است، ارائه می‌دهد. بررسی درصد اریبی دما نشان می‌دهد که نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی، دمای ایران را ۹/۳۶ درصد بیش‌تر از دمای مشاهداتی برآورد می‌کند. این در حالیست که نسخه احتمالاتی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی، دمای کشور را ۱۲/۰۱ درصد بیش‌تر برآورد می‌کند. در نهایت نسخه قطعی ERA5 دمای کشور را ۷/۴۱ درصد کمتر از داده‌های ایستگاهی برآورد کرده است. بررسی درصد اریبی این سه نسخه از ERA5 نشان می‌دهد که تفکیک افقی به تنهایی نقش تعیین کننده را در برآورد دما ندارد. چرا که همانطور که دیده شد نسخه قطعی ERA5 با تفکیک ۰/۵ درجه قوسی نتیجه‌ای متفاوت را نسبت به نسخه احتمالاتی با همین تفکیک افقی ارائه داده است. بالاترین کم‌برآوردی دمای ایران با ۳۹/۶ درصد در نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی در ایستگاه خوی به دست آمده است. در مقابل بیشینه بیش برآوردی دمای ERA5 نیز برای نسخه احتمالاتی است که ۶۲/۵ درصد در تبریز به دست آمده است. بررسی آماری ایستگاه‌هایی با درصد اریبی بیش از ۱۰ درصد نشان می‌دهد که نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی فقط در ۴۱/۳۰ درصد از ایستگاه‌ها دارای اریبی بیش از ۱۰ درصد بوده است که از این تعداد ایستگاه بیش از ۶۰ درصد اریبی کمتر از ۲۰ درصد را نشان می‌دهند. این در حالیست که در نسخه احتمالاتی ERA5، ۷۳/۹۱ درصد از ایستگاه‌ها دارای اریبی بیش از ۱۰ درصد بوده‌اند. همچنین در نسخه قطعی ۰/۵ درجه قوسی نیز ۶۵/۲۱ درصد از ایستگاه‌ها دارای اریبی بیش‌تر از ۱۰- درصد بوده‌اند. این نتایج به روشنی نشان دهنده برآورد دقیق‌تر نسخه قطعی ۰/۲۵ درجه قوسی ERA5 است. بدیهی است که نسخه ۰/۲۵ به دلیل تفکیک افقی بالاتر توانسته است کارایی بالاتری را به تصویر بکشد. اما بررسی دو نسخه احتمالاتی و قطعی ۰/۵ درجه قوسی نیز نشان می‌دهد که ERA5 حتی با تفکیک افقی برابر نیز، دارای تغییرات زیادی در نسخه‌های قطعی و احتمالاتی خود است.



شکل ۴: درستی سنجی نسخه‌های مختلف احتمالاتی و قطعی ERA5 در ایران با سنجه PBias

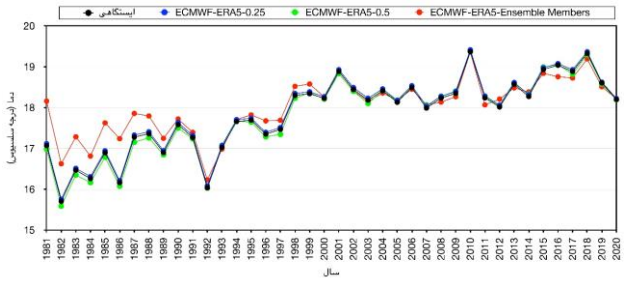
سنجه KGE به‌طور همزمان همبستگی خطی، اریبی و ورایی را ارزیابی می‌کند، که از این نظر کمتر سنجه‌ای چنین توانایی را دارد. بررسی این سنجه نیز همانند سه سنجه آماری پیشین نشان می‌دهد که نسخه‌های مختلف ERA5 در مناطق کوهستانی و سواحل جنوبی دریای خزر کارایی پایین‌تری را به نسبت سایر مناطق کشور دارند. کمینه این سنجه در ایران ۰/۳۳ و بیشینه ۰/۹۸ برای نسخه قطعی ۰/۲۵ درجه قوسی به دست آمده است. سنجه KGE در نسخه قطعی ERA5 با تفکیک ۰/۲۵ در ۳۹/۱۳ درصد از ایستگاه‌ها بالاتر از ۰/۹ را نشان داده است. در مقابل، ۳۰/۴۳ و ۳۵/۳۴ درصد از ایستگاه‌ها در نسخه‌های احتمالاتی و قطعی ۰/۵ درجه قوسی به ترتیب دارای KGE بالاتر از ۰/۹ بوده‌اند.



شکل ۵: درستی سنجی نسخه‌های مختلف احتمالاتی و قطعی ERA5 در ایران با سنجه KGE

بررسی تغییرات سری زمانی نسخه‌های قطعی و احتمالاتی ERA5 در متوسط پهنه‌ای ایران

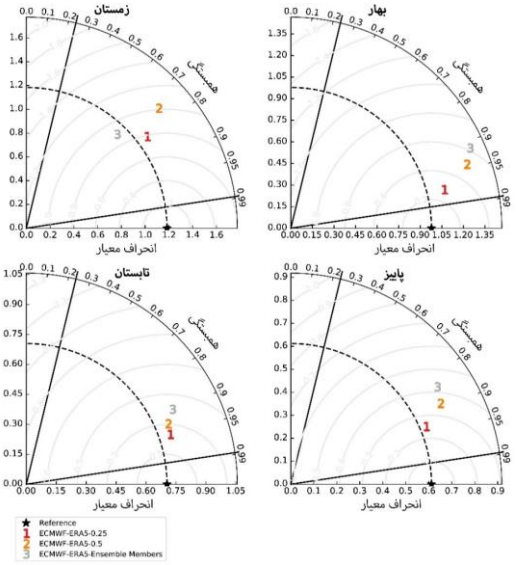
سری زمانی سه نسخه مختلف ECMWF-ERA5 که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است به شکل متوسط پهنه‌ای در کشور محاسبه شد. نتایج نشان می‌هد که سری زمانی متوسط پهنه‌ای نیز نتایج سنجه‌های درستی سنجی را که پیش‌تر به شکل فضایی ارائه شد تایید می‌کند. به طوری که نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی بالاترین کارایی را در مقابل سری زمانی داده‌های ایستگاهی ایران دارد (شکل ۶). جهت مقایسه سنجه‌های درستی سنجی در سری زمانی متوسط پهنه‌ای نیز ارائه شده‌اند (شکل ۶). بررسی‌ها نشان می‌دهد که نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی دارای اریبی ۰/۵۲ درجه سلسیوس، درصد اریبی ۱/۱۲ درصد و ریشه میانگین مربعات خطای ۰/۳ درجه سلسیوس است. مقدار سنجه KGE نیز ۰/۹۸ به دست آمده است که کارایی بسیار بالای این مجموعه داده را در سری زمانی متوسط پهنه‌ای سالانه کشور نشان می‌دهد. اریبی، درصد اریبی، ریشه میانگین مربعات خطا و سنجه KGE در نسخه قطعی با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی به ترتیب ۰/۸۷ درجه سلسیوس، ۱/۸۹ درصد، ۰/۵۲ درجه سلسیوس و ۰/۹۱ به دست آمده است. به همین ترتیب برای نسخه احتمالاتی نیز سنجه‌ها به ترتیب ۱/۰۵ درجه سلسیوس، ۲/۱۳ درصد، ۰/۷۹ درجه سلسیوس ۰/۷۳ می‌باشند. همان‌طور که بالاتر نیز گفته شد این نتایج کارایی بالاتر مجموعه داده ERA5 نسخه قطعی با تفکیک افقی ۰/۲۵ را در کشور تایید می‌نماید.



شکل ۶: سری زمانی متوسط پهنه‌ای سالانه نسخه‌های مختلف قطعی و احتمالاتی ERA5 در متوسط پهنه‌ای ایران

ارزیابی کارایی فصلی نسخه‌های مختلف قطعی و احتمالاتی ERA5 با استفاده از نمودار تیلور

پس از بررسی نسخه‌های مختلف ERA5 در سطح کشور به شکل فضایی و سری زمانی سالانه، کارایی این مجموعه داده برای نسخه‌های مختلف در مقیاس فصلی برای متوسط پهنه‌ای ایران با استفاده از نمودار تیلور مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج اولیه نشان داد که هر سه نسخه مختلف ERA5 در دوره گرم سال کارایی بالاتری را در ایران نسبت به دوره سرد سال دارند. به‌طوری که در فصل زمستان نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ که بالاترین کارایی را در بین سه مجموعه داده مورد بررسی دارد، دارای همبستگی فضایی ۰/۷۹ است. این درحالیست که همین مجموعه داده در فصل بهار همبستگی ۰/۹۷ و در فصل تابستان همبستگی ۰/۹۴ و در فصل پاییز همبستگی ۰/۹۲ را نشان داده است. پایین‌ترین کارایی در نمودارهای تیلور فصلی ارائه شده مربوط به نسخه احتمالاتی این مجموعه داده در متوسط پهنه‌ای کشور است. بر این اساس می‌توان اذعان داشت که نسخه قطعی مجموعه داده ECMWF-ERA5 چه در مقیاس سالانه برای ایستگاه‌ها و چه در سری زمانی متوسط پهنه‌ای کشور و همچنین در مقیاس فصلی بالاترین کارایی را در سطح کشور در برآورد دمای میانگین دارد.



شکل ۷: بررسی کارایی فصلی نسخه‌های مختلف قطعی و احتمالاتی مجموعه داده ECMWF-ERA5 با نمودار تیلور

پراکنش فضایی دمای سالانه نسخه‌های مختلف ERA5 در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در ایران

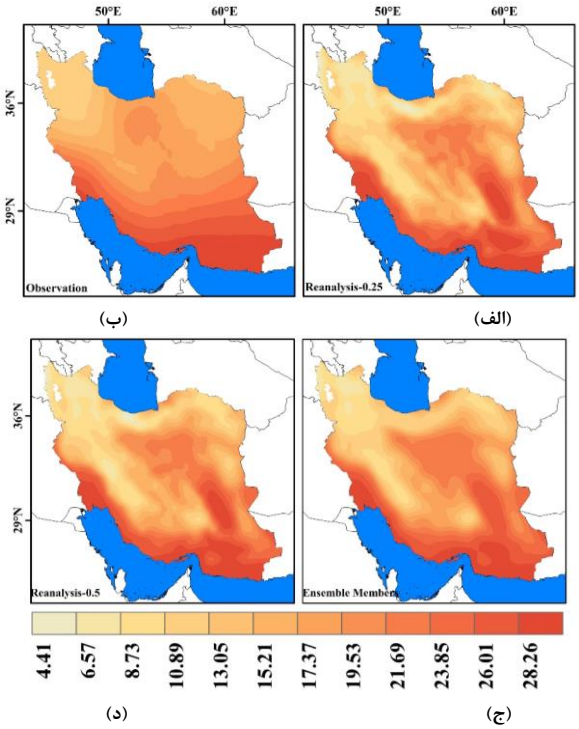
مقایسه الگوهای فضایی دمای سالانه نسخه‌های قطعی و احتمالاتی ERA5 با ایستگاه‌های هواشناسی همدید در شکل ۸ نشان داده شده است. به‌طور کلی الگوهای فضایی سه نوع داده ERA5 انطباق خوبی با داده‌های ایستگاهی در ایران نشان می‌دهند. هر دو گروه داده مشاهداتی و بازتحلیل دمای بالاتر را در مناطق جنوبی و دمای پایین‌تر را در شمال‌غرب کشور ارائه می‌هند. کمینه و بیشینه دمای ایران براساس داده‌های مشاهداتی ۹/۵۴ و ۲۷/۲۷ درجه

سلسیوس به دست آمده است. به همین ترتیب کمینه و بیشینه دمای ERA5 احتمالاتی با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی ۶/۵۳ و ۲۸/۲۶ درجه سلسیوس، مجموعه داده ERA5 نسخه قطعی با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی ۴/۶۰ و ۲۷/۷۳ درجه سلسیوس و ERA5 نسخه قطعی با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی ۴/۴۱ و ۲۸/۰۸ درجه سلسیوس به دست آمده است (شکل ۸). همان‌طور که مشخص است نسخه‌های مختلف ERA5 در برآورد دمای بیشینه از دقت بالاتری برخوردار هستند و اختلاف چندانی بین داده‌های مشاهداتی و نسخه‌های مختلف ERA5 دیده نمی‌شود. این در حالیست که بین کمینه دو سری داده مشاهداتی و بازتحلیل اختلاف زیادی دیده می‌شود. به نظر می‌رسد این اختلاف به دلیل خطای بالای مجموعه داده ERA5 و نسخه‌های مختلف آن در ایران نیست بلکه از آنجایی که طی دوره آماری ۴۰ ساله مورد بررسی (۱۹۸۱-۲۰۲۰) در مناطق مرتفع ایران ایستگاهی وجود نداشته است و بر همین اساس اختلاف زیادی بین دمای مجموعه داده ERA5 با دمای ایستگاه‌های هواشناسی همدید مشاهده می‌شود. خطای بالاتر مجموعه داده ERA5 در مناطق کوهستانی در سطح جهانی نیز گزارش شده است (Gualtieri, 2021). اخلاقی حسینی و همکاران (۱۴۰۲) نیز کارایی پایین‌تر AgERA5 را در مناطق مرتفع کوهستانی ایران گزارش کرده‌اند. لذا نتایج این تحقیق یافته‌های پیشین در خصوص کارایی پایین‌تر مجموعه داده ERA5 در مناطق کوهستانی به دلیل نبود داده مشاهداتی در سامانه داده‌گواری ECMWF-ERA5 را تایید می‌کند. حتی با در نظر گرفتن کاراترین محصول ERA5 (نسخه قطعی با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی) بدیهی است که به‌طورکلی این مجموعه داده دما را در مقایسه با داده‌های مشاهداتی بیش‌تر برآورد می‌کند. اگرچه ERA5 دما را در ارتفاعات در مقایسه با اندازه‌گیری‌های ایستگاهی همان‌طور که در بخش درستی سنجی اشاره شد، بیش‌تر برآورد می کند با این حال این مجموعه داده توانسته است الگوی فضایی دمای مناطق کوهستانی کشور را به درستی به تصویر بکشد. همچنین بررسی نتایج دمای مجموعه داده ERA5 نشان می‌هد که نسخه‌های جدید ERA5 در مقایسه با نسخه پیشین ERA-Interim (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷) بسیار بهبود یافته‌اند. اگرچه همانطور که گفته شد کماکان اریبی زیادی در مناطق ساحلی و مرتفع ایران دیده می‌شود.

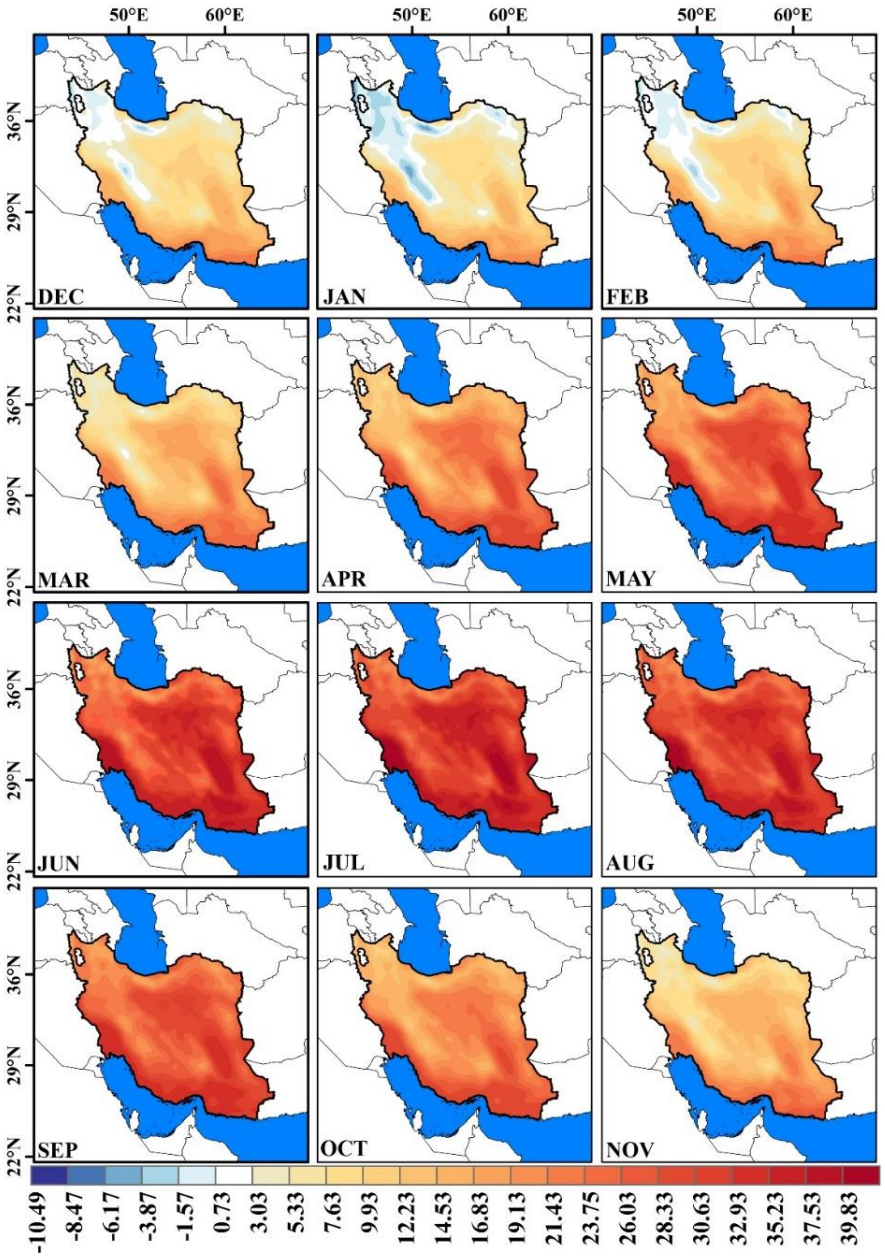
پراکنش فضایی دمای ماهانه ایران مبتنی بر برونداد دمای نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی

داده‌های ماهانه ERA5 در بسیاری از مناطق ایران الگویی مشابه با داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های هواشناسی همدید) ارائه داده‌اند. اما مناطق محدودی نیز وجود دارند که برونداد مجموعه داده ERA5 به‌طور قابل‌توجهی نسبت به داده‌های ایستگاهی متفاوت است (شکل ۹). در مناطقی با عرض جغرافیایی بیشتر از ۳۶ درجه شمالی، مجموعه داده ERA5 به غیر از چند ایستگاه منفرد در سایر مناطق بیش برآوردی داشته است. در مقابل، این مجموعه داده در منطقه ساحلی جنوب در مقایسه با داده‌های مشاهداتی دما را کمتر برآورد کرده است. در حالی که با حرکت به سمت مناطق خشک داخلی ایران بیش برآوردی دما در این مجموعه داده مشاهده می‌شود. به‌علاوه در مناطق شمالی و غربی ایران، توپوگرافی پیچیده بر کارایی داده‌ها تأثیر گذاشته است. در مناطق مرتفع مانند ارتفاعات زاگرس و البرز، هر دو نسخه احتمالاتی ۰/۵ درجه قوسی و نسخه قطعی ۰/۲۵ درجه قوسی نسبت به داده‌های ایستگاهی بیش برآوردی داشته‌اند (شکل ۹). میانگین دمای ماهانه ERA5 در ایران از تغییرات توپوگرافی و عرض جغرافیایی پیروی می‌کند (شکل ۹). کمینه دما در فصول مختلف در شمال‌غربی کشور دیده می‌شود. در حالی که دماهای بسیار بالا در سواحل مکران، جنوب‌غرب ایران و مناطق داخلی همانند دشت لوت و دشت کویر در تابستان و با مقداری کمتر در بهار رخ می‌دهند (شکل ۹). بیشینه دما با ۳۹/۸۳ درجه سلسیوس در ماه ژوئیه و کمینه آن با ۱۰/۴۹- درجه سلسیوس در ماه ژانویه مشاهده می‌شود. کمینه دما در ایران براساس برونداد مجموعه داده ERA5 نسخه قطعی با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی در پنج ماه از سال کمتر از صفر درجه سلسیوس است. این پنج ماه عبارتند از ژانویه، فوریه، مارس، نوامبر و دسامبر. مناطقی با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس در سراسر ایران منطبق بر کوه‌های مرتفع است. به عبارت دیگر اقلیم شناسی مناطق همراه با یخبندان، طی دوره سرد سال از آرایش مناطق کوهستانی پیروی می‌کند. درصد مناطقی با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس در ژانویه ۲۲/۸۵ درصد، فوریه ۱۵/۹۹ درصد،

مارس ۰/۹۷ درصد، نوامبر ۰/۰۹ درصد و دسامبر ۱۱/۶۶ درصد از مساحت کل کشور را در بر می‌گیرند. نوامبر تنها ماهی است که میانگین دمای کمتر از صفر در آن تنها در ارتفاعات البرز دیده می‌شود. کمینه‌های دمایی در سایر ماه-هایی که دما در آن به کمتر از صفر درجه سلسیوس می‌رسد در ارتفاعات زاگرس، شمال‌غرب، البرز و ارتفاعات شمال-شرق مشاهده می‌شود. مناطقی با دمای بالاتر از ۳۰ درجه سلسیوس در عرض‌های جغرافیایی پایین در سواحل مکران و خلیج فارس دیده می‌شوند. مناطقی با بیشینه دمای میانگین بیش‌تر از ۳۰ درجه سلیسوس در فصل تابستان در ایران مرکزی تا دشت کویر دیده می‌شود. همچنین در مناطق جنوبی کشور ارتفاعات باعث بر هم خوردن الگوی مداری دما در این مناطق شده است. به‌طوری که کوه‌های هزار و لاله زار کرمان در تغییرات مداری دمای این منطقه از کشور نقش بسیار مهمی دارند. به‌طوری که این ویژگی جغرافیایی باعث شده است تا در حوالی مدار ۲۹ درجه شمالی در جنوب ایران در ماه ژانویه میانگین بلند مدت دما ۰/۶۶- درجه سلسیوس باشد. از سوی دیگر همین ویژگی جغرافیایی (ارتفاعات) باعث شده است تا در گرم‌ترین ماه سال در ایران (ژوئیه) در یک فاصله کمتر از ۳۰۰ کیلومتری بین ارتفاعات کرمان تا بندرعباس اختلاف دمای بیش از ۱۱ درجه سلسیوس (۱۱/۱۲ درجه سلسیوس) وجود داشته باشد. حتی اختلاف نزدیک به ۱۷ درجه سلسیوس (۱۶/۹۸ درجه سلسیوس) بین ارتفاعات کرمان و دشت لوت در شرق آن در فاصله حدود ۱۵۰ کیلومتری تا مرکز دشت لوت دیده می‌شود. این تغییرات دما به روشنی نقش غیر قابل انکار ارتفاعات در شکل‌گیری اقلیم‌های متنوع ایران را نشان می-دهد. بررسی بلند مدت دامنه تغییرات سالانه دما بین سردترین و گرم‌ترین نقطه ایران نشان می‌دهد که اختلاف سالانه دما در ایران بیش از ۵۰ درجه سلسیوس (۵۰/۳۲ درجه سلسیوس) است. کمینه دما از ژوئن تا سپتامبر بالاتر از ۱۲ درجه سلسیوس است. بالاترین مقدار میانگین کمینه دما در ایران در ماه ژوئیه با ۱۶/۹۷ درجه سلسیوس به دست آمده است. بر این اساس می‌توان اذعان داشت که وردایی دما در ایران از یک الگوی زنگدیس پیروی می‌کند به‌طوری که کمینه و بیشینه دما همگام با یکدیگر از ژانویه تا ژوئیه روند افزایشی و پس از دسامبر روند کاهشی را نشان می‌دهند.



شکل ۸: پهنه بندی میانگین دمای سالانه نسخه‌های مختلف ERA5 در ایران در مقایسه با داده‌های مشاهداتی؛ الف: نسخه قطعی با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی، ب: داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های هواشناسی همدید)، ج: نسخه احتمالاتی با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی، د: نسخه قطعی با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی.



شکل ۹: پهنه‌بندی میانگین دمای ماهانه در ایران با داده‌های نسخه ERA5-0.25°

نتیجه‌گیری

بررسی نسخه‌های مختلف احتمالاتی و قطعی ERA5 با دو تفکیک افقی ۰/۵ و ۰/۲۵ درجه قوسی در برآورد دمای ایران نشان داد که به‌طور کلی، نسخه‌های مختلف مجموعه داده ERA5 پراکنش فضایی میانگین دما در ایران را به درستی برآورد می‌کنند. با این‌حال کارایی آن‌ها در برآورد دمای کشور در عرض‌های جغرافیایی بالا و مناطقی با توپوگرافی پیچیده نسبت به مناطق خشک و نیمه‌خشک داخلی کمتر است. علاوه بر توپوگرافی پیچیده، جغرافیای درهم تنیده همانند سواحل جنوبی دریای خزر نیز بر کارایی ERA5 تأثیر می‌گذارد. کارایی پایین‌تر مجموعه داده‌های ERA5 در مناطق ساحلی در منطقه السورث جنوبگان (Tetzner et al, 2019) و در سطح جهانی (Gualtieri, 2020) نیز گزارش شده است. به نظر می‌رسد کارایی پایین تر این مجموعه داده در سواحل به دلیل تضاد دریا-خشکی است که منجر به تفاوت‌های زیادی در برونداد ERA5 نسبت به داده‌های مشاهداتی می‌شود. ارزیابی متغیر دما در نسخه‌های مختلف ERA5 با داده‌های مشاهداتی نشان داد که نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی به‌طور سیستماتیک دارای کم‌برآوردی دما است که این

مقدار برای متوسط پهنه‌ای کشور ۷/۴۱- درصد است. در مقابل نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۵ درجه قوسی دمای ایران را در متوسط پهنه‌ای کشور ۱۲/۰۱ درصد بیش‌تر برآورد نموده است. بررسی سه نسخه متفاوت از مجموعه داده ERA5 برای دو نسخه قطعی و احتمالاتی نشان داد که نسخه قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی با متوسط اریبی ۱/۰۷ درجه سلسیوس و درصد اریبی ۹/۳۶ درصد در متوسط پهنه‌ای کشور بهترین برآورد را از دمای ایران ارائه می‌دهد. نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد که توافق کلی خوبی بین نسخه‌های ERA5 احتمالاتی و قطعی با داده‌های مشاهداتی در ایران وجود دارد و از این مجموعه بازتحلیل که چه از نظر تعدد متغیرها، گام‌های زمانی و ترازهای ارائه شده و چه از نظر نسخه‌های مختلف بسیار کامل و در پوشش جهانی ارائه شده است، می‌توان در مناطق فاقد داده مشاهداتی با اطمینان بالایی استفاده کرد. با این حال هنگام به کارگیری این داده‌ها به عنوان داده مشاهداتی یا داده اصلی در مناطق ساحلی و کوهستانی باید دقت بیشتری کرد. بررسی پراکنش ماهانه دمای میانگین ایران براساس برونداد قطعی ERA5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه قوسی نشان داد که کمینه دمای ایران با ۱۰/۴۹- درجه سلسیوس در ماه ژانویه و بیشینه آن با ۳۹/۸۳ درجه سلسیوس در ماه ژوئیه اتفاق می‌افتد. دما در تمامی ماه‌ها و میانگین سالانه از آرایش توپوگرافی کشور پیروی می‌کند. به‌طوری که کمینه دمای ایران در ۵ ماه از سال (ژانویه، فوریه، مارس، نوامبر و دسامبر) منفی است. به‌طور کلی از منظر اقلیم‌شناسی با توجه به ارزیابی نسخه‌های مختلف ERA5 در مناطق مختلف کشور، این مجموعه داده بازتحلیل در برآورد دمای ایران مناسب است. با این‌حال، جدا از نقاط قوت، این مجموعه داده برخی محدودیت‌ها در برآورد متغیر دما در ایران را آشکار کرده است. این محدودیت‌ها عمدتاً در مناطقی با توپوگرافی پیچیده که ایستگاه‌های مشاهداتی ندارند و همچنین در سواحل خزری به دلیل برهمکنش دریا-هوا-خشکی مشاهده می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی دریافت نکرده است.

پانوشت

1-Ensemble of Data Assimilations (EDA)

منابع (References)

-Azizi mobaser, J., Rasoulzadeh, A., rahmati, A., shayeghi, A. and Bakhtar, A., 2021. Evaluating the Performance of Era-5 Re-Analysis Data in Estimating Daily and Monthly Precipitation, Case Study; Ardabil Province. Iranian Journal of Soil and Water Research, v. 51, p. 2937-2951 (in Persian).

-Bandhauer, M., Isotta, F., Lakatos, M., Lussana, C., Baserud, L., Izsak, B. and Frei, C., 2022. Evaluation of daily precipitation analyses in E-OBS (v19. 0e) and ERA5 by comparison to regional high-resolution datasets in European regions. International Journal of Climatology, v. 42, p. 27-747.

-Barlow, M., Zaitchik, B., Paz, S., Black, E., Evans, J. and Hoell, A., 2016. A review of drought in the Middle East and southwest Asia. Journal of climate, v. 29(23), p. 8547-8574.

-Ahmadi, M., Dadashi Roudbari, A., Ahmadi, H. and Alibakhshi, Z., 2018. Analysis of Iran Temperature Structure Based on ECMWF, ERA Interim Version. Physical Geography Research Quarterly, v. 50(2), p. 353-372. Doi: 10.22059/jphgr.2018.238512.1007092 (in Persian).

-Akhlaghi-Hosseiny, S.F., Zarrin, A. and Dadashi-Roudbari, A., 2023. Examining the Diurnal Temperature Range (DTR) in Iran using the AgERA5 dataset, Journal of Geography and Environmental Hazards, v. 12, p. 189-208 (in Persian).

-Asadi Rahim-Begi, N., Zarrin, A., Modfidi, A. and Dadashi-Roudbari, A., 2022. Seasonal Distribution Analysis of Extreme Precipitation in Iran using AgERA5 dataset. Iranian Journal of Soil and Water Research, v. 52, p. 2723-2737 (in Persian).

-Carvalho, D., Rafael, S., Monteiro, A., Rodrigues, V., Lopes, M. and Rocha, A., 2022. How well have CMIP3, CMIP5 and CMIP6 future climate projections portrayed the recently observed warming. Scientific Reports, v. 12(1), p. 1-7.
-Freville, H., Brun, E., Picard, G., Tatarinova, N., Arnaud, L., Lanconelli, C. and Van den Broeke, M., 2014. Using MODIS land surface temperatures and the Crocus snow model to understand the warm bias of ERA-Interim reanalyses at the surface in Antarctica, The Cryosphere, v. 8(4), p. 1361-1373.
-Gao, L. and Hao, L., 2014. Verification of ERA-Interim reanalysis data over China. J. Subtrop. Resour. Environ, v. 9, p. 75-81.
-Gualtieri, G., 2021. Reliability of era5 reanalysis data for wind resource assessment: A comparison against tall towers. Energies, v. 14(14), p. 4169.
-Gualtieri, G., 2021. Reliability of ERA5 reanalysis data for wind resource assessment: a comparison against tall towers. Energies, v. 14(14), p. 41-69.
-Hamill, T.M., 2021. Comparing and Combining Deterministic Surface Temperature Postprocessing Methods over the United States. Monthly Weather Review, v. 149(10), p. 3289-3298.
-Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Munoz-Sabater, J. and Thepaut, J.N., 2020. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 146(730), p. 1999-2049.
-IPCC., 2021. Summary for policymakers Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribu- tion of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press (2021).
-Kadkhoda, E., Omidvar, K., Zarrin, A. and Mazidi, A., 2023. Seasonal analysis and trend of heat stress in Iran using ERA5 data. Journal of the Earth and Space Physics, Articles in Press, Accepted (in Persian).
-Karaman, C.H. and Akyurek, Z., 2023. Evaluation of near-surface air temperature reanalysis datasets and downscaling with machine learning based Random Forest method for complex terrain of Turkey. Advances in Space Research, v. 71(12), p. 5256-5281.
-Mohammadi Ghaleni, M. and Sharafi, S., 2022. Evaluation of CRU TS4.05 and ERA5 Datasets Accuracy to Precipitation, Temperature and Potential Evapotranspiration in Different Climates across Iran. Iranian Journal of Irrigation & Drainage, v. 16, p. 879-890 (in Persian).
-Munoz-Sabater, J., Dutra, E., Agusti-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G. and Thepaut, J.N., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth system science data, v. 13(9), p. 4349-4383.
-Ravand, A., khaledi, S. and hasanabadi, D., 2022 Forecasting the effects of climate change on the climatic of the Miahne-city using climate models (SDSM), Journal of Applied researches in Geographical Sciences, v. 21, p. 251-270 (in Persian).
-Rahimzadeh, F., Asgari, A. and Fattahi, E., 2009. Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, v. 29(3), p. 329-343.
-Sam Khaniani, A. and Mohammadi, A., 2022. Comparison of ERA5-Land reanalysis data with surface observations over Iran, Iranian Journal of Geophysics, v. 16, p. 195-212 (in Persian).
-Sheridan, S.C., Lee, C.C. and Smith, E.T., 2020. A comparison between station observations and reanalysis data in the identification of extreme temperature events, Geophysical Research Letters, v. 47(15), p. e2020GL088120.
-Stefanidis, K., Varlas, G., Papaioannou, G., Papadopoulos, A. and Dimitriou, E., 2022. Trends of lake temperature, mixing depth, and ice cover thickness of European lakes during the last four decades. Science of the Total Environment, v. 830, p. 154709.
-Syed, Z., Ahmad, S., Dahri, Z.H., Azmat, M., Shoaib, M., Inam, A. and Ahmad, S., 2022. Hydroclimatology of the Chitral River in the Indus Basin under changing climate, Atmosphere, v. 13, p. 295.
-Tarek, M., Brissette, F.P. and Arsenault, R., 2020. Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America, Hydrology and Earth System Sciences, v. 24(5), p. 2527-2544.
-Tetzner, D., Thomas, E. and Allen, C., 2019. A validation of ERA5 reanalysis data in the Southern Antarctic Peninsula—Ellsworth land region, and its implications for ice core studies. Geosciences, v. 9(7), p. 289.

-Trenberth, K.E., 2011. Changes in precipitation with climate change. Climate research, v. 47(1-2), p. 123-138.
-Vanella, D., Longo-Minnolo, G., Belfiore, O.R., Ramirez-Cuesta, J.M., Pappalardo, S., Consoli, S. and Gandolfi, C., 2022. Comparing the use of ERA5 reanalysis dataset and ground-based agrometeorological data under different climates and topography in Italy, Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 42, p. 101182.
-Vitolo, C., Di Giuseppe, F., Barnard, C., Coughlan, R., San-Miguel-Ayanz, J., Liberta, G. and Krzeminski, B., 2020. ERA5-based global meteorological wildfire danger maps, Scientific data, v. 7, p. 216.
-Yao, X., Fu, B., Lu, Y., Sun, F., Wang, S. and Liu, M., 2013. Comparison of four spatial interpolation methods for estimating soil moisture in a complex terrain catchment, PloS one, v. 8(1), p. e54660.
-Yilmaz, M., 2023. Accuracy assessment of temperature trends from ERA5 and ERA5-Land. Science of The Total Environment, v. 856, p. 159182.
-Zarrin, A. and Dadashi-Roudbari, A., 2022. Evaluation of reanalysis-based, satellite-based, and bias-correction-based datasets for capturing extreme precipitation in Iran, Meteorology and Atmospheric Physics, v. 134(4), p. 67.
-Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A. and Hassani, S., 2021. Historical variability and future changes in seasonal extreme temperature over Iran. Theoretical and Applied Climatology, v. 146, p. 1227-1248.
-Zhu, J., Xie, A., Qin, X., Wang, Y., Xu, B. and Wang, Y., 2021. An assessment of ERA5 reanalysis for Antarctic near-surface air temperature. Atmosphere, v. 12(2), p. 217.
-Zou, J., Lu, N., Jiang, H., Qin, J., Yao, L., Xin, Y. and Su, F., 2022. Performance of air temperature from ERA5-Land reanalysis in coastal urban agglomeration of Southeast China. Science of The Total Environment, v. 828, p. 154459.