




Research Article

Projection and analysis of changes in Middle East heatwaves based on CMIP6 multi-model simulations for the period 2026–2055

Faezeh Noori¹, Ebrahim Fatahi², Abbas Ranjbar Saadat Abadi^{3*} 

1-Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

2-Transportation Meteorology Research Group, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

3-Atmospheric Hazard Early Warning Group, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

Received: 11 Feb 2026 Accepted: 22 Apr 2026

Extended Abstract

Introduction

The increase in greenhouse gas concentrations in recent decades, alongside the intensification of global warming, has led to more frequent, more intense, and longer-lasting extreme atmospheric events—especially heatwaves. Rising mean air temperatures and a shift in the temperature distribution toward higher values have caused warm-season thermal thresholds to be exceeded more quickly and for longer periods. As a result, episodes of extreme heat not only occur more often but also last longer and are associated with higher peak temperatures, placing greater stress on human health and infrastructure. The Middle East is considered one of the most vulnerable regions to heat stress due to the dominance of arid and semi-arid climates, limited water resources, and the high sensitivity of natural systems. At the same time, population growth, rapid urbanization, and the expansion of the urban heat island effect can further exacerbate heatwave impacts in many cities across the region. Therefore, monitoring and projecting changes in heatwaves is essential for risk management, adaptation planning, and reducing socio-economic consequences in the Middle East.

Materials and Methods

In this study, the Middle East was selected as the target region and, to capture spatial heterogeneity, was subdivided into three sub-regions (northern, central, and southern) based on geographic-climatic characteristics and temperature gradients. To characterize past climate conditions and project future heatwave changes, daily maximum temperature from ERA5 for the reference period 1985–2014 was combined with 0.25° downscaled CMIP6 projections from the NEX-GDDP dataset. Simulations from three selected CMIP6 models were analyzed for the future period 2026–2055 under three emissions pathways SSP1-2.6 (low), SSP2-4.5 (intermediate), and SSP5-8.5 (high) to span a range of plausible futures. Before index calculation, all datasets underwent preprocessing, including quality control, handling of missing values, and calendar harmonization (removal of leap days) to ensure consistency across products. Model skill for the reference period was assessed by benchmarking model outputs against ERA5 using the root-mean-square error (RMSE), mean bias, and the Pearson correlation coefficient (R), providing a basis for uncertainty assessment and confidence in future projections. Heatwave intensity was quantified following Russo et al. (2014), where a heatwave is defined as at least three consecutive days with daily maximum temperature exceeding a day-specific 90th-percentile threshold computed from the 1985–2014 baseline using a centered 31-day moving window; the annual heatwave intensity index was then derived as the maximum intensity among all events in each year.

Citation: Noori, F. et al, 2026. Projection and analysis of changes in Middle East heatwaves based on CMIP6 multi-model, *Res. Earth. Sci.* 17(1), (135-154) DOI: 10.48308/esrj.2026.107031

* Corresponding author E-mail address: aranjabr@rimas.ac.ir



Results and Discussion

The findings indicate that the performance of climate models in reproducing maximum temperature over the Middle East is significantly season-dependent. In summer, the models achieve the lowest systematic and random errors alongside the highest correlation with reanalysis data, demonstrating strong skill in representing both absolute temperatures and their variability during the hottest season. In contrast, winter exhibits the weakest performance: higher bias and overall error combined with reduced correlation point to limitations in capturing wintertime temperature variability. Spring shows an improvement relative to winter, although correlations remain only moderate, whereas autumn—characterized by very high correlation and comparatively moderate overall error—provides robust reliability for temperature-based analyses. Overall, these results confirm that model outputs are more dependable for temperature applications in summer and autumn, while winter requires greater emphasis on seasonal bias correction and targeted calibration. The annual spatial evaluation further shows that model performance is acceptable and relatively stable across much of the Middle East, with errors increasing mainly in areas of complex topography and along land–sea transition zones. This is physically plausible, as simulations in such regions are more sensitive to local processes and land–atmosphere interactions and depend more strongly on parameterization quality. Although the bias pattern is relatively coherent at the regional scale, it appears amenable to correction: a tendency toward underestimation is evident in parts of the Arabian Peninsula, while overestimation occurs in portions of the northwest. Taken together, these results suggest that the selected models are sufficiently capable for regional analyses and future-change assessments, provided that spatial and seasonal biases are explicitly considered in interpretation. For future projections, the overall signal points to a pronounced increase in summertime heat stress during the projected period relative to the reference climate. Heatwave frequency and the number of very hot days rise across most of the domain, with the strongest amplification over interior and desert regions—particularly the Arabian Peninsula, Iraq, and large parts of Iran. A key implication is that, even under optimistic emissions pathways, a substantial intensification of summer heatwaves is largely unavoidable and may have serious consequences for public health, energy demand, and water resources. Under the intermediate pathway, increases in both the frequency and spatial extent of heatwave occurrence become more persistent across many mid- and higher-latitude parts of the region, revealing clearer spatial contrasts. This indicates that regional responses to future warming are not uniform and are strongly shaped by local climate conditions and geographic setting. One of the most important findings is the emergence of nonlinear behavior in heatwave metrics under the high-emissions pathway. While a monotonic increase in heatwave frequency might be expected with stronger warming, the results show that in some areas—particularly toward the end of the projection period—frequency can decline relative to the intermediate pathway, even though overall heat stress remains above the baseline. This suggests that, under intense warming, the dominant change mechanism may shift from “more events” toward event merging and longer-lasting heatwaves. In other words, rather than producing a greater number of discrete episodes, a hotter climate may favor more persistent, multi-week heatwave conditions—reducing the count of events while increasing their duration and intensity. The spatiotemporal analyses further indicate that heatwave changes vary with time and scenario in both latitude and longitude, and do not organize into a single, uniform gradient across the study domain. Under the optimistic pathway, interannual variability and episodic spikes are evident, but a consistent, region-wide upward trend is not dominant. Under the intermediate pathway, increases become more coherent and sustained, with larger portions of the region—especially mid- and higher-latitude areas—remaining at elevated heatwave-day levels for longer periods. Under the high-emissions pathway, the pattern becomes more unstable and distinctly nonlinear: intervals of sharp increases alternate with periods of relative decline or large variability, and hotspots of thermal stress may emerge in different longitudes at different times. This behavior highlights the importance of accounting for interannual variability and regional processes in heatwave risk assessment. At the decadal scale, heatwave intensity generally increases across all scenarios, with scenario divergence becoming more evident from the middle decades onward. In some cases, the intermediate pathway exhibits a larger upward shift in the median and spread of intensity, whereas the high-emissions pathway displays nonlinear responses. Nevertheless, heatwave duration intensifies most strongly under the high-emissions pathway and can accelerate toward the end of the period. This is particularly important for risk management, as prolonged heatwaves—even if fewer in number—can impose greater cumulative stress on public health, labor productivity, electricity demand, and water-system reliability. Sub-regional analyses reveal clear contrasts among the northern, central, and southern sectors. The northern and central sectors are more sensitive in terms of intensity increases, with stronger intensification under higher-emissions pathways. The southern sector, despite being warmer in absolute terms, shows smaller relative increases in intensity—potentially reflecting proximity to already-high thermal thresholds and physical–statistical constraints on relative

growth. In terms of duration or heatwave days, all three sectors experience substantial increases, but the central sector exhibits the largest jump; under the high-emissions pathway, heatwaves may shift from multi-day events to multi-week phenomena. The convergence of scenarios early in the period and their divergence later further indicate that the influence of emissions pathways grows over time, and that mitigation and adaptation choices can meaningfully shape future risk. Overall, the Middle East is projected to face a significant rise in summertime heat stress during 2026–2055. Importantly, this increase is not limited to a higher number of events; under warmer scenarios, it may involve a transformation toward longer and more intense heatwaves. Accordingly, adaptation planning should simultaneously address the three core dimensions of heatwave risk—frequency, duration, and intensity—while explicitly considering spatial differences across sub-regions. Given the weaker model performance in winter and the heightened sensitivity of complex terrain and land–sea interface areas, seasonal bias correction and uncertainty assessment should be treated as integral components of both scientific analysis and policy-relevant applications.

Conclusion

This study shows that CMIP6 model performance in estimating temperature is seasonally dependent: simulations are more reliable in summer and autumn, whereas winter exhibits the largest bias and RMSE, underscoring the need for seasonal bias correction and targeted calibration—particularly for winter conditions. Spatially, errors are concentrated mainly over mountainous terrain and along land–sea transition zones, while model performance is more stable across interior regions. The results also indicate that future warming is not confined to higher daytime maxima; the widespread rise in minimum temperatures (especially at night) emerges as a key climate-change signal across the region. Heatwave metrics further reveal that thermal risk increases under all emissions scenarios, but the magnitude and spatial pattern of change are scenario- and location-dependent and can be nonlinear. Heatwave intensity increases most strongly in the northern and central sub-regions, while persistence/number of heatwave days shows an even more pronounced rise—particularly in the central sector, where events may extend to near multi-week durations. Overall, the Middle East is likely to experience a shift in the heatwave regime toward more intense and longer-lasting events; consequently, adaptation strategies should address both “intensity” and “persistence” simultaneously and explicitly incorporate sub-regional differences in planning for health, energy, water, and critical infrastructure.

Keywords: Heatwaves, CMIP6 climate models, SSP scenarios, ERA5-Land, Middle East.

پیش‌نگری و تحلیل تغییرات امواج گرمایی خاورمیانه بر پایه شبیه‌سازی‌های چندمدلی

CMIP6 در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵

فائزه نوری^۱، ابراهیم فتاحی^۲، عباس رنجبرسعدت‌آبادی^{۳*} 

۱- پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران

۲- گروه پژوهشی هواشناسی ترابری پژوهشگاه هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

۳- گروه پیش‌آگاهی مخاطرات جوی، پژوهشگاه هواشناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۵/۰۲/۰۲

چکیده گسترده

مقدمه

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر با تشدید گرمایش جهانی به افزایش فراوانی، شدت و تداوم رخداد‌های حدی جوی، به‌ویژه امواج گرما، انجامیده است. افزایش میانگین دما و جابه‌جایی توزیع دما به سوی مقادیر بالاتر باعث شده است که در فصل گرم، عبور از آستانه‌های حرارتی زودتر رخ دهد و مدت زمان آن طولانی‌تر شود. در نتیجه، دوره‌های گرمای شدید نه تنها بیشتر رخ می‌دهند، بلکه طولانی‌تر شده و با دماهای اوج بالاتری همراه هستند و فشار بیشتری بر سلامت انسان و زیرساخت‌ها وارد می‌کنند. خاورمیانه به دلیل غالب بودن اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، محدودیت منابع آب و حساسیت بالای سامانه‌های طبیعی، از آسیب‌پذیرترین مناطق در برابر تنش حرارتی به شمار می‌رود. همزمان، رشد جمعیت، شهرنشینی سریع و گسترش جزیره گرمایی شهری می‌تواند اثرات موج‌های گرما را در بسیاری از شهرهای منطقه تشدید کند. از این‌رو پایش و پیش‌نگری تغییرات امواج گرمایی، برای مدیریت ریسک، برنامه‌ریزی سازگاری و کاهش پیامدهای اجتماعی - اقتصادی در خاورمیانه ضروری است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، خاورمیانه به عنوان منطقه مطالعه انتخاب و برای تحلیل ناهمگنی‌های مکانی، بر اساس ویژگی‌های جغرافیایی - اقلیمی به سه زیربخش شمالی، مرکزی و جنوبی تقسیم شد. برای بازنمایی اقلیم گذشته و شبیه‌سازی آینده، از دمای بیشینه روزانه ERA5 در دوره مرجع ۱۹۸۵-۲۰۱۴ و داده‌های کاهش‌مقیاس‌یافته (CMIP6) NEX-GDDP با تفکیک ۰/۲۵ درجه استفاده شد. سه مدل منتخب CMIP6 برای دوره آینده ۲۰۲۶-۲۰۵۵ تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 به کار گرفته شدند تا طیفی از مسیرهای انتشار پوشش داده شود. پیش از محاسبه شاخص‌ها، داده‌ها از نظر کنترل کیفیت، مدیریت داده‌های مفقود و یکسان‌سازی تقویم (حذف روز کبیسه) پیش‌پردازش شدند. توان مدل‌ها در بازنمایی دوره مرجع با مقایسه خروجی‌ها و ERA5 و محاسبه شاخص‌های Bias، RMSE و ضریب همبستگی پیرسون ارزیابی شد.

استناد: نوری، ف. و همکاران، ۱۴۰۵. پیش‌نگری و تحلیل تغییرات امواج گرمایی خاورمیانه بر پایه شبیه‌سازی‌های چندمدلی CMIP6،

پژوهشهای دانش زمین: ۱۷(۱)، (۱۵۴-۱۱۳)، DOI: 10.48308/esrj.2026.107031

شدت موج گرما مطابق روش روسو و همکاران محاسبه گردید؛ به طوری که موج گرما رخدادی با حداقل ۳ روز متوالی دمای بیشینه بالاتر از آستانه روزانه صدک ۹۰ (بر پایه پنجره ۳۱ روزه در دوره ۱۹۸۵-۲۰۱۴) تعریف شد و شاخص شدت سالانه به صورت بیشینه شدت رخدادهای همان سال استخراج شد.

نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد عملکرد مدل‌های اقلیمی در بازتولید دمای بیشینه در خاورمیانه به‌طور معناداری وابسته به فصل است. در فصل تابستان، مدل‌ها کمترین خطای سیستماتیک و تصادفی را همزمان با بیشترین همبستگی با داده‌های باز تحلیل ثبت می‌کنند که بیانگر توان بالای آن‌ها در بازنمایی هم مقدار دما و هم تغییرپذیری آن در گرم‌ترین فصل سال است. در مقابل، زمستان ضعیف‌ترین کارایی را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که افزایش آریبی و خطای کلی همراه با افت همبستگی، از محدودیت مدل‌ها در بازتولید نوسانات دمایی این فصل حکایت دارد. در بهار، عملکرد نسبت به زمستان بهبود می‌یابد اما همبستگی همچنان در حد متوسط باقی می‌ماند، در حالی که پاییز با همبستگی بسیار بالا و خطای کلی نسبتاً متوسط، اتکاپذیری مناسبی برای تحلیل‌های دمایی ارائه می‌دهد. این الگو به‌طور کلی تأیید می‌کند که قابلیت اعتماد به خروجی مدل‌ها برای کاربردهای مرتبط با دما در تابستان و پاییز بیشتر است و برای زمستان، به کارگیری تصحیح آریبی و کالیبراسیون فصلی اهمیت بالاتری دارد. ارزیابی فضایی سالانه نیز نشان می‌دهد مدل‌ها در بخش وسیعی از خاورمیانه عملکرد قابل قبول و نسبتاً پایدار دارند و خطاها عمدتاً در نواحی با توپوگرافی پیچیده و مناطق گذار خشکی - دریا افزایش می‌یابد؛ موضوعی که از نظر فیزیکی قابل انتظار است، زیرا شبیه‌سازی فرایندهای محلی و برهم‌کنش‌های سطح - جو در چنین پهنه‌هایی حساس‌تر و وابسته‌تر به کیفیت پارامترسازی‌هاست. الگوی آریبی، گرچه در سطح منطقه‌ای نسبتاً منسجم است، اما ماهیتی قابل اصلاح دارد؛ به طوری که در برخی بخش‌های شبه‌جزیره عربستان گرایش به کم‌برآوردی و در قسمت‌هایی از شمال غرب گرایش به بیش‌برآوردی مشاهده می‌شود. در مجموع، این یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل‌های منتخب ظرفیت کافی برای تحلیل‌های منطقه‌ای و بررسی تغییرات آینده را دارند، هرچند توجه به سوگیری‌های مکانی و فصلی برای تفسیر نتایج ضروری است. در بخش برون‌یابی آینده، الگوی کلی نشان‌دهنده افزایش چشمگیر تنش حرارتی تابستانه در دوره آینده نسبت به دوره مرجع است. فراوانی موج‌های گرمایی و همچنین تعداد روزهای بسیار گرم در بخش عمده‌ای از منطقه افزایش می‌یابد و مناطق داخلی و بیابانی به‌ویژه در شبه‌جزیره عربستان، عراق و بخش‌های گسترده‌ای از ایران بیشترین تشدید را تجربه می‌کنند. این نتیجه مهم را برجسته می‌کند که حتی در مسیرهای انتشار خوش‌بینانه نیز، افزایش موج‌های گرما در تابستان تا حد زیادی اجتناب‌ناپذیر است و می‌تواند پیامدهای جدی برای سلامت، انرژی و منابع آب به همراه داشته باشد. در مسیر انتشار میانی، افزایش فراوانی و گستره مکانی رخدادهای موج گرما در بسیاری از عرض‌های میانی و شمالی پایدارتر می‌شود و تفاوت‌های مکانی به صورت واضح‌تر نمایان می‌گردد؛ به این معنا که پاسخ منطقه‌ای به گرمایش آینده یکنواخت نیست و شرایط اقلیمی محلی و موقعیت جغرافیایی نقش تعیین‌کننده دارند. یکی از یافته‌های کلیدی، مشاهده رفتار غیرخطی شاخص‌های موج گرما تحت سناریوی انتشار بالا است. در حالی که انتظار می‌رود با افزایش گرمایش، فراوانی موج‌های گرما نیز به‌طور یکنواخت افزایش یابد، نتایج نشان می‌دهد در برخی نواحی و در سال‌های پایانی دوره آینده، فراوانی می‌تواند نسبت به مسیر انتشار میانی کاهش نسبی نشان دهد، در حالی که سطح کلی تنش حرارتی همچنان بالاتر از دوره مرجع باقی می‌ماند. این الگو به این تفسیر منتهی می‌شود که در شرایط گرمایش شدید، سازوکار تغییر ممکن است از «افزایش تعداد رخدادهای گرما» به سمت ادغام رخدادهای طولانی‌تر شدن موج‌های گرما تغییر کند. به بیان دیگر، در سناریوی شدیدتر، به‌جای افزایش تعداد موج‌ها، موج‌های گرمایی پایدارتر و چند هفته‌ای محتمل‌تر می‌شوند و همین امر می‌تواند باعث کاهش شمار رخدادهای در کنار افزایش مدت و شدت آن‌ها شود. تحلیل‌های زمانی - مکانی نیز نشان می‌دهد تغییرات موج‌های گرما هم از نظر عرضی و هم از نظر طولی، وابسته به زمان و سناریو است و یک گرادیان ثابت و یکنواخت در کل منطقه شکل نمی‌گیرد. در مسیر خوش‌بینانه، نوسانات بین‌ساله و افزایش‌های مقطعی دیده می‌شود اما روند افزایشی یکدست و پایدار در تمام پهنه‌ها غالب نیست. در مسیر میانی، افزایش‌ها منسجم‌تر و پایدارتر می‌شود و بخش‌های بزرگ‌تری از منطقه به‌ویژه در عرض‌های میانی و شمالی برای دوره‌های طولانی‌تری در سطح بالای فراوانی موج گرما قرار می‌گیرند. در مسیر شدید، الگو ناپایدارتر و غیرخطی‌تر است؛ به طوری که دوره‌هایی از افزایش شدید با دوره‌هایی از افت نسبی

یا نوسانات بزرگ همراه می‌شود و کانون‌های تنش حرارتی می‌توانند در طول‌های مختلف و در زمان‌های متفاوت فعال شوند. این رفتار، اهمیت توجه به تغییرپذیری بین‌سالی و نقش فرایندهای ناحیه‌ای را در تحلیل ریسک موج گرما برجسته می‌کند. در مقیاس دهه‌ای، شاخص شدت موج گرما به‌طور کلی در همه سناریوها روند افزایشی دارد، اما شکاف سناریویی از دهه‌های میانی به بعد آشکارتر می‌شود. در برخی موارد، مسیر انتشار میانی می‌تواند افزایش چشمگیرتری در میانه و دامنه توزیع شدت نشان دهد و مسیر انتشار بالا رفتار غیرخطی بروز دهد؛ با این حال، شاخص مدت موج گرما در مسیر انتشار بالا بیشترین تشدید را تجربه می‌کند و در دهه‌های پایانی می‌تواند به افزایش‌های شتاب‌دار منجر شود. این نتیجه از منظر مدیریت ریسک بسیار تعیین‌کننده است، زیرا موج‌های گرمای طولانی، حتی اگر تعداد رخدادهایشان کمتر باشد، می‌تواند فشار تجمعی بیشتری بر سلامت عمومی، بهره‌وری نیروی کار، تقاضای برق و پایداری منابع آب ایجاد کنند. در تفکیک ناحیه‌ای، تفاوت‌های شمال، مرکز و جنوب آشکار است. مناطق شمالی و مرکزی از نظر شدت افزایش حساس‌تر به گرمایش آینده هستند و در مسیرهای انتشار بالاتر، رشد شدت در آن‌ها برجسته‌تر می‌شود. در مقابل، ناحیه جنوبی اگرچه از نظر مطلق گرم‌تر است، اما افزایش نسبی شدت در آن کمتر مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از نزدیک بودن شرایط فعلی به آستانه‌های بالای دمایی و محدودیت‌های فیزیکی-آماری در رشد نسبی شاخص‌ها باشد. از نظر مدت یا تعداد روزهای موج گرما، افزایش‌ها در هر سه ناحیه قابل توجه است، اما ناحیه مرکزی بیشترین جهش را نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که در مسیر انتشار بالا، موج‌های گرما می‌توانند از رخداد‌های چندروزه به پدیده‌های چند هفته‌ای تبدیل شوند. همگرایی سناریوها در ابتدای دوره و واگرایی آن‌ها در نیمه دوم دوره نیز بیانگر آن است که اثر انتخاب مسیر انتشار با گذر زمان برجسته‌تر می‌شود و تصمیمات کاهش انتشار و سازگاری می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در مهار ریسک‌های آتی داشته باشد. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد خاورمیانه در دوره ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۵ با افزایش معنادار تنش حرارتی تابستانه مواجه خواهد شد؛ افزایش‌هایی که صرفاً به بیشتر شدن تعداد رخدادها محدود نمی‌شود، بلکه در سناریوهای گرم‌تر می‌تواند به تغییر ماهیت موج‌های گرما به رخداد‌های طولانی‌تر و شدیدتر منجر شود. از این رو، برنامه‌ریزی سازگاری باید همزمان بر سه مؤلفه «فراوانی، مدت و شدت» تمرکز کند و به تفاوت‌های مکانی بین زیربخش‌ها توجه ویژه داشته باشد. همچنین با توجه به عملکرد ضعیف‌تر مدل‌ها در زمستان و حساسیت نواحی پیچیده توپوگرافی و مرزهای خشکی - دریا، استفاده از راهبردهای تصحیح اریبی فصلی و ارزیابی عدم قطعیت باید به عنوان جزء جدایی‌ناپذیر تحلیل‌ها و کاربردهای سیاستی در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد عملکرد مدل‌های CMIP6 در برآورد دما فصلی است؛ تابستان و پاییز قابل اعتمادترند، اما زمستان بیشترین اریبی و RMSE را دارد و تصحیح اریبی/کالیبراسیون فصلی به‌ویژه برای زمستان ضروری است. از نظر مکانی، خطاها عمدتاً در مناطق کوهستانی و گذار خشکی - دریا متمرکز بوده و در نواحی داخلی عملکرد مدل‌ها پایدارتر است. همچنین گرمایش آینده فقط به افزایش بیشینه‌ها محدود نیست و افزایش دماهای کمینه (شب‌ها) سیگنال مهمی در منطقه محسوب می‌شود. شاخص‌های موج گرما نشان می‌دهد ریسک حرارتی در همه سناریوها افزایش می‌یابد، اما شدت و الگوی تغییرات به مکان و سناریو وابسته و گاه غیرخطی است. شدت موج گرما بیشتر در شمال و مرکز افزایش می‌یابد، در حالی که تداوم/تعداد روزهای موج گرما افزایش برجسته‌تری دارد، به خصوص در بخش مرکزی که می‌تواند به دوره‌های چند هفته‌ای نزدیک شود. در مجموع، خاورمیانه با تغییر رژیم موج‌های گرما (شدیدتر و ماندگارتر شدن) روبه‌روست؛ بنابراین سازگاری باید هم‌زمان بر مدیریت شدت و تداوم تمرکز کند و تفاوت‌های زیرناحیه‌ای را در برنامه‌ریزی سلامت، انرژی، آب و زیرساخت لحاظ کند.

واژگان کلیدی: امواج گرمایی، مدل‌های اقلیمی CMIP6، سناریوهای SSP، ERA5-Land، خاورمیانه.

مقدمه

تغییر اقلیم به عنوان یکی از پیچیده‌ترین و فراگیرترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن حاضر، الگوهای پایدار اقلیمی را در سراسر کره زمین دگرگون ساخته است. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی، دمای میانگین سطح زمین را به‌طور بی‌سابقه‌ای افزایش داده و به دنبال آن، تناوب، شدت و تداوم رویدادهای حدی آب‌وهوایی را به‌طور چشمگیری تشدید کرده است (IPCC, 2021; Seneviratne et al, 2021). در میان این رویدادهای حدی، امواج گرمایی به‌عنوان دوره‌های تداوم‌یافته با دمای بالا، از مرگ‌بارترین و پرهزینه‌ترین بلایای اقلیمی محسوب می‌شوند که اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر سلامت عمومی، تاب‌آوری اکوسیستم‌ها، امنیت غذایی، ثبات اقتصادی و بهره‌وری انرژی بر جای می‌گذارند (Perkins-Kirkpatrick, 2015; Baldi et al, 2004; Kovats and Hajat, 2008; D'Ippoliti et al, 2009; Astrom et al, 2011). شواهد علمی نشان می‌دهد که شدت و فراوانی امواج گرمایی در چند دهه اخیر با شتاب نگران‌کننده‌ای افزایش یافته و رکوردهای دمایی در مقیاس‌های زمانی و مکانی بی‌سابقه‌ای شکسته شده‌اند (Coumou and Rahmstorf, 2012; Min et al, 2012; IPCC, 2012). منطقه خاورمیانه، با توجه به موقعیت جغرافیایی خاص، اقلیم غالباً خشک و نیمه‌خشک، تراکم جمعیتی رو به رشد و وابستگی شدید به منابع آب محدود، در زمره حساسترین و آسیب‌پذیرترین مناطق جهان در برابر گرمایش جهانی جای دارد. (Diffenbaugh and Giorgi, 2012). مطالعات اقلیمی اخیر حاکی از آن است که نرخ گرمایش در این منطقه در دهه‌های گذشته به‌طور معناداری از میانگین جهانی پیشی گرفته و تکرار و شدت رویدادهای گرمایی حدی در آن روندی صعودی و نگران‌کننده داشته است (Zittis et al, 2021). این تغییرات پیامدهای گسترده‌ای بر سلامت انسان، امنیت انرژی و پایداری زیست‌محیطی منطقه دارد (Almazroui et al, 2021). حتی پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که تحت سناریوهای بدبینانه (SSP5-8.5)، بخش‌های وسیعی از خاورمیانه ممکن است تا پایان قرن حاضر با امواج گرمایی فراتر از آستانه تحمل فیزیولوژیک انسان مواجه شوند که تهدیدی جدی برای زیست‌پذیری و پایداری سکونتگاه‌ها به شمار می‌رود (Pal and Eltahir, 2016). در این میان، مدل‌سازی اقلیمی

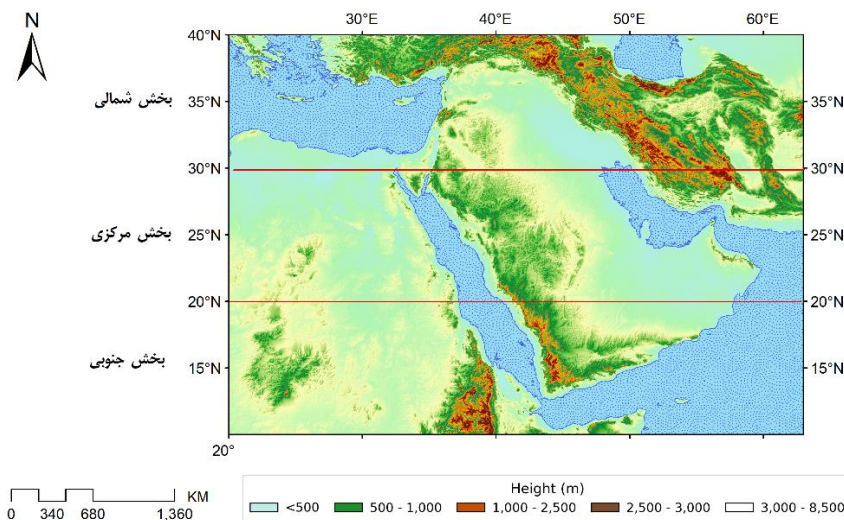
به‌عنوان ابزاری بنیادین برای درک، ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات آتی، نقش محوری ایفا می‌کند. پروژه مقایسه مدل‌های اقلیمی فاز ششم (CMIP6)، با معرفی سناریوهای مسیرهای اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSPs)، ارتقای قابل‌توجهی در شبیه‌سازی فرآیندهای فیزیکی جو، بازخوردهای اقلیمی و وضوح مکانی ارائه داده است (O'Neill et al, 2016) و به‌عنوان جامع‌ترین چارچوب برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی بلندمدت و تحلیل عدم قطعیت‌ها شناخته می‌شود (Eyring et al, 2016). این مدل‌ها امکان بررسی کمی و کیفی ویژگی‌های امواج گرمایی (شامل شدت، فراوانی، تداوم و گستره مکانی) را در افق‌های زمانی آینده و تحت سناریوهای مختلف انتشار فراهم می‌سازند. با وجود مطالعات متعدد در مقیاس جهانی و برخی بررسی‌های منطقه‌ای، شکاف پژوهشی معناداری در زمینه تحلیل یکپارچه و آینده‌نگر امواج گرمایی در مقیاس کلان منطقه خاورمیانه با به‌کارگیری خروجی‌های نسل ششم مدل‌های اقلیمی (CMIP6) و سناریوهای SSP مشهود است. امروزه مطالعات متعددی در خصوص رخدادهای حدی اقلیمی از جمله امواج گرمایی در مقیاس منطقه‌ای انجام شده است، اما اغلب پژوهش‌های پیشین بر تحلیل داده‌های تاریخی یا مطالعات موردی در مقیاس استانی یا محلی متمرکز بوده‌اند. به‌عنوان مثال، بهاروندی و همکاران (Baharvandi et al, 1399) با تحلیل تغییرات زمانی و مکانی امواج گرمایی شناسایی شده بر اساس دمای بیشینه روزانه ۴۴ ایستگاه هواشناسی طی دوره ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۵، نشان دادند که بیشترین تکرار این موج‌ها در غرب رشته‌کوه زاگرس متمرکز است. حسینی و خرم‌آبادی (Hosseini and Khorramabadi, 1402) به پیش‌نگری امواج گرمایی مخاطره‌آمیز در آذربایجان شرقی با مدل‌سازی گزارش ششم تغییر اقلیم پرداختند و نشان دادند که با کاهش عرض جغرافیایی در این استان و همجواری با مناطق پست و کم‌ارتفاع، بسامد و شدت رخداد امواج گرمایی افزایش می‌یابد. حسین‌پور و همکاران (Hosseinpour et al, 1402) در یک مطالعه آماری به تبیین فراوانی، توزیع زمانی و استمرار امواج گرمایی در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی پرداختند و نتایج آن‌ها حاکی از افزایش رخداد امواج گرمایی در دوره سرد سال بود، در حالی که در سایر فصول روند معناداری مشاهده نشد.

منطقه خاورمیانه، به‌ویژه در افق‌های زمانی نزدیک و تحت سناریوهای مختلف SSP، وجود دارد که هدف اصلی این پژوهش، پرکردن این خلأ علمی است.

منطقه‌ی مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش خاورمیانه است؛ منطقه‌ای که در دهه‌های اخیر به‌طور فزاینده‌ای به یکی از کانون‌های اصلی بروز امواج گرمایی شدید و پایدار در مقیاس جهانی تبدیل شده است. این ناحیه با ثبت دماهای بسیار بالا، به‌ویژه در فصل تابستان، شناخته می‌شود و روند افزایشی دماهای حدی در آن به‌طور گسترده در مطالعات اخیر گزارش شده است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای افزایش دقت در تحلیل‌های مکانی و شناسایی ناهمگنی‌های اقلیمی در منطقه مورد مطالعه، خاورمیانه بر اساس ویژگی‌های جغرافیایی - اقلیمی و گرادیان‌های دمایی به سه زیربخش شمالی، مرکزی و جنوبی تقسیم‌بندی شد. این تفکیک امکان می‌دهد تغییرات شاخص‌های دما و موج‌های گرما (مانند شدت، تداوم و فراوانی) به صورت ناحیه‌ای بررسی شده و تفاوت‌های پاسخ هر بخش به سناریوهای مختلف انتشار با وضوح بیشتری آشکار شود. محدوده مکانی این سه زیربخش و مرزهای تفکیک آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

صلاحی و همکاران (Salahi et al, 1403) نیز به الگویابی و تحلیل هم‌مدیدی امواج گرمایی استان اردبیل پرداختند. در سطح بین‌المللی، پرکینز و الکساندر (Perkins and Alexander, 2013) با تحلیل شاخص‌های حدی دما نشان دادند که افزایش معناداری در فراوانی و شدت امواج گرمایی در بسیاری از مناطق جهان رخ داده است. همچنین پرکینز (Perkins, 2015) بر اهمیت انتخاب شاخص‌های مناسب برای تحلیل امواج گرمایی و مقایسه نتایج مدل‌های اقلیمی تأکید کرد. کومو و رامستورف (Coumou and Rahmstorf, 2012) نشان دادند که افزایش رخداد‌های حدی گرما ارتباط مستقیمی با گرمایش جهانی دارد و احتمال وقوع امواج گرمایی شدید در دهه‌های اخیر به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. کنوتی و همکاران (Knutti et al, 2017) نیز نقش استفاده از مجموعه‌های چندمدلی را در کاهش عدم قطعیت‌های پیش‌بینی‌های اقلیمی برجسته کردند. در منطقه خاورمیانه، پال و الطاهر (Pal and Eltahir, 2016) نشان دادند که در برخی نواحی جنوب غرب آسیا، دماهای آینده ممکن است از آستانه تحمل فیزیولوژیکی انسان فراتر رود. زیتیس و همکاران (Zittis et al, 2021) نیز با بررسی رخداد‌های حدی اقلیمی در این منطقه، افزایش قابل توجه امواج گرمایی و تشدید شرایط گرمایی افراطی را گزارش کردند. با وجود این، همچنان خلأ پژوهشی در خصوص تحلیل جامع، مکانی‌شده و آینده‌نگر امواج گرمایی در کل



شکل ۱: نمای کلی منطقه مورد مطالعه به همراه توپوگرافی سطح زمین و محدوده بخش‌های شمالی، جنوبی و مرکزی در نظر گرفته شده
 Fig. 1: Overview of the study area, including surface topography and the boundaries of the northern, southern, and central sub-regions considered.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور تحلیل شرایط اقلیمی گذشته و شبیه‌سازی تغییرات آینده امواج گرمایی، از ترکیب داده‌های بازتحلیل و خروجی مدل‌های اقلیمی با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه استفاده شد. داده‌های بازتحلیل شامل دمای بیشینه روزانه استخراج شده از مجموعه داده ERA5 برای دوره مرجع ۱۹۸۵-۲۰۱۴ است. مجموعه داده ERA5 به دلیل پوشش زمانی پیوسته، تفکیک مکانی بالا و دقت مناسب در بازنمایی متغیرهای دمایی، به‌طور گسترده در مطالعات اقلیم‌شناسی و تحلیل رخداد‌های حدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر داده‌های ERA5، از آخرین نسخه داده‌های پیش‌آگاهی (پروجکشن) روزانه کاهش‌مقیاس‌یافته مدل‌های CMIP6 تولیدشده در چارچوب NEX-GDDP¹ استفاده شده است. این محصولات کاهش‌مقیاس‌یافته با بهره‌گیری از نسخه روزانه روش ماهانه تصحیح اریب/تفکیک مکانی (BCSD²) تولید شده و دارای تفکیک‌پذیری افقی ۰/۲۵ درجه هستند. در این مطالعه از خروجی سه مدل اقلیمی منتخب از پروژه CMIP6 (جدول ۱)، برای دوره مرجع (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و همچنین دوره آینده ۲۰۲۶-

۲۰۵۵ تحت سه سناریوی خوش‌بینانه SSP126، سناریوی میانه SSP245 و سناریوی بدبینانه SSP585 مورد استفاده قرار گرفت. استفاده از داده‌های بازتحلیل و پیش‌آگاهی‌های اقلیمی با تفکیک مکانی یکسان (۰/۲۵ درجه)، امکان مقایسه مستقیم و منسجم میان این دو مجموعه داده را فراهم می‌سازد. پیش از محاسبه شاخص‌های دمایی و موج گرما، تمامی داده‌ها تحت مراحل پیش‌پردازش قرار گرفتند. این مراحل شامل کنترل کیفیت داده‌ها، بررسی و مدیریت داده‌های مفقود، یکسان‌سازی تقویم زمانی (حذف روز کبیسه برای هم‌ترازسازی روزهای سال)، بود. این اقدامات با هدف افزایش همگنی داده‌ها و بهبود قابلیت مقایسه میان داده‌های بازتحلیل و خروجی مدل‌ها انجام شد. به‌منظور بررسی توانمندی مدل‌های اقلیمی در بازنمایی شرایط دمایی دوره مرجع، خروجی مدل‌ها با داده‌های ERA5 مقایسه شدند. برای این منظور از شاخص‌های آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، اریبی (Bias) و ضریب همبستگی پیرسون (R) استفاده شد. این ارزیابی امکان تحلیل عدم قطعیت‌ها و افزایش اطمینان به نتایج شبیه‌سازی‌های آینده را فراهم می‌کند.

جدول ۱: مدل‌های CMIP6 مورد استفاده به همراه مشخصات آنها

Table 1: CMIP6 models used in this study and their specifications.

نام مدل	تفکیک افقی (جو/درجه)	تفکیک افقی اقیانوس (بر حسب درجه)	تعداد تراز قائم جو (اقیانوس)	موسسه
GFDL-ESM4	0.938×0.938	0.5×0.5	49 (75)	اداره ملی اقیانوسی و جوی، آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی آمریکا ^۴
MRI-ESM2-0	1.08×1.08	0.5×0.5	80 (60)	موسسه تحقیقات هواشناسی ژاپن
ACCESS-CM2	1.25×1.25	1×1	85 (50)	سازمان تحقیقات علمی و صنعتی مشترک المنافع استرالیا

بنابراین، برای یک روز مشخص d، آستانه نودمین صدک از مجموعه داده A_d است که به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

رابطه)

$$A_d = U_{y=1991}^{2020} U_{i=d-15}^{d+15} T_{y,i}$$

که در آن U نشان‌دهنده مجموعه داده‌ها و T_(y,i) دمای بیشینه روز i در سال y است. آستانه به صورت روز به روز تقویمی و بر اساس توزیع دمای بیشینه دوره پایه محاسبه شد تا تغییرات فصلی دما در طول سال لحاظ شود. این تعریف با چارچوب‌های استاندارد ارائه‌شده توسط گروه

در این مطالعه تعیین شاخص شدت موج گرما، بر اساس روش تعریف شده به وسیله روسو و همکاران (Russo et al, 2014) در نظر گرفته شده است. در این روش شاخص شدت موج گرما، به‌عنوان حداکثر شدت موج‌های گرما در یک سال تعریف می‌شود، جایی که موج گرما به دوره‌ای اطلاق می‌شود که ۳ روز متوالی یا بیشتر، دمای بیشینه بالاتر از آستانه روزانه برای دوره مرجع 1985-2014 باشد. آستانه به عنوان نودمین صدک از دماهای بیشینه روزانه دوره مرجع تعریف می‌شود که بر اساس یک بازه ۳۱ روزه متمرکز (۱۵ روز قبل و ۱۵ روز بعد از روز مشخص) است.

تخصصی تشخیص تغییر اقلیم و شاخص‌ها (ETCCDI⁵) و مطالعات پیشین همخوانی دارد. جدول ۲ خلاصه از برنامه جهانی پژوهش‌های اقلیم سازمان هواشناسی جهانی شاخص‌های بررسی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۲: خلاصه شاخص‌های مورد استفاده در تحلیل امواج گرمایی

Table 2: Summary of the indices used in the heatwave analysis.

نام شاخص	نام مخفف	رفرنس	توضیحات
روزهای بسیار گرم	TX90p	Alexander et al, 2006; Zhang et al, 2005	تعداد روزهای با دمای بیشینه بالاتر از صدک ۹۰
فراوانی موج گرما	HWF	Perkins and Alexander, 2013	تعداد کل روزهای درگیر موج گرما
تداوم موج گرما	HWD	Fischer and Schär, 2010	طولانی‌ترین موج گرما (روز)
شدت موج گرما	HWA	Meehl and Tebaldi, 2004; Russo et al, 2015	بیشینه دمای ثبت شده در موج گرما (°C)

بحث و نتایج

می‌کند که دلالت بر بازتولید مناسب تغییرات دما در این فصل دارد؛ در مجموع، این الگو نشان می‌دهد اتکاپذیری خروجی مدل‌ها برای کاربردهای مرتبط با دما در فصل تابستان و پاییز بالاتر است، در حالی که برای زمستان به کارگیری راهبردهای کالیبراسیون و تصحیح اریبی فصلی ضرورت بیشتری دارد. با توجه به شرایط اقلیمی کشور، در تابستان و تا اواسط پاییز، استقرار سامانه پرفشار جنب حاره ای بر روی بخش‌های وسیعی از کشور موجب ایجاد پایداری نسبی از نظر دینامیکی می‌شود. در این شرایط، تغییرات دما عمدتاً ناشی از انرژی تابشی خورشید در طول روز و سرمایه‌های شبانه زمین است که چرخه‌های تقریباً شبانه‌روزی و پایدار در بلندمدت دارد. بنابراین، عملکرد مدل‌ها در این بازه‌ها از دقت بیشتری برخوردار است. اما در زمستان و بهار، به دلیل عبور چرخندهای دینامیکی و وقوع فرآیندهای مرتبط با بارش و تغییرات دما - به‌ویژه در مناطق کوهستانی پیچیده و نیز به سبب وابستگی این تغییرات به فرآیندهای محلی و همرفت دما از مناطق گوناگون، شرایط بسیار پیچیده‌تر می‌شود. در نتیجه، دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی این فرآیندها کاهش می‌یابد.

جدول ۳ ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در تخمین دما با استفاده از شاخص‌های اریبی، ریشه میانگین مربعات خطا و همبستگی را برای فصول مختلف سال نشان می‌دهد. بر اساس نتایج جدول، عملکرد مدل‌های CMIP6 در بازتولید دما به‌طور معناداری تابع فصل است، به‌گونه‌ای که در تابستان کمترین خطای سیستماتیک و تصادفی همزمان با بیشترین همبستگی مشاهده می‌شود. مقادیر اریبی، ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی به ترتیب ۰/۲۳، ۰/۱۵۷ و ۰/۹۶ بدست آمد که حاکی از بازنمایی بسیار مناسب هم مقدار دما و هم تغییرپذیری آن در این فصل است. در حالی که زمستان ضعیف‌ترین عملکرد را نشان می‌دهد و بیانگر بروز هم‌زمان انحراف سیستماتیک قابل توجه، خطای کلی بزرگ و افت محسوس در توان بازتولید نوسانات دماست. فصل بهار با همبستگی متوسط (اریبی، میانگین مربعات خطا و همبستگی به ترتیب، ۰/۴۷، ۰/۹۶ و ۰/۶۲) نشان‌دهنده بهبود نسبت به فصل زمستان است. در مقابل فصل پاییز با وجود میانگین مربعات خطا نسبتاً متوسط (۱/۱۵) و همبستگی بسیار بالا (۰/۹۷) را ثبت

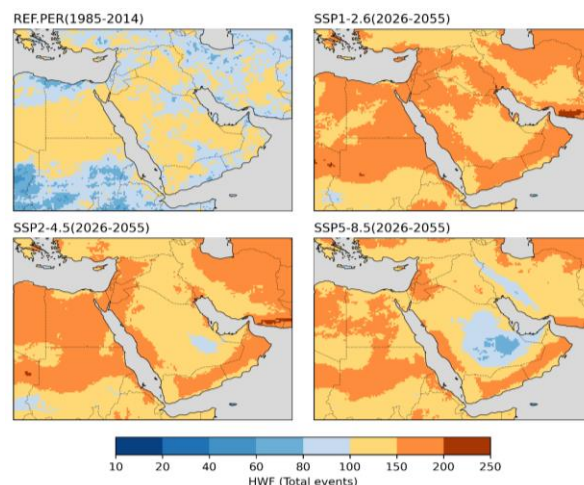
جدول ۳: ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در تخمین دما با استفاده از شاخص‌های اریبی (Bias)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و همبستگی (Correlation) برای فصول مختلف سال

Table 3: Evaluation of the performance of CMIP6 models in estimating temperature using the bias (Bias), root mean square error (RMSE), and correlation (Correlation) indices for different seasons of the year.

Bias	RMSE	Correlation	فصل
1.67	2.23	0.48	Winter
0.96	1.46	0.62	Spring
0.23	0.57	0.96	Summer
0.64	1.15	0.97	Fall

ترکیه، مقادیر نسبتاً پایین تری را حفظ می کنند. این الگو بیانگر آن است که در مسیر انتشار میانی، افزایش فراوانی موج های گرمایی به صورت منطقه ای و وابسته به شرایط اقلیمی محلی رخ می دهد و هنوز به یک الگوی کاملاً فراگیر در کل دامنه مکانی مطالعه تبدیل نشده است. در مقابل، سناریوی SSP5-8.5 برخلاف انتظار، کاهش نسبی مقادیر HWF را نسبت به SSP2-4.5 در بخش هایی از منطقه نشان می دهد. مطابق با نقشه، اگرچه HWF همچنان نسبت به دوره مرجع در سطح بالاتری قرار دارد، اما شدت و گستره فضایی مقادیر بسیار بالا در SSP5-8.5 محدودتر شده و در برخی نواحی داخلی، به ویژه بخش هایی از شبه جزیره عربستان و ایران، کاهش نسبی فراوانی موج های گرمایی نسبت به سناریوی انتشار میانی مشاهده می شود. این رفتار نشان می دهد که افزایش بیشتر دما الزاماً به افزایش خطی فراوانی موج های گرمایی منجر نمی شود. کاهش نسبی HWF در سناریوی SSP5-8.5 می تواند ناشی از تغییر در ساختار زمانی موج های گرمایی باشد؛ به طوری که در شرایط گرمایش شدید، به جای افزایش تعداد رخدادها، موج های گرمایی طولانی تر و پایدارتر شکل می گیرند و در نتیجه، تعداد رویدادها (فراوانی) کاهش می یابد. بنابراین، در این سناریو، گرمایش شدیدتر احتمالاً به ادغام رخدادهای حرارتی و افزایش مدت و شدت موج ها، نه افزایش تعداد آن ها، منجر شده است.

شکل ۲، توزیع مکانی میانگین فضایی فراوانی موج گرما را در فصل تابستان برای دوره مرجع ۲۰۱۴-۱۹۸۵ و دوره آینده ۲۰۲۶-۲۰۵۵ تحت سه سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در منطقه خاورمیانه نشان می دهد. در دوره مرجع، فراوانی امواج گرمایی در سراسر منطقه نسبتاً پایین بوده و اغلب نواحی با فراوانی محدود موج های گرمایی مشخص می شوند. با ورود به دوره آینده تحت سناریوی خوشبینانه، افزایش قابل توجهی در فراوانی موج های گرمایی در کل منطقه مشاهده می شود. اگرچه این سناریو خوشبینانه است، اما همچنان بخش های وسیعی از خاورمیانه، به ویژه مناطق داخلی و بیابانی شبه جزیره عربستان، عراق، جنوب و بخش های شمالی ایران، با افزایش چشمگیر تعداد روزهای تحت موج گرما مواجه می شوند. این امر نشان می دهد که حتی در خوش بینانه ترین سناریوی اقلیمی نیز، تشدید موج های گرمایی در فصل تابستان اجتناب ناپذیر است. در سناریوی SSP2-(۲۰۲۶-۲۰۵۵) شاخص HWF نسبت به دوره مرجع افزایش محسوسی را در بخش عمده ای از منطقه نشان می دهد، با این حال الگوی فضایی آن همچنان ناهمگن باقی می ماند. بیشینه های HWF عمدتاً در نواحی شمال شرق و نیمه غربی منطقه، به ویژه بخش هایی از مصر، سودان و مناطقی از ایران مشاهده می شود، در حالی که برخی نواحی ساحلی و شمالی، از جمله بخش هایی از شرق مدیترانه و شمال

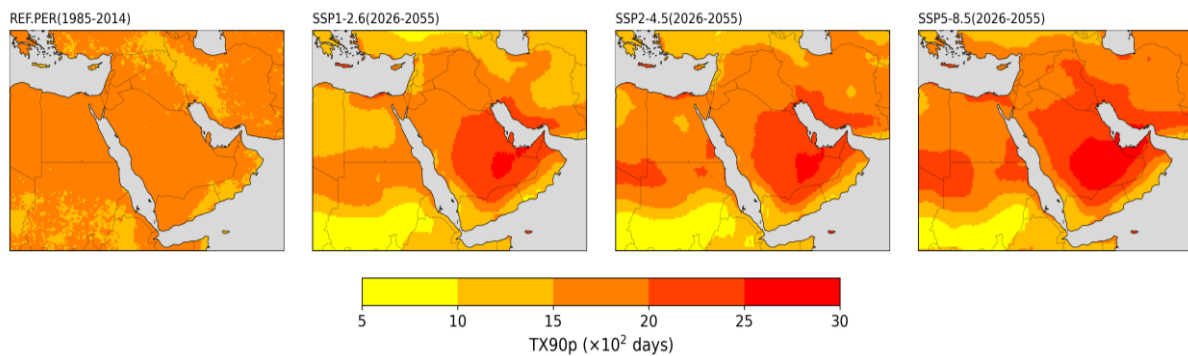


شکل ۲: نقشه میانگین فضایی فراوانی موج گرما (HWF) در فصل تابستان (JJA) برای دوره مرجع و دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵، بر حسب تعداد رخداد در سال.

Fig. 2: Map of the spatial mean summer (JJA) heatwave frequency (HWF) for the reference period and the 2026–2055 period, expressed as the number of events per year.

و بخش وسیع‌تری از منطقه تحت تأثیر فراوانی بالاتر روزهای بسیار گرم قرار می‌گیرد. بیشینه‌ها عمدتاً در نواحی داخلی و گرم‌خشک متمرکز بوده و بیانگر تشدید تنش حرارتی تابستانه در این مناطق است. در سناریوی SSP5-8.5، فراوانی روزهای خیلی گرم در سطحی بالا باقی می‌ماند، اما افزایش آن نسبت به SSP2-4.5 در برخی نواحی محدودتر است. این رفتار نشان می‌دهد که در سناریو بدبینانه، افزایش بیشتر دما لزوماً به افزایش متناسب تعداد روزهای فراتر از آستانه صدک ۹۰ منجر نمی‌شود. به‌طور کلی، مقایسه دوره مرجع با سناریوهای آینده نشان می‌دهد که فراوانی روزهای بسیار گرم در فصل تابستان در خاورمیانه به‌طور معناداری افزایش می‌یابد، هرچند شدت و الگوی این افزایش به سناریوی انتشار وابسته بوده و ناهمگنی فضایی قابل توجهی را حفظ می‌کند.

شکل ۳ نقشه میانگین روزهای خیلی گرم در فصل تابستان نشان داده شده است. در دوره مرجع ۲۰۱۴-۱۹۸۵، روزهای خیلی گرم در فصل تابستان در سراسر منطقه خاورمیانه مقادیر نسبتاً پایین و با تغییرات فضایی محدود را نشان می‌دهد که بیانگر فراوانی کم روزهای با دمای بیشینه فراتر از صدک ۹۰ در اقلیم پایه است. در سناریوی (۲۰۲۶-۲۰۵۵) SSP1-2.6، افزایش قابل توجهی در مقادیر این شاخص در بخش عمده‌ای از منطقه مشاهده می‌شود، به‌طوری که نواحی داخلی، به‌ویژه شبه‌جزیره عربستان، ایران و عراق، با افزایش فراوانی روزهای بسیار گرم مشخص می‌شوند. با وجود این افزایش، الگوی فضایی همچنان ناهمگن باقی مانده و برخی مناطق ساحلی مقادیر پایین‌تری را نسبت به نواحی داخلی نشان می‌دهند. در سناریوی SSP2-4.5، شدت و گستره فضایی مقادیر بالای TX90p نسبت به SSP1-2.6 افزایش بیشتری پیدا می‌کند.



شکل ۳: نقشه میانگین روزهای خیلی گرم در فصل تابستان برای دوره مرجع و دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵، بر حسب روز در سال.

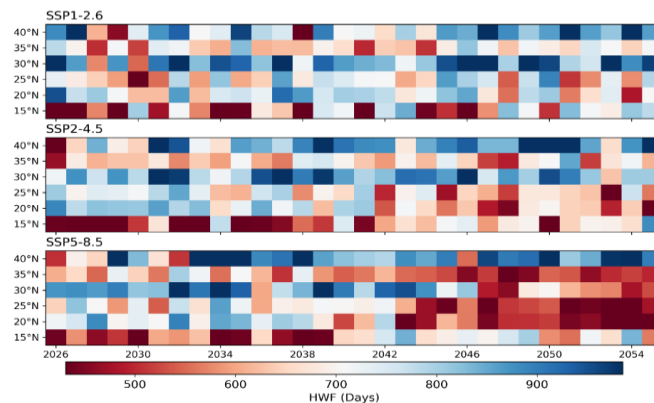
Fig. 3: Map of the spatial mean number of very hot days in summer (JJA) for the reference period and the 2026-2055 period, expressed as days per year.

برخی سال‌ها افزایش‌های مقطعی در عرض‌های میانی و شمالی دیده می‌شود، اما الگوی منسجم افزایشی در طول زمان شکل نمی‌گیرد. همچنین، عرض‌های جنوبی (حدود ۱۵° تا ۲۰° شمالی) اغلب با مقادیر پایین‌تر HWF مشخص می‌شوند که نشان‌دهنده فراوانی کمتر رخدادهای موج گرما در این سناریو است. در سناریوی SSP2-4.5، افزایش محسوسی در فراوانی موج‌های گرما در اغلب عرض‌های جغرافیایی مشاهده می‌شود. الگوی زمانی نشان می‌دهد که HWF در عرض‌های میانی و شمالی (حدود ۲۵° تا ۴۰° شمالی) به‌طور پایدارتر و با دامنه نوسان کمتر در مقادیر بالا باقی می‌ماند. در این سناریو، تفاوت عرضی واضح‌تر شده و فراوانی موج‌های گرما در عرض‌های بالاتر نسبت به

شکل ۴ نقشه میانگین روزهای خیلی گرم در فصل تابستان برای دوره مرجع و دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵، بر حسب روز در سال. تغییرات فراوانی موج‌های گرما را در فصل تابستان به‌صورت تابعی از زمان (۲۰۲۶ تا ۲۰۵۵) و عرض جغرافیایی (۱۵° تا ۴۰° شمالی) و طول جغرافیایی (۶۳° شرقی) برای سه سناریوی انتشار در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. الگوی رنگی بیانگر تعداد روزهای تحت موج گرما بوده و امکان بررسی هم‌زمان تغییرات زمانی-عرضی و طولی سناریومحور را فراهم می‌کند. در سناریوی SSP1-2.6، مقادیر HWF به‌طور کلی در سطح پایین‌تری نسبت به سایر سناریوها قرار دارد و نوسانات زمانی قابل توجهی در تمامی عرض‌ها مشاهده می‌شود. در این سناریو، گرچه در

فراوانی موج‌های گرما به گرمایش شدید غیرخطی است و افزایش بیشتر دما الزاماً به افزایش مداوم تعداد موج‌های گرما منجر نمی‌شود. در این سناریو، عرض‌های جنوبی همچنان مقادیر پایین‌تری از HWF را نسبت به عرض‌های شمالی حفظ می‌کنند و تمرکز تنش حرارتی احتمالاً از افزایش تعداد رخدادها به سمت افزایش مدت و شدت موج‌های گرما تغییر می‌یابد.

عرض‌های جنوبی افزایش بیشتری را تجربه می‌کند که بیانگر حساسیت بالاتر مناطق شمالی‌تر به گرمایش در مسیر انتشار میانی است. در سناریوی SSP5-8.5، رفتار HWF تغییر کیفی مشخصی را نشان می‌دهد. در سال‌های ابتدایی دوره، مقادیر HWF در برخی عرض‌ها افزایش می‌یابد، اما در ادامه، به‌ویژه از حدود دهه ۲۰۴۰ به بعد، کاهش نسبی یا نوسانات شدید در عرض‌های میانی و جنوبی مشاهده می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که پاسخ



شکل ۴: تغییرات زمانی عرضی فراوانی موج گرما (HWF) در فصل تابستان طی دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵ تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

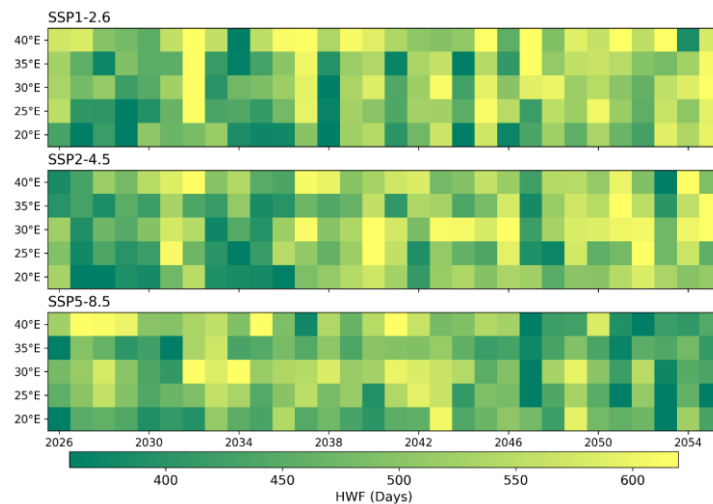
Fig. 4: Latitudinal temporal variations of summer (JJA) heatwave frequency (HWF) during 2026–2055 under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios.

جغرافیایی محسوس‌تر می‌شود و علاوه بر بیشتر شدن فراوانی با مقادیر بالاتر، پایداری زمانی این افزایش‌ها نیز تقویت می‌گردد؛ به این معنا که در چندین مقطع زمانی، به‌ویژه در نیمه دوم دوره، بخش قابل توجهی از بخش‌های شرقی به‌طور همزمان در سطوح بالاتر HWF قرار می‌گیرند. با وجود این، ناهمگنی شرق - غربی همچنان پابرجاست و در برخی سال‌ها طول‌های مشخصی (معمولاً در یک بازه محدود طولی) افت یا مقادیر پایین‌تر نشان می‌دهند، اما در مجموع، نسبت به SSP1-2.6، الگوی طولی منسجم‌تر بوده و مقادیر بالای فراوانی امواج در گستره‌ی وسیع‌تری از طول جغرافیایی رخ می‌دهد. در سناریوی SSP5-8.5، رفتار HWF در راستای طول جغرافیایی کیفیت غیرخطی بارزتری پیدا می‌کند؛ بدین صورت که در کنار رخداد‌های با HWF بالا در این راستا، دوره‌هایی از افت نسبی یا نوسانات شدید نیز دیده می‌شود و بیشینه‌ها و کمینه‌ها در طول‌های مختلف به صورت متناوب جابه‌جا می‌شوند. در این سناریو، به جای آن‌که در راستای شرق به غرب به سمت

الگوی فراوانی موج گرما در راستای طول جغرافیایی (۲۰° تا ۴۰° شرقی)، نشان می‌دهد که تغییرات شرق-غربی موج‌های گرما وابسته به بازه‌های زمانی مشخص است و یک روند یکنواخت در تمام طول‌ها به‌صورت همزمان دیده نمی‌شود. در سناریوی SSP1-2.6، مقادیر HWF عموماً در دامنه‌ی پایین‌تر قرار می‌گیرد و نوسانات زمانی در در راستای شرق به غرب قابل مشاهده است؛ به‌طوری که در برخی سال‌ها افزایش‌های مقطعی به صورت ستون‌های روشن‌تر در بخش‌هایی از دامنه طولی ظاهر می‌شود، اما این افزایش‌ها غالباً کوتاه‌مدت بوده و از یک طول مشخص به طول دیگر جابه‌جا می‌شوند. در این سناریو، هرچند در بعضی سال‌ها بخش‌هایی از طول‌های میانی تا شرقی (حدود ۳۰° تا ۴۰°) مقادیر نسبتاً بالاتری را تجربه می‌کنند، ولی همزمانی مکانی گسترده در امتداد طول شکل نمی‌گیرد و الگو بیشتر بیانگر تغییرپذیری محلی و سال‌به‌سال است و یک تشدید پایدار در کل منطقه مشاهده نمی‌شود. در سناریوی SSP2-4.5، افزایش HWF در امتداد طول

بتوان از شکل‌گیری یک گرادیان ثابت شرق - غرب صحبت کرد. مجموع این شواهد نشان می‌دهد که در بعد طولی، با افزایش شدت سناریو، نقش فرآیندهای ناحیه‌ای و تغییرپذیری بین‌سالی پررنگ‌تر می‌شود و در SSP5-8.5 احتمالاً تمرکز مخاطره از «افزایش یکنواخت فراوانی» به سمت «تغییرات نامنظم‌تر و بالقوه همراه با افزایش شدت/ماندگاری رخدادها» سوق می‌یابد، به گونه‌ای که کانون‌های تنش حرارتی می‌توانند در طول‌های مختلف در زمان‌های متفاوت فعال شوند.

افزایش یکنواخت حرکت کنند، الگو بیشتر شبیه به تقویت‌های موضعی و گذرا است که در برخی سال‌ها بخش‌هایی از دامنه طولی را درگیر می‌کند و در سال‌های دیگر همان نواحی تضعیف می‌شود؛ بنابراین پاسخ HWF به گرمایش شدید در بعد طولی لزوماً به معنای افزایش دائمی و همزمان تعداد رخدادها در سراسر منطقه نیست. در عین حال، در بخش‌هایی از دوره به ویژه در سال‌های پایانی افزایش‌های مقطعی گسترده‌تری نسبت به SSP-1.6 مشاهده می‌شود، اما تداوم آن‌ها به اندازه‌ای نیست که



شکل ۵: تغییرات زمانی طولی فراوانی موج گرما (HWF) در فصل تابستان طی دوره ۲۰۲۶ - ۲۰۵۵ تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

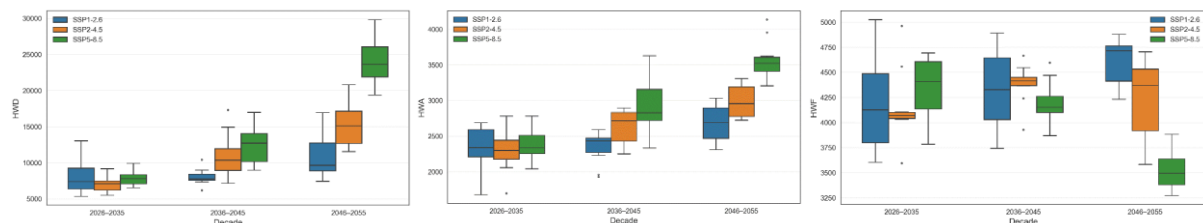
Fig. 5: Longitudinal temporal variations of summer (JJA) heatwave frequency (HWF) during 2026–2055 under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios.

نشان‌دهنده پاسخ غیرخطی شدت موج‌های گرما به گرمایش شدید است. در خصوص شاخص مدت موج گرما (HWD)، نتایج نشان می‌دهد که در دهه نخست (۲۰۲۶-۲۰۳۵) تفاوت بین سناریوها محدود بوده و مقادیر HWD در هر سه سناریو در بازه‌ای نسبتاً نزدیک به یکدیگر قرار دارند. در این بازه زمانی، سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مقادیر بالاتری نسبت به SSP1-2.6 نشان نمی‌دهند و توزیع مقادیر HWD در سه سناریو تا حد زیادی هم‌پوشانی دارد. با ورود به دهه میانی افزایش تدریجی HWD در تمامی سناریوها مشاهده می‌شود، اما شکاف بین سناریوها به تدریج آشکارتر می‌گردد. در این دهه، مقادیر میانه و دامنه توزیع HWD در SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌ویژه نسبت به SSP1-2.6 افزایش می‌یابد، هرچند این افزایش هنوز بسیار شدید نیست. در دهه پایانی تفاوت بین سناریوها کاملاً برجسته می‌شود و سناریوی

شکل ۶ نمودار جعبه‌ای سه شاخص HWF، HWD و HWA را در دهه‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که شدت موج‌های گرما در تمامی سناریوها با گذر زمان افزایش می‌یابد، اما الگوی این افزایش به سناریوی انتشار وابسته است. در دهه نخست (۲۰۲۶-۲۰۳۵)، تفاوت بین سناریوها محدود بوده و مقادیر میانه HWA در بازه‌ای نسبتاً نزدیک به یکدیگر قرار دارند. با این حال، از دهه میانی (۲۰۳۶-۲۰۴۵) به بعد، شکاف بین سناریوها آشکارتر می‌شود. در این بازه، سناریوی SSP2-4.5 بیشترین افزایش در میانه و گستره توزیع HWA را نشان می‌دهد، به طوری که مقادیر شدت موج گرما نسبت به SSP1-2.6 به‌طور محسوسی بالاتر است. در دهه پایانی (۲۰۴۶-۲۰۵۵)، اگرچه SSP5-8.5 همچنان مقادیر بالایی از HWA را حفظ می‌کند، اما نسبت به SSP2-4.5 در برخی موارد، کاهش نسبی در میانه توزیع مشاهده می‌شود. این رفتار

و در دهه میانی مقادیر HWF در سناریوی SSP2-4.5 به تدریج افزایش می‌یابد و شکاف آن با SSP1-2.6 و SSP5-8.5 کاهش پیدا می‌کند. در این بازه، توزیع مقادیر HWF در SSP2-4.5 گسترش یافته و میانه آن به مقادیر بالاتری منتقل می‌شود، در حالی که در سناریوی SSP5-8.5 نشانه‌هایی از کاهش یا تثبیت فراوانی موج‌های گرما مشاهده می‌شود. در دهه پایانی این روند به‌طور واضح‌تر نمایان می‌شود؛ به‌گونه‌ای که سناریوی SSP2-4.5 بیشترین میانه مقادیر HWF را در میان سناریوها نشان می‌دهد، در حالی که سناریوی SSP5-8.5 کاهش نسبی در فراوانی موج‌های گرما را تجربه می‌کند، هرچند مقادیر آن همچنان در بسیاری از موارد بالاتر از SSP1-2.6 باقی می‌ماند. این رفتار متضاد نشان می‌دهد که پاسخ فراوانی موج‌های گرما به تشدید گرمایش غیرخطی و وابسته به زمان است.

SSP5-8.5 بیشترین افزایش در میانه و گستره توزیع HWD را نشان می‌دهد. در این بازه، موج‌های گرمایی در این سناریو به‌طور قابل‌توجهی طولانی‌تر و پایدارتر می‌شوند، در حالی که SSP2-4.5 افزایش متوسط‌تری را تجربه کرده و SSP1-2.6 همچنان کمترین مقادیر HWD را حفظ می‌کند. این الگو بیانگر آن است که افزایش مدت موج‌های گرما عمدتاً در دهه‌های پایانی تشدید می‌شود. شاخص فراوانی موج گرما (HWF) الگوی زمانی و سناریومحور متفاوتی نسبت به شاخص‌های شدت و مدت نشان می‌دهد. در دهه نخست مقادیر HWF در سناریوی SSP2-4.5 نسبتاً پایین‌تر بوده و میانه و دامنه توزیع آن در سطحی محدود قرار دارد، در حالی که سناریوی SSP5-8.5 در همین بازه زمانی مقادیر بالاتری از HWF را نشان می‌دهد. این تفاوت بیانگر فراوانی بیشتر رخدادهای موج گرما در ابتدای دوره تحت مسیر پراختشار است. با گذر زمان



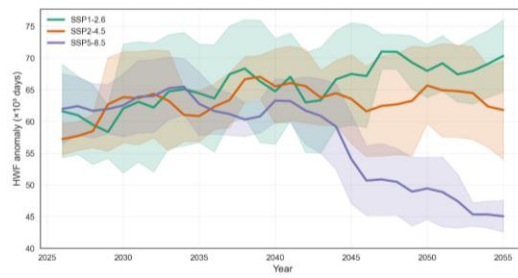
شکل ۶: تغییرات دهه‌ای شاخص‌های موج گرما شامل شدت (HWA)، مدت (HWD) و فراوانی (HWF) در فصل تابستان طی دوره

۲۰۲۶-۲۰۵۵ تحت سناریوهای انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Fig. 6: Decadal changes in summer (JJA) heatwave indices, including intensity (HWA), duration (HWD), and frequency (HWF), during 2026–2055 under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 emissions scenarios.

به‌گونه‌ای که اگرچه در کل دوره مقادیر HWF بالاتر از دوره مرجع باقی می‌مانند، اما روند زمانی آن ملایم‌تر بوده و پس از افزایش اولیه تا حوالی دهه ۲۰۴۰، نوسانات بیشتری بدون یک شیب مشخص افزایشی یا کاهشی مشاهده می‌شود. در سناریوی SSP5-8.5، الگوی کاملاً متفاوتی دیده می‌شود؛ به‌طوری که آنومالی HWF در سال‌های ابتدایی دوره نسبتاً بالا بوده، اما از اوایل دهه ۲۰۴۰ به بعد کاهش محسوسی را تجربه می‌کند و تا پایان دوره به مقادیر حدود ۴۵ هزار روز می‌رسد. این کاهش همراه با افزایش قابل توجه دامنه نوسانات بین‌ساله (نواحی سایه‌دار گسترده‌تر) است که نشان‌دهنده بی‌ثباتی بیشتر سیستم اقلیمی در سناریوی بدبینانه می‌باشد.

در شکل ۷، تغییرات زمانی آنومالی فراوانی موج گرما (HWF) در فصل تابستان برای دوره ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۵ تحت سه سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در خاورمیانه نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که در سناریوی SSP1-2.6، آنومالی HWF به‌طور کلی روندی افزایشی و نسبتاً پایدار دارد؛ به‌طوری که از مقادیر حدود ۶۰ هزار روز در اواخر دهه ۲۰۲۰ آغاز شده و تا دهه ۲۰۵۰ به مقادیر بالاتر از ۷۰ هزار روز می‌رسد. این روند افزایشی، همراه با نوسانات بین‌ساله محدودتر نسبت به سایر سناریوها، نشان‌دهنده افزایش تدریجی اما کنترل‌شده فراوانی موج‌های گرمایی در شرایط خوش بینانه است. در مقابل، سناریوی SSP2-4.5 رفتار میانی را نشان می‌دهد؛

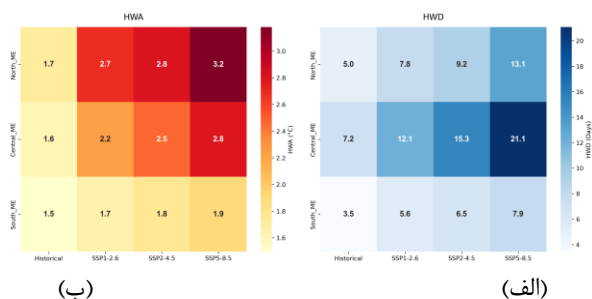


شکل ۷: آنومالی فراوانی موج گرما (HWF) در فصل تابستان نسبت به دوره مرجع تحت سناریوهای انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5. خطوط صلب نمایانگر میانگین و نواحی سایه‌دار بیانگر نوسانات بین‌سالانه (± یک انحراف معیار) هستند.

Fig. 7: Summer (JJA) heatwave frequency (HWF) anomalies relative to the reference period under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 emissions scenarios. Solid lines represent the mean, and shaded areas indicate interannual variability (\pm one standard deviation).

مقدار و کمترین نرخ افزایش را نشان می‌دهد و شدت امواج حتی در بدترین سناریو از ۲°C درجه سانتی‌گراد فراتر نمی‌رود. این الگو بیانگر آن است که مناطق گرم‌تر فعلی، افزایش نسبی کمتری در شدت تجربه می‌کنند، در حالی که مناطق خنک‌تر حساسیت بیشتری به گرمایش آینده دارند. در شکل سمت راست، افزایش تعداد روزهای موج گرما بسیار برجسته‌تر از تغییرات شدت است و وابستگی قوی‌تری به سناریوی انتشار نشان می‌دهد. در هر سه ناحیه، میانگین مدت زمان امواج از دوره تاریخی به سمت سناریو بدبینانه به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد، اما ناحیه مرکزی بیشترین آسیب‌پذیری را دارد. در این ناحیه، تعداد روزهای موج گرما از ۷/۲ روز در دوره تاریخی به بیش از ۲۱ روز در سناریو بدبینانه افزایش می‌یابد که تقریباً سه برابر شدن را نشان می‌دهد. ناحیه شمال نیز افزایش قابل توجهی را تجربه می‌کند (از ۵/۰ به ۱۳/۱ روز)، در حالی که ناحیه جنوب اگرچه مقادیر کمتری دارد، اما روند افزایشی آن همچنان واضح است (از ۳/۵ به ۷/۹ روز).

شکل ۸ تغییرات میانگین شدت امواج گرما (HWA) و تعداد روزهای موج گرما (HWD) را در سه ناحیه مکانی (شمال، مرکز و جنوب) تحت دوره تاریخی و سه سناریوی اقلیمی آینده (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) نشان می‌دهد و تصویر روشنی از تشدید ریسک امواج گرما در آینده ارائه می‌کند. میانگین شدت موج گرما در همه نواحی روند افزایشی شدت امواج گرما از دوره تاریخی به سمت سناریوهای آینده مشاهده می‌شود، اما میزان این افزایش به‌طور معناداری به سناریوی انتشار و موقعیت جغرافیایی وابسته است. ناحیه شمال بیشترین افزایش شدت را تجربه می‌کند؛ به طوری که شدت امواج گرما از ۱/۷ درجه سانتی‌گراد در دوره تاریخی به ۳/۲ درجه سانتی‌گراد در سناریو بدبینانه SSP5-8.5 می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که مناطق شمالی، در آینده با تشدید قابل توجه شدت امواج گرما مواجه خواهند شد. در ناحیه مرکزی نیز افزایش یکنواخت و قابل توجهی مشاهده می‌شود (از ۱/۶ به ۲/۸ درجه سانتی‌گراد)، در حالی که ناحیه جنوبی کمترین

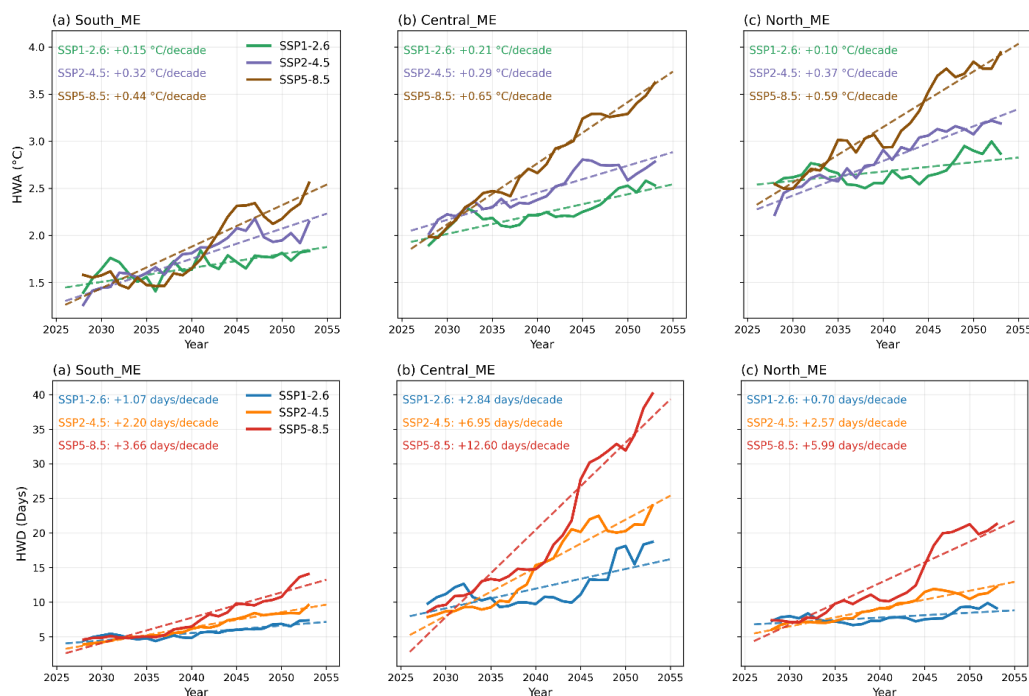


شکل ۸: نقشه‌های گرمایی میانگین شدت موج گرما (HWA) بر حسب درجه سانتی‌گراد و میانگین مدت زمان موج گرما (HWD)، بر حسب روز) در فصل تابستان (JJA) برای دوره مرجع و دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۵ تحت سناریوهای اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در بخش‌های شمالی (North)، مرکزی (Central) و جنوبی (South) منطقه مورد مطالعه

Fig. 8: Heatmaps of mean heatwave intensity (HWA, in °C) and mean heatwave duration (HWD, in days) in summer (JJA) for the reference period and for 2026–2055 under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 climate scenarios across the northern (North), central (Central), and southern (South) parts of the study region.

در بخش‌های مرکزی حساسیت به انتشار برجسته‌تر است (۰/۲۱، ۰/۲۹ و ۰/۶۵ به ترتیب SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) که منجر به رشد چشمگیر شدت امواج و رسیدن به حدود ۳/۸ درجه سانتی‌گراد در پایان دوره می‌شود. در بخش شمالی اگرچه در سناریوی خوش بینانه افزایش ملایم‌تر است، اما در سناریوهای میانی و بدبینانه به ترتیب ۰/۳۷ و ۰/۵۹ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود و HWA تا اواخر دوره به مقادیر بالاتر در SSP5-8.5 می‌رسد؛ این الگو نشان می‌دهد که از نظر «شدت»، بخش‌های شمالی و مرکزی نسبت به جنوبی آسیب‌پذیری بیشتری دارند و در سناریوی بدبینانه، روندها نه فقط قوی‌تر بلکه با نوسانات بالاتر همراه‌اند.

شکل ۹ روندهای آینده شدت و مدت موج‌های گرما در جنوب، مرکز و شمال خاورمیانه (۲۰۲۶-۲۰۵۵) نشان داده شده است. در شکل اول شاخص HWA به عنوان نماینده شدت موج گرما بر حسب درجه سانتی‌گراد در هر سه زیربخش جنوب، مرکز و شمال خاورمیانه روند افزایشی معنادار در دوره ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۵ دیده می‌شود و میزان افزایش به سناریوی انتشار وابسته است؛ به طوری که شکاف بین سناریوها با گذر زمان بزرگ‌تر می‌شود (همگرایی در ابتدای دوره و واگرایی در دهه‌های بعد). در جنوب نرخ افزایش شدت از حدود ۰/۱۵ در SSP1-2.6 تا ۲/۶ در SSP5-8.5 می‌رسد و تا انتهای دوره مقدار HWA تقریباً از حدود ۱/۶ به نزدیک ۲/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.



شکل ۹: روندهای آینده شدت و مدت موج‌های گرما در بخش‌های جنوبی، مرکزی و شمالی منطقه مورد مطالعه (۲۰۲۶-۲۰۵۵)

Fig. 9: Future trends in heatwave intensity and duration in the southern, central, and northern parts of the study region (2026–2055).

غیرخطی ایجاد می‌کند و تا انتهای دوره می‌تواند به حدود ۴۰ روز برسد؛ این یعنی تبدیل موج‌های گرما از رویدادهای چندروزه به پدیده‌های چند هفته‌ای. در بخش شمالی نیز اگرچه سناریوی خوشبینانه افزایش کمی (۰/۷) اما در SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۲/۵۷ و ۵/۹ روز/دهه بدست آمده و HWD از حدود ۸ روز به ۲۲ روز در پایان دوره افزایش می‌یابد؛ هم‌زمان، واگرایی سناریوها در نیمه دوم دوره تشدید می‌شود.

در شکل ۹ (ردیف دوم) (به‌عنوان مدت موج گرما)، افزایش‌ها ملموس‌تر است و در برخی بخش‌ها رفتار شتاب‌دار در دهه‌های پایانی دیده می‌شود. در جنوب افزایش تداوم نسبتاً تدریجی است و از ۱/۰۷ روز/دهه در SSP1-2.6 تا ۲/۲ در SSP2-4.5 و ۳/۶ روز/دهه در SSP5-8.5 تغییر می‌کند؛ بنابراین HWD تا ۲۰۵۵ حدوداً از ۵ روز به ۱۴ روز می‌رسد. در بخش مرکزی جهش اصلی رخ می‌دهد که به‌ویژه در SSP5-8.5 پس از دهه ۲۰۴۰ افزایش تند و

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی توان مدل‌های نسل ششم اقلیمی (CMIP6) در پیش‌بینی دمای سطح زمین و نیز واکاوی رفتار آینده موج‌های گرما در خاورمیانه، مجموعه‌ای از شاخص‌های دمایی و موج گرما را در ابعاد فصلی، مکانی و سناریومحور تحلیل کرد. نتایج ارزیابی آماری نشان داد عملکرد مدل‌های CMIP6 به‌طور معناداری وابسته به فصل است؛ به‌گونه‌ای که عملکرد مدل‌ها برای برآورد دما در تابستان و پاییز مطلوب‌تر بوده، درحالی‌که فصل زمستان بیشترین اریبی و RMSE را دارد و ضرورت تصحیح اریبی فصلی و کالیبراسیون هدفمند را برجسته می‌کند. این پژوهش با هدف ارزیابی توان مدل‌های نسل ششم اقلیمی (CMIP6) در پیش‌بینی دمای سطح زمین و نیز واکاوی رفتار آینده موج‌های گرما در خاورمیانه، مجموعه‌ای از شاخص‌های دمایی و موج گرما را در ابعاد فصلی، مکانی و سناریومحور تحلیل کرد. نتایج ارزیابی آماری نشان داد عملکرد مدل‌های CMIP6 به‌طور معناداری وابسته به فصل است؛ به‌گونه‌ای که با حاکمیت سامانه پرفشار جنب حاره‌ای و شرایط پایداری نسبی از دیدگاه دینامیکی عملکرد مدل‌ها برای برآورد دما در تابستان و پاییز مطلوب‌تر بوده، در حالی‌که فصل زمستان به علت عبور چرخندهای دینامیکی، فرآیندهای پیچیده همرفت و فرارفت دما در مناطق کوهستانی بیشترین اریبی و RMSE را دارد که ضرورت تصحیح اریبی فصلی و کالیبراسیون هدفمند را برجسته می‌کند. از منظر مکانی نیز خطاها عمدتاً در نواحی با توپوگرافی پیچیده و مناطق گذار خشکی - دریا متمرکز است، اما در بخش‌های وسیعی از نواحی داخلی، مدل‌ها رفتار پایداری و قابل‌قبولی نشان می‌دهند. تحلیل شاخص‌های موج گرما نشان داد که روند تغییرات این شاخص‌ها هم وابسته به سناریو و هم وابسته به مکان است و در برخی شاخص‌ها رفتار غیرخطی مشاهده می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده، میانگین شدت موج گرما (HWA) از دوره تاریخی به سمت آینده در هر سه ناحیه افزایش می‌یابد، اما حساسیت فضایی متفاوت است به طوری که بخش شمالی بیشترین افزایش را تجربه می‌کند (تقریباً از ۱/۷ درجه سانتی‌گراد در دوره تاریخی به حدود ۳/۲ درجه سانتی‌گراد در SSP5-8.5)، ناحیه مرکزی نیز افزایش یکنواخت و قابل توجهی دارد (حدود ۱/۶ به ۲/۸ درجه سانتی‌گراد)، درحالی‌که بخش جنوبی کمترین مقدار و

کمترین نرخ افزایش را نشان می‌دهد و حتی در سناریو بدبینانه عمدتاً از مرز ۲ درجه سانتی‌گراد فراتر نمی‌رود؛ این الگو بیانگر آن است که نواحی خنک‌تر فعلی (شمال و تا حدی مرکز) نسبت به گرمایش آینده حساس‌ترند. در مقابل، شاخص تداوم/تعداد روزهای موج گرما (HWD) افزایش برجسته‌تری دارد و وابستگی آن به سناریو قوی‌تر است؛ به طوری که در ناحیه مرکزی از حدود ۷/۲ روز در دوره تاریخی به بیش از ۲۱ روز در SSP5-8.5 می‌رسد (تقریباً سه‌برابر)، در شمال از حدود ۵/۰ به ۱۳/۱ روز افزایش می‌یابد و در جنوب نیز هرچند مقدار مطلق کمتر است، اما روند افزایشی باقی می‌ماند (حدود ۳/۵ به ۷/۹ روز). روندهای زمانی ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۵ نیز این جمع‌بندی را تقویت می‌کند به طوری که در بخش جنوبی نرخ افزایش HWA از حدود ۰/۱۵ (SSP1-2.6) تا حدود ۰/۴۴ (SSP5-8.5) رشد می‌کند، در بخش مرکزی شیب تغییرات بیشتر و در بخش شمالی نیز در سناریوهای میانه و بدبینانه افزایش قابل توجه مشاهده شد. برای HWD نیز جهش اصلی در بخش مرکزی رخ می‌دهد و در SSP5-8.5 می‌تواند به مقادیر چند هفته‌ای تا حدود ۴۰ روز در انتهای دوره نزدیک شود که به معنای تغییر ماهیت موج‌های گرما از رویدادهای چندروزه به پدیده‌های طولانی‌مدت است. در عین حال، نتایج فراوانی موج گرما در راستای ۲۰ تا ۴۰ شرقی نشان می‌دهد افزایش‌ها الزاماً به صورت گردایان شرق - غرب یکنواخت رخ نمی‌دهند؛ در SSP1-2.6 تغییرپذیری بیشتر محلی و سال‌به‌سال است، در SSP2-4.5 پایداری زمانی افزایش‌ها تقویت می‌شود و در SSP5-8.5 رفتار غیرخطی و نوسانی‌تر دیده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده تغییر رفتار از افزایش یکنواخت تعداد رخدادها به سمت رخدادهای نامنظم‌تر اما شدیدتر و ماندگارتر باشد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان داد که خاورمیانه در دهه‌های آینده با تغییر رژیم موج‌های گرما مواجه خواهد شد؛ تغییری که هم‌زمان شامل افزایش قابل توجه شدت (به‌ویژه در بخش‌های شمالی و مرکزی) و افزایش چشمگیر تداوم/روزهای موج گرما (به‌خصوص در بخش‌های مرکزی) است و در ابعاد مکانی (عرضی و طولی) ناهمگن و تا حدی غیرخطی عمل می‌کند. در سناریوهای خوش‌بینانه نیز افزایش ریسک حرارتی قابل انتظار است، اما در سناریوهای بدبینانه، فشار حرارتی به‌طور نامتناسبی در بخش‌های مرکزی و شمالی تشدید می‌شود؛ بنابراین برنامه‌ریزی

سپاسگزاری

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

سازگاری باید هم‌زمان بر مدیریت «شدت» و «تداوم» (و نه صرفاً تعداد رخدادها) متمرکز باشد و در طراحی زیرساخت، سلامت، انرژی و آب، تفاوت‌های زیرناحیه‌ای و جابه‌جایی کانون‌های مخاطره در زمان و فضا به صورت صریح لحاظ شود.

پانویس

- 1-The NaSa Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections.
- 2-Bias correction/spatial disaggregation.

- 3-National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton, NJ, USA
- 4-Expert Team on Climate Change Detection and Indices.

References

- Alexander, L.V., Zhang, X., Peterson, T.C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A.M.G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Kumar, K.R., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D.B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M. and Vazquez-Aguirre, J.L., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 111(D5), D05109. <https://doi.org/10.1029/2005JD006290>
- Åström, D.O., Forsberg, B. and Rocklöv, J., 2011. Heat wave impact on morbidity and mortality in the elderly population: A review of recent studies. *Maturitas*, v. 69(2), p. 99-105. <https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2011.03.008>
- Baharvandi, N., Mojarrad, F. and Masoompour Samakoosh, J., 2020. Identification of heat waves and analysis of their spatiotemporal variations in Iran. *Applied Research in Geographical Sciences*, v. 20(59), p. 39-58 (In Persian).
- Diffenbaugh, N.S. and Giorgi, F., 2012. Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic Change*, v. 114(3-4), p. 813-822. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0570-x>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. and Taylor, K.E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Fischer, E.M. and Schär, C., 2010. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience*, v. 3(6), p. 398-403. <https://doi.org/10.1038/ngeo866>
- Hosseinpour, Z., Shamsipour, A.A., Karimi, M. and Khoshakhlaq, F., 2023. Statistical analysis of heat waves on the southern slopes of the Central Alborz. *Applied Research in Geographical Sciences*. (In Persian).
- Hosseini, S.M. and Khorramabadi, F., 2023. Forecasting hazardous heat waves in East Azerbaijan using CMIP6 (Sixth Assessment Report) climate modeling. *Geography and Environmental Hazards*. (In Persian).
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021. *Climate change 2021: The physical science basis. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Knutti, R., Sedláček, J., Sanderson, B.M., Lorenz, R., Fischer, E.M. and Eyring, V., 2017. A climate model projection weighting scheme accounting for performance and interdependence. *Geophysical Research Letters*, v. 44(4), p. 1909-1918. <https://doi.org/10.1002/2016GL072012>
- Kovats, R.S. and Hajat, S., 2008. Heat stress and public health: A critical review. *Annual Review of Public Health*, v. 29, p. 41-55. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>
- Meehl, G.A. and Tebaldi, C., 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, v. 305(5686), p. 994-997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G. and Sanderson, B.M., 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Pal, J.S. and Eltahir, E.A.B., 2016. Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability. *Nature Climate Change*, v. 6(2), p. 197-200. <https://doi.org/10.1038/nclimate2833>
- Perkins, S.E. and Alexander, L.V., 2013. On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*,

- v. 26(13), p. 4500-4517.
<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>
- Perkins-Kirkpatrick, S.E., 2015. A review on the scientific understanding of heatwaves—their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale. *Atmospheric Research*, v. 164-165, p. 242-267.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.05.014>
- Rahmstorf, S. and Coumou, D., 2011. Increase of extreme events in a warming world. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 108(44), p. 17905-17909.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1101766108>
- Russo, S., Dosio, A., Gravensén, R.G., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M.B. Vogt, J.V., 2014. Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 119(22), p. 12500-12512.
<https://doi.org/10.1002/2014JD022098>
- Russo, S., Sillmann, J. and Fischer, E.M., 2015. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environmental Research Letters*, v. 10(12), 124003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124003>
- Salahi, B., Saber, M. and Vatanparast (Ghaleh Jough), F., 2024. Pattern recognition and synoptic analysis of heat waves in Ardabil Province. *Quarterly Journal of Natural Geography*. (In Persian).
- Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A. and Zhou, B., 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate (Chapter 11). In *Climate change 2021: The physical science basis (IPCC AR6 WG1)*. Cambridge University Press.
- Zhang, X., Hegerl, G.C., Zwiers, F.W. and Kenyon, J., 2005. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. *Journal of Climate*, v. 18(11), p. 1641-1651.
<https://doi.org/10.1175/JCLI3366.1>
- Zittis, G., Hadjinicolaou, P., Almazroui, M., Bucchignani, E., Driouech, F., El Rhaz, K. and Lelieveld, J., 2021. Business-as-usual will lead to super and ultra-extreme summer heatwaves in the Middle East and North Africa. *npj Climate and Atmospheric Science*, v. 4, p. 20-38.
<https://doi.org/10.1038/s41612-021-00178-7>