



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University

Vol. 5, No. 17, Spring 2024



## Arctic amplification and its impact on weather patterns in Southwest and West Asia

Roya Rezvanizadeh<sup>1</sup>, Maryam Rezazadeh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D student of Meteorology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, Email: R.rezvanizadeh.phd@hormozgan.ac.ir

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Marin Science and Technology, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran, Email: rezazadeh@hormozgan.ac.ir

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 2023-10-31  
Accepted: 2024-1-15

**Keywords:**  
Arctic Amplification  
Jet stream  
Global warming  
Weather patterns  
Southwest and West Asia

### ABSTRACT

The rate of disproportionate temperature increases in the Arctic relative to the global average is called Arctic amplification. The purpose of this study is to investigate these effects in Southwest and West Asia, longitude 20-70 degrees east and latitude 20-60 degrees north. To this end, the reanalysis data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), version ERA-5, with a horizontal resolution of  $0.25 \times 0.25$  degrees in the period 1959-2021 was used. The periods before and after the rapid warming of the Arctic were considered to be 1959-1985 and 1995-2021, respectively. The analysis of weather temperature variance indicated that the variability of temperature near the earth surface in the Arctic has decreased in the period after the rapid warming of the Arctic in the all seasons, which can be due to the increased volume of ocean water due to the loss of the sea ice extent in this region. The impact of the rapid warming of the Arctic on the weather patterns in Southwest and West Asia was also investigated. The results showed that due to the rapid warming of the Arctic, the meridional range of the lines of equal value in the geopotential height of 500 Hectopascal in the studied area has increased by 4 degrees in the summer season and in other seasons other than winter, an increase in the amplitude of the waves and a change in the location of the waves to higher heights were observed. It was also observed that the jet stream speed in the period after the rapid warming of the Arctic has decreased the most in the summer season, except for the autumn season. It has almost decreased in the other seasons. These changes can result in an increased frequency of extreme weather events, especially in the summer season.

**Cite this article:** Rezvanizadeh, R., Rezazadeh, M. (2024). Arctic amplification and its impact on weather patterns in Southwest and West Asia. *Journal of the Climate Change Research*, 5 (17), 31-52.



©The author(s)  
Doi:

Publisher: Golestan University



## تقویت شمالگان و تاثیر آن بر الگوهای جوی در منطقه جنوب غرب و غرب آسیا

رویا رضوانی زاده<sup>۱</sup>، مریم رضازاده<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری هواشناسی، دانشکده علوم و فنون دریایی و جوی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه علوم غیر زیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران، رایانامه: [rezazadeh@Hormozgan.ac.ir](mailto:rezazadeh@Hormozgan.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی	آهنگ افزایش دمای نامتناسب شمالگان نسبت به میانگین جهانی "تقویت شمالگان" نامیده می‌شود. هدف مطالعه حاضر بررسی تاثیر افزایش دمای سریع شمالگان در جنوب غرب و غرب آسیا، (۲۰ تا ۶۰ درجه شمالی و ۲۰ تا ۷۰ درجه شرقی) می‌باشد. بدین منظور از داده‌های بازتحلیل مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان مدت وضع هوا (ECMWF) نسخه ERA-5 با تفکیک افقی ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه در دوره (۱۹۵۹-۲۰۲۱) استفاده شده است. دوره پیش و پس از گرمایش سریع شمالگان به ترتیب (۱۹۵۹-۱۹۸۵) و (۱۹۸۵-۲۰۲۱) در نظر گرفته شده است. در دوره پس از گرمایش سریع شمالگان، افزایش دمای منطقه شمالگان نسبت به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر به جز فصل تابستان در همه فصول خصوصاً زمستان و پاییز بسیار بیشتر بوده است. بررسی ورادایی دمای هوا نشان داد که تغییرپذیری دمای هوای نزدیک سطح زمین در شمالگان در دوره پس از گرمایش سریع شمالگان در همه فصول کاهش یافته است که به دلیل افزایش حجم آب اقیانوس‌ها در اثر از بین رفتن گستره یخ دریاها در این منطقه می‌تواند باشد. همچنین نتایج نشان دادند که در اثر گرمایش سریع شمالگان، گستره (دامنه) نصف‌النهاری خطوط هم‌مقدار ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در منطقه مورد مطالعه به اندازه ۴ درجه در فصل تابستان و ارتفاع آن هم از ۵۵۰۰ متر به ۵۶۵۰ متر افزایش یافته که بیشترین تغییر بوده است. در فصول دیگر غیر از زمستان، افزایش دامنه امواج و تغییر مکان امواج به ارتفاعات بالاتر مشاهده شد و همچنین سرعت جریان جوی در جنوب غرب و غرب آسیا در دوره پس از گرمایش سریع شمالگان در همه فصول به‌جز پاییز کاهش یافته است که بیشترین کاهش در فصل تابستان بوده است، این تغییرات می‌تواند منجر به افزایش فراوانی رخدادهای فرین آب‌وهوایی در این منطقه خصوصاً در فصل تابستان گردد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۸/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵	
واژه‌های کلیدی: تقویت شمالگان جریان جوی الگوهای جوی جنوب غرب و غرب آسیا گرمایش زمین	

**استناد:** رضوانی زاده، رویا؛ رضازاده، مریم. (۱۴۰۳). تقویت شمالگان و تاثیر آن بر الگوهای جوی در منطقه جنوب غرب و غرب آسیا. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۵ (۱۷)، ۵۲-۳۱.



## مقدمه

امروزه رخداد تغییر اقلیم و گرمایش زمین ذهن بسیاری از اندیشمندان و پژوهشگران را به خود جلب کرده است. پدیده گرمایش زمین به دلیل تاثیرات گسترده آن از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. گرمایش زمین و پدیده تغییر اقلیم از معضلات مهم زیست‌محیطی است که به ویژه در دو دهه اخیر از سوی بسیاری از محافل علمی در دنیا مورد توجه قرار گرفته است. این موضوع به ویژه در منطقه شمالگان که میزان گرمایش آن در قیاس با میانگین جهانی حدود چهار برابر برآورد شده، دارای اهمیت است (رانتانن و همکاران، ۲۰۲۲). افزایش دما و ذوب شدن یخ‌های شمالگان و بالا آمدن تراز آب دریاها، کاهش بارش و خشک‌سالی‌های پی‌پی و شدید، افزایش فراوانی وقوع سیلاب‌ها و امواج گرمایی به‌عنوان پیامدهای تغییر اقلیم شناخته می‌شوند. پیامدهای تغییر اقلیم که به برخی از آنها اشاره شد موجب مشکلات اقتصادی و اجتماعی فراوانی در سراسر جهان شده‌اند (مونگلی و همکاران، ۲۰۰۶). افزایش گازهای گلخانه‌ای موجب افزایش دمای هوای کره زمین، افزایش سطح تراز آب دریاها و دمای سطح اقیانوس‌ها می‌شود، که افزایش میزان بخار آب جو را در پی دارد. در نتیجه بارش در برخی از مناطق جهان افزایش (مناطق حاره‌ای و جنب‌قطبی) و در برخی مناطق دیگر (مناطق جنب‌حاره‌ای) کاهش می‌یابد (علیزاده و نجفی، ۲۰۱۷). در واقع، پاسخ به گرمایش زمین در همه مناطق جهان به یک صورت نخواهد بود (هیات بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۳)<sup>۱</sup>. یکی از معیارهایی که در بررسی تغییرات اقلیمی و گرمایش زمین به‌عنوان یک معضل مهم زیست‌محیطی مطرح می‌شود، تغییر الگوهای جوی و افزایش فراوانی وقوع رویدادهای فرین هواشناسی در مناطق مختلف دنیاست که می‌توان پیامدهای آن را به شکل ثبت دماهای بسیار بالا و پایین و همچنین بارش‌های شدید و توفان‌های مهیب مشاهده کرد. براساس گزارش اعلام شده از سوی اداره ملی جوی و اقیانوس‌شناسی آمریکا، در چهار دهه اخیر

فراوانی وقوع رویدادهای فرین هواشناسی در سطح زمین در حال افزایش بوده است. در چند دهه اخیر تغییرپذیری بین‌سالانه اقلیم بر اساس تاثیر الگوهای دورپیوندی مورد توجه محققان قرار گرفته است (یاراحمدی و عزیزی، ۱۳۸۶). والس و گززر دورپیوند را ارتباط هم زمان بین نوسان‌های عناصر اقلیمی یک مکان با تغییرات الگوهای فشار و دمای سطح دریا در مناطق دیگر تعریف کرده‌اند (والاک و گززر، ۱۹۸۱). شاخص‌های هواشناسی که در اثر تغییرات میدان فشار در مناطق مختلف زمین شناخته شده‌اند، می‌توانند با تغییر توزیع فشار در سطح زمین، الگوهای بارش و به ویژه دمای سطح زمین را تعیین کنند (معمدی و همکاران، ۱۳۸۶). محققین توانسته‌اند با استفاده از تغییر میدان‌های فشار و دما در مناطق مختلف کره زمین، شاخص‌های متعددی را بیابند که هر کدام می‌تواند باعث اثرگذاری بر اقلیم مناطقی از کره زمین شود. در واقع، الگوهای دورپیوندی بر امواج جوی، موقعیت رودبادهای، الگوی بارش و مسیر توفان‌ها اثر می‌گذارند. بنابراین می‌توان دورپیوند را یکی از کلیدهای پیش‌بینی‌های اقلیمی قلمداد کرد (خسروی، ۱۳۸۳؛ مطلبی‌زاده، ۱۳۹۲). در این میان شناسایی الگوهای دورپیوندی و تحلیل آثار آنها بر الگوهای جوی می‌تواند جهت شناخت و درک بهتر بی‌هنجاری‌های اقلیمی که در بسیاری از قسمتهای این کره خاکی به وقوع می‌پیوندند، مفید باشند (مولر و آمبریزی، ۲۰۰۷). منطقه غرب و جنوب‌غرب آسیا خصوصاً ایران به دلیل داشتن شرایط خاص اقلیمی، همواره در معرض پیامدهای ناشی از بی‌هنجاری‌های اقلیمی بوده و هست. تغییر و جابجایی فصول از نشانه‌های تاثیرپذیری اقلیم ایران از این تغییرات جهانی است (قلی‌پور و همکاران، ۱۳۹۵). در بیست سال اخیر شاهد پدیده "تقویت شمالگان" یا گرمایش سریع شمالگان بوده‌ایم (فرانسیس و اسکیفیک، ۲۰۱۵). فرایندهای متعددی در افزایش سریع دمای شمالگان دخیل‌اند، که یکی از مهم‌ترین آن‌ها کاهش سپیدایی شمالگان به دلیل کاهش پوشش برف و یخ این مناطق است، گرمایش سریع شمالگان باعث

<sup>1</sup> IPCC, 2014

تضعیف گرادیان دما بین شمالگان و عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر می‌شود (کوهن و همکاران، ۲۰۱۴؛ فرانسویس و واورس، ۲۰۱۵). احتمال وجود رابطه بین گرمایش سریع شمالگان و الگوهای جوی در عرض‌های میانی نیمکره شمالی در سال‌های اخیر توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است برای مثال، فرانسویس و واورس، ۲۰۱۲؛ ۲۰۱۵؛ فرانسویس و اسکیفیک ۲۰۱۵؛ کوهن و همکاران، ۲۰۲۳؛ کوهن و همکاران (۲۰۱۴) سه چارچوب دینامیکی متفاوت مبنی بر این‌که چگونه تقویت شمالگان می‌تواند الگوهای جوی در عرض‌های میانی نیمکره شمالی را تحت تاثیر قرار دهد بیان داشتند: (۱) تغییر در مسیر توفان‌ها؛ (۲) تغییر در ویژگی رودبادهای؛ و (۳) تغییر در الگوی امواج سیاره‌ای (دامنه و سرعت حرکت این امواج). این سه چارچوب از یکدیگر متمایز نیستند، بلکه ارتباط تنگاتنگی با یکدیگر دارند. می‌توان گفت، کاهش یخ دریای بارنت\_کارا باعث گسترش و تشدید پرفشار سیبری از شمال غربی به سمت غرب می‌شود که زمستان‌های سردی در شرق آسیا به دنبال خواهد داشت. گرمایش منطقه شمالگان باعث افزایش ضخامت ژئوتپانسیلی روی کلاهک قطبی می‌شود و این اتفاق باعث جابجایی جریان جتی و مسیر توفان‌ها می‌گردد و در عرض‌های میانی تاثیر می‌گذارد که پیامد آن می‌تواند تغییر در فراوانی وقوع رویدادهای فرین هواشناسی در این مناطق گردد (کوهن و همکاران، ۲۰۱۸). یکی از پیامدهای تقویت شمالگان کاهش شیو قطب سوی دمای هوا در نزدیکی سطح زمین است که یک عامل بنیادی و بسیار مهم در سرعت انتشار بادهای مداری در ترازهای فوقانی جو می‌باشد. از آنجاکه شدت رودباد در عرض‌های میانی بستگی مستقیم به این گرادیان دما دارد، گرمایش بیشتر شمالگان منجر به تضعیف رودباد در عرض‌های میانی (کاهش مؤلفه مداری سرعت باد) می‌شود. کاهش مؤلفه مداری سرعت باد باعث می‌شود که رودباد تمایل بیشتری به نصف‌النهاری شدن داشته باشد. با افزایش دامنه رودباد در عرض‌های میانی، ناهه‌ها بیشتر به سمت جنوب و پشته‌ها بیشتر به سمت شمال گسترش

می‌یابند. با این حال، مطالعات نشان می‌دهند که در مقایسه با جابجایی ناهه‌ها به سمت جنوب، پشته‌ها جابجایی بیشتری به سمت شمال دارند، که این بدین معناست که رودباد در عرض‌های میانی جابجایی به سمت عرض‌های بالاتر داشته است (اسکرین و سیموندز، ۲۰۱۰). افزایش دامنه الگوی موجی شکل رودباد عرض‌های میانی باعث می‌شود که هوای گرم و سرد در نیمکره شمالی بیشتر با یکدیگر اختلاط یابند. مهم‌تر این‌که، افزایش دامنه رودباد عرض‌های میانی باعث می‌شود که پیشروی شرق‌سوی ناهه‌ها و پشته‌ها کندتر شود؛ بنابراین شرایط جوی که منطقه‌ای را تحت تاثیر قرار می‌دهند ماندگارتر می‌شوند یا رویدادهای فرین هواشناسی افزایش می‌یابند (اسکرین و سایموندز، ۲۰۱۲). سرز و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی گرمایش شمالگان پرداختند. آن‌ها دمای هوا در دو دوره (۲۰۰۷-۱۹۷۹) و (۲۰۰۷-۲۰۰۳) را با هم مقایسه و مشاهده نمودند بیشترین و کمترین میزان گرمایش شمالگان به ترتیب مربوط به فصل پاییز و تابستان می‌باشد. پارک و هوئی (۲۰۱۰) اثر نوسان شمالگان را بر موج‌های سرد شرق آسیا مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که موج‌های سرد در طی فاز منفی نوسان شمالگان هم از لحاظ مدت زمان و هم از لحاظ وسعت، دامنه‌ای قوی‌تر از فاز مثبت نوسان شمالگان دارند. کوهن و همکاران (۲۰۱۰)، فاز منفی نوسان شمالگان را عامل جوی زمستان سخت و شدید سال ۲۰۱۰-۲۰۰۹ دانسته‌اند که موجب ریزش برف سنگین و سرمای شدید و وارد آمدن خساراتی به مراکز صنعتی و جمعیتی در شرق آسیا، اروپا و ایالت متحده آمریکا شد. کوهن و همکاران (۲۰۱۴)، دریافتند که تغییرات الگوی تقویت شمالگان می‌تواند در وقوع رویدادهای فرین آب و هوایی در عرض‌های میانی نیمکره شمالی تاثیر زیادی داشته باشد. فرانسویس و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به بررسی اثر شاخص تقویت شمالگان بر الگوهای جوی در عرض‌های میانی پرداختند و متوجه شدند که با تشدید تقویت شمالگان گرادیان دمایی بین شمالگان و عرض‌های میانی ضعیف می‌شود و در نتیجه جریان جتی

و همکارانش (۲۰۱۸) در تحقیق خود بر روی ارتباط مونسون زمستانه شرق آسیا و تغییرات دمایی و پوشش برفی دریای قطب شمال دریافتند که در فاصله سالهای (۱۴۰۰-۱۰۰۰) دوره‌ای که همراه با کاهش یخ‌های دریای قطب شمال بوده یک همبستگی مثبت و معنی‌داری بین نوسانات شمالگان و مونسون زمستانه شرق آسیا وجود داشته است اما در بین سالهای (۱۷۰۰-۱۴۰۰) که همراه با افزایش پوشش یخ‌های دریای قطب شمال بوده همبستگی معنی‌داری بین نوسانات شمالگان و مونسون زمستانه شرق آسیا وجود نداشته و این نشان می‌دهد که کاهش یخ‌های قطبی ارتباط مستقیم و معنی‌داری روی افزایش شدت مونسون زمستانه شرق آسیا دارد. علیزاده و لین (۲۰۲۱) در تحقیق خود در مورد تاثیر گرمایش سریع شمالگان بر روی سرعت جریان جتی در عرض‌های میانی منطقه غرب آسیا برای دوره زمانی ۲۰۱۸-۱۹۹۷ دریافتند که در دوره بعد از گرمایش شمالگان (۲۰۱۸-۲۰۰۴) قطب شمال و غرب آسیا دما در کلیه فصل‌ها افزایشی بوده، اما افزایش دما در شمالگان در مقایسه با عرض‌های میانی خیلی بیشتر بوده است که این باعث کاهش شیب نصف‌النهاری دما گشته و به دنبال آن شاهد کاهش سرعت جریان جتی در کلیه فصل‌ها غیر از پاییز بوده‌اند در حالی که خطوط هم مقدار ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در فصل پاییز کاهش و در زمستان افزایش یافته است. حجتی و مسعودیان (۱۴۰۰) برای بررسی تأثیر گرمایش سریع شمالگان بر روی تغییرات دمایی در ایران، از روش تموج تجمیعی استفاده نمودند. بررسی‌ها افزایش مقدار تموج را در چند سال اخیر، هم در میانگین روزانه و هم در میانگین فصلی و سالانه نشان می‌دهند. افزایش مقدار تموج نشان‌دهنده افزایش دامنه موج و افزایش تعداد فرین‌های آب‌وهوایی است. همبستگی‌ها میان تموج تجمیعی و دمای کمینه، بیشینه و نوسان شمالگان نشان می‌دهد که مقادیر مثبت (منفی) نوسان شمالگان موجب افزایش (کاهش) تموج تجمیعی و در نتیجه کاهش (افزایش) دمای کشور در فصل سرد سال می‌شود. محققین در

تضعیف می‌شود و حالت نصف‌النهاری پیدا می‌کند و به این صورت الگوهای جوی در عرض‌های میانی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و در حالت تقویت شمالگان زمستان‌های شدید و سردتری را در عرض‌های میانی داریم و عکس آن در شمالگان حاکم می‌باشد. فرانسیس و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی واکنش امواج رودبادهای قطبی در پاسخ به گرمایش سریع شمالگان پرداختند و با استفاده از شاخص گردش نصف‌النهاری به تحلیل حالت مداری و نصف‌النهاری آن پرداختند. زمانی که تقویت شمالگان تشدید می‌شد جریان رودبادهای ضعیف‌تر و حالت نصف‌النهاری پیدا می‌کرد. فرانسیس (۲۰۱۵) با استفاده از شبیه‌سازی عددی نشان داد که در زمان گذشته و همچنین آینده بسیاری از وقایع فرین آب‌وهوایی در داخل و خارج از منطقه شمالگان تحت تاثیر میزان پوشش یخ دریای قطب می‌باشد. لاین و همکاران (۲۰۱۶) به مطالعه تقویت شمالگان پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل<sup>۲</sup> (CMIP5) تحت سناریوی (RCP4/5) در فصول مختلف سال و به‌طور جداگانه به بررسی اثر فاکتورهای موثر مختلفی مانند آلبیدو، بخار آب، اثر گرمایشی ابرها، شار گرمای محسوس و شار گرمای نهان بر روی تغییرات دمای سطح خشکی و اقیانوس در منطقه شمالگان پرداختند و نتیجه گرفتند که بازخورد بخار آب برای منطقه شمالگان و مناطق استوایی یکسان نیست. میزان حساسیت گرمایشی آنها متفاوت بود که در شمالگان اثر مثبت و در استوا اثر منفی داشت. اثر شار گرمای محسوس و شار گرمای نهان در روی خشکی‌ها و اقیانوس‌ها متفاوت بود. بازخورد آلبیدو در فصول مختلف سال در منطقه شمالگان به صورت افزایشی بود و در تابستان میزان بالایی از انرژی خصوصاً در مناطقی که پوشش یخ و برف ندارند جذب و در زمستان توسط اقیانوس منجمد شمالی پخش می‌گردد و در نتیجه میزان تبخیر در زمستان بر روی اقیانوس افزایش می‌یابد که این عامل گرمایش بیشتر در زمستان نسبت به تابستان آن مناطق می‌باشد. لی

<sup>2</sup> Climate Model Intercomparison Project

ژئوپتانسیل در ترازهای ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای دوره (۲۰۲۱ - ۱۹۵۹) اخذ شده است. منطقه مورد بررسی غرب و جنوب‌غرب آسیا (۲۰ تا ۶۰ درجه شمالی و ۲۰ تا ۷۰ درجه شرقی) را در برمی‌گیرد که شامل ایران نیز هست. از داده‌های روزانه برای تحلیل و بررسی دامنه امواج در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و بررسی سرعت جریان رودباد در ترازهای فوقانی جو استفاده شده است در حالی که بقیه تحلیل‌ها بر اساس داده‌های ماهانه انجام شده است. در این مطالعه بی‌هنجاری متغیرهای هواشناسی در دوره ۲۰۲۱-۱۹۵۹ نسبت به میانگین دوره پایه ۲۰۱۰-۱۹۸۱ محاسبه شده است. به منظور تحلیل ویژگی‌های امواج در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، از پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال استفاده شده است. علت انتخاب پربندهای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال این است که این پربندها توسط تعداد زیادی از رادیوگمانه‌ها و بازیابی‌ها ماهواره‌ای بازیابی شده‌اند. همچنین این پربندها نسبتاً مستقل از اثرات مکان‌نگاری سطح هستند و ویژگی‌های الگوهای جوی در ترازهای میانی و فوقانی جو را به خوبی نشان می‌دهند. دوره مورد مطالعه که از سال ۱۹۵۹ تا سال ۲۰۲۱ را شامل می‌شود، به دو دوره پیش از تقویت شمالگان (۱۹۸۵-۱۹۵۹) و پس از تقویت شمالگان (۲۰۲۱-۱۹۹۵) تقسیم‌بندی شده است. شایان ذکر است که در این دو دوره ممکن است عوامل دیگری نیز در تغییر احتمالی الگوهای جوی در عرض‌های میانی نیمکره شمالی نقش داشته باشند اما با توجه به اینکه گرمایش شمالگان از حدود سال ۱۹۹۵ بسیار قابل توجه بوده است (کوهن و همکاران، ۲۰۱۴) انتظار می‌رود که نقش عمده‌ای در تغییر احتمالی الگوهای جوی در عرض‌های میانی ایفا کند. همچنین، برای بررسی سطح اطمینان محاسبات از آزمون T-Test و رگرسیون خطی با سطح اعتماد ۹۵ درصد استفاده شده است. مناطق نقطه‌چین در تمامی شکل‌های ۱ تا ۹ در بخش نتایج نشانگر مناطقی است که سطح اعتماد در آنها مساوی یا بیشتر از ۹۵ درصد است. به منظور نشان‌دادن تغییرات متغیرهای

سال‌های اخیر بین تغییرات رخ داده در شمالگان و فراوانی وقوع رویدادهای فرین هواشناسی در عرض‌های میانی ارتباط‌هایی را یافته‌اند (علیزاده و لین، ۲۰۲۱؛ اسکرین و سیموند، ۲۰۱۳؛ لاین و همکاران، ۲۰۱۶؛ کوهن، ۲۰۱۰؛ کوهن و همکاران، ۲۰۱۴؛ فرانسویس و اسکیفیک، ۲۰۱۵؛ لی و همکاران، ۲۰۱۸). به همین دلیل در پژوهش حاضر رابطه بین "تقویت شمالگان" و الگوهای جوی در غرب و جنوب‌غرب آسیا مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور از داده‌های باز تحلیل مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان مدت جوی (ECMWF) نسخه ERA-5 با تفکیک افقی  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  استفاده شده است. این داده‌ها به‌طور کامل توسط بریسفورد و همکاران (۲۰۰۹) توصیف شده‌اند. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که این داده‌ها دقت نسبتاً مناسبی دارند (بویلی و والد، ۲۰۱۵؛ عزیزی و همکاران، ۱۳۹۹؛ وثوقی و همکاران، ۱۴۰۱؛ محمدی قلعه‌نی و همکاران، ۱۴۰۱). از حدود سال ۱۹۹۵ به بعد در نزدیکی سطح زمین و از حدود سال ۲۰۰۰ در وردسپهر زیرین، نشانه‌های وقوع گرمایش سریع شمالگان مشاهده شده است (فرانسویس و واوروس، ۲۰۱۵؛ درگاهیان و همکاران، ۱۴۰۱) به همین علت به این دوره اصطلاحاً عصر تقویت شمالگان گفته می‌شود. بر همین اساس دوره مورد مطالعه که از سال ۱۹۵۹ تا سال ۲۰۲۱ می‌باشد. به‌ترتیب (۱۹۸۵-۱۹۵۹) و (۲۰۲۱-۱۹۹۵) دوره پیش و پس از گرمایش سریع شمالگان در نظر گرفته شده است.

### مواد و روش‌ها

در تحقیق حاضر از داده‌های بازتحلیل مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان مدت جوی (ECMWF) نسخه ERA-5 استفاده شده است. این داده‌ها را می‌توان از سال ۱۹۵۹ تا حال حاضر از آدرس <https://www.ecmwf.int> استخراج نمود. برای انجام مطالعه حاضر میانگین ماهانه و روزانه داده‌های بازتحلیل ERA-5 مانند دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، مولفه‌های مداری و نصف‌النهاری سرعت باد در ترازهای ۲۵۰ هکتوپاسکال و ارتفاع

دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان با یکدیگر مقایسه شده تا تاثیر گرمایش سریع شمالگان بر پیچ و تاب امواج در ترازهای میانی جو مشخص شود. بارنز (۲۰۱۳) نشان داد که روش به کار برده شده در مطالعه فرانسیس و واورس (۲۰۱۲) نقص‌هایی دارد و بهتر است تصحیحی روی آن اعمال شود. ضمن ارائه یک روش جایگزین برای تحلیل پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، استدلال او این بود که معیار قراردادن محدوده کوچکی از پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در هر فصل از سال و بررسی تغییرات دامنه این پربندها روش صحیح نیست زیرا در اثر گرمایش زمین ممکن است پربندی که در آن بیشینه دامنه اتفاق می‌افتد در دوره پس از گرمایش سریع شمالگان تغییر کرده و احتمالاً به ارتفاعهای بالاتر جابجا شده باشد. بر این اساس دو دامنه پربندهای تراز بین حدود ۵۰۰ تا ۵۸۰۰ دکامتر را با فواصل اندک در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر حسب درجه در دوره پیش و پس از گرمایش سریع شمالگان برای منطقه آمریکای شمالی مورد بررسی قرار داد و سپس بیشینه دامنه را در فصل‌های مختلف سال در این دوره مقایسه کرد. این دامنه بر حسب درجه محاسبه می‌شود زیرا اختلاف بین عرض‌های جغرافیایی که به ترتیب در پشته و ناوه پربندهای مختلف رخ می‌دهد بر حسب درجه محاسبه می‌شود و از بیشینه این اختلاف‌ها، بیشینه دامنه محاسبه می‌شود. این بررسی به طور روزانه برای فصل‌های مختلف سال انجام می‌شود و سپس برای دوره پیش و پس از گرمایش سریع شمالگان میانگین‌گیری می‌شود. در مطالعه حاضر نیز از همین روش برای منطقه مورد مطالعه استفاده شده است.

### بحث و نتایج

**گرمایش سریع شمالگان:** در شکل ۱، توزیع جغرافیایی و میانگین مداری تغییرات دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای نیمکره شمالی در فصل‌های مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل، دمای هوا نزدیک سطح زمین در دوره ۱۹۵۹ تا

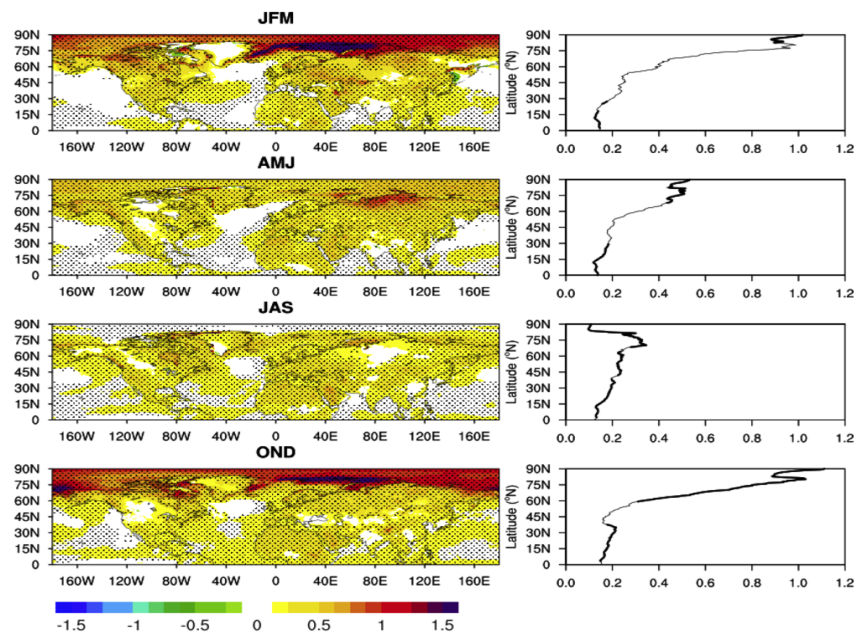
هواشناسی برای ایجاد هماهنگی با مطالعات قبلی مانند (فرانسیس و واورس، ۲۰۱۲؛ بارنز، ۲۰۱۳؛ فرانسیس و واورس، ۲۰۱۵؛ فرانسیس و اسکیفیک، ۲۰۱۵؛ علیزاده ولین، ۲۰۲۱)، در مطالعه حاضر، میانگین‌ها و بی‌هنجاری‌ها عمدتاً به صورت فصلی محاسبه شده‌اند. قابل ذکر است که منظور از فصل زمستان، ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس (JFM)؛ منظور از فصل بهار، ماه‌های آوریل، می و ژوئن (AMJ)؛ فصل تابستان، جولای، آگوست، سپتامبر (JAS) و فصل پاییز، اکتبر، نوامبر و دسامبر (OND) است که این تقسیم‌بندی فصل‌ها به دلیل هماهنگی با مطالعات انجام شده مرتبط قبلی انتخاب شده است.

### تحلیل پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰

**هکتوپاسکال:** بر اساس نتایج مطالعات قبلی فرانسیس و واورس، (۲۰۱۲ و ۲۰۱۵)، گرمایش سریع‌تر منطقه شمالگان باعث شده است پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در عرض‌های جغرافیایی بالاتر در مقایسه با عرض‌های میانی نیمکره شمالی جابجایی بیشتری به سمت ارتفاع‌های بالاتر داشته‌اند. یکی از روش‌هایی که با استفاده از آن پیچ و تاب امواج جوی در ترازهای میانی جو مورد بررسی قرار می‌گیرد توسط فرانسیس و واورس (۲۰۱۲)، مطرح شده است. در این روش یکی از پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای هر فصل انتخاب می‌شود که این پربنده به طور میانگین دارای بیشترین دامنه (فاصله بین ناوه و پشته) در این تراز است. محدوده انتخاب شده توسط فرانسیس و واورس، (۲۰۱۲)، در فصل‌های مختلف به این صورت است که از پربندهای  $5600 \pm 50$ ،  $5400 \pm 50$  و  $5700 \pm 50$  ژئوپتانسیل‌متر به ترتیب در فصل‌های پاییز، زمستان و تابستان استفاده می‌شود. بر اساس استدلال فرانسیس و واورس، با توجه به این که بی‌هنجاری فصلی ضخامت لایه (۵۰۰ - ۱۰۰۰) هکتوپاسکال در فصل بهار تفاوت چندانی با مقدار میانگین آن ندارد، تحلیل پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این فصل انجام نشده است. میانگین دامنه پربندهای ذکر شده در فصل‌های مختلف سال برای دو

بیشترین آهنگ افزایش میانگین مداری دمای هوای نزدیک سطح زمین به حدود ۱/۱ درجه سانتی‌گراد بر دهه در عرض ۹۰ درجه طی دو فصل پاییز و زمستان می‌رسد.

در بیشتر مناطق نیمکره شمالی طی هر چهار فصل افزایش یافته است، اما آهنگ گرمایش در منطقه شمالگان به ویژه در فصل‌های پاییز و زمستان نسبت به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر بسیار قابل توجه است. مطابق نمودارهای سمت راست شکل ۱،



شکل ۱- توزیع جغرافیایی روند تغییرات دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ( $^{\circ}\text{decade}^{-1}$ ) برای نیمکره شمالی در فصول مختلف سال طی دوره زمانی (۲۰۲۱ - ۱۹۵۹) میانگین‌گیری شده (سمت چپ) و میانگین مداری آن‌ها (سمت راست). مناطق نقطه‌چین‌ها و خطوط مشکی پررنگ طبق آزمون رگرسیون خطی مناطقی هستند که سطح اعتماد در آنها مساوی یا بیشتر از ۹۵ درصد است.

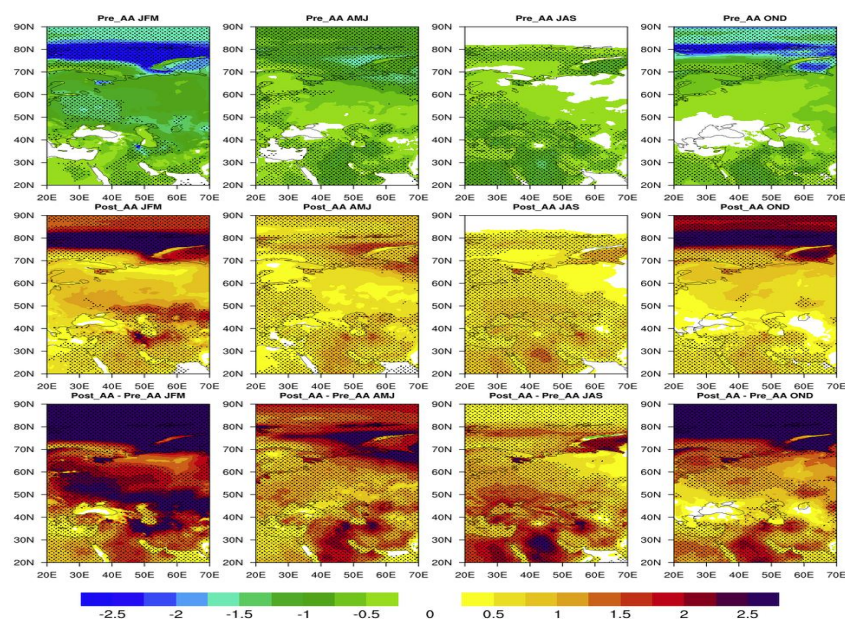
باعث آهنگ گرمایش قابل توجه هوای نزدیک سطح زمین در منطقه شمالگان در فصل پاییز شده است. در واقع، به علت از بین رفتن پوشش یخ دریا در منطقه شمالگان طی دهه‌های اخیر (فرانسیس و واوروس، ۲۰۱۲)، مقدار زیادی از گرما و رطوبت وارد جو زیرین این منطقه می‌شوند که در گرمایش سریع‌تر شمالگان در فصل پاییز نقش دارند. به دلیل ذوب قابل توجه یخ دریا در منطقه شمالگان در سال‌های اخیر، انجماد یخ دریا در فصل پاییز به تاخیر می‌افتد که این موضوع باعث می‌شود انتشار گرما از اقیانوس به سطح در فصل زمستان نیز ادامه پیدا کند. مطابق مطالعات گذشته افزایش تابش طول موج بلند ورودی به سطح زمین در منطقه شمالگان به دلیل افزایش غلظت بخار آب و

شیب خط روند افزایش دما بر هر دهه در فصل زمستان (JFM) ۰/۸۵، در بهار (AMJ) ۰/۴۷، در تابستان (JAS) ۰/۲۲ و در پاییز (OND) ۰/۸۹ می‌باشد. مشاهده می‌شود که منطقه شمالگان طی دو فصل پاییز و زمستان با آهنگ سریع‌تری گرم شده است، در حالی که تأثیر بازخورد سپیدایی سطح در این دو فصل ضعیف‌تر از فصل‌های بهار و تابستان است، به ویژه در فصل زمستان که بیشتر آب‌های آزاد در منطقه شمالگان منجمد می‌شوند. در فصل پاییز، هوای نزدیک سطح زمین در منطقه شمالگان سردتر از سطح اقیانوس زیرین می‌شود. در نتیجه گرمای جذب شده توسط اقیانوس در فصل تابستان به دلیل ذوب یخ دریا به جو بالای سطح داده می‌شود، که این موضوع



شمالگان در این فصل اتفاق افتاده است. این موضوع به این دلیل است که انرژی اضافی دریافت شده در فصل تابستان به دلیل بازخورد سپیدایی سطح معمولاً برای ذوب یخ باقیمانده دریا و گرمایش آبهای فوقانی اقیانوس استفاده می‌شود. در شکل ۱ مشاهده می‌شود که در فصل تابستان بیشترین آهنگ گرمایش در حوالی عرض جغرافیایی ۷۰ درجه شمالی اتفاق افتاده است زیرا پوشش برف روی سطوح خشکی در نزدیکی اقیانوس شمالگان طی فصل تابستان در دوره پس از تقویت شمالگان به شدت کاهش یافته است، به طوری که حتی سریع‌تر از کاهش یخ دریا در منطقه شمالگان در عرض‌های جغرافیایی بالاتر بوده است (کومو و همکاران، ۲۰۱۸).

ابرنیکی در این منطقه نیز در آهنگ گرمایش سریع‌تر شمالگان در فصل زمستان نقش داشته است. در فصل‌های گرم سال، اثر گرمایشی ناشی از گسیل تابش طول موج بلند به سطح زمین به واسطه افزایش غلظت بخار آب و پوشش ابر در منطقه شمالگان تا حد زیادی به دلیل اثر سرمایشی ناشی از بازتاب تابش طول موج کوتاه ورودی توسط ابرها خنثی می‌شود. در فصل زمستان تابش طول موج کوتاه ورودی به منطقه شمالگان بسیار ناچیز است. در نتیجه پوشش ابر عمدتاً در تابش طول موج بلند اثر می‌گذارد که پیامد آن اثر گرمایشی است. بنابراین مطابق شکل ۱ آهنگ گرمایش شمالگان در فصل زمستان نیز همانند پاییز قابل توجه است. با وجود قابل توجه بودن بازخورد سپیدایی سطح در فصل تابستان، کمترین آهنگ گرمایش منطقه



شکل ۲- بی‌هنجاری فصلی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (درجه سانتی‌گراد) برای دوره‌های قبل و بعد از تقویت شمالگان (۲۰-۹۰ درجه شمالی و ۲۰-۷۰ درجه شرقی)، مناطق نقطه‌چین‌ها مناطقی هستند که طبق آزمون تی-تست سطح اعتماد در آن‌ها مساوی یا بیشتر از ۹۵ درصد است.

طبق جدول ۱، دمای شمالگان (۷۰-۹۰ درجه شمالی و ۲۰-۷۰ شرقی)، در فصل زمستان به مقدار ۴/۱۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره قبل از گرمایش سریع شمالگان گرم‌تر شده است که این تغییر طبق آزمون تی-تست، ۰/۰۱ معنی‌دار است. برای عرض‌های پایین‌تر از منطقه شمالگان، در همین فصل افزایش دما

۱/۶۳ درجه سانتی‌گراد بوده که ۰/۰۵ معنی‌دار است. در فصل بهار دمای شمالگان نسبت به دوره قبل از گرمایش به مقدار ۱/۷۷ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است که این تغییر طبق آزمون تی-تست ۰/۰۱ معنی‌دار است.

جدول ۱- مقایسه میزان تغییرات دمای هوا در ارتفاع ۲ متری و نتایج آزمون تی-تست برای دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان در شمالگان (۷۰-۲۰ درجه شرقی و ۹۰-۷۰ درجه شمالی) و غرب و جنوب غرب آسیا (۷۰-۲۰ درجه شرقی و ۶۰-۲۰ درجه شمالی)

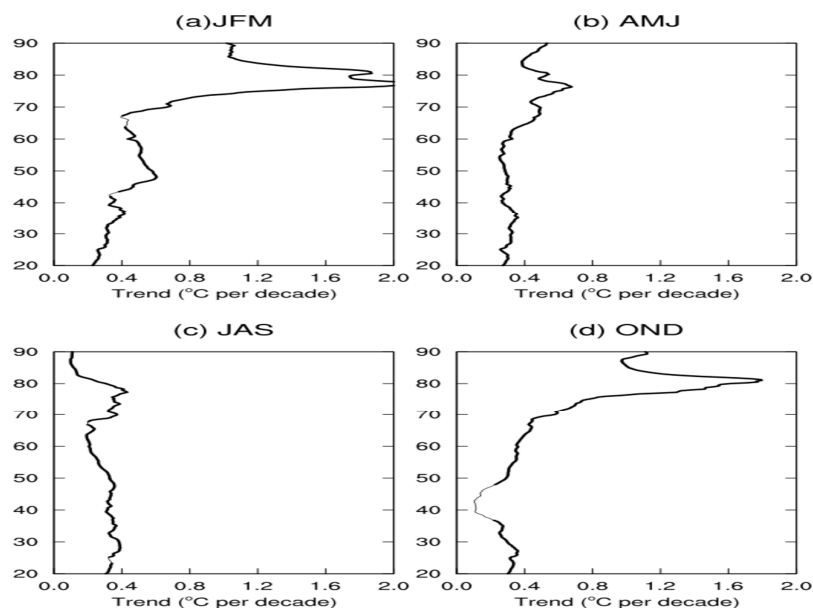
Region	JFM	AMJ	JAS	OND
اختلاف دما قبل و بعد از تقویت شمالگان در ناحیه (۷۰-۲۰ درجه شرقی و ۹۰-۷۰ درجه شمالی)	۴/۱۲	۱/۷۷	۰/۷۹	۳/۷۴
سطح معنی‌داری تغییرات دما طبق آزمون تی-تست	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱
اختلاف دما قبل و بعد از تقویت شمالگان در ناحیه (۷۰-۲۰ درجه شرقی و ۶۰-۲۰ درجه شمالی)	۱/۶۳	۱/۱۶	۱/۱۵	۱/۰۶
سطح معنی‌داری تغییرات دما طبق آزمون تی-تست	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	معنی دار نمی‌باشد

می‌افتد، با این‌که کاهش یخ دریا در این فصل نسبتاً کمتر از فصل‌های دیگر سال است. کاهش پوشش یخ دریا در زمستان منجر به گرمایش بزرگتر در اقیانوس و اعتدال در جو می‌شوند و باعث می‌شوند گرمای اضافی که توسط اقیانوس جذب و نگه داشته شده به جو بازگردد. روند عرضی میانگین مداری دمای سطح (درجه سانتی‌گراد در هر دهه) در منطقه جنوب غرب و غرب آسیا (۲۰ تا ۷۰ درجه شرقی در نیمکره شمالی) برای دوره (۲۰۲۱-۱۹۵۹) در چهار فصل در شکل ۳ نشان داده شده است.

این منطقه شامل جنوب غرب و غرب آسیا برای عرض‌های جغرافیایی پایین و دریای بارنت-کارا و بخشی از اقیانوس منجمد شمالی برای عرض‌های جغرافیایی بالاتر است. در شکل ۳، مشابه روند عرضی میانگین مداری دما در همه طول‌های جغرافیایی نیمکره شمالی در نمودارهای سمت راست شکل ۱، نرخ گرم شدن این بخش از قطب شمال نیز در فصل پاییز و زمستان قوی‌تر می‌باشد. با این حال در بهار و تابستان این افزایش دما نسبتاً ضعیف می‌باشد. شکل ۳ نشان می‌دهد که روند تغییرات دمای متوسط در این منطقه در تابستان بین سال‌های ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۱ تقریباً سه دهم درجه سانتی‌گراد بوده است که اندکی از دمای همین بازه طول جغرافیایی دمای قطب شمال بالاتر بود و فقط در این حالت است که گرمایش قطب شمال کمتر از عرض‌های پایین است و طبق شکل تنها در فصل تابستان در منطقه مورد مطالعه مشاهده شد، و این حالت با تغییرات روند میانگین مداری دما برای همه طول‌های جغرافیایی نیمکره شمالی (شکل ۱) مطابقت دارد.

درحالی‌که برای عرض‌های پایین‌تر آن، در همین فصل افزایش دما ۱/۱۵ درجه سانتی‌گراد بوده که ۰/۰۵ معنی‌دار است. همچنین در فصل تابستان دمای شمالگان نسبت به دوره قبل از گرمایش، به مقدار ۰/۷۹ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است که این تغییر طبق آزمون تی-تست ۰/۰۵ معنی‌دار است. درحالی‌که در همین فصل برای عرض‌های پایین‌تر منطقه شمالگان، افزایش دما ۱/۱۶ درجه سانتی‌گراد بوده که ۰/۰۵ معنی‌دار است. در فصل پاییز نیز دمای شمالگان نسبت به دوره قبل از گرمایش، به مقدار ۳/۷۴ درجه سانتی‌گراد افزایش داشته است که این تغییر طبق آزمون تی-تست، ۰/۰۱ معنی‌دار است و برای عرض‌های پایین‌تر در همین فصل افزایش دما ۱/۰۶ درجه سانتی‌گراد بوده که طبق آزمون تی-تست معنی‌دار نیست.

بی‌هنجاری فصلی دمای هوای نزدیک سطح زمین برای دوره‌های قبل و بعد از گرمایش سریع شمالگان در عرض‌های میانی و منطقه شمالگان در جنوب غرب و غرب آسیا در شکل ۲ نشان داده شده است. بی‌هنجاری بیشتر عرض‌های بالاتر به خصوص در فصل‌های پاییز و زمستان در دوره بعد از تقویت شمالگان به طور آشکار در شکل ۲ مشاهده می‌شود، که نشان‌دهنده گرمایش بیشتر این منطقه و تشدید وقوع پدیده تقویت شمالگان در این فصل‌ها است. گرمایش سطحی در فصل‌های بهار و تابستان کمتر از فصل‌های پاییز و زمستان اتفاق می‌افتد زیرا، از انرژی گرمایی در این فصل‌ها برای ذوب باقی‌مانده یخ دریا و گرم کردن ترازهای فوقانی اقیانوس استفاده می‌شود. همان‌طور که پیشتر نیز اشاره شد، عمده گرمایش در فصل زمستان به علت تغییرات پوشش یخ دریا اتفاق



شکل ۳- روند عرضی میانگین مداری دمای سطح (درجه سانتی‌گراد در هر دهه) در طول جغرافیایی ۲۰ تا ۷۰ درجه شرقی نیمکره شمالی برای دوره (۲۰۲۱-۱۹۵۹) در چهار فصل، خطوط مشکی ضخیم و پررنگ مناطقی هستند که طبق آزمون رگرسیون خطی سطح اعتماد در آن‌ها مساوی یا بیشتر از ۹۵ درصد است.

در همه طول‌های جغرافیایی نیمکره شمالی متفاوت است. در آن منطقه بالاترین میزان گرمایش در عرض ۹۰ درجه شمالی برای همه فصول غیر از فصل تابستان رخ می‌دهد. علت این تفاوت می‌تواند به دلیل کاهش پوشش برف روی سطوح خشکی در نزدیکی اقیانوس شمالگان طی فصل تابستان در دوره پس از تقویت شمالگان باشد به طوری که این کاهش حتی سریع‌تر از کاهش یخ دریا در منطقه شمالگان در عرض‌های جغرافیایی بالاتر بوده است (کومو و همکاران ۲۰۱۸).

به نظر می‌رسد که در این فصل از سال بیشتر انرژی اضافی مربوط به بازخورد سپیدایی سطحی قوی در تابستان برای ذوب یخ و گرم کردن قسمت‌های فوقانی اقیانوس به کار می‌رود و باعث کندتر شدن روند گرمایشی هوا در این فصل نسبت به فصول دیگر می‌شود. همچنین شکل نشان می‌دهد که در عرض‌های ۷۰ تا ۸۰ درجه شمالی یک افزایش دما در همه فصول نسبت به عرض‌های بالاتر و پایین‌تر وجود دارد که در واقع بیشترین روند افزایش دما می‌باشد که در قیاس با (شکل ۱) روند تغییرات میانگین مداری دما

جدول ۲- وردایی فصلی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان در (۷۰-۲۰ درجه شرقی و ۹۰-۷۰ درجه شمالی)

Region	JFM	AMJ	JAS	OND
(70°N-90°N) (20°E-70°E)	قبل از تقویت شمالگان: ۲/۳۲	قبل از تقویت شمالگان: ۰/۵۹	قبل از تقویت شمالگان: ۰/۲۶	قبل از تقویت شمالگان: ۱/۵۸
	بعد از تقویت شمالگان: ۱/۴۳	بعد از تقویت شمالگان: ۰/۵۲	بعد از تقویت شمالگان: ۰/۱۵	بعد از تقویت شمالگان: ۱/۵۱

سطح زمین در فصل‌های پاییز و زمستان بیشتر از فصل‌های بهار و تابستان است. این موضوع بیان می‌کند که وقوع رویدادهای فرین سرد یا گرم در دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان در فصل‌های پاییز و

جدول ۲ مقدار محاسبه شده وردایی فصلی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان، را در منطقه شمالگان نشان می‌دهد. در هر دو دوره وردایی دمای هوای نزدیک به

است. دلیل این موضوع این است که در این دوره حجم آب اقیانوس‌ها به دلیل ذوب یخ دریا افزایش یافته است و افزایش حجم آب اقیانوس‌ها منجر به کاهش تغییرپذیری دمای هوا شده است بنابراین احتمال وقوع رویدادهای فرین هواشناسی در کلیه فصل‌ها در منطقه شمالگان کاهش یافته است.

زمستان بیشتر بوده است که می‌تواند ناشی از گرمایش سریع‌تر منطقه شمالگان نسبت به سایر مناطق کره زمین باشد. با توجه به مقادیر وردایی در منطقه شمالگان برای دوره بعد از گرمایش سریع شمالگان نسبت به دوره قبل از گرمایش سریع شمالگان می‌توان گفت که مقدار وردایی در همه فصل‌ها کاهش یافته

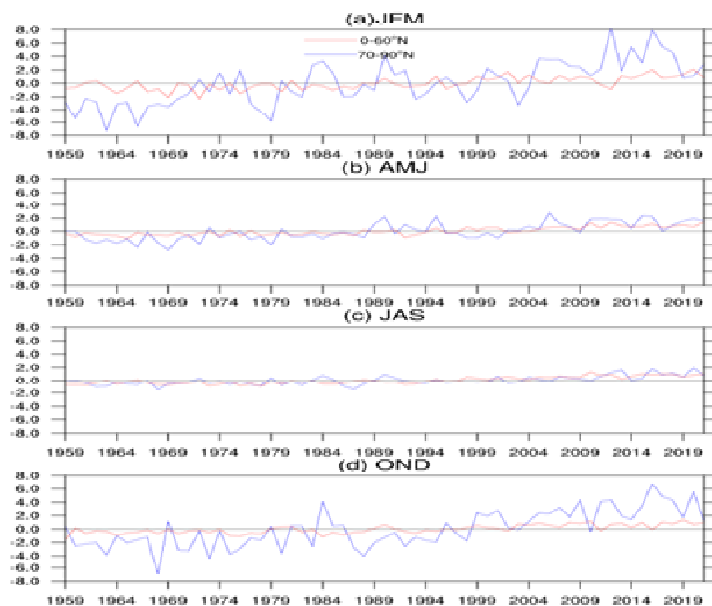
جدول ۳: وردایی فصلی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین برای دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان در (۷۰-۲۰ درجه شرقی و ۶۰-۲۰ درجه شمالی)

Region	JFM	AMJ	JAS	OND
(20°N-60°N) (20°E-70°E)	قبل از تقویت شمالگان: ۳/۷۵	قبل از تقویت شمالگان: ۱/۰۳	قبل از تقویت شمالگان: ۰/۶۶	قبل از تقویت شمالگان: ۱/۹۲
	بعد از تقویت شمالگان: ۳/۴۴	بعد از تقویت شمالگان: ۱/۱۶	بعد از تقویت شمالگان: ۰/۹۱	بعد از تقویت شمالگان: ۱/۶۱

شمالی) مقایسه شده است. شکل ۴، بی‌هنجاری دمای هوا را در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین طی فصل‌های مختلف سال بین عرض‌های پایین‌تر (۰ تا ۶۰ درجه شمالی) و منطقه شمالگان (۷۰ تا ۹۰ درجه شمالی) را از سال ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴، از ابتدای دوره مورد مطالعه تا اواخر دهه ۱۹۹۰ بی‌هنجاری دمای هوا در منطقه شمالگان عموماً در همه فصل‌ها منفی بوده است اما پس از آن تا انتهای دوره مثبت شده است. همچنین بی‌هنجاری‌های مثبت دمای هوای نزدیک سطح زمین در منطقه شمالگان از اواخر دهه ۱۹۹۰ به ویژه فصل‌های پاییز و زمستان به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر از منطقه شمالگان بوده است. با توجه به شکل، بی‌هنجاری دمای هوای نزدیک به سطح زمین در دوره پس از تقویت شمالگان در فصل‌های پاییز و زمستان نسبت به فصل بهار و تابستان به طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر است. که در مورد دلایل آن قبلاً بحث شد. افزایش بی‌هنجاری دمای هوای نزدیک سطح زمین در منطقه شمالگان در همه فصل‌ها و به خصوص در فصل‌های پاییز و زمستان نسبت به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر باعث کاهش گرادیان نصف‌النهاری دمای هوای نزدیک سطح زمین در طی سال‌های (۲۰۲۱ - ۱۹۵۹) شده است.

جدول ۳ مقدار محاسبه شده وردایی فصلی دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین را برای دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان، در منطقه جنوب غرب و غرب آسیا نشان می‌دهد که در دوره بعد از تقویت شمالگان، وردایی دمای هوای نزدیک به سطح زمین در فصل تابستان و بهار افزایش یافته است. بنابراین احتمال وقوع رویدادهای فرین هواشناسی در این فصل‌ها در منطقه مورد مطالعه نسبت به دوره قبل از گرمایش افزایش یافته است. از روش‌هایی که برای ارزیابی پدیده تقویت شمالگان مورد استفاده قرار می‌گیرد، بررسی تغییرات دمای هوا در منطقه شمالگان نسبت به نیمکره شمالی یا کل کره زمین است (هولند و بیتز، ۲۰۰۳). این موضوع به عوامل گوناگونی از جمله از بین رفتن یخ دریا، آب شدن برف، نازک و شکننده شدن پوشش یخ دریا، افزایش بخار آب و تفاوت بین منطقه شمالگان و عرض‌های پایین‌تر در رفتار آهنگ کاهش<sup>۳</sup> دما و اثرات بازخورد تابشی بستگی دارد. با توجه به این موضوع، در این مطالعه به جهت سادگی برای ارزیابی پدیده تقویت شمالگان، بی‌هنجاری دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در منطقه شمالگان (عرض ۷۰ تا ۹۰ درجه شمالی) نسبت به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر (عرض ۰ تا ۶۰ درجه

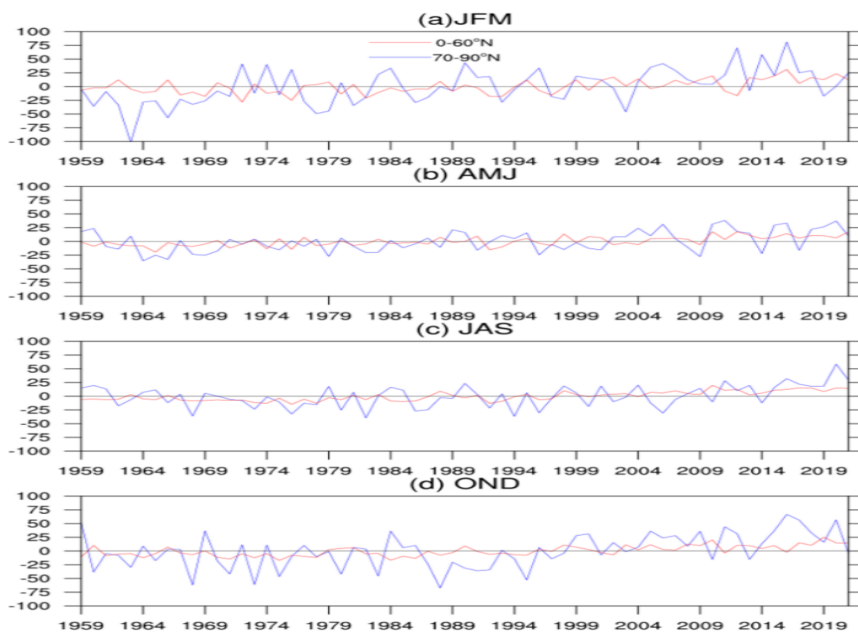
<sup>3</sup> Lapse rate



شکل ۴- سری زمانی بی‌هنجاری دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین در فصول مختلف سال طی دوره زمانی (۲۰۲۱ - ۱۹۵۹) برای منطقه شمالگان (۷۰ تا ۹۰ درجه شمالی) و عرض‌های (۰ تا ۶۰ درجه شمالی).

در فصول مختلف سال طی دوره ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۱ که برای منطقه شمالگان (۷۰ تا ۹۰ درجه شمالی) و عرض‌های (۰ تا ۶۰ درجه شمالی) میانگین‌گیری شده‌اند در شکل ۵ نشان داده شده است.

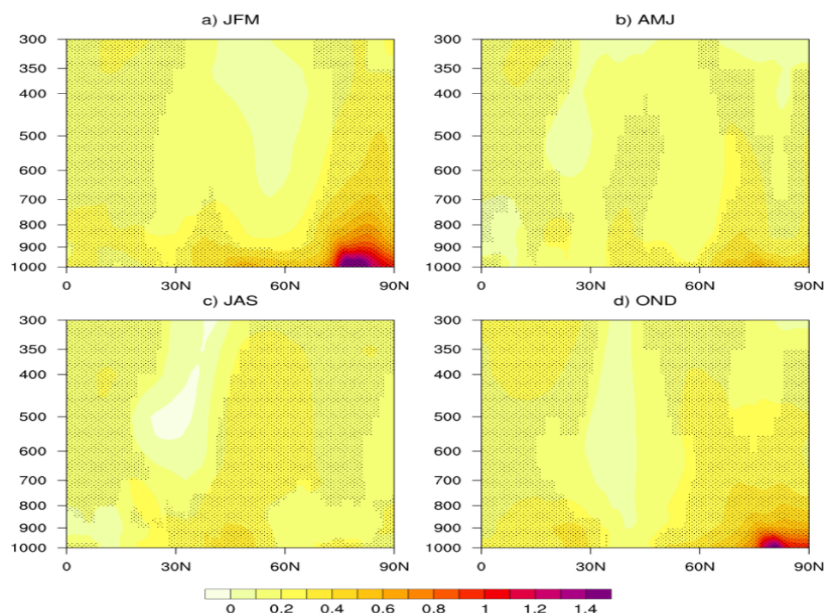
تاکنون تغییرات دمای هوا در نزدیکی سطح زمین مورد بررسی قرار گرفته است، در حالی که انتظار می‌رود ترازهای میانی و فوقانی جو در منطقه شمالگان نیز تحت تاثیر قرار گیرند. تغییرات بین سالانه بی‌هنجاری ضخامت لایه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال



شکل ۵- سری زمانی بی‌هنجاری ضخامت لایه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال (m) در فصول مختلف سال طی دوره زمانی (۲۰۲۱ - ۱۹۵۹) برای منطقه شمالگان (۷۰ تا ۹۰ درجه شمالی) و عرض‌های پایین‌تر (۰ تا ۶۰ درجه شمالی).

۱۰۰۰ هکتوپاسکال نیز افزایش یافته است. افزایش بی‌هنجاری ضخامت یک لایه جو در یک منطقه به منزله گرم‌تر شدن لایه جوی در آن منطقه است. بنابراین، می‌توان گفت که افزایش محسوس بی‌هنجاری ضخامت لایه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در منطقه شمالگان نسبت به عرض‌های میانی نیمکره شمالی زمین نشان دهنده گرم‌شدن سریع‌تر لایه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در منطقه شمالگان است. به بیان دیگر، گرمایش سریع شمالگان در فصل‌های پاییز و زمستان تنها محدود به سطح زمین نیست، بلکه تا ارتفاع‌های بالاتر و ردسپهر نیز گسترش می‌یابد. در نتیجه انتظار می‌رود که گرمایش به طور موثری بر الگوهای جوی در عرض‌های میانی اثرگذار باشد. سطح مقطع عرض جغرافیایی - ارتفاع روند تغییر دمای هوا در نیمکره شمالی طی دوره ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۱ در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل، عموماً در اکثر مناطق نیمکره شمالی گرمایش در و ردسپهر اتفاق افتاده است، اما آهنگ گرمایش منطقه شمالگان در همه فصول، به ویژه پاییز و زمستان، شدیدتر است.

ارزیابی شاخص بی‌هنجاری ضخامت لایه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای آگاهی از میزان تاثیر تقویت شمالگان بر گردش‌های بزرگ مقیاس مناسب‌تر است زیرا تغییرات ضخامت یک لایه نشان دهنده تفاوت گرمایش در یک لایه عمیق جوی است که به طور مستقیم بر بادهای ترازهای فوقانی جو اثر می‌گذارد (فرانسیس و واوروس، ۲۰۱۵). با توجه به شکل ۵، از ابتدای دوره تا حدود سال ۱۹۹۵ بی‌هنجاری ضخامت لایه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در تمامی فصل‌ها منفی است. از سال ۱۹۹۵ به بعد و با تشدید آهنگ گرمایش منطقه شمالگان، در تمامی فصل‌ها به خصوص در فصل‌های پاییز و زمستان، بی‌هنجاری ضخامت لایه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در منطقه شمالگان مثبت است و نسبت به عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر افزایش یافته است که با شکل ۳ که بی‌هنجاری دمای هوای نزدیک سطح زمین را نشان می‌دهد هماهنگی دارد. بنابراین، در فصل‌های پاییز و زمستان هم زمان با افزایش دمای هوا در نزدیکی سطح زمین در منطقه شمالگان، ضخامت لایه ۵۰۰ تا

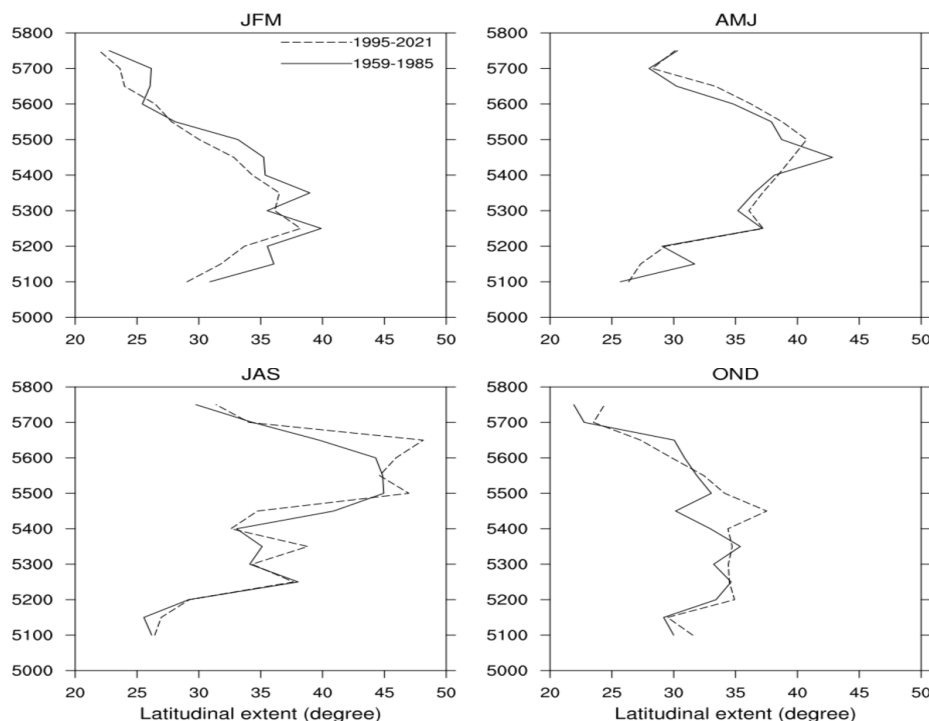


شکل ۶- سطح مقطع عرض جغرافیایی - ارتفاع روند تغییر دمای هوا ( $^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ ) در نیمکره شمالی برای دوره زمانی (۲۰۲۱ - ۱۹۵۹) در چهار فصل، مناطق نقطه چین‌ها مناطقی هستند که سطح اعتماد در آنها طبق آزمون رگرسیون خطی مساوی یا بیشتر از ۹۵ درصد است.

منطقه کاهش قابل توجهی داشته‌است و بستر آب‌های آزاد افزایش یافته‌است. افزایش گستره آب‌های آزاد در منطقه شمالگان موجب شده‌است تا شارهای گرمایی بیشتری از طرف اقیانوس به جو انتقال داده شود و دمای هوای نزدیک سطح زمین در این منطقه افزایش یابد. جهت بررسی پیچ و تاب امواج تراز میانی جو در دوره بعد از تقویت شمالگان در مقایسه با دوره قبل از تقویت شمالگان، دامنه پربندهای ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (فاصله بین پشته و ناوه) در منطقه جنوب‌غرب و غرب آسیا (۲۰ تا ۷۰ درجه شرقی و ۲۰ تا ۶۰ درجه شمالی) در فصول مختلف سال طی دو دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان بررسی شده‌است. برای این منظور دامنه پربندهای مختلف در این منطقه ابتدا به طور روزانه محاسبه شده‌است و سپس میانگین فصلی آنها برای دو دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان به‌دست آمده‌است که نتایج آن در شکل ۷ رسم شده‌است.

به علاوه، جز فصل تابستان، در بقیه فصول در سطح زمین بیشینه مقدار دما را دارد و با افزایش ارتفاع، دما کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر آن است که احتمالاً دلیل اصلی گرمایش سریع شمالگان بازخورد سپیدایی سطح است تا انتقال گرما از عرض‌های پایین‌تر توسط گردش کلی جو. همان‌طور که قبلاً توضیح داده شد، دلیل گرمایش سطحی منطقه شمالگان در فصل تابستان این است که انرژی گرمایی اضافی دریافتی در این فصل عمدتاً صرف ذوب یخ دریا و گرمایش لایه آمیخته اقیانوس فوقانی می‌گردد. در نتیجه، دمای هوا در نزدیکی سطح زمین چندان افزایش نداشته و تفاوت محسوسی با آهنگ گرمایش ارتفاع‌های بالاتر ندارد.

**تقویت شمالگان و تغییرات نصف‌النهاری دامنه امواج سیاره‌ای در جنوب‌غرب و غرب آسیا:** با توجه به این که از اواخر دهه ۱۹۸۰ ذوب یخ دریا در منطقه شمالگان با سرعت بیشتری اتفاق افتاده‌است (فرانسیس و واوروس ۲۰۱۲)، گستره یخ دریا در این



شکل ۷- میانگین‌های فصلی گستره نصف‌النهاری خطوط هم مقدار ارتفاع ژئوپتانسیل (متر) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در منطقه جنوب‌غرب و غرب آسیا (۲۰ تا ۷۰ درجه شرقی و ۲۰ تا ۶۰ درجه شمالی) در فصول مختلف طی دوره زمانی (۱۹۸۵-۱۹۵۹) و (۲۰۲۱-۱۹۹۵) قبل و بعد از تقویت شمالگان.

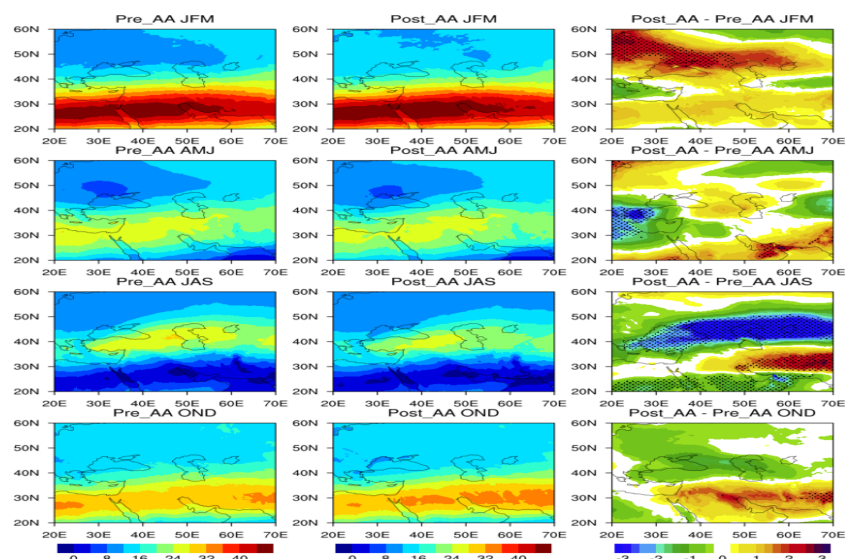
دوره قبل از گرمایش سریع شمالگان در نزدیک خط هم‌ارتفاع ۵۴۵۰ ژئوپتانسیل متر می‌باشد و در دوره بعد از گرمایش سریع شمالگان به خط هم‌ارتفاع ۵۵۰۰ ژئوپتانسیل متر جابجا شده است. در فصل بهار و زمستان گستره نصف‌النهاری خطوط هم‌مقدار ارتفاع ژئوپتانسیل متر برای هر دو دوره تغییر چندانی نداشته است و تقریباً یکسان بوده است.

#### تقویت شمالگان و تغییرات سرعت جت

##### جنب‌حاره‌ای در جنوب‌غرب و غرب آسیا:

همان‌طور که پیشتر نشان داده شد، در اثر وقوع پدیده گرمایش سریع شمالگان، گردایان نصف‌النهاری دمای هوا بین منطقه شمالگان و عرض‌های میانی کاهش یافته است (شکل ۴ و ۵). پیامد این شرایط می‌تواند کاهش سرعت باد مداری در ترازهای فوقانی جو باشد که می‌تواند منجر به افزایش فراوانی وقوع رویدادهای فرین هواشناسی شود (کوهن و همکاران، ۲۰۱۴). سرعت جریان جتی در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال در عرض‌های میانی منطقه جنوب‌غرب و غرب آسیا در فصل‌های مختلف سال طی دو دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان در شکل ۸ نشان داده شده است.

بیشینه دامنه امواج تراز میانی جو در فصل تابستان در دوره قبل از گرمایش سریع شمالگان در نزدیکی خط هم‌ارتفاع ۵۵۰۰ پتانسیل‌متر است، که برای دوره بعد از گرمایش سریع شمالگان با ارتفاع ۵۶۵۰ پتانسیل‌متر جابجا شده است. بیشترین گستره نصف‌النهاری خطوط هم‌مقدار ارتفاع در دوره قبل از گرمایش شمالگان در فصل تابستان تقریباً ۴۴ درجه بوده است و در دوره بعد گرمایش سریع شمالگان به ۴۸ درجه افزایش یافته است که بیشترین تغییر در بیشینه گستره نصف‌النهاری خطوط هم‌مقدار ارتفاع در نتیجه گرمایش سریع شمالگان می‌باشد. همچنین بیشینه دامنه امواج تراز میانی جو در فصل پاییز در دوره قبل از گرمایش سریع شمالگان در نزدیکی خط هم‌ارتفاع ۵۳۵۰ پتانسیل متر است، که برای دوره بعد از گرمایش سریع شمالگان با ارتفاع ۵۴۵۰ پتانسیل‌متر جابجا شده است. بیشترین گستره نصف‌النهاری خطوط هم‌مقدار ارتفاع در دوره قبل از گرمایش سریع شمالگان در فصل پاییز تقریباً ۳۶ درجه بوده است و در دوره بعد از گرمایش به ۳۸ درجه افزایش یافته است. بیشینه دامنه امواج تراز میانی جو در فصل بهار در

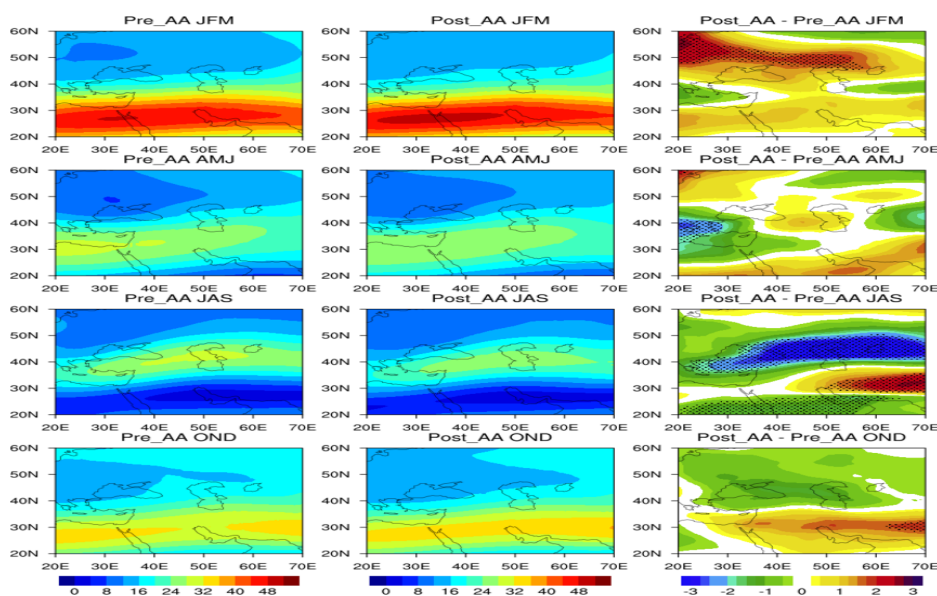


شکل ۸- تغییرات فصلی چینش قائم باد مداری در تراز (۲۵۰-۱۰۰۰) هکتوپاسکال ( $ms^{-1}$ ) برای دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان در محدوده (۷۰-۲۰ درجه شرقی و ۹۰-۷۰ درجه شمالی)، نقطه‌چین‌ها مناطقی هستند که طبق آزمون تی-تست سطح اعتماد در آنها مساوی و یا بیشتر از ۹۵ درصد است.



انتشار امواج غربی انتظار می‌رود که الگوهای جوی در عرض‌های میانی منطقه مورد مطالعه در فصل تابستان ماندگارتر شوند در نتیجه فراوانی وقوع رویدادهای فرین هواشناسی در این منطقه در فصل تابستان افزایش می‌یابد.

مطابق شکل ۸، سرعت جریان جتی در فصل تابستان در دوره پس از تقویت شمالگان بیشترین کاهش را داشته است که با شکل ۷ کاملاً همخوانی دارد. در شکل ۷ افزایش گستره نصف‌النهاری خطوط هم‌مقدار ارتفاع ژئوپتانسیل در فصل تابستان مشاهده شد. با افزایش دامنه نصف‌النهاری و کاهش سرعت



شکل ۹ - تغییرات فصلی سرعت جریان باد در تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال ( $ms^{-1}$ ) برای دوره قبل و بعد از تقویت شمالگان در محدوده (۷۰-۲۰ درجه شرقی و ۶۰-۲۰ درجه شمالی)، نقطه چین‌ها مناطقی هستند که طبق آزمون تی-تست سطح اعتماد در آنها مساوی و یا بیشتر از ۹۵ درصد است.

را در مقایسه با فصول دیگر در این منطقه در این فصل دارد. طبق شکل‌های ۴ و ۵ انتظار می‌رود سرعت جریان جتی چندان تغییری نکند، اما عکس این موضوع در فصل تابستان در منطقه غرب و جنوب‌غرب آسیا مشاهده می‌شود. این موضوع دلایل مختلفی می‌تواند داشته باشد که می‌توان به تاثیر سامانه‌های جوی موثر بر این منطقه در این فصل از جمله پرفشار جنب حاره‌ای در غرب و ناوه کم فشار و مونسون هند در شرق این منطقه اشاره کرد که از نظر دینامیکی قویتر هستند. در نتیجه نقش عوامل دیگر از جمله گرمایش سریع شمالگان کم‌رنگ‌تر می‌شود. یافته‌های محققین در دهه‌های اخیر (علیچانی و همکاران، ۱۳۹۸؛ موحدی و همکاران، ۱۳۹۴؛ حجاری‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱؛ عساکره و همکاران، ۱۳۹۵) نشان

در مورد باد تراز ۲۵۰ هکتوپاسکال همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، در پاییز (اکتبر، نوامبر، دسامبر) سرعت باد در دوره بعد از تقویت شمالگان کمی افزایش یافته است، اما برعکس در فصل‌های دیگر سرعت باد در دوره بعد از تقویت شمالگان کاهش یافته است که کاملاً با شکل ۸ همخوانی دارد. بخصوص در فصل تابستان کاهش شدیدی داشته است. در نتیجه تقویت شمالگان، شیو نصف‌النهاری دمای هوا در منطقه شمالگان (۷۰-۹۰ درجه شمالی) نسبت به عرض‌های پایین‌تر (۶۰-۷۰ درجه شمالی) در کلیه فصول کاهش داشته است، با توجه به اینکه کمترین میزان گرمایش در منطقه شمالگان در دوره پس از تقویت شمالگان مربوط به فصل تابستان می‌باشد، بنابراین شیو نصف‌النهاری دما کمترین تغییر

دوره پیش و پس از تقویت شمالگان (۱۹۸۵-۱۹۵۹) و (۲۰۲۱-۱۹۹۵) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تغییرپذیری بین‌سالانه دمای هوا در نزدیکی سطح زمین در منطقه شمالگان در دوره مورد مطالعه بسیار شدیدتر از تغییرپذیری آن در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که اقلیم منطقه شمالگان با شدت بیشتری تحت تاثیر واداشت‌های اقلیمی طبیعی قرار می‌گیرد. در دوره پس از تقویت شمالگان، تغییرپذیری دمای هوا در شمالگان در همه فصول کاهش یافته است. زیرا در مقایسه با دوره پیش از تقویت شمالگان، سطح گسترده‌تری از اقیانوس آزاد در معرض جو قرار گرفته است. در هر دو دوره پیش و پس از تقویت شمالگان، تغییرپذیری دمای هوا در نزدیکی سطح زمین در منطقه شمالگان کم‌تر از نیمی از تغییرپذیری دمای هوا در زمستان است، که بیانگر وقوع رویدادهای فرین بیشتر در منطقه شمالگان طی فصل زمستان است. در دوره مورد مطالعه، هر دو منطقه شمالگان و غرب آسیا گرم شدند، اما گرمایش شمالگان در فصل‌های زمستان و پاییز بسیار شدیدتر بوده است. در هر دو منطقه، آهنگ گرمایش در نزدیک سطح زمین بسیار بیشتر از گرمایش ورددسپهر میانی و فوقانی بوده است. برخلاف الگوی گرمایشی شمالگان و سرمايشی قاره‌ای که در شمال شرق آسیا مشاهده شده است (بلک‌پورت و همکاران، ۲۰۱۹)، نتایج نشان داد که غرب آسیا در سال‌های اخیر به شدت گرم شده است و دامنه امواج در همه فصول غیر از فصل زمستان گسترش یافته و به ارتفاعات بالاتر تغییر مکان داده‌اند. بیشترین تغییر در فصل تابستان می‌باشد که دامنه امواج از ۴۴ درجه به ۴۸ درجه و خطوط هم‌ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از ۵۵۰۰ متر به ۵۶۵۰ متر تغییر مکان داده است. همچنین مشاهده شد که چینش قائم سرعت باد مداری و سرعت باد در جنوب غرب و غرب آسیا در دوره بعد از تقویت شمالگان در همه فصول، جز فصل پاییز کاهش داشته‌اند و بیشترین کاهش سهم در فصل تابستان است. افزایش دامنه نصف‌النهاری و کاهش سرعت انتشار امواج غربی باعث

می‌دهد که بر اثر گرمایش جهانی سامانه پرفشار جنب‌حاره‌ای تقویت شده و تغییر مکان به عرض‌های بالاتر داده و گستردگی بیشتر داشته است. در منطقه مورد مطالعه سرعت رودباد در دوره پس از گرمایش سریع شمالگان غیر از فصل پاییز در کلیه فصول کاهش داشته است. علت می‌تواند این باشد که در کل ورددسپهر کمترین روند گرمایش در منطقه غرب و جنوب غرب آسیا طی دوره پس از تقویت شمالگان در فصل پاییز رخ داده است. این موضوع می‌تواند در کاهش شدت پیچک‌های همدیدی یا توفان‌ها در منطقه مورد مطالعه در فصل پاییز طی دوره پس از تقویت شمالگان نقش داشته باشد. پیچک‌های همدیدی می‌توانند بر شدت رودباد تاثیرگذار باشند (کوهن و همکاران، ۲۰۱۴). بنابراین، بازخورد ناشی از پیچک‌های همدیدی یا توفان‌ها ممکن است در پاسخ شدت رودباد در منطقه غرب و جنوب غرب آسیا به گرمایش سریع شمالگان در فصل پاییز نقش داشته باشد، به نحوی که شدت رودباد در منطقه غرب و جنوب غرب آسیا در فصل پاییز طی دوره پس از تقویت شمالگان تغییر چندانی نداشته است. با این حال، به دلیل تاثیرگذاری عوامل مختلف بر رودباد در عرض‌های میانی (کوهن و همکاران، ۲۰۱۴)، نقش عوامل احتمالی دیگر که بر ارتباط بین شدت رودباد در منطقه غرب و جنوب غرب آسیا و گرمایش سریع شمالگان طی فصل پاییز تاثیرگذارند باید مورد بررسی قرار گیرد.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی تاثیر گرمایش سریع شمالگان بر الگوهای جوی در عرض‌های میانی جنوب غرب و غرب آسیا (۷۰-۲۰ درجه شرقی و ۶۰-۲۰ درجه شمالی) از داده‌های ERA-5 با تفکیک افقی  $0.25 \times 0.25$  درجه برای دوره زمانی (۲۰۲۱-۱۹۵۹) استفاده شده است. تاثیر گرمایش سریع شمالگان بر تغییرات دما، موقعیت و دامنه امواج در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، چینش قائم باد مداری و سرعت باد (جریان جتی) در ترازهای فوقانی جو در

تایید می‌کند. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج علیزاده و همکاران (۲۰۲۱)، بارنس و همکاران (۲۰۱۳) و فرانسیس و همکاران (۲۰۱۲) همخوانی داشت.

شده که الگوهای جوی در عرض‌های میانی منطقه مورد مطالعه ماندگارتر شوند که این تغییرات منجر به افزایش فراوانی رخدادهای فرین آب‌وهوایی خصوصاً در فصل تابستان شد. افزایش وردایی دمای هوا در منطقه مورد مطالعه در فصل تابستان و بهار نیز این موضوع را

## منابع

- اسمعیل زاده، زینب (۱۳۹۲). آشکارسازی ارتباط بین تغییرات برخی شاخص‌های رطوبت نسبی سواحل جنوب ایران با الگوهای دورپیوند اقیانوس آرام و اقیانوس هند. پایان‌نامه کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی در برنامه ریزی محیطی، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم انسانی، گروه جغرافیای طبیعی.
- حجازی زاده، زهرا؛ علیجانی، بهلول؛ عساکره، حسین؛ فتاحیان، مختار، (۱۴۰۱). واکاوی روند ارتفاع ژئوپتانسیل جو بر روی ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۱)، ۲۰۱-۲۱۶. DOI: 10.22067/geoeh.2021.70712.1068
- حجتی، زهرا و مسعودیان، سید ابوالفضل، (۱۴۰۰). واکاوی تغییرات گردش‌های جوی عرض‌های میانه و پیوند آن با وردش‌های دمایی در ایران، مجله جغرافیا و توسعه، ۱۹(۶۲)، ۳۱-۵۲.
- خسروی، محمود، (۱۳۸۳). بررسی روابط بین الگوهای چرخشی کلان مقیاس نیمکره شمالی با خشکسالی‌های سالانه سیستان و بلوچستان، جغرافیا و توسعه، بهار و تابستان ۱۳۸۳، ص ۱۸۸-۱۶۷.
- عزیزی، جوانشیر، رسول زاده، علی، رحمتی، اکبر، شایقی، افشین، و باختر، آیدین، (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد داده‌های بازتحلیل شده Era-5 در تخمین بارش روزانه و ماهانه در استان اردبیل. تحقیقات آب و خاک ایران (علوم کشاورزی ایران)، ۵۱(۱)، ۲۹۳۷-۲۹۵۱. SID. <https://sid.ir/paper/402729/fa>
- عساکره، حسین؛ قایمی، هوشنگ. (۱۳۹۵). اقلیم‌شناسی مرز شمالی پشته پرفشار جنب حاره بر روی ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۲۵(۲)، ۳۲-۲۱.
- علیجانی، بهلول، طولابی‌نژاد، میثم، کربلایی درئی، علیرضا، (۱۳۹۸). رفتارسنجی اثر گرمایش جهانی بر پرفشار جنب حاره. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، ۵۱(۱)، ۳۷-۵۰. <https://sid.ir/paper/406461/fa>
- درگاهیان، فاطمه؛ رضوی‌زاده، سمانه؛ لطفی نسب اصل، سکینه، (۱۴۰۱). آنومالی مثبت دمای ایران بیش از دو برابر جهانی براساس داده‌های ECMWF ERA5. doi: 10.22092/irn.2022.357773.1446,37-44, 7(4).
- قلی‌پور، جمیله، ثنایی‌نژاد، سیدحسین؛ مفیدی، عباس، علیزاده، امین، (۱۳۹۵). تعیین آغاز فصل تابستان در ایران بر اساس پرش ناگهانی شمال سوی جت جنب حاره بر روی خاورمیانه، مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۲۰، زمستان ۱۳۹۵، ص ۷۱-۵۷، DOI: 10.22067/geo.v5i4.57806
- معمدی، محمد؛ احترامیان، کوروش؛ شهاب‌فر، علیرضا، (۱۳۸۶). بررسی سیگنال دورپیوند ENSO با نوسانات بارندگی و دما در استان خراسان، مجله علوم محیطی، شماره ۴
- مطلبی زاده، سلماز، (۱۳۹۴). شناسایی، طبقه بندی و تحلیل سینوپتیک امواج سرمای منطقه شمال غرب ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مخاطرات آب و هوایی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، دانشکده علوم انسانی.
- محمدی قلعه‌نی، مهدی، شرفی، سعید، (۱۴۰۱). ارزیابی دقت پایگاه داده‌های ERA5 و CRUTS4. 05 برای متغیرهای بارش، دما و تبخیر-تعرق پتانسیل در مختلف ایران. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶(۵). ۸۷۹-۸۹۰.
- موحدی، سعید؛ کاشکی، عبدالرضا؛ حسینی، سید محمد؛ فاطمی‌نیا، فخری سادات، (۱۳۹۴). بررسی گستره‌ی مکانی-زمانی پرفشار جنب حاره ای در نیمکره شمالی، نشریه جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۶(۳). [magiran.com/p1456386](http://magiran.com/p1456386)
- وثوقی، منیژه، منصوری، داریوش، علی اکبری بیدختی، عباسعلی، (۱۴۰۱). تاثیر جدیدترین داده‌های بازتحلیل مدل ECMWF بر تغییرات دمای سطحی آب دریای خزر. هیمدروفیزیک، ۷(۲)، ۶۷-۷۸. doi: 20.1001.1.24767131.1400.7.2.6.9

25. Cohen, J., Screen, J A., Furtado, J C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J., Jones, J., (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather, *NatureGeoscience*, 7: 627-637.
26. Cohen, J., Zhang, X., Francis, J., Jung, T., Overland, Kwok J.R., Ballinger, T.J., Bhatt, U.S., Chen, H.W., Coumou, D., Feldstein, S., Gu, H., Handorf, D., Henderson, G., Ionita, M., Kretschmer, M., Laliberte, F., Lee, S., Linderholm, H.W., Maslowski, W., Peings, Y., Pfeiffer, K., Rigor, I., Semmler, T., Stroeve, J., Taylor, P.C., Vavrus, S., Vihma, T., Wang, S., Wendisch, M., Wu, Y., Yoon, J. (2020). Divergent consensus on Arctic amplification influence on midlatitude severe winter weather. *Nat. Clim. Chang.* 10, 20–29.
27. Coumou, D., Di Capua G., Vavrus, S., Wang, L., Wang, S., Univ of California CUS D. (2018). The influence of Arctic amplification on mid-latitude summer circulation. *Nature communications* 9(1):295
28. Francis, J.A., and Vavrus, S.J. (2012). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L06801. doi:10.1029/2012GL051000
29. Francis, J.A., Skific, N. (2015). Evidence linking rapid Arctic warming to mid-latitude weather patterns. *Phil Trans R Soc A* 373:2014017, doi.org/10.1098/rsta.2014.0170
30. Francis J.A., and Vavrus S.J. (2015). Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. *Environ Res Lett* 10:014005
31. Francis, J. (2015). Evidence for a wavier jet stream in response to rapid Arctic warming. *Environ. Res. Lett.*, 10, 014005, doi: 10. 1088/1748-9326/10/1/014005
32. Francis, J.A. (2015). The Arctic matters: extreme weather responds to diminished Arctic Sea ice, *Environ. Res. Lett.* DOI: 10.1088 /1748-9326/10/ 9/091002.
33. Field, Christopher B., Barros, Vicente R.; Mach, Katharine J., Mastrandrea, Michael D., et al. "IPCC, Climate ۱۵. یاراحمدی، داریوش، عزیززی، قاسم، (۱۳۸۶). تحلیل چند متغیره ارتباط میزان بارش فصلی ایران و شاخص‌های اقلیمی. مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۶۲، صفحات ۱۶۱ .  
<https://sid.ir/paper/5453/fa>
16. Alizadeh-Choobari, O., and Najafi, S. (2017). Extreme weather events in Iran under a changing climate. *Clim Dyn.*, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3602-4>
17. Alizadeh, O., and Lin, Z. (2021). Rapid Arctic warming and its link to the waviness and strength of the westerly jet stream over West Asia. *Glob. Planet. Change* 199 103447
18. Alizadeh, O. (2022). Amplitude duration variability and seasonal frequency analysis of the El Nino-Southern oscillation. *Clim Change*, 174, 20.
19. Berrisford, P., Dee, D.P., Fielding, K., Fuentes, M., Kallberg, P., Kobayashi, S., Uppala S.M. (2009).
20. Barnes, E.A. (2013). Revisiting the evidence linking Arctic amplification to extreme weather in midlatitudes. *Geophys Res Lett* 40: 1-6 doi/full/10.1002/grl.50880
21. Blackport, R., Screen, J.A., van der Wiel, K., and Bintanja, R. (2019). Minimal influence of reduced Arctic Sea ice on coincident cold winters in mid-latitudes. *Nat. Clim. Chang.* 9, 697–704.
22. Boilley, A., and Wald, L. (2015). Comparison between meteorological re-analyses from ERA Interim and MERRA and measurements of daily solar irradiation at surface. *Renewable Energy* 75:135- 143
23. Cohen, J., Agel, L., Barlow, M., and Entekhabi, D. (2023). No detectable trend in mid-latitude cold extremes during the recent period of Arctic amplification. *Communications Earth & Environment* 4 (341). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01008-9>
24. Cohen, J., Foster, J., Barlow, M., Saito, K., Jonce, J., (2010). Winter 2009-2010: A Case study of an extreme Arctic Oscillation event, *Geophysical Research Letters*, 37, L17707. doi:10.1029 /2010GL044256

39. Park, T W., Hoi, H C., (2010). Relationship between the Arctic Oscillation and Cold Surges over East Asia, *Journal of Climate*, 24: 68 -83.
40. Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., et al., (2022). The Arctic has warmed nearly fourtimes faster than the globe since 1979: *Communications Earth & Environment*, 3(1), 168.
41. Schwing, F. B., Murphree, T. and P.M. Green, (2002). The Northern Oscillation Index (NOI): a newclimate index. *Progress in Oceanography*, 53: 115–139
42. Serreze, M.C., Barrett, AP., Stroeve, JC., Kindig, DM., Holland, MM., (2009). The emergence of surface-based Arctic amplification. *Cryosphere* 3:11–19.
43. Screen, J.A., Simmonds, I. (2013). Exploring links between Arctic amplification and mid-latitude weather, *Geophysical Research Letters*, volume 40, no. 5, pages 959-964doi:10.1002/grl.50174.
44. Simmonds, I. (2015). Comparing and contrasting the behaviour of Arctic and Antarctic Sea ice over the 35year period 1979-2013. *Ann. Glaciol.* 56 (69), 18–28
45. The ERA-Interim archive. Era Report Series (1). ECMWF, Reading, UK.
46. Wallace, J.M., Gutzler, D. (1981). Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter, *Monthly weather Review*, 109: 784-812.
- Change (2014): Impacts, Adaptation, and Vulnerability – Technical Summary" (PDF). Intergovernmental Panel on Climate Change
34. IPCC 2013- Climate Chang. (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changeed T F Stocker, D Qin, G-K Plattner, M Tignor, S K Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, V Bex and P M Midgley (Cambridge: Cambridge University Press) p.1535
35. Li, D., Li, T., Jiang, H., Björck, S., Seidenkrantz, M., S, Zhao, M., Knudsen, K. L. (2018). East Asian winter monsoon variations and their links to Arctic Sea ice during the last millennium, inferred from sea surface temperatures in the Okinawa Trough. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 33, 61–75, doi.org/10.1002/2016PA003082
36. Mongelli, I, G., Tassielli, B., Notarnicola. (2006). Global warming.
37. Müller, G.V., Ambrizzi, T. (2007). Teleconnection Patterns and Rossby Wave Propagation Associated to Generalized Frosts over Southern South America. *Clim. Dyn.*, 29(6), 633-645.
38. NASA. "More Extreme Weather Events Forecast". Retrieved June 15, 2014. "Global warming means more snowstorms: scientists". 1 March 2011.

