

بررسی شاخص‌های جریان جتی در فصل‌های گرم و سرد سال در دو نیم‌کره شمالی و جنوبی (۲۰۲۳-۱۹۴۸)

محمد مرادی*^۱

۱- دانشیار و عضو هیات علمی پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو

moradim36@gmail.com

چکیده

در این پژوهش با استفاده از داده‌های دما، ارتفاع و مولفه‌های افقی بردار باد در ۶ سطح فشاری زیرین از ۴۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال که در بایگانی NCEP/NCAR در دسترس است، تغییرات فصلی میانگین وزنی سرعت باد، فشار و عرض جغرافیایی در دو نیم‌کره شمالی و جنوبی در دوره آماری ۲۰۲۳-۱۹۴۸، با اصلاح روش آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) محاسبه و تحلیل شد.

نتایج کلی نشان داد که محور جت‌های جنب‌حاره در هر دو نیم‌کره به سوی قطب جابجا شده و جت جنب‌حاره نیم‌کره جنوبی در هر دو فصل گرم و سرد، روند تضعیف دارد و سرعت باد در محور این جت کاهشی است در حالیکه سرعت باد جت جنب‌قطبی این نیم‌کره در هر دو فصل گرم و سرد، افزایشی است. در نیم‌کره شمالی در هر دو فصل گرم و سرد، در بخش شمالی محور جت جنب‌حاره روند سرعت باد افزایشی و در بخش جنوبی محور آن کاهشی است در حالیکه سرعت بیشینه جت در هر دو فصل افزایشی می‌باشد. یکی از عوامل مهم این تغییرات را می‌توان به روند افزایشی دما در مناطق حاره و جنب‌حاره در هر دو نیم‌کره ربط داد. کوچک بودن شیب خط روند میانگین مداری دمای سطوح زیرین منطقه حاره در این دوره آماری، نسبت به شیب خط روند میانگین مداری دمای سطوح زیرین منطقه جنب‌حاره سبب شده است که اثر تقویت گستره همرفت سلول هادلی نسبت به واداشت تضعیف گستره گردش نصف‌النهاری آن کمتر باشد و این می‌تواند یکی از عوامل روند کاهشی سرعت جریان‌های جتی در هر دو نیم‌کره باشد.

واژه‌های کلیدی: شاخص سرعت باد جت، میانگین وزنی عرض جغرافیایی بر اساس شار جرم، جریان‌های جت جنب‌حاره

Investigation of jet indices in warm and cold seasons in the northern and southern hemispheres (1948-2023)

Summery

Narrow, rapidly flowing currents of air located near the tropopause are known as jet streams. These jets, often found nearly girdling the globe while exhibiting large meridional meanders, are among the most ubiquitous structural characteristics of Earth's atmosphere and are known to play a substantial role in the production of sensible weather in the mid-latitudes. Jet streams are classified into two different types subtropical jet and polar-front jet streams. Subtropical jets are driven by angular momentum transport from the tropics and are centered at the poleward boundaries of the Hadley cell and polar-front jets are driven by baroclinic eddies and are associated with weather and climate events, such as precipitation and cold wave processes.

To study whether jet streams have been changing in the past decades, we used the historical data of NCEP/NCAR from the National Centers for Environmental Protection and the National Center for Atmospheric Research, covering 1948 to 2023. We have used the daily means of u , v components, temperature and geopotential height, at 6 levels from 400 to 100 hPa and daily means temperature at 4 levels from 1000 to 700 hPa.

In this paper, we firstly calculated the wind speed index, pressure index and latitude index that were defined by Archer and Caldeira (2008) to characterize the strength, the pressure level, and the latitudinal position of a jet stream, respectively. Then after that the variability of the characteristics of jet streams of both hemispheres in warm and cold seasons were investigated.

In addition, the temperature trend in the upper and lower troposphere was determined by calculating the average seasonal temperatures over latitudinal zones 0° - 15° , 15° - 30° , 30° - 45° , 45° - 60° , 60° - 75° , 75° - 90° in northern and southern hemisphere at upper levels of 400, 300, 250, 200, 150, 100 hPa and lower levels of 1000, 925, 850, 700 hPa.

We found that, in general, the jet streams have moved poleward in both hemispheres so that the shift to the pole of subtropical jets in the northern hemisphere was 0.061 (0.019) $^{\circ}$ /decade in DJF (JJA) and in the southern hemisphere was 0.307 (0.223) $^{\circ}$ /decade in DJF (JJA) for 1948-2023.

Also of the southern hemisphere the subtropical jet in winter and summer is weakening but the polar front jet is strengthening. In the northern hemisphere, in both warm and cold seasons the trend of wind speed is increasing in the poleward side of the jet axis, and is decreasing in the southern side of its axis, while in the trend of the maximum wind speed is upward.

One of the important factors of these changes can be related to the upward temperature trend in the tropical and subtropical regions of both hemispheres.

In this statistical period, the smallness of the slope of the zonal mean of seasonal temperature trend line of the lower levels of the tropical region compared to the slope of the average temperature trend of the upper levels of the subtropical region has caused that the strengthening of the Hadley cell convection which is less than the weakening of its meridional circulation range, this can be one of the factors that lowered the trend of the jet streams speed in both hemispheres.

Also, the results showed that the mass-flux weighted pressure in the DJF season is minimum around the equator and in the JJA season around the orbit of 12°N from the west of Mauritania to the southeast of China is minimum.

Keywords: Jet speed index, Mass-flux weighted average latitude, Subtropical jet stream

۱. مقدمه

جت استریم، نوار باریکی از بادهای غربی قوی در نزدیکی وردایست است (والیس، ۲۰۱۹) که با فراز و فرودهای نصف‌النهاری که در مقیاس همدیدی به خود می‌گیرد (فاراندا و همکاران، ۲۰۱۹)، دور تا دور زمین را در بالای وردسپهر عرض‌های جغرافیایی حاره‌ای تحت تاثیر قرار می‌دهد (کریستن سن و همکاران، ۲۰۱۷). این جریان از ویژگی‌های اصلی گردش جو در مقیاس بزرگ است که نقش مهمی در تغییرات وضع هوا دارد و می‌تواند فراوانی، شدت و تداوم رخدادهای جوی را در مناطق تحت تاثیر، تعدیل کند (هال و همکاران، ۲۰۱۴؛ روتلیسبرگر و همکاران، ۲۰۱۶؛ روسی و همکاران، ۲۰۲۲) به طوری که تغییر در مقدار سرعت و جهت آن می‌تواند عامل تضعیف یا تشدید رخدادهای جوی و افزایش یا کاهش فراوانی آنها باشد که از طریق تقویت یا تضعیف سامانه‌های همدیدی عبوری یا تغییر مسیر آنها میسر می‌شود. دیدبانی‌های روزانه میدان باد در وردسپهر بالا و پژوهش‌های پیشین (پینا-اورتیز و همکاران، ۲۰۱۳؛ هال و همکاران، ۲۰۱۷) دو نوع جت، جت جنب حاره و جت جنبه قطبی، را در هر نیم کره آشکار کرده است. جت جنب حاره که در لبه قطب سوی سلول هادلی در وردسپهر بالای مناطق جنب حاره هر دو نیم کره قرار دارد، در اثر پایداری تکانه زاویه‌ای و اختلاف گرمای دو منطقه حاره و جنب حاره ایجاد می‌شود (کوتسوارام، ۱۹۵۳؛ کریشنامورتی، ۱۹۶۱؛ ریچل، ۱۹۶۲) و در نقشه‌های همدیدی در فصل‌های مختلف در سطوح فشاری ۳۰۰، ۲۵۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال در اطراف مدار ۳۰ درجه جغرافیایی قابل تشخیص است. جت جنبه قطبی در بالای منطقه کزفشاری قرار دارد که در آن شیو نصف‌النهاری دما، هوای گرم مناطق جنب حاره را از هوای سرد مناطق جنب قطبی جدا کرده است. بیشترین سرعت محور این جت، در نزدیک ۳۰۰ هکتوپاسکال آشکار می‌شود (پالمن و نیوتن، ۱۹۶۹؛ شاپیرو و کیسر، ۱۹۹۰). این جت معرف مرز بین دو توده هوای عرض‌های میانی و جنب قطبی می‌باشد (کروگر، ۲۰۲۰).

شدت و موقعیت جت‌ها تابعی از شیو دما است. در زمستان که شیو دما بیشتر است، سرعت باد در مرکز هر دو جت افزایش می‌یابد و جهت جت جنبه قطبی در راستای نصف‌النهاری به سوی جنوب تغییر می‌کند و ممکن است در برخی مناطق هر دو نیم کره با بخش شمالی جت جنب حاره ادغام شود. در نتیجه، هر دو جت نمی‌توانند به صورت مجزا ظاهر شوند و یک نوار پهن یکسان سرعت بیشینه باد ایجاد می‌شود (لی و کیم، ۲۰۰۳). بعلاوه هنگام استفاده از میانگین بلندمدت سرعت باد برای آشکارسازی جت‌ها نیز هر دو جت به ندرت ظاهر می‌شوند. در این حالت برای نامیدن این نوار پهن سرعت بیشینه باد، از عبارت جفت شدگی دو جت استفاده می‌شود (آرچر و کالدیرا، ۲۰۰۸). سامانه‌های همدیدی گرایش دارند که با جریان‌های جتی همراهی کنند (هادسون، ۲۰۱۱؛ بلمچری و همکاران، ۲۰۱۷)، بنابراین تغییر موقعیت جت‌ها می‌تواند سبب تغییر در مسیر سامانه‌های همدیدی و در نتیجه تغییر در الگوی بارش، دما و چرخه آب در مناطق مختلف شود و در ایجاد خشکسالی یا ترسالی نقش موثری داشته باشد. از این رو جریان‌های جتی همواره مورد توجه پژوهشگران مختلفی قرار گرفته است که در این بخش به طور کوتاه به چند پژوهش که در ده‌های اخیر انجام شده است، اشاره می‌شود.

کوانگ و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های NCEP/NCAR، تغییرات فصلی شدت و موقعیت جت جنب‌حاره در منطقه شرق آسیا را در دوره آماری ۲۰۰۰-۱۹۶۱ بررسی کردند. آنها نشان دادند که نه تنها محور جت جنب‌حاره در شرق آسیا در راستای مداری به شمال جابجا شده است بلکه موقعیت منطقه‌ای محور این جت در ماه‌های ژوئن-ژوئیه در راستای نصف‌النهار نیز به سوی شرق تغییر کرده است. این پژوهشگران علت جابجایی منطقه‌ای محور جت جنب‌حاره در شرق آسیا را در گرمایش درو فلات تبت در ماه‌های ژوئن-ژوئیه به مناطق بالای ورسپهر میانی می‌دانند.

استرانگ و دیویس (۲۰۰۷) با استفاده از داده‌های ۶ ساعته مولفه‌های افقی باد که از NCEP/NCAR گرفته شده بود، روند سرعت باد مربوط به جت جنب‌حاره زمستانه نیم کره شمالی را در دوره آماری ۲۰۰۷-۱۹۵۸ بررسی کردند. آنها با در نظر گرفتن تراز فشاری ۲۵۰ هکتوپاسکال و آستانه سرعت باد ۲۵/۷ متر بر ثانیه برای محور جت جنب‌حاره در ماه‌های دسامبر تا فوریه، نشان دادند که در غرب و مرکز اقیانوس آرام روند سرعت باد محور جت جنب‌حاره صعودی است و سرعت محور جت در هر ده سال به مقدار ۱/۷۵ متر بر ثانیه افزایش یافته است. چون سرعت جت به پایستاری تکانه زاویه‌ای بستگی دارد و تکانه زاویه‌ای نیز تابعی از عرض جغرافیایی است، از این رو افزایش سرعت جت می‌تواند معرف افزایش عرض جغرافیایی بخش قطب سوی سلول هادلی نسبت به حالت اولیه و در نتیجه افزایش تکانه زاویه‌ای در این منطقه نسبت به حالت قبل از افزایش سرعت جت باشد. همچنین محور جت در این دوره آماری در خاورمیانه و شرق اقیانوس آرام به سوی قطب و در روی اقیانوس اطلس به سوی استوا جابجا شده است.

هادسون (۲۰۱۱)، موقعیت جت جنب‌حاره نیم کره شمالی و جنوبی را در دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۷۹ بررسی کرد. این پژوهشگر با استفاده از تحلیل وایزی خطی نشان داد که در دوره سی ساله تحت بررسی، جت جنب‌حاره در نیم کره شمالی ۳/۷ درجه و در نیم کره جنوبی ۶/۵ درجه به سمت قطب جابجا شده است. لی و همکاران (۲۰۱۹)، در دوره آماری ۲۰۱۸-۱۹۷۹، با استفاده از شاخص‌های آرچر و کالدیرا (میانگین وزنی سرعت باد بر اساس جرم، میانگین وزنی فشار و عرض جغرافیایی بر اساس شار جرم)، ابتدا جت جنب‌حاره شرق آسیا را به جت زمستانه جنب‌حاره (از مدار ۱۵ تا ۴۷/۵ درجه شمالی)، جت تابستانه جنب‌حاره (از ۲۷/۵ تا ۶۰ درجه شمالی) و جت تابستانه جبهه قطبی (از ۶۰ تا ۸۷/۵ درجه شمالی) دسته‌بندی کردند و سپس روندهای حاکم بر شاخص‌های انتخابی را تحلیل نمودند. این پژوهشگران یک روند نزولی ضعیف در جت تابستانه جنب‌حاره با شیب خط ۰/۱۳ متر بر ثانیه در هر دهه و یک جابجایی شمال‌سوی قابل ملاحظه در جت جنب‌حاره زمستانه با شیب ۰/۲۲ درجه در هر دهه را آشکار کردند.

وولینگ و همکاران (۲۰۲۳)، با استفاده از چهار مجموعه داده بازتحلیل ERA5، NCEP/NCAR، JRA55 و MERAA-2، اثر گرمایش منطقه حاره بر جت جنب‌حاره در دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۷۹ را بررسی کردند. این پژوهشگران با بکارگیری داده‌های میانگین روزانه مولفه مداری و نصف‌النهاری سرعت باد و دما در دو فصل زمستان (DJF) و تابستان (JJA)، روند جابجایی جت جنب‌حاره به سوی قطب در اثر گرمایش مناطق حاره را در هر دو نیم کره تحلیل کردند. آنها نشان دادند که اگرچه مقدار جابجایی قطب سوی جت‌ها به انتخاب دوره آماری و منابع داده‌ای بستگی دارد و منابع داده‌ای متفاوت، مقادیر جابجایی متفاوتی را بدست می‌دهد، ولی مسیر جابجایی در هر دو نیم کره با هر منبع داده‌ای، به سوی قطب است و مقدار آن نیز قابل توجه می‌باشد. این پژوهشگران گرمایش مناطق حاره در اثر تغییر اقلیم را یکی از عوامل اصلی موثر بر جابجایی جت‌ها معرفی کرده‌اند و بیان کرده‌اند که این عامل بهتر است که با جزئیات بیشتری مطالعه شود.

در ایران جت‌ها از دیدگاه هواشناسی و اقلیم‌شناسی همواره مورد توجه پژوهشگران زیادی قرار گرفته است. برخی پژوهشگران ارتباط جریان‌های جتی با تغییرات بارش مناطق مختلف ایران را بررسی کرده‌اند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۸؛ کیخسروی و همکاران، ۱۴۰۱؛ درستکار گل‌خیلی و همکاران، ۱۴۰۲)، برخی موقعیت جت جنب حاره را در فصل‌های گرم و سرد ارزیابی نموده‌اند (قانقره، ۱۳۹۹؛ حسینی صدیق و همکاران، ۱۴۰۰) و برخی نیز با استفاده از مدل‌های اقلیمی و سناریوهای مختلف، موقعیت و سرعت هسته جت را برای دوره‌های آماری گوناگون شبیه‌سازی کرده‌اند (عالمزاده و همکاران، ۱۳۹۶) که در زیر به طور کوتاه فقط به چند نمونه اشاره می‌شود.

عالمزاده و همکاران (۱۳۹۶)، در یک مطالعه، ساختار هندسی جت آفریقا-آسیا در وردسپهر زبرین و پاسخ آن به گرمایش زمین را با انتخاب دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای مدل‌های اقلیمی CMIP5 در دوره ۲۰۷۶-۲۰۹۹ شبیه‌سازی کردند. آنها در این بررسی، ناحیه آفریقا-آسیا را به دو قطاع شمال آفریقا و جنوب غرب آسیا تقسیم کردند و ویژگی‌های جت‌های هر قطاع را بطور جداگانه در فصل‌های مختلف بررسی نمودند. این پژوهشگران برای ارزیابی نتایج حاصل از شبیه‌سازی از دوره تاریخی ۱۹۸۰-۲۰۰۵ استفاده کردند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که در قطاع جنوب غرب آسیا، در بهار تندی جت افزایش می‌یابد، در تابستان جت به سوی استوا جابجا می‌شود و در پاییز تندی جت کاهش می‌یابد. در مطالعه این پژوهشگران برای فصل زمستان تغییر پایداری در هیچ یک از شاخص‌های جت آشکار نشده است و فقط پهنای جت در قطاع آفریقا حدود ۰/۲ درجه افزایش نشان داده است.

محمدی و همکاران (۱۳۹۸)، جریان‌های جتی محدوده صفر تا ۱۲۰ درجه طول جغرافیایی شرقی و صفر تا ۸۰ درجه عرض جغرافیایی شمالی را در ۵ تراز ۳۰۰، ۴۰۰، ۵۰۰، ۶۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال در دوره آماری ۱۹۶۵-۲۰۱۶ بررسی کردند و نشان دادند که در دوره سرد سال، جت جنب حاره در عرض‌های جغرافیایی ۲۰ تا ۳۰ درجه شمالی و در دوره گرم سال در عرض‌های جغرافیایی ۳۵ تا ۴۵ درجه شمالی قرار دارند. این پژوهشگران همچنین نشان دادند که در همه ترازهای تحت بررسی، دو کمربند پیوسته بادهای شدید در عرض جغرافیایی ۲۰ تا ۳۰ درجه شمالی و ۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی وجود دارند.

قانقره (۱۳۹۹)، تغییر موقعیت جت جنب حاره روی ایران را بر اساس مدل‌های اقلیمی ارزیابی کرد. این پژوهشگر نشان داد که در دوره تاریخی ۱۹۴۸-۲۰۰۵، در طول سال، سرعت هسته جت در نواحی شرقی ایران روند صعودی معنی‌داری دارد در حالی که در نواحی غربی ایران این روند نزولی می‌باشد. او در ادامه با انتخاب دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای مدل‌های اقلیمی CamESM2 و GFDL-CM3 نشان داد که در دوره آماری ۲۱۰۰-۲۰۰۶، موقعیت جت جنب حاره در نیم کره شمالی به شمال جابجا خواهد شد. حسینی صدیق و همکاران (۱۴۰۰)، با استفاده از داده‌های ERA5 در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۱۸، گسترش قطب سوی جت جنب حاره نیم کره شمالی را بررسی کردند و نشان دادند که وضعیت میانگین ساختار افقی جت جنب حاره نیم کره شمالی در فصل تابستان در شمالی‌ترین عرض جغرافیایی قرار گرفته است و در فصل زمستان به جنوبی‌ترین عرض جغرافیایی جابجا شده است. آنها همچنین نشان دادند که این جت در سال‌های ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۷ و ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷ دو روند جابجایی به عرض‌های جغرافیایی بالاتر را داشته است.

کیخسروی و همکاران (۱۴۰۱) در تحلیل الگوهای همدیدی منجر به بارش ابرسنگین در حوضه آبریز کرخه با استفاده از جت ترازهای ۲۰۰ و ۲۵۰ هکتوپاسکال در دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۵، نشان دادند که برای ریزش بارش‌های ابرسنگین در حوضه آبریز کرخه، مناسب‌ترین حالت قرارگیری هسته جت جنب حاره در موقعیت ۲۴ درجه عرض جغرافیایی شمالی و ۴۲ درجه طول جغرافیایی شرقی می‌باشد. این پژوهشگران به عوامل دیگری که در فرایند بارش می‌تواند نقش داشته باشد، اشاره نکرده‌اند. درستکار و همکاران (۱۴۰۲)، نقش جت جنب حاره‌ای در ترسالی‌های جنوب غرب ایران را بررسی کردند و نشان دادند که در بیش از ۷۵ تا ۸۰ درصد از ترسالی‌های

شدید، محور جت در روی کویت و استان خوزستان قرار گرفته است. آنها بیان کردند که محورهای جت در محدوده شمالی دریای سرخ کاملاً تغییر جهت داده و امتدادی جنوب غربی - شمال شرقی پیدا کرده و مولفه نصف النهاری آن تقویت می شود. این سازوکار سبب تزریق تاوایی مناسب به سامانه های بارشی ورودی شده و از طریق تشدید ناپایداری ها، سبب تشدید جریانات همرفتی و در صورت وجود رطوبت مناسب، سبب افزایش بارش می شوند.

از بررسی پژوهش های پیشین خارجی دیده شد که با افزایش دما در سطوح زیرین و اثر آن به سطوح میانی و بالای جو، جریان های جتی بر اساس معادله باد گرمایی، دستخوش تغییر می شوند. از این رو با به روز کردن دوره آماری و شیوه های بررسی، شاید بتوان تغییرات ویژگی های جت را بهتر آشکار نمود. بر این اساس، پژوهش حاضر در ادامه پژوهش آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) و لی و همکاران (۲۰۱۹) برای بررسی جریان های جتی انتخاب شد با این تفاوت که در محاسبه جرم ترازهای فشاری از ارتفاع و دمای سطوح فشاری انتخابی استفاده شد و در تعیین مرزهای افقی سطوح زیرین و زیرین جت، آستانه های بر اساس محاسبه میانگین مداری متوسط اندازه سرعت باد در طول یک دوره آماری مشخص، انتخاب شد و روابط ارائه شده بوسیله پژوهشگران فوق، اصلاح گردید. همچنین طول دوره آماری بیشتری که منتهی به سال ۲۰۲۳ است، در نظر گرفته شد. در ایران تا کنون، مطالعه ای بر اساس میانگین وزنی بر اساس شار جرم و به روز کردن شیوه های برآورد ویژگی های جریان های جت انجام نشده است و اولین بار است که با این شیوه، سعی شده است تا شاخص های مربوط به جریان های جت با داده های بروزتر تحلیل شود. همچنین اثر افزایش دما و گرم شدن لایه های مختلف جو در مناطق حاره و جنب حاره، در تغییرات سرعت و مکان جریان های جتی نیز در این پژوهش، بررسی شده است.

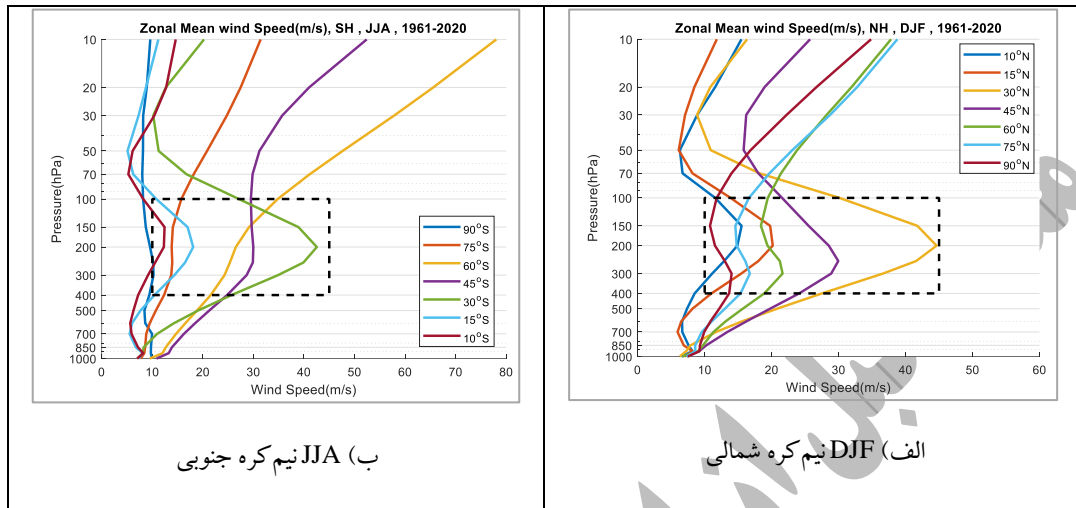
ساختار این مقاله به شرح زیر است. در بخش ۲ ابتدا داده های مورد استفاده برای شناسایی ویژگی های جت در هر دو نیم کره معرفی شده است و سپس شیوه تعیین و محاسبه شاخص های جت شرح داده شده است. بخش ۳ به بحث و بررسی نتایج بدست آمده اختصاص دارد و در انتها، در بخش ۴، نتایج کلی تحقیق بیان شده است.

۲. روش پژوهش

جریان های جتی همواره تحت تاثیر تغییرات مداری و نصف النهاری دما قرار دارند و افزایش دما و گرم شدن لایه های مختلف جو از طریق انتقال جرم و تغییر فشار هوا، سبب تغییر در سرعت و مکان جریان های جتی می شود. از این رو شناسایی موقعیت مکانی جت ها در یک زمان مشخص می تواند دشوار و مبهم باشد. پژوهشگران برای غلبه بر این مشکل، از روش میانگین وزنی کمیت ها استفاده کرده و شاخص هایی تعریف کرده اند تا بتوانند ناپیوستگی مکانی و زمانی جت ها را به کمترین مقدار کاهش دهند. این شاخص ها که به راستاهای نصف النهاری و قائم بستگی دارند و در این پژوهش به عنوان شاخص های اصلی بررسی می شوند، میانگین وزنی سرعت باد بر اساس جرم، میانگین وزنی فشار و عرض جغرافیایی بر اساس شار جرم است که بوسیله آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) تعریف شده است. در این مقاله با بررسی نیمرخ قائم میانگین مداری سرعت باد، پهنای جت در حالت میانگین و تغییرات محور آن در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۶۱، شرایط مناسب برای استفاده از این شاخص ها فراهم شد که بطور کوتاه به آن اشاره می شود. در این مطالعه، فصل های سرد نیم کره شمالی و گرم نیم کره جنوبی با نماد DJF نشان داده شده است که معرف ماه های دسامبر، ژانویه و فوریه است و فصل های گرم نیم کره شمالی و سرد نیم کره جنوبی با JJA مشخص شده است که نماد ماه های ژوئن، ژوئیه و اوت می باشد.

بررسی میانگین مداری سرعت باد در ترازهای مختلف فشاری در عرض های جغرافیایی مختلف دو نیم کره در فصل های DJF و JJA در طول دوره آماری نشان داد که در هر دو نیم کره، جریان های جت پیوسته نیستند و در ترازهای فشاری زیرین بین سطوح فشاری ۴۰۰ و

۱۰۰ هکتوپاسکال قرار دارند (شکل ۱). از این رو برای تحلیل ویژگی‌های جریان‌های جتی و محاسبه شاخص‌ها، از شش تراز فشاری ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، ۱۵۰ و ۱۰۰ هکتوپاسکال استفاده شد.



شکل ۱: نیمرخ قائم میانگین مداری سرعت باد (متر بر ثانیه) در عرض‌های جغرافیایی مختلف دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۶۱ در ماه‌های الف (DJF) نیم کره شمالی و ب (JJA) نیم کره جنوبی.

از آنجایی که هنگام استفاده از میانگین بلندمدت میانگین مداری سرعت باد برای آشکارسازی جت‌ها نیز هر دو جت به ندرت ظاهر می‌شوند، از این رو در این مقاله به جای تحلیل مجزای جت جنب حاره و جت جنبه قطبی، یک نوار پهن سرعت بیشینه در نظر گرفته شد (بلمچری و همکاران، ۲۰۱۷؛ فاراندا و همکاران، ۲۰۱۹) که در فصل DJF هر دو نیم کره به صورت یک جت منفرد آشکار می‌شود و در فصل JJA در نیم کره شمالی به صورت یک نوار نازک و کوتاه و در نیم کره جنوبی به صورت دو نوار نازک و بلند در اطراف مدار ۳۰ و ۶۰ درجه جنوبی ظاهر شده است. بر این اساس، شاخص میانگین وزنی سرعت باد بر اساس جرم (بر حسب متر بر ثانیه) که از این پس به اختصار میانگین وزنی سرعت باد نامیده می‌شود، برای هر نقطه از شبکه از رابطه زیر بدست آمد (لی و همکاران، ۲۰۱۹):

$$WS_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^6 m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}}{\sum_{k=1}^6 m_{i,j,k}} \quad (1)$$

که در آن u و v به ترتیب مولفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد افقی و m جرم تراز فشاری برای هر متر مربع است که به چگالی، دما و ارتفاع سطح فشاری بستگی دارد. برای مشخص کردن تغییر هر کمیت در راستای مداری (λ)، راستای نصف‌النهاری (φ) و در ترازهای فشاری (p)، به ترتیب از زیرنویس‌های i ، j و k استفاده شد که مقادیر آن در زیر مشخص شده است.

$$k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \rightarrow p(k) = 400, 300, 250, 200, 150, 100 \quad hPa$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, 72, 73 \rightarrow \varphi(j) = -90.0, -87.5, -85.0, \dots, +87.5, +90.0$$

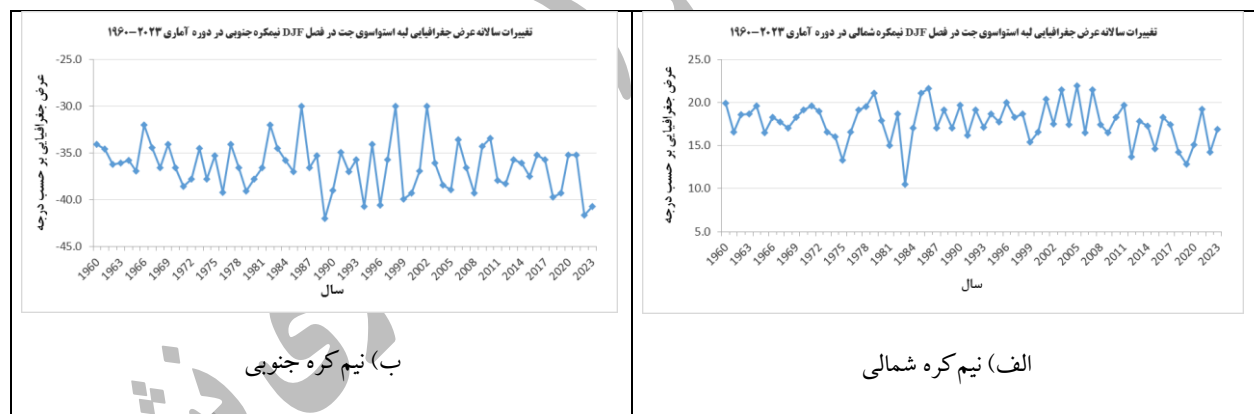
$$i = 1, 2, 3, \dots, 143, 144 \rightarrow \lambda(i) = -180.0, -177.5, -175.0, \dots, +177.5, +180.0$$

برای محاسبه جرم هوا در هر تراز فشاری، با استفاده از تعریف چگالی و معادله حالت، در هر نقطه از شبکه افقی، ستونی از هوا به مساحت قاعده یک متر مربع و ارتفاع آن تراز فشاری، از رابطه زیر استفاده شد:

$$m_{i,j,k} = \frac{P_k}{R_d \times T_{i,j,k}} \times Z_{i,j,k} \quad (2)$$

در این رابطه Z ارتفاع (متر)، T دمای تراز فشاری (کلوین) و R_d ثابت ویژه گازها برای هوای خشک می‌باشد.

برای تعیین مرزهای بالا و پایین و موقعیت عرض جغرافیایی جریان‌های جتی از نیم‌رخ قائم تغییرات میانگین مداری سرعت باد در عرض‌های جغرافیایی مختلف استفاده شد. برای تعیین دامنه عرض جغرافیایی جریان‌های جت دو نیم‌کره در دو فصل گرم و سرد، از تغییرات میانگین سالانه سرعت باد در دامنه ۱۰۰-۴۰۰ هکتوپاسکال استفاده شد. شکل ۲ تغییرات سالانه عرض جغرافیایی لبه استواسوی جت در ماه‌های DJF در نیم‌کره شمالی (شکل ۲-الف) و نیم‌کره جنوبی (شکل ۲-ب) را نشان می‌دهد. از شکل ۲-الف دیده می‌شود که در فصل سرد نیم‌کره شمالی لبه استواسوی جت از عرض جغرافیایی ۱۰ تا ۲۲ درجه شمالی تغییر کرده است. شکل ۲-ب نیز نشان می‌دهد که در فصل گرم نیم‌کره جنوبی لبه استواسوی جت از عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۴۲ درجه جنوبی تغییر کرده است. بنابراین در محاسبات پایین‌ترین لبه استواسوی جت در نیم‌کره شمالی در فصل سرد ۱۰ درجه و در نیم‌کره جنوبی در فصل گرم ۳۰ درجه در نظر گرفته شد. مشابه این بررسی، برای فصل گرم نیم‌کره شمالی و فصل سرد نیم‌کره جنوبی و همچنین لبه استواسوی جت در هر دو نیم‌کره در فصل‌های مختلف انجام شد. نتایج در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۲: تغییرات سالانه عرض جغرافیایی لبه استواسوی جت در ماه DJF. الف) نیم‌کره شمالی و ب) نیم‌کره جنوبی.

جدول ۱: تغییرات عرض جغرافیایی لبه‌های جت در دو فصل گرم و سرد نیم‌کره شمالی و جنوبی

کمیت	تغییرات عرض جغرافیایی لبه‌های جت بر حسب درجه			
	نیم‌کره شمالی		نیم‌کره جنوبی	
	DJF	JJA	DJF	JJA

لبه استواسوی جت	۱۰	۲۷/۵	-۳۰	-۱۷/۵
لبه قطب سوی جت	۷۰	۴۲/۵	-۶۵	-۷۰/۰

بنابراین پهناى جت در طول سال در نیم کره شمالی بین ۱۰ تا ۷۰ درجه عرض جغرافیایی (زیرنویس J از ۴۱ تا ۶۵) تغییر می کند و فرمول برآورد تغییرات میانگین وزنی عرض جغرافیایی (بر حسب درجه) بر اساس شار جرم که از این پس به اختصار میانگین وزنی عرض جغرافیایی نامیده می شود، در نیم کره شمالی نسبت به مطالعات لی و همکاران (۲۰۱۹) و آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸)، اصلاح شد:

$$L_i^{NH} = \frac{\sum_{j=41}^{65} \left\{ \sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}] \right\} \times \varphi(j)}{\sum_{j=41}^{65} \left\{ \sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}] \right\}} \quad (3)$$

در نیم کره جنوبی پهناى جت در طول سال بین ۱۷/۵ تا ۷۰ (زیرنویس J از ۴۴ تا ۹) درجه جنوبی تغییر می کند. از این رو معادله تغییرات میانگین وزنی عرض جغرافیای محور جت در این نیم کره به صورت زیر نوشته شد:

$$L_i^{SH} = \frac{\sum_{j=9}^{44} \left\{ \sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}] \right\} \times \varphi(j)}{\sum_{j=9}^{44} \left\{ \sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}] \right\}} \quad (4)$$

شاخص میانگین وزنی فشار بر اساس شار جرم (بر حسب هکتوپاسکال) که از این پس بطور کوتاه میانگین وزنی فشار نامیده می شود، نیز با رابطه زیر تعریف شد:

$$P_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}] \times p(k)}{\sum_{k=1}^6 [m_{i,j,k} \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}]} \quad (5)$$

نمونه ای از الگوهای میانگین وزنی سرعت باد و میانگین وزنی فشار برای ماه های فصل سرد و گرم بر اساس محاسباتی آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) در شکل ۳ نشان داده شده است.

بر پایه مبانی ذکر شده در این بند، در زیر بطور کوتاه روش پژوهش نشان داده شده است:

۱- محاسبه میانگین مداری اندازه سرعت باد در هر تراز فشاری و تعیین سطوح فشاری مطالعاتی بر اساس این کمیت

۲- محاسبه میانگین جرم از رابطه ۲ و برآورد میانگین وزنی سرعت باد بر اساس جرم از رابطه ۱

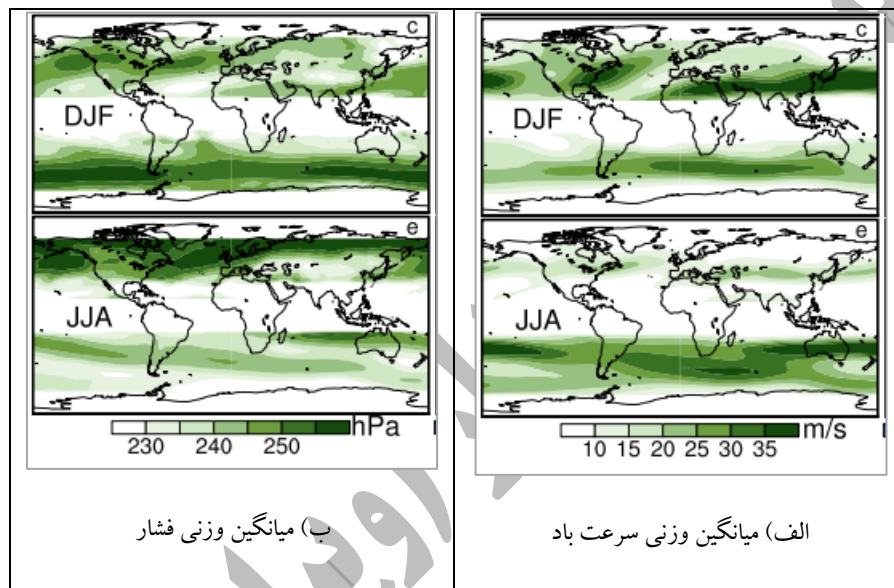
۳- تعیین آستانه برای لبه های زیرین و زبرین جت در صفحه افقی

۴- محاسبه تغییرات میانگین وزنی عرض جغرافیایی در هر دو نیم کره بر اساس معادله‌های ۳ و ۴

۵- محاسبه شاخص میانگین فشار از رابطه ۵

۶- برآورد میانگین مداری متوسط دما در سطوح زیرین (۷۰۰ تا ۱۰۰۰ هکتوپاسکال) و زیرین (۴۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال) در دو منطقه ۱۵-۰۰ و ۱۵-۳۰ درجه در هر دو نیم کره شمالی و جنوبی

۷- رسم الگوهای محاسبه شده، تعیین روند بر اساس معادله خط روند و تفسیر الگوها



شکل ۳: الف) میانگین وزنی سرعت باد (متر بر ثانیه) و ب) میانگین وزنی فشار (هکتوپاسکال) بر اساس پژوهش آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸).

۳. داده‌ها

در این مطالعه از داده‌های روزانه دما، ارتفاع و مولفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد افقی در دوره آماری ۲۰۲۳-۱۹۴۸ استفاده شد. این داده‌ها در روی یک شبکه افقی منظم که منطقه محدود به طول جغرافیایی از ۱۸۰ درجه غربی تا ۱۸۰ درجه شرقی و عرض جغرافیایی از ۹۰ درجه جنوبی تا ۹۰ درجه شمالی را شامل می‌شود، از NCEP/NCAR گرفته شد (کلانی و همکاران، ۱۹۹۶). تفکیک افقی این داده‌ها ۲/۵ درجه است و شبکه انتخابی دارای ۱۴۴×۷۳ نقطه می‌باشد.

۴. بحث

شکل ۴ میانگین وزنی سرعت باد در فصل DJF، (۴-الف) و JJA، (شکل ۴-ب) در دو نیم کره شمالی و جنوبی را نشان می‌دهد. هم مقادیرهای این شاخص از ۲۵ متر بر ثانیه با فاصله ۵ واحد رسم شده است تا پیوستگی جریان جت بهتر نشان داده شود. شکل ۴-الف نشان می‌دهد که در فصل زمستان نیم کره شمالی، یک نوار پیوسته میانگین وزنی سرعت باد از شرق اقیانوس اطلس در روی موریتانی شروع و با حرکت به سوی شرق، در امتداد مدار ۳۰ درجه عرض جغرافیایی با عبور از شمال آفریقا، جنوب ایران، شمال هند، جنوب

چین، جنوب ژاپن، غرب اقیانوس آرام، جنوب ایالات متحده آمریکا، کره زمین را دور می‌زند و در غرب بریتانیا پایان می‌یابد. این نوار طولانی میانگین وزنی سرعت باد دارای دو هسته بیشینه در غرب ژاپن و غرب ایالات متحده آمریکا است که هسته بیشینه غرب ژاپن (۵۵ تا ۶۵ متر بر ثانیه) از هسته بیشینه غرب ایالات متحده آمریکا (۴۰ تا ۴۵ متر بر ثانیه) خیلی قویتر می‌باشد. این وضعیت با مبانی همدیدی هماهنگ است. در زمستان نیم کره شمالی که شار تابش خورشیدی در مناطق حاره بیشتر از مناطق جنب حاره است، گرما در منطقه حاره شمالی بیشتر است و تعدیل گرما از طریق سلول هادلی با جابجایی نصف‌النهاری آن تشدید می‌شود. بنابراین فرونشینی هوا در اطراف مدار ۳۰ درجه شمالی رخ می‌دهد و به دلیل پایستاری تکانه زاویه‌ای، سرعت باد در این محدوده افزایش می‌یابد. در نتیجه این سازوکار جت جنب حاره در اطراف مدار ۳۰ درجه شمالی آشکار می‌شود. همچنین به سبب ایجاد گرادیان دمایی بین مناطق خشکی و آبی، سرعت جریان جتی در شرق قاره‌ها بیشتر است و چون گرادیان دما بین مناطق آبی و خشکی در غرب ژاپن بیشتر از غرب ایالات متحده آمریکا است، از این رو اختلاف سرعت جریان‌های جتی در این دو منطقه قابل توجیه می‌باشد.

در تابستان نیم کره جنوبی (شکل ۴-الف)، دیده می‌شود که یک نوار پیوسته از این شاخص در اطراف مدار ۵۵ درجه جنوبی از غرب نیم کره جنوبی به سوی شرق آن امتداد یافته است. هسته بیشینه مقدار این کمیت ۳۰ تا ۳۵ متر بر ثانیه است که بین دو نصف‌النهار ۳۵ درجه غربی تا ۱۳۷ درجه شرقی قرار گرفته است. در حد فاصل دو نصف‌النهار سی درجه غربی و شرقی هسته بیشینه میانگین وزنی سرعت باد، بیش از ۳۵ متر بر ثانیه برآورد شده است. در فصل گرم نیم کره جنوبی شار تابش خورشیدی در مناطق جنب حاره بیشتر از مناطق حاره است و انتقال گرما از طریق سلول هادلی تضعیف می‌شود. شایان ذکر است که در فصل گرم نیم کره جنوبی، تغییر نصف‌النهاری دما بنا به معادله باد گرمایی نیز می‌تواند عامل افزایش سرعت باد جت شود. چون در این فصل زاویه میل خورشیدی به ۲۳/۵- گرایش می‌یابد، از این رو بخش همرفت سلول هادلی هماهنگ با تغییرات زاویه میل خورشیدی به عرض‌های جغرافیایی شمالی این نیم کره جابجا و گستره شمالی آن به اطراف مدار ۴۵ درجه جنوبی محدود می‌گردد. در نتیجه جت جنب حاره در اطراف این مدار آشکار شده است.

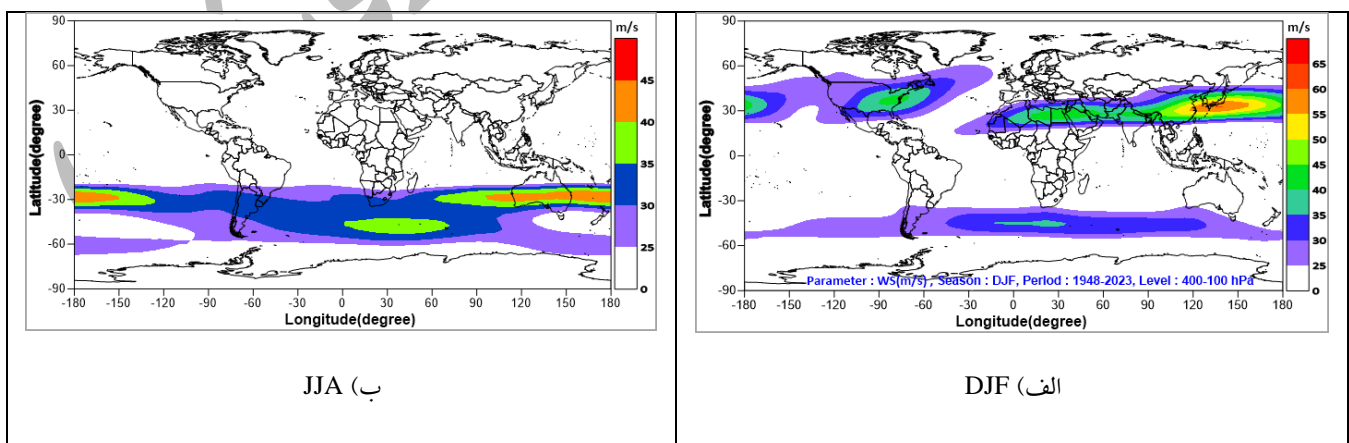
شکل ۴-ب) نشان می‌دهد که در تابستان نیم کره شمالی، میانگین وزنی سرعت باد کمتر از ۲۵ متر بر ثانیه است که در شکل مشخص نشده است. بررسی‌ها نشان داد که در این فصل در نیم کره شمالی، یک نوار طولانی پیوسته با مقدار ۱۷ تا ۲۴ متر بر ثانیه در اطراف مدار ۴۵ درجه شمالی دور تا دور کره زمین را فرا گرفته است و دو هسته کوچک بیشینه ۲۰ تا ۲۴ متر بر ثانیه در شمال غرب چین و شمال شرق ایالات متحده آمریکا وجود دارد. همچنین در این فصل یک هسته کوچک ۱۷ تا ۱۸ متر بر ثانیه نیز در جنوب دریای سرخ به سوی شرق آن دریا قابل رویت است. علت کاهش سرعت میانگین مداری سرعت باد در این فصل، اختلاف دمایی معکوس بین مناطق حاره و جنب حاره است که به سبب دریافت انرژی خورشیدی بیشتر مناطق جنب حاره ایجاد شده است. از این رو گردش نصف‌النهاری سلول هادلی تضعیف و مقدار سرعت باد به خوبی افزایش نیافته است. بعلاوه چون در طول این فصل زاویه میل خورشیدی به ۲۳/۵+ گرایش می‌یابد، بنابراین گستره شمالی سلول هادلی نیز به عرض‌های جغرافیایی شمالی‌تر منتقل می‌شود و در نتیجه بادهای غربی این نیم کره اطراف مدار ۴۵ درجه شمالی آشکار شده است.

در نیم کره جنوبی، دو نوار باریک پیوسته در اطراف مدار ۳۰ و ۶۰ درجه جنوبی گرداگرد کره زمین را در بر گرفته است. این دو نوار، از اقیانوس آرام جنوبی به سوی شرق امتداد یافته است و از آرژانتین، اقیانوس اطلس جنوبی، آفریقای جنوبی، اقیانوس هند جنوبی، استرالیا و نیوزلند عبور کرده است با این تفاوت که نوار اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی نیز مناطق جنوبی‌تر را تحت تاثیر قرار داده است و همچنین مقادیر آن از نوار اطراف ۳۰ درجه جنوبی کمتر می‌باشد. هسته بیشینه میانگین وزنی سرعت باد اطراف مدار ۳۰ درجه جنوبی با مقدار ۴۰

تا ۴۵ متر بر ثانیه، استرالیا، شمال نیوزلند و شرق اقیانوس آرام جنوبی را در بر گرفته است. یک هسته ۳۵ تا ۴۰ متر بر ثانیه نیز در امتداد مدار ۴۵ درجه جنوبی، در جنوب آفریقای جنوبی محدود به طول جغرافیایی ۱۸ درجه غربی تا ۸۰ درجه شرقی قابل رویت است که می تواند به سبب گرادیان دمای ایجاد شده ناشی از جریان های گرم اقیانوسی باشد. در این فصل از نیم کره جنوبی نیز، شار تابش خورشیدی در مناطق حاره خیلی بیشتر از مناطق جنب حاره این نیم کره است. از این رو انتقال نصف النهاری سلول هادلی برای تعدیل گرما تقویت شده است و در نتیجه میانگین وزنی سرعت باد در اطراف مدار ۳۰ درجه جنوبی آشکار شده است. از آنجا که در نیم کره جنوبی تابش خورشیدی به عرض های جغرافیایی بیشتر از ۶۶/۵ درجه جنوبی نمی رسد و پوشش این منطقه تا قطب خشکی است، از این رو به سبب گرادیان دمایی شدیدی که بین منطقه جنب حاره و منطقه قطبی ایجاد می شود، گستره جنوبی جت جنب قطبی نیز می تواند در اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی آشکار گردد.

از مقایسه میانگین وزنی سرعت باد در دو فصل گرم و سرد، در نیم کره شمالی مشخص شد که میانگین وزنی سرعت باد در فصل سرد این نیم کره (DJF)، بیشتر از فصل گرم (JJA) آن است. در نیم کره جنوبی میانگین وزنی سرعت باد در فصل گرم (DJF) بیشتر از فصل سرد (JJA) می باشد. علت این تفاوت را می توان در منطقه شروع همرفت و خاتمه گردش نصف النهاری سلول هادلی جستجو کرد. در فصل گرم (سرد) نیم کره شمالی همرفت از مدار شمالی بالاتری (پایین تری) شروع و گردش نصف النهاری سلول هادلی به اطراف مدار ۴۵ درجه (۳۰ درجه) شمالی ختم می شود که چون شعاع مدار استوا بیشتر از عرض های جغرافیای بالاتر است، از این رو پایداری تکانه زاویه ای از طریق افزایش عرض جغرافیایی نسبت به فصل سرد افزایش یافته و سبب افزایش سرعت باد در این فصل می شود. این شرایط در نیم کره جنوبی نیز وجود دارد. در فصل گرم (سرد) نیم کره جنوبی همرفت از منطقه حاره ای جنوب (شمال) استوا شروع و گردش نصف النهاری سلول هادلی به اطراف مدار ۴۵ درجه (۳۰ درجه) جنوبی ختم می شود.

همچنین از مقایسه الگوی میانگین وزنی سرعت باد در فصل سرد نیم کره شمالی (DJF) و نیم کره جنوبی (JJA) دیده شد که در اطراف مدار ۳۰ درجه، مقدار بیشینه این کمیت در نیم کره شمالی بیشتر از نیم کره جنوبی است در حالی که این بیشینه در فصل گرم نیم کره جنوبی (DJF) بیشتر از فصل گرم نیم کره شمالی (JJA) می باشد. علت این اختلاف در فصل سرد را می توان به گرادیان دمای زیاد بین منطقه حاره و جنب حاره نیم کره شمالی نسبت به نیم کره جنوبی نسبت داد. در فصل گرم دمای منطقه جنب حاره نسبت به منطقه حاره نیم کره شمالی بیشتر است و تضاد دمایی در این نیم کره کاهش یافته و سرعت باد جریان های جتی نیز کاهش می یابد.

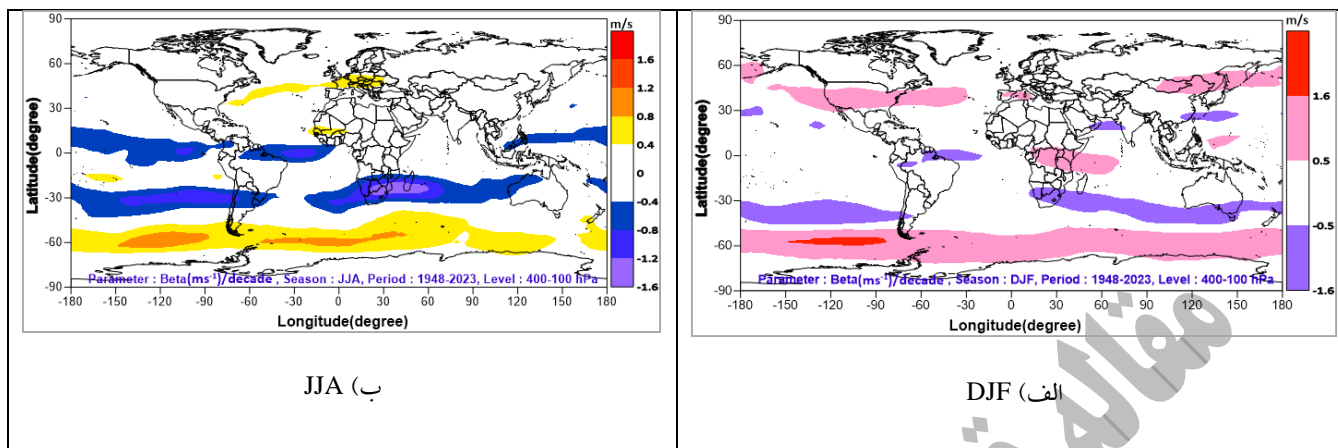


شکل ۴: الگوی میانگین وزنی سرعت باد (متر بر ثانیه) در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳ در ماه های الف (DJF) و ب (JJA).

شکل ۵ مقدار شیب خط روند بر میانگین وزنی سرعت باد در فصل سرد DJF (شکل ۵-الف) و گرم JJA (شکل ۵-ب) در هر دو نیم کره شمالی و جنوبی را نشان می‌دهد. در فصل سرد نیم کره شمالی (DJF) که در شکل ۵-الف نشان داده شده است، در اطراف مدار ۴۰ درجه شمالی بطور ناپیوسته، روند میانگین وزنی سرعت باد افزایشی است و شیب خط روند ۰/۵ تا ۱/۶ متر بر ثانیه بر دهه برآورد شد. در اطراف مدار ۲۰ درجه شمالی نیز بطور ناپیوسته روند کاهشی برآورد شد که مقدار شیب خط روند بین ۰/۵- تا ۱/۶- متر بر ثانیه بر دهه مشخص شد. در این فصل که فصل گرم نیم کره جنوبی (DJF) است، در اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی یک نوار پیوسته روند افزایشی با شیب خط روند ۰/۵ تا ۱/۶ متر بر ثانیه بر دهه دیده شد که سرتاسر نیم کره را فرا گرفته است و در محدوده بین نصف‌النهار ۸۰ تا ۱۵۰ درجه غربی شیب خط روند بیشتر از ۱/۶ متر بر ثانیه بر دهه آشکار شد. در این نیم کره در اطراف مدار ۴۰ درجه نیز روند نزولی است که از جنوب موریسانی تا جنوب استرالیا، اقیانوس آرام جنوبی و آفریقای جنوبی را پوشش داده است و ناپیوستگی آن در روی اقیانوس اطلس جنوبی می‌باشد. در فصل گرم نیم کره شمالی (JJA) که در شکل ۵-ب آورده شده است، از شرق ایالات متحده آمریکا در اقیانوس اطلس از مدار ۴۰ تا ۴۵ درجه شمالی در شمال دریای سیاه روند افزایشی ضعیف با شیب خط روند ۰/۴ تا ۰/۸ متر بر ثانیه بر دهه برآورد شد. در این فصل در اطراف خط استوا از نصف‌النهار ۱۱۰ درجه شرقی به سوی شرق تا نصف‌النهار ۵ درجه غربی در شرق اقیانوس اطلس نیز روند کاهشی برآورد شد که شیب خط روند بین ۰/۴- تا ۱/۲- متر بر ثانیه بر دهه است. در این فصل (JJA)، در نیم کره جنوبی در اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی روند افزایشی با شیب خط روند بین ۰/۴ تا ۱/۲ متر بر ثانیه بر دهه، و در اطراف مدار ۳۰ درجه جنوبی روند کاهشی با شیب خط روند بین ۰/۴- تا ۱/۶- متر بر ثانیه بر دهه آشکار شد.

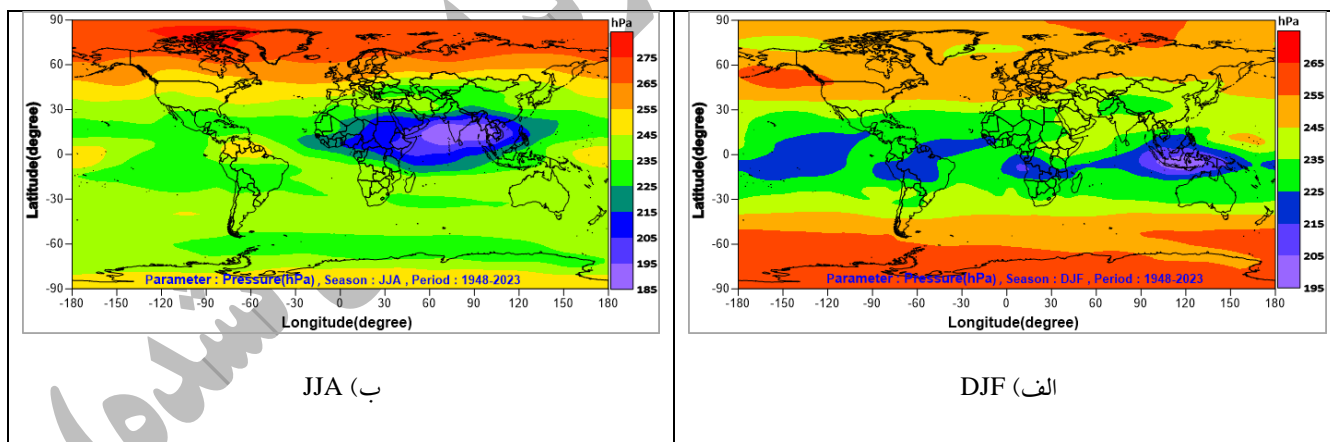
از مقایسه نتایج آشکار شده در فصل گرم و سرد نیم کره شمالی دیده شد که روند میانگین وزنی سرعت باد در این نیم کره افزایشی است ولی شیب خط روند در فصل سرد بیشتر از فصل گرم است. در نیم کره جنوبی نیز در هر دو فصل سرد و گرم، روند میانگین وزنی سرعت باد در اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی افزایشی و در اطراف مدار ۳۰ درجه نزولی می‌باشد و شیب خط روند تغییر قابل توجهی نشان نمی‌دهد. از آنجایی که اختلاف دمای زیاد بین مناطق جنب‌قطبی و قطبی عامل ایجاد جریان‌های جتی اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی است، از این رو هر عاملی که بتواند گرادیان دمای بین این دو منطقه را تقویت کند، می‌تواند سرعت باد جت اطراف این مدار را افزایش دهد. بررسی روند میانگین فصلی میانگین مداری متوسط دمای لایه زیرین در مناطق قطبی و جنب قطبی نشان داد که این کمیت در مناطق قطبی (۷۵ تا ۹۰ درجه جنوبی) بدون روند و در مناطق جنب‌قطبی (۶۰ تا ۷۵ درجه جنوبی) دارای روند صعودی معنی‌داری می‌باشد بطوریکه شیب خط روند در فصل سرد ۰/۲۵ درجه بر دهه و در فصل گرم ۰/۳۰ درجه بر دهه برآورد شد. بنابراین این عامل سبب تقویت تضاد دمایی و افزایش سرعت باد اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی شده است.

از بررسی شیب خط روند میانگین فصلی میانگین مداری متوسط دمای لایه‌های مختلف جو دیده شد که در فصل گرم نیم کره جنوبی، شیب خط روند این کمیت در سطوح زیرین عرض‌های جنب‌حاره (۰/۲۶۵ درجه بر دهه) بیشتر از شیب خط روند دما در سطوح زیرین (۰/۱۷۶ درجه بر دهه) عرض‌های حاره جنوبی است که اولی سبب تضعیف گردش نصف‌النهاری و دومی سبب تقویت همرفت سلول هادلی می‌شود. بنابراین تضعیف گردش نصف‌النهاری سلول هادلی بیشتر از تقویت همرفت آن است و این فرایند می‌تواند سبب کاهش سرعت باد عرض‌های جنب‌حاره جنوبی را در فصل گرم توجیه کند. همین شرایط در فصل سرد نیز وجود دارد به طوری که شیب خط روند سطوح زیرین عرض‌های جنب‌حاره (۰/۲۷۱ درجه بر دهه) بیشتر از شیب خط روند سطوح زیرین (۰/۱۷۷ درجه بر دهه) عرض‌های حاره شمالی است.



شکل ۵: الگوی شیب خط روند بر میانگین وزنی سرعت باد (متر بر ثانیه بر دهه) در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳ در ماه‌های الف (DJF) و ب (JJA).

شکل ۶ میانگین وزنی فشار در فصل DJF (شکل ۶-الف) و JJA (شکل ۶-ب) در دو نیم کره شمالی و جنوبی را نشان می‌دهد. در فصل DJF که در شکل ۶-الف نشان داده شده است، در اطراف خط استوا میانگین وزنی فشار کمینه است و در اطراف مدار ۳۰ درجه در هر دو نیم کره شمالی و جنوبی، مقدار این کمیت ۲۲۵ تا ۲۴۵ هکتوپاسکال برآورد شده است. در اطراف مدار ۶۰ درجه جنوبی نیز مقدار این کمیت ۲۴۵ تا ۲۶۵ هکتوپاسکال بدست آمده است. در فصل JJA که در شکل ۶-ب نشان داده شده است، در اطراف مدار ۱۲ درجه شمالی از غرب موریتانی تا جنوب شرق چین مقدار میانگین وزنی فشار کمینه است. نتایج بدست آمده این بخش با نتایج آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) کمی تفاوت دارد. علت تفاوت در انتخاب دوره آماری، منابع داده‌ای و برآورد نکردن میانگین وزنی فشار در منطقه حاره می‌باشد. این پژوهشگران در این بخش، دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۰۱ و از داده‌های ERA-40 استفاده کرده بودند.



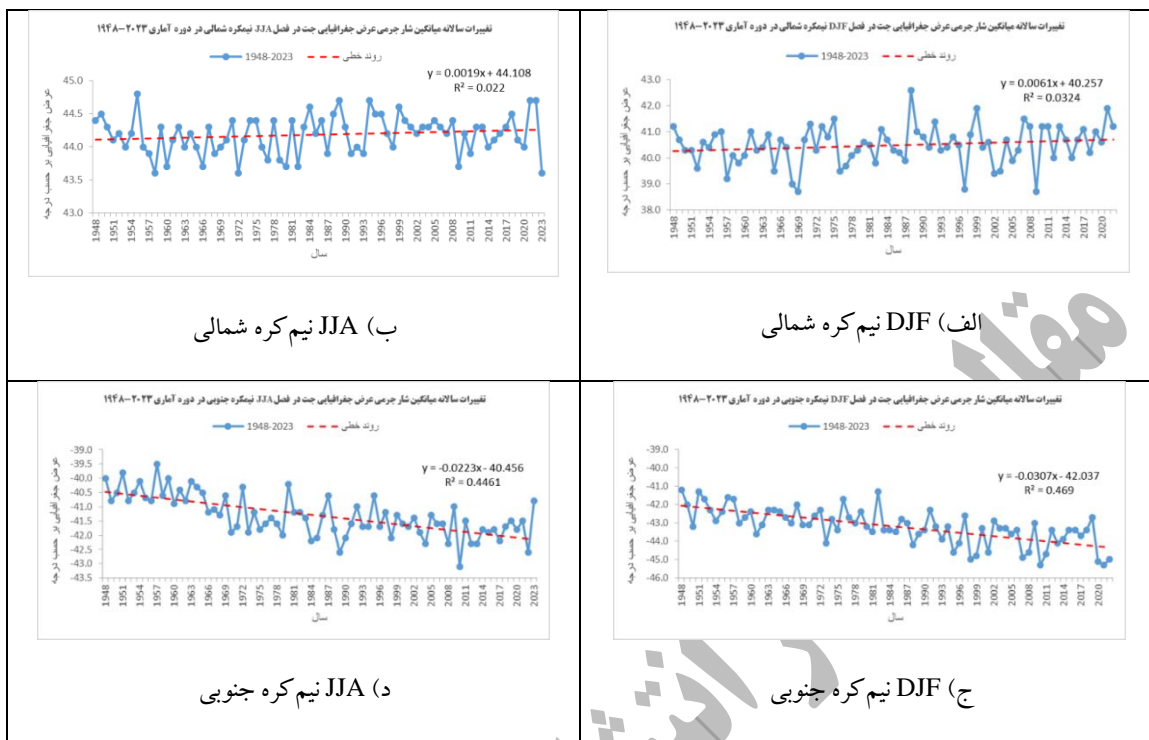
شکل ۶: الگوی میانگین وزنی فشار (هکتوپاسکال) در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳ در ماه‌های الف (DJF) و ب (JJA).

شکل ۷ میانگین وزنی عرض جغرافیایی جت در دو نیم کره شمالی در هر دو فصل، روند میانگین وزنی عرض جغرافیایی افزایشی است. شیب خط روند در فصل DJF (شکل ۷-الف) به مقدار $0/061$ درجه بر دهه و در فصل JJA (شکل ۷-ب) به مقدار $0/019$ درجه بر دهه به سوی قطب می‌باشد. شیب خط روند در فصل DJF نیم کره جنوبی (شکل ۷-ج) مقدار $0/307$ و در فصل JJA این نیم کره (شکل ۷-د) مقدار $0/223$ درجه در هر ده سال به سوی قطب می‌باشد. شایان ذکر است که ویژگی‌های آماری مربوط

به خط روند میانگین وزنی عرض جغرافیایی برای کاهش حجم مطالب آورده نشده است. روند افزایشی در هر دو فصل نیم کره جنوبی و نیز فصل سرد نیم کره شمالی از نظر آماری تایید شده است ولی در فصل گرم نیم کره شمالی تایید نشده است. این تحلیل نشان داد که روند افزایشی در فصل سرد هر دو نیم کره (DJF نیم کره شمالی و JJA نیم کره جنوبی) معرف انتقال قطب سوی جت است که می تواند معرف جابجایی شمال سوی مسیر توفان ها از طریق جابجایی شمال سوی انتشار پیچک ها باشد که شرایط آب و هوایی مناطق جنوبی و شمالی جت ها را در هر دو نیم کره تغییر می دهد.

از آنجایی که واداشت گرمایش دررو بیشترین سهم را در گردش نصف النهاری سلول هادلی به عهده دارد و مولفه فرارفت قائم دمای گرمایش دررو $(\omega \frac{\partial T}{\partial p})$ اطراف مدار ۵ درجه شمالی و جنوبی و سرمایش اطراف مدار ۳۰ درجه شمالی و جنوبی محرک اصلی این گردش است (زولوتف و همکاران، ۲۰۱۸)، از این رو برای بررسی اثر افزایش دما بر جریان های جتی، تغییرات دمای سطوح زیرین و زیرین جو در منطقه حاره و جنب حاره در دوره آماری بررسی شد که نتایج آن به ترتیب در جدول های ۲ و ۳ آورده شده است. از جدول ۲ دیده می شود که خط روند میانگین مداری متوسط دمای سطوح زیرین و زیرین در هر دو نیم کره و در فصل های مختلف گرم و سرد منطقه حاره افزایشی است که از نظر آماری در سطح اطمینان ۹۵ درصد نیز تایید شده است و معرف افزایش دمای سطوح زیرین و زیرین در این منطقه می باشد. افزایش دما و گرم شدن منطقه حاره می تواند گستره همرفت سلول هادلی را تقویت کند و از این طریق سبب افزایش سرعت باد و نیز افزایش عرض جغرافیایی محور جت جنب حاره در هر دو فصل گرم و سرد دو نیم کره شمالی و جنوبی شود. همچنین روند افزایشی دمای سطوح زیرین در منطقه حاره نیز می تواند بنا به معادله باد گرمایی، بر مقدار سرعت باد بیافزاید. از جدول ۳ دیده می شود که خط روند میانگین مداری متوسط دمای سطوح زیرین و زیرین در هر دو نیم کره و در فصل های مختلف گرم و سرد منطقه جنب حاره افزایشی است و معرف افزایش دمای سطوح زیرین و زیرین در این منطقه می باشد. افزایش دما و گرم شدن سطوح زیرین منطقه جنب حاره می تواند اختلاف دمای مناطق حاره و جنب حاره را کاهش دهد و از طریق تضعیف گستره گردش نصف النهاری سلول هادلی سبب کاهش سرعت جریان های جتی گردد و ممکن است بتواند افزایش سرعت جریان که در اثر گرم شدن سطوح زیرین منطقه حاره رخ می دهد را خنثی نماید.

به عبارت دیگر چون هر چه دمای سطوح زیرین در منطقه جنب حاره بیشتر شود، گستره بخش نصف النهاری سلول نیز کمتر می گردد که در نتیجه آن عرض جغرافیایی فرونشینی کاهش می یابد. بنابراین سرعت جریان جت در اثر این سازوکار، می تواند نسبت به حالت اولیه، کاهش داشته باشد. هر چه دمای سطوح زیرین در منطقه حاره نیز بیشتر شود همرفت سلول هادلی نیز تقویت می شود و این سازوکار به تنهایی می تواند عامل افزایش سرعت جریان جت شود. از آنجای که دمای سطوح زیرین منطقه حاره و سطوح زیرین منطقه جنب حاره روند افزایشی دارند که مقدار شیب خط روند اولی کمتر از دومی است، از این رو چون روند کاهش در سرعت جریان جت برآورد شده است، چنین به نظر می رسد که اثر تقویت گستره همرفت سلول هادلی نسبت به تضعیف گستره گردش نصف النهاری آن کمتر بوده است.



شکل ۷: تغییرات سالانه میانگین وزنی عرض جغرافیایی جت (درجه در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳). الف) DJF نیم کره شمالی، ب) JJA نیم کره شمالی، ج) DJF نیم کره جنوبی و د) JJA نیم کره جنوبی.

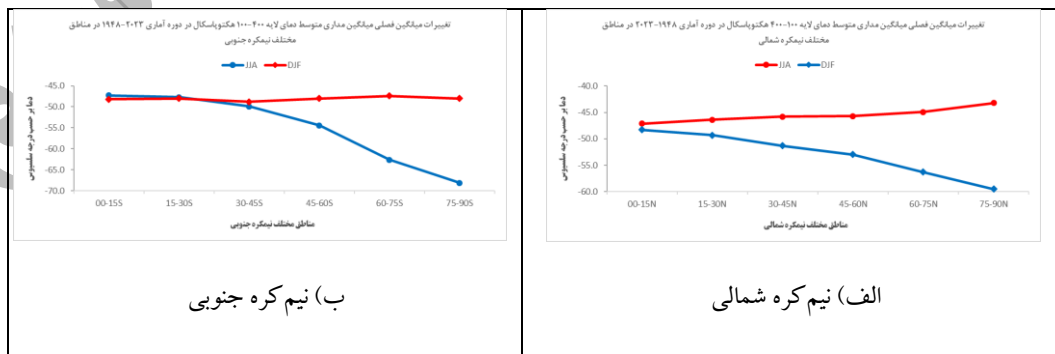
شکل ۸ میانگین فصلی میانگین مداری متوسط دمای لایه زیرین در دو نیم کره شمالی (شکل ۸-الف) و جنوبی (شکل ۸-ب) را نشان می‌دهد. از این شکل‌ها دیده می‌شود که در فصل گرم هر دو نیم کره متوسط دما در مناطق جنب‌حاره بیشتر از مناطق حاره است. بنابراین در لایه‌ای که جریان‌های جتی می‌توانند شکل بگیرند، تغییرات دمای نصف‌النهاری مثبت است و بنا به معادله باد گرمایی، مثبت بودن اختلاف دمای نصف‌النهاری می‌تواند عامل ایجاد افزایش سرعت باد در لایه فوق شود. این شرایط در زمستان رخ نمی‌دهد. شایان ذکر است که علت فاصله خطوط این شکل در مناطق جنب قطبی هر دو نیم کره به سبب اختلاف در رسیدن تابش خورشیدی به مناطق بالای ۶۶/۵ درجه عرض جغرافیای می‌باشد. شکل ۹ تغییرات سالانه بیشترین میانگین سرعت باد ترازهای فشاری ۴۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال در فصل DJF نیم کره شمالی، (شکل ۹-الف)، فصل JJA نیم کره شمالی (شکل ۸-ب)، فصل DJF نیم کره جنوبی (شکل ۹-ج) و فصل JJA نیم کره جنوبی (شکل ۹-د) را نشان می‌دهد. در این شکل‌ها دیده می‌شود که در هر دو فصل نیمکره شمالی (جنوبی) روند بیشترین میانگین سرعت باد افزایشی (کاهش) است. بررسی‌های آماری نشان داد که روند افزایشی فصل زمستان نیم کره شمالی تایید شد در حالی که در فصل گرم تایید نشد. در فصل سرد نیم کره شمالی، شیب خط روند ۰/۴۵ متر بر ثانیه در هر دهه برآورد شده است. شایان ذکر است که روند کاهش فصل زمستان نیم کره جنوبی با مقدار شیب سن ۴/۲۴- تایید شد ولی در فصل گرم تایید نشد. در فصل سرد نیم کره جنوبی، شیب خط روند ۰/۶۶- متر بر ثانیه در هر دهه برآورد شده است. از بررسی تغییرات بیشترین میانگین سرعت باد دیده شد که در فصل سرد هسته جت در نیم کره شمالی روند افزایشی و در نیم کره جنوبی روند کاهش دارد.

جدول ۲: کمیت‌های معادله خط روند بر میانگین مداری متوسط دمای سطوح زیرین و زبرین در منطقه صفر تا ۱۲/۵ درجه عرض جغرافیایی در دو فصل گرم و سرد برای دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳.

منطقه: صفر تا ۱۲/۵ درجه عرض جغرافیایی، نوع روند: در همه حالت‌ها افزایشی، نتیجه روند: تایید، مقدار P: ۰/۰۰۰								
منطقه				سطح زیرین (۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال)				
جنوبی		شمالی		جنوبی		شمالی		
فصل	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	DJF
	کمیت							
شیب خط روند (درجه بر ۱۰۰ سال)	+ ۱/۲۳	+ ۱/۵۳	+ ۱/۱۳	+ ۱/۴۳	+ ۱/۴۶	+ ۱/۷۶	+ ۱/۷۷	+ ۱/۶۰
شیب سن	+ ۴/۴۲۱	+ ۴/۵۷۰	+ ۴/۲۵۱	+ ۴/۴۴۷	+ ۶/۲۸۴	+ ۶/۷۹۸	+ ۸/۷۶۱	+ ۶/۷۴۷

جدول ۳: کمیت‌های معادله خط روند بر میانگین مداری متوسط دمای سطوح زیرین و زبرین در منطقه ۱۵ تا ۳۰ درجه عرض جغرافیایی در دو فصل گرم و سرد برای دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳.

منطقه: ۱۵ تا ۳۰ درجه عرض جغرافیایی، نوع روند: در همه حالت‌ها افزایشی، مقدار P: ۰/۰۰۰								
منطقه				سطح زیرین (۱۰۰۰ تا ۷۰۰ هکتوپاسکال)				
جنوبی		شمالی		جنوبی		شمالی		
فصل	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	DJF
	کمیت							
شیب خط روند (درجه بر ۱۰۰ سال)	+ ۰/۹۷	+ ۱/۵۹	+ ۰/۳۹	+ ۱/۱۶	+ ۱/۴۴	+ ۱/۴۶	+ ۱/۸۳	+ ۱/۰۳
شیب سن	+ ۳/۶۲۶	+ ۵/۳۰۰	+ ۱/۶۱۳	+ ۴/۵۴۸	+ ۸/۶۴۶	+ ۶/۷۲۷	+ ۸/۹۸۰	+ ۴/۹۴۹
نتیجه روند	تایید	تایید	رد	تایید	تایید	تایید	تایید	تایید



شکل ۸: تغییرات سالانه میانگین فصلی میانگین مداری متوسط دمای لایه زبرین در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳ در مناطق مختلف (الف) نیم کره شمالی و (ب) نیم کره جنوبی.



شکل ۹: تغییرات سالانه بیشترین میانگین سرعت باد ترازهای فشاری ۴۰۰ تا ۱۰۰ هکتوپاسکال در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳. الف) DJF نیم کره شمالی، ب) JJA نیم کره شمالی، ج) DJF نیم کره جنوبی و د) JJA نیم کره جنوبی.

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه با استفاده از داده‌های روزانه دما، ارتفاع و مولفه‌های مداری و نصف‌النهاری باد افقی در دوره آماری ۱۹۴۸-۲۰۲۳، که از پایگانی NCEP/NCAR گرفته شد، میانگین وزنی سرعت باد، فشار و عرض جغرافیایی جریان‌های جتی در دو نیمکره شمالی و جنوبی محاسبه شد و با استفاده از مقادیر بدست آمده، روند تغییرات ویژگی‌های جریان جت تحلیل شد.

نتایج کلی نشان داد که به طور متوسط، محور جت‌ها در هر دو نیم کره به سمت قطب جابجا شده‌اند. همچنین جت جنب‌حاره نیمکره جنوبی در هر دو فصل گرم و سرد، در حال تضعیف است و سرعت باد در محور این جت دارای روند کاهشی است در حالیکه جت جنب‌قطبی این نیمکره در هر دو فصل گرم و سرد، تمایل دارد که تقویت شود و سرعت باد در محور این جت روند افزایشی دارد. در نیمکره شمالی در هر دو فصل گرم و سرد، در بخش شمالی محور جت جنب‌حاره روند سرعت باد افزایشی و در بخش جنوبی محور آن روند کاهشی است در صورتیکه در محور جت روند سرعت باد در هر دو فصل افزایشی می‌باشد. یکی از عوامل مهم این تغییرات را می‌توان به روند افزایشی دما در سطوح زیرین و زبرین مناطق حاره و جنب‌حاره هر دو نیم کره مربوط کرد.

پس از برآورد شاخص‌های تعیین شده، الگوی نتایج بدست آمده با نتایج آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) مقایسه شد. الگوهای مربوط به شاخص‌ها هماهنگ بودند ولی تفاوت‌هایی از نظر مقدار در شاخص‌ها مشاهده شد که در شاخص میانگین وزنی سرعت باد و میانگین وزنی عرض جغرافیایی جزئی و در میانگین وزنی فشار قابل توجه بود. علت تفاوت‌های جزئی را می‌توان به انتخاب دوره آماری، منابع داده‌ای مختلف و به‌روز کردن روابط بکار گرفته ربط داد. این پژوهشگران از داده‌های ERA-40 و دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۰۱ استفاده کرده بودند. تفاوت

قابل توجه مقدار میانگین وزنی فشار به منطقه گرمسیری دو نیمکره مربوط بود که در پژوهش آرچر و کالدیرا (۲۰۰۸) برای این مناطق میانگین وزنی فشار کمتر از ۲۳۰ هکتوپاسکال ثبت شده است در حالیکه در پژوهش حاضر مقدار این شاخص در فصل JJA در نیمکره شمالی از جنوب دریای سرخ به سوی شرق هند و برمه و در فصل DJF در جنوب استرالیا کمتر از ۲۱۵ هکتوپاسکال برآورد شده است. این اختلاف ممکن است به سبب برآورد نشدن میانگین وزنی فشار در منطقه حاره دو نیمکره ایجاد شده باشد. همچنین میانگین وزنی سرعت باد در فصل سرد نیم کره شمالی با نتایج لی و همکاران (۲۰۱۹) مقایسه شد. نتایج نشان داد که الگوی فصل سرد نیم کره شمالی با نتایج این پژوهشگران هماهنگ است. آنها نیز در دوره آماری ۲۰۱۸-۱۹۷۹ در فصل سرد نیم کره شمالی، دو هسته بیشینه میانگین وزنی سرعت باد را در غرب ژاپن و غرب ایالات متحده آمریکا محاسبه کرده‌اند و نشان داده‌اند که بیشینه میانگین وزنی سرعت باد در شرق ژاپن در روی نصف‌النهار ۱۴۰ درجه شرقی بیش از ۶۰ متر بر ثانیه است. بعلاوه نتایج این مطالعه با بخشی از پژوهش‌های هادسون (۲۰۱۱)، لی و همکاران (۲۰۱۹)، وولینگ و همکاران (۲۰۲۳)، مانی و هگلین (۲۰۱۸) و زولوتف و همکاران (۲۰۱۸) نیز مقایسه شد. نتایج از نظر جابجایی قطب سوی جت جنب حاره در دو نیم کره مختلف با پژوهش‌های مانی و هگلین (۲۰۱۸)؛ وولینگ و همکاران، (۲۰۲۳) و عالمزاده و همکاران، (۱۳۹۶) هماهنگ بود ولی از نظر مقدار شیب روند تفاوت‌های با پژوهش‌های دیگر دیده شد. در پژوهش هادسون (۲۰۱۱)، جابجایی شمال سوی جت جنب حاره نیم کره شمالی ۳/۵ درجه بر سی سال (۱/۲ درجه بر دهه) و در نیم کره جنوبی ۶/۵ درجه در هر سی سال (۲/۲ درجه بر دهه) برآورد شده است که در مقایسه با بیشترین شیب خط روند برآورد شده در این پژوهش تفاوت قابل توجهی دارد. این تفاوت نمی‌تواند به دلیل منابع داده‌ای، دوره آماری و فصل‌های مختلف باشد و احتمالاً به سبب تفاوت در شیوه کار و نحوه محاسبات شیب خط ایجاد شده است که به نظر می‌رسد غیر قابل استناد باشد.

لی و همکاران (۲۰۱۹) و نیز زولوتف و همکاران (۲۰۱۸)، شیب خط روند برای زمستان نیم کره شمالی را به ترتیب ۰/۲۲ و ۰/۱۶ درجه بر دهه برآورد کرده‌اند که با نتایج این پژوهش (۰/۶۱ درجه بر دهه)، اختلاف قابل توجهی (حدود سه برابر) دارد و تفاوت را می‌توان در انتخاب منابع داده‌ای و دوره آماری متفاوت نسبت داد. یکی دیگر از علت‌های اختلاف در مقدار روندهای بدست آمده را می‌توان در نحوه استفاده از شاخص‌ها دانست. چون میانگین وزنی سرعت باد سبب حذف نوسانات و هموار کردن سرعت باد می‌شود، از این رو استفاده از این شیوه می‌تواند عامل کوچک بودن مقادیر روند در این پژوهش و علت تفاوت با پژوهش‌های فوق باشد. شایان ذکر است که این پژوهش اگر با منابع داده‌ای متفاوت و دوره‌های آماری دیگری انجام شود، می‌تواند نتایج متفاوتی داشته باشد ولی الگوهای بدست آمده تغییر قابل توجهی نخواهند داشت.

منابع

- حسینی صدیق، س.، م.، جعفری، ت. و جلالی، م.، ۱۴۰۰، گسترش قطب سوی رودباد جنب حاره نیمکره شمالی در عرض‌های میانه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، دوره ۲، شماره ۷، صفحه ۱ تا ۱۲.
- درستکار، ه.، لشکری، ح. و محمدی، ز.، ۱۴۰۲، تحلیل همدیدی نقش جت جنب حاره‌ای در ترسالی‌های جنوب غرب ایران، مجله پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، دوره ۱۴۰۲، شماره ۵۴، صفحه ۱ تا ۱۸.
- عالمزاده، ش.، احمدی گیوی، ف.، محب‌الحجه، ع.ر. و یازجی، د.، ۱۳۹۶، ساختار هندسی جت آفریقا-آسیا در وردسپهر زیرین و پاسخ آن به گرمایش زمین در مدل‌های CMIP5 مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱۱، شماره ۳، صفحه ۱ تا ۲۶.
- قانقرمه، ع.، ۱۳۹۹، ارزیابی تغییر مویعیت رودباد جنب حاره‌ای مستقر بر روی ایران و آینده‌نگری آن بر اساس دو مدل اقلیمی CanESM2 و GFDL-CM3، نشریه علمی-پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره نهم، شماره ۲۵، صفحه ۱۰۱ تا ۱۲۴.

کیخسروی، ق.، شکبیا، ع.، ر. و حمیدپور، پ.، ۱۴۰۱، تحلیل الگوهای همدیدی و ترمودینامیک منجر به بارش‌های ابر سنگین و برآورد پهنه آبی حاصل از بارش‌ها در حوضه آبخیز کرخه، مجله مطالعات جغرافیایی نواحی ساحلی، دوره ۳، شماره ۸، صفحه ۸۳ تا ۱۰۰.

محمدی، ب.، علیجانی، ب. و عمر صالح، آ.، ۱۳۹۸، اقلیم‌شناسی رودباده‌ها در خاورمیانه، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۱، شماره ۲، صفحه ۲۰۱ تا ۲۲۱.

- Archer, C.L. and Caldeira, K., 2008, Historical trends in the jet streams, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08803, <https://doi.org/10.1029/2008GL033614>, 2008.
- Belmecheri, S., Babst, F., Hudson, A.R., Betancourt, J., and Trouet, V., 2017, Northern Hemisphere jet stream position indices as diagnostic tools for climate and ecosystem dynamics, *Earth Interact.*, 21, 1–23.
- Christenson, C.E., Martin, J.E. and Handlos, Z.J., 2017, A Synoptic Climatology of Northern Hemisphere, Cold season Polar and Subtropical Jet Superposition Events, *Journal of Climate*, 30(18), 7231-7246.
- Faranda, D., Sato, T., Messori, G., Moloney, N.R. and Yiou, P., 2019, Minimal dynamical systems model of the Northern Hemisphere jet stream via embedding of climate data, *Earth Syst. Dynam.*, 10, 555–567.
- Hall, R.J., Erdélyi, R., Hanna, E., Jones, J. and Scaife, A., 2014, Drivers of north atlantics polar front jet stream variability, *International Journal of Climatology*, 35, 1-25.
- Hall, R.J., Jones, J.M., Hanna, E., Scaife, A.A., and Erdélyi, R., 2017, Drivers and potential predictability of summer time north atlantics polar front jet variability, *Climate Dynamics*, 48 (11), 3869–3887.
- Hudson, R., 2011, Measurements of the movement of the jet streams at mid-latitudes, in the Northern and Southern Hemispheres, 1979 to 2010, *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*. 11. 31067-31090.
- Lee, S.; Kim, H.K., 2008, The dynamical relationship between subtropical and eddy-driven jets, *J. Atmos. Sci.*, 60(12), 1490–1503.
- Li, Z., Fan, K. and Xu, Z., 2019, Modified Three-Dimensional Jet Indices and Their Application to East Asia, *Atmosphere*, 10(12), 776, 1-17.
- Manney, G.L. and Hegglin, M.I., 2018, Seasonal and regional variations of long-term changes in upper-tropospheric jets from reanalysis, *J. Climate*, 31, 423-48.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996, The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–470.
- Krishnamurti, T. N., 1961, The subtropical jet stream of winter, *J. Meteor.*, 18, 172–191.
- Koteswaram, P., 1953, An analysis of the high tropospheric wind circulation over India in winter, *Indian J. Meteor. Geophys.*, 4, 13–21.
- Krüger, J., 2020, Characteristic Jet Stream patterns related to European Heat Waves, (Master thesis), Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel, Germany, 57 pp.
- Kuang, X.Y., Zhang, Y.C. and Liu, J., 2007, Seasonal variations of the East Asian subtropical westerly jet and the thermal mechanism, *Acta Meteorologica Sinica*. 21. 192-203.
- Palmén, E. and Newton, C.W., 1969, *Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation*, Academic Press, 603 pp.
- Pena-Ortiz, C., Gallego, D., Ribera, P., Ordonez, P. and Alvarez-Castro, M.D.C, 2013, Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118 (7), 2702–2713.
- Riehl, H., 1962, Jet streams of the atmosphere, Colorado State University Dept. of Atmospheric Science Tech. Rep. 32, 117 pp.
- Röthlisberger, M., Pfahl, S., and Martius, O., 2019, Regional-scale jet waviness modulates the occurrence of mid-latitude weather extremes, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 10989–10997.
- Rousi, E., Kornhuber, K., Beobide-Arsuaga, G., Luo, F. and Coumou, D., 2022, Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia, *Nat Commun* 13, 3851, 1-11.
- Shapiro, M. A. and Keyser, D., 1990, Fronts, jet streams and the tropopause, *Extratropical Cyclones: The Erik Palmén Memorial Volume*, C. Newton and E. O. Holopainen, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 167–191.
- Strong, C. and Davis, R., 2007, Winter jet stream trends over the Northern Hemisphere, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133. 2109 - 2115.
- Woollings, T., Drouard, M., O'Reilly, C.H., Sexton, D.M.H. and McSweeney, C., 2023, Trends in the atmospheric jet streams are emerging in observations and could be linked to tropical warming, *Commun Earth Environ* 4, 125.
- Zolotov, S., Ippolitov, I. and Loginov, S., 2018, Characteristics of the subtropical jet stream over the North Atlantic from reanalysis data, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 211.