



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 7, No. 27, Autumn 2026



Assessment of the Northward Displacement of the Northern Tropical Belt Edge toward Iran Based on Tropopause Indices

Hossein Mirmousavi¹, Helaleh Fahimi^{2*}

¹Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Email: hossein.mirmousavi@znu.ac.ir

²(Corresponding Author) Postdoctoral Researcher, University of Zanjan, Zanjan, Email: hh.fahimi@yahoo.com

Article Info	ABSTRACT
Article type: Research Full Paper Article history: Received: 2026-06-19 Revised: : 2026-08-06 Accepted: 2026-08-23 Keywords: Tropical Belt Expansion Hadley Cell Tropopause Structural Convergence Southwest Asia Iran Climate	The poleward expansion of the tropical belt is considered one of the most prominent responses of the climate system to global warming; however, its regional implications for Southwest Asia and Iran remain insufficiently understood. This study investigates the displacement of the northern edge of the tropical belt over Southwest Asia during 1980–2024 at monthly and seasonal scales, with particular emphasis on its spatial changes toward Iran. Using ERA5 data, the tropical belt edge was identified based on two tropopause-related indices, namely the Tropopause Gradient Latitude (TGL) and the 15-km Tropopause Height (TP15), and the composite HCE index was calculated as the mean of these two estimates. The Structural Convergence Index (SCI) was also used to quantify the coherence between the dynamical and thermodynamic boundaries. The results showed that, during 2001–2024, the northern tropical belt edge shifted to higher latitudes in all seasons compared with 1980–2000. The largest mean seasonal displacement occurred in summer, reaching 3.25° of latitude (approximately 361 km), whereas the smallest displacement was observed in winter, at 0.87° (approximately 97 km). The maximum structural convergence (84.8%) occurred in winter, while the minimum value (21.5%) was observed in summer. The greatest penetration toward Iran occurred in summer, accounting for 44% of the total annual penetration, when the tropical belt edge extended into the central and northern latitudes of the country, reaching approximately 40°N. The results also indicated that the most pronounced expansion was concentrated between June and September and within the latitudinal band of 42°–47°N. Statistical tests confirmed a significant difference in the position of the northern tropical belt edge between the two study periods. Overall, the findings showed that the displacement of the northern tropical belt edge over Southwest Asia follows a distinct seasonal pattern, with its greatest advance toward Iranian latitudes occurring during summer. In the present study, the simultaneous application of tropopause indices and the quantification of seasonal and spatial variations in the tropical belt edge provided a more integrated assessment of the expansion of this system toward Iran.

Cite this article: Rezaie, J., Jalali, M., Asakereh, H., Mahmoudi, P., Darnd, M. (2026). A Comparative Assessment of Remote Sensing Indices for Monitoring Agricultural Drought in the Jazmourian Basin Focusing on Lagged Response to Precipitation. *Journal of the Climate Change research*, 7 (27), 45-68.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

DOI: [10.30488/ccr.2026.587558.1343](https://doi.org/10.30488/ccr.2026.587558.1343)



ارزیابی جابجایی لبه شمالی کمربند حاره به سوی ایران بر پایه شاخص‌های وردایست

حسین میرموسوی^۱، هلاله فهیمی^{۲*}

^۱ گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، رایانامه: hossein.mirmousavi@znu.ac.ir

^۲ (نویسنده مسئول) دانشجوی پسا دکتری گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، رایانامه: hh.fahimi@yahoo.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۳/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۶/۱ واژه‌های کلیدی: گسترش کمربند حاره سلول هدی وردایست همگرایی ساختاری جنوب غرب آسیا اقلیم ایران	گسترش قطب سوی کمربند حاره یکی از برجسته ترین پاسخ‌های سامانه اقلیمی به گرمایش جهانی محسوب می‌شود، اما پیامدهای منطقه‌ای آن در جنوب غرب آسیا و ایران همچنان به خوبی شناخته نشده است. پژوهش حاضر به بررسی جابجایی لبه شمالی کمربند حاره در جنوب غرب آسیا طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۴ بصورت ماهانه و فصلی پرداخته و بر تغییرات مکانی آن به سوی ایران تمرکز دارد. با استفاده از داده‌های ERA5، موقعیت لبه حاره با دو شاخص تروپوپاز (شامل لبه گرادیان دما (TGL) و ارتفاع تروپوپاز ۱۵ کیلومتر (TP15)) تعیین و شاخص ترکیبی HCE از میانگین آنها محاسبه شد. شاخص همگرایی ساختاری (SCI) نیز برای کمی‌سازی انسجام مرزهای دینامیکی و ترمودینامیکی استفاده شد. نتایج نشان داد که موقعیت لبه شمالی کمربند حاره در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۴ نسبت به دوره ۱۹۸۰-۲۰۰۰ در تمامی فصول به عرض‌های شمالی‌تر جابجا شده است. بیشترین میانگین جابجایی فصلی در تابستان، برابر با ۳/۲۵ درجه عرض جغرافیایی (حدود ۳۶۱ کیلومتر)، و کمترین آن در زمستان، برابر با ۰/۸۷ درجه (حدود ۹۷ کیلومتر)، است. بیشینه همگرایی ساختاری (۸/۸۴ درصد) در زمستان و کمینه آن (۲۱/۵ درصد) در تابستان مشاهده شد. بیشترین نفوذ به ایران در تابستان (۴۴ درصد) از کل نفوذ سالانه رخ می‌دهد که لبه حاره تا عرض‌های مرکزی و شمالی کشور (تا ۴۰ درجه شمالی) پیشروی می‌کند. همچنین نتایج نشان داد بیشترین شدت گسترش در بازه ژوئن تا سپتامبر و عرض‌های ۴۲ تا ۴۷ درجه شمالی متمرکز است. آزمون‌های آماری، تفاوت معنی‌دار موقعیت لبه شمالی کمربند حاره میان دو دوره مورد مطالعه را تأیید کردند. در مجموع، یافته‌ها نشان داد که جابجایی لبه شمالی کمربند حاره در جنوب غرب آسیا از الگوی فصلی مشخصی پیروی می‌کند و بیشترین پیشروی آن به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران در فصل تابستان رخ می‌دهد. در پژوهش حاضر استفاده هم زمان از شاخص‌های وردایست و کمی‌سازی تغییرات فصلی و مکانی لبه کمربند حاره، امکان ارزیابی منسجم‌تر گسترش این سامانه به سوی ایران را فراهم نموده است.

استناد: میرموسوی، حسین؛ فهیمی، هلاله (۱۴۰۵). ارزیابی جابجایی لبه شمالی کمربند حاره به سوی ایران بر پایه شاخص‌های وردایست. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۷ (۲۷)، ۶۸-۴۵.



مقدمه

تغییر اقلیم در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست محیطی جهان تبدیل شده است. افزایش دمای سطح زمین، تغییر الگوهای بارش، افزایش فراوانی رخداد‌های حدی و بازآرایی ساختار گردش عمومی جو از مهم‌ترین پیامدهای این پدیده به شمار می‌روند (IPCC, 2021, 45). در این میان، تغییرات ساختاری در سلول هدلی و جابجایی قطب سوی کمربند حاره از برجسته‌ترین جلوه‌های تغییر اقلیم در مقیاس سیاره‌ای محسوب می‌شود (Hu & Fu, 2007, 5230; Seidel et al., 2008, 21). کمربند حاره به عنوان مهم‌ترین سامانه گردشی جو در عرض‌های پایین، نقش کلیدی در توزیع انرژی، انتقال رطوبت و تعیین موقعیت کمربند‌های خشک و بارشی در سطح زمین ایفا می‌کند و هرگونه جابجایی در موقعیت مداری آن می‌تواند پیامد‌های اقلیمی گسترده‌ای، به ویژه در مناطق انتقالی و نیمه خشک همچون ایران، به دنبال داشته باشد (Held & Hou, 1980, 515; Davis & Birner, 2017, 1211).

در سطح جهانی، مطالعات متعددی به بررسی روند، عوامل و پیامد‌های جابجایی قطب سوی کمربند حاره پرداخته‌اند. فو و همکاران (۲۰۰۶) افزایش گازهای گلخانه‌ای و کاهش ازن استراتوسفری را از مهم‌ترین عوامل گسترش کمربند حاره معرفی کردند. سیدل و رندل (۲۰۰۷) در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که کردند که مرزهای کمربند حاره در هر دهه حدود ۰/۵ تا ۱ درجه عرض جغرافیایی به سمت قطب‌ها جابجا شده‌اند. یوهانسون و فو (۲۰۰۹) نشان دادند که این گسترش با کاهش بارش در مناطق جنب حاره‌ای همراه است. لو و همکاران (۲۰۰۷) تأثیر این پدیده را بر جابجایی جریان جت‌های جنب حاره‌ای و تغییر مسیر سامانه‌های طوفانی تأیید کردند. دیویس و روزنلف (۲۰۱۲) نشان دادند که شدت جابجایی کمربند حاره در نیمکره جنوبی بیش از نیمکره شمالی بوده است. لوکاس و همکاران (۲۰۱۴) کاهش بارش و افزایش خشکسالی در استرالیا را با گسترش قطب سوی کمربند حاره مرتبط دانستند. همچنین استیتن

و همکاران (۲۰۱۸)، شیان (۲۰۲۱) و فریزن و همکاران (۲۰۲۲) بر نقش این پدیده در تغییر رژیم بارش مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان تأکید کرده‌اند. در سوی دیگر، پست و همکاران (۲۰۱۴) کاهش بارش در مناطق مدیترانه‌ای را به جابجایی سلول هدلی نسبت دادند و نوریس و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP5 نشان دادند که گسترش کمربند حاره موجب انتقال نواحی خشک به عرض‌های بالاتر می‌شود. آلن و کوویلاکام (۲۰۱۹) نیز تغییرات ساختار سلول هدلی را یکی از عوامل اصلی دگرگونی الگوهای بارش در عرض‌های میانی دانستند. با این حال، اغلب پژوهش‌های پیشین بر موقعیت متوسط لبه کمربند حاره متمرکز بوده‌اند و کمتر به ابعاد ساختاری تغییرات آن، از جمله شدت نفوذ به عرض‌های بالاتر و بازآرایی زمانی مرز حاره‌ای، توجه کرده‌اند (Lucas et al., 2014, 90; Staten et al., 2018, 770).

در ایران نیز پژوهش‌های متعددی در زمینه سامانه‌های حاره‌ای و برون حاره‌ای انجام شده است. مسعودیان (۱۳۹۰) نشان داد که موقعیت ایران در مرز سامانه‌های حاره‌ای و عرض‌های میانی موجب حساسیت بالای کشور نسبت به تغییرات گردش جو شده است. حسینی صدیق و همکاران (۱۳۹۸؛ ۱۴۰۱) تغییرات کمربندهای اقلیمی را در منطقه جنوب غرب آسیا بررسی کردند و شواهدی از جابجایی کمربند حاره در منطقه خاورمیانه ارائه نمودند. فهیمی و همکاران (۱۴۰۰) نقش برهمکنش الگوهای گردشی حاره-برون حاره را در بارش‌های فرین فراگیر ایران بررسی کردند. عساکره (۱۳۹۵) با تحلیل مرز شمالی پشته پرفشار جنب حاره بر روی ایران، ارتباط معناداری میان تغییرات مکانی این پشته و نوسانات بارشی کشور یافت. لشکری و محمدی (۱۳۹۴) نیز اثر موقعیت استقرار پرفشار جنب حاره‌ای عربستان بر سامانه‌های بارشی در جنوب و جنوب غرب ایران را تأیید کردند. با این حال، بیشتر مطالعات داخلی به بررسی نقش سامانه‌های منفرد جوی پرداخته‌اند و کمتر به تحلیل همزمان ابعاد ساختاری جابجایی

کمربند حاره، به ویژه بر اساس شاخص‌های تروپوپازی، توجه شده است.

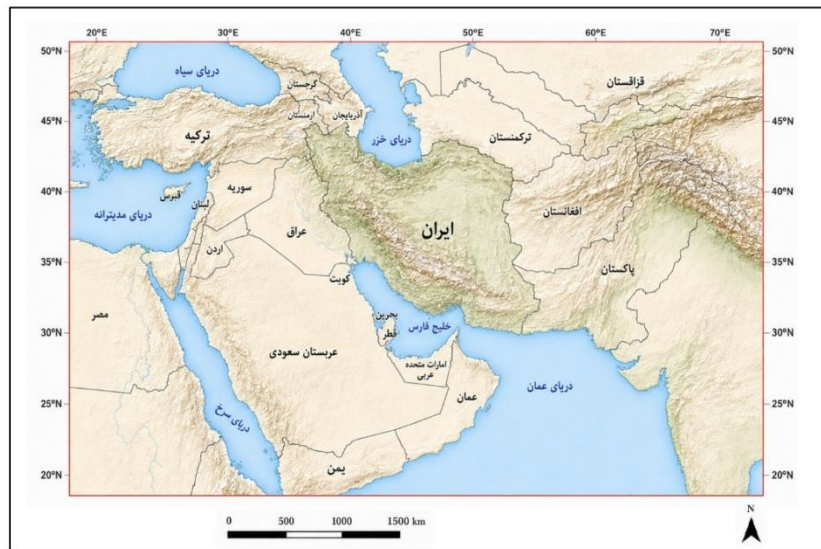
علیرغم پیشرفت‌های قابل توجه، هنوز چند شکاف اساسی در دانش موجود وجود دارد: (۱) بیشتر مطالعات خارجی بر روند جابجایی کمربند حاره در مقیاس جهانی متمرکز بوده‌اند و تحلیل‌های منطقه‌ای با رویکرد ساختاری در جنوب غرب آسیا محدود است؛ (۲) در مطالعات داخلی، تأثیر ترکیبی و ساختاری جابجایی خود لبه کمربند حاره بر اساس شاخص‌های تروپوپازی کمتر مورد ارزیابی قرار گرفته است؛ (۳) هنوز مشخص نیست که گسترش قطب سوی کمربند حاره در منطقه خاورمیانه چه ابعاد ساختاری (شامل شدت جابجایی، نفوذ به عرض‌های جغرافیایی ایران و بازآرایی زمانی) داشته است و آیا این تغییرات در دو دوره اقلیمی پیش و پس از تشدید گرمایش جهانی متفاوت بوده است.

بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر، شناسایی و کمی‌سازی تغییرات ساختاری لبه شمالی کمربند حاره در جنوب غرب آسیا و ارزیابی میزان گسترش آن به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران طی دوره ۲۰۲۴-۱۹۸۰ است. در این پژوهش تلاش است تا موقعیت لبه شمالی کمربند حاره بر اساس دو شاخص مکمل وردایستی شامل لبه گرادیان دما (TGL) و ارتفاع وردایست ۱۵ کیلومتر (TP15) تعیین شود و تغییرات فصلی و بین دوره‌ای آن تحلیل گردد؛ همچنین با استفاده از این شاخص‌ها، میزان جابجایی لبه کمربند حاره و نفوذ آن به سوی عرض‌های ایران در دو دوره اقلیمی ۲۰۲۴-۲۰۰۱ و ۲۰۰۰-۱۹۸۰ مقایسه شود. نتایج این پژوهش می‌تواند به روشن‌سازی نقش واقعی جابجایی کمربند حاره در تغییرات ساختاری اقلیم منطقه کمک کند.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از مجموعه داده‌های بازتحلیل ERA5 مرکز اروپایی پیش‌بینی

میان مدت وضع هوا استخراج شد. ERA5 به عنوان یکی از دقیق‌ترین محصولات بازتحلیل جو، با استفاده از سامانه همگون سازی داده‌ها، امکان بازسازی پیوسته وضعیت جو را در مقیاس جهانی فراهم می‌کند (Hersbach et al., 2020, 1999). داده‌ها با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه طولی و عرضی، معادل تقریباً ۲۸ کیلومتر در منطقه مورد مطالعه، و تفکیک زمانی ماهانه برای دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۴ دریافت شدند. برای محاسبه شاخص‌های وردایست، داده‌های دما در ۳۲ تراز فشاری ERA5 استخراج و از پروفیل قائم حاصل برای بررسی تغییرات نرخ کاهش دما با ارتفاع و تعیین موقعیت وردایست استفاده شد. از میان این ترازها، سطوح فشاری ۳۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال به دلیل قرارگیری در بخش بالایی تروپوسفر و مجاورت ناحیه وردایست، به طور مشخص در تحلیل ساختار این ناحیه مورد توجه قرار گرفتند؛ با این حال، تعیین وردایست صرفاً بر اساس این دو تراز انجام نشد و پروفیل قائم دما در مجموعه ۳۲ تراز فشاری مبنای شناسایی آن بود. بر این اساس، تغییرات گرادیان قائم دما برای تعیین شاخص TGL بررسی شد و ارتفاع وردایست نیز برای شناسایی عرض جغرافیایی متناظر با آستانه ۱۵ کیلومتر در شاخص TP15 مورد استفاده قرار گرفت. قلمرو مکانی پژوهش محدوده جنوب غرب آسیا را در بازه تقریبی ۲۰ تا ۷۰ درجه طول شرقی و ۲۰ تا ۵۰ درجه عرض شمالی در بر می‌گیرد و برای تحلیل ارتباط نتایج با ایران، بازه ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی مدنظر قرار گرفت (شکل ۱). دوره مطالعه شامل سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۴ است. برای مقایسه اقلیم شناختی میان بخش ابتدایی و اخیر دوره مطالعه به دو زیردوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ تقسیم شد. این تقسیم‌بندی صرفاً چارچوبی برای مقایسه میانگین موقعیت لبه تروپوپازی در دو بخش زمانی داده‌ها است.



شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

روش پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، شناسایی و کمی‌سازی جابجایی لبه شمالی کمر بند حاره در جنوب غرب آسیا و ارزیابی گسترش آن به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۴ است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که موقعیت وردایست یکی از شاخص‌های مناسب برای تشخیص مرز کمر بند حاره است، زیرا تغییرات ساختار حرارتی و ارتفاع آن با جابجایی عرضی کمر بند حاره ارتباط دارد (Seidel et al., 2008, 21; Birner, 2010, 1; Davis & Birner, 2017, 1211). در پژوهش حاضر، به منظور حفظ تغییرپذیری درون‌سالانه، محاسبات با تفکیک زمانی ماهانه انجام شد و موقعیت شاخص‌های TGL و TP15 برای هر یک از دوازده ماه و در هر یک از دو زیردوره به طور مستقل تعیین گردید. میانگین موقعیت هر شاخص در این پژوهش به میانگین مکانی عرض جغرافیایی لبه در امتداد محدوده طولی مطالعه برای یک ماه مشخص اشاره دارد و به معنای میانگین‌گیری زمانی از ماه‌های سال نیست. پس از تعیین موقعیت ماهانه دو شاخص، جابجایی هر ماه میان دو زیردوره محاسبه و سپس نتایج برای تبیین الگوی فصلی نیز تجمیع و مقایسه شدند. بر این اساس، علاوه بر تغییر مکان عرضی لبه، تغییرپذیری ماهانه و فصلی آن و میزان پیشروی به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران نیز

مورد ارزیابی قرار گرفت. چارچوب روش‌شناسی

پژوهش شامل چهار مرحله اصلی به شرح زیر است:

شاخص‌های تشخیص جابه‌جایی لبه شمالی کمر بند حاره: در این پژوهش، جابجایی لبه شمالی کمر بند حاره بر اساس دو شاخص مکمل تروپوپازی تعیین شد: شاخص دینامیکی لبه گرادیان دما (TGL) و شاخص ترمودینامیکی ارتفاع تروپوپاز ۱۵ کیلومتر (TP15). استفاده از شاخص‌های تروپوپازی در مطالعات گسترش کمر بند حاره سابقه دارد، زیرا تروپوپاز در عرض‌های حاره‌ای و برون‌حاره‌ای ساختار متفاوتی دارد و تغییرات آن می‌تواند گسترش یا عقب‌نشینی کمر بند حاره را آشکار کند (Seidel & Randel, 2007, 2; Seidel et al., 2008, 22).

الف) شاخص دینامیکی لبه گرادیان دما: شاخص نخست، لبه گرادیان دما (Tropopause Gradient Latitude) است. در این شاخص، لبه شمالی کمر بند حاره به صورت عرض جغرافیایی متناظر با شکست مکانی در میدان گرادیان قائم دما در ناحیه تروپوپاز تعیین شد. مبنای این شاخص آن است که گذار از تروپوپاز حاره‌ای به تروپوپاز عرض‌های میانی با تغییر آشکار در ساختار حرارتی و گرادیانی جو همراه است (Birner, 2010, 5; Davis & Birner, 2017, 1214).

$$\Delta TGL_m = TGL_{2,m} - TGL_{1,m}$$

$$\Delta TP15_m = TP15_{2,m} - TP15_{1,m} \quad (۳)$$

مقادیر مثبت نشان دهنده جابجایی شمال سو و مقادیر منفی نشان دهنده عقب نشینی جنوب سو هستند.

(د) شاخص ترکیبی موقعیت لبه کمربند حاره، HCE: از آنجا که برآورد موقعیت لبه کمربند حاره به نوع شاخص مورد استفاده حساس است، برای کاهش عدم قطعیت، موقعیت نهایی لبه شمالی کمربند حاره از میانگین دو شاخص پایه محاسبه شد. استفاده همزمان از چند شاخص برای تعیین موقعیت لبه کمربند حاره در مطالعات گسترش حاره‌ای توصیه شده است (Seidel et al., 2008, 22; Davis & Rosenlof, 2012, 1062):

$$HCE_{p,m} = \frac{TGL_{p,m} + TP15_{p,m}}{2} \quad (۴)$$

با توجه به اینکه هر دو شاخص TGL و TP15 از اعتبار یکسانی در تعیین موقعیت لبه کمربند حاره برخوردارند و هیچ یک بر دیگری برتری نظری یا تجربی ندارد، وزن برابر به آن‌ها اختصاص یافت. برای ارزیابی حساسیت نتایج به وزن دهی، تحلیل حساسیتی با نسبت‌های وزنی مختلف (۶۰-۴۰ و ۷۰-۳۰) انجام شد که تغییر معناداری در نتایج نهایی ایجاد نکرد.

شاخص همگرایی ساختاری (SCI): به منظور کمی‌سازی تغییر فاصله مکانی میان دو تشخیص وردایستی، موقعیت عرضی شاخص‌های TGL و TP15 استخراج و میانگین عرض جغرافیایی هر شاخص در محدوده مطالعه محاسبه شد. فاصله مطلق میان موقعیت دو شاخص به عنوان معیاری از میزان جدایی یا هم مکانی آنها در نظر گرفته شد؛ به گونه‌ای که کاهش فاصله نشان دهنده افزایش توافق مکانی TGL و TP15 و افزایش فاصله بیانگر کاهش توافق میان آن‌ها است (Wilks, 2011, 168). برای کمی‌سازی تغییر این فاصله میان دو زیردوره، شاخص همگرایی ساختاری (SCI) به صورت درصد تغییر فاصله نسبت به دوره مرجع تعریف شد: (Wilks, 2011, 168)

$$SCI_m = \left(1 - \frac{Gap_{2,m}}{Gap_{1,m}}\right) \times 100 \quad (۷)$$

برای شناسایی این شکست، ابتدا گرادیان قائم دما (lapse rate) در هر نقطه از شبکه محاسبه شد. سپس موقعیت لبه گرادیان دما به عنوان عرض جغرافیایی که در آن بیشترین تغییرات نصف‌النهاری در گرادیان قائم دما رخ می‌دهد، تعریف گردید. موقعیت میانگین این لبه برای هر ماه و هر دوره از رابطه زیر محاسبه شد:

$$TGL_{p,m} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n TGL_{p,m,j} \quad (۱)$$

که در آن $TGL_{p,m}$ موقعیت میانگین لبه گرادیان دما در دوره p و ماه m ، $TGL_{p,m,j}$ موقعیت لبه در طول جغرافیایی j و n تعداد مقاطع طولی است. این رابطه یک میانگین مکانی است که برای خالص‌سازی موقعیت عرضی لبه در پهنه مطالعه استفاده شد (von Storch & Zwiers, 1999, 215).

(ب) **شاخص ترمودینامیکی ارتفاع تروپوپاز ۱۵ کیلومتر، TP15:** شاخص دوم، ارتفاع تروپوپاز ۱۵ کیلومتر (Tropopause Height 15 km) است. در این شاخص، عرض جغرافیایی متناظر با مرز گسترش تروپوپاز مرتفع (حدود ۱۵ کیلومتر) به عنوان شاخص ترمودینامیکی در نظر گرفته شد. استفاده از ارتفاع تروپوپاز برای تشخیص گسترش حاره‌ای در مطالعات پیشین رواج داشته است، زیرا تروپوپاز حاره‌ای معمولاً مرتفع‌تر از تروپوپاز عرض‌های میانی است. موقعیت میانگین این لبه از رابطه زیر محاسبه شد (Seidel & Randel, 2007, 3; Seidel et al., 2008, 22):

$$TP15_{p,m} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n TP15_{p,m,j} \quad (۲)$$

که در آن $TP15_{p,m}$ موقعیت میانگین لبه تروپوپاز ۱۵ کیلومتر در دوره p و ماه m ، $TP15_{p,m,j}$ موقعیت این لبه در طول جغرافیایی j و n تعداد مقاطع طولی است.

(ج) **محاسبه جابجایی هر شاخص:** پس از استخراج موقعیت دو شاخص در هر یک از دوره‌های زمانی، میزان جابجایی آنها از طریق اختلاف دو دوره محاسبه شد. تحلیل اختلاف دوره‌ای یکی از متداول‌ترین روش‌های ارزیابی تغییر اقلیم بلند مدت است (von Storch & Zwiers, 1999, 220; Wilks, 2011, 175):

به منظور ارائه تفسیری فیزیکی از میزان جابه‌جایی، مقادیر عرض جغرافیایی به کیلومتر تبدیل شدند (Snyder, 1987, 32):

$$\Delta K_m = 111 \times \Delta HCE_m \quad (۶)$$

که در آن ۱۱۱ کیلومتر معادل تقریبی یک درجه عرض جغرافیایی در سطح زمین است.

به منظور کاهش عدم قطعیت ناشی از تفسیر بصری نقشه‌ها، موقعیت عرضی هر یک از شاخص‌های TGL و TP15 از روی مرزهای وردایستی استخراج شد و سپس میانگین عرض جغرافیایی آن‌ها در محدوده مطالعه محاسبه گردید. با توجه به مقیاس نقشه‌ها و تفکیک مکانی داده‌های مورد استفاده، دقت تعیین موقعیت لبه کمر بند حاره حدود ± 0.5 درجه عرض جغرافیایی برآورد شد که در محدوده قابل قبول مطالعات اقلیم‌شناسی منطقه‌ای قرار دارد (Wilks, 2011, 168).

آزمون معنی‌داری تفاوت بین دو دوره اقلیمی: به منظور ارزیابی معنی‌داری آماری تغییرات موقعیت لبه شمالی کمر بند حاره بین دو دوره اقلیمی ۱۹۸۰-۲۰۰۰ و ۲۰۰۱-۲۰۲۴، از آزمون t زوجی (Paired Samples t-test) استفاده شد. در این روش، مقادیر میانگین ماهانه شاخص ترکیبی HCE در دو دوره با یکدیگر مقایسه گردید. فرض صفر (H_0) بیانگر عدم وجود تفاوت معنی‌دار میان موقعیت لبه کمر بند حاره در دو دوره و فرض مقابل (H_1) بیانگر وجود تفاوت معنی‌دار بین دو دوره بود.

پیش از اجرای آزمون، نرمال بودن توزیع اختلاف داده‌ها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک بررسی شد. پس از تأیید نرمال بودن داده‌ها، آزمون t زوجی در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($\alpha = 0.05$) اجرا گردید. علاوه بر این، به منظور افزایش قابلیت اطمینان نتایج و کاهش حساسیت به توزیع داده‌ها، از آزمون ناپارامتری ویلکاکسون نیز به عنوان آزمون مکمل استفاده شد. همچنین برای ارزیابی شدت تفاوت میان دو دوره، اندازه اثر (Cohen's d) محاسبه گردید. نتایج این آزمون‌ها در بخش یافته‌ها ارائه شده و مبنایی برای ارزیابی آماری جابه‌جایی لبه شمالی کمر بند حاره در

که در آن، ΔK_m ، ΔHCE_m فاصله مطلق میان TGL و TP15 در ماه m طی دوره ۱۹۸۰-۲۰۰۰ و ΔK_m ، ΔHCE_m فاصله متناظر در همان ماه طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۴ است. مقادیر مثبت SCI نشان دهنده کاهش فاصله و افزایش توافق مکانی دو شاخص در دوره اخیر، مقدار صفر بیانگر عدم تغییر فاصله نسبت به دوره مرجع و مقادیر منفی نشان دهنده افزایش فاصله میان دو شاخص است. مقدار ۱۰۰ درصد زمانی حاصل می‌شود که فاصله دو شاخص در دوره اخیر به صفر برسد، مشروط بر آنکه فاصله در دوره مرجع بزرگ تر از صفر باشد. در مواردی که ΔK_m برابر صفر باشد، محاسبه درصد SCI به دلیل صفر بودن مخرج تعریف پذیر نیست و وضعیت هم مکانی دو شاخص به صورت توصیفی گزارش می‌شود. SCI برای هر ماه به طور مستقل و با مقایسه همان ماه در دو زیر دوره محاسبه می‌شود؛ بنابراین تفاوت مقادیر SCI میان ماه‌های متوالی، مانند مه و ژوئن، بیانگر نرخ تغییر پیوسته همگرایی از یک ماه به ماه بعد نیست، بلکه بازتاب تفاوت تغییر فاصله دو شاخص در هر ماه نسبت به مقدار مرجع همان ماه است.

محاسبه میزان جابجایی لبه شمالی کمر بند حاره:

پس از تعیین موقعیت لبه شمالی کمر بند حاره با استفاده از دو شاخص TGL و TP15 و محاسبه شاخص ترکیبی HCE، میزان جابجایی لبه کمر بند حاره در هر ماه از اختلاف موقعیت میان دو دوره زمانی محاسبه گردید. تحلیل اختلاف دو دوره یکی از روش‌های متداول برای آشکارسازی تغییر اقلیم بلندمدت محسوب می‌شود. جابجایی ماهانه لبه کمر بند حاره از رابطه زیر محاسبه شد (von Storch & Zwiers, 1999, 218).

$$\Delta HCE_m = HCE_{2,m} - HCE_{1,m} \quad (۵)$$

که در آن ΔHCE_m میزان جابجایی لبه کمر بند حاره در ماه m، $HCE_{1,m}$ موقعیت لبه کمر بند حاره در دوره ۱۹۸۰-۲۰۰۰ و $HCE_{2,m}$ موقعیت لبه کمر بند حاره در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۴ است. مقادیر مثبت بیانگر گسترش شمال‌سوی کمر بند حاره و مقادیر منفی بیانگر عقب‌نشینی جنوب‌سوی آن هستند.

Seidel & Randel, 2007, 2; Seidel et al.,)
(2008, 21; Davis & Birner, 2017, 1211.

مقایسه الگوهای فضایی دو دوره نشان می‌دهد که مهم‌ترین ویژگی تغییرات زمستانه، کاهش فاصله میان مرزهای دینامیکی و ترمودینامیکی تروپوپاز و افزایش همگرایی فضایی آن‌ها است. در دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰، میانگین فاصله میان دو شاخص در ماه‌های زمستان حدود ۲/۱۷ درجه عرض جغرافیایی بود، در حالی که این مقدار در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ به حدود ۰/۳۳ درجه کاهش یافته است (جدول ۱). این تغییر معادل ۸۴/۸ درصد کاهش فاصله میان دو شاخص بوده و بیانگر افزایش قابل توجه انسجام ساختاری مرز کمربند حاره در خاورمیانه است.

الگوی مکانی تغییرات نشان می‌دهد که جهت غالب جابجایی‌ها در اغلب بخش‌های منطقه به سمت عرض‌های بالاتر بوده است. بر اساس نتایج جدول (۱)، شاخص دینامیکی (TGL) به طور متوسط ۱/۱۷ درجه عرض جغرافیایی به سمت شمال جابجا شده است، در حالی که شاخص ترمودینامیکی (TP15) به طور متوسط ۰/۶۷ درجه عرض جغرافیایی جابجایی نشان می‌دهد. این تفاوت بیانگر آن است که بخش عمده تغییرات مشاهده شده ناشی از جابجایی مرز دینامیکی کمربند حاره بوده است، در حالی که مرز ترمودینامیکی تغییرات محدودتری را تجربه کرده است.

بررسی تغییرات فضایی لبه شمالی کمربند حاره نشان می‌دهد که در فصل زمستان، جابجایی شمال‌سوی لبه در بخش‌های غربی محدوده مطالعه، به ویژه شرق مدیترانه و عراق، بیشتر از بخش‌های شرقی بوده است. مقایسه موقعیت عرضی مرزهای وردایستی در دو دوره نشان می‌دهد که میزان جابه‌جایی در بخش‌های غربی حدود ۴ تا ۵ درجه عرض جغرافیایی، معادل تقریباً ۴۴۴ تا ۵۵۵ کیلومتر، و در بخش‌های شرقی، به ویژه شرق ایران و افغانستان، حدود ۱ تا ۲ درجه، معادل تقریباً ۱۱۱ تا ۲۲۲ کیلومتر بوده است. الگوی مکانی نیز کاهش تدریجی شدت جابجایی از غرب به شرق را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که تغییرات مثبت در شرق مدیترانه، عراق و غرب ایران برجسته‌تر

دوره اخیر نسبت به دوره مرجع فراهم می‌سازد (Wilks, 2011; Field, 2013).

یافته‌ها

در پژوهش حاضر در مرحله نخست، تغییرات زمانی و مکانی لبه شمالی کمربند حاره در جنوب غرب آسیا بر اساس دو شاخص تروپوپازی TGL و TP15 مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا الگوی فضایی لبه کمربند حاره در دو دوره اقلیمی ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ در مقیاس ماهانه تحلیل شد. سپس میزان جابجایی لبه کمربند حاره، شدت گسترش آن به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران و تفاوت‌های زمانی و فصلی این تغییرات ارزیابی گردید. در ادامه، با بهره‌گیری از شاخص همگرایی ساختاری (Structural Convergence Index - SCI) میزان انسجام فضایی میان مرزهای دینامیکی و ترمودینامیکی کمربند حاره در طول چرخه سالانه تحلیل شد. این شاخص که از کاهش فاصله میان دو مرز تروپوپازی محاسبه می‌شود، بیانگر درجه هماهنگی ساختاری میان مؤلفه‌های دینامیکی و ترمودینامیکی جو است و می‌تواند نشان دهنده تغییرات در سازمان‌یابی فضایی تروپوسفر فوقانی باشد.

تغییرات موقعیت و میزان همگرایی شاخص‌های تروپوپازی لبه شمالی کمربند حاره در فصل زمستان: به منظور بررسی رفتار زمستانه لبه شمالی کمربند حاره در خاورمیانه، تغییرات موقعیت دو شاخص تروپوپازی شامل شاخص دینامیکی لبه گرادیان دما (TGL) و شاخص ترمودینامیکی ارتفاع تروپوپاز ۱۵ کیلومتر (TP15) در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه طی دو دوره زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که موقعیت تروپوپاز یکی از پادارترین شاخص‌های تعیین مرز کمربند حاره است و تغییرات آن می‌تواند بازتابی از تحول ساختار گردش عمومی جو و گسترش عرضی سامانه‌های حاره‌ای باشد

و در شرق ایران و افغانستان ضعیف تر است (شکل ۲).

جدول (۱). موقعیت عرضی شاخص های وردایست لبه شمالی کمر بند حاره بر حسب درجه عرض جغرافیایی شمالی، جابجایی و میزان همگرایی آنها در فصل زمستان

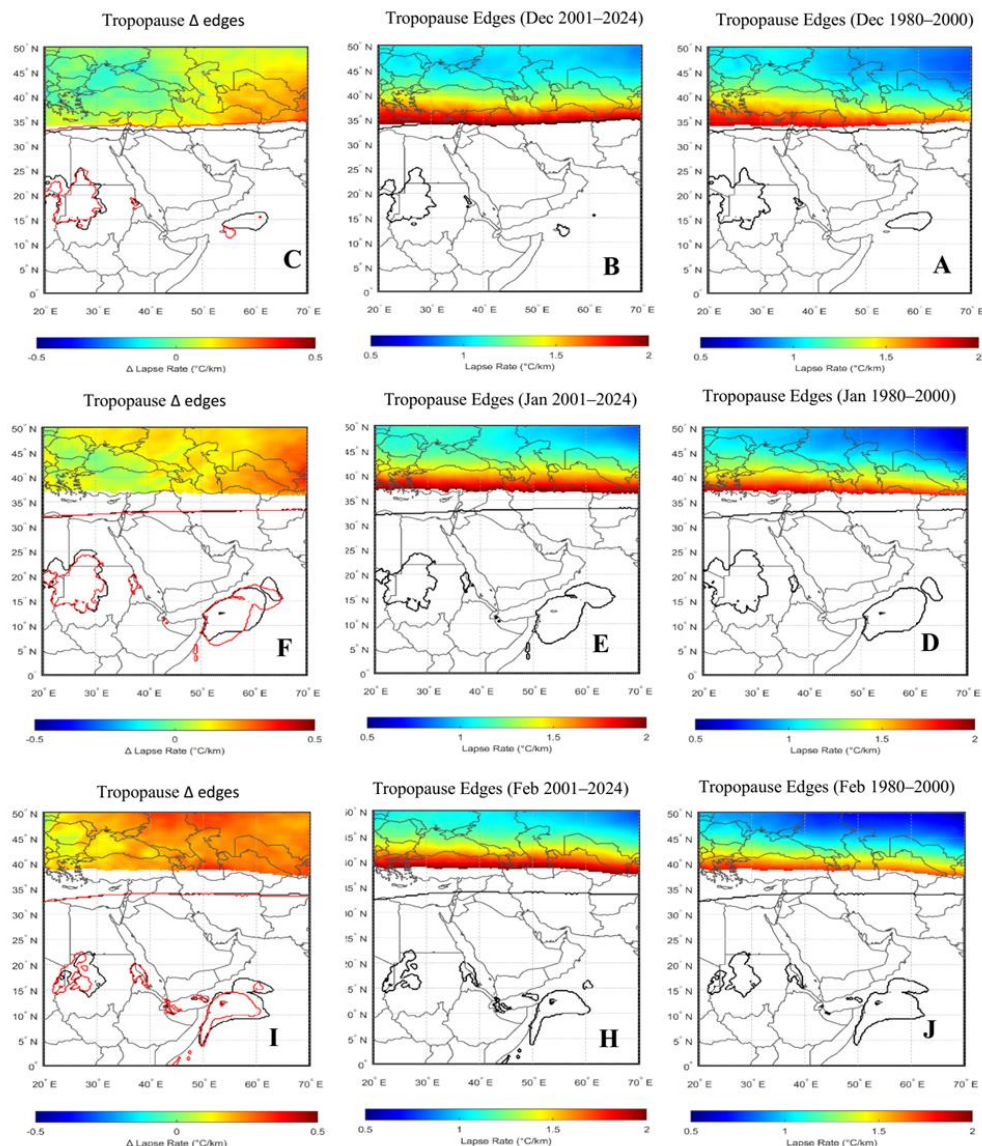
ماه	TGL ₁ (°N)	TP15 ₁ (°N)	فاصله ۱ (°)	TGL ₂ (°N)	TP15 ₂ (°N)	فاصله ۲ (°)	ΔTGL (°)	ΔTP15 (°)	SCI (%)
دسامبر	۲۷	۲۷	۰	۲۹	۲۹	۰	+۲	+۲	*همگرایی کامل
ژانویه	۲۸	۳۰	۲	۲۹	۳۰	۱	+۱	۰	۵۰
فوریه	۲۷/۵	۲۷/۵	۰	۳۰	۳۰	۰	+۲/۵	+۲/۵	*همگرایی کامل
میانگین	۲۷/۵	۲۸/۱۷	۰/۶۷	۲۹/۳۳	۲۹/۶۷	۰/۳۳	+۱/۸۳	+۱/۵۰	۵۰

* در ماه های دسامبر و فوریه، فاصله میان TGL و TP15 در دوره مرجع برابر صفر است؛ بنابراین محاسبه درصد تغییر SCI تعریف پذیر نیست. با این حال، برابر بودن موقعیت دو شاخص در هر دو زیر دوره بیانگر هم مکانی کامل آنها است. SCI فصلی بر اساس تغییر میانگین فاصله دو شاخص از ۰/۶۷ به ۰/۳۳ درجه محاسبه شده است.

مقایسه الگوهای فضایی دو دوره نشان می دهد که مهم ترین ویژگی تغییرات زمستانه، کاهش فاصله میان مرزهای دینامیکی و ترمودینامیکی تروپوپاز و افزایش همگرایی فضایی آنها است. در دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰، میانگین فاصله میان دو شاخص حدود ۲/۱۷ درجه بود، در حالی که در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ به حدود ۰/۳۳ درجه کاهش یافته است که معادل ۸۴/۸ درصد همگرایی ساختاری است. این همگرایی در دسامبر و فوریه به ۱۰۰ درصد (همگرایی کامل) می رسد. از دید فیزیکی، کاهش فاصله میان این دو مرز بیانگر آن است که ساختار ترمودینامیکی جو (TP15) و ساختار دینامیکی آن (TGL) در دوره اخیر هماهنگ تر شده اند؛ موضوعی که می تواند ناشی از افزایش پایداری جو و یکپارچگی بیشتر گردش هادلی در فصل زمستان باشد (Seidel & Randel, 2007, 10; Seidel et al., 2008, 22; Lucas et al., 2014, 95; Staten et al., 2018, 772). به بیان دیگر، زمستان طی چهار دهه اخیر نه تنها با جابجایی قطب سوی مرز کمر بند حاره همراه بوده، بلکه همزمان بازآرایی ساختاری در سازمان فضایی تروپوسفر فوقانی نیز رخ داده است که به افزایش انسجام مرز حاره ای انجامیده است.

مهم ترین ویژگی تغییرات زمستانه، کاهش محسوس فاصله میان دو تشخیص وردایستی TGL و TP15 است. در دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰، میانگین فاصله میان دو شاخص ۰/۶۷ درجه بود، در حالی که در دوره

۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ این مقدار به ۰/۳۳ درجه کاهش یافت که بر مبنای میانگین فصلی، معادل حدود ۵۰ درصد کاهش فاصله و افزایش همگرایی مکانی میان دو شاخص است (جدول ۱). در ماه ژانویه، فاصله میان دو شاخص از ۲ درجه در دوره نخست به ۱ درجه در دوره دوم کاهش یافت و مقدار SCI برابر با ۵۰ درصد محاسبه شد. در دسامبر و فوریه، TGL و TP15 در هر دو زیر دوره در یک عرض جغرافیایی قرار داشتند و هم مکانی کامل نشان دادند؛ با این حال، به دلیل صفر بودن فاصله در دوره مرجع، محاسبه درصد SCI برای این دو ماه بر اساس رابطه تعریف شده امکان پذیر نیست. از دید فیزیکی، کاهش فاصله میان این دو مرز بیانگر آن است که ساختار ترمودینامیکی جو (TP15) و ساختار دینامیکی آن (TGL) در دوره اخیر هماهنگ تر شده اند؛ موضوعی که می تواند ناشی از افزایش پایداری جو و یکپارچگی بیشتر گردش هادلی در فصل زمستان باشد (Seidel & Randel, 2007, 10; Seidel et al., 2008, 22; Lucas et al., 2014, 95; Staten et al., 2018, 772). به بیان دیگر، زمستان طی چهار دهه اخیر نه تنها با جابجایی قطب سوی مرز کمر بند حاره همراه بوده، بلکه همزمان بازآرایی ساختاری در سازمان فضایی تروپوسفر فوقانی نیز رخ داده است که به افزایش انسجام مرز حاره ای انجامیده است.



شکل ۲- توزیع فضایی شاخص‌های وردایست لبه شمالی کمربند حاره در فصل زمستان. مناطق رنگی نشان‌دهنده شاخص ترمودینامیکی TGL (گرادیان قائم دما) و خط مشکی نشان‌دهنده موقعیت شاخص دینامیکی TP15 در هر دوره است. ستون اول مربوط به دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰، ستون دوم مربوط به دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، و ستون سوم بیانگر اختلاف دو دوره (دوره دوم منهای دوره اول) است. (خط قرمز در ستون سوم، جابجایی مکانی شاخص TP15 را از دوره اول به دوره دوم نشان می‌دهد).

شمالی کمربند حاره در فصل بهار از یک الگوی انتقالی و غیرخطی پیروی می‌کند. در آغاز فصل (مارس)، فاصله میان شاخص‌های دینامیکی و ترمودینامیکی از ۶ درجه به ۷ درجه افزایش یافته و بیانگر تشدید موقت واگرایی میان دو مرز تروپوپازی است. با این حال، از ماه آوریل روند تغییرات معکوس شده و فاصله میان دو شاخص به سرعت کاهش می‌یابد؛ به طوری که این فاصله از ۲/۵ درجه در دوره مرجع به ۰/۵ درجه

تغییرات موقعیت و میزان همگرایی شاخص‌های تروپوپازی لبه شمالی کمربند حاره در فصل بهار: فصل بهار یکی از مهم‌ترین دوره‌های انتقالی چرخه سالانه کمربند حاره محسوب می‌شود که طی آن سامانه‌های حاره‌ای از موقعیت زمستانه به سمت عرض‌های بالاتر منتقل شده و ساختار فضایی تروپوپاز به سرعت بازسازماندهی می‌شود (Seidel et al., 2008; Davis & Birner, 2017, 1220). بررسی رفتار لبه

در آوریل و صفر درجه در ماه مه می‌رسد. شاخص همگرایی ساختاری (SCI) نیز از ۱۶/۷- درصد در مارس (واگرایی نسبی) به ۸۰ درصد در آوریل و ۱۰۰ درصد در ماه مه افزایش می‌یابد (جدول ۲). همزمان، شاخص دینامیکی به طور متوسط حدود ۱/۱۷ درجه عرض جغرافیایی به سمت شمال جابجا شده است، در حالی که تغییرات شاخص ترمودینامیکی محدود بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که فصل بهار مرحله گذار و بازآرایی سریع مرز کمر بند حاره در خاورمیانه است؛ به گونه‌ای که پس از واگرایی نسبی در مارس، فرآیند همگرایی به سرعت تقویت شده و در پایان فصل به هم‌مکانی کامل مرزهای دینامیکی و ترمودینامیکی منجر می‌شود (جدول ۲).

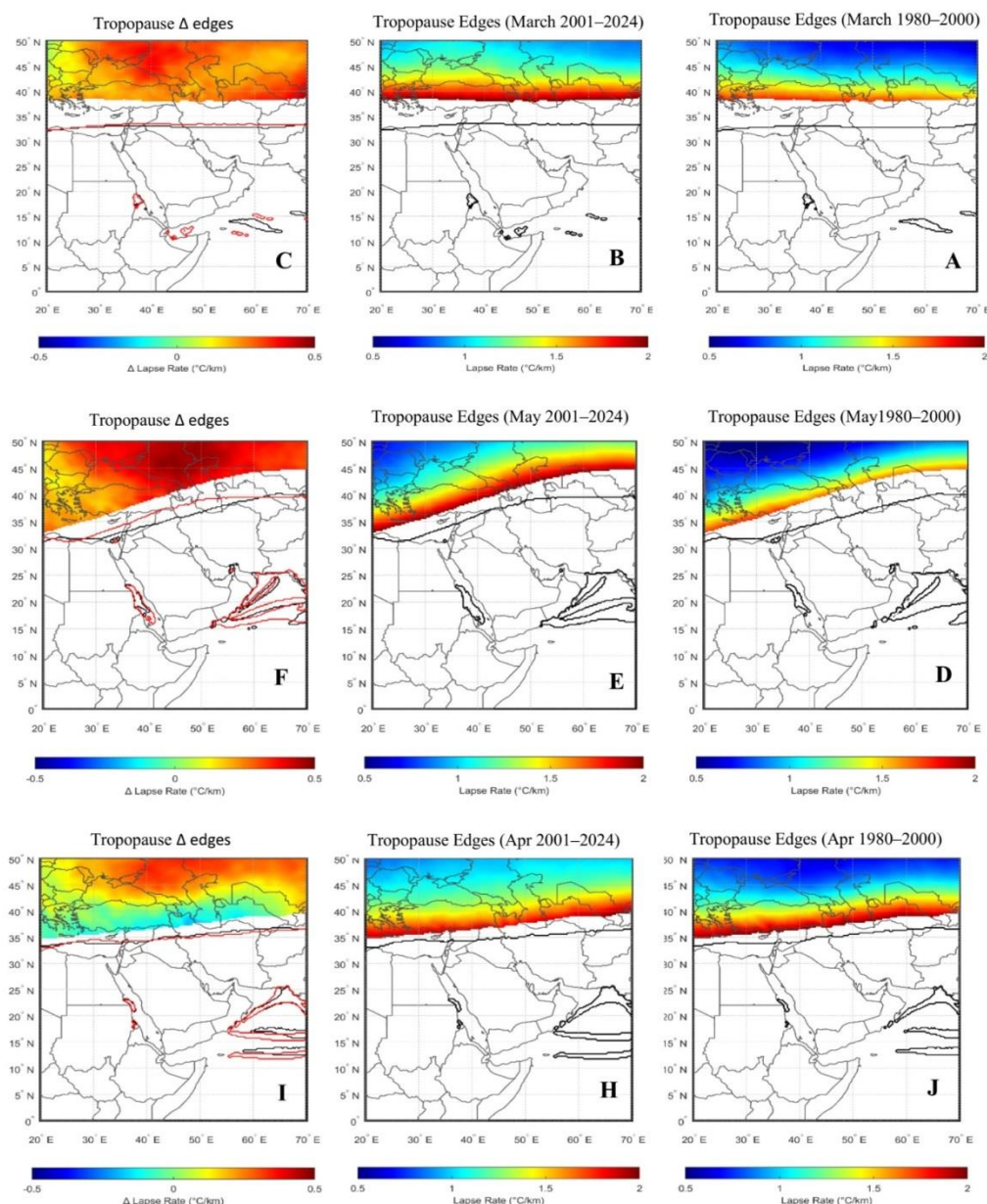
بررسی تغییرات فضایی لبه شمالی کمر بند حاره نشان می‌دهد که در فصل بهار، لبه شمالی کمر بند حاره طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نسبت به دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ به طور محسوسی به این جابجایی در بخش‌های غربی منطقه (شرق مدیترانه و عراق) با بیشینه ۴ تا ۵ درجه عرض جغرافیایی (معادل ۴۴۴ تا ۵۵۵ کیلومتر) و در بخش‌های شرقی (شرق ایران و افغانستان) با کمینه ۱ تا ۲ درجه (معادل ۱۱۱ تا ۲۲۲ کیلومتر) همراه بوده است. الگوی مکانی نشان می‌دهد که شدت جابجایی از غرب به شرق کاهش می‌یابد و پهنه‌های قرمز و نارنجی (تغییرات مثبت) در ستون سوم، عمدتاً بر فراز شرق مدیترانه، عراق و غرب ایران متمرکز است. نکته قابل توجه در فصل بهار، تغییر رفتار ماه‌های مختلف است. سمت عرض‌های شمالی‌تر جابجا شده است.

جدول ۲- موقعیت عرضی شاخص‌های وردایست لبه شمالی کمر بند حاره بر حسب درجه عرض جغرافیایی شمالی، جابجایی و میزان همگرایی آنها در فصل بهار

ماه	TGL ₁ (°N)	TP15 ₁ (°N)	فاصله ^۱ (°)	TGL ₂ (°N)	TP15 ₂ (°N)	فاصله ^۲ (°)	ΔTGL (°)	ΔTP15 (°)	SCI (%)
مارس	۳۲	۳۸	۶	۳۲	۳۹	۷	۰	+۱	-۱۶/۷
آوریل	۲۸	۳۰/۵	۲/۵	۳۰	۳۰/۵	۰/۵	+۲	۰	۸۰
مه	۲۸/۵	۳۱	۲/۵	۳۰	۳۰	۰	+۱/۵	-۱	همگرایی کامل
میانگین	۲۹/۵	۳۳/۲	۳/۶۷	۳۰/۷	۳۰/۷	۲/۵	+۱/۱۷	۰	۳۱/۹

در ماه مارس، الگوی تغییرات مشابه زمستان است و همگرایی ساختاری کامل دیده نمی‌شود. اما در آوریل و به ویژه مه، همپوشانی کامل مرزهای دینامیکی و ترمودینامیکی در بخش‌های وسیعی از خاورمیانه مشاهده می‌شود که نشان دهنده اوج بازآرایی ساختاری کمر بند حاره در پایان بهار است (شکل ۳). مهم‌ترین ویژگی تغییرات بهاری، گذار از واگرایی ساختاری در اوایل فصل به همگرایی کامل در اواخر آن است. در ماه مارس، فاصله میان دو شاخص از ۶ درجه در دوره مرجع به ۷ درجه در دوره اخیر افزایش یافته و SCI منفی (۱۶/۷- درصد) نشان‌دهنده واگرایی نسبی است. اما در آوریل، این فاصله به ۰/۵ درجه کاهش یافته و SCI به ۸۰ درصد می‌رسد و در مه، فاصله به صفر رسیده و SCI به ۱۰۰ درصد افزایش

می‌یابد. از دید فیزیکی، این الگوی غیرخطی بیانگر آن است که در آغاز بهار، ساختار دینامیکی جو (TGL) و ساختار ترمودینامیکی آن (TP15) با سرعت‌های متفاوتی به تغییرات فصلی پاسخ می‌دهند؛ به گونه‌ای که مرز دینامیکی با تأخیر بیشتری نسبت به مرز ترمودینامیکی به سمت شمال حرکت می‌کند. اما از آوریل به بعد، هماهنگی بین این دو مؤلفه افزایش یافته و در مه به بیشینه می‌رسد (Seidel & Randel, 2007, 10; Lucas et al., 2014, 95; Staten et al., 2018, 772). این الگوی انتقالی و غیرخطی نشان می‌دهد که بهار حساسترین فصل از نظر بازآرایی ساختاری کمر بند حاره در خاورمیانه است و تغییرات آن می‌تواند پیامدهای مهمی بر الگوهای جوی و اقلیمی منطقه در فصول بعدی داشته باشد.

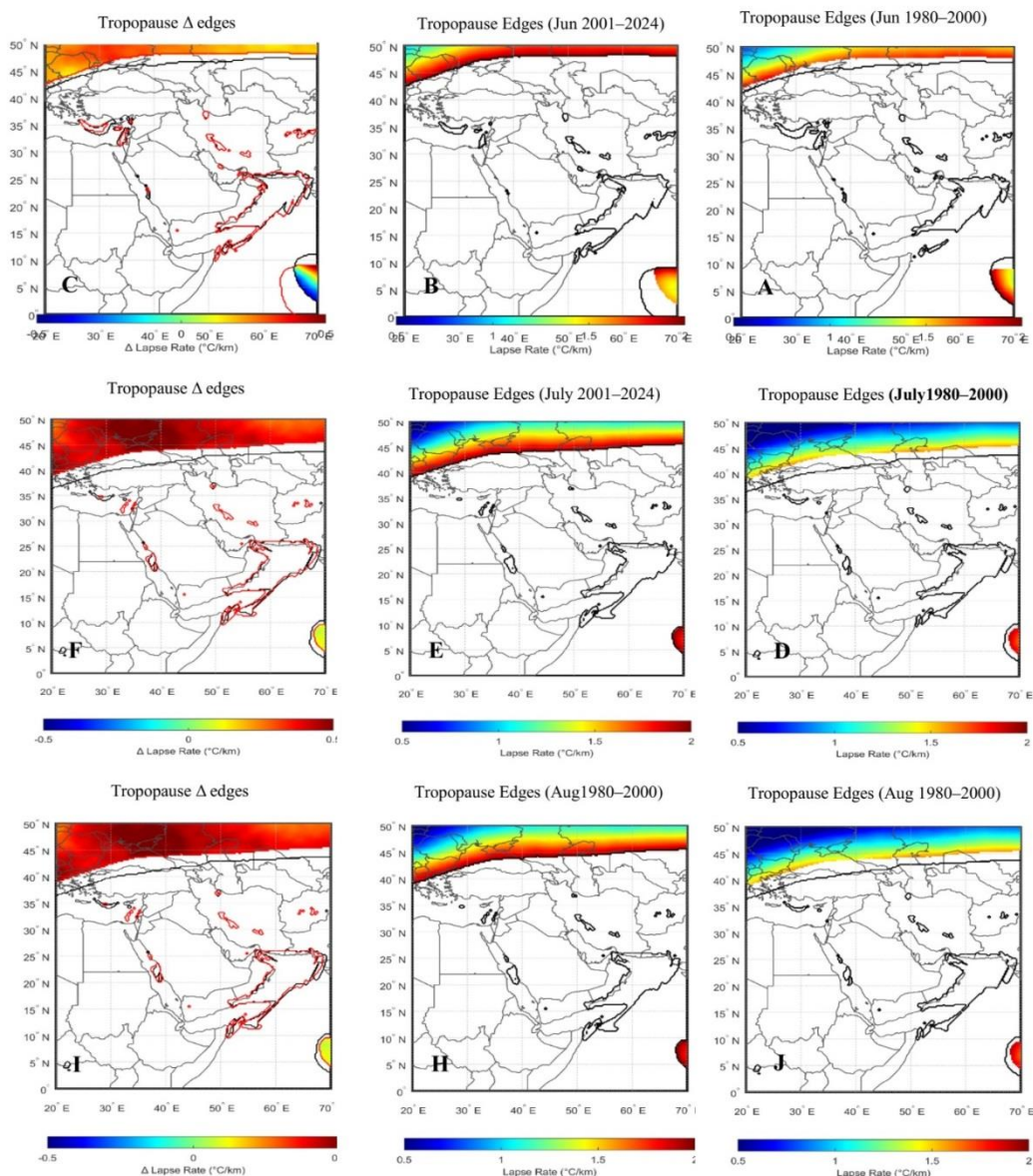


شکل ۳- توزیع فضایی شاخص‌های وردایست لبه شمالی کمربند حاره در فصل بهار. مناطق رنگی نشان دهنده شاخص ترمودینامیکی TGL (گرادیان قائم دما) و خط مشکی نشان دهنده موقعیت شاخص دینامیکی TP15 در هر دوره است. ستون اول مربوط به دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰، ستون دوم مربوط به دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، و ستون سوم بیانگر اختلاف دو دوره (دوره دوم منهای دوره اول) است. (خط قرمز در ستون سوم، جابجایی مکانی شاخص TP15 را از دوره اول به دوره دوم نشان می‌دهد).

تغییرات موقعیت و میزان همگرایی شاخص‌های تروپوپازی لبه شمالی کمربند حاره در فصل تابستان: فصل تابستان همزمان با بیشینه گسترش سالانه کمربند حاره در نیمکره شمالی است و به همین دلیل انتظار می‌رود شدت جابه‌جایی‌ها و تغییرات ساختاری مرز حاره‌ای در این فصل بیش از سایر فصول باشد (Seidel et al., 2008, 22; Davis & Birner, 2017, 1220). بررسی موقعیت شاخص‌های وردایستی لبه شمالی کمربند حاره و میزان همگرایی آنها در فصل تابستان نشان می‌دهد که در تمامی ماه‌های تابستان هر دو شاخص وردایستی به سمت عرض‌های شمالی جابجا شده‌اند (جدول ۳).

جدول ۳- موقعیت عرضی شاخص‌های وردایست لبه شمالی کمربند حاره بر حسب درجه عرض جغرافیایی شمالی، جابجایی و میزان همگرایی آنها در فصل تابستان

ماه	TGL ₁ (°N)	TP15 ₁ (°N)	فاصله ۱(°)	TGL ₂ (°N)	TP15 ₂ (°N)	فاصله ۲(°)	ΔTGL(°)	ΔTP15(°)	SCI (%)
ژوئن	۴۱	۴۹	۸	۴۳	۵۰	۷	+۲	+۱	۱۲/۵
ژوئیه	۴۲	۴۹/۵	۷/۵	۴۵	۵۰	۵	+۳	+۰/۵	۳۳/۳
اوت	۴۱	۴۹	۸	۴۳	۴۹/۵	۶/۵	+۲	+۰/۵	۱۸/۸
میانگین	۴۱/۳	۴۹/۲	۷/۸	۴۳/۷	۴۹/۸	۶/۲	+۲/۳۳	+۰/۶۷	۲۱/۵



شکل ۴- توزیع فضایی شاخص‌های وردایست لبه شمالی کمربند حاره در فصل تابستان. مناطق رنگی نشان دهنده شاخص ترمودینامیکی TGL (گرادیان قائم دما) و خط مشکی نشان دهنده موقعیت شاخص دینامیکی TP15 در هر دوره است. ستون اول مربوط به دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰، ستون دوم مربوط به دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، و ستون سوم بیانگر اختلاف دو دوره (دوره دوم منهای دوره اول) است. (خط قرمز در ستون سوم، جابجایی مکانی شاخص TP15 را از دوره اول به دوره دوم نشان می‌دهد).

بررسی تغییرات فضایی لبه شمالی کمربند حاره (شکل ۴) نشان می‌دهد که در فصل تابستان، لبه شمالی کمربند حاره طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نسبت به دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ به طور قابل توجهی به سمت عرض‌های شمالی‌تر جابجا شده است. این جابجایی در بخش‌های غربی منطقه (شرق مدیترانه و عراق) با بیشینه ۴ تا ۵ درجه عرض جغرافیایی (معادل ۴۴۴ تا ۵۵۵ کیلومتر) و در بخش‌های شرقی (شرق ایران و افغانستان) با کمینه ۲ تا ۳ درجه (معادل ۲۲۲ تا ۳۳۳ کیلومتر) همراه بوده است. الگوی مکانی نشان می‌دهد که پهنه‌های قرمز و نارنجی (تغییرات مثبت) در ستون سوم، در مقایسه با زمستان و بهار، گسترده‌تر بوده و بخش‌های وسیع‌تری از خاورمیانه را پوشش می‌دهند. بیشترین شدت تغییرات در عرض‌های میانی (۳۵ تا ۴۵ درجه شمالی) متمرکز است که نشان دهنده نفوذ عمیق کمربند حاره به عرض‌های ایران و مناطق مجاور در دوره اخیر است. در ماه ژوئیه، مرز دینامیکی به عرض‌های ۴۵ درجه شمالی و مرز ترمودینامیکی به ۵۰ درجه شمالی گسترش یافته است که بیانگر بیشینه نفوذ قطب‌سوی کمربند حاره در خاورمیانه است. مهم‌ترین ویژگی تغییرات تابستانه، غلبه جابجایی عرضی بر همگرایی ساختاری است.

در این فصل، شاخص دینامیکی به‌طور متوسط ۲/۳۳ درجه و شاخص ترمودینامیکی حدود ۰/۶۷ درجه عرض جغرافیایی به سمت شمال منتقل شده‌اند که نشان دهنده بیشینه گسترش فضایی کمربند حاره در طول سال است. اگرچه میانگین شاخص همگرایی ساختاری (SCI) در تابستان تنها ۲۱/۵ درصد است و از مقادیر زمستان (۸۴/۸ درصد) و بهار (۳۱/۹ درصد) کمتر است، اما بیشترین میزان پیشروی قطب‌سوی کمربند حاره در این فصل رخ می‌دهد. از دید فیزیکی، این الگو بیانگر آن است که در تابستان، تقویت ساختار حرارتی تروپوسفر فوقانی و افزایش ارتفاع تروپوپاز باعث می‌شود که هر دو مرز دینامیکی و ترمودینامیکی به طور هم زمان به سمت شمال حرکت کنند، اما هماهنگی میان آنها به اندازه زمستان و بهار قوی نیست (Seidel & Randel, 2007, 10; Lucas et al., 2017, 1220).

بنابراین تابستان را می‌توان فصل بیشینه گسترش فضایی کمربند حاره در خاورمیانه دانست؛ فصلی که در آن نقش جابه‌جایی عرضی مرز حاره‌ای از نقش همگرایی ساختاری پررنگ‌تر است و بیشترین نفوذ کمربند حاره به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران در این فصل رخ می‌دهد.

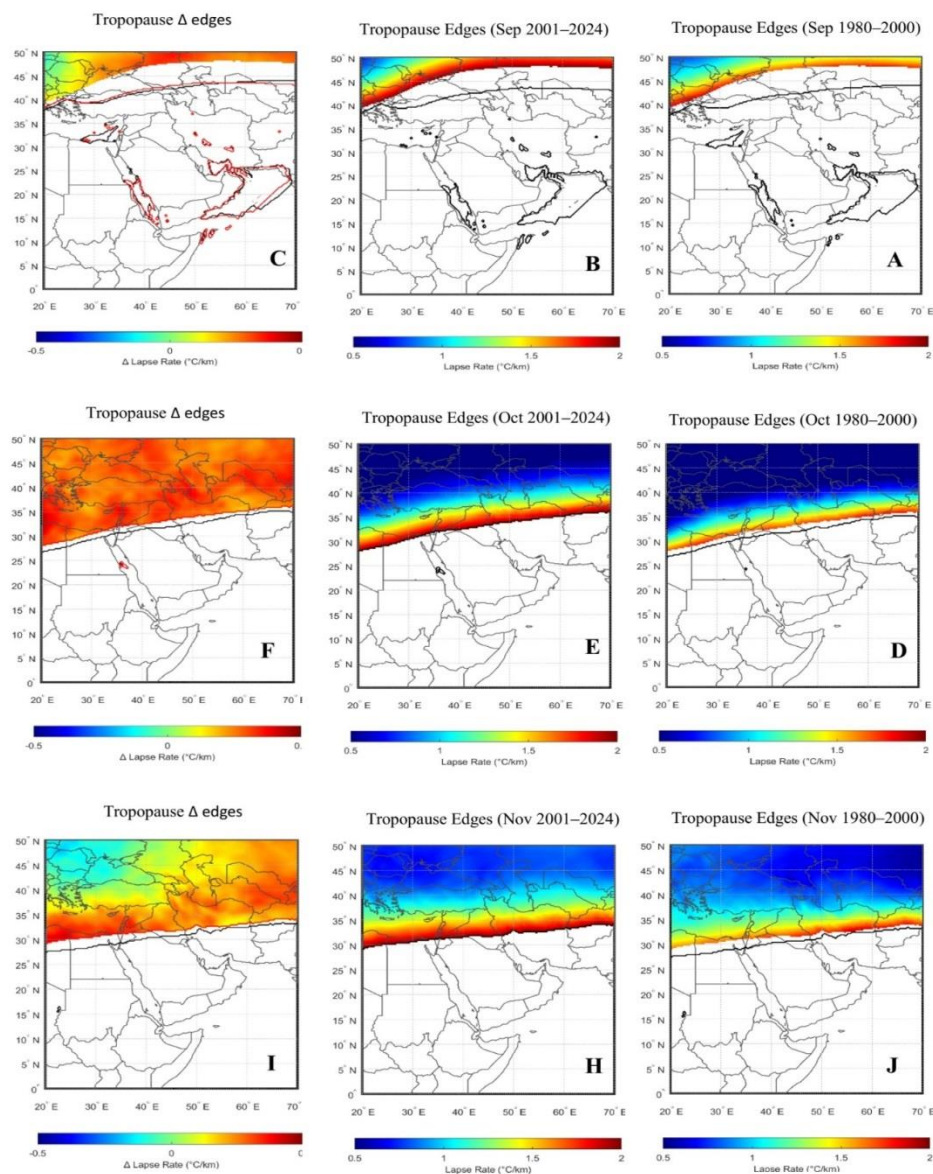
تغییرات موقعیت و میزان همگرایی شاخص‌های تروپوپازی لبه شمالی کمربند حاره در فصل پاییز

فصل پاییز مرحله گذار از بیشینه گسترش تابستانه کمربند حاره به شرایط پایدارتر زمستانی محسوب می‌شود (Seidel et al., 2008, 22; Davis & Birner, 2017, 1220). بررسی موقعیت شاخص‌های تروپوپازی لبه شمالی کمربند حاره و میزان همگرایی آنها در فصل تابستان نشان می‌دهد که در تمامی ماه‌های پاییز، موقعیت هر دو شاخص نسبت به دوره مرجع به سمت عرض‌های بالاتر جابجا شده است. بیشترین جابجایی در سپتامبر مشاهده می‌شود که تداوم شرایط تابستانه را نشان می‌دهد. همچنین میانگین فاصله میان دو شاخص از حدود ۶/۳۳ درجه در دوره مرجع به ۵ درجه در دوره اخیر کاهش یافته است که بیانگر افزایش تدریجی همگرایی میان مرزهای دینامیکی و ترمودینامیکی در فصل پاییز است. شاخص همگرایی ساختاری (SCI) در پاییز از ۲۱/۴ درصد در سپتامبر به ۲۵ درصد در نوامبر افزایش می‌یابد (جدول ۴) که نشان دهنده تقویت تدریجی انسجام فضایی مرز کمربند حاره در طول این فصل است. با این حال، میانگین SCI در پاییز (۲۱/۷ درصد) اندکی بیشتر از تابستان (۲۱/۵ درصد) است و همچنان به مراتب کمتر از زمستان (۸۴/۸ درصد) و بهار (۳۱/۹ درصد) می‌باشد. این الگو نشان می‌دهد که پاییز، مشابه تابستان، دوره‌ای است که جابجایی عرضی بر همگرایی ساختاری غلبه دارد، اما شدت جابجایی در پاییز نسبت به تابستان کاهش یافته و همگرایی ساختاری به طور بسیار آرام و تدریجی در حال افزایش است.

جدول ۴- موقعیت عرضی شاخص‌های وردایست لبه شمالی کمر بند حاره بر حسب درجه عرض جغرافیایی شمالی، جابجایی و میزان همگرایی آنها در فصل پاییز

SCI (%)	$\Delta TP15(^{\circ})$	$\Delta TGL(^{\circ})$	فاصله ۲ ($^{\circ}$)	$TP15_2 (^{\circ}N)$	$TGL_2 (^{\circ}N)$	فاصله ۱ ($^{\circ}$)	$TP15_1 (^{\circ}N)$	$TGL_1 (^{\circ}N)$	ماه
۲۱/۴	+۰/۵	+۲	۵/۵	۴۷/۵	۴۲	۷	۴۷	۴۰	سپتامبر
۱۸/۸	+۰/۵	+۲	۶/۵	۳۶/۵	۳۰	۸	۳۶	۲۸	اکتبر
۲۵	۰	۱	۳	۳۵	۳۲	۴	۳۵	۳۱	نوامبر
۲۱/۷	+۰/۳۳	+۱/۶۷	۵	۳۹/۷	۳۴/۷	۶/۳۳	۳۹/۳	۳۳	میانگین

مقدار SCI هر ماه از درصد تغییر فاصله TGL و TP15 در همان ماه میان دو زیردوره محاسبه شده و SCI فصلی بر اساس تغییر میانگین فاصله دو شاخص در فصل به دست آمده است.



شکل ۵- توزیع فضایی شاخص‌های وردایست لبه شمالی کمر بند حاره در فصل تابستان. مناطق رنگی نشان دهنده شاخص ترمودینامیکی TGL (گرادیان قائم دما) و خط مشکی نشان دهنده موقعیت شاخص دینامیکی TP15 در هر دوره است. ستون اول مربوط به دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰، ستون دوم مربوط به دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، و ستون سوم بیانگر اختلاف دو دوره (دوره دوم منهای دوره اول) است. (خط قرمز در ستون سوم، جابجایی مکانی شاخص TP15 را از دوره اول به دوره دوم نشان می‌دهد).

بررسی تغییرات فضایی لبه شمالی کمربند حاره نشان می‌دهد که در فصل پاییز، لبه شمالی کمربند حاره طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نسبت به دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ همچنان به سمت عرض‌های شمالی‌تر جابجا شده است، اما شدت این جابجایی نسبت به تابستان کاهش یافته است. این جابجایی در بخش‌های غربی منطقه (شرق مدیترانه و عراق) با بیشینه ۳ تا ۴ درجه عرض جغرافیایی (معادل ۳۳۳ تا ۴۴۴ کیلومتر) و در بخش‌های شرقی (شرق ایران و افغانستان) با کمینه ۱ تا ۲ درجه (معادل ۱۱۱ تا ۲۲۲ کیلومتر) همراه بوده است. الگوی مکانی نشان می‌دهد که پهنه‌های قرمز و نارنجی (تغییرات مثبت) در ستون سوم، در مقایسه با تابستان، کاهش وسعت یافته و رنگ‌های زرد و سبز (تغییرات کمتر) در بخش‌های شرقی و جنوبی منطقه گسترش بیشتری یافته‌اند. این موضوع نشان دهنده آغاز عقب نشینی فصلی کمربند حاره از عرض‌های شمالی است. در ماه سپتامبر، بیشترین جابجایی ۲ درجه برای TGL مشاهده می‌شود که تداوم شرایط تابستانه را نشان می‌دهد. در اکتبر، همزمان با آغاز عقب نشینی فصلی، فاصله میان دو شاخص از ۸ درجه به ۶/۵ درجه کاهش می‌یابد و در نوامبر، مرزهای دینامیکی و ترمودینامیکی به یکدیگر نزدیک‌تر شده و فاصله به ۳ درجه می‌رسد (شکل ۵).

مهم‌ترین ویژگی تغییرات پاییزی، گذار تدریجی از غلبه جابجایی عرضی به افزایش همگرایی ساختاری است. در این فصل، شاخص دینامیکی به طور متوسط ۱/۶۷ درجه عرض جغرافیایی به سمت شمال جابجا شده است، در حالی که جابجایی شاخص ترمودینامیکی حدود ۰/۳۳ درجه بوده است. مقدار میانگین شاخص همگرایی ساختاری (SCI) برابر با ۲۱/۷ درصد برآورد شد که بیانگر کاهش تدریجی فاصله میان دو شاخص و افزایش انسجام فضایی مرز کمربند حاره است.

برخلاف بهار که همگرایی ساختاری به سرعت افزایش می‌یافت و تابستان که جابجایی عرضی نقش

غالب را داشت، پاییز مرحله گذار تدریجی به سمت شرایط زمستانه محسوب می‌شود؛ مرحله‌ای که در آن همزمان با عقب نشینی فصلی کمربند حاره، آثار گسترش قطب‌سوی آن در مقایسه با دوره مرجع همچنان حفظ شده است (Seidel & Randel, 2007, 10; Lucas et al., 2014, 95; Staten et al., 2018, 772). از دید فیزیکی، این الگو نشان دهنده آن است که در پاییز، کاهش تدریجی دمای تروپوسفر فوقانی و افزایش فعالیت امواج راسبی عرض‌های میانی، موجب عقب‌نشینی تدریجی کمربند حاره و افزایش هماهنگی میان مؤلفه‌های دینامیکی و ترمودینامیکی جو می‌شود، اما این هماهنگی همچنان در مراحل اولیه قرار دارد و تا رسیدن به شرایط زمستانه، فاصله قابل توجهی باقی مانده است.

بطور کلی مقایسه فصلی نشان می‌دهد که شدت و ماهیت تغییرات لبه شمالی کمربند حاره در طول سال یکسان نیست و هر فصل الگوی ساختاری متمایزی را نشان می‌دهد. بیشترین جابجایی عرضی در تابستان مشاهده شد؛ به طوری که میانگین ΔTGL به ۲/۳۳ درجه عرض جغرافیایی (معادل ۲۵۹ کیلومتر) رسید که بیانگر بیشینه گسترش قطب‌سوی کمربند حاره در منطقه است. در مقابل، بیشترین همگرایی ساختاری در زمستان رخ داد و مقدار SCI به ۸/۸۴ درصد رسید که نشان دهنده افزایش قابل توجه انسجام فضایی میان مرزهای دینامیکی و ترمودینامیکی است. فصل بهار با SCI برابر ۳۱/۹ درصد، مهم‌ترین دوره بازآرایی فضایی مرز حاره‌ای محسوب می‌شود؛ به گونه‌ای که این فصل با واگرایی نسبی در آغاز (مارس) شروع شده و به همگرایی کامل در پایان (مه) ختم می‌شود. در مقابل، پاییز عمدتاً نقش یک فصل گذار تدریجی را ایفا می‌کند که در آن همزمان با عقب‌نشینی فصلی کمربند حاره، آثار گسترش قطب‌سوی آن در مقایسه با دوره مرجع همچنان حفظ شده است (جدول ۵).

جدول ۵- مقایسه فصلی شاخص‌های جابه‌جایی و همگرایی ساختاری لبه شمالی کمر بند حاره

فصل	میانگین ($^{\circ}$) ΔTGL	میانگین ($^{\circ}$) $\Delta TP15$	Gap ₁ ($^{\circ}$)	Gap ₂ ($^{\circ}$)	SCI (%)	ویژگی
زمستان	+۱/۱۷	+۰/۶۷	۲/۱۷	۰/۳۳	۸۴/۸	همگرایی ساختاری
بهار	+۱/۱۷	+۰/۶۷	۲/۶۷	۲/۵	۳۱/۹	بازآرایی ساختاری
تابستان	+۲/۳۳	۰	۷/۸۳	۶/۱۷	۲۱/۵	جابجایی مداری
پاییز	+۱/۶۷	+۰/۳۳	۶/۳۳	۵	۲۱/۷	گذار تدریجی

نسبتاً بالا (۳۱/۹ درصد) همراه است. این فصل با واگرایی نسبی در آغاز (مارس) شروع شده و به همگرایی کامل در پایان (مه) ختم می‌شود که نشان دهنده حساسیت بالای ساختار کمر بند حاره به تغییرات فصلی و نقش مهم این فصل در بازآرایی فضایی مرز تروپوپاز است.

بازدید فیزیکی، این الگوی فصلی نشان‌دهنده آن است که گسترش کمر بند حاره در خاورمیانه صرفاً یک جابجایی مکانی یکنواخت نیست، بلکه با تغییرات ساختاری متفاوتی در مقیاس فصلی همراه است. در تابستان، تقویت ساختار حرارتی تروپوسفر فوقانی و افزایش ارتفاع تروپوپاز باعث می‌شود که هر دو مرز دینامیکی و ترمودینامیکی به طور هم‌زمان به سمت شمال حرکت کنند، اما هماهنگی میان آن‌ها به دلیل شدت گرمایش و ناپایداری‌های فصلی، چندان قوی نیست. در زمستان، تضعیف گرادیان‌های حرارتی و افزایش نقش امواج راسی عرض‌های میانی موجب می‌شود که ساختار تروپوپاز به سمت یکپارچگی و انسجام بیشتر حرکت کند. هرچند جابجایی مداری محدود است. بهار و پاییز نیز به ترتیب دوره‌های بازآرایی سریع و گذار تدریجی هستند که در آنها تعادل میان جابجایی مداری و همگرایی ساختاری در حال تغییر است (Seidel & Randel, 2007, 10; Seidel et al., 2008, 22; Lucas et al., 2014, 95; Staten et al., 2018, 772).

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که گسترش کمر بند حاره در خاورمیانه طی چهار دهه اخیر نه تنها یک پدیده خطی و یکنواخت نبوده، بلکه دارای چرخه فصلی مشخص با غلبه مؤلفه‌های مختلف در هر فصل است. بیشترین نفوذ آن به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران در تابستان (با میانگین جابجایی ۲/۳۳ درجه یا حدود ۲۵۹ کیلومتر) و بیشترین انسجام ساختاری مرز

نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که الگوی تغییرات فصلی از یک نظم مشخص پیروی می‌کند. در تابستان، بیشینه جابجایی مداری (۲/۳۳ درجه) و بیشینه فاصله میان دو شاخص (۷/۸۳ درجه) مشاهده می‌شود که نشان دهنده گسترش حداکثری کمر بند حاره به سمت عرض‌های شمالی و کاهش انسجام ساختاری در این فصل است. این الگو بیانگر آن است که در تابستان، تقویت ساختار حرارتی تروپوسفر فوقانی و افزایش ارتفاع تروپوپاز باعث می‌شود که هر دو مرز دینامیکی و ترمودینامیکی به طور هم‌زمان به سمت شمال حرکت کنند، اما هماهنگی میان آنها به دلیل شدت گرمایش و ناپایداری‌های فصلی، چندان قوی نیست. در پاییز، شدت جابجایی به میزان ۱/۶۷ درجه کاهش یافته و همگرایی ساختاری اندکی افزایش یافته است (۲۱/۷ درصد) و همچنان جابجایی عرضی نقش غالب را ایفا می‌کند. این وضعیت نشان دهنده آغاز عقب نشینی تدریجی کمر بند حاره از عرض‌های شمالی و کاهش دامنه نفوذ آن به سوی عرض‌های میانی است، هرچند آثار گسترش قطب سوی آن در مقایسه با دوره مرجع همچنان حفظ شده است. در زمستان، اگرچه جابجایی عرضی به کمترین مقدار خود رسیده است (۱/۱۷ درجه) اما همگرایی ساختاری به بیشینه (۸۴/۸ درصد) رسیده و فاصله میان دو شاخص به حداقل ۰/۳۳ درجه کاهش یافته است. این الگو نشان دهنده افزایش قابل توجه انسجام فضایی میان مرزهای دینامیکی و ترمودینامیکی در فصل سرد است؛ پدیده‌ای که می‌تواند ناشی از کاهش گرادیان‌های حرارتی، افزایش نقش امواج راسی عرض‌های میانی و یکپارچگی بیشتر گردش هادلی در زمستان باشد. در بهار، فصل انتقالی و بازآرایی ساختاری است که در آن جابجایی عرضی ۱/۱۷ درجه با همگرایی ساختاری

حاره‌ای در جابجایی با ۸/۸ درصد رخ داده است. این یافته‌ها می‌تواند مبنایی برای تحلیل دقیق‌تر پیامدهای اقلیمی این تغییرات بر الگوهای دمایی و بارشی ایران در پژوهش‌های آینده قرار گیرد.

تغییرات میزان نفوذ کمربند حاره به عرض‌های جغرافیایی ایران: نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد که نفوذ کمربند حاره به عرض‌های جغرافیایی ایران دارای الگوی فصلی مشخصی است. بیشترین میزان نفوذ در تابستان رخ می‌دهد؛ به‌طوری‌که میانگین جابجایی لبه کمربند حاره به ۳/۲۵ درجه عرض جغرافیایی (حدود ۳۶۱ کیلومتر) می‌رسد و حدود ۴۴ درصد از کل نفوذ سالانه را شامل می‌شود. پس از آن، پاییز با سهم ۲۷ درصد در رتبه دوم قرار دارد و میانگین جابجایی ۲ درجه (۲۲۲ کیلومتر) را نشان می‌دهد که بیانگر تداوم نسبی

نفوذ حاره‌ای در آغاز فصل سرد است. بهار با سهم ۱۷/۲ درصد و میانگین جابجایی ۱/۲۷ درجه (۱۴۱ کیلومتر)، فصل آغاز گسترش حاره‌ای محسوب می‌شود که در آن کمربند حاره به تدریج از موقعیت زمستانه به سمت عرض‌های بالاتر حرکت می‌کند. در مقابل، زمستان با میانگین جابجایی ۰/۸۷ درجه (۹۷ کیلومتر) و سهم ۱۱/۸ درصد، کمترین میزان نفوذ را نشان می‌دهد که عمدتاً به جنوب ایران محدود می‌شود. این نتایج بیانگر آن است که تأثیر گسترش قطب سوی کمربند حاره بر ایران عمدتاً در نیمه گرم سال متمرکز بوده و بیشترین گسترش آن در تابستان رخ می‌دهد، در حالی که در زمستان، به دلیل عقب نشینی سلول هدلی به عرض‌های پایین‌تر، نفوذ آن به ایران بسیار محدود است.

جدول ۶- شاخص‌های فصلی نفوذ کمربند حاره به عرض‌های جغرافیایی ایران طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نسبت به ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰

فصل	میانگین جابه‌جایی لبه کمربند حاره (درجه)	جابجایی (کیلومتر)	سهم از کل نفوذ سالانه (%)	دامنه اثرگذاری بر ایران	تفسیر اقلیمی
زمستان	۰/۸۷	۹۷	۱۱/۸	محدود به جنوب ایران	کمترین نفوذ حاره‌ای
بهار	۱/۲۷	۱۴۱	۱۷/۲	جنوب و بخش‌هایی از مرکز ایران	آغاز گسترش حاره‌ای
تابستان	۳/۲۵	۳۶۱	۴۴	بخش عمده ایران به ویژه نیمه مرکزی و شمالی	بیشینه نفوذ حاره‌ای
پاییز	۲	۲۲۲	۲۷	مرکز و نیمه جنوبی ایران	تداوم نفوذ و آغاز عقب‌نشینی

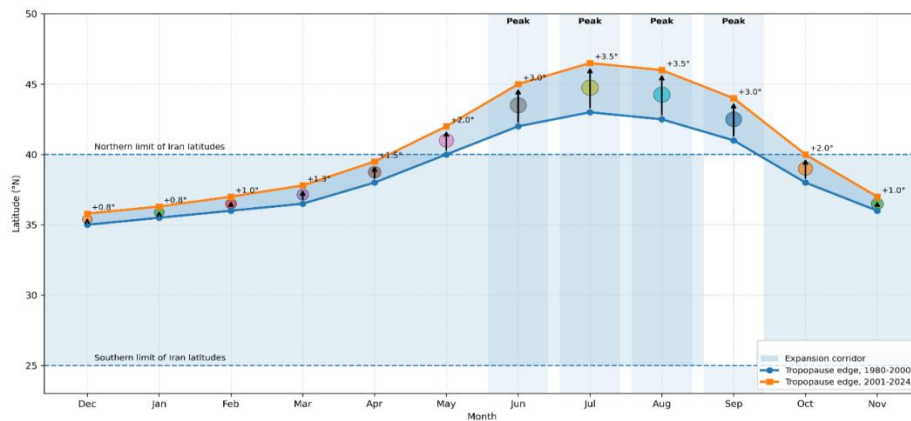
توانسته است بخش‌های وسیعی از ایران را تحت تأثیر مستقیم قرار دهد و این موضوع می‌تواند پیامدهای قابل توجهی بر الگوهای دمایی، بارشی و پایداری جو در مناطق یاد شده داشته باشد (جدول ۶ و شکل ۶).

نتایج نشان می‌دهد که موقعیت لبه شمالی کمربند حاره در تمامی ماه‌های سال طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نسبت به دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ به سمت عرض‌های شمالی جابجا شده است. مقدار این جابجایی از حدود ۰/۸ درجه عرض جغرافیایی در زمستان آغاز شده و به تدریج افزایش یافته و در ژوئیه و اوت به بیشینه ۳/۵ درجه عرض جغرافیایی (حدود ۳۸۹ کیلومتر) می‌رسد. همچنین بیشترین گسترش در بازه ژوئن تا سپتامبر مشاهده می‌شود که بیانگر تقویت نفوذ ساختارهای

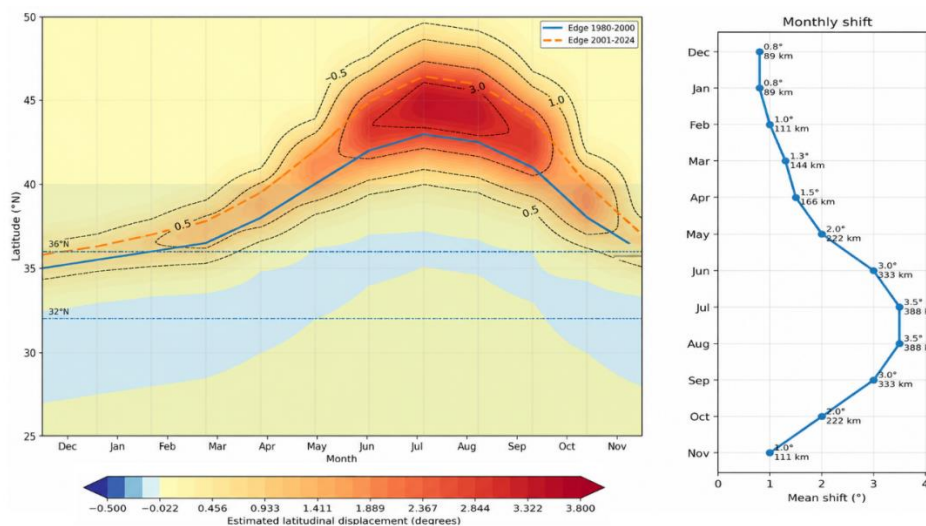
از دیدگاه دامنه اثرگذاری مکانی، در زمستان نفوذ کمربند حاره عمدتاً به جنوب ایران (استان‌های هرمزگان، بوشهر و جنوب سیستان و بلوچستان) محدود می‌شود. در بهار، این نفوذ به جنوب و بخش‌هایی از مرکز ایران (شامل استان‌های فارس، کرمان، یزد و اصفهان) گسترش می‌یابد. در تابستان، بیشترین دامنه اثرگذاری رخ می‌دهد و کمربند حاره بخش عمده ایران، به ویژه نیمه مرکزی و شمالی (تا عرض‌های حدود ۴۰ درجه شمالی) را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در پاییز، با آغاز عقب نشینی، دامنه نفوذ به مرکز و نیمه جنوبی ایران باز می‌گردد. این الگوی مکانی نشان می‌دهد که گسترش قطب سوی کمربند حاره در دوره اخیر، به ویژه در تابستان،

طور کلی، نتایج بیانگر آن است که بیشترین تأثیر گسترش کمربند حاره در منطقه طی فصل گرم سال رخ می‌دهد (شکل ۶).

حاره‌ای به سمت عرض‌های بالاتر و فراتر از مرز شمالی عرض‌های جغرافیایی ایران است. پس از تابستان، روند جابجایی به تدریج کاهش یافته و در اواخر پاییز به حدود ۱ درجه عرض جغرافیایی محدود می‌شود. به



شکل ۷- تغییرات ماهانه موقعیت لبه شمالی کمربند حاره را در دو دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴



شکل ۸- تغییرات ماهانه جابه‌جایی لبه شمالی کمربند حاره و کریدور نفوذ آن به عرض‌های جغرافیایی ایران

عمیق سامانه‌های حاره‌ای به عرض‌های میانی خاورمیانه است. (شکل ۸). در مقابل، در ماه‌های زمستانی (دسامبر تا فوریه)، شدت جابجایی به کمتر از ۱ درجه عرض جغرافیایی کاهش می‌یابد و هسته‌های جابجایی عمدتاً در عرض‌های پایین‌تر (۳۰ تا ۳۵ درجه شمالی) با شدت محدود (۰/۵ تا ۰/۸ درجه) مشاهده می‌شود. ماه‌های گذار (مارس-آوریل و اکتبر-نوامبر) نیز الگوی میانی را نشان می‌دهند؛ به گونه‌ای که جابجایی به تدریج از

همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشترین شدت گسترش قطب سوی کمربند حاره در بازه زمانی ژوئن تا سپتامبر و در عرض‌های حدود ۴۲ تا ۴۷ درجه شمالی متمرکز است. این ناحیه با هسته‌های مثبت جابجایی بیش از ۳ درجه عرض جغرافیایی (معادل ۳۳۳ کیلومتر) مشخص می‌شود که بیانگر بیشترین بازآرایی فضایی لبه تروپوپاز در دوره اخیر است. در این بازه، لبه شمالی کمربند حاره به طور متوسط ۳ تا ۳/۵ درجه به سمت شمال جابجا شده که نشان دهنده نفوذ

مقادیر زمستانه به تابستانه تغییر می‌کند. به طور کلی، بیشینه جابجایی در اواسط تابستان (ژوئیه) و در عرض‌های حدود ۴۵ درجه شمالی رخ می‌دهد که با چرخه سالانه تابش خورشیدی و پاسخ دینامیکی سلول همدلی هماهنگ است و بیانگر آن است که بیشترین نفوذ کمربند حاره به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر رخ می‌دهد.

ارزیابی آماری تفاوت دو دوره اقلیمی: به منظور بررسی معنی‌داری آماری تغییرات مشاهده شده در موقعیت لبه شمالی کمربند حاره، مقادیر میانگین ماهانه شاخص HCE در دو دوره اقلیمی ۱۹۸۰-۲۰۰۰ و ۲۰۰۱-۲۰۲۴ با استفاده از آزمون t زوجی مقایسه شد. نتایج نشان داد که میانگین موقعیت لبه

کمربند حاره از ۳۸/۶۳ درجه عرض شمالی در دوره نخست به ۴۰/۵۷ درجه عرض شمالی در دوره دوم افزایش یافته است. اختلاف میانگین دو دوره برابر با ۱/۹۵ درجه عرض جغرافیایی (حدود ۲۱۶ کیلومتر) برآورد شد. نتایج آزمون t زوجی وجود تفاوت معنی‌دار بین دو دوره را تأیید کرد ($t = 6.44$, $p < 0.001$). همچنین مقدار اندازه اثر (Cohen's $d = 1.86$) بیانگر شدت زیاد این تفاوت است. نتایج آزمون ناپارامتری ویلکاکسون نیز معنی‌داری این تغییرات را تأیید کرد ($p < 0.001$). بنابراین، جابجایی قطب سوی لبه شمالی کمربند حاره در دوره اخیر صرفاً ناشی از نوسانات کوتاه مدت اقلیمی نبوده و از یک تغییر ساختاری پایدار در موقعیت کمربند حاره حکایت دارد (جدول ۷).

جدول ۱۱- نتایج آزمون معنی‌داری تغییرات موقعیت لبه شمالی کمربند حاره در دوره اخیر نسبت به دوره مرجع

شاخص آماری	مقدار
میانگین دوره ۱۹۸۰-۲۰۰۰	38.63°N
میانگین دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۴	40.57°N
اختلاف میانگین	1.95°
T	6.44
p-value	<0.001
Cohen's d	1.86

بحث و نتیجه گیری

مطالعات پیشین شواهد متعددی از گسترش قطب سوی کمربند حاره در مقیاس جهانی و نیمکره‌ای ارائه کرده‌اند. سیدل و همکاران (Seidel et al., 2008, 22)، لوکاس و همکاران (Lucas et al., 2014, 95) و استیتن و همکاران (Staten et al., 2018, 772) نشان داده‌اند که لبه کمربند حاره طی دهه‌های اخیر به سوی عرض‌های بالاتر جابجا شده است. با این حال، مقادیر اعلام شده برای شدت این جابجایی در مطالعات مختلف یکسان نیست و به شاخص مورد استفاده، محدوده مکانی، دوره زمانی و فصل مورد بررسی وابسته است. از این رو، صرف مشاهده جابجایی شمال سو در پژوهش حاضر تکرار نتیجه مطالعات قبلی محسوب نمی‌شود؛ مسئله اصلی در این پژوهش، تعیین الگوی منطقه‌ای و فصلی این جابجایی در

جنوب غرب آسیا و چگونگی امتداد آن به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران با استفاده هم زمان از دو تشخیص و ردیابی است.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، موقعیت لبه شمالی کمربند حاره نسبت به دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ در تمام فصول به سوی عرض‌های جغرافیایی بالاتر جابجا شده است، اما شدت این جابجایی دارای تغییرپذیری فصلی مشخصی است. بیشترین میانگین جابجایی در تابستان، حدود ۳/۲۵ درجه عرض جغرافیایی، معادل تقریباً ۳۶۱ کیلومتر، و کمترین آن در زمستان، حدود ۰/۸۷ درجه، معادل تقریباً ۹۷ کیلومتر، است. بنابراین، یافته حاضر ضمن همسویی با جهت کلی تغییر مطرح شده در مطالعات جهانی، نشان می‌دهد که پاسخ لبه کمربند حاره در جنوب غرب آسیا از نظر زمانی یکنواخت نیست و فصل

نشان دهنده افزایش توافق مکانی دو تشخیص است تا اثبات یک بازآرایی دینامیکی مشخص.

در مقابل، تابستان علاوه بر بیشترین جابجایی شمال سو، بیشترین گسترش لبه کمر بند حاره به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران را نشان داد. تمرکز بیشترین جابجایی در نیمه گرم سال نشان می‌دهد که چرخه فصلی در تفسیر گسترش کمر بند حاره در این منطقه اهمیت اساسی دارد. از نظر فیزیکی، این الگو می‌تواند با تغییرات ساختار حرارتی تروپوسفر فوقانی، ارتفاع وردایست و جابجایی سامانه‌های جنب حاره‌ای سازگار باشد؛ با این حال، پژوهش حاضر این سازوکارها را به طور مستقیم با استفاده از میدان باد، حرکت قائم یا سایر متغیرهای دینامیکی آزمون نکرده است. بنابراین، این عوامل باید به عنوان تبیین‌های فیزیکی محتمل در نظر گرفته شوند و تعیین سهم هر یک به تحلیل‌های دینامیکی مستقل نیاز دارد.

نتایج پژوهش حاضر از منظر منطقه‌ای با مطالعات داخلی نیز قابل مقایسه است. مسعودیان (۱۳۹۰، ۱۵)، لشکری و محمدی (۱۳۹۴، ۸۵)، روشن و قانقرمه (۱۳۹۴، ۱۵۰)، عساکره (۱۳۹۵، ۲۱) و حسینی صدیق و همکاران (۱۳۹۸، ۱۵۵؛ ۱۴۰۱، ۱۵۵) نشان داده‌اند که ایران در ناحیه گذار میان سامانه‌های حاره‌ای، جنب حاره‌ای و عرض‌های میانی قرار دارد و تغییر موقعیت سامانه‌های بزرگ مقیاس می‌تواند با تغییرپذیری اقلیمی کشور ارتباط داشته باشد. یافته حاضر این مطالعات را از زاویه متفاوتی تکمیل می‌کند؛ زیرا به جای تمرکز مستقیم بر پرفشار جنب‌حاره‌ای، بارش یا سایر سامانه‌های گردش، موقعیت خود لبه شمالی کمر بند حاره را با دو تشخیص وردایستی ارزیابی و میزان پیشروی آن را به سوی عرض‌های ایران در مقیاس ماهانه و فصلی کمی‌سازی می‌کند.

از نظر مقایسه با پژوهش‌های خارجی نیز نتیجه کلی با یافته‌های هو و فو (Hu & Fu, 2007, 5233)، سیدل و همکاران (Seidel et al., 2008, 22)، لوکاس و همکاران (Lucas et al., 2014, 95) و استیتن و همکاران (Staten et al., 2018, 772) همسو است؛ اما

تابستان نقش برجسته‌تری در گسترش شمال سوی آن دارد. مطالعات جهانی نیز تفاوت شدت گسترش بر حسب زمان، مکان و شاخص را به شاخص‌های مختلف مطرح نموده‌اند (Seidel et al., 2008, 22; Lucas et al., 2014, 95; Staten et al., 2018, 772)، اما تحلیل حاضر این تفاوت را به صورت مشخص در مقیاس ماهانه و فصلی برای جنوب غرب آسیا و در ارتباط با ایران کمی‌سازی و پیوند مستقیم نتایج با عرض‌های ایران مطرح می‌کند.

یکی از نکات مهم نتایج، تفاوت رفتار دو تشخیص TGL و TP15 در طول سال است. این موضوع نشان می‌دهد که موقعیت لبه کمر بند حاره را نمی‌توان در همه فصول با اتکا به یک شاخص منفرد به طور یکسان توصیف کرد. تفاوت فاصله میان TGL و TP15 در ماه‌ها و فصول مختلف بیانگر حساسیت برآورد لبه به ویژگی فیزیکی شاخص مورد استفاده است. از این منظر، استفاده هم زمان از دو تشخیص وردایستی در پژوهش حاضر امکان بررسی میزان توافق یا جدایی مکانی آنها را فراهم کرده و یکی از تفاوت‌های روش‌شناختی مطالعه حاضر با مطالعاتی است که تنها یک معیار برای تعیین لبه کمر بند حاره به کار گرفته‌اند.

در زمستان، اگرچه میزان جابجایی شمال سو نسبت به سایر فصول کمتر بود، فاصله متوسط میان TGL و TP15 از حدود ۰/۶۷ درجه در دوره نخست به حدود ۰/۳۳ درجه در دوره دوم کاهش یافت و SCI فصلی حدود ۵۰ درصد به دست آمد. این نتیجه بیانگر افزایش توافق مکانی دو تشخیص وردایستی در دوره اخیر است. با این حال، SCI در این پژوهش شاخصی توصیفی از تغییر فاصله میان دو تشخیص است و نباید به تنهایی به عنوان شاهدهی از تغییر یک سازوکار دینامیکی خاص در جو تفسیر شود. دیدگاه بیرنر (Birner, 2010, 5) و دیویس و بیرنر (Davis & Birner, 2017, 1220) نیز بر حساسیت ساختار وردایست به تغییرات میان نواحی حاره‌ای و عرض‌های میانی تأکید دارد. بر این اساس، نتیجه زمستان بیشتر

این همسویی به معنی یکسان بودن نتایج نیست. مطالعات یاد شده عمدتاً تصویری جهانی یا نیمکره‌ای از گسترش کمربند حاره ارائه می‌کنند، در حالی که پژوهش حاضر نشان می‌دهد در جنوب غرب آسیا شدت جابجایی دارای چرخه فصلی مشخص است، دو تشخیص وردایستی در تمام ماه‌ها رفتار یکسانی ندارند و بیشترین پیشروی به سوی عرض‌های ایران در نیمه گرم سال، به ویژه تابستان، رخ می‌دهد. بنابراین، وجه متمایز مطالعه حاضر در تأیید مجدد اصل گسترش کمربند حاره نیست، بلکه در آشکارسازی ساختار زمانی و مکانی این گسترش در جنوب غرب آسیا، مقایسه هم زمان دو تشخیص وردایستی و کمی‌سازی ارتباط آن با عرض‌های جغرافیایی ایران است.

در عین حال، نتایج حاضر باید با توجه به محدودیت‌های پژوهش تفسیر شوند. استفاده از شاخص‌های وردایستی امکان تعیین و مقایسه موقعیت لبه را فراهم می‌کند، اما به تنهایی برای انتساب تغییرات مشاهده شده به یک عامل دینامیکی یا اقلیمی خاص کافی نیست. همچنین تفاوت میان TP15 TGL نشان می‌دهد که مقدار جابجایی برآورد شده می‌تواند به نوع تشخیص حساس باشد. از این رو، ترکیب این نتایج با میدان‌های باد، حرکت قائم، ارتفاع ژئوپتانسیل، شاخص‌های تابشی و الگوهای دورپیوندی می‌تواند در مطالعات آینده به تبیین دقیق‌تر سازوکارهای مسئول تغییر موقعیت لبه کمک کند.

نتایج این پژوهش نشان داد که لبه شمالی کمربند حاره در جنوب غرب آسیا طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ نسبت به دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ به سوی عرض‌های جغرافیایی بالاتر جابجا شده است، اما شدت این جابجایی در طول سال یکنواخت نیست. بیشترین میانگین جابجایی در تابستان و کمترین آن در زمستان مشاهده شد و بیشترین دامنه پیشروی به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران نیز به نیمه گرم سال اختصاص داشت. بنابراین، تحلیل میانگین سالانه به تنهایی نمی‌تواند ساختار زمانی این تغییر را به طور

کامل نشان دهد و بررسی ماهانه و فصلی برای شناخت رفتار منطقه‌ای لبه کمربند حاره ضروری است. استفاده هم زمان از TGL و TP15 نیز نشان داد که دو تشخیص وردایستی در همه ماه‌ها و فصول رفتار کاملاً یکسانی ندارند و میزان فاصله و توافق مکانی آن‌ها در طول سال تغییر می‌کند. این نتیجه اهمیت استفاده از بیش از یک تشخیص را برای ارزیابی موقعیت لبه کمربند حاره برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که بخشی از تفاوت مقادیر گزارش‌شده در مطالعات مختلف می‌تواند به نوع شاخص مورد استفاده وابسته باشد.

در مجموع، ارزش اصلی نتایج حاضر در ارائه یک ارزیابی منطقه‌ای و فصلی از جابجایی لبه شمالی کمربند حاره و تعیین نحوه امتداد آن به سوی عرض‌های جغرافیایی ایران است. این یافته‌ها می‌توانند مبنایی برای بررسی‌های بعدی درباره ارتباط تغییر موقعیت کمربند حاره با دما، بارش، خشکسالی و پایداری جو در ایران فراهم کنند؛ با این حال، اثبات اثر مستقیم این جابجایی بر متغیرهای اقلیمی کشور نیازمند تحلیل‌های مستقل و اختصاصی است.

بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده شاخص‌های وردایستی با شاخص‌های دینامیکی، ترمودینامیکی و تابشی ترکیب شوند؛ نقش الگوهای دورپیوندی مانند ENSO، NAO و IOD در تغییرپذیری لبه کمربند حاره بررسی گردد؛ ارتباط کمی جابجایی لبه با تغییرات دما، بارش و خشکسالی ایران، به ویژه در فصل تابستان، آزمون شود؛ از خروجی مدل‌های اقلیمی CMIP6 برای ارزیابی تغییرات آینده استفاده گردد؛ و نقش ناهمواری‌های زاگرس و البرز در تعدیل یا تشدید اثرگذاری سامانه‌های حاره‌ای بر ایران مورد بررسی قرار گیرد.

((این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۳۱۵۴۲ «انجام شده است»)).

منابع

۱. حسینی صدیق، سیدمحمود، جلالی، مسعود، و عساکره، حسین. ۱۳۹۸. گسترش قطب‌سوی چرخش سلول هادلی در نیمکره جنوبی. نشریه هواشناسی و علوم جو، ۲(۲)، ۱-۱۸.
۲. حسینی صدیق، سیدمحمود، جلالی، مسعود، و عساکره، حسین. ۱۴۰۱. ارتباط گردش هادلی و مؤلفه‌های جوی با خشکسالی‌های نیوار ایران. فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۶(۸۱)، ۱-۱۷.
۳. روشن، غلامرضا، و قانقرمه، عبدالعظیم. ۱۳۹۴. ارزیابی نقش جریان جت جنب حاره‌ای در کنترل بارش‌های ایران. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۶(۳)، ۱۴۹-۱۷۰.
۴. عساکره، حسین. ۱۳۹۵. اقلیم‌شناسی مرز شمالی پشته پرفشار جنب حاره بر روی ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۳۹۵(۲۵)، ۲۱-۳۲.
۵. فهمی، هاله، فرجی، عبدالله، و علیجانی، بهلول. ۱۴۰۰. بررسی نقش برهمکنش الگوهای گردشی حاره-برون حاره بر بارش‌های فرین فراگیر ایران. نشریه هواشناسی و علوم جو، ۴(۳)، ۲۱۰-۲۲۳.
۶. لشکری، حسن، و محمدی، زینب. ۱۳۹۴. اثر موقعیت استقرار پرفشار جنب‌حاره‌ای عربستان بر سامانه‌های بارشی در جنوب و جنوب غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۷(۱)، ۷۳-۹۰.
۷. مسعودیان، سید ابوالفضل. ۱۳۹۰. آب و هوای ایران. انتشارات دانشگاه اصفهان.
8. Allen, R. J., & Kovilakam, M. 2017. The role of natural climate variability in recent tropical expansion. *Journal of Climate*, 30(16), 6329-6350. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0735.1>
9. Birner, T. 2010. Recent widening of the tropical belt from global tropopause statistics: Sensitivities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D23), D23109. <https://doi.org/10.1029/2010JD014664>
10. Davis, N. A., & Birner, T. 2017. On the discrepancies in tropical belt expansion between reanalyses and climate models and among tropical belt width metrics. *Journal of Climate*, 30(4), 1211-1231. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0371.1>
11. Davis, S. M., & Rosenlof, K. H. 2012. A multidagnostic intercomparison of tropical-width time series using reanalyses and satellite observations. *Journal of Climate*, 25(4), 1061-1078. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00127.1>
12. Freisen, P. F., Arblaster, J. M., Jakob, C., Rodriguez, J. M., & Davis, S. M. 2022. Investigating tropical versus extratropical influences on the Southern Hemisphere tropical edge in the unified model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(7), e2021JD035891. <https://doi.org/10.1029/2021JD035891>
13. Fu, Q., Johanson, C. M., Wallace, J. M., & Reichler, T. 2006. Enhanced midlatitude tropospheric warming in satellite measurements. *Science*, 312(5777), 1179. <https://doi.org/10.1126/science.1125566>
14. Held, I. M., & Hou, A. Y. 1980. Nonlinear axially symmetric circulations in a nearly inviscid atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 37(3), 515-533. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037<0515:NASCIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<0515:NASCIA>2.0.CO;2)
15. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J.-N. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
16. Hu, Y., & Fu, Q. 2007. Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(19), 5229-5236. <https://doi.org/10.5194/acp-7-5229-2007>

17. IPCC. 2021. *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
18. Johanson, C. M., & Fu, Q. 2009. Hadley cell widening: Model simulations versus observations. *Journal of Climate*, 22(10), 2713-2725. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2620.1>
19. Lucas, C., Timbal, B., & Nguyen, H. 2014. The expanding tropics: A critical assessment of the observational and modeling studies. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(1), 89-112. <https://doi.org/10.1002/wcc.251>
20. Lu, J., Vecchi, G. A., & Reichler, T. 2007. Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophysical Research Letters*, 34(6), L06805. <https://doi.org/10.1029/2006GL028443>
21. Norris, J. R., Allen, R. J., Evan, A. T., Zelinka, M. D., O'Dell, C. W., & Klein, S. A. 2016. Evidence for climate change in the satellite cloud record. *Nature*, 536(7614), 72-75. <https://doi.org/10.1038/nature18273>
22. Post, D. A., Timbal, B., Chiew, F. H. S., Hendon, H. H., Nguyen, H., & Moran, R. 2014. Decrease in southeastern Australian water availability linked to ongoing Hadley cell expansion. *Earth's Future*, 2(4), 231-238. <https://doi.org/10.1002/2013EF000194>
23. Seidel, D. J., & Randel, W. J. 2007. Recent widening of the tropical belt: Evidence from tropopause observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D20), D20113. <https://doi.org/10.1029/2007JD008861>
24. Seidel, D. J., Fu, Q., Randel, W. J., & Reichler, T. J. 2008. Widening of the tropical belt in a changing climate. *Nature Geoscience*, 1(1), 21-24. <https://doi.org/10.1038/ngeo.2007.38>
25. Staten, P. W., Lu, J., Grise, K. M., Davis, S. M., & Birner, T. 2018. Re-examining tropical expansion. *Nature Climate Change*, 8(9), 768-775. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0246-2>
26. von Storch, H., & Zwiers, F. W. 1999. *Statistical analysis in climate research*. Cambridge University Press.
27. Wilks, D. S. 2011. *Statistical methods in the atmospheric sciences* (3rd ed.). Academic Press.
28. Xian, T., Xia, J., Wei, W., Zhang, Z., Wang, R., Wang, L.-P., & Ma, Y.-F. 2021. Is Hadley cell expanding? *Atmosphere*, 12(12), 1699. <https://doi.org/10.3390/atmos12121699>