

Thermodynamic Forcing and the Structure of Summer Atmospheric Circulation over the Zagros Mountains: The Role of Sensible Heat Flux, Upward Motion, and Mid-Tropospheric Anticyclone Development

Ghasem Azizi¹ , Remoon Harotoonian² , Mostafa Karimi³ , Framarz Khoshakhlagh⁴

1. (Corresponding Author) *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*

Email: ghazizi@ut.ac.ir

2. *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*

Email: remonharoutouni@ut.ac.ir

3. *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*

Email: mostafakarimi.a@ut.ac.ir

4. *Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran*

Email: fkhosh@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:

Received:

9 June 2026

Revised:

27 August 2026

Accepted:

6 October 2026

Available online:

26 October 2026

Keywords:

Thermal Energy
Accumulation,
Air Density,
Zagros Mountains,
Surface Sensible Heat
Flux,
Diabatic Heating.

ABSTRACT

The Zagros Mountains, as an elevated heat source, can play an important role in organizing the regional atmospheric circulation over western Iran and the Middle East during summer. This study aims to investigate the process-based linkage among surface sensible heat flux, the thermal structure of the atmosphere, vertical motion, vorticity, and the development of a mid-tropospheric anticyclone over the Zagros Mountains. To this end, reanalysis data on shortwave radiative flux, sensible heat flux, potential temperature, omega, relative vorticity, geopotential height, thickness, and the meridional wind component were examined for the summers of 1990–2021 over the region bounded by 30–34°N and 48–54°E. The years 1999 and 2003 were selected as representative dry and wet years, respectively, and 10 July was chosen as a representative day. The results showed that surface sensible heating was accompanied by an increase in the temperature of the lower atmospheric layer, upward motion, and enhanced positive vorticity at lower levels. At mid-tropospheric levels, however, the thermal structure of the atmospheric column and the reorganization of the vorticity field were consistent with the development of a 500-hPa anticyclone. The proposed mechanism involves a sequence of surface heating, increased buoyancy, convergence and upward motion, column stretching, and vorticity reorganization, ultimately leading to the development of mid-tropospheric anticyclonic circulation. Nevertheless, reanalysis data alone is insufficient to disentangle the contribution of Zagros heating from the mechanical forcing of topography and the influence of large-scale atmospheric circulation.

Cite this article: Azizi, G., Harotoonian, R., Karimi, M., & Khoshakhlagh, F. (2026). Thermodynamic Forcing and the Structure of Summer Atmospheric Circulation over the Zagros Mountains: The Role of Sensible Heat Flux, Upward Motion, and Mid-Tropospheric Anticyclone Development. *Physical Geography Research Quarterly*, 58 (3), 1-21.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.416289.1007943>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

The Zagros Mountains is an important regional source of diabatic heating during summer. Their elevation, dry surface conditions, and strong solar radiation can produce substantial surface sensible heat flux, allowing the Zagros to function as an elevated heat source. Previous numerical studies have demonstrated that Zagros heating can influence summertime circulation over Iran and the Middle East, including low-level cyclonic circulation, upward motion, and a mid-tropospheric anticyclonic circulation. However, the physical pathway linking surface sensible heat flux to the three-dimensional atmospheric response is not sufficiently articulated in many synoptic climatological studies. Sensible heat flux does not directly generate a 500-hPa anticyclone. Surface heating first modifies near-surface temperature, virtual potential temperature, buoyancy, pressure gradients, and boundary-layer circulation, which can subsequently affect vertical motion, vorticity, atmospheric thickness, and geopotential height. The present study therefore examines the process-based relationship among surface sensible heat flux, thermal structure, buoyancy-related processes, vertical motion, relative vorticity, and the development of the mid-tropospheric anticyclonic circulation over the Zagros.

Methodology

The study focuses on the Zagros region (30–34°N and 48–54°E). Summer conditions during 1990–2021 were investigated using reanalysis-derived atmospheric and surface variables. Downward shortwave radiation and surface sensible heat flux were used to characterize surface energy input and sensible heating. Relative vorticity at 850, 800, 750, 700, and 500 hPa was examined to determine the vertical organization of cyclonic and anticyclonic circulation. Potential temperature was used to characterize the thermal structure of the lower and middle troposphere, while vertically integrated total-energy tendency provided a complementary indicator of atmospheric column energy evolution. Pressure vertical velocity (ω),

geopotential height, 850–500-hPa thickness, and the meridional wind component were analyzed to diagnose vertical motion and the three-dimensional circulation structure. Two contrasting years, 1999 and 2003, were selected as representative dry and wet cases, respectively, and 10 July was used as a representative summer day for detailed process-oriented analysis. The analysis involved spatial comparisons, vertical cross sections, and joint interpretation of heating, potential temperature, ω , vorticity, thickness, geopotential height, and wind fields. The physical interpretation was based on established thermodynamic and dynamical relationships. The analysis treats the observed relationships as evidence of process consistency rather than direct proof of causality.

Results and Discussion

The results show a spatially organized maximum of surface sensible heating over the elevated and relatively compact central Zagros during summer. The major spatial structure of heating is evident in both selected years, although the comparison of only two years cannot establish the statistical significance of interannual variability. Enhanced sensible heating coincides with a thermally modified lower atmospheric layer and an organized vertical-motion response. Negative ω , representing upward motion in pressure coordinates, is evident over the Zagros and extends toward the middle troposphere. At lower levels, particularly 850, 800, and 750 hPa, positive relative vorticity is concentrated over or near the central elevated region. This spatial correspondence is dynamically consistent with low-level convergence and stretching of atmospheric columns, although a complete vorticity budget was not calculated and individual contributions cannot therefore be quantified. With increasing altitude, the circulation changes from predominantly cyclonic at lower levels to anticyclonic in the middle troposphere. Around 500 hPa, the geopotential-height and wind fields indicate a pronounced anticyclonic circulation over the elevated Zagros region. The potential-temperature and thickness fields further indicate a vertically organized warm

atmospheric column associated with the mountainous heat source.

The results support a physically coherent sequence linking surface heating with regional atmospheric circulation. Enhanced solar radiation and sensible heat flux warm the air immediately above the Zagros. Where this energy is effectively transferred and mixed through the boundary layer, virtual potential temperature and buoyancy increase. The resulting Low-level convergence can subsequently contribute to column stretching. Because the Coriolis parameter is positive over the Zagros, convergence acting on positive absolute vorticity can increase positive relative vorticity. Thus, the observed low-level positive vorticity should not be interpreted as being directly produced by sensible heat flux; rather, it is part of the dynamical response associated with thermally induced circulation and convergence.

The 500-hPa anticyclone requires a distinct but connected interpretation. Surface sensible heating does not act directly at 500 hPa. Instead, heating alters the temperature and thickness of the atmospheric column, changes geopotential heights through hydrostatic adjustment, and interacts with vertical motion, background flow, and potential-vorticity redistribution. Over the elevated Zagros heat dome, vertical compression and associated changes in absolute vorticity can favor anticyclonic curvature. This interpretation is consistent with previous controlled numerical experiments demonstrating an important role for Zagros heating in the development of the regional mid-tropospheric high.

The circulation cannot, however, be attributed exclusively to thermal forcing. The Zagros Mountains exert both thermal and mechanical influences, while the regional circulation is embedded within larger-scale subtropical and monsoonal systems. Consequently, the present reanalysis-based results demonstrate consistency among the observed processes but cannot isolate the causal contribution of Zagros heating from topographic mechanical forcing or remote circulation. Controlled model sensitivity experiments, together with explicit divergence, vorticity-budget, and

potential-vorticity analyses, would be required for quantitative attribution.

Conclusion

The study identifies a coherent three-dimensional summertime circulation structure over the Zagros. Enhanced surface sensible heat flux is associated with lower-tropospheric warming and conditions favorable for increased buoyancy, convergence, and upward motion. The associated convergence and column stretching are dynamically consistent with enhanced positive relative vorticity in the lower troposphere. At middle levels, the warm-column structure, increased thickness, hydrostatic adjustment, vertical compression, and redistribution of vorticity provide a physically plausible pathway toward the development of the 500-hPa anticyclonic circulation. The most defensible conceptual sequence is therefore: surface heating → boundary-layer warming and increased buoyancy → low-level convergence and ascent → column stretching and positive low-level vorticity → thermal and hydrostatic adjustment of the atmospheric column → mid-tropospheric anticyclonic circulation. The scientific contribution of the study lies in integrating surface energy flux, thermal structure, omega, vorticity, thickness, geopotential height, and wind fields within a unified synoptic-dynamical framework. Nevertheless, definitive attribution requires controlled numerical experiments capable of separating thermal forcing, mechanical topography, and large-scale circulation.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

واداشت ترمودینامیکی و ساختار گردش جو تابستانه بر فراز رشته‌کوه زاگرس: نقش شار گرمای محسوس، حرکت صعودی و توسعه واپرخند تروپوسفر میانی

قاسم عزیزی^۱✉، رمون هاروتونیان^۲، مصطفی کریمی^۳، فرامرز خوش‌اخلاق^۴

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ghazizi@ut.ac.ir

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: remonharoutoun.1@ut.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mostafakarimi.a@ut.ac.ir

۴- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: fkhosh@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۵/۰۳/۱۹

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۷/۱۴

تاریخ چاپ:

۱۴۰۵/۰۸/۰۴

واژگان کلیدی:

انرژی گرمایی،

چگالی هوا،

رشته‌کوه‌های

زاگرس،

شار گرمای

محسوس سطحی،

گرمایش دررو.

رشته‌کوه زاگرس به‌عنوان یک منبع گرمایی مرتفع، در تابستان می‌تواند در سازمان‌دهی گردش منطقه‌ای جو غرب ایران و خاورمیانه نقش داشته باشد. هدف پژوهش، بررسی ارتباط فرایند محور میان شار گرمای محسوس سطحی، ساختار حرارتی، حرکت قائم، تلاوایی و شکل‌گیری واپرخند میانی بر فراز زاگرس است. برای این منظور، داده‌های باز تحلیل مربوط به شار تابش موج‌کوتاه، شار گرمای محسوس، دمای پتانسیل، امگا، تلاوایی نسبی، ارتفاع ژئوپتانسیل، ضخامت و مؤلفه نصف‌النهاری باد طی تابستان‌های ۱۹۹۰-۲۰۲۱ در محدوده ۳۰-۳۴ درجه شمالی و ۴۸-۵۴ درجه شرقی بررسی شد. سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۳ به‌ترتیب به‌عنوان نمونه خشک و تر و ۱۰ ژوئیه به‌عنوان روز نماینده انتخاب شدند. نتایج نشان داد که گرمایش محسوس سطحی با افزایش دمای لایه زیرین، صعود هوا و تقویت تلاوایی مثبت در ترازهای پایین همراه است؛ درحالی‌که در ترازهای میانی، ساختار حرارتی ستون و بازآرایی میدان تلاوایی با توسعه واپرخند ۵۰۰ هکتوپاسکال همخوانی دارد. سازوکار پیشنهادی شامل زنجیره گرمایش سطحی، افزایش شناوری، همگرایی و صعود، کشیدگی ستون و بازآرایی تلاوایی و در نهایت شکل‌گیری گردش واپرخندی میانی است. بااین‌حال، داده‌های باز تحلیل به‌تنهایی برای تفکیک سهم گرمایش زاگرس از واداشت مکانیکی توپوگرافی و گردش بزرگ‌مقیاس کافی نیست. نوآوری این مقاله در تلفیق شارهای انرژی سطحی، ساختار حرارتی، امگا (ω)، تلاوایی، ضخامت، ارتفاع ژئوپتانسیل و میدان‌های باد در یک چارچوب یکپارچه سینوپتیکی-دینامیکی است. بااین‌حال، تعیین قطعی سهم هر یک از این سازوکارها مستلزم آزمایش‌های عددی کنترل‌شده‌ای است که امکان تفکیک اثر واداشت حرارتی، اثر مکانیکی توپوگرافی و گردش بزرگ‌مقیاس را فراهم سازند.

استناد: عزیزی، قاسم؛ هاروتونیان، رمون؛ کریمی، مصطفی و خوش‌اخلاق، فرامرز. (۱۴۰۵). واداشت ترمودینامیکی و ساختار گردش جو تابستانه بر فراز رشته‌کوه زاگرس: نقش شار گرمای محسوس، حرکت صعودی و توسعه واپرخند تروپوسفر میانی. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۸ (۳)، ۲۱-۱.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.416289.1007943>

مقدمه

تبادل انرژی بین سطح زمین و جو یکی از پایه‌های شکل‌گیری ساختار حرارتی و دینامیکی لایه زیرین وردسپهر است. در مناطق کوهستانی مرتفع، دریافت تابش خورشیدی، ویژگی‌های سطح، خشکی نسبی، عمق لایه مرزی و ناهمواری می‌توانند شار گرمای محسوس را تقویت کنند و به تشکیل یک منبع گرمایی مرتفع بینجامند. با این حال، وجود شار محسوس زیاد به تنهایی برای اثبات ایجاد یک گردش جوی کافی نیست؛ باید مسیر انتقال اثر گرما به میدان فشار، حرکت قائم و تاوایی نیز نشان داده شود. از این رو، مسئله اصلی این پژوهش از توصیف صرف شار گرمای محسوس فراتر رفته و بر ارتباط ترمودینامیک سطح با پاسخ دینامیکی ستون جو تمرکز دارد.

پیشینه پژوهش‌های داخلی نشان داده است که زاگرس در تابستان می‌تواند هم به عنوان منبع گرمایی مرتفع و هم به عنوان عامل مکانیکی در سازمان‌دهی گردش منطقه‌ای عمل کند. زرین و مفیدی (۱: ۱۳۹۰) در یک مدل‌سازی، نقش ارتفاعات ایران را در ساختار پرفشارهای جنب‌حاره‌ای بررسی کردند و حذف زاگرس را با تغییر قابل توجه در گردش زیرین و میانی همراه دانستند. آن‌ها ساختار و ماهیت پرفشارهای جنب حاره روی ایران را با استفاده از داده‌های بازکوی شده پایگاه NCEP/NCAR، خصوصیات جغرافیایی پرفشارهای جنب‌حاره‌ای تابستانه روی خاورمیانه را از لحاظ فراوانی رخداد در یک دوره آماری ۳۰ ساله در ترازهای زیرین، میانی و بالایی وردسپهر بررسی کردند. سپس نقش واداشت‌های گرمایی در تشکیل و تقویت پرفشارهای مزبور مورد واکاوی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشانگر ماهیت مستقل پرفشار جنب‌حاره‌ای در ترازهای میانی و بالایی وردسپهر بود. لذا در شرایط حذف رشته‌کوه زاگرس و به دنبال کاهش مقادیر گرمایش روی منطقه، سرعت قائم بالاسوی ترازهای زیرین به سرعت قائم پائین سوی روی منطقه تبدیل گردید. همچنین حذف رشته‌کوه‌ها نه تنها منجر به تضعیف گردش و اچرخندی در ترازهای میانی و بالایی وردسپهر گردید، بلکه گردش چرخندی ترازهای زیرین را نیز تضعیف و حتی به گردش و اچرخندی تبدیل کرد. زرین و همکاران (۲۰۱۱: ۹۶) با کمک مدل RegCM4 نشان دادند که حذف زاگرس موجب تغییر گرمایش دررو و تضعیف گردش چرخندی زیرین و و اچرخندی میانی می‌شود. این مطالعه برای مقاله حاضر اهمیت دارد زیرا از آزمایش حساسیت عددی برای استنتاج علت استفاده کرده است. در پژوهش قائمی و همکاران (۸۴-۸۵: ۱۳۹۲)، الگوی عمومی پاسخ جو گرم شده، گردش چرخندی در ترازهای پایین و و اچرخندی در ترازهای بالاتر تبیین شده است. یاراحمدی و همکاران (۱۰۲-۱۰۳: ۱۳۹۵) نیز در شبیه‌سازی اثر ارتفاعات زاگرس بر سامانه‌های همرفتی، بر ارتباط توپوگرافی، همگرایی و حرکت قائم تأکید کرده‌اند. حاجی محمدی (۹۵-۹۶: ۱۴۰۱) نقش واداشت‌های فرامنطقه‌ای و گردش فوقانی مرتبط با مونسون شرق آسیا و فلات تبت را در و اچرخند تابستانه ایران بررسی کرده است. بنابراین، پاسخ گردش میان‌مقیاس در ایران را نمی‌توان بدون قرار دادن آن در چارچوب گردش بزرگ‌مقیاس تفسیر کرد. ذوالفقاری و همکاران (۴۴۸: ۱۳۹۵) استفاده از داده‌های دمای هوا، دمای سطح زمین و سرعت باد از پایگاه NCEP/NCAR برای یک دوره ۳۴ ساله (۲۰۱۴-۱۹۸۰)، محاسبات شار گرمای محسوس برای بهار و تابستان بر اساس رابطه حجمی انجام دادند. سپس به وسیله میانگین متحرک، ناهنجاری متغیرها و روند تغییرات با تحلیل رگرسیون خطی، چندجمله‌ای و ضریب همبستگی پیرسون نشان دادند که تغییرات باد تأثیر بیشتری در شار گرمای محسوس تابستانه می‌گذارد و سرعت باد بیست درصد تغییرات شار گرمای محسوس تابستانه را توجیه می‌کند. بعلاوه، نواحی غرب، شمال غرب، مرکز و کرانه جنوبی خزر بیشترین تغییرات شار گرمای محسوس در دوره گرم و حداکثر تغییرات دمای هوا و دمای سطح را به خود اختصاص داده است. امیری و همکاران (۱: ۱۳۹۷) رابطه دمای هوا با توزیع تاوایی نسبی در خاورمیانه را در دو تراز ۸۵۰ و ۵۰۰ ه. پ و دمای هوای ۹۷ ایستگاه همدید کشور در طول ۱۹۸۱-۲۰۱۰ را با استفاده از روش‌های آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل همبستگی کانونیکال

(CCA) انجام دادند. آن‌ها نشان دادند تاوایی نسبی و دمای هوا در فصل گرم سال بالاترین همبستگی را دارد. گرمسیری و همکاران (۱، ۱۳۹۹) در پژوهشی که با استفاده از داده‌های ERA5 و ECMWF در دوره ۴۰ ساله، با تمرکز بر ساختار خطوط جریان، گردش و تاوایی (ارتباط مساحت و عرض جغرافیایی گردش با تاوایی نسبی)، در ترازهای دارای بیشینه جریان و اچرخندی انجام دادند، اثر گرمای محسوس را در شکل‌گیری الگوی ارتفاع ژئوپتانسیل با توجه به سطح مقطع دما و مؤلفه نصف‌النهاری باد، آغاز و پایان فعالیت و اچرخندی ایران در تراز ۶۵۰ تا ۵۰۰ ه. پ به ترتیب در ماه‌های جون و سپتامبر نشان دادند. آن‌ها اشاره کردند که تشدید گرمایش سطحی در تراز زیرین باعث تقویت صعود هوا می‌شود. عزیزی و همکاران (۱۳۹۹: ۹۴) اشاره می‌کنند که گرمایش محسوس ناشی از دریافت بالای انرژی خورشیدی در طول روز، همراه با گرمایش حاصل از جذب انرژی طول‌موج بلند توسط بخش تحتانی و ردسپهر، موجب گرمایش شدید ترازهای سطحی و شکل‌گیری جریانات همرفتی خشک می‌شود. همین‌طور اضافه می‌کنند که نزول دینامیکی هوا با دمای پتانسیل بالا از وردسپهر بالایی روی این مناطق خشک ضمن کاهش ابرناکی، افزایش بیشتر دمای سطحی را به دنبال خواهد داشت. در نتیجه کم‌فشارهای گرمایی تابستانه به‌صورت دینامیکی تقویت می‌شوند و این مراکز فشاری ریشه در خصوصیات گرمایی و شارهای سطحی زمین دارند که نسبت به فاصله از سطح زمین از شدت آن‌ها کاسته می‌شود و باعث واگرایی در بالای ترازهای زیرین خود می‌گردند.

در ادبیات بین‌المللی نیز زایچک^۱ و همکاران (۲۰۰۷) با آزمایش‌های عددی نشان دادند که زاگرس یک منبع گرمایی مرتفع مؤثر بر گردش تابستانه خاورمیانه است. در آزمایش حساسیت آن‌ها، خنثی کردن گرمایش زاگرس باعث حذف مرکز پرفشار ۵۰۰ هکتوپاسکال روی فلات ایران شد. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی آلودی سطوح پوشیده از برف ارتفاعات زاگرس، نشان دادند که گردش گرمای تولید شده روی زاگرس متوقف گردیده و موجب افزایش ۱ تا ۲ درجه سلسیوس دما در خاورمیانه در قیاس با داده‌های بازکاوی شده NCEP/NCAR می‌گردد. این تأثیر در اواسط تابستان که میزان گرمایش روی فلات زاگرس بیشینه است نیز به بیشترین مقدار خود رسید. بعلاوه نتایج شبیه‌سازی آلودی فوق نشان‌دهنده کاهش فرونشست و تقویت بارش می‌باشد. لذا نتایج به‌دست‌آمده از مدل او حاکی از تداوم گردش گرمای تولید شده ایست که در ایجاد تعادل ترمودینامیکی مؤثر می‌باشد. این نتیجه از نظر مقاله حاضر بسیار مهم است، اما باید توجه داشت که مطالعه زایچک و همکاران بر مبنای آزمایش عددی کنترل‌شده است و از نظر استنباط علی با تحلیل هم‌زمان متغیرهای باز تحلیل تفاوت دارد. در سطح وسیع‌تر، رودول و هاسکینز^۲ (۲۰۰۱) و مطالعات بعدی درباره خاورمیانه نشان داده‌اند که و اچرخندهای جنب‌حاره‌ای حاصل برهم‌کنش گرمایش دررو، گردش مونسونی، فرایندهای تاوایی پتانسیل و توپوگرافی‌اند. سیمپسون^۳ و همکاران (۲۰۱۵) با مدل‌سازی حذف توپوگرافی نشان دادند که زاگرس از طریق واداشت مکانیکی نیز می‌تواند در سازمان‌دهی فرونشست و گردش تابستانه مدیترانه نقش داشته باشد.

نیاما^۴ ۱۹۶۸ در مطالعه‌ای با استفاده از ارتفاع ژئوپتانسیل در ماه آگوست برای مدت ۹ سال مورفولوژی و اچرخندهای جنب‌حاره‌ای نیمکره شمالی را بررسی کرد. نتایج او نشان‌دهنده بالاتر بودن دمای و اچرخند جنوب آسیا نسبت به و اچرخندهای قاره آمریکای شمالی ناشی از اثر گرمایشی متفاوت کوه‌های هیمالیا و راکی بوده است (نقل از قائمی و همکاران، ۱۳۹۹: ۳۲۱). هینز و مکینتایر^۵ ۱۹۸۷ اشاره دارند که تولید شار گرمای محسوس سطحی قوی و مداوم در

1 Zaitchik

2 Rodwell & Hoskins

3 Simpson

4 Niama

5 Heinz & MacIntyre

طول روزهای تابستان، ستون هوای بالای آن را در طی روز به صورت مداوم گرم می‌کند و موجب فرازش شدید در ستون هوای گرم شده بر روی سطح کوهستان می‌شود. این سازوکار هوای اطراف کوهستان را از پایین به سوی سطح کوهستان روانه می‌سازد و منطقه همگرایی شدیدی را ایجاد می‌کند که صعود قوی‌تر هوا را در پی دارد. لذا در فراز سطح کوهستان تاوایی مثبت و در لایه بالاتر و میانی تاوایی منفی رخ می‌دهد. همچنین گرمایش شدید در سطح زمین، چرخندی در سطح و واچرخندی در بالای آن تولید می‌کند. از طرفی گرمایش بیشینه در نزدیکی سطح زمین با حداقل ۱۰۰ وات بر مترمربع، موجب واداشت بادهای استوا سو بر روی ناحیه گرم شده در لایه‌های زیرین با ضخامت حدود یک کیلومتر می‌شود (نقل از قائمی و همکاران، ۱۳۹۲: ۸۴-۸۵). استال^۱ (۲۰۰۰) اشاره می‌کند که شار گرمای نهان و محسوس موجود میان سطح زمین و جو تنها به حدود ۲ کیلومتر اولیه محدود می‌شود. ما^۲ و همکاران (۲۰۱۴) با کمک یک مدل جهانی و با قدرت تفکیک افقی ۴۰ کیلومتر، آزمونی برای بررسی مونسون تابستانه جنوب آسیا به وسیله شار گرمای محسوس و اروگرافی بر روی فلات تبت انجام دادند. آن‌ها مشاهده کردند که با حذف فلات تبت و با حفظ کوه‌های هیمالیا و کوه‌های الحاقی آن تأثیر کمی بر شدت مونسون دیده می‌شود. از سویی شدت مونسون به طور تقریباً خطی با کاهش ارتفاع هیمالیا کاسته می‌شود. زو^۳ و همکاران، ۱، ۲۰۲۳ با مطالعه‌ای که در خصوص تغییرات روزانه شار گرمای محسوس سطحی بر روی فلات تبت انجام دادند، ساعت اوج این تغییرات را در ماه‌های می تا آگوست همراه با نوسان از ماهی به ماه دیگر مشاهده کردند. ضمناً فصول بهار و پاییز سال‌های ۲۰۱۵ به بعد دارای دو ساعت اوج می‌باشد، همچنین توصیه شده ضریب انتقال گرما (CDH) به منظور دقت بیشتر در فصل بهار به ۳-۲،۲۴×۱۰ و در تابستان به ۳-۲،۷۸×۱۰ تغییر یابد.

هدف این مقاله بازبینی سازوکار ترمودینامیکی گردش تابستانه بر فراز زاگرس با تمرکز بر مسیر فیزیکی شار گرمای محسوس تا حرکت قائم و تاوایی است. پرسش‌های پژوهش عبارت‌اند از: ۱) آیا افزایش و سازمان‌یافتگی شار گرمای محسوس در ناحیه مرتفع متراکم با الگوی منسجم صعود هوا همراه است؟ ۲) آیا صعود و همگرایی لایه زیرین با افزایش تاوایی مثبت در ترازهای ۸۵۰-۷۵۰ هکتوپاسکال هم‌زمان است؟ ۳) چگونه ساختار حرارتی و حرکت قائم با توسعه واچرخند ۵۰۰ هکتوپاسکال مرتبط می‌شوند؟ و ۴) کدام بخش از این زنجیره را می‌توان از باز تحلیل نتیجه گرفت و کدام بخش نیازمند آزمایش حساسیت عددی است؟ نوآوری مقاله نه ادعای کشف یک پدیده ناشناخته، بلکه ارائه یک تفسیر یکپارچه و فرایند محور از روابط متقابل شار محسوس، شناوری، حرکت قائم، تاوایی و ساختار واچرخندی بر فراز زاگرس است؛ تفسیری که یافته‌های مطالعات عددی پیشین را با شواهد باز تحلیل سه‌ساعته و مقایسه سال خشک و تر پیوند می‌دهد.

روش پژوهش

شرح داده‌های مورد استفاده در مقاله در جدول شماره ۱ ارائه گردیده است:

1 Stull

2 Ma

3 Zhu

جدول ۱. داده‌ها و کاربرد هر متغیر

کاربرد	تفکیک/دوره	منبع	متغیر
تشخیص دریافت انرژی تابشی	۲۰۲۱-۱۹۹۰، سه ساعته، 0.25×0.25 درجه	ECMWF	شار تابش موج کوتاه پایین سو
متغیر اصلی گرمایش محسوس	0.1×0.1 درجه، سه ساعته، ۲۰۲۱-۱۹۹۰	ECMWF	شار گرمای محسوس سطحی
تشخیص پاسخ چرخندی/واچرخندی	۵۰۰ و ۷۰۰ هکتوپاسکال	باز تحلیل مورد استفاده	تاوایی نسبی
ساختار حرارتی و پایداری	ماهانه، ۸۵۰-۲۵۰ هکتوپاسکال	NCEP/NCAR	دمای پتانسیل
شاخص مکمل گرمایش ستون	۰۰UTC، ماه‌های گرم	ECMWF	گرایش انرژی ستون
تشخیص صعود/فرونشست	۸۵۰-۲۵۰/۲۰۰ هکتوپاسکال	NCEP/NCAR	امگا
ساختار ارتفاعی و واچرخند	JJA و موارد منتخب	NCEP/NCAR	ارتفاع ژئوپتانسیل و ضخامت
ساختار گردش و تقارن	1940-2021 JJA	NCEP/NCAR	باد نصف‌النهاری

سال‌های منتخب و روز نماینده: سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۳ به عنوان نمونه خشک و تر استفاده شدند. این دو سال برای مقایسه فرایندی‌اند، نه آزمون آماری. روز ۱۰ ژوئیه نیز مطالعه موردی نماینده است و نباید به کل تابستان تعمیم آماری داده شود.

چارچوب تحلیل

ابتدا شار تابش و شار محسوس برای تعیین ناحیه گرمایش؛ سپس تاوایی برای پاسخ چرخندی؛ امگا برای حرکت قائم؛ دمای پتانسیل و ضخامت برای ساختار حرارتی؛ و ارتفاع ژئوپتانسیل و باد نصف‌النهاری برای ساختار واچرخندی بررسی شد. هم‌زمانی فضایی/زمانی، سازگاری با معادلات فیزیکی و مقایسه با مطالعات حساسیت عددی سه سطح شواهد هستند که در جدول شماره ۲ ارائه گردیده است:

جدول ۲. شواهد ارائه شده در مقاله

مرحله	شاخص	پیش‌بینی فیزیکی	شاهد
۱	شار محسوس	گرمایش سطحی و افزایش θ_v	نقشه شار
۲	θ و ضخامت	گرم شدن و افزایش ضخامت ستون	شکل ۸
۳	امگا	$\omega < 0$ و صعود	شکل‌های ۱۰ و ۱۱
۴	$850-750$ hPa	تقویت ζ مثبت با همگرایی/کشش	شکل ۶
۵	500 hPa و Z	ساختار واچرخندی	شکل ۷ و باد
۶	پیشینه	سازگاری با نقش گرمایش زاگرس	Zaitchik et al.; Zarrin et al.

فرایند تحلیل

ترتیب عمل و فرایند دنبال شده در این تحقیق بدین شرح بوده است که از شار تابش موج کوتاه ↓ شروع شده و به تشکیل واچرخند ۵۰۰ هکتوپاسکال ختم می‌شود:

- ✓ شار تابش موج کوتاه پایین سو ↓
- ✓ گرم شدن سطح و افزایش شار گرمای محسوس
- ✓ افزایش دمای هوای مجاور سطح و افزایش شناوری
- ✓ تغییر چگالی و تعدیل گرادبان فشار افقی
- ✓ همگرایی در لایه زیرین و صعود هوا ($\omega < 0$)

- ✓ کشش ستون و تقویت تاوایی مثبت در ترازهای پایین
 - ✓ افزایش ضخامت و ارتفاع ژئوپتانسیل ستون گرم و شکل‌گیری واگرایی در ترازهای بالاتر
 - ✓ بازآرایی تاوایی و پتانسیل تاوایی (PV)
 - ✓ توسعه گردش و اچرخندی در تراز میانی
 - ✓ و اچرخند ۵۰۰ هکتوپاسکال
- البته واداشت مکانیکی توپوگرافی زاگرس و گردش بزرگ‌مقیاس زمینه‌ای، بستر و تعدیل‌کننده این زنجیره هستند و نمی‌توان از داده‌های باز تحلیل به‌تنهایی سهم علی هر یک را به‌طور قطعی تفکیک کرد.

شار محسوس و شناوری

شار محسوس سطحی مستقیماً نیروی شناوری را وارد معادله حرکت نمی‌کند؛ بلکه با تغییر دمای هوای مجاور سطح، چگالی را تغییر می‌دهد و از این طریق نیروی شناوری را تعدیل می‌کند. در تقریب بوزینسک می‌توان نوشت: $B = g(\theta_v'/\theta_v)$ بنابراین افزایش شار محسوس رو به جو، در صورت فراهم بودن اختلاط و انتقال گرما به لایه‌مرزی، افزایش θ_v و B را به دنبال دارد. متغیر مشاهده‌شده در سطح «شار» است، درحالی‌که متغیر دینامیکی مؤثر بر صعود «شناوری ناشی از گرم شدن هوا» است.

شناوری، همگرایی و امگا

افزایش شناوری در یک ستون گرم می‌تواند همرفت و صعود را تقویت کند، اما صعود محلی باید با پیوستگی جرم سازگار باشد. در مختصات فشاری، امگای منفی به معنای حرکت رو به بالا است. مشاهده $\omega < 0$ بر فراز زاگرس شاهد مستقیم حرکت صعودی است، اما تنها علت آن نیست.

همگرایی و تاوایی

رابطه شار محسوس با تاوایی باید از طریق معادله تاوایی تفسیر شود:

$$D\zeta/Dt = -(\zeta+f)\nabla \cdot \mathbf{V} - \beta v + \text{Tilting} + \text{Friction}$$

در نیمکره شمالی، همگرایی افقی در حضور تاوایی مطلق مثبت می‌تواند با کشیدگی ستون، ζ را افزایش دهد. بنابراین افزایش تاوایی مثبت در منطقه ۸۵۰-۷۵۰ هکتوپاسکال با همگرایی و کشیدگی ستون سازگار است؛ اما برای اثبات سهم کمی همگرایی، میدان واگرایی یا بودجه کامل تاوایی لازم است.

ظاهر شدن و اچرخند در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

گرمایش ستون هوا باعث افزایش ضخامت لایه و افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل سطوح فشاری می‌شود. در یک برآمدگی گرمایی مرتفع، توزیع عمودی دما و فشار موجب بازآرایی میدان ارتفاع ژئوپتانسیل و جریان می‌شود. از دیدگاه تاوایی پتانسیل نیز گرمایش دررو می‌تواند PV را تغییر دهد و جریان را وادار به سازگاری کند. افزون بر آن، زایچک و همکاران (۲۰۰۷) نشان داده‌اند که در نزدیکی برآمدگی گرمایی زاگرس، فشردگی عمودی و کاهش تاوایی مطلق می‌تواند با حفظ تقریبی PV به انحنای و اچرخندی در ترازهای میانی منجر شود.

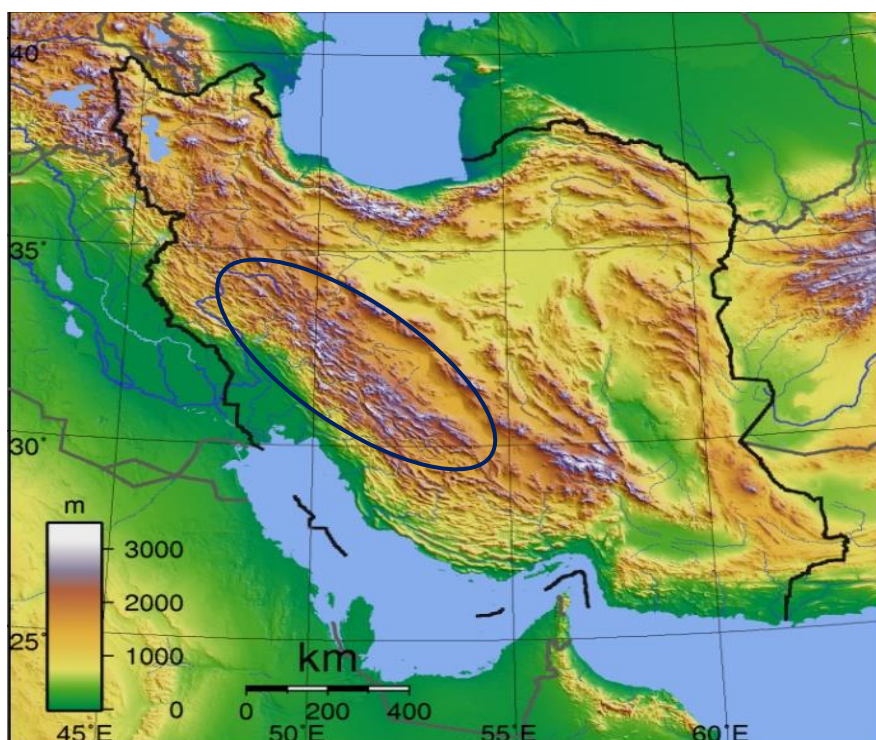
نسبت میان چرخند زیرین و و اچرخند میانی

در یک منبع گرمایی مرتفع، انتظار می‌رود لایه زیرین به علت گرم شدن و تغییر فشار نسبی، گرایش چرخندی و همگرایی داشته باشد؛ در بالای ناحیه گرم، پاسخ و اچرخندی می‌تواند شکل گیرد. این ساختار عمودی به‌صورت یک

گردش سلولی ترمودینامیکی قابل تفسیر است، اما شدت و مکان آن تابع گردش زمینه، توپوگرافی، گرادیان دما و شرایط مرزی نیز هست.

محدوده مطالعه

محدوده اصلی پژوهش بین عرض‌های ۳۰-۳۴ درجه شمالی و طول‌های ۴۸-۵۴ درجه شرقی شامل ناحیه مرتفع و متراکم زاگرس، به‌ویژه عرض‌های ۳۰,۵-۳۲,۲۵ درجه شمالی بوده است که به‌عنوان زیر ناحیه فرایندی موردتوجه قرار گرفته است. در تابستان بادهای غربی در جنب حاره‌ها ضعیف‌اند و واداشت‌های گرمایی اثر بیشتری در شکل‌گیری گردش جوی دارند (هاسکینز، ۱۹۸۷، ۶۸۵). توصیف مطالعه بر مختصات و ساختار توپوگرافی مورد استفاده در داده‌ها استوار است (شکل ۱).

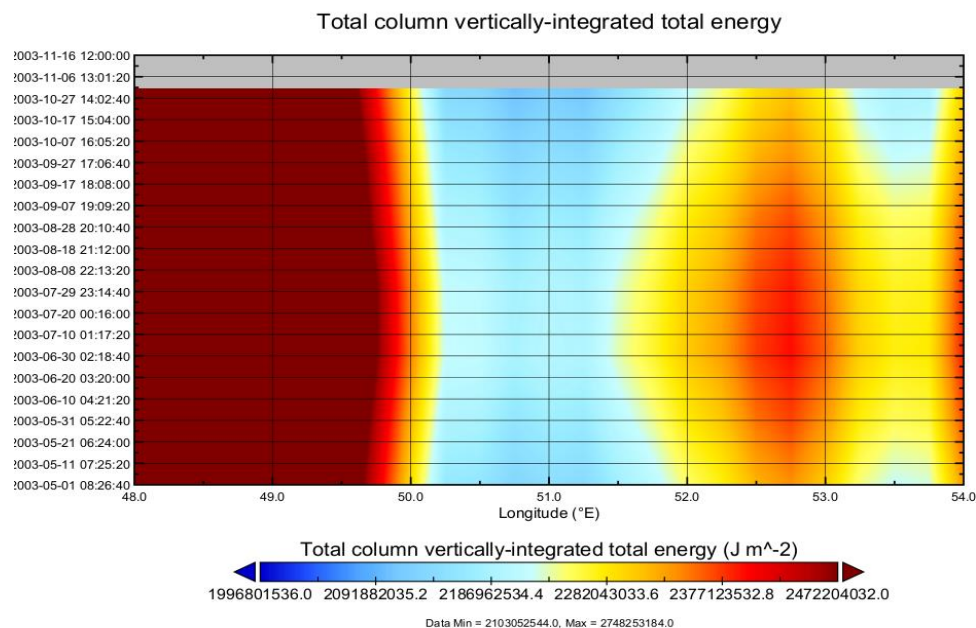


شکل ۱. محدوده مطالعه و جایگاه تقریبی محور زاگرس در غرب ایران

یافته‌ها

همان‌طور که در بخش روش‌ها اشاره شد، روز ۱۰ جولای در داده مورد استفاده در شمار روزهایی قرار می‌گیرد که انرژی ستون در عرض ۳۲ درجه شمالی به مقادیر بالایی می‌رسد. انتخاب این روز امکان مطالعه هم‌زمان شار، تاوایی و حرکت قائم را فراهم می‌کند. شکل ۲ مقادیر مجموع ۲۴ ساعته این انرژی‌ها بر حسب ژول بر مترمربع را برای ماه می تا اکتبر سال تر (۲۰۰۳) در عرض ۳۲ شمالی را نشان می‌دهد.

مجموع انرژی‌های ستون جو در روزهای ماه می تا اکتبر سال تر (۲۰۰۳) در عرض ۳۲ شمالی بر حسب ژول بر مترمربع نشان می‌دهد که شار گرما در ساعت (شش و نیم بعد از ظهر محلی) یا ۱۵ UTC در منطقه مورد پژوهش تقریباً به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

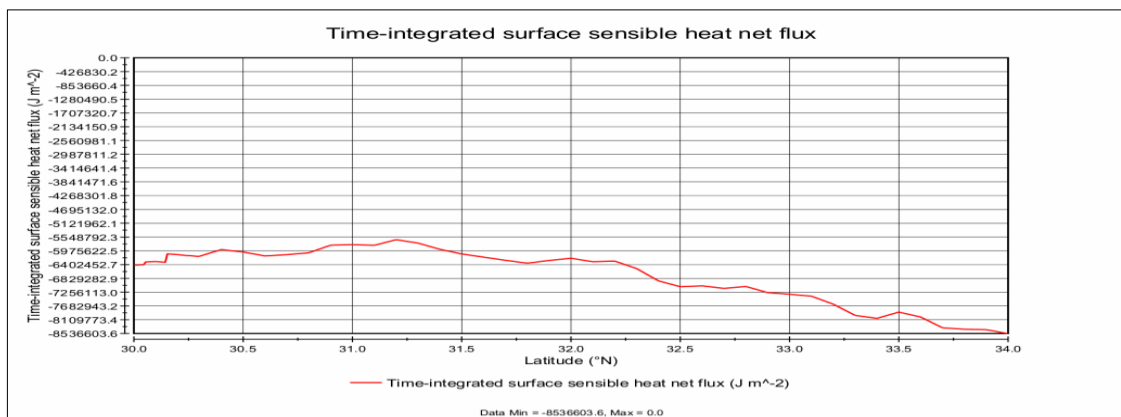


شکل ۲. مجموع انرژی ستون جو در روزهای ماه مه تا اکتبر سال ۲۰۰۳ در عرض ۳۲ درجه شمالی

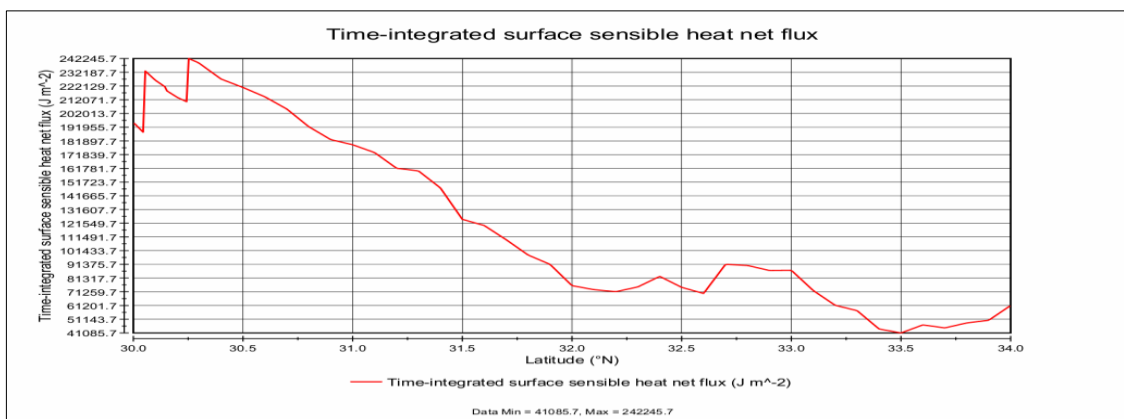
تغییرات شار مزبور در ساعت ۱۵ دهم جولای ۱۹۹۹ در شکل ۳ نشان داده شده است. دامنه تغییرات شار تجمعی در ناحیه ۳۰،۵-۳۲،۲۵ درجه شمالی حدود ۲۲ درصد از دامنه تغییرات محدوده ۳۰-۳۴ درجه شمالی است. این عدد «نسبت دامنه تغییرات» تلقی می‌شود، نه سهم انرژی. نتیجه قابل دفاع آن است که الگوی شار در ناحیه متراکم‌تر منسجم‌تر و کم‌نوسان‌تر است. محور افقی اشکال زیر نمایانگر تغییرات شار در عرض جغرافیایی برای میانگین طول‌های جغرافیایی ۴۸-۵۴ درجه طول شرقی است محور عمودی نشان‌دهنده تغییرات انرژی شار گرما بر مبنای ژول بر مترمربع است.

تداوم صعود هوای گرم در محدوده مورد مطالعه، مقادیر و تغییرات شار انباشتی گرمای محسوس در ساعت ۳ UTC دهم جولای سال‌های خشک و تر (۱۹۹۹ و ۲۰۰۳) در اشکال ۴ و ۵ نشان داده شده است. درواقع انرژی شار انباشتی فوق به علل تداوم صعود هوا و جذب در سطح ارتفاعات با کاهش تقریباً یکنواختی همراه است. دامنه کاهش شار فوق در فاصله عرض ۳۰ تا ۳۴ شمالی و میانگین ۴۸ تا ۵۴ شرقی در دو سال خشک و تر، با الگوی تقریباً همسان، با ۵ درصد اختلاف قابل‌رؤیت می‌باشد. تغییرات جهشی شار مزبور از عرض ۳۰ تا ۳۰،۲۵ شمالی به علت مجاورت با شمال خلیج فارس بوده و شیب تقریباً خطی کاهش شار مزبور از ۳۰،۲۵ تا ۳۲ شرقی مبین منطقه صعود یکنواخت هوا می‌باشد.

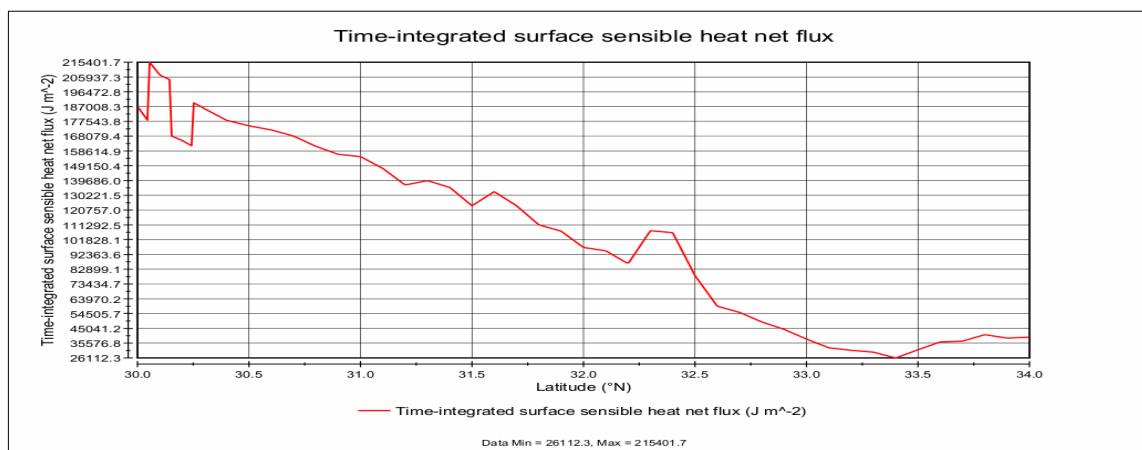
از سویی تغییرات نسبتاً غیریکنواخت شار فوق از عرض ۳۲ تا ۳۴ شمالی به‌ویژه در سال‌تر احتمالاً می‌تواند ناشی از آزاد شدن گرمای نهان تبخیر (شبنم صبحگاهی) باشد. به عبارت دیگر صعود هوا روی ارتفاعات متراکم‌تر هماهنگ‌تر از نواحی با تراکم کمتر می‌باشد. شباهت دو سال منتخب نشان می‌دهد ساختار فضایی شار محسوس فقط به وضعیت بارشی یک سال وابسته نیست؛ اما این مقایسه به دلیل دو ساله بودن، آزمون آماری نیست. ضمن این‌که اشاره به نقش رطوبت و شبنم و گرمای نهان نیز بدون داده مستقل رطوبت/تبخیر صرفاً یک احتمال است.



شکل ۳. شار گرمای انباشتی ساعت ۱۵ دهم جولای ۱۹۹۹ بر حسب ژول بر مترمربع

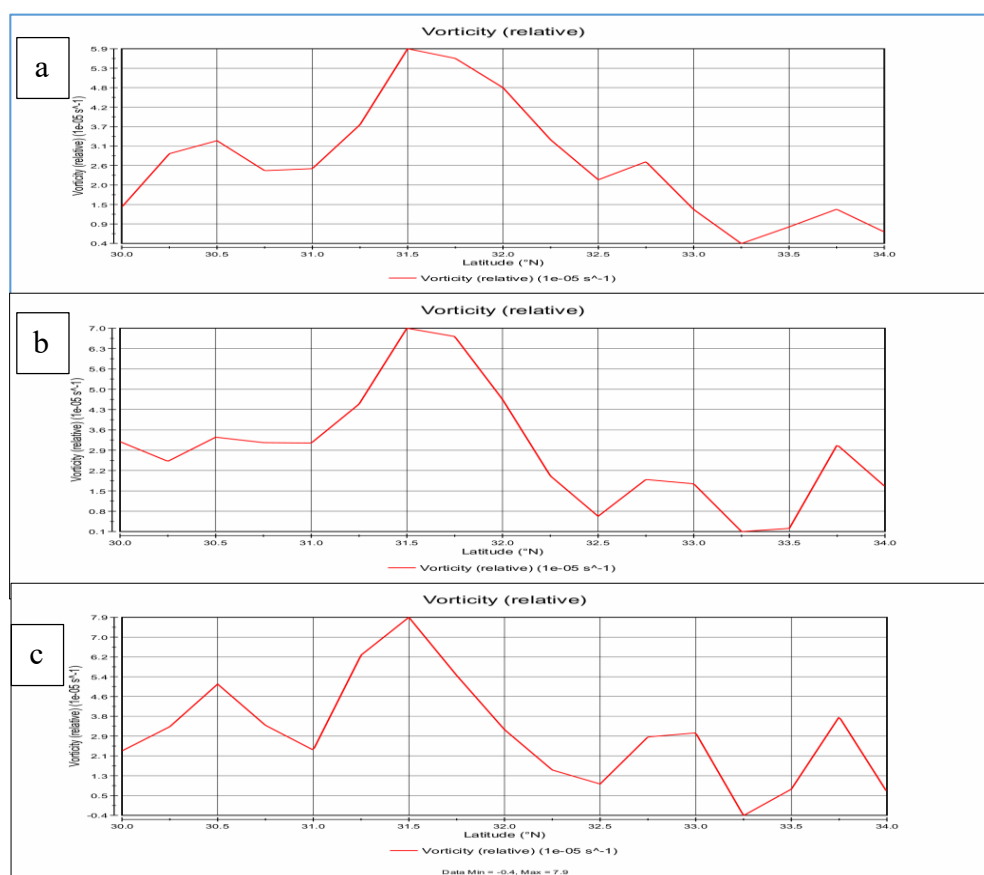


شکل ۴. شار گرمای انباشتی در ساعت ۳ دهم جولای ۲۰۰۳ بر حسب ژول بر مترمربع



شکل ۵. شار گرمای انباشتی در ساعت ۳ دهم جولای ۱۹۹۹ بر حسب ژول بر مترمربع

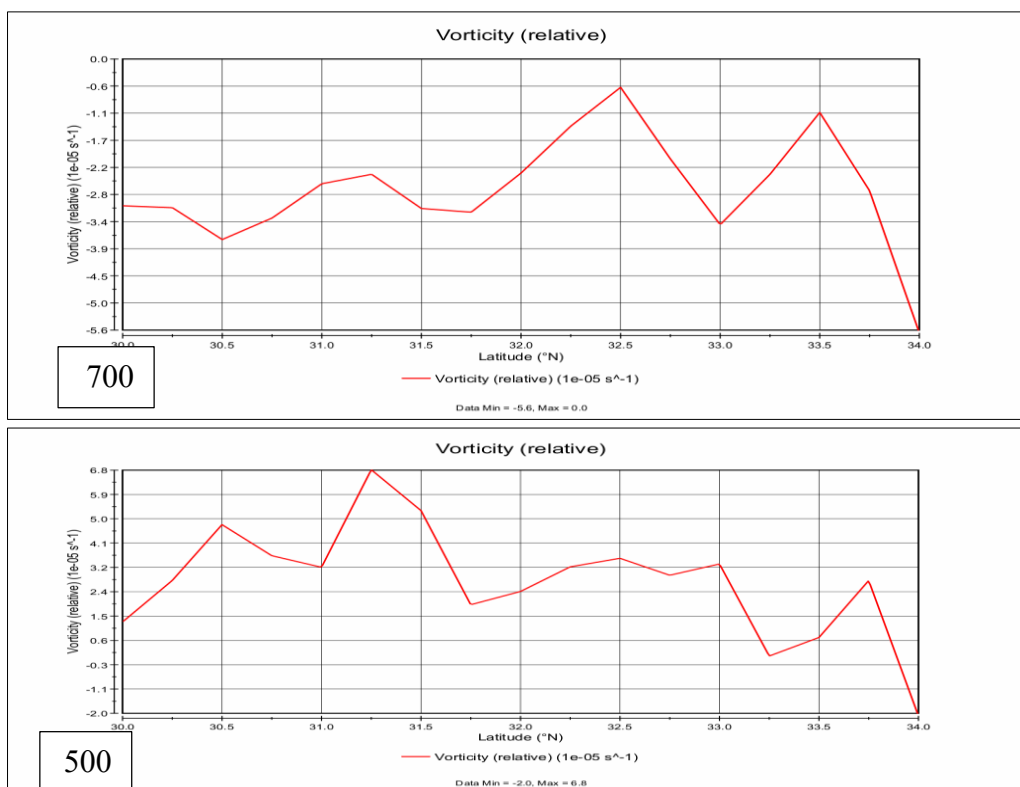
شکل ۶ که اختصاص به تاوایی لایه زیرین دارد و نشان می‌دهد در ساعت ۱۵ UTC روز ۱۰ ژوئیه ۱۹۹۹، تاوایی نسبی مثبت در ۸۵۰، ۸۰۰ و ۷۵۰ هکتوپاسکال با بخش مرکزی ارتفاعات همپوشانی دارد. این یافته با همگرایی و کشیدگی ستون سازگار است. بنابراین شرایط مساعد برای تقویت تاوایی مثبت وجود دارد.



شکل ۶. تغییرات تاوایی ساعت ۱۵ دهم جولای ۱۹۹۹ = a: ۸۵۰ ه. پ، b: ۸۰۰ ه. پ و c: ۷۵۰ ه. پ بر مبنای 10^{-5} s^{-1}

واچرخند میانی

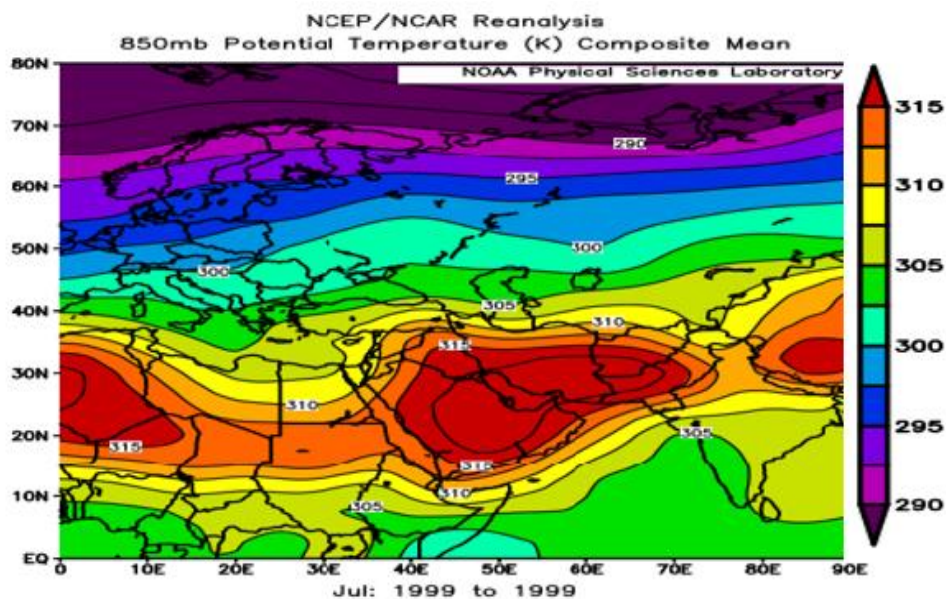
شکل ۷، تغییر علامت تاوایی از مثبت در ۷۰۰ هکتوپاسکال به منفی در ۵۰۰ هکتوپاسکال را نشان می‌دهد. همراهی این تغییر با امگای منفی و ساختار حرارتی، وجود یک گردش عمودی دو لایه را تقویت می‌کند. تاوایی ساعت ۱۵ UTC دهم جولای ۱۹۹۹ تراز ۷۰۰ ه. پ در میانگین طول ۴۸-۵۴ شرقی و تراز ۵۰۰ ه. پ در میانگین طول ۵۰-۵۵ شرقی ت. همان‌طور که مشاهده می‌شود تاوایی (منفی) تراز ۵۰۰ ه. پ بر فراز ناحیه ارتفاعی مترکم‌تر و دارای تاوایی قوی‌تر (مثبت) با قوت بیشتری مشاهده می‌شود.



شکل ۷- تاوایی ساعت ۱۵ دهم جولای ۱۹۹۹ بر مبنای $1e-05 \text{ s}^{-1}$ از بالا به پایین تراز ۷۰۰ و ۵۰۰ ه. پ

ساختار حرارتی

دمای پتانسیل پیرامون زاگرس سازمان‌یافتگی فضایی دارد. مقدارهای تقریبی تغییر θ به‌عنوان خوانش شکل در نظر گرفته‌شده است، و به‌عنوان رابطه ثابت نیست. خطوط هم‌دمای پتانسیل ماه‌های جون تا آگوست در تراز ۸۵۰ ه. پ در طول سه دهه مورد مطالعه، پیرامون محدوده ارتفاعات متراکم با چرخش در جهت شرق مشاهده می‌گردد. (شکل ۸)

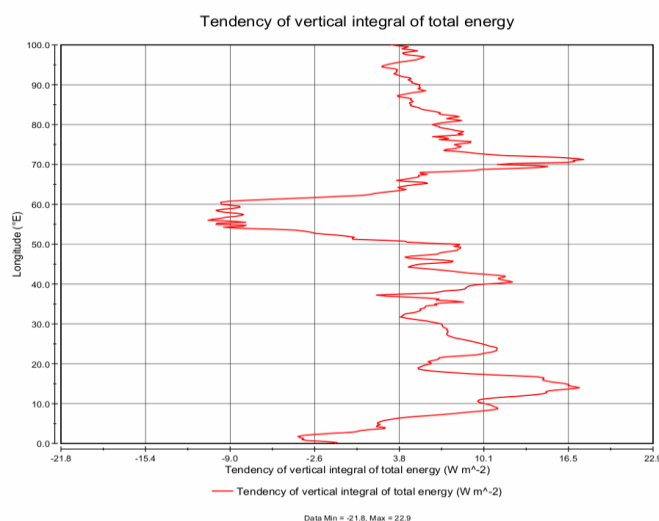


شکل ۸. خطوط هم‌دمای پتانسیل ماه جولای سال ۱۹۹۹ تراز ۸۵۰ ه. پ

خطوط هم‌دمای پتانسیل در ماه‌های تابستان از تراز ۸۵۰ تا ۲۵۰ ه. پ روی منطقه ارتفاعات غرب ایران، نشان‌دهنده شیب‌خطی افزایش دمای فوق از تراز ۸۵۰ تا ۵۰۰ ه. پ می‌باشد. به عبارتی به ازاء هر ۱۰۰ ه. پ کاهش فشار، دمای پتانسیل حدود ۴ درجه کلون افزوده شده است. همچنین از تراز ۵۰۰ تا ۴۰۰ ه. پ، دمای مزبور حدود ۶ تا ۱۰ درجه کلون افزایش داشته و از ۴۰۰ تا ۲۵۰ ه. پ، هر ۱۰۰ ه. پ کاهش فشار با افزایش ۱۴ تا ۱۵ درجه کلون همراه می‌باشد. درواقع ارتفاعات مزبور به‌عنوان منبع حرارتی مرتفع تابستانه، ستون هوای بالای خود را به‌طور پیوسته و شیب تقریباً یکنواخت تا تراز ۵۰۰ ه. پ گرم می‌کند. از طرفی در تراز بالاتر از ۵۰۰ ه. پ، تا ۲۵۰ ه. پ شیب غیرخطی افزایش دمای پتانسیل و تشدید پایداری مشاهده می‌شود.

گرایش انرژی ستون

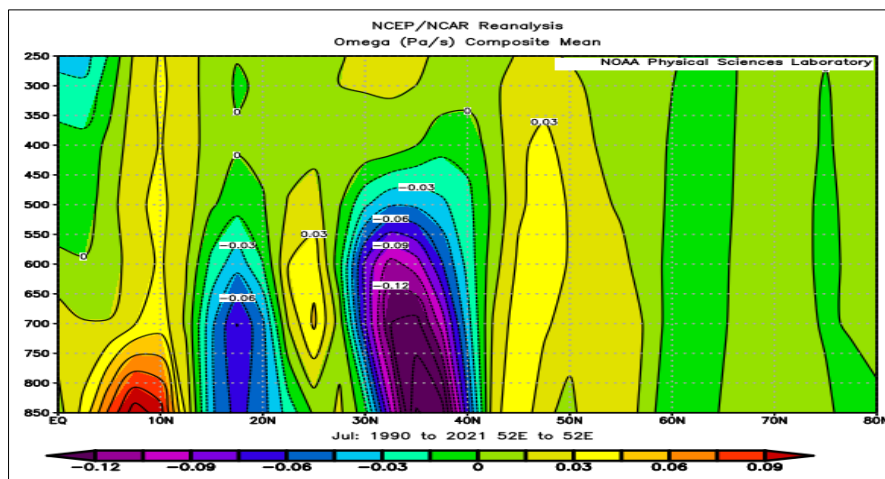
گرایش مثبت انرژی ستون در محدوده ۳۱-۳۳ درجه شمالی و ۴۸-۵۲ درجه شرقی شاخص مکمل تداوم گرمایش است و نباید با شار محسوس سطحی یکی دانسته شود. گرایش مجموع انرژی‌های ستون جو در روزهای تابستان (ساعت ۰۰) در محدوده برخلاف فصول دیگر سال مثبت است. (شکل ۹) محور عمودی در شکل مزبور طول جغرافیایی و محور افقی مقادیر گرایش مزبور را نشان می‌دهد.



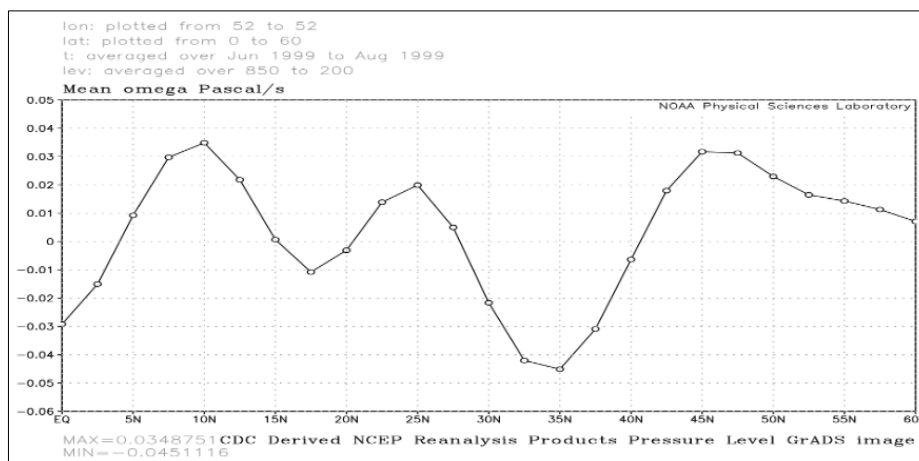
شکل ۹. گرایش یکپارچه مجموع انرژی‌های ستون قائم جو در ساعت ۰۰ روز ۱۵ جولای ۱۹۹۹ عرض ۳۲ شمالی برحسب وات بر مترمربع

حرکت قائم

امگای منفی از سطح تا حدود ۶۵۰ هکتوپاسکال بر روی محور زاگرس برجسته است. این نتیجه حلقه مهم «گرمایش-حرکت قائم» را پشتیبانی می‌کند، اما صعود می‌تواند حاصل برهم‌کنش گرمایی و مکانیکی باشد. امگای تراز قائم ۸۵۰ تا ۲۵۰ ه. پ در مقاطع ۴۸ تا ۵۴ شرقی روی ارتفاعات مزبور، نشان داده شده است. (شکل ۱۰) همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر امگای منفی در ۵۲ شرقی از تراز ۸۵۰ تا ۶۵۰ ه. پ قابل‌ملاحظه بوده و از تراز ۶۵۰ ه. پ تا ۴۵۰ ه. پ به صفر نزدیک شده است. همچنین در میانگین تراز ۸۵۰ تا ۲۰۰ ه. پ، در نوار ۳۰ تا ۳۵ شمالی و ۴۹ تا ۵۲ شرقی بیشترین مقادیر امگای منفی از نوار صفر تا ۶۰ شمالی و ۴۹ تا ۵۲ شرقی مشاهده می‌گردد. به همین منظور تغییرات امگا در میانگین تراز قائم فوق در تابستان سال خشک (۱۹۹۹) در شکل ۱۱ نشان داده شده است. افزایش شمال سو امگای منفی در راستای نصف‌النهار ۵۲ شرقی و در مجاورت محور محدوده مورد مطالعه می‌باشد. این امر مؤید بیشینه همرفت قائم در ناحیه مرکزی ارتفاعات متراکم می‌باشد.



شکل ۱۰. میانگین بلندمدت نمایه امگا ماه جولای طول ۵۲ شرقی

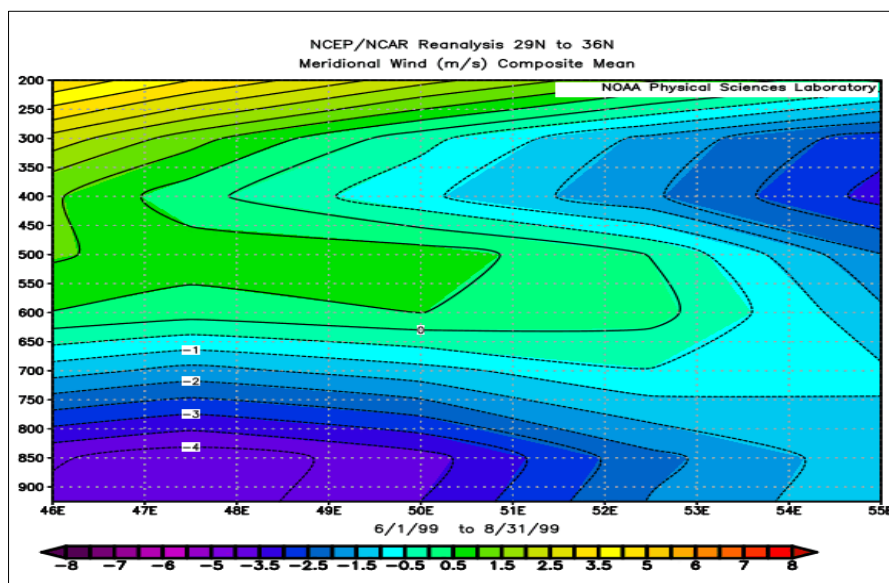


شکل ۱۱. نمایه امگا (جون تا آگوست سال ۱۹۹۹) در میانگین تراز قائم در ۵۲ شرقی

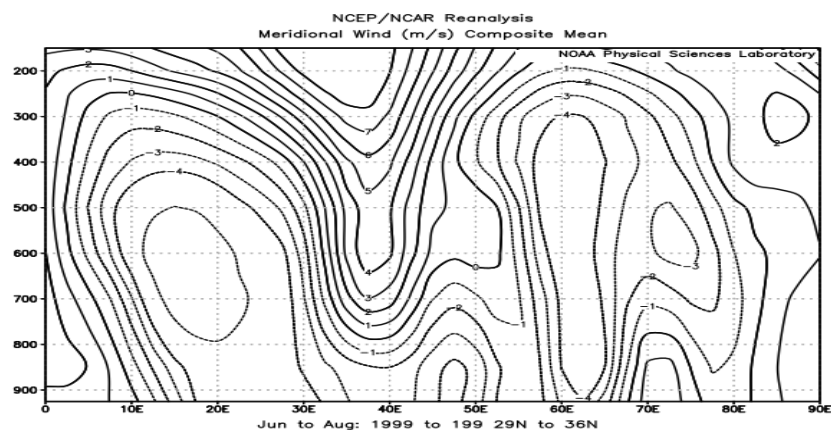
ساختار باد نصف‌النهاری و واچرخند

میدان باد نصف‌النهاری، مرکز گردش واچرخندی میانی را در حوالی ۵۲٫۵ درجه شرقی و بر فراز بخش میانی ارتفاعات نشان می‌دهد. آغاز تغییر علامت گردش در حدود ۶۶۰-۶۳۰ هکتوپاسکال و تقویت ساختار واچرخندی در حوالی ۵۰۰ هکتوپاسکال مشاهده می‌شود.

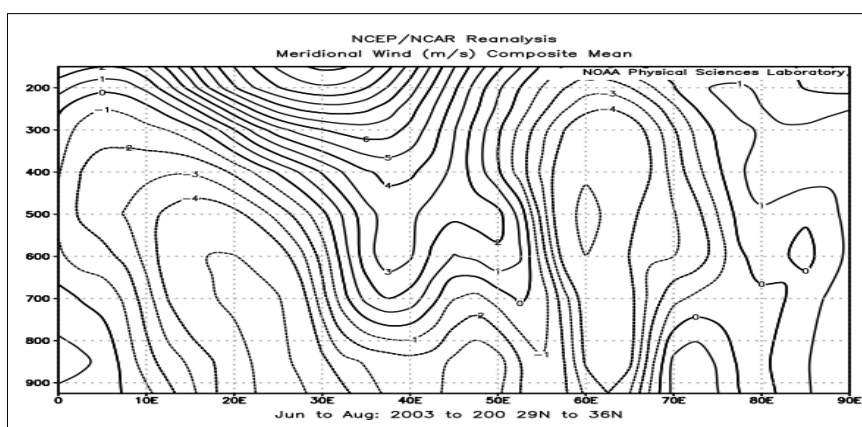
باد نصف‌النهاری جون تا آگوست ۱۹۹۹ در تراز قائم در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مرکز واچرخند تراز ۵۰۰ ه. پ (پربند ۰) حدوداً در ۵۲٫۵ شرقی و بر فراز بخش میانی ارتفاعات فوق قرار گرفته است. از سویی پرفشار تابستانه فلات تبت در تراز قائم ۴۰۰-۲۵۰ ه. پ با انحراف در طول جغرافیایی به طرف غرب جابجا شده که به علت کشیدگی غرب سوی پربند پشته مزبور روی منطقه ارتفاعات غرب ایران می‌باشد. آغاز شکل‌گیری چرخش واچرخندی تقریباً در فاصله تراز ۶۶۰ تا ۶۳۰ ه. پ و در میانگین عرض ۲۹ تا ۳۶ درجه شمالی دیده می‌شود. بیشینه گرادیان واچرخندی با چرخش متقارن در تراز ۵۰۰ ه. پ، بین ۵۲ تا ۵۳ شرقی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۲. باد نصف‌النهاری جون تا آگوست ۱۹۹۹ در میانگین عرض ۲۹ تا ۳۶ شمالی برحسب متر بر ثانیه



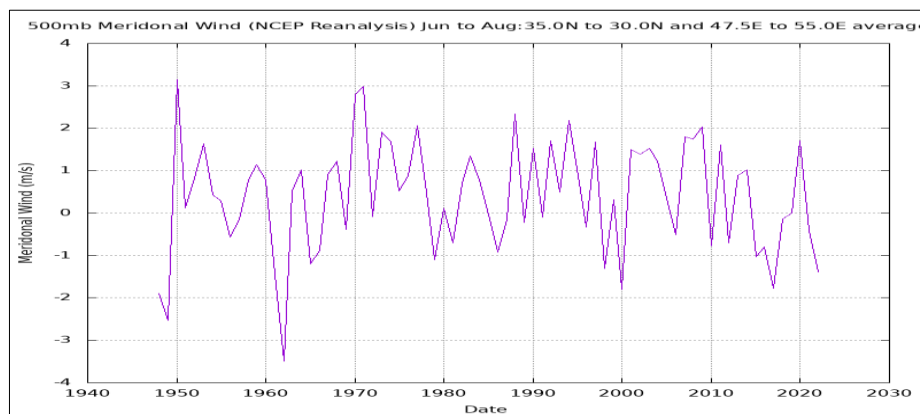
شکل ۱۳. باد نصف‌النهاری جون تا آگوست ۱۹۹۹ در میانگین عرض ۲۹ تا ۳۶ شمالی برحسب متر بر ثانیه



شکل ۱۴. باد نصف‌النهاری جون تا آگوست ۲۰۰۳ در میانگین عرض ۲۹ تا ۳۶ شمالی برحسب متر بر ثانیه

سری زمانی (۱۹۴۰ تا ۲۰۲۱) سه‌ماهه جون تا آگوست میانگین مؤلفه باد نصف‌النهاری از تراز ۷۰۰ ه.پ تا تراز ۲۰۰ ه.پ در محدوده عرض ۳۰ تا ۳۵ درجه شمالی و طول ۴۷٫۵ تا ۵۵ درجه شرقی بررسی گردید. میانگین مؤلفه باد مزبور

به‌ویژه در تراز ۵۰۰ ه. پ در شکل ۱۵ نشان داده شده است. میانگین مؤلفه باد فوق‌الذکر در تراز ۵۰۰ ه. پ دارای دامنه نوسان کمتر و متوازن تر از ترازهای بالاتر بوده و حول میانگینی به مقدار تقریباً ۰ در نوسان است. این امر نشان‌دهنده تداوم چرخش متقارن و اچرخند تراز میانی روی ارتفاعات فوق در طول تابستان تمامی سال‌های سری زمانی یادشده می‌باشد. از طرفی مؤید تأثیر کوه‌های مرتفع متراکم در ایجاد تعادل ترمودینامیکی ستون هوا در طول نزدیک به هشت دهه می‌باشد.



شکل ۱۵. سری زمانی باد نصف‌النهاری جون تا آگوست تراز ۵۰۰ ه. پ برحسب متر بر ثانیه

بحث

بر مبنای یافته این پژوهش توازن در توزیع انرژی شار انباشتی گرمای محسوس سطحی در ستون هوای روی منطقه متراکم ارتفاعات زاگرس، منشاء شروع و تداوم گردش جو تابستانه منطقه مزبور می‌باشد. مطالعه فرایند مزبور در طول مدت پژوهش، به‌ویژه در دو سال خشک ۱۹۹۹ (بارش کمتر از میانگین) و تر ۲۰۰۳ (بارش بیشتر از میانگین) نشان داد که شار مذکور در هر دو سال بیشینه‌ای را در حدود عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی نمایش می‌دهد که به سمت عرض‌های بالاتر کاهش یافته و در عرض حدود ۳۳ درجه به حداقل می‌رسند. این دو سال ضمن مشابهت بسیار زیاد الگوی نحوه تغییرات انرژی انباشتی شار گرما در دو سال فوق را روی منطقه مزبور (اشکال ۴ و ۵) به تصویر می‌کشند که به‌نوعی حکایت از نقش مناطق مرتفع در این فرایند دارند. لذا می‌توان استدلال نمود این توازن و تعادل در توزیع انرژی یادشده به علت اثر ترمودینامیکی این توده ارتفاع یافته بر ستون هوای بالای خود به وجود آمده است. درواقع توازن در توزیع انرژی فوق موجب کاهش گرادیان فشارهای جانبی و تقویت پدیده شناوری، همرفت قائم و همگرایی هوا می‌گردد. شدت همگرایی و صعود هوا با نزدیک‌تر شدن به مرکز منطقه مذکور (۳۱-۳۲ شمالی و ۵۲-۵۳ شرقی) افزایش می‌یابد. این فرایند باعث پیوستگی حرکت صعودی هوا در تمام ساعات شبانه‌روز ایام تابستان می‌گردد. به‌عبارت‌دیگر صعود هوا در پیرامون مرکز منطقه مزبور، سریع‌تر و منسجم‌تر از نواحی دیگر روی محور ارتفاعات اتفاق افتاده که بر مبنای روند تغییرات امگا به‌ویژه از سطح تا تراز میانی (اشکال ۱۰ و ۱۱) همخوانی دارد. از طرفی الگوی خطوط دمای پتانسیل ماه‌های تابستان و تغییرات آن در تراز قائم علی‌الخصوص در ماه جولای دو سال خشک و تر، مؤید این مسئله می‌باشد. درواقع آرایش و شیب افقی خطوط هم‌دمای پتانسیل در تراز بالاتر از ۸۵۰ ه. پ مؤید این امر می‌باشد. (شکل ۸) بنابراین نتایج این مقاله با یافته‌ها در پژوهش‌های زرین و همکاران (۲۰۱۱) زرین و مفیدی (۱۳۹۰ و ۱۳۹۱)، مفیدی و همکاران (۱۳۸۶، ۱۳۸۹)، قائمی و همکاران (۱۳۹۲)، یاراحمدی و همکاران (۱۳۹۵)، گرمسیری و همکاران (۱۳۹۹) و عزیزی و

همکاران (۱۳۹۹) همخوانی دارد. لازم به ذکر است که این پژوهش متکی بر تحلیل سازوکار اثرات ترمودینامیکی رشته‌کوه مزبور در شکل‌گیری و تداوم گردش جو منطقه زاگرس می‌باشد.

دامنه تغییرات انرژی انباشتی شار گرمای محسوس در روی ناحیه ارتفاعات فشرده در ایام تابستان با نوسان کمتری همراه می‌باشد. لذا این امر موجب ایجاد تاوایی قوی (مثبت) در فاصله عرض ۳۱ تا ۳۲ درجه شمالی از تراز ۸۵۰ تا ۷۵۰ ه. پ می‌گردد. ضخامت روی منطقه مورد مطالعه تا تراز میانی در ماه آغازین تابستان (جون)، از ضخامت روی منطقه فلات مرتفع تبت بیشتر است. این یافته‌ها با کلیات نتایج مطالعات برگرون (۱۹۳۰، ۲۵۰) نیاما (۱۹۶۸)، هاسکینز (۱۹۸۷)، قائمی و همکاران (۱۳۹۲) و امیری و همکاران (۱۳۹۷) مبنی بر ارتباط مستقیم دمای هوای سطح زمین و تاوایی نسبی، همچنین اثر گرمایش منطقه‌ای در صعود هوا و ایجاد گردش چرخندی در تراز زیرین و گردش واپرخندی در تراز بالاتر و رابطه دمای واپرخند هسته گرم با گرمایش ناشی از ارتفاعات همخوانی دارد.

گرایش مجموع انرژی‌های ستون قائم جو (tetend) در ماه‌های جون، جولای و آگوست (ساعت صفر UTC)، به‌ویژه در محدوده تشدید صعود هوا و تاوایی قوی، نشان‌دهنده وجود گرادیان دمایی در تراز قائم می‌باشد. درواقع پاسخ متغیرهای ارتفاع ژئوپتانسیل، تاوایی و نمایه امگا در فاصله عرض ۳۰ تا ۳۳ شمالی در تبعیت از دامنه تغییرات شار (انباشتی) گرمای محسوس می‌باشد.

بر ارتفاع تراز ۴۰۰ ه. پ و بالاتر از عرض ۲۷ درجه شمالی به‌طرف غرب کج شدگی نشان می‌دهد که به علت کشیدگی غرب سوی پربند پرفشار هسته گرم تابستانه فلات مرتفع تبت بر فراز منطقه غرب کشور می‌باشد. آغاز تاوایی منفی و گردش واپرخندی حدوداً از تراز ۷۰۰ تا ۶۵۰ ه. پ بوده و تکوین آن در تراز ۵۰۰ ه. پ به همراه چرخش متقارن مشاهده می‌شود. راستای مراکز چرخندی و واپرخندی بدون جابجایی قابل ملاحظه تقریباً در ۵۲٫۵ درجه شرقی قابل رؤیت است. تداوم گردش چرخندی تابستانه بعضاً تا حدود تراز ۶۳۰ ه. پ دیده می‌شود. به عبارتی متغیر مؤلفه باد نصف‌النهاری، نشان‌دهنده شکل‌گیری خط پشته با پربند صفر در تراز مزبور می‌باشد. (شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴)

تغییرات میانگین سرعت باد نصف‌النهاری بلندمدت تابستانه حول میانگینی نزدیک به صفر و با دامنه نوسان کمتر در دو تراز ۶۰۰ و ۵۰۰ ه. پ، به‌ویژه در تراز ۵۰۰ ه. پ دیده می‌شود. به عبارتی چرخش واپرخند تراز میانی نسبت به چرخش واپرخندهای ترازهای ۴۰۰، ۳۰۰ و ۲۰۰ ه. پ در طول نزدیک به هشت دهه از نظم، تقارن و پایداری بهتر برخوردار بوده است. درواقع این توده عظیم سنگی مرتفع که به‌صورت نصف‌النهاری در مجاورت عرض ۳۰ درجه شمالی واقع شده، در شکل‌گیری گردش جوی و تداوم آن بر فراز منطقه ارتفاعات یادشده نقش بنیادین دارد. از طرفی یافته‌های سیمپسون و همکاران (۲۰۱۵، ۱۹۸۹) در خصوص واداشت مکانیکی و ایجاد یک موج راسبی غرب سو در دوره گرم سال ناشی از رشته‌کوه‌های زاگرس، به علت انتزاع و عدم هماهنگی با شرایط اقلیمی فلات غربی کشور، با نتایج این مطالعه و سایر پژوهش‌های انجام‌یافته در این حوزه همخوانی ندارد. نتایج تحقیقات پیشین مبنی بر وابستگی الگوی همدید تراز میانی ارتفاعات غرب ایران به زبانه‌های پرفشار جنب‌حاره‌ای جنوب غرب آسیا و ایران فاقد دلایل محکم است.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان مواردی بدین شرح را در مورد موضوع مقاله مطرح کرد:

✓ شار محسوس، شناوری و صعود:

شار محسوس سطحی زمانی می‌تواند به افزایش شناوری و صعود منجر شود که انرژی شار از سطح به هوای مجاور منتقل شود. افزایش θ_v و کاهش چگالی، ساختار فشار و گردش محلی را تغییر می‌دهد و همرفت را تقویت می‌کند. شکل‌های مربوط به شار گرمای محسوس و امگا این هم‌زمانی را نشان می‌دهند، اما برای علیت قوی باید رابطه زمانی و آزمایش حساسیت بررسی شود. بر اساس نظر (Stull, 2000: 65)، شارهای سطحی اثر مستقیم خود را عمدتاً در لایه

زیرین نشان می‌دهند؛ بنابراین حلقه واسط بین شار سطحی و ۵۰۰ هکتوپاسکال، انتقال گرما در لایه مرزی، تغییر ضخامت ستون، فشار هیدروستاتیکی و حرکت قائم است.

✓ شناوری، همگرایی و تاوایی

گرم شدن هوای مجاور سطح، چگالی را کاهش می‌دهد و پاسخ فشار-چگالی می‌تواند شرایط مساعد برای همگرایی لایه زیرین ایجاد کند. در صورت وجود همگرایی، جمله کشیدگی ستون در معادله تاوایی می‌تواند تاوایی مطلق را افزایش دهد. چون f در عرض‌های زاگرس مثبت است، این سازوکار برای تقویت γ مثبت مناسب است. با این حال، نبود میدان واگرایی مستقل، سهم کمی این فرایند را نامشخص می‌گذارد.

✓ رابطه با واچرخند ۵۰۰ هکتوپاسکال

واچرخند میانی حاصل یک پاسخ سه‌بعدی است: افزایش ضخامت و ارتفاع ژئوپتانسیل ستون گرم، واگرایی بالایی، تغییر توزیع تاوایی و سازگاری عمودی PV و کاهش تاوایی. همان‌طور که زایچک و همکاران (۲۰۰۷، ۴۱۳۳) برای زاگرس نشان دادند که فشردگی عمودی و کاهش تاوایی مطلق در نزدیکی برآمدگی گرمایی می‌تواند به انحنای واچرخندی منجر شود. بنابراین، به ترتیب این رخدادهای فیزیکی وقوع پیدا می‌کنند: «شار محسوس، گرم شدن ستون، تغییر فشار/ضخامت، پاسخ حرکتی و تاوایی، واچرخش». لیو و همکاران (۲۰۰۴، ۶۸۵) نیز رابطه گرمایش دررو و واچرخندهای جنب‌حاره‌ای را بررسی کرده‌اند.

✓ نقش توپوگرافی مکانیکی و واداشت‌های بزرگ‌مقیاس

سیمپسون و همکاران (۱۹۸۹، ۲۰۱۵) نشان داده‌اند که زاگرس و توپوگرافی خاورمیانه از طریق واداشت مکانیکی نیز بر گردش تابستانه مدیترانه اثر دارند. بنابراین وجود شار محسوس زیاد، صعود و واچرخند به‌تنهایی اثبات نمی‌کند که گرمایش تنها عامل است. در مقابل، آزمایش‌های Zaitchik et al (2007) و Zarrin et al. (2011) سهم گرمایی زاگرس را با حذف یا خنثی کردن واداشت نشان داده‌اند. که می‌توانند جمع‌بندی، برهم‌کنش واداشت گرمایی و مکانیکی با سهم مهم گرمایش زاگرس مرتفع باشد.

شواهد این مطالعه نقش مهم و محلی گرمایش زاگرس را نشان می‌دهد، اما سهم نسبی واداشت‌های بزرگ‌مقیاس از باز تحلیل به‌تنهایی قابل‌تفکیک نیست.

این مقاله در ادعای کشف پدیده جدید نیست. زیرا که زاگرس به‌عنوان منبع گرمایی و عامل گردش منطقه‌ای پیش‌تر توسط محققین گزارش شده است. ارزش‌افزوده مقاله در کنار هم قرار دادن شار محسوس، دمای پتانسیل، امگا، تاوایی، ضخامت، ارتفاع ژئوپتانسیل و باد نصف‌النهاری در یک زنجیره فرایندی است؛ به‌ویژه توضیح اینکه چرا تاوایی مثبت لایه زیرین و تاوایی منفی واچرخند تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌توانند دو بخش از یک پاسخ سه‌بعدی باشند.

نتیجه‌گیری

شار انباشتی گرمای محسوس سطحی تابستانه، نقش اساسی در ایجاد گردش منطقه‌ای بر روی ارتفاعات غرب ایران دارد. این ارتفاعات از ویژگی راستای استقرار، جنس سنگ‌ها، دریافت بیشینه تابش خورشید، مجاورت عرض ۳۰ درجه شمالی و ضعیف بودن جریان باد غربی از سطح تا تراز میانی برخوردار است. تولید و انباشت مداوم شار گرمای محسوس و توزیع متوازن آن توسط این توده سنگی عظیم و مرتفع در ماه‌های تابستان در ستون هوای بالای ارتفاعات مزبور به‌ویژه در محدوده عرض ۳۰ تا ۳۴ شمالی و طول ۴۸ تا ۵۴ شرقی (ناحیه مرتفع متراکم)، صورت می‌پذیرد. فرآیند فوق موجب ایجاد و تشدید پدیده شناوری، همرفت قائم و همگرایی قوی خصوصاً پیرامون مرکز ناحیه ارتفاعات متراکم

می‌گردد. این امر باعث ایجاد تاوایی (مثبت)، از تراز ۸۵۰ تا ۷۵۰ ه.پ می‌شود. درواقع این فرآیند ترمودینامیکی با توزیع متوازن انرژی انباشتی شار گرمای محسوس سطحی، موجب تسریع در شکل‌گیری و تداوم گردش چرخندی شدید از تراز ۸۵۰ ه.پ تا تراز ۷۰۰ ه.پ و حتی بالاتر (میانگین تا ۶۵۰ ه.پ) می‌شود. مقدمه ایجاد تاوایی منفی و شروع گردش واچرخندی تابستانه از تراز ۷۰۰ ه.پ و بالاتر، با چرخش متقارن در تراز ۵۰۰ ه.پ در طول سه دهه مورد مطالعه، به‌ویژه سال‌های خشک و تر (۱۹۹۹ و ۲۰۰۳) بر فراز محور ارتفاعات غرب ایران فراهم می‌گردد. این گردش جوی روی ارتفاعات فوق که با چرخش متقارن در تراز میانی همراه است، در طول نزدیک به هشت دهه، نشان‌دهنده خاصیت توده‌های سنگی مرتفع و متراکم کوه‌های مزبور در ذخیره انرژی تابشی تا حد اشباع و باز توزیع متعادل انرژی فوق می‌باشد. این تحقیق از زوایای متفاوت به تحلیل سازوکار و الگوی گردش جو تابستانه ارتفاعات غرب ایران پرداخته است و سعی در توسعه بیشتر این مبحث داشته است. در انتها می‌توان گفت، منشأ وجودی و تداوم گردش جو تابستانه بر روی ارتفاعات فوق‌الذکر در طول دهه‌ها تا حد زیادی مستقل از واداشت‌های بیرونی مانند گردش سلول هدلی، مونسون، اثرات گرمایشی فلات مرتفع تبت و امواج راسبی بوده است.

این پژوهش نشان داد که بر فراز بخش مرتفع و متراکم زاگرس، افزایش و سازمان‌یافتگی شار گرمای محسوس با ساختار منسجم حرکت قائم و بازآرایی تاوایی همراه است. شار محسوس ابتدا از طریق گرم کردن هوای مجاور سطح، شناوری و ساختار حرارتی لایه‌مرزی را تغییر می‌دهد؛ این تغییرات با همگرایی و صعود سازگار می‌شوند؛ همگرایی از طریق کشیدگی ستون می‌تواند تاوایی مثبت لایه زیرین را تقویت کند؛ و در بالای ستون گرم، افزایش ضخامت، واگرایی و بازآرایی PV و تاوایی به توسعه گردش واچرخندی میانی کمک می‌کند. وجود تاوایی مثبت در ۸۵۰-۷۵۰ هکتوپاسکال، امگای منفی تا حدود ۶۵۰ هکتوپاسکال، تغییر علامت تاوایی در ترازهای میانی و قرارگیری مرکز واچرخند در حوالی ۵۰۰ هکتوپاسکال، درمجموع ساختار عمودی سازگار با منبع حرارتی مرتفع را نشان می‌دهد. این ساختار با مطالعات مدل‌سازی زاگرس هم‌راستاست.

برای ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌گردد آزمون کمی این سازوکار، با سه آزمایش حساسیت «توپوگرافی واقعی/حذف‌شده»، «گرمایش واقعی/خنثی‌شده» و «گرمایش تعدیل‌شده» اجرا و بودجه PV، واگرایی و تاوایی را محاسبه گردد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- امیری، آریتا؛ علیجانی، بهلول؛ حجازی‌زاده، زهرا؛ فتاحی، ابراهیم و آزادی، مجید. (۱۳۹۷). بررسی رابطه مراکز فعالیت تلاوایی نسبی در خاورمیانه با دمای هوای ایران. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۹(۳۶)، ۱-۱۲.
- حاجی‌محمدی، حسن. (۱۴۰۱). بررسی نقش گردش و ردسپهر فوقانی موسمی شرق آسیا و واداشتهای فلات تبت در شکل‌گیری و اچرخند تابستانه و ردسپهر میانی ایران. *نشریه هواشناسی و علوم جو*، ۵(۲)، ۸۱-۹۷.
- <https://doi.org/10.22034/jmas.2023.366974.1189>
- ذوالفقاری، حسن؛ صحرایی، جلیل؛ معصوم‌پور سماکوش، جعفر و برزو، فرزانه. (۱۳۹۵). بررسی شار گرمای محسوس و ارتباط آن با تغییرات دما و باد طی دوره گرم سال در ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۸(۳)، ۴۳۱-۴۵۰.
- <https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.60100>
- زرین، آذر و مفیدی، عباس. (۱۳۹۰). آیا پرفشار جنب‌حاره‌ای تابستانه بر روی ایران زبانه‌ای از پرفشار جنب‌حاره آزور است؟ *یازدهمین کنگره انجمن جغرافیدانان ایران، دانشگاه شهید بهشتی*، ۱-۱۵.
- عزیزی، قاسم؛ خوش‌اخلاق، فرامرز؛ شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ نگاه، سمانه و فرید مجتهدی، نیما. (۱۳۹۹). کم‌فشارهای گرمایی فلات ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۱(۴۱)، ۹۳-۱۱۳.
- قائمی، هوشنگ؛ زرین، آذر؛ آزادی، مجید و فرج‌زاده اصل، منوچهر. (۱۳۸۶). تحلیل الگوی فضایی پرفشار جنب‌حاره روی آسیا و آفریقا. *فصلنامه مدرس علوم انسانی*، ۱۳(۱)، ۲۲۰-۲۴۵.
- قائمی، هوشنگ؛ زرین، آذر و خوش‌اخلاق، فرامرز. (۱۳۹۲). *اقلیم‌شناسی مناطق خشک* (چاپ دوم). سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاه‌ها (سمت) و مرکز تحقیق و توسعه علوم انسانی.
- گرمسیری مهوار، علی‌اکبر؛ عزیزی، قاسم؛ محمدی، حسین و کریمی احمدآباد، مصطفی. (۱۳۹۹). تحلیلی بر و اچرخندهای جنب‌حاره در ترازهای میانی از شمال آفریقا تا ایران. *نشریه هواشناسی و علوم جو*، ۳(۲)، ۱۲۹-۱۴۷.
- <https://doi.org/10.22034/jmas.2021.290981.1143>
- گرمسیری مهوار، علی‌اکبر؛ عزیزی، قاسم؛ محمدی، حسین و کریمی احمدآباد، مصطفی. (۱۴۰۰). گردش کلی جو در اطلس و آرام شمالی و ارتباط آن با توسعه و تقویت و اچرخندهای جنب‌حاره‌ای آزور و هاوایی. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۷(۳)، ۵۱۹-۵۳۶.
- <https://doi.org/10.22059/jesphys.2021.318963.1007291>
- مفیدی، عباس. (۱۳۸۶). *تحلیل گردش تابستانه بر روی ایران و ارتباط آن با بارش‌های تابستانه فلات ایران*. گروه جغرافیا، دانشگاه تربیت‌معلم، ۲۶-۶۶.
- مفیدی، عباس و زرین، آذر. (۱۳۹۱). بررسی ماهیت ساختار و وردایی زمانی گردش بزرگ‌مقیاس تابستانه بر روی جنوب غرب آسیا. *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۳(۱۱)، ۱۵-۴۰.
- مفیدی، عباس؛ زرین، آذر و قاسولو، جان. (۱۳۸۹). گردش تابستانه در و ردسپهر فوقانی روی جنوب غرب آسیا و وردایی زمانی آن در طی نیم‌قرن گذشته. *چهارمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم*، ۳-۷.
- یاراحمدی، داریوش؛ بساطی، سعید؛ نصیری، بهروز و رفعتی، سمیه. (۱۳۹۵). بررسی تأثیرات ارتفاعات زاگرس بر چرخه عمر سامانه‌های همرفتی میان‌مقیاس غرب ایران. *فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۵(۱۸)، ۸۷-۱۰۴.
- <https://doi.org/10.22067/geo.v5i2.53241>

References

- Amiri, A., Alijani, B., Hejazi-Zadeh, Z., Fattahi, E., & Azadi, M. (2018). Investigation of the relationship between relative vorticity activity centers in the Middle East and air temperature over Iran. *Journal of Climatological Research*, 9(36), 1-12. [In Persian]
- Azizi, G., Khosh Akhlagh, F., Shamsipour, A. A., Negah, S., & Farid Mojtahedi, N. (2020). Thermal low-pressure systems over the Iranian Plateau. *Geographical Studies of Arid Regions*, 11(41), 93-113. [In Persian]

- Bergeron, T. (1930). Richtlinien einer dynamischen Klimatologie. *Meteorologische Zeitschrift*, 47(7), 246–262.
- Garamsiri Mahvar, A. A., Azizi, G., Mohammadi, H., & Karimi Ahmadabad, M. (2020). An analysis of subtropical anticyclones at mid-tropospheric levels from North Africa to Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 3(2), 129–147. <https://doi.org/10.22067/geo.v5i2.53241> [In Persian]
- Garmsiri Mahvar, A. A., Azizi, G., Mohammadi, H., & Karimi Ahmadabad, M. (2021). The general circulation of the atmosphere in the North Atlantic and Pacific and its relationship with development and strengthening the Azores and Hawaiian subtropical anticyclones. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(3), 519–536. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2021.318963.1007291> [In Persian]
- Ghaemi, H., Zarrin, A., & Khosh Akhlagh, F. (2013). *Climatology of arid regions* (2nd ed.). SAMT & Center for Humanities Research and Development. [In Persian]
- Ghaemi, H., Zarrin, A., Azadi, M., & Farajzadeh Asl, M. (2007). Analysis of the spatial pattern of the subtropical high over Asia and Africa. *Modares Quarterly in Humanities*, 13(1), 220–245. [In Persian]
- Hajimohammadi, H. (2022). The role of upper-tropospheric circulation associated with the East Asian summer monsoon and Tibetan Plateau forcing in the formation of the mid-tropospheric summer anticyclone over Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 5(2), 81–97. <https://doi.org/10.22034/jmas.2023.366974.1189> [In Persian]
- Hoskins, B. J. (1987). Diagnosis of forced and free variability in the atmosphere. In H. Cattle (Ed.), *Atmospheric and oceanic variability* (pp. 57–73). James Glaisher House.
- Liu, Y., Wu, G., & Ren, R. (2004). Relationship between the subtropical anticyclone and diabatic heating. *Journal of Climate*, 17(4), 682–698. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)07<0682:RBTSAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)07<0682:RBTSAA>2.0.CO;2)
- Ma, D., Boos, W. R., & Kuang, Z. (2014). Effects of orography and surface heat fluxes on the South Asian summer monsoon. *Journal of Climate*, 27(17), 6647–6659. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00138.1>
- Mofidi, A. (2007). *Analysis of summer circulation over Iran and its relationship with summer precipitation over the Iranian Plateau* [Doctoral dissertation, Tarbiat Moallem University]. Department of Geography. [In Persian]
- Mofidi, A., & Zarrin, A. (2012). Investigation of the nature, structure, and temporal variability of large-scale summer circulation over Southwest Asia. *Journal of Climatological Research*, 3(11), 15–40. [In Persian]
- Mofidi, A., Zarrin, A., & Ghaslou, J. (2010). Upper-tropospheric summer circulation over Southwest Asia and its temporal variability during the past half century. In *Proceedings of the Fourth Regional Conference on Climate Change* (pp. 3–7). [In Persian]
- Rodwell, M. J., & Hoskins, B. J. (2001). Subtropical anticyclones and summer monsoons. *Journal of Climate*, 14(15), 3192–3211. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<3192:SAASM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<3192:SAASM>2.0.CO;2)
- Simpson, I. R., Seager, R., Shaw, T. A., & Ting, M. (2015). Mediterranean summer climate and the importance of Middle East topography. *Journal of Climate*, 28, 1977–1996. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00298.1>
- Stull, R. (2000). *Meteorology for scientists and engineers* (2nd ed.). Brooks/Cole.
- Yarahmadi, D., Basati, S., Nasiri, B., & Rafati, S. (2016). Investigation of the effects of the Zagros Mountains on the life cycle of mesoscale convective systems over western Iran. *Quarterly Journal of Geography and Environmental Hazards*, 5(18), 87–104. <https://doi.org/10.22067/geo.v5i2.53241> [In Persian]
- Zaitchik, B. F., Evans, J. P., & Smith, R. B. (2007). Regional impact of an elevated heat source: The Zagros Plateau of Iran. *Journal of Climate*, 20(16), 4133–4146. <https://doi.org/10.1175/JCLI4248.1>
- Zarrin, A., & Mofidi, A. (2011). Is the summer subtropical high over Iran an extension of the Azores subtropical high? In *Proceedings of the 11th Congress of the Iranian Geographers Association* (pp. 1–15). Shahid Beheshti University. [In Persian]

- Zarrin, A., Ghaemi, H., Azadi, M., Mofidi, A., & Mirzaei, E. (2011). The effect of the Zagros Mountains on the formation and maintenance of the Iran anticyclone using RegCM4. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 112, 91–100. <https://doi.org/10.1007/s00703-011-0134-z>
- Zhu, Z., Wang, J., Ma, X., Luo, G., & Yao, X. (2023). Diurnal variation characteristics of the surface sensible heat flux over the Tibetan Plateau. *Atmosphere*, 14(1), Article 128. <https://doi.org/10.3390/atmos14010128>
- Zolfaghari, H., Sahraei, J., Masoumpour Samakoush, J., & Barzoo, F. (2016). Investigation of sensible heat flux and its relationship with temperature and wind variations during the warm season in Iran. *Physical Geography Research*, 48(3), 431–450. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.60100> [In Persian]