




Spatial and temporal distribution of lightning occurrence and its trend

Somayeh Rafati¹  | Alireza Sadeghinia²

1. Corresponding Author, Department of Geography, Faculty of Humanities, Sayyed Jamaledin Asadabadi University, Asadabad, Iran. Rafati@sjau.ac.ir

2. Department of Humanities and Social Sciences, Farhangian University, Tehran, Iran. alirezasadeghinia@gmail.com

Article Information

Research Paper

Vol:	14
No:	53
P:	103-120
Received:	2023-03-18
Revised:	2023-05-13
Accepted:	2023-05-21
Published:	2023-10-15

Keywords:

- Climate Change
- Lightning
- Convective Systems
- LIS-OTD Sensors

Cite this Article:

Rafati, S., Sadeghinia, A. (2023). Spatial and temporal distribution of lightning occurrence and its trend. *Journal of Arid Regions Geographic Studies* 14(53): 103-120.
doi: 10.22034/JARGS.2023.390318.1017

Publisher: Hakim Sabzevari University

© The Author(s)



 [10.22034/JARGS.2023.390318.1017](https://doi.org/10.22034/JARGS.2023.390318.1017)

Abstract

Aim: Investigating the spatial and temporal distribution of lightning occurrence and the trend of lightning occurrence in Iran.

Material & Method: Monthly spatial and temporal distribution of lightning occurrence investigated based on HRMC data in the range of 25° E - 65° E and 15° N - 42° N. The trend of lightning occurrence was studied based on LRMTS data in about twenty years (1995-2014) using a standardized regression slope.

Finding: Iran is divided into eight regions based on the characteristics of lightning activity. The minimum of lightning and convective activities occur in the country's center and east. The maximum occurs in the northwest from June to August, in the west, southwest, and south from November to May, and in the south in September. The activity of the Red Sea convergence zone influences the maximum occurrence from December to May in the southwest and west of Iran. The most significant increase in the occurrence of lightning occurred in the southeast of Iran in the summer, the Caspian Sea in the winter, the area between the Black Sea and the Mediterranean in the fall, and finally, in the south of the Persian Gulf in the spring. The most significant decrease has been observed in the center of the Red Sea, the Black Sea, and the Mediterranean, respectively, in the summer season.

Conclusion: Considering the effect of convective activities on Iran's rainfall regime, we can expect an effective change in the characteristics of Iran's rainfall regime due to global warming.

Innovation: The climatology of lightning has been studied using satellite data for the first time. Clarifying the spatial and temporal distribution of the occurrence of this phenomenon in Iran and the region and its change has created a clearer perspective regarding the occurrence of convective systems.

Extended Abstract

1. Introduction

Lightning is a natural phenomenon that can lead to forest fires, anomalies or interruptions in the electricity distribution network, accidents related to transportation, such as airplanes and ships, damage to remote communication systems, and the death of humans and animals. On the other hand, it has been determined that lightning has a close relationship with thunderstorm activity, heavy rainfall, and precipitation patterns. Therefore, lightning activity, including its global to regional distribution and its daily to annual fluctuations, is of great interest to researchers so that the electrical properties of clouds and precipitation systems are increasingly used to understand global climate changes. It has been validated and added to the list of EOCs and the Global Climate Observing System (GCOS). The results of regional studies on the long-term trends of this phenomenon have shown that regional mechanisms can affect the trend of lightning frequency locally. However, due to the lack of ground networks for recording lightning events in the study area, the spatial and temporal distribution of lightning events and their changing trend has not been studied; because of the recording of lightning by space sensors and the possibility of research in recent decades, it is necessary to study the regional trends in lightning activity to understand the changes in precipitation systems under climate change. Thus, this research aims to reveal the spatial and temporal features of lightning occurrence and investigate its trend in the study area, which can be the beginning of research related to the investigation of the effect of global warming on the occurrence of convective systems.

2. Materials and Methods

First, this research investigates the spatial and temporal distribution of lightning (in the range of 25 to 65° E and 15 to 42° N) based on HRMC data on a monthly scale. Then, the lightning trend in 1995-2014 is shown based on LRMTS data and using regression slope and R software. Although the 20-year time series is not very long for determining climate trends, it is still valuable considering the lack of long-term data. The p-value of the linear trend is determined by the slope parameter's t-test statistic (one-sided). The p-value is the probability of being more significant than zero for a positive trend or less than zero for a negative trend. Also, the 95% confidence interval of the estimated trend is presented, which is the result of the two-sided t-test. In order to compare the intensity of change at different points and months, the regression slope values are standardized. The method recommended by Huth and Pokorna (2005) was used to standardize these values. Based on this method, trend values are standardized by dividing by half of the confidence interval. In this way, the significant trends are greater than the absolute value of one, and the values between +1 and -1 are not statistically different from zero. The higher the absolute value of the standardized trend, the more significant the change, and the standardized values of the regression slope show a direct and significant relationship with the intensity of the change.

3. Results and Discussion

The results showed that Iran can be divided into eight regions based on the characteristics of lightning activity and, hence, convective systems as northwest, west, southwest, northeast, north, southeast, south, and center-east. The minimum activity of this phenomenon occurs in the central-eastern region, but the northwest, west, southwest, and northeast regions are the most active areas of lightning and, therefore, convective systems. The maximum occurrence of lightning in Iran occurs in the northwest from June to August, in the west, southwest, and south from November to May, and in the southeast in September. Increasing or decreasing lightning trends in any point of the study area is not significant at the confidence level of 95% and above. The increasing trend is significant only in the Caspian Sea, and the decreasing trend is significant only in the northeast corner of the region (Turkmenistan) at a confidence level of 90%. The monthly trends study also showed that lightning occurrence in the south of the Caspian Sea has increased in all months at a confidence level of 90%. In southeast Iran, the increasing trend is significant at the confidence level of 90% from February to August. Also, a significant decrease in the mentioned confidence level has been observed in the northwest of Iran from May to August. In the Red Sea, the decreasing trend from July to November is significant at the confidence level above 90%, which is worthy of attention considering this region's effects on Iran's climate. While in the area between the Black Sea and the Mediterranean, there is an increasing trend from January and February, as well as September to

December, and a decreasing trend in July. A significant increasing trend has been observed in the south of the Persian Gulf from March to June.

4. Conclusions

The most intense increasing trend in the occurrence of lightning occurred respectively in the southeast of Iran in the summer, the Caspian Sea in the winter, the area between the Black Sea and the Mediterranean in the fall, and finally, in the south of the Persian Gulf in the spring. On the other hand, the most intense decreasing trend has been observed in the Red Sea, the Black Sea, and the Mediterranean, respectively, in the summer. According to the significant change in lightning, as a manifestation of the occurrence of convective systems, in some places and months, and considering the effect of convective systems on the precipitation, we can expect a change in the characteristics of the precipitation of Iran as a result of global warming. Therefore, further studies in this field in the future are necessary to provide a clearer perspective and adapt to climate change.

5. Acknowledgment & Funding

The authors acknowledge support from the Atmospheric Science and Meteorological Research Center (ASMERC) and the groups of Global Hydrology Resource Center (GHRC), which provided the data needed for this study. The manuscript did not receive a grant from any organization.

6. Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest





دانشگاه حکیم سبزواری

مطالعات خرفایی مناطق خشک



پراکنش فضایی و زمانی رخداد آذرخش و روند تغییر آن

سمیه رفعتی^۱ ✉، علیرضا صادقی نیا^۲

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه سید جمال‌الدین اسدآبادی، اسدآباد، ایران. Rafati@sjau.ac.ir
۲- گروه علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران. alirezasadeghinia@gmail.com

چکیده:

هدف: بررسی پراکنش مکانی و زمانی رخداد آذرخش و روند تغییر آن
روش و داده: پراکنش مکانی و زمانی رخداد آذرخش و روند تغییر آن با کاربرد محصولات شبکه‌های اقلیمی آذرخش LIS-OTD در گستره‌ی $25^{\circ}E-65^{\circ}E$ و $15^{\circ}N-42^{\circ}N$ مطالعه شد. پراکنش ماهانه مکانی و زمانی رخداد آذرخش بر اساس داده‌های HRMC و روند تغییر رخداد آذرخش در دوره‌ای حدود بیست‌ساله (۱۹۹۵-۲۰۱۴) بر اساس داده‌های LRMTS و با کاربرد شیب رگرسیون استاندارد شده و نرم‌افزار R بررسی شد.
یافته‌ها: بر اساس ویژگی‌های فعالیت آذرخش می‌توان ایران را به هشت ناحیه تقسیم کرد. کمینه‌ی رخداد آذرخش و بنابراین فعالیت همرفتی در مرکز و شرق کشور رخ می‌دهد. بیشینه‌ی آن در ماه‌های جون تا آگوست در شمال‌غرب، در ماه‌های نوامبر تا می در غرب، جنوب‌غرب و جنوب و در ماه سپتامبر در جنوب رخ می‌دهد. بیشینه‌ی رخداد در جنوب‌غرب و غرب ایران، تحت تأثیر فعالیت منطقه‌ی همگرایی دریای سرخ است. شدیدترین روند افزایشی رخداد آذرخش به ترتیب در جنوب‌شرق ایران در فصل تابستان، دریای مازندران در فصل زمستان، محدوده‌ی بین دریای سیاه و مدیترانه در فصل پاییز و بالاخره جنوب خلیج فارس در فصل بهار رخ داده است. از سوی دیگر شدیدترین روند کاهش‌ی نیز به ترتیب در مرکز دریای سرخ و محدوده‌ی دریای سیاه و مدیترانه در فصل تابستان مشاهده شده است.

نتیجه‌گیری: بنا به تغییر معنادار آذرخش، به عنوان تظاهراتی از فعالیت‌های همرفتی، در برخی نقاط و ماه‌ها در دو دهه‌ی مطالعه شده، و با توجه به تأثیر فعالیت‌های همرفتی بر رژیم بارشی ایران، می‌توان انتظار داشت تغییری مؤثر در ویژگی‌های رژیم بارشی ایران در نتیجه‌ی پدیده گرمایش زمین رخ دهد.

نوآوری، کاربرد نتایج: برای نخستین بار اقلیم‌شناسی آذرخش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مطالعه شده است. روشن شدن توزیع فضایی و زمانی رخداد این پدیده در سطح ایران و منطقه و همچنین روند تغییر آن چشم‌انداز روشن‌تری در رابطه با رخداد سامانه‌های همرفتی ایجاد کرده است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

شماره:	۱۴
دوره:	۵۳
صفحه:	۱۰۳-۱۲۰
تاریخ دریافت:	۱۴۰۱/۱۲/۲۷
تاریخ ویرایش:	۱۴۰۲/۰۲/۲۳
تاریخ پذیرش:	۱۴۰۲/۰۲/۳۱
تاریخ انتشار:	۱۴۰۲/۰۷/۲۳

کلیدواژه‌ها:

- تغییر اقلیم
- آذرخش
- سامانه‌های همرفتی
- سنجنده‌های LIS-OTD

نحوه ارجاع به این مقاله:

رفعتی، سمیه، صادقی‌نیا، علیرضا. (۱۴۰۲). پراکنش فضایی و زمانی رخداد آذرخش و روند تغییر آن. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۴(۵۳): ۱۰۳-۱۲۰.
doi: 10.22034/JARGS.2023.390318.1017

ناشر: دانشگاه حکیم سبزواری



© نویسنده(گان).

۱ - مقدمه

آذرخش پدیده‌ای طبیعی است که بر اثر تخلیه‌ی بارهای الکتریکی موجود در ابر رخ می‌دهد و می‌تواند منجر به آتش‌سوزی جنگل، ناهنجاری‌ها یا قطع شبکه توزیع برق، حوادث مربوط به حمل‌ونقل مانند هواپیما و کشتی، آسیب به سامانه‌های ارتباط از راه دور و مرگ‌ومیر انسان‌ها و حیوانات شود (Cardoso et al., 2014). از سوی دیگر مشخص شده است، آذرخش رابطه نزدیکی با فعالیت توفان تندری، بارندگی شدید و همچنین الگوهای بارش دارد (Peterson & Rutledge, 1998; Price, 2013). نوسانات فصلی آذرخش یکی از ویژگی‌هایی است که می‌توان از آن برای توصیف فعالیت‌های توفان‌های تندری بهره برد (Li et al., 2020). فعالیت توفان تندری می‌تواند چرخه هیدرولوژیکی در سراسر جهان را تحت تأثیر قرار دهد و منبع مهمی از بخار آب در نزدیکی وردایست است (Wu et al., 2020). بنابراین فعالیت آذرخش، از جمله توزیع جهانی تا منطقه‌ای آن و همچنین نوسانات روزانه تا سالانه آن بسیار مورد توجه محققان است، به گونه‌ای که ویژگی‌های الکتریکی ابرها و سامانه‌های بارشی به طور فزاینده‌ای برای درک تغییرات آب‌وهوای جهانی مفید واقع شده و به فهرست متغیرهای ضروری آب‌وهوا (EOCs) و سامانه‌ی مشاهده آب‌وهوای جهانی (GCOS) اضافه شده است (Qie et al., 2020).

در گذشته بررسی آذرخش در برخی نقاط به دلیل نبود روش‌های اندازه‌گیری مناسب ممکن نبوده است. پایش آذرخش تنها به صورت محلی انجام می‌شد و به دست آوردن یک تصویر جهانی دشوار بود. در واقع، تا همین اواخر، در دسترس‌ترین مجموعه داده آذرخش جهانی، داده‌های روزهای تندری بود. نبود شبکه‌های زمینی گسترده و متراکم سنجش آذرخش موجب شد سنجنده‌های ماهواره‌ای جایگزین خوبی برای پایش آذرخش شوند (Cecil et al., 2014; Taszarek et al., 2019)، به ویژه در جایی که پوشش شبکه‌های زمینی وجود ندارد یا پوشش وجود دارد، اما دقت تشخیص پایین است. امروزه، اندازه‌گیری‌های گوناگون آذرخش، شناسایی ویژگی‌های فعالیت آذرخش را تقریباً در هر نقطه از زمین امکان‌پذیر می‌سازد (Dayeh et al., 2021).

تأثیر شهرها بر فعالیت آذرخش نتیجه ترکیبی از اثر ترمودینامیکی ناشی از پدیده جزیره گرمایی شهری و افزایش غلظت آلاینده‌ها (هواویزهایی که به عنوان CCN عمل می‌کنند) در جو محلی است که عمدتاً توسط فعالیت‌های انسانی ایجاد می‌شود (Farias et al., 2014). نتایج پژوهش قرایلو و همکاران نیز نشان داد، بین میانگین روزانه غلظت PM10 و تعداد آذرخش در منطقه تهران به‌ویژه در دوره‌ی گرم همبستگی مثبتی وجود دارد (Gharaylou et al., 2021). هرچند، به دلیل پیچیدگی روابط بین متغیرهای درگیر، مکانیسم‌های فیزیکی مسئول این اثرات به طور کامل روشن نشده است (Abreu et al., 2020). عامل مهم دیگر در رخداد آذرخش ناهموازی‌ها است (Kastman et al., 2017; Albrecht et al., 2016). برای نمونه رسولی و همکاران در بررسی ارتباط رخداد آذرخش با ارتفاع در جنوب شرق ایران نشان دادند بیشینه‌ی فراوانی این پدیده در دامنه‌های جنوبی، قبل از رسیدن به قله اصلی و در ارتفاع ۷۰۰ تا ۱۲۰۰ متر رخ می‌دهد (Rasuli et al., 2018). جریان‌های جنوبی ایجاد شده توسط موسمی‌های جنوب شرق آسیا همراه با ناهموازی محلی عامل تشدید فعالیت آذرخش است. رفعتی و فتاحی پارامترهای منطقه‌ای مهم تأثیرگذار بر رخداد آذرخش در جنوب غرب ایران را برای دو فصل زمستان و بهار با یکدیگر مقایسه کردند (Rafati & Fattahi, 2022). نتایج این بررسی نشان داد شار گرمای محسوس (در سوریه و اردن)، CAPE در جنوب غرب ایران، دمای سطح دریای عرب و شار گرمای نهان در شمال شرق اروپا بهترین پارامترها برای پیش‌بینی آذرخش در زمستان هستند. در حالی که CAPE در جنوب غرب ایران، شار گرمای محسوس در شمال شرق ایران و دریای عرب و دمای سطحی در شبه‌جزیره عربستان مهم‌ترین پارامترها برای پیش‌بینی این پدیده در فصل بهار هستند. اثر محلی CAPE و چینش عمودی سطح پایین باد بر فعالیت آذرخش در بهار نسبت به زمستان بیش‌تر است که نشان می‌دهد سهم سامانه‌های همرفتی محلی در ایجاد آذرخش در بهار بیش‌تر از زمستان است. همچنین آشکار شد دریای مدیترانه در فصل زمستان و خلیج فارس، دریا‌های عمان، عرب و سرخ در فصل بهار بخار آب لازم برای شکل‌گیری سامانه‌های همرفتی و رخداد آذرخش را فراهم می‌آورند. بنابراین فعالیت آذرخش با بسیاری از عوامل آب‌وهوایی مرتبط است و به دلیل حساسیت محلی آذرخش به دمای سطحی می‌تواند به عنوان شاخصی حساس برای بررسی تغییرات میانگین دمای جهانی (Williams, 2019; Ma et al., 2005; Price & Asfur, 2006) و شاخص تغییرپذیری بخار آب در وردسپهر بالایی (Price, 2000; Price & Asfur, 2006) به کار رود. در نتیجه‌ی گرمایش کره زمین، انتظار می‌رود فعالیت آذرخش تغییر کند. گزارش شده است که وقوع رویداد آذرخش با افزایش دمای سطح جهانی به میزان ۱ درجه سانتی‌گراد، تقریباً ۵ تا ۶ درصد افزایش می‌یابد (Romps et al., 2014). از آن‌جا که علاقه زیادی به احتمال وقوع رویدادهای شدید بارندگی در سناریوهای گرمایش جهانی وجود دارد (IPCC, 1996)، آذرخش می‌تواند

شاخص کمکی مفیدی نیز در این زمینه باشد. کاستی عمده به کارگیری فعالیت‌های آذرخش برای پایش آب‌وهوا، بازه زمانی نسبتاً کوتاه اندازه‌گیری جهانی است. به این دلیل، در برخی پژوهش‌ها از داده‌هایی مانند فراوانی رخداد روزهای تندر به عنوان مجموعه‌ی داده‌ی نماینده آذرخش برای بررسی تغییر اقلیم، به دلیل سابقه نسبی طولانی مدت و همچنین پوشش تقریباً جهانی، بهره برده‌اند (Aich et al., 2018). نتایج بررسی ویلیامز و همکاران نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین تغییرات رخداد روزهای تندی و آذرخش در بیشتر مناطق حوزه‌ی TRMM، از جمله چین، جنوب‌شرق آسیا، آفریقای جنوبی و آرژانتین است (Williams et al., 2019). هرچند، در چندین منطقه مانند هند، آفریقای غربی بین میزان آذرخش و روندهای رخداد روزهای تندی اختلاف وجود دارد. اختلاف‌ها مربوط به تغییرات تعداد آذرخش در هر توفان تندی است که دلایل دیگری را برای تفسیر روند بلندمدت رخداد روزهای تندی در مناطق مختلف پیشنهاد می‌کند. با این حال، چگونگی تغییر فعالیت آذرخش در دهه‌های گذشته به طور کامل مشخص نیست، و این‌که آیا فعالیت‌های آذرخش در آینده افزایش یا کاهش می‌یابد، هنوز مورد بحث است (Romps et al., 2014; Finney et al., 2018). به عنوان نمونه فینی و همکاران نشان دادند که به دلیل افزایش میانگین دمای جهانی، رخداد آذرخش در حال کاهش است (Finney et al., 2018). نویسندگان این روند را بر اساس رویکردهای ارتفاع سطح ابر و شار رو به بالای یخ ابر در مدل‌های آب و هوای جهانی شناسایی کردند. بر خلاف این بررسی، پیش‌بینی افزایش فعالیت آذرخش جهانی با تغییرات آب و هوا در قرن آینده نیز گزارش شده است (Krause et al., 2014). همچنین داده‌های روز تندی و داده‌های OTD^۱ و LIS^۲ آوندهای متفاوتی از رخداد آذرخش را در نقاط مختلف جهان نشان داده‌اند، به این معنی که رخداد آذرخش در برخی مناطق افزایش و در برخی دیگر کاهش یافته است (Lavigne et al., 2019; Qie et al., 2020). این مطالعات منطقه‌ای نشان داده است که روند روزهای تندی در قرن گذشته در مناطق مختلف بسیار متغیر و متفاوت بوده است. در آسیا، لین و همکاران و ژانگ و همکاران نشان دادند که وقوع رویدادهای آب و هوایی مانند توفان‌های تندی و تگرگ در ۵۰ سال گذشته در چین در حال کاهش بوده است (Lin et al., 2010; Zhang et al., 2017). ژانگ و همکاران نشان دادند که بر اساس بیش از ۵۰۰ ایستگاه زمینی که چین را پوشش می‌دهند، روزهای تندر و تگرگ از سال ۱۹۶۰ تقریباً ۵۰ درصد کاهش یافته است (Zhang et al., 2017). این کاهش در وقوع روز تندی با کاهش هم‌زمان شدت موسمی تابستانی آسیا مرتبط بود و با کوچک‌تر شدن اندازه تگرگ همراه بود که نشان‌دهنده تضعیف همرفت در منطقه است (Ni et al., 2017). در جنوب آسیا، جزیره سریلانکا، روند طولانی‌مدت در فراوانی سالانه‌ی روزهای تندی عمدتاً افزایشی بوده است (Sonnadara, 2016). در این پژوهش با کاربرد ۹ ایستگاه خشکی در سراسر کشور طی سال‌های ۱۳۴۰ تا ۱۳۸۹، نشان دادند که فراوانی سالانه روزهای تندی در پنج ایستگاه افزایش معنی‌داری داشته‌اند، در حالی که در چهار ایستگاه روند قابل‌توجهی مشاهده نشد. نتایج پژوهش ویلیامز و همکاران نشان داد که در بسیاری از مناطق جهان افزایش یا کاهش قابل توجهی در رخداد روزهای تندی رخ داده است. از دهه ۱۹۷۰ فراوانی آن به عنوان نمونه در آمازون، جنوب‌شرق آسیا، هند، کنگو، آمریکای مرکزی و آرژانتین افزایش، در حالی که در چین، استرالیا و ساحل کاهش یافته است (Williams et al., 2019). کای و همکاران نیز بر اساس داده‌های OTD/LIS در دو دهه اخیر روند افزایشی روشنی در آذرخش در جنوب آسیا مشاهده کردند (Qie et al., 2021). در این بررسی شار گرمای محسوس در امتداد ساحل غربی شبه قاره هند، دمای سطح دریا در دریای عرب، انرژی پتانسیل همرفتی در شمال غربی شبه قاره هند و چینش عمودی باد در ساحل شمال غربی مهم‌ترین عوامل مؤثر بر این روند افزایشی شناخته شده‌اند.

افزایش یا کاهش فعالیت آذرخش و سامانه‌های همرفتی به دلیل تغییرات متفاوت در نقاط مختلف به موضوعی مهم تبدیل شده است. نتایج حاصل از مطالعات منطقه‌ای در مورد روندهای بلندمدت این پدیده نشان داده است مکانیسم‌های منطقه‌ای ویژه می‌توانند بر روند فراوانی آذرخش به‌صورت محلی تأثیر بگذارند و هر منطقه‌ای دارای دوره زمانی فعال همرفتی ویژه خود است (Williams, 2009). هرچند به دلیل نبود شبکه‌های زمینی متراکم و گسترده ثبت رخداد آذرخش در منطقه‌ی مطالعه، ویژگی‌های پراکنش فضایی و زمانی رخداد آذرخش و روند تغییر آن در ادبیات پیشین وجود ندارد. با گذشت بیش از دو دهه از ثبت آذرخش با سنجنده‌های فضایی و فراهم شدن امکان پژوهش در این زمینه، ضرورت انجام آن برای درک روندهای منطقه‌ای در فعالیت آذرخش و علل آن برای درک تغییرات سامانه‌های بارش تحت تأثیر تغییر آب و هوا مهم است. بنابراین هدف این پژوهش آشکارسازی ویژگی‌های فضایی و

1. Optical Transient Detector

2. Lightning Imaging Sensor

زمانی رخداد آذرخش و بررسی روند تغییر آن در منطقه‌ی مطالعه است که می‌تواند آغازگر پژوهش‌هایی در ارتباط با بررسی تأثیر گرمایش جهانی بر رخداد سامانه‌ها و بارش‌های همرفتی باشد.

۲- مواد و روش

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

با توجه به این که یکی از اهداف این مطالعه روشن نمودن روند تغییر فعالیت‌های همرفتی از طریق فعالیت آذرخش به عنوان نمودی مهم از رخداد فعالیت‌های سامانه‌های همرفتی در سطح کشور ایران است و از سوی دیگر چون ویژگی‌های مناطق غربی و جنوب‌غربی کشور ایران، در فعالیت‌های همرفتی آن بسیار تأثیر گذارند و منشأ بسیاری از سامانه‌های همرفتی در سطح کشور به ویژه نیمه‌ی جنوب‌غربی آن هستند، منطقه‌ی مطالعه در این پژوهش گستره‌ای فراتر از کشور ایران از $15^{\circ}N - 32^{\circ}N$ و $65^{\circ}E - 25^{\circ}E$ انتخاب شد. این گستره در امتداد شرقی - غربی از شرق دریای مدیترانه و شمال شرق آفریقا تا شرق کشور ایران و در امتداد شمالی - جنوبی از جنوب دریای سرخ و دریای عرب تا نیمه‌ی جنوبی دریای مازندران را در بر می‌گیرد. پر واضح است که ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی این محدوده گذار از مناطق حاره به معتدله (از نواحی شمالی مناطق حاره‌ای تا نواحی جنوبی معتدله)، بسیار متنوع است. اقلیم عمده این مناطق بیابانی، نیمه‌بیابانی و مدیترانه‌ای است. میانگین دما در دی ماه عمدتاً از $3 - 25$ درجه سلسیوس و در تیرماه از 18 تا 32 درجه سلسیوس متغیر است. تغییر میانگین مجموع بارش سالانه نیز در این محدوده بسیار زیاد است؛ ولی عمدتاً از کم‌تر از 25 تا حدود 100 سانتی‌متر متغیر است (کاویانی و علیجانی، ۱۳۹۲).

۲-۲- روش پژوهش

سنجنده OTD روی ماهواره MicroLab-1 (که سپس به OV-1 تغییر نام یافت) و سنجنده LIS روی ماهواره TRMM^۱ برای پایش آذرخش به کار می‌روند. ماهواره Microlab-1 در آوریل ۱۹۹۵ به فضا پرتاب شد و مأموریت خود را در مارس ۲۰۰۰ با ارتفاع مداری 740 کیلومتر و شیب مداری 70 درجه به پایان رساند (Christian et al., 2003). ماهواره TRMM در نوامبر ۱۹۹۷ با ارتفاع مداری 350 کیلومتر و شیب مداری 35 درجه به فضا پرتاب شد. رخداد آذرخش را بر اساس داده‌های این سنجنده می‌توان در منطقه‌ای با وسعت 600×600 کیلومتری با تفکیک فضایی $4 - 7$ کیلومتر بین 36 درجه جنوبی و 36 درجه شمالی مشاهده کرد. با راه‌اندازی این سنجنده بررسی‌های بیش‌تری در مورد ساختار توفان‌ها انجام شده است (Zipser et al., 2006). LIS سنجنده‌ای است که آذرخش کامل (ابر به زمین و درون ابر) را با اندازه‌گیری انرژی تابش شده از آذرخش شبانه‌روز ثبت می‌کند (Abreu et al., 2020). گروه علمی OTD/LIS اداره ملی هوانوردی و فضا^۲ داده‌های شبکه‌ای آذرخش مبتنی بر داده‌های LIS و OTD را ادغام کرد تا شبکه‌ای گسترده‌تر در دسترس^۳ باشد (Cecil et al., 2014). محصولات شبکه‌ای اقلیم‌شناسی آذرخش LIS-OTD از مرکز منابع هیدرولوژی جهانی (GHRC) در دسترس‌اند.

در این پژوهش سری زمانی ماهانه حدود بیست‌ساله (۱۹۹۵-۲۰۱۴) با تفکیک پایین (LRMTS) و داده‌های اقلیمی ماهانه با تفکیک بالا (HRMC) به کار گرفته شد. در گام نخست پراکنندگی فضایی - زمانی رخداد آذرخش (در گستره‌ی 25 تا 65 درجه شرقی و 15 تا 42 درجه شمالی) بر اساس داده‌های HRMC در مقیاس ماهانه بررسی می‌شود. داده‌های HRMC نخست به صورت یک روز 0.5×0.5 درجه ذخیره می‌شوند. سپس به ترتیب میانگین متحرک جعبه‌ای 31 روزه و فیلتر پایین‌گذر اعمال می‌شود. پس از هموارسازی^۴، میانگین نرخ آذرخش روزانه^۵ با واحد تعداد آذرخش در روز در هر کیلومترمربع، از اواسط هر ماه استخراج می‌شود (Cecil et al., 2014).

1. Tropical Rainfall Measuring Mission
2. OTD/LIS scientific group of National Aeronautics and Space Administration
3. <http://thunder.nsstc.nasa.gov>
4. Smoothing
5. Daily average flash rate

در گام دوم روند تغییر رخداد آذرخش در دوره‌ای حدود بیست‌ساله (۱۹۹۵-۲۰۱۴) بر اساس داده‌های LRMTS و با کاربرد شیب رگرسیون و نرم‌افزار R نمایان می‌شود. LRMTS نرخ ماهانه آذرخش را با وضوح شبکه $2/5 \times 2/5$ درجه ارائه می‌کند. در LRMTS داده‌های ترکیبی نسبت به LIS که کارایی تشخیص بهتری دارد، وزن بیش‌تری دارند. این محصول به طور قابل‌توجهی برای تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی پیشنهاد می‌شود (Cecil et al., 2014). اگرچه سری زمانی ۲۰ساله برای تعیین روندهای اقلیمی چندان طولانی نیست، اما با توجه به نبود داده‌های طولانی‌مدت همچنان ارزشمند است. مقدار p روند خطی به‌وسیله آماره‌ی آزمون t (یک‌طرفه) از پارامتر شیب تعیین می‌شود. مقدار p احتمال بزرگ‌تر از صفر بودن برای روند برآورد شده مثبت یا کوچک‌تر از صفر بودن برای روند برآورد شده منفی است. همچنین فاصله اطمینان ۹۵ درصد از روند برآورد شده ارائه می‌شود که حاصل آزمون دوطرفه t است. به منظور مقایسه شدت تغییر در نقاط و ماه‌های مختلف مقادیر شیب رگرسیون استاندارد می‌شوند. برای استاندارد کردن این مقادیر روش توصیه شده توسط هات و پاکرنا به کار گرفته شد (Huth & Pokorna, 2005). بر اساس این روش مقادیر روند با تقسیم شدن بر نصف فاصله اطمینان، استاندارد می‌شوند. به این ترتیب روندهای معنی‌دار در سطح اطمینان موردنظر بزرگ‌تر از قدرمطلق یک هستند و مقادیر بین $+1$ و -1 از نظر آماری با صفر تفاوتی ندارند. هرچه مقدار قدرمطلق روند استاندارد شده بیش‌تر باشد، تغییر معنی‌دارتر است و مقادیر استاندارد شده شیب رگرسیون با شدت تغییر نیز رابطه مستقیم و معنی‌دار نشان می‌دهند.

۳- یافته‌ها

نقشه‌های پراکندگی ماهانه آذرخش در منطقه‌ی مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. واحد تمامی اعداد درج شده در این بخش، میانگین تعداد آذرخش روزانه در هر کیلومتر مربع ($\text{Flash}/\text{km}^2.\text{day}$) است، که به جهت خلاصه‌سازی از متن حذف شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در ماه ژانویه بیشینه‌های رخداد در شمال‌شرق دریای مدیترانه ($0/034$)، مرکز دریای سرخ ($0/036$)، جنوب‌غرب ایران و شمال خلیج فارس ($0/029$) قرار گرفته است. در سطح ایران بیشینه‌ی فعالیت آذرخش در حاشیه غربی، جنوب‌غرب، دریاها و سواحل جنوبی مشاهده می‌شود و در دیگر نقاط رخداد آن ناچیز است (در حدود $0/0001$). در ماه فوریه سطح فعالیت سامانه‌های همرفتی و بنابراین رخداد آذرخش به میزان قابل‌توجهی در منطقه کاهش می‌یابد. بیشینه‌ی فعالیت در شمال دریای مدیترانه ($0/029$)، شمال دریای سرخ ($0/021$) و جنوب‌غرب ایران ($0/017$) است. در ماه مارس نیز همانند ماه فوریه بیشینه‌ی رخداد آذرخش در جنوب‌غرب ایران ($0/017$) رخ داده است، اما بیشینه‌ی دیگری در جنوب ایران، حوالی تنگه هرمز ($0/017$) مشاهده می‌شود. در سطح منطقه مرکز بیشینه‌ی رخداد در دریای سرخ از بین می‌رود و بیشینه‌ی شمال‌شرق دریای مدیترانه نیز تضعیف می‌شود ($0/023$)، در حالی که بیشینه‌ی دیگری در نزدیکی مرز جنوب‌شرقی ایران در کشور پاکستان ($0/023$) مشاهده می‌شود. در ماه آوریل رخداد آذرخش در سطح ایران به میزان قابل‌توجهی تقویت می‌شود، به طوری که بیشینه‌ی برابر $0/026$ در جنوب‌غرب ایران و $0/021$ در جنوب ایران و $0/017$ در مرز شمال‌شرقی ایران مشاهده می‌شود. در خارج از مرز ایران بیشینه‌ی شمال‌شرق مدیترانه بسیار ضعیف‌تر ($0/016$) اما بیشینه‌ی قوی در جنوب‌غرب شبه‌جزیره عربستان (جنوب‌شرق دریای سرخ) با مقداری در حدود $0/057$ مشاهده می‌شود.

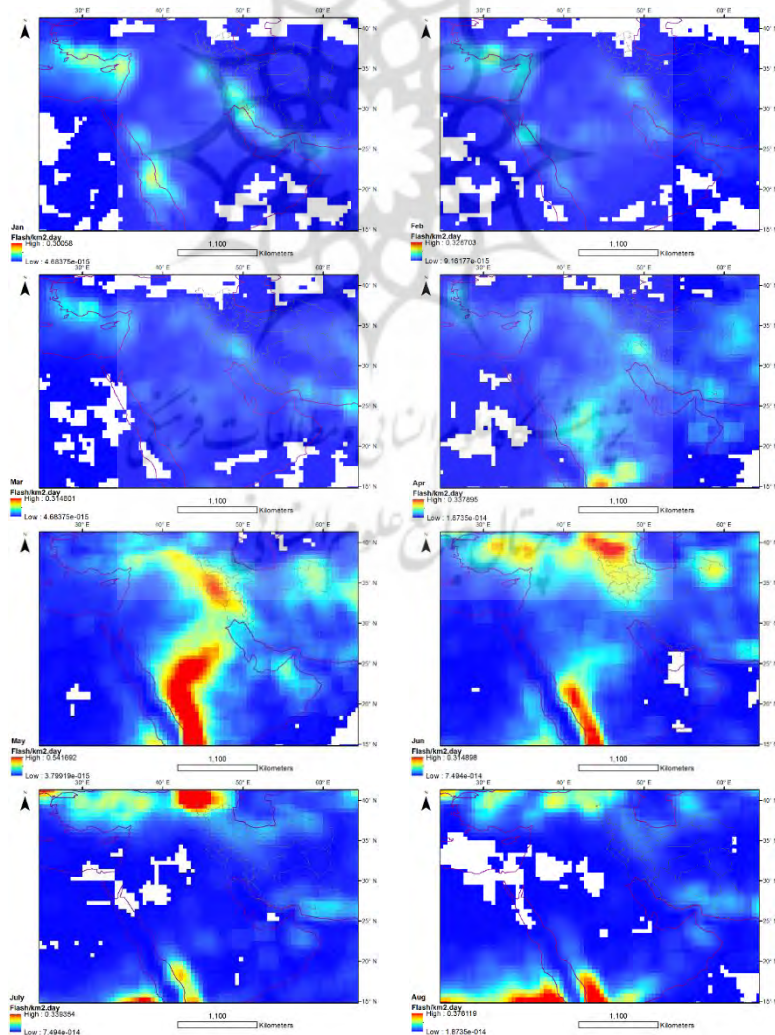
بیشینه‌ی رخداد آذرخش در ماه می در سواحل شرقی دریای سرخ از جنوب تا مرکز آن و سپس در راستای منطقه‌ی همگرایی دریای سرخ امتداد یافته است ($0/123$). در سطح ایران بیشینه رخداد آذرخش در غرب ایران در استان کرمانشاه ($0/067$) مشاهده می‌شود. بیشینه‌ی دومی نیز در شمال‌شرق کشور ($0/034$) وجود دارد. در ماه جون بیشینه‌ی سواحل شرقی دریای سرخ از جنوب تا مرکز آن با شدتی کم‌تر همچنان برقرار است ($0/084$)، در حالی که در امتداد منطقه همگرایی دریای سرخ از رخداد آذرخش به میزان قابل‌توجهی کاسته می‌شود. بیشینه‌ی رخداد این پدیده در سطح ایران در شمال‌غرب ($0/085$)، بیشینه‌ی دوم همچنان در شمال‌شرق ایران ($0/046$) و بیشینه‌ی سوم، که زبانه‌ای از بیشینه‌ی رخداد این پدیده در کشورهای پاکستان و افغانستان است، در جنوب‌شرق ایران ($0/023$) قرار گرفته است. بیشینه‌ی روی شمال‌شرق دریای مدیترانه در ماه‌های می و جون به تدریج به عرض‌های بالاتر (منطقه‌ی بین دریای مدیترانه و دریای سیاه) منتقل می‌شود که البته رخداد آذرخش در آن نسبت به بیشینه‌ی منطقه مقدار کمتری دارد ($0/058$).

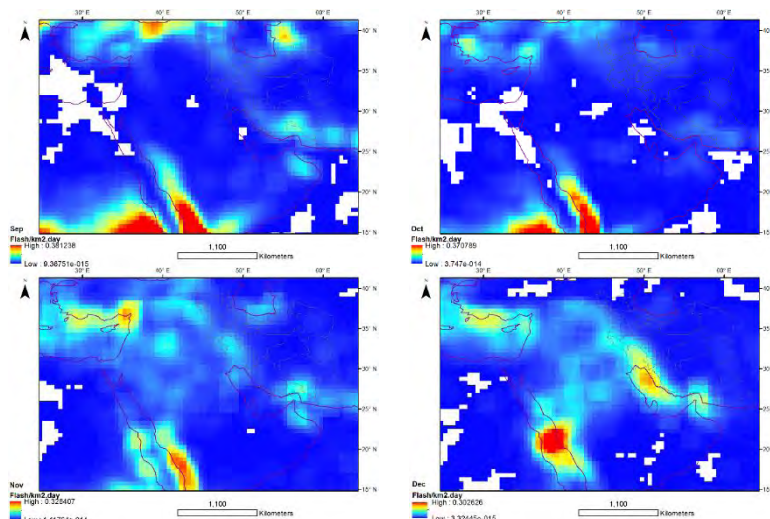
در ماه جولای بیشینه‌ی رخداد آذرخش در بخش مرزی شمال‌غرب ایران ($0/124$) مشاهده می‌شود. بیشینه‌ی دوم نیز در جنوب‌شرق ($0/023$) وجود دارد. در سطح منطقه نیز در سواحل غربی و شرقی بخش جنوبی دریای سرخ در عرض کمتر از 20 درجه رخداد آذرخش قابل‌توجه است ($0/236$). پراکنش رخداد آذرخش در ماه آگوست در سطح ایران مشابه ماه جولای است با این تفاوت

که میزان رخداد در بخش مرزی شمال غرب ایران به میزان چشم‌گیری کاهش می‌یابد (۰/۰۳۹). همچنین در ماه‌های آگوست و سپتامبر بیشینه‌ی جنوب شرقی ایران به تدریج به سمت جنوب حرکت می‌کند (در ماه سپتامبر ۰/۰۳۴) و بیشینه‌ای در سواحل شرقی دریای مازندران پدیدار می‌شود (۰/۰۶۱).

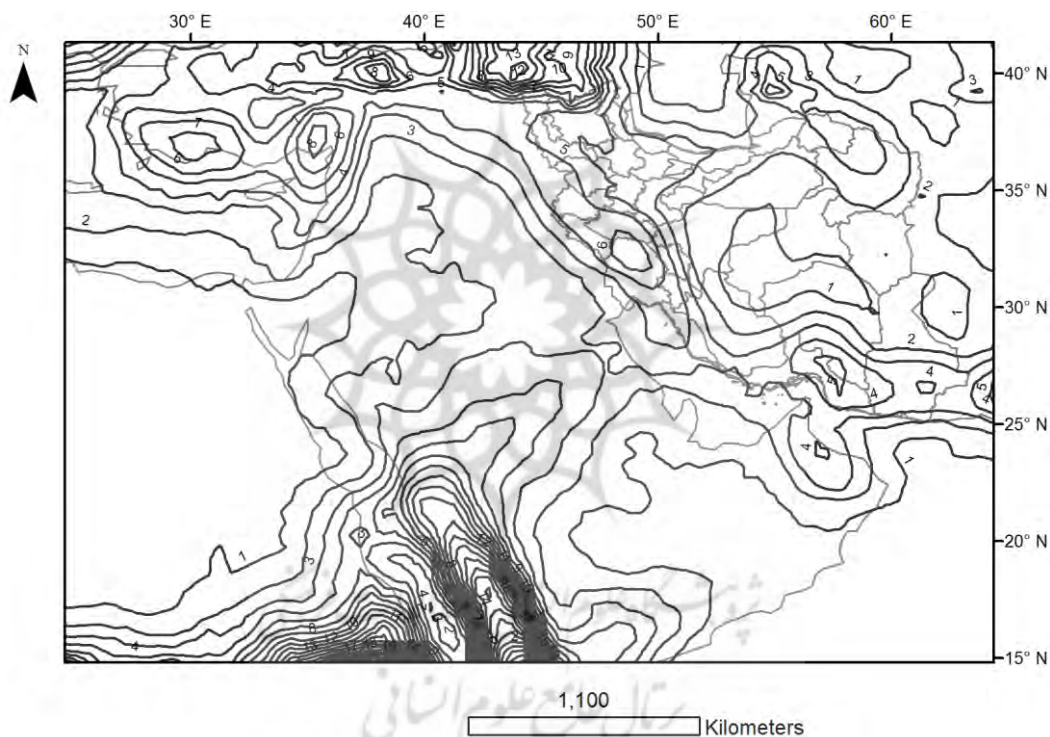
در ماه اکتبر بیشینه‌ی اول در مرز شمال غرب ایران (۰/۰۱۶)، بیشینه‌ی دوم در بخش‌های جنوبی دریای مازندران (۰/۰۱۴) و بیشینه‌ی سوم در جنوب شرقی ایران (۰/۰۱۲) هر سه مقادیر کم‌تری را نسبت به ماه‌های دیگر نشان می‌دهند. در ماه‌های سپتامبر و اکتبر به تدریج بیشینه‌ی مقدار آذرخش در شمال شرق دریای مدیترانه پدیدار می‌شود (۰/۰۳۲). در این ماه نیز بیشینه‌ی سواحل شرقی و غربی در بخش جنوبی دریای سرخ همچنان به قوت خود باقی است (۰/۲۵۷). در ماه نوامبر رخداد آذرخش نسبت به ماه قبل در سطح ایران افزایش می‌یابد. بیشینه‌ی اول در جنوب ایران (۰/۰۲۹)، بیشینه‌ی دوم در جنوب غرب ایران (۰/۰۲۳)، بیشینه‌ی سوم در جنوب دریای مازندران (۰/۰۲۱) وجود دارد. در سطح منطقه بیشینه‌ای در شمال شرق دریای مدیترانه (۰/۰۶۰) و بیشینه‌ای در ساحل شرقی دریای سرخ (۰/۰۷۰) مشاهده می‌شود. همچنین بیشینه‌ی اطراف دریای سرخ به تدریج به عرض‌های بالاتر منتقل می‌شود. در ماه دسامبر پراکنش رخداد آذرخش شباهت زیادی به ماه ژانویه دارد. در سطح ایران بیشینه‌ی رخداد در خلیج فارس (۰/۰۵۵) مشاهده می‌شود. اما در سطح خشکی بیشینه‌ی نخست در جنوب غرب (۰/۰۴۲) و بیشینه‌ی دوم در جنوب ایران (۰/۰۳۵) قرار گرفته است. در سطح منطقه نیز بیشینه‌ای در مرکز دریای سرخ (۰/۱۰۲) و بیشینه‌ی دیگری در شمال شرق دریای مدیترانه (۰/۰۴۱) وجود دارد (شکل ۱).

نقشه‌ی میانگین سالانه رخداد آذرخش (شکل ۲) نیز نشان می‌دهد، بیشینه رخداد سالانه در سطح ایران به ترتیب در شمال غرب (۱۰ آذرخش)، جنوب غرب (بیش از ۶)، غرب و جنوب (بیش از ۵)، جنوب شرق و شمال شرق (بیش از ۴ آذرخش) رخ می‌دهد.





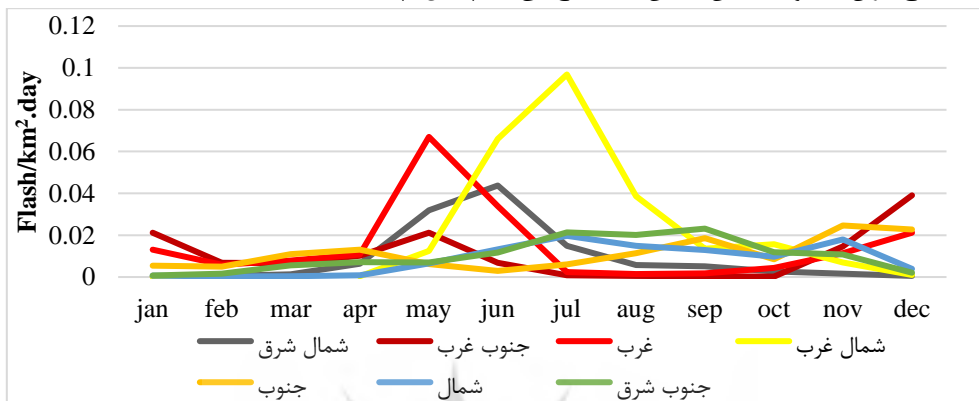
شکل ۱. پراکنش فضایی آذرخش در سطح منطقه‌ی مطالعه در ماه‌های مختلف



شکل ۲. میانگین فراوانی سالانه رخداد آذرخش در سطح منطقه‌ی مطالعه

جهت مقایسه توزیع زمانی رخداد آذرخش در مناطق مختلف در سطح ایران نمودارهای نوسان ماهانه رخداد آذرخش در یاخته‌هایی با بیشینه‌ی رخداد در هر بخش از کشور ایران ترسیم شده است (شکل ۳). نخستین منطقه‌ی بیشینه‌ی رخداد آذرخش در سطح ایران، منطقه‌ی شمال غرب است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی میانگین روزانه رخداد آذرخش در این منطقه در ماه جولای رخ می‌دهد. به طور کلی رخداد این پدیده در این منطقه در ماه‌های ژانویه تا آوریل ناچیز است، ولی از ماه می به تدریج افزایش یافته و در ماه جون و به‌ویژه جولای (میانه‌ی بهار تا اوایل تابستان) به اوج می‌رسد و سپس با شروع فصل پاییز به میزان زیادی از مقدار رخداد آن کاسته شده و در فصل زمستان به کمینه‌ی مقدار خود می‌رسد. دومین منطقه‌ی رخداد بالای آذرخش منطقه غرب ایران است که روند تغییر ماهانه‌ی آن تا اندازه‌ای مشابه منطقه‌ی جنوب غرب است. به این ترتیب که رخداد آذرخش در این مناطق دارای دو بیشینه در ماه‌های می و دسامبر است، هر چند در منطقه‌ی غرب بیشینه نخست مربوط به ماه می و در منطقه‌ی جنوب غرب بیشینه نخست مربوط به ماه دسامبر است. در هر دو منطقه در تابستان و اوایل پاییز میزان رخداد سامانه‌های همرفتی و آذرخش

ناچیز است. در جنوب ایران روند ماهانه رخداد آذرخش تا اندازه‌ای با منطقه‌ی غرب و جنوب‌غرب متفاوت است، به طوری که بیشینه‌ی رخداد به ترتیب در ماه‌های نوامبر، سپتامبر و آوریل رخ می‌دهد. میزان رخداد آذرخش در شمال‌شرق ایران از ماه آوریل افزایش می‌یابد و در ماه جون به بیشینه‌ی خود می‌رسد. به طور کلی در این منطقه مقدار رخداد از اواسط بهار تا اواسط تابستان نسبت به ماه‌های دیگر قابل توجه است. در شمال کشور اوج رخداد این پدیده با نوسان اندک از اواخر بهار تا اواخر پاییز مشاهده می‌شود و بیشینه‌ی آن در ماه‌های جولای و نوامبر رخ می‌دهد. در منطقه‌ی جنوب‌شرق ایران در فصل تابستان و اوایل فصل پاییز رخداد این پدیده به نسبت بالا است و بیشینه‌ی آن در ماه‌های جولای تا سپتامبر رخ می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این ماه بیشینه‌ی رخداد آذرخش در سطح ایران به طور میانگین در این منطقه رخ می‌دهد (شکل ۳).

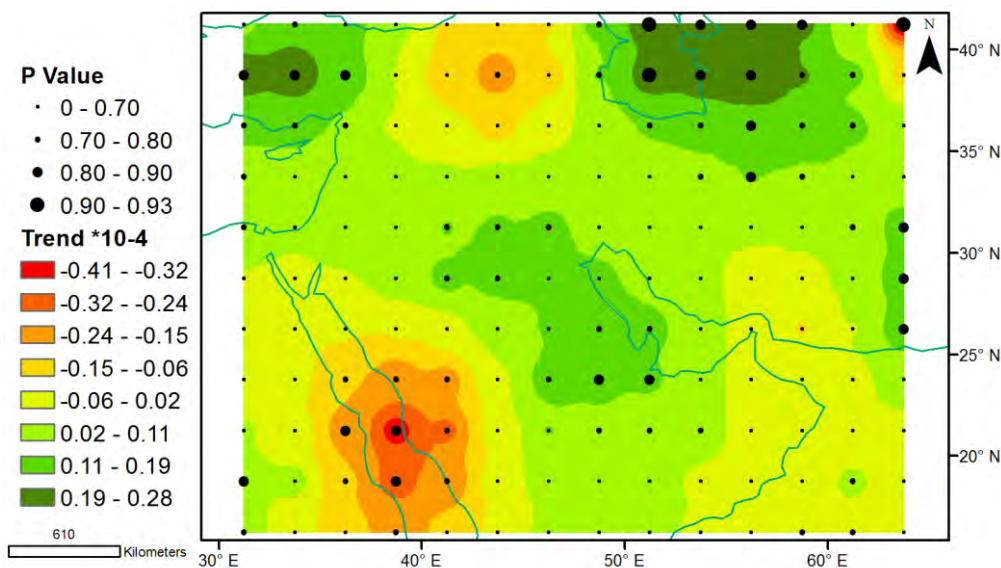


شکل ۳. پراکنش زمانی آذرخش در مناطق بیشینه رخداد آذرخش در سطح ایران

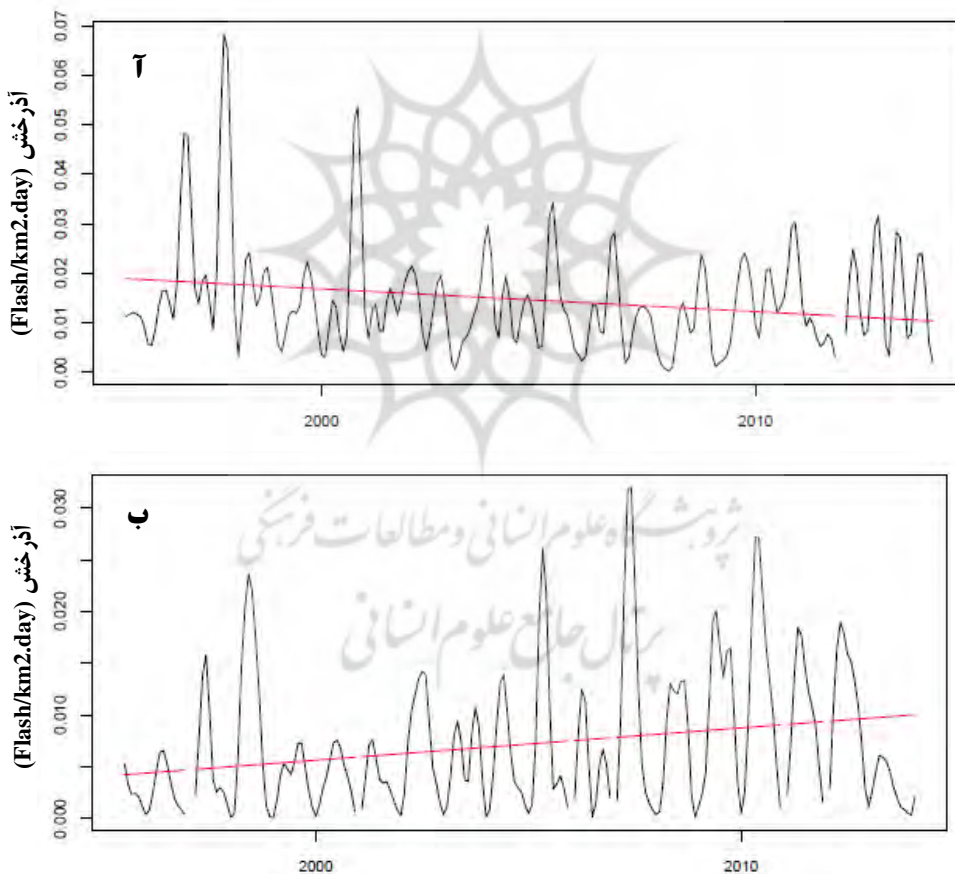
• روند تغییر رخداد آذرخش

بیشینه‌های روند کاهشی رخداد آذرخش در گوشه‌ی شمال شرق منطقه (ترکمنستان)، مرکز دریای سرخ (سطح اطمینان نزدیک به ۹۰٪) و شمال غرب ایران (سطح اطمینان بالای ۷۰٪) مشاهده می‌شود (شکل ۴). در حالی که در محدوده‌ی دریای مازندران و شرق آن، محدوده‌ی بین دریای سیاه و دریای مدیترانه، بخش مرکزی شبه‌جزیره عربستان و غرب پاکستان (سطح اطمینان بالای ۸۰٪) روند افزایشی مشاهده می‌شود. به طور کلی روند تغییر آذرخش در هیچ نقطه‌ای از منطقه‌ی مطالعه در سطح اطمینان ۹۵٪ و بالاتر معنی‌دار نیست. روند افزایشی تنها در دریای مازندران و روند کاهشی تنها در گوشه شمال شرق منطقه (ترکمنستان) در سطح اطمینان بالای ۹۰٪ معنی‌دار است (شکل ۴).

شیب تغییر برای دو پیکسل نمونه، یکی با روند کاهشی (مرکز دریای سرخ) و دیگری با روند افزایشی (جنوب دریای مازندران) در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در جنوب دریای مازندران میزان رخداد آذرخش در ماه‌های بیشینه رخداد به میزان قابل توجهی افزایش نشان می‌دهد. اما در ماه‌های کمینه رخداد تغییر چشم‌گیری مشاهده نمی‌شود. روند کاهشی در میزان رخداد آذرخش در مرکز دریای سرخ نیز مربوط به کاهش در ماه‌های بیشینه رخداد این پدیده است.



شکل ۴. پراکنش فضایی روند تغییر (شیب رگرسیون) آذرخش و سطح اطمینان آن در منطقه‌ی مطالعه



شکل ۵. روند تغییر آذرخش در دوره‌ی (۱۹۹۵-۲۰۱۴): آ: در مرکز دریای سرخ ب: جنوب دریای مازندران

جهت ارزیابی روند تغییر ماهانه در رخداد آذرخش نقاط دارای بیشینه روند کاهشی یا افزایش (شکل ۴) انتخاب و روند تغییر ماهانه به همراه سطح اطمینان آن‌ها محاسبه و نتایج در جدول (۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در سطح اطمینان بالای ۹۰٪، رخداد آذرخش در جنوب دریای مازندران افزایش معنی‌داری در تمامی ماه‌ها نشان می‌دهد. در جنوب شرق ایران نیز از

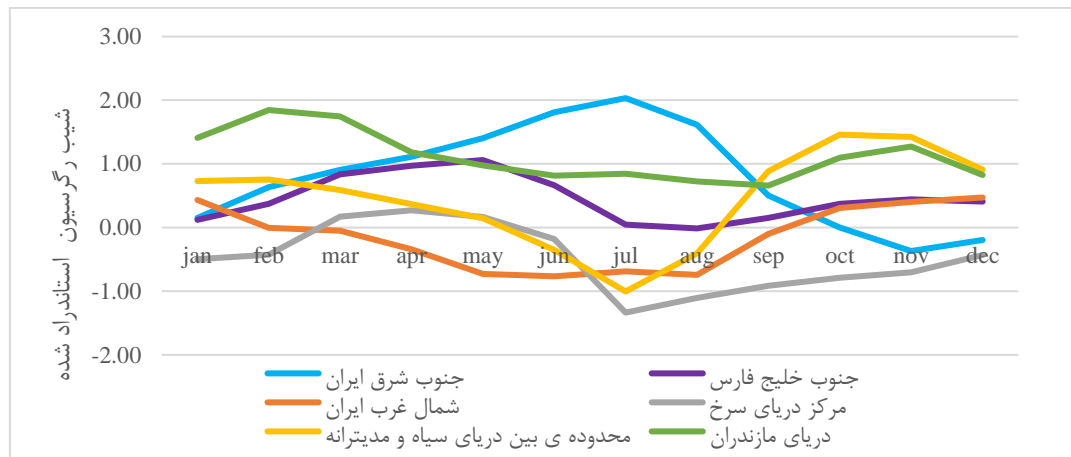
ماه فوریه تا آگوست این روند افزایشی با سطح اطمینان ۹۰٪ قابل قبول است. همچنین در شمال غرب ایران در ماه‌های می تا آگوست روند کاهشی معنی‌داری در سطح اطمینان اشاره شده مشاهده می‌شود.

روند تغییر ماهانه نقاط بیشینه‌ی تغییر در منطقه، شامل مرکز دریای سرخ و محدوده‌ی بین دریای مدیترانه و سیاه و جنوب خلیج فارس (در شبه‌جزیره عربستان) نیز به جهت تأثیری که بر اقلیم ایران دارند، محاسبه و نتایج آن در جدول ارائه شده است. در مرکز دریای سرخ روند کاهشی در ماه‌های جولای تا نوامبر در سطح اطمینان بالای ۹۰٪ معنی‌دار است. در حالی که در محدوده‌ی بین دریای سیاه و مدیترانه روند افزایشی در ماه‌های ژانویه و فوریه و همچنین ماه‌های سپتامبر تا دسامبر و روند کاهشی در ماه جولای معنی‌دار است. در جنوب خلیج فارس نیز در ماه‌های مارس تا جون روند افزایشی معناداری مشاهده شده است.

برای امکان مقایسه شدت روند تغییر در ماه‌ها و نقاط مختلف، شیب رگرسیون محاسبه شده بر اساس پیشنهاد هاث و پاکرنا با تقسیم بر نصف فاصله اطمینان استاندارد شده و نتایج در شکل (۶) نشان داده شده است (Huth & Pokorna, 2005). همان‌طور که مشاهده می‌شود، شدیدترین روند افزایشی رخداد آذرخش به ترتیب در جنوب شرق ایران در فصل تابستان، دریای مازندران در فصل زمستان، محدوده‌ی بین دریای سیاه و مدیترانه در فصل پاییز و بالاخره جنوب خلیج فارس در فصل بهار رخ داده است. از سوی دیگر شدیدترین روند کاهشی نیز به ترتیب در مرکز دریای سرخ و محدوده‌ی دریای سیاه و مدیترانه در فصل تابستان مشاهده می‌شود.

جدول ۱. شیب رگرسیون روند تغییر آذرخش ($\times 1000$) و سطح اطمینان آن در مناطق مختلف

جنوب شرق ایران	جنوب خلیج فارس	شمال غرب ایران	محدوده‌ی بین دریای مدیترانه و دریای سیاه	مرکز دریای سرخ	دریای مازندران	
۰/۰۲۹ ۰/۶۲	۰/۰۲۵ ۰/۶۰	۰/۰۶۷ ۰/۸۱	۰/۵۱۳ ۰/۹۳	-۰/۴۱۵ ۰/۸۵	۰/۰۳۱ ۰/۹۹	ژانویه
۰/۱۴۲ ۰/۹۰	۰/۱۲۶ ۰/۷۸	-۰/۰۰۱ ۰/۵۰	۰/۳۶۶ ۰/۹۴	-۰/۱۹۳ ۰/۸۱	۰/۰۹۶ ۱	فوریه
۰/۲۳۹ ۰/۹۶	۰/۴۵۵ ۰/۹۵	-۰/۰۲۹ ۰/۵۴	۰/۲۷۵ ۰/۸۹	۰/۰۹۲ ۰/۶۴	۰/۲۹۷ ۱	مارس
۰/۳۷۶ ۰/۹۸	۰/۵۵۲ ۰/۹۷	-۱/۰۶۳ ۰/۷۶	۰/۲۰۷ ۰/۷۸	۰/۲۱۸ ۰/۷۱	۰/۵۰۱ ۰/۹۹	آوریل
۰/۳۹۱ ۰/۹۹	۰/۳۸۵ ۰/۹۸	-۰/۷۶۸ ۰/۹۳	۰/۰۹۱ ۰/۶۲	۰/۱۴۷ ۰/۶۴	۰/۶۲۷ ۰/۹۷	می
۰/۳۸۸ ۱	۰/۱۲۳ ۰/۹۱	-۱/۲۳۷ ۰/۹۴	-۰/۲۲۷ ۰/۷۷	-۰/۰۸۹ ۰/۶۵	۰/۵۰۹ ۰/۹۵	جون
۰/۴۲۸ ۱	۰/۰۰۸ ۰/۵۴	-۱/۳۳۲ ۰/۹۲	-۰/۰۶ ۰/۹۷	-۰/۲۰۱ ۰/۹۹	۰/۴۰۹ ۰/۹۵	جولای
۰/۴۲۳ ۱	-۰/۰۰۲ ۰/۵۱	-۰/۷۴۲ ۰/۹۳	-۰/۲۴۱ ۰/۸۰	-۰/۳۰۳ ۰/۹۸	۰/۳۵۷ ۰/۹۳	آگوست
۰/۲۵۳ ۰/۸۵	۰/۰۲۷ ۰/۶۲	-۰/۰۷۳ ۰/۵۸	۰/۵۵ ۰/۹۶	-۰/۵۸۵ ۰/۹۶	۰/۳۳۶ ۰/۹۱	سپتامبر
۰ ۰/۵۰	۰/۱۰۹ ۰/۷۸	۰/۳۲ ۰/۷۴	۱/۱۱۵ ۱	-۰/۸۷۲ ۰/۹۴	۰/۳۶۹ ۰/۹۸	اکتبر
-۰/۱۴۳ ۰/۷۸	۰/۱۴۴ ۰/۸۲	۰/۳۹۸ ۰/۸۰	۱/۱۳ ۱	-۰/۹۳۹ ۰/۹۲	۰/۲۲ ۰/۹۹	نوامبر
-۰/۰۴۱ ۰/۶۶	۰/۱۰۴ ۰/۸۰	۰/۲۵۶ ۰/۸۳	۰/۷۲۲ ۰/۹۶	-۰/۵۹۵ ۰/۸۱	۰/۰۵۶ ۰/۹۵	دسامبر



شکل ۶. مقایسه شدت روند تغییر رخداد آذرخش در مناطق مختلف

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد بر اساس ویژگی‌های فعالیت آذرخش و از این رو سامانه‌های همرفتی می‌توان ایران را به هشت ناحیه شمال غرب، غرب، جنوب غرب، شمال شرق، شمال، جنوب شرق، جنوب و مرکز - شرق تقسیم کرد. کمینه‌ی فعالیت این پدیده در ناحیه مرکزی شرقی رخ می‌دهد، ولی مناطق شمال غرب، جنوب غرب، غرب، جنوب، جنوب شرق و شمال شرق مناطق بیشینه‌ی فعالیت رخداد آذرخش و بنابراین فعالیت همرفتی هستند. در بررسی سیف مناطق شمال غرب، غرب، شمال شرق بیشینه‌ی رخداد تگرگ که همانند آذرخش از فعالیت همرفتی ناشی می‌شود، معرفی شده‌اند (Saif, 1996). بیشینه‌ی رخداد آذرخش در سطح ایران در ماه‌های جون تا آگوست در شمال غرب، در ماه‌های نوامبر تا می در غرب، جنوب غرب و جنوب و در ماه سپتامبر هم در جنوب رخ می‌دهد.

نخستین منطقه‌ی بیشینه رخداد آذرخش در سطح ایران، منطقه‌ی شمال غرب است. به طور کلی رخداد این پدیده در این منطقه در ماه‌های ژانویه تا آوریل ناچیز است، ولی از ماه می به تدریج افزایش یافته و با افزایش چشم‌گیری در ماه جون و به‌ویژه جولای (میانه‌ی بهار تا اوایل تابستان) به اوج می‌رسد و سپس با شروع فصل پاییز به میزان زیادی از مقدار رخداد آن کاسته شده و در فصل زمستان به کمینه‌ی مقدار خود می‌رسد. به طور کلی بارش‌های سنگین بهار، که یکی از ویژگی‌های آن، رگباری و تندی بودن آنهاست، بارزترین مشخصه اقلیمی منطقه‌ی شمال غرب ایران به شمار می‌آیند، به طوری که در این منطقه این بارش‌ها سهم چشم‌گیری در بارش‌های فصلی و سالانه دارند (Khorshiddoust et al., 2016). علی‌جانی با بررسی اقلیم‌شناسی بارش‌های شمال غرب ایران وجود رطوبت مناسب در جو و حاکمیت ناپایداری‌های همرفتی بر اثر گرمایش سطح را علت وجودی بارش‌های سنگین و رگباری در این منطقه برشمرد. هرچند عامل گرمایش سطحی تنها عامل مؤثر در فعالیت‌های همرفتی فراوان منطقه نیست (Alijani, 2008). در فصل بهار بادهای غربی به طور کامل از شمال غرب خارج نشده‌اند. بنابراین سامانه‌های پوشی محرک ناپایداری جو هنوز در منطقه وجود دارند. بنابراین ترکیب شرایط دینامیکی-ترمودینامیکی باعث وقوع این سامانه‌ها می‌شود (Khorshiddoust et al., 2016).

دومین منطقه‌ی رخداد بالای آذرخش منطقه جنوب غرب ایران است که روند تغییر ماهانه‌ی آن تا اندازه‌ای مشابه منطقه‌ی غرب است. به این ترتیب که رخداد آذرخش در این مناطق دارای دو بیشینه در ماه‌های می و دسامبر است، هر چند در منطقه‌ی غرب بیشینه نخست مربوط به ماه می و در منطقه‌ی جنوب غرب بیشینه نخست مربوط به ماه دسامبر است. در هر دو منطقه در تابستان و اوایل پاییز میزان رخداد سامانه‌های همرفتی و آذرخش ناچیز است. بیشینه‌ی رخداد در این ماه‌ها نتیجه‌ی فعالیت سامانه‌های سودانی و منطقه‌ی همگرایی دریای سرخ در این مناطق به‌ویژه جنوب غرب ایران است. به طوری که سامانه‌های همرفتی بیش‌تری در این ماه در امتداد منطقه همگرایی دریای سرخ تشکیل شده و منطقه‌ی غرب و به‌ویژه جنوب غرب ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بنابراین نرخ بیش‌تر آذرخش را در این مناطق در پی دارد (Rafati et al., 2014; Hejazizadeh et al., 2015). ولی با توجه به عرض پایین‌تر منطقه‌ی جنوب غرب و ورود زودتر پرفشار، بیشینه‌ی ماه می در این منطقه در قیاس با غرب کشور اوج ضعیف‌تری دارد. نتایج این بررسی به همراه بررسی‌های پیشین نشان می‌دهد بیشینه‌ی فعالیت سامانه‌های همرفتی و آذرخش در جنوب غرب ایران ارتباط تنگاتنگی با فعالیت منطقه‌ی همگرایی دریای سرخ دارد. منطقه همگرایی دریای سرخ در رخداد بیشینه‌ی سامانه‌های

همرفتی و آذرخش در غرب ایران در ماه می، در جنوب غرب ایران در ماه آوریل و جنوب غرب و غرب ایران در ماه دسامبر نقش مهمی دارد. به گونه‌ای که از ماه دسامبر تا می که این منطقه‌ی همگرایی در مرکز دریای سرخ فعال است و در جهت شمال شرق امتداد دارد، بیشینه‌ی فعالیت آذرخش در جنوب غرب، یا غرب ایران رخ می‌دهد.

در جنوب ایران روند ماهانه رخداد آذرخش تا اندازه‌ای با منطقه‌ی غرب و جنوب غرب متفاوت است، به طوری که بیشینه‌ی رخداد به ترتیب در ماه‌های نوامبر، سپتامبر و آوریل رخ می‌دهد. به طور کلی به دلیل دوره‌ی طولانی‌تر سیطره پرفشار پوشی در منطقه جنوب ایران رخداد سامانه‌های همرفتی و پدیده‌ی آذرخش در این منطقه کم و مربوط به زمانی‌هایی است که ارتفاع این پرفشار از سطح زمین بیش‌تر می‌شود. بنابراین پراکنش به نسبت یکنواخت‌تری در ماه‌های مختلف دارد.

میزان رخداد آذرخش در شمال شرق ایران از ماه آوریل افزایش می‌یابد و در ماه جون به بیشینه‌ی خود می‌رسد. به طور کلی در این منطقه مقدار رخداد از اواسط بهار تا اواسط تابستان نسبت به ماه‌های دیگر قابل توجه است. بنابراین نوسان ماهانه این پدیده در شمال شرق تا اندازه‌ای مشابه شمال غرب است، البته با مقادیر کم‌تر و اوج زود هنگام‌تر که این مشابهت و تفاوت به ترتیب با توجه به مشابهت در عرض جغرافیایی و نزدیکی بیش‌تر شمال غرب به منابع رطوبتی دور از انتظار نیست.

در شمال کشور اوج رخداد این پدیده با نوسان اندک از اواخر بهار تا اواخر پاییز است و بیشینه‌ی رخداد در ماه‌های جولای و نوامبر رخ می‌دهد. بیشینه‌ی ماه جولای به دلیل افزایش گرمایش سطحی و افزایش همرفت حرارتی است. ولی بیشینه‌ی ماه نوامبر و به طور کلی افزایش ناپایداری‌های شدید و افزایش سهم بارش‌های فصل پاییز از بارش‌های شدید سواحل جنوبی دریای مازندران، بنا به نظر سیف به دلیل وجود سامانه‌های جبهه‌ای برون حاره است که با فرارفت هوای گرم و مرطوب همراه است (Saif, 1996). همچنین بر اساس بررسی مفیدی و همکاران نفوذ زیانه‌ی پرفشار و تسلط یک جریان شمالی - جنوبی گسترده روی دریای خزر یا استقرار یک مرکز کم‌فشار دینامیکی و عبور جبهه‌های آن از فراز این منطقه دلیل افزایش ناپایداری‌های شدید همرفتی در این منطقه است (Mofidi et al., 2008). بنابراین می‌توان رخداد ترکیبی ویژه از برهم‌کنش مؤلفه‌های گردش بزرگ مقیاس با مؤلفه‌های مقیاس منطقه‌ای و محلی را عامل تشدید فعالیت همرفتی در این منطقه به شمار آورد (Mofidi et al., 2008).

در منطقه‌ی جنوب شرق ایران در فصل تابستان و اوایل فصل پاییز رخداد این پدیده به نسبت بالا است و بیشینه‌ی آن در ماه‌های جولای تا سپتامبر رخ می‌دهد. این منطقه بیش از ۵۰٪ میانگین بارش تابستانه خود را تنها در ماه جولای دریافت می‌کند (Alijani et al., 2007). دلیل آن نیز فعالیت سامانه‌های موسمی جنوب آسیا و کم‌فشار گنگ است که جنوب شرق ایران را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. گسترش غرب‌سوی کم‌فشارهای موسمی هند و افزایش ارتفاع پرفشار جنب‌حاره شرایط برای شکل‌گیری سامانه‌های همرفتی و رخداد آذرخش فراهم می‌کند (Alijani, 1993).

نتایج بررسی روند تغییر فعالیت آذرخش نشان داد به طور کلی تغییر آذرخش در هیچ نقطه‌ای از منطقه‌ی مطالعه در سطح اطمینان ۹۵٪ و بالاتر معنی‌دار نیست. روند افزایشی تنها در دریای مازندران و روند کاهشی تنها در گوشه شمال شرق منطقه (ترکمستان) در سطح اطمینان بالای ۹۰٪ معنی‌دار است. در حالی که بر اساس پژوهش رسولی و جوان تغییرات معناداری در وقوع توفان‌های تندی در نیمه غربی ایران رخ داده است، به طوری که روند افزایشی در بیش‌تر ایستگاه‌های این منطقه معنادار است (Rasuli & Javan, 2011). این تفاوت به دلیل تفاوت ماهیت داده‌ها به کار گرفته شده و همچنین طول دوره بررسی است. در حالی که بررسی روند تغییر ماهانه نشان داد رخداد آذرخش در جنوب دریای مازندران افزایش معنی‌داری در تمامی ماه‌ها در سطح اطمینان بالای ۹۰٪ نشان می‌دهد. در جنوب شرق ایران نیز از ماه فوریه تا آگوست این روند افزایشی با سطح اطمینان ۹۰٪ قابل قبول است. همچنین در شمال غرب ایران در ماه‌های می تا آگوست روند کاهشی معنی‌داری در سطح اطمینان اشاره شده مشاهده شده است. در مرکز دریای سرخ روند کاهشی در ماه‌های جولای تا نوامبر در سطح اطمینان بالای ۹۰٪ معنی‌دار است، که با توجه به اثراتی که این منطقه بر اقلیم ایران دارد می‌تواند درخور توجه باشد. ولی در محدوده‌ی بین دریای سیاه و مدیترانه روند افزایشی در ماه‌های ژانویه و فوریه و همچنین ماه‌های سپتامبر تا دسامبر و روند کاهشی در ماه جولای معنی‌دار است. در جنوب خلیج فارس نیز در ماه‌های مارس تا جون روند افزایشی معناداری مشاهده شده است. شدیدترین روند افزایشی رخداد آذرخش به ترتیب در جنوب شرق ایران در فصل تابستان، دریای مازندران در فصل زمستان، محدوده‌ی بین دریای سیاه و مدیترانه در فصل پاییز و بالاخره جنوب خلیج فارس در فصل بهار رخ داده است. از سوی دیگر شدیدترین روند کاهشی نیز به ترتیب در مرکز دریای سرخ و محدوده‌ی دریای سیاه و مدیترانه در فصل تابستان مشاهده شده است. در داخل مرز ایران شدیدترین روند کاهشی به شمال غرب ایران در فصل تابستان مربوط است.

بنابراین در نتیجه پدیده گرمایش زمین می‌توان انتظار داشت در فصل تابستان فعالیت‌های همرفتی در جنوب شرق ایران که سهم مهمی در بارش این منطقه دارند، و همچنین در فصل زمستان در دریای مازندران افزایش بیش‌تری یابد. ولی فعالیت این سامانه‌ها در شمال غرب ایران در فصل گرم رو به کاهش است. آذرخش‌ها عمدتاً از توفان‌های تندری و سامانه‌های همرفتی نشأت می‌گیرند. این سامانه‌ها خود بارندگی‌های شدید و در نتیجه الگوی بارش را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. بنابراین اطلاعات حاصل از این مطالعه نه تنها جنبه‌های مهمی از فعالیت‌های همرفتی را در گستره‌ی کشور ایران و همسایگان غربی و جنوب غربی آن، که منشأ بسیاری از سامانه‌های همرفتی در سطح کشور به‌ویژه نیمه‌ی جنوب غربی آن هستند، روشن ساخته است، بلکه دورنمایی از تغییر رژیم بارشی ایران را به نمایش گذاشته است. بنابراین انجام بررسی‌های بیش‌تر در این زمینه در آینده برای فراهم کردن چشم‌اندازی روشن‌تر و سازگاری با تغییر اقلیم ضروری است.

۵- سپاس‌گزاری

نویسندگان از مرکز تحقیقات علوم جوی و هواشناسی (ASMER) و گروه‌های مرکز منابع جهانی هیدرولوژی (GHRC) که داده‌های مورد نیاز برای این مطالعه را ارائه کردند، قدردانی می‌کنند.

۶- فهرست منابع

- حجازی‌زاده، زهرا؛ ضیاییان، پرویز؛ کریمی، مصطفی؛ رفعتی، سمیه. (۱۳۹۴). تحلیل الگوهای فضایی و زمانی سامانه‌های همرفتی با بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر در جنوب غرب ایران. جغرافیا و توسعه، ۳۹، ۹۳-۱۰۶.
- خورشیددوست، علی‌محمد؛ مفیدی، عباس؛ رسولی، علی‌اکبر؛ آرم، کامل. (۱۳۹۵). تحلیل هم‌پیدی ساز و کار وقوع بارش‌های سنگین بهاره در شمال غرب ایران، مخاطرات محیط طبیعی، ۵(۸)، ۵۳-۸۲.
- رسولی، علی‌اکبر؛ جوان، خدیجه. (۱۳۹۱). تحلیل روند وقوع توفان‌های رعد و برقی در نیمه غربی ایران با کاربرد آزمون‌های ناپارامتری، فضای جغرافیایی، ۱۲(۳۸)، ۱۱۱-۱۲۶.
- رسولی، علی‌اکبر؛ خورشیددوست، علی‌محمد؛ فخاری واحد، مجتبی. (۱۳۹۷). بررسی پراکنش فراوانی رعد و برق‌ها و ارتباط آن با ارتفاع در جنوب شرق ایران، اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۷(۱۰۶)، ۱۶۹-۱۷۸.
- رفعتی، سمیه؛ حجازی‌زاده، زهرا؛ کریمی، مصطفی. (۱۳۹۳). تحلیل هم‌پیدی شرایط رخداد سامانه‌های همرفتی با بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر در جنوب غرب ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۶(۲)، ۱۳۷-۱۵۶.
- سیف، مهرزاد. (۱۳۷۵). بررسی توزیع بارش تگرگ در ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.
- علیجانی، بهلول. (۱۳۷۲). مکانیزم‌های صعود بارندگی‌های ایران، مجله دانشکده ادبیات دانشگاه تربیت معلم، دوره جدید (۱)، ۸۵-۱۰۱.
- علیجانی، بهلول. (۱۳۸۷). آب و هوای ایران، چاپ هشتم، انتشارات دانشگاه پیام‌نور، تهران.
- علیجانی، بهلول؛ جعفرپور، زین‌العابدین؛ بیدختی، علی‌اکبر؛ مفیدی، عباس. (۱۳۸۶). تحلیل سینوپتیکی الگوهای گردشی بارش‌های موسمی جولای ۱۹۹۴ در ایران، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۷(۵)، ۷-۳۸.
- قرابلو، مریم؛ صدر دادرس، پگاه؛ بیدختی، علی‌اکبر؛ محمودیان، علیرضا. (۱۴۰۰). بررسی ارتباط بین آلودگی هوا و آذرخش در طی رخدادهای توفان تندری سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۳ در شهر تهران، محیط‌شناسی، ۴۷(۲)، ۱۲۱-۱۲۹.
- کاوایی، محمدرضا؛ علیجانی، بهلول. (۱۳۹۵). مبانی آب و هواشناسی، چاپ نوزدهم، انتشارات سمت، تهران.
- مفیدی، عباس؛ زرین، آذر؛ جانباز قبادی، غلامرضا. (۱۳۸۶). تعیین الگوهای هم‌پیدی بارش‌های شدید و حدی پاییزه در سواحل جنوبی دریای خزر، فیزیک زمین و فضا، ۳۳(۳)، ۱۳۱-۱۵۴.

References

- Abreu, L. P., Gonçalves, W. A., Mattos, E. V., Albrecht, R. I. (2020). Assessment of the total lightning flash rate density (FRD) in northeast Brazil (NEB) based on TRMM orbital data from 1998 to 2013. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 93, 102195. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102195>

- Aich, V., R. H. Holzworth, S. J. Goodman, Y. Kuleshov, C. Price, Williams, E. R., (2018). Lightning: A New Essential Climate Variable, *Eos*, 99. <https://doi.org/10.1029/2018EO104583>
- Albrecht, R.I., Goodman, S.J., Buechler, D.E., Blakeslee, R.J., Christian, H.J., (2016). Where are the lightning hotspots on earth? *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 97, 2051–2068. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>
- Alijani, B., (1993). Mechanisms of increasing rainfall in Iran, *Journal of the Faculty of Literature of Tarbiat Moalem University*, 1(1), 85-101. **[in Persian]**
- Alijani, B., (2008). *Climate of Iran*, 8th edition, Payamnoor University Press, Tehran. **[in Persian]**
- Alijani, B., Jafarpour, Z., Bidakhti, A., Mofidi, A., (2007). Synoptic analysis of circulation patterns of July 1994 seasonal rainfall in Iran, *Applied Research in Geographical Sciences*, 7(5), 7-38. **[in Persian]**
- Cardoso, I., Pinto, O., Pinto, I.R.C.A., Holle, R., (2014). Lightning casualty demographics in Brazil and their implications for safety rules. *Atmos. Res.* 135–136, 374–379. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.12.006>
- Cecil, D., Buechler, D., Blakeslee, R., (2014). Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: dataset description. *Atmospheric Research*, 135–136, 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.028>
- Christian, H., (2003). Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector. *Journal of Geophysical Research*, 108, 4005. <https://doi.org/10.1029/2002JD002347>
- Dayeh, M. A., Farahat, A., Ismail-Aldayeh, H., Abuelgasim, A., (2021). Effects of aerosols on lightning activity over the Arabian Peninsula. *Atmospheric Research*, 261, 105723. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105723>
- Farias, W.R.G., Pinto, O., Pinto, I.R.C.A., Naccarato, K.P., (2014). The influence of urban effect on lightning activity: evidence of weekly cycle. *Atmos. Res.* 135–136, 370–373. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.09.007>
- Finney, D.L., Doherty, R.M., Wild, O., Stevenson, D.S., MacKenzie, I.A., Blyth, A.M., (2018). A projected decrease in lightning under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 8, 210–213. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0072-6>
- Gharaylou, M., Sadr Dadras, P., Aliakbarbidokhti, A., Mahmoudian, A., (2021). Investigation of the relationship between air pollution and lightning during thunderstorm events of the years 2009-2013 in Tehran. *Journal of Environmental Studies*, 47 (2):147-159. [10.22059/JES.2021.327005.1008202](https://doi.org/10.22059/JES.2021.327005.1008202) **[in Persian]**
- Hejazizadeh, Z., Zeaiean, P., Karimi, M., Rafati, S., (2015). Analysis of Spatial and Temporal Patterns of Convective Systems With Precipitation of More Than 10mm. *Geography and Development*, 13(39): 93-106. [10.22111/GDIJ.2015.2007](https://doi.org/10.22111/GDIJ.2015.2007) **[in Persian]**
- Huth, R., Pokorna, L., (2005). Simultaneous analysis of climatic trends in multiple variables. *International Journal of Climatology*, 25, 469-484. <https://doi.org/10.1002/joc.1146>
- IPCC, 1996. *Climate change (1995). The science of climate change*. Eds. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Kastman, J., Market, P., Fox, N., Foscatto, A., Lupo, A., (2017). Lightning and rainfall characteristics in elevated vs. surface based convection in the midwest that produce heavy rainfall. *Atmosphere (Basel)*, 8, 36. [10.3390/atmos8020036](https://doi.org/10.3390/atmos8020036)
- Kavyani, M., Alijani, B. (2015). *The Foundations of Climatology*, 19th Edition, Samt Publications, Tehran. **[in Persian]**
- Khorshiddoust, A., Mofidi, A., Rasouli, A., Azarm, K., (2016). A Synoptic analysis for the occurrence of springtime heavy rainfall in the Northwest of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 5(8): 53-82. [10.22111/JNEH.2016.2783](https://doi.org/10.22111/JNEH.2016.2783) **[in Persian]**
- Krause, A., Kloster, S., Wilkenskield, S., Paeth, H., (2014). The sensitivity of global wildfires to simulated past, present, and future lightning frequency. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 119, 312–322. <https://doi.org/10.1002/2013JG002502>
- Lavigne T, Liu C, Liu N., (2019). How does the trend in thunder days relate to the variation of lightning flash density? *J Geophys Res*, 124, 4955–74. <https://doi.org/10.1029/2018JD029920>
- Li, J., Wu, X., Yang, J., Jiang, R., Yuan, T., Lu, J., Sun, M., (2020). Lightning activity and its association with surface thermodynamics over the Tibetan Plateau, *Atmospheric Research*, 245, 105118. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105118>
- Lin-Lin, Z., Jian-Hua, S., Jie, W., (2010). Thunder events in China: 1980-2008. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 3(4), 181-188. <https://doi.org/10.1080/16742834.2010.11446866>

- Ma M, Tao S, Zhu B, (2005). Response of global lightning activity to air temperature variation. *Chin. Sci. Bull.*, 50, 2640–4. <https://doi.org/10.1007/BF03183663>
- Mofidi, A., Zarin, A., Janbaz, G., (2008). Determining the synoptic pattern of autumn heavy and extreme precipitations on the southern coast of the Caspian Sea, *Journal of the Earth and Space Physics*, 33(3):131-154. [10.1007/1.2538371.1386.33.3.10.7](https://doi.org/10.1007/1.2538371.1386.33.3.10.7) [in Persian]
- Ni, X., Zhang, Q., Liu, C., Li, X., Zou, T., Lin, J., Ren, Z., (2017). Decreased hail size in China since 1980. *Scientific reports*, 7(1), 10913. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11395-7>
- Orville, R., Henderson, R. W., (1986). Global distribution of midnight lightning: September 1977 to August 1978. *Mon. Weather Rev.* 119, 573-577. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114<2640:GDOMLS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114<2640:GDOMLS>2.0.CO;2)
- Peterson, W. A., Rutledge, S. A., (1998). On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall. *J. Geophys. Res.*, 103, 14025-14040. <https://doi.org/10.1029/97JD02064>
- Price C, Asfur M., (2006). Can lightning observations be used as an indicator of upper-tropospheric water vapor variability? *Bull Am Meteorol Soc*, 87, 291–8. <http://www.jstor.org/stable/26217147>.
- Price, C. G., (2013). Lightning applications in weather and climate research, *Surv. Geophys.*, 34(6), 755–767. [10.1007/s10712-012-9218-7](https://doi.org/10.1007/s10712-012-9218-7)
- Qie, K., Qie, X., Tian, W., (2021). Increasing trend of lightning activity in the South Asia region. *Science Bulletin*, 66, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.08.033>
- Qie, K., Tian, W., Wang, W., Wu, X., Yuan, T., Tian, H., Luo, J., Zhang, R., Wang, T., (2020). Regional trends of lightning activity in the tropics and subtropics, *Atmospheric Research*, 242, 104960. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104960>.
- Rafati, S., Fatahi, E., (2022). Effects of Regional Thermodynamic Parameters on Lightning Flash Density as an Indicator of Convective Activity Over Southwest Iran, *Pure and Applied Geophysics*, <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03002-2>.
- Rafati, S., Hejazizadeh, Z., Karimi, M., (2014). Synoptic Analysis of the Conditions for Occurrence of Mesoscale Convective Systems. *Physical Geography Research Quarterly*, 46(2): 137-156. [10.22059/JPHGR.2014.51421](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2014.51421) [in Persian]
- Rasuli, A., Javan, K. (2011). Analyzing the occurrence of thunderstorms in the western half of Iran using non-parametric tests, *Geographical Space*, 12(38), 111-126. [in Persian]
- Rasuli, A., Khorshiddoust, A., Fakhari Vahed, M., (2018). Investigating the frequency distribution of lightning and its relation with elevation in Southeast of Iran. *SEPEHR*, 27(106): 169-178. [20.1001.1.25883860.1397.27.106.12.6](https://doi.org/10.1007/1.25883860.1397.27.106.12.6) [in Persian]
- Romps, D.M., Seeley, J.T., Vollaro, D., Molinari, J., (2014). Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science*, 346, 851–854. [10.1126/science.125910](https://doi.org/10.1126/science.125910)
- Saif, M., (1996). Studying the distribution of hail in Iran, Master's Thesis, Institute of Geophysics, University of Tehran. [in Persian]
- Sonnadara, U., (2016). Spatial and temporal variations of thunderstorm activities over Sri Lanka. *Theoretical and applied climatology*, 124(3-4), 621-628. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1442-x>
- Taszarek, M., Allen, J., Póčík, T., Groenemeijer, P., Czerniecki, B., Kolendowicz, L., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Schulz, W., (2019). A climatology of thunderstorms across Europe from a synthesis of multiple data sources. *J. Clim.* 32, 1813–1837. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0372.1>
- Williams E, Guha A, Boldi R, Christian, H., Buechler, D., (2019). Global lightning activity and the hiatus in global warming. *J Atmos Sol Terr Phys*, 189, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.03.011>
- Williams, E. R., (2009). The global electrical circuit: A review. *Atmospheric Research*, 91(2-4), 140-152. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.05.018>
- Wu, X., Yuan, T., Qie, K., Luo, J., (2020). Geographical distribution of extreme deep and intense convective storms on Earth. *Atmos. Res.* 235, 104789. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104789>
- Zhang, Q., Ni, X., & Zhang, F., (2017). Decreasing trend in severe weather occurrence over China during the past 50 years. *Scientific Reports*, 7, 42310. [10.1038/srep42310](https://doi.org/10.1038/srep42310)
- Zipser, E. J., Cecil, D. J., Liu, C., Nesbitt, S. W., Yorty, D. P., (2006). Where are the most: intense thunderstorms on Earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87, 1057–1071. <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-8-1057>