



Synoptic Analysis of the Impact of Cut-Off Lows in Heavy Rains in Iran

Shahram Lotfi Qaranchai ^a, Tayebeh Akbari Azirani ^{b*}, Alireza Shakiba ^c, Fatemeh Rabbani ^d,
Ameneh Dasht-Bozorgi ^e

^a PhD in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of earth sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

^b Assistant Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of earth sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

^c Associate Professor in Climatology, Center for Remote Sensing and GIS Studies, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

^d PhD in Climatology, Payam Noor University Lecturer, Parand Branch, Tehran, Iran

^e PhD in Climatology, Research Associate of Center for Remote Sensing and GIS Studies, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Received: 12 December 2022 Revised: 17 February 2023 Accepted: 24 February 2023

Abstract

Nowadays, heavy rains are an important aspect of climate studies because of their dangers and damage. Cut-off lows are influential in the occurrence of heavy rainfall in Iran by creating atmospheric instability. In this regard, first, the climatic variables of temperature, precipitation, and geopotential height of 500 hPa were investigated in connection with the formation of cut-off low during the period 1986-2018. Then, to predict the changes of the cut-off low event in the future and its impact on heavy precipitation, ECMWF database ERA-Interim version and CMIP5 models with CORDEX exponential microscale approach under two scenarios of optimistic release RCP4.5 and pessimistic RCP8.5 was used until 2099. The results showed that in the RCP4.5 scenario, the increase in precipitation was estimated to be at least 2.41 mm, and in the RCP8.5 scenario, the maximum precipitation decrease was estimated to be 91 mm. The surface pressure anomalies of 500 hPa will increase by 61.5 and 92.5 geopotential meters based on RCP4.5 and RCP8.5. The lowest frequency cut-off low events was in 1995 and 1996 with 10 events, and the highest event was in 1986 with 30 events. With the increase of air temperature and the advance of subtropical high pressure towards high latitudes, the place of formation and the path of movement cut-off low in 33 years have been extended towards northern latitudes, which indicate the effects of change of the climate in Iran. The existence of a significant positive relationship between the frequency cut-off low events and heavy rainfall was confirmed at the 5% error level. Moreover, the impact of cut-off low on the frequency of heavy rainfall in Iranian stations, especially the northern stations, has been more impressive.

Keywords: Climate Change, Cut-off Low, CORDEX Dynamic Downscaling Method, CMIP5, RCP Scenarios

*. Corresponding author: Tayebeh Akbari Azirani E-mail: t_akbari@sbu.ac.ir Tel: + 98912824858

How to cite this Article: Lotfi, S., Shakiba, A., Akbari Azirani, T., Rabbani, F., & Dashtbozorgi, A. (2024). Synoptic analysis of the impact of cut-off lows in heavy rainfall in Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 12(4), 205-232.

DOI: 10.22067/geoeh.2023.79894.1314



Journal of Geography and Environmental Hazards are fully compliant
With open access mandates, by publishing its articles under Creative
Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).



Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 12, Issue 4 - Number 48, Winter 2024

<https://geoeh.um.ac.ir>

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79894.1314>

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال دوازدهم، شماره چهل و هشتم، زمستان ۱۴۰۲، صص ۲۳۲-۲۰۵
مقاله پژوهشی

تحلیل سینوپتیک اثر کم‌فشارهای بریده در بارش سنگین ایران

شهرام لطفی قرانچای - دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
 طیبه اکبری ازیرانی^۱ - استادیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
 علیرضا شکبیا - دانشیار اقلیم‌شناسی، مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
 فاطمه ربانی - دکتری اقلیم‌شناسی، مدرس دانشگاه پیام نور تهران، واحد پرند، تهران
 آمنه دشت‌بزرگی - دکتری اقلیم‌شناسی، همکار پژوهشی مرکز مطالعات سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۲۱ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸ تاریخ تصویب: ۱۴۰۱/۱۲/۵

چکیده

بارش‌های سنگین امروزه به خاطر مخاطرات و خسارات وارده، از جنبه‌های مهم در مطالعات آب‌وهوایی هستند. کم‌فشارهای بریده با ایجاد ناپایداری جوی در رخداد بارش سنگین در ایران تأثیرگذار هستند. در این راستا ابتدا متغیرهای آب‌وهوایی دما، بارش و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال جو در ارتباط با تشکیل کم‌فشارهای بریده طی دوره (۲۰۱۸-۱۹۸۶) بررسی شد. سپس جهت پیش‌نگری تغییرات رخداد کم‌فشار بریده در آینده و اثر آن بر بارش سنگین، از پایگاه داده ECMWF نسخه ERA-Interim و مدل‌های CMIP5 با رویکرد ریزمقیاس‌نمایی CORDEX تحت دو سناریوی انتشار خوش‌بینانه RCP4.5 و بدبینانه RCP8.5 تا سال ۲۰۹۹ استفاده شد. نتایج نشان داد که در سناریوی RCP4.5 افزایش بارش به میزان حداقل ۲/۴۱ میلی‌متر و در سناریوی RCP8.5 کاهش بارش حداکثر به میزان ۹۱ میلی‌متر برآورد شد. ناهنجاری‌های فشار سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال براساس RCP4.5 و RCP8.5 به میزان ۶۱/۵ و ۹۲/۵ ژئوپتانسیل متر افزایش خواهد داشت. کمترین فراوانی رخداد کم‌فشار بریده در

Email: t_akbari@sbu.ac.ir

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۸۲۴۸۵۸۲

نحوه ارجاع به این مقاله:

لطفی قرانچای، شهرام؛ اکبری ازیرانی، طیبه؛ شکبیا، علی رضا؛ ربانی، فاطمه؛ دشت بزرگی، آمنه. (۱۴۰۲). تحلیل سینوپتیک اثر کم‌فشارهای بریده در بارش سنگین ایران. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۲(۴). صص ۲۳۲-۲۰۵

<https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.79894.1314>

سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۹۶ به تعداد ۱۰ رخداد، و بیشترین رخداد در سال‌های ۱۹۸۶ با ۳۰ رخداد بوده است. با افزایش دمای هوا و پیش‌روی پرفشارجنب حاره‌ای به سمت عرض‌های بالا، محل تشکیل و مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده در دوره ۳۳ ساله به سمت عرض‌های جغرافیایی شمالی‌تر کشیده شده‌اند که می‌تواند شواهدی از اثرات تغییر اقلیم در ایران باشد. وجود رابطه مستقیم معنادار بین فراوانی رخداد کم‌فشار بریده و بارش سنگین در سطح خطای ۵ درصد تأیید شد. همچنین میزان تأثیر کم‌فشارهای بریده در فراوانی بارش سنگین ایستگاه‌های ایران به‌ویژه ایستگاه‌های شمالی چشم‌گیرتر بوده است.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، کم‌فشار بریده، روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX، CMIP5، سناریوهای RCP

۱- مقدمه

براساس گزارش هیئت بین‌دولتی تغییرات آب‌وهوایی (IPCC¹) در ۲۸ فوریه ۲۰۲۲، میزان افزایش دمای سطح جهان در طول پنج دهه گذشته (از سال ۱۹۷۰) در تاریخ محدودۀ دمای جهان بی‌سابقه بوده است. دمای دهه گذشته (۲۰۲۰-۲۰۱۱) از گرم‌ترین دوره چند قرن اخیر که تقریباً ۶۵۰۰ سال پیش رخ داده است، فراتر رفته است. و تغییراتی شامل رشد سریع‌تر در افزایش سطح آب دریا، گرمای شدیدتر (مانند موج گرما) و تناوب بیشتر در پدیده‌های شدید و خشن (مانند بارش شدید و فعالیت طوفانی) قابل توجه بوده است. در هر پنج سناریوی انتشار آلاینده‌های منتشرشده از سوی IPCC، دمای سطح جهان تا اواسط قرن افزایش می‌یابد. گرم‌تر شدن کره زمین (بیش از ۲ درجه سانتی‌گراد) در سناریوهای با انتشار آلاینده زیاد، در طول دوره دوم قرن ادامه خواهد یافت (IPCC, 2022). تغییر اقلیم اثر قابل توجهی روی پارامترهای اقلیمی و سیستم‌های جوی سیاره‌ای و منطقه‌ای حاره‌ای و برون‌حاره‌ای می‌گذارد. که می‌توان به گرمایش جهانی، خشکسالی‌ها، رخداد پدیده‌های حدی شدید مانند یخبندان‌های زودرس و دیررس، امواج گرمایی، بارش‌های سنگین و سیل‌آسا و... اشاره کرد. یکی از سیستم‌های سیاره‌ای متأثر از تشدید جریان‌های نصف‌النهاری بادهای غربی، کم‌فشارهای بریده^۲ یا سردچال‌ها هستند (پالمن و نیوتن^۳، ۱۹۶۹). کم‌فشارهای بریده اغلب در اواخر زمستان و اوایل بهار جلوه می‌کنند و ویژگی‌ها و مکانیسم فرود اولیه ایجاد کننده خود را تا پلیمان حیات خود حفظ می‌کنند. در مدت حضور کم‌فشار بریده در شرق آن جریان صعودی و در غرب آن جریان نزولی ادامه دارد (نی تو^۴، ۲۰۰۵). از جمله متغیرهایی که کم‌فشار بریده در آن تأثیر می‌گذارد بارش و به‌ویژه بارش‌های سنگین است، که میزان بارش‌های سنگین در عرض‌های میانی بیشتر شده و باعث بروز سیلاب‌های شدید می‌شوند

1 Intergovernmental Panel on Climate Change

2 Cut Off Lows

3 Palmen & Newton

4 Nieto

(دیویس^۱، ۱۹۹۸) وقوع بارش های سنگین و تنوع زمانی و مکانی آن، خود از مظاهر تنوع اقلیمی ایران قلمداد می گردد (فرج زاده و بابایی فینی، ۱۳۸۱). کم فشارهای بریده اغلب با اختلالات در مقیاس متوسط همراه است که می تواند باعث ایجاد رویدادهای نامطلوب مرتبط با آب و هوا، مانند بارش سنگین، سیلاب شلید و ناگهانی (گریفیث^۲ و همکاران ۱۹۹۸؛ سینگلتن و ریسون^۳، ۲۰۰۷؛ فاور^۴ و همکاران ۲۰۱۲، پورثو^۵ و همکاران ۲۰۰۷؛ باکلی^۶ و همکاران ۲۰۰۷، شوهاخر و جانسون^۷، ۲۰۰۸)، رانش زمین به دلیل باران شلید (هیروتا^۸ و همکاران، ۲۰۱۶)، رعدوبرق (تسبوکی و اوگورا^۹، ۱۹۹۹؛ موهر^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۰)، تگرگ (ژائو و سان^{۱۱}، ۲۰۰۷) و گردبادها (دیویس^{۱۲}، ۲۰۰۶؛ هومار^{۱۳} و همکاران، ۲۰۰۱؛ سکو^{۱۴} و همکاران، ۲۰۱۵) شود. از تحقیقات داخلی در مورد اثر کم فشار بریده در بارش می توان به تحقیق امیدوار و همکاران (۱۳۹۴)، بلیانی و سلیقه (۱۳۹۵)، حجازی زاده و همکاران (۱۳۸۶)، امیدوار و همکاران (۱۳۸۹)، حیدری منفرد (۱۳۹۲)، اشرف (۱۳۹۳)، راستی و همکاران (۱۳۹۳)، شفیع (۱۳۹۵)، رضایی (۱۳۹۶)، ناصری (۱۳۹۶)، امیدوار و همکاران (۱۳۹۲) و حاجی خانی (۱۳۹۷) اشاره کرد. مونوز^{۱۵} و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی با عنوان اقلیم شناسی عرض های میانه و تغییرات سالانه کم فشارهای بریده تراز ۲۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان دادند سیستم های ۲۰۰ هکتوپاسکال در تابستان و پاییز بیشتر است، سیستم های ۵۰۰ هکتوپاسکال به طور یکنواخت در طول فصول توزیع می شوند. در داخل هر منطقه و در هر سطح، تعداد سالانه کم فشارهای بریده در طول زمان افزایش یافته است، روندهایی که با سیگنال های مستند تغییرات آب و هوایی مانند تضعیف و تغییر قطبی جت های نیمه گرمسیری و افزایش فرکانس مسدود شدن سازگار است. تسوجی^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی رابطه افزایش بارش از طریق تعامل بین رودخانه های جوی و کم فشارهای بریده در دوره ۱۴ ساله در منطقه غربی اقیانوس آرام شمالی پرداختند و مقایسه بین آن ها نشان داد که یک منطقه افزایش بارش در شمال غربی کم فشار بریده و همچنین قسمت جنوب محور رودخانه های جوی وجود داشته است. که شکل گیری افقی میان رودخانه های جوی،

1 Daviss

2 Griffiths

3 Singleton & Reason

4 Favre

5 Porcu

6 Buckley

7 Schumacher and Johnson

8 Hirota

9 Tsuboki and Ogura

10 Mohr

11 Zhao and Sun

12 Davies

13 Homar

14 Seko

15 Munoz

16 Tsuji

کم فشار بریده و منطقه افزایش بارش با رویداد سیل فاجعه‌باری که در هیرووشیمای ژاپن، در سال ۲۰۱۴ رخ داد، همزمان است. آباتزگلو^۱ (۲۰۱۶)، در تحقیقی با عنوان سهم کم‌فشارهای بریده در بارندگی در سراسر ایالات متحده آمریکا نشان دادند که کم‌فشارهای بریده بین ۲٪ تا ۳۲٪ از بارندگی سالانه در ایستگاه‌های سراسر ایالات متحده را با تنوع جغرافیایی و فصلی مجزا تشکیل می‌دهد. بیشترین سهم کم‌فشارهای بریده در مجموع بارش و شدت بارش در سراسر دشت‌های بزرگ و داخلی غرب ایالات متحده، به‌ویژه در طول فصول انتقال بهار و پاییز یافت شد. فریرا^۲ (۲۰۲۱)، در تحقیقی با عنوان کاهش بارندگی و بارش شدید در شرق اسپانیا: آب‌وهوای فعلی و آینده نشان دادند که کم‌فشارهای بریده تولیدکننده اصلی بارش شدید در منطقه والنسیا، به‌ویژه در طول فصول انتقال هستند. شدیدترین وقایع بارانی کم‌فشارهای بریده در ماه سپتامبر تا نوامبر رخ داد. این پژوهش با هدف بررسی اثر کم‌فشارهای بریده بر بارش سنگین ایران با توجه به اهمیت و خسارات ناشی از بارش‌های سنگین با رویکرد تغییر اقلیم، با روندیابی و پیش‌نگری تغییرات کم‌فشارهای بریده در دوره آماری مشاهداتی ۳۳ ساله (۲۰۱۸ - ۱۹۸۶) و دوره آینده (۲۰۹۹ - ۲۰۲۶) تدوین شد. همچنین این تحقیق به دنبال دستیابی به درک بهتری از اثر تغییرات اقلیمی بر کم‌فشارهای بریده مؤثر بر بارش سنگین ایران است.

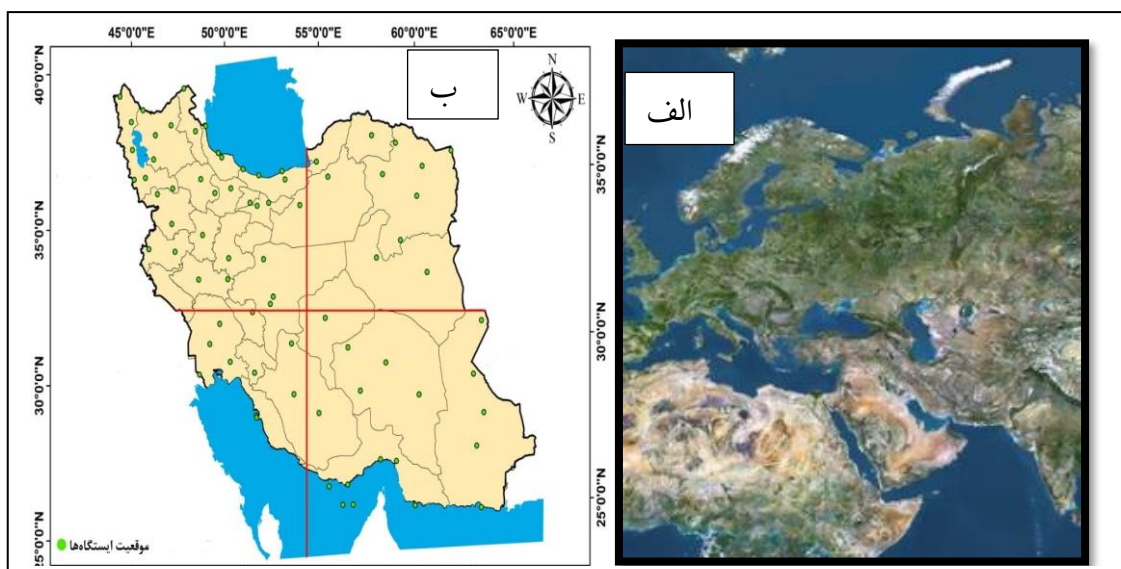
۲- داده‌ها و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، برای مطالعه تغییر اقلیم و کم‌فشارهای بریده منطقه‌ای به وسعت ۰ - ۸۰ درجه عرض شمالی و ۰ - ۸۰ درجه طول شرقی انتخاب شد. دلیل انتخاب این منطقه برای مطالعه، اولاً آشکارسازی تغییرات اقلیمی با مدل‌های دینامیکی و ثانیاً کم‌فشارهای بریده جزء سیستم‌های سینوپتیک هستند، که با مطالعه و تحلیل سینوپتیک می‌توان ضمن آشکارسازی محل شکل‌گیری و مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده، اثرات متغیرهای مختلف سطح منطقه در میزان شدت و ضعف عملکرد آن‌ها را نیز بررسی کرد. با توجه به عملکرد مقیاس سینوپتیک این پدیده و مدت‌زمان تأثیرگذاری آن، که معمولاً بیش از دو روز است پس ایستگاه‌هایی از کل ایران انتخاب شد، تا بهتر اثرات کم‌فشار بریده بر روی بارش سنگین ایران مورد پژوهش قرار گیرد. **شکل (۱)** منطقه شکل‌گیری و مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده و همچنین ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب ایران برای مطالعه بارش سنگین را نشان می‌دهد.

1 Abatzoglou

2 Ferreira



شکل ۱- الف- محدوده منطقه مطالعه کم فشارهای بریده و ب- نقشه ایران و موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه برای بارش سنگین

۲-۲- روش انجام پژوهش

۲-۲-۱- مدل‌ها و سناریوهای منتخب

در این پژوهش جهت پیش‌نگری شرایط آینده از مدل‌های اقلیم تحت شرایط تغییر اقلیم مبتنی بر روش ریزگردانی دینامیکی^۱ CORDEX استفاده شد (جدول ۱). کوردکس یک چارچوب هماهنگ بین‌المللی برای تولید نسلی پیشرفته از پیش‌نگری‌های تغییرات اقلیمی در سراسر جهان است (ایچ^۲ و همکاران، ۲۰۱۵). در این روش ریزگردانی دینامیکی از سناریوهای خط سیر انتشار گازهای گلخانه‌ای (RCPS^۳) استفاده شد (وارناتسچ و رئی^۴، ۲۰۱۹). این مقاله با استفاده از خروجی‌های CMIP5^۵ و سناریوهای RCP4/5 و RCP8/5 تولید شده توسط روش ریزمقیاس‌نمایی منطق‌هایی کوردکس (CORDEX) انجام شد. در این راستا پیشنهاد‌های گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) در خصوص استفاده از داده‌های کنترل کیفی شده و کاربست خروجی مدل‌های گزارش پنجم کارگروه هماهنگ‌کننده مدل‌های جفت شده اقلیم و جدیدترین سناریوهای تغییر اقلیم بر مبنای خط سیر انتشار گازهای گلخانه‌ای (RCPS^۶) بکار گرفته شد و در نهایت پس پردازش خروجی داده‌های ریزمقیاس شده

1 Coordinated Regional Climate Downscaling experiment

2 Aich

3 Representative Concentration Pathway

4 Warnatzsch & Reay

5 Coupled Model Intercomparison Project 5

6 Representative Concentration Pathway

به منظور کاهش حداکثری عدم قطعیت استفاده شد. اطلاعات دقیق مدل منتخب روش ریزمقیاس نمایی CORDEX در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱- مدل‌های اقلیم تحت شرایط تغییر اقلیم مبتنی بر روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX

مدل دینامیکی						
مدل اجراکننده	ریزگردانی	محدوده	گروه	مدل مسیر نمایشگر تمرکز	تفکیک مکانی	
آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیک- مدل‌های سیستم زمین ^{۱۲}	آزمایش کاهش آب‌وهوای هماهنگ منطقه- ای ^۲	شمال آفریقا و خاورمیانه ^۳	rli1pl	RCA4	0.44×0.44	مسیرهای نمایشگر تمرکز ^۴
						مسیرهای نمایشگر تمرکز ^۴
						تاریخی ^۶
						×

۲-۲-۲- روندیابی

برای نشان دادن روند داده‌های دما، از آزمون ناپارامتریک کندال و شیب سن در سطح ۰/۹۵ استفاده شد. آزمون ناپارامتری من - کندال ابتدا توسط Mann (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط Kendall (۱۹۷۵) بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه یافت. برای تعیین تصادفی بودن داده‌ها از آزمون زیر استفاده می‌شود (عساکره، ۱۳۹۰).

$$T = \frac{4P}{N(n-1)} - 1 \quad (1)$$

که T آماره من-کندال، N تعداد کل سال‌های آماری مورد استفاده و P مجموع تعداد رتبه‌های بزرگ‌تر از ردیف ni که بعد از آن قرار می‌گیرند است. و در نهایت به منظور سنجش معنی دار بودن آماره T از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$(T)t = \pm tg \frac{\sqrt{4N+10}}{\sqrt{9N(N-1)}} \quad (2)$$

که در آن N تعداد کل سال‌های آماری، tg برابر سطح احتمال معنی دار بودن آزمون و (T)t آماره من-کندال است. که tg برابر مقدار بحرانی نمره نرمال یا استاندارد Z یا سطح اطمینان آزمون است و با سطح احتمال آزمون ۹۵ درصد برابر ۱/۹۶ می‌باشد.

شیب سن در رابطه شماره ۳ که Ft برابر است با معادله خط روند:

1 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL). Earth System Models (Esm2m)

2 Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (Cordex)

3 Middle east & north Africa (MNA)

4 Representative Concentration Pathways 8.5 (RCP8.5)

5 Representative Concentration Pathways 4.5 (RCP4.5)

6 Historical

$$f(t) = Qt + B \quad (۳)$$

که Q ، شیب خط روند و B ، مقدار ثابت است. جهت محاسبه شیب خط روند، ابتدا بایستی شیب بین هر جفت داده مشاهداتی، با استفاده از معادله مربوطه محاسبه گردد (سن، ۱۹۶۸).

۲-۳- استخراج کم فشار بریده

برای شناسایی و مطالعه بر روی کم فشارهای بریده مؤثر در بارش سنگین ایران از داده‌های متوسط روزانه ارتفاع ژئوپتانسیل، باد مداری (U) و دمای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بازتحلیل شده $ECMWF^2$ سایت اروپا با گام شبکه‌ای $۰/۱۲۵ * ۰/۱۲۵$ درجه‌ای در دوره آماری ۳۳ سال (۱۹۸۶-۲۰۱۸) در منطقه‌ای شامل ۰ تا ۸۰ درجه عرض شمالی و ۰ تا ۸۰ درجه طول شرقی استفاده شد. شاخص تیبالدی - مولتنی^۳ (۱۹۹۰) در شناسایی خودکار کم فشارهای بریده به صورت الگوریتم در برنامه Matlab کدنویسی شد. در مرحله شناسایی، کم فشارهای بریده مؤثر در بارش سنگین ایران از سایر کم فشارها جداسازی شد. در این پژوهش همچنین کم فشارهای بریده‌ای مورد مطالعه قرار گرفتند که طول عمر آن‌ها دو روز یا بیشتر بودند و از کم فشارهایی که یک روز عمر و ماندگاری داشتند صرف نظر شد. شاخص تیبالدی - مولتنی در شناسایی کم فشارهای بریده با استفاده از رابطه‌های شماره ۲ و ۳ به دست آمد:

$$GHGS = \left[\frac{Z(\Phi_0) - Z(\Phi_s)}{(\Phi_0 - \Phi_s)} \right] \quad (۲)$$

$$GHGN = \left[\frac{Z(\Phi_n) - Z(\Phi_0)}{(\Phi_n - \Phi_0)} \right] \quad (۳)$$

$$\Phi_n = 80N + \partial. \quad \Phi_0 = 60N + \partial. \quad \Phi_s = 40N + \partial. \quad \partial = -50. \quad 00.50.$$

$$GHGN < -10 \text{ m/deg latitude} \quad (2)$$

$$GHGS > 0 \quad (1)$$

بر اساس رابطه‌های شماره ۲ و ۳ به ترتیب، $GHGS^4$ شاخه جنوبی سامانه بندالی، $GHGN^5$ شاخه شمالی سامانه بندالی، Z ارتفاع ژئوپتانسیل بر حسب متر در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و Φ عرض جغرافیایی است. سه عرض جغرافیایی $۰، ۴۰، ۸۰$ درجه در شاخص تیبالدی - مولتنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به دلیل استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده ۰.۱۲۵ درجه از شاخص تیبالدی - مولتنی معادل $۴، ۰، ۴$ - استفاده شد. برای شناسایی بارش‌های سنگین با توجه به مطالعات انجام شده آستانه‌های متفاوتی مانند مقادیر مطلق، دوره بازگشت و شاخص‌های صدک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مطالعه از مقادیر آستانه‌ای مطلق و دوره بازگشت با توجه به ویژگی‌های اقلیمی و

1 Sen

2 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

3 Tibaldi and Molteni

4 geopotential height gradient southern

5 geopotential height gradient northern

بارشی ایران صرف نظر شد، چراکه در هر منطقه از ایران میانگین سالانه بارش متفاوت است. برای مثال در منطقه شمال ایران میانگین بارش نزدیک به ۱۸۰۰ میلی متر است در حالی که در نواحی شرقی به طور متوسط به ۷۰ میلی متر می رسد، لذا رخداد بارش ۲۰ میلی متر برای منطقه اول نرمال و برای منطقه دوم مخرب و موجب سیلاب می شود (دوستکامیان و همکاران، ۱۳۹۵)؛ در اکثر منابع صدک ۹۰ یا ۹۵م بارش به عنوان آستانه شناسایی بارش های سنگین به کار برده می شود. با توجه به طبیعت خشک و نیمه خشک ایران و فراوانی کم روزهای بارش بالاتر از آستانه صدک ۹۵م (علیچانی^۱، ۲۰۱۱) در این پژوهش از صدک ۹۰م بارش هر ایستگاه و حداقل بارش ۱ میلی متر (به منظور جلوگیری از غیرواقعی شدن آستانه بر حسب صدک) به عنوان آستانه برای تعیین بارش های سنگین استفاده شد.

۳- یافته ها

۳-۱- روند تغییرات دمایی تراز دریا در طول دوره تاریخی (۱۹۸۶-۲۰۱۸) و آینده (۲۰۲۶-۲۰۹۹) بر اساس مدل

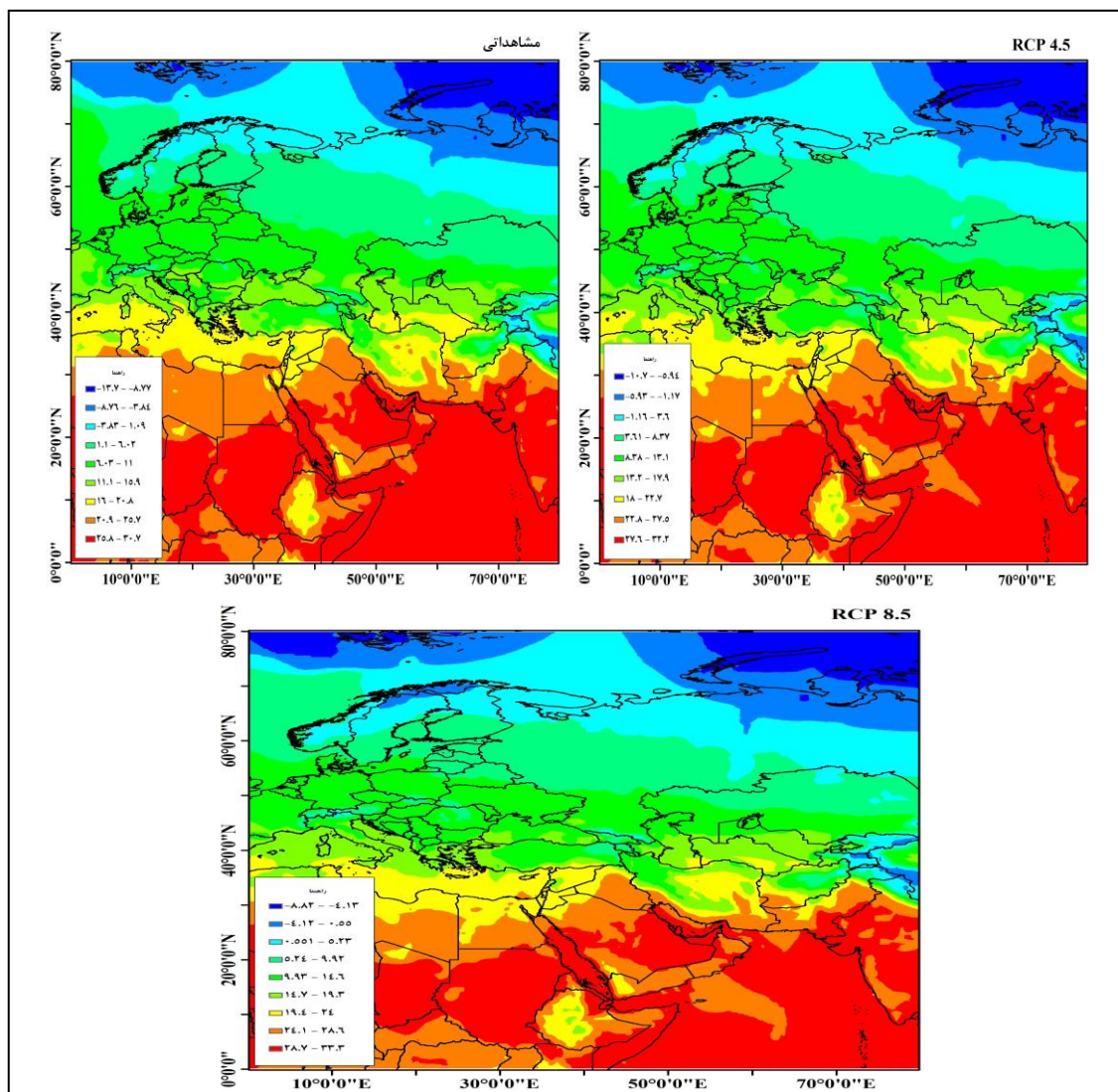
GFDL-ESM2M پروژه CORDEX

تغییرات و ناهنجاری های سالانه دمایی تراز دریا در دوره تاریخی و سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در سطح منطقه مورد پژوهش در شکل (۲)، نشان داده شده است. میانگین دما در سطح منطقه مورد پژوهش در دوره تاریخی و سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۸/۷، ۸/۱۰ و ۳/۱۲ درجه سلسیوس است. مقدار افزایش دما در مناطق کمینه دمایی عرض های بالا در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۳ و ۸/۴ درجه سلسیوس و در مناطق بیشینه دمایی عرض های پایین در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۵/۱ و ۶/۲ درجه سلسیوس است. این تغییرات سالیانه در دوره آینده با توجه به خروجی سناریوها (RCPs) نمایانگر روند افزایشی دما در سطح منطقه است به طوری که روند افزایشی در مناطق کمینه دمایی شدیدتر و در سناریوی RCP8.5 بیشتر و به میزان ۸/۴ درجه سلسیوس) خواهد بود. بر اساس شکل ۲ در هر دو بازه زمانی تاریخی و آینده و سناریوهای مورد مطالعه، میانگین دمایی ۲۲-۲۷ درجه سلسیوس در قسمت های جنوبی ایران، بخشی از پاکستان، عربستان، عراق و کشورهای واقع در شمال آفریقا دیده می شود که نشان دهنده گسترش دماهای بالای ۲۰ درجه سلسیوس به سمت عرض های بالای ۳۰ درجه شمالی است. نتایج افزایش دما در سطح منطقه پژوهش حاضر با نتایج کار خوش اخلاق و همکاران (۱۳۹۸)، حمزه سرکانی (۱۳۹۷) و بلبائیان و همکاران (۱۳۸۸)، تالیارد^۲ (۱۹۸۵) و آلمازویی^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۵ مطابقت دارد.

1 Alijani

2 Taljaard

3 Almazori



شکل ۲- تغییرات دمایی در سطح منطقه در دوره آماری تاریخی (۱۹۸۶-۲۰۱۸) و دوره آینده (۲۰۲۶-۲۰۹۹)

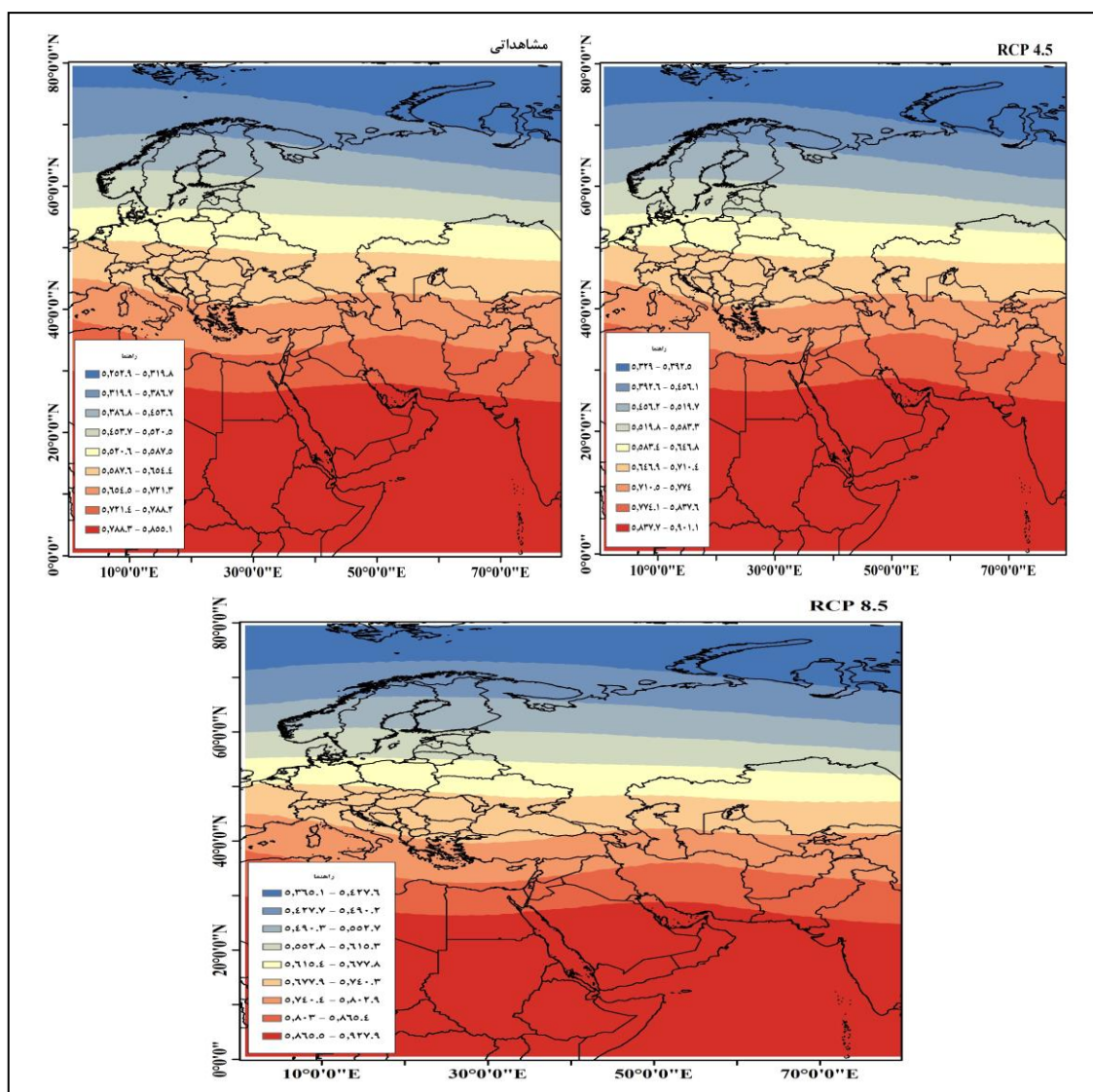
براساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، مدل GFDL-ESM2M پروژه CORDEX

۲-۳- توزیع و تغییرات فشار سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال منطقه در دوره تاریخی (۱۹۸۶-۲۰۱۸) و دوره آینده

(۲۰۲۶-۲۰۹۹) براساس داده‌های تاریخی مدل GFDL-ESM2M

براساس نقشه سالیانه فشار دوره تاریخی و دوره آینده (سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5) در شکل ۳ میانگین فشار سطح منطقه به ترتیب ۵۵۵۴، ۵۶۱۵/۰۵ و ۵۶۷۴/۶ ژئوپتانسیل متر است که حاکی از افزایش میانگین فشار در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به میزان ۶۱/۵ و ۹۲/۵ ژئوپتانسیل متر نسبت به دوره مشاهداتی است.

در منطقه بیشینه پر ارتفاع عرض‌های پایین میزان متوسط فشار ۵۸۵۵/۱ ژئوپتانسیل متر و برای دوره آینده براساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب به میزان ۵۹۰۱/۱ و ۵۹۲۷/۹ ژئوپتانسیل متر است و افزایش فشار در سناریوی RCP8.5 شدیدتر خواهد بود. در شکل ۳ مراکز پر ارتفاع هسته سرد میزان فشار در دوره تاریخی و دوره آینده به ترتیب ۵۲۵۲/۹، ۵۳۲۹ و ۵۳۶۵/۱ ژئوپتانسیل متر است. که در دوره آینده براساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب میزان کاهش فشار ۷۷/۹ و ۱۱۲/۸ ژئوپتانسیل متر خواهد بود. نتایج حاصل از شکل برای دوره آینده نشان می‌دهد که ناهنجاری‌های فشار تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در پر ارتفاع عرض‌های بالایی به میزان بیشتری افزایش خواهد یافت. براساس شکل (۳) پراکندگی ناهنجاری‌های فشاری در سطح منطقه پژوهش نشان می‌دهد که در دوره تاریخی پر ارتفاع عرض‌های پایین تا عرض ۲۲ درجه شمالی گسترش دارد. و این مرکز پر ارتفاع و پرفشار جنب‌حاره‌ای در دوره آینده به سمت عرض‌های بالاتر کشیده خواهد شد. حرکت و گسترش آن تا حدود ۲ الی ۳ درجه خواهد بود. که نشان می‌دهد بخش‌های جنوبی ایران را تحت سیطره خود قرار خواهد داد. نتایج پژوهش با کارهای خوش اخلاق و همکاران (۱۳۹۸)، پروین (۱۳۹۶)، دارند (۲۰۱۴)، لو و ریچلر^۱ (۲۰۰۹) مطابقت دارد.

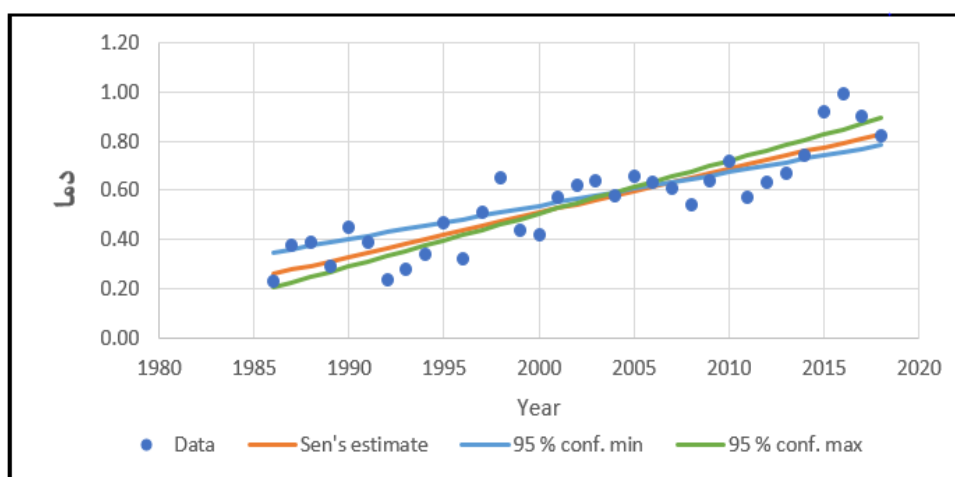


شکل ۳- تغییرات سالیانه فشار تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در دوره آماری تاریخی (۱۹۸۶-۲۰۱۸) و دوره آینده

براساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، مدل GFDL-ESM2M پروژه CORDEX

در شکل (۴) و جدول (۲)، میانگین دمای منطقه پژوهش براساس سری زمانی شیب روند آزمون کندال و شیب سن محاسبه و معنی داری این آماره در سطح اطمینان ۹۵٪ بررسی شد. نتایج نشان داد که در طول دوره مورد مطالعه با توجه به اینکه مقدار آماره Z کندال حدود ۵/۷۵ و بیشتر از ۱/۹۶ است، بنابراین روند افزایشی معناداری در میانگین دمای منطقه پژوهش در سطح خطای ۵٪ تأیید شد. بررسی آماره‌ی آزمون شیب سن برای میانگین دمایی منطقه

پژوهش نشان داد که به طور متوسط دما در هر سال حدود $0/018$ افزایش داشته است، ضمن اینکه کمینه و بیشینه افزایش دما در سطح 95% به ترتیب برابر با $0/014$ و $0/021$ سلسیوس بوده و نشان دهنده افزایش نسبتاً شدیدی در میانگین دماهای بیشینه سطح منطقه پژوهش است. همچنین **شکل (۴)** برازش نمودار خط سن برداده‌های میانگین دمایی را طی دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد. با وجود تغییرات درخور توجه سالانه دما ($0/55$ سلسیوس) که بیشینه آن $0/92$ سلسیوس در سال 2016 و کمینه آن ($0/23$ سلسیوس) در سال 1986 بوده است، به طور کلی منطقه پژوهش روند افزایشی معناداری را در سطح خطای 5 درصد در ناهنجاری دما تجربه کرده است. (**شکل ۴**)



شکل ۴- برازش نمودار خط سن بر سری زمانی داده‌های میانگین افزایشی دما پژوهش $2018-1986$ میلادی (میانگین افزایش دماهای دمایی سطح منطقه پژوهش از سایت مرکز ملی اطلاعات زیست‌محیطی (ncei.noaa.gov) اخذ گردید)

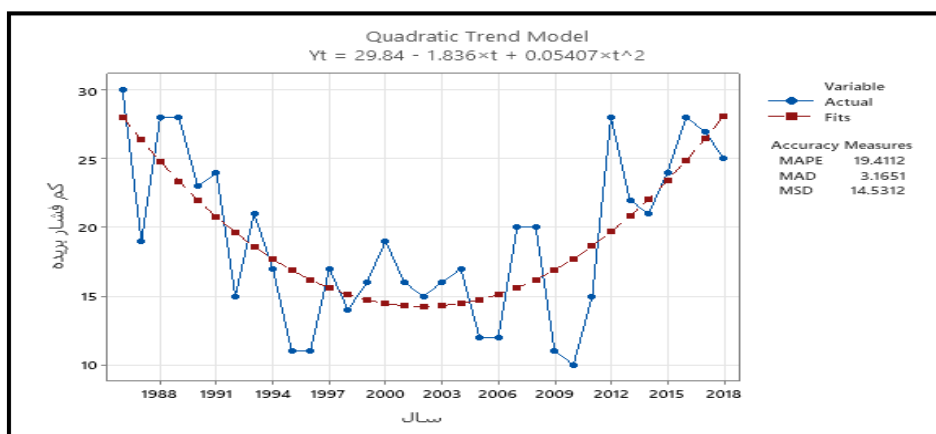
جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون سن بررسی ناهنجاری دمای تراز دریا در سطح خطای $0/05$ درصد

پارامتر	دوره	Z	معناداری در سطح 95%	برآورد شیب سن	کمینه شیب	بیشینه شیب	ثابت شیب خط	کمینه ثابت شیب خط	بیشینه ثابت شیب خط
دما	$2018-1986$	$5/75$	+	$0/018$	$0/014$	$0/021$	$0/26$	$0/35$	$0/20$

۳-۳- تغییرات دمایی سالیانه و تعداد رخداد کم‌فشار بریده در طول دوره تاریخی ($2018-1986$)

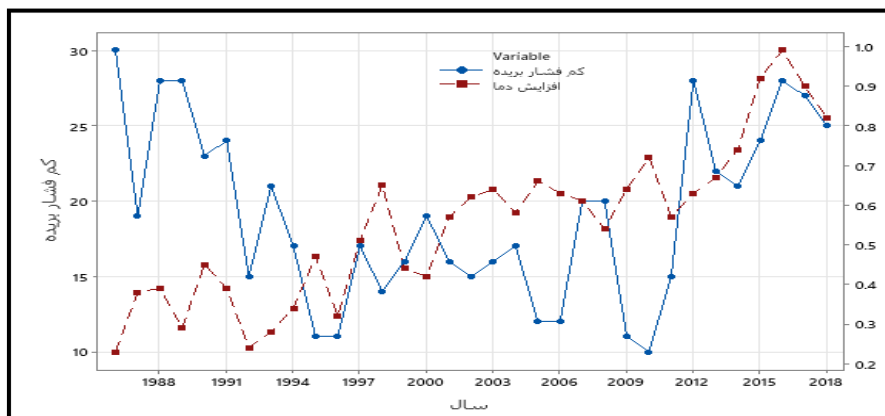
بر اساس بررسی رابطه بین ناهنجاری دما و فراوانی رخداد کم‌فشار بریده همبستگی معناداری بین دو متغیر در دوره 33 ساله تأیید نشد. باین وجود در **شکل (۵)**، ناهنجاری‌های افزایش دمایی و تغییرات تعداد رخداد کم‌فشار بریده مؤثر در بارش سنگین ایران در طول دوره آماری حاکی از وجود کمترین فراوانی رخداد کم‌فشار بریده، در

سال‌های ۱۹۹۶، ۱۹۹۵ و ۲۰۱۰ (۱۰ رخداد)، ۲۰۰۹ (۱۱ رخداد)، و سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ (۱۲ رخداد) بوده است. همچنین بیشترین فراوانی رخداد کم فشار بریده، در سال‌های ۱۹۸۶ (۳۰ رخداد) و ۱۹۸۸، ۱۹۸۹، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵ (۲۸ رخداد) است. لذا در برخی موارد انطباق معکوس بین دو پارامتر دما و فراوانی کم فشارهای بریده مشهود است و با افزایش دما تعداد رخداد کم فشارهای بریده کاهش داشته است. در سال‌های اخیر (یعنی ۲۰۱۵ به بعد) انطباق مستقیم بیشتر بوده و با افزایش دما در سطح منطقه، کاهشی در تعداد رخداد کم فشارهای بریده مشاهده نشده و بالعکس زیاد شده است. که با تحقیقات **مونوز و همکاران^۱ (۲۰۲۰)** که نشان دادند با تغییر اقلیم رخداد کم فشارهای بریده افزایش داشته است مطابقت دارد. برای فراوانی رخداد کم فشارهای بریده در بازه زمانی ۳۳ سال مقادیر آماره استاندارد کندال به میزان $0/031-$ نشان داد که از نظر آماری روند معنادار تأیید نمی‌شود هرچند تغییرات افزایش و کاهش در فراوانی رخدادها مشهود بوده و تابع منحنی درجه دو انطباق بهتری بر توزیع رخدادهای کم فشار بریده داشته و میزان خطای مدل درجه دو نسبت به مدل‌های خطی و نمایی کمتر است (شکل ۵ و ۶).



شکل ۵- برازش نمودار خط روند درجه دوم بر سری زمانی داده‌های فراوانی رخداد کم فشارهای بریده در منطقه

پژوهش ۲۰۱۸-۱۹۸۶ میلادی

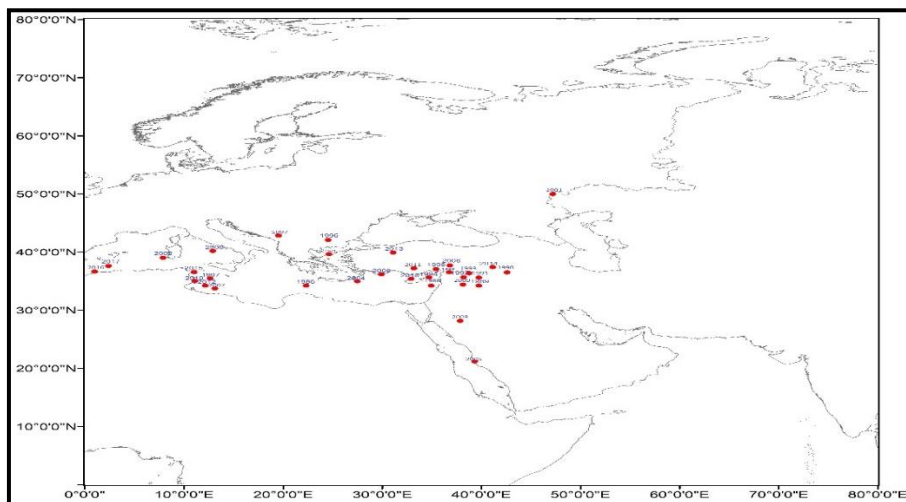


شکل ۶- ناهنجاری میانگین افزایشی دما و تعداد رخداد کم فشار بریده منطقه پژوهش در طول دوره مطالعاتی (۱۹۸۶-۲۰۱۸)

۳-۴- محل شکل‌گیری و مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده موثر در بارش سنگین ایران

۳-۴-۱- اثر تغییر اقلیم در محل شکل‌گیری کم‌فشارهای بریده

شکل (۷) اثر تغییر اقلیم بر مکان شکل‌گیری کم‌فشار بریده در پایین‌ترین عرض جغرافیایی در دوره مطالعاتی را نشان می‌دهد. براساس شکل (۷)، محل تشکیل کم‌فشارهای بریده در طول دوره آماری متغیر بوده و دارای نوسان زیادی در محل تشکیل از لحاظ عرض و طول جغرافیایی بوده است. دوره آماری پژوهش به سه دوره ۱۱ ساله اول تقسیم‌بندی شد. نتایج نشان داد که جنوبی‌ترین و شرقی‌ترین محل تشکیل کم‌فشارهای بریده در ۱۱ ساله اول (۱۹۸۶-۱۹۹۶) به‌طور میانگین در عرض جغرافیایی $37^{\circ}45'$ درجه شمالی و طول $31^{\circ}81'$ شرقی بوده است. در ۱۱ ساله دوم (۲۰۰۷-۱۹۹۷) به‌طور میانگین در عرض $37^{\circ}27'$ شمالی و طول $28^{\circ}45'$ شرقی و در ۱۱ ساله سوم (۲۰۱۸-۲۰۰۸) کم‌فشارهای بریده به‌طور میانگین در عرض جغرافیایی $37^{\circ}27'$ و طول جغرافیایی $21^{\circ}72'$ شرقی تشکیل شده‌اند (شکل ۷). با توجه به ناهنجاری در محل تشکیل کم‌فشارهای بریده در طول دوره آماری به نظر می‌رسد که تغییرات محل تشکیل مراکز کم‌فشار بریده در اثر تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، منجر به کشیده شدن محل تشکیل مراکز به سمت عرض‌های جغرافیایی بالاتر و طول‌های جغرافیایی در جهت غرب شده است. این موضوع می‌تواند در ارتباط با شواهد گسترش پرفشار جنب‌حاره‌ای به سمت عرض‌های بالاتر (لشکری و محمدی، ۱۳۹۴) و در نتیجه، تغییر امتداد کم‌فشارهای بریده در جهت شمالی‌تر و غربی‌تر باشد.

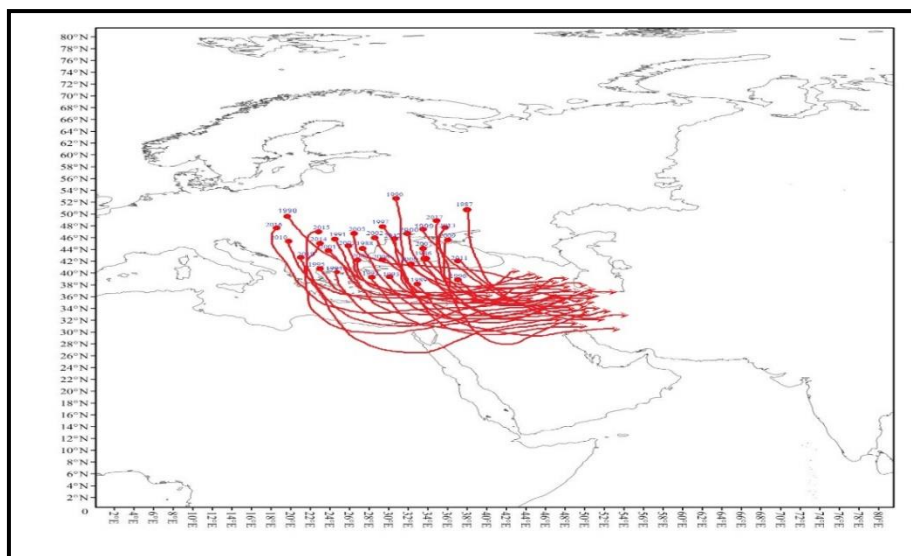


شکل ۷- مکان شکل گیری کم فشار بریده از لحاظ عرض جغرافیایی در طول دوره آماری (۱۹۸۶-۲۰۱۸)

۳-۲- اثر تغییر اقلیم در مسیر حرکت کم فشارهای بریده

محل شکل گیری و مسیر حرکت کم فشارهای بریده در طول دوره آماری (۱۹۸۶-۲۰۱۸) به گونه‌ای است که در ۱۱ سال اول دوره مطالعاتی (۱۹۸۶-۱۹۹۶)، کم فشارهای بریده معمولاً در روی دریای سیاه، شمال شرق و شرق دریای مدیترانه تشکیل شده و در طول مسیر حرکت خود رطوبت دریای سیاه و دریای مدیترانه را از سمت غرب، جنوب غرب و شمال غرب وارد ایران کرده و باعث اغتشاشات جوی و بارش‌هایی در سطح منطقه شده‌اند. در ۱۱ سال دوم (۲۰۰۷-۱۹۹۷)، کم فشارهای بریده عمدتاً در قسمت‌های شمالی دریای سیاه و همچنین شمال دریای مدیترانه تشکیل شده‌اند. و مسیر حرکت آن‌ها به سمت غرب که با عبور از روی دریای مدیترانه همراه بوده رطوبت قسمت‌های مرکزی و شرقی دریای مدیترانه را جذب و در ادامه مسیر حرکت خود از طرف غرب و شمال غرب وارد ایران شده و ایستگاه‌های غربی و شمال غربی کشور را، تحت تأثیر بارش‌های سنگین قرار داده‌اند. در ۱۱ سال سوم (۲۰۰۸-۲۰۱۸)، که افزایش دمای به‌ویژه در سال‌های ۲۰۱۶، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ شدیدتر بوده و نمودار شکل (۴) نیز تأییدکننده این افزایش دمایی شدید در سطح منطقه پژوهش است. کم فشارهای بریده عمدتاً در شمال دریای مدیترانه و غرب دریای سیاه تشکیل شده‌اند و از لحاظ عرض جغرافیایی به سمت عرض‌های بالا و از لحاظ طول جغرافیایی به سمت غرب کشیده شده‌اند. و ایستگاه‌های شمال غرب کشور را بیشتر تحت تأثیر قرار داده‌اند، و در مواردی محدود و در صورت فراهم بودن شرایط اقلیمی حاکم بر منطقه، با حرکت به سمت عرض‌های جغرافیایی پایین و عبور از روی دریای سرخ، رطوبت دریای سرخ را جذب و ایستگاه‌های غرب را متأثر ساخته است. تغییرات محل شکل گیری و مسیر حرکت کم فشارهای بریده نشان داد که در سال‌های اخیر با افزایش دما، پرفشار جنب‌حاره به سمت عرض‌های بالا در قسمت‌های نیمه جنوبی ایران، عراق، عربستان، بخش‌هایی از سوریه و ترکیه، و شمال غرب

آفریقا پیش‌روی کرده (لشکری و محمدی، ۱۳۹۴) و در نتیجه محل تشکیل و هم مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده به سمت عرض‌های جغرافیایی بالای نقل مکان کرده و به نوعی کمتر در ایستگاه‌های جنوب‌غرب و مرکزی ایران تأثیر گذاشته و بیشترین تأثیرات کم‌فشارهای بریده روی ایستگاه‌های غرب و در سال‌های اخیر عمدتاً در ایستگاه‌های شمال‌غرب ایران بوده است.

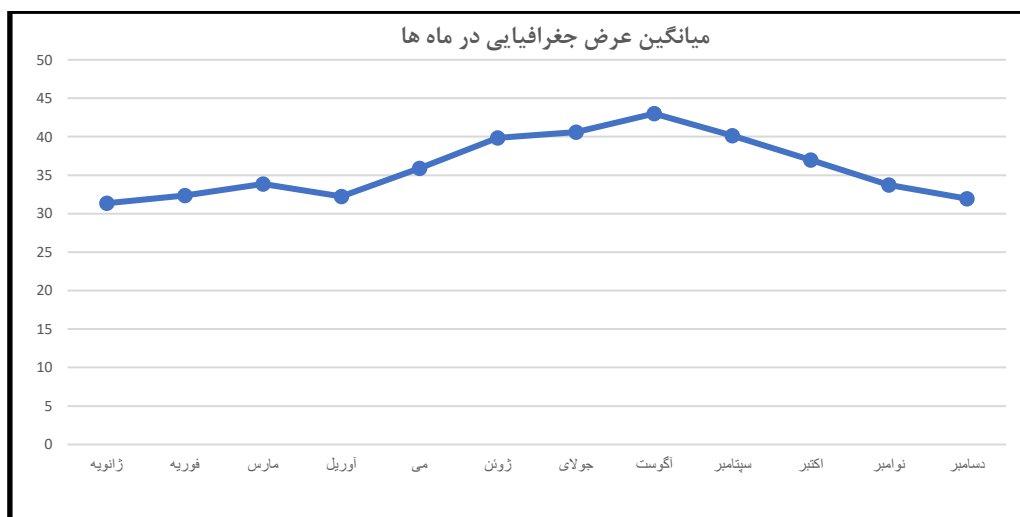


شکل ۸- تغییرات مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده در طول دوره آماری (۱۹۸۶-۲۰۱۸)

۳-۴-۳- تغییرات مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده در ماه‌های مطالعاتی

شکل (۹) تغییرات مکانی مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده در ماه‌های دوره آماری را نشان می‌دهد. براساس نمودار مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده در ماه‌های می، ژوئن، جولای و آگوست تغییرات شدیدی داشته و بیشتر به سمت عرض‌های جغرافیایی بالاتر کشیده شده‌اند. با توجه به تغییرات مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده براساس شکل (۸)، و تغییرات مراکز فشار براساس شکل (۷)، می‌توان گفت که در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و آوریل، هسته پر ارتفاع جنب‌حاره‌ای در روی اقیانوس اطلس شکل گرفته و هنوز گسترش شرق‌سو و بالای روی قابل توجهی نداشته است، بنابراین کم‌فشارهای بریده در عرض‌های بین ۳۰ تا ۳۵ درجه به سمت شرق حرکت کرده‌اند و قسمت‌های جنوب‌غرب و غرب ایران را تحت تأثیر قرار داده‌اند. در ماه می گسترش رو به شرق پر ارتفاع جنب‌حاره‌ای افزایش یافته و بخش‌های زیادی از شمال‌غرب قاره آفریقا، عربستان و عراق را فراگرفته و در ماه ژوئن و جولای زبانه‌هایی از پر ارتفاع به نیمه جنوب و جنوب‌غربی ایران رسیده است، بنابراین در ماه‌های می، ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده به سمت عرض‌های شمالی جابجا شده و بین عرض‌های ۳۵-۴۰ درجه شمالی قرار

گرفته‌اند. با فرا رسیدن فصل پاییز و عقب‌نشینی زبلنه پر ارتفاع جنب‌حاره‌ای به عرض‌های جغرافیایی پایین، کم‌فشارهای بریده در ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر مسیرهای جنوبی‌تر را پیموده و در محدوده عرض‌های بین ۳۰-۳۵ درجه عرض شمالی به سمت غرب و کشور ایران حرکت کرده‌اند.

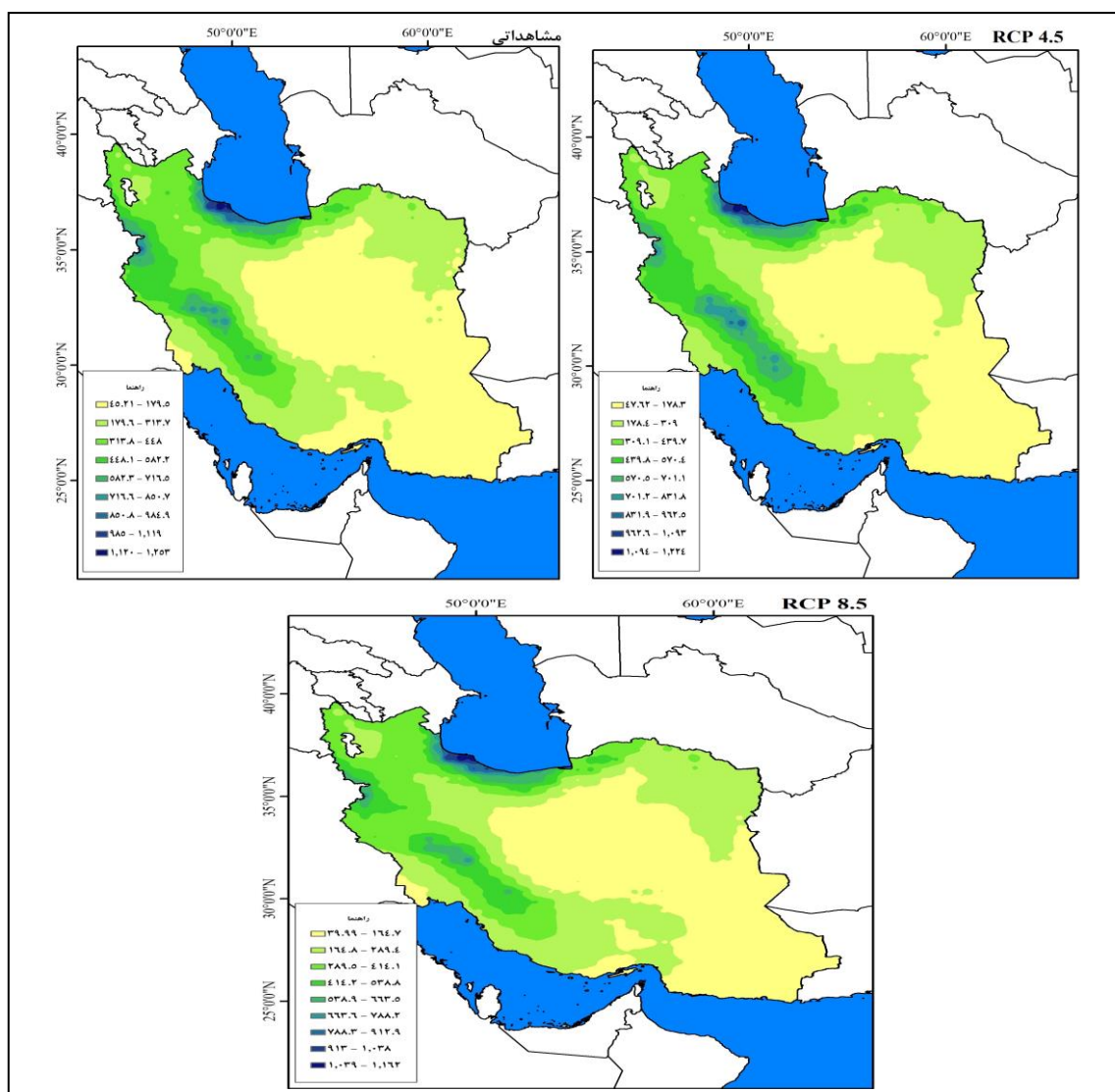


شکل ۹- تغییرات مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده از لحاظ عرض جغرافیایی در ماه‌های سال

۳-۵- تغییرات میزان بارش سالانه ایران در دوره مطالعاتی و دوره آینده

میزان بارندگی سالانه برای دوره تاریخی و پیش‌نگری شده برای دوره آینده برای دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در شکل (۱۰) نشان داده شد. براساس نقشه بارش دوره تاریخی، بیشترین میزان بارش به مقدار ۱۲۵۲ میلی‌متر در قسمت‌های جنوب‌غربی سواحل دریای خزر و کمترین میزان بارش دریافتی در طول دوره مطالعاتی به میزان ۴۵/۲۱ میلی‌متر در نواحی مرکزی، شرقی، جنوب‌شرقی و محدوده خیلی کم در شمال خلیج فارس در استان خوزستان را فرا گرفته است. برای دوره آینده براساس خروجی مدل Cordex در سناریوی RCP4.5 بیشترین میزان بارش دریافتی به مقدار ۱۲۲۴ و کمترین مقدار بارش دریافتی به میزان ۴۷/۶۲ خواهد بود. که نشان می‌دهد مقدار بارش حداقل به میزان ۲/۴۱ میلی‌متر افزایش و در مقابل مقدار بارش حداکثر به میزان ۲۷ میلی‌متر در جنوب‌غرب دریای خزر کاهش خواهد داشت. و در سناریوی RCP8.5 بیشترین میزان بارش دریافتی به مقدار ۱۱۶۲ و کمترین مقدار بارش دریافتی به میزان ۳۹/۹۹ خواهد بود. که نشان‌دهنده کاهش میزان بارش حداقل به مقدار ۵/۲۲ و کاهش بارش حداکثر به میزان ۹۱ میلی‌متر برای دوره آینده خواهد بود. از نظر توزیع مکانی بارش در سناریوی RCP4.5، میانگین بارش (۸۳۱-۹۶۲) میلی‌متر در امتداد زاگرس مرکزی و جنوبی افزایش، ولی در سناریوی RCP8.5 کاهش خواهد داشت. در هر دو سناریو، در زاگرس شمالی میانگین بارش به میانگین (۷۰۱-۸۳۱) میلی‌متر در استان کردستان

کاهش خواهد داشت. همچنین بارش در شرق و شمال دریاچه ارومیه و همچنین بخش‌هایی از استان زنجان و قزوین کاهش خواهد بود. در قسمت‌های شمال‌شرق (خراسان رضوی و جنوبی)، به علت فعالیت و گسترش سامانه پرفشار سیبری و در جنوب‌غرب و جنوب ایران به علت تاثیرات بارشی سیستم کم‌فشار سودانی و دریای سرخ بارش افزایش خواهد داشت. نتایج پژوهش در مورد ناهنجاری‌های بارش در دوره تاریخی و آینده با تحقیقات بلبائیان و همکاران (۱۳۸۸)، دوستان (۱۳۹۸)، گوهاتا کورتا و همکاران (۲۰۱۱)، عساکره و همکاران (۱۳۹۰)، سیدکابلی (۱۳۹۵) مشابهت داشته است.

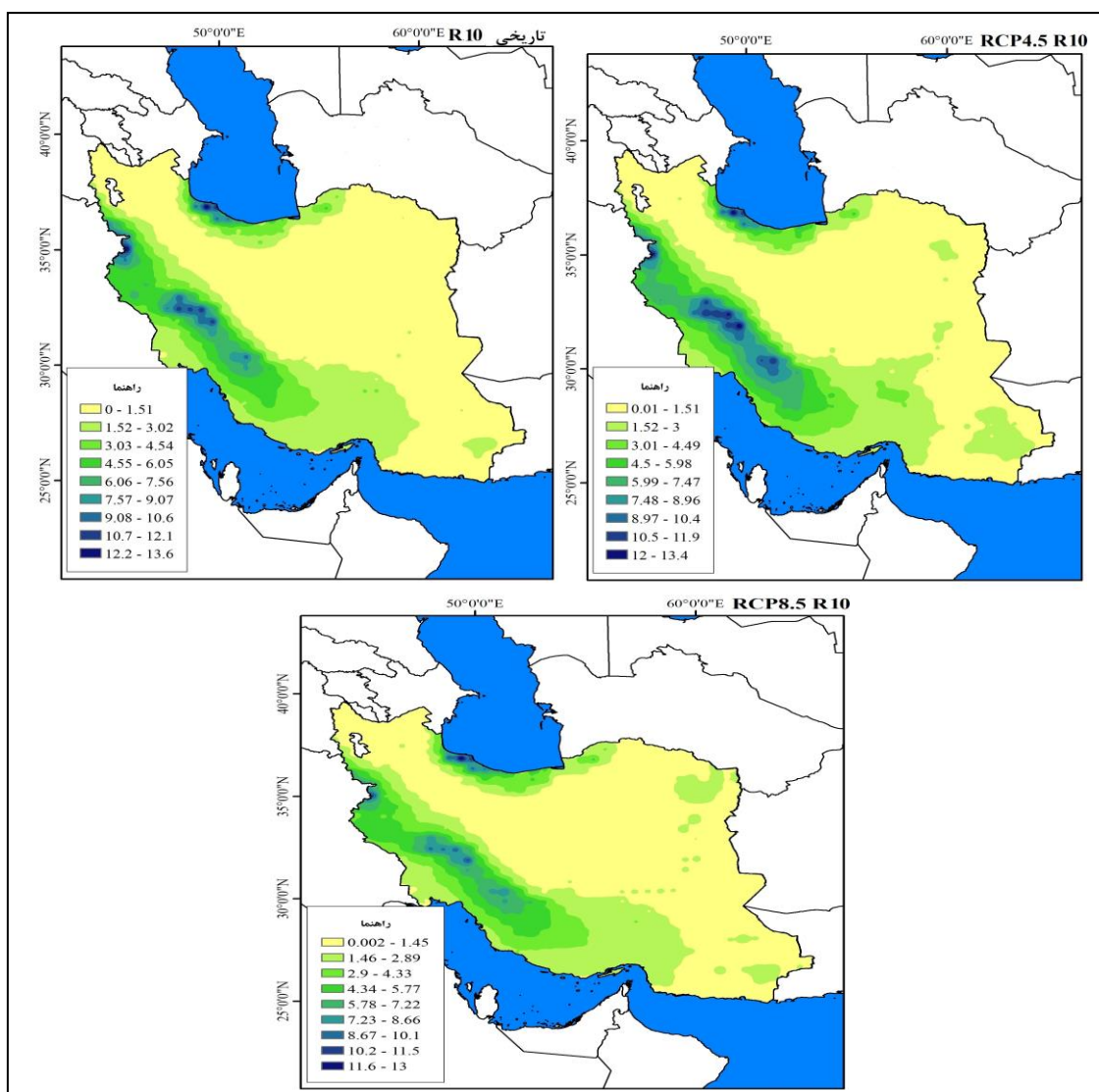


شکل ۱۰- تغییرات میزان بارش سالانه ایران در دوره مطالعاتی (۱۹۸۶-۲۰۱۸) و دوره آینده (۲۰۲۶-۲۰۹۹)

براساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، مدل GFDL-ESM2M پروژه CORDEX

۳-۶- تغییرات میزان بارش سنگین (۱۰ میلی‌متر) در دوره مطالعاتی و دوره آینده

شکل (۱۱) بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر دوره تاریخی (۱۹۸۶-۲۰۱۸) و دوره آینده (۲۰۲۶-۲۰۹۹) را نشان داده است. براساس خروجی cordex در سناریوی RCP4.5 در شمال کشور بارش بالای ۱۰ میلی‌متر بر روی البرز مرکزی گسترش خواهد یافت و حتی به دامنه‌های جنوبی البرز کشیده خواهد شد. در آذربایجان فقط در اطراف قله سهند بارش بالای (۴/۵ - ۵/۹۹ میلی‌متر) خواهیم داشت. در غرب و جنوب غرب ایران به علت افزایش فعالیت کم‌فشار سودانی تأثیرات بارشی در این منطقه محسوس خواهد بود و افزایش بارش‌های سنگین بالای ۱۰ میلی‌متر هم از لحاظ کمیت و هم از لحاظ گستردگی در سطح منطقه محسوس خواهد بود. در چند سال اخیر در اثر تغییرات اقلیمی و تأثیری که این عامل روی سیستم‌های جوی و از جمله بارش‌های موسمی داشته است در جنوب شرق و جنوب ایران شاهد افزایش بارش و به‌ویژه بارش‌های سنگین هستیم. در هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در قسمت جنوب و جنوب شرق در استان‌های هرمزگان، سیستان و بلوچستان، کرمان و فارس میزان و تعداد بارش‌های سنگین و بالای ۱۰ میلی‌متر افزایش خواهند داشت، و این افزایش در استان سیستان و بلوچستان در سطح گسترده‌تر و به صورت محسوس‌تر خواهد بود. در شمال شرق ایران براساس دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بارش‌های سنگین در خراسان رضوی و خراسان جنوبی در آینده رخ خواهد داد. که این مسئله نشان می‌دهد که بارش‌های موسمی و فعالیت پرفشار سیبری در صورت فراهم بودن رطوبت لازم (که از طریق سامانه‌های غربی رطوبت به این منطقه از کشور آورده خواهد شد)، باعث رخداد بارش‌های سنگین در این بخش از کشور خواهد شد. نتایج پژوهش حاضر در مورد بارش سنگین با تحقیقات دوستان (۱۳۹۸)، گوها تاکورتا و همکاران (۲۰۱۱)، خورشید دوست و همکاران (۱۳۹۸)، حجازی زاده و همکاران (۱۳۹۹)، کائو و گانگولی (۲۰۱۱)، رحیمی و همکاران (۲۰۱۸)، وی و همکاران (۲۰۱۸) و رحیمی و فاطمی (۲۰۱۹) مطابقت داشته است.



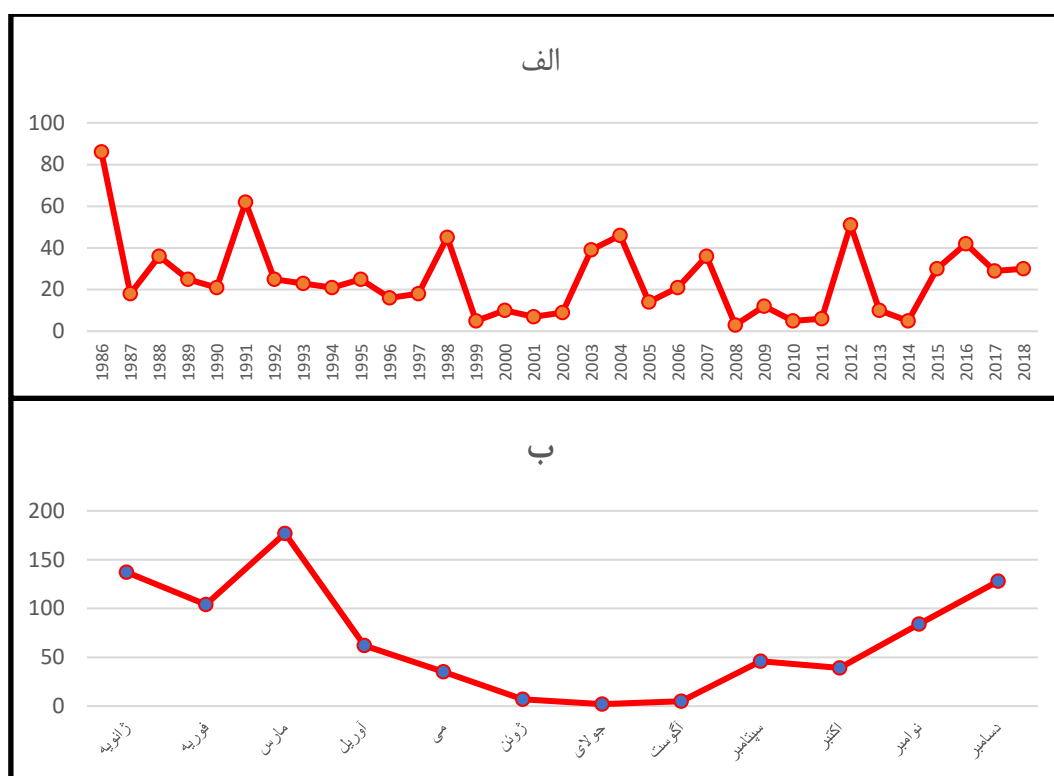
شکل ۱۱- تغییرات میزان بارش سنگین (۱۰ میلی متر) در دوره مطالعاتی (۱۹۸۶-۲۰۱۸) و دوره آینده (۲۰۲۶-۲۰۹۹)

بر اساس سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، مدل GFDL-ESM2M پروژه CORDEX

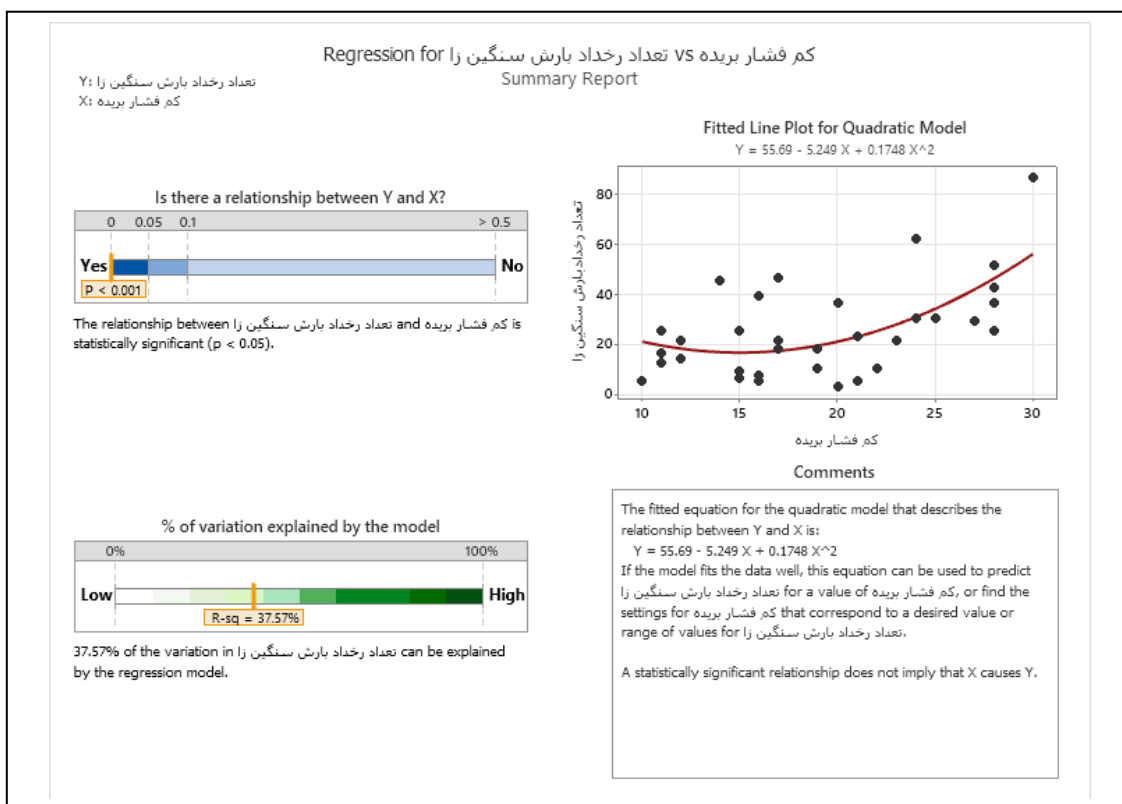
۳-۷- بررسی تعداد رخداد سالانه و ماهانه بارش سنگین حاصل از کم فشار بریده در دوره مطالعاتی (۱۹۸۶-۲۰۱۸)

روند بارش های سنگین حاصل از کم فشارهای بریده در ایستگاه های سینوپتیک مورد پژوهش در طول دوره مطالعاتی نشان داد که با وجود اینکه از نظر آماری روند معناداری در رخداد بارش سنگین در ۳۳ سال تأیید نمی شود اما افت و خیزهایی در رخداد بارش سنگین دیده شد (شکل ۱۲). بررسی رابطه رگرسیون دوجمله ای نشان داد که رابطه مستقیم معناداری بین رخداد کم فشار بریده و بارش سنگین در سطح خطای ۵ درصد تأیید شده است بطوریکه

تغییرات تعداد رخداد کم فشار بریده حدود ۳۷/۵۷ درصد تغییرات رخداد بارش سنگین را تبیین می کند (شکل ۱۳). کانون تشکیل و مسیر حرکت کم فشارهای بریده به سمت عرض های جغرافیایی بالا کشیده شده و از لحاظ تغییرات فشاری و شدت و قدرت به صورت ضعف عمل می کند (شکل ۱۲ الف). ولی در سال های اخیر میزان تأثیر کم فشارهای بریده در بارش سنگین ایستگاه های ایران به ویژه ایستگاه های شمالی چشم گیرتر بوده است و باعث افزایش بارش های سنگین شده است. از لحاظ شرایط تأثیر کم فشارهای بریده در بارش های سنگین ماهانه، ماه های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر به ترتیب با (۱۳۷، ۱۰۴، ۱۷۷ و ۱۲۸) دارای بیشترین تعداد رخداد بارش و ماه های ژوئن (۷)، جولای (۲) و آگوست (۵) دارای کمترین تعداد رخداد و یا تأثیر کمتر کم فشار بریده در رخداد بارش سنگین در طول دوره مطالعاتی بوده است.



شکل ۱۲- الف- تعداد رخداد سالانه کم فشار بریده و ب- فراوانی رخداد ماهانه بارش سنگین حاصل از کم فشار بریده در دوره مطالعاتی (۱۹۸۶-۲۰۱۸)



شکل ۱۳- بررسی رابطه تعداد رخداد بارش سنگین (۱۰ میلی متر) و رخداد کم فشار بریده به روش رگرسیون در دوره تاریخی

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با بررسی تغییرات دمای تراز زمین و فشار تراز سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال با استفاده از مدل GFDL-ESM2M پروژه CORDEX، میانگین دما در سطح منطقه مورد پژوهش در دوره تاریخی و آینده تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۸، ۱۰/۸ و ۱۲/۳ درجه سلسیوس برآورد شد. میانگین دمای (۲۲ - ۲۷) درجه سلسیوس در قسمت‌های جنوبی ایران، بخشی از پاکستان، عربستان، عراق و کشورهای واقع در شمال آفریقا گسترش یافته است. نتایج پژوهش با تحقیق (للیولد^۱ و همکاران، ۲۰۱۶)، که براساس گروهی از مدل‌های CMIP5 تحت شرایط RCP4.5 و RCP8.5 گرمایش آب‌وهوا در فصل تابستان (در ارتباط با تقویت کم‌فشار گرمایی) در خلیج فارس، جنوب آسیا تا دریای مدیترانه را نشان دادند و همچنین تحقیق جلیستروم و همکاران (۲۰۱۸)، که با استفاده از مدل EURO-CORDEX نشان دادند که تغییرات اقلیمی اروپا در دمای میانگین جهانی،

۱/۵ و ۲ درجه سلسیوس بالاتر از شرایط پیش از صنعتی شدن است مطابقت دارد. ناهنجاری‌های فشار سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال در سطح منطقه پژوهش برای دوره تاریخی (۱۹۸۶-۲۰۱۸) و دوره آینده (۲۰۲۶-۲۰۹۹) با سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 حاکی از افزایش میانگین فشار در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 به میزان ۶۱/۵ و ۹۲/۵ میلی‌بار است. از آنجاکه پرفشار جنب‌حاره‌ای در دوره گرم سال منطقه شمال آفریقا و جنوب‌غرب آسیا را تحت تأثیر قرار داده و زبانه‌ای از آن بر روی ایران پدیدار می‌شود (حلییان، ۱۳۸۸) افزایش فشار در منطقه مورد مطالعه می‌تواند شواهدی از جابجایی پرفشار حاره در اثر تغییر اقلیم در منطقه باشد. فراوانی رخداد کم‌فشار بریده مؤثر در بارش سنگین ایران با توجه به ناهنجاری دما در سطح منطقه که مثبت و افزایشی است، در طول دوره آماری روند کاهشی را نشان می‌دهد. کمترین فراوانی رخداد کم‌فشار بریده در سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۹۶ به تعداد ۱۰ رخداد، و بیشترین میزان رخداد در سال‌های ۱۹۸۶ با ۳۰ رخداد بوده است. با افزایش دمای هوا و پیش‌روی پرفشار جنب‌حاره‌ای به سمت عرض‌های بالا، محل تشکیل کم‌فشار بریده در طول دوره آماری به‌ویژه در سال‌های اخیر به سمت عرض‌های بالا کشیده شده است. از نظر تغییرات مسیر حرکت، کم‌فشارهای بریده در ماه‌های می، ژوئن، جولای و آگوست تغییرات شدیدی داشته و بیشتر به سمت عرض‌های جغرافیای بالاتر کشیده شده‌اند. کم‌فشارهای بریده براساس طول عمر به‌ترتیب با عمر متوسط ۳، ۲ و ۴ روز دارای بیشترین تعداد رخداد بوده‌اند. و کم‌فشارهای بریده با عمر بالای ۷ روز خیلی کم و به‌صورت اتفاقی رخ داده‌اند. از لحاظ تغییرات بارش در ایستگاه‌های سینوپتیک ایران در دوره آینده براساس خروجی مدل CORDEX در سناریوی RCP4.5 مقدار بارش حداقل به میزان ۲/۴۱ میلی‌متر افزایش و در مقابل مقدار بارش حداکثر به میزان ۲۷ میلی‌متر در جنوب‌غرب دریای خزر کاهش خواهد داشت. و براساس خروجی مدل CORDEX در سناریوی RCP8.5 کاهش میزان بارش حداقل به مقدار ۵/۲۲ و کاهش بارش حداکثر به میزان ۹۱ میلی‌متر برای دوره آینده خواهد بود. میزان تأثیر کم‌فشار بریده در بارش‌های سنگین کاهش داشته است. و این نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی باعث شده که کانون تشکیل و مسیر حرکت کم‌فشارهای بریده به سمت عرض‌های جغرافیایی بالا کشیده شده و از لحاظ تغییرات فشاری و شدت و قدرت به‌صورت ضعیف عمل کند. ولی در سال‌های اخیر میزان تأثیر کم‌فشارهای بریده در بارش سنگین ایستگاه‌های ایران به‌ویژه ایستگاه‌های شمالی چشم‌گیرتر بوده است و باعث افزایش بارش‌های سنگین شده است. از لحاظ شرایط تأثیر کم‌فشارهای بریده در بارش‌های سنگین ماهانه، ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر به ترتیب با (۱۳۷، ۱۰۴، ۱۷۷ و ۱۲۸) دارای بیشترین تأثیر و ماه‌های ژوئن (۷)، جولای (۲) و آگوست (۵) دارای کمترین تأثیر کم‌فشار بریده در رخداد بارش سنگین در طول دوره مطالعاتی بوده است.

کتابنامه

اشرف، سمیه؛ ۱۳۹۳. *تحلیل هم‌مدیدی سامانه‌های سیل زا در حوضه قره‌سو*، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده ادبیات و علوم انسانی. دانشگاه محقق اردبیلی.

امیدوار، کمال؛ الفتی، سعید؛ اقبالی بآبادی، فریبا؛ مرادی، خدیجه؛ ۱۳۹۲. واکاوی ترمودینامیکی بارش‌های سنگین ناشی از پدیده سردچال در نواحی مرکزی و جنوب غرب ایران در بارش ۱۱ آذر ۱۳۸۷. *فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی*، شماره پنجم، بهار ۱۳۹۲، ص ۱-۱۹.

<https://doi.org/10.22067/geo.v2i1.16881>

امیدوار، کمال؛ صفرپور، فرشاد؛ محمودآبادی، مهدی؛ الفتی، سعید؛ ۱۳۸۹. تحلیل هم‌مدیدی اثرهای سردچال در وقوع بارش‌های شدید در مرکز و جنوب غرب ایران. *مجله برنامه‌ریزی و آمایش فضا*. دوره ۱۴. شماره ۴، صص ۱۶۱-۱۸۹.

<http://hsm.sp.modares.ac.ir/article-21-3422-fa.html>

امیدوار، کمال؛ نارنگی فرد، مهدی؛ محمودآبادی، مهدی؛ فخاری واحد؛ مجتبی؛ ۱۳۹۴. واکاوی ترمودینامیکی و هم‌مدید بارش‌های استثنایی بهاره و نقش ارتفاع ابر در رخداد بارش‌ها در شیراز. *جغرافیای سرزمین*. ۱۲(۴۷)، ۹۳-۱۱۱.

https://journals.srbiau.ac.ir/article_9638.html

بابایی فینی، ام‌السلمه. فرج زاده اصل، منوچهر؛ ۱۳۸۱. الگوهای تغییرات مکانی و زمانی بارش در ایران. *مدرس علوم انسانی*، ۶(۴۶) (پیاپی ۲۷)، ۵۱-۷۰. <https://sid.ir/paper/6948/fa>

باباییان، ایمان؛ نجفی نیک، زهرا؛ زابل عباسی، فاطمه؛ حبیبی نوخندان، مجید؛ ادب، حامد؛ ملبوسی، شراره؛ ۱۳۸۸. ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ میلادی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو. *جغرافیا و توسعه*، ۷ (پیاپی ۱۶)، ۱۳۵-۱۵۲.

<https://doi.org/10.22111/gdij.2009.1179>

بلیانی، سعید؛ سلیقه، محمد؛ ۱۳۹۵. تحلیل و استخراج الگوهای جوی منجر به بارش‌های سنگین روزانه منطقه شمال خلیج فارس مورد مطالعه: حوضه‌های آبریز حله و مند. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. ۳(۲)، ۷۹-۹۸.

<http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jsaeh.3.2.79>

پروین، نادر؛ ۱۳۹۶. بررسی مرکز تغییرات تراز میانی جو مؤثر بر روزهای خشک در حوضه آبریز زاب کوچک با استفاده از PCA. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، سال هفدهم، شماره ۴۶، پاییز ۹۶، صفحه ۲۳-۴۳. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22287736.1396.17.46.6.6>

حاجی خانی، نسیم؛ ۱۳۹۷. نقش سردچال‌های جوی عرض‌های میانه در تداوم بارش‌های روزانه غرب ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده ادبیات و علوم انسانی. دانشگاه رازی.

حجازی زاده، زهرا؛ حلبیان، امیرحسین؛ کربلانی درئی، علیرضا؛ طولابی نژاد، میثم؛ ۱۳۹۹. واکاوی تغییرات مقادیر حدی بارش در گستره ایران زمین. *مخاطرات محیط طبیعی*. جلد ۷، شماره ۲۳، ص ۱۳۵-۱۵۰.

<https://doi.org/10.22111/jneh.2019.29874.1519>

حجازی زاده، زهرا؛ جعفرپور، زین العابدین؛ پروین، نادر؛ ۱۳۸۶. بررسی و شناسایی الگوهای سینوپتیکی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مولد سیلاب‌های مخرب و فراگیر سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، جلد ۷، شماره ۱۰. صص ۱۲۵-۱۵۵.

<http://jgs.khu.ac.ir/article-1-545-fa.html>

حلیان، امیرحسین؛ ۱۳۸۸. تحلیل همبند ارتباط پرفشار آזור با دماهای بیشینه ایران. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی. شماره ۹۶. صص ۵۱-۷۸. https://www.sid.ir/fa/VEWSSID/J_PDF/553139010008.pdf

حمزه سرکانی، میترا؛ ۱۳۹۷. بررسی پدیده تغییر اقلیم در منطقه خاورمیانه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی. حیدری منفرد، زهرا؛ ۱۳۹۲. تحلیل آماری و سینوپتیکی بارش تگرگ در منطقه شمال غرب ایران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده ادبیات و علوم انسانی. دانشگاه زنجان.

خورشیددوست، محمدعلی؛ رضایی بنفشه، مجید؛ خرم آبادی، فرحناز؛ رشیدی حسن آبادی، اسماعیل؛ ۱۳۹۸. بررسی تغییرات بارش‌های حدی در ایران مرکزی، چهارمین کنفرانس معماری، مهندسی عمران، کشاورزی و محیط زیست، <https://civilica.com/doc/1000406>

خوش اخلاق، فرامرز؛ احمدی، نعمت؛ کریمی احمدآباد، مصطفی؛ ۱۳۹۸. واکاوی همبند اثر گرمایش جهانی بر روند دمای ترازهای جوّی در ایران. اطلاعات جغرافیایی، ۲۸(۱۰۹)، ۲۱۱-۲۲۲. magiran.com/p1985802. دارند، محمد؛ ۱۳۹۳. شناسایی تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیل، تاوایی و فشار تراز دریای الگوهای گردش جوی غالب مؤثر بر اقلیم ایران زمین. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی (پژوهش‌های جغرافیایی)، ۴۶(۳)، صص ۳۷۴-۳۴۹.

<https://doi.org/10.22059/jphgr.2014.52136>

دوستان، رضا؛ ۱۳۹۸. تحلیلی بر تغییرات بارش در ایران. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی ۱۳-۲۵. https://clima.irimo.ir/article_113829.html دوستکامیان، مهدی؛ میر موسوی، حسین؛ ستوده، فاطمه؛ ۱۳۹۵. بررسی و تحلیل الگوی فضایی تغییرات درون دهه‌ای بارش‌های سنگین و فوق سنگین ایران، جغرافیا و برنامه ریزی محیطی پاییز ۱۳۹۵ - شماره ۶۳، ۲۰، صص ۸۶-۶۷. <https://doi.org/10.22108/gep.2017.97958>

راستی، فاطمه؛ امیدوار، کمال؛ ۱۳۹۳. تحلیل همبندی اثر سردچال در وقوع شدیدترین بارش مشهد طی دوره آماری ۴۹ ساله (۱۳۴۰ - ۱۳۸۹). دومین همایش ملی پژوهش‌های کاربردی در جغرافیا و گردشگری.

<https://civilica.com/doc/413510>

رضایی، حسین؛ ۱۳۹۶. نقش کم‌فشارهای بریده در بارش ایران. رساله دکتری آب و هواشناسی. دانشکده جغرافیا. دانشگاه تهران.

سیدکابلی، حسام؛ ۱۳۹۵. عدم قطعیت مقادیر شدت-فراوانی بارش‌های حداکثر در اثر تغییر اقلیم آتی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). تحقیقات منابع آب ایران ۱۲ (۱۲)، ۱۰۳-۹۳.

<https://www.virascience.com/article/131355>

شفیعی، شهاب؛ ۱۳۹۵. بررسی آستانه بارش‌های حدی (فرین) و واکاوی همبستگی الگوهای مؤثر بر وقوع آن‌ها در غرب ایران. رساله دکتری آب و هواشناسی (مخاطرات محیطی). پردیس علوم انسانی و اجتماعی. دانشگاه یزد. عساکره، حسین. رزمی، رباب؛ ۱۳۹۰. اقلیم‌شناسی بارش شمال غرب ایران. مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۲۵، ص ۱۵۸ - ۱۳۷. <https://doi.org/10.22111/gdij.2011.514>

عساکره، حسین؛ ۱۳۹۰. مبانی اقلیم‌شناسی آماری. انتشارات دانشگاه زنجان. لشکری، حسن؛ محمدی، زینب؛ ۱۳۹۴. اثر موقعیت استقرار پرفشار جنب حاره ای عربستان بر سامانه های بارشی در جنوب و جنوب غرب ایران. نشریه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. بهار ۱۳۹۴. شماره ۹۱. ص ۷۳-۹۰.

<https://doi.org/10.22059/jphgr.2015.53679>

ناصری، نرگس؛ ۱۳۹۶. تأثیر سامانه بلاکینگ بر بارش‌های ایران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی. دانشگاه فردوسی مشهد.

- Abatzoglou, John T. 2016. Contribution of Cutoff Lows to Precipitation across the United States. *Journal of applied Meteorology and Climatology* Volume55. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-15-0255.1>
- Aich V, Akhundzadah N A, Knuerr A, Khoshbeen A J, Hattermann F, Paeth H, Scanlon A, Nora Paton E. 2015. Climate Change in Afghanistan Deduced from Reanalysis and Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX), South Asia Simulations, *Climate*, Vol 5 (38): pp 1-25.
- Alijani B. 2011. Spatial analysis of the critical temperatures and daily precipitation in Iran. *Journal of Geographical Sciences and Applied Research* 11(20): 1–29. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-593-fa.html>
- Almazorei, R. E., H. O. Hygen, R. van Dorland, J. Cook, D. Nuccitelli, 2015, Agnotology: Learning from Mistakes, *Earth Systems Dynamics*, Vol. 4, pp. 451-505.
- Asakereh. H. 2008. Spatio - Temporal Changes of Iran Inland Precipitation during Recent Decades. *Geography and Development Iranian Journal*. 5(10). pp. 145-164.
- Buckley BW, Leslie LM, Sullivan W, Leplastrier M, Qi L. 2007. A rare East Indian Ocean autumn season tropical cut-off low: impacts and a high-resolution modelling study. *Meteorol Atmos Phys* 96:61-84.
- Darand, M. 2014. Analysis of variations in extreme temperature and precipitation in Oromieh indices as the signs of climate change. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(2), 1-29.
- Davies JM. 2006. Tornadoes with cold core 500-mb lows. *Wea. Forecasting*, 21, 1051–1062, <https://doi.org/10.1175/WAF967.1>
- Davis JC. 1998. *Statistics and data Analysis in geology* :2nded. New Yourk:John, wily&sons. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0497.1>
- Favre A, Hewitson B, Tadross M, Lennard C, Mota R. 2012. Relationships Between CutOff Lows and The Semiannual and Southern Oscillations, *Climate Dynamics*, Vol. 38, pp. 1473-1487
- Ferreira, R.N. Cut-Off Lows and Extreme Precipitation in Eastern Spain: Current and Future Climate. *Atmosphere* 2021, 12, 835. <https://doi.org/10.3390/atmos 12070835>

- Griffiths M, Reeder MJ, Low DJ, Vincent RA. 1998 Observations of a cut-off low over southern Australia. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1109–1132, <https://doi.org/10.1002/qj.49712454805>
- Guhathakurta. P. Sreejith. O.P. Menon. P.A. 2011. Impact of climate change on extreme rainfall events and flood risk in india. *Journal of Earth system science*. 120(3). pp. 359-373.
- Hirota NY, Takayabu N, Kato M, Arakane S. 2016. Roles of an atmospheric river and a cutoff low in the extreme precipitation event in Hiroshima on 19 August 2014. *Mon.Wea. Rev.*, 144, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0299.1>
- Homar V, Gaya M, Ramis C. 2001. A synoptic and mesoscale diagnosis of a tornado outbreak in the Balearic Islands. *Atmos. Res.*, 56, 31–55, [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(00\)00087-9](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(00)00087-9)
- IPCC. 2022. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change The Working Group III report provides an updated global assessment of climate change mitigation progress and pledges, and examines the sources of global emissions. It explains developments in emission reduction and mitigation efforts, assessing the impact of national climate pledges in relation to long-term emissions goals.
- Kao, S. C., & Ganguly, A. R. 2011. Intensity, duration, and frequency of Precipitation Extremes under 21st-century warming scenarios. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, <https://doi.org/10.1029/2010JD015529>
- Kendall M.G. 1975. Rank Correlation Methods, Griffin, London.
- Kjellström E, Nikulin G, Strandberg G, Christensen OB, Jacob D, Keuler K, Lenderink G, van Meijgaard E, Schär C, Somot S, Sørland SL, Teichmann C, Vautard R. 2018. European climate change at global mean temperature increases of 1.5 and 2° C above pre-industrial conditions as simulated by the EURO-CORDEX regional climate models. *Earth Syst Dyn* 9(2):459–478. <https://doi.org/10.5194/esd-9-459-2018>.
- Lelieveld J, Proestos Y, Hadjinicolaou P, Tanarhte M, Tyrllis E, Zittis G. 2016. Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21st century, *Climatic Change*, 137(1-2), 245- 260.
- Lu, J., C. Deser, and T. Reichler., 2009, Cause of the widening of the tropical belt since 1958, *Geophys Research. Letters*, 36, L03803, <https://doi.org/10.1029/2008GL036076>
- Mann, H. B, 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica. Journal of the Econometric Society*, 245-259.
- Mohr S, Coauthors. 2020. The role of large-scale dynamics in an exceptional sequence of severe thunderstorms in Europe May–June 2018. *Wea. Climate Dyn.*, 1, 325–348, <http://dx.doi.org/10.5194/wcd-1-325-2020>
- Munoz, Cristian. Schultz, David. Vaughan, Geraint. 2020. A Midlatitude Climatology and Interannual Variability of 200- and 500-hPa Cut-Off Lows. *American Meteorological Society*. For information regarding reuse of this content and general copyright information, consult the AMS Copyright Policy (www.ametsoc.org/PUBSReuseLicenses). Page(s): ۲۲۰۱–۲۲۲۲
- Nieto R, Gimento L, Torre L, Ribera P, Gallego D, Herrera R, Garcia J, Nunez M, Redano A, Lorente J. 2005. Climatological features of Cutoff Low Systems in the Northern Hemisphere, *Journal of Climate*, Volume 18, PP 3085-3103.
- Palmén E, Newton C. 1969. Atmospheric Circulation Systems, Academic Press, <http://n2t.net/ark:/85065/d789173b>
- Porcu F, Carrassi A, Medaglia CM, Prodi F, Mugnai A. 2007. A study on cut-off low vertical structure and precipitation in the Mediterranean region. *Meteorol Atmos Phys* 96:121–140.

- Rahimi, M. , Mohammadian, N. , Vanashi, A. Whan, K., 2018. Trends in Indices of Extreme Temperature and Precipitation in Iran over the Period 1960-2014.
- Rahimi, M., & Fatemi, S. S. 2019. Mean versus Extreme Precipitation Trends in Iran over the Period of 1960–2017. *Pure and Applied Geophysics*, 1-19. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-019-02165-9>
- Riley E. Dunlap, Aaron M. McCright 2010. Climate change denial: sources, actors and strategies."Routledge handbook of climate change and society.
- Schumacher RS, Johnson RH. 2008. Mesoscale processes contributing to extreme rainfall in a midlatitude warm-season flash flood. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 3964–3986, <https://doi.org/10.1175/2008MWR2471.1>
- Seko HM, Kunii S, Yokota T, Tsuyuki T. 2015. Ensemble experiments using a nested LETKF system to reproduce intense vortices associated with tornadoes of 6 May 2012 in Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 2, 42, <https://progearthplanet.sci.springeropen.com/articles/10.1186/s40645-015-0072-3>
- Sen PK. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*. 63. Pp 1379-1389.
- Seyed Kaboli. H. 2016 .Uncertainty of extreme rainfall intensity and frequency under future climate change impact: Khorasan-Razavi province. *IR-WRR*. 12(2). pp. 93-103.
- Singleton A, Reason T. 2007. A numerical model study of an intense cutoff low pressure system over South Africa. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 1128–1150, <https://doi.org/10.1175/MWR3311.1>
- Taljaard, J. (1985), Cut-off lows in the South African region, South African Weather Bureau Technical Paper14.
- Tibaldi S, Molteni F. 1990. On the operational predictability of blocking. *Tellus*, 42A, 343-365.
- Tsuboki K, Ogura Y. 1999. A potential vorticity analysis of thunderstorm-related cold lows (in Japanese). *Tenki*, 46, 453–459.
- Tsuji, Hiroki Takayabu, Yukarin. 2019. Precipitation Enhancement via the Interplay between Atmospheric Rivers and Cutoff Lows. American Meteorological Society. For information regarding reuse of this content and general copyright information, consult the AMS Copyright Policy (www.ametsoc.org/PUBSReuseLicenses). Vol. 147, Iss. 7, (Jul 2019): 2451-2466. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0358.1>
- Warnatzsch EA, Reay DS. 2019. Temperature and precipitation change in Malawi: Evaluation of CORDEX-Africa climate simulations for climate change impact assessments and adaptation planning. *Science of the Total Environment*, 654, 378-392.
- Wei, P., Shi, J., Cui, L., & Zhang, B. (2018). Spatio-temporal characteristics of extreme precipitation in East China from 1961 to 2015. *Meteorologische Zeitschrift*. <http://dx.doi.org/10.1127/metz/2018/0849>
- Zhao S, Sun J. 2007. Study on cutoff low-pressure systems with floods over Northeast Asia. *Meteor. Atmos. Phys.*, 96, 159–180, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00703-006-0226-3>.