

Investigation of the Spatiotemporal Correlation of the Impact of Teleconnection Patterns on Temperature and Precipitation Variations in West and Northwest Iran: The 1987–2022 Period

Masoud Jalal¹ | Bahareh Batmani² | Ehsan Soureh³

1. Assistant professor of Geography University of Zanjan

2. Ph.D. Student in Climatology, Faculty of humanities, University of zanjan, zanjan, Iran

3. Ph.D. Student in Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Article Info:

Article type:

Research Article

Date:

Received: 2025.05.31

Received: 2025.06.28

Accepted: 2025.07.01

Published:

Keywords:

Teleconnection patterns, Canonical Correlation Analysis, North Atlantic Oscillation, Arctic Oscillation, Multivariate ENSO Index, West and Northwest Iran

Abstract: Precise elucidation of the dynamic interactions between large-scale atmospheric circulation patterns and hydro-climatic variability in mountainous and semi-arid regions is a prerequisite for environmental risk management. This study was conducted to investigate the correlation of the North Atlantic Oscillation (NAO), Arctic Oscillation (AO), and Multivariate ENSO Index (MEI) with temperature and precipitation in western and northwestern Iran over the period 1987–2022. Data from 20 synoptic stations were processed using Pearson correlation, Canonical Correlation Analysis (CCA), and Inverse Distance Weighting (IDW) spatial modeling. Pearson results indicated that the highest positive correlation of temperature was with MEI (0.21), while the highest negative correlation of precipitation was with NAO (−0.19). Although linear correlations were weak (mostly <0.20), canonical analysis revealed a significant and non-linear climatic response. The highest canonical correlation coefficients were recorded at Ardabil (0.266), Mahabad (0.232), and Khoy (0.231). Precipitation, with a canonical loading of −0.78, exhibited the highest influence from NAO (particularly at Sarab and Maku), whereas temperature, with a canonical loading of 0.64, was mainly controlled by MEI (notably at Sanandaj). Negative canonical loadings at Sardasht and Jolfa indicated a distinct circulation mechanism. The impact of teleconnections in western Iran is a function of synergy with Zagros topography, creating a spatial gradient from the north (dominated by NAO/AO) to the south (dominated by MEI).

Cite this article: Jalal, M, Batmani, B, Soureh, E. (2025). Investigation of the Spatiotemporal Correlation of the Impact of Teleconnection Patterns on Temperature and Precipitation Variations in West and Northwest Iran: The 1987–2022 Period. *Climat Chenge and Climat Disasters*, 4(7), 161-197.

© The Author(s).

Homepage: cccd.znu.ac.ir

Publisher: University of Zanjan.



Extended Abstract

Objective

In mountainous and semi-arid regions, hydroclimatic variability is governed by complex interactions between large-scale atmospheric circulation patterns and local factors. This study aims to analyze the spatial-temporal correlation of three major teleconnection indices – North Atlantic Oscillation (NAO), Arctic Oscillation (AO), and the Multivariate ENSO Index (MEI) – with temperature and precipitation variables in western and northwestern Iran over the period 1987–2022.

Methodology

Monthly temperature and precipitation data from 20 selected synoptic stations across East Azerbaijan, West Azerbaijan, Kurdistan, Ardabil, and Zanjan provinces were used. Monthly NAO, AO, and MEI indices were obtained from the NCEP/NCAR database. Pearson correlation coefficient was first computed in SPSS to assess linear relationships. Subsequently, Canonical Correlation Analysis (CCA) was applied to evaluate

multivariate associations between the set of teleconnection indices and climatic variables. Finally, spatial distribution maps of correlation coefficients were generated using Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation in ArcGIS Pro.

Results

Pearson correlations revealed weak (mostly <0.20) and predominantly negative linear relationships with monthly temperature, while precipitation correlations were weak but positive. Canonical correlation analysis, however, demonstrated a statistically significant and nonlinear climatic response across the region. The highest canonical correlation coefficients were recorded at Ardabil (0.266), Mahabad (0.232), and Khoy (0.231). Canonical loadings revealed a two-core spatial pattern: NAO with very high loadings (Sarab 0.955, Maku 0.954) dominated northern and central areas, whereas MEI (Sanandaj 0.841, Ahar 0.812) was the primary climate driver in southern and western cores. At the border stations of Sardasht and Jolfa, all canonical loadings were negative, indicating a

distinct rotational mechanism and heightened sensitivity to negative phases of all indices.

Conclusion

The influence of teleconnection patterns in western and northwestern Iran is not uniform; rather, it depends on dynamic synergy with the Zagros topography, producing a spatial gradient from a northern domain (dominated by NAO/AO) to a southern domain (dominated by MEI). These findings underscore the

necessity of moving beyond station-based and linear analyses toward spatial-canonical modeling and integrated index use for seasonal forecasting and water/agriculture resource management in the region.

Keywords: Teleconnection patterns, Canonical correlation analysis, North Atlantic Oscillation, Arctic Oscillation, Multivariate ENSO Index, Western and Northwestern Iran.



بررسی همبستگی فضایی و زمانی تأثیر الگوهای دورپیوندی بر تغییرات دما و بارش غرب

و شمال غرب ایران: دوره‌ی ۱۹۸۷-۲۰۲۲

مسعود جلالی^۱ | بهاره باتمانی^۲ | احسان سوره^۳

۱. استادیار گروه جغرافیای دانشگاه زنجان

۲. دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، دانشکده علوم انسانی - دانشگاه زنجان- زنجان- ایران

۳. دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

اطلاعات مقاله:

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ‌ها:

دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۰

انتشار:

واژگان کلیدی:

الگوهای پیوند از دور، تحلیل همبستگی کانونی، نوسان اطلس شمالی، نوسان قطبی، شاخص چندمتغیره‌ی انسو، غرب و شمال غرب ایران

چکیده: تبیین برهم‌کنش‌های دینامیکی میان الگوهای گردش جوی کلان‌مقیاس و تغییرپذیری هیدروکلیماتیک در مناطق کوهستانی و نیمه‌خشک، پیش‌شرط مدیریت ریسک محیطی است. این پژوهش با هدف واکاوی همبستگی شاخص‌های نوسان اطلس شمالی (NAO)، نوسان قطبی (AO) و شاخص چندمتغیره انسو (MEI) با دما و بارش در غرب و شمال غرب ایران (۱۹۸۷ تا ۲۰۲۲) انجام شد. داده‌های ۲۰ ایستگاه سینوپتیک با آزمون پیرسون، تحلیل همبستگی کانونی و مدل‌سازی IDW پردازش گردید. نتایج پیرسون نشان داد بیشترین همبستگی مثبت دما با MEI (۰/۲۱) و بیشترین همبستگی منفی بارش با NAO (۰/۱۹-) بوده است. اگرچه همبستگی‌های خطی ضعیف (غالباً کمتر از ۰/۲۰) بودند، تحلیل کانونی پاسخ اقلیمی معنادار و غیرخطی را آشکار ساخت. بیشترین ضریب همبستگی کانونی در اردیبهیل (۰/۲۶۶)، مه‌باد (۰/۲۳۲) و خوی (۰/۲۳۱) ثبت شد. بارش با بار کانونی ۰/۷۸- بیشترین تأثیرپذیری را از NAO (به‌ویژه در سراب و ماکو) و دما با بار کانونی ۰/۶۴- عمدتاً تحت کنترل MEI (به‌ویژه در سنج) داشت. بارهای منفی در سردشت و جلفا، سازوکاری متمایز نشان داد. تأثیر دورپیوندی‌ها در غرب ایران تابعی از هم‌افزایی با توپوگرافی زاگرس بوده و گرادیان فضایی شمال (تحت سلطه NAO/AO) به جنوب (تحت سلطه MEI) ایجاد کرده است.

استناد: جلالی، مسعود، باتمانی، بهاره، سوره، احسان. (۱۴۰۴). بررسی همبستگی فضایی و زمانی تأثیر الگوهای دورپیوندی بر تغییرات دما و بارش غرب و شمال غرب ایران: دوره‌ی ۱۹۸۷-۲۰۲۲. دگرگونی‌ها و مخاطرات آب و هوایی، ۴(۷)، ۱۶۱-۱۹۷.

© نویسندگان .

Homepage: cccd.znu.ac.ir

ناشر: دانشگاه زنجان



۱. مقدمه

تغییرات اقلیمی جهانی ضرورت شناسایی دقیق عوامل اثرگذار بر نوسانات اقلیمی را دوچندان کرده است. در این میان، الگوهای دورپیوندی (Teleconnections) از مهم‌ترین پدیده‌های جوی به‌شمار می‌روند که تغییر در آن‌ها، ناهنجاری‌های گسترده‌ای در الگوهای بارش و دمای مناطق مختلف جهان ایجاد می‌کند (Goudarzi et al., 2017). ایران با اقلیم عمدتاً خشک و نیمه‌خشک (Salehi et al., 2020)، به شدت تحت تأثیر این متغیرهای مقیاس بزرگ قرار دارد. این الگوها با تبیین اثر ناهنجاری‌های جوی دوردست بر شرایط منطقه‌ای، نوسانات دمایی و بارشی بخش‌های وسیعی از نیمکره شمالی را کنترل می‌کنند (Ghanghermeh et al., 2015). مطالعات پیشین در ایران، از جمله ارزیابی همبستگی بارش در حوضه‌های اصلی، بر

اهمیت این نمایه‌ها به عنوان

پیش‌بینی‌کننده‌های کلیدی در مقیاس حوضه‌ای تأکید داشته‌اند (Helali et al., 2022). بررسی‌ها نشان می‌دهد شاخص‌هایی نظیر نوسان اطلس شمالی (NAO)، نوسان قطبی (AO) و الگوهای اقیانوسی، همبستگی معناداری با پارامترهای اقلیمی ایران، به‌ویژه در مناطق غربی و شمال‌غربی دارند (Ghavidel Rahimi et al., 2014; Mousavi Baygi et al., 2008). مفهوم دورپیوندی که نخستین بار توسط Walker (1924) مطرح شد، به همبستگی ناهنجاری‌های اقلیمی در فواصل طولانی اشاره دارد. اگرچه این مفهوم قدمت زیادی دارد، اما بهبود کیفیت مشاهدات هواشناسی از دهه ۱۹۸۰ میلادی، امکان شناسایی دقیق‌تر این شاخص‌ها را در تروپوسفر فراهم آورده است (Pavlovic Berdon, 2013). درک دقیق تغییرپذیری بارش و دما برای

مدیریت منابع آب، کشاورزی و کاهش خسارات ناشی از رویدادهای حدی مانند خشکسالی و سیل حیاتی است (Zhang et al., 2021). استفاده از شاخص‌های پیوند از دور در مدل‌های پیش‌بینی، دقت تحلیل متغیرهای پیچیده اقلیمی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد (Helali et al., 2022). با توجه به تأثیر مستقیم نوسانات دمایی و بارشی بر امنیت غذایی و منابع آب در مناطق کوهستانی (Ghanghermeh et al., 2015)، واکاوی جامع همبستگی فضایی و زمانی این الگوها در غرب و شمال‌غرب ایران از اهمیت علمی و کاربردی بسزایی برخوردار است. این پژوهش در پی آن است تا با تبیین رفتار دینامیکی این شاخص‌ها، گامی در جهت توسعه راهبردهای تطبیقی در برابر تغییرات اقلیمی منطقه بردارد.

در راستای واکاوی پیوند میان الگوهای گردش بزرگ مقیاس و تغییرپذیری‌های اقلیم منطقه‌ای، مطالعات متعددی در سال‌های اخیر انجام شده است؛ چنان‌که Halali et al. (2020)، در بررسی همبستگی بارش پاییزی ۳۰ حوضه آبریز ایران با هشت شاخص پیوند از دور، نقش کلیدی و تعیین‌کننده‌ی نمایه‌های گرمسیری و فراگرمسیری، به‌ویژه MEI و NAO^۱، را در کنترل و پیش‌بینی بارش‌های این فصل در مناطق غربی، جنوبی و شرقی اثبات کردند. در ادامه‌ی این پژوهش‌ها، Halali et al (2022) با بهره‌گیری از مدل‌های هوشمند یادگیری ماشین جهت شبیه‌سازی بارش فصلی در پهنه‌ی ایران، دریافتند که رژیم بارشی زمستانه عمده‌تاً تحت کنترل شاخص‌های NAO و AO قرار دارد، در حالی که بارش‌های بهاره بیشترین تأثیرپذیری را از شاخص‌های MEI و NAO نشان می‌دهند.

¹. Multivariate ENSO Index

هم‌زمان، Amir et al (2022) با به‌کارگیری آزمون جزئی من-کندال (PMK^1) و ضریب همبستگی پیرسون در استان بلوچستان پاکستان، بر وجود ارتباط معنادار میان شاخص‌های NAO، AO و ENSO-MEI با بارش‌های ماه‌های دسامبر و ژانویه تأکید ورزیدند. در سطحی گسترده‌تر، Rebi et al (2023) با استفاده از روش پیشرفته‌ی تحلیل انسجام موجک (WTC^2) در شمال پاکستان، الگوهای AO، ENSO³ و IOD⁴ را به عنوان متغیرهایی با بالاترین همبستگی در تبیین نوسانات بارش مناطق کوهستانی معرفی نموده و در مقابل، از ضعف ارتباط شاخص‌هایی چون NAO و PDO⁵ در آن منطقه سخن گفتند. نهایتاً، Santos et al (2023) با تحلیل شاخص ناهنجاری بارش

(RAI⁶) در شمال شرق برزیل از طریق روش همبستگی متقاطع موجک، نقش متمایز و با اهمیت الگوهای جهانی MEI و NAO را در کنترل تغییرپذیری بارش نواحی خشک و نیمه‌خشک در مقیاس‌های بین‌سالانه و ده‌ساله مورد تأیید قرار دادند که مجموع این یافته‌ها، چارچوبی روش‌شناختی و منسجم برای درک عمیق‌تر پیوندهای دورپیوندی و نوسانات اقلیم منطقه‌ای فراهم می‌آورد.

تمایز بنیادین و نوآوری روش‌شناختی این پژوهش در مقایسه با مطالعات پیشین، در تلفیق رویکرد آماری با تحلیل‌های دقیق فضایی در بستر سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS⁷) و تمرکز مقیاس بر ناحیه‌ی هیدروکلیماتیک حساس غرب و شمال‌غرب ایران است. برخلاف

⁵. Pacific Decadal Oscillation

⁶. Rainfall Anomaly Index

⁷. Geographic Information System

¹. Partial Mann-Kendall

². Wavelet Coherence

³. El Niño-Southern Oscillation

⁴. Indian Ocean Dipole

سیگنال‌های اقلیمی و درک رفتار ناهمگن این پدیده‌ها در سطح منطقه را فراهم آورده و خلأ موجود در تحلیل‌های فضایی دقیق مطالعات پیشین را پوشش می‌دهد.

۲. داده‌ها و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

محدوده‌ی مطالعاتی این پژوهش، منطقه‌ای حیاتی در غرب و شمال‌غرب ایران را در بر می‌گیرد که شامل شهرهای اصلی استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، کردستان، اردبیل و زنجان است. این منطقه از نظر عرض جغرافیایی از حدود ۳۵ درجه و ۱۸ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی و از نظر طول جغرافیایی از حدود ۴۵ درجه و ۰۸ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۷ دقیقه شرقی گسترده شده است. این منطقه به دلیل قرارگیری در عرض‌های شمالی و مجاورت با رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز، از یک‌سو متأثر از سیستم‌های

پژوهش‌های گذشته که عمدتاً با رویکردی کلی‌نگر بر تمام حوضه‌های آبریز کشور مانند (Halali et al (2020, 2022 یا با تمرکز بر تکنیک‌های مدل‌سازی پیش‌بینانه

و تحلیل‌های طیفی موجک مانند [Rebi et al \(2023\)](#) انجام شده‌اند، مطالعه‌ی حاضر

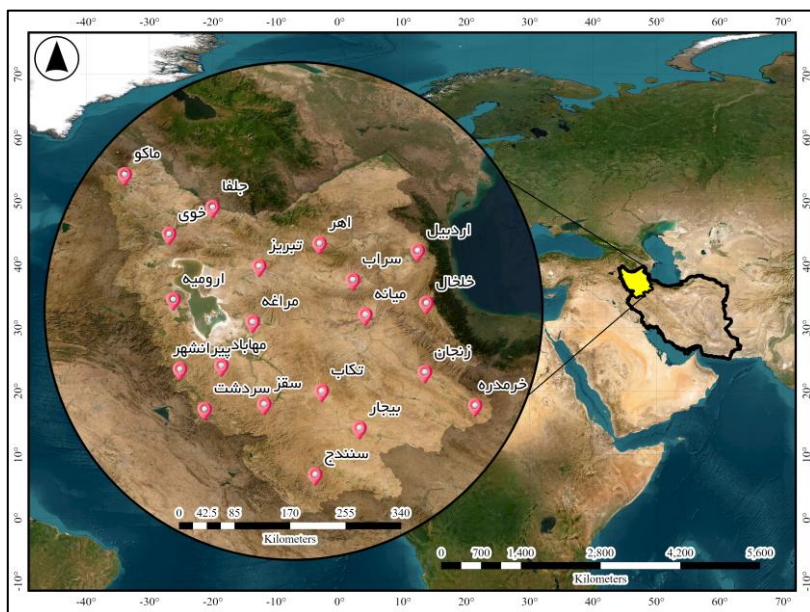
با بهره‌گیری از داده‌های ایستگاهی به‌روزرسانی شده تا سال ۲۰۲۲ و به‌کارگیری تکنیک درون‌یابی^۱ وزندهی فاصله‌ی معکوس (IDW^۲)، فراتر از همبستگی‌های صرفاً زمانی گام برداشته است. این پژوهش با ترسیم نقشه‌های همبستگی فضایی، الگوی توزیع مکانی و تغییرات جغرافیایی شدت ارتباط میان شاخص‌های پیوند از دور (AO، NAO، MEI) و پارامترهای توأمان دما و بارش را به صورت بصری و کمی واکاوی می‌کند؛ رویکردی که امکان شناسایی دقیق کانون‌های جغرافیایی پاسخ‌دهنده به

^۱. Interpolation

^۲. Inverse Distance Weighting

بارشی مدیترانه‌ای و دریای سیاه و از سوی دیگر متأثر از الگوهای گردش کلان‌مقیاس شمالی (مانند NAO و AO) و حاره‌ای (مانند MEI) است. علاوه بر این، ناهموازی‌های شدید و نوسانات ارتفاعی در بستر توپوگرافی زاگرس، منجر به تغییرپذیری مکانی قابل‌توجهی در اقلیم منطقه شده است؛ به‌طوری‌که طیفی از اقلیم کوهستانی مرطوب (قابل مشاهده در ایستگاه‌های نوار مرزی نظیر سردشت و

پیرانشهر) تا اقلیم نیمه‌خشک سرد (در دشت‌های مرتفع داخلی نظیر بیجار و تکاب) در این محدوده شکل گرفته است. این تنوع فضایی بالا، تحلیل دقیق ارتباط میان الگوهای دورپیوندی و پارامترهای اقلیمی (دما و بارش) را در این بستر جغرافیایی ناهمگن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌سازد. شکل (۱) محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: محدوده مورد مطالعه (غرب و شمال غرب ایران)

۲.۲. داده‌ها

ایستگاه‌های مورد مطالعه شامل نام شهر و

مختصات دقیق طول و عرض جغرافیایی را نمایش می‌دهد. این ایستگاه‌ها یک توزیع مکانی گسترده از دامنه‌های کوهستانی تا نواحی دره‌ای منطقه را پوشش می‌دهند، که امکان تحلیل‌های دقیق فضایی-زمانی را فراهم می‌سازد.

به منظور انجام تحلیل‌های همبستگی و تعیین تأثیر الگوهای دورپیوندی بر اقلیم منطقه‌ای، داده‌های دما و بارش ۲۰ ایستگاه سینوپتیک و اقلیم‌شناسی اصلی واقع در منطقه‌ی غرب و شمال‌غرب ایران انتخاب گردید. جدول (۱)، مشخصات جغرافیایی

جدول ۱: مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
اردبیل	۴۸/۴۲	۳۸/۳۳	خوی	۴۷	۳۸/۵۶
ارومیه	۴۵/۰۶	۳۷/۶۶	زنجان	۴۸/۵۲	۳۶/۶۶
اهر	۴۷/۰۷	۳۸/۴۳	سراب	۴۷/۵۳	۳۷/۹۳
بیجار	۴۷/۶۲	۳۵/۸۹	سردشت	۴۵/۴۹	۳۶/۱۵
پیرانشهر	۴۵/۱۵	۳۶/۷	سقز	۴۶/۳۱	۳۶/۲۲
تبریز	۴۶/۲۴	۳۸/۱۲	سنندج	۴۷/۰۱	۳۵/۲۵
تکاب	۴۷/۱	۳۶/۴	ماکو	۴۴/۳۹	۳۹/۳۸
جلفا	۴۵/۶	۳۸/۹۳	مراغه	۴۶/۱۵	۳۷/۳۵
خرمدره	۴۹/۲۱	۳۶/۲	مهاباد	۴۵/۷۲	۳۶/۷۵
خلخال	۴۸/۵۴	۳۷/۶۱	میانه	۴۷/۷	۳۷/۴۵

منطقه‌ای در غرب و شمال‌غرب ایران

می‌پردازد. در این راستا، سه شاخص کلیدی دورپیوندی یعنی نوسان اطلس شمالی (NAO)، نوسان قطبی (AO) و

۳.۲. روش‌ها

مطالعه حاضر با روش آماری-تحلیلی به بررسی ارتباط میان شاخص‌های بزرگ‌مقیاس جوی و مؤلفه‌های اقلیمی

شاخص چندمتغیره‌ی انسو (MEI) به عنوان سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس جوی انتخاب شدند. و آمار ماهانه‌ی آن‌ها از پایگاه داده‌های اقلیمی NCEP/NCAR دریافت و مورد استفاده قرار گرفت. علت انتخاب این سه الگو، نقش کلیدی آن‌ها در هدایت سامانه‌های بارشی مدیترانه‌ای، تنظیم محور جت‌اسکرین جنب‌مداری و کنترل نفوذ توده‌های هوای سرد قطبی به عرض‌های میانی است که مستقیماً اقلیم مناطق کوهستانی غرب ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند. شاخص‌های NAO و AO به دلیل پیوند مستقیم با نوسانات فشار در عرض‌های بالا و کنترل شدت بادهای غربی انتخاب شدند؛ در حالی که شاخص MEI به عنوان نماینده‌ی برهم‌کنش‌های اقیانوس-جو در مناطق حاره‌ای، جهت واکاوی اثر نوسانات اقیانوس آرام بر اقلیم میان‌عرض‌ها برگزیده شد. به منظور ارزیابی ارتباط خطی میان این الگوهای دورپیوندی با متغیرهای دما و بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه، از ضریب همبستگی پیرسون و نیز ضریب کانونی (برای تعیین قوی‌ترین ارتباط خطی میان مجموعه‌ی متغیرها) در محیط نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد. این همبستگی‌ها به‌صورت ماهانه مورد بررسی قرار گرفتند تا تأثیرات همزمان و تأخیری الگوهای یادشده بر اقلیم منطقه تعیین شود. در نهایت، پس از انجام محاسبات آماری، داده‌های خروجی به نرم‌افزار ArcGIS Pro منتقل شدند و با استفاده از روش درونیایی وزن‌دهی فاصله‌ی معکوس (IDW)، نقشه‌های فضایی نهایی طراحی و تهیه شدند.

نوسان اطلس شمالی (NAO) به عنوان یکی از مهم‌ترین الگوهای دورپیوندی نیمکره شمالی، بر اساس اختلاف فشار سطح دریا بین پرفشار جنب‌حاره‌ای آזור و کم‌فشار زیرقطبی ایسلند تعریف و محاسبه می‌شود (Cullen et al., 2002). این

نوسان یک شاخص نرمال شده است که به ویژه در فصل زمستان، تأثیر قدرتمندی بر الگوی گردش جوی و اقلیم مناطق گسترده‌ای از آمریکای شمالی، شمال آفریقا، شمال آسیا و اروپا دارد (Tabari & Willems, 2016). نوسان اطلس شمالی (NAO) که نخستین بار توسط گیلبرت واکر در سال ۱۹۲۴ به عنوان ناهنجاری فشار تراز دریا بین آزور و ایسلند معرفی گردید، مهم‌ترین حالت تغییرپذیری جوی در اقیانوس اطلس شمالی محسوب می‌شود (Walker, 1924). این پدیده بیانگر یک نوسان دینامیکی در جرم جو بین مراکز عمل پرفشار جنب‌حاره (واقع در پونتا دلگادا، آزور) و کم‌فشار قطبی (واقع در ریکیاویک و استکهلم) است که نقش کلیدی در کنترل اقلیم آمریکای شمالی و اوراسیا دارد (Wallace & Gutzler, 1981). این نوسان که با اختلاف فشاری بیش از ۱۵ هکتوپاسکال بین دو مرکز

عمل، فازهای مثبت و منفی خود را تعریف می‌کند، منجر به الگوهای اقلیمی متضادی می‌شود؛ به طوری که در فاز مثبت، تقویت پرفشار آزور و عمیق‌تر شدن کم‌فشار ایسلند موجب تشدید بادهای غربی و حاکمیت شرایط سرد و خشک در حوضه مدیترانه و جنوب اروپا می‌گردد و در فاز منفی، این الگوهای اقلیمی معکوس می‌شوند (Salahi et al., 2007). شاخص کمی این نوسان نیز بر اساس اختلاف فشار استاندارد شده سطح دریا بین منطقه آزور و ایسلند محاسبه می‌شود:

$$NAO = P(A) - P(I) \quad (1)$$

که در آن P نشان‌دهنده فشار استاندارد شده سطح دریا بین منطقه آزور A و ایسلند I است.

نوسان قطبی (AO)، که به عنوان مُد حلقوی نیمکره شمالی نیز شناخته می‌شود، یک الگوی بزرگ‌مقیاس از تغییرپذیری

اقلیمی است که مشخصه‌ی آن گردش پادساعت‌گرد بادهای اطراف قطب شمال، تقریباً در عرض ۵۵ درجه شمالی، است. فازهای AO مستقیماً بر نفوذ هوای سرد تأثیر می‌گذارند: در فاز مثبت، حلقه‌ای از بادهای قوی، هوای سرد را در نواحی قطبی محبوس می‌کند؛ اما در فاز منفی، این کمربند بادی تضعیف می‌شود و توده‌های هوای سرد قطبی به سمت عرض‌های میانی آسان‌تر نفوذ کرده و افزایش توفان‌زایی را ممکن می‌سازد. شاخص AO از طریق تصویر کردن الگوی بارگذاری AO (که اولین مُد از تحلیل EOF ارتفاع ۱۰۰۰ میلی‌بار است) بر روی میدان ناهنجاری ارتفاع ۱۰۰۰ میلی‌بار روزانه در محدوده‌ی عرض‌های ۲۰ تا ۹۰ درجه شمالی محاسبه و به‌دست می‌آید (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]). الگوی نوسان شمالگان (AO) به‌عنوان حالت غالب ناهنجاری‌های

ماهانه‌ی ارتفاع سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در نیمکره‌ی شمالی، از عرض جغرافیایی ۲۰ درجه‌ی شمالی به سمت قطب تعریف می‌شود. محاسبه‌ی این شاخص بر پایه‌ی میانگین‌گیری ماهانه انجام می‌پذیرد. با توجه به اینکه شاخص AO بیشترین تغییرپذیری را در فصل سرد سال نشان می‌دهد، عمده‌تأ به‌عنوان الگوی بنیادین در تعیین و تحلیل الگوهای جوی غالب در فصل سرد مورد استفاده قرار می‌گیرد (آروین، ۱۳۹۱).

نوسان جنوبی ال‌نینو (ENSO)، به عنوان یک حالت ناهنجار طبیعی در شرایط اقیانوس-جو اقیانوس آرام حاره‌ای، محرک اصلی ناهنجاری‌های اقلیمی جهانی و منطقه‌ای است و درک وضعیت بی‌درنگ آن برای خدمات اقلیمی و سیاست‌گذاری‌های مرتبط با امنیت غذایی و مدیریت آب ضروری است. شاخص چندمتغیره‌ی ENSO (MEI.v2) که ترکیبی از پنج

دقت بالاتر آن است. این پارامترها شامل فشار سطح دریا (P)، مؤلفه مداری (U) و نصف‌النهاری باد سطحی (V)، دمای سطح دریا (S)، دمای هوای سطحی (A) و پوشش کلی ابر (C) می‌باشند که رابطه تابعی شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$MEI = f(P + U + V + S + A + C) \quad (2)$$

به دلیل تعدد و تنوع عناصر به کار رفته در ساختار شاخص چندمتغیره انسو (MEI)، این شاخص ماهیت پیچیده و به هم پیوسته سامانه جوّی-اقیانوسی انسو را با دقتی برتر نسبت به دیگر شاخص‌ها نمایان می‌سازد. همچنین، کاستی‌های وارد بر شاخص‌هایی همچون شاخص نوسان جنوبی (SOI) — به ویژه در زمینه‌هایی مانند افزودن داده‌های جدید، به‌روزرسانی سری‌های

متغیر اقیانوسی و جوی است، ارزیابی جامعی از ENSO در یک شاخص واحد فراهم می‌کند و شدت و بافت تاریخی شرایط در حال تحول ENSO را نشان می‌دهد. MEI.v2 یک سری زمانی از اولین تابع متعامد تجربی (EOF^1)

ترکیب‌شده پنج متغیر فشار سطح دریا (SLP^2)، دمای سطح دریا (SST^3)، مؤلفه‌های نصف‌النهاری (V) و مداری (U) باد سطحی، و تابش طول موج بلند خروجی (OLR^4) در حوضه‌ی اقیانوس آرام حاره‌ای است (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]). این شاخص به عنوان معتبرترین نمایه‌نویس پدیده انسو محسوب می‌گردد که مزیت اصلی آن نسبت به سایر نمایه‌های انسو (مانند نوسان جنوبی و شاخص‌های ناحیه‌ای نینو) در به کارگیری همزمان شش پارامتر کلیدی و در نتیجه

³. Sea Surface Temperature

⁴. Outgoing Longwave Radiation

¹. Empirical Orthogonal Function

². Sea Level Pressure

مقادیر نزدیک به 1- نشان دهنده‌ی همبستگی معکوس قوی (رابطه‌ی ضد فاز)، و مقادیر نزدیک به صفر نشان دهنده‌ی فقدان همبستگی خطی هستند. محاسبه‌ی این ضریب بر اساس رابطه (۲) انجام می‌گیرد (Lee Rodgers & Nicewander, 1988).

(Nicewander, 1988):

(۲)

در این فرمول، r ضریب همبستگی پیرسون، n تعداد داده‌ها، x_i و y_i مقادیر سری‌های زمانی متغیرها، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ میانگین‌های متغیرهای مربوطه هستند.

۲.۳.۱. تحلیل همبستگی کانونی

(CCA)

در این روش، مجموعه‌ای از متغیرها به‌طور همزمان جهت تبیین تغییرات روابط بین پارامترهای هر یک از مجموعه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند (Wollenberg, 1977). همبستگی کانونی بیش از یک جفت حاصل از ترکیب متغیرها را در مطالعه ارائه می‌کند تا هر کدام از جفت‌ها

زمانی یا مواجهه با داده‌های تصادفی — در مورد شاخص MEI کمتر مصداق دارد. در این شاخص، مقادیر منفی نشانگر فاز سرد انسو (لانینا) و مقادیر مثبت بیانگر فاز گرم آن (ال نینو) هستند. در شکل شماره ۳، سری زمانی شاخص MEI همراه با

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

نوسانات آن ترسیم و ارائه شده است (Khorshiddoost & Qavidel, 2007).

به منظور ارزیابی ارتباط خطی بین تغییرات سری‌های زمانی متغیرهای اقلیمی منطقه‌ای (دما و بارش) و شاخص‌های پیوند

از دور (NAO، AO، MEI)، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. این ضریب یک معیار پارامتری است که قدرت و جهت رابطه‌ی بین دو متغیر را در محدوده‌ی 1- تا 1+ اندازه‌گیری می‌کند. مقادیر نزدیک به 1+ نشان دهنده‌ی همبستگی مستقیم قوی (رابطه‌ی هم فاز)،

ایجاد بردار m بعدی X (متغیرهای پیش‌بین) و بردار P بعدی Y (متغیرهای ملاک)، دستیابی به یک ترکیب خطی از متغیرهای مستقل فراهم گردد که دارای حداکثر همبستگی با یک ترکیب خطی از

متغیرهای وابسته باشد:

(۳)

این معادلات به نحوی انتخاب می‌شوند که به‌ترتیب همبستگی بین V_1 و U_1 در حداکثر مقدار باشد و سپس همبستگی بین جفت‌های بعدی (V_2 و U_2) به‌مراتب کمتر شود؛ از طرف دیگر، هر بُعد نسبت به سایر ابعاد مستقل بوده و هر یک از جفت متغیرهای کانونی بُعد مستقلی از رابطه‌ی بین دو مجموعه‌ی متغیر X و Y را نشان می‌دهند (Liu, 2000; Gardner et al., 2006; Ouarda et al., 2009).

در این پژوهش، برخلاف رویکردهای کلی‌نگر، تحلیل همبستگی کانونی برای هر یک از ۲۰ ایستگاه سینوپتیک به‌صورت

در ارتباط با یکدیگر مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس هر نوع رابطه‌ی موجود از طریق تعیین سهم نسبی هر یک از متغیرها در تابع کانونی استخراج و ارتباط بین مجموعه متغیرها تعیین شود (Hair et

$$A_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_m x_m = dx = X = V_1$$

$$B_1 y_1 + b_2 y_2 + \dots + b_p y_p = bx = Y = U_1$$

al., 1998). ایده‌ی اصلی تکنیک

همبستگی کانونی، پدید آوردن مجموعه‌ای از متغیرهای جدید از طریق دو گروه داده‌های اصلی است که بر اساس آن، متغیرهای جدید شکل گرفته دارای ترکیب خطی و با همبستگی بسیار بالا ظاهر می‌شوند. چنانچه دو مجموعه‌ی داده‌های اصلی تحقیق با عناوین Z و Y مشخص شوند، متغیرهای جدید ایجاد شده در ماتریس با عناوین V و U ظاهر می‌شوند که دارای همبستگی بالایی با همان شاخص هستند (Larson et al., 2000). در واقع هدف همبستگی کانونی این است که با

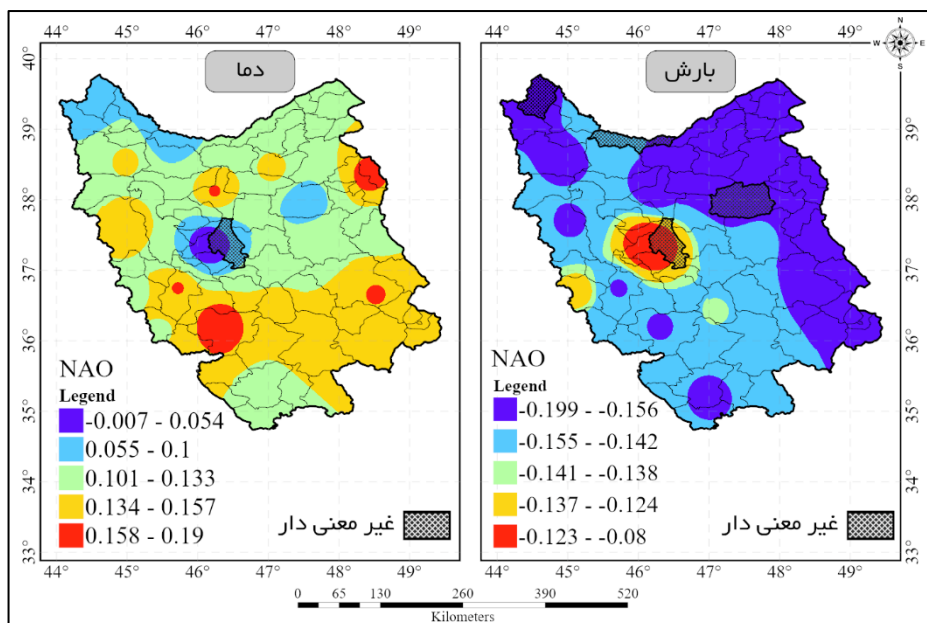
مجزا اجرا گردیده است. علت انتخاب این رویکرد ایستگاه محور، ناهمگنی شدید توپوگرافیک منطقه و نقش تعدیل گر رشته کوه زاگرس است که منجر به واکنش های اقلیمی متفاوت در کانون های جغرافیایی مختلف می شود. این متدولوژی امکان شناسایی دقیق کانون های با حساسیت بالا را فراهم آورده و خروجی ضرایب کانونی هر ایستگاه مبنای مدل سازی فضایی در محیط GIS قرار گرفته است. همچنین جهت بررسی معنی داری آماری جفت متغیرهای کانونی و اعتبار روابط استخراج شده، از آزمون لاندای ویلکس (Wilks' Lambda) استفاده شده است.

۳. یافته ها و نتایج

واکاوی توزیع فضایی ضرایب همبستگی پیرسون میان شاخص نوسان اطللس شمالی (NAO) و بارش در پهنه ی مورد مطالعه، گویای حاکمیت یک الگوی غالباً مثبت اما

ناپیوسته و مکان مند است. بر اساس یافته های کمی، بیشترین میزان همبستگی مثبت در ایستگاه های سقز (۰/۱۹)، اردبیل (۰/۱۷) و ایستگاه های تبریز، زنجان، مهاباد و ارومیه (۰/۱۶) مشاهده می شود که نشان دهنده واکنش نسبی بارش این کانون ها به تغییر فازهای اطللس شمالی است. با این حال، تحلیل نقشه ی پهنه بندی در کنار نتایج آزمون معنی داری، آشکار می سازد که اثرگذاری این شاخص در تمامی پهنه ی یکنواخت نبوده و در بخش هایی از شمال، مرکز و شرق منطقه شامل ایستگاه های ماکو (۰/۰۷)، جلفا (۰/۰۶)، سراب (۰/۰۶) و مراغه (۰/۰۸-)، همبستگی ها از نظر آماری غیرمعنی دار ($P > 0.05$) ارزیابی شده که در نقشه با هاشور متمایز گردیده اند. این ساختار فضایی نشان می دهد که نوسان اطللس شمالی از طریق تعدیل غیرمستقیم مسیر سامانه های مدیترانه ای، نقشی ثانویه در

رژیم بارشی منطقه ایفا می‌کند، به‌طوری‌که بیشترین حساسیت بارشی در امتداد دامنه‌های زاگرس و کانون‌های مرتفع شمالی متمرکز شده و با حرکت به سمت پهنه‌های شرقی و کانون‌های محلی، سیگنال‌های دورپیوندی تضعیف می‌گردد. در مقابل، الگوی توزیع فضایی همبستگی میان شاخص NAO و پارامتر دما، ساختاری منسجم، فراگیر و کاملاً معکوس را به نمایش می‌گذارد که از نظر آماری نسبت به بارش، پایداری بیشتری دارد. نتایج کمی استخراج‌شده نشان می‌دهد که تمامی ضرایب همبستگی دما در سطح منطقه منفی بوده و بیشترین شدت پیوند در ایستگاه اردبیل ($-0/20$) ثبت شده است و پس از آن کانون‌های اهر ($-0/18$)، تبریز و خلخال ($-0/17$) قرار دارند که بیانگر ارتباط ضدفاز قوی بین فازهای این دورپیوندی و نوسانات حرارتی منطقه است. بررسی نقشه‌ی پهنه‌بندی حرارتی حاکی از آن است که به استثنای ایستگاه مراغه ($-0/08$) که با هاشور به عنوان تنها ناحیه غیرمعنی‌دار در این شاخص مشخص شده، سایر بخش‌های منطقه دارای همبستگی‌های معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد هستند. این انسجام فضایی تأیید می‌کند که فاز مثبت NAO با تقویت مراکز فشار و جابه‌جایی توده‌های هوای سرد در عرض‌های بالا، منجر به سرمایش نسبی و ناهنجاری‌های منفی دمایی در پهنه‌ی وسیعی از غرب و شمال‌غرب ایران می‌شود، به‌گونه‌ای که شدت این پاسخ حرارتی در نواحی کوهستانی شمال و غرب منطقه به‌دلیل هم‌افزایی با توپوگرافی، به مراتب محسوس‌تر از نواحی مرکزی است (شکل ۲).



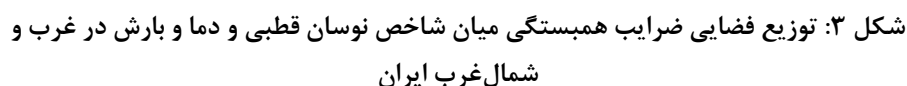
شکل ۲: توزیع فضایی ضرایب همبستگی میان شاخص نوسان اطلس شمالی و دما و بارش در غرب و شمال غرب ایران

ایستگاه‌های سقز (۰/۱۴) و زنجان (۰/۱۳) می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی واکنش منظم‌تر بارش این نواحی به نوسانات فازهای شاخص قطبی است. در مقابل، بخش‌های وسیعی از شمال و مرکز منطقه شامل ایستگاه‌هایی نظیر جلفا (۰/۰۱-)، مراغه (۰/۰۴-)، ماکو (۰/۰۲) و سراب (۰/۰۱) همبستگی‌های بسیار ضعیف و فاقد اعتبار آماری ($P > 0.05$) نشان داده‌اند که در

واکاوی توزیع فضایی ضرایب همبستگی میان شاخص نوسان قطبی (AO) و پارامتر بارش در پهنه‌ی مورد مطالعه، بیانگر وجود یک الگوی فضایی دو بخشی و نسبتاً پراکنده با گرادین کلی شمال به جنوب است. بر اساس یافته‌های کمی استخراج‌شده از جداول آماری، بیشترین میزان همبستگی مثبت و معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد متعلق به

نقشه‌ی پهنه‌بندی با هاشور متمایز گردیده‌اند. تحلیل کیفی نقشه نشان می‌دهد که کانون‌های متمرکز با همبستگی نسبتاً زیاد در جنوب‌شرق و جنوب‌غرب، بر مناطق گذار اقلیمی و گذرگاه‌های اصلی سامانه‌های بارشی تأکید دارند؛ به‌طوری‌که هماهنگی میان فازهای منفی AO و گسترش جریانات غربی به عرض‌های پایین‌تر، موجب تقویت پاسخ بارشی در دامنه‌های جنوبی زاگرس می‌گردد. در بررسی ارتباط فضایی شاخص نوسان قطبی (AO) با مؤلفه‌ی دما، یک الگوی منسجم اما ناهمگون با گرادیان ملایم شرق به غرب آشکار می‌گردد که طی آن، شدت پیوند در نواحی غربی و جنوب‌غربی تقویت شده است. نتایج کمی نشان‌دهنده‌ی غلبه‌ی کامل همبستگی‌های منفی در سطح منطقه است، به‌گونه‌ای که قوی‌ترین پیوند آماری در سطح معناداری ۹۹ درصد در

ایستگاه‌های اردبیل (۰/۱۵-) و اهر (۰/۱۲-) ثبت شده است. بخش وسیعی از پهنه‌ی غربی شامل ایستگاه‌های خوی، ارومیه، سقز و مهاباد با ضریب همبستگی یکسان (۰/۱۱-)، حساسیت بالای حرارتی خود را به تغییرات شاخص قطبی اثبات کرده‌اند. با این حال، کانون‌های محدودی شامل ایستگاه‌های مراغه (۰/۰۰۰) و پیرانشهر (۰/۰۸-) به دلیل تعدیل اثر شاخص توسط مؤلفه‌های محلی نظیر توپوگرافی و وارونگی دما، فاقد معنی‌داری آماری تشخیص داده شده و با هاشور مشخص گردیده‌اند. این ساختار فضایی گویای آن است که نوسانات AO از طریق جابه‌جایی توده‌های هوای غربی و تغییر مسیر سامانه‌های مدیترانه‌ای، نقشی کلیدی در تبیین تغییرات دمایی منطقه، به‌ویژه در دامنه‌های شمالی زاگرس ایفا می‌کند (شکل ۳).

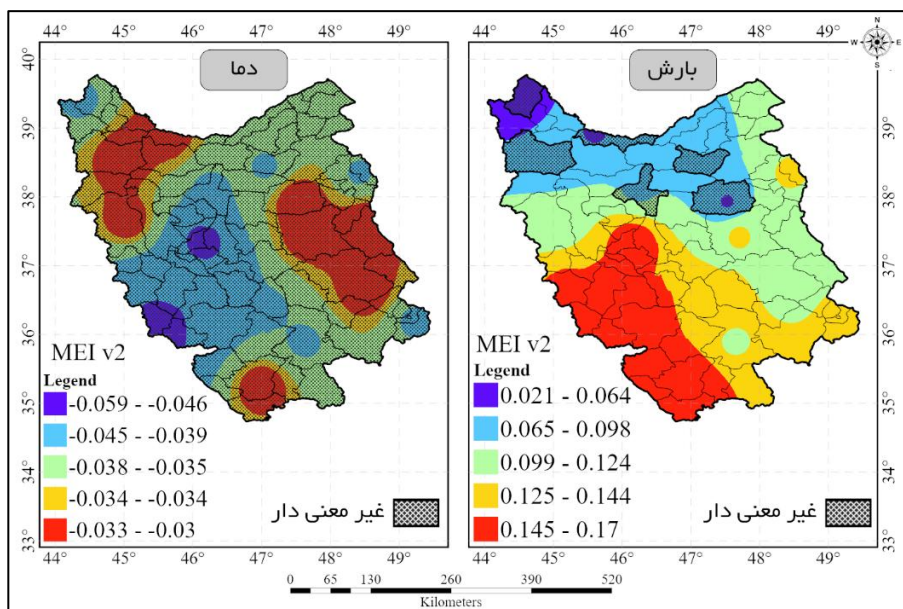


تحلیل توزیع فضایی ضرایب همبستگی میان شاخص MEI v2 و بارش در پهنه‌ی مورد مطالعه، حاکی از وجود یک ساختار منظم و نوارمانند با گرادیان افزایشی مشخص از شمال به جنوب است. بر اساس یافته‌های کمی استخراج شده از جداول آماری، بیشترین میزان همبستگی مثبت و معنادار در کانون‌های جنوبی و جنوب‌غربی

(۰/۱۲) نیز همبستگی‌های معناداری را در سطح ۹۵ درصد ثبت کرده‌اند که بیانگر نقش قابل توجه الگوهای حاره‌ای در تنظیم رژیم بارشی این عرض‌ها است. در مقابل، بخش‌های شمالی و شمال غربی منطقه به دلیل دوری از مسیرهای اصلی انتقال رطوبت حاره‌ای و غلبه‌ی سامانه‌های محلی، همبستگی‌های ضعیف و فاقد اعتبار آماری نشان داده‌اند؛ چنان‌که ایستگاه‌هایی نظیر ماکو (۰/۰۲)، جلفا (۰/۰۶)، تبریز (۰/۰۹) و خوی (۰/۰۹) در نقشه‌ی پهنه‌بندی با پوشش هاشور به عنوان نواحی غیرمعنادار متمایز شده‌اند. این الگوی فضایی تصاعدی اثبات می‌کند که اثر شاخص MEI بر بارش منطقه تابعی از موقعیت جغرافیایی بوده و در نواحی جنوبی‌تر به دلیل تعامل بهینه‌ی نوسانات اقیانوس آرام با سامانه‌های بارشی غربی، پاسخ اقلیمی به مراتب پایدارتر و قوی‌تری بروز می‌یابد. در واکاوی ارتباط فضایی شاخص MEI v2 با پارامتر دما، یک الگوی منسجم اما ناهمگن با ضرایب همبستگی بسیار ضعیف و منفی در کل منطقه آشکار می‌گردد. از منظر کمی، ضرایب استخراج‌شده در محدوده‌ی بسیار محدود منفی ۰/۰۳ تا منفی ۰/۰۶ قرار دارند که نشان‌دهنده‌ی فقدان یک رابطه‌ی خطی معنادار در مقیاس ماهانه میان این دو متغیر است. بر اساس جداول آماری، هیچ‌یک از ۲۰ ایستگاه مورد مطالعه در همبستگی میان دما و شاخص MEI به سطح معناداری آماری ($P>0.05$) نرسیده‌اند که این موضوع در نقشه‌ی پهنه‌بندی با هاشور متراکم در سراسر منطقه به وضوح نمایش داده شده است. بیشترین مقدار همبستگی منفی، هرچند غیرمعنادار، در ایستگاه سردشت (۰/۰۶-) و کمترین مقدار در کانون‌های داخلی و شمالی نظیر سنندج، زنجان، خوی و جلفا (۰/۰۳-) ثبت شده است. تحلیل کیفی این ساختار فضایی حلقوی و پیرامونی نشان

می‌دهد که اثر نوسانات اِنسو بر دمای منطقه تحت‌الشعاع فرآیندهای محلی، توپوگرافی متنوع زاگرس و سایر محرک‌های اقلیمی قرار دارد؛ لذا برخلاف پارامتر بارش، نوسانات حرارتی منطقه در مقیاس زمانی ماهانه پاسخ مستقیمی به

سیگنال‌های حاره‌ای اقیانوس آرام نشان نمی‌دهند و تغییرات دمایی در این بخش از ایران بیشتر تابع مکانیسم‌های انتقال حرارت منطقه‌ای و ویژگی‌های اوروگرافیک ایستگاه‌ها است (شکل ۴).



شکل ۴: توزیع فضایی ضرایب همبستگی میان شاخص چندمتغیره‌ی نوسان جنوبی ال‌نینو و دما و بارش در غرب و شمال‌غرب ایران

جدول (۲) نشان‌دهنده ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های پیوند از دور و پارامترهای اقلیمی است. تحلیل توزیع

فضایی ضرایب همبستگی پیرسون در پهنه‌ی غرب و شمال‌غرب ایران، نشان‌دهنده‌ی پیوندی پیچیده، ناهمگن و

مکان‌مند میان سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس جوی و پارامترهای هیدروکلیماتیک منطقه است. شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO) قوی‌ترین ارتباط معکوس و معنادار را با پارامتر دما در سطح منطقه برقرار کرده است، به‌طوری‌که در تمامی ایستگاه‌ها به‌جز مراغه (۰/۰۸-)، همبستگی منفی در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($P>0.01$) مشاهده می‌شود و بیشینه‌ی این حساسیت حرارتی در ایستگاه اردبیل با ضریب ۰/۲۰- ثبت شده است؛ در مقابل، پیوند این شاخص با بارش، ماهیتی مثبت و معنادار در اکثر کانون‌ها دارد که اوج آن در ایستگاه سقز (۰/۱۹) تجلی یافته است، هرچند در پهنه‌های شمالی و مرکزی شامل ماکو (۰/۰۷)، جلفا (۰/۰۶) و سراب (۰/۰۶) این ارتباط فاقد اعتبار آماری تشخیص داده شده است. شاخص نوسان قطبی (AO) نیز رفتاری مشابه اما با شدت ضعیف‌تر نشان می‌دهد؛ این شاخص اگرچه در تبیین

نوسانات حرارتی اکثر پهنه به‌جز مراغه و پیرانشهر موفق بوده، اما در بخش بارش تنها در کانون‌های محدودی نظیر سقز (۰/۱۴) و زنجان (۰/۱۳) به سطح معناداری ۹۹ درصد رسیده و در سایر بخش‌ها نظیر ماکو (۰/۰۲) و سنندج (۰/۰۵) پیوند ضعیف و غیرمعناداری را به نمایش گذاشته است. در واکاوی اثرات شاخص چندمتغیره‌ی انسو (MEI V2)، یک گرادیان فضایی مشخص در پارامتر بارش مشاهده می‌شود که بر اساس آن، کانون‌های جنوبی و جنوب‌غربی نظیر سنندج و مراغه (۰/۱۷) و سقز و سردشت (۰/۱۶) بالاترین حساسیت معنادار را به سیگنال‌های حاره‌ای نشان می‌دهند، در حالی که با حرکت به سمت شمال و شمال‌شرق در ایستگاه‌هایی نظیر خوی (۰/۰۹)، تبریز (۰/۰۹) و اهر (۰/۰۸)، این سیگنال تضعیف شده و از نظر آماری غیرمعنادار می‌گردد. نکته‌ی حائز اهمیت

در تحلیل نهایی، عدم معناداری آماری ماهانه، رژیم حرارتی غرب ایران بیش از پیوند شاخص MEI با نوسانات دمایی در آنکه تحت تأثیر مستقیم نوسانات اقیانوس کل پهنه‌ی مورد مطالعه است، به‌طوری‌که تمامی ضرایب در محدوده‌ی ۰/۰۳- تا ۰/۰۶- باقی مانده و فاقد معناداری هستند؛ این موضوع بیانگر آن است که در مقیاس

ماهان، رژیم حرارتی غرب ایران بیش از آنکه تحت تأثیر مستقیم نوسانات اقیانوس آرام باشد، تابع سازوکارهای دینامیکی عرض‌های بالا (NAO/AO) و ویژگی‌های توپوگرافیک محلی است.

جدول ۲: ضرایب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های پیوند از دور و پارامترهای اقلیمی

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (LON)	عرض جغرافیایی (LAT)	NAO/P	AO/P	MEI V2/P	NAO/T	AO/T	MEI V2/T
سردشت	۴۵/۴۹	۳۶/۱۵	۰/۱۳**	۰/۰۵	۰/۱۶**	۰/۱۵**	۰/۱۱*	۰/۰۶-
مهاباد	۴۵/۷۲	۳۶/۷۵	۰/۱۶**	۰/۱۰*	۰/۱۵**	۰/۱۶**	۰/۱۱*	۰/۰۴-
پیرانشهر	۴۵/۱۵	۳۶/۷	۰/۱۳**	۰/۰۴	۰/۱۵**	۰/۱۳**	۰/۰۸-	۰/۰۴-
اردبیل	۴۸/۴۲	۳۸/۳۳	۰/۱۷**	۰/۱۱*	۰/۱۳**	۰/۲۰**	۰/۱۵**	۰/۰۴-
ببجار	۴۷/۶۲	۳۵/۸۹	۰/۱۵**	۰/۱۱*	۰/۱۲*	۰/۱۵**	۰/۱۰*	۰/۰۴-
سقز	۴۶/۳۱	۳۶/۲۲	۰/۱۹**	۰/۱۴**	۰/۱۶**	۰/۱۶**	۰/۱۱*	۰/۰۴-
خوی	۴۵	۳۸/۵۶	۰/۱۴**	۰/۱۱*	۰/۰۹	۰/۱۶**	۰/۱۱*	۰/۰۳-
ماکو	۴۴/۳۹	۳۹/۳۸	۰/۰۷	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۱۶**	۰/۱۰*	۰/۰۴-
اهر	۴۷/۰۷	۳۸/۴۳	۰/۱۴**	۰/۱۰*	۰/۰۸	۰/۱۸**	۰/۱۲**	۰/۰۴-
تکاب	۴۷/۱	۳۶/۴	۰/۱۴**	۰/۰۷	۰/۱۴**	۰/۱۴**	۰/۱۰*	۰/۰۴-
چلغا	۴۵/۶	۳۸/۹۳	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۱۵**	۰/۱۰*	۰/۰۳-
سراب	۴۷/۵۳	۳۷/۹۳	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۱۶**	۰/۱۱*	۰/۰۳-
میانه	۴۷/۷	۳۷/۴۵	۰/۱۳**	۰/۰۸	۰/۱۳**	۰/۱۵**	۰/۱۱*	۰/۰۳-
تبریز	۴۶/۲۴	۳۸/۱۲	۰/۱۶**	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۱۷**	۰/۱۱*	۰/۰۴-
ارومیه	۴۵/۰۶	۳۷/۶۶	۰/۱۵**	۰/۱۰*	۰/۱۰*	۰/۱۶**	۰/۱۱*	۰/۰۳-
سنندج	۴۷/۰۱	۳۵/۲۵	۰/۱۱*	۰/۰۵	۰/۱۷**	۰/۱۶**	۰/۱۰*	۰/۰۳-
زنجان	۴۸/۵۲	۳۶/۶۶	۰/۱۶**	۰/۱۳**	۰/۱۲*	۰/۱۶**	۰/۱۱*	۰/۰۳-
خرمدره	۴۹/۲۱	۳۶/۲	۰/۱۴**	۰/۱۰*	۰/۱۳**	۰/۱۶**	۰/۱۰*	۰/۰۴-
خلخال	۴۸/۵۴	۳۷/۳۱	۰/۱۲*	۰/۰۷	۰/۱۱*	۰/۱۷**	۰/۱۱*	۰/۰۳-
مراغه	۴۶/۱۵	۳۷/۳۵	۰/۰۰۸	۰/۰۴	۰/۱۷**	۰/۰۸	.	۰/۰۵-

※: معنی داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد

※: معنی داری در سطح اطمینان ۹۹ درصد

نتایج تحلیل همبستگی کانونی (CCA)^۱ بین مجموعه شاخص‌های پیوند از دور (نوسان قطبی، نوسان اطلس شمالی، و شاخص چندمتغیره‌ی انسو) و متغیرهای اقلیمی منطقه‌ای، وجود یک پیوند خطی معنادار را در سطح کل منطقه‌ی مورد مطالعه تأیید می‌کند؛ به‌طوری که تمامی ضریب‌های همبستگی کانونی محاسبه‌شده، در سطح معنی‌داری آماری ۰/۰۵ قرار دارند. قوی‌ترین ارتباط کلی در ایستگاه‌های اردبیل (با ضریب ۰/۲۶۶)، مهاباد (۰/۲۳۲)، و خوی (۰/۲۳۱) مشاهده شد که نشان‌دهنده بیشترین تبیین‌پذیری اقلیم این نواحی توسط الگوهای کلان‌مقیاس است. با بررسی بارهای کانونی، مشخص می‌شود که نوسان اطلس شمالی (NAO) با بارهایی تا ۰/۹۵۵ (در سراب) و ۰/۹۵۴ (در ماکو)، قوی‌ترین عامل کنترل‌کننده در

اغلب ایستگاه‌های شمالی و مرکزی منطقه (مانند تبریز، ارومیه، زنجان و خلخال) است. در مقابل، تأثیر شاخص چندمتغیره‌ی انسو (MEI) در ایستگاه‌های جنوبی و غربی مانند سنندج (۰/۸۴۱)، اهر (۰/۸۱۲) و پیرانشهر (۰/۷۴۲) برجسته‌تر است. یافته‌ی قابل توجه، بار کانونی بسیار قوی و منفی MEI در مراغه (۰/۹۸۲-) است که بر اهمیت فاز منفی انسو (لانینا) در این ایستگاه تأکید دارد. همچنین، ایستگاه‌های مرزی سردشت و جلفا الگوهای منحصر به فردی را نشان می‌دهند؛ در این دو ایستگاه، تمامی بارهای کانونی دارای علامت منفی هستند که این امر حکایت از یک سازوکار چرخشی متفاوت و حساسیت بالای این مناطق به فازهای منفی شاخص‌های شمالی و حاره‌ای دارد (جدول ۳).

^۱. Canonical Correlation Analysis

جدول ۳: نتایج همبستگی کانونی بین شاخص‌های پیوند از دور و بارش و دما در ایستگاه‌های غرب و شمال غرب ایران

ایستگاه	سطح اطمینان	همبستگی کانونی	بار کانونی MEI	بار کانونی NAO	بار کانونی AO
اردبیل	۰/۰۰۰	۰/۲۶۶	۰/۴۳۶	۰/۸۷۹	۰/۶۰۵
ارومیه	۰/۰۰۲	۰/۲۱۴	۰/۴۳۴	۰/۸۸۲	۰/۵۹۵
اهر	۰/۰۰۱	۰/۲۲۸	۰/۸۱۲	۰/۵۲۹	۰/۶۰۹
پیرانشهر	۰/۰۰۱	۰/۲۱۱	۰/۷۴۲	۰/۶۲۴	۰/۱۷۰
تبریز	۰/۰۰۱	۰/۲۲۷	۰/۳۸۵	۰/۹۱۳	۰/۴۹۳
تکاب	۰/۰۰۱	۰/۲۱۱	۰/۶۲۱	۰/۷۶۸	۰/۴۳۷
جلفا	۰/۰۱۵	۰/۱۸۰	-۰/۳۲۸	-۰/۹۳۵	-۰/۴۸۹
خرمدره	۰/۰۰۱	۰/۲۱۰	۰/۵۲۶	۰/۸۲۸	۰/۵۸۰
خلخال	۰/۰۰۱	۰/۲۰۴	۰/۴۳۵	۰/۸۸۶	۰/۵۶۷
خوی	۰/۰۰۱	۰/۲۳۱	۰/۳۷۸	۰/۸۹۴	۰/۶۷۰
زنجان	۰/۰۰۰	۰/۲۲۷	۰/۴۸۵	۰/۸۲۶	۰/۶۶۰
سراب	۰/۰۱۹	۰/۱۸۱	۰/۲۷۰	۰/۹۵۵	۰/۵۹۲
سردشت	۰/۰۰۰	۰/۲۱۴	-۰/۷۲۴	-۰/۶۷۰	-۰/۳۰۷
سنندج	۰/۰۰۰	۰/۲۱۲	۰/۸۴۱	۰/۵۲۱	۰/۲۴۳
ماکو	۰/۰۱۰	۰/۱۹۷	۰/۲۷۷	۰/۹۵۴	۰/۵۶۶
مراغه	۰/۰۰۵	۰/۱۸۱	-۰/۹۸۲	۰/۱۶۲	۰/۲۶۷
مهاباد	۰/۰۰۰	۰/۲۳۲	۰/۶۰۳	۰/۷۷۷	۰/۵۰۱
میانه	۰/۰۰۲	۰/۲۰۱	۰/۵۷۳	۰/۷۹۴	۰/۵۴۴

می‌کند. این تحلیل نه تنها ضریب

همبستگی کانونی را در ایستگاه‌هایی مانند

اردبیل، مهاباد و خوی در بالاترین سطح

نشان می‌دهد، بلکه با بررسی بارهای

کانونی، الگوی فضایی سلطه‌ی دینامیکی را

به وضوح آشکار می‌سازد؛ به‌طوری که

نوسان اطلس شمالی (NAO) به وضوح

تحلیل همبستگی کانونی (CCA) میان

مجموعه شاخص‌های پیوند از دور (نوسان

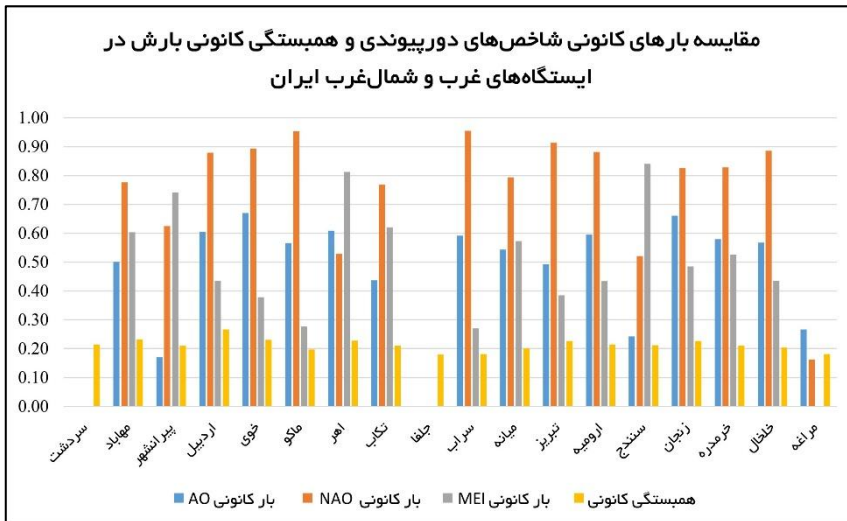
قطبی، نوسان اطلس شمالی، و شاخص

چندمتغیره‌ی انسو) و متغیرهای اقلیمی

منطقه، وجود یک پیوند خطی کاملاً

معنادار را در سطح آماری برای تمامی

ایستگاه‌های غرب و شمال غرب ایران تأیید



شکل ۵: نمودار توزیع ایستگاهی مقادیر همبستگی کانونی بین شاخص‌های پیوند از دور در غرب و شمال غرب ایران

سازوکار چرخشی متمایز و حساسیت بالای این نواحی به فازهای منفی هر سه شاخص است. در مجموع، این نتایج تأیید می‌کنند که الگوهای دور پیوندی، یک نیروی چندکانونی هستند که اثرگذاری آن‌ها تابعی از موقعیت فضایی و ویژگی‌های توپوگرافی ایستگاه‌ها است و الگویی چندکانونی را در غرب و شمال غرب ایران به نمایش می‌گذارد (شکل ۵).

قوی‌ترین عامل در بیشتر ایستگاه‌های منطقه‌ی آذربایجان است، در حالی که نوسانات حاره‌ای شاخص چندمتغیره‌ی انسو (MEI) اهمیت خود را در ایستگاه‌های جنوبی‌تر (مانند سنندج) و در نواحی داخلی‌تر (مانند اهر) افزایش می‌دهد. علاوه بر این، مشاهده‌ی علامت منفی و یکسان تمامی بارهای کانونی در ایستگاه‌های مرزی سردشت و جلفا، نشان‌دهنده‌ی یک

تحلیل کانونی فضایی همبستگی شاخص‌های نوسان اطلس شمالی (NAO) و نوسان قطبی (AO) با متغیرهای اقلیمی که در شکل (۶) آمده است، وجود یک ساختار مکانی منسجم و کانونی را در غرب و شمال غرب ایران تأیید می‌کند که الگوی فضایی AO در آن، به‌طور قابل توجهی شبیه NAO است. این همگرایی ناشی از اثر مشترک این دو شاخص بر جریان‌های غربی، محور جت جنب‌مدیترانه‌ای و الگوهای فشار در عرض‌های میانی شمالی است. کمترین همبستگی در بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی منطقه مشاهده می‌شود، که به دلیل دوری از مسیر اصلی نفوذ سامانه‌های مدیترانه‌ای، تغییرات اقلیمی آن‌ها بیشتر تحت تأثیر فرآیندهای محلی قرار می‌گیرد؛ در حالی که یک نوار همبستگی متوسط از شمال شرق آغاز شده، از مرکز عبور کرده و تا جنوب امتداد می‌یابد که نشان‌دهنده جابه‌جایی محور

جت جنب‌مدیترانه‌ای و پاسخ دووجهی اقلیم منطقه (افزایش بارش و کاهش دما در فاز منفی NAO/AO و برعکس در فاز مثبت) است. قوی‌ترین همبستگی‌ها (نسبتاً زیاد و زیاد) در دو کانون اصلی شمال و جنوب غرب منطقه متمرکز شده‌اند؛ کانون شمالی تحت تأثیر تعامل NAO/AO با سامانه‌های پرفشار شمالی و کانون جنوب غربی در امتداد دامنه‌های زاگرس و مسیر ورودی سامانه‌های مدیترانه‌ای واقع شده است. این الگوی فضایی دوکانونی نشان می‌دهد که شاخص‌های پیوند از دور بزرگ مقیاس همراه با توپوگرافی زاگرس، نقش کلیدی در شکل‌دهی پاسخ اقلیم منطقه ایفا می‌کنند و اثر NAO و AO بر بارش و دما نه به‌صورت ایستگاهی و خطی، بلکه به شکل الگوهای فضایی کانونی با تمرکز در نواحی شمالی و جنوب غربی نمود پیدا می‌کند. تحلیل کانونی فضایی همبستگی شاخص چندمتغیره‌ی انسو

(MEI) با مؤلفه‌های اقلیمی، الگوهای مکانی ناهمگن، کانونی و پیچیده‌ای را در غرب و شمال غرب ایران نشان می‌دهد که پاسخ منطقه به نوسانات ENSO را به صورت فضایی منعکس می‌کند. کمترین همبستگی در لکه‌های پراکنده (مانند بخش‌هایی از جنوب، غرب و شمال) مشاهده می‌شود؛ این امر حاکی از اثر محدود MEI در این نواحی به دلیل نرسیدن مسیرهای اصلی پل جوی ENSO و غلبه‌ی فرآیندهای محلی است. با حرکت از این نواحی به سمت اطراف، همبستگی به تدریج تقویت شده و پهنه‌ای با ارتباط متوسط در شمال غرب، شمال، شرق و مرکز گسترش می‌یابد. این مناطق میانی، تحت تأثیر تعامل MEI با جریان‌های غربی و سامانه‌های مدیترانه‌ای قرار دارند. قوی‌ترین همبستگی‌ها (نسبتاً زیاد و زیاد) در سه کانون اصلی شمال، مرکز و جنوب غرب متمرکز شده‌اند که نشان‌دهنده بیشینه‌ی

پاسخ اقلیم منطقه به نوسانات ENSO است. این الگوهای فضایی، گواهی بر آن است که پاسخ بارش و دما به شاخص MEI غیرخطی، کانونی و وابسته به تعامل میان فرآیندهای دورپیوندی و محلی بوده، و اثر MEI با ترکیب اثر جریان‌های غربی و توپوگرافی زاگرس، تمرکز مکانی پاسخ را در نواحی کوهستانی تقویت کرده است، در حالی که شرق و جنوب شرق منطقه اثرگذاری بسیار کمی دارند. تحلیل کانونی فضایی همبستگی شاخص‌های MEI، NAO، و AO با مؤلفه‌های اقلیمی (بارش و دما) یک پاسخ گسترده، هم‌فاز و کانونی را در اقلیم غرب و شمال غرب ایران نشان می‌دهد. این الگو حاکی از آن است که تغییرات اقلیم در این محدوده به صورت یکپارچه و متأثر از هم‌زمانی و هم‌افزایی اثر شاخص‌های بزرگ مقیاس رخ می‌دهد، نه به شکل پراکنده. در این میان، قوی‌ترین کانون‌ها که دارای همبستگی بالا و بسیار

بالا هستند، در شمال، شمال غرب، مرکز،

می دهد (شکل ۴).

جنوب و جنوب غرب مشاهده می شوند. این

۴. نتیجه گیری

تمرکز اثرات، نشان دهنده تعامل پیچیده‌ی

تبیین دقیق پیوندهای میان نوسانات جوی

فرآیندهای دورپیوندی با دینامیک

کلان مقیاس و متغیرهای هیدروکلیماتیک

جریان‌های غربی و سامانه‌های مدیترانه‌ای

منطقه‌ای، به‌ویژه در پهنه‌های کوهستانی

و اثر تقویت‌شده‌ی توپوگرافی زاگرس است،

و حساس به تغییر اقلیم، گامی بنیادین در

که موجب تمرکز انرژی و رطوبت در این

جهت درک دینامیک‌های پیچیده اتمسفر

نواحی و تقویت پاسخ اقلیمی می‌شود. در

و ارتقای مدیریت ریسک‌های محیطی

مقابل، بخش‌های کوچک و محدود در شرق

است. پژوهش حاضر با هدف واکاوی

و نقاط پراکنده دیگر، دارای پاسخ

ساختار فضایی و زمانی اثر شاخص‌های

ضعیف‌تری هستند که بازتاب تضعیف

نوسان اطلس شمالی (NAO)، نوسان

سیگنال دورپیوندی در مناطقی است که

قطبی (AO) و شاخص چندمتغیره انسو

مسیر مستقیم سامانه‌های جوی بر آن‌ها

(MEI) بر رژیم‌های دما و بارش در

محدود بوده و اثرات محلی نقش غالب را

شمال غرب ایران تدوین شد. ضرورت انجام

ایفا می‌کنند. به این ترتیب، تحلیل کانونی

این تحقیق از آنجا ناشی می‌شود که

فضایی تأکید می‌کند که واکنش اقلیم

مطالعات پیشین عمدتاً بر تحلیل‌های

منطقه به ترکیب شاخص‌ها غیرخطی،

نقطه‌ای یا رویکردهای خطی ساده متمرکز

گسترده و کانونی است و تصویر جامع‌تر و

بوده‌اند و خلأ جدی در شناسایی

دقیق‌تری از رفتار اقلیم منطقه نسبت به

ساختارهای غیرخطی و کانون‌های

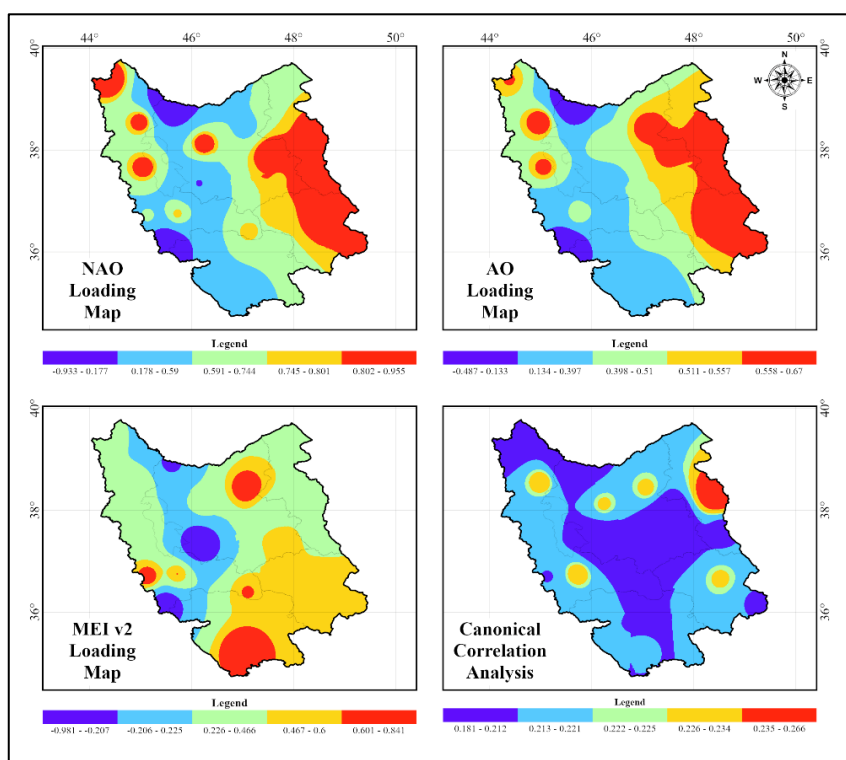
تحلیل‌های ایستگاهی یا تک‌شاخصی ارائه

جغرافیایی پاسخ‌دهنده به سیگنال‌های

دورپیوندی در این منطقه وجود داشت. هستند. شناسایی این گرادیان فضایی یافته‌های این مطالعه اثبات کرد که واکنش اقلیم منطقه به دورپیوندی‌ها، تابعی از یک هم‌افزایی دینامیکی با ویژگی‌های اوروگرافیک، به‌ویژه توپوگرافی رشته‌کوه زاگرس است. یکی از مهم‌ترین دستاوردهای این پژوهش، آشکارسازی ماهیت غیرخطی روابط میان متغیرها بود؛ در حالی که تحلیل‌های خطی متداول (پیرسون) پیوندهای ضعیفی را نشان دادند، کاربست تحلیل همبستگی کانونی (CCA) پرده از پاسخ‌های اقلیمی بسیار معنادار و سازمان‌یافته برداشت. این نتایج نشان داد که منطقه از یک الگوی فضایی دوکانونی پیروی می‌کند؛ به طوری که نواحی شمالی و مرکزی تحت سلطه دینامیک‌های عرض‌های بالا (NAO/AO) قرار دارند، در حالی که نواحی جنوبی و غربی به‌طور مستقیم تحت کنترل سیگنال‌های حاره‌ای (MEI)

هستند. شناسایی این گرادیان فضایی شفاف، بینشی نوین در تحلیل‌های سینوپتیکی منطقه ایجاد می‌کند که در تحقیقات گذشته به این دقت تبیین نشده بود. تحلیل یافته‌های حاصل از این پژوهش، دریچه‌ای نو به سوی درک پیچیدگی‌های برهم‌کنش میان الگوهای گردش کلان‌مقیاس جوی و نوسانات هیدروکلیماتیک در پهنه کوهستانی غرب و شمال غرب ایران می‌گشاید. هدف اصلی این مطالعه، واکاوی ساختار فضایی-زمانی همبستگی شاخص‌های NAO، AO و MEI با دما و بارش بود که نتایج به دست آمده، فرضیه وجود روابط غیرخطی و کانون‌مند را در این منطقه تأیید می‌کند. در گام نخست، نتایج حاصل از ضریب همبستگی پیرسون نشان‌دهنده پیوندهای خطی ضعیف (عمدتاً کمتر از ۰/۲۰) میان شاخص‌های پیوند از دور و متغیرهای اقلیمی، به‌ویژه در مقیاس ماهانه بود. این

ضعف در همبستگی خطی را می‌توان به ماهیت آشوبناک سیستم جو و غلبه عوامل محلی و توپوگرافیک در ایستگاه‌های سینوپتیک نسبت داد که سیگنال‌های دوردست را در کوتاه‌مدت تحت‌الشعاع قرار می‌دهند. با این حال، انتقال از تحلیل تک‌متغیره (پیرسون) به تحلیل چندمتغیره کانونی (CCA)، پاسخ اقلیمی منطقه را به صورت کاملاً معنادار و غیرخطی برجسته کرد. این تغییر معنادار در نتایج، نشان‌دهنده نوآوری روش‌شناختی این پژوهش است؛ جایی که CCA توانست روابط سیستماتیک و همزمان مجموعه‌ای از شاخص‌ها را که در تحلیل‌های ساده خطی پنهان مانده بود، آشکار سازد.



شکل ۶: توزیع فضایی بار کانونی و همبستگی کانونی میان شاخص‌های پیوند از دور و متغیرهای اقلیمی در غرب و شمال غرب ایران

یافته‌های مربوط به شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO) و نوسان قطبی (AO) نشان‌دهنده سلطه این الگوها بر بخش‌های شمالی و مرکزی منطقه، به‌ویژه در ایستگاه‌هایی نظیر سراب (۰/۹۵۵) و ماکو (۰/۹۵۴) است. این نتایج با یافته‌های Halali et al (2022) که بر نقش کلیدی NAO و AO در کنترل بارش‌های زمستانه ایران تاکید داشتند، همخوانی دارد. دلیل فیزیکی این ارتباط را می‌توان در هدایت مسیر جریان‌های غربی و سیکلون‌های مدیترانه‌ای توسط این دو شاخص جستجو کرد. در فاز مثبت NAO، تقویت پرفشار آزور موجب انحراف سامانه‌های بارشی به سمت عرض‌های بالاتر شده که منجر به کاهش بارش و دما در شمال غرب ایران می‌گردد، امری که در همبستگی‌های منفی مشاهده شده در این تحقیق نیز منعکس شده است. در مقابل، نتایج مرتبط با شاخص چندمتغیره‌ی انسو (MEI) حاکی از عملکرد متفاوت این سیگنال حاره‌ای است. در حالی که شاخص‌های شمالی بر نواحی آذربایجان حاکم بودند، MEI به عنوان کنترل‌کننده اصلی اقلیم در کانون‌های جنوبی و غربی نظیر سنج (۰/۸۴۱) و پیرانشهر (۰/۷۴۲) شناسایی شد. این یافته با نتایج Halali et al. (2020) که نقش تعیین‌کننده MEI را در بارش‌های پاییزی غرب و جنوب ایران اثبات کردند، سازگاری کامل دارد. تفاوت در کانون‌های اثرگذاری شاخص‌ها نشان‌دهنده وجود یک گرادیان فضایی شمال به جنوب در غرب ایران است که بر اساس آن، با کاهش عرض جغرافیایی، نقش نوسانات حاره‌ای اقیانوس آرام در تنظیم رژیم بارشی منطقه افزایش می‌یابد. یکی از یافته‌های چالش‌برانگیز این پژوهش، ثبت بارهای کانونی منفی در ایستگاه‌های مرزی

سردشت و جلفا بود. این موضوع نشان‌دهنده یک سازوکار چرخشی متمایز در لبه‌های کوهستانی منطقه نسبت به نواحی داخلی است. این رفتار خاص اقلیمی احتمالاً ناشی از تعامل مستقیم و شدید جریان‌های هوای ورودی با توپوگرافی مرتفع زاگرس در این نقاط است که باعث ایجاد خرده‌اقلیم‌هایی با پاسخ معکوس به سیگنال‌های دورپیوندی می‌گردد. در مقایسه با مطالعات بین‌المللی، یافته‌های حاضر با تحقیق (Rebi et al 2023) در شمال پاکستان تفاوت‌هایی را نشان می‌دهد. در حالی که ربی و همکاران نقش NAO را در شمال پاکستان ضعیف ارزیابی کردند، مطالعه حاضر این شاخص را عامل غالب در شمال غرب ایران معرفی می‌کند. این اختلاف ناشی از تفاوت در محدوده‌های جغرافیایی و مکانیسم‌های انتقال رطوبت است؛ چرا که شمال غرب ایران به طور مستقیم در مسیر کمربند بادهای غربی و سیکلون‌های مدیترانه‌ای قرار دارد که به شدت تحت کنترل فازهای NAO هستند. در مقابل، نتایج این مطالعه در مورد نقش MEI با یافته‌های (Santos et al 2023) در برزیل که بر اهمیت این شاخص در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأکید داشتند، هم‌راستا است. از جنبه نوآوری، تلفیق تحلیل‌های آماری پیشرفته با مدل‌سازی فضایی IDW در محیط GIS، این امکان را فراهم آورد تا کانون‌های پاسخ‌دهنده به سیگنال‌های اقلیمی به صورت بصری و کمی شناسایی شوند. این رویکرد خلأ موجود در مطالعات پیشین که عمدتاً بر همبستگی‌های صرفاً زمانی یا ایستگاهی تمرکز داشتند را پوشش داد. اثبات ماهیت غیریکنواخت و چندکانونی تأثیر دورپیوندی‌ها در غرب ایران، ادعاهای کلی‌نگر گذشته را به چالش کشیده و نشان می‌دهد که توپوگرافی زاگرس به عنوان یک عامل هم‌افزا، شدت و جهت اثرگذاری این

الگوها را تغییر می‌دهد. در نهایت، تایید همبستگی‌های معنادار در تحلیل کانونی (CCA) علی‌رغم نتایج ضعیف پیرسون، ثابت می‌کند که اقلیم منطقه پاسخ‌های پیچیده و غیرخطی به ترکیبی از شاخص‌های پیوند از دور نشان می‌دهد. این نتایج ضرورت بازنگری در مدل‌های پیش‌بینی فصلی سنتی و حرکت به سمت مدل‌های پویای مبتنی بر تحلیل‌های چندمتغیره را برای مدیریت بهتر منابع آب و مخاطرات محیطی در غرب ایران ایجاب می‌کند. شناسایی کانون‌های حساس نظیر اردبیل (۲۶۶/۰) و مهاباد (۲۳۲/۰) ابزاری ارزشمند برای برنامه‌ریزان محیطی فراهم می‌آورد تا بر مبنای ویژگی‌های غالب هر زیرمنطقه، راهبردهای تطبیقی متفاوتی را تدوین نمایند.

از منظر کاربردی، این یافته‌ها ابزاری ارزشمند برای مدیریت هوشمند منابع آب، برنامه‌ریزی کشاورزی پایدار و پیش‌بینی مخاطرات حدی نظیر سیل و خشکسالی در غرب ایران فراهم می‌آورد. شناخت کانون‌های حساس نظیر اردبیل، مهاباد و خوی به تصمیم‌گیران اجازه می‌دهد تا استراتژی‌های انطباق با تغییر اقلیم را به صورت محلی و با دقت بالاتری تدوین کنند. همچنین، تبیین رفتار متمایز ایستگاه‌های مرزی، ضرورت بازنگری در مدل‌های پیش‌بینی سینوپتیکی در مقیاس‌های خرد را آشکار می‌سازد.

با وجود دستاوردهای حاصله، محدودیت‌هایی نظیر اتکا به داده‌های ماهانه و عدم لحاظ اثرات تأخیری بلندمدت در این پژوهش وجود داشت. لذا پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی، با بهره‌گیری از مدل‌های هوشمند یادگیری ماشین نظیر حافظه طولانی کوتاه‌مدت (LSTM) و بررسی سری‌های زمانی روزانه، مکانیسم‌های تأخیر زمانی (Lag) این الگوها بر دبی رودخانه‌ها و منابع آب

زیرزمینی واکاوی شود. همچنین، تلفیق عمیق تری از چگونگی تعامل جریان های
 نتایج فضایی این تحقیق با مدل های اقلیمی دورپیوندی با ناهموازی های فلات ایران
 منطقه ای (RCMs) می تواند درک فیزیکی ارائه دهد.

ملاحظات اخلاقی

حامی مالی: این پژوهش هیچ کمک مالی از سازمان های تأمین مالی دریافت نکرده است.
تعارض منافع: طبق اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.
برگرفته از پایان نامه / رساله: این مقاله برگرفته از پایان نامه/رساله نبوده است.

References

- Avarin, A. (2013). Relationship between teleconnection patterns and total ozone in Isfahan. *Journal of Natural Geography Research*, 45(1), 39–52.
- Biabanaki, M., Eslamian, S. S., Koupai, J. A., Cañón, J., Boni, G., & Gheysari, M. (2014). A principal components/singular spectrum analysis approach to ENSO and PDO influences on rainfall in western Iran. *Hydrology Research*, 45(2), 250-262.
<https://doi.org/10.2166/nh.2013.166>
- Cullen, H. M., Kaplan, A., Arkin, P. A., & Demenocal, P. B. (2002). Impact of the North Atlantic Oscillation on Middle Eastern climate and streamflow. *Climatic Change*, 55(3), 315-338.
<https://doi.org/10.1023/A:1020518305517>
- Dezfuli, A. K., Karamouz, M., & Araghinejad, S. (2010). On the relationship of regional meteorological drought with SOI and NAO over southwest Iran. *Theoretical and applied climatology*, 100(1), 57-66.

- <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0157-2>
- dos Santos, D. C., Santos, C. A. G., Brasil Neto, R. M., da Silva, R. M., & dos Santos, C. A. C. (2023). Precipitation variability using GPCC data and its relationship with atmospheric teleconnections in Northeast Brazil. *Climate Dynamics*, 61(11), 5035-5048. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06838-z>
 - Doust, A. M. K., Khorshid, A. M., Rahimi, A., & Qavidel, Y. (2007). Assessment of the impact of the “ENSO” phenomenon on seasonal precipitation variability in East Azerbaijan Province using a multivariate ENSO index. *Geographical Research (Unpublished)*, 38(57).
 - Gardner, S.; Gowerb, C., & Rouxa, N. J. (2006). A synthesis of canonical variate analysis, generalized canonical correlation and procrustes analysis. *Comput. Stat. Data. An*, 50, 107–134.
 - Ghanghermeh, A., Roshan, G., & Al-Yahyai, S. (2015). The influence of Atlantic-Eurasian teleconnection patterns on temperature regimes in South Caspian Sea coastal areas: a study of Golestan Province, North Iran. *Pollution*, 1(1), 67-83. <https://doi.org/10.7508/pj.2015.01.007>
 - Gholami Rostam, M., Sadatinejad, S. J., & Malekian, A. (2020). Precipitation forecasting by large-scale climate indices and machine learning techniques. *Journal of Arid Land*, 12(5), 854-864. <https://doi.org/10.1007/s40333-020-0097-3>
 - Goudarzi, M., Ahmadi, H., & Hosseini, S. A. (2017). Investigation of the relationship between teleconnection indices and temperature and precipitation components (Case study: Karaj

synoptic station). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 4(3), 689–712.

– Hair, J. F.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L., & Black, W. C. (1998). *Multivariate Data Analysis. 5th ed. Prentice-Hall. upper saddle river. new jersey.*

– Halali, J., Pishdad, E., Alidadi, M., Lookzadeh, S., Asadi Askouei, E., & Norooz Valashadi, R. (2020). Relationship between climate teleconnection indices and autumn precipitation in Iranian watersheds. *Iranian Journal of Soil and Water Conservation Research*, 51(8), 1921–1936.

– Helali, J., Ghaleni, M. M., Hosseini, S. A., Siraei, A. L., Saeidi, V., Safarpour, F., ... & Lotfi, M. (2022). Assessment of machine learning model performance for seasonal precipitation simulation based on teleconnection indices in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(15), 1343.

<https://doi.org/10.1007/s12517-022-10640-2>

– Larson, M.; Capobianco, M., & Hanson, H. (2000). Relationship between beach profiles and waves at Duck, North Carolina, determined by canonical correlation analysis. *Mar. Geol.*, 163, 275–288.

– Lee Rodgers, J., & Nicewander, W. A. (1988). Thirteen ways to look at the correlation coefficient. *The American Statistician*, 42(1), 59-66.

<https://doi.org/10.1080/00031305.1988.10475524>

– Liu, J.; Drane, W.; Liu, X., & Wu, T. (2009). Examination of the relationships between environmental exposures to volatile organic compounds and biochemical liver tests: application of canonical correlation analysis. *Env. Res.*, 109, 193–199.

– Mousavi Baygi, M., Fallah Gholhary, G. A., Habibi,

- M., & Nokhandan, M. (2008). Relationship between large-scale climate signals and precipitation in Khorasan. *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 15(2), 217–224.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)
- Ouarda, T. B. M. J.; Girard, C.; Cavadias, G. S., & Bernard, B. (2000). Regional flood frequency estimation with canonical correlation analysis. *J. Hydrol.* 254 ,157-173.
- Pavlovic Berdon, N. (2013). The Impact of Teleconnection on Pressure, Temperature and Precipitation in Serbia. *International Journal of Remote Sensing Applications*, 3(4). doi: 10.14355/ijrsa.2013.0304.03
- Qavidel Rahimi, Y., Farajzadeh Asl, M., & Kakapour, S. (2014). Investigation of the impact of the North Sea–Caspian Sea teleconnection pattern on autumn precipitation variability in western and northwestern Iran. *Geography and Planning Quarterly*, 18(49), 217–230.
- Rebi, A., Hussain, A., Hussain, I., Cao, J., Ullah, W., Abbas, H., Ullah, S., & Zhou, J. (2023). Spatiotemporal Precipitation Trends and Associated Large-Scale Teleconnections in Northern Pakistan. *Atmosphere*, 14(871). <https://doi.org/10.3390/atmos14050871>.
- Salahi, B., Khorshiddoost, A. M., & Qavidel Rahimi, Y. (2007). Relationship between North Atlantic atmospheric-oceanic circulation oscillations and droughts in East Azerbaijan. *Geographical Research*, 39(60), 147–156.
- Salehi, S., Dehghani, M., Mortazavi, S. M., & Singh, V. P. (2020). Trend analysis and

- change point detection of seasonal and annual precipitation in Iran. *International Journal of Climatology*, 40(1), 308-323. <https://doi.org/10.1002/joc.6211>
- Tabari, H. and Willems, P. (2016) Daily Precipitation Extremes in Iran: Decadal Anomalies and Possible Drivers. *Journal of American Water Resources Association*, 52, 541-599. <http://dx.doi.org/10.1111/1752-1688.12403>
- Walker, G. T. (1924). Correlations in seasonal variations of weather. VIII, A further study of world weather. *Men. Indian Meteor. Dept.*, 24, 275-332.
- Wallace, J. M., & Gutzler, D. S. (1981). Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly weather review*, 109(4), 784-812. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2)
- Wollenberg, A. L. V. (1977). Redundancy analysis: an alternative for canonical correlation analysis. *Psychometrika*, 42(2), 207-219.
- Zhang, C., Huang, G., Yan, D., Wang, H., Zeng, G., Wang, S., & Li, Y. (2021). Analysis of South American climate and teleconnection indices. *Journal of Contaminant Hydrology*, 244, 103915. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103915>