



Response of Iranian Cloud Cover to Teleconnection Variability: A Study of 136 Synoptic Stations

Alireza Saadatmoghadasi¹, Zahra Aghashariatmadari^{2*} 

1. Ph.D. Student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Engineering and Agricultural Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Engineering and Agricultural Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*Corresponding Author: zagha@ut.ac.ir

Keywords:

Components analysis, Indices, Cloud cover, East Atlantic, Iran plateau.

Received:

02 June 2025

Revised:

13 September 2025

Accepted:

03 October 2025

Introduction

Teleconnections organize large-scale climate variability by linking remote regions through wave dynamics, air–sea coupling, and chains of transient weather events. Beyond stationary Rossby-wave frameworks, recent studies have emphasized non-stationarity and intermittency. Cloud cover, which is central to the surface radiation budget and the hydrological cycle, is particularly sensitive to such large-scale controls over complex terrain. Iran’s juxtaposition of the Zagros Mountains, the Iranian Plateau, and Caspian and coastal zones demands methods that preserve phase information and nonlinear structure. Accordingly, we aim to quantify the joint effects of fifteen teleconnection indices on cloudiness over Iran and to assess whether a phase-aware, rotation-based kernel framework can reveal interpretable signals for applications in seasonal outlooks and resource planning.

Materials and Methods

Monthly cloud-cover data from 136 synoptic stations covering the period 1979–2023 were quality controlled and normalized, with ERA5 fields used to provide reanalysis context and for compositing. We applied the ROCK-PCA pipeline:

How to cite this article:

Saadatmoghadasi, A. & Aghashariatmadari, Z.(2026). Response of Iranian Cloud Cover to Teleconnection Variability: A Study of 136 Synoptic Stations. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3 (Spatial Issue), 57-78. [10.22077/jdcr.2025.9514.1148](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9514.1148)



(i) Hilbert analytic embedding to encode phase and lag information in complex form; (ii) kernel PCA with linear and Gaussian kernels to capture curved manifolds within a reproducing-kernel Hilbert space; and (iii) Varimax and Promax rotations to achieve simple-structure loadings and enhance component interpretability. Rotated component scores were correlated with the NAO, AO, PNA, EA/WR, SCAND, AMM, TNA, TSA, DMI, EP–NP, and other indices using Spearman’s rho, evaluated on annual and seasonal timescales. Statistical significance was assessed at $\alpha = 0.05$ with consideration of false discoveries. To examine dynamical consistency, we generated composites of geopotential height, winds, and humidity at 850, 700, and 500 hPa for key index phases and combinations (e.g., NAO+/EAWR+).

Result and Discussion


At the annual scale, the Tropical North Atlantic (TNA) emerges as the leading control on Iranian cloudiness, exhibiting coherent negative correlations that peak near $|r| \approx 0.49$ across approximately sixty stations. EP–NP ranks second (about 31 stations, $|r| \approx 0.45$), followed by EA/WR (around 20 stations, $|r| \approx 0.46$). At the seasonal scale, the North Atlantic Oscillation (NAO) is dominant, showing broadly positive associations (mean $r \approx 0.33$ across roughly 130 stations). The strongest spatial responses occur along the Zagros Mountains and over the southern–central plateau, whereas southeastern Iran displays mixed signals consistent with monsoonal influences. Composite diagnostics confirm physical plausibility: NAO+ and EA/WR+ phases jointly restructure the subtropical jet and storm-track pathways, producing belt-like reductions in cloud cover over Western and Central Europe and enhanced cloudiness over the Caucasus–Caspian corridor extending into Iran. Vertically, regions of increased cloudiness coincide with 500-hPa divergence and positive vorticity advection, 700-hPa moisture convergence, and 850-hPa surges in humidity.

Conclusion

Methodologically, ROCK-PCA integrates phase awareness, nonlinear manifold learning, and interpretable rotation—three properties that are rarely achieved together—yielding components that are both meteorologically coherent and operationally useful. Substantively, the analysis refines the teleconnection–cloudiness nexus over Iran: the TNA provides a persistent annual-scale control, the NAO governs seasonal modulation, and the EP–NP and EA/WR offer additional region-specific leverage through jet displacement and storm-track rephasing. These findings support the targeted use of teleconnection-conditioned forecasts for water-resource management, solar-energy planning, and climate-risk monitoring. Future efforts should assimilate satellite-based cloud products, examine kernel and hyperparameter sensitivity, adopt causal discovery approaches (e.g., PCMCI+), and embed ROCK-PCA outputs into S2S and machine-learning forecasting systems.



پاسخ ابرناکی ایران به نوسانات دورپیوندی: مطالعه‌ای بر ۱۳۶ ایستگاه سینوپتیک

علیرضا سعادت مقدسی^۱، زهرا آفاشریعتمداری^۲ 

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

*نویسنده مسئول: zagha@ut.ac.ir

چکیده

پدیده‌های دورپیوندی به‌عنوان الگوهای هم‌بستگی دوربرد، اثرگذاری در مناطق برون حاره با رویکردهای نوین داده‌کاوی دوباره پررنگ شده‌اند. در این پژوهش نقش همزمان ۱۵ شاخص دورپیوندی بر ابرناکی ایران نرمال سازی و کمی‌سازی شد. بدین‌منظور میانگین ماهانه ابرناکی ۱۳۶ ایستگاه سینوپتیک کشور طی ۱۹۷۹-۲۰۲۳ به کار رفت و با چارچوب Rock-PCA همبستگی‌ها با چرخش Varimax و چرخش بازتولیدپذیر RKHS (با اسپیرمن) در دو مقیاس ماهانه و سالانه استخراج شد. نقشه‌های ترکیبی در سه سطوح ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال با استفاده از نرم‌افزار پایتون ترسیم گردید. بیشترین اثر سالانه متعلق به TNA بود ($r \approx 0/33$ ایستگاه؛ $r \approx -0/49$ ؛ $p < 0/05$) و در مقیاس ماهانه NAO بر ۱۳۰ ایستگاه با میانگین $r \approx 0/33$ غالب بود. الگوهای مکانی با جابه‌جایی جت جنب‌حاره‌ای، تغییر مسیر توفان‌ها و انتقال رطوبت مدیترانه-دریای سرخ-خلیج فارس سازگار است؛ ترکیب +NAO+/EAWR کمربند کاهش ابر بر اروپای غربی-میانی و افزایش آن بر قفقاز-کاسپین و بخش‌هایی از ایران را تقویت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آنالیز ترکیبی، شاخص‌ها، پوشش ابر، شرق اطلس، فلات ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱

مقدمه

پدیده «پیوند از دور» (Teleconnection) به منزله الگوهای همبستگی دوربرد در سامانه جو-اقیانوس، در دهه اخیر با رویکردهای نوین تحلیل داده و کشف روابط علی دوباره در کانون توجه قرار گرفته است. بر خلاف تبیین‌های کلاسیک مبتنی بر موج‌های رسوبی ایستا، مطالعات جدید نشان داده‌اند که بسیاری از این شاخص‌ها از زنجیره‌ای از رخدادهای هوا شناختی ناپایا بر مقیاس‌های همدیدی پدید می‌آیند؛ در نتیجه، سنجش اثرات شاخص‌های گوناگون (AO, NAO, ENSO/MEI/ONI, DMI, TSA, TNA, AMM, SCAND, EA/WR, PNA, AMO و غیره که در جدول یک توضیح داده شده است) بر متغیرهای اقلیمی باید هم‌زمان بر ماهیت زمانی-مکانی و برهم‌کنش‌های غیرخطی تکیه کند (Spens Berger, 2024; Weylandt and Swiler, 2024). در این میان، «پوشش ابر» یکی از مؤلفه‌های کلیدی تراز انرژی و چرخه هیدرولوژیک است و تغییرات آن می‌تواند به‌طور معناداری دما، بارش و فرین‌ها را دگرگون کند. شواهد تازه از مقیاس جهانی و منطقه‌ای نشان می‌دهد که کاهش ابرناکی، در بسیاری از نواحی خشکی‌زی، به افزایش تابش ورودی و گرم‌شدن تندتر منجر شده است (Liu et al., 2023; Wang et al., 2024). در ایران با توجه به رشد جمعیت و اثر تغییر اقلیم بر میزان خشکی و نیز روندهای معناداری که در ابرناکی گزارش شده، بر برنامه‌ریزی منابع آب و انرژی بیش از پیش بایستی اهمیت داده شود. با توجه به اینکه خشک‌سالی یکی از مهم‌ترین مسائل در دو دهه اخیر در کشور بوده است (Rashedi et al., 2024; Ramezani et al., 2024; Ahmadi et al., 2025 and Hajararian, 2025). با وجود نقش شناخته‌شده ENSO در کنترل بازخورد تابشی ابرها، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که فازها و شدت‌های متفاوت ENSO می‌تواند اثربخشی بازخورد

تابشی را بر هم زده و به ناهمگنی‌های مکانی قابل توجهی بینجامد (Jin et al., 2024). افزون بر آن، شاخص‌های اطلس شمالی و قطبی (NAO/AO) و نیز الگوهای پاسیفیک-آمریکای شمالی (PNA) و اسکاندیناوی (SCAND) می‌توانند مسیرها و شدت‌های انتقال موجی و ساختار ابرها را دگرگون کنند (Zhang et al., 2024; Park et al., 2024). در حوضه اطلس، نقش شاخص‌های مرتبط با دوقطبی اقیانوس هند (DMI) و محرک‌های مدیترانه‌ای و آتلانتیکی گرمسیری (EA/WR, EA, AMM, TNA, TSA) نیز در سال‌های اخیر با رویکردهای علی-آماری بازبینی شده و اهمیت برهم‌کنش‌های فرامنطقه‌ای بیشتر روشن گشته است (Carvalho-Oliveira et al., 2024; An et al., 2023; Sheng et al., 2023; Galytska et al., 2023). در نتیجه، مطالعه نقش هم‌زمان این شاخص‌ها بر ابرناکی ایران ضرورتی علمی و کاربردی دارد؛ خاصه آن‌که منطقه خاورمیانه در دهه اخیر یکی از بالاترین نرخ‌های گرم‌شدن را تجربه کرده است (Malik et al., 2024) و گزارش‌های اقلیمی اروپا / اوراسیا نیز تغییرات چشم‌گیر در الگوهای ابرناکی و ساعات آفتابی را مستند کرده‌اند (Schilliger et al., 2024).

شناسایی و پایش الگوهای ابرناکی یکی از ابزارهای کلیدی در درک فرایندهای جوی و تغییر اقلیم به‌شمار می‌آید. از این منظر، بررسی شاخص‌های اثرگذار برجو و سایر متغیرهای اقلیمی می‌تواند به تبیین میزان تأثیر و شدت عملکرد دورپیوندی‌ها در شکل‌گیری و توزیع مکانی و زمانی ابرها کمک کند. در این چارچوب، نقش پدیده‌های دورپیوندی مختلف در افزایش یا کاهش ابرناکی در مناطق متنوعی همچون ایران، هیمالیا، چین و سایر نقاط جهان قابل ارزیابی است. افزون بر این، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پیامدهای ناشی از گرمایش جهانی، تغییرپذیری مکانی و زمانی دما و بارش را تشدید کرده و از این طریق بر تغییر الگوهای بارشی، دمایی و ابرناکی

al., 2020). افزوده شدن چرخش وریمکس و آزمون‌های همبستگی با شاخص‌های دورپیوندی اجازه می‌دهد سهم نسبی هر شاخص در توضیح تغییرپذیری ابرناکی در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه برآورد شود؛ ضمن آن‌که تحلیل‌های مکمل مکانی-زمانی می‌توانند پیوندهای با تأخیر زمانی را آشکار کنند (Rieger et al., 2021).

در این پژوهش از ۱۳۶ ایستگاه سینوپتیک کشور با میانگین ماهانه ابرناکی در بازه زمانی ۱۹۷۹ الی ۲۰۲۳ به مدت ۴۵ سال و تمامی ماه‌های سال با استفاده از داده‌های ERA5 اتحادیه اروپا نرمال‌سازی داده‌ها انجام و اثر ۱۵ شاخص دورپیوندی بر روی آنها با روش جدید ROCK-PCA انجام شده است. از مزایای این روش کشف روابط غیرخطی پنهان در داده‌های اقلیمی، کاهش بُعد داده‌ها همراه با حفظ ساختار غیرخطی، تفسیر بهتر به‌خاطر مرحله‌ی rotation (مثل varimax) را می‌توان نام برد. در جدول ۱ معرفی شاخص‌های دورپیوندی مورد استفاده در پژوهش و سایر توضیحات نشان داده شده است.

تأثیرگذار بوده‌اند (Hussain et al., 2021; Kambezidis et al., 2024; Cardenas et al., 2020; Chitrikova et al., 2023; Sundararajan et al., 2021; Pi et al., 2020; Meidani and Araghinejad, 2014; Zohrabi et al., 2014; Foroozan et al., 2020).

از منظر روش‌شناختی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)^۱ همچنان ابزار بنیادین کاهش بُعد و کشف ساختارهای هم‌بسته در اقلیم‌داده‌های چند متغیره است؛ با این حال، محدودیت‌های قیود و خطی بودن در PCA کلاسیک، به‌ویژه در حضور روابط ناپایا، غیر ایستا و غیرخطی، می‌تواند به الگوهای کم‌معنا بینجامد. کارهای نوین در خانواده «PCA پیشرفته» بر بهره‌گیری از روش‌های تنک، غیر منفی، چرخش‌های مبتنی بر معیارهای تفسیربخشی تأکید می‌کنند (Weylandt and Swiler, 2024). در همین راستا، رویکرد ROCK-PCA^۲ به‌عنوان یک چارچوب غیرخطی و استوار معرفی شده که با نگاشت هسته‌ای/غیرخطی، نرمال‌سازی مقاوم، و چرخش وریمکس، هم بارهای عاملی تفسیرپذیرتر و هم نمره‌مؤلفه‌های واقع‌گرایانه‌تری تولید می‌کند (Bueso et

جدول ۱. فهرست شاخص‌های دورپیوندی مورد استفاده در پژوهش

Table 1: List of teleconnections for this study

ردیف	توضیحات
AMO	Atlantic Multidecadal Oscillation
NAO	North Atlantic Oscillation
PDO	Pacific Decadal Oscillation
ENSO	Elnino Southern Oscillation
AO	Arctic Oscillation
SCAND	Scandinavian Index
PNA	Pacific North America
QBO	Quasi Biennial Oscillation
SOI	Southern Oscillation Index
TNA	Tropical North America
TSA	Tropical South America
DMI	Dipole Multivariate Index
EP-NP	East Pacific-North Pacific
MEI	Multivariate Enso Index
ONI	Oscillation Nino Index

مواد و روش‌ها

محاسبه روش جدید^۱ Rock-PCA به شکل ذیل می‌باشد:

ROCK-PCA تعمیمی از EOF/PCA است که سه مورد را هم‌زمان انجام می‌دهد: (۱) کدگذاری فاز/تأخیر با تعبیه مختلط مبتنی بر انتقال هیلبرت، (۲) مدل‌سازی غیرخطی با نگاشت کرنلی به فضای هیلبرت بازتولیدپذیر^۲ (RKHS)، و (۳) تفسیرپذیری با چرخش (Varimax/ProMax). این چارچوب، وقتی کرنل خطی باشد، به تابع متعامد تجربی^۳ complex/EOF/PCA فروکاسته می‌شود و وقتی کرنل غیرخطی است، ساختارهای خمیده/غیرخطی را نیز می‌گیرد.

۱- ترکیب مختلط هیلبرت:

برای هر ستون سری زمانی $X(t) = x(t)$ (هر ایستگاه/متغیر)، انتقال هیلبرت را روی محور زمان اعمال می‌کنیم:

$$Z = X + iH[X] \in C^{T \times M} \quad (۱)$$

$$H[X] \in R^{T \times M} \quad (۲)$$

که در آن $X(t)$ زمانی حقیقی هر ایستگاه، H عملکرد هیلبرت بر محور زمان، Z سیگنال تحلیلی، $C^{T \times M}$ ماتریس داده مختلط است.

۲- مرحله دوم یک کرنل مثبت معین $k = (0,0)$ (گوسی، پلی‌نومی و خطی) و نگاشت $H \times PC: \emptyset$ به RKHS انتخاب می‌شود. هر برش زمانی سطر (t) از Z یک نمونه است که به شکل ذیل محاسبه شده است:

$$K_{t,t'} = k(z_t, z_{t'}), K \in C^{T \times T} \quad (۳)$$

وقتی که k خطی است این مرحله معادل EOF/PCA Complex است که برای تمرکز پیدا کردن بر روی RKHS از فرمول ذیل استفاده خواهد شد:

$$\begin{aligned} K &= HKH \\ H &= I_T - \frac{1}{T} 11^T \end{aligned} \quad (۴)$$

که در آن H ماتریس مرکز سازی، K کرنل مثبت معین و T متغیر زمان است.

۳- محاسبه KPCA (صورت دوگانه و نمرات بارگذاری شده بدون چرخش و به شکل استاندارد از طریق فرمول ذیل محاسبه خواهد شد):

$$\frac{1}{T} KU_p = \lambda_p u_p, U^*U = I, \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq 0, \quad (۵)$$

که در آن λ بردار و مقدار ویژه، T متغیر زمان و U و U_p ضرایب دوگانه و بارگذاری نمونه‌ای مکانی معرفی می‌شوند.

و مرحله آخر چرخش ترکیبی برای تفسیرپذیری (Varimax, Promax) برای رسیدن به ساختار ساده و تفسیر داده از فرمول‌های ذیل استفاده شده است:

$$B = WT, \quad S = AT, \quad (۶)$$

که در آن T متعامد در روش Varimax است و در روش Promax مایل نیز می‌تواند باشد. معیار وریمکس در رابطه γ بر حسب اندازه دوم بارگذاری‌ها به صورت ذیل بیشینه می‌شود:

$$\max T \varphi(T) = \sum_{p=1}^P \left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M |b_{jp}|^4 \right] - \quad (۷)$$

$$\left(\left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M |b_{jp}|^2 \right)^2 \right), \quad B = WT, \quad b_{jp} \in C$$

¹ Reduction of Components via Kernels/Nonlinearities + Orthogonal rotation + Component

² Principal Components Analysis

³ Empirical Orthogonal Function

ایستگاه‌های شرق کشور به‌رنگ نارنجی، ایستگاه‌های نیمه شمالی به‌رنگ سبز و ایستگاه‌های نیمه جنوبی کشور نیز به‌رنگ قرمز قابل مشاهده است. ایستگاه‌های فلات مرکزی نیز به‌رنگ صورتی در نقشه نمایش داده شده است. توچال با ۳۷۴۷ متر بلندترین ایستگاه و انزلی با ۲۳/۶- به‌عنوان کم‌ارتفاع‌ترین نقطه شناسایی شدند. همچنین ایستگاه‌های آبدلی، آشتیان، دماوند، اقلید، فریدون‌شهر، منشاد، میگون، شهرکرد و سپیدان به‌عنوان ایستگاه‌های بالای ۲۰۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا در پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سایر ایستگاه‌ها در دامنه ارتفاع ۲۲- تا ۱۹۸۰ متر از سطح دریا در نقشه قابل مشاهده هستند.

که در آن b_{jp} قدر مطلق مختلط، ستون‌های B مدهای مکانی چرخیده و ستون‌های S مقدار pc های زمانی چرخیده هستند. T در فرمول ۷ ماتریس چرخش، $B=WT$ بارگذاری‌های چرخیده، و $S=AT$ نمرات زمانی چرخیده در رابطه ۶ محسوب می‌شوند. شواهد نظری و محاسباتی نشان داده است که چرخش و ریمکس افزون بر تفسیرپذیری بهتر، معناداری آماری محورها را هم بهبود می‌دهد: تحلیل‌های نامتعاد نیز در صورت نیاز برای همبستگی بین عوامل کارایی دارد (Bueso et al., 2022; Marukatat S., 2023; Matsuki et al., 2023; Javorskyi et al., 2024; Rohe K and Zeng M., 2023; Cap J., 2024; Fang et al., 2024 and Akhtar-Danesh N., 2023).

در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. ایستگاه‌های غرب کشور به‌رنگ آبی،



Fig1. The location of the synoptic stations for this study

ضریب همبستگی اسپیرمن

با استفاده از ضریب همبستگی اسپیرمن، درجه همبستگی مولفه ابرناکی با دورپیوندی‌ها انجام شده است. استفاده از این ضریب با توجه به اینکه توزیع آماری در آن آزاد است برای چنین پژوهش‌هایی مناسب‌تر است. فرمول ضریب همبستگی اسپیرمن به شرح ذیل است (Yang et al., 2022):

$$R_s = \text{Pr}(X), R(Y) = \frac{\text{cov}(R(X), R(Y))}{\sigma R(X)\sigma R(Y)} \quad (8)$$

که در آن R_s مقدار ضریب همبستگی اسپیرمن را نشان می‌دهد، $\text{Cov}(X, Y)$ کوواریانس متغیرهای دسته بندی شده و $\sigma(X)$ و $\sigma(Y)$ انحراف از معیار متغیرهای طبقه بندی شده را نشان می‌دهند.

نتایج و بحث

در شکل ۲ نمودارهای تحلیل سالانه اثر دور پیوندی بر مولفه ابرناکی نشان داده شده است. نمودار دارای چهار بخش a, b, c, d است. نمودار a اسکری پلات، b چرخش و ریمکس، c نقشه حرارتی RPC1-6 ها با دورپیوندی و d نمودار فراوانی بیشترین تأثیر دورپیوندی در ایستگاه‌های مورد مطالعه پژوهش را نمایش داده است. نمودارهای اطلس در چرخش و ریمکس در RPC1 مشاهده می‌شوند. در نمودار فراوانی نیز شاخص گرمسیری شمال اطلس TNA بیشترین تأثیر و همبستگی را بر روی مولفه ابرناکی ایستگاه‌های مورد مطالعه پژوهش نشان داده است. ۶۰ ایستگاه همبستگی $0.49-$ را با شاخص مذکور در سطح معنی‌داری $0.05 <$ نشان دادند که در جدول ۲ قابل مشاهده است. از جمله ایستگاه‌هایی که می‌توان نام برد در نیمه شمالی آبکنار، انزلی، بابلسر، املش، بندر ترکمن، گرگان و گلستان، در دامنه‌های البرز شمالی-جنوبی و غربی-شرقی ایستگاه‌های مانند کوئین، دندی، دماوند، قزوین، کجور، میگون، میامی، شمیرانات، سیاه‌بیشه،

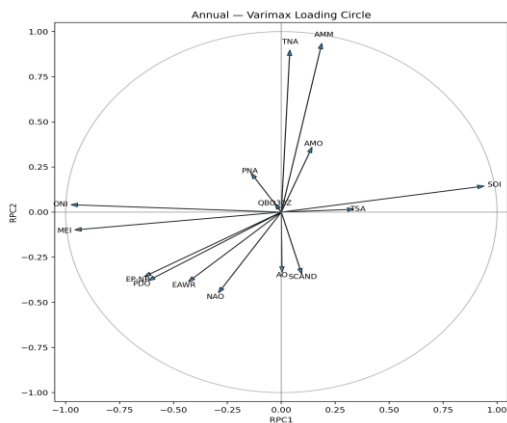
طالقان، زنجان و توجال می‌باشند. در شمال شرق کشور ایستگاه سبزوار و بیرجند و در شمال غرب کشور نمین در استان اردبیل در کنار مشکین‌شهر، و نطنز در اصفهان از استان‌های فلات مرکزی بیشترین همبستگی مولفه ابرناکی را با شاخص گرمسیری شمال اطلس نشان دادند.

در نیمه جنوبی کشور سپیدان فارس، بیشترین همبستگی را با شاخص مذکور نشان دادند این مقدار $0.39-$ محاسبه شده است. آرزوئیه در کرمان با مقدار $0.30-$ در رتبه بعدی قرار دارد ضمن اینکه مابقی ایستگاه‌های واقع در جنوب کشور همبستگی ضعیف کمتر از $0.23-$ درصد را با شاخص مذکور نشان دادند که یکی از علت‌های آن می‌تواند اقلیم متفاوت این منطقه با سایر نقاط باشد که تحت تأثیر دورپیوندی‌های دیگر از جمله دوقطبی اقیانوس‌هند، جریانات موسمی هند، شاخص زیر فصلی مادن و جولیان و رژیم بارشی متفاوت برخی ایستگاه‌ها از جمله سراوان، جاسک، زابل، حاجی‌آباد هرمز، بوشهر، شبانکاره، کیش، جزیره‌سیری، بخش‌هایی از کرمان، جیرفت، لار و بندر کنگان، رودان، میناب، منوجان، استهبان و فراه‌سبند، قصرقند و فیروز آباد و سایر مناطق مورد مطالعه در این بخش باشد. در غرب کشور ایستگاه مهران بیشترین همبستگی را با شاخص مذکور نشان داد و عدد $0.47-$ را به ثبت رساند. همدان در رتبه بعدی بیشترین تأثیر دورپیوندی مذکور بر روی مولفه ابرناکی مقدار $0.44-$ را به دست آورد. پس از آن بیستون و سنندج و کرمانشاه به‌طور مشترک با مقدار $0.39-$ و سقز در استان کردستان با مقدار $0.38-$ در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

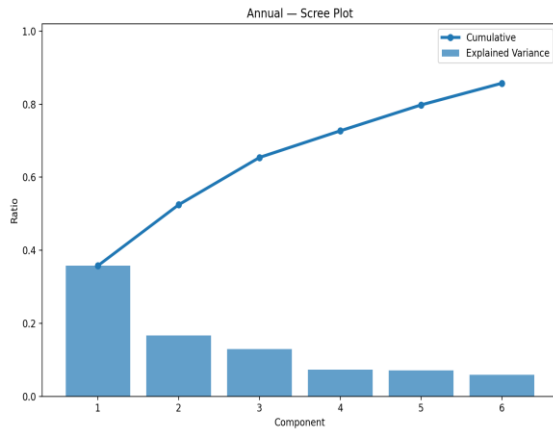
سایر ایستگاه‌های واقع در غرب کشور از جمله دهلران، قصر شیرین، ایلام، گیلان غرب همبستگی بین $0.28-$ تا $0.34-$ را نشان دادند. رتبه دوم به شاخص EP-NP تعلق دارد که ۳۱ ایستگاه مطابق جدول ۲ با میانگین همبستگی 0.45 در سطح معنی‌داری اشاره شده در بالا را نشان دادند. و رتبه سوم به شاخص غرب اطلس-شرق

فراز اوراسیا را دچار تغییرات می‌کند و از راه تعدیل مسیرهای توفان و جریانات همگرا بر رطوبت و ابرناکی ایران اثر می‌گذارد. EAWR الگوی بلاکینگ شرق اروپا-قفقاز / دریای خزر را کنترل می‌کند؛ تغییرات در بسامد بلاکینگ و جابه‌جایی ناوه مدیترانه‌ای به‌طور مستقیم روی ابرناکی شمال غرب تا شمال شرق ایران اثر دارد (Akhtar-). Danesh, 2023; Rohe and Zeng, 2023 سایر دورپیوندی‌ها اثر بسیار جزئی روی مولفه ابرناکی ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان دادند.

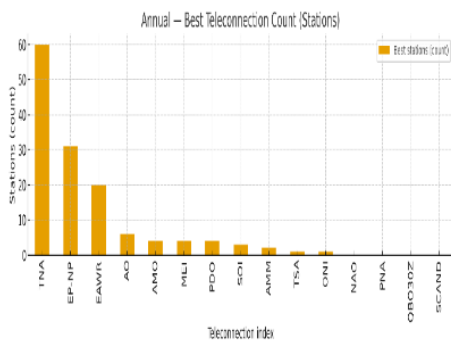
روسیه اختصاص دارد که میزان ۲۰ ایستگاه با میانگین همبستگی ۰/۴۶- را به ثبت رسانده‌اند. از عمده دلایل تأثیر شاخص TNA می‌توان بیان نمود که با تعدیل و اچرخند جنب‌حاره، سلول هادلی و انتقال بخار آب روی پهنه خاورمیانه، مسیر و فراوانی ناوه‌ها / پشته‌ها و رطوبت نسبی تراز ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال ایران را تغییر می‌دهد؛ بنابراین در بیشترین ایستگاه‌ها اثر منسجم نشان می‌دهد. EP-NP با امواج راسبی حاره به عرض میانه و تغییر جریان جتی آرام-شمالی، الگوی پرفشار / کم‌فشار بر



(ب)
b)



(الف)
a)



(د)
d)



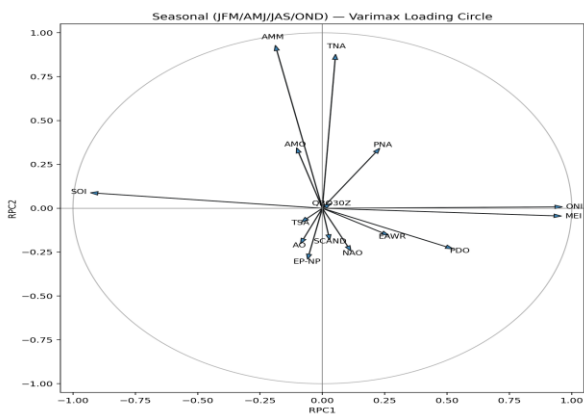
(ج)
c)

شکل ۲. نمودار اسکرپی پلات، وریمکس و نقشه حرارتی تحلیل اثر سالانه دورپیوندی بر میانگین سالانه ابرناکی ایستگاه‌های مورد مطالعه
Fig 2. Scree-plot, varimax loading, and heatmap graph of annual teleconnection impact on the annual mean cloudiness in the studied stations

جدول ۲. فهرست بهترین ایستگاه‌ها با درصد همبستگی با دور پیوندی (میانگین سالانه)

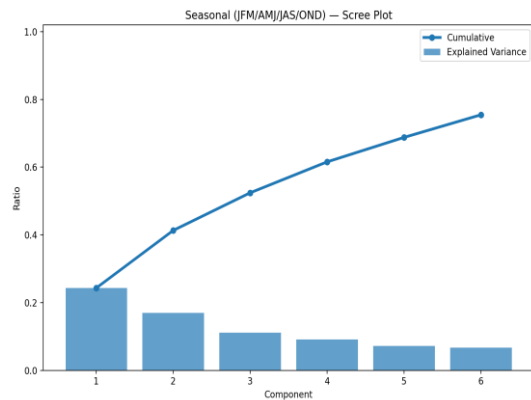
Table 2. The best stations with percent correlation of teleconnection (Annual mean)

شاخص Index	تعداد ایستگاه (N) Number of stations	سطح معنی‌داری ($p < 0.05$) Significance level	همبستگی (Spearman) R-Mean Spearman correlation
TNA	60	60	-0.49
EP-NP	31	31	0.45
EAWR	20	20	0.46
AO	6	4	0.32
AMO	4	4	-0.50
MEI	4	4	0.50
PDO	4	4	0.47
SOI	3	3	0.45
AMM	2	2	0.39
TSA	1	1	0.50
ONI	1	1	0.33
NAO	0	0	0.00
PNA	0	0	0.00
QBO	0	0	0.00
SCAND	0	0	0.00



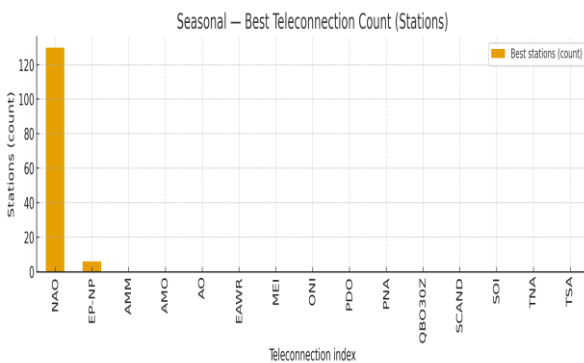
(ب)

b)



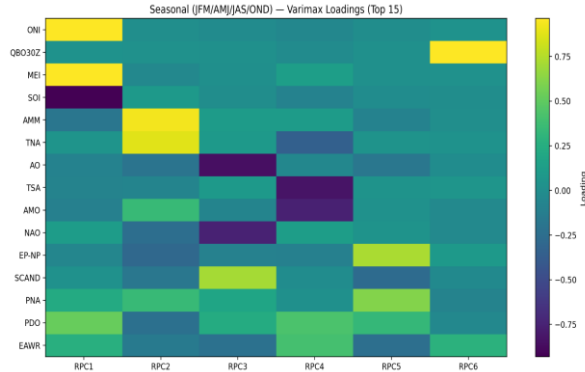
(الف)

a)



(د)

d)



(ج)

c)

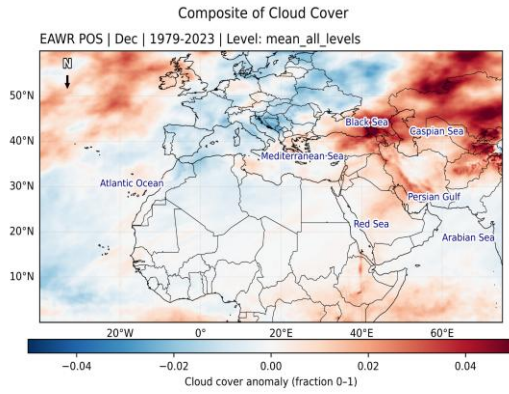
شکل ۳. نمودار اسکری پلات، وریمکس و نقشه حرارتی تحلیل اثر فصلی دور پیوندی بر میانگین فصلی ابرناکی ایستگاه‌های مورد مطالعه
Fig 3. Scree-plot, varimax loading, and heatmap graph of impact of seasonal teleconnection impact on the seasonal mean cloudiness in the studied stations

فاز مثبت آفرین باشد این مهم تأثیر چشمگیری دارد، از جمله مونسون هند در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۳ که حتی به سبب بالا آمدن کمربند حاره‌ی تا منطقه امامزاده داود تهران در سال ۱۴۰۱ شمسی در تابستان سبب سیل و رخداد‌های مخاطره‌آمیز در این مورد شده است. به طور کلی شاخص‌های منطقه اطلس در برهمکنش با شاخص‌های اقیانوس آرام از جمله EP-NP اثرگذار در تغییر در موقعیت‌قدرت جت جنب‌حاره‌ای، انتشار و شکست امواج راسبی، تغییر در جابه‌جایی رطوبت از مدیترانه-دریای سرخ-خلیج فارس و کاهش یا افزایش همرفت در جلوی ناه‌ها هستند. رژیم‌های خاص مسیر توفان اقیانوس اطلس (storm-track regimes) به‌ویژه در زمستان می‌توانند با ایجاد جریان‌های ورتکس قطبی در شرق مدیترانه، فرکانس سامانه‌های بارشی و در نتیجه پوشش ابر را روی ایران افزایش بدهند؛ در تابستان، نقش TNA/AMM از طریق تنظیم گرادیان فشار سطح در اطلس گرمسیری و فرا رفت رطوبت ضعیف دیده می‌شود، که با توجه به استقرار واچرخند جنب‌حاره و رژیم بارشی مدیترانه‌ی در اغلب نقاط کشور این مهم انکارناپذیر است (Sandler et al., 2024; Molteni et al., 2023; Strand et al., 2022; Vazques et al., 2023; Rivosecchi et al., 2024; Cheng et al., 2024; Halifa et al., 2024 and Shaw et al., 2024).

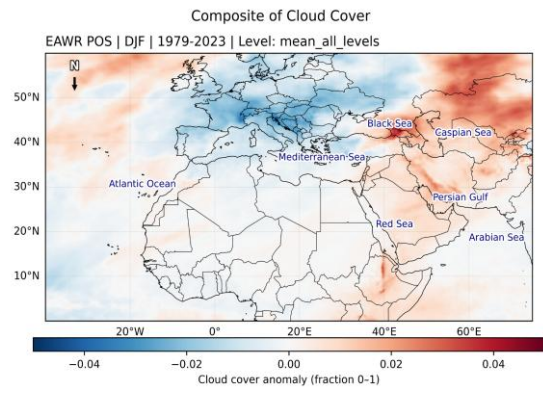
در ادامه به بررسی ترکیب (Composite) اثرات سالانه، فصلی و ماهانه سه شاخص تأثیرگذار یعنی NAO, TNA, EAWR و برهمکنش آنها در سطوح ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال و میانگین ابرناکی سه سطوح پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که موارد حدی و تأثیرگذار بر سه سطح نام‌برده شده مورد تحلیل و بحث و بررسی واقع شده است.

در شکل ۳ نمودارهای تحلیل فصلی اثر دور پیوندی بر مولفه ابرناکی نشان داده شده است. نمودار دارای چهار بخش a, b, c, d است. نمودار a اسکری پلات، b چرخش وریمکس، c نقشه حرارتی RPC1-6 ها با دور پیوندی و d نمودار فراوانی بیشترین تأثیر دور پیوندی در ایستگاه‌های مورد مطالعه پژوهش را نمایش داده است. بیشتر دور پیوندی‌های اطلس در چرخش وریمکس در RPC2 مشاهده می‌شوند. نکته بسیار جالب توجه در نمودار فراوانی تأثیر بسیار چشمگیر شاخص اطلس شمالی در فصول مختلف ایستگاه‌های مورد مطالعه پژوهش است، که در چرخش وریمکس (شکل b) در RPC1 قرار گرفته است. این در حالی است که در تحلیل میانگین سالانه ابرناکی اثر صفر را داشته است. ۱۳۰ ایستگاه با میانگین کلی ۰/۳۳ همبستگی مثبت را با شاخص اطلس شمالی نشان دادند. در خصوص شاخص نوسان اطلس شمالی بایستی بیان شود که اثرات فصلی NAO در جریان‌های فصلی در غرب، فلات مرکزی ایران به‌لحاظ آماری انکارناپذیر است و تأثیر به‌سزایی در ابرناکی این منطقه دارد. تنها ۶ ایستگاه سروان، قصرقند، جاسک، چابهار در جنوب شرق کشور و رامسر و کیاسر در سواحل غربی کاسپین (خزر) با شاخص EP-NP همبستگی به‌ترتیب ۰/۳۷، ۰/۲۸، ۰/۳۰، ۰/۳۸، ۰/۳۹ و ۰/۳۶ را با شاخص شرق آرام- شمال آرام نشان دادند.

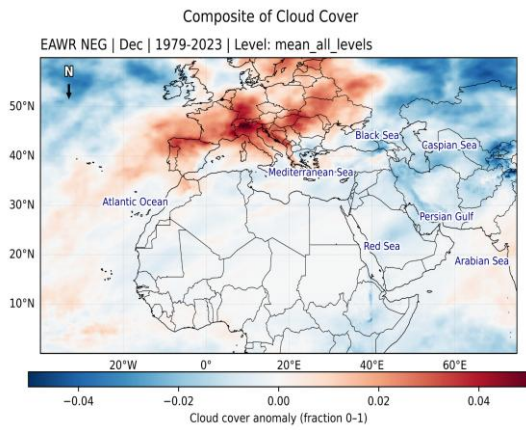
از دلایل عمده می‌توان به رژیم بارشی متفاوت در جنوب شرق کشور اشاره کرد که طبق طبقه‌بندی کوپن و گایگر مدیترانه‌ی و شبه مدیترانه‌ی است و در فصول گرم‌سال مانند تابستان در منطقه در اثر جریانات موسمی هند خصوصاً در زمان‌هایی که شاخص‌های نصف‌النهاری اطلس مثل AMM و خود شاخص کلان مقیاس AMO در



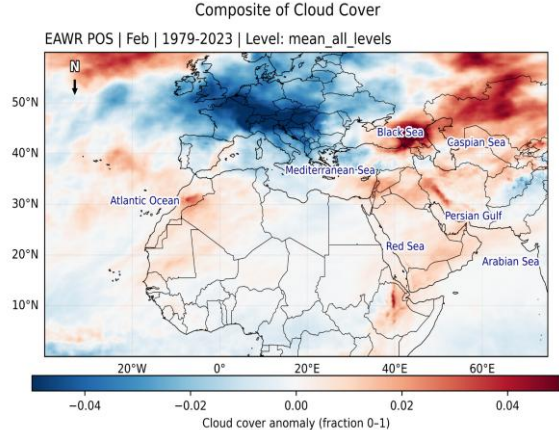
(ب)
b)



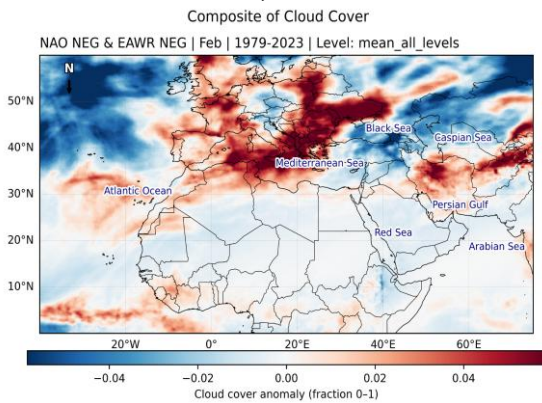
(الف)
a)



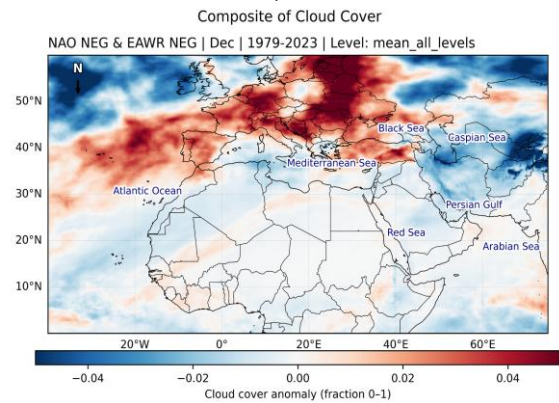
(د)
d)



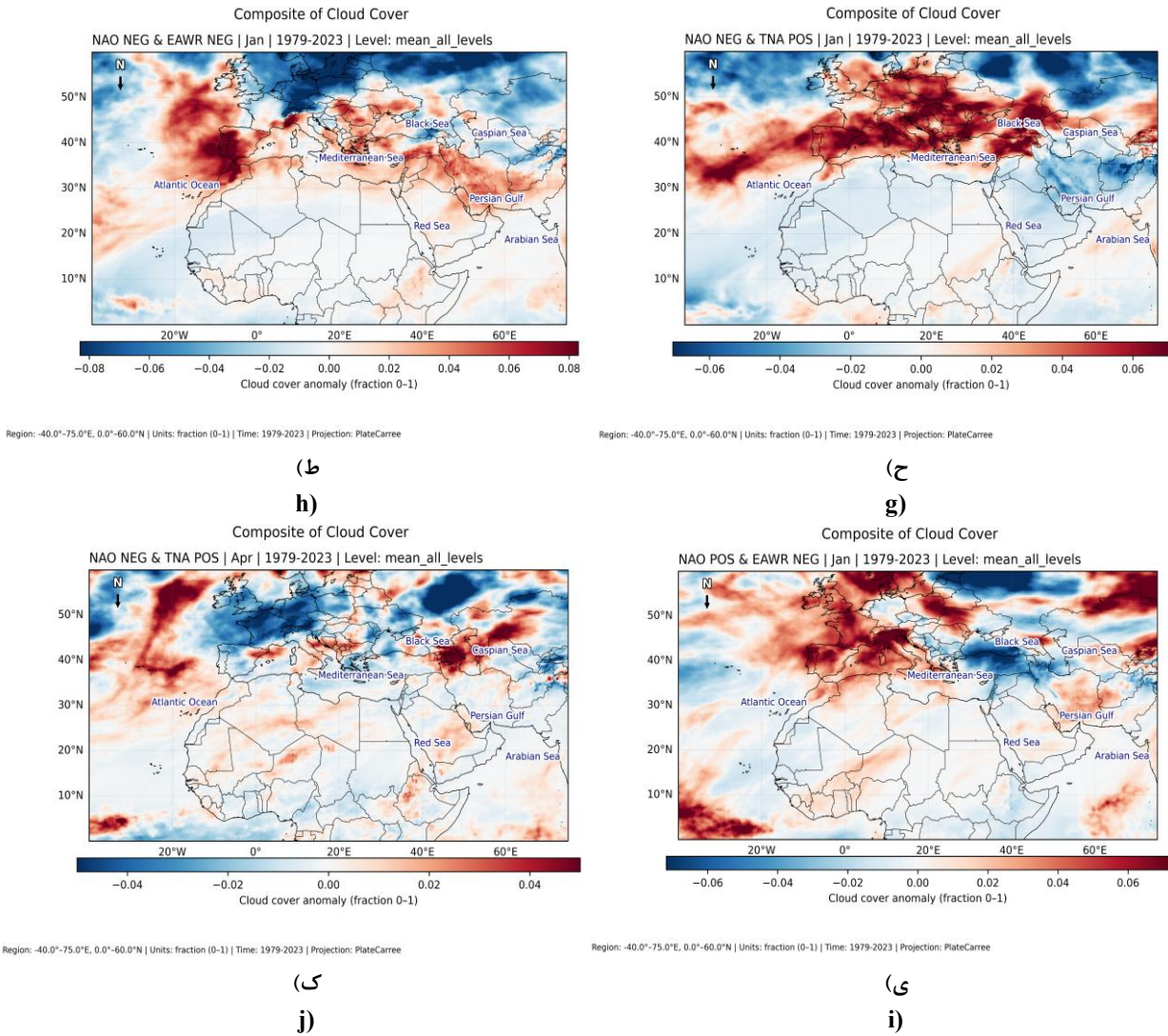
(ج)
c)



(و)
f)



(ه)
e)



شکل ۴. بررسی ترکیب اثر دورپیوندی‌های NAO, TNA, EAWR بر میانگین ابرناکی سه سطح ۵۰۰، ۷۰۰، ۸۵۰ هکتوپاسکال
Fig 4. Investigation of the impact of the merged teleconnections of NAO, TNA, and EAWR on mean cloudiness in three levels of 500,700, and 850hpa

که موسوم به سطح زمین است) ابرهای ارتفاع پایین حساس به فرا رفت سرد روی دریا و وارونگی لایه مرزی با همگرایی رطوبت با صعود کوهستانی و قطاع گرم جبهه بارشی باعث تشکیل ابرهایی از جنس استراتوکمولوس خواهد شد. شکل ۴ دارای ۱۰ قسمت است که به ترتیب از a تا z نام‌گذاری شده است.

در شکل (a) آذرماه تا بهمن‌ماه (دسامبر تا فوریه) فاز مثبت شرق اطلس - غرب روسیه (EAWR) با پشته پر ارتفاع بر اروپای غربی و ناوه بر روسیه شناخته می‌شود؛

در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (تراز میانی) ابرهای سیروس (پرسا چنگکی) با واگرایی سمت راست ورودی جت‌استریک و تاخت‌وتاز موجی تقویت می‌شود؛ در جو فشار ناورد (باروکیلینک) چتر ابری عمیق از تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال تا ۸۵۰ در سطح زمین تشکیل خواهد شد. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ابرهای میانی با بیشینه در نوارهای جبهه‌ی و کم فشارهای مدیترانه پاسخ مستقیم به صعود و همگرایی در رطوبت منتقل شده به این تراز است. در تراز ۸۵۰ (سطح زمین ارتفاع ۱۴۷۰ متری از سطح دریا

فرو نشینی و آنتی-سیکلون سطحی در اروپا کاهش ابر را به صورت کمربند آبی از فرانسه تا ایتالیا و بالکان ایجاد می‌کند؛ در شرق دریای سیاه-کاسپین، ناوه عمیق و واگرایی تروپوپاز، افزایش ابر و نوار قرمز را ایجاد کرده است. نیمه غربی ایران افزایش انومالی رشد ابر را بیشتر از سایر نقاط نشان می‌دهد. در شکل (b) میانگین سه سطح ذکر شده در بالا در آذرماه (دسامبر) در فاز مثبت شاخص شرق اطلس-غرب روسیه مشاهده می‌شود، مرکز کم‌ارتفاع بر روی اروپای غربی-مرکزی و پشته بر روسیه غربی مستقر می‌شود؛ جابه‌جایی کمربند جبهه‌ای و تقویت واگرایی بالایی بر فراز مدیترانه مرکزی باعث صعود گسترده و افزایش ابر از ایبری تا بالکان می‌شود؛ در مقابل، بر روی دریای سیاه-خزر و شمال اقیانوس اطلس، فرو نشینی هوا، کاهش ابر را رقم می‌زند. در فلات ایران شمال غرب، غرب و دامنه‌های زاگرس جنوبی بیشترین آنومالی منفی ابرناکی را نشان داده‌اند.

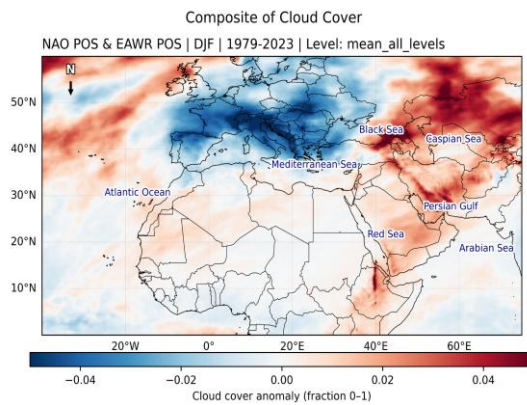
شکل (c) آنومالی ابرناکی ماه بهمن (فوریه) را نمایش داده است. تقویت گرادیان شدید جت و مهاجرت شرق سو-الگوی پشته-ناوه، کاهش ابر را بر اروپای میانی تشدید می‌کند، در حالی که بر پیرامون قفقاز و خاورمیانه ابرناکی افزایش می‌یابد؛ این در چارچوب تقویت فرا رفت و چرخندگی مثبت در جلوی ناوه شرق مدیترانه قابل توجه است. بیشترین آنومالی مثبت ابرناکی در دامنه‌های زاگرس مرکزی در استان‌های فارس، بوشهر، ایلام، کرمانشاه، چهار محال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد مشاهده می‌شود. در شکل (d) وضعیت فاز منفی شاخص شرق اطلس-غرب روسیه در آذرماه نشان داده است. نکته جالب توجه این است که در فاز مثبت سواحل شرقی خزر با کاهش ابرناکی مواجه خواهند شد. شکل (e) فاز ترکیبی نوسان اطلس شمالی و شرق اطلس-غرب روسیه را به تصویر کشیده است. جت استریم در این ترکیب به عرض‌های جنوبی‌تر نقل مکان کرده است، در نتیجه افزایش

ابر در جنوب اروپا و شبه جزیره ایبری کاملاً مشهود است که این وضعیت ادامه داشته و پهنه وسیعی از فلات مرکزی ایران را فراگرفته است که به علت واگرایی بالایی در جلوی ناوه‌های عرض‌های میانه و همگرایی رطوبت در ۷۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال ارتباط دارد. تنها در شمال شرق این مسئله دیده نمی‌شود که مربوط به جریانات آنتی-سیکلونی در فلات ترکمنستان است. در شکل (f) ترکیب نوسان اطلس شمالی (فاز منفی) و شرق اطلس-غرب روسیه (فاز منفی) را نشان داده است. در بهمن‌ماه پوشش ضخیم ابر پیوسته از اسپانیا تا بالکان نشان‌دهنده صعود قوی جبهه گرم و چرخنده‌زایی مدیترانه است؛ حجم ابر افزایش می‌یابد و بیشینه پاسخ در ۷۰۰ هکتوپاسکال انتظار می‌رود. نکته جالب توجه آنومالی بسیار مثبت ابرناکی (>0.04) در بخش‌هایی از ارتفاعات البرز شمالی و دامنه‌های البرز جنوبی استان‌هایی هم‌چون تهران، البرز، قزوین، و همچنين مناطق کویری قم، اصفهان، سمنان است که در این ترکیب فازی مشاهده می‌شود. در شکل (g) عکس قضیه صادق است.

بررسی ترکیب فازی فوق در آذرماه (دسامبر) نشان می‌دهد تأثیر دورپیوندی ماه به ماه و فصل به فصل متفاوت است و ممکن است در یک‌ماه آن ترکیب اثر مثبت و در ماه دیگر اثر منفی بر مولفه مورد بررسی (در اینجا میانگین ابرناکی) داشته باشد. در شکل (h) ترکیب NAO منفی و TNA مثبت است. الگوی TNA یکی از استخرهای سه‌گانه شاخص بزرگ مقیاس AMO است که تأثیر به سزایی در الگوی ابرناکی خاورمیانه و ایران دارد. این الگو که اختلاف گرادیان دمایی بین آب‌های شمال گرینلند با نام TNA و جنوب آن به نام TSA معروف است در کنار شاخص بزرگ مقیاس AMO الگوی سه‌گانه نامیده می‌شود. در این ترکیب فازی شمال و غرب اروپا تحت سیطره جت موسوم به سنت‌هلن اطلس واقع می‌شود که بارش و ابرناکی را برای آن مناطق به ارمغان می‌آورد. در

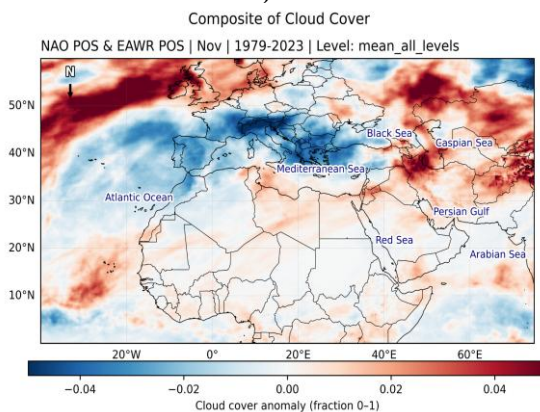
همراه است. نقش پشته غرب روسیه (EAWR-) در شکل‌گیری ناوه عمیق‌تر بر اروپای غربی-مرکزی می‌تواند نوار افزایشی ابر از فرانسه تا بالکان را (طبق نقشه) مشخص کند، در حالی که در شرق مدیترانه کاهش ابر به چشم می‌خورد (Spens Berger C., 2024; Yu et al., 2024; Geng et al., 2024; Xu et al., 2024; Ionita et al., 2025; Zhang et al., 2024; Hou et al., 2025; Felsxhe et al., 2024; Luo et al., 2024; Svennevik et al., 2024; Hersbach et al., 2024; Rantanen et al., 2025; Beranova R., 2025; Rivosecchi A., 2024; Maycock, A.C., 2025).

شکل (i) بررسی NAO منفی و TNA مثبت در فروردین‌ماه است (آوریل). در استانهایی مانند اردبیل، آذر غربی و شرقی و شمال‌کردستان آنومالی بسیار مثبت افزایش شدت ابرناکی مشاهده می‌شود. تداوم شار رطوبت از منطقه‌ی حاره‌ی اطلس و تقویت واگرایی سطوح بالا در جلوه ناوه دریای سیاه و قفقاز سبب افزایش ابرناکی در این مناطق شده است. شکل آخر (j) ترکیب NAO مثبت با EAWR منفی است (دی‌ماه)، این ترکیب معمولاً با تقویت جت اقیانوس اطلس و انتقال محور مسیر طوفان به شمال



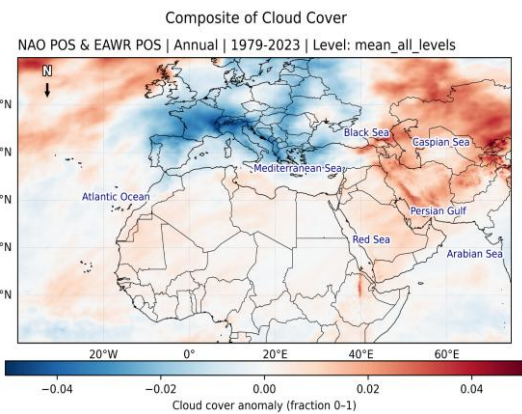
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(ب)
b)



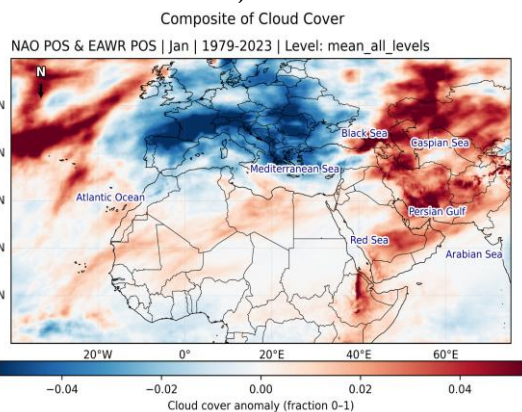
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(د)
d)



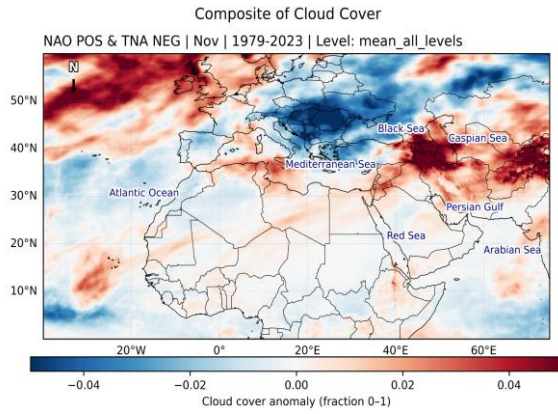
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(الف)
a)



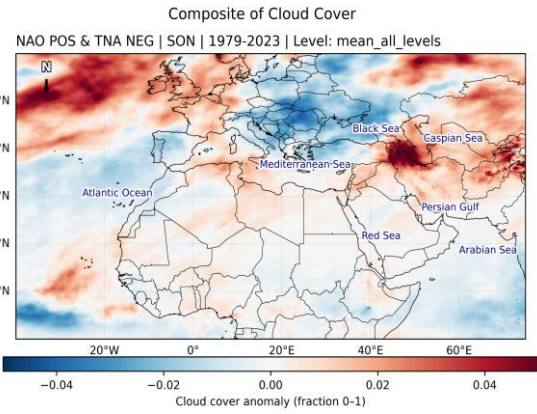
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(ج)
c)



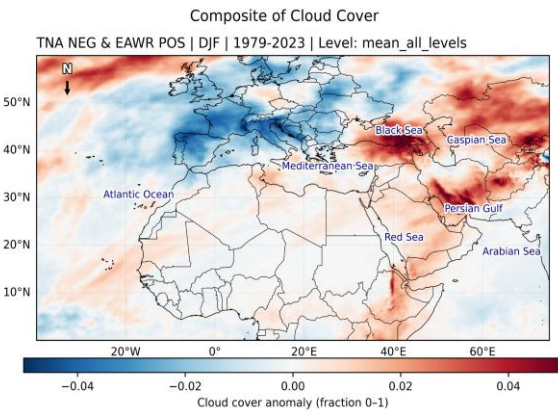
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(ا)



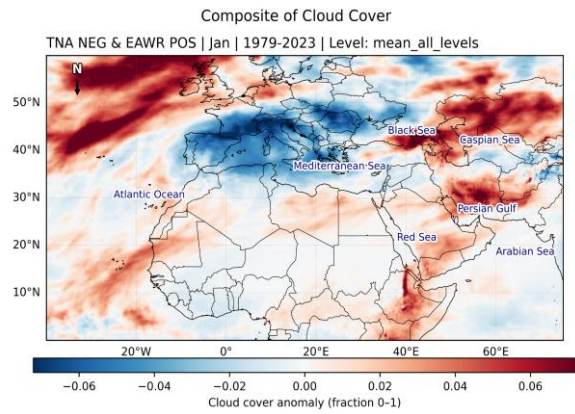
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(ب)



Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(ج)



Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(د)

شکل ۵. بررسی ترکیب اثر دورپیوندی‌های NAO, TNA, EAWR بر میانگین ابرناکی سه سطح ۵۰۰، ۷۰۰، ۸۵۰ هکتوپاسکال (بخش دوم)

Fig 5. Investigation of the impact of the merged teleconnections of NAO, TNA, and EAWR on mean cloudiness in three levels of 500,700, and 850hpa (section 2)

سه‌ماهه آذر تا بهمن (دسامبر تا ژانویه) با ترکیب فاز مثبت دو شاخص نمایش داده شده است. تقویت گرادیان جت اطلس و جبهه‌زایی حاشیه مدیترانه باعث کاهش ابر بر فرانسه، ایتالیا، بالکان و افزایش آن بر قفقاز-کاسپین می‌شود؛ کمبود ابر لایه‌پایین (۸۵۰ hPa) و میانی (۷۰۰ hPa) بر اروپا و افزایش ابر سیروس در (۵۰۰ hPa) در شرق مدیترانه از دیگر اثرات این ترکیب فازی است. در فلات ایران دوسوم جنوبی بیشینه تأثیر افزایش ابرناکی در سه‌ماهه حساس بارشی در کشور را به خود اختصاص داده است. و یک بیشینه تأثیر دیگر در مرز تمرچین و ارتفاعات

شکل (a) آنومالی ابرناکی سالانه در سه‌سطح ذکرشده با ترکیب نوسان اطلس شمالی در فاز مثبت و نوسان شرق اطلس- غرب روسیه در فاز مثبت را نشان می‌دهد. کمربند کاهش ابر در اروپای غربی-میانی قابل مشاهده است که با فرونشینی هوا در همین مناطق سازگاری دارد. همزمان در پیرامون دریای سیاه- کاسپین با توجه به فاز مثبت EAWR وجود پشته در اروپای غربی تا میانی در شرق الگو، چرخنده‌زایی سبب افزایش ابر در پهنه وسیعی از فلات ایران شده است، که بیشینه تأثیر آن در دامنه‌های زاگرس مشهود است. در شکل (b) آنومالی ابرناکی در

ابرناسکی را با مشکل مواجه می‌کند. در شکل (f) ترکیب فاز NAO مثبت و TNA منفی این بار در سه‌ماهه شهریور تا آبان (سپتامبر تا نوامبر) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که باز هم بیشینه تأثیر در شمال غرب ایران است. کمربند کاهش ابر در اروپای غربی و بالعکس افزایش آن در شبه جزیره بالکان تا قفقاز که ناشی از واگرایی ورودی سمت راست جت بر شرق مدیترانه است که صعود دینامیکی هوا و به دنبال آن افزایش ابرناکی را در سه سطح مورد بررسی پژوهش تشدید خواهد کرد.

در شکل (g) ترکیب فاز منفی TNA و EAWR مثبت در سه‌ماهه آذر تا بهمن (دسامبر تا ژانویه) نمایش داده شده است. حداکثر تأثیر در دامنه‌ها و ارتفاعات زاگرس مرکزی و جنوبی در فلات ایران قابل مشاهده است. و در آخر شکل (h) ترکیب بازهم دو فاز نام‌برده در بالا یعنی TNA منفی و EAWR مثبت در دی‌ماه (ژانویه) است که بازهم حداکثر تأثیر در دوسوم جنوبی فلات ایران قابل مشاهده است. نوار آبی در شکل کاهش کمربند ابرناکی را در شبه‌جزیره ایبری نشان داده است. این مورد نشان‌دهنده سیگنال قوی فرونشینی و نزول دینامیکی هوا در منطقه ذکر شده است که با جابه‌جایی مسیر طوفان به شمال، ابرناکی در سه سطح (۵۰۰ و ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال) کاهش چشمگیری دارد و صرفاً چتر ابر سیروس در جبهه‌های شرقی دور دست را تقویت خواهد کرد (Portal et al., 2024; Doiteau et al., 2024; Caporaso et al., 2024; Avolio et al., 2024; Gutierrez et al., 2024; Atkins et al., 2024; O'Reilly, 2025; Mitevski, et al., 2025; Dalelane et al., 2025; Hou et al., 2025; Diodato et al., 2025; Chen et al., 2024 and Post and Aun, 2024).

نتیجه‌گیری

از منظر روش‌شناختی، ROCK-PCA سه ویژگی که به‌ندرت به‌طور هم‌زمان فراهم می‌شوند—فاز آگاهی، یادگیری متعدد و متنوع غیرخطی، و چرخش

زاگرس شمالی به چشم می‌خورد، سایر مناطق نیز اثر افزایش نسبی ابرناکی را نیز به خود اختصاص داده‌اند. در شکل (c) ترکیب مثبت دو شاخص در دی‌ماه (ژانویه) را نشان می‌دهد. بیشینه فرونشینی هوا بر اروپای میانی همراه است؛ نوار آبی (کاهش ابرناکی) از ایبری تا بالکان نمایانگر تسلط واچرخندی سطحی و واگرایی تروپوپاز در خروجی چپ جت استریک اقیانوس اطلس شمال شرقی است؛ در شرق، ناوه پایدار (الگوی بندال) سبب ابرناکی زیاد پیرامون دریای سیاه می‌شود. در فلات ایران نیز دو بیشینه تأثیر افزایش ابرناکی در اثر برهمکنش فاز مثبت دو شاخص مشاهده می‌شود. یکی در سواحل غربی خزر و دیگری در استان‌های واقع در نیمه جنوبی و شرقی کشور از جمله یزد، فارس، کرمان، چهار محال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و جنوب خراسان جنوبی این مسئله قابل رویت است. در شکل (d) ترکیب فاز مثبت دو شاخص در آبان‌ماه (نوامبر) نمایش داده شده است. بیشینه تأثیر در شمال غرب ایران مشاهده می‌شود. در پاییز گردان گرمایی بین سطح دریا-هوا قوی است؛ با وجود NAO+ کاهش ابر بر اروپای غربی مشهود است اما نوار باریک افزایش ابر بر آلپ-بالکان ناشی از سیکلون‌های عبوری و صعود و هم‌گرایی رطوبت در پیشانی ناوه مدیترانه‌ای است. در شکل (e) ترکیب فاز مثبت نوسان اطلس شمالی و TNA منفی در آبان‌ماه (نوامبر) قابل مشاهده است. بیشینه تأثیر آفرین (حدی) در شمال غرب ایران و سواحل غربی، مرکزی تا تقریباً سواحل شرقی دریای خزر با مقدار آنومالی بزرگ‌تر از ۰/۰۴ بر طبق راهنمای نقشه قابل مشاهده است. نتیجه این برهمکنش افزایش ابر در بالکان-قفقاز تا دریای سیاه است و کاهش ابرناکی در مدیترانه مرکزی مشهود است. کاهش شار بخار سطح دریا در اطلس حاره‌ای شرقی نقش کاهنده بر تغذیه رطوبت در چرخنده‌های عبوری از مدیترانه دارد که تشدید

Beranová, R. (2025). A multi-dataset analysis of precipitation trends in Europe in the 21st century. *Journal of Hydrometeorology*, 26(7), 1313–1333. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-24-0114.1>

Bueso, D., Piles, M., & Camps-Valls, G. (2022). Let's consider more general nonlinear approaches to study teleconnections of climate variables. *arXiv preprint*, arXiv:2212.07635. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.07635>

Bueso, M.-C., Piles, M., & Camps-Valls, G. (2020). Nonlinear PCA: ROCK approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, arXiv 58(5), 3272–3284. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2969813>

Cape, J. (2024). On varimax asymptotic in network models and spectral methods. *arXiv preprint*, arXiv:2403.05461. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.05461>

Caporaso, L., Duveiller, G., Giuliani, G., Giorgi, F., Stengel, M., Massaro, E., Piccardo, M., & Cescatti, A. (2024). Converging findings of climate models and satellite observations on global afforestation impacts on clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129, e2023JD039235. <https://doi.org/10.1029/2023JD039235>

Carvalho-Oliveira, J., Di Capua, G., Borchert, L. F., Donner, R. V., & Baehr, J. (2024). Causal relationships and predictability of the summer East Atlantic teleconnection. *Weather and Climate Dynamics*, 5, 1561–1578. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-1561-2024>

Chen, L., Zhong, X., Li, H., Wu, J., Lu, B., Chen, D., Xie, S.-P., Wu, L., Chao, Q., Lin, C., Hu, Z., & Qi, Y. (2024). A machine learning model that outperforms conventional numerical weather models at S2S timescales. *Nature Communications*, 15, 50714. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50714-1>

Cheng, S., Li, J., Zhang, P., & Zhang, R. (2024). Impact of summer North Atlantic Sea surface temperature on European precipitation. *Journal of Climate*, 37(19), —. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-24-0072.1>

Chtirkova, B., Folini, D., Correa, L. F., & Wild, M. (2023). Internal variability of the climate system mirrored in decadal-scale trends of surface solar radiation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(12), e2023JD038573. <https://doi.org/10.1029/2023JD038573>

Dalelane, C., Paxian, A., Senande, M., Sanfiz, S., Rodríguez Guisado, E., Wandel, J., & Tyagi, A. (2025). Targeted teleconnections and their application to the postprocessing of climate predictions. *EGU sphere (preprint)*, —. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-3664>

Diodato, N., Seftigen, K., & Bellocchi, G. (2025). Millennium-scale Atlantic multidecadal oscillation and soil moisture in the Mediterranean. *Research*, 6, 606. <https://doi.org/10.34133/research.0606>

تفسیرپذیر—را یکپارچه می‌کند و بدین‌سان مؤلفه‌هایی همخوان با واقعیت‌های هواشناسی و سودمند در سطح عملیاتی را ارائه می‌دهد. از منظر محتوایی، این تحلیل پیوند میان دورپیوندی‌ها و ابرناکی بر فراز ایران را دقیق‌تر می‌سازد: شاخص TNA کنترل پایدار در مقیاس سالانه را اعمال می‌کند؛ NAO نقش مهمی در تغییرات فصلی را برعهده دارد؛ و الگوهای EP-NP و EA/WR از رهگذر جابه‌جایی جت و با تقویت مسیر توفان‌ها اهرم اثرگذار است و تأثیر خاصی را در منطقه ایجاد می‌کند. این یافته‌ها از به‌کارگیری هدفمند پیش‌بینی‌های شرطی‌شده به وضعیت دورپیوندی برای مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی انرژی‌خورشیدی و پایش ریسک‌های اقلیمی پشتیبانی می‌کند. در ادامه، پیشنهاد می‌شود محصولات ماهواره‌ای ابر همسان‌سازی شوند، حساسیت نسبت به نوع کرنل و فرا پارامترها بررسی‌گردد، روش‌های کشف علی (مانند ROCK-PCMC) به کار گرفته شود، و برون‌داده‌های PCA در سامانه‌های پیش‌بینی زیر فصلی تا فصلی (S2S) و چارچوب‌های یادگیری ماشین ادغام گردد.

منابع

Ahmadi, F Mojard, M& Najafi. R. (2025). Analysis of the relationship between soil temperature sensors of meteorological stations in Kermanshah province and remote sensing patterns. *Journal of Drought and Climate Change Research*. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8448.1085> [In Persian].

Akhtar-Danesh, N. (2023). Impact of factor rotation on Q-methodology analysis. *PLOS ONE*, 18(8), e0286587. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286587> [In Persian].

An, S.-I., Park, H. J., Kim, S. K., Cai, W., Santoso, A., Kim, D., & Kug, J.-S. (2023). Main drivers of Indian Ocean Dipole asymmetry revealed by a simple IOD model. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 93. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00422-2>

Atkins, J. R. C., Tinker, J., Graham, J. A., Scaife, A. A., & Halloran, P. R. (2024). Seasonal forecasting of the European North-West shelf seas. *Climate Dynamics*, 63, 1761–1777. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07439-0>

- Doiteau, B., Pantillon, F., Plu, M., Descamps, L., & Rieutord, T. (2024). Systematic evaluation of the predictability of different cyclone types over the Mediterranean. *Weather and Climate Dynamics*, 5, 1409–1435. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-1409-2024>
- Fang, K., Tao, Q., Lv, K., He, M., Huang, X., & Yang, J. (2024). Kernel PCA for out-of-distribution detection. *NeurIPS 2024 Proceedings, Proc. 38th NeurIPS*.
- Felsche, E., Böhnisch, A., Poschlod, B., & Ludwig, R. (2024). European hot and dry summers are projected to become more frequent and expand northwards. *Communications Earth & Environment*, 5, 410. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01575-5>
- Foroozan, Z., Griebinger, J., Pourtahmasi, K., & Bräuning, A. (2020). 501 years of spring precipitation history for the semi-arid Northern Iran derived from tree-ring $\delta^{18}O$ data. *Atmosphere*, 11(9), 889. <https://doi.org/10.3390/atmos11090889> [In Persian].
- Fourotan, Z., Zainali, —., & Betul, —. (2023). The simultaneous effect of NAO and AMO cycle indices on the variability of temperature and precipitation in the neighboring cities of Sablan. *Environmental Science Studies*, 8(1), 5857–5868. <https://doi.org/10.22034/jess.2022.345519.1802> [In Persian].
- Galytska, E., Weigel, K., Handorf, D., Jaiser, R., Köhler, R., Runge, J., & Eyring, V. (2023). Evaluating causal Arctic–midlatitude teleconnections in CMIP6. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD037978. <https://doi.org/10.1029/2022JD037978>
- Geng, X., Kug, J.-S., & Kosaka, Y. (2024). Future changes in the wintertime ENSO–NAO teleconnection under greenhouse warming. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 81. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00627-z>
- Gutiérrez-Fernández, J., Miglietta, M. M., González-Alemán, J. J., & Gaertner, M. Á. (2024). A new refinement of Mediterranean tropical-like cyclones identification. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL106429. <https://doi.org/10.1029/2023GL106429>
- Halifa-Marín, A., Woollings, T., Hernández-Carrascal, A., Barriopedro, D., & Vicente-Serrano, S. M. (2024). Too-stable North Atlantic climate system in CMIP6 models limits precipitation teleconnections. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(753), 1193–1210. <https://doi.org/10.1002/qj.4999>
- Hajjarian, Ahmad. (2025). Drought risk monitoring and zoning using the random forest model (case study: Ardabil province). *Journal of Drought and Climate Change Research*. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8551.1093>. [In Persian].
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2024). The ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150, 3392–3430. <https://doi.org/10.1002/qj.4803>
- Hou, Y., Man, K., Yu, S., & Li, X. (2025). Record-high precipitation over Eastern Europe induced by atmospheric rivers in late fall 2023. *Geophysical Research Letters*, 52, e2024GL114309. <https://doi.org/10.1029/2024GL114309>
- Hussain, A., Cao, J., Hussain, I., Begum, S., Akhtar, M., Wu, X., Guan, Y., & Zhou, J. (2021). Observed trends and variability of temperature and precipitation and their global teleconnections in the Upper Indus Basin, Hindukush-Karakoram-Himalaya. *Atmosphere*, 12(8), 973. <https://doi.org/10.3390/atmos12080973>
- Ioniță, M., Vaideanu, P., & Nagavciuc, V. (2025). Breaking records under clear skies: The impact of sunshine duration and soil moisture on Eastern European heat in 2024. *npj Natural Hazards*, 1, 9. <https://doi.org/10.1038/s44304-025-00137-9>
- Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Lychak, O., & Matsko, I. (2024). Hilbert transform for covariance analysis of periodically nonstationary random signals with high-frequency modulation. *ISA Transactions*, 144, 452–481. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.10.025>
- Jin, S., Yu, L., Cao, J., Zhang, L., Zhao, Y., Zhou, W., & Jiang, J. H. (2024). ENSO disrupts the effectiveness of the cloud-radiative-effect feedback perturbations on precipitation. *Journal of Climate*, 37(6), 2553–2572. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0282.1>
- Kambeizidis, H. D. (2024). Atmospheric Processes over the Broader Mediterranean Region: Effect of the El Niño–Southern Oscillation? *Atmosphere*, 15(3), 268. <https://doi.org/10.3390/atmos15030268>
- Liu, Y., Zhu, L., Yu, Z., Wang, Z., Sillmann, J., & Li, C. (2023). Opposing trends of cloud coverage over land and ocean under global warming. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(10), 6559–6577. <https://doi.org/10.5194/acp-23-6559-2023>
- Llanes-Cárdenas, O., Norzagaray-Campos, M., Gaxiola, A., & González, G. E. G. (2020). Regional precipitation tele-connected with PDO–AMO–ENSO in northern Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 667–681. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03003-7>
- Luo, H., Quaas, J., & Han, Y. (2024). Diurnally asymmetric cloud cover trends amplify daytime warming and nighttime moistening. *Science Advances*, 10, eado5179. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado5179>

- Malik, A., Stenchikov, G., Mostamandi, S., Parajuli, S., Lelieveld, J., Zittis, G., Ahsan, M. S., Atique, L., & Usman, M. (2024). Accelerated historical and future warming in the Middle East and North Africa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *129*(19), e2024JD041625. <https://doi.org/10.1029/2024JD041625>
- Marukatat, S. (2023). Tutorial on PCA and approximate kernel PCA. *Artificial Intelligence Review*, *56*, 5445–5477. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10297-z>
- Matsuki, A., Kori, H., & Kobayashi, R. (2023). An extended Hilbert transform method for reconstructing the phase from an oscillatory signal. *Scientific Reports*, *13*, 3535. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30405-5>
- Maycock, A. C. (2025). North Atlantic seasonal climate variability significantly modulates European windstorm hazards. *EGUsphere (preprint)*, *EGUsphere* 2025-1131. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1131>
- Meidani, E., & Araghinejad, S. (2014). Long-lead streamflow forecasting in the southwest of Iran by sea surface temperature of the Mediterranean Sea. *Journal of Hydrologic Engineering*, *19*(8), 05014005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000965](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000965). [In Persian].
- Mitevski, I., Lee, S. H., Vecchi, G. A., Orbe, C., & Polvani, L. M. (2025). More positive and less variable North Atlantic Oscillation at higher CO₂ forcing. *npj Climate and Atmospheric Science*, *8*, 51. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01051-7>
- Molteni, F., Corti, S., & Ferranti, L. (2023). Early- and late-winter ENSO teleconnections to the Euro–Atlantic sector from C3S seasonal forecasts. *Climate Dynamics*, —. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06698-7>
- O'Reilly, C. H. (2025). Signal-to-noise errors in early winter Euro-Atlantic teleconnections. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *151*, e4952. <https://doi.org/10.1002/qj.4952>
- Park, M., Johnson, N. C., & Delworth, T. L. (2024). The driving of North American climate extremes by wave interference over the North Pacific. *Nature Communications*, *15*, 7455. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51601-5>
- Pi, Y., Yu, Y., Zhang, Y., Xu, C., & Yu, R. (2020). Extreme temperature events during 1960–2017 in the arid region of Northwest China: *Spatiotemporal dynamics and associated large-scale atmospheric circulation*. *Sustainability*, *12*(3), 1198. <https://doi.org/10.3390/su12031198>
- Portal, A., Raveh-Rubin, S., Catto, J. L., Givon, Y., & Martius, O. (2024). Linking compound weather extremes to Mediterranean cyclone types. *Weather and Climate Dynamics*, *5*, 1043–1066. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-1043-2024>
- Post, P., & Aun, M. (2024). Changes in cloudiness contribute to changing seasonality of marine climate variability. *Progress in Oceanography*, *217*, 103134. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.103134>
- Ramezani Edelali, Hadi, & Kouhi. (2024). Investigating the impact of climate change on drought in Iran using a population exposure approach. *Journal of Drought and Climate Change Research*. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079> [In Persian].
- Rantanen, M., Lindfors, A. V., Räisänen, P., & Laaksonen, A. (2025). Summer 2024 in northern Fennoscandia was very likely the warmest on record. *npj Climate and Atmospheric Science*, *8*, 46. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01046-4>
- Rashedi, S., Sorooshian, A., Kazemi, Z., Karimi, N., & Namazi, M. (2024). On the characteristics and long-term trend of total cloud cover in Iran. *Acta Geophysica, Advance online publication*. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01351-1>. [In Persian].
- Rieger, N., Corral, Á., Olmedo, E., & Turiel, A. (2021). Lagged teleconnections of climate variables identified via complex rotated maximum covariance analysis. *Journal of Climate*, *34*(24), 9861–9878. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0244.1>
- Rivosecchi, A., Bollasina, M. A., & Colfescu, I. (2024). Future changes in the influence of the NAO on Mediterranean winter precipitation extremes in the EC-Earth3 large ensemble: *The prominent role of internal variability*. *SSRN Preprint, SSRN 4705279*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4705279>
- Rohe, K., & Zeng, M. (2023). Vintage factor analysis with Varimax performs statistical inference. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, *85*(4), 1037–1066. <https://doi.org/10.1093/jrsssb/qkad029>
- Sandler, D., Saaroni, H., Ziv, B., Tamarin-Brodsky, T., & Harnik, N. (2024). The connection between North Atlantic storm track regimes and eastern Mediterranean cyclonic activity. *Weather and Climate Dynamics*, *5*, 1103–1116. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-1103-2024>
- Schilliger, L., Bourgeois, Q., Correa, L. F., & Wild, M. (2024). An investigation on causes of the detected surface solar radiation brightening in Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *129*(18), e2024JD041101. <https://doi.org/10.1029/2024JD041101>
- Shaw, T. A., Baldwin, M., Barnes, E. A., Hassanzadeh, P., Li, C., O’Gorman, P. A., Simpson, I. R., Son, S.-W., Ting, M., & Voigt, A. (2024). Emerging climate-change signals in atmospheric circulation. *AGU Advances*, *5*(5), e2024AV001297. <https://doi.org/10.1029/2024AV001297>

- Spensberger, C. (2024). Teleconnections through weather rather than stationary waves. *Weather and Climate Dynamics*, 5, 659–669. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-659-2024>
- Strnad, F. M., Chen, Z., Tan, G., Wang, C., & Whitehouse, L. (2022). Teleconnection patterns of different El Niño types revealed by a large-ensemble full-field GCM experiment. *Geophysical Research Letters*, 49(17), e2022GL098571. <https://doi.org/10.1029/2022GL098571>
- Sundararajan, R. R. (2021). Principal component analysis using frequency components of multivariate time series. *Computational Statistics & Data Analysis*, 157, 107164. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2020.107164>
- Svennevik, H., Hicks, S. A., Riegler, M. A., Storelvmo, T., & Hammer, H. L. (2024). A dataset for predicting cloud cover over Europe. *Scientific Data*, 11, 245. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03062-0>
- Vázquez, M., Nieto, R., Drumond, A., & Gimeno, L. (2023). Influence of teleconnection patterns on global moisture transport. *International Journal of Climatology*, 43(18), 7855–7878. <https://doi.org/10.1002/joc.7843>
- consider in the development of climate fingerprints. *Journal of Climate*, 37(5), 1723–1735. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0267.1>
- Yang, R., & Xing, B. (2022). Teleconnections of large-scale climate patterns to regional drought in mid-latitudes: A case study in Xinjiang, China. *Atmosphere*, 13(2), 230. <https://doi.org/10.3390/atmos13020230>
- Yu, L., Wu, B., Jiang, Z., & Li, J. (2024). Seasonal phase change of the North Atlantic triple drivers shaping European winter climate. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 73. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00882-0>
- Zhang, G., Rantanen, M., & Clancy, P. (2024). SCAND: An index for the Scandinavian pattern. *Weather and Climate Dynamics*, 5(3), 893–907. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-893-2024>
- Wang, G., Yuan, X., Jing, C., Hamdi, R., Ochege, F. U., Dong, P., Shao, Y., & Qin, X. (2024). The decreased cloud cover dominated the rapid spring temperature rise in arid Central Asia over the period 1980–2014. *Geophysical Research Letters*, 51(2), e2023GL107523. <https://doi.org/10.1029/2023GL107523>
- Weylandt, M., & Swiler, L. P. (2024). Beyond PCA: Additional dimension reduction techniques to Zhang, R., Zhang, L., Wu, L., & Johns, W. E. (2019). Sensitivity of the Atlantic meridional overturning circulation to the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Nature*, 565(7739), 367–372. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0822-7>
- Zhu, Z., Piao, S., Xu, Y., Bastos, A., Ciais, P., & Peng, S. (2017). The effects of teleconnections on carbon fluxes of global terrestrial ecosystems. *Geophysical Research Letters*, 44(7), 3209–3218. <https://doi.org/10.1002/2016GL072296>
- Zohrabi, N., Bavani, A. M., Goodarzi, E., & Eslamian, S. (2014). Attribution of temperature and precipitation changes to greenhouse gases in northwest Iran. *Quaternary International*, 345, 130–137 (In Persian). <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.01.026> [In Persian].

