

The relationship between teleconnection indices and Aerosol Optical Depth (AOD) at selected stations in Sistan and Baluchistan Province

Abolfazl Davari ¹, Rasool Mahdavi Najafabadi ^{2*}, Marzieh Rezai ², Ommolbanin Bazrafshan ³, Alireza Shahriary ⁴

¹ PhD Student of Watershed Management Sciences and Engineering, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran

² Associate Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran

³ Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Hormozgan University, Bandar Abbas, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Green Space, Faculty of Geography and Environmental Planning, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

Extended Abstract

Introduction

Dust storms, which are particularly prevalent in arid and semi-arid regions such as Sistan and Baluchestan Province in Iran, pose significant environmental and health challenges. These storms are influenced by climatic factors and large-scale atmospheric patterns known as teleconnections, which modulate dust activity by affecting wind patterns, precipitation, and temperature. This study investigates the relationship between teleconnection indices and Aerosol Optical Depth (AOD) at two stations, Iranshahr and Zabol, aiming to improve the understanding and prediction of dust storms in the region. By leveraging machine learning models, the research seeks to identify key climatic drivers and develop accurate predictive tools for dust storm management.

Materials and Methods

The study utilized meteorological and climatic data from local weather stations, satellite sources (e.g., MODIS), and global teleconnection indices obtained from NOAA's Physical Sciences Laboratory. Data preprocessing involved normalization and standardization to enhance model performance. Relationships between teleconnection indices and AOD were examined using Pearson correlation analysis. Feature selection was performed with the Boruta method, followed by the application of five machine learning algorithms: Bagged CART, LightGBM, Gradient Boosting, Random Forest, and XGBoost for AOD prediction. Model performance was evaluated using Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), and R-squared (R^2). Furthermore, Shapley values, Sobol sensitivity analysis, and Partial Dependence Plots (PDPs) were employed to assess variable importance and interpret model behavior.

Results and Discussion

Correlation analysis revealed distinct patterns between teleconnection indices and Aerosol Optical Depth (AOD) at the two study stations. At Iranshahr, a strong negative correlation (-0.437) was observed with the Atlantic Meridional Mode (AMM), while the North Atlantic Oscillation (NAO) showed a positive correlation (0.236). In contrast, the most influential indices at Zabol were the Trans-Niño Index (TNI) and the Western Hemisphere Warm Pool (WHWP). Feature selection identified AMM, WHWP, and the Tropical Northern Atlantic index (TNA) as critical drivers for Iranshahr, whereas TNI and WHWP emerged as dominant predictors for Zabol. The applied machine learning models demonstrated strong predictive performance for AOD, with XGBoost and Gradient Boosting achieving the highest accuracy ($R^2=1$ for Iranshahr and $R^2=0.99$ for Zabol). Sensitivity analyses confirmed.

Conclusion

The analysis of results from the Iranshahr and Zabol stations indicates that teleconnection indices significantly influence Aerosol Optical Depth (AOD) variations in these regions. This influence stems from the indices' impact on atmospheric circulation patterns, dust transport pathways, and regional moisture conditions. While similar general patterns have been observed elsewhere, the intensity and direction of these relationships vary due to the unique geographical characteristics of each location. Pacific Ocean indices dominate AOD variations at Zabol, with increasing influence over longer lags, whereas Atlantic indices are the primary drivers at Iranshahr, due to distinct local wind and geographical conditions. From a modeling perspective, boosting-based algorithms (e.g., XGBoost, Gradient Boosting) outperformed bagging models, demonstrating higher efficiency in capturing the nonlinear relationships between climatic indices and AOD. This study advances the understanding of AOD control mechanisms by identifying key teleconnection drivers and developing accurate predictive models. It also accounts for spatial variations in influential factors, which can support the design of region-specific early warning systems for dust storms. The identification of threshold-dependent relationships and critical behavioral thresholds in the indices can significantly improve the accuracy of both short-term and long-term AOD predictions. Furthermore, these results provide a robust scientific foundation for adaptive management planning in sectors such as water resources, agriculture, public health, and transportation. By leveraging this enhanced understanding of regional climatic mechanisms, policymakers and planners can develop more targeted and effective strategies to mitigate the impacts of dust storms.

Keywords: Aerosol Optical Depth (AOD), Shapley value, Sobol sensitivity analysis, Teleconnections, XGBoost model.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Hormozgan for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

We have no permission to release data and code.

Authors' contribution

Abolfazl Davari: Performing software analyses, writing the initial version of the article, **Rasool Mahdavi Najafabadi:** Guidance, conceptualization, editing and reviewing the article, review of results, **Marzieh Rezai:** Conceptualization, reviewing the text of the article, **Ommolbanin Bazrafshan:** Conceptualization, reviewing the text of the article, **Alireza Shahriary:** Conceptualization, reviewing the text of the article

Corresponding Author, E-mail: ra_mahdavi2000@hormozgan.ac.ir

Citation: Davari, A., Mahdavi Najafabadi, R., Rezai, A., Bazrafshan, O., & Shahriary, AR. (2026). Prediction of teleconnection effects on AOD index in Sistan and Baluchestan province using machine learning models. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 350-367.

doi: 10.22098/mmws.2026.19012.1755

Received: 20 December 2025, Received in revised form: 26 February 2026, Accepted: 27 March 2026, Published online: 27 August 2026.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 350-367.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارتباط شاخص های پیوند از دور با شاخص (AOD) در ایستگاه های منتخب استان سیستان و بلوچستان

ابوالفضل داوری^۱، رسول مهدوی نجف آبادی^{۲*}، مرضیه رضایی^۲، ام البنین بذرافشان^۳، علیرضا شهریاری^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۳ استاد، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

^۴ دانشیار، گروه فضای سبز، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

شاخص های پیوند از دور تأثیر بسزایی بر شدت و فراوانی طوفان های گرد و غبار دارند. در این پژوهش به بررسی ارتباط بین شاخص های پیوند از دور و تغییرات عمق اپتیکی آتروسول در ایستگاه های ایران شهر و زابل در سیستان و بلوچستان پرداخته شده است. داده های ماهانه AOD (۲۰۰۰-۲۰۲۱) از سنجنده MODIS و شاخص های پیوند از دور از پایگاه NOAA استخراج شد. تحلیل اولیه با همبستگی پیرسون انجام گرفت. سپس، با استفاده از الگوریتم Boruta، متغیرهای مؤثر برای هر ایستگاه انتخاب شدند. پنج الگوریتم یادگیری ماشین شامل Gradient Boosting، Random Forest، XGBoost و مدل سازی استفاده شد و با معیارهای RMSE، MAPE و R^2 مورد ارزیابی قرار گرفتند. در نهایت، برای تفسیر مدل های یادگیری ماشین از روش های SHAP، تحلیل حساسیت Sobol و نمودارهای Partial Dependence Plots (PDP) استفاده گردید. نتایج همبستگی بین شاخص های پیوند از دور و AOD نشان داد شاخص Atlantic Meridional Mode (AMM) با همبستگی منفی (۰/۴۳۷-) و North Atlantic Oscillation (NAO) با همبستگی مثبت (۰/۲۳۶+) بیشترین تأثیر را بر عمق اپتیکی آتروسول ایران شهر دارند، درحالی که در زابل، شاخص های Trans-Niño Index (TNI) و Western Hemisphere Warm Pool (WHWP) نقش اصلی را ایفا می کنند. تحلیل نتایج انتخاب ویژگی های اقلیمی در ایستگاه ایران شهر نشان داد، شاخص های مرتبط با اقیانوس اطلس از جمله AMM، Tropical Northern Atlantic، Tropical Southern Atlantic (TSA) و Atlantic Multi-decadal Oscillation (AMO) به همراه شاخص های منطقه ای مانند Tropical Southern Atlantic (TSA) و NAO بیشترین تأثیر را بر شرایط اقلیمی دارند. در مقابل، در ایستگاه زابل شاخص های وابسته به اقیانوس آرام شامل TNI و WHWP نقش تعیین کننده تری ایفا کردند. مدل سازی با پنج الگوریتم یادگیری ماشین نشان داد مدل های Gradient Boosting و XGBoost به عنوان بهترین مدل ها قادر به پیش بینی دقیق عمق اپتیکی آتروسول هستند. تحلیل جامع ارزیابی اهمیت متغیرها در دو ایستگاه ایران شهر و زابل نشان داد که عوامل اقلیمی مؤثر در هر منطقه کاملاً متمایز هستند. در ایران شهر، شاخص AMM به عنوان مؤثرترین عامل، به ویژه در تأخیرهای کوتاه مدت و در هر دو روش SHAP و Sobol شناخته شد. در مقابل، در زابل شاخص های اقیانوس آرام (TNI و WHWP) نقش غالب داشتند و تأثیر آن ها با افزایش مدت تأخیر، تشدید شد.

واژه های کلیدی: ارزش Shapley، پیوند از دور، تحلیل حساسیت Sobol، عمق اپتیکی آتروسول، مدل XGBoost

نوع مقاله: پژوهشی

مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ra_mahdavi2000@hormozgan.ac.ir

استناد: داوری، ابوالفضل، مهدوی نجف آبادی، رسول، رضایی، مرضیه، ام البنین، بذرافشان، و شهریاری، علیرضا (۱۴۰۵). پیش بینی تأثیر پیوند از دور شاخص AOD در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از مدل های یادگیری ماشین. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۳۵۰-۳۶۷.

doi: 10.22098/mmws.2026.19012.1755

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۰۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۳۵۰ تا ۳۶۷.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

طوفان گرد و غبار یکی از انواع بلایای طبیعی در آسیا است که بیشترین فراوانی را در بهار دارد. در مقایسه با تغییرات پوشش زمین، عوامل جوی و اقلیمی نقش‌های غالب‌تری در تأثیرگذاری بر تغییرپذیری طوفان‌های گرد و غبار دارند (Zhang et al., 2003). دمای بالای سطح زمین، بارش کمتر و وزش بادهای قوی از مهم‌ترین شرایط جوی مؤثر بر وقوع و تشدید طوفان‌های گرد و غبار به شمار می‌روند (Ding et al., 2005). ارتباط‌های پیوند از دور میان طوفان‌های گردوغبار و الگوهای اقلیمی بزرگ‌مقیاس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Gong et al., 2006). به ویژه در ارتباط با تغییرات جهانی زیرا این ارتباطات اقلیمی می‌توانند از طریق تأثیرگذاری بر وضعیت جوی و اقلیمی منطقه‌ای بر طوفان‌های گرد و غبار تأثیر بگذارند. چرخه گرد و غبار جهانی یک پیوند مهم است که اجزای سیستم اقلیمی را به هم متصل می‌کند (Shao et al., 2011). آئروسول گرد و غبار، که به عنوان گرد و غبار معدنی نیز شناخته می‌شود، اهمیت زیادی برای تغییرات اقلیمی منطقه‌ای و جهانی و همچنین برای سلامت انسان دارد. مانند سایر انواع آئروسول‌ها در جو، آئروسول گرد و غبار می‌تواند مستقیماً بودجه انرژی زمین را با پخش و جذب تابش‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت مختل کند (Miller and Tegen, 1998). تحقیقات نشان داده‌اند که آئروسول‌های جاذب از غرب آسیا می‌توانند گرمایش تروپوسفر را در منطقه‌ی مونسون جنوب آسیا تقویت کرده و به این ترتیب، گردش و بارش مونسون را تقویت کنند (Jin et al., 2014). این آئروسول‌ها همچنین می‌توانند از طریق تعامل با قطرات ابر، بازتابندگی ابرها را تغییر دهند و غیرمستقیم بر بارش و بودجه انرژی سیستم زمین تأثیر بگذارند (Choozari et al., 2014). در سطح جهانی، غلظت‌های بالای آئروسول‌های گرد و غبار عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک یافت می‌شوند. بزرگترین پایدارترین منابع گرد و غبار در نیمکره شمالی قرار دارند و کمربند گرد و غباری را تشکیل می‌دهند که از سواحل غربی شمال آفریقا تا شرق چین کشیده شده و از خاورمیانه، آسیای مرکزی و جنوب آسیا عبور می‌کند (Washington et al., 2003). گرد و غبار در آسیا می‌تواند بر مسافت‌های طولانی بیش از ۱۰۰۰۰ کیلومتر منتقل شود و در اقیانوس آرام شمالی رسوب کند یا حتی تمام کره زمین را دور بزند (Uno et al., 2009). تحقیقات متعددی برای بررسی تأثیرات عوامل مختلف بالقوه بر تغییرات گرد و غبار انجام شده است. در مقیاس بزرگ‌تر، ناهنجاری‌های دمای سطح دریا که توسط الگوهای گردش جوی و اقیانوسی ایجاد می‌شوند، می‌توانند فعالیت‌های گرد و غبار آسیا را از طریق ارتباط‌های پیوند از دور تحت تأثیر قرار دهند، مانند نوسان قطبی و نوسان جنوبی ال نینو (Li et al., 2021). برخی از مطالعات مبتنی بر

ماهواره نشان داده‌اند که بازسازی پوشش گیاهی، فراوانی رویدادهای گرد و غبار را کاهش داده است (Zhao et al., 2018). این یافته‌های تحقیقاتی حاکی از آن است که فعالیت‌های گرد و غبار آسیا تحت تأثیر ترکیبی از عوامل اقلیمی مختلف و پوشش گیاهی قرار دارد. بیشتر مطالعات بر تأثیرات عوامل منطقه‌ای مانند سرعت باد، بارش، رطوبت خاک و پوشش گیاهی بر تغییرات گرد و غبار تمرکز کرده‌اند، در حالی که تأثیرات الگوهای پیوند از دور اقیانوس-جو در سیستم زمین، مانند ال نینو/نوسان جنوبی و نوسان اقیانوس اطلس شمالی که می‌توانند با تغییر دادن گردش جوی بزرگ‌مقیاس، بارش و دما بر فعالیت‌های گرد و غبار تأثیر بگذارند، در نظر گرفته نشده‌اند (Li et al., 2021). تأثیر پیوند از دور بر طوفان‌های گرد و غبار اهمیت زیادی دارد، زیرا الگوهای جوی بزرگ مقیاس مختلف، فراوانی و شدت این رویدادها را در مناطق مختلف تحت تأثیر قرار می‌دهند. پیوند از دور، مانند الگوی اقیانوس آرام/شمال آمریکا و نوسان شمال اقیانوس اطلس، نقش‌های حیاتی در تعدیل شرایط جوی که به وقوع طوفان‌های گرد و غبار منجر می‌شوند، ایفا می‌کنند و معمولاً قابلیت پیش‌بینی طوفان‌های گرد و غبار را افزایش می‌دهند. مطالعات متعددی به بررسی ارتباط بین الگوهای پیوند از دور و پدیده‌های جوی مانند طوفان‌های تندر، گرد و غبار و تغییرات آب‌وهوایی در مناطق مختلف پرداخته‌اند (Ghojghar et al., 2021). Tavousi and Zahraei (2013) نشان دادند که طوفان‌های تندر در استان سیستان و بلوچستان عمدتاً در بهار و در ساعات بعدازظهر رخ می‌دهند و با فاز گرم ENSO ارتباط معناداری دارند. Feng et al. (2016) نیز نشان دادند که الگوی PNA در فصل زمستان می‌تواند غلظت آئروسول‌ها در ایالات متحده را تحت تأثیر قرار دهد. Alipour (2016) تأثیر الگوهای پیوند از دور مانند ENSO و AO بر روزهای غباری در ایران را بررسی کردند و نشان دادند که این الگوها می‌توانند تا ۳۵ درصد تغییرات روزهای غباری را تبیین کنند، اگرچه دقت پیش‌بینی در برخی مناطق مانند کرمان پایین است. همچنین Sun et al. (2022) تأثیر AO و تغییرات فصلی آن بر طوفان‌های گرد و غبار در شمال چین و خاورمیانه را بررسی کردند و نشان دادند که AO می‌تواند از طریق تأثیر بر ناپایداری جوی، فعالیت طوفان‌های گرد و غبار را تعدیل کند. در مطالعه‌ای (Le et al., 2022) نقش مهم اما غیرمستقیم ENSO را در فعالیت گردوغبار جهانی تأیید کردند بر اساس یافته‌های این پژوهش، ENSO عمدتاً بر انتقال و نشست گردوغبار در مقیاس جهانی تأثیر می‌گذارد، در حالی که انتشار گردوغبار از کانون‌های اصلی بیشتر تحت تأثیر عوامل محلی، از جمله فعالیت‌های انسانی، قرار دارد. Shaheen et al. (2023) به بررسی تغییرات ده‌ساله و روندهای گرد و غبار در ایران و منطقه شرقی مدیترانه پرداختند و نشان دادند که عواملی

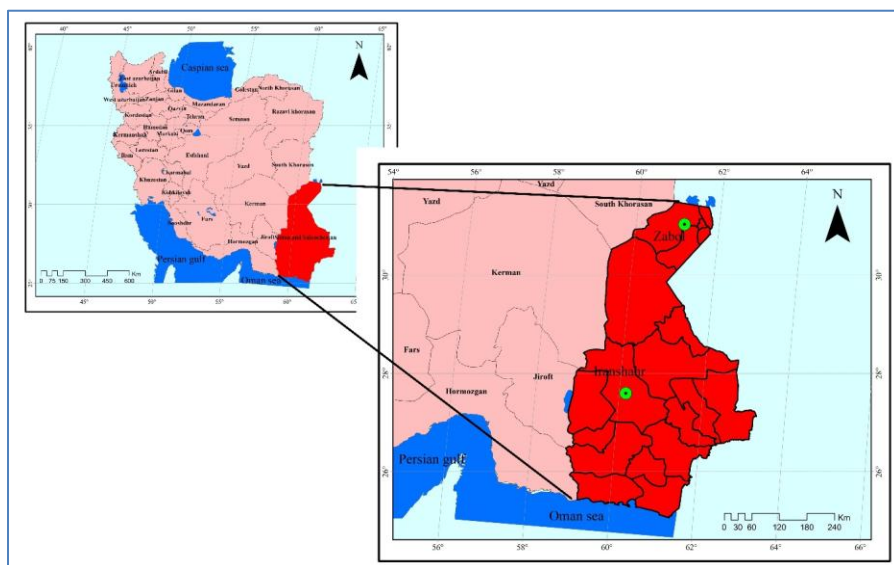
عواملی نظیر پیوندهای جوی و بروز گرد و غبار کمک کنند. در این مطالعه، تأثیر شاخص‌های پیوند از دور بر فعالیت‌های گرد و غبار در استان سیستان و بلوچستان مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، از مدل‌های یادگیری ماشین استفاده شد تا روابط پیچیده بین الگوهای پیوند از دور و وقوع گرد و غبار به‌طور کمی تحلیل شود. این رویکرد امکان شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر پدیده گرد و غبار و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها را فراهم می‌کند و محدودیت موجود در مطالعات پیشین، که عمدتاً تنها به بررسی محدود عوامل جوی پرداخته بودند، برطرف می‌سازد. بنابراین، ترکیب تحلیل اثر شاخص‌های پیوند از دور با مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین و تحلیل جامع اهمیت ویژگی‌ها، امکان پیش‌بینی به‌موقع و دقیق‌تر گرد و غبار در منطقه‌ای با شرایط اقلیمی دشوار را فراهم می‌آورد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه سیستان با مساحت ۱۵۹۱۷ کیلومتر مربع در شرق ایران واقع شده است، استان سیستان و بلوچستان، جنوب شرق استان خراسان جنوبی و جنوب غربی افغانستان قرار دارد در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۲۵°۳۰' تا ۳۱°۲۸' شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۸°۴۷' تا ۶۳°۱۹' شرقی قرار دارد. شهر زابل به عنوان سکونتگاه مرکزی این منطقه شناخته می‌شود (Sahebzadeh, 2019) و در جنوب شرقی ایران قرار دارد (شکل ۱).

مانند تغییرات فشار سطح دریا، رطوبت خاک و نوسانات اقیانوسی مانند PDO می‌توانند بر فراوانی و شدت طوفان‌های گرد و غبار تأثیر بگذارند. Pereira et al. (2024) تأخیر فاز آماری معنادار ۴ تا ۶ ماهه بین شاخص‌های ENSO و AOD در آمازون را گزارش کردند که افزایش حدود ۱۰۰ درصدی AOD پس از دوره‌های النینو را نشان داده است. استان سیستان و بلوچستان با شرایط جغرافیایی خاص و آب و هوای خشک خود، یکی از مناطقی است که به‌طور مداوم تحت تأثیر پدیده‌های گرد و غبار قرار دارد. این پدیده، نه تنها بر کیفیت هوا و سلامت عمومی تأثیر منفی می‌گذارد، بلکه می‌تواند به کاهش تولید کشاورزی و آسیب به زیرساخت‌های اقتصادی و اجتماعی نیز منجر شود. لذا، پیش‌بینی دقیق و به‌موقع تغییرات گرد و غبار در این منطقه از اهمیت بسیاری برخوردار است. تحقیقات نشان می‌دهد که عوامل جوی، به ویژه الگوهای پیوند از دور، تأثیر قابل توجهی بر وقوع و شدت طوفان‌های گرد و غبار دارند. این الگوها می‌توانند به‌طور قابل توجهی بر روی دما، بارش و الگوی باد تأثیر بگذارند که همه این عوامل در بروز پدیده گرد و غبار نقش بسزایی دارند. بنابراین، درک تأثیر این پیوندها بر وقوع گرد و غبار، می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه یادگیری ماشین و توانمندی بالای آن در تحلیل داده‌های پیچیده، استفاده از این مدل‌ها می‌تواند یک رویکرد مؤثر برای پیش‌بینی گرد و غبار باشد. مدل‌های یادگیری ماشین با توانایی شناسایی الگوهای نهفته در داده‌ها، می‌توانند به درک بهتر ارتباط بین



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Figure 1- Study area

انتخاب شدند که تأثیرات سیستماتیک الگوهای جوی بزرگ مقیاس را بر تغییرات مکانی و زمانی AOD تحلیل می کنند (Pereira et al., 2024). داده های عمق آتروسول^۸ (AOD) از سنجنده MODIS نصب شده بر روی ماهواره Terra برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ استخراج شدند. AOD یک شاخص بدون بعد است که میزان تضعیف تابش خورشیدی توسط آتروسول ها در ستون اتمسفر را از طریق جذب و پراکندگی کمی می کند و به عنوان یک شاخص کلیدی برای بارهای آتروسول و تأثیر آن ها بر تابش و کیفیت هوا عمل می کند. AOD از منابع داده مختلف، از جمله ابزارهای ماهواره ای و شبکه های زمینی استخراج می شود (Li et al., 2024; Solanki et al., 2015). داده های AOD از محصولات سطح ۳ ماهانه MODIS حاصل شده و به صورت شبکه بندی شده با وضوح مکانی ۱۸۰×۳۶۰۰ در مقیاس جهانی ارائه می شوند (Gupta et al., 2020). هر سلول شبکه نشان دهنده میانگین ماهانه AOD است و این داده ها امکان تحلیل تغییرات مکانی و زمانی بار آتروسول در مقیاس های منطقه ای و جهانی را فراهم می کنند. سپس مراحل پردازش داده ها شامل یکپارچه سازی داده های ناهمگون از طریق همگام سازی زمانی و درون یابی مکانی، و تحلیل روابط خطی بین شاخص های پیوند از دور و AOD با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در ایستگاه های ایران شهر و زابل مورد بررسی قرار گرفت. ضریب همبستگی پیرسون بر اساس رابطه ۱ محاسبه می شود (Hao et al., 2022)

$$r_{ij} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

در این فرمول، x_i و y_i مقادیر مربوط به دو متغیر مورد بررسی هستند، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ میانگین این مقادیر را نشان می دهند، و $\sum$ نماد جمع برای تمام داده ها است. ضریب r نشان دهنده میزان همبستگی بین دو متغیر است. هرچه مقدار مطلق ضریب همبستگی $|r|$ بزرگ تر باشد، شدت رابطه بین دو متغیر قوی تر است؛ به طوری که اگر $|r|$ به ۱ نزدیک تر باشد، همبستگی بین دو متغیر بیشتر است. مقدار مثبت r نشان دهنده همبستگی مثبت (رابطه مستقیم) بین دو متغیر است، در حالی که مقدار منفی r بیانگر همبستگی منفی است (Schober et al., 2018). در مرحله بعدی، انتخاب ویژگی ها با روش بوروتا^۹ و روش های مبتنی بر اهمیت ویژگی به کار گرفته شد تا بهترین ویژگی ها برای مدل های یادگیری ماشین انتخاب شوند. سپس در مرحله توسعه مدل های

دارای آب و هوای خشک تا نیمه خشک و با میانگین بارش سالانه حدود ۶۰ میلی متر و دمای سالانه ۲۸ درجه سانتی گراد است. موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خاص زابل باعث شده این منطقه همواره در معرض دو پدیده اقلیمی، خشکسالی و طوفان های گرد و غبار، قرار داشته باشد. وزش بادهای ۱۲۰ روزه از خرداد تا شهریور، همراه با خاک های ریزدانه حساس به فرسایش، دمای بالا، تبخیر زیاد، پوشش گیاهی کم، خشکسالی های دوره ای و فعالیت های انسانی، موجب فرسایش شدید خاک و وقوع طوفان های گرد و غبار در این منطقه می شود. همچنین، ایران شهر به عنوان یکی از شهرهای مهم جنوب استان سیستان و بلوچستان، نقش کلیدی در پیوند مناطق مرکزی استان با نواحی جنوبی ایفا می کند. شهرستان ایران شهر در قسمت های پست حوزه آبریز جازموریان قرار گرفته و منطقه تولید ریزگرد است. بخش های مرتفع منطقه به صورت تپه ماسه ای و قسمت های پست با خاک های آبرفتی با بافت ریز هستند که حساسیت بالایی به فرسایش دارند. اقلیم منطقه براساس روش آمبرژه، بیابانی گرم شدید طبقه بندی شده است و تعداد روزهای خشک و بدون بارش در دوره آماری حدود ۳۴۲ روز در سال می باشد. در سال های با بارندگی مناسب، پوشش گیاهی یکساله و چندساله مستقر می شود، اما در سال های خشک پوشش گیاهی کاهش یافته، رطوبت خاک کم و حساسیت خاک به فرسایش افزایش می یابد.

۲-۲- روش شناسی پژوهش

در این پژوهش، داده های مورد نیاز از منابع چندگانه شامل ایستگاه های هواشناسی سینوپتیک محلی، محصولات سنجنش از دور سنجنده MODIS نصب شده بر روی ماهواره های Terra و Aqua، و شاخص های پیوند از دور از پایگاه معتبر بین المللی NOAA از سال های ۲۰۰۰-۲۰۲۱ استخراج گردید. داده های شاخص های اقلیمی ماهانه از وبسایت^۱ NOAA Physical Sciences Laboratory (PSL) تهیه شد. داده های مورد استفاده شامل شاخص های مربوط به اقیانوس اطلس (NAO، AMM، AMO، TNA، TSA)، شاخص های مرتبط با اقیانوس آرام (SOI^۲، Nino 3.4، MEI^۳، BEST، TNI، WHWP، PDO) و همچنین سایر الگوهای پیوند از دور و الگوهای بزرگ مقیاس (PNA، AAO^۴، WP^۵، AO^۶، QBO^۷) می باشند. این شاخص ها معرف الگوهای جوی بزرگ مقیاس و نوسانات فشار و جریان های جوی دوربرد هستند که بر توزیع مکانی و شدت بار آتروسول و شرایط اقلیمی منطقه ای تأثیر می گذارند. بنابراین، این شاخص ها به عنوان متغیرهایی

^۶ Arctic Oscillation

^۷ Quasi-Biennial Oscillation

^۸ Aerosol Optical Depth (AOD)

^۹ Boruta

^۱ <https://psl.noaa.gov/>

^۲ Southern Oscillation Index

^۳ Multivariate ENSO Index

^۴ Antarctic Oscillation

^۵ Western Pacific

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج همبستگی شاخص‌های پیوند از دور در

تأخیرهای مختلف با AOD در ایستگاه‌های ایرانشهر و زابل

در این تحلیل به کمی‌سازی الگوهای تأخیری پایدار بین نوسانات اقلیمی بزرگ‌مقیاس و AOD ایستگاه زابل و ایرانشهر پرداخته شده است. از آنجا که مکانیسم‌های انتقال تأثیر پیوند از دور از طریق تغییر در الگوهای گردش جوی، دما و رطوبت اغلب با وقفه‌های زمانی قابل پیش‌بینی رخ می‌دهند، استفاده از تحلیل همبستگی با تأخیر، یک پیش‌نیاز برای درک این روابط به شمار می‌آید. در این رویکرد روابط معنادار در داده‌ها که در تحلیل بدون تأخیر ممکن است نادیده گرفته شود آشکار می‌شود؛ و بازه تأخیر بهینه را برای هر شاخص مشخص می‌کند که به‌عنوان بازه زمانی مؤثر پیش‌بینی عمل کرده و چارچوب زمانی دقیقی برای توسعه مدل‌های عملیاتی پیش‌آگاهی در آینده فراهم می‌آورد. تحلیل همبستگی بین شاخص‌های اقلیمی در دو ایستگاه زابل و ایرانشهر نشان‌دهنده روابط پیچیده و متفاوتی است که تحت تأثیر نوع شاخص و تأخیر زمانی قرار دارند. بر اساس شکل ۲ در ایستگاه زابل، شاخص‌های AAO و AO همبستگی‌های ضعیفی نشان دادند، با این حال AO در تأخیر ۳ ماهه به حداکثر همبستگی مثبت ۰/۰۷۶ رسید. شاخص QBO در زابل همبستگی مثبت قابل توجهی (۰/۱۰۶) در تأخیر ۳ ماهه داشت، در حالی که SOI در تأخیرهای بالاتر (۶ ماهه) به همبستگی مثبت ۰/۱۵۳ رسید. شاخص‌های ENSO مانند Nino3.4 و MEI در زابل همبستگی منفی در تأخیرهای ۴ تا ۶ ماهه نشان دادند که حداکثر آن به ۰/۱۱۴- برای Nino3.4 در تأخیر ۶ ماهه بود. در مقابل، در ایستگاه ایرانشهر، شاخص‌های AAO و AO همبستگی مثبت قوی‌تری داشتند، به‌طوری که AAO در تأخیر ۳ ماهه به ۰/۲۰۴ و AO در تأخیر ۴ ماهه به ۰/۱۷۳ رسید. شاخص NAO در ایرانشهر همبستگی بسیار قوی‌تری نسبت به زابل نشان داد و در تأخیر ۴ ماهه به حداکثر ۰/۲۳۶ رسید. شاخص AMM در هر دو ایستگاه همبستگی منفی نشان دادند، اما این همبستگی در ایرانشهر بسیار قوی‌تر بود (۰/۴۳۷-). شاخص PNA در هر دو ایستگاه همبستگی منفی داشت، اما در ایرانشهر این همبستگی قوی‌تر بود (۰/۲۳۲- در تأخیر ۳ ماهه). الگوی WP در ایرانشهر همبستگی مثبت قوی‌تری (۰/۱۹۸) در تأخیر ۴ ماهه نسبت به زابل نشان داد. شاخص‌های TSA و TNA نیز در هر دو ایستگاه رفتار متفاوتی داشتند، به‌طوری که TSA در ایرانشهر همبستگی مثبت (۰/۲۰۸) در تأخیر ۲ ماهه و TNA همبستگی منفی (۰/۲۸۵-) در تأخیر

یادگیری ماشین، از مدل‌های LightGBM، Bagged CART، Gradient Boosting، Random Forest و XGBoost برای مدل‌سازی عمق اُپتیکی آئروسول استفاده شد (Khodayar et al., 2025). مدل‌ها با داده‌های پیش‌پردازش شده و انتخاب شده آموزش داده می‌شوند و پارامترهای آن‌ها برای بهینه‌سازی عملکرد تنظیم می‌شود. در مرحله ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها، داده‌ها به دو مجموعه آموزشی و آزمایشی تقسیم شدند، به گونه‌ای که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۳۰ درصد برای آزمایش مدل‌ها استفاده شد. عملکرد مدل‌ها با استفاده از معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا^{۱۰} (RMSE)، میانگین درصد خطای مطلق^{۱۱} (MAPE) و ضریب تعیین^{۱۲} (R²) مورد ارزیابی قرار گرفت تا دقت و قابلیت پیش‌بینی مدل‌ها به‌طور کمی سنجیده شود. ریشه میانگین مربعات خطا تفاوت بین مقادیری که توسط مدل پیش‌بینی می‌شود و مقادیر مشاهداتی است. معیارهای ارزیابی بر اساس روابط ۲ تا ۴ محاسبه می‌شود (Sharma et al., 2022).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (3)$$

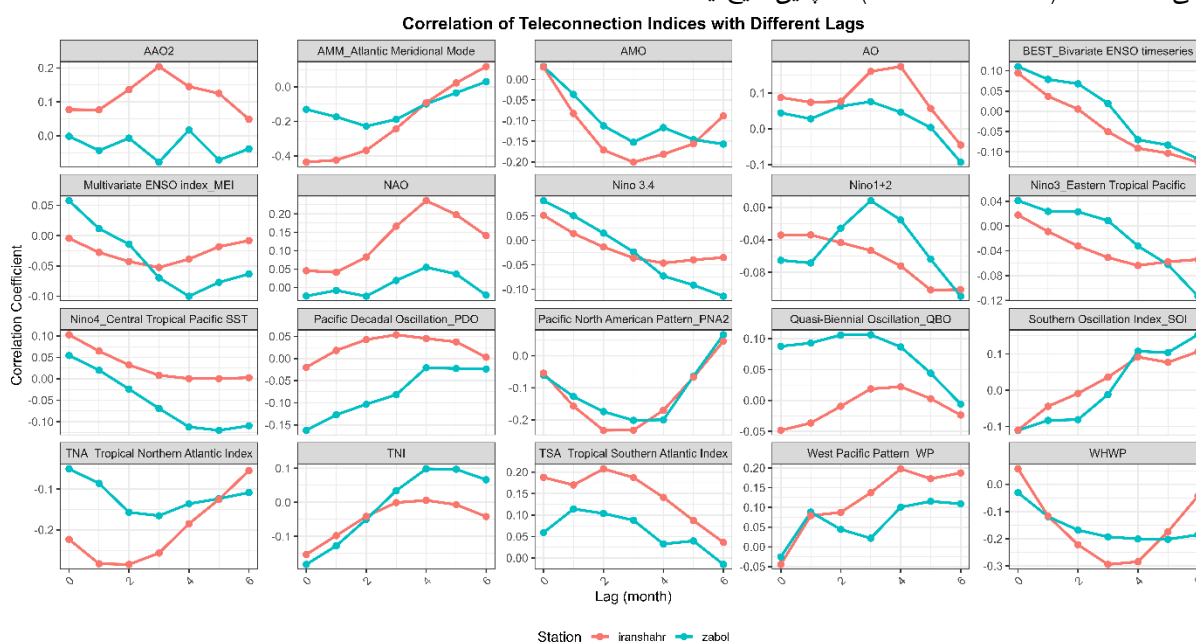
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

$\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی شده، y_i ارزش واقعی برای i امین داده، n تعداد مشاهدات و $\bar{y}$ مقدار میانگین متغیر وابسته است. در نهایت، پیش‌بینی‌های مدل‌ها تحلیل شده و دقت و صحت آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. پس از ارزیابی مدل‌ها، از روش‌های پیشرفته‌ای برای تفسیر خروجی مدل‌ها و تحلیل حساسیت آن‌ها استفاده شد تا درک بهتری از روابط بین ورودی‌ها و خروجی مدل حاصل شود. برای تفسیر مدل و تحلیل روابط، از سه روش تحلیل SHAP، برای تخصیص اهمیت ویژگی‌ها بر پایه نظریه بازی، نمودارهای وابستگی جزئی^{۱۳} (PDP) برای نمایش رابطه بین ویژگی‌های کلیدی و پیش‌بینی مدل، و تحلیل حساسیت سوپول برای سنجش کمی سهم هر متغیر و تعاملات آن‌ها در واریانس خروجی استفاده شد. تمامی مراحل با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R و کتابخانه‌های iml (برای SHAP و PDP)، caret (برای پیاده‌سازی مدل‌ها)، stats (برای تحلیل آماری) انجام شد.

¹² R-squared (R²)¹³ Partial Dependence Plots (PDP)¹⁰ Root Mean Square Error (RMSE)¹¹ Mean Absolute Percentage Error (MAPE)

زابل نشان داد شاخص های اقلیمی به ویژه WHWP و TNI تأثیر را بر تغییرات AOD در این منطقه دارند. این روابط ناشی از مکانیسم های مختلفی است بطوریکه TNI از طریق تأثیر بر الگوهای بارشی و رطوبت منطقه (Chen et al., 2025) و WHWP از طریق تعدیل دمای سطحی و الگوهای گردش جوی عمل می کند (Durán-Quesada et al., 2017). نتایج همبستگی تأیید می کنند که تغییرپذیری AOD به پیوند از دور نه تنها وابسته به نوع شاخص، بلکه متأثر از موقعیت جغرافیایی ایستگاه و بازه تأخیر زمانی است. شناسایی این الگوهای تأخیر، پیش نیاز اساسی برای ایجاد هر گونه مدل پیش بینی بر مبنای شاخص های بزرگ مقیاس است.

۲ ماهه) نشان داد. شاخص WHWP در هر دو ایستگاه همبستگی منفی داشت، اما این همبستگی در ایرانشهر قوی تر بود ($-0/294$) در تأخیر ۳ ماهه). شاخص های اقلیمی تأثیرات متفاوتی بر این دو ایستگاه دارند، با همبستگی های قوی تر و الگوهای زمانی متفاوت در ایرانشهر نسبت به زابل، که احتمالاً ناشی از تفاوت های جغرافیایی و اقلیمی بین این دو منطقه است. نتایج ایستگاه ایرانشهر نشان می دهد که شاخص های پیوند از دور به ویژه AMM (با همبستگی منفی قوی $-0/437$) و NAO (با همبستگی مثبت $0/236$) تأثیر معناداری بر تغییرات AOD در این منطقه دارند. این روابط ناشی از تأثیر این شاخص ها بر الگوهای گردش جوی، مسیرهای انتقال گردوغبار و شرایط رطوبتی منطقه است (Nabat et al., 2020). همچنین نتایج ایستگاه



شکل ۲- همبستگی شاخص های پیوند از دور در تأخیرهای مختلف با AOD در ایستگاه های ایرانشهر و زابل
Figure 2- Correlation of teleconnections indices at different lags with AOD at Iranshahr and Zabol stations

۱۰/۱۳ متغیر است بر اساس خروجی الگوریتم انتخاب متغیر بوروتا (شکل ۳)، شاخص WHWP در تأخیرهای ۳ و ۴ ماهه (lag 3, 4) دارای اهمیت بالا تشخیص داده شد. در مقابل، تأخیر ۲ ماهه (lag 2) این شاخص توسط الگوریتم رد^۳ شد. شاخص TNA نیز با تمامی تأخیرهای آن تأیید شده است و میانگین اهمیت آن بین $4/74$ تا $3/74$ قرار دارد، که نشان دهنده نقش متوسط تا بالای این شاخص در شرایط اقلیمی منطقه است. در مقابل، شاخص PNA با تأخیرهای دو و سه ماهه رد شده است، که نشان می دهد این شاخص تأثیر قابل توجهی بر

۲-۳- نتایج انتخاب ویژگی با روش Boruta در ایستگاه های ایرانشهر و زابل

بر اساس شکل ۳ روش Boruta برای انتخاب ویژگی های مؤثر در تحلیل شرایط اقلیمی ایستگاه ایرانشهر نشان می دهد که برخی شاخص های اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر این منطقه دارند. شاخص AMM با تمامی تأخیرهای آن (از lag 0 تا lag 3) به عنوان ویژگی های تأیید شده^۱ شناخته شده اند، که نشان دهنده اهمیت بالای این شاخص در مدل سازی است، به طوری که میانگین اهمیت^۲ آن بین $4/92$ تا

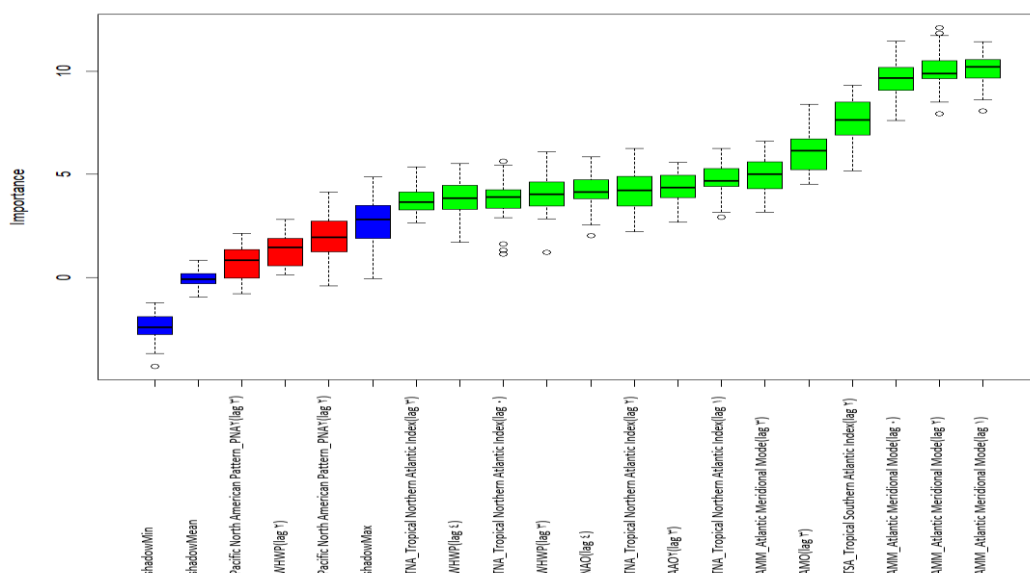
³ Rejected

¹ Confirmed

² MeanImp

شاخص است. به طور کلی، شاخص‌های AMM، AAO، TNA، TSA، AMO و NAO به عنوان شاخص‌های تأیید شده شناخته شده‌اند و تأثیر قابل توجهی بر شرایط اقلیمی ایستگاه ایرانشهر دارند، در حالی که شاخص‌های PNA و WHWP رد شده‌اند و تأثیر قابل توجهی ندارند. اگرچه الگوهای کلی مشابهی در مناطق مختلف مانند تأثیر AMM و NAO در مطالعات (Sun et al. (2022) مشاهده شده است اما شدت و جهت این روابط به دلیل ویژگی‌های جغرافیایی خاص منطقه ایرانشهر متفاوت است.

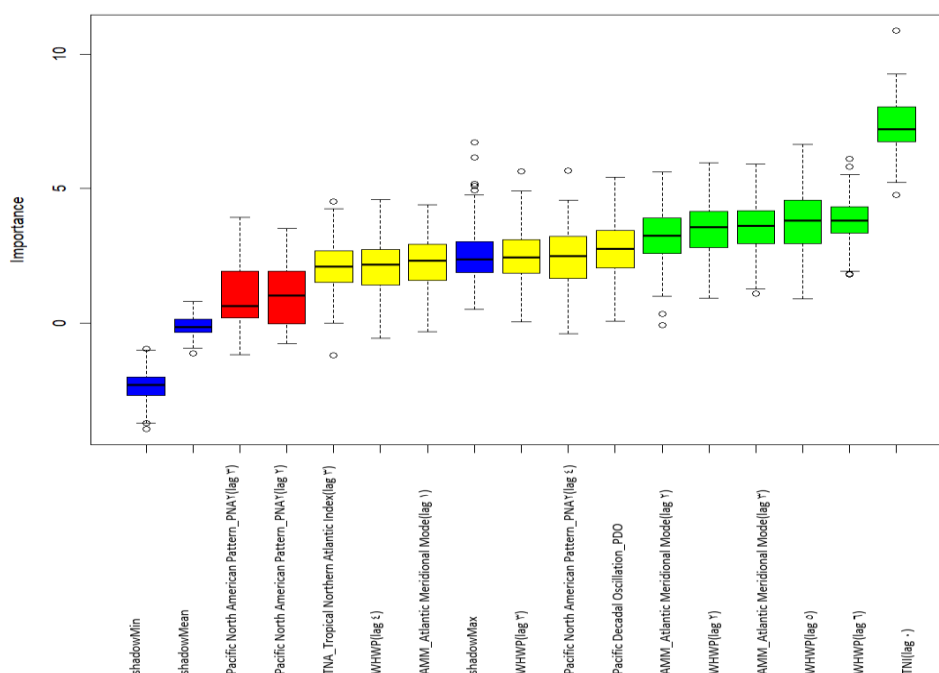
ایستگاه ایرانشهر ندارد. شاخص AMO با تأخیر سه ماهه تأیید شده و میانگین اهمیت آن ۶/۱۱ است، که نشان‌دهنده نقش مهم این شاخص در مدل‌سازی است. شاخص AAO نیز با تأخیر سه ماهه تأیید شده و میانگین اهمیت آن ۴/۳۲ است، که نشان‌دهنده تأثیر متوسط این شاخص است. شاخص TSA با تأخیر دو ماهه تأیید شده و میانگین اهمیت آن ۷/۶۸ است، که نشان‌دهنده نقش مهم این شاخص در شرایط اقلیمی منطقه است. در نهایت، شاخص NAO با تأخیر چهار ماهه تأیید شده و میانگین اهمیت آن ۴/۲۰ است، که نشان‌دهنده تأثیر متوسط این



شکل ۳- شاخص‌های پیوند از دور مؤثر بر AOD در ایستگاه ایرانشهر با استفاده از الگوریتم Boruta
Figure 3- Effective teleconnection indices on AOD at Iranshahr station using the Boruta algorithm

حالت‌های دو و سه ماهه با مقادیر پایین (۷/۰۳) رد شده‌اند که بیانگر تأثیر محدود این شاخص در برخی تأخیرهای زمانی است. شاخص PDO با مقدار میانگین اهمیت ۲/۷۷ تأیید شده است که نشان‌دهنده تأثیر متوسط این شاخص بر منطقه است. از سوی دیگر، شاخص TNA در حالت تأخیر سه ماهه با مقدار ۲/۰۹ رد شده است که نشان‌دهنده عدم تأثیر معنادار این شاخص بر شرایط اقلیمی ایستگاه زابل است. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد شاخص‌های مرتبط با اقیانوس آرام (TNI و WHWP) و نوسانات چنددهه‌ای (PDO) نقش کلیدی در پیش‌بینی AOD زابل دارند. اگرچه تأثیر شاخص‌های اقیانوس آرام در مناطق مختلف در مطالعات (Gong et al. (2006 و Kamal et al. (2022 گزارش شده است اما شدت تأثیر TNI در زابل بی‌سابقه است که ناشی از موقعیت جغرافیایی خاص این ایستگاه و حساسیت آن به تغییرات ال نینو است.

براساس نتایج شکل ۴ انتخاب ویژگی با روش Boruta در ایستگاه زابل نشان‌دهنده اهمیت و تأثیر متفاوت شاخص‌های اقلیمی بر شرایط این منطقه است. شاخص TNI در حالت بدون تأخیر با مقدار میانگین اهمیت ۷/۴۰ به عنوان مهم‌ترین شاخص تأیید شده است که بیانگر تأثیر بسیار قوی این شاخص بر شرایط اقلیمی ایستگاه زابل است. شاخص‌های مرتبط با WHWP نیز در حالت‌های تأخیر سه، پنج و شش ماهه با مقادیر میانگین اهمیت به ترتیب ۳/۸۰، ۳/۸۴ و ۳/۴۸ تأیید شده‌اند که نشان‌دهنده نقش مهم این شاخص در مدل‌سازی اقلیمی منطقه است. شاخص AMM در حالت‌های تأخیر دو و سه ماهه با مقادیر میانگین اهمیت ۳/۱۸ و ۳/۶۰ تأیید شده است، اما در حالت تأخیر یک ماهه با مقدار ۲/۲۵ رد شده است که نشان‌دهنده کاهش تأثیر این شاخص با کاهش تأخیر زمانی است. شاخص PNA در حالت تأخیر چهار ماهه با مقدار میانگین اهمیت ۲/۴۳ تأیید شده است، اما در



شکل ۴- شاخص‌های پیوند از دور مؤثر بر AOD در ایستگاه زابل با استفاده از الگوریتم Boruta
Figure 4- Effective teleconnection indices on AOD at Zabol station using the Boruta algorithm

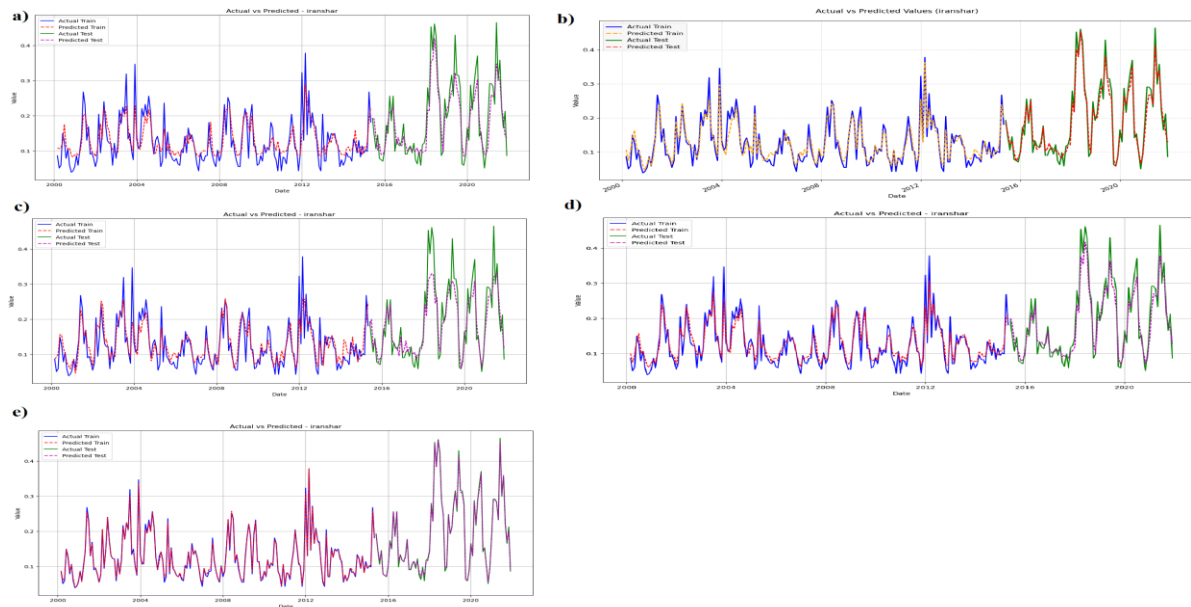
دوره آزمایشی (۲۰۱۶-۲۰۲۲) اما، با تشدید نوسانات و ظهور پیک‌های شدید (به‌ویژه پس از سال ۲۰۱۸ که احتمالاً مرتبط با افزایش فعالیت‌های گردوغبار و تغییرات اقلیمی است)، دقت تمامی مدل‌ها کاهش یافت. با این حال، مدل‌های پیچیده‌تر مبتنی بر تقویت (XGBoost و LightGBM) در مقایسه با مدل‌های ساده‌تر بگینگ (Bagged CART و Random Forest)، عملکرد بهتری در پیش‌بینی این نوسانات از خود نشان دادند، اگرچه در برآورد پیک‌های شدید همچنان خطاهایی مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، مدل‌های مبتنی بر تقویت^۱ (XGBoost، LightGBM و Gradient Boosting) در هر دو ایستگاه عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های بگینگ^۲ (Bagged CART و Random Forest) داشتند که به دلیل توانایی بالاتر آن‌ها در یادگیری روابط غیرخطی و پیچیده موجود در داده‌هاست. شکل ۶ نیز نتایج مشابهی را برای ایستگاه زابل تأیید می‌کند. عملکرد دقیق‌تر مدل XGBoost در دوره آزمایشی (پس از ۲۰۱۶) را می‌توان به سازگاری ویژگی‌های آن با چالش‌های این دوره نسبت داد. مکانیسم‌های تنظیم داخلی این مدل از بیش‌برازش بر روی داده‌های آموزشی جلوگیری کرده و تعمیم‌پذیری آن را در مواجهه با نوسانات شدید (پیک‌های گردوغبار) بهبود بخشیده است.

۳-۳- پیش‌بینی AOD با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین در ایستگاه‌های ایران‌شهر و زابل

شکل ۵ مقایسه عملکرد مدل‌های مختلف یادگیری ماشین (Gradient Boosting، LightGBM، Bagged CART) در پیش‌بینی شاخص AOD در ایستگاه ایران‌شهر استان سیستان و بلوچستان را نشان می‌دهد. مدل‌ها با استفاده از متغیرهای منتخب الگوریتم Boruta آموزش داده شدند. ورودی‌های مدل برای دو ایستگاه به‌صورت زیر تعیین شد: در ایستگاه ایران‌شهر مدل با ۱۴ متغیر ورودی شامل: AMM (lag0, lag1, lag2, lag3), WHWP (lag3, lag4), TNA (lag0, lag1, lag2, lag3), AMO (lag3), AAO (lag3), TSA (lag2) و NAO (lag4) و در ایستگاه زابل نیز مدل‌ها با ۸ متغیر ورودی شامل: TNI (lag0), PNA, AMM (lag2, lag3), WHWP (lag3, lag5, lag6) و PDO (lag4) آموزش دیدند. این تفاوت در مجموعه متغیرهای ورودی نشان‌دهنده تمایز در مکانیسم‌های اقلیمی مؤثر بر AOD در دو ایستگاه است. در دوره آموزشی (۲۰۱۶-۲۰۰۰)، تمام مدل‌ها در هر دو ایستگاه روند کلی داده‌ها را با دقت مناسب شبیه‌سازی کردند و مدل‌های Gradient Boosting و XGBoost بهترین برآزش را نشان دادند. در

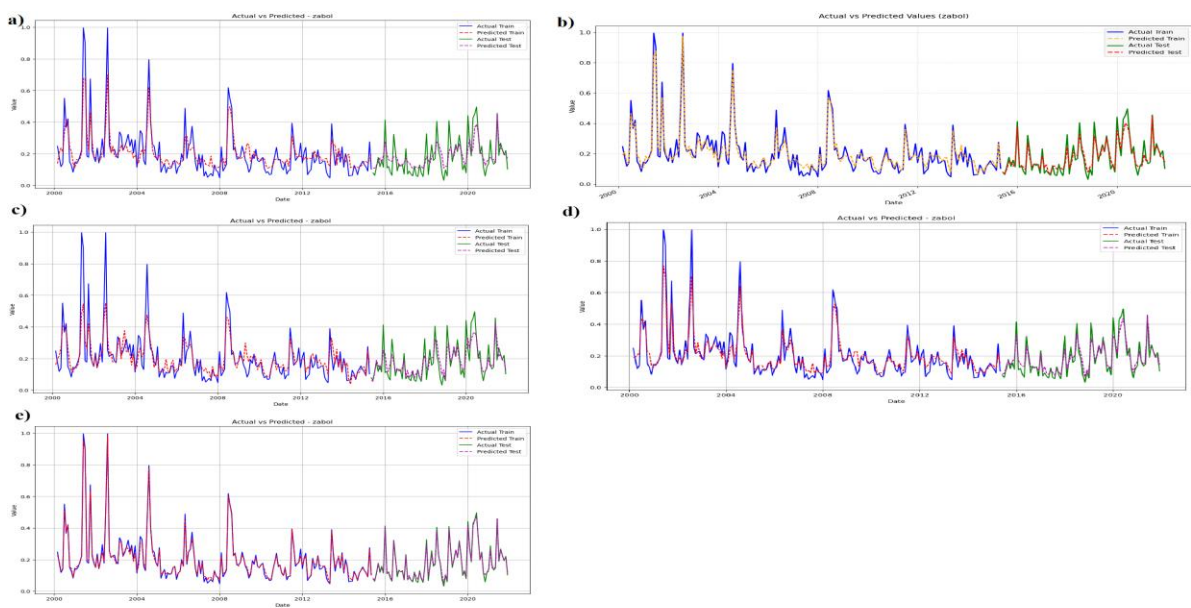
² Bagging Models

¹ Boosting Based



شکل ۵- پیش‌بینی AOD با مدل‌های الف) Bagged CART ب) Gradient Boosting پ) LightGBM ت) Random Forest ث) XGBoost در ایستگاه ایرانشهر

Figure 5- AOD prediction with a) Bagged CART b) Gradient Boosting c) Random Forest d) LightGBM e) XGBoost models at Iranshahr station



شکل ۶- پیش‌بینی AOD با مدل‌های الف) Bagged CART ب) Gradient Boosting پ) LightGBM ت) Random Forest ث) XGBoost در ایستگاه زابل

Figure 6- AOD prediction with a) Bagged CART b) Gradient Boosting c) Random Forest d) LightGBM e) XGBoost models at Zabol station

۳-۴- ارزیابی عملکرد مدل های یادگیری ماشین در

ایستگاه های ایرانشهر و زابل

جدول های ۱ و ۲ نتایج ارزیابی عملکرد پنج مدل یادگیری ماشین (Bagged CART, LightGBM, Gradient Boosting, Random Forest و XGBoost) را در دو ایستگاه ایرانشهر و زابل، بر اساس معیارهای RMSE, MAPE و R^2 نشان می دهند. در هر دو ایستگاه، مدل XGBoost به عنوان بهترین مدل با اختلاف قابل توجهی شناخته شد که کمترین مقادیر خطا (RMSE و MAPE) و بالاترین

ضریب تعیین (R^2) را در هر دو دوره آموزش و آزمایش به خود اختصاص داد. پس از آن، مدل های Gradient Boosting و Random Forest در رده های بعدی قرار گرفتند. در مقابل، مدل های LightGBM و به ویژه Bagged CART در هر دو منطقه ضعیف ترین عملکرد را ثبت کردند. عملکرد برتر مدل های مبتنی بر boosting مانند XGBoost نسبت به مدل های bagging، همسو با یافته های Shaheen et al. (۲۰۲۳) است که نشان دادند این مدل ها در پردازش روابط غیرخطی بین شاخص های اقلیمی و AOD کارایی بالاتری دارند.

جدول ۱- مقایسه مدل های یادگیری ماشین برای پیش بینی AOD در ایستگاه ایرانشهر

Table 1- Comparison of machine learning models for AOD prediction at Iranshahr station

Model	RMSE		MAPE		R2
	Test	Train	Test	Train	Test
Bagged CART	0.039	0.044	29.734	22.235	0.66
LightGBM	0.034	0.045	22.808	17.926	0.73
Gradient Boosting	0.022	0.023	17.087	12.459	0.89
Random Forest	0.024	0.030	18.098	14.258	0.89
XGBoost	0.006	0.006	4.104	3.170	0.99

جدول ۲- مقایسه مدل های یادگیری ماشین برای پیش بینی AOD در ایستگاه زابل

Table 2- Comparison of machine learning models for AOD prediction at Zabol station

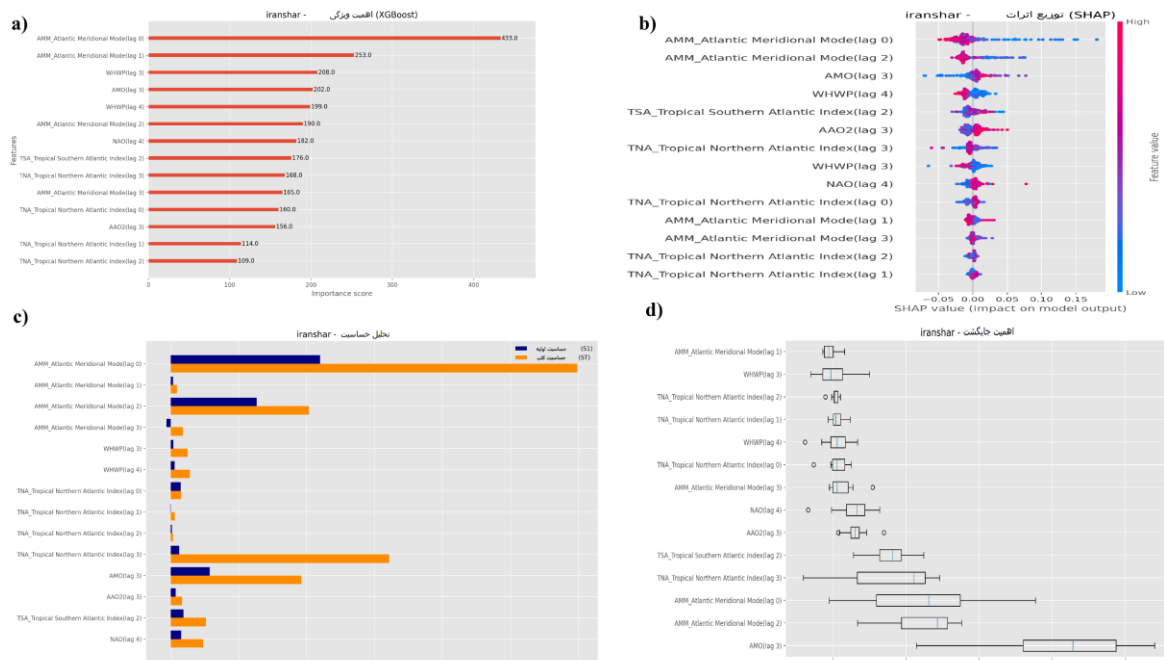
Model	RMSE		MAPE		R2
	Test	Train	Test	Train	Test
Bagged CART	0.078	0.071	38.261	42.677	0.80
LightGBM	0.086	0.061	30.418	31.911	0.76
Gradient Boosting	0.041	0.039	22.833	24.132	0.93
Random Forest	0.057	0.040	24.635	23.993	0.91
XGBoost	0.017	0.014	8.595	9.465	0.99

۳-۵- مقایسه روش های تحلیل اهمیت و حساسیت متغیرها

در ایستگاه ایرانشهر

شکل ۷ تحلیل جامع نتایج مدل سازی برای ایستگاه ایرانشهر نشان می دهد که شاخص AMM به عنوان مؤثرترین عامل در پیش بینی های مدل شناسایی شده است، به طوری که در تحلیل اهمیت ویژگی های مدل XGBoost با بالاترین امتیاز اهمیت (۴۳۳)، در تحلیل اهمیت ویژگی ها با روش Shapley و در تحلیل حساسیت سوبول به ترتیب با سطح اهمیت بالا و سهم و ۰/۶ از تغییرات خروجی مدل، نقش محوری خود را در سیستم اقلیمی منطقه نشان داده است. این شاخص به ویژه در تأخیرهای کوتاه مدت (۰ تا ۲) بیشترین تأثیر را دارد، در حالی که شاخص های WHWP و AMO عمدتاً در تأخیرهای بلندمدت تر (۳ و ۴) اهمیت پیدا می کنند که نشان دهنده تأثیر تجمعی این عوامل بر اقلیم منطقه است. تحلیل اهمیت جایگشت نیز این یافته ها را تأیید می کند و نشان می دهد که شاخص AMM با تأخیر ۱ ماهه بیشترین حساسیت را در دقت پیش بینی مدل ایجاد می کند. شاخص های مرتبط با اقیانوس اطلس (شامل TNA و TSA) نیز در تمامی تحلیل ها از اهمیت

قابل توجهی برخوردار بوده اند، به طوری که TNA در تأخیرهای ۱ و ۲، TSA در تأخیر ۲ تأثیر متوسطی بر عملکرد مدل نشان داده اند. این نتایج به وضوح نشان می دهد که سیستم اقلیمی ایرانشهر به صورت پیچیده ای تحت تأثیر فعل و انفعالات اقیانوس اطلس در مقیاس های زمانی مختلف قرار دارد و شاخص های این منطقه اقیانوسی سهم غالب (بین ۱۰۹ تا ۴۳۳ در مقیاس اهمیت ویژگی ها) در پیش بینی های مدل دارند. در مقابل، شاخص های دیگر مانند NAO و AAO اگرچه تأثیراتی داشته اند، اما اهمیت کمتری نسبت به شاخص های اطلس نشان داده اند.

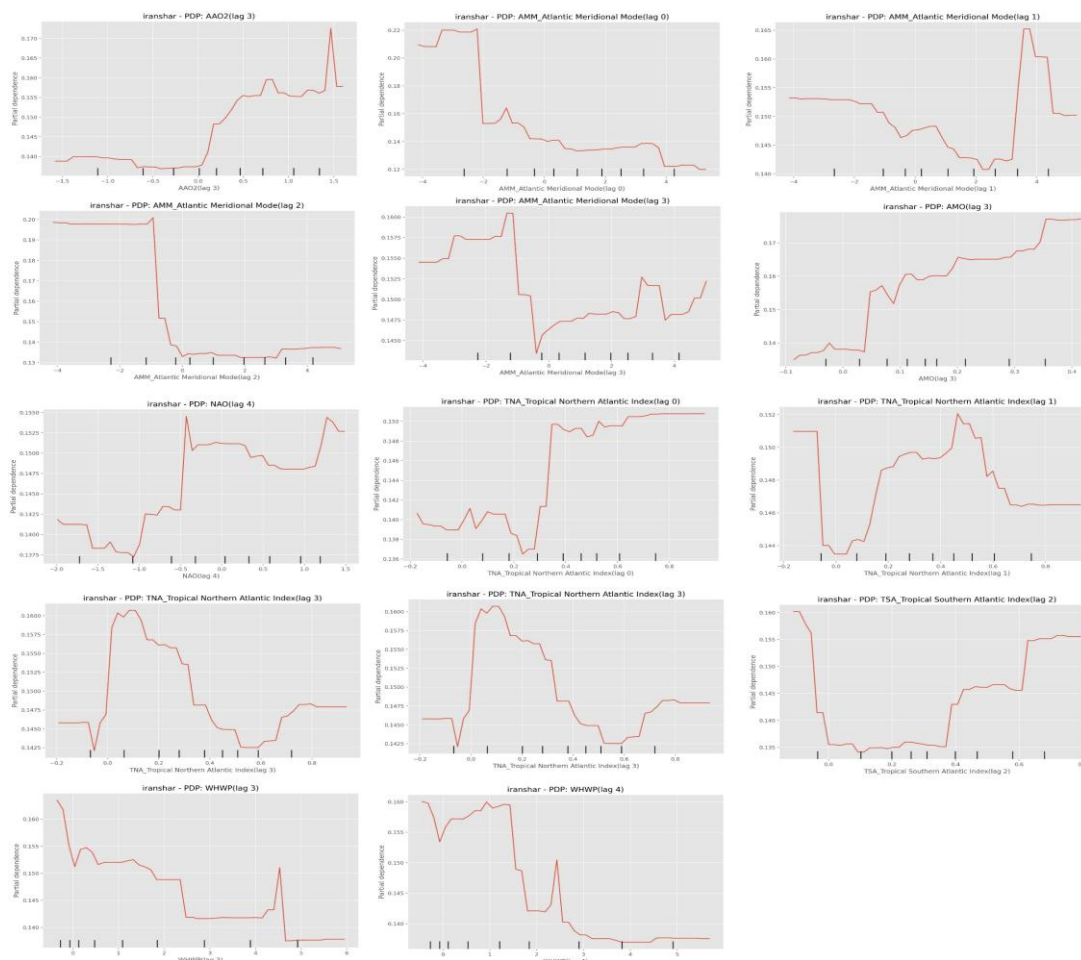


شکل ۷- الف) نمودار اهمیت ویژگی ب) تغییرات شاخص‌های اقلیمی با روش SHAP پ) تحلیل حساسیت شاخص‌ها با روش Sobol ت) تحلیل اهمیت جایگشت شاخص‌ها در ایستگاه ایرانشهر

Figure 7- a) Feature importance diagram b) Changes in climatic indicators using the SHAP method c) Sensitivity analysis of indicators using the Sobol method d) analysis of the importance of permutation of indicators at Iranshar station

فعالیت است. در مورد شاخص WHWP با تأخیر ۳ ماهه، نوسانات قابل توجهی در نمودار PDP مشاهده می‌شود که حاکی از حساسیت مدل به تغییرات این شاخص در محدوده‌های خاصی از مقادیر است. شاخص NAO با تأخیر ۴ ماهه نیز الگوی مشابهی با نوسانات متعدد نشان می‌دهد که نشانگر تأثیرات متغیر این نوسان بر سیستم پیش‌بینی مدل است. در مقابل، شاخص TSA با تأخیر ۲ ماهه تأثیر ملایم‌تر و خطی‌تری بر خروجی مدل دارد که نشان‌دهنده مکانیسم تأثیرگذاری ساده‌تر و مستقیم‌تر این شاخص بر اقلیم منطقه است. مدل پیش‌بینی برای منطقه ایرانشهر به صورت پیچیده‌ای به تغییرات مقادیر مختلف شاخص‌های اقلیمی واکنش نشان می‌دهد و این واکنش‌ها در محدوده‌های مختلف مقادیر، کاملاً متفاوت هستند. تحلیل PDP وجود روابط آستانه‌ای و غیرخطی را تأیید می‌کند که با نتایج Feng et al. (2016) درباره تأثیر الگوهای پیوند از دور بر آبروسل‌ها همخوانی دارد.

تحلیل نمودارهای PDP برای ایستگاه ایرانشهر نشان‌دهنده روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای اقلیمی و پیش‌بینی‌های مدل است. این نمودارها به وضوح نشان می‌دهند که هر متغیر در محدوده‌های مختلف مقادیر خود، تأثیرات متفاوتی بر خروجی مدل دارد. به طور خاص، شاخص AMM با تأخیر ۳ ماهه رفتار بسیار حساسی از خود نشان می‌دهد، به طوری که در یک مقدار بحرانی خاص، تغییر ناگهانی در تأثیر آن بر پیش‌بینی مدل مشاهده می‌شود. این پدیده احتمالاً نشان‌دهنده وجود یک آستانه حیاتی در سیستم اقلیمی منطقه است که هنگام عبور از آن، تأثیرات شدیدی بر الگوهای جوی ایجاد می‌کند. شاخص TNA در حالت بدون تأخیر نیز رفتار جالبی دارد، به طوری که در مقادیر پایین تأثیر منفی بر خروجی مدل دارد، اما با افزایش مقدار آن، این تأثیر به تدریج مثبت می‌شود. این تغییر جهت تأثیر احتمالاً نشان‌دهنده تغییر در مکانیسم‌های تأثیرگذاری این شاخص بر اقلیم منطقه در سطوح مختلف



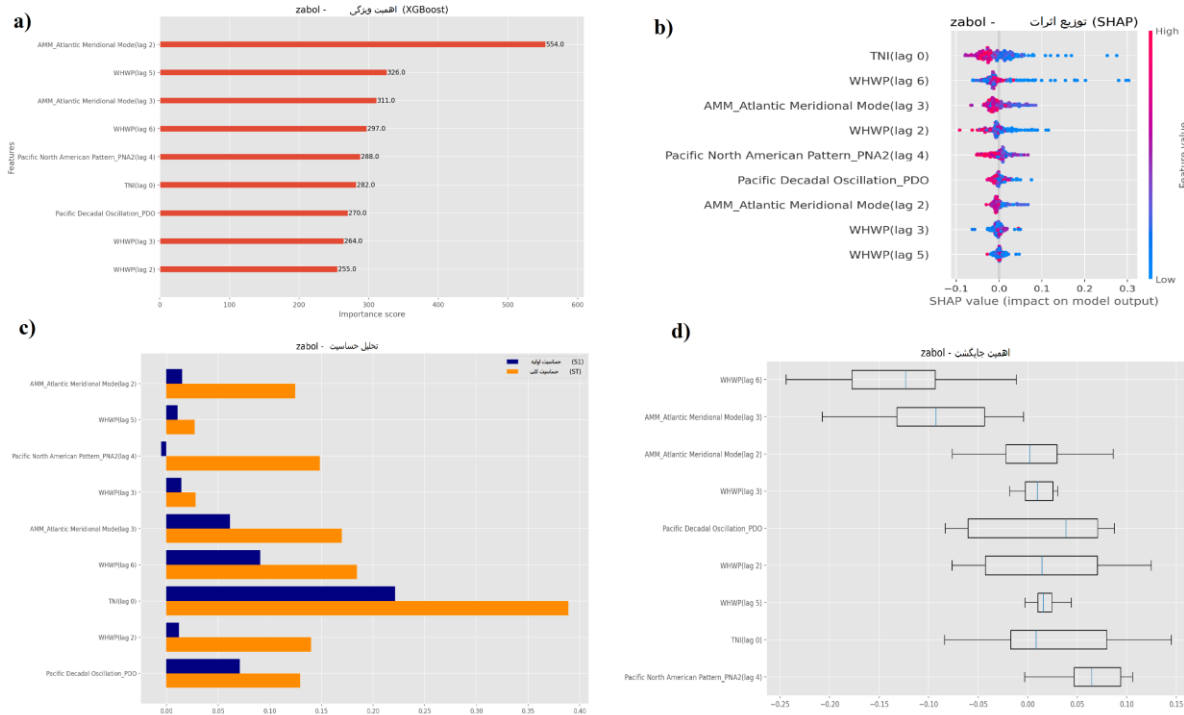
شکل ۸- بررسی رفتار مدل در برابر تغییرات شاخص های اقلیمی با استفاده از تحلیل PDP در ایستگاه ایران شهر
Figure 8- Investigating the behavior of the model against changes in climatic indicators using PDP analysis at Iranshar station

دارد. این نتایج تأیید می کند که شاخص های اقیانوس آرام (TNI) و WHWP نقش غالب را در تغییرپذیری AOD ایستگاه زابل ایفا می کنند و تأثیر شاخص های اقیانوس اطلس (AMM) در درجه بعدی اهمیت قرار می گیرد. تحلیل سوبول این یافته ها را با دقت بیشتری بررسی کرده و نشان می دهد که شاخص TNI بدون تأخیر (با حساسیت نزدیک به ۰.۴) و شاخص WHWP در تأخیرهای ۲ تا ۶ ماهه (با حساسیت ۰.۱ تا ۰.۲) بیشترین سهم را در تغییرپذیری خروجی مدل دارند. نکته جالب توجه در این تحلیل، افزایش تدریجی حساسیت شاخص WHWP با افزایش مدت تأخیر است که احتمالاً نشان دهنده مکانیسم های تأثیر تجمعی این شاخص بر سیستم اقلیمی منطقه است. تحلیل اهمیت جایگشت نیز این نتایج را تأیید می کند و نشان می دهد که شاخص WHWP با تأخیر ۶ ماهه بیشترین تأثیر را بر دقت مدل

۳-۶- مقایسه روش های تحلیل اهمیت و حساسیت متغیرها در ایستگاه زابل

شکل ۹ تحلیل جامع نتایج مدل سازی برای منطقه زابل است که نشان دهنده سلسله مراتب پیچیده ای از تأثیرات متغیرهای اقلیمی است که در قالب سه رویکرد اهمیت ویژگی ها، تحلیل حساسیت سوبول^{۱۹} و اهمیت جایگشت مورد بررسی قرار گرفته اند. در مدل XGBoost شاخص AMM با امتیاز ۵۵۴ به عنوان مؤثرترین متغیر شناسایی شده است که به همراه دیگر شاخص های مرتبط با اقیانوس اطلس (با امتیازات ۳۱۱ و ۲۷۰) و الگوهای اقیانوس آرام (WHWP) با امتیاز ۳۲۶ و PNA (با امتیاز ۲۸۸) ساختار اصلی پیش بینی های مدل را شکل می دهند. در تحلیل SHAP برای ایستگاه زابل، شاخص TNI به عنوان مهم ترین شاخص با سطح اهمیت زیاد است و پس از آن WHWP قرار

مقیاس‌های زمانی مختلف (از تأخیر صفر تا ۶ ماهه) اثرات متفاوتی بر سیستم دارند. تفاوت اصلی ایستگاه زابل با ایستگاه ایرانشهر در تأثیر کمتر شاخص‌های مرتبط با اقیانوس اطلس (مانند AMM) و تأثیر بیشتر شاخص‌های مرتبط با اقیانوس آرام (TNI و WHWP) است که به دلیل تفاوت در الگوهای باد و موقعیت جغرافیایی دو ایستگاه است.

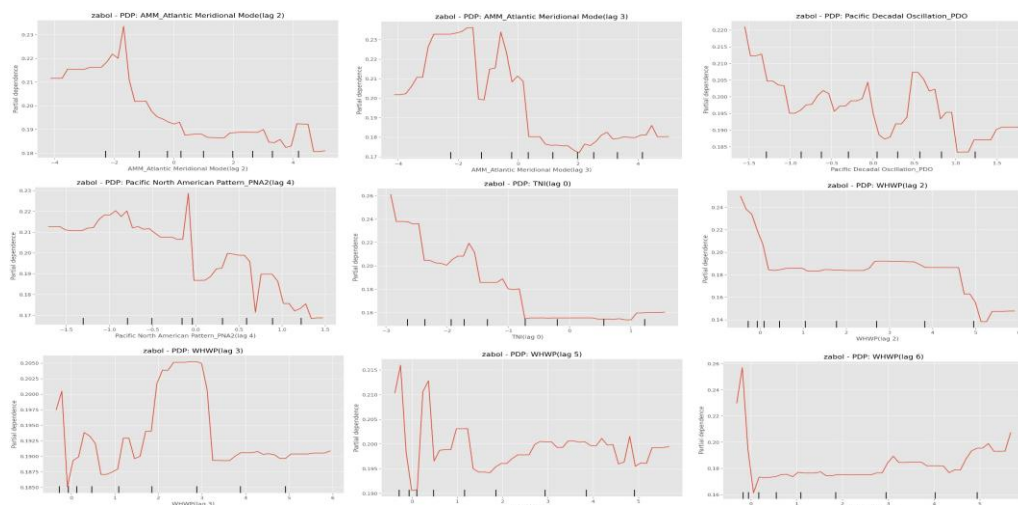


شکل ۹- الف) نمودار اهمیت ویژگی ب) تغییرات شاخص‌های اقلیمی با روش SHAP پ) تحلیل حساسیت شاخص‌ها با روش Sobol ت) تحلیل اهمیت جایگزینی شاخص‌ها در ایستگاه زابل

Figure 9- a) Feature importance diagram b) Changes in climatic indicators using the SHAP method c) Sensitivity analysis of indicators using the Sobol method d) Analysis of the importance of permutation of indicators at Zabol station

پایدارتر این نوسان چنددهه‌ای بر سیستم مدل است. شاخص WHWP در تأخیر ۳ ماهه، رابطه‌ای تقریباً خطی با خروجی مدل نشان می‌دهد، در حالی که در تأخیر ۶ ماهه، الگوی پیچیده‌تری با نقاط عطف متعدد مشاهده می‌شود. این تفاوت‌ها بازتابی از تغییر در مکانیسم‌های تأثیرگذاری این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف است. تأثیرات کوتاه‌مدت ممکن است بیشتر مرتبط با تغییرات دمایی باشد، در حالی که تأثیرات بلندمدت‌تر می‌تواند با تغییر در الگوهای بارشی و گردش جوی مرتبط باشد. نکته قابل تأمل در تمامی این نمودارها، وجود نقاط عطف و مقادیر آستانه‌ای است که در آن‌ها رفتار مدل به‌طور محسوس تغییر می‌کند. این ویژگی‌ها اهمیت در نظر گرفتن روابط غیرخطی و آستانه‌ای را در مدل‌سازی‌های اقلیمی برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که چگونه تغییرات ظاهراً کوچک در مقادیر شاخص‌های اقلیمی می‌توانند در شرایط خاص، تأثیرات نامتناسبی بر سیستم داشته باشند.

تحلیل نمودارهای PDP برای منطقه زابل، لایه‌های پیچیده‌ای از روابط غیرخطی بین متغیرهای اقلیمی و خروجی مدل را آشکار می‌سازد. شاخص AMM در تأخیرهای ۲ و ۳ ماهه، الگوی مشخصی از وابستگی را نشان می‌دهد که در آن، عبور از مقادیر آستانه‌ای خاص باعث تغییرات ناگهانی در تأثیر این شاخص بر پیش‌بینی‌های مدل می‌شود. این رفتار غیرخطی به‌ویژه در محدوده‌های میانی مقادیر شاخص مشهود است، جایی که شیب منحنی به‌طور محسوس تغییر می‌کند. شاخص PNA در تأخیر ۴ ماهه نیز روابط جالبی را نمایش می‌دهد، به‌طوری که در مقادیر منفی تأثیر کاهنده و در مقادیر مثبت تأثیر فزاینده‌ای بر خروجی مدل دارد. این دوجانگی نشان‌دهنده تغییر در مکانیسم‌های تأثیرگذاری این الگوی جوی در فازهای مختلف آن است. در مورد شاخص PDO، اگرچه دامنه تأثیر محدودتر است، اما تغییرات تدریجی و یکنواخت آن در محدوده‌های مختلف مقادیر، حاکی از تأثیر



شکل ۱۰- بررسی رفتار مدل در برابر تغییرات شاخص های اقلیمی با استفاده از تحلیل PDP در ایستگاه زابل
Figure 10- Investigating the behavior of the model against changes in climatic indicators using PDP analysis at Zabol station

۳- نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل نتایج ایستگاه های ایران شهر و زابل نشان می دهد که شاخص های پیوند از دور به طور قابل توجهی بر تغییرات AOD در سیستان و بلوچستان تأثیر می گذارند و این روابط ناشی از تأثیر آن ها بر الگوهای جوی، مسیرهای انتقال گرد و غبار و شرایط رطوبت منطقه ای است. در حالی که الگوهای کلی مشابهی در مناطق مختلف مشاهده شده است، شدت و جهت این روابط به دلیل ویژگی های جغرافیایی ایران شهر و زابل متفاوت است. در ایستگاه زابل، شاخص های مرتبط با اقیانوس آرام نقش غالب را ایفا می کنند و تأثیر آن ها با افزایش تأخیر زمانی تشدید می شود، برخلاف ایستگاه ایران شهر که شاخص های اقیانوس اطلس تأثیر قوی تری نشان می دهند. از دیدگاه مدل سازی، مدل های مبتنی بر Boosting، عملکرد بهتری نسبت به مدل های Bagging دارند و کارایی بالاتری را در پردازش روابط غیرخطی بین شاخص های اقلیمی و AOD نشان می دهند. در این مطالعه با شناسایی شاخص های کلیدی و ارائه مدل های پیش بینی دقیق، گام مهمی در درک مکانیسم های کنترل کننده AOD در منطقه مور مطالعه برداشته است. همچنین این یافته ها با در نظر گرفتن تفاوت های مکانی شناسایی شده در عوامل مؤثر، امکان طراحی سیستم های هشدار زودهنگام منطقه ای را فراهم می کنند. شناسایی روابط آستانه ای و نقاط بحرانی در رفتار شاخص ها می تواند به بهبود قابل توجه دقت پیش بینی های کوتاه مدت و بلندمدت منجر شود. همچنین، نتایج این تحقیق می تواند مبنای علمی مستحکمی برای برنامه ریزی های مدیریتی تطبیقی در حوضه های مختلف از جمله مدیریت منابع آب، کشاورزی، سلامت عمومی و حمل و نقل را فراهم آورد، به طوری که تصمیم گیران و

برنامه ریزان می توانند با اتکا به درک عمیق تر از مکانیسم های اقلیمی مؤثر بر منطقه، راهبردهای هدفمند و مؤثرتری برای کاهش اثرات مخرب پدیده گردوغبار طراحی و اجرا نمایند.

سپاسگزاری

در این بخش از همکاری و مساعدت اساتید محترم، فارغ التحصیلان و دانشجویان دکتری دانشگاه بندرعباس که در آموزش برنامه نویسی R و در اختیار قرار دادن داده یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

ابوالفضل داوری: انجام تحلیل های نرم افزاری، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **رسول مهدوی نجف آبادی:** راهنمایی، مفهوم سازی، ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج؛ **مرضیه رضایی:** مشاوره علمی، بازبینی متن مقاله؛ **ام البنین بذرافشان:** مشاوره علمی، بازبینی متن مقاله؛ **علیرضا شهر یاری:** مشاوره علمی، بازبینی متن مقاله.

منابع

انصاری قوجقار، محمد، پورغلام آمیجی، مسعود، عراقی نژاد، شهاب، بابایان، ایمانف لیاقت، عبدالمجید و سلاجقه، علی (۱۴۰۰). تأثیر

هواشناسی. مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶(۱)، ۱۲۷-۱۵۰.
magiran.com/p2842364

طاوسی، تقی، و زهرایی، اکبر (۱۳۹۲). مدل‌سازی و پیش‌بینی پدیده گرد و غبار استان سیستان و بلوچستان بر اساس مدل برون‌یابی منحنی روند سری‌های زمانی. کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی، ۱(۱)، ۱۵۷-۱۳۹.
doi:10.1001.1.2345332.1392.1.1.6.2

References

- Alipour, E. (2016). *Analysis of the effect of teleconnection patterns on spatio-temporal changes of dust storms frequency in Iran* [master's thesis, Tarbiat Modares University]. [In Persian]
- Ansari Ghoghhar, M., Pourgholam-Amiji, M., Araghejad, S., Babaeian, I., Liaghat, A., & Salajegheh, A. (2021). The effect of warm phase of ENSO phenomenon on the formation of dust storms in Khuzestan and Sistan and Baluchestan provinces. *Journal of Range and Watershed Management*, 74(2), 257-271. [In Persian].
magiran.com/p2333807
- Chen, C., Hu, Y., Fan, M., Jia, L., Zhang, W., & Fan, T. (2025). Investigation on the Linkage Between Precipitation Trends and Atmospheric Circulation Factors in the Tianshan Mountains. *Water*, 17(5), 726. doi:10.3390/w17050726
- Choobari, O. A., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The global distribution of mineral dust and its impact on the climate system: A review. *Atmospheric Research*, 138, 152-165. doi: 10.1016/j.atmosres.2013.11.007
- Ding, R., Li, J., Wang, S., & Ren, F. (2005). Decadal change of the spring dust storm in northwest China and the associated atmospheric circulation. *Geophysical Research Letters*, 32(2), L02808. doi:10.1029/2004GL021561
- Durán-Quesada, A., Castillo, R., Hundsdoerfer, M., & Gimeno, L. (2017). CLLJ and WHWP heat content as a constrain to North American Monsoon activation moisture supply. doi:10.3390/CHyCle-2017-04856
- Feng, J., Liao, H., & Li, J. (2016). The impact of monthly variation of the Pacific-North America (PNA) teleconnection pattern on wintertime surface-layer aerosol concentrations in the United States. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(8), 4927-4943. doi:10.5194/acp-16-4927-2016
- Gong, S. L., Zhang, X. Y., Zhao, T. L., Zhang, X. B., Barrie, L. A., McKendry, I. G., & Zhao, C. S. (2006). A simulated climatology of Asian dust aerosol and its trans-Pacific transport. Part II: Interannual variability and climate connections. *Journal of Climate*, 19(1), 104-122. doi:10.1175/JCLI3606.1
- Gupta, P., Remer, L. A., Patadia, F., Levy, R. C., & Christopher, S. A. (2020). High-resolution gridded level 3 aerosol optical depth data from MODIS. *Remote Sensing*, 12(17), 2847. doi:10.3390/rs12172847
- Hao, N., Sun, P., He, W., Yang, L., Qiu, Y., Chen, Y., & Zhao, W. (2022). Water resources allocation in the Tingjiang River Basin: Construction of an interval-fuzzy two-stage chance-constraints model and its assessment through Pearson correlation. *Water*, 14(18), 2928. doi:10.3390/w14182928
- Jin, Q., Wei, J., & Yang, Z.-L. (2014). Positive response of Indian summer rainfall to Middle East dust. *Geophysical Research Letters*, 41(11), 4068-4074. doi:10.1002/2014GL059980
- Kamal, A., Lin, Z., & Wu, C. (2022). Decadal change of spring dust activity in western Iran and its mechanism. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 983048. doi:10.3389/fenvs.2022.983048
- Khodayar, F., Ansari, M., Hojati, S., & Khodayar, E. (2025). Comparing machine learning algorithms for estimating PM10 particle concentration using AOD and selected meteorological parameters. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56(1), 127-150. [In Persian].
magiran.com/p2842364
- Le, T., & Bae, D. H. (2022). Causal influences of El Niño–Southern Oscillation on global dust activities. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2022, 1-19. doi:10.5194/acp-22-5253-2022
- Li, H., Hu, S., Ma, S., Tan, Z., Ai, W., & Yan, W. (2024). Retrieving nighttime aerosol optical depth using

فاز گرم پدیده ENSO بر شکل‌گیری طوفان‌های گرد و غبار در استان‌های خوزستان و سیستان و بلوچستان. نشریه مرتع و آبخیزداری، ۷۴(۲)، ۲۵۷-۲۷۱.
magiran.com/p2333807

خدایار، فاطمه، انصاری، محمدرضا، حجتی، سعید و خدایار، الهام (۱۴۰۴). مقایسه الگوریتم‌های یادگیری ماشین به منظور تخمین غلظت ذرات PM10 با استفاده از شاخص AOD و برخی پارامترهای

- combined measurements of satellite low light channels and ground-based integrating spheres. *International Journal of Remote Sensing*, 45(21), 7902-7914. doi:10.1080/01431161.2022.2118003
- Li, J., Garshick, E., Huang, S., & Koutrakis, P. (2021). Impacts of El Niño-Southern Oscillation on surface dust levels across the world during 1982-2019. *Science of the Total Environment*, 769, 144566. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144566
- Miller, R. L., & Tegen, I. (1998). Climate responses to soil dust aerosols. *Journal of Climate*, 11(12), 3247-3267.
- Nabat, P., Somot, S., Cassou, C., Mallet, M., Michou, M., Bouniol, D., ... & Saint-Martin, D. (2020). Modulation of radiative aerosols by atmospheric circulation over the Euro-Mediterranean region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(14), 8315-8349. doi:10.5194/acp-20-8315-2020
- Pereira, A. G., Palácios, R., Santos, P. C., Pereira, R. V. S., Cirino, G., & Imbiriba, B. (2024). Relationship between El Niño-Southern Oscillation and Atmospheric Aerosols in the Legal Amazon. *Climate*, 12(2), 13. doi:10.3390/cli12020013
- Sahebzadeh, B. (2019). Health risk of wind sediments distribution in human environmental in Sistan region, east of Iran. *EQA-International Journal of Environmental Quality*, 34, 35-45. doi:10.6092/issn.2281-4485/8461
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763-1768. doi:10.1213/ANE.0000000000002864
- Shaheen, A., Wu, R., Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Kaskaoutis, D. G., & Munawar, I. (2023). Spatio-temporal changes of spring-summer dust AOD over the Eastern Mediterranean and the Middle East: Reversal of dust trends and associated meteorological effects. *Atmospheric Research*, 281, 106509. doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106509
- Shao, Y., Wyrwoll, K.-H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G. H., & Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, 2(4), 181-204. doi: 10.1016/j.aeolia.2011.02.001
- Sharma, D. K., Chatterjee, M., Kaur, G., & Vavilala, S. (2022). Deep learning applications for disease diagnosis. In *Deep learning for medical applications with unique data* (pp. 31-51). Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-824145-5.00002-1
- Solanki, P., Deswal, M., Malik, S. S., Laura, J. S., & Attri, S. D. Validation of MODIS Aerosol Optical Depth Retrieval with AERONET Data. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 2(14), 1172-1175. <https://www.krishisanskriti.org/jbaer.html>
- Sun, Y., Mao, R., Gong, D. Y., Li, Y., Kim, S.-J., Zhang, X. X., & Hamidi, M. (2022). Decadal shift of the influence of Arctic Oscillation on dust weather frequency in spring over the Middle East during 1974-2019. *International Journal of Climatology*, 42(4), 2440-2454. doi:10.1002/joc.7379
- Tavousi, T., & Zahraei, A. (2013). Modeling and prediction of dust phenomenon in Sistan and Baluchestan province based on time series trend extrapolation model. *Iranian Journal of Geographical Explorations of Desert Regions*, 1(1), 139-157. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2345332.1392.1.1.6.2>
- Uno, I., Eguchi, K., Yumimoto, K., Takemura, T., Shimizu, A., Uematsu, M., & Sugimoto, N. (2009). Asian dust transported one full circuit around the globe. *Nature Geoscience*, 2(8), 557-560. doi:10.1038/ngeo583
- Washington, R., Todd, M., Middleton, N. J., & Goudie, A. S. (2003). Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations. *Annals of the Association of American Geographers*, 93(2), 297-313. doi:10.1111/1467-8306.9302003
- Zhang, X. Y., Gong, S. L., Zhao, T. L., Arimoto, R., Wang, Y. Q., & Zhou, Z. J. (2003). Sources of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission. *Geophysical Research Letters*, 30(24), 2272. doi:10.1029/2003GL018206
- Zhao, Y., Xin, Z., & Ding, G. (2018). Spatiotemporal variation in the occurrence of sand-dust events and its influencing factors in the Beijing-Tianjin Sand Source Region, China, 1982-2013. *Regional Environmental Change*, 18(8), 2433-2444. doi:10.1007/s10113-018-1423-6