

Development of the simplified meta-statistical extreme value (SMEV) model for analyzing extreme wind events and particle transport hazards in Eastern Lake Urmia

Maryam Vasef¹, Keivan Khalili^{2*}, Majid Montaseri³

¹Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

^{2*}Associate Professor, Urmia Lake Research Institute, Urmia University, Urmia, Iran

³Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

Extended Abstract

Introduction

The ongoing desiccation of Lake Urmia in northwestern Iran has transformed its former lakebed into a significant source of airborne dust and salt particles, posing escalating environmental and public health risks. These storms pose serious environmental and health risks by elevating particulate matter concentrations (PM_{10} and $PM_{2.5}$), degrading air quality, and impairing agricultural productivity. Wind events exceeding 5 m/s can initiate wind storm mobilization and atmospheric dust generation in arid and semi-arid environments. Wind direction is important for the transport of dust to cities. The eastern part of Urmia Lake is more affected by wind because of the dominant wind direction in the Urmia Lake basin. This part is more important for risk assessment studies. Classical models, such as the Generalized Extreme Value (GEV) distribution, often fall short of capturing the full complexity of wind extremes under nonstationary conditions. To overcome these limitations, the Simplified Meta-Statistical Extreme Value (SMEV) model is developed and used for the first time, in this study, as a method that integrates both ordinary and extreme wind data into a unified distribution framework. This study aims to estimate return period wind speeds with SMEV compared against GEV, and evaluate wind direction probabilities for storm prediction. Results will inform regional dust storm risk management and advance extreme value modeling in the Lake Urmia basin.

Materials and Methods

Using three-hourly wind speed and direction data from 2005 to 2024 across four synoptic stations (Tabriz, Maragheh, Bonab, and Shabestar) in the eastern Lake Urmia Basin, SMEV was employed to estimate return period wind speeds and assess directional probabilities. In this research, the CEEMDAN method has been used as a technique to remove noise and trends from wind speed data. At the stations, wind events were divided into extreme and ordinary events, based on the wind speed threshold, using the peak-over-threshold (POT) approach by applying the 90th percentile. Return periods of 5, 10, 20, 50, 100, and 200 years were chosen. The model combines a two-parameter Weibull distribution for ordinary winds with annual extreme wind counts to generate composite cumulative distribution functions (CDFs) per dominant direction sector. The bootstrap method was used for SMEV model performance evaluation. The GEV model was used as a benchmark and employed to estimate return period wind speeds, and both models were evaluated using AIC, BIC, FSE, WFSE, and leave-one-out cross-validation (LOO). Additionally, a random forest algorithm was trained to predict the likelihood of wind directions associated with dust transport.

Results and Discussion

SMEV predicted critical wind speeds exceeding 7 m/s with high confidence. In all four stations, wind speeds exceeded 7 m/s, and wind direction analysis revealed over 70% probability of wind-driven dust transport from the southwest and south to the east, toward residential areas. The random forest method predicted the corresponding wind directions for selected stations east of Lake Urmia. The dominant directions for extreme storm events are southwest and south for short to medium return periods. In longer periods, the dominance of south and west continues at Shabestar and Maragheh stations, and for Tabriz and Maragheh stations, the dominant direction changes to east. GEV extreme values predicted more than 12 m/s for wind speeds. It shows the GEV model overestimates. For the Urmia Lake Basin, wind speeds of more than 12 happen rarely and are not common. The SMEV model outperformed the GEV model, providing more stable and realistic estimates of return-level wind speeds, particularly for long recurrence intervals. Error metrics confirmed the superiority of SMEV (FSE = 0.014; WFSE = 20.7) compared to GEV (FSE = 0.081; WFSE = 196), highlighting its improved performance in

estimating environmental hazards. The advantage of this method over other classical methods is in distinguishing between extreme and normal events, as well as distinguishing extreme events with the corresponding dominant directions of extreme wind speeds. In addition, the use of a wind speed threshold limit, unlike other statistical methods such as GEV, which only focus on maximum wind speeds in the analysis of extreme events, can provide reliable accuracy for this method in estimating extreme events.

Conclusion

This study focused on the analysis of extreme wind speeds in the eastern part of the Urmia Lake watershed, and using a simplified meta-statistical extreme value model, was able to provide reliable estimates of strong winds in different return periods. The results showed that speeds exceeding 7 m/s occur with high probability in this area, and this amount is sufficient to initiate the transport of suspended particles and the formation of dust storms in the study area. In conclusion, SMEV demonstrates significant potential for use in regional wind hazard assessments, early warning systems, and dust storm risk mitigation in the Urmia Lake Basin. This model relies solely on wind speed and direction and does not consider other environmental drivers such as soil moisture, land cover, vegetation, or surface roughness that can significantly affect the potential for dust emission. This approach can also help universities, along with other tools, to identify high-risk areas susceptible to dust transport from the dry bed of Lake Urmia. Overall, this model can be used as an effective tool in analyzing climate risks associated with wind and dust storms in the region. In addition, the use of the 90th percentile threshold and 24-hour separation criteria raises statistical assumptions that more extreme events may have been identified, which has increased the accuracy of the model and, on the other hand, has made the model more sensitive to extreme phenomena. However, it is suggested that in future studies, the integration of environmental variables such as relative humidity and precipitation should be considered to improve the SMEV model. Also, combining this model with wind datasets based on satellite images can improve the spatial representation of wind patterns.

Keywords: Extreme value distributions, Statistical model, Wind direction, Climate change, Return period, Wind speed.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Water Department of the Faculty of Agriculture, Urmia University, the respected department director, Dr. Mohammad Hemmati, and the National Meteorological Organization, for providing a letter and confirmation for access to meteorological data.

Conflicts of interest

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

Data Availability Statement

All data and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

Maryam Vasef: Writing - original draft preparation, Conceptualization, methodology, Visualization, Supervision, Resources, Software; **Keivan Khalili:** Manuscript editing, Formal analysis and investigation; **Majid Montaseri:** Formal analysis and investigation

*Corresponding Author, E-mail: k.khalili@urmia.ac.ir

Citation: Vasef, M., Khalili, K., & Montaseri, M (2025). Development of the simplified meta-statistical extreme value (SMEV) model for analyzing extreme wind events and particle transport hazards in Eastern Lake Urmia. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3), 173-196.

doi: 10.22098/mmws.2025.17371.1597

Received: 06 May 2025, Received in revised form: 07 June 2025, Accepted: 07 June 2025, Published online: 23 September 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 3, pp. 173-196.
Publisher: University of Mohaghegh Ardabili © Author(s)





توسعه مدل فرا ابتکاری مقادیر حدی SMEV جهت تحلیل خطرات بادهای حدی و انتقال ذرات در شرق دریاچه ارومیه

مریم واصف^۱، کیوان خلیلی^{۲*}، مجید منتصری^۳

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ دانشیار، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۳ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

با توجه به بحران خشکسالی و کاهش سطح آب دریاچه ارومیه بسترهای خشک اطراف دریاچه به کانون‌های جدید تولید گرد و غبار تبدیل شده‌اند. با بروز تغییرات اقلیمی، وقوع باد و نرخ سرعت باد طی سال‌های اخیر افزایش داشته، در نتیجه پدیده انتشار ذرات معلق در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه مشاهده شده است. این پژوهش با هدف تحلیل و پیش‌بینی دوره بازگشت رویدادهای حدی باد، به مقایسه مدل کلاسیک توزیع مقادیر حدی (GEV) با رویکرد ساده شده فراماری مقادیر حدی (SMEV) بر روی داده‌های باد می‌پردازد. در این راستا داده‌های سرعت و جهت باد در چهار ایستگاه تبریز، مراغه، بناب و شبستر در شرق دریاچه ارومیه طی سال‌های آماری ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ تحلیل شده و مدل سازی آماری با استفاده از زبان‌های برنامه‌نویسی Python و R اجرا شد. مدل سازی با دو روش GEV و SMEV صورت گرفت. مدل SMEV به‌صورت هدفمند منطبق با شرایط منطقه‌ای بر روی داده‌های باد توسعه داده شد. پیش‌بینی دوره بازگشت برای دوره‌های ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله پیاده‌سازی شد. نتایج حاصل نشان داد سرعت‌های باد حدی بیش از ۷ متر بر ثانیه و در دوره‌های بازگشت بلندمدت تا حدود ۱۳ متر بر ثانیه افزایش یافته است. در دوره‌های بازگشت ۲ و ۵ ساله، سرعت باد در ایستگاه‌های تبریز و مراغه به ترتیب ۹ و ۱۱ متر بر ثانیه پیش‌بینی شد که می‌تواند نشانگر احتمال وقوع طوفان حدی در آینده نزدیک باشد. برای پیش‌بینی جهت‌های غالب بادهای حدی مدل جنگل تصادفی استفاده شد، جهت‌های جنوب غربی و جنوب با احتمال وقوع ۷۸ و ۴۲ درصد بیش‌ترین فراوانی را داشتند. همچنین مدل GEV در برخی از دوره‌های بازگشت بلند مدت سرعت‌هایی تا ۳۰ متر بر ثانیه را پیش‌بینی کرده است که با شرایط اقلیمی منطقه هم‌خوانی ندارد. در مقابل مدل SMEV، با خطای مربع کسری (FSE) برابر با ۰/۰۱۴ و خطای مربع کسری وزنی (WFSE) معادل ۲۰/۷ نسبت به مدل GEV با مقادیر ۰/۰۸۱ و ۱۹۶ عملکرد دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری در پیش‌بینی داشته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد به‌کارگیری و توسعه مدل SMEV برای داده‌های باد با توجه به شرایط اقلیمی می‌تواند ابزاری موثر برای تحلیل تغییرات اقلیمی و مدیریت مخاطراتی مانند طوفان‌های باد باشد.

واژه‌های کلیدی: توزیع‌های حدی، مدل آماری، جهت باد، تغییرات اقلیمی، دوره بازگشت، سرعت باد

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: k.khalili@urmia.ac.ir

استناد: واصف، مریم، خلیلی، کیوان، و منتصری، مجید (۱۴۰۴). توسعه مدل فرا ابتکاری مقادیر حدی SMEV جهت تحلیل خطرات بادهای حدی و انتقال ذرات در شرق دریاچه ارومیه. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۳)، ۱۷۳-۱۹۶.

doi: 10.22098/mmws.2025.17371.1597.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۱۷۳ تا ۱۹۶.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران به دلیل خشک شدن دریاچه فوق شور ارومیه که زمانی یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های شور جهان بود، امروزه به یکی از مراکز انتقال ذرات گرد و غبار و نمک تبدیل شده است. این دریاچه در دهه‌های اخیر به دلیل تغییرات آب و هوایی و فعالیت‌های انسانی با کاهش سطح قابل‌توجهی مواجه شده است (AghaKouchak et al, 2015). کاهش سطح دریاچه، سبب پیدایش بسترهای خشک حساس به فرسایش بادی در اطراف دریاچه ارومیه شده است. این بحران علاوه بر پیامدهای اکولوژیکی و هیدرولوژیکی، بخش‌هایی از بستر خشک شده دریاچه ارومیه را به کانون فعال گرد و غبار و انتشار نمک تبدیل کرده است (Sotoudeheian et al, 2016). و طبق تجربه‌های جهانی مشابه، مانند پدیده خشک شدن دریاچه آرال، باید اظهار کرد، این پدیده می‌تواند پیامدهای غیرقابل جبرانی برای محیط زیست و سلامت عمومی و اقلیم منطقه داشته باشد (Miller-Schulze et al, 2022; Chen et al, 2015). برای تحلیل این پدیده ابتدا به اندازه، ویژگی‌های ذرات و شرایط انتشار آن‌ها در منطقه پرداخته شد. یافته‌های مطالعات متعدد نشان داده است اندازه ذرات معلق موجود در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه عمدتاً در بازه PM_{10} با قطر کم‌تر از ۱۰ میکرومتر قرار دارند. درخصوص تحلیل اندازه ذرات مطالعه Gholampour et al (2015) با هدف بررسی وقوع طوفان گرد و غبار با توجه به سرعت باد و قابلیت انتقال ذرات در بخش شرقی دریاچه ارومیه صورت گرفته است. محدوده سرعت باد با میانگین ۲/۵ متر بر ثانیه و در برخی موارد ۱۳ متر بر ثانیه برای ایستگاه‌های عجب‌شیر و تسوج بوده است، اندازه ذرات $PM_{2.5}$ و عمدتاً PM_{10} شناسایی شده‌اند. میزان انتشار ذرات PM_{10} در منطقه با افزایش سرعت باد افزایش یافته و در نتیجه سرعت‌های بین ۲/۵ تا ۱۳ متر بر ثانیه و بیش‌تر، قابلیت انتقال و انتشار ذرات معلق در بستر خشکیده دریاچه ارومیه را طبق نتایج پژوهش داشته‌اند. برای تأکید بیش‌تر بر رابطه بین سرعت باد و اندازه ذرات، طبق یافته‌های مروری جهانی Middleton. (2017)، سرعت‌های باد در محدوده ۵ تا ۷ متر بر ثانیه برای جابه‌جایی ذرات به اندازه PM_{10} در بسترهای خشک با شرایط مشابه دریاچه ارومیه، به تنهایی شرط کافی می‌باشد. در ادامه یافته‌های این مطالعه به وضوح به منطقه آسیا و خاورمیانه اشاره شده و در کشورهایی مانند ایران انتشار و انتقال ذرات PM_{10} دلیل وقوع طوفان‌های گرد و غبار بیان شده است. در خصوص ویژگی‌های ذرات، (Effati et al. 2019) با هدف بررسی کانون‌های خاکی انتقال ذرات، با کمک تصاویر ماهواره‌ای MODIS بین سال‌های

۲۰۱۴ تا ۲۰۱۷ وجود خاک از نوع sandy clay loam در منطقه را، مستعدترین نوع خاک برای انتشار گرد و غبار در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه به دلیل وجود رطوبت نسبی پایین به هنگام وقوع باد شدید معرفی کرده‌اند. این نوع خاک همان ذرات با اندازه PM_{10} و قابل انتقال با سرعت‌های باد متوسط در منطقه ذکر شده است. همچنین (Boroughani et al. 2019) با بررسی بیش از ۲۰۰۰ تصویر ماهواره MODIS بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ اثبات کرده‌اند که بستر خشک شده دریاچه ارومیه به یک منبع فعال انتشار گرد و غبار تبدیل شده است. در تحلیل تصاویر ماهواره‌ای مشخص شده است که پس از بروز پدیده خشکسالی دریاچه ارومیه ذرات معلق در این منطقه افزایش یافته و از این منطقه به سمت سایر نقاط ایران انتشار می‌یابند. مطالعات متعددی در سال‌های اخیر تلاش کرده‌اند تا مکانیسم انتشار ذرات معلق موجود در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه را شناسایی، تحلیل و مدل‌سازی کنند. در بخشی از پژوهش‌هایی که از سنجش از دور استفاده کرده‌اند، (Harati et al. 2021) ارتباط مستقیم بین افزایش شاخص‌های گرد و غبار در شرق دریاچه ارومیه با کاهش سطح آب دریاچه را با ارزیابی شاخص‌های سنجش از دور NDVI، NDWI و عمق نوری آئروسول (AOD) و شاخص سنجش طوفان گرد و غبار (DSI) را ثابت کرده‌اند. در این پژوهش با خشک شدن دریاچه ارومیه و افزایش بستر خشک و کاهش پوشش گیاهی میزان وقوع طوفان‌های گرد و غبار افزایش داشته است و حتی در سال‌هایی مانند ۲۰۱۱ و ۲۰۱۶ که خشکسالی و کاهش سطح وجود داشته است میزان انتشار گرد و غبار افزایش چشم‌گیری داشته است. (Abadi et al. 2022) با تحلیل‌های بلندمدت AOD550، برگرفته از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و CALIPSO نیز میزان افزایش ذرات معلق در منطقه را در لایه ۱/۵ تا ۳ کیلومتری جو در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ را نشان داده است. طی بررسی روزهای همراه گرد و غبار حتی در برخی روزها به وقوع طوفان‌های مکرر تا ۶ بار تکرار نیز اشاره شده است. نتایج این پژوهش به بروز پدیده گرد و غبار پس از خشک شدن دریاچه به‌طور واضح تأکید کرده است. (Hamzehpour et al. 2022) بیان کرده‌اند، با توجه به ترکیبات شیمیایی نمکی ذرات معلق و ساختار فیزیکی سبک آن‌ها توسط بادهای با سرعت کم از بستر جدا شده و وارد جو می‌شوند. این یافته‌ها، نقش الگوهای باد در انتقال ذرات به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های انتقال ذرات و تشدید بحران پدیده گرد و غبار در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه را برجسته می‌سازد. به دلیل وجود نمک در ذرات این حوضه با توجه به نتایج پژوهش بستر خشک شده دریاچه ارومیه کانون انتشار ذرات نمک در منطقه می‌باشد.

محیط‌زیستی اهمیت به‌سزایی دارد. این در حالی است که، روش‌های سنتی تجزیه و تحلیل ارزش افراطی سنتی (EVA) مانند توزیع ارزش افراطی تعمیم یافته (GEV)، به داده‌های بلند مدت نیاز دارند و بر مفروضات جانبی تکیه دارد که اغلب برای مناطقی مانند دریاچه ارومیه این روش کارایی کافی را ندارد (Beniston et al, 2007; Nikulin et al, 2011). در این راستا، رویکرد ارزش افراطی فراآماري (MEV)، با استفاده از داده‌های کوتاه مدت در کنار توزیع کامل رویدادهای عادی و حدی با دقت بالاتر که توسط (Marani and Ignaccolo, 2015) ارائه شده است، می‌تواند جایگزین بهتری برای مطالعه رویدادهای حدی باشد. در ادامه به‌منظور بهبود عملکرد مدل‌های توزیع حدی، مدل ساده شده‌ی رویکرد فرا آماری مقادیر حدی (Simplified Meta-statistical Extreme Value)، مدل ساده شده MEV توسط (Marra et al, 2019) با استفاده از توزیع وایبل ثابت، ساده‌تر شده است و از نظر محاسباتی برای کاربردهای علمی کارآمدتر ارائه شده است.

با این حال، در زمینه کاربرد رویکرد ساده شده فرا آماری مقادیر حدی (SMEV)، می‌توان به مطالعه رویدادهای حدی بارندگی توسط (Marra et al. (2018 اشاره کرد. در این پژوهش با اعمال حد آستانه بر روی داده‌های ساعتی بارندگی و پیش‌بینی رویدادهای حدی روش SMEV نتایج قابل‌قبولی در مقایسه با روش GEV ارائه کرده است. و (Miniussi and Marra (2021 ایستگاه‌های کشور آلمان را برای بارش‌های روزانه مورد مدل‌سازی با SMEV قرار داده است. نتایج مدل‌سازی بیانگر عملکرد قابل‌قبول روش در تخمین دوره بازگشت‌ها بوده اما به دلیل تفکیک رویدادها امکان پیش‌بینی مقادیر کم برای شدت بارندگی‌ها وجود داشته است. رویدادهای هیدرولوژیکی توسط Vidrio-Sahagún and He. (2022 در منطقه کوهستانی ایتالیا مورد بررسی قرار گرفته است، این پژوهش نشان داده است روش SMEV در پیش‌بینی رویدادهای حدی هیدرولوژیکی در شرایط تغییر اقلیمی موثر بوده و به‌خصوص در دوره‌های بازگشت ۲۰ و ۱۰۰ ساله بارندگی‌های شدید را به‌خوبی پیش‌بینی کرده است. Hu et al. (2023 روند سیل را با روش SMEV در سراسر آمریکا شبیه‌سازی کرده‌اند. در این پژوهش روش SMEV نسبت به روش GEV کارایی بهتری در دوره‌های آماری ۲۸ ساله داشته است و توانسته است سیلاب‌های حدی را تا حد زیادی پیش‌بینی کند. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد این روش محدود به تحلیل رویدادهای حدی بارش و سیلاب بوده است و استفاده از این رویکرد برای متغیرهای جوی مانند باد به‌ویژه بررسی دیده گرد و غبار در مناطقی با شرایط دریاچه ارومیه مورد توجه قرار

(Mobarak Hassan et al. (2023 با تحلیل داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و تصاویر MERRA-2، طی ۳۰ سال از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹، در شهرهای تبریز، سقز، مهاباد و ارومیه بعد از خشک شدن دریاچه ارومیه نشان داده‌اند، تعداد روزهای همراه با پدیده گرد و غبار، افزایش معناداری طی دو دهه اخیر داشته است که تبریز با تعداد ۷۲۸ روز طوفانی به‌علت سرعت و شدت بالای باد و به‌علت جهت انتشار دارای بالاترین میزان بوده است (Hamzeh et al. 2023). (داده‌های باد در سال‌های آماری بین ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار داده‌اند. با استفاده از روش عددی پیش‌بینی آب و هوا سرعت باد غالب منطقه ۱۰ متر بر ثانیه محاسبه شده است. به‌خصوص، در این پژوهش قید شده است این منطقه در بهار و پاییز بادهای فصلی قوی را تجربه می‌کند، که سرعت باد به بیش از ۱۰ متر بر ثانیه نیز می‌رسد و همراه با ثبت رویدادهای گرد و غبار در این فصل‌ها در کل منطقه با منشا بستر خشک دریاچه ارومیه بوده است. افزون‌بر این، تغییرات فصلی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه از جمله افزایش دما و کاهش بارندگی، در کنار افزایش سرعت باد، انتشار گرد و غبار و ذرات را از بسترهای خشک اطراف دریاچه را تسهیل می‌کند (Ahrari et al, 2024; Mobarak Hassan et al, 2023). مطالعه (Hossein Hamzeh et al. (2024، با ادغام دو مدل WRF_Chem و HYSPLIT که مربوط به ماه آوریل سال ۲۰۱۷ و ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز، بناب، ارومیه، سردشت، بوکان و سلماس بوده است، برای تحلیل مسیر ذرات طوفان شدید گرد و غباری و شبیه‌سازی ۱۲ ساعته برای یک ماه به‌کار گرفته شده و منشاء ذرات PM₁₀ بستر خشک دریاچه ارومیه و منشاء محلی شناسایی شده است. همچنین مطالعه Firouzeh and Danesh Yazdi (2024 با بررسی ارتباط AOD و سرعت باد، وجود ذرات نمکی بستر دریاچه ارومیه را در هوا و ایجاد آلودگی در استان‌های آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی تثبیت کرده‌اند. در این پژوهش همبستگی بین انتقال ذرات و عوامل محیطی مانند سرعت باد و رطوبت خاک رو بررسی کرده و اثبات کرده‌اند بیش‌ترین همبستگی بین سرعت باد و انتقال ذرات بوده است. با توجه به اهمیت انتقال ذرات در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، از مطالعات پیشین برداشت می‌شود که مطالعه رفتار باد به‌خصوص بادهایی که قابلیت انتقال ذرات و ایجاد پدیده طوفان را داشته باشند در قالب پدیده‌های حدی صورت نگرفته است. انجام مطالعات رخدادهای حدی باد و استفاده از روش‌های نوین مدل‌سازی با توجه به تغییرات اقلیمی در این حوضه طی سال‌های اخیر، ضروری به‌نظر می‌رسد. مدل‌سازی رویدادهای شدید جوی به‌خصوص باد، همواره در مدیریت خطرات

نگرفته است. مطالعات صورت گرفته در ایران و در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه با کمک روش GEV بیش‌تر بر قابلیت منطقه از لحاظ استفاده از انرژی باد تمرکز داشته‌اند و برای پیش‌بینی طوفان‌های حدی صورت نگرفته است. مانند مطالعات Esmacili et al. (2023) در شمال ایران بر روی داده‌های سرعت باد و برای سنجش موقعیت شمال ایران برای استفاده از انرژی باد و Mohammadpour and Bevrani. (2024) به مطالعه شهر تبریز درخصوص انرژی باد اشاره کرده است و مدل GEV را برای مدل‌سازی داده‌های باد در مقابل روش‌های نوین لجستیک ناکافی دانسته‌اند.

از این رو، به دلیل اهمیت تحلیل رفتار باد در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، این پژوهش برای نخستین بار در ایران مدل آماری SMEV که برای داده‌های هیدرولوژیکی طراحی شده است و با داده‌های باد استفاده نشده است، با توسعه هدفمند بر روی داده‌های باد و تحلیل رفتار باد به عنوان ابزاری نوین، به منظور تحلیل جامع سرعت و جهت باد در چهارچوب شرایط منطقه‌ای پیشنهاد می‌کند. در این مطالعه با بهره‌گیری از مدل‌سازی هم‌زمان رویدادهای حدی و عادی باد، امکان پیش‌بینی دوره بازگشت سرعت باد در سطوح مختلف فراهم شده است. انتظار می‌رود، رویکرد نوین این مدل، با توجه به استفاده از کل توزیع داده‌های باد، نتایج دقیق و جامع‌تری از نقش باد در بروز پدیده‌های گرد و غبار و بحران انتشار ذرات معلق ارائه کند. از جمله نوآوری‌های کلیدی این پژوهش، می‌توان به توسعه مدل SMEV برای اولین بار در زمینه تحلیل الگوهای مکانی و زمانی باد در منطقه‌ای با شرایط بحرانی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه اشاره کرد. افزون‌بر این، مدل‌سازی رویدادهای حدی با استفاده از SMEV، قادر خواهد بود روشی قابل اتکا برای پیش‌بینی دوره بازگشت سرعت باد در شرایط حدی و مطالعه تکرارپذیری این رفتار ارائه کند. بدین ترتیب، این پژوهش چشم‌اندازی نوین در ارزیابی، مدیریت و کاهش ریسک خطرات محیطی فراهم می‌نماید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه، واقع در شمال غربی ایران، زمانی بزرگ‌ترین دریاچه دائمی فوق شور در خاورمیانه بود. حوزه آبخیز دریاچه ارومیه مساحتی به اندازه ۵۱۱۹ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد و در سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان امتداد دارد (Sharifi et al, 2021). اکوسیستم این دریاچه به عنوان نمونه‌ای قابل توجه از یک حوضه بسته عمل می‌کند که در آن تمام رواناب‌های

رودخانه‌های حوزه آبخیز دریاچه به آن تخلیه می‌شود. منابع اصلی تأمین آب دریاچه شامل بارش مستقیم به دریاچه و ورودی از رودخانه‌های حوضه است. براساس آمار جریان رودخانه‌های تغذیه‌کننده دریاچه ارومیه، رودخانه‌های جنوبی حدود ۶۵ درصد از آب مورد نیاز دریاچه را تأمین می‌کنند و رودخانه‌های شمالی، ۱۰ درصد از این سهم را تشکیل می‌دهند. تنوع گیاهی از پوشش‌های نیمه‌خشک تا کوهستانی در این منطقه به چشم می‌خورد. این حوضه به عنوان منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شود و کشاورزی را به شدت به آبیاری وابسته می‌کند. به طوری که ۸۹ درصد از آب موجود برای اهداف آبیاری استفاده می‌شود. حوزه آبخیز دریاچه ارومیه شامل یک منطقه کشاورزی برجسته با جمعیتی تقریباً ۷ میلیون نفری است (Hadipour et al, 2024). برای این حوضه به طور متوسط سالانه ۳۲۰ میلی‌متر بارندگی و میانگین دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. طبق نتایج تصاویر ماهواره‌ای طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۲۵، از سال ۲۰۰۸ به بعد، کاهش قابل توجهی در مساحت سطح آب قابل مشاهده بوده است که با افزایش استخراج آب، کاهش جریان ورودی از رودخانه‌ها و خشکسالی طولانی مدت هم‌زمان بوده است. بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷، چشم‌گیرترین کاهش در مساحت سطح در این دوره رخ داده است. نشانه‌هایی از بهبود پس از سال ۲۰۱۸ مشهود است که احتمالاً به دلیل، پروژه‌های احیا و شرایط آب و هوایی مطلوب بوده است. با وجود این تلاش‌ها، مساحت سطح دریاچه در سال‌های اخیر ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ هم‌چنان بسیار پایین‌تر از سطوح تاریخی پیشین در زمان‌های مشابه می‌باشد (Habibi, 2025). تمرکز اصلی این مطالعه بر بخش شرقی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه است، که عمدتاً در استان آذربایجان شرقی قرار دارد. ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک انتخاب شده در بخش شرقی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه شامل تبریز، مراغه، شبستر و بناب می‌باشد. در شکل ۱، موقعیت این ایستگاه‌ها در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه نمایش داده شده است. ایستگاه‌های انتخاب شده دارای داده‌های ثبت شده‌ی سرعت و جهت باد به صورت ساعتی و روزانه می‌باشد و برای مدل‌سازی رفتار باد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. از دلایل انتخاب ایستگاه‌های ذکر شده موقعیت جغرافیایی، توپوگرافی و پراکندگی متنوع این ایستگاه‌ها در قسمت شرق دریاچه ارومیه بوده است. از دیگر دلایل انتخاب این ایستگاه‌ها محدوده مقدار سرعت باد و کافی بودن داده‌های سرعت و جهت باد می‌باشد. همچنین توجه بر جهت غالب باد که عمدتاً به سمت مناطق مسکونی و شهری می‌باشد، از دلایل مهم انتخاب ایستگاه‌های مورد مطالعه است. از نظر جغرافیایی، منطقه مورد مطالعه تقریباً در محدوده عرض‌های

۲-۱-۱- داده‌های مورد استفاده

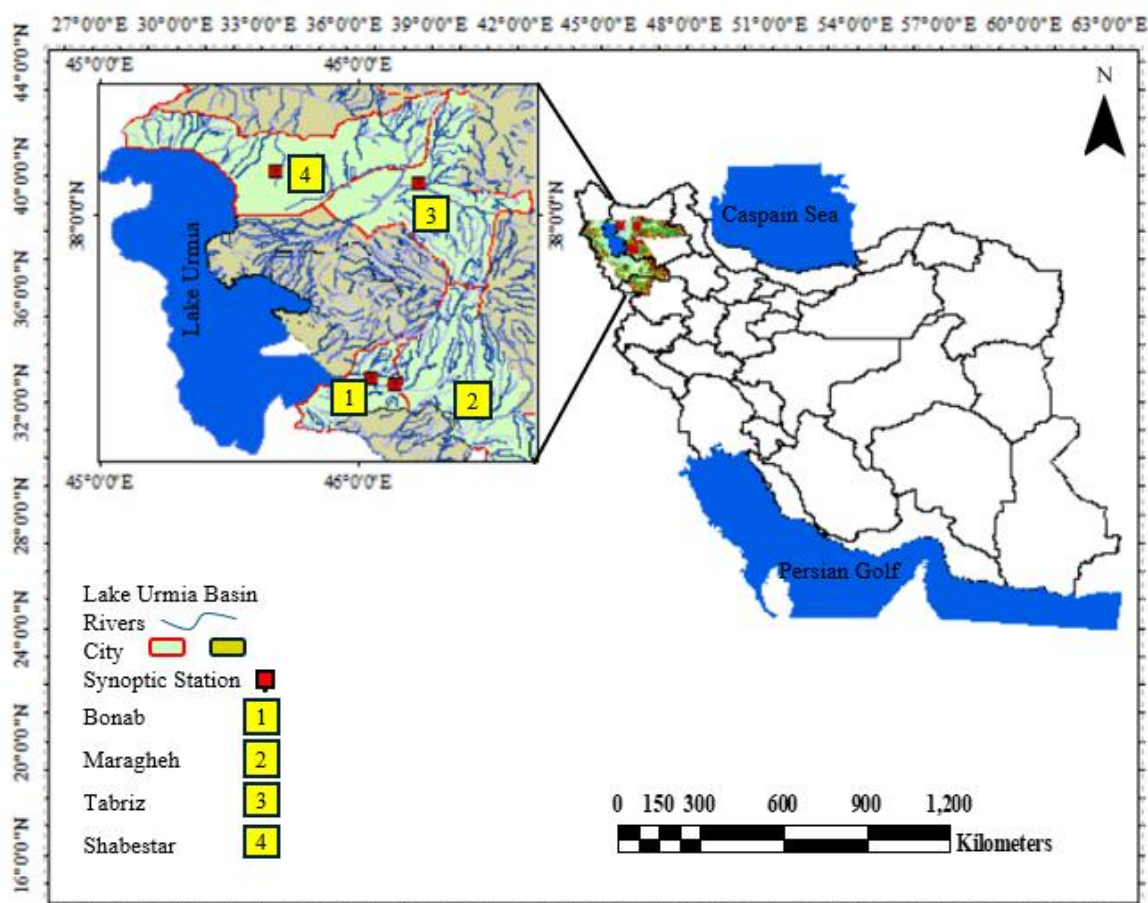
در این پژوهش از داده‌های سرعت و جهت باد ۴ ایستگاه سینوپتیک در شرق دریاچه ارومیه استفاده شده است. این داده‌ها، طی دوره آماری از سال ۲۰۰۵ تا سال ۲۰۲۴ به مدت ۲۰ سال در مقیاس زمانی ۳ ساعتی روزانه و در یک دوره آماری ۲۰ ساله هستند. مشخصات ایستگاه‌ها به صورت جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های منتخب شرق دریاچه ارومیه

Table 1. Characteristics of the selected stations in the eastern Urmia Lake basin

Synoptic station	Longitude	Latitude	Elevation above sea level (m)	Statistical period
Tabriz	46.23	38.12	1361	2024- 2005
Maragheh	56.14	37.34	1344	2024- 2005
Shabestar	45.68	38.17	1350	2024- 2005
Bonab	46.05	37.37	1281	2024- 2005

جغرافیایی "۳۷°۰۰'۰۰" تا "۳۸°۳۰'۰۰" شمالی و طول‌های جغرافیایی "۳۰°۰۰'۰۰" تا "۴۶°۳۰'۰۰" شرقی واقع شده است. از نظر اقلیمی این منطقه دارای بادهای شدیدتری نسبت به سایر قسمت‌های حوزه آبخیز دریاچه ارومیه می‌باشد (Hamzeh et al, 2022). به همین دلیل تحلیل رژیم باد و تفکیک پدیده‌های عادی و بحرانی باد در این منطقه دارای اهمیت خاصی در مطالعات پدیده‌های گرد و غبار و مدیریت خطرات احتمالی دارد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

Figure 1. Geographical location of the study area

در این پژوهش روش (CEEMDAN) به عنوان روش حذف نویز و ترند از داده‌های سرعت باد به کار گرفته شده است. داده‌های آماری و سری زمانی در زبان برنامه‌نویسی R با پکیج‌های (wavelets

۲-۲- روش‌شناسی تحقیق

۲-۲-۱- حذف نویز

جهت باد به ۸ دسته اصلی با فاصله ۴۵ درجه تقسیم شد و برای هر دسته تعداد رویدادهای عادی و طوفانی محاسبه شد. به منظور تحلیل جهت‌های باد، نمودارهای گلباد مخصوص ایستگاه‌های منتخب برای هر نوع رویداد رسم شد. جهت‌های غالب براساس بیش‌ترین تعداد رخداد باد با سرعت باد (رویداد طوفان) شناسایی شدند. داده‌های باد به سه گروه تقسیم‌بندی شد. گروه اول، اولین جهت باد غالب، گروه دوم دومین جهت غالب و گروه سوم سایر جهت‌های باد بوده‌اند. این طبقه‌بندی به منظور تحلیل دقیق‌تر رفتار بادهای حدی در ارتباط با جهات غالب صورت گرفت.

۲-۲-۴- برازش توزیع ویبول (Weibull) به داده‌های سرعت باد

توزیع ویبول (Weibull) یکی از رایج‌ترین توزیع‌های آماری در مدل‌سازی و تحلیل داده‌های سرعت باد است. ویژگی‌های آماری این توزیع از جمله انعطاف‌پذیری بالا در شکل چگالی احتمال، توانایی تطابق با انواع مختلف داده‌های باد از جمله توزیع‌های دم سنگین و نرمال، و همچنین ساده‌سازی محاسبات آماری در تحلیل‌های داده‌های باد، موجب شده است که در اکثر منابع علمی، به عنوان گزینه پایه برای مدل‌سازی رفتار باد معرفی شود (Derome et al, 2023). افزون بر این، ویبول به صورت تجربی در مطالعات منطقه‌ای در ایران به عنوان توزیع مناسب برای داده‌های سرعت باد شناسایی شده است (Nazari and Abbasi, 2021; Barvayeh et al, 2024). همچنین، Kaplan (2022) تأکید می‌کند که انتخاب توزیع مناسب باید نه تنها بر پایه تئوری، بلکه با توجه به همخوانی تجربی داده‌های منطقه انجام شود. در مطالعه حاضر نیز، با برازش چند توزیع (شامل نرمال، گاما و ویبول)، نتایج آزمون‌های آماری نشان دادند که توزیع ویبول بهترین تطابق را با داده‌های سرعت باد منطقه مورد مطالعه دارد. روش حداکثر درست نمایی یا ماکزیمم لایکلیهود^۱ یک روش معمول برای تعیین پارامترهای ویبول است که به طور گسترده در آمار و احتمالات و همچنین در مدل‌سازی توزیع‌های احتمالاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای محاسبه پارامترهای ویبول با استفاده از این روش، ابتدا ویژگی یا ویژگی‌های داده‌های مناسب به عنوان تابع هدف برای ماکزیمم لایکلیهود شناسایی، سپس پارامترهای مورد نیاز برای تابع هدف معین می‌شود. در مورد توزیع باد، این مراحل با توجه به شرایط منطقه انجام می‌شود. در توزیع ویبول این پارامترها شامل پارامتر

(signal)، تحلیل و رفع نویز شده‌اند. تجزیه حالت تجربی (EMD) یک تکنیک با وضوح چندگانه تطبیقی داده برای تجزیه یک سیگنال به اجزای فیزیکی معنی‌دار است (Huang et al, 1998). روش EMD در صورت وجود اثر حالت‌های اختلاط ناکارآمد می‌شود. که روش (EEMD) برای غلبه بر نقاط ضعف EMD استفاده می‌شود (Wu and Huang, 2009). این روش توانایی مقیاس‌پذیری بهتر دارد. اثربخشی EEMD به دامنه نویز (A) و انتخاب شماره مجموعه (N) بستگی دارد که از مقدار انحراف استاندارد نهایی (E) بین سیگنال اصلی و توابع حالت ذاتی حاصل مشاهده می‌شود در رابطه ۱ این توضیح به صورت فرمول‌سازی شده نشان داده شده است. روش CEEMDAN نوعی از الگوریتم EEMD است که بازسازی دقیق سیگنال اصلی و تفکیک طیفی بهتری از توابع حالت ذاتی را ارائه می‌دهد.

$$\varepsilon = \frac{A}{\sqrt{N}} \quad (1)$$

۲-۲-۲- طبقه‌بندی رویدادهای باد

در ایستگاه‌های مورد نظر رویدادهای باد براساس آستانه سرعت باد، با اعمال صدک ۹۰ به دو دسته رویدادهای حدی و رویدادهای عادی تقسیم‌بندی شدند. این رویکرد در مطالعات مختلف به عنوان یک روش معتبر برای استخراج رویدادهای حدی به کار رفته است. رویکرد فراتر از حد آستانه (peak-over-threshold (POT) به عنوان رویکردی که می‌تواند تعداد بیش‌تری از رویدادها را به عنوان رویداد حدی استخراج کند قید شده است و صدک‌های ۹۰ و ۹۵ درصد برای اعمال این روش توصیه شده است (Song and Chung, 2024). رویدادهایی با سرعت کم‌تر از حد آستانه، به عنوان رویداد عادی شناخته و داده‌های ثبت شده سرعت باد که از حد آستانه عبور کرده‌اند، به صورت رویداد حدی (طوفانی) نام‌گذاری شد. در این طبقه‌بندی فاصله وقوع ۲۴ ساعته برای جداسازی رویدادهای مستقل در نظر گرفته شد. دلیل این اقدام جلوگیری از تداخل رویدادهای متوالی بوده است. رابطه تعیین حد آستانه به صورت رابطه ۲ می‌باشد (Chen et al, 2023):

$$\text{Quantile}_{90\%}(\text{Speed}) = \text{Threshold} \quad (2)$$

۲-۲-۳- تحلیل جهت باد و انتخاب جهت‌های غالب

¹ Maximum Likelihood

(Value) (SMEV) ساده شده روش متاستاتیک پیش‌بینی رخدادهای حدی می‌باشد. این روش با ارائه یک رویکرد که به رخدادهای عادی و رخدادهای حدی در مدل‌سازی توجه کرده و تمرکز خود را بر رخدادهای حدی ماکسیم محدود نمی‌کند، در نتیجه روش مناسب‌تری برای تخمین رویدادهای همراه با عدم قطعیت می‌باشد. رابطه پایه روش SMEV برای داده‌های مستقل و توزیع شده یکسان به صورت رابطه ۷ است.

$$G_{SMEV}(x) = F(x, \theta)^{<n>} \quad (۷)$$

در این رابطه $F(x; \theta)$ تابع توزیع تجمعی (CDF) برای رخدادهای عادی باد می‌باشد. این تابع با استفاده از پارامترهای برازش شده تابع (CDF) ویبول بدست آمده است. n میانگین تعداد رخدادهای طوفانی در سال است. برای اجرای روش SMEV داده‌های طوفانی با استفاده از توزیع ویبول برازش داده شد. در مرحله بعد میانگین سالانه تعداد رخدادهای حدی محاسبه و تابع توزیع تجمعی SMEV برآورد شد. برای سه گروه جهت بادی که طبقه بندی شده بود توزیع ویبول به صورت مجزا برازش و مدل SMEV پیاده شد. رابطه ۸ این توزیع را نمایش می‌دهد:

$$G_{SMEV}(x) = \prod_{i=1}^S F_i(x; \theta_i)^{n_i} \quad (۸)$$

در این رابطه، S تعداد گروه‌ها، n میانگین سالانه تعداد رخدادهای برای گروه i که پارامترهای مخصوص خود را دارد. رابطه ۹ تعداد طوفان‌های حدی را محاسبه می‌کند:

$$n_i = \frac{1}{M} \sum_j n_{i,j} \quad (۹)$$

M تعداد سال‌های آماری و $n_{i,j}$ تعداد طوفان‌های گروه i در سال j است.

۲-۲-۶- تخمین دوره بازگشت سرعت باد با SMEV

با استفاده از مدل SMEV، مقدار سرعت باد برای هر سه گروه جهت باد، برای دوره‌های بازگشت مختلف ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله محاسبه شد. رابطه دوره بازگشت به صورت رابطه ۱۰ بیان می‌شود (Marra et al, 2019).

$$x_T = F^{-1} \left(\left(1 - \frac{1}{T} \right)^{\frac{1}{(n)}} \right) \quad (۱۰)$$

در این رابطه، x_T مقدار سرعت باد با دوره بازگشت T ساله، F^{-1} تابع معکوس توزیع تجمعی احتمال بادهای عادی و n میانگین تعداد

مقیاس و پارامتر شکل می‌باشد. با استفاده از روش بیشینه درست‌نمایی (ML)، پارامترهای توزیع ویبول برآورد شد. تابع چگالی احتمال توزیع ویبول به صورت رابطه ۳ می‌باشد (Stedinger, 1993):

$$\frac{K}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} e^{\left(\frac{x}{\lambda} \right)^k} = f(x; \lambda, k) \quad (۳)$$

در این رابطه، k فاکتور شکل، λ مقیاس و x سرعت باد است. تابع درست‌نمایی برای نمونه‌ای از داده‌ها با تعداد n به صورت رابطه ۴ است (Stedinger, 1993).

$$f(x_i; k, c) \prod_{i=1}^n = L(k, c) \quad (۴)$$

۲-۲-۵- تحلیل رخدادهای شدید با رویکرد ساده شده فراآماري مقدار حدی SMEV

ابتدا باید در مورد رویکرد روش MEV (Marani and Ignaccolo, 2015)، توضیحاتی داده شود، که هم پارامترهایی را که تابع توزیع تجمعی مقادیر فرآیند مشاهده شده در طول یک سال معین، و هم تعداد دفعات یک فرآیند یا رخداد (به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر می‌گیرد) را که هر سال مشاهده می‌شود را تعیین می‌کند. با M تعداد سال‌های موجود، n_j تعداد رویدادهای مشاهده شده در طول سال j و $F(\cdot)$ تابع توزیع تجمعی در کلاس توزیع که بزرگی رویداد معمولی x را توصیف می‌کند، و با پارامترهای L توصیف $\theta_j = (\theta_j^1, \dots, \theta_j^L)$ ، تابع توزیع تجمعی MEV^2 را می‌توان به عنوان میانگین نمونه‌ای از توابع توزیع تجمعی مشاهده شده در طول سال‌های نمونه که در رابطه ۵ ارائه شده است توصیف کرد:

$$MEV(x) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{j=1}^M [F(x; \theta_j)]^{n_j} \quad (۵)$$

مزایای روش ذکر شده نسبت به روش کلاسیک رویدادهای حدی، کاهش عدم قطعیت‌ها و استفاده از تمام رویدادهای معمولی با طبقه‌بندی مشخص به جای رویدادهای ماکزیمم است. در روش MEV، به منظور توزیع داده‌ها، کلاس‌بندی رویدادهای نوع i با حرف S نمایش داده شده و در رابطه ۶ ارائه شده است:

$$MEV(x) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{j=1}^M \left[\prod_{i=1}^S F_i(x; \theta_{i,j}) \right]^{n_{i,j}} \quad (۶)$$

برای مواردی که تغییرات بین سال‌ها در نظر گرفته نشود مدل SMEV پیشنهاد شده است که توسط (Marra et al, 2019) ارائه شده است. مدل (Simplified Meta-statistical Extreme)

رخدادهای حدی در هر سال می‌باشد. در این پژوهش رخدادهای همان بادهای حدی یا طوفان گرد و غبار می‌باشد.

۲-۲-۷- برآورد عدم قطعیت مدل

از روش بوت استرپ (Boot strap) برای برآورد بازه‌های اطمینان ۹۰ درصد استفاده شد. در این ارزیابی تعداد تکرار ۱۰۰۰ بار نمونه‌گیری تصادفی با جایگزینی صورت گرفت (Vogel and EVT) ^۱ تئوری مدل‌سازی و اندازه‌گیری رویدادها با کم‌ترین احتمال است. به‌طوری که برای مدل‌سازی حداکثر یا حداقل مشاهدات تصادفی برای یک توزیع، تنها به سه توزیع نیاز است (Sefian et al, 2022). توزیع مقدار حدی ^۲ (EVD) برای محدود کردن توزیع‌ها برای حداکثر یا حداقل استفاده می‌شود. توزیع مقادیر حدی هم‌چنین برای مدل‌سازی اندازه‌گیری‌های ریسک مرتبط با دنباله استفاده می‌شود (Minuissi et al, 2020). اگر $X_1, \dots, X_n$ متغیرهای تصادفی مستقل با تابع توزیع استاندارد (F) فرض کنیم، با افزایش حجم نمونه، توزیع‌های مقادیر حدی به‌عنوان توزیع‌های محدودکننده برای حداکثرها یا حداقل‌ها (مقادیر شدید) نمونه‌ای از متغیرهای تصادفی مستقل و یکسان ایجاد می‌شوند. کلاس توزیع‌های مقادیر حدی اساساً شامل سه نوع توزیع ارزش شدید، نوع I، II و III است که در زیر تعریف شده‌اند (Jung and Schindler, 2019). توابع استاندارد توزیع مقادیر حدی به شرح رابطه‌های ۱۲، ۱۱، ۱۳ است:

گامبل ^۳ تیپ ۱:

$$\Lambda(x) = \exp\{-\exp(-x)\}, x \in R \quad (11)$$

فرچه ^۴ تیپ ۲ (Fr'echet):

$$\Phi_{\alpha}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0; \\ \exp\{-x^{-\alpha}\}, & x > 0, \alpha > 0; \end{cases} \quad (12)$$

ویبول تیپ ۳:

$$\Psi_{\alpha}(x) = \begin{cases} \exp\{-(-x)^{\alpha}\}, & x \leq 0, \alpha > 0; \\ 1, & x > 0. \end{cases} \quad (13)$$

خانواده‌های EVD را می‌توان با ادغام پارامترهای مکان (λ) و مقیاس (δ) به‌صورت رابطه ۱۴ تعمیم داد:

$$\begin{aligned} \Lambda(x; \lambda, \delta) &= \Lambda((x - \lambda)/\delta), \\ \Phi_{\alpha}(x; \lambda, \delta) &= \Phi_{\alpha}((x - \lambda)/\delta), \\ \Psi_{\alpha}(x; \lambda, \delta) &= \Psi_{\alpha}((x - \lambda)/\delta), \lambda \in R, \\ \delta &> 0 \end{aligned} \quad (14)$$

توزیع GEV سه نوع توزیع مقادیر حدی (گامبل، فرچه و ویبول) را در یک خانواده واحد ترکیب می‌کند که با پارامترهای مکان (μ).

(Fennessey, 1994). توزیع ویبول مجدداً برازش داده شد و صدک‌های ۵ و ۹۵ درصد برای داده‌ها محاسبه شد.

۲-۲-۸- محاسبه دوره بازگشت سرعت باد با توزیع ارزش

افراطی تعمیم یافته GEV

یک مقدار حدی در یک سری از داده‌های مشاهداتی یک مقدار بسیار بزرگ یا یک مقدار کوچک است. تئوری مقادیر حدی مقیاس (σ) و شکل (δ) تعریف می‌شوند (Esfah et al, 2020) توزیع GEV با استفاده از روش تخمین حداکثر درستنمایی (MLE) برای تخمین پارامترها، به سری‌های حداکثر سالانه برازش داده شد. این تحلیل با استفاده از بسته‌ی scipy.stats در پایتون و extRemes در زبان برنامه‌نویسی R انجام شد. تابع توزیع تجمعی (CDF) برای توزیع مقادیر حدی به‌صورت رابطه ۱۵ ارائه شده است. پس از استخراج مقادیر حداکثر سرعت باد دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال پیش‌بینی شد.

$$F(x) = \exp\left\{-\left[1 + \delta \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\delta}}\right\} \quad (15)$$

۲-۲-۹- شاخص‌های ارزیابی مدل

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل SMEV، یک تحلیل مقایسه‌ای در برابر مدل GEV بر اساس قابلیت این دو مدل در پیش‌بینی دوره بازگشت سرعت باد حدی و پدیده طوفان انجام شد. برای سنجش کارایی از مجموعه‌ای از شاخص‌های آماری استفاده شده است. معیار اطلاعات Akaike (AIC) و معیار اطلاعات بیزی (BIC)، علاوه بر این، برای ارائه اعتبارسنجی قوی‌تر، معیارهای مبتنی بر خطا نیز محاسبه شد. خطای مربع کسری (FSE) برای تعیین کمیت انحراف نسبی بین سطوح بازده مشاهده شده و پیش‌بینی شده، خطای مربع کسری وزنی (WFSE) برای در نظر گرفتن اهمیت نسبی دوره‌های بازگشت مختلف، اعتبار سنجی متقاطع نمونه یک خروجی (LOO) بر اساس معیارهای احتمال ورود و خطا برای اندازه‌گیری تعمیم مدل به کار گرفته شده‌اند. رابطه‌های ۱۶ و ۱۷ معادلات معیار اطلاعات Akaike و معیار اطلاعات بیزی را نشان می‌دهد (Burnham and Anderson, 2004).

$$AIC = \log(L)2 - 2k \quad (16)$$

$$BIC = \log(L)2 - K \log(n) \quad (17)$$

³ Gumbel Distribution

⁴ Fr'echet

¹ Extreme Value Theory

² Extreme Value Distribution

۲-۱۰-۲- الگوریتم جنگل تصادفی

الگوریتم جنگل تصادفی^۱ (Breiman, 2011)، یک الگوریتم یادگیری ماشینی نظارت شده است که بسیار محبوب است و برای مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون در یادگیری ماشین استفاده می‌شود. الگوریتم جنگل تصادفی یک طبقه‌بندی کننده است که شامل چندین درخت تصمیم در زیر مجموعه‌های مختلف مجموعه داده است و میانگین‌گیری را برای بهبود دقت پیش‌بینی آن مجموعه داده انجام می‌دهد (شکل ۲). روند کار الگوریتم جنگل تصادفی شامل انتخاب نمونه‌های تصادفی از یک داده یا مجموعه آموزشی مشخص، ایجاد یک درخت تصمیم برای هر داده آموزشی، انجام رأی‌گیری با میانگین‌گیری درخت تصمیم و در نهایت، نتیجه پیش‌بینی بیش‌ترین رأی، به‌عنوان نتیجه پیش‌بینی نهایی انتخاب می‌شود. در این پژوهش، برای مدل‌سازی و پیش‌بینی کلاس‌های جهت باد، در دو مرحله از روش جنگل تصادفی بهره گرفته شد. به‌منظور تعیین جهت‌های غالب باد حدی، یک طبقه‌بندی با سه گروه اصلی انجام شد. گروه‌های طبقه‌بندی به‌صورت جهت غالب اول، دوم و سایر جهت‌ها بوده است. در مرحله نهایی تحلیل نتایج، پس از تخمین دوره بازگشت سرعت‌های باد حدی از طریق مدل SMEV، جهت‌های باد متناظر با این سرعت‌ها با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی کلاس‌بندی و پیش‌بینی شد. تمام کدهای لازم برای مدل‌سازی کل پژوهش در برنامه‌های Python و R انجام شده است. در رفع خطاهای جزئی در فرآیند اجرای کدهای مدل SMEV از ChatGPT به‌عنوان دستیار استفاده شده است. کلیات کدها از روی روابط و مراحل روش مورد استفاده در پژوهش، بدون استفاده از ChatGPT و با زبان‌های برنامه‌نویسی Python کتابخانه‌های (Scikit-learn, Scipy, Numpy) و R پکیج‌های (evd, extRemes) نوشته شده است. مراحل کلی بخش مواد و روش‌های پژوهش به‌صورت فلوچارت نمایش داده شده است که تصویر بهتری از فرآیند پژوهش ارائه می‌کند (شکل ۳).

در این روابط، k تعداد پارامترهای تخمینی است و L حداکثر مقدار احتمال و n حجم نمونه است. رابطه ۱۸ به‌صورت کامل قسمت دوم معادلات را توضیح می‌دهد:

$$\log(L) = \log(f(x_i)) \sum_{i=1}^n x_i \quad (18)$$

که در آن $f(x_i)$ تابع چگالی احتمال برازش شده در مشاهده x_i است. بین ماکزیمم‌های برآورد شده و مشاهده شده برای اندازه نمونه کالیبراسیون خاص (S) و دوره بازگشت (T) رویکرد مونت کارلو امکان ساخت توزیع فرکانس کامل خطای غیر بعدی را فراهم می‌کند. سپس خطای استاندارد کسری (FSE) بر روی تمام درک‌های مونت کارلو از خطای غیر بعدی محاسبه می‌شود که به‌صورت رابطه‌های ۱۹ و ۲۰ ارائه شده است (Marra and Morin, 2015).

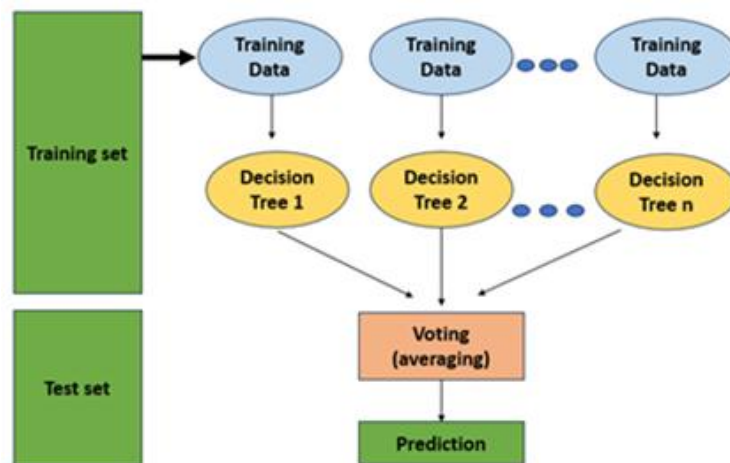
$$FSE(S, T) = \frac{1}{N_r} \left[\sum_{j=1}^{N_r} \varepsilon_j(S, T)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

$$WFSE(S, T) = \frac{1}{N_r} w_i \left[\sum_{j=1}^{N_r} \varepsilon_j(S, T)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

در شاخص LOO، برای یک مجموعه‌ی داده با n نمونه، مدل n بار آموزش داده می‌شود. هر بار، یکی از نمونه‌ها کنار گذاشته می‌شود و مدل با $n-1$ نمونه آموزش می‌بیند، سپس روی آن نمونه کنار گذاشته‌شده آزمون می‌شود. میانگین خطای پیش‌بینی روی همه نمونه‌ها، معیار عملکرد مدل است (Vehtari et al, 2017)، این معیار در رابطه ۲۱ ارائه شده است. این فرمول نشان می‌دهد که برای هر نمونه i ، مقدار پیش‌بینی شده با حذف آن نمونه از آموزش $\hat{y}_{-i}$ از مقدار واقعی y_i کم شده، سپس مربع خطا گرفته شده و میانگین کل آن‌ها به‌دست می‌آید.

$$LOO = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{-i})^2 \quad (21)$$

¹ Random Forest



شکل ۲- ساختار کلی الگوریتم جنگل تصادفی

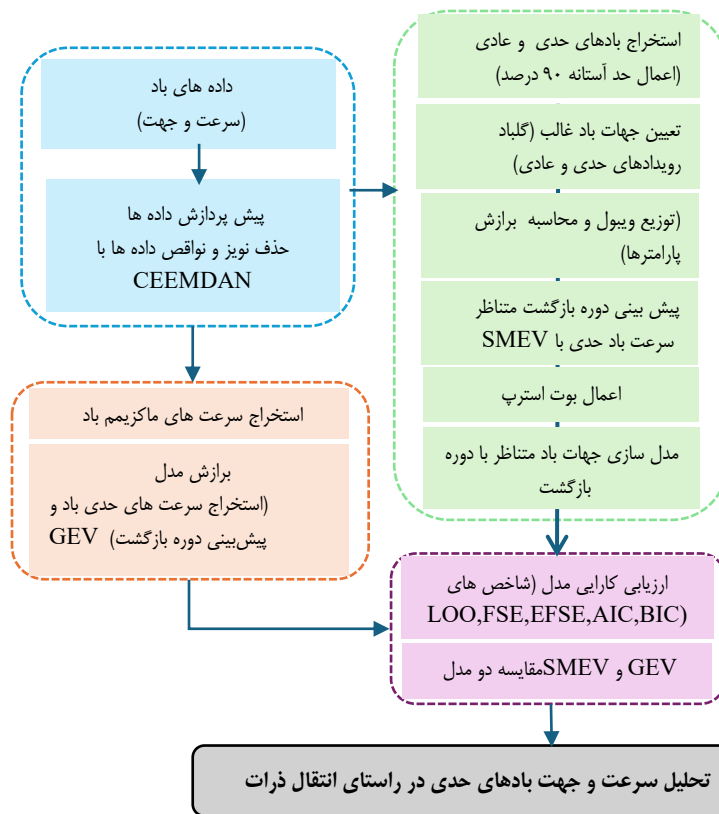
Figure 2- Random forest algorithm

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محاسبه حد آستانه رویدادهای حدی باد

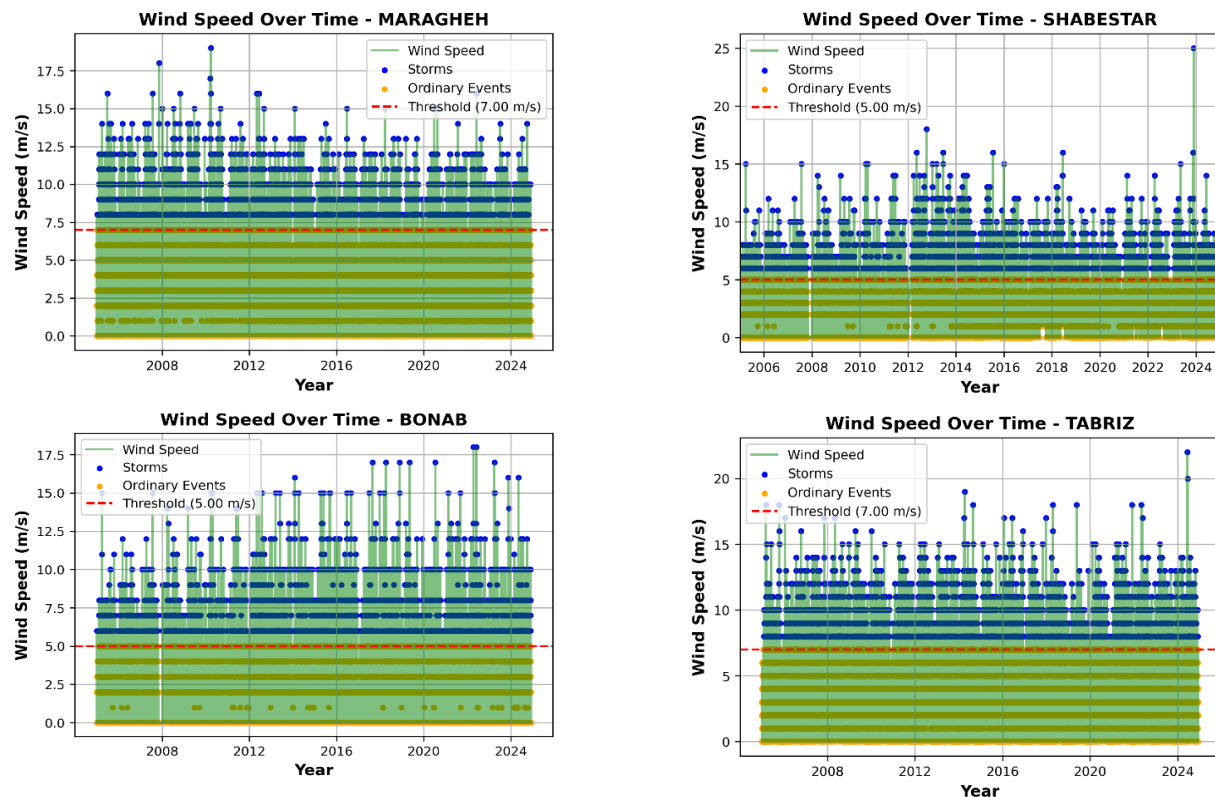
نمودارهای حد آستانه برای جداسازی رویدادهای عادی و طوفانی به فاصله زمانی ۲۴ ساعت به منظور حفظ استقلال وقایع در نظر گرفته شده است. در نمودارهای مرتبط با ایستگاههای منتخب در شکل ۴، روند تغییرات سرعت باد طی بازه زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴) با نقاط نارنجی برای رویدادهای عادی و رویدادهای حدی با نقاط آبی در بالای خط آستانه مشخص شده‌اند. نتایج شکل ۴، نشان می‌دهد بیشترین حجم داده‌ها در زیر خط آستانه قرار گرفته‌اند و این تحلیل دلیلی بر تعیین درست حد آستانه برای رویدادهای حدی است. پراکندگی بادهای حدی که به عنوان رویداد طوفانی در این پژوهش ذکر شده است، به صورت پراکنده و نسبتاً یکنواخت در طول سال‌های آماری بوده است. در برخی از سال‌ها مانند ۲۰۱۵ و ۲۰۲۰ و ۲۰۲۴ تعداد و شدت طوفان‌ها افزایش داشته و در برخی مناطق نظیر ایستگاه تبریز به بالاتر از ۱۸ متر بر ثانیه نیز رسیده است. با توجه به دسته‌بندی صورت گرفته و جداسازی طوفان‌های حدی، طبق یافته‌های (Mobarak Hassan et al. (2023 در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، سرعت‌های باد بیش از ۶ متر بر ثانیه را برای آغاز فرآیند طوفان گرد و غبار در ایستگاه‌های شرق و غرب دریاچه به خصوص تبریز متناسب دانسته، می‌توان گفت این سرعت‌ها عاملی برای ایجاد پدیده گرد و غبار و انتقال ذرات در شرق دریاچه می‌باشد. هم‌چنین (Ghomashi and Khalesifard. (2020 با بررسی پدیده گرد و غبار در حوزه دریاچه ارومیه این محدوده سرعت باد را برای انتقال

این نوع از ذرات را کافی دانسته‌اند. نتایج اعمال حد آستانه برای محدوده سرعت باد در ایستگاه‌های منتخب شرق دریاچه ارومیه، سرعت بالای ۵ متر بر ثانیه برای ایستگاه‌های شبستر و بناب، و بادهای بالای ۷ متر بر ثانیه در ایستگاه‌های تبریز و مراغه را نشان داده است. براساس یافته‌های (Sattari and Allahverdipour. (2024 از لحاظ آماری و شرایط منطقه‌ای سرعت‌های ۱۱ متر بر ثانیه و بیش‌تر از این سرعت برای سرعت‌های آستانه انتقال ذرات، در شرق دریاچه ارومیه، ارائه شده‌اند. در همین راستا نتایج شکل ۴ برای ۱۰ درصد مقادیر کل داده‌های باد که به صورت رویدادهای حدی تفکیک شده‌اند و سرعت‌های بالای ۵ متر بر ثانیه را برای تمام ایستگاه‌ها نشان داده است نتیجه‌ای منطقی برای شروع فرآیند طوفان گرد و غبار می‌باشد. و در تکمیل این یافته‌ها برای تحلیل بهتر رفتار باد در منطقه شرق دریاچه ارومیه باید گفت اغلب رویدادهای باد در منطقه به صورت رخدادهای پایین خط آستانه و عادی طبقه‌بندی شده‌اند. اما وجود مقادیر ۲۵ متر بر ثانیه در برخی روزها برای ایستگاه‌های تبریز و شبستر در سال ۲۰۲۴، خود گواه بر اهمیت تفکیک رویدادهای حدی و عادی در فواصل ۲۴ ساعته برای پیش‌بینی دقیق‌تر پدیده طوفان می‌باشد. یکی از دلایل کاهش پراکندگی بادهای حدی انتخاب صدک ۹۰ می‌باشد که در عین حال باعث جداسازی رویدادها با دقت بالا شده است. این رویکرد طبق شرایط اقلیمی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، پیش‌بینی پدیده طوفان در بسترهای خشک دریاچه ارومیه را با دقت بالاتری فراهم می‌کند.



شکل ۳- فلوچارت مراحل انجام تحقیق

Figure 3- Flowchart of the research methodology



شکل ۴- نمودار حد آستانه ۹۰ درصد، تفکیک رویدادهای حدی و عادی

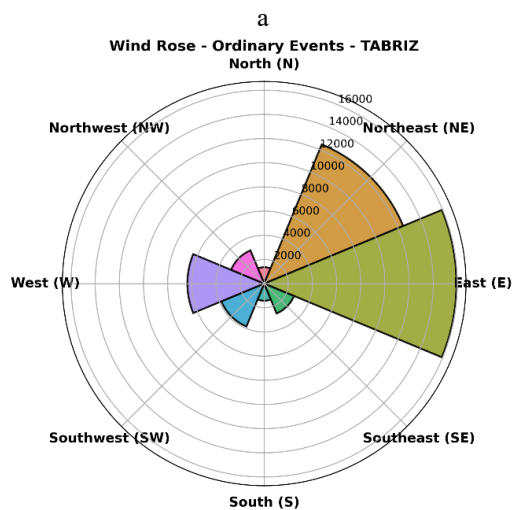
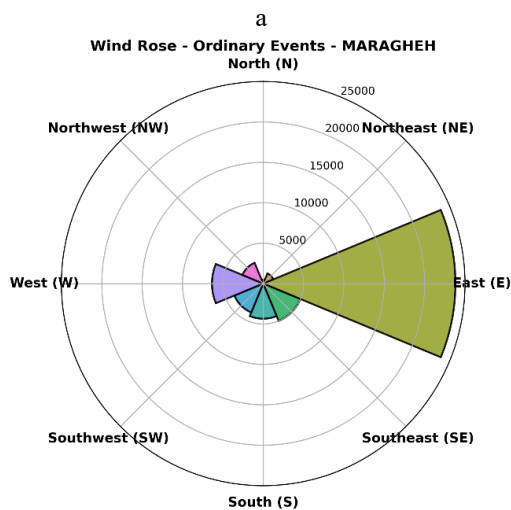
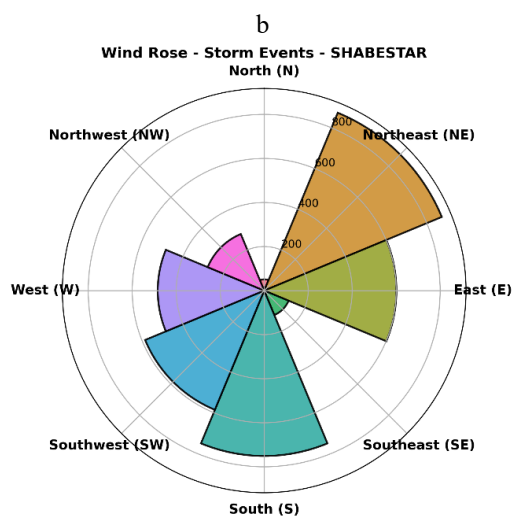
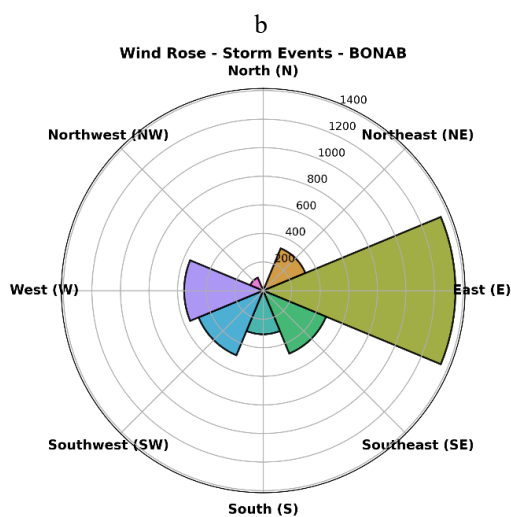
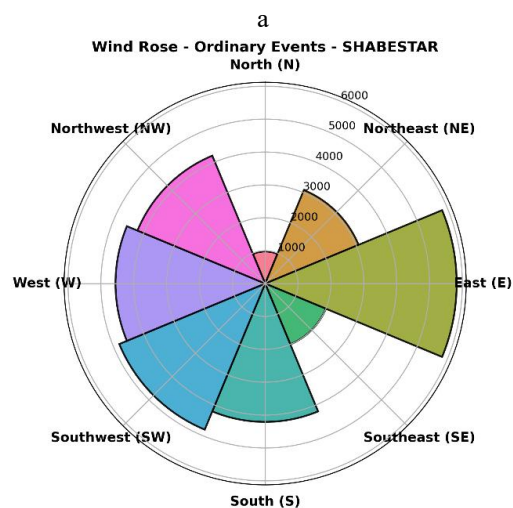
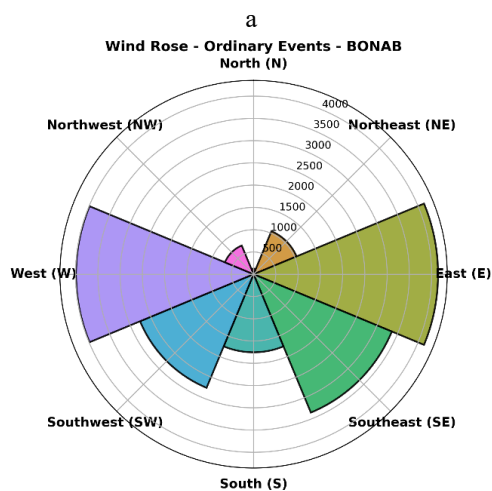
Figure 4. Peak-over-threshold plot at the 90th percentile threshold, distinguishing between extreme and ordinary events

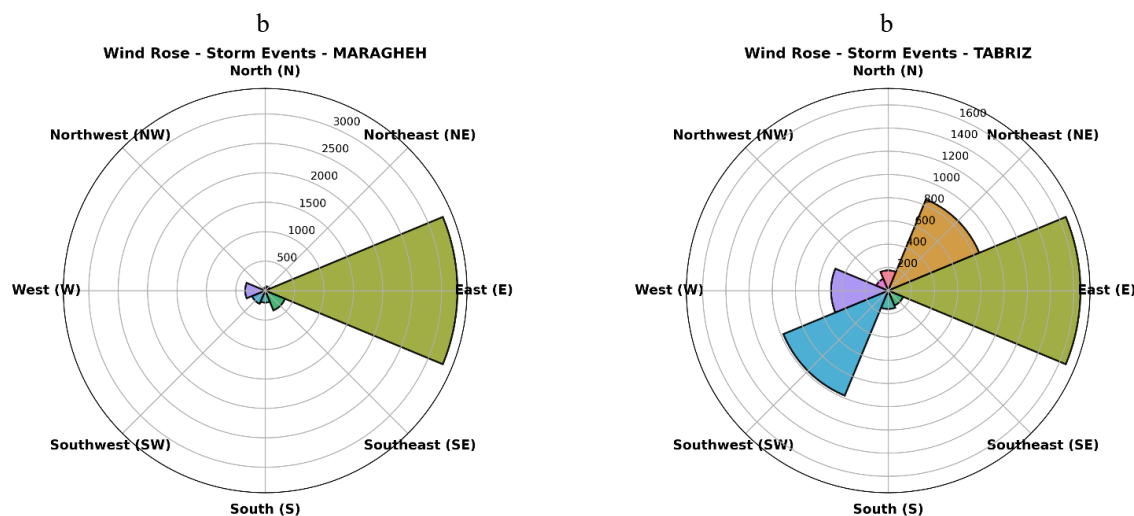
۳-۲- توزیع و تحلیل جهات غالب باد برای رویدادهای عادی و حدی

جهات باد متناظر با سرعت باد برای ایستگاههای منتخب شرق دریاچه ارومیه برای رویدادهای عادی و حدی به طور جداگانه تحلیل و توسط نمودارهای گلباد نمایش داده شده است (شکل ۵). در شکل ۵ با توجه به سرعت باد و پراکندگی بادهای ثبت شده گلبادها ترسیم شده است. در شکل های (a) و (b) نمایش جهات باد و تعداد تکرار رخداد در گلبادهای مختص به جهات غالب رویدادهای عادی و طوفانی ارائه شده است. به دلیل اهمیت جهت باد در انتقال ذرات و بروز پدیده طوفان به تحلیل منحصربه فرد ایستگاههای منتخب پرداخته می شود. برای ایستگاه بناب، در حالت کلی جهت باد غالب سمت شرق دیده می شود که در این جهت پراکندگی سرعت های باد بیش از ۵ متر بر ثانیه قابل توجه است اما سرعت های پایین باد درصد پراکندگی بالاتری دارند. برای تحلیل گلبادهای تفکیک شده رویدادهای عادی و حدی جهات غالب شرق و غرب دیده می شود با این تفاوت که در رویدادهای حدی که بادهای بالای ۵ متر بر ثانیه را شامل می شوند جهت اول از لحاظ تعداد تکرار رویداد شرق و سپس غرب تحلیل می شود. در تحلیل کلی جهت غالب ایستگاه مراغه شرق و بیشترین درصد فراوانی برای مقادیر بین ۴ تا ۱۰ متر بر ثانیه ثبت شده است. در تحلیل گلباد رویدادهای تفکیک شده حدی و عادی از لحاظ تعداد وقوع رویداد جهات غالب اول و دوم به ترتیب شرق و غرب بوده است که برای رویدادهای حدی بادهای با سرعت بیش از ۷ متر بر ثانیه را شامل می شود. در ایستگاه تبریز جهت باد غالب برای کل رویدادهای باد حدی و عادی سمت شرق بوده است. اما در مورد ایستگاه تبریز نکته مهم در مورد رویدادهای حدی می باشد. در گلباد رویداد حدی فراوانی وقوع بادهای ۷ و بیش تر از ۷ متر بر ثانیه در سمت شرق و دومین جهت غالب جنوب غربی بوده است. این نتیجه اهمیت تفکیک رویدادهای حدی و عادی و اهمیت وجود تعداد تکرار در این تفکیک می باشد. در ایستگاه شبستر رویدادهای عادی با سرعت زیر ۵ متر بر ثانیه دارای گلباد با جهت غالب شرق از لحاظ تعداد وقوع بیش تر و جهت دوم جنوب غربی می باشد. در حالی که، گلباد رویدادهای حدی در ایستگاه شبستر با تغییر جهت برای بادهای بالای ۵ متر بر ثانیه جهت غالب شمال شرقی و جهت غالب دوم جنوب را نمایش می دهد. در راستای

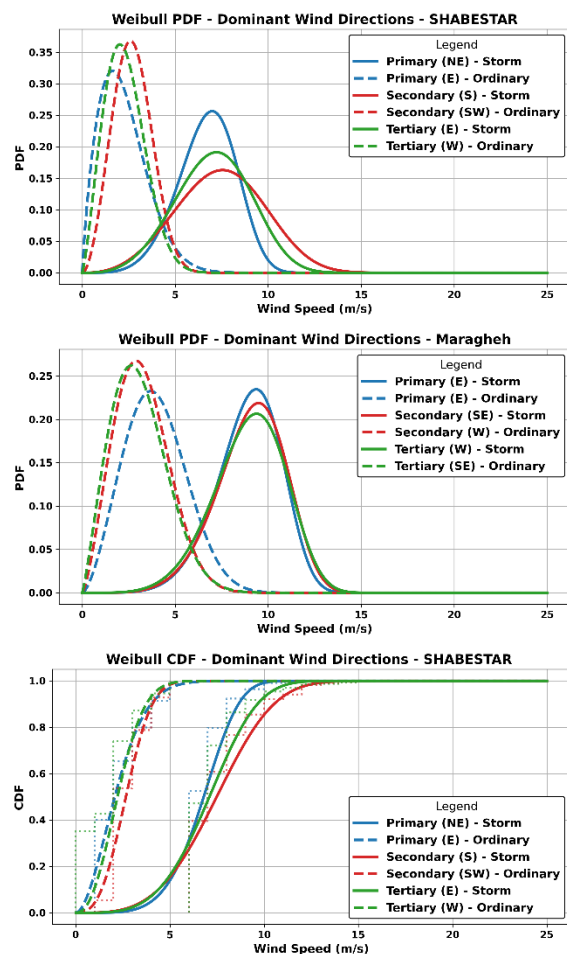
این یافته، تغییر جهت غالب باد برای رویدادهای حدی و عادی یک دلیل دیگر برای نشان دادن اهمیت تفکیک رویدادها و تفسیر جداگانه آنها می باشد. برای تحلیل کلی جهت باد غالب برای وقایع حدی در سه ایستگاه مراغه، بناب و تبریز باید گفت در رسم گلبادهای رویدادهای حدی بادهای بالای خط آستانه باتوجه به تعداد وقوع و تکرارپذیری مورد استفاده قرار گرفته اند، و می توان گفت شدت و سرعت باد در جهات غالب اول و دوم یکسان است فقط در میزان تعداد وقوع تفاوت وجود دارد. دلیل ذکر این توضیح اهمیت جهت غالب دوم در این ایستگاهها با توجه به موقعیت جغرافیایی آنها نسبت به دریاچه ارومیه و بستر خشک شده بخش شرقی این دریاچه می باشد. زمانی که بادهای حدی با سرعت بالای ۷ متر بر ثانیه در جهت غالب جنوب غربی در ایستگاه تبریز رخ می دهند، با توجه به موقعیت جغرافیایی این ایستگاه در شرق دریاچه ارومیه این بادهای پتانسیل قابل توجهی برای انتقال ذرات از بستر خشک دریاچه به سمت شرق دارند. در ایستگاه شبستر که در محور شمال و شمال شرقی دریاچه ارومیه قرار دارد جهت غالب جنوب می تواند نشان دهنده اهمیت وجود رویدادهای حدی با سرعت بالای ۵ متر بر ثانیه در این جهت برای انتقال ذرات از سمت دریاچه به سمت شرق این دریاچه باشد. در ایستگاههای مراغه و بناب که هردو در بخش جنوب شرقی دریاچه قرار دارند، وجود جهت غالب غرب برای رویدادهای حدی با سرعت های بیش از ۷ و ۵ متر بر ثانیه اثبات نقش این بادهای در انتقال ذرات معلق به سمت شرق می باشد. در راستای نتایج گلبادها، یافته های مطالعه Delfi et al. (2019)، از طریق تصاویر ماهواره ای و روش HYSPLIT که انتشار ذرات در شرق دریاچه ارومیه را مدل سازی کرده است، سرعت های ۵ متر بر ثانیه و بیش تر با توجه خاص به شرایط جغرافیایی منطقه قابلیت انتقال ذرات به سمت مناطق مسکونی شرق دریاچه را دارا هستند. همچنین طبق نتایج پژوهش Biabani et al. (2019) پس از خشک شدن دریاچه ارومیه و تغییرات اقلیمی سرعت های باد افزایش داشته است و حد متوسط سرعت ۵ متر بر ثانیه به خصوص در ایستگاه های شرق دریاچه که دارای سرعت باد بالاتر از ۷ متر بر ثانیه هستند در این حوضه قابلیت انتقال ذرات را از سمت دریاچه را دارند. در نتیجه رویدادهای حدی با جهتهای غالب ارائه شده در نتایج می توانند، پتانسیل انتقال ذرات و افزایش ریسک پدیده گرد و غبار در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه را دارا باشند. بر اساس این تحلیل جهتهای غالب باد برای رویدادهای طوفانی، شناسایی و در مرحله بعد با کمک روش جنگل تصادفی به سه کلاس اصلی با ترتیب اولین جهت باد غالب، دومین جهت غالب و سایر جهتها برای

رویدادهای حدی طبقه‌بندی شد. این طبقه‌بندی در بخش پیش‌بینی جهت بادهای حدی متناظر با دوره بازگشت به کار گرفته می‌شوند.





شکل ۵- رویدادهای عادی (a)، رویدادهای حدی (b)، طی دوره آماری (۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴) برای ایستگاه‌های منتخب شرق دریاچه ارومیه
Figure 5- (a) Ordinary and (b) extreme events during the statistical period (2005–2024) for the selected stations in the eastern Urmia Lake basin



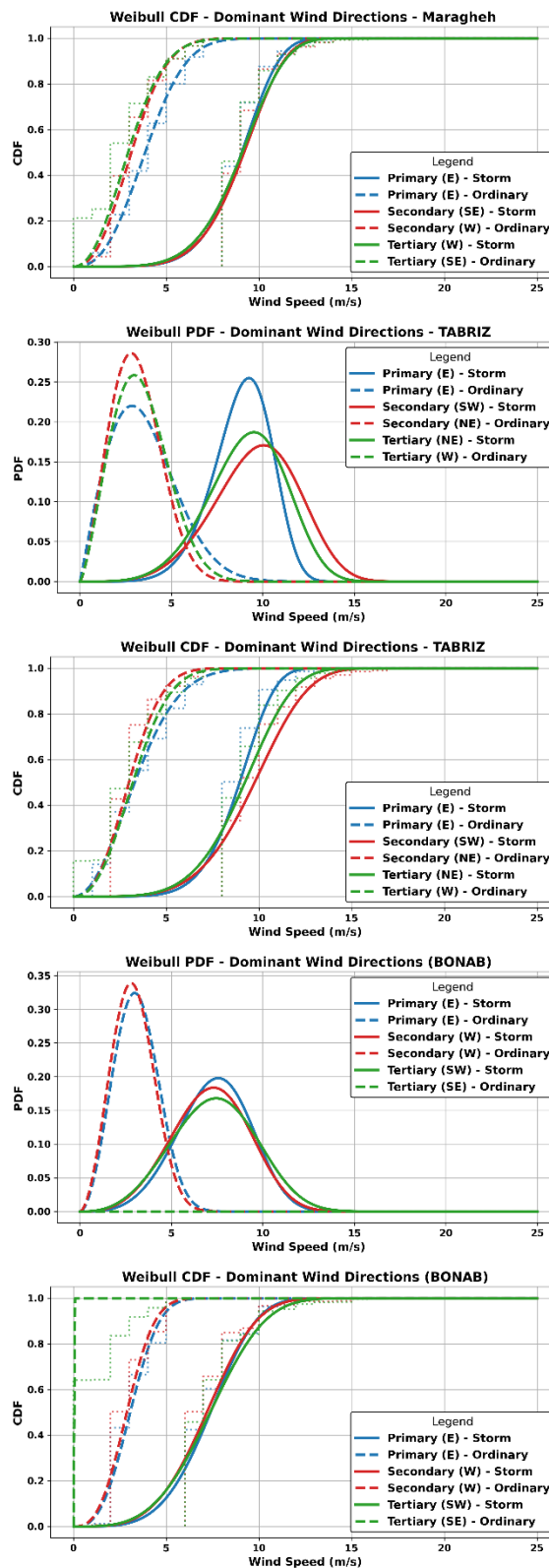
۳-۳- برازش توزیع ویبول برای داده‌های باد و تحلیل توابع توزیع تجمعی براساس جهات باد

به‌منظور تحلیل آماری جهت‌های باد متناظر با سرعت‌های حدی و عادی باد برای ایستگاه‌های منتخب از توزیع آماری ویبول استفاده شد. تابع چگالی احتمال و تابع تجمعی توزیع ویبول با روش بیشینه درستنمایی بر روی ۸ جهت باد برازش داده شد (شکل ۶). این اقدام امکان تحلیل الگوی تغییرات باد در جهات مختلف را در دسترس قرار می‌دهد. شکل کلی توزیع‌ها نشان‌دهنده برازش مناسب مدل ویبول بر روی داده‌های باد تمام ایستگاه‌ها می‌باشد. این نتیجه طبق شیب منحنی‌ها بیان شده است که دارای شیب تند بوده‌اند (Chen et al., 2025). با توجه به کشیدگی بیش‌تر منحنی‌های چگالی به سمت سرعت‌های بالاتر، در جهات خاص مانند جنوب و جنوب‌غربی می‌توان نتیجه‌گیری کرد در جهات غالب به سمت سرعت‌های بین ۳ تا ۸ متر بر ثانیه کشش داشته و احتمال وقوع در این جهات بیش‌تر است. طبق این یافته، تحلیل مجزای رفتار باد به دو بخش رویدادهای عادی و طوفانی می‌تواند در پیش‌بینی پدیده گرد و غبار در شرق دریاچه ارومیه اهمیت داشته باشد. طبق شکل ۶ تابع توزیع چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی ویبول با توجه به شکل توزیع به درستی توزیع سرعت‌های حدی و عادی باد را نشان داده است. اما برای ایستگاه بناب باید خاطر نشان کرد سایر جهات غالب باد دارای پراکندگی و داده کمی بوده است و این امر دلیل وجود مقادیر صفر در شکل است. دو جهت غالب اول و دوم دارای پراکندگی بهتری هستند.

Figure 6- Probability density function (PDF) and cumulative distribution function (CDF) of the Weibull distribution fitted to wind speed data.

۳-۴- مدل سازی دوره بازگشت سرعت های حدی باد با مدل SMEV

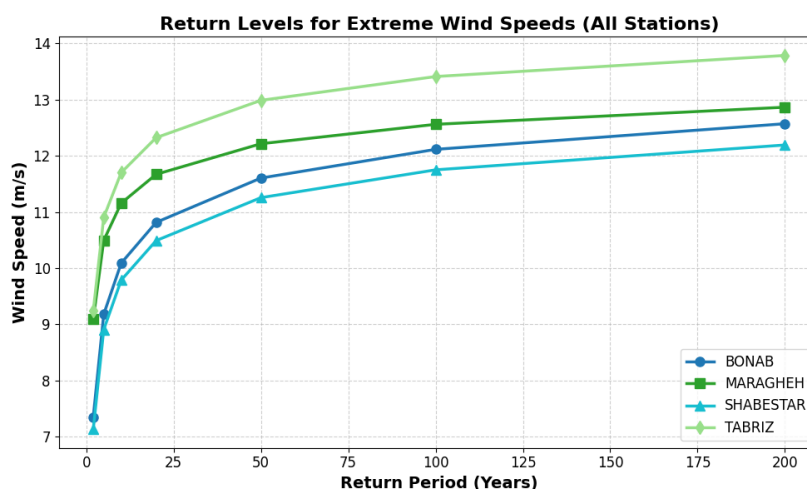
در این پژوهش به منظور برآورد سرعت باد در دوره های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله از مدل SMEV استفاده شد. برتری این روش نسبت به سایر روش های کلاسیک در تفکیک رویدادهای حدی و عادی و همچنین تفکیک رویدادهای حدی با جهات غالب متناظر سرعت های حدی باد می باشد. افزون بر این، استفاده از حد آستانه سرعت باد، بر خلاف سایر روش های آماری مانند GEV که در تحلیل رویدادهای حدی فقط بر روی سرعت های ماکزیمم باد تمرکز دارند، می تواند دقت قابل اتکای این روش در تخمین رویدادهای حدی باشد. دوره بازگشت ها با استفاده از روش SMEV برای ۴ ایستگاه منتخب شرق دریاچه ارومیه محاسبه شد. نتایج حاکی از روند افزایشی نرخ سرعت باد در تمام ایستگاه ها بوده است. اگرچه این روند با طولانی تر شدن دوره بازگشت آهسته بوده است، اما در شکل ۷، روند ملایم افزایش به وضوح دیده می شود. برای بهبود دقت و اطمینان در پیش بینی دوره بازگشت، روش بوت استرپ با ۱۰۰۰ بار تکرار و بازه های اطمینان ۹۰ درصد محاسبه شد. می توان طبق نتایج بوت استرپ که برای دوره های بازگشت کوتاه دارای انحراف معیار ۰/۳۶ و بلندتر ۰/۴۴ متر بر ثانیه و نسبت میانگین بر انحراف معیار ۳/۳ و ۵/۷ درصد بوده است بیان کرد که حتی در دوره بازگشت های بلند مدت نیز روش SMEV برای پیش بینی سرعت باد متناظر دارای پایداری نسبی بالایی می باشد. نتایج نشان می دهد برای ایستگاه تبریز سرعت باد از ۹ متر بر ثانیه برای دوره بازگشت ۲ سال شروع و با روند افزایشی در دوره ۲۰ ساله به محدوده ۱۴ متر بر ثانیه رسیده است. در ایستگاه مراغه هم از محدوده مشابهی آغاز و با ۱۳ متر بر ثانیه در دوره بازگشت ۲۰۰ سال خاتمه یافته است. این نشان از روند آهسته افزایش در این ایستگاه می باشد. نتایج پیش بینی سرعت باد در ایستگاه های شبستر و بناب برای دوره های بازگشت یکسان با تبریز و مراغه از سرعت های ۷ شروع تا ۱۳ متر بر ثانیه افزایش داشته است. روند پیوسته و آهسته افزایش سرعت بادهای پیش بینی شده برای دوره بازگشت های طولانی مدت در تمام ایستگاه ها، وقوع پدیده های حدی در شرق دریاچه ارومیه را نشان می دهد. این سرعت های باد برای انتقال ذرات در محدوده قابل قبولی هستند. زیرا طبق یافته های مطالعات (Raei et al, 2020; Allahverdipour and Sattari,)



شکل ۶- تابع توزیع احتمالاتی و تابع توزیع تجمعی توزیع ویبول برای داده های سرعت باد

کانون‌های انتقال ذرات شناسایی کرده‌اند. و در یافته‌های خود قابلیت سرعت‌های باد بالای ۶ متر بر ثانیه را برای آغاز فرآیند انتقال ذرات در محدوده حوزه آبخیز دریاچه ارومیه کافی دانسته و این بادهای ثبت شده را یکی از عوامل اصلی در وقوع پدیده طوفان گرد و غبار شناسایی کرده‌اند. براین اساس نتایج مدل SMEV در پیش‌بینی سرعت باد متناظر با دوره بازگشت طبق تطابق با یافته‌های پیشین برای مطالعات مخاطرات طبیعی قابل اتکا می‌باشد.

(2024) در زمینه فرسایش بادی و انتقال ذرات در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، بررسی رفتارهای باد، سرعت‌های بیش‌تر از ۸ متر بر ثانیه را برای ایستگاه‌های سینوپتیک شرق دریاچه ارومیه دارای پتانسیل ایجاد طوفان گرد و غبار بیان کرده‌اند. همچنین در تکمیل یافته‌های پیشین، پژوهش (Moradi and Rezazadeh 2020) بر روی ایستگاه‌های شرق و غرب دریاچه ارومیه با اعمال حد آستانه ۶ متر بر ثانیه برای تمامی ایستگاه‌ها با تحلیل گلبادهای ذرات معلق و شن، ایستگاه‌های شرق دریاچه مانند تبریز، مراغه و بناب را به‌عنوان



شکل ۷- نمودارهای سرعت‌های باد پیش‌بینی شده متناظر با دوره بازگشت ایستگاه‌های منتخب شرق دریاچه ارومیه با روش SMEV

Figure 7- Predicted wind speed plots corresponding to return periods at the selected stations in the eastern Urmia Lake basin using the SMEV method

برای ایستگاه‌های تبریز و مراغه جهت غالب به سمت شرق تغییر پیدا می‌کند. درصد احتمال وقوع بادهای حدی در دوره بازگشت‌های کوتاه مدت به‌خصوص در ایستگاه مراغه بیش از ۷۰ درصد محاسبه شده است. طبق یافته‌های مدل، انتشار ذرات معلق به سمت شرق و جنوب شرقی دریاچه ارومیه محتمل‌تر است. نتایج مطالعه (Bayati Khatibi and Sari Sarraf 2024) بر روی ایستگاه‌های شرق دریاچه ارومیه توسط تصاویر ماهواره‌ای، گواهِ بر گسترش دامنه ذرات به سمت جنوب شرقی دریاچه و بروز طوفان‌های گرد و غبار در این منطقه بوده است. براین اساس تطبیق نتایج مدل آماری و تصاویر ماهواره‌ای پژوهش پیشین، صحت تخمین‌های جهت غالب باد با استفاده از روش ترکیبی جنگل تصادفی و SMEV در این پژوهش را نشان می‌دهد.

۳-۵- تخمین جهت باد متناظر سرعت‌های رویدادهای حدی با دوره بازگشت

با استفاده از روش جنگل تصادفی برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰، جهت‌های باد متناظر با سرعت‌های پیش‌بینی شده توسط مدل SMEV مدل‌سازی و محاسبه شد. روش جنگل تصادفی به‌دلیل قابلیت تخمین و طبقه‌بندی داده‌های هواشناسی در این پژوهش استفاده شد. در جدول ۲، جهت‌های باد متناظر برای ایستگاه‌های منتخب شرق دریاچه ارومیه ارائه شده است. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که جهت‌های غالب برای رویدادهای حدی طوفان، برای دوره‌های بازگشت کوتاه‌مدت تا میانی، جنوب‌غرب و جنوب می‌باشد. در بازه‌های بلند مدت‌تر در ایستگاه‌های شبستر و مراغه غالبیت جنوب و غرب ادامه داشته و

جدول ۲- جهت باد متناظر با سرعت بادهای پیش‌بینی شده برای دوره بازگشت‌های مشخص با SMEV برای ایستگاه‌های منتخب

Table 2- Wind directions corresponding to SMEV-predicted wind speeds for specified return periods at the selected stations

Wind directions corresponding to (year) and Probability						
200	100	50	20	10	5	2
Southwest	East	East	East	Southwest	East	Southwest
						Tabriz

26.86	31.71	31.71	37.61	37.61	40.45	44.54	
East	East	East	East	Southwest	Southwest	Southwest	Maragheh
63.76	63.76	70.23	70.23	70.88	72.51	77.62	
South	South	Southwest	South	South	South	South	Shabestar
47.89	47.89	35.68	36.35	36.35	36.44	30.14	
East	West	west	west	west	west	Southwest	Bonab
34.7	35.23	35.23	42.05	40.04	40.71	37.2	

شاخص LOO مقادیری اندک بالاتر برای SMEV نشان داده است که حاکی از حساسیت بیش‌تر مدل SMEV نسبت به رویدادهای عادی به‌دلیل تفکیک و بهره‌گیری از رویدادهای حدی و عادی می‌باشد. در مقابل مدل GEV به‌دلیل استفاده از داده‌های ماکزیمم سالانه حساسیت کم‌تری دارد و می‌تواند نشانه بیش‌برازش مدل بر روی داده‌ها و پایداری کم‌تر بر روی داده‌های واقعی باشد. با این حال مقادیر $0.14/0$ و $0.17/0$ ، برای خطای شاخص‌های FSE و WFSE در مدل SMEV به‌طور قابل‌توجهی کم‌تر بوده است و دلیلی بر قابلیت بالای این مدل نسبت به GEV در تخمین دوره بازگشت رویدادهای حدی باد می‌باشد. براین اساس برتری مدل SMEV، در پیش‌بینی مقادیر نزدیک به مقادیر واقعی نسبت به مدل GEV مشخص می‌شود. مقادیر AIC و BIC برای روش SMEV نسبت به مدل GEV بالاتر محاسبه شده است، مثلاً در ایستگاه تبریز AIC برای SMEV برابر $10518/83$ و برای GEV برابر $80/835$ است. این نتایج ناشی از برازش مدل SMEV بر روی محدوده نمونه وسیع‌تر در نتیجه تعداد داده‌ی باد بیش‌تر نسبت به GEV می‌باشد که فقط بر روی داده‌های ماکزیمم برازش داده شده است. در کل نتایج ارزیابی مدل‌ها حاکی از دقت و پایداری بالا و همچنین قابل اعتماد بودن مدل SMEV در مدل‌سازی واقع بینانه‌تر رویدادهای حدی باد می‌باشد. طبق مقادیر کم‌تر خطای این مدل می‌تواند گزینه مناسبی برای تحلیل مخاطرات محیطی و پیش‌بینی ریسک‌های طوفان باشد.

۳-۶- اجرای مدل GEV و ارزیابی عملکرد مدل SMEV در

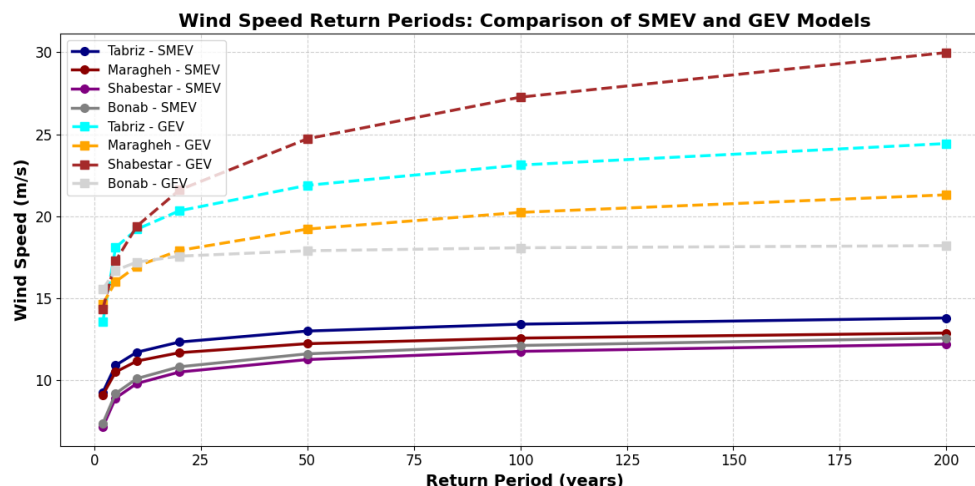
مقایسه با مدل GEV در محاسبه دوره بازگشت سرعت باد

به‌منظور ارزیابی رویکرد SMEV و نمایش کارایی بهتر مدل در این پژوهش نتایج این مدل با یکی از مدل‌های کلاسیک ارزیابی رویدادهای حدی مقایسه شد. توزیع مقادیر حدی تعمیم‌یافته (GEV) به‌عنوان مدل کلاسیک در این پژوهش برای مدل‌سازی سرعت‌های حدی باد به‌کار گرفته شد، زیرا به‌طور مؤثر رفتار حداکثرها را در مجموعه داده‌های محیطی ثبت می‌کند و در مطالعات اقلیمی متعدد اعتبارسنجی شده است (Coles et al, 2001; Vieira et al, 2023). هدف از این مقایسه بررسی قابلیت و مزیت‌ها و کاستی‌های مدل SMEV در ارزیابی و پیش‌بینی رویدادهای حدی باد می‌باشد. دوره بازگشت سرعت باد با استفاده از مدل کلاسیک توزیع ارزش افراطی محاسبه شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است مدل GEV به‌طور کلی سرعت‌های بالاتری را نسبت به مدل SMEV پیش‌بینی کرده است (شکل ۸). این امر به‌خصوص در ایستگاه تبریز و شبستر برای دوره‌های طولانی مدت با سرعت‌های ۲۴ و ۳۰ متر بر ثانیه تفاوت فاحشی با سرعت‌های ۱۳ و ۱۲ متر بر ثانیه مدل SMEV دارد. این تفاوت به‌دلیل استفاده مدل GEV از تمام داده‌های ماکزیمم به‌عنوان رویدادهای حدی می‌باشد، در حالی که SMEV برای استفاده از داده‌ها به حد آستانه و جهات غالب باد توجه کرده است. در جدول ۳، برای ارزیابی کمی عملکرد هر دو مدل، شاخص‌های آماری مختلف شامل LOO^۸، FSE^۹ و WFSE^{۱۰} و AIC و BIC بر روی نتایج آن‌ها محاسبه شد.

¹⁰ Weighted Forecast Standard Error

⁸ Leave-One-Out cross-validation error

⁹ Forecast Standard Error



شکل ۸- مقایسه سرعت‌های باد پیش‌بینی شده متناظر دوره بازگشت با مدل‌های SMEV و GEV برای ایستگاه‌های شرق دریاچه ارومیه
Figure 8- Comparison of return-period wind speeds predicted by the SMEV and GEV models for stations in the eastern Urmia Lake basin

جدول ۳- شاخص‌های ارزیابی عملکرد برای دو روش SMEV و GEV

Table 3- Performance evaluation metrics for the SMEV and GEV methods

	LOO-SMEV	LOO-GEV	FSE-SMEV	FSE-GEV	WFSE-SMEV	WFSE-GEV	AIC_SMEV	AIC_GEV	BIC_SMEV	BIC_GEV
Tabriz	-0.821	-1.45	0.014	0.081	23.38	196.40	10518.83	80.835	10530.18	83.823
Maragheh	-0.825	-1.28	0.014	0.077	24.22	185.23	13318.56	75.603	1330.95	78.59
Shabestar	-0.807	-1.13	0.017	0.071	17.13	108.87	5937.95	70.629	5948.53	72.32
Bonab	-0.841	-1.89	0.014	0.082	18.09	152.07	7675.78	75.29	7685.97	78.27

کنند. همچنین این رویکرد می‌تواند به دانشگاه‌ها کنار سایر ابزارها برای شناسایی مناطق پرخطر مستعد انتقال گرد و غبار ناشی از بستر خشک دریاچه ارومیه کمک کند. در مجموع، این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در تحلیل خطرات اقلیمی مرتبط با طوفان‌های بادی و گرد و غبار در منطقه به‌کار گرفته شود. اما باید به چندین محدودیت در مورد این رویکرد توجه داشت. این مدل صرفاً بر سرعت و جهت باد متکی است، و به سایر محرک‌های محیطی مانند رطوبت خاک، پوشش زمین، پوشش گیاهی یا زبری سطح را که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر پتانسیل انتشار گرد و غبار تأثیر بگذارد، توجهی نکرده است. علاوه بر این، استفاده از آستانه صدک نودم و معیارهای جداسازی ۲۴ ساعته، فرضیات آماری را مطرح می‌کند که ممکن است رویدادهای حدی بیش‌تری شناسایی شده باشند که به دقت مدل افزوده است و از طرف دیگر حساسیت مدل نسبت به پدیده‌های حدی را محسوس‌تر کرده است. با این حال، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، برای بهبود مدل SMEV ادغام متغیرهای محیطی مانند رطوبت نسبی و بارش مورد توجه قرار گیرد. همچنین ترکیب این مدل با مجموعه داده‌های باد مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند نمایش مکانی الگوهای باد را نیز بهبود بخشد.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با تمرکز بر تحلیل سرعت‌های حدی باد در شرق حوزه آبخیز دریاچه ارومیه، و به‌کارگیری مدل ساده شده فرآاماری مقادیر حدی، توانست تخمین‌های قابل‌اتکایی از بادهای شدید در بازه‌های بازگشت مختلف ارائه دهد. نتایج نشان داد که سرعت‌های بیش از ۷ متر بر ثانیه در این منطقه با احتمال بالایی رخ می‌دهند و این میزان برای آغاز انتقال ذرات معلق و شکل‌گیری طوفان‌های گرد و غبار در منطقه مورد مطالعه کافی است. همچنین، تحلیل جهت باد بیانگر احتمال بالای انتشار ذرات به سوی نواحی مسکونی در شرق دریاچه است. این نتایج به‌خصوص در دوره بازگشت‌های طولانی قابل‌توجه‌تر بوده است. مقایسه عملکرد مدل آماری ساده شده فرآاماری مقادیر حدی با مدل کلاسیک مقادیر حدی نشان داد که رویکرد جدید از دقت و پایداری بیش‌تری در پیش‌بینی سرعت‌های باد حدی برخوردار است و توسعه این روش بر روی داده‌های باد نتایج قابل‌قبولی ارائه کرده است. با توجه به این یافته‌ها تصمیم‌گیرندگان و سازمان‌هایی مانند محیط‌زیست و هواشناسی می‌توانند در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی کاهش ریسک، ادغام پیش‌بینی باد شدید در سیستم‌های هشدار اولیه به‌عنوان یک رویکرد پشتیبانی استفاده

سپاسگزاری

از گروه آب دانشکده کشاورزی دانشگاه ارومیه، مدیرگروه محترم جناب آقای دکتر محمد همتی، سازمان هواشناسی کشوری، جهت ارائه نامه و تاییده برای دسترسی به داده‌های هواشناسی کمال تشکر را داریم.

از ابزار ChatGPT برای اصلاح ساختار نوشتاری زبان مقاله و اصلاح خطاهای جزئی کدهای اجرایی مدل SMEV در محیط پایتون استفاده شده است.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

مشارکت نویسندگان

مریم واصف: مفهوم‌سازی، انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، نتایج، رسم نمودار و نقشه، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ کیوان خلیلی: راهنمایی، بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ مجید منتصری: مشاوره، بازبینی متن مقاله

منابع:

- الله‌پوردی پور، پویا و ستاری، محمدتقی (۱۴۰۳). بررسی سرعت و جهت باد بیشینه در ایستگاه‌های همدیدی شرق دریاچه ارومیه. جغرافیا و مخاطرات طبیعی، ۱۳(۴)، ۱۹۷-۲۲۱. doi: 10.22067/geoeh.2024.86654.1464
- بیابانی، لیلا، نظری سامانی، علی‌اکبر، خسروی، حسن و کاظم‌زاده، مجید (۱۳۹۸). بررسی روند تغییرات سرعت ماهانه باد در حاشیه دریاچه ارومیه طی ۳۰ سال گذشته. خشک بوم، ۱۹(۱)، ۱۳۹-۱۵۱. doi: 10.22067/geoeh.2024.86654.1464
- بیاتی خطیبی، مریم و ساری صراف، بهروز (۱۴۰۳). شناسایی کانون‌های در معرض خطر فرسایش بادی در جنوب شرق دریاچه ارومیه (مطالعه موردی: شهرستان‌های بناب و ملکان). doi: 10.22034/hyd.2024.60434.1728
- راعی، بیژن، احمدی، عباس، نیشابوری، محمدرضا، قربانی، محمدعلی و اسدزاده، فرخ (۲۰۲۰). تعیین فرسایش‌پذیری بادی در بخشی از اراضی شرق دریاچه ارومیه و بررسی ارتباط آن با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک. تحقیقات کاربردی خاک، ۸(۲)، ۸۲-۹۲.
- مرادی، محمد و رضازاده، پرویز (۱۳۹۹). بررسی توان حمل ماسه و نمک در اطراف دریاچه ارومیه. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۱(۴۱)، ۷۱-۸۹.
- نظری، محمدرضا و عباسی، مهدی (۱۴۰۰). بررسی پتانسیل انرژی باد در استان یزد با استفاده از توزیع ویبول. نشریه انرژی ایران، ۳۴(۳)، ۳۱-۱۷.

References

- Abadi, A. R. S., Hamzeh, N. H., Shukurov, K., Opp, C., & Dumka, U. C. (2022). Long-term investigation of aerosols in the Urmia Lake region in the Middle East by ground-based and satellite data in 2000–2021. *Remote Sensing*, 14(15), 3827. doi: 10.3390/rs14153827
- AghaKouchak, A., Norouzi, H., Madani, K., Mirchi, A., Azarderakhsh, M., Nazemi, A., Nasrollahi, N., Farahmand, A., Mehran, A., & Hasanzadeh, E. (2015). Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: call for action. *Journal of Great Lakes Research*, 41(1), 307–311. doi: 10.1016/j.jglr.2014.12.007
- Ahrari, A., Panchanathan, A., & Haghighi, A. T. (2024). Dust over water: Analyzing the impact of lake desiccation on dust storms on the Iranian Plateau. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 136377. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.136377
- Allahverdipour, P., & Sattari, M. T. (2024). Investigating the Maximum Wind Speed and Wind Direction of Synoptic Stations in the East of Lake Urmia. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 197–221. doi: 10.22067/geoeh.2024.86654.1464 [In Persian]
- Bayati Khatibi, M., & Sari Sarraf, B. (2024). Identifying the centers at risk of wind erosion around Lake Urmia (Case study: Bonab and Malekan cities). *Hydrogeomorphology*, 11(39), 122–43. doi.org/10.22034/hyd.2024.60434.1728 [In Persian]
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A. T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., & Koffi, B. (2007). Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81, 71–95. doi.org/10.1007/s10584-006-9226-z
- Biabani, L., Nazari Samani, A. A., Khosravi, H., & Kazemzadeh, M. (2019). An investigation of the trends of monthly wind speed fluctuation on the edge of Lake Urmia over the last 30 years. *Journal of Arid Biome*, 9(1), 139–151. doi: 10.22067/geoeh.2024.86654.1464 [In Persian]

- Boroughani, M., Hashemi, H., Hosseini, S. H., Pourhashemi, S., & Berndtsson, R. (2019). Desiccating Lake Urmia: a new dust source of regional importance. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(9), 1483–1487. doi: 10.1109/LGRS.2019.2949132
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine learning*, 45(1), 5–32. doi: 10.1023/A:1010933404324
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2004). Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research*, 33(2), 261–304. doi.org/10.1177/0049124104268644
- Chen, A., Huang, H., Wang, J., Li, Y., Chen, D., & Liu, J. (2023). An analysis of the spatial variation of tropical cyclone rainfall trends in Mainland Southeast Asia. *International Journal of Climatology*, 43(13), 5912–5926. doi: 10.1002/joc.8180
- Chen, Y., Zhao, M., Liu, Z., Ma, J., & Yang, L. (2025). Comparative analysis of offshore wind resources and optimal wind speed distribution models in China and Europe. *Energies*, 18(5), 1108. doi: 10.3390/en18051108
- Chen, Z., Gao, X., & Lei, J. (2022). Dust emission and transport in the Aral Sea region. *Geoderma*, 428, 116177. doi: 10.1016/j.geoderma.2022.116177
- Coles, S., Bawa, J., Trenner, L., & Dorazio, P. (2001). An introduction to statistical modeling of extreme values (Vol. 208). *Springer*. doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0
- Delfi, S., Mosaferi, M., Hassanvand, M. S., & Maleki, S. (2019). Investigation of aerosols pollution across the eastern basin of Urmia lake using satellite remote sensing data and HYSPLIT model. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17(2), 1107–1120. doi: 10.1007/s40201-019-00425-3
- Derome, D., Razali, H., Fazlizan, A., & Jedi, A. (2023). Distribution cycle of wind speed: A case study in the Southern Part of Malaysia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1278(1), 12010. doi: 10.1088/1757-899X/1278/1/012010
- Effati, M., Bahrami, H., Gohardoust, M., Babaeian, E., & Tuller, M. (2019). Application of satellite remote sensing for estimation of dust emission probability in the Urmia Lake Basin in Iran. *Soil Science Society of America Journal*, 83(4), 993–1002. doi: 10.2136/sssaj2019.01.0018
- Esfeh, M. A., Kattan, L., Lam, W. H. K., Esfe, R. A., & Salari, M. (2020). Compound generalized extreme value distribution for modeling the effects of monthly and seasonal variation on the extreme travel delays for vulnerability analysis of road network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102808. doi: 10.1016/j.trc.2020.102808
- Esmaceli, L., Naserpour, S., & Nadarajah, S. (2023). Wind energy potential modeling in northern Iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(8), 3205–3219. doi: 10.1007/s00477-023-02445-w
- Firouzeh, M., & Danesh-Yazdi, M. (2024). The environmental and health impact of salt dust aerosols from the dried Lake Urmia. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 15430. doi: 10.5194/egusphere-egu24-15430
- Gholampour, A., Nabizadeh, R., Hassanvand, M. S., Taghipour, H., Nazmara, S., & Mahvi, A. H. (2015). Characterization of saline dust emission resulted from Urmia Lake drying. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13, 1–11. doi: 10.1186/s40201-015-0238-3
- Ghomashi, F., & Khalesifard, H. R. (2020). Investigation and characterization of atmospheric aerosols over the Urmia Lake using the satellite data and synoptic recordings. *Atmospheric Pollution Research*, 11(11), 2076–2086. doi: 10.1016/j.apr.2020.08.020
- Habibi, S. (2025). An Explainable Machine Learning Framework for Forecasting Lake Water Equivalent Using Satellite Data: A 20-Year Analysis of the Urmia Lake Basin. 1–27. doi: 10.3390/w17101431
- Hadipour, M., Pourebrahim, S., Heidari, H., Nikooy, F., Najah Ahmed, A., & Jit Ern, C. (2024). Evaluation of water resource balance in the Urmia Lake Basin: Integrating carrying capacity and water footprint model for sustainable management. *Ecological Indicators*, 166(March), 112464. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112464
- Hamzeh, N. H., Abadi, A. R. S., Kaskaoutis, D. G., Mirzaei, E., Shukurov, K. A., Sotiropoulou, R.-E. P., & Tagaris, E. (2023). The importance of wind simulations over dried lake beds for dust emissions in the Middle East. *Atmosphere*, 15(1), 24. doi: 10.3390/atmos15010024
- Hamzeh, N. H., Ranjbar Saadat Abadi, A., Ooi, M. C. G., Habibi, M., & Schöner, W. (2022). Analyses of a lake dust source in the Middle East through models performance. *Remote Sensing*, 14(9), 2145. doi: 10.3390/rs14092145
- Hamzehpour, N., Marcolli, C., Klumpp, K., Thöny, D., & Peter, T. (2022). The Urmia playa as a source of airborne dust and ice-nucleating particles—Part 2: Unraveling the relationship

- between soil dust composition and ice nucleation activity. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(22), 14931–14956. doi: 10.5194/acp-22-14931-2022, 2022.
- Harati, H., Kiadaliri, M., Tavana, A., Rahnavard, A., & Amirnezhad, R. (2021). Urmia Lake dust storms occurrences: investigating the relationships with changes in water zone and land cover in the eastern part using remote sensing and GIS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1–16. doi: 10.1007/s10661-021-08851-3
- Hossein Hamzeh, N., Ranjbar Saadat Abadi, A., Abdulkhakimovich Shukurov, K., Mhawish, A., Alam, K., & Opp, C. (2024). Simulation and synoptic investigation of a severe dust storm originated from the Urmia Lake in the Middle East. *Atmósfera*, 38. doi: 10.20937/atm.53290
- Hu, L., Nikolopoulos, E. I., Marra, F., & Anagnostou, E. N. (2023). Toward an improved estimation of flood frequency statistics from simulated flows. *Journal of Flood Risk Management*, 16(2), e12891. doi: 10.1111/jfr3.12891
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N.-C., Tung, C. C., & Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 454(1971), 903–995. doi: 10.1098/rspa.1998.0193
- Jung, C., & Schindler, D. (2019). Wind speed distribution selection—A review of recent development and progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109290. doi: 10.1016/j.rser.2019.109290
- Kaplan, Y. A. (2022). Calculation of Weibull distribution parameters at low wind speed and performance analysis. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 175(4), 195–204. doi: 10.1680/jener.21.00010
- Marani, M., & Ignaccolo, M. (2015). A metastatistical approach to rainfall extremes. *Advances in Water Resources*, 79, 121–126. doi: 10.1016/j.advwatres.2015.03.001
- Marra, F., & Morin, E. (2015). Use of radar QPE for the derivation of Intensity–Duration–Frequency curves in a range of climatic regimes. *Journal of Hydrology*, 531, 427–440. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.08.064
- Marra, F., Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., & Morin, E. (2018). Metastatistical extreme value analysis of hourly rainfall from short records: Estimation of high quantiles and impact of measurement errors. *Advances in Water Resources*, 117, 27–39. doi: 10.1016/j.advwatres.2018.05.001
- Marra, F., Zoccatelli, D., Armon, M., & Morin, E. (2019). A simplified MEV formulation to model extremes emerging from multiple nonstationary underlying processes. *Advances in Water Resources*, 127, 280–290. doi: 10.1016/j.advwatres.2019.04.002
- Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: A global review. *Aeolian Research*, 24, 53–63. doi: 10.1016/j.aeolia.2016.12.001
- Miller-Schulze, J. P., Shafer, M., Schauer, J. J., Heo, J., Solomon, P. A., Lantz, J., Artamonova, M., Chen, B., Imashev, S., & Sverdlik, L. (2015). Seasonal contribution of mineral dust and other major components to particulate matter at two remote sites in Central Asia. *Atmospheric Environment*, 119, 11–20. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.07.011
- Miniussi, A., & Marra, F. (2021). Estimation of extreme daily precipitation return levels at-site and in ungauged locations using the simplified MEV approach. *Journal of Hydrology*, 603, 126946. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126946
- Miniussi, A., Villarini, G., & Marani, M. (2020). Analyses through the metastatistical extreme value distribution identify contributions of tropical cyclones to rainfall extremes in the eastern United States. *Geophysical Research Letters*, 47(7), e2020GL087238. doi: 10.1029/2020GL087238
- Mobarak Hassan, E., Fattahi, E., & Habibi, M. (2023). Application of a regional climate model on autumn dust events over the Urmia Basin. *Atmospheric Pollution Research*, 14(11), 101904. doi: 10.1016/j.apr.2023.101904
- Mobarak Hassan, E., Fattahi, E., & Habibi, M. (2023). Temporal and Spatial Variability of Dust in the Urmia Basin, 1990–2019. *Atmosphere*, 14(12), 1761. doi: 10.3390/atmos14121761
- Mohammadpour, M., & Bevrani, H. (2024). Comparative analysis of two new wind speed TX models using Weibull and log-logistic distributions for wind energy potential estimation in Tabriz, Iran. *ArXiv Preprint ArXiv:2402.01897*. doi: 10.48550/arXiv.2402.01897
- Moradi, M., & Rezazadeh, P. (2020). Investigation the Sand and Salt Drift Potential in Orumia Lake. *Journal of Climate Research*, 1399(41), 71–89. [In Persian]
- Nazari, M. R., & Abbasi, M. (2021). investigation of wind energy potential in Yazd province Using

- Weibull distribution. *Iranian Journal of Energy*, 24(3), 17-31. [In Persian]
- Nikulin, G., Kjellstro, M. E., Hansson, U. L. F., Strandberg, G., & Ullerstig, A. (2011). Evaluation and future projections of temperature, precipitation and wind extremes over Europe in an ensemble of regional climate simulations. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63(1), 41–55. doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00466.x
- Raei, B., Ahmadi, A., Neyshabouri, M. R., Ghorbani, M. A., & Asadzadeh, F. (2020). Determination of Soil Wind Erodibility in Eastern Urmia Lake and its Relationship with Soil Physicochemical Properties. *Applied Soil Research*, 8(2), 82-92. [In Persian]
- Sattari, M. T., & Allahverdi-pour, P. (2024). Application of tree-based intelligence methods for wind speed estimation at the east of Lake Urmia. *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems*, 157–164. doi: 10.1007/978-3-031-67192-0_20
- Sefian, H., Bahraoui, F., & Bahraoui, Z. (2022). Weibull and Extreme Value Theory Approach to Estimate Wind Energy in the North Region. *International Conference on Advanced Intelligent Systems for Sustainable Development*, 515–522. doi: 10.1007/978-3-031-35245-4_47
- Sharifi, A., Esfahaninejad, M., & Kabiri, K. (2021). Hydroclimate of the Lake Urmia catchment area: A brief overview. *Lake Urmia: A Hypersaline Waterbody in a Drying Climate*, 169–185. doi: 10.1007/698_2021_809
- Song, J. Y., & Chung, E. S. (2024). Temporal and spatial distribution of extreme rainfall from tropical storms in the Gulf of Mexico from 1979 to 2021. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(8), 3239–3255. doi: 10.1007/s00477-024-02742-y
- Sotoudeheian, S., Salim, R., & Arhami, M. (2016). Impact of Middle Eastern dust sources on PM10 in Iran: Highlighting the impact of Tigris-Euphrates basin sources and Lake Urmia desiccation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(23), 14–18. doi: 10.1002/2016JD025119
- Stedinger, J. R. (1993). Frequency analysis of extreme events. *Handbook of Hydrology*. doi: 10024474232
- Vehtari, A., Gelman, A., & Gabry, J. (2017). Practical Bayesian model evaluation using leave-one-out cross-validation and WAIC. *Statistics and Computing*, 27, 1413–1432. doi: 10.1007/s11222-016-9696-4
- Vidrio-Sahagún, C. T., & He, J. (2022). Hydrological frequency analysis under nonstationarity using the Metastatistical approach and its simplified version. *Advances in Water Resources*, 166, 104244. doi: 10.1016/j.advwatres.2022.104244
- Vieira, F. F., Oliveira, M., Sanfins, M. A., Garção, E., Dasari, H., Dodla, V., Satyanarayana, G. C., Costa, J., & Borges, J. G. (2023). Statistical analysis of extreme temperatures in India in the period 1951–2020. *Theoretical and Applied Climatology*, 152(1), 473–520. doi: 10.1007/s00704-023-04377-5
- Vogel, R. M., & Fennessey, N. M. (1994). Flow-duration curves. I: New interpretation and confidence intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4), 485–504. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(485)
- Wu, Z., & Huang, N. E. (2009). Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(01), 1–41. doi: 10.1142/S1793536909000047