



مرکز تحقیقات آموزش کشاورزی و منابع طبیعی فارس

# پژوهش‌های آب‌خیزداری

شاپا: ۲۰۳۸-۲۹۸۱



مراکز تحقیقات آموزش و پژوهش کشاورزی

## تحلیل فراوانی رخداد‌های گرد و غبار شمال دریاچه ارومیه

### بر پایه تصویرهای سنجش از دور و الگوریتم MAIAC

مریم فتحی<sup>۱</sup>، حسام احمدی‌بیرگانی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

#### چکیده مبسوط

#### مقدمه و هدف

توفان‌های گرد و غبار به‌عنوان یکی از مخاطره‌های زیست‌محیطی، بر سلامت انسان، کشاورزی و پایداری بوم‌سازگان اثرات گسترده‌ای دارند. در سال‌های گذشته، بروز این پدیده در نواحی پیرامون دریاچه ارومیه، به‌ویژه در بخش شمالی آن، به‌شکل قابل توجهی افزایش یافته است. این روند ناشی از عامل‌های پرشماری است که مهم‌ترین آن‌ها خشک شدن گسترده بستر دریاچه ارومیه در پی کاهش شدید منابع آبی و تغییرات اقلیمی است. کاهش اندازه آب ورودی به دریاچه و افزایش تبخیر به دلیل تغییرات اقلیمی موجب کاهش سطح آب و نمایان شدن بخش گسترده‌ای از بستر دریاچه شده است. امروزه، این بستر خشک‌شده به‌عنوان یک منبع تولید و انتشار ذرات معلق گرد و غبار در منطقه است که ادعاهای زیادی در زمینه گرد و غبار آن بر محیط پیرامون مطرح می‌شود. از این رو، پایش دقیق و تحلیل روندهای زمانی و مکانی توفان‌های گرد و غبار در حاشیه شمالی دریاچه ارومیه برای اتخاذ تدابیر مدیریتی و سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی، اهمیت زیادی دارد. با توجه به اهمیت پایش دقیق این پدیده، بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش از دور و الگوریتم‌های تصحیح جو مانند MAIAC امکان ارائه تحلیل‌های دقیق‌تر و به‌روزتر را فراهم می‌آورد. در این راستا، هدف اصلی این پژوهش، تحلیل روندهای زمانی و مکانی تغییرات فراوانی روزهای گرد و غبار در حاشیه شمالی دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ با استفاده از داده‌های اصلاح‌شده الگوریتم گرد و غبار MAIAC بود. با استفاده از نتایج این پژوهش فهم فرآیندهای موثر در تولید و انتشار گرد و غبار بهبود یافته و راهکارهای مدیریتی مناسبی برای کاهش اثرات منفی آن می‌توان ارائه داد.

#### مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تصویرهای ماهواره‌ای MODIS با تفکیک متوسط در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ برای حاشیه شمالی

#### نوع مقاله: پژوهشی

\*مسئول مکاتبات: h.ahmadybircani@urmia.ac.ir

استناد: فتحی، م.، احمدی‌بیرگانی، ح. ۱۴۰۴. تحلیل فراوانی رخداد‌های گرد و غبار شمال دریاچه ارومیه بر پایه تصویرهای سنجش از دور و الگوریتم MAIAC. پژوهش‌های آبخیزداری. ۳۸ (۴) ۱۲۸-۱۴۵.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.369926.1627

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۱، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۱  
پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۴، دوره ۳۸، شماره ۴، شماره پیاپی ۱۴۹، زمستان ۱۴۰۴، صفحه‌های ۱۲۸ تا ۱۴۵.

نویسندگان ©

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



دریاچه ارومیه جمع‌آوری شد. با بهره‌گیری از قابلیت زیاد الگوریتم بازیابی هواویز (آئروسل) مایاک (MAIAC) در تفکیک دقیق ذرات معلق در هوا، روزهای گرد و غبار شناسایی شدند. داده‌های استخراج‌شده با سامانه گوگل ارث انجین (GEE) و نرم‌افزار ArcMap (نسخه ۱۰/۸) تحلیل شدند و برپایه تعداد روزهای گرد و غبار به چهار طبقه فراوانی کم (۵۰- روز گرد و غباری در سال) (طبقه ۱)، متوسط (۱۰۰-۵۰ روز گرد و غباری در سال) (طبقه ۲)، زیاد (۱۵۰-۱۰۰ روز گرد و غباری در سال) (طبقه ۳) و بسیار زیاد (بیش از ۱۵۰ روز گرد و غباری در سال) (طبقه ۴) تقسیم شدند. سپس، نقشه‌های توزیع مکانی و زمانی هر طبقه با دقت تهیه شد. همچنین، به‌منظور شناسایی و دسته‌بندی سال‌هایی با الگوهای مشابه از دیدگاه فراوانی روزهای گرد و غبار، از روش خوشه‌بندی K-Means در نرم‌افزار SPSS (نسخه ۳۰) استفاده شد. با استفاده از این تحلیل، سال‌ها برپایه فراوانی‌های مشابه در گروه‌های خوشه‌ای به‌خوبی تفکیک شدند.

### نتایج و بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات پراکنش مکانی و شدت رویدادهای گرد و غبار در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ قابل توجه بود. در سال‌های ابتدایی پژوهش (۲۰۰۸-۲۰۰۱)، فراوانی رخداد گرد و غبار در طبقه کم بود، اما از سال ۲۰۱۲ به بعد، مساحت طبقه‌های با فراوانی متوسط و زیاد، به‌طور چشمگیری افزایش یافت. هرچند در برخی سال‌ها مانند ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ فراوانی گرد و غبار، نسبتاً کاهش یافت، اما در سال‌های گذشته روند این پدیده افزایشی بود. نتایج تحلیل خوشه‌ای با استفاده از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۳۰) نشان داد که بیشترین فراوانی روزهای گرد و غبار در سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۵ و ۲۰۱۶-۲۰۱۵ مربوط به گروه خوشه ۲ بود. همچنین کمترین فراوانی روزهای گرد و غبار در سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۰۲ تا ۲۰۰۷-۲۰۰۸، ۲۰۲۰-۲۰۱۹ و ۲۰۲۱-۲۰۲۰ مربوط به خوشه ۴ بود. همچنین، نتایج اعتبارسنجی با استفاده از داده‌های ایستگاه همدیدی شبستر (نزدیک‌ترین ایستگاه در شمال دریاچه ارومیه) نشان داد که ارتباط میان داده‌های ایستگاهی (کدهای ۵، ۶ و ۸) و مساحت پیکسل‌های با فراوانی زیاد گرد و غبار در تصویرهای سنجنش از دور ضعیف و از دیدگاه آماری معنادار نبود. این یافته‌ها بیانگر آن بود که ذرات گرد و غبار برخاسته از بستر خشک‌شده دریاچه قابلیت انتقال به فاصله‌های دور را نداشته و در فاصله‌ای بسیار نزدیک از محل برخاست خود فرو می‌نشینند.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج بررسی فراوانی مکانی و زمانی پدیده گرد و غبار در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ در حاشیه شمالی دریاچه ارومیه نشان داد که تغییرات سالانه فراوانی روزهای گرد و غبار در منطقه نامبرده، چشم‌گیر بود. از این‌رو، نقش عامل‌های اقلیمی، زمین‌شناختی، خاک‌شناسی و محیطی حائز اهمیت است. نتایج این پژوهش بیانگر ضرورت پایش مستمر و به‌روزرسانی داده‌ها در منطقه نامبرده است تا روند آسیب‌زای رخداد‌های گرد و غبار در منطقه به موقع شناسایی و مدیریت شوند. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود از نتایج این پژوهش برای طراحی راهبردهای مدیریتی و کاهش مخاطره‌های زیست‌محیطی در منطقه استفاده شود تا تصمیم‌گیری‌های مطلوبی در سطح محلی و منطقه‌ای انجام شود. همچنین، پیشنهاد می‌شود به‌روزرسانی داده‌ها در حاشیه شمالی دریاچه ارومیه به‌طور مستمر انجام شود تا روندهای آسیب‌زا به‌موقع شناسایی و تصمیم‌گیری‌های محلی و منطقه‌ای با دقت و اثرگذاری بیشتر انجام شود. از سوی دیگر، با تلفیق اطلاعات اقلیمی، زمین‌شناختی و خاک‌شناسی می‌توان به توسعه سامانه‌های هشدار سریع و مدیریت پیشگیرانه کمک کرد و اثرات منفی این پدیده بر محیط زیست و جامعه‌های محلی را به حداقل رساند.

### واژگان کلیدی

الگوریتم MAIAC، خوشه‌بندی K-Means، دریاچه ارومیه، سنجنش از دور، فراوانی توفان‌های گرد و غبار

## مقدمه

امروزه توفان های گرد و غبار به عنوان یکی از مهم ترین مخاطره های زیست محیطی شناخته شده اند که نقش مهمی در چرخه انرژی و مواد غذایی کره زمین دارند (عبادی و همکاران ۲۰۲۴؛ احمدی بیرگانی و فیض نیا ۲۰۱۶). بادهای شدید ذرات ریزدانه را از رسوبات سست و خشک سطح زمین بلند کرده و منجر به شکل گیری پدیده گرد و غبار می شوند (ژانگ و همکاران ۲۰۲۴). این توفان های گرد و غبار شامل ذرات جامد بسیار ریزی هستند که در نتیجه شرایط جوی ناپایدار، خشکسالی های طولانی مدت و کمبود رطوبت در منطقه به وجود می آیند (باغبانان و قویدل ۲۰۲۰؛ سبقتی و همکاران ۲۰۱۶). افزون بر عامل های اقلیمی، نقش فعالیت های نامناسب انسانی مانند تغییر کاربری زمین و نابودی پوشش گیاهی نیز در بروز پدیده گرد و غبار قابل توجه است (افشاری و ولی ۲۰۲۴). رخدادهای گرد و غبار در ابتدا در مقیاس های محلی و کوچک شکل می گیرند، ولی برپایه شرایط باد، ویژگی های زمین ریخت شناسی منطقه و عامل هایی مانند خصوصیات فیزیکی خاک و چسبندگی ذرات خاک، می توانند در مقیاس های گسترده تری جابه جا شوند (بروغنی و پورهایشمی ۲۰۲۰؛ محمودی و ایکگایا ۲۰۲۳). این پدیده در بسیاری از نقاط جهان به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک در حال گسترش بوده و امروزه به عنوان یکی از چالش های سلامتی و بهداشت بشر مطرح است (دی و همکاران ۲۰۲۵، نیرا و همکاران ۲۰۲۳). برپایه گزارش های سازمان های بین المللی بیش از ۱۵۰ کشور به شکل مستقیم تحت تأثیر توفان های گرد و غبار هستند که ۴۵ کشور به عنوان منشا این توفان ها شناخته شده اند (احمدی بیرگانی و ناصری ۲۰۲۳؛ اوپ و همکاران ۲۰۲۱). بیابان ها و زمین های خشک خاورمیانه و آسیای مرکزی پس از صحرای بزرگ آفریقا به عنوان دومین منبع اصلی انتشار گرد و غبار در جهان می باشند که حدود ۴۵٪ از انتشار جهانی گرد و غبار مربوط به آنهاست (عبادی و همکاران ۲۰۲۴). در جهان، منابع گرد و غبار از دیدگاه گستردگی، پراکنش، ترکیب

فیزیکی و شیمیایی ذرات گسیل شده از آن مناطق متنوع بوده و هر منبع گرد و غبار حاوی ذرات با ویژگی های منحصر به فرد است (کوک و همکاران ۲۰۲۱؛ احمدی بیرگانی و همکاران ۲۰۱۹). در این مناطق، خاک های خشک و فاقد پوشش گیاهی به طور مداوم تحت تأثیر بادهای شدید و فرساینده است؛ به طوری که حدود ۲۴٪ از زمین های زراعی و ۴۱٪ از زمین های مرتعی به طور مستقیم در معرض فرسایش بادی هستند (عواد ۲۰۲۳).

همچنین، توفان های گرد و غبار اثرات قابل توجهی بر محیط زیست، سلامت و بهداشت انسان، چرخه های زیست شیمیایی و تغییرات اقلیمی جهانی داشته و لزوم سازگاری و تعدیل اثرات آن بیش از پیش ضروری می باشد (سلیمانی و همکاران ۲۰۲۴؛ نیرا و همکاران ۲۰۲۳؛ زینعلی و همکاران ۲۰۲۳). از جمله پیامدهای ناشی از این توفان ها می توان به فرسایش بادی و تشدید روند بیابان زایی اشاره کرد که منجر به نابودی زمین، کاهش حاصل خیزی خاک، کاهش پوشش گیاهی و آسیب به محصولات کشاورزی می شود (رابینسون ۲۰۲۴؛ رستمی و همکاران ۲۰۲۳). افزون بر این، گرد و غبار معلق در هوا می تواند باعث بروز یا تشدید بیماری های تنفسی و قلبی، اختلال در حمل و نقل جاده ای و هوایی، آسیب به زیرساخت ها و خسارت های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی می شود (نیرا و همکاران ۲۰۲۳؛ میدلتون ۲۰۱۹).

امروزه بستر خشک دریاچه های شور داخلی به عنوان یکی از مهم ترین منابع گسیل گرد و غبار در دنیا به شمار می آیند (رَوَن و همکاران ۲۰۱۹). اگرچه در دهه های پیشین، منابع مهم گرد و غبار را رودهای خشک، دشت های سیلابی کم آب، تپه های ماسه ای، دلتاهای آبرفتی، کفه های رسی و نمکی بیابان و زمین های کشاورزی رها شده در مقیاس های محلی و منطقه ای تشکیل داده اند (عبادی و همکاران ۲۰۲۴؛ شریفی و همکاران ۲۰۱۸).

دریاچه های شور داخلی حدود نیمی از حجم و یک چهارم مساحت کل دریاچه های زمین را تشکیل می دهند. سطح آب آن ها تحت تأثیر تغییرات آب و

هوایی و فصلی، پیوسته در نوسان است. سطح آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌دلیل عامل‌هایی همچون کاهش بارش، افزایش دما به‌همراه سوءمدیریت منابع آبی و انحراف بیش از حد آب در پایین‌دست، به‌شکل قابل توجهی کاهش‌یافته است (گنگ و همکاران ۲۰۲۳؛ گبیرت-برانت و همکاران ۲۰۲۳؛ براد و همکاران ۲۰۲۲). زمانی که بستر خشک‌شده دریاچه‌های شور در معرض بادهای فرساینده باشند، افزون بر گسیل ذرات معلق در جو، مواد سمی و خطرناک موجود در این رسوبات نیز مانند سلیوم، جیوه، آرسنیک و دیگر فلزات سنگین می‌توانند به‌وسیله توفان‌های گرد و غبار کیلومترها جابه‌جا شده و کیفیت هوا را به‌شدت کاهش دهند (سلیمانی و همکاران ۲۰۲۴؛ هال و همکاران ۲۰۲۳؛ جی و همکاران ۲۰۱۹). ازاین‌رو، بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته در پژوهش‌های فرسایش بادی و گرد و غبار مانند تصویرهای ماهواره‌ای و مدل‌سازی‌های مکانی و زمانی امکان شناسایی دقیق منابع گرد و غبار و تحلیل روندهای زمانی آن‌ها را فراهم می‌آورد و به برنامه‌ریزی و اجرای اقدامات هدفمند کمک می‌کند (احمدی بیرگانی ۲۰۲۵).

در پژوهش‌های مشابه، رشکی و همکاران (۲۰۲۱) مناطق اصلی تولید گرد و غبار ایران را با کاربرد سنجش از دور شناسایی کردند. این پژوهشگران، مکان‌های اصلی انتشار گرد و غبار در ایران را چاله جازموریان، بسترهای خشک تالاب‌های هامون و ارومیه، زمین‌های کشاورزی نابودشده و مناطقی که پوشش گیاهی آن‌ها بر اثر فعالیت‌های انسانی یا خشکسالی از بین رفته است، شناسایی کردند. برای پژوهش پدیده گرد و غبار از داده‌های ایستگاه‌های همدید هواشناسی و ایستگاه‌های خودکار سنجش کیفیت هوا استفاده می‌شود (یانگ و همکاران ۲۰۲۱، احمدی بیرگانی ۲۰۱۶). برپایه سازمان جهانی هواشناسی (WMO)، در سامانه‌های ثبت رخدادهای هواشناسی، کدهای عددی ۰۶، ۰۷، ۰۸، ۰۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴ و ۹۸ به پدیده گرد و غبار اختصاص داده شده‌اند (سازمان جهانی هواشناسی

۲۰۲۳). از سوی دیگر، فناوری سنجش از دور یکی از مؤثرترین روش‌ها برای پایش ذرات معلق در جو و هواویزها (آئروسول‌ها) به‌شمار می‌آید. در این روش با هزینه‌ای نسبتاً کم، امکان پوشش مکانی گسترده از مناطق فراهم شده و تغییرات مکانی و زمانی ذرات معلق جوی در مقیاس منطقه‌ای و حتی جهانی نشان‌داده می‌شود (احمدی بیرگانی ۲۰۲۵). امروزه، تصویرهای ماهواره‌ای مودیس (MODIS) به‌طور گسترده، به‌عنوان یکی از ابزارهای سنجش از دور با پوشش جهانی، برای شناسایی ویژگی‌های نوری هواویزها و ذرات معلق جوی به‌کار می‌روند (جیانگ و همکاران ۲۰۲۳). برای تشخیص قطر و غلظت ذرات معلق در جو و هواویزها، از محصولات مختلف سنجنده مودیس و الگوریتم‌های متنوعی استفاده می‌شود. ژرفای نوری هواویز (AOD)، یکی از محصولات سنجنده مودیس است که نشانگر اندازه نوری است که به‌وسیله هواویزها در فضا جذب یا پراکنده می‌شود. در سال‌های گذشته، الگوریتم جدید بازیابی هواویز یا مایاک (MAIAC)، توسعه‌یافته است (دی آنتونیو و همکاران ۲۰۲۳). این مدل مبتنی بر تعاملات فیزیکی میان جو و سطح زمین است که شاخص‌های آن از داده‌های چند زاویه‌ای ماهواره‌ای استخراج می‌شوند. استفاده از این محصول موجب افزایش دقت، صحت و بهبود کیفیت داده‌های بازیابی در سطح جهان شده است. حال با توجه به پیچیدگی و گستردگی داده‌های مرتبط با گرد و غبار، روش‌های داده‌کاوی به‌ویژه الگوریتم‌های خوشه‌بندی، ابزارهای مناسبی برای تحلیل و استخراج الگوهای پنهان در داده‌ها به‌شمار می‌آیند. داده‌کاوی، فرآیندی است که به‌منظور استخراج الگو از داده‌های گسترده، استفاده می‌شود (احمر و همکاران ۲۰۱۸). خوشه‌بندی یکی از روش‌های داده‌کاوی است که با گروه‌بندی داده‌ها برپایه ویژگی‌های مشابه، می‌توان الگوهای مکانی و زمانی را بهتر شناسایی کرد. روش الگوریتم خوشه‌بندی K-means، به‌دلیل سادگی، سرعت زیاد و قابلیت تطبیق با داده‌های بزرگ، در پژوهش‌های

محیطی کاربرد زیادی دارد (جهانی و همکاران ۲۰۲۳).

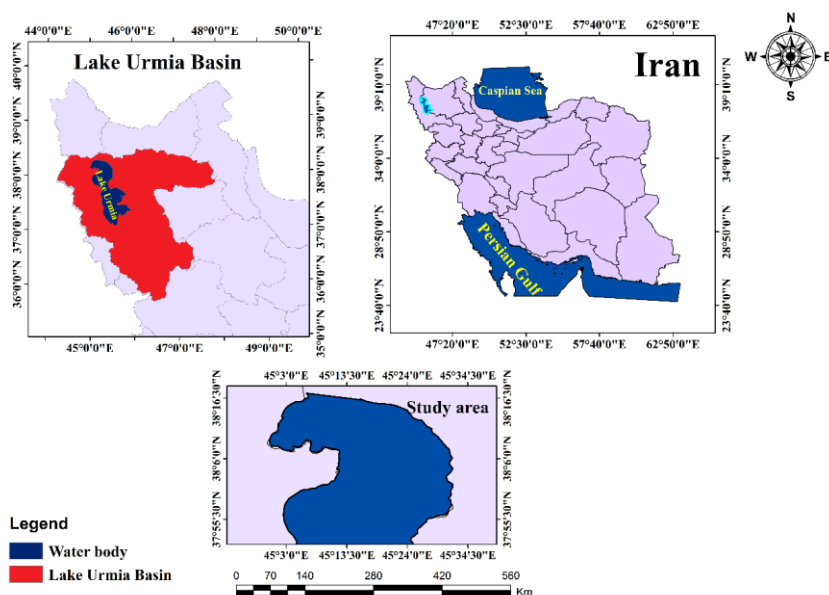
هدف این پژوهش، تحلیل روند زمانی و مکانی تغییرات فراوانی روزهای گرد و غبار در بخش شمالی دریاچه ارومیه در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴، با استفاده از داده‌های سنجش از دور و الگوریتم پیشرفته MAIAC به همراه داده‌های ایستگاه هواشناسی همدید شبستر بود. سپس، تحلیل آماری خوشه‌بندی انجام شد و الگوهای سالانه مشابه شناسایی و بررسی شدند و نقشه‌های توزیع مکانی-زمانی گرد و غبار در مقیاس منطقه‌ای رسم شد.

### مواد و روش‌ها

#### معرفی منطقه مطالعه‌شده

آبخیز دریاچه ارومیه یکی از شش آبخیز اصلی ایران و در شمال غرب کشور است. این آبخیز با مساحت تقریبی ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع، در میان سه استان آذربایجان غربی (۴۶٪)، آذربایجان شرقی (۴۳٪) و کردستان (۱۱٪) است. این آبخیز ۳/۱۵٪ از مساحت کل ایران را در بر می‌گیرد و حدود ۷٪ از آب‌های سطحی کشور را پوشش می‌دهد (قاسمی‌پور و همکاران ۲۰۲۴) (شکل ۱). بخش شمالی دریاچه ارومیه به دلیل موقعیت زمین‌شناسی/زمین-

ریخت‌شناسی و شرایط اقلیمی خاص، بیش از دیگر مناطق این آبخیز در معرض آسیب خشک شدن است (عبادی و همکاران ۲۰۲۲؛ احمدی بیرگانی و همکاران، ۲۰۲۱). با خشک شدن بخش شمالی دریاچه ارومیه در سال‌ها و ماه‌های مختلف، به‌منظور درک بهتر از روند زمانی و مکانی شکل‌گیری و پراکندگی ذرات معنلق ناشی از بستر دریاچه ارومیه که نقش تأثیرگذاری بر بهبود مدیریت منابع آبی، کاهش آلودگی هوا و پیشگیری از بحران‌های زیست محیطی و بهداشتی دارد، مدل‌سازی و تعیین یک الگو پایدار در پژوهش‌های ذرات معلق جو در منطقه بیش از پیش ضروری است (عبادی و همکاران ۲۰۲۲). از سوی دیگر، بخش شمالی آبخیز دریاچه ارومیه به دلیل خشکی تدریجی دریاچه، با چالش‌های جدی در زمینه کشاورزی و امنیت غذایی مواجه است. افزایش شوری آب و خاک، کاهش دسترسی به منابع آبی و نابودی زمین‌های زراعی، باعث کاهش تولید محصولات کشاورزی و افزایش آسیب‌پذیری کشاورزان شده است (فیضی‌زاده و همکاران، ۲۰۲۲). ازاین‌رو، در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری‌های مرتبط با منابع آب، محیط زیست و تولید غذا، توجه ویژه به این ناحیه کاملاً ضروری است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی بخش شمالی دریاچه ارومیه.

Figure 1- Geographical location of the Lake Urmia northern part.

## روش پژوهش

## گردآوری و پردازش داده‌ها

در این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای مودیس در بازه زمانی ۲۰۲۴-۲۰۰۱ به منظور استخراج فراوانی روزهای گرد و غبار در منطقه مطالعه‌شده، استفاده شد. داده‌های مربوط به ژرفای نوری هواویز (AOD) با استفاده الگوریتم بازیابی هواویز مایاک (MAIAC) در سامانه گوگل ارث انجین (GEE) به‌طور سالانه پردازش و استخراج شد. سپس، تصاویرهای محاسبه‌ای برپایه تعداد روزهای گرد و غبار در سال (فراوانی)، به چهار طبقه فراوانی کم (۵۰-۰ روز)، متوسط (۱۰۰-۵۰ روز)، زیاد (۱۵۰-۱۰۰ روز) و بسیار زیاد (بیش از ۱۵۰ روز) تقسیم‌بندی شدند. به‌منظور تحلیل توزیع مکانی و زمانی این داده‌ها، نقشه‌های فراوانی روزهای گرد و غبار با نرم‌افزار ArcMap نسخه ۱۰/۸ تهیه شد. شاخص‌های مهم این پژوهش در جدول ۱ ارائه‌شده است.

## تحلیل خوشه‌بندی داده‌ها

برای تحلیل و دسته‌بندی داده‌های سالانه فراوانی روزهای گرد و غبار، از روش خوشه‌بندی K-Means در نرم‌افزار SPSS نسخه ۳۰ استفاده شد. در این پژوهش، برای تعیین تعداد بهینه خوشه‌ها (K)، از روش تحلیل بصری مبتنی بر نمودار کاهش خطای خوشه‌بندی (Sum of Squared Errors - SSE) در نرم‌افزار SPSS نسخه ۳۰ استفاده شد. ابتدا الگوریتم K-Means برای اندازه‌های مختلف k اجرا شد. سپس، نمودار تغییرات SSE بر حسب تعداد خوشه‌ها رسم شد. با شناسایی نقطه شکست (Elbow point) در نمودار (یعنی جایی که کاهش خطا به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد) تعداد بهینه خوشه‌ها انتخاب شد. در پایان، نتایج خوشه‌بندی با استفاده از نقشه‌های به‌دست‌آمده از تصاویرهای ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه هواشناسی همدید شبستر تحلیل و ارزیابی شدند تا کیفیت و

معناداری آن‌ها در چارچوب پژوهش بررسی شود. نقاط مرکزی هر خوشه به‌طور تصادفی انتخاب شد. سپس، داده‌های فراوانی روزهای گرد و غبار برای سال‌های مختلف، به خوشه‌ای با نزدیک‌ترین مرکز، اختصاص یافت. فاصله میان داده‌ها و مراکز خوشه‌ها با استفاده از فاصله اقلیدسی محاسبه شد (فرحان و هیکال ۲۰۲۴). در الگوریتم خوشه‌بندی K-Means، فاصله با استفاده از معادله ۱ محاسبه شد.

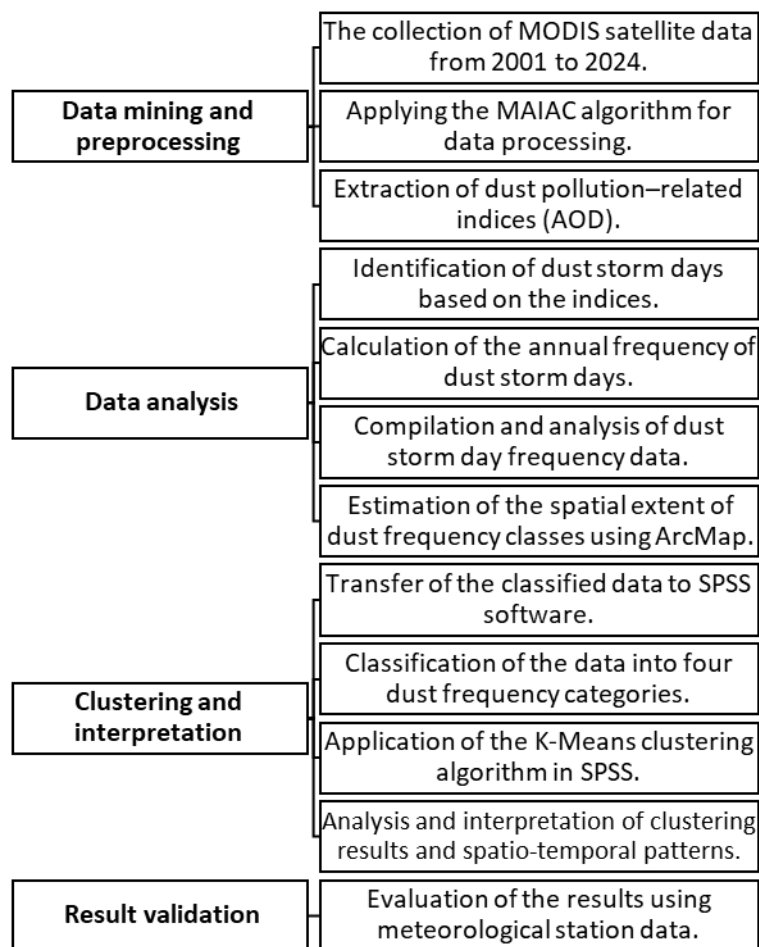
$$Dist_{xy} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (1)$$

در الگوریتم خوشه‌بندی K-Means، مرکز خوشه جدید با استفاده از معادله ۲ محاسبه شد.

$$v_i = \left( \frac{1}{c_i} \right) \sum_1^{c_i} x_i \quad (2)$$

$x_i$ : نشان‌دهنده داده  $i$ ام،  $n$ : تعداد کل داده‌ها،  $v_i$ : مرکز خوشه  $i$ ام،  $c$  یا  $k$ : تعداد خوشه‌ها، و  $c_i$ : تعداد داده‌های موجود در خوشه  $i$ ام است (سینگ و همکاران ۲۰۱۳).

پس از خوشه‌بندی اولیه، نقاط مرکزی هر خوشه با محاسبه میانگین داده‌های آن خوشه، به‌روزرسانی شد. این فرآیند تا زمانی ادامه یافت که تغییر قابل توجهی در خوشه‌ها مشاهده نشد. این تکرار تا رسیدن به همگرایی ادامه یافت. سپس، تحلیل خوشه‌ها انجام شد (فرحان و هیکال ۲۰۲۴). تاریخچه تکرارهای مراکز نهایی خوشه‌ها در جدول ۲ ارائه‌شده است. الگوریتم پس از دو تکرار به همگرایی رسید. همچنین، فاصله میان مراکز خوشه‌ها در جدول فاصله میان مراکز نهایی خوشه‌ها نسبتاً زیاد بود که نشان‌دهنده تفکیک‌پذیری مناسب خوشه‌ها بود (جدول ۴). روند نمای انجام پژوهش در شکل ۲ آورده‌شده است.



شکل ۲- روندنمای انجام پژوهش.

Figure 2 - Flowchart of the present study.

جدول ۱- شاخص‌ها و روش‌های استفاده‌شده در تحلیل بلندمدت فراوانی رخدادهای گرد و غبار (۲۰۰۱-۲۰۲۴).

Table 1- Parameters and methods used in the long-term analysis of dust Storm frequency (2001–2024).

| Parameter                           | Value                                                                                        | Description                                                        |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Time Period                         | 2001 – 2024                                                                                  | Long-term trend analysis of dust storm frequency                   |
| Data Type                           | Dust storm frequency                                                                         | Includes number of days and aerosol optical depth                  |
| Atmospheric Correction Algorithm    | MAIAC                                                                                        | Multi-angle atmospheric correction algorithm for improved accuracy |
| Spatial Analysis Software           | ArcMap                                                                                       | Creating maps of distribution and frequency of dust storm days     |
| Clustering Method                   | K-Means test                                                                                 | Data structure analysis using SPSS version 26                      |
| Dust Storm Frequency Classification | Low: 0 – 50 days<br>Medium: 50 – 100 days<br>High: 100 – 150 days<br>Very High: X > 150 days | Classification based on number of dust storm days                  |

جدول ۲- تکرار مراکز نهایی خوشه‌های طبقات فراوانی گرد و غبار استخراج‌شده.

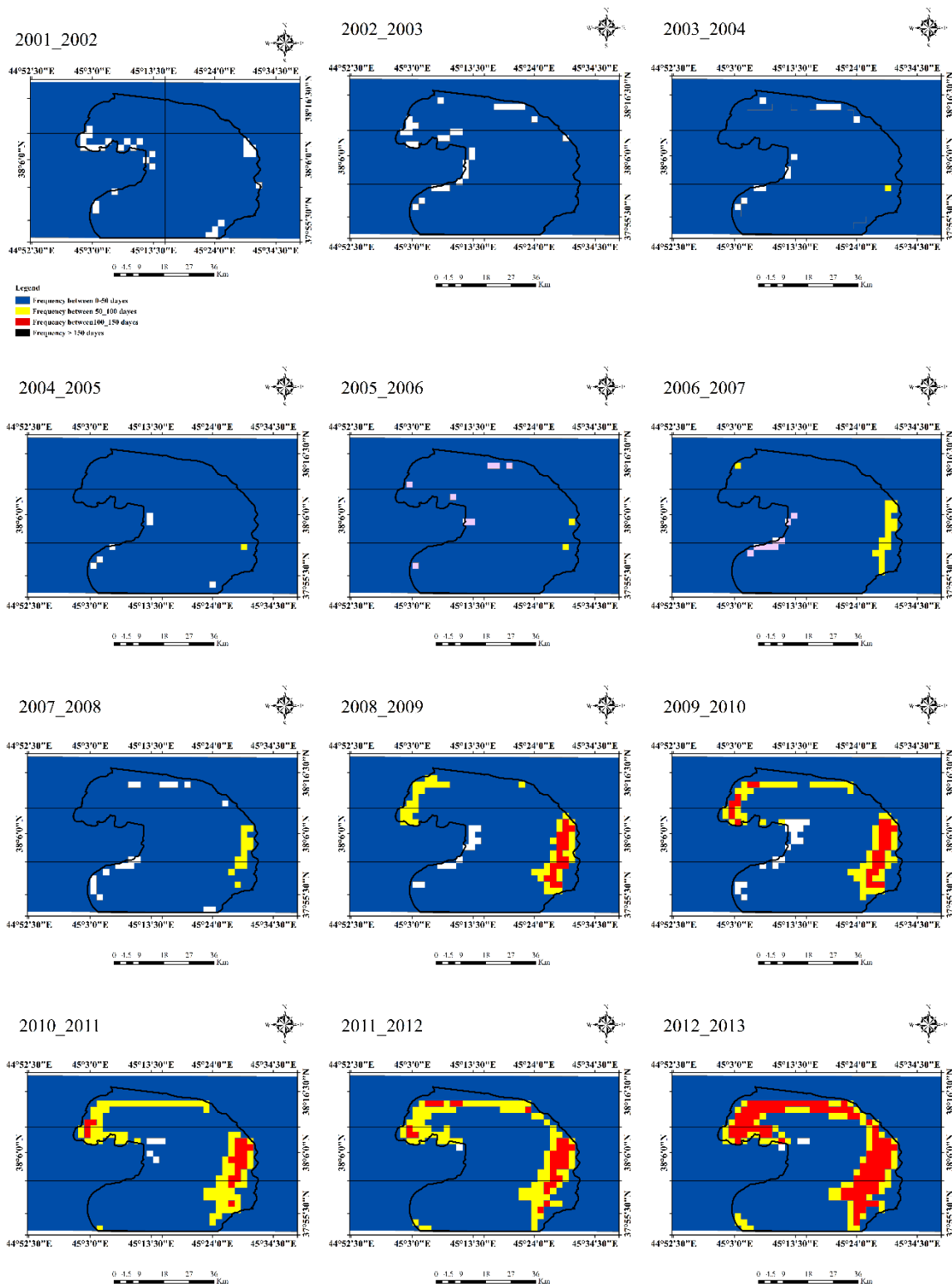
Table 2- Iteration history of final cluster centers for dust frequency categories.

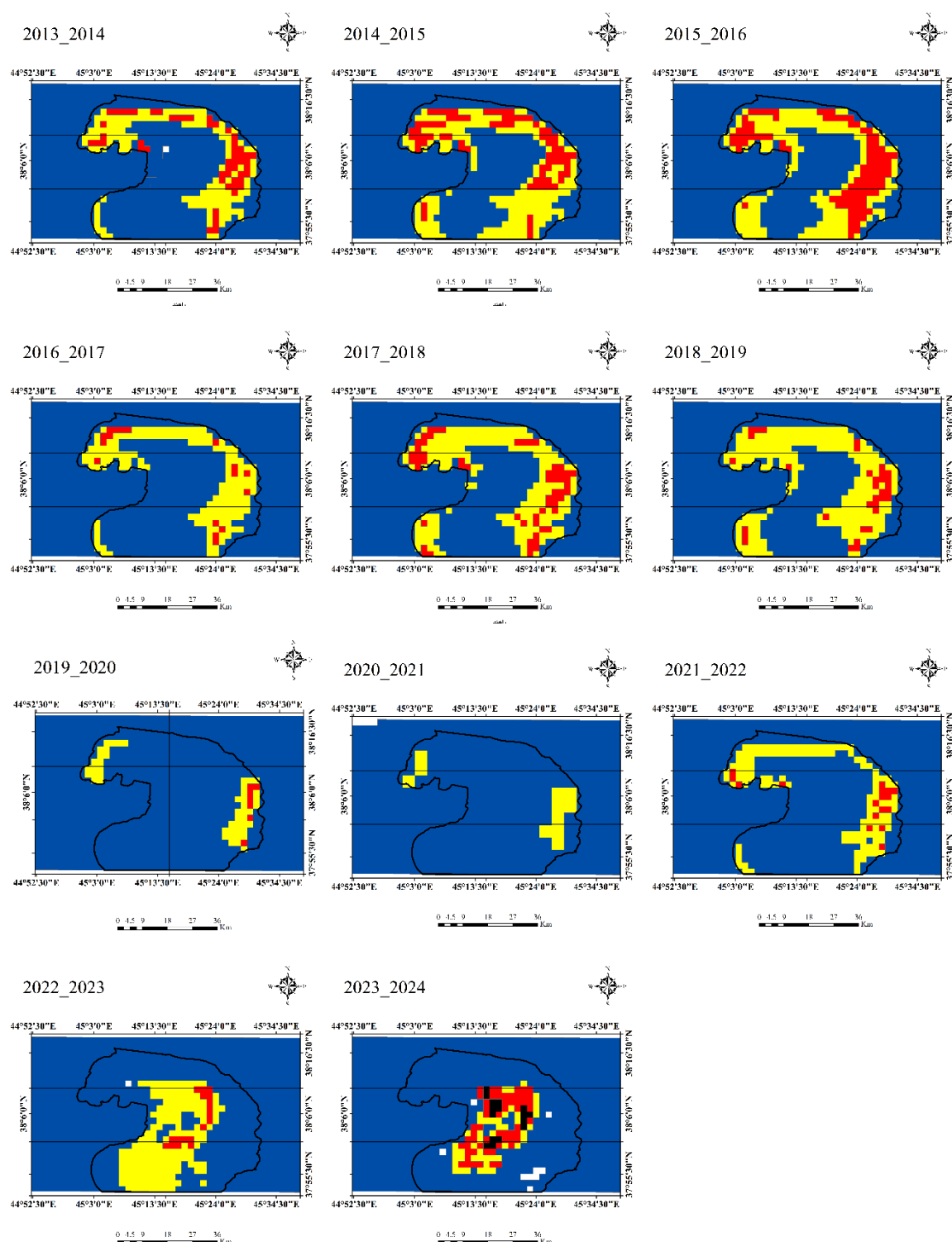
| Iteration | Cluster 1 | Cluster 2 | Cluster 3 | Cluster 4 | Cluster 5 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1         | 8770.939  | 4444.559  | 11037.749 | 8371.606  | 7067.004  |
| 2         | 0         | 0         | 0         | 0         | 0         |

## نتایج و بحث

زمانی و مکانی رویدادهای گرد و غبار در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ رسم شد (شکل ۳).

برپایه نقشه‌های طبقه‌بندی فراوانی گرد و غبار در بخش شمالی دریاچه ارومیه، روند تغییرات





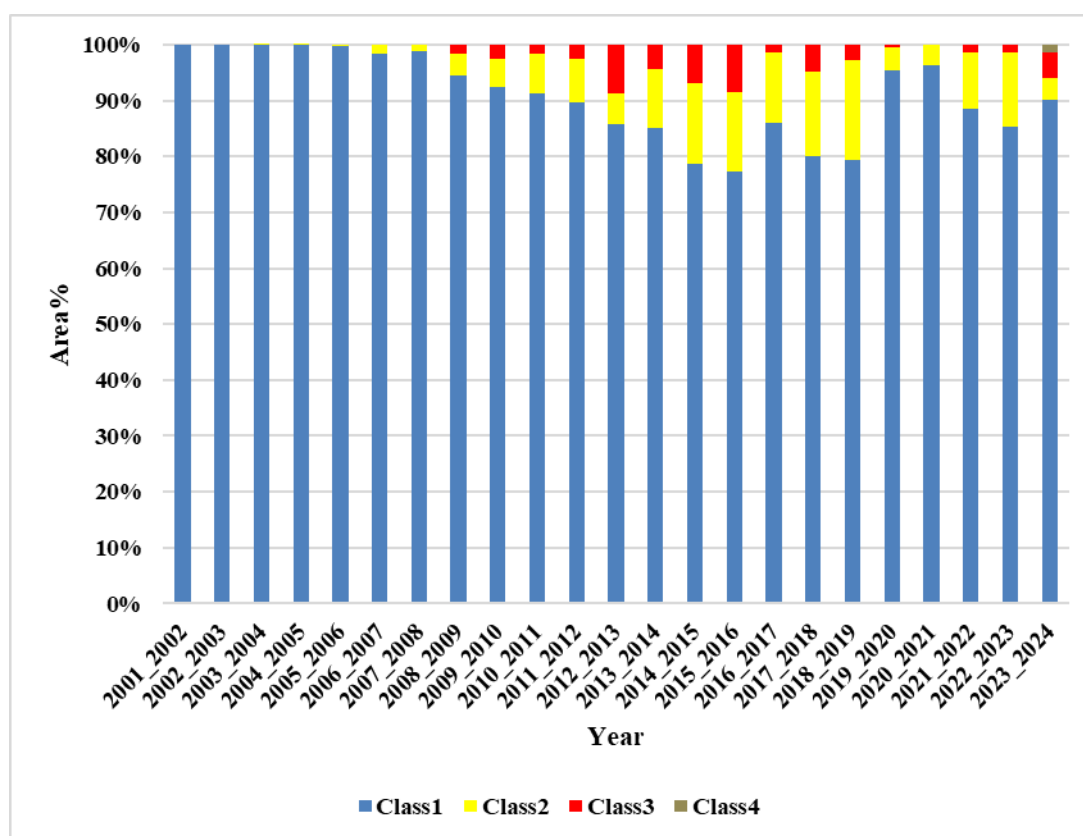
شکل ۳- نقشه زمانی-مکانی فراوانی روزهای گرد و غبار در بخش شمالی دریاچه ارومیه (۲۰۰۱-۲۰۲۴).  
Figure 3- Map of spatio-temporal dust storm frequency over the Lake Urmia northern part (2001-2024).

طبقه فراوانی متوسط در حاشیه شرقی دریاچه مشاهده شد. از سال ۲۰۰۹، طبقه فراوانی زیاد گرد و غبار مربوط به شرق و غرب منطقه مطالعه‌شده (حدود

برپایه نتایج این پژوهش از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۹، فراوانی خیلی کم گرد و غبار مربوط به بخش شمالی دریاچه ارومیه بود و از سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹،

طبقه فراوانی متوسط از ۱۸٪ به ۶/۳٪ کاهش یافت. درصد مساحت طبقه فراوانی زیاد از ۳٪ به صفر رسید. در سال ۲۰۲۱-۲۰۲۰ طبقه فراوانی کم گرد و غبار در به طور چشمگیری در سطح منطقه افزایش یافت. در این دوره درصد مساحت طبقه فراوانی متوسط از ۱۸٪ به ۶/۳٪ کاهش یافت و درصد مساحت طبقه فراوانی زیاد از ۳٪ به صفر رسید. سپس، از سال ۲۰۲۲ تا سال ۲۰۲۴ طبقه‌های فراوانی متوسط و زیاد در منطقه دوباره افزایش یافت. در این دوره درصد مساحت طبقه فراوانی زیاد به ۸/۴٪ و درصد مساحت طبقه فراوانی متوسط به ۹/۳٪ رسید. این تغییرات بیشتر مربوط به مرکز پهنه آبی دریاچه ارومیه بود (شکل‌های ۳ و ۴).

۱/۷٪)، بود. در حالی‌که از سال ۲۰۰۹ فراوانی طبقه‌های زیاد در غرب و شرق دریاچه گسترش یافتند. طبقه‌های فراوانی متوسط و زیاد به سمت شمال توسعه یافتند و بر نواحی بیشتری اثرگذار بودند. در سال ۲۰۱۳-۲۰۱۲ مساحت تحت تأثیر طبقه با فراوانی زیاد در شمال، شرق و غرب افزایش چشمگیری (۶/۸٪) داشت. سپس، از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۹ به‌مرور طبقه فراوانی گرد و غبار زیاد به آرامی کاهش (۲/۷٪) یافت و طبقه فراوانی متوسط گرد و غبار، کمی افزایش یافت. این طبقه در بیشتر نقاط پیرامون دریاچه گسترش یافت. در طول این سال‌ها درصد مساحت طبقه فراوانی متوسط از ۵٪ به ۱۹٪ افزایش یافت. میان سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۱۹ طبقات فراوانی متوسط و زیاد روزهای گرد و غبار، به‌طور محسوسی کاهش یافت. در این دوره درصد مساحت



شکل ۴- سهم نسبی مساحت مربوط به هر یک از چهار طبقه فراوانی گرد و غبار در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴.

Figure 4- The relative proportion of area in each dust frequency class (2001 to 2024).

که هر یک نمایانگر الگوهای خاصی از فراوانی و پراکنش گرد و غبار مبتنی بر تغییرات اقلیمی و

برپایه نتایج خوشه‌بندی، سال‌های مختلف از دیدگاه فراوانی گرد و غبار به پنج گروه متمایز تقسیم شدند

خاک‌شناسی محدوده مطالعه‌شده بودند. نتایج خوشه‌بندی به این شرح است:

الف: خوشه ۱: سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۰۸ و سال ۲۰۲۴-۲۰۲۳

ب: خوشه ۲: سال‌های ۲۰۱۵-۲۰۱۴ و ۲۰۱۶-۲۰۱۵

ج: خوشه ۳: سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۳، ۲۰۱۷-۲۰۱۶، ۲۰۲۲-۲۰۲۱ و ۲۰۲۳-۲۰۲۲

د: خوشه ۴: سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۱، ۲۰۲۰-۲۰۱۹ و ۲۰۲۱-۲۰۲۰

ه: خوشه ۵: سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۱۷ و ۲۰۱۹-۲۰۱۸

تفکیک نتایج خوشه‌بندی بیانگر وجود روندهای زمانی و مکانی معنادار در فراوانی و پراکنش گرد و غبار در منطقه مطالعه‌شده در سال‌های خاص بود. از این نتایج می‌توان به‌عنوان مبنایی برای تحلیل روندهای زیست محیطی و طراحی راهبردهای بهینه مدیریت و کاهش مخاطره‌های ناشی از گرد و غبار استفاده کرد. برای تبیین ویژگی‌های هر خوشه از نتایج جدول ۳ که بیانگر مرکز نهایی خوشه‌ها است، استفاده شد. در تحلیل انجام‌شده، بیشترین میانگین طبقه فراوانی کم مربوط به خوشه دوم بود. این یافته بیانگر آن بود که اندازه گرد و غبار دوره‌های عادی کم است. از سوی دیگر، بیشترین میانگین طبقه فراوانی زیاد و کمترین میانگین طبقه‌های فراوانی متوسط و کم مربوط به خوشه چهارم بود. این یافته مربوط به سال‌های با فراوانی گرد و غبار شدید است. همچنین، بررسی فاصله میان مراکز خوشه‌ها نشان داد بیشترین فاصله مربوط به خوشه ۲ و خوشه ۴ بود. می‌توان نتیجه گرفت تفاوت‌های گسترده‌ای در ماهیت و شدت پدیده گرد و غبار میان این دو خوشه وجود دارد. در جدول ۴ فاصله مراکز خوشه‌ها ارائه‌شده است. این تفاوت‌ها بیانگر وجود تفاوت‌های قابل‌توجه در بروز و شدت پدیده گرد و غبار در این دو خوشه است.

تفاوت‌های معنادار در فراوانی و شدت گرد و غبار میان خوشه‌ها ناشی از تأثیر هم‌زمان عامل‌های پرشماری شامل تغییرات اقلیمی (مانند نوسانات بارش و دما)، ویژگی‌های زمین‌شناسی در آن بخش دریاچه، فعالیت‌های انسانی مانند تغییر کاربری زمین، کاهش پوشش گیاهی، توسعه صنعتی و کشاورزی است. این عامل‌ها، به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم، بر فرآیند تولید، انتقال و پراکنش گرد و غبار و فراوانی آن در منطقه تأثیر بسزایی دارند. با این وجود، برای تعیین دقیق نقش و سهم هر یک از این عامل‌ها در الگوهای مشاهده‌شده، نیاز است که در آینده پژوهش‌های جامع‌تر با داده‌های محیطی، اقلیمی و اجتماعی تکمیلی انجام شود. همچنین به‌منظور انجام صحت‌سنجی خوشه‌بندی، تحلیل پراکنش (ANOVA) میان خوشه‌ها در هر طبقه فراوانی رخدادهای گرد و غبار انجام شد. نتایج نشان داد که در سه خوشه اول (فراوانی‌های کم، متوسط و زیاد)، تفاوت‌های متغیرها از دیدگاه آماری معنادار و اندازه معناداری ( $\text{Sig. } 0.05 >$ ) کمتر از ۰/۰۵ بود. این یافته بیانگر تفکیک موفق و وجود ساختار قابل تمایز میان این خوشه‌ها در هر طبقه فراوانی رخدادهای گرد و غبار بود. از سوی دیگر، در خوشه چهارم (طبقه فراوانی بسیار زیاد) تفاوت‌های متغیرها از دیدگاه آماری معنادار نبود ( $\text{Sig. } = 0.624$ ). دلیل این یافته وجود فقط یک سال (۲۰۲۴-۲۰۲۳) از این طبقه فراوانی است. همچنین، اندازه‌های زیاد آماره F در سه خوشه اول، تأییدی بر تفاوت معنادار میان خوشه‌ها به‌شمار می‌آید. این نتایج به همراه فاصله قابل توجه میان مراکز خوشه‌ها، نشان‌دهنده صحت و اعتبار قابل قبول خوشه‌بندی انجام‌شده، بود (جدول ۵).

جدول ۳- مراکز نهایی خوشه‌های طبقات فراوانی گرد و غبار استخراج‌شده.

Table 3- Final Cluster Centers of Dust Frequency Classes.

| Cluster/class | Class 1 | Class 2 | Class 3 | Class 4 |
|---------------|---------|---------|---------|---------|
| 1             | 344950  | 20996   | 13872   | 837.51  |
| 2             | 299244  | 54728   | 29491   | 0       |
| 3             | 330201  | 44448   | 8320.8  | 0       |
| 4             | 373620  | 4572.3  | 244.37  | 0       |
| 5             | 305488  | 63260   | 14710   | 0       |

جدول ۴- بررسی تمایز خوشه‌ها در طبقات فراوانی گرد و غبار بر پایه فواصل میان مرکز.

Table 4- Analysis of cluster differentiation in dust frequency classes based on inter-Centroid Distances.

| Cluster Pair  | Distance  |
|---------------|-----------|
| Cluster 1 & 2 | 58919.601 |
| Cluster 1 & 3 | 28266.807 |
| Cluster 1 & 4 | 35750.896 |
| Cluster 1 & 5 | 57833.996 |
| Cluster 2 & 3 | 38887.492 |
| Cluster 2 & 4 | 94354.365 |
| Cluster 2 & 5 | 18173.027 |
| Cluster 3 & 4 | 59501.763 |
| Cluster 3 & 5 | 31708.456 |
| Cluster 4 & 5 | 91078.677 |

جدول ۵- نتایج تحلیل پراکنش (ANOVA) برای مقایسه میانگین فراوانی گرد و غبار در خوشه‌های به‌دست آمده از آزمون K-means  
Table 5- Analysis of variance (ANOVA) for comparing mean dust frequencies in the clusters obtained by the K-Means test.

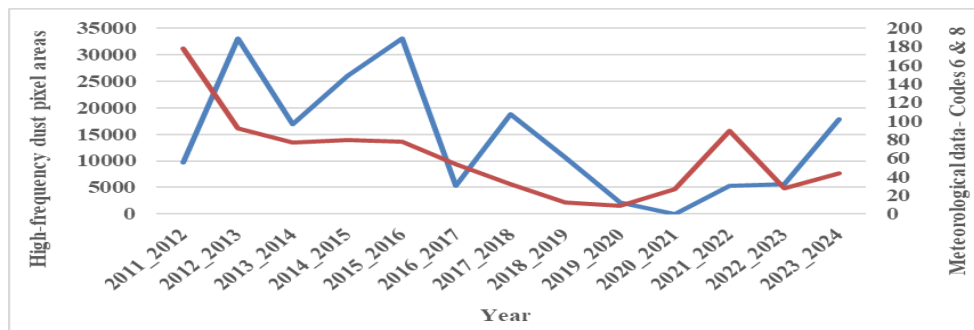
|        | Cluster     |    | Error       |    | F      | Sig.  |
|--------|-------------|----|-------------|----|--------|-------|
|        | Mean Square | Df | Mean Square | df |        |       |
| class1 | 3881104225  | 4  | 46035871.8  | 18 | 84.306 | 0     |
| class2 | 2514575767  | 4  | 37029665    | 18 | 67.907 | 0     |
| class3 | 434790229   | 4  | 38109253.7  | 18 | 11.409 | 0     |
| class4 | 777655.984  | 4  | 1169025.34  | 18 | 0.665  | 0.624 |

فرآیند اعتبارسنجی شامل مقایسه تعداد رخدادهای گرد و غبار ثبت‌شده در هر سال با مساحت پیکسل‌های طبقه فراوانی زیاد در داده‌های سنجش از دور بود (در نقشه‌های به‌دست آمده پیکسل‌ها به رنگ قرمز بودند). این مقایسه به‌منظور بررسی اندازه هم‌خوانی و همبستگی میان مشاهده‌های زمینی و داده‌های سنجش از دور انجام شد. نتایج مقایسه تعداد رخدادهای گرد و غبار ثبت‌شده در هر سال (کدهای هواشناسی ۵، ۶ و ۸) با مساحت پیکسل‌های طبقه فراوانی زیاد در داده‌های سنجش از دور نشان داد که از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳ اطلاعات به‌دست آمده از سنجش از دور با مشاهده‌های زمینی

به‌منظور اعتبارسنجی داده‌های سنجش از دور به‌دست آمده از الگوریتم مایاک، از داده‌های هواشناسی مربوط به کدهای گرد و غبار شامل کد ۵ (وجود مه‌دود یا غبار ریز که دید را کاهش می‌دهد)، کد ۶ (گرد و غبار گسترده‌ای که از جای دیگری آمده و در هوا معلق است، ولی در محل ایستگاه باد آن را بلند نکرده است) و کد ۸ (گردباد یا چرخش‌های محلی گرد و غبار که پیرامون ایستگاه دیده می‌شوند، اما طوفان گرد و غبار کامل نیستند) استفاده شد. این داده‌ها از ایستگاه همدیدی شبستر که نزدیک‌ترین ایستگاه همدیدی در شمال دریاچه ارومیه بود، تهیه شد. این داده‌ها از سال ۲۰۱۲ در دسترس هستند.

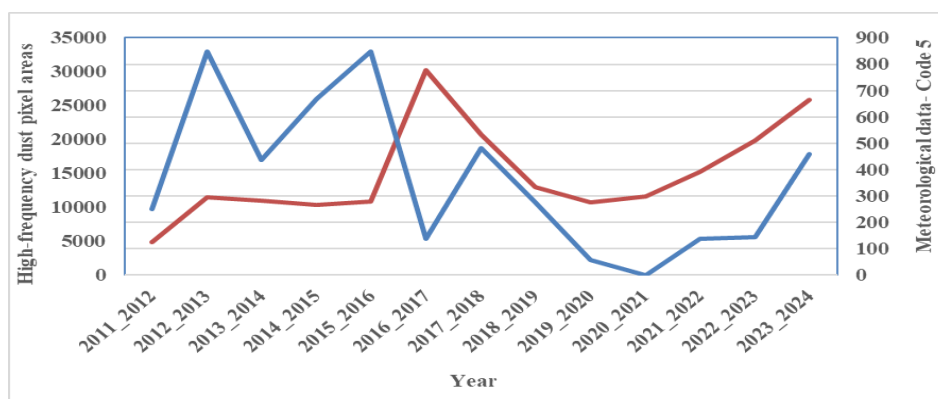
دور و هواشناسی مربوط به کدهای ۶ و ۸ بیانگر آن بود که فقط میان داده‌های سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ همبستگی قابل قبول بود (شکل ۶).

همبستگی نداشت. از سوی دیگر، همبستگی در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۴ نسبتاً قابل قبول بود (شکل ۵). همچنین، نتایج بررسی داده‌های سنجش از



شکل ۵- مقایسه تعداد رخدادهای گرد و غبار ثبت‌شده در هر سال (کد ۵ هواشناسی در ایستگاه شبستر) با مساحت پیکسل‌های طبقه فراوانی زیاد در داده‌های سنجش از دور.

Figure 5- Comparison of the number of recorded dust events per year (meteorological code 5 at Shabestar station) with the area of high-frequency class pixels in remote sensing data.



شکل ۶- مقایسه تعداد رخدادهای گرد و غبار ثبت‌شده در هر سال (کدهای ۶ و ۸ هواشناسی در ایستگاه شبستر) با مساحت پیکسل‌های طبقه فراوانی زیاد در داده‌های سنجش از دور.

Figure 6- Comparison of the number of recorded dust events per year (meteorological codes 6 & 8 at Shabestar station) with the area of high-frequency class pixels in remote sensing data.

بیرگانی و همکاران (۲۰۲۵)، (۲۰۲۱) و (۲۰۲۰) و رَوَن و همکاران (۲۰۲۲) و (۲۰۱۹) هماهنگی دارد. برپایه همبستگی ضعیف و نبود ارتباط معنادار تعداد روزهای گرد و غبار در ایستگاه هواشناسی شبستر در نزدیک-ترین نقطه به حاشیه شمالی دریاچه ارومیه و فراوانی گرد و غبار در سال‌های متفاوت، مشخص شد که اندازه انتقال ذرات گرد و غبار به فاصله‌های دور امکان‌پذیر نیست و گرد و غبار گسیل‌شده از بستر خشک دریاچه ارومیه در فاصله بسیار کمی از نقطه برخاست خود فرو

نتایج این پژوهش نشان داد یکی از شاخص‌ترین مناطق با بیشترین فراوانی گرد و غبار در سطح آبخیز دریاچه ارومیه، حاشیه شمالی این دریاچه بود. عملکرد این دریاچه در سال‌های مختلف و به دلیل عامل‌های اقلیمی، زمین‌شناختی و خاک‌شناختی گوناگون، در گسیل گرد و غبار، متفاوت بود. افزون بر این، کاهش سطح آب دریاچه ارومیه از اواخر دهه ۱۹۹۰ تا به امروز منجر به افزایش قابل توجه تعداد روزهای توفانی با گرد و غبار در منطقه شد. این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌های احمدی

تصمیم‌گیری‌های مطلوبی در سطح محلی و منطقه‌ای انجام شود.

### تضاد منافع نویسندگان

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

### دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

### مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام تحلیل‌های نرم‌افزاری/آماري، تحلیل‌های داده‌های هواشناسی، نگارش نسخه اولیه مقاله

نویسنده دوم: مفهوم‌سازی، ایده‌پردازی، اقدامات و تحلیل‌های سنجش از دوری، ویرایش و بازبینی مقاله، بررسی نتایج

می‌نشینند و به دوردست منتقل نمی‌شود. این نتایج با یافته‌های احمدی بیرگانی و همکاران (۲۰۲۳) هم‌راستا است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج بررسی فراوانی مکانی و زمانی پدیده گرد و غبار در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ در حاشیه شمالی دریاچه ارومیه نشان داد که تغییرات سالانه فراوانی روزهای گرد و غبار در منطقه نامبرده، چشم‌گیر بود. از این‌رو، نقش عامل‌های اقلیمی، زمین‌شناختی، خاک‌شناسی و محیطی حائز اهمیت است. نتایج این پژوهش بیانگر ضرورت پایش مستمر و به‌روزرسانی داده‌ها در منطقه نامبرده است تا روند آسیب‌زای رخداد‌های گرد و غبار در منطقه به موقع شناسایی و مدیریت شوند. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود از نتایج این پژوهش برای طراحی راهبردهای مدیریتی و کاهش مخاطره‌های زیست‌محیطی در منطقه استفاده شود تا

### فهرست منابع

- Abadi ARS, Hamzeh NH, Shukurov K, Opp C, Dumka UC. 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. <https://doi.org/10.3390/rs14153827>
- Abadi ARS, Shukurov KA, Hamzeh NH, Kaskaoutis DG, Opp C, Shukurova LM, Ghasabi Z. 2024. Dust events over the Urmia Lake Basin, NW Iran, in 2009–2022 and their potential sources. *Remote Sensing*. 16(13): 2384. <https://doi.org/10.3390/rs16132384>
- Afshari M, Vali A. 2024. Application of Maximum Entropy Model and Remote Sensing Technique to predict susceptible areas to dust storms in Isfahan Province, Iran. *ECOPERSIA*, 12(1): 25–37.
- Ahmady-Birgani H. 2025. Conceptualizing dust emission areas and hotspots over the Aeolian landforms via remote-sensing aerosol algorithms (Case study: Lake Urmia, a major hypersaline lake in the Middle East). *Geoscience Letters*, 12(1):28. <https://doi.org/10.1186/s40562-025-00287-4>
- Ahmady-Birgani, H., Ravan, P., Yao, Z., & Afrasinei GM. 2023. Understanding saline lake sand dunes dynamics: Coupling remote sensing techniques and field studies. *Catena*. 232:107424. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107424>
- Ahmady-Birgani H, Naseri HR. 2023. Deserts, sand dunes and sand seas of Iran. In *Sand Dunes of the Northern Hemisphere: Distribution, Formation, Migration and Management*. CRC Press. pp. 219–234.
- Ahmady-Birgani H, Ravan P, Schlosser JS, Cuevas-Robles A, Azadi-Aghdam M, Sorooshian A. 2021. Is there a relationship between Lake Urmia saline lakebed emissions and wet deposition composition in the Caucasus region? *ACS Earth and Space Chemistry*. 5(10): 2970–2985. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.1c00205>
- Ahmady-Birgani H, Ravan P, Schlosser JS, Cuevas-Robles A, Azadi-Aghdam M, Sorooshian A. 2020. On the chemical nature of wet deposition over a major desiccated lake: Case study for Lake Urmia basin. *Atmospheric Research*. 234: 104762. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104762>
- Ahmady-Birgani H, Engelbrecht J, Bazgir M. 2019. How different source regions across the Middle East change aerosol and dust particle characteristics. *Desert*. 24(1):61–73. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2019.72441>

- Ahmady-Birgani H, Feiznia S. 2016. Chemical composition of TSP dust-sized as an indicator in geochemical fingerprinting of sediments. *Journal of Natural Environment*. 69(2):283–301. <https://doi.org/10.22059/jne.2016.59750>
- Ahmady-Birgani H, Mosavi S, Sani S. 2016. The impact of meteorological parameters on SO<sub>2</sub> pollutant accumulation over Urmia City. *Environment and Water Engineering*. 1(1):95–110.
- Ahmar AS, Napitupulu D, Rahim R, Hidayat R, Sonatha Y, Azmi M. 2018. Using K-means clustering to cluster provinces in Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*. 1028: 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1028/1/012006>
- Awadh SM. 2023. Impact of North African sand and dust storms on the Middle East using Iraq as an example: Causes, sources, and mitigation. *Atmosphere*. 14(1): 180. <https://doi.org/10.3390/atmos14010180>
- Baghbanan P, Ghavidel Y, Farajzadeh M. 2020. Temporal long-term variations in the occurrence of dust storm days in Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*. 132(6): 885–898. <https://doi.org/10.1007/s00703-020-00722-z>
- Boroughani M, Pourhashemi S, Hashemi H, Salehi M, Amirahmadi A, Asadi MAZ, Berndtsson R. 2020. Application of remote sensing techniques and machine learning algorithms in dust source detection and dust source susceptibility mapping. *Ecological Informatics*. 56:101059. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101059>
- Borda LG, Cosentino NJ, Iturri LA, Garcia MG, Gaiero DM. 2022. Is dust derived from shrinking saline lakes a risk to soil sodification in southern South America? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 127(4): e2021JF006585. <https://doi.org/10.1029/2021JF006585>
- Dey R, Sharma SB, Thakkar MG, Sarangi RK, Chowdhury A, Naz A. 2025. Phosphorus transitions driven by cyclone Biparjoy linked Middle East–North Africa (MENA) and Indian Thar Desert dust storm pathways in Asia's largest grassland. *Scientific Reports*. 15(1): 4321. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-41358-1>
- Di Antonio L, Di Biagio C, Foret G, Formenti P, Siour G, Doussin JF, Beekmann M. 2023. Aerosol optical depth climatology from the high-resolution MAIAC product over Europe: Differences between major European cities and their surrounding environments. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 23(19): 12455–12475. <https://doi.org/10.5194/acp-23-12455-2023>
- Farhan M, Heikal J. 2024. Used car customer segmentation using k-means clustering model with SPSS: Case study Caroline. *Jurnal Indonesia Sosial Sains*. 5(03): 543–559. <https://doi.org/10.36084/jiss.v5i03>
- Feizizadeh B, Lakes T, Omarzadeh D, Sharifi A, Blaschke T, Karimzadeh S. 2022. Scenario-based analysis of the impacts of lake drying on food production in the Lake Urmia Basin of Northern Iran. *Scientific Reports*. 12(1): 6237. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10226-2>
- Ghasempour R, Aalami MT, Saghebian SM, Kirca VO. 2024. Analysis of spatiotemporal variations of drought and soil salinity via integrated multiscale and remote sensing-based techniques (Case study: Urmia Lake Basin). *Ecological Informatics*. 81: 102560. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102560>
- Gibert-Brunet E, Tudryn A, Kong T, Tucholka P, Motavalli-Anbaran SH, Marlin C, Karimi G. 2023. Salt wedges and trapped brines of low-latitude endoreic saline lakes as potential modulators of GHG emission. *Scientific Reports*. 13(1): 21118. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48052-9>
- Ge Y, Abuduwaili J, Ma L. 2019. Lakes in arid land and saline dust storms. *E3S Web of Conferences*. 99: 01007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199901007>
- Hall DK, Kimball JS, Larson R, DiGirolamo NE, Casey KA, Hulley G. 2023. Intensified warming and aridity accelerate terminal lake desiccation in the Great Basin. *Earth and Space Science*. 10(1): e2022EA002630. <https://doi.org/10.1029/2022EA002630>
- Jahani Y, Jambarsang S, Bahrampour A. 2023. Longitudinal data clustering methods: A systematic review. *Journal of Biostatistics and Epidemiology*. 9(4): 396–411.
- Jiang J, Liu J, Jiao D, Zha Y, Cao S. 2023. Evaluation of MODIS DT, DB, and MAIAC aerosol products over different land cover types in the Yangtze River Delta of China. *Remote Sensing*. 15(1): 275. <https://doi.org/10.3390/rs15010275>
- Kok JF, Adebisi AA, Albani S, Balkanski Y, Checa-Garcia R, Chin M, Wan JS. 2021. Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 21(10): 8169–8193. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021>
- Kong T, Tudryn A, Gibert-Brunet E, Tucholka P, Motavalli-Anbaran SH, Lankarani M, Dufaure O. 2023. Sediment flux and early diagenesis inferred from high-resolution XRF-CS data and iron and arsenic sulfides during the last 30 kyr in Lake Urmia, Iran. *Sedimentary*

- Geology. 453: 106450.  
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2023.106450>
- Mahmoudi L, Ikegaya N. 2023. Identifying the distribution and frequency of dust storms in Iran based on long-term observations from over 400 weather stations. Sustainability. 15(16):12294.  
<https://doi.org/10.3390/su151612294>
- Middleton N. 2019. Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. Geosciences. 9(6): 261.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences9060261>
- Neira M, Erguler K, Ahmady-Birgani H, Al-Hmoud ND, Fears R, Gogos C, Christophides G. 2023. Climate change and human health in the Eastern Mediterranean and Middle East: Literature review, research priorities and policy suggestions. Environmental Research. 216: 114537.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114537>
- Opp C, Groll M, Abbasi H, Foroushani MA. 2021. Causes and effects of sand and dust storms: What has past research taught us? A survey. Journal of Risk and Financial Management. 14(7): 326.  
<https://doi.org/10.3390/jrfm14070326>
- Rashki A, Middleton NJ, Goudie AS. 2021. Dust storms in Iran–Distribution, causes, frequencies and impacts. Aeolian Research. 48: 100655.  
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2020.100655>
- Ravan P, Ahmady-Birgani H, Solomos S, Yassin MF, Abasalizadeh H. 2022. Wet scavenging in removing chemical compositions and aerosols: A case study over the Lake Urmia. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 127(6): e2021JD035896.  
<https://doi.org/10.1029/2021JD035896>
- Ravan P, Ahmady-Birgani H, Sorooshian A. 2019. Spatial mapping of elemental variabilities of atmospheric particulates throughout the Lake Urmia basin. Journal of the Earth and Space Physics. 45(3): 667–686.  
<https://doi.org/10.22059/jesphys.2019.268885.1007097>
- Robinson MC, Schueth K, Ardon-Dryer K. 2024. Spatial, temporal, and meteorological impact of the 26 February 2023 dust storm: Increase in particulate matter concentrations across New Mexico and West Texas. Atmospheric Chemistry and Physics. 24(23): 13733–13750. <https://doi.org/10.5194/acp-24-13733-2024>
- Rostami S, Alijanpour A, Banj Shafiei A, Ahmady-Birgani H, Beygi Heidarlou H. 2023. Investigation on biological activities for combating desertification in the western shores of Lake Urmia, Northwest Iran. Journal of Arid Land. 15(3): 297–309.  
<https://doi.org/10.1007/s40333-023-0094-1>
- Sebghati M, Ahmady-Birgani H, Moghaddam A. 2016. The calculation of continuity and intensity of droughts using Modified SPEI Index (Case study: Tabriz and Urmia Cities). Environment and Water Engineering. 2(2): 188–195.
- Sharifi A, Murphy LN, Pourmand A, Clement AC, Canuel EA, Beni AN, Ahmady-Birgani H. 2018. Early-Holocene greening of the Afro-Asian dust belt changed sources of mineral dust in West Asia. Earth and Planetary Science Letters. 481: 30–40.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.009>
- Singh A, Yadav A, Rana A. 2013. K-means with three different distance metrics. International Journal of Computer Applications. 67(10):13–17. <https://doi.org/10.5120/11430-6785>
- Soleimani A, Atafar Z, Nemati-Mansour S, Ahmed M, Ahmady-Birgani H, Ravan P, Miri M, Mohammadi A. 2024. Impact of PAHs compounds on air quality in Maragheh City: Probabilistic risk assessment and source apportionment. Toxicology Reports. 13: 101686.  
<https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101686>
- World Meteorological Organization. 2023. WMO Airborne Dust Bulletin No. 7 – September 2023. Geneva: World Meteorological Organization.
- Yang L, Hu Z, Huang Z, Zhang Y, Hu M. 2023. Regional and seasonal variation of dust aerosol over North Africa and the Middle East: Analysis based on satellite data and ground measurements. Atmospheric Environment. 296: 119733.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119733>
- Zeinali B, Juq FVG, Teymouri M, Das S, Ruhi F, Sihag P. 2023. Selection of the best clustering technique in order to zone the frequency of dust storms in Iran. Arabian Journal of Geosciences. 16(1):11389.  
<https://doi.org/10.1007/s12517-022-11389-7>
- Zhang L, Zhang H, Cai X, Song Y, Mamtimin A, He Q. 2024. Physical mechanisms of deep convective boundary layer leading to dust emission in the Taklimakan Desert. Geophysical Research Letters. 51(10): e2024GL108521.  
<https://doi.org/10.1029/2024GL108521>



## Assessment of Dust Event Frequency in the North Lake Urmia Based on MAIAC-Derived Aerosol Retrievals

Maryam Fathi<sup>1</sup> , Hesam Ahmady Birgani\* <sup>2</sup>

1- Masters' Student, Rangeland and Watershed Management Group, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

2- Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

### Extended Abstract

#### Introduction and Goal

Dust storms, as one of the major environmental hazards, have widespread impacts on human health, agriculture, and ecosystem sustainability. In recent years, the incidence of this phenomenon has increased significantly in the areas surrounding Lake Urmia, particularly in the northern parts. This trend is due to numerous factors, the most important of which is the widespread drying of the bed of Lake Urmia following a severe reduction in water resources and climate change. The decrease in the amount of water entering the lake and the increase in evaporation duo to climatic change have caused the water level to drop and a large portion of the lake bed to become visible. Today, this dried bed serves as a source of dust particles in the region, with many claims being made about the dust it causes to the surrounding environment. Therefore, accurate monitoring and spatiotemporal trends of dust storm on the northern margin of Lake Urmia is a great importance for adopting management measures and environmental policies. Given the importance of accurate monitoring of this phenomenon, the use of remote sensing technologies and atmospheric correction algorithms such as MAIAC allows for more accurate and up-to-date analyses. In this regard, the main objective of this research was to analyze the temporal and spatial patterns trends in the frequency of dust day on the northern Lake Urmia during the period 2001 to 2024 using MAIAC-corrected dust algorithm data. Using the results of this research, understanding of the processes affecting dust generation and transport has been improved and appropriate management strategies can be provided to reduce its negative effects.

#### Materials and Methods

In this study, moderate resolution MODIS satellite images were collected between 2001 and 2024 for the northern margin of Lake Urmia. By utilizing the high capability of the Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) in accurately separating airborne particles, dusty days were identified.

**Article Type:** Research Article

**\*Corresponding Authors' E-mail:** h.ahmadybirgani@urmia.ac.ir

**Citation:** Fathi, M., Ahmady Birgani, H. 2026. Assessment of Dust Event Frequency in the North Lake Urmia Based on MAIAC-Derived Aerosol Retrievals. Watershed Management Research. 38 (4):128-145.

**DOI:** 10.22092/wmrj.2025.369926.1627

**Received:** 04 July 2025, **Received in revised form:** 31 August 2025, **Accepted:** 22 September 2025

**Published online:** 01 January 2026

Watershed Management Research, Vol. 38, No.4, Ser. No: 149, Winter 2026, pp. 128-145.

**Publisher:** Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

©Author(s)



The extracted data were analyzed using Google Earth Engine (GEE) platform and ArcMap software (version 10.8) and divided into four frequency classes based on the number of dust days: low (0–50 dusty days per year) (class 1), moderate (50–100 dusty days per year) (class 2), high (100–150 dusty days per year) (class 3), and very high (more than 150 dusty days per year) (class 4). Subsequently, spatial and temporal distribution maps of each class were carefully prepared. Also, in order to identify and categorize years with similar patterns in terms of the frequency of dust day, the K-Means clustering method was used in SPSS software (version 30). Using this analysis, years were well separated into cluster groups based on similar frequencies.

### Results and Discussion

The results of this study showed that changes in the spatial distribution and intensity of dust events were significant between 2001 and 2024. In the early years of the study (2001–2008), the frequency of dust occurrence on the floor was low, but from 2012 onwards, the area of floors with medium and high frequency increased significantly. Although in some years, such as 2019 and 2020, the abundance of dust decreased relatively, in previous years the trend of this phenomenon was increasing. The results of cluster analysis using SPSS software (version 30) showed that the highest frequency of dusty days in 2014–2015 and 2015–2016 belonged to cluster group 2. Also, the lowest frequency of dusty days in the years 2001–2002 to 2007–2008, 2019–2020, and 2020–2021 was related to cluster 4. Also, validation result using data from the Shabestar synoptic station, (the nearest station to the northern margin of Lake Urmia), indicated that the relationship between station observations (codes 5, 6, and 8) and the area of pixels with high dust storm frequency in remote sensing image was weak and not statistically insignificant. These findings indicated that dust particles rising from the dried lake bed are unable to be transported over long distances and settle very close to their point of origin.

### Conclusion and Suggestions

The result of the study of the spatial and temporal frequency of dust storm events from 2001 to 2024 on the northern margin of Lake Urmia showed that the annual changes in the frequency of dusty days in the mentioned region were significant. Therefore, the role of climatic, geological, soil and environmental factors is important. The results of this study indicate the need for continuous monitoring and updating of data in the mentioned region so that the damaging trend of dust events in the region can be identified and managed in a timely manner. Therefore, it is suggested that the results of this research be used to design management strategies and reduce environmental risks in the region so that favorable decisions can be made at the local and regional levels. It is also suggested that data updates be carried out continuously on the northern shore of Lake Urmia to identify harmful trends in a timely manner and to make local and regional decisions with more accuracy and effectiveness. On the other hand, by integrating climatic, geological, and soil information, it is possible to help develop early warning systems and preventive management and minimize the negative effects of this phenomenon on the environment and local communities.

**Keywords:** Dust storm frequency, K-Means clustering, Lake Urmia, MAIAC algorithm, remote sensing

**Article Type:** Research Article

### Conflicts of interest

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

### Data Availability Statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

### Authors' Contribution

**Author 1:** Performed software/statistical analyses, conducted meteorological data analysis, and prepared the initial draft of the manuscript

**Author 2:** Contributed to conceptualization and idea development, carried out remote sensing procedures and analyses, revised and edited the manuscript, and evaluated the results