

ارتباط تغییرات پهنه آبی و پوشش گیاهی در شرق دریاچه ارومیه با پدیده ریزگردها

حبیبه هراتی^۱، مسعود کیادلیری*^۲، احمد توانا^۲، آبتین راهنورد^۲، رضا امیرنژاد^۲

^۱ دانشجوی دکترای محیط زیست، گروه محیط زیست، واحد تنکابن، دانشگاه آزاد اسلامی
^۲ استادیار گروه محیط زیست، واحد تنکابن، دانشگاه آزاد اسلامی

دریافت: ۱۳۹۹/۶/۱۵، بازنگری: ۱۳۹۹/۸/۲۵، پذیرش: ۱۳۹۹/۹/۲۹، نشر آنلاین: ۱۳۹۹/۹/۲۹

چکیده

در سال‌های اخیر به دلیل خشک شدن تدریجی بخش‌هایی از دریاچه ارومیه، کانون‌های متعددی از ریزگردهای نمکی در این مناطق تشکیل شده که منجر به تأثیرات بارزی در کیفیت هوا و پوشش گیاهی نواحی اطراف این دریاچه شده است. در این مطالعه با هدف آشکارسازی ارتباط رخداد‌های گردوغباری حریم شرقی دریاچه ارومیه و پوشش گیاهی اطراف آن از تغییرپذیری سالانه و بلندمدت این پهنه آبی در دوره آماری ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹، از شاخص‌های (Normalized Difference Vegetation Index) NDVI، (Normalized Difference Water Index) NDWI، (Aerosol Optical Depth) AOD و شاخص (Dust Storm Index) DSI ایستگاهی استفاده شد. بدین منظور از همبستگی Perason، آنالیز T-test، آنالیز تحلیل روند شیب و تست من-کندال (Mann-Kendal) به منظور آشکارسازی ارتباط پارامترهای مطالعه و بررسی روند تغییرات در دوره مطالعه استفاده شد. نتایج کلی در دوره ۲۹ ساله مطالعه در منطقه نشان داد که هم فراوانی گردوغبار و هم شدت گردوغبار، افزایش داشته و این افزایش به صورت معنی‌داری همگام با کاهش مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه و کاهش تراکم پوشش گیاهی حریم شرقی دریاچه ارومیه بوده است. در سال‌هایی که مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه کاهش داشته و پوشش گیاهی نیز هم‌زمان به صورت نسبی پایین بوده است، بیش‌ترین فراوانی (DSI) و شدت (AOD) گردوغبار مشاهده شده است. تأثیر هم‌زمانی کاهش پهنه آبی دریاچه و کاهش میانگین NDVI در سطح منطقه، به صورت توأمان (Synergy) علاوه بر این‌که منجر به افزایش DSI در سطح منطقه شده است، شاخص AOD را نیز، افزایش داده است.

کلیدواژه‌ها: تحلیل روند، گردوغبار، تحلیل همبستگی، پهنه آبی، دریاچه ارومیه.

۱- مقدمه

دریاچه‌ها در جهان به‌شمار می‌رود (Boroughani و همکاران، ۲۰۱۹؛ Mardi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Sotoudehian و همکاران، ۲۰۱۶؛ Dehghanipour و همکاران، ۲۰۲۰؛ Valiollahi و همکاران، ۲۰۱۹).

وقوع طوفان‌های نمکی به دلیل خشک شدن بخش‌هایی از دریاچه ارومیه در سال‌های اخیر، یکی از مسائل مورد توجه محققان بوده است. کانون‌های ریزگرد اطراف دریاچه ارومیه که دارای ترکیبات نمکی است و در سال‌های اخیر فعال شده‌اند، هر ساله هم‌زمان با فصل وزش بادهای موسمی، موجی از گردوغبار نمکی را در هوای برخی شهرهای هم‌جوار دریاچه منتشر می‌کند (Gholampour و همکاران، ۲۰۱۵؛ Alkhayer و همکاران، ۲۰۱۹؛ Mardi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Delfi و همکاران، ۲۰۱۹؛ AghaKouchak و همکاران، ۲۰۱۵) که جمعیتی نزدیک به شش

قسمت عمده کشور ایران در غرب آسیا در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهانی قرار دارد. از سوی دیگر این کشور در سال‌های گذشته به دلیل خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت و تغییرات اقلیمی و ایجاد پروژه‌های توسعه‌ای مانند سدسازی‌ها، شاهد پدیده خشک شدن دریاچه‌ها بوده است که بحران‌های بزرگ زیست‌محیطی همچون ایجاد طوفان‌های شن و نمک را به همراه داشته است (Alkhayer و همکاران، ۲۰۱۹؛ Mohebbi و Eimanifar، ۲۰۰۷؛ Tourian و همکاران، ۲۰۱۵؛ Klingmüller و همکاران، ۲۰۱۶؛ Delfi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Moghim و Ramezanpoor، ۲۰۱۹؛ Namdari و همکاران، ۲۰۱۶).

خشک شدن سریع و نگران‌کننده دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و دومین دریاچه فوق‌اشباع از نمک دنیا، بارزترین نمونه تشدید خشکی

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴۴۰۱۷۵۲۱

بیماری‌های مرتبط با فشارخون بالا، ناراحتی‌های قلبی-عروقی و تنفسی، مشکلات بینایی و مرگ‌ومیرها در شهرها و روستاهای اطراف دریاچه ارومیه از قبیل تبریز و ارومیه نشان‌دهنده تأثیرات گردوغبار با منشأ نمک در سلامت ساکنان اطراف این پهنه آبی بوده است (Sotoudeheian و همکاران، ۲۰۱۶؛ Gholampour و همکاران، ۲۰۱۵).

تأثیرات تغییرپذیری پهنه آبی دریاچه ارومیه تنها به گردوغبار مستقیم ختم نمی‌شود، ترسیب گردوغبار نمکی در اراضی زراعی و مراتع تا صدها کیلومتر اطراف دریاچه، باعث کاهش شدید حاصلخیزی خاک و به تبع آن کاهش شدید پوشش گیاهی در مراتع و بسیاری از اراضی کشاورزی و باغی می‌شود (Delfi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Boroughani و همکاران، ۲۰۱۹؛ Mardi و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین گسترش شورزارها و بیابان‌زایی، تغییر الگوهای اقلیمی مناطق وابسته، تخریب زیستگاه‌های طبیعی پرندگان، برهم زدن موازنه هیدروژئوشیمیایی^۲ سفره‌های آبی منطقه و بروز طوفان‌های نمک را می‌توان از بارزترین پیامدهای خشک شدن دریاچه برشمرد (Valiollahi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Alkhayer و همکاران، ۲۰۱۹؛ Eimanifar و Mohebbi، ۲۰۰۷؛ AghaKouchak و همکاران، ۲۰۱۵).

بنابراین تأثیرات گردوغبار ناشی از خشک شدن دریاچه ارومیه هم به صورت مستقیم از طریق ایجاد کانون‌های داخلی گردوغبار (عموماً گردوغبار با منشأ رسوبات نمک)، و هم به صورت غیرمستقیم از طریق تضعیف پوشش گیاهی، می‌تواند کیفیت هوای اطراف دریاچه را تا شعاع صدها کیلومتر تحت تأثیر قرار دهد (Boroughani و همکاران، ۲۰۱۹؛ رایگانی و خیراندیش، ۱۳۹۶). تاکنون برای شناسایی کانون‌های تولید ریزگردها، عوامل دخیل در ایجاد آن‌ها، تحلیل حوزه جابه‌جایی و انتقال آن‌ها و تأثیر آن بر محیط اطراف مطالعات زیادی صورت گرفته است، به‌ویژه آن‌که با پیشرفت‌های سنجش‌ازدوری و داده‌های ماهواره‌ای، امکان مطالعات علمی در این خصوص با دقت مناسب در سطح جهانی فراهم شده است (Klingmüller و همکاران، ۲۰۱۶؛ Mardi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Tan، ۲۰۱۶؛ Tourian و همکاران، ۲۰۱۵؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۴؛ Mei و همکاران، ۲۰۱۸؛ Dong و همکاران، ۲۰۱۳؛ Moghim و Ramezanpoor، ۲۰۱۹؛ Goudie، ۲۰۱۸؛ Sun و همکاران، ۲۰۱۹؛ Namdari و همکاران، ۲۰۱۶؛ ولی‌زاده کامران و نامداری، ۱۳۹۹؛ رایگانی و خیراندیش، ۱۳۹۶). این فناوری با وجود ویژگی‌هایی مانند پوشش گسترده و مستمر در فضا، می‌تواند در نظارت بر طوفان‌های گردوغبار نقش مهمی داشته و با فراهم آوردن امکان مانیتورینگ از راه دور طوفان‌های گردوغباری برای نظارت، ردیابی، پیش‌بینی و ارزیابی

میلیون نفر به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تحت تأثیر عواقب خشک شدن این دریاچه قرار می‌گیرند (Tourian و همکاران، ۲۰۱۵). مساحت دریاچه ارومیه از ۳۱۲۰،۰۶ کیلومترمربع در سال ۲۰۱۰ به کم‌ترین حد خود ۸۸۷،۴۶ در سال ۲۰۱۴ کاهش یافته و سطح شوری آن نیز افزایش قابل توجهی داشته است (Moghim و Ramezanpoor، ۲۰۱۹؛ فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ محمدزاده و فیضی‌زاده، ۱۳۹۶).

سطح آب دریاچه ارومیه تنها در یک دهه اخیر بیشتر از پنج متر کاهش یافته و غلظت نمک این دریاچه از ۱۸۵ به ۲۲۰ گرم در لیتر افزایش یافته است (Gholampour و همکاران، ۲۰۱۵). بررسی تغییرات زمانی-مکانی غلظت ریزگردها در دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ و در حوضه نفوذ دریاچه ارومیه در استان‌های آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی (مجاور دریاچه) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مادیس^۱ و داده‌های AOD نشان داده است که علی‌رغم وجود نوسانات سال‌به‌سال، روند افزایش کلی در غلظت ریزگردها دیده می‌شود (ولی‌زاده کامران و نامداری، ۱۳۹۹). همچنین بررسی تصاویر ماهواره مادیس در دوره ۲۰۰۰-۲۰۱۷ شواهد قوی را مبنی بر این‌که منطقه خشک دریاچه به یک منبع فعال گردوغبار تبدیل شده است، نشان می‌دهد (Tourian و همکاران، ۲۰۱۵؛ Boroughani و همکاران، ۲۰۱۹).

طی دو دهه اخیر، تغییرات اقلیمی کلان در شمال غرب ایران، کاهش میزان بارش، افزایش تبخیر و تفرق ناشی از افزایش متوسط درجه حرارت و دخالت عوامل انسان‌ساخت از قبیل سدسازی (احداث ۷۴ سد در حوضه آبریز دریاچه ارومیه از سال ۱۹۹۵ به بعد)، سبب بروز تغییرات گسترده‌ای در حجم آب ورودی دریاچه و مساحت این پهنه آبی همراه با افزایش غلظت نمک شده است (Delfi و همکاران، ۲۰۱۹؛ AghaKouchak و همکاران، ۲۰۱۵؛ Gholampour و همکاران، ۲۰۱۵؛ Valiollahi و همکاران، ۲۰۱۹؛ Mardi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Sotoudeheian و همکاران، ۲۰۱۶؛ Alkhayer و همکاران، ۲۰۱۹).

تغییرات مساحت و حجم آب این دریاچه در مقیاس سالانه و فصلی تأثیرات بارزی در کیفیت خاک و هوای نواحی اطراف این دریاچه داشته است (Boroughani و همکاران، ۲۰۱۹؛ AghaKouchak و همکاران، ۲۰۱۵؛ Eimanifar و Mohebbi، ۲۰۰۷؛ Tourian و همکاران، ۲۰۱۵).

به‌عبارت‌دیگر، بخش‌هایی از دریاچه که خشک می‌شوند، به‌مثابه یک کانون گردوغبار داخلی عمل کرده که صدها کیلومتر اطراف خود را متأثر می‌کنند (Dehghanipour و همکاران، ۲۰۲۰؛ Tan، ۲۰۱۶؛ Shirmohammadi و همکاران، ۲۰۲۰). گزارش‌های وزارت بهداشت ایران (۱۳۹۸)، نشان داده است که وقوع برخی

همکاران، ۱۳۹۳؛ بیات و همکاران، ۱۳۹۵؛ Delfi و همکاران، ۲۰۱۹).

شاخص ایستگاهی مانند 2SDI به همراه شاخص سنجش از دوری AOD، می‌توانند فراوانی و شدت گردوغبار را نشان دهند (Mei و همکاران، ۲۰۱۸؛ Dong و همکاران، ۲۰۱۳؛ Klingmüller و همکاران، ۲۰۱۶؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۴؛ Delfi و همکاران، ۲۰۱۹؛ شمشیری و همکاران، ۱۳۹۳؛ Moghim و Ramezanpoor، ۲۰۱۹؛ Namdari و همکاران، ۲۰۱۶؛ Boroughani و همکاران، ۲۰۱۹؛ Mardi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Tan، ۲۰۱۶). از طرف دیگر شاخص NDWI که در واقع شاخص آشکارسازی پهنه‌های آبی است و نیز شاخص NDVI که مربوط به پوشش گیاهی است، می‌توانند فاکتورهای مستقیم و غیرمستقیم مولد و تأثیرپذیر گردوغبار حوضه را آشکار کنند (Wang و همکاران، ۲۰۱۴؛ Dong و همکاران، ۲۰۱۳؛ Mardi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Tan، ۲۰۱۶؛ شمشیری و همکاران، ۱۳۹۳؛ بیات و همکاران، ۱۳۹۵).

با توجه به اهمیت آثار منفی طوفان‌های نمکی و همچنین روند افزایشی آن‌ها در حوضه شرقی دریاچه ارومیه، بررسی تغییرات زمانی و مکانی ریزگردهای این دریاچه و اثرات آن در بیش از یک دهه اخیر می‌تواند اهمیت این پدیده را در سال‌های اخیر نشان دهد و به‌منظور یکی از شاخص‌های تصمیم‌گیری در مدیریت بحران طوفان‌های نمکی مورداستفاده قرار گیرد. هدف اساسی این تحقیق آشکارسازی تأثیرپذیری رخدادهای گردوغباری حریم شرقی دریاچه ارومیه از تغییرپذیری سالانه و بلندمدت پهنه آبی دریاچه ارومیه بوده است. این موضوع با بررسی رابطه شاخص‌های سنجش از دوری تفاضل نرمال شده آب (NDWI)، شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) استخراج شده از سنجنده‌های TM و OLI/TIRS ماهواره لندست^۴ در طی دوره آماری (۱۹۹۰-۲۰۱۹) و شاخص عمق اپتیکی ائروسول^۵ (AOD) و شاخص طوفان گردوغبار (DSI) با استفاده از مدل‌های تحلیل روند پارامتریک و ناپارامتریک و تحلیل همبستگی زمانی و مکانی آن‌ها انجام گردید.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه در یک فرورفتگی طبیعی درون حوضه آبریز، در ۱۷ کیلومتری شرق شهرستان ارومیه و ۵۵ کیلومتری غرب شهر تبریز، در بین استان‌های آذربایجان شرقی و غربی در شمال غرب ایران قرار گرفته است. این دریاچه در سال‌های دور (۱۹۹۸)

فاجعه به‌طور گسترده‌ای مورداستفاده قرار گیرد (Goudie؛ ۲۰۱۹؛ Sun و همکاران، ۲۰۱۹؛ Tan، ۲۰۱۶؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۴؛ آرامی و همکاران، ۱۳۹۸؛ رایگانی و خیراندیش، ۱۳۹۶؛ شمشیری و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین محدودیت داده‌های ایستگاهی در برآورد شاخص‌های کمی مربوط به ریزگردها، سطح وسیع و تغییرات شدید این پدیده از نظر زمانی و مکانی، سبب شده است که اطلاعات سنجش از دور ماهواره‌ای با توجه به تفکیک زمانی و مکانی قابل قبول بهترین ابزار برای بررسی توزیع مکانی و زمانی ریزگردها محسوب شود (Sun و همکاران، ۲۰۱۹؛ Tan، ۲۰۱۶؛ Mei و همکاران، ۲۰۱۸؛ Dong و همکاران، ۲۰۱۳؛ Klingmüller و همکاران، ۲۰۱۶؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۴؛ Delfi و همکاران، ۲۰۱۹؛ شمشیری و همکاران، ۱۳۹۳؛ آرامی و همکاران، ۱۳۹۸؛ بیات و همکاران، ۱۳۹۵).

طوفان‌های گردوغبار، بسته به طیف وسیعی از عوامل، از جمله ماهیت مواد سطح حوضه و شرایط آب و هوایی موجود، در فضا و زمان بسیار متغیر هستند (شمشیری و همکاران، ۱۳۹۳؛ Goudie، ۲۰۱۸). ثبت طوفان‌های گردوغبار شدید و فراوان‌تر در ایستگاه‌های پیرامون دریاچه، در سال‌هایی که مساحت دریاچه در حداقل خود بوده است نسبت به سال‌هایی که دریاچه پر آب بوده است، نیز می‌تواند یکی از ابزارهای آشکارسازی تأثیر تغییرپذیری سالانه پهنه آبی بر فراوانی رخدادهای گردوغبار باشد (Dong و همکاران، ۲۰۱۳؛ Mardi و همکاران، ۲۰۱۸). همچنین برای مدیریت کاهش گردوغبار و رسوب‌گذاری مرتبط با آن، تجزیه و تحلیل روند تغییرات کانون‌های گردوغبار بسیار مفید خواهد بود. این روش می‌تواند برخی اطلاعات مفید را به تصمیم‌گیرندگان در مورد وقوع گردوغبار در آینده و کنترل آن به‌دست دهد (Dong و همکاران، ۲۰۱۳؛ رایگانی و خیراندیش، ۱۳۹۶).

یکی از عوامل اثرگذار در فرکانس وقوع پدیده گردوغبار، دخالت‌های انسانی به شکل تغییر در پوشش زمین است. شناسایی روند تغییرات پوشش زمین و تغییرات ذرات معلق موجود در هوا می‌تواند به شناسایی صحیح کانون‌های گردوغبار کمک فراوانی نماید (Dong و همکاران، ۲۰۱۳؛ Mardi و همکاران، ۲۰۱۸؛ Tan، ۲۰۱۶؛ Wang و همکاران، ۲۰۱۴).

از سوی دیگر مطالعات نشان داده است که شاخص‌های سنجش از دوری و اطلاعات ایستگاهی ارتباط بین فراوانی گردوغبارهای ثبت‌شده در اطراف دریاچه با تغییرات پهنه آبی (تأثیر مستقیم) و تغییر در پوشش گیاهی (تأثیر غیرمستقیم) را آشکار می‌کنند (Dong و همکاران، ۲۰۱۳؛ Boroughani و همکاران، ۲۰۱۹؛ Mardi و همکاران، ۲۰۱۸؛ شمشیری و

داده‌های مربوط به گردوغبار که شامل فراوانی و شدت گردوغبار می‌باشد. برای فراوانی گردوغبار از کدهای گردوغباری ۱۶ ایستگاه اطراف دریاچه طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۹ و شاخص طوفان گردوغبار (DSI) استفاده شد (Tan, ۲۰۱۶; O'Loingsigh و همکاران، ۲۰۱۴).

برای بررسی شدت گردوغبار از شاخص عمق اپتیکی ائروسول (AOD) سنجنده MODIS استفاده شد. شاخص عمق اپتیکی ائروسول‌ها در هوا (AOD) یکی از محصولات سنجنده MODIS می‌باشد (Moghimi و Ramezani, ۲۰۱۹; Delfi و همکاران، ۲۰۱۹). در این راستا محصول MOD04 (MODIS AOD) (550 nm) با حد تفکیک مکانی ۱۰ کیلومتر از پایگاه اطلاعاتی این سنجنده دریافت شد. برای بررسی تغییرات دوره‌ای و سالانه پوشش گیاهی منطقه از شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) سنجنده‌های TM و OLI/TIRS ماهواره‌های لندست ۵ تا ۸ و برای پایش تغییرات سالانه و دوره‌ای پهنه آبی دریاچه ارومیه نیز از شاخص تفاضل نرمال شده پهنه آبی (NDWI) همان ماهواره استفاده گردید.

۲-۳- آشکارسازی روند سری زمانی تغییرات شاخص‌ها

برای بررسی این‌که آیا وضعیت شدت و فراوانی گردوغبار در سطح منطقه به‌عنوان معلول دو پیشران اصلی یعنی تغییرات مساحت پهنه آبی دریاچه و تغییرات پوشش گیاهی طی دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹، در سطح منطقه مورد بررسی تغییرات معنی‌داری داشته است یا خیر، از آنالیز ناپارامتریک تحلیل روند شیب و تست ناپارامتریک من-کندال استفاده شد. تخمین‌گر شیب Sen⁺، یک روش ناپارامتریک است که در آن جهت محاسبه شیب‌خط روند یعنی Q_i ابتدا بایستی شیب بین هر جفت داده مشاهداتی، محاسبه گردد (Fernandes و Leblanc, ۲۰۰۵).

تست من-کندال نیز یک روش ناپارامتریک برای بررسی معنی‌داری یا عدم معنی‌داری روند آشکار شده از تخمین‌گر شیب Sen است. فرض صفر آزمون من-کندال بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد (Blain, ۲۰۱۳). در این روش ابتدا اختلاف بین هر یک از مشاهدات با تمام مشاهدات پس‌از آن محاسبه شده و پارامتر S مطابق رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

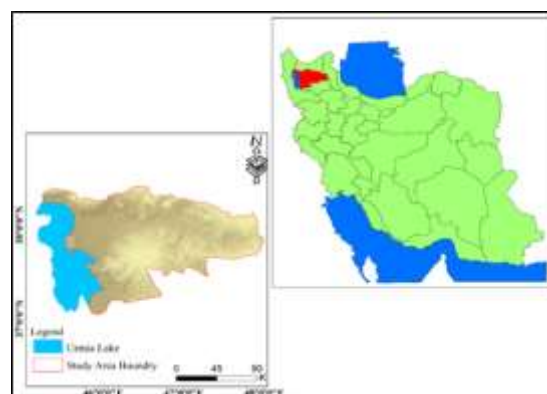
که در این روابط، n تعداد مشاهدات سری، x_j و x_k به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری است.

مساحتی حدود ۵۴۳۳ کیلومترمربع را در بر می‌گرفت (Mardi و همکاران، ۲۰۱۸; Alkhayer و همکاران، ۲۰۱۹; Eimanifar و Mohebbi, ۲۰۰۷). گزارش شده است که سطح زمین و سطح آب دریاچه از سال ۱۹۹۵ به دلیل دلایل مختلف آب و هوایی و انسان‌شناسی در حال کاهش است. این دریاچه حاوی حدود ۸ میلیارد تن نمک است (Dehghanipour و همکاران، ۲۰۲۰).

با توجه به جهت باد غالب منطقه که به سمت شرق و شمال شرق است، بخش‌های شرقی دریاچه در دو دهه اخیر به واسطه تغییرات دوره‌های خشک و مرطوب دریاچه ارومیه، تحت تأثیر طوفان‌های نمکی، تغییرات زیست‌محیطی بسیاری را داشته است (Mardi و همکاران، ۲۰۱۸; Valiollahi و همکاران، ۲۰۱۹; Delfi و همکاران، ۲۰۱۹; ولی‌زاده کامران و نامداری، ۱۳۹۹).

کیفیت هوا و فراوانی رخدادها گردوغبار به‌ویژه گردوغبارهای با منشأ محلی در این بخش از دریاچه در دوره‌های خشک و مرطوب دریاچه دچار تغییرات عمده‌ای شده است (Eimanifar و Mohebbi, ۲۰۰۷).

منطقه مورد مطالعه شامل زیرحوضه‌های شرقی دریاچه ارومیه بوده که با مساحت ۲۰۲۹۲ کیلومترمربع بخش وسیعی از استان آذربایجان شرقی را پوشش می‌دهد. مهم‌ترین مرکز جمعیتی این قسمت شهر دو میلیون نفری تبریز است (شکل (۱)). میانگین بارش سالانه حوضه دریاچه ارومیه ۳۵۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه بین ۶/۵ درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات بالاتر تا ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد در ارتفاعات پایین‌تر متغیر است و تبخیر سالانه از دریاچه بین ۹۰۰ تا ۱۱۷۰ میلی‌متر متغیر است (Alkhayer و همکاران، ۲۰۱۹).



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه (حریم شرقی دریاچه ارومیه)

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

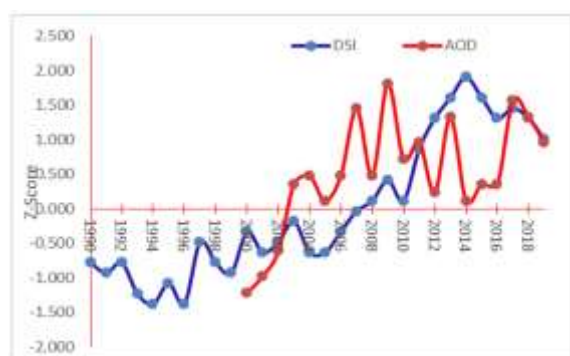
داده‌هایی مورد استفاده در این تحقیق در جدول (۱) ارائه شده است. سه دسته از داده‌ها در این تحقیق استفاده شده است.

بررسی ارتباط شدت (AOD) و فراوانی (DSI) گردوغبار در ارتباط با تغییرات سالانه (NDWI) و (NDVI) در دو فاز زمانی استفاده شد.

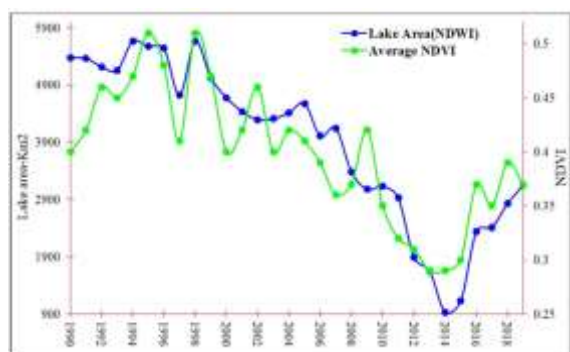
در ادامه به منظور تحلیل همبستگی بین فراوانی و شدت گردوغبار و تغییرات مساحت پهنه آبی دریاچه و پوشش گیاهی منطقه از ماتریس همبستگی Perason در سطح اطمینان ۰/۹۵ (Pvalue = 0.05)، استفاده شده است. از آنالیز T-test به منظور

جدول ۱- داده‌های مورد استفاده در تحقیق

نوع داده	داده اصلی	شاخص	منبع	دوره آماری
گردوغبار	فراوانی رخداد گردوغبار	DSI	Meteorological Station (Inverse Distance Weighting)	۲۰۱۹-۱۹۹۰
	شدت گردوغبار	AOD	MODIS AOD(550 nm) (MOD04)	۲۰۱۹-۲۰۰۰
پوشش گیاهی		NDVI	LANDSAT-TM-OLI/TIRS	۲۰۱۹-۱۹۹۰
سطح پهنه آبی دریاچه		NDWI	LANDSAT-TM-OLI/TIRS	۲۰۱۹-۱۹۹۰



شکل ۲- روند سری زمانی ۲۹ ساله شاخص شدت گردوغبار (AOD) و فراوانی رخدادهای گردوغبار در منطقه (DSI)



شکل ۳- روند سری زمانی دو شاخص تغییرات مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه و میانگین شاخص NDVI حریم شرقی دریاچه ارومیه طی دوره آماری ۲۰۱۹-۱۹۹۰

میانگین فضایی شاخص پوشش گیاهی (NDVI) در سطح منطقه، در سال ۱۹۹۰ برابر ۰/۳۹ بوده و انحراف معیار فضایی آن برابر ۰/۰۸ بوده است (شکل ۵). در حالی که در سال ۲۰۰۰ این دو آماره فضایی دچار تغییراتی شده‌اند به صورتی که میانگین فضایی NDVI در سطح منطقه کاهش یافته و به ۰/۳۵ رسیده است. اما انحراف معیار فضایی شاخص در سطح منطقه روند افزایشی داشته و به ۰/۱۰ رسیده است.

۳- نتایج

نتایج حاصل از بررسی روند سری زمانی ۲۹ (۱۹۹۰-۲۰۱۹) ساله تغییرات شاخص شدت و فراوانی گردوغبار در حریم شرقی دریاچه ارومیه بر اساس داده‌های ایستگاهی و نیز بر اساس شاخص عمق اپتیکی آبروسل‌ها بیانگر آن بود که در طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹، هم شاخص فراوانی رخدادها گردوغبار (DSI) و هم شاخص شدت گردوغبار (AOD)، روند افزایشی داشته است (شکل ۲). تحلیل روند سری زمانی دو شاخص تغییرات سطح آب دریاچه (NDWI) و پوشش گیاهی متوسط (NDVI) حریم شرقی دریاچه ارومیه استخراج شده از ماهواره لندست، بیانگر آن بوده است که هر دوی این شاخص‌ها طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۹ روند کاهشی چشمگیری داشته است (شکل ۳).

روند کاهشی به صورتی بوده که مساحت دریاچه در ژوئن سال ۱۹۹۰ از حدود ۵۷۰۰ کیلومتر مربع به کم‌تر از ۲۵۰۰ کیلومتر مربع در ژوئن سال ۲۰۱۰ رسیده است که این کاهش ۵۵ درصدی در مساحت دریاچه ارومیه طی یک دوره ۲۰ ساله بسیار چشمگیر است. اما مساحت دریاچه در سال ۲۰۱۴ به کم‌ترین حد خود یعنی ۹۲۸ کیلومتر مربع رسیده است که نسبت به سال ۱۹۹۰ حدود ۸۲ درصد کاهش در مساحت دریاچه مشاهده شده است. در شش ساله ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ در واقع بزرگ‌ترین کاهش در مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه روی داده است. در این دوره به طور متوسط مساحت دریاچه حداقل ۶۵ درصد نسبت به سال ۱۹۹۰ کم‌تر شده است (شکل ۴).

هم‌زمان با روند کاهشی مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه، شاخص پوشش گیاهی متوسط سطح منطقه شرقی دریاچه نیز روند کاهشی از خود نشان داده است. تغییر در توزیع فضایی رطوبت در سطح منطقه به واسطه کاهش بارش سالانه و حاکمیت خشک‌سالی و به تبع آن کاهش در مساحت دریاچه، منجر به ایجاد نوسانات شدید سالانه و بروز روند کاهشی در متوسط شاخص پوشش گیاهی شده است.

در سال ۲۰۱۰ میانگین فضایی شاخص در کمترین مقدار خود بوده (۰/۳۰) و انحراف معیار فضایی پوشش گیاهی در سطح منطقه به بیشترین مقدار خود در بین ۴ دوره مورد بررسی رسیده است (۰/۱۴). در سال ۲۰۱۹ شاخص پوشش گیاهی در سطح حریم شرقی دریاچه ارومیه افزایشی بوده است و همزمان با آن شاخص انحراف معیار به مقدار ۰/۱۲ رسیده است. بنابراین روندی که در پوشش گیاهی منطقه مشاهده شد این بود که همزمان با کاهش میانگین فضایی سبزیگی در سطح منطقه، میزان همگونی یا هموزیستی توزیع فضایی پوشش گیاهی نیز در سطح منطقه کمتر شده است.

در جدول (۲) نتایج حاصل از تحلیل روند شدت و فراوانی گردوغبار در حریم شرقی دریاچه ارومیه بیانگر آن بود که هم شدت و هم فراوانی رخداد های گردوغبار طی دوره مورد بررسی به صورت معنی داری افزایش داشته است. فراوانی رخداد های کدهای گردوغبار سالانه (DSI) ۰/۱ واحد افزایش داشته و همزمان با آن غلظت یا شدت گردوغبار در منطقه، سالانه ۰/۰۸ واحد AOD افزایش داشته است که بر اساس آماره MANN-Kendall هر دو مورد در سطح اطمینان ۰/۹۵ معنی دار بوده است. در مورد تغییرات مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه نیز، مساحت دریاچه ارومیه طی دوره آماری مورد بررسی روند کاهشی مستمر داشته است که بر اساس آماره Sens Slop Estimator برابر ۱۴۲ کیلومترمربع کاهش در سال بوده است.

متوسط NDVI حریم شرقی دریاچه نیز به طور کلی طی دوره ۲۹ ساله مورد بررسی یعنی از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۹ روند کاهشی داشته و به طور متوسط تراکم پوشش گیاهی در حریم شرقی دریاچه سالانه ۰/۰۰۵ واحد NDVI کاهش داشته است که همانند روند کاهش مساحت دریاچه این روند کاهشی پوشش گیاهی منطقه نیز معنی دار بوده است. نتایج حاصل از تحلیل روند سری زمانی تغییرات مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه نشان داد که مساحت دریاچه و متوسط شاخص پوشش گیاهی حریم شرقی دریاچه طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۹ یعنی طی یک دوره ۲۹ ساله به صورت معنی داری کاهش داشته و از طرف دیگر به موازات این کاهش در مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه و متوسط پوشش گیاهی منطقه، شدت و فراوانی گردوغبار در سطح منطقه به صورت معنی داری روند افزایشی داشته است.

برای تحلیل همبستگی زمانی بین فراوانی و شدت گردوغبار سالانه در منطقه و نیز تغییرات مساحت پهنه آبی دریاچه و پوشش گیاهی منطقه از ماتریس همبستگی Perason در سطح اطمینان ۰/۹۵ (Pvalue = 0.05)، استفاده شد که نتایج به صورت جدول (۳) ارائه شده است. همان طور که در این جدول دیده می شود، شاخص فراوانی رخداد های گردوغبار (DSI)، اولاً به صورت معنی-



(الف)



(ب)



(ج)

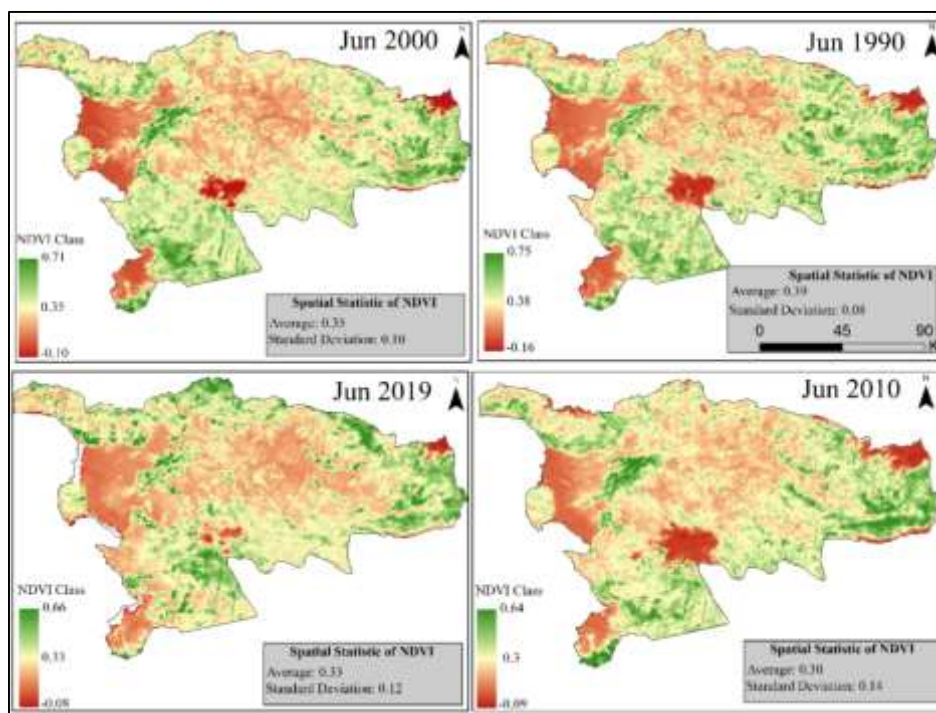


(د)

شکل ۴- تغییرات فضایی پهنه آبی دریاچه ارومیه طی چهار دوره: الف) ژوئن ۱۹۹۰، ب) ژوئن ۲۰۰۰، ج) ژوئن ۲۰۱۰، د) ژوئن ۲۰۱۹

به تغییرات پهنه آبی دریاچه ارومیه وابسته بوده‌اند. به‌صورتی که شاخص DSI همبستگی برابر ۰/۹۶- با شاخص NDWI نشان داد درحالی‌که شاخص AOD همبستگی برابر ۰/۶۵- با شاخص NDWI نشان داده است.

داری با شاخص AOD همبسته بوده است که گویای آن است هم- زمان که فراوانی رخدادهای گردوغبار در سطح منطقه افزایش داشته، شدت گردوغبار نیز در سطح منطقه افزایشی بوده است. اما دو شاخص گردوغبار یعنی AOD و DSI به‌صورت معنی‌داری نیز



شکل ۵- تغییرات توزیع فضایی NDVI حریم شرقی دریاچه ارومیه طی ۴ دوره ژوئن ۱۹۹۰ تا ژوئن ۲۰۱۹

جدول ۲- نتایج آنالیز روند و آزمون Mann-Kendal سری زمانی ۲۹ ساله شاخص شدت گردوغبار (AOD)، فراوانی رخدادهای گردوغبار (DSI)، شاخص NDVI و NDWI در منطقه

NDVI	مساحت دریاچه	DSI ایستگاهی	MOD04-AOD	تست‌های تحلیل روند ناپارامتریک
۰/۰۰۵	۱۴۲ Km/year	۰/۱۰	۰/۰۸	تحلیلگر روند شیب (Q)
۰/۰۴*	۰/۰*	۰/۰۰۱*	۰/۰۰۲*	من- کندال

*- معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد (P_value = 0.05)

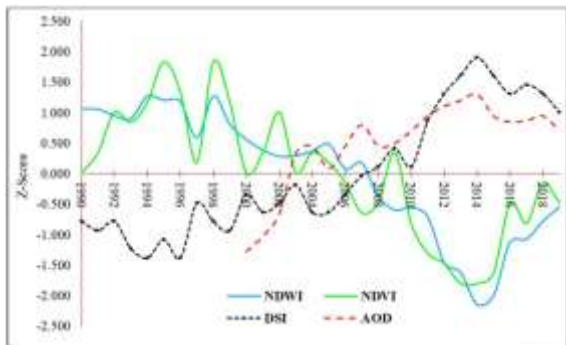
برآیند کلی گردوغبار در منطقه طی دوره ۲۹ ساله مطالعه نشان داد که هم فراوانی گردوغبار (DSI) و هم شدت گردوغبار (AOD)، افزایش داشته است و این افزایش به‌صورت معنی‌داری همگام با کاهش مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه و کاهش تراکم پوشش گیاهی حریم شرقی دریاچه بوده است (شکل ۶).

نتایج تحلیل بیانگر آن بود که در سال‌هایی که مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه کاهش داشته است و پوشش گیاهی نیز هم- زمان به‌صورت نسبی پایین بوده است، بیش‌ترین فراوانی و شدت گردوغبار مشاهده شده است، به‌عبارت‌دیگر تأثیر هم‌زمانی کاهش پهنه آبی دریاچه و کاهش میانگین شاخص پوشش گیاهی در سطح منطقه، به‌صورت سینرژیک علاوه بر این‌که منجر به افزایش شاخص DSI در سطح منطقه شده است، شاخص AOD که نمایه

جدول ۳- ماتریس تحلیل همبستگی Pearson بین دو شاخص شدت گردوغبار (AOD) و فراوانی گردوغبار (DSI) و تغییرات پهنه آبی دریاچه ارومیه (NDWI) و تغییرات پوشش گیاهی (NDVI) در سطح منطقه مورد مطالعه

شاخص‌ها	سطح معنی‌داری	DSI	AOD	NDVI	NDWI
DSI	R	۱	۰/۷۵	-۰/۷۰	
	Sig	۰/۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰	
AOD	R	۱	۱	-۰/۸۰	
	Sig	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	-۰/۰۱۴
NDVI	R	۱	۰/۸۸	۱	
	Sig	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	
NDWI	R	۱	۱	۱	
	Sig	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	

سالانه وضعیت پوشش گیاهی منطقه، همبستگی معنی داری با شاخص‌های گردوغباری دارد (جدول (۵)).



شکل ۶- ارتباط سری زمانی تغییرات سطح آب دریاچه (NDWI) و پوشش گیاهی (NDVI) با شدت (AOD) و فراوانی (DSI) رخداد‌های گردوغباری در سطح منطقه



شکل ۷- مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه در سال ۲۰۰۱ که بسیار نزدیک به میانگین بلندمدت دوره بوده است و به‌عنوان سال پایه انتخاب شد

شدت گردوغبار است را نیز، افزایش داده است. برای بررسی و آشکارسازی ارتباط بین تغییرات مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه و فراوانی و شدت گردوغبار در منطقه مورد مطالعه اقدام به بررسی وضعیت دو شاخص شدت عمق اپتیکی ائروسول‌ها (AOD)^۸ که نمایه غلظت گردوغبار در واحد هوا و میدان دید است و فراوانی ایستگاهی کدهای گردوغباری (DSI) در شرایط پرآبی و کم‌آبی دریاچه ارومیه گردید. مساحت متوسط پهنه آبی دریاچه طی دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۱۹ برابر ۳۵۰۰ کیلومترمربع بوده است، که در سال ۲۰۰۱ مساحت دریاچه به این میانگین بلندمدت از سایر سال‌ها نزدیک‌تر بوده است (۳۷۰۰ کیلومترمربع) (شکل (۷)). لذا این سال به‌عنوان سال میانگین انتخاب شد و تغییرات دو شاخص شدت (AOD) و فراوانی (DSI) گردوغبار، در دو فاز اول و دوم بررسی گردید. دو فاز تغییرات دریاچه یعنی سال‌هایی که مساحت دریاچه از متوسط بلندمدت آن (مساحت پهنه آبی دریاچه در سال ۲۰۰۱) کم‌تر بوده است (سال‌های فاز اول) و سال‌هایی که مساحت دریاچه از متوسط بلندمدت آن بیشتر بوده است (سال‌های فاز دوم) تعیین گردید.

همان‌طور که در جدول (۴) دیده می‌شود از بین دو شاخص AOD و DSI تنها شاخص AOD در فاز اول و دوم مساحت پهنه آبی دریاچه به‌صورت معنی‌داری متفاوت بوده است، درحالی‌که شاخص DSI که گویای فراوانی رخداد‌های گردوغبار در منطقه است در دو فاز زمانی مختلف از مساحت دریاچه، تغییرات معنی‌داری نشان نداده است. نتایج آزمون فوق برای تغییرات پوشش گیاهی در سطح منطقه مورد مطالعه نشان داد که تغییرات

جدول ۴- نتایج آنالیز T-student برای بررسی ارتباط بین شدت (AOD) و فراوانی (DSI) گردوغبار در حریم شرقی دریاچه ارومیه در ارتباط با تغییرات سالانه مساحت پهنه آبی دریاچه (NDWI) نسبت به سال میانگین (۲۰۰۱)

آزمون لیون برای همسانی واریانس					
Sig. (2-tailed)	df	t	Sig.	F	
/۰۰۰	۲۸	-۲/۳۷۶	/۰۵۱	۱۱/۴۰۹	با فرض واریانس‌های همسان
					با فرض واریانس‌های ناهمسان
/۰۰۰	۱۸/۳۱۰	-۸/۰۲۷	/۰۲۳	۵/۸۲۱	با فرض واریانس‌های همسان
					با فرض واریانس‌های ناهمسان

جدول ۵- نتایج آنالیز T-student برای بررسی ارتباط بین شدت (AOD) و فراوانی (DSI)، گردوغبار در حریم شرقی دریاچه ارومیه در ارتباط با تغییرات سالانه پوشش گیاهی (NDVI)

آزمون لیون برای همسانی واریانس					
Sig. (2-tailed)	df	t	Sig.	F	
/۰۰۰	۲۸	-۵/۳۷۶	/۰۲۰	۱۱/۴۰۹	با فرض واریانس‌های همسان
					با فرض واریانس‌های ناهمسان
/۰۰۰	۱۸/۳۱۰	-۸/۰۲۷	/۰۵۳	۵/۸۲۱	با فرض واریانس‌های همسان
					با فرض واریانس‌های ناهمسان

خاک و نمک به راحتی توسط وزش باد محلی جابه‌جا شود. در نتیجه به عنوان یک نتیجه مستقیم، فعالیت گردوغباری در هر دو شکل شدت و فراوانی افزایش یافته است. تا جایی که وزش باد در چنین محیط نیمه‌خشکی ممکن است منجر به نوسانات قابل توجه ته نشست گردوغبار منطقه‌ای در مقیاس‌های زمانی- فصلی تا بین سالانه شود. در شرایط خشکی طولانی مدت، سطوح خشکی که قبلاً توسط پوشش گیاهی تثبیت شده بودند به طور فزاینده‌ای در معرض فرسایش بادی قرار می‌گیرند و منجر به بیابان‌زایی و افزایش فراوانی و شدت گردوغبار در منطقه می‌شود. اما روند تغییرپذیری بین AOD سالانه می‌تواند علاوه افزایش دمای هوا، به کاهش رطوبت خاک، کاهش بارش و وزش باد سطحی نسبت داده شود، که اصلی‌ترین عامل کنترلی چرخه گردوغبار هستند (Klingmüller و همکاران، ۲۰۱۶). روند فزاینده AOD به روند منفی رطوبت در خاک مربوط می‌شود. با کاهش رطوبت خاک انتشار گردوغبار افزایش یافته و باعث روند تخریب پوشش گیاهی و روند کاهش NDVI می‌گردد. همچنین افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی در دهه گذشته در منطقه باعث خشک شدن خاک و دمای هوا شده، در نتیجه افزایش AOD به دلیل تغییرات آب و هوایی پیش‌بینی می‌شود. از سوی دیگر روند کاهش پوشش گیاهی در منطقه در حالی که وابسته به افزایش فعالیت‌های کشاورزی محلی و تغییر کاربری اراضی در منطقه است (Shirmohammadi و همکاران، ۲۰۲۰)، اما افزایش شدت و فراوانی گردوغبار در حوضه مطالعه می‌تواند اثرات منفی بر NDVI داشته باشد. بنابراین تغییرات کاربری اراضی با تغییرات رطوبت خاک و خشکی دریاچه و فرکانس و شدت طوفان‌های گردوغبار همراه بوده است. توزیع ائروسول‌ها همچنین تا حد زیادی تحت تأثیر توپوگرافی اراضی قرار می‌گیرد.

مطالعات سنجش‌ازدور از تصاویر اخیر دریاچه ارومیه نشان داده است که سطح دریاچه ارومیه از ۵۴۳۳ کیلومتر مربع در سال ۱۹۹۸ به ۱۷۹۸ کیلومتر مربع در سال ۲۰۱۸ کاهش یافته است. این بدان معنی است که در سال‌های اخیر مساحتی تقریباً ۳۶۰۰ کیلومتر مربع در معرض خطر قرار گرفته است (Alkhayer و همکاران، ۲۰۱۹). مطالعه حاضر وجود ارتباط معنی‌دار بین مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه و شاخص AOD را نشان داد در حالی که برخی مطالعات دیگر از قبیل مطالعه Mardi و همکاران (۲۰۱۸) با وجود روند افزایشی گردوغبار در شمال غربی ایران در دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۵ هیچ ارتباط معنی‌داری بین میانگین سالانه سطح آب دریاچه و AOD نیافته‌اند. اما در برخی دیگر از تحقیقات نتایج این تحقیق تأیید شده است از جمله نتایج مطالعه Boroughani و همکاران (۲۰۱۹) نشان از آن داشته که منطقه خشک دریاچه به یک منبع فعال گردوغبار در منطقه تبدیل

آنالیز پارامتریک T-Student نشان داد که شاخص فراوانی ایستگاهی گردوغبار (DSI) در شرایط مختلف پوشش گیاهی تفاوت معنی‌داری داشته است به نحوی که در سال‌هایی که پوشش گیاهی بالاتر از حالت میانگین بوده است، فراوانی DSI به صورت معنی‌داری کم‌تر از سال‌هایی بوده است که شاخص پوشش گیاهی پایین‌تر از میانگین بلندمدت بوده است.

۴- بحث

دریاچه ارومیه در ایران که زمانی بزرگ‌ترین دریاچه خاورمیانه بود، در حال خشک شدن است. خشک شدن دریاچه باعث طوفان گردوغبار می‌شود. بدون تردید گسترش دفعات رویداد و بسط گستره طوفان‌های نمکی برخاسته از بستر دریاچه ارومیه، مهم‌ترین پیامد خشکی دریاچه می‌باشد که منجر به شور شدن و مسمومیت خاک و پوشش گیاهی می‌شود و امنیت زیست‌محیطی منطقه را به طور جدی تهدید می‌کند (Moghimi و Ramezani, ۲۰۱۹).

با توجه به شوری دریاچه ارومیه و جهت باد، منطقه شرقی دریاچه ارومیه به طور جدی در معرض نفوذ نمک به خاک و آب‌های زیرزمینی قرار دارد که می‌تواند کاملاً در زندگی مردم محلی تأثیر گذاشته، حیات جانوران و گیاهان را به خطر انداخته، کیفیت هوا، توازن انرژی زمین و چرخه هیدرولوژی منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Valiollahi و همکاران، ۲۰۱۹).

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که هم‌زمان با کاهش پهنه آبی دریاچه ارومیه طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۹، میانگین تراکم پوشش گیاهی (NDVI) در سطح منطقه مورد مطالعه نیز کاهش پیدا کرده است. در دوره افول بزرگ پهنه آبی دریاچه ارومیه یعنی دوره ۶ ساله ۲۰۱۱-۲۰۱۶، مساحت دریاچه به کم‌ترین حد خود طی دوره مورد مطالعه رسیده و بیش از ۶۰ درصد از مساحت خود را نسبت به سال ۱۹۹۰ از دست داده است. هم‌زمان با این کاهش چشمگیر مساحت پهنه آبی دریاچه ارومیه، پوشش گیاهی منطقه نیز دچار تغییرات عمده‌ای شده که منجر به افزایش فراوانی رخداد‌های گردوغبار (DSI) در سطح منطقه شده است. تغییرات پوشش گیاهی در سطح حریم شرقی دریاچه ارومیه به صورتی بوده است که علاوه بر کاهش میانگین فضایی شاخص پوشش گیاهی، توزیع فضایی آن نیز در سطح منطقه مورد مطالعه ناهمگون‌تر شده است و ضریب تغییرپذیری فضایی شاخص پوشش گیاهی در سطح منطقه افزایش داشته است. سطح آب دریاچه به دلیل کاهش میزان بارش محلی و منطقه‌ای، شرایط خشکی و خشک‌سالی طی دهه‌های گذشته به طور قابل توجهی تغییر کرده است. پس از خشک‌سالی‌های مکرر، دریاچه کاملاً خشک و رطوبت خاک و پوشش گیاهی به طور قابل توجهی کاهش یافته و باعث شده ذرات

با این نتایج به راحتی می‌توان پیش‌بینی کرد که در صورت عدم انجام اقدامات متقابل، نه تنها این دریاچه بلکه حیات سرزمین‌های مجاور آن نیز طی چند سال کاملاً از بین خواهد رفت. از جمله اقدامات پیشگیرانه به منظور کاهش خسارات ناشی از حوادث گردوغبار در منطقه می‌توان به مدیریت کنترل فرسایش بادی و متوقف کردن استخراج آب‌های زیرزمینی در حوضه، کنترل روند تخریبی پوشش گیاهی در منطقه و جنگل کاری و احیای پوشش گیاهی اشاره نمود.

۵- نتیجه‌گیری

سال‌های طولانی فعالیت کشاورزی، رشد جمعیت و تغییرات اقلیم و خشک‌سالی‌های طولانی در منطقه شمال غرب ایران باعث کاهش چشمگیر سطح آب دریاچه ارومیه و خشک شدن این دریاچه شده است. علاوه بر آن با افزایش غلظت نمک در هوا و خاک، اکوسیستم بی‌نظیر این دریاچه نیز از بین می‌رود. این مسئله باعث شده تا منطقه‌ای وسیع در معرض فرسایش بادی قرار گرفته و مناطق اطراف آن را تحت تأثیر قرار دهد که منجر به یک فاجعه زیست‌محیطی و اقتصادی در منطقه می‌گردد.

نتایج این تحقیق منجر به آشکار شدن این موضوع شد که اولاً تغییرات پهنه آبی دریاچه ارومیه که طی سه دهه اخیر کاهش یافته است، به‌طور مستقیم و معنی‌داری منجر به افزایش غلظت گردوغبار (شاخص AOD) در سطح حریم شرقی دریاچه ارومیه شده است. از طرف دیگر، هم‌زمان که پهنه آبی دریاچه ارومیه روند کاهش مستمری طی کرده است، متوسط شاخص سبزیگی در سطح حریم شرقی دریاچه ارومیه یک روند نوسانی سالانه را داشته است اما این شاخص نیز روند کاهش داشته است. این تغییر در شاخص سبزیگی نقش اساسی در فراوانی رخدادهای گردوغبار (شاخص DSI) داشته است. بنابراین یافته اصلی این تحقیق این است که غلظت گردوغبار یا شاخص AOD وابسته به تغییرات پهنه آبی دریاچه بوده درحالی‌که فراوانی رخدادهای گردوغبار یا شاخص DSI قرابت بیشتری با تغییرات شاخص سبزیگی در سطح حوضه منطقه دارد. ذکر این نکته لازم است که دلیل کاهش شاخص سبزیگی در منطقه شرقی دریاچه ارومیه می‌تواند مرتبط با نوسانات و تغییرات سالانه بارش در سطح منطقه باشد همان‌طور که همین مؤلفه (یعنی تغییرات بارش سالانه) یکی از کنترل‌کننده‌های تغییرات پهنه آبی دریاچه ارومیه بوده است.

۶- مراجع

آرامی س ع، اونق م، محمدیان بهبهانی ع، اکبری م، زراسوندی ع، "بررسی کارایی شاخص BADI: رویکرد بهبود یافته جهت تشخیص طوفان‌های گردوغبار خاورمیانه با استفاده از تصاویر

شده است و غلظت گردوغبار منطقه را افزایش داده است. مطالعه Tourian و همکاران (۲۰۱۵) بیان داشتند که از سال ۲۰۰۹، دریاچه سریع‌تر خشک شده است.

دریاچه ارومیه به‌عنوان بزرگ‌ترین پهنه آبی داخل ایران، طی دو دهه اخیر به دلیل عوامل مختلف انسانی و طبیعی دچار تغییرات عمده‌ای گشته است. تراز آب این پهنه آبی به شدت دچار نوسان سالانه شده و به‌طور کلی روند کاهش چشمگیری داشته است، از طرف دیگر مساحت این پهنه آبی نیز به‌طور کلی طی دو دهه اخیر روند کاهش معنی‌داری را (به‌طور متوسط ۱۴۳ کیلومتر مربع در سال) طی کرده است. این روند کاهش مستمر پهنه آبی این دریاچه طی دو دهه اخیر که با نوسانات سالانه نیز همراه بوده، آثار تبعات گسترده‌ای بر کانون‌های جمعیتی اطراف این دریاچه داشته است. تأثیرگذاری بر فراوانی و شدت رخدادهای طوفان گردوغباری در منطقه شمال غرب ایران یکی از مهم‌ترین تبعات تغییرات فضایی پهنه آبی دریاچه ارومیه است. با کاهش مساحت و عقب‌نشینی دریاچه در بخش‌های خشک‌شده آن، کانون‌های محلی نوظهوری برای تولید گردوغبار ایجاد می‌شود که ریزگردهای نمکی یکی از مهم‌ترین آبروسل‌های این بخش‌های خشک شده می‌باشد. پمپاژ حجم عظیمی از ذرات نمکی به داخل هوا و ترسیب آن در صدها کیلومتر دورتر از کانون شکل‌گیری، علاوه بر ایجاد پیامدهای سلامتی عمومی برای جمعیت عظیم منطقه که حدود هفت میلیون نفر است، می‌تواند به‌صورت چشمگیری حاصل‌خیزی خاک را از بین برده و پوشش گیاهی منطقه را تضعیف کند. از طرف دیگر با تضعیف پوشش گیاهی اطراف دریاچه، کانون‌های گردوغبار جدید محلی شکل می‌گیرد و فراوانی و شدت گردوغبار در منطقه تشدید می‌شود.

بنابراین کاهش مساحت و خشک شدن دریاچه هم به‌صورت مستقیم (از طریق ایجاد کانون‌های گردوغباری در عرصه‌های خشک‌شده حاشیه دریاچه) و هم به‌صورت غیرمستقیم (Proxy) از طریق تضعیف حاصلخیزی خاک (ناشی از ترسیب آبروسل‌های نمک در خاک) و تضعیف پوشش گیاهی (بسته شدن منافذ برگ‌ها و اختلال در فرآیندهای فتوسنتز، تنفس و تعرق)، منجر به تشدید رخدادهای گردوغباری در حریم شرقی دریاچه ارومیه شده است. اندازه‌گیری‌های میدانی بیشتری برای بررسی ارتباط حوادث گردوغبار و شرایط پیش‌زمینه ایجادکننده آن در حوضه مطالعه لازم است. اگرچه نتایج این مطالعه نشان داد که روند افزایشی در گردوغبار وجود دارد. اما کانون‌های گردوغبار خارجی نیز نقش اساسی در افزایش فراوانی گردوغبار منطقه دارند. از سوی دیگر کوچک شدن دریاچه ممکن است بر شرایط آب و هوایی محلی نیز تأثیر بگذارد (Dehghanipour و همکاران، ۲۰۲۰).

- Dehghanipour AH, Moshir Panahi D, Mousavi H, Kalantari Z, Tajrishy M, "Effects of Water Level Decline in Lake Urmia, Iran, on Local Climate Conditions", Preprints 2020, 2020070165. doi: 10.20944/preprints202007.0165.v1.
- Delfi S, Mosaferi M, Hassanvand MS, Maleki S, "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, 2019, 17, 1107-1120.
- Dong Z, Yu X, Li X, Dai J, "Analysis of variation trends and causes of aerosol optical depth in Shaanxi Province using MODIS data", Chinese Science Bulletin, 2013, 58 (35), 4486-4496.
- Eimanifar A, Mohebbi F, "Urmia Lake (northwest Iran): a brief review", Saline systems, 2007, 3 (1), 5.
- Fernandes R, Leblanc SG, "Parametric (modified least squares) and non-parametric (Theil-Sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors", Remote Sensing of Environment, 2005, 95 (3), 303-316.
- Gholampour A, Nabizadeh R, Hassanvand MS, Taghipour H, Nazmara S, Mahvi AH, "Characterization of saline dust emission resulted from Urmia Lake drying", Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2015, 13 (1), 82.
- Goudie A, "Dust storms and ephemeral lakes", Desert, 2018, 23 (1), 153-164.
- Klingmüller K, Pozzer A, Metzger S, Stenchikov GL, Klingmüller K, Pozzer A, Metzger S, Stenchikov GL, Lelieveld J, "Aerosol optical depth trend over the Middle East, Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16, 5063-5073.
- Mardi AH, Khaghani A, MacDonald AB, Nguyen P, Karimi N, Heidary P, Karimi N, Saemian P, Sehatkashani S, Tajrishy M, Sorooshian A, "The Lake Urmia environmental disaster in Iran: A look at aerosol pollution", Science of The Total Environment, 2018, 633, 42-49.
- Mei D, Xiushan L, Lin S, Ping WANG, "A dust-storm process dynamic monitoring with multi-temporal MODIS data", The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37, Vol. XXXVII. Part B7, 6pp, Beijing, 2008.
- Moghim S, Ramezani S, "Characterization of aerosol types over Lake Urmia Basin". E3S Web of Conferences 99, CADUC 2019, 01006 (2019).
- Namdari S, Valizade KK, Rasuly AA, Sarraf BS, 2016, "Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran", Arabian Journal of Geosciences, 9 (3), 191.
- O'Loingsigh T, McTainsh GH, Tews EK, Strong CL, Leys JF, Shinkfield P, Tapper NJ, "The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records", Aeolian Research, 2014, 12, 29-40.
- Shirmohammadi B, Malekian A, Salajegheh A, Taheri B, Azarnivand H, Malek Z, Verburg PH, "Scenario analysis for integrated water resources management under future land use change in the Urmia Lake region, Iran", Land Use Policy, 2020, 90, 104299.
- سنجده MODIS", مجله مخاطرات محیطی، ۸ (۲۲)، ۱۳۹۸، ۷۵-۹۴.
- بیات ر، جعفری س، قرمزچشمه ب، چرخایی ا ح، "مطالعه تأثیر ریزگردها بر تغییرات پوشش گیاهی (مطالعه موردی: تالاب شادگان، خوزستان)", "سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۳۹۵، ۷ (۲)، ۱۷-۳۲.
- رایگانی ب، خیراندیش ز، "بهره‌گیری از سری زمانی داده‌های ماهواره‌ای به منظور اعتبارسنجی کانون‌های شناسایی شده تولید گردوغبار استان البرز"، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۱۳۹۶، ۴ (۴)، ۱-۱۸.
- شمشیری س، جعفری ر، سلطانی س، رضانی ن، "آشکارسازی و پهنه‌بندی ریزگردهای استان کرمانشاه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS"، بوم‌شناسی کاربردی، ۱۳۹۳، ۳ (۸)، ۲۹-۴۱.
- فیضی‌زاده ب، شهبابی ه، سیفی ه، "شناسایی پهنه‌های مستعد طوفان‌های نمکی با استفاده از پردازش فازی- شیء‌گرایی تصاویر ماهواره‌ای"، مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۳۹۵، ۳ (۳)، ۲۶۹-۲۸۴.
- محمدزاده ک، فیضی‌زاده ب، "مدل‌سازی اثرات خشکی دریاچه ارومیه بر روند گسترش شوری در اراضی کشاورزی حاشیه شرقی دریاچه با استفاده از تکنیک فازی شیء‌گرا"، سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۱۳۹۶، ۸ (۳)، ۵۶-۷۲.
- ولی‌زاده کامران خ، نامداری س، "بررسی تغییرات زمانی- مکانی غلظت ریزگردها در حوضه نفوذ ریزگردهای دریاچه ارومیه در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۵ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (مطالعه موردی آذربایجان شرقی و آذربایجان غربی)", "نشریه علمی جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۱۳۹۹، ۲۴ (۷۲)، ۴۲۷-۴۴۶.
- AghaKouchak A, Norouzi H, Madani K, Mirchi A, Azarderakhsh M, Nazemi A, Nasrollahi N, Farahmand A, Mehran A, Hasanzadeh E, "Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: call for action", Journal of Great Lakes Research, 2015, 41 (1), 307-311.
- Alkhayer M, Eghbal MK, Hamzehpour N, "Geomorphic surfaces of eastern lake Urmia Playa and their influence on dust storms", Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 2019, 23 (8), 1511-1520.
- Blain GC, "The Mann-Kendall test: the need to consider the interaction between serial correlation and trend", Acta Scientiarum, Agronomy, 2013, 35 (4), 393-402.
- Boroughani M, Hashemi H, Hosseini SH, Pourhashemi S, Berndtsson R, "Desiccating Lake Urmia: A New Dust Source of Regional Importance", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 1545-598X, 2019 IEEE.

- Sotoudeheian S, Salim R, Arhami M, "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*, 2016, 121 (23), 14-018.
- Sun K, Su Q, Ming Y, "Dust Storm Remote Sensing Monitoring Supported by MODIS Land Surface Reflectance Database", *Remote Sensing*, 2019, 11 (15), 1772.
- Tan M, "Exploring the relationship between vegetation and dust-storm intensity (DSI) in China", *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26 (4), 387-396.
- Tourian MJ, Elmi O, Chen Q, Devaraju B, Roohi S, Sneeuw N, "A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran", *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156, 349-360.
- Valiollahi J, Soltani A, Ahmadi Eghbal M, "Evaluating Climate Change and Anthropogenic effects on inducing Salt Storms Aerosol Hazards Risk in Urmia Lake", *Anthropogenic Pollution Journal*, 2019, 3 (1), 25-32.
- Wang HY, Li ZY, Gao ZH, Wu JJ, Sun B, Li CL, "Assessment of land degradation using time series trend analysis of vegetation indicators in Otindag Sandy land", In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2014, 17 (1), 012065.

EXTENDED ABSTRACT

Relationship between Changes in Water Body and Vegetation in the Eastern of Lake Urmia with the Phenomenon of Dust Storms

Habibeh Harati, Masoud Kiadaliri^{*}, Ahmad Tavana, Aptin Rahnavard, Reza Amirnezhad

Department of Environment, Tonekabon Branch, Islamic Azad University, Tonekabon, Iran

Received: 05 September 2020; **Review:** 15 November 2020; **Accepted:** 19 December 2020

Keywords:

Trend analysis, Dust, Correlation analysis, Water body, Lake Urmia.

1. Introduction

The area of Lake Urmia, as the largest closed lake in the world, has significantly reduced in the last three decades, and this trend has had in-depth effects on environmental characteristics of the areas around the lake. During the last two decades, macro-climatic changes in northwestern Iran, and the involvement of anthropogenic factors such as dam construction caused extensive changes in the volume of water entering the lake and the area of water zone along with increasing salt concentration (Mardi et al., 2018; Sotoudeheian et al., 2016; Alkhayer et al., 2019; Boroughani et al., 2019; Mardi et al., 2018; Delfi et al., 2019). The changes in the area and volume of water of this lake on an annual and seasonal scale have had significant effects on the soil, climate and vegetation quality of the areas around this lake (Tourian et al., 2015; Eimanifar and Mohebbi, 2007). Therefore, the effects of dust due to drying of Lake Urmia can affect air quality around the lake up to a radius of hundreds of kilometers both directly by creating internal dust centers (usually dust from salt deposits) and indirectly by weakening vegetation. Also, emit a wave of salt dust in the air of some cities adjacent to the lake, which has a population of nearly six million persons who are directly and indirectly affected by the consequences of the drying of this lake.

The main objective of this study was to identify the relationship between dust storms in the eastern part of Lake Urmia and the surrounding vegetation due to the annual and long-term variability of this water zone during the statistical period 1999-2019.

2. Methodology

2.1. Study area

The study area includes eastern sub-basins of Lake Urmia, and with an area of 20,292 square kilometers covers a large part of East Azerbaijan Province.

2.2. Data and Modeling

In order to investigate periodic and annual changes in vegetation in the region, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used and in order to monitor annual and periodic changes in water body of Lake Urmia, Normalized Difference Water Index (NDWI) was used. Dust data include frequency and intensity of dust. Dust codes from stations around the lake and Dust Storm Index (DSI) were used for dust frequency. MODIS sensor was used to investigate dust intensity of aerosol optical depth (AOD) (Delfi et al., 2019; Tan, 2016). In

^{*} Corresponding Author; kiadalirimasoud@gmail.com (Masoud Kiadaliri)

E-mail addresses: hharati50@gmail.com (Habibeh Harati), kiadalirimasoud@gmail.com (Masoud Kiadaliri), ahmad.tavana200@yahoo.com (Ahmad Tavana), rahnavard-aptin@yahoo.com (Aptin Rahnavard), rezaamirnezhad@gmail.com (Reza Amirnezhad).

order to investigate whether intensity and frequency of dust in the region as a result of the two main drivers i.e. changes in water body area of the lake and vegetation during the statistical period 1990-2019, significant changes were found in the study area or not, non-parametric analysis Sen's slop estimator and Mann-Kendall test were used (Fernandes and Leblanc, 2005). In order to analyze the correlation between frequency and intensity of dust and changes in the area of water body of the lake and vegetation of the region, Pearson correlation has been used. T-test analysis was used to investigate the relationship between AOD and DSI in relation to annual changes NDWI and NDVI in two time phases.

3. Results and discussion

The study results of 29-year time series trend (1990-2019) of changes in dust intensity and frequency index in the eastern part of Lake showed that during the study period, both DSI and AOD have been significant increasing (Fig. 1-a). Analysis of the time series trend of the two indicators of changes in NDWI and NDVI of the eastern area of Lake Urmia indicates that both of these indicators have a significant decreasing trend during the period 1990-2019 (Fig. 1-b) and vegetation density in the eastern part of the lake has reduced by 0.005 NDVI units per year, which is similar to the decreasing trend of the lake area. This decreasing trend of vegetation in the region has also been significant. The changes in vegetation in the eastern part of Lake Urmia have been such that in addition to reducing the spatial average of vegetation index, its spatial distribution has become more heterogeneous in the study area and the spatial variability coefficient of vegetation index has increased in the region.

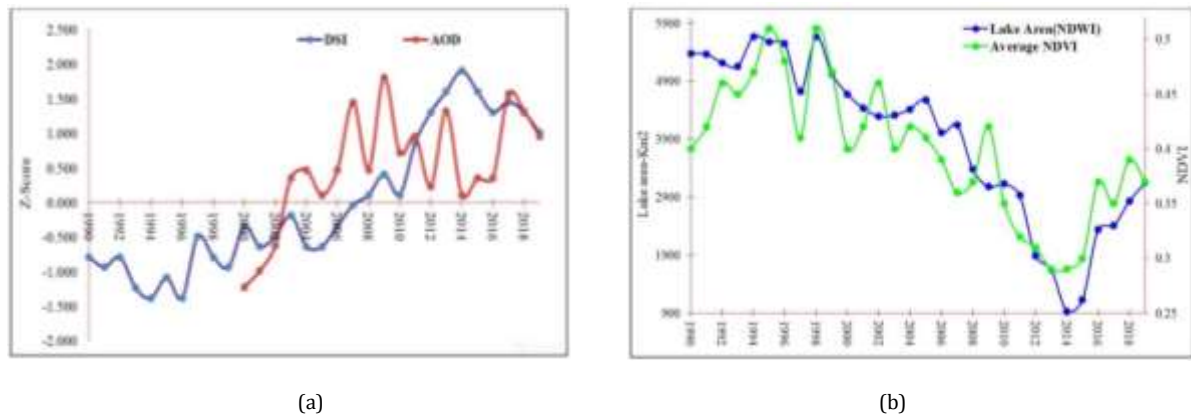


Fig. 1. a) 29-year time series trend of intensity (AOD) and frequency (DSI) of dust storms in the region, b) Time series trend of changes in the area of water zone of Lake Urmia and the average NDVI of the eastern area of Lake Urmia

The area of Lake Urmia has had a continuous decreasing trend during the statistical period, which according to the statistics of Sen's slope estimator has been equal to 142 square kilometers per year. The 6-year period (2011-2016) is in fact the largest reduction in the area of water body of Lake Urmia.

DSI was significantly correlated with AOD, which indicates that while the frequency of dust storms increased in the region, the intensity of dust has also increased in the region. But the two dust indicators, were significantly dependent on changes in water body of Lake Urmia (Table 1). The results of the analysis showed that in the years when the area of water zone of Lake Urmia has reduced and vegetation has been relatively low at the same time, the highest frequency and intensity of dust has been observed, in other words, the simultaneous effect of reducing water zone of the lake and the reduction in the average vegetation index in the region, synergistically, in addition to increasing DSI in the region, has also increased AOD index, which is an indicator of the intensity of dust (Fig. 2).

Table 1. Pearson correlation analysis matrix between two indicators of AOD and DSI and changes in NDWI and NDVI of Urmia Lake water body

Index	Significant level	DSI	AOD	NDVI	NDWI
DSI	R	1	0.75	-0.85	-0.70
	Sig	0.00	0.002	0.00	0.00
AOD	R		1	-0.60	-0.80
	Sig		0.00	0.02	0.014
NDVI	R			1	0.88
	Sig			0.00	0.00
NDWI	R				1
	Sig				0.00

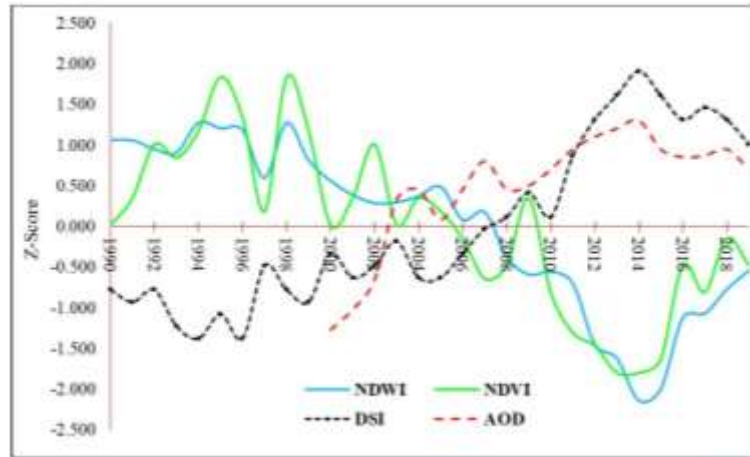


Fig. 2. Relationship between time series of changes in NDWI, NDVI with AOD and DSI in the region

Therefore, reducing the area and drying of the lake both directly (by creating dust centers in the arid areas of the lake) and indirectly (proxy) by weakening soil fertility (due to sequestration of salt aerosols in soil) and weakening of vegetation (closure of leaf pores and disruption of photosynthesis, respiration and transpiration processes), has led to intensification of dust storms in the eastern part of Lake Urmia.

Results showed that the role of changes in the area of water zone of Lake Urmia in frequency of dust storms (DSI) is not direct but indirect and proxy, through change (destruction) in the basin vegetation.

The frequency of dust storms during the 29-year period (1990-2019) has shown more sensitivity to annual changes in vegetation than changes in water zone of Lake Urmia, while the concentration of dust (AOD) is directly related to changes in water body of the lake. The overall outcome of these two indicators i.e. AOD and DSI, has been an increase in intensity and frequency of dust storms in the eastern part of Lake Urmia.

4. Conclusions

The study results led to the revelation that, first, changes in water body of Lake Urmia, which has been reducing over the past three decades, directly and significantly led to an increase in dust concentration (AOD) in the eastern part of Lake Urmia. On the other hand, changes in water level of Lake Urmia have led to a general decreasing trend in vegetation in the region, which has led to an increase in frequency of dust storm index (DSI) in the region. The study model study showed that changes in water body of Lake Urmia as a very powerful driver leads to an increase in intensity and frequency of dust in the eastern part of Lake Urmia and intensifies dust conditions in the region. If the decreasing trend of Lake Urmia intensifies in the study area, more frequent and severe dust storms will occur in the region. Therefore, in addition to management solutions provided, management and conservation of this unique ecosystem should be considered.

5. References

- Boroughani M, Hashemi H, Hosseini SH, Pourhashemi S, Berndtsson R, "Desiccating Lake Urmia: A New Dust Source of Regional Importance", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 1545-598X, 2019 IEEE.
- Delfi S, Mosaferi M, Hassanvand MS, Maleki S, "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*, 2019, 17, 1107-1120.
- Eimanifar A, Mohebbi F, "Urmia Lake (northwest Iran): a brief review", *Saline systems*, 2007, 3 (1), 5.
- Fernandes R, Leblanc SG, "Parametric (modified least squares) and non-parametric (Theil-Sen) linear regressions for predicting biophysical parameters in the presence of measurement errors", *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95 (3), 303-316.
- Mardi AH, Khaghani A, MacDonald AB, Nguyen P, Karimi N, Heidary P, Karimi N, Saemian P, Sehatkashani S, Tajrishy M, Sorooshian A, "The Lake Urmia environmental disaster in Iran: A look at aerosol pollution", *Science of The Total Environment*, 2018, 633, 42-49.
- Tan M, "Exploring the relationship between vegetation and dust-storm intensity (DSI) in China", *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26 (4), 387-396.
- Tourian MJ, Elmi O, Chen Q, Devaraju B, Roohi S, Sneeuw N, "A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran", *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156, 349-360.