

DOI: <https://doi.org/10.22034/jmas.2026.579472.1268>

## بررسی عوامل اقلیمی مؤثر بر بارش در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از همبستگی اسپیرمن و مدل جنگل تصادفی

سارا کرمی<sup>۱</sup>، زهرا قصابی<sup>۱\*</sup>

۱. استادیار پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۳۱

### چکیده

هدف این پژوهش بررسی جامع عوامل اقلیمی مؤثر بر بارش در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره ۲۰ ساله ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ است. بدین منظور از مجموعه‌ای از داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل شامل CHIRPS، MODIS، ERA5-Land، غلظت PM2.5 و شاخص‌های دورپیوندی NAO و SOI استفاده شد. روند سری‌های زمانی با آزمون من-کندال و برآورد گر سن-اسلوپ ارزیابی شد و روابط میان بارش و متغیرهای اقلیمی-محیطی با استفاده از همبستگی اسپیرمن، به صورت هم‌زمان و با در نظر گرفتن تاخیرهای زمانی (۳- تا ۳+ ماه)، مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه، مدل جنگل تصادفی به منظور شناسایی اهمیت نسبی متغیرها به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که اغلب متغیرهای اقلیمی و سطح زمین، از جمله بارش، دما، رطوبت خاک و NDVI در دوره مطالعه فاقد روند معنادار بوده‌اند، در حالی که غلظت PM2.5 و SLP روند افزایشی معناداری را نشان می‌دهد. تحلیل همدیدی بارش زمستانه نشان داد که سال‌های پربارش با تضعیف پرفشار سیری و تقویت کم‌فشارها و ناو‌های مدیترانه‌ای همراه بوده‌اند. بررسی تاخیرهای زمانی و همبستگی‌ها نشان می‌دهد که رطوبت خاک و رطوبت نسبی بیشترین ارتباط را با بارش داشته و نقش پیش‌شرطی کوتاه‌مدت در وقوع آن دارند. براساس نتایج مدل جنگل تصادفی نیز رطوبت خاک ماه جاری مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده بارش است. به طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که علی‌رغم نقش تعیین‌کننده بارش در فرآیندهای سطح-جو، اثرات بلندمدت خشک شدن دریاچه و مداخلات انسانی موجب تضعیف ارتباط مستقیم بارش با وضعیت دریاچه و کیفیت هوا شده‌اند؛ به گونه‌ای که حتی سال‌های پربارش نیز قادر به معکوس کردن روند خشک شدن دریاچه ارومیه نبوده‌اند.

### کلمات کلیدی: دریاچه ارومیه، بارش، متغیرهای اقلیمی، همبستگی، جنگل تصادفی.

\* پست الکترونیکی نویسنده مسئول مکاتبه: [z.ghassabi@gmail.com](mailto:z.ghassabi@gmail.com), [zghassabi@rimas.ac.ir](mailto:zghassabi@rimas.ac.ir)

## مقدمه

تغییر اقلیم در حال حاضر بر بسیاری از مناطق جهان تاثیر گذاشته است. در ایران حوضه دریاچه ارومیه یکی از آسیب پذیرترین مناطق از تغییر اقلیم است (ابراهیمی و همکاران، ۱۴۰۲)، دریاچه ارومیه به منزله بزرگترین دریاچه داخلی ایران در شمال غربی کشور، دومین دریاچه بزرگ فوق شور در جهان و یکی از مهم ترین اکوسیستم های آبی منطقه، همواره با تغییرات پیچیده اقلیمی، فشارهای کاربری اراضی و نوسانات منابع آبی مواجه بوده است. کاهش قابل توجه در سطح آب این دریاچه، فاجعه دریاچه ارومیه را رقم زده است که شاید فاجعه بارترین مشکل آبی باشد که ایرانیان تا به امروز تجربه کرده اند. نه تنها در نتیجه خشکسالی های مکرر، استفاده و ذخیره سازی آب در بالادست، بلکه به دلیل اثرات انسانی فعالیت های توسعه ای متکبرانه و ناهماهنگ بالادست یک محیط رقابتی را در استان های منطقه به وجود آورده است (اخروی و همکاران، ۲۰۱۶). کوچک شدن دریاچه، پیامدهای قابل توجهی برای اکوسیستم ارزشمند دریاچه و اقتصاد منطقه ای در پی داشته است. از جمله می توان به کاهش تعداد گردشگران به طور قابل ملاحظه اشاره کرد که این امر نیز، سبب از بین رفتن مشاغل مرتبط با گردشگری، کاهش درآمد مردم محلی و همچنین پدیده مهاجرت شده است (ایمنی قشلاق و همکاران، ۱۳۹۵).

بررسی اثر تغییر خرد اقلیم محلی بر الگوی بارش اطراف حوضه دریاچه ارومیه می تواند تغییرات همزمان دما، رطوبت، کیفیت هوا و الگوهای بارش را آشکار سازد. در بررسی خشکسالی های هیدرولوژیک در شمال دریاچه ارومیه مشخص شد که تداوم دوره های خشکی کوتاه مدت با شدت کمتر، از احتمال وقوع بیشتری برخوردار است و ضرورت توجه به مدیریت بهینه منابع آب سطحی با توجه

به وابستگی شدید مصارف کشاورزی و عدم تغذیه مناسب جریان های سطحی از نزولات جوی و روند کاهشی جریان های سطحی در سال های اخیر بیش از پیش نمایان می شود (یاراحمدی و رستمی زاد، ۱۳۹۸). بررسی اثر خشک شدن دریاچه ارومیه بر بارش مناطق شمال غربی ایران با شبیه سازی بارش بیانگر کاهش بارش در صورت حذف دریاچه ارومیه برای منطقه می باشد که اثرات بیشتر آن در استان آذربایجان شرقی با توجه به موقعیت قرارگیری منطقه و در مسیر بادهای غربی بودن است (گلزاری پرتو، ۱۳۹۴). در طی دهه های اخیر خطوط ساحلی دریاچه پسروی بسیار مشخصی داشته است، چنانچه برای شهرهای اطراف دریاچه به ویژه شهرهایی که در شرق دریاچه قرار دارند و تحت تاثیر جهت باد غربی یا جنوب غربی هستند، مشکلات عدیده ای به وجود آورده است. در مطالعه عوامل اصلی کاهش آب دریاچه ارومیه دبی های ماه های ژانویه، فوریه، مارس، نوامبر و دسامبر به عنوان مولفه اول با بیشترین درصد از واریانس کل معرفی شدند (زینالی و اصغری سراسکانرود، ۱۳۹۱).

این فرضیه مطرح شده است که خشک شدن دریاچه ارومیه ناشی از تغییرات اقلیمی و افزایش خشکسالی های ناشی از تغییر اقلیم بوده است. مطالعات نشان دادند که نوسانات اقیانوس آرام ( $ENSO^1$ ) تأثیر قوی تری نسبت به نوسانات اقیانوس اطلس ( $NAO^2$ ) بر تغییرپذیری سطح آب دریاچه ارومیه و همچنین سایر متغیرهای آب و هوایی دارند، به جز دما که به نظر می رسد تحت تأثیر نوسانات اقیانوس اطلس قرار دارد (رضیئی و گورداک<sup>۳</sup>، ۲۰۲۰). همچنین، مطالعه توزیع زمانی و مکانی بارش زمستانه و الگوهای پیوند از دور در حوضه دریاچه ارومیه نشان داد که این رابطه با الگوهای  $NAO^4$ ،  $EAWR^5$  و  $MOI^5$  معنادار است (سنی خانی، ۲۰۲۲).

<sup>4</sup>East Atlantic/ Western Russia<sup>5</sup>Mediterranean Oscillation Indices<sup>1</sup>El Nino Southern Oscillation<sup>2</sup>North Atlantic Oscillation<sup>3</sup>Gurdak

غیرمستقیم در کاهش سطح آب و خشک شدن دریاچه ارومیه نقش داشته‌اند، بررسی شده‌اند (ستاری و همکاران، ۲۰۲۰؛ روان و همکاران، ۲۰۲۲؛ بروگانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ مقیم و همکاران، ۲۰۱۹). از سوی دیگر، ساختن بیش از ۵۰ سد بر روی رودخانه‌های دائمی و فصلی که به دریاچه ارومیه می‌ریزند، برای مصارف آبیاری کشاورزی، سبب کاهش شدید سطح آب دریاچه در دو دهه اخیر شده است (سودی و همکاران، ۲۰۱۷). کاهش سطح آب دریاچه، به ویژه در بخش‌های جنوبی، سبب برخاستن ذرات گردو خاک، به دلیل وزش باد غالب جنوب غربی در طی توفان‌های گردو خاک (ابودوبلی و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۰؛ حمزه و همکاران، ۲۰۲۲) می‌شود. این شرایط منجر به ایجاد مشکلات سلامتی و تنفسی در ساکنین اطراف حوضه دریاچه ارومیه، به ویژه شهر تبریز که در شمال شرقی دریاچه قرار گرفته است (حمزه و همکاران، ۲۰۲۲)، شده است.

در سال‌های اخیر برنامه تحقیقات جهانی آب و هوا (WCRP<sup>۳</sup>) مدل‌های پیش‌بینی را بسیار توسعه داده است. بررسی نتایج پیش‌نگری دما و بارش در دوره‌های آینده با دوره پایه نشان می‌دهد که دمای متوسط سالانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه تحت همه سناریوها افزایش خواهد داشت. میزان افزایش دمای متوسط سالانه در آینده نزدیک در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۱/۵ و ۱/۸ درجه سلسیوس و در آینده دور به ترتیب ۱/۴ و ۴ درجه سلسیوس خواهد بود. بارش متوسط سالانه در تمامی سناریوها کاهش خواهد یافت، در آینده نزدیک در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۱۹/۹ و ۲۱/۶ درصد و در آینده دور به ترتیب ۱۲ و ۲۸/۶ درصد کاهش خواهد یافت. همچنین براساس توزیع مکانی تغییرات دما و بارش در دوره‌های آتی بیشترین افزایش دما و بیشترین

کرمی و همکاران (۱۴۰۱) در بررسی تغییرات توامان اقلیمی و محیطی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان دادند که اثرات چشمگیر تغییرپذیری فراسنج‌های محیطی و اقلیمی در این مناطق افزایش دمای سطح زمین و هوا، پوشش گیاهی و کاهش منابع آب است که با توجه به افزایش نیاز آبی گیاهان، فشار بر منابع آب به ویژه آب زیرزمینی افزایش یافته است. همچنین بررسی اثرات احتمالی تغییر اقلیم بر عناصر اقلیمی حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد که روند کلی دما در حوضه آبریز دریاچه ارومیه افزایشی ولی بارش کاهشی خواهد بود. این تغییرات دمایی و بارشی می‌تواند منجر به افزایش تبخیر و تعرق و کاهش ورودی دریاچه و همچنین تغذیه سفره‌های زیرزمینی گردد (رضایی بنفشه و جلالی، ۱۳۹۷) که این شرایط بیلان آبی دریاچه را دستخوش تغییرات شدیدتر از شرایط فعلی خواهد نمود (کرمی و نبی‌زاده، ۱۳۹۷).

طی دهه‌های اخیر چندین دریاچه در آسیای مرکزی و خاورمیانه مانند دریاچه آرال (چن و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۲۲) و دریاچه ارومیه (غلامپور و همکاران، ۲۰۱۵؛ روان و همکاران، ۲۰۲۲) به بسترهای خشک تبدیل شده‌اند. دلایل اصلی خشک شدن یا از بین رفتن دریاچه‌ها در داخل قاره‌ها در امتداد منطقه کمربند گردو خاک مربوط به عوامل انسانی مانند ساخت سدها و بهره‌برداری بیش از حد از آب برای کشاورزی و مصارف آشامیدنی است (احمدی بیرگانی، ۲۰۲۰)، در حالی که دومین عامل مؤثر، تغییرات اقلیمی است (کرمی و همکاران، ۲۰۲۱). دریاچه ارومیه در شمال غربی ایران یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های خشک شده در خاورمیانه در دو دهه گذشته است و به یک منبع فعال گردو خاک تبدیل شده است (غلامپور و همکاران، ۲۰۱۵؛ بروگانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ عبادی و همکاران، ۲۰۲۲). در پژوهش‌های مختلف، عوامل جوی، اقلیمی، کوهساری یا انسانی که به طور مستقیم یا

<sup>3</sup> World Climate Research Program<sup>1</sup> Chen et all<sup>2</sup> Abuduwailli et al

کاهش بارش در مناطق شمالی حوضه اتفاق خواهد افتاد (عبدالعلی زاده و همکاران، ۱۴۰۱).

این پژوهش با هدف بررسی جامع عوامل اقلیمی مؤثر بر تغییرپذیری بارش در حوضه دریاچه ارومیه انجام شد. در این راستا، علاوه بر متغیرهای اقلیمی و سطح زمین، از مجموعه‌ای از داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل، غلظت  $PM_{2.5}$ <sup>۱</sup> و شاخص‌های دورپیوندی NAO و SOI<sup>۲</sup> نیز استفاده شد. اگرچه در بسیاری از مطالعات پیشین در حوضه دریاچه ارومیه تمرکز اصلی بر تغییرات بارش و عوامل اقلیمی بوده است، در این پژوهش تلاش شد با در نظر گرفتن  $PM_{2.5}$  در کنار متغیرهای اقلیمی، نقش احتمالی تغییرات محیطی و فشارهای انسان‌زاد در تفسیر وضعیت کنونی منطقه نیز مورد توجه قرار گیرد. بر این اساس، اهداف اصلی پژوهش شامل (۱) بررسی روند تغییرات متغیرهای اقلیمی-محیطی، (۲) تعیین روابط زمانی بین بارش و عوامل مؤثر بر آن، و (۳) شناسایی اهمیت نسبی متغیرهای کنترل‌کننده بارش با استفاده از مدل جنگل تصادفی است. در بخش ۲، داده‌های اقلیمی، ماهواره‌ای، بازتحلیل، دورپیوند و کیفیت هوا معرفی و روش کار بیان شد. بحث و تفسیر نتایج در بخش ۳ و جمع‌بندی در بخش ۴ ارائه شد.

### مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه دریاچه ارومیه در شمال‌غربی ایران و بین مختصات جغرافیایی ۳۶/۵ تا ۳۸/۵ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۴۷/۵ درجه طول شرقی قرار دارد. دریاچه ارومیه به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه نمکی ایران، ویژگی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی خاصی دارد و تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی متعددی قرار گرفته است. ارتفاع این منطقه از سطح دریا متغیر بوده و زمین‌های پیرامونی شامل دشت‌ها و کوهپایه‌ها است. اقلیم حوضه عمدتاً نیمه‌خشک با بارش

سالانه کم و توزیع نامنظم است و تغییرات دمایی روزانه و فصلی آن قابل توجه است. پوشش گیاهی در این حوضه محدود و پراکنده بوده و اغلب شامل علفزارهای خشک و بوته‌زارهای مقاوم به خشکی است. کاهش سطح آب دریاچه، فعالیت‌های کشاورزی و تغییرات اقلیمی باعث تشدید مسائل محیطی مانند افزایش غلظت ذرات معلق در هوا شده است، که اهمیت مطالعات اقلیمی و زیست‌محیطی در این منطقه را دوچندان می‌کند. شکل ۱ منطقه مورد مطالعه را با استفاده از داده‌های بازتاب سطحی Landsat 8 (Collection 1, Level-2) در سال ۲۰۲۲ نشان می‌دهد.

داده‌ها

در این مطالعه، برای تهیه نقشه دقیق منطقه مورد مطالعه در محیط GIS، از داده‌های بازتاب سطحی Landsat 8 (Collection 1, Level-2) استفاده شد. این تصاویر با وضوح مکانی ۳۰ متر در باندهای مرئی و مادون قرمز، پس از تصحیح اثرات جوی، اطلاعات مناسبی برای تحلیل‌های مکانی و سطحی فراهم می‌کنند.

متغیرهای محیطی و اقلیمی مؤثر بر حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از پلتفرم پردازش ابری Google Earth Engine (GEE) استخراج و پردازش شدند. به منظور بررسی جامع شرایط اقلیمی، هیدرولوژیکی، زیست‌محیطی و کیفیت هوا، از مجموعه‌ای از داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل جهانی استفاده شد.

داده‌های بارش از مجموعه داده CHIRPS<sup>۳</sup> تهیه گردید که با ادغام تصاویر فروسرخ ماهواره‌ای و داده‌های ایستگاه‌های زمینی، امکان تولید سری‌های زمانی بارش شبکه‌ای با دقت مناسب را فراهم می‌کند. متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی شامل دمای هوا در ارتفاع ۲ متری، میانگین فشار سطح دریا و رطوبت حجمی لایه

<sup>3</sup> The Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data

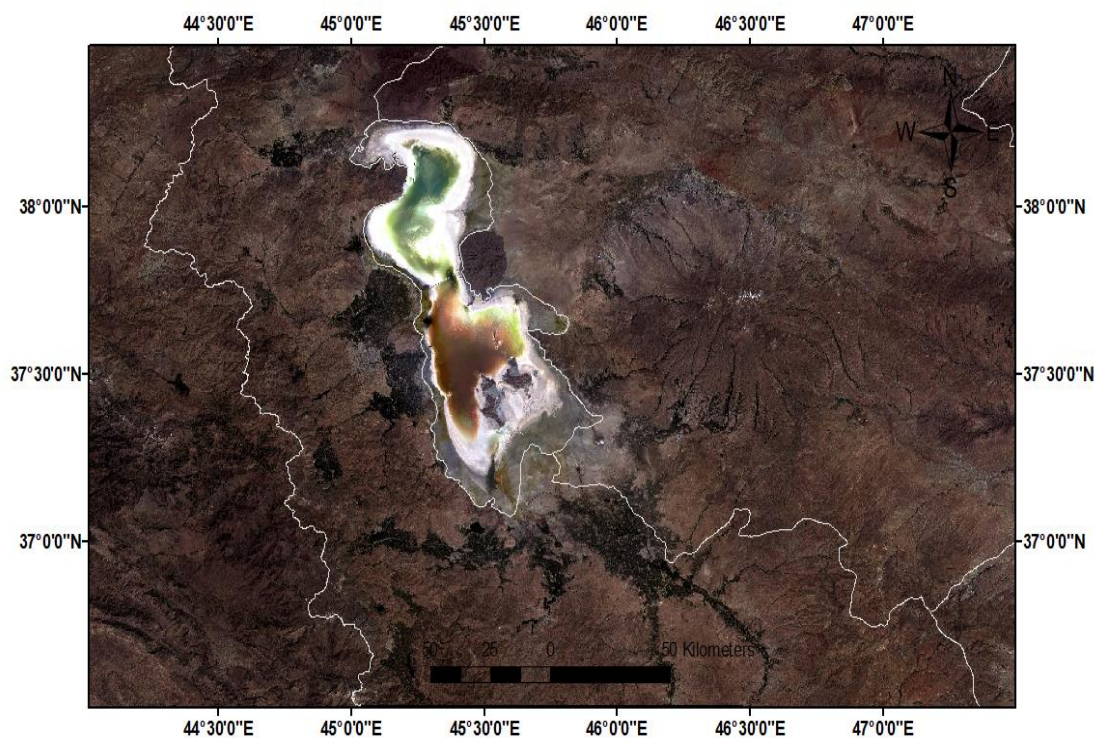
<sup>1</sup> Particulate Matter

<sup>2</sup> Southern Oscillation Index

از وبسایت NCAR<sup>۳</sup> تهیه شده و داده‌های شاخص نوسان جنوبی (SOI) از وبسایت Physical Sciences Laboratory (PSL) وابسته به NOAA دریافت شده است. همچنین داده‌های میانگین فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از وبسایت <https://psl.noaa.gov/> دریافت شده است. در جدول (۱) مشخصات داده‌های مورد استفاده ارائه گردیده است.

سطحی خاک (۰-۷ سانتی‌متر) از داده‌های بازتحلیل ERA5-Land استخراج شدند. پایش پوشش گیاهی و شرایط دمایی سطح زمین با استفاده از محصولات MODIS شامل شاخص NDVI<sup>۱</sup> و دمای سطح زمین (LST<sup>۲</sup>) انجام شد. همچنین، به منظور بررسی کیفیت هوا، از مجموعه داده‌های جهانی PM2.5 به دست آمده از مشاهدات ماهواره‌ای استفاده شد.

داده‌های شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO) از مجموعه داده NAO station-based (monthly)



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

<sup>۳</sup> National Center for Atmospheric Research

<sup>۱</sup> Normalized Difference Vegetaion Index

<sup>۲</sup> Land Surface Temperature

جدول ۱. مشخصات داده‌های مورد استفاده

| کمیت                                | منبع / سازمان                                                    | شناسه مجموعه داده                   | تفکیک مکانی | تفکیک زمانی                  |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------|------------------------------|
| بارش                                | دانشگاه کالیفرنیا سانتا باربارا / گروه مخاطرات اقلیمی (UCSB/CHG) | CHIRPS Daily Version 2.0            | ۵/۵ کیلومتر | روزانه (تجمیع شده به ماهانه) |
| دمای هوا (۲ متر)                    | مرکز پیش‌بینی‌های میان‌مدت هواشناسی اروپا (ECMWF)                | ERA5-Land Reanalysis                | ۹ کیلومتر   | ساعتی (میانگین ماهانه)       |
| رطوبت حجمی خاک (لایه ۰-۷ سانتی‌متر) | ECMWF                                                            | ERA5-Land Reanalysis                | ۹ کیلومتر   | ساعتی (میانگین ماهانه)       |
| میانگین فشار سطح دریا               | ECMWF                                                            | ERA5-Land Reanalysis                | ۹ کیلومتر   | ساعتی (میانگین ماهانه)       |
| شاخص پوشش گیاهی (NDVI)              | ناسا / سازمان زمین‌شناسی آمریکا (NASA/USGS)                      | MOD13A2.061 (Terra)                 | ۱ کیلومتر   | ترکیب ۱۶ روزه                |
| دمای سطح زمین روزانه (LST Day)      | ناسا / USGS                                                      | MOD11A2.061 (Terra)                 | ۱ کیلومتر   | ترکیب ۸ روزه                 |
| ذرات معلق PM2.5                     | دانشگاه واشنگتن                                                  | V6.GL.02 مبتنی بر (GWR)             | ۱/۱ کیلومتر | ماهانه                       |
| تصاویر ماهواره‌ای                   | ناسا / USGS                                                      | Landsat 8/9 OLI/TIRS                | ۳۰ متر      | ترکیب میانه ۱۶ روزه          |
| شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO)         | مرکز ملی پژوهش‌های جوی (NCAR)                                    | NAO Station-Based (Monthly)         | -           | ماهانه                       |
| شاخص نوسان جنوبی (SOI)              | آزمایشگاه علوم فیزیکی NOAA (PSL)                                 | Southern Oscillation Index          | -           | ماهانه                       |
| فشار سطح دریا (SLP)                 | NOAA / Physical Sciences Laboratory (PSL)                        | NOAA PSL Composite Map Monthly SLP  | 2.5° × 2.5° | ماهانه                       |
| ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال    | NOAA / Physical Sciences Laboratory (PSL)                        | NOAA PSL Composite Map Monthly Z500 | 2.5° × 2.5° | ماهانه                       |

## روش پژوهش

در این مطالعه نخست سری زمانی کمیت‌های بارش، دما و رطوبت نسبی هوا در ارتفاع ۲ متری، میانگین فشار سطح دریا، دما و رطوبت خاک، شاخص پوشش گیاهی NDVI و غلظت ذرات معلق PM2.5 در دوره زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲) ارائه شد. به منظور انجام تحلیل‌ها در مقیاس حوضه آبریز و با توجه به تفاوت تفکیک مکانی داده‌های مورد استفاده، میانگین مکانی تمامی پیکسل‌های واقع در محدوده حوضه برای هر متغیر محاسبه و به منزله سری زمانی نماینده شرایط متوسط حوضه در تحلیل‌های بعدی به کار گرفته شد. سپس برای بررسی دقیق‌تر آنها در دوره مورد مطالعه، میانگین سالانه این متغیرها نیز مورد

تحلیل قرار گرفت. برای شناسایی و کمی‌سازی روند هر یک از سری‌های زمانی از آزمون من-کندال و برآورد گر سن-سلوپ استفاده شد. از آنجا که بارش زمستانه در منطقه مورد مطالعه از اهمیت زیادی برخوردار است، میانگین ماهانه بارش در فصل زمستان (ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه) نیز به صورت مجزا در این دوره زمانی بررسی شد. به منظور تعیین الگوی همبستگی غالب بر بارش زمستانه در منطقه نقشه‌های میانگین فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به صورت میانگین کل دوره و بی‌هنجاری پربارش‌ترین و کم‌بارش‌ترین ماه در دوره مطالعه ترسیم شد.

عنوان متغیر مستقل تعریف شدند. به منظور جلوگیری از نشت اطلاعات زمانی (data leakage)، داده‌ها به صورت ترتیبی و بدون اختلاط (shuffle=False) به دو بخش آموزش (۷۵٪ ابتدایی سری زمانی) و آزمون (۲۵٪ انتهایی سری زمانی) تقسیم شدند. در آموزش مدل Random Forest Regressor تعداد درخت‌ها ۵۰۰، حداکثر عمق هر درخت ۸، حداقل نمونه در هر برگ ۵ و برای تکرارپذیری نتایج random\_state = 42 در نظر گرفته شد. این تنظیمات به تعادل بین توانایی تعمیم‌پذیری مدل و جلوگیری از بیش‌برازش کمک می‌کنند، به طوری که مدل قادر باشد اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت متغیرهای سطح و جو بر بارش را به طور هم‌زمان شناسایی کند. برای ارزیابی توان توضیح‌دهندگی مدل جنگل تصادفی، از ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده شد. این شاخص میزان تغییرات متغیر وابسته را که توسط مدل توضیح داده می‌شود نشان می‌دهد و از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (1)$$

### مبانی نظری

آزمون من-کندال (Mann-Kendall Test)

آزمون من-کندال یک آزمون ناپارامتری پرکاربرد برای شناسایی وجود روند یکنواخت (افزایشی یا کاهششی) در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و اقلیمی است. از آنجا که این آزمون مبتنی بر رتبه داده‌ها بوده و به توزیع آماری خاصی وابسته نیست، برای داده‌های اقلیمی که اغلب دارای توزیع غیرنرمال، داده‌های پرت و گسستگی زمانی هستند، بسیار مناسب است. در این آزمون، تمام جفت‌های ممکن داده‌ها در یک سری زمانی با یکدیگر مقایسه می‌شوند و آماره آزمون  $S$  براساس علامت اختلاف بین مقادیر محاسبه می‌شود. علامت مثبت یا منفی آماره نهایی نشان‌دهنده وجود روند افزایشی یا کاهششی است، در حالی که مقدار آماره نرمال شده  $Z$  و مقدار احتمال ( $p$ -value) برای بررسی معناداری آماری روند به کار می‌روند. مزیت

در ادامه ضریب همبستگی اسپیرمن برای بررسی ارتباط میان بارش و سایر کمیت‌های محیطی و اقلیمی مورد مطالعه با در نظر گرفتن تاخیرهای زمانی (lagged correlation) محاسبه شد. علاوه بر این کمیت‌ها، ارتباط بارش با شاخص‌های NAO و SOI که کنترل‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی هستند و از طریق تغییر در گردش عمومی جو و دورپیوندها می‌توانند بر بارش منطقه‌ای اثرگذار باشند، نیز بررسی شد. از آنجا که اثر متقابلی میان کمیت‌های مورد بررسی با بارش وجود دارد، تاخیر زمانی از سه ماه پیش تا ۳ ماه بعد در نظر گرفته شد. این رویکرد امکان تفکیک روابط هم‌زمان، اثرات پیش‌شرطی و پاسخ تأخیری متغیرها نسبت به یکدیگر را فراهم می‌کند.

در انتها از مدل جنگل تصادفی برای بررسی روابط غیرخطی بین متغیرهای اقلیمی-محیطی و بارش و همچنین شناسایی اهمیت نسبی متغیرها استفاده شد. از آنجا که بارش کمیتی پیچیده بوده و به شدت به عوامل متغیرجوی وابسته است، هدف از کاربست این مدل پیش‌بینی بارش ماهانه نبوده و صرفاً تعیین ارتباط میان کمیت‌های مورد بررسی با بارش است. مدل جنگل تصادفی می‌تواند با در نظر گرفتن متغیرهای با تاخیر زمانی (lagged features) روابط پیچیده بین شرایط گذشته سطح زمین و جو و وقوع بارش را شناسایی کند. همچنین، محاسبه اهمیت ویژگی‌ها، امکان تشخیص عوامل کلیدی کنترل‌کننده بارش یا پاسخ‌دهنده به آن را فراهم می‌کند.

در اجرای مدل جنگل تصادفی برای شناسایی اثرات پیش‌شرطی و پاسخ متغیرهای محیطی و اقلیمی به بارش، کمیت‌های دما و رطوبت نسبی هوا در ارتفاع ۲ متری، دمای سطح زمین و رطوبت خاک، میانگین فشار سطح دریا، شاخص NDVI و غلظت ذرات معلق ( $PM_{2.5}$ ) با تاخیرهای ۳- تا ۳+ ماه به عنوان متغیر مستقل و بارش ماهانه به عنوان متغیر وابسته (هدف) تعیین شدند. نمایه‌های فصلی (season) نیز به صورت one-hot encoding به

اصلی آزمون من-کندال این است که نسبت به مقادیر حدی<sup>۱</sup> و نوفه داده‌ها حساسیت کمتری دارد. با این حال، این آزمون تنها وجود یا عدم وجود روند را مشخص می‌کند و اطلاعاتی درباره شدت یا نرخ تغییرات ارائه نمی‌دهد.

برآوردگر سن-اسلوپ (Sen's Slope Estimator)

روش سن-اسلوپ به منزله مکمل آزمون من-کندال، برای برآورد میزان یا شیب روند در یک سری زمانی به کار می‌رود. این روش نیز ناپارامتری است و براساس محاسبه شیب بین تمام جفت‌های ممکن داده‌ها در طول زمان تعریف می‌شود. شیب نهایی به صورت میانه<sup>۲</sup> این شیب‌ها محاسبه می‌شود که باعث کاهش اثر داده‌های پرت می‌گردد. برآوردگر سن-اسلوپ نشان می‌دهد که متغیر مورد نظر به طور متوسط در هر واحد زمان (مثلاً سال یا ماه) چه میزان افزایش یا کاهش داشته است. ترکیب آزمون من-کندال و سن-اسلوپ امکان ارائه تصویری کامل‌تر از رفتار زمانی متغیر را فراهم می‌کند؛ به طوری که آزمون من-کندال وجود روند را مشخص می‌کند و سن-اسلوپ شدت آن را کمی‌سازی می‌نماید. این روش به طور گسترده در مطالعات تغییر اقلیم، تحلیل بارش، دما، خشکسالی و سایر متغیرهای محیطی مورد استفاده قرار گرفته است.

شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO)

شاخص نوسان اطلس شمالی یکی از مهم‌ترین الگوهای گردش جوی در نیم کره شمالی است که تغییرات فشار سطح دریا بین دو مرکز عمده جوی، یعنی کم‌فشار ایسلند و پرفشار آزور را توصیف می‌کند. این شاخص معمولاً به صورت اختلاف نرمال‌شده فشار سطح دریا بین این دو ناحیه تعریف می‌شود و بیانگر شدت و موقعیت جریان‌های غربی‌آدر

عرض‌های میانی است. اثر NAO معمولاً غیرخطی و وابسته به فصل است و اغلب با یک تأخیر زمانی چند هفته تا چند ماه بر متغیرهای اقلیمی منطقه‌ای ظاهر می‌شود. به همین دلیل، در مطالعات اقلیمی، استفاده از لگ‌های زمانی مختلف NAO برای بررسی اثر پیش‌شرطی آن بر بارش و سایر متغیرها امری ضروری است.

شاخص نوسان جنوبی (SOI)

شاخص نوسان جنوبی نمایانگر نوسانات فشار سطح دریا بین دو ایستگاه تاهیتی و داروین است و یکی از مهم‌ترین شاخص‌های توصیف‌کننده پدیده ال‌نینو-لانیئا (ENSO) به شمار می‌رود. این شاخص به صورت اختلاف نرمال‌شده فشار سطح دریا بین این دو ناحیه تعریف می‌شود و تغییرات آن بیانگر فازهای مختلف ENSO است. مقادیر منفی SOI معمولاً با شرایط ال‌نینو و مقادیر مثبت SOI با شرایط لانیئا مرتبط هستند. این نوسانات می‌توانند از طریق تغییر در الگوهای گردش عمومی جو، امواج سیاره‌ای و دورپیوندها، بر اقلیم مناطق دوردست از اقیانوس آرام، از جمله خاورمیانه، اثرگذار باشند. اثر SOI بر بارش و دمای منطقه‌ای اغلب غیرمستقیم، ضعیف‌تر و با تأخیر زمانی بلندتر نسبت به شاخص‌هایی مانند NAO ظاهر می‌شود. این تأخیر زمانی می‌تواند چند ماه باشد و به فصل، شدت فاز ENSO و برهم‌کنش آن با سایر الگوهای گردش جوی وابسته است. از این رو، بررسی اثر SOI در قالب لگ‌های زمانی مختلف برای شناسایی نقش آن در تغییرپذیری بین‌سالانه بارش ضروری است.

ضریب همبستگی اسپیرمن (Spearman's Rank Correlation)

ضریب همبستگی اسپیرمن یک شاخص ناپارامتری برای سنجش شدت و جهت رابطه

<sup>3</sup>Westerlies

<sup>1</sup> Outliers

<sup>2</sup> Median

شکل ۲ نشان‌دهنده میانگین مکانی سری زمانی متغیرهای بارش تجمعی ماهانه، میانگین ماهانه دمای هوا و رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری، رطوبت خاک، دمای سطح زمین، شاخص NDVI و غلظت ذرات معلق PM2.5 در دوره زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲) در منطقه مورد مطالعه است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، نوسانات ماهانه این کمیت‌ها به خوبی نمایش داده شده و الگوهای فصلی در بسیاری از متغیرها قابل تشخیص است. برای بررسی دقیق‌تر روندهای بلندمدت، میانگین سالانه این متغیرها نیز مورد تحلیل قرار گرفته است. میانگین سالانه کمیت‌های مورد بررسی

شکل ۳ میانگین مکانی بارش تجمعی سالانه و میانگین سالانه متغیرهای دمای هوا، رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری، رطوبت خاک، میانگین فشار سطح دریا، دمای سطح زمین، شاخص NDVI و غلظت ذرات معلق PM2.5 را در همان دوره زمانی ۲۰ ساله نشان می‌دهد. بیشترین میزان بارش در منطقه مربوط به سال ۲۰۱۸ و پس از آن سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۰۶ بوده است، در حالی که کمترین بارش در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۲۲ رخ داده است. در سال ۲۰۱۸ با بیشترین میزان بارش، کمیت‌های دمای هوا، رطوبت نسبی، رطوبت خاک و NDVI نسبت به سال‌های قبل و بعد از آن بیشتر بوده است؛ ولی مقدار دمای خاک و میانگین فشار سطح دریا در این سال تفاوت چندانی نشان نداده است. در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۰۸ با کمترین میزان بارش مقدار غلظت ذرات معلق قابل توجه بوده است. به طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که نوسانات بارش سالانه با تغییرات رطوبت خاک و کیفیت هوا در منطقه مرتبط است و سال‌هایی با بارش کم، افزایش قابل توجه ذرات معلق و کاهش رطوبت خاک را به همراه داشته‌اند.

یکنواخت<sup>۱</sup> بین دو متغیر است. برخلاف ضریب همبستگی پیرسون که براساس مقادیر واقعی داده‌ها و فرض خطی بودن رابطه تعریف می‌شود، ضریب اسپیرمن بر پایه رتبه داده‌ها محاسبه می‌شود و بنابراین نسبت به نرمال بودن توزیع داده‌ها حساس نیست. ضریب اسپیرمن می‌تواند روابط غیرخطی اما یکنواخت را نیز شناسایی کند و به همین دلیل برای تحلیل روابط بین متغیرهای اقلیمی و محیطی که اغلب رفتار پیچیده و غیرخطی دارند، مناسب است. مقدار این ضریب بین +۱ و -۱ قرار دارد؛ مقادیر مثبت نشان‌دهنده رابطه مستقیم و مقادیر منفی بیانگر رابطه معکوس بین دو متغیر هستند.

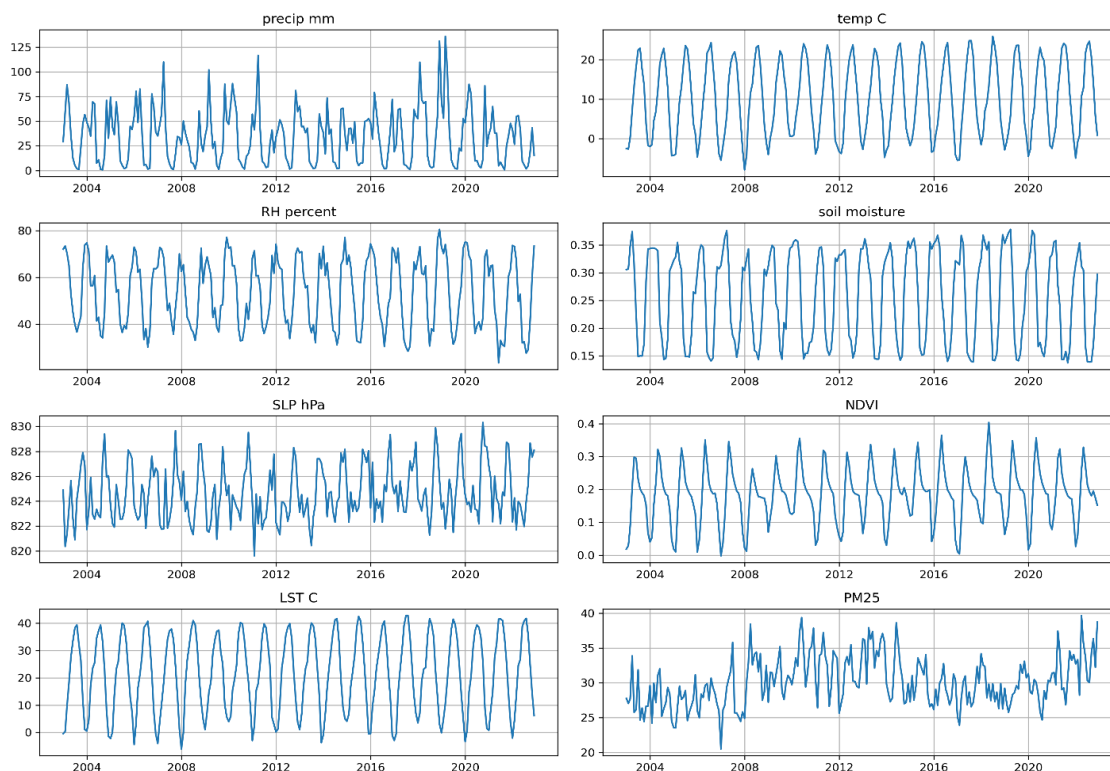
### مدل جنگل تصادفی

جنگل تصادفی (RF) یکی از مدل‌های یادگیری ماشین مبتنی بر درخت تصمیم است که برای پیش‌بینی و تحلیل روابط پیچیده بین متغیرها بسیار پرکاربرد است. این مدل در دسته الگوریتم‌های ensemble قرار می‌گیرد و با ترکیب نتایج چندین درخت تصمیم، هم پیش‌بینی دقیق‌تر و هم تعمیم‌پذیری بهتر نسبت به داده‌های ناشناخته ارائه می‌دهد. در جنگل تصادفی تعداد زیادی درخت تصمیم مستقل ایجاد می‌شود. هر درخت بر روی نمونه‌ای تصادفی از داده‌ها (Bootstrap Sample) آموزش داده می‌شود و در هر گره، بهترین تقسیم‌بندی براساس زیرمجموعه‌ای از ویژگی‌ها انتخاب می‌شود. پیش‌بینی نهایی مدل از طریق میانگین (برای مسائل رگرسیون) یا رأی اکثریت (برای مسائل طبقه‌بندی) حاصل از تمام درخت‌ها محاسبه می‌شود.

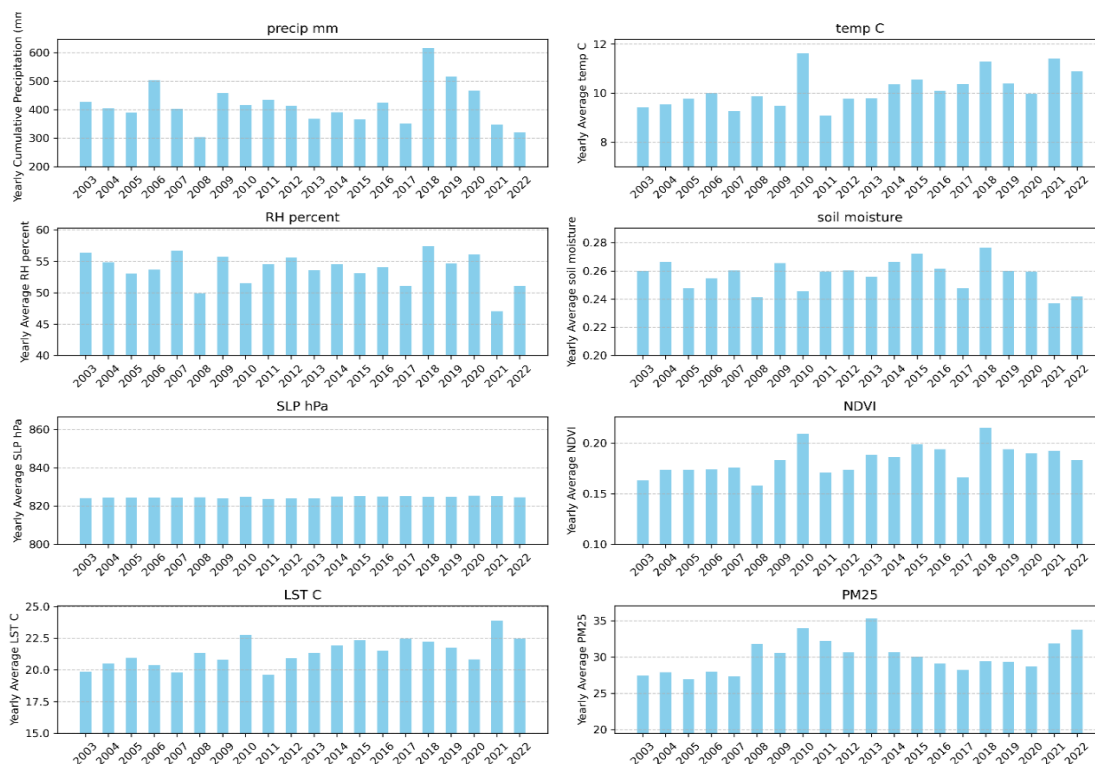
### بحث و نتایج

سری زمانی کمیت‌های مورد بررسی

<sup>1</sup> Monotonic



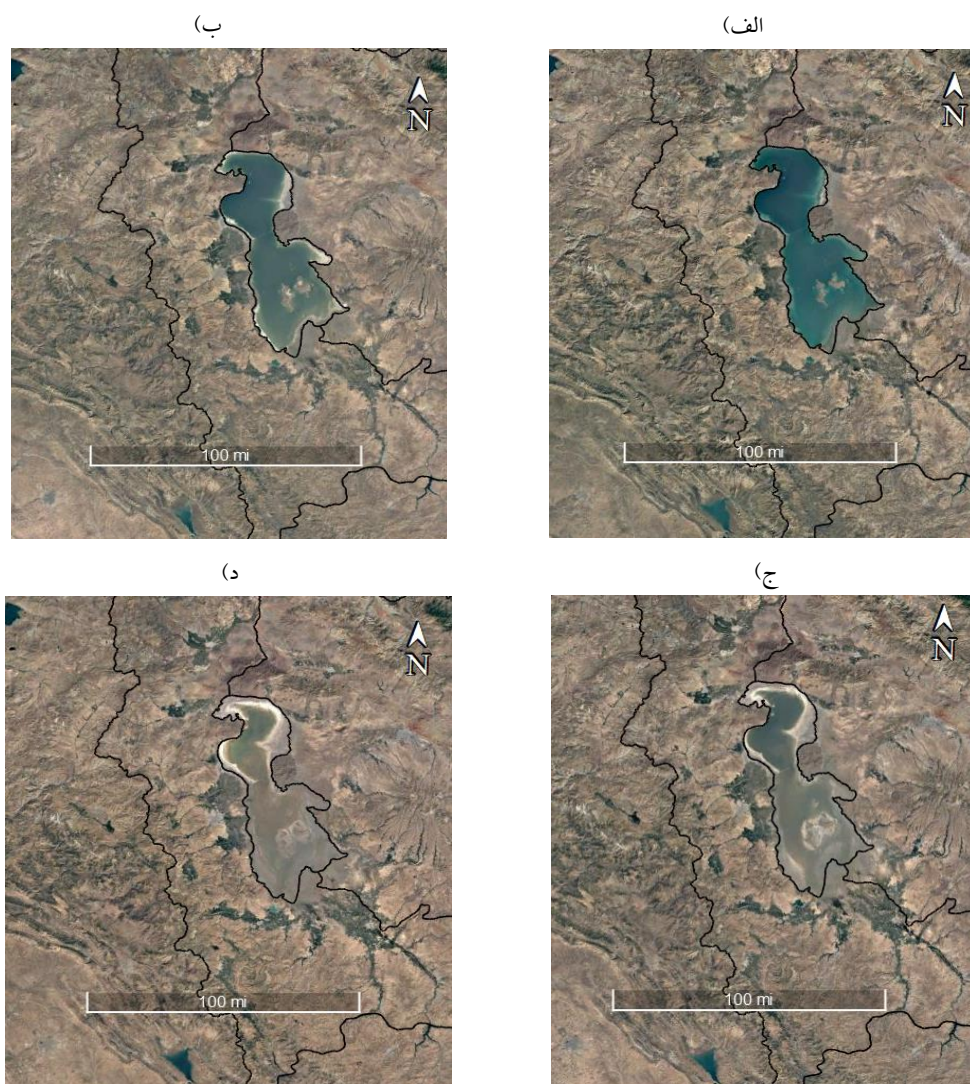
شکل ۲. میانگین مکانی سری زمانی متغیرهای بارش تجمعی ماهانه، میانگین ماهانه دمای هوا و رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری، رطوبت خاک، دمای سطح زمین، شاخص NDVI و غلظت ذرات معلق PM2.5 در دوره زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲)



شکل ۳. میانگین مکانی بارش تجمعی سالانه و میانگین سالانه متغیرهای دمای هوا، رطوبت نسبی در ارتفاع دو متری، رطوبت خاک، میانگین فشار سطح دریا، دمای سطح زمین، شاخص NDVI و غلظت ذرات معلق PM2.5 را در دوره زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۳-۲۰۲۲)

علی‌رغم افزایش بارش در سال ۲۰۱۸، بخش‌های وسیعی از دریاچه خشک باقی مانده‌اند و تنها بخش کوچکی از آن آب دارد. این موضوع نشان می‌دهد که از یک دوره مشخص به بعد، حتی بارش‌های نسبتاً زیاد نیز توانایی احیای کامل دریاچه را ندارند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وضعیت دریاچه ارومیه در دو دهه اخیر تحت تأثیر عوامل بلندمدت هیدرولوژیکی، برداشت آب و تغییرات کاربری زمین قرار گرفته است و ارتباط مستقیم بین بارش سالانه و وسعت آب دریاچه، به ویژه در سال‌های اخیر، کاهش یافته است. به عبارت دیگر، حتی افزایش بارش در برخی سال‌ها نمی‌تواند روند خشک شدن بلندمدت دریاچه را معکوس کند.

شکل ۴ تصویر دریاچه ارومیه در دسامبر سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸ با بازه زمانی ۵ ساله را نشان می‌دهد که با استفاده از نرم‌افزار Google Earth به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سال ۲۰۰۳ دریاچه وضعیت آبی مناسبی داشته و بخش اعظم سطح آن پر از آب بوده است (شکل ۴-الف). در سال ۲۰۰۸، به تدریج بخش‌هایی از اطراف دریاچه خشک شده و وسعت کلی آن کاهش یافته است (شکل ۴-ب). در سال ۲۰۱۳، کاهش حجم آب به ویژه در نیمه جنوبی دریاچه شدیدتر شده و بخش وسیعی از آن از دست رفته است (شکل ۴-ج). در سال ۲۰۱۸، تقریباً تمام مناطق دریاچه خشک شده و تنها یک بخش کوچک در شمال آن آب دارد (شکل ۴-د). با گذشت زمان،



شکل ۴ تصویر دریاچه ارومیه در دسامبر سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸

## تعیین روند تغییر کمیت‌ها

جدول ۲ شیب سن (Sen's slope) و مقادیر p-value

را برای کلیه کمیت‌ها در دوره زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد. همان‌طور که داده‌ها نشان می‌دهند، بارش تجمعی، دمای هوا، رطوبت نسبی، رطوبت خاک، شاخص NDVI و دمای سطح زمین هیچ روند معنی‌داری در طول دوره ۲۰ ساله نداشته‌اند ( $p\text{-value} > 0.05$ ). کمیت میانگین فشار سطح دریا روند افزایشی اندکی ( $0.005$ ) در سطح معناداری ۵٪ نشان داده است. همچنین کمیت غلظت ذرات معلق PM2.5 دارای روند افزایشی کوچکی در سطح معناداری ۱٪ ( $p = 0.00021$ ) بوده و مقدار شیب آن برابر  $0.0124$  است. این افزایش تدریجی نشان می‌دهد که کیفیت هوا در

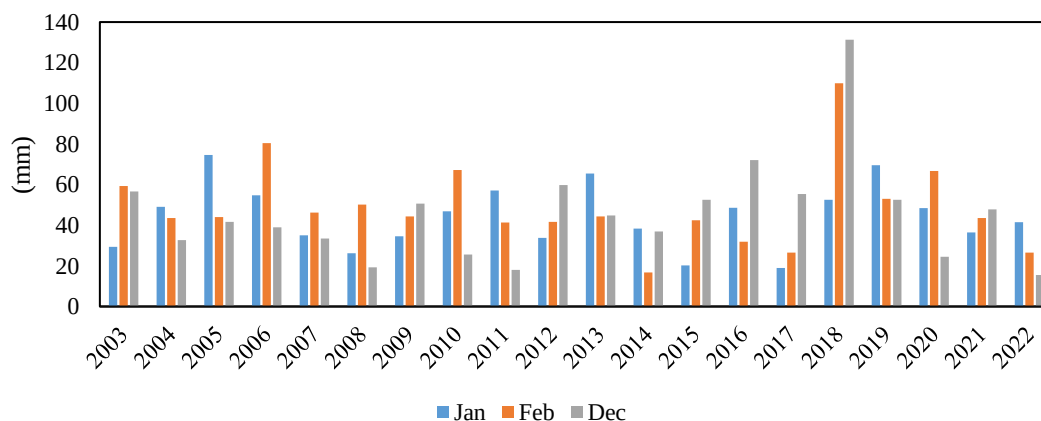
منطقه طی دو دهه اخیر به تدریج کاهش یافته است، حتی با وجود اینکه سایر متغیرهای اقلیمی و پوشش گیاهی تغییر قابل توجهی نداشته‌اند. این امر می‌تواند ناشی از افزایش فعالیت‌های انسانی، منابع آلاینده محلی و منطقه‌ای و یا اثرات ناشی از تغییرات کاربری زمین باشد، که بر غلظت ذرات معلق در هوا تأثیر گذاشته و روند افزایشی PM2.5 را توضیح می‌دهد.

بارش فصل زمستان و الگوی جوی موثر بر آن  
شکل ۵ بارش ماه‌های زمستان در دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ را نشان می‌دهد. بیشترین میزان بارش در این دوره زمانی در ماه‌های دسامبر (حدود ۱۳۱ mm) و فوریه (حدود ۱۱۰ mm) سال ۲۰۱۸ و فوریه سال ۲۰۰۶ (حدود ۸۰ mm) ثبت شده است.

جدول ۲ شیب سن (Sen's slope) و مقادیر p-value را برای کلیه کمیت‌ها در دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲

| Variable      | Trend      | p_value | Sen_slope |
|---------------|------------|---------|-----------|
| precip_mm     | no trend   | 0.769   | -0.005    |
| temp_C        | no trend   | 0.285   | 0.008     |
| RH_percent    | no trend   | 0.359   | -0.011    |
| soil_moisture | no trend   | 0.679   | 0.000     |
| SLP_hPa       | increasing | 0.033   | 0.005     |
| NDVI          | no trend   | 0.308   | 0.000     |
| LST_C         | no trend   | 0.242   | 0.013     |
| PM25          | increasing | 0.000   | 0.012     |

## precipitation



شکل ۵. بارش ماه‌های زمستان در دوره زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲

از روی روسیه تا شمال دریای خزر کشیده شده است و مرکز پرفشاری در شمال غرب ایران و شرق ترکیه وجود دارد و بر روی دریای سیاه، غرب ترکیه، دریای مدیترانه تا جنوب و شرق ایران کم فشار استقرار دارد. در الگوی پربارشی کاهش فشار تا ۳ هکتوپاسکال در اغلب مناطق کشور (به جز نوار سواحل جنوبی دریای خزر و شمال شرق کشور) و شرق ترکیه دیده می شود که بیانگر تضعیف زبانه های پرفشار سبیری در منطقه و تقویت کم فشار نسبی بر روی ایران است. در الگوی کم بارشی با کاهش فشار در کل کشور، تضعیف شدید پرفشار سبیری در عرض های شمالی و نفوذ کم فشار از اروپای شرقی به سوی ایران روبرو هستیم.

در میانگین بلندمدت (۲۰۰۳-۲۰۲۲) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ماه ژانویه (شکل ۷-د)، کم ارتفاع نسبی ۵۵۸ هکتوپاسکال در منطقه مطالعه قرار دارد و در بالای عرض جغرافیایی ۳۳ درجه کم ارتفاع استقرار دارد. در الگوی بی هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل در ماه ژانویه در الگوی پربارشی در غرب دریای سیاه و غرب ترکیه افزایش ارتفاع (۳۵ دکامتر) و بر روی منطقه مطالعه افزایش ارتفاع (۵ تا ۱۰ دکامتر) دیده می شود (شکل ۷-ه). در الگوی کم بارشی کاهش قابل ملاحظه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از شمال دریای سیاه تا شمال دریای سرخ دیده می شود و در منطقه مطالعه ۲۰ دکامتر افت ارتفاع وجود دارد (شکل ۷-و).

در شکل ۸ میانگین بلندمدت (۲۰۰۳-۲۰۲۲) فشار سطح دریا در ماه فوریه (شکل ۱۰-الف) و بی هنجاری همین ماه در سال های ۲۰۱۸ (پربارشی) و ۲۰۲۲ (کم بارشی) نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ مشاهده می شود (شکل ۱۰-ب و ج). در الگوی بلند مدت پرفشار سبیری از روی روسیه تا شمال و مرکز دریای خزر، شمال غرب ایران و شرق ترکیه کشیده شده است و بر روی دریای

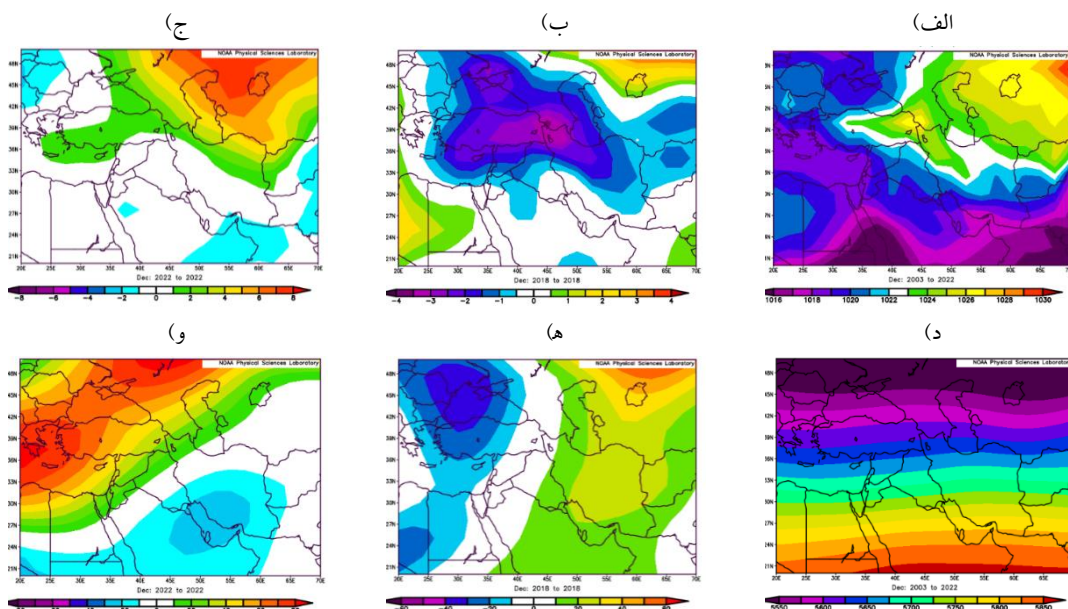
در شکل ۶ میانگین بلندمدت (۲۰۰۳-۲۰۲۲) فشار سطح دریا در ماه دسامبر (شکل ۶-الف) و بی هنجاری همین ماه در سال های ۲۰۱۸ (پربارشی) و ۲۰۲۲ (کم بارشی) نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ مشاهده می شود (شکل ۶-ب و ج). این شکل نشان می دهد که در الگوی بلند مدت پرفشار سبیری از روی روسیه تا دریای خزر، شمال غرب ایران و شرق ترکیه کشیده شده است. در الگوی پربارشی کاهش فشار بیش از ۳ هکتوپاسکال در شمال غرب ایران و شرق ترکیه دیده می شود که بیانگر تضعیف زبانه های پرفشار سبیری در منطقه است. همچنین کاهش فشار در شرق دریای مدیترانه، غرب، شمال و مرکز ایران و بر روی دریای خزر دیده می شود که نشان دهنده تقویت و نفوذ زبانه های کم فشار واقع بر روی مدیترانه تا مناطق شمال غربی ایران است. در الگوی کم بارشی با افزایش فشار در نیمه شمالی ایران (تقویت و روی دریای سیاه، دریای مدیترانه و ترکیه روبرو هستیم.

میانگین بلندمدت (۲۰۰۳-۲۰۲۲) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ماه دسامبر (شکل ۶-د) نشان می دهد که کم ارتفاع نسبی ۵۶۵ هکتوپاسکال در منطقه مطالعه قرار دارد و در بالای عرض جغرافیایی ۳۳ درجه کم ارتفاع مستقر است. براساس بی هنجاری همین ماه در سال های ۲۰۱۸ (پربارشی) و ۲۰۲۲ (کم بارشی) نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ (شکل ۶-ه و) در منطقه دریای سیاه، روی ترکیه و دریای مدیترانه در الگوی پربارشی، کاهش ارتفاع قابل ملاحظه و در الگوی کم بارشی افزایش ارتفاع مشاهده می شود.

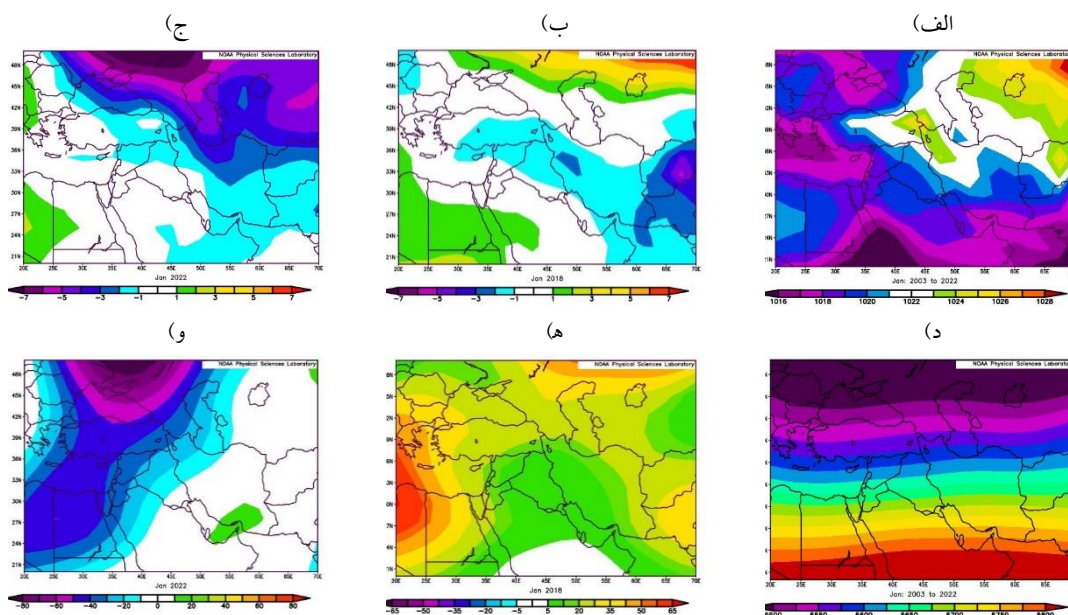
در شکل ۷ میانگین بلندمدت (۲۰۰۳-۲۰۲۲) فشار سطح دریا در ماه ژانویه (شکل ۷-الف) و بی هنجاری همین ماه در سال های ۲۰۱۸ (پربارشی) و ۲۰۲۲ (کم بارشی) نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ مشاهده می شود (شکل ۷-ب و ج). در الگوی بلند مدت پرفشار سبیری

سیاه، غرب ترکیه، دریای مدیترانه تا مرکز و جنوب ایران کم فشار استقرار دارد. در الگوی پربارشی کاهش فشار ۲ تا ۳ هکتوپاسکال در شمال غرب، غرب و مرکز ایران به دلیل نفوذ کم فشار از سوی دریای مدیترانه دیده می شود که سبب تضعیف زبانه های پرفشار سیری

در منطقه شده است. در الگوی کم بارشی افزایش فشار کمی (تا ۱ هکتوپاسکال) در شمال غرب و شمال شرق کشور و نیز افزایش فشار در غرب دریای مدیترانه دیده می شود.



شکل ۶. میانگین بلندمدت (۲۰۲۲-۲۰۰۳) فشار سطح دریا در ماه دسامبر (الف) و بی هنجاری همین ماه در سال های ۲۰۱۸ (پربارشی) و ۲۰۲۲ (کم بارشی) نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ (ب و ج)، میانگین بلندمدت (۲۰۲۲-۲۰۰۳) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ماه دسامبر (د) و بی هنجاری همین ماه در سال های ۲۰۱۸ (پربارشی) و ۲۰۲۲ (کم بارشی) نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ (ه و و)



شکل ۷. مانند شکل ۶ برای ماه ژانویه

سطح دریا در سطح معناداری ۱٪ همبستگی معنی‌دار دارد. بیشترین میزان همبستگی بارش با رطوبت خاک و پس از آن با رطوبت نسبی هوا در ارتفاع دو متری مشاهده می‌شود که بیانگر نقش مستقیم بارش در تأمین رطوبت سطح زمین و لایه‌های پایینی جو در حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. وجود همبستگی منفی قابل توجه میان بارش و دمای هوا نشان می‌دهد که سال‌های پربارش معمولاً با کاهش دمای هوا همراه هستند که می‌تواند ناشی از افزایش پوشش ابر، کاهش تابش دریافتی و افزایش تبخیر-تعرق باشد. این الگو در شرایط اقلیمی حوضه دریاچه ارومیه اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا تغییرات دما مستقیماً بر توازن انرژی سطح زمین و نرخ تبخیر از بستر دریاچه و اراضی اطراف آن اثر می‌گذارد.

در ارتباط با شاخص NDVI، مشاهده همبستگی منفی با بارش بیانگر آن است که پاسخ پوشش گیاهی به بارش به صورت هم‌زمان رخ نمی‌دهد و دارای یک تأخیر زمانی است. از سوی دیگر، در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، نقش فعالیت‌های انسانی، توسعه اراضی کشاورزی و تغییرات کاربری زمین می‌تواند موجب تضعیف ارتباط مستقیم میان بارش و پوشش گیاهی شده باشد، به گونه‌ای که تغییرات NDVI لزوماً منعکس‌کننده نوسانات بارش نباشد. در مطالعه مزیدی و همکاران (۱۴۰۴)، در بررسی همبستگی بین بارش و پوشش گیاهی در هیچکدام از فصل‌ها رابطه معنی‌داری پیدا نشد.

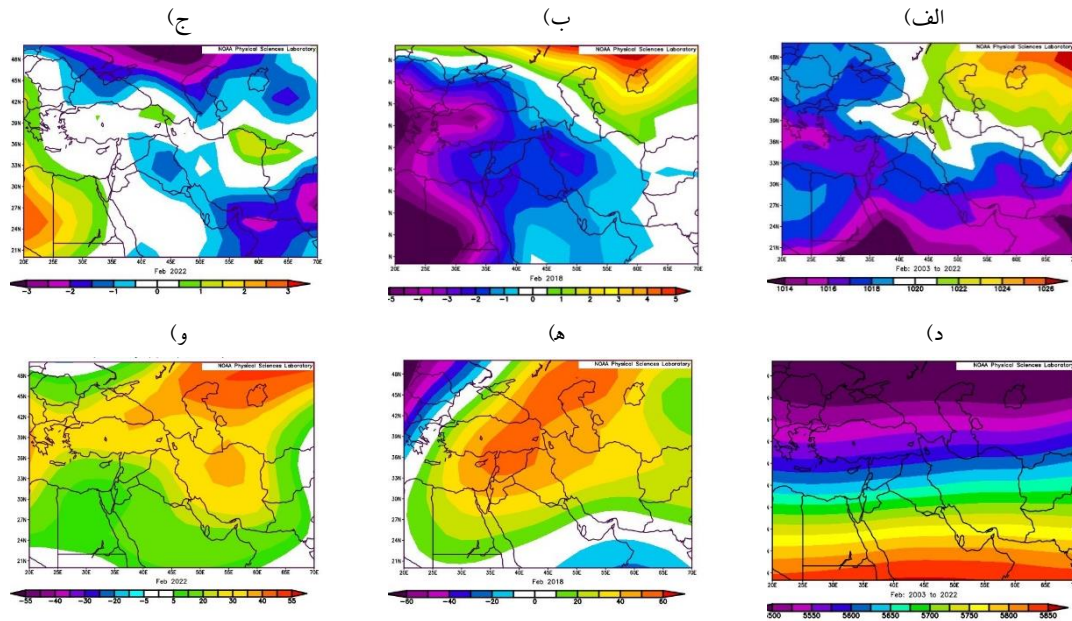
عدم وجود همبستگی معنی‌دار میان بارش و غلظت PM<sub>2.5</sub> را می‌توان در چارچوب خشک شدن دریاچه ارومیه تفسیر کرد. با کاهش سطح آب دریاچه و تبدیل بستر آن به منبع فعال گردوخاک، حتی در سال‌های با بارش نسبتاً مناسب نیز انتشار ذرات معلق ادامه یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که پس از یک آستانه مشخص در فرآیند خشک شدن دریاچه، اثر کنترلی بارش بر کیفیت هوا تضعیف شده و منابع گردوغبار محلی نقش غالب‌تری در تعیین غلظت PM<sub>2.5</sub> ایفا می‌کنند.

در شکل ۸ میانگین بلندمدت (۲۰۰۳-۲۰۲۲) فشار سطح دریا در ماه فوریه (شکل ۱۰-الف) و بی‌هنجاری همین ماه در سال‌های ۲۰۱۸ (پربارشی) و ۲۰۲۲ (کم بارشی) نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ مشاهده می‌شود (شکل ۱۰-ب و ج). در الگوی بلند مدت پرفشار سبیری از روی روسیه تا شمال و مرکز دریای خزر، شمال غرب ایران و شرق ترکیه کشیده شده است و بر روی دریای سیاه، غرب ترکیه، دریای مدیترانه تا مرکز و جنوب ایران کم‌فشار استقرار دارد. در الگوی پربارشی کاهش فشار ۲ تا ۳ هکتوپاسکال در شمال غرب، غرب و مرکز ایران به دلیل نفوذ کم‌فشار از سوی دریای مدیترانه دیده می‌شود که سبب تضعیف زبانه‌های پرفشار سبیری در منطقه شده است. در الگوی کم بارشی افزایش فشار کمی (تا ۱ هکتوپاسکال) در شمال غرب و شمال شرق کشور و نیز افزایش فشار در غرب دریای مدیترانه دیده می‌شود.

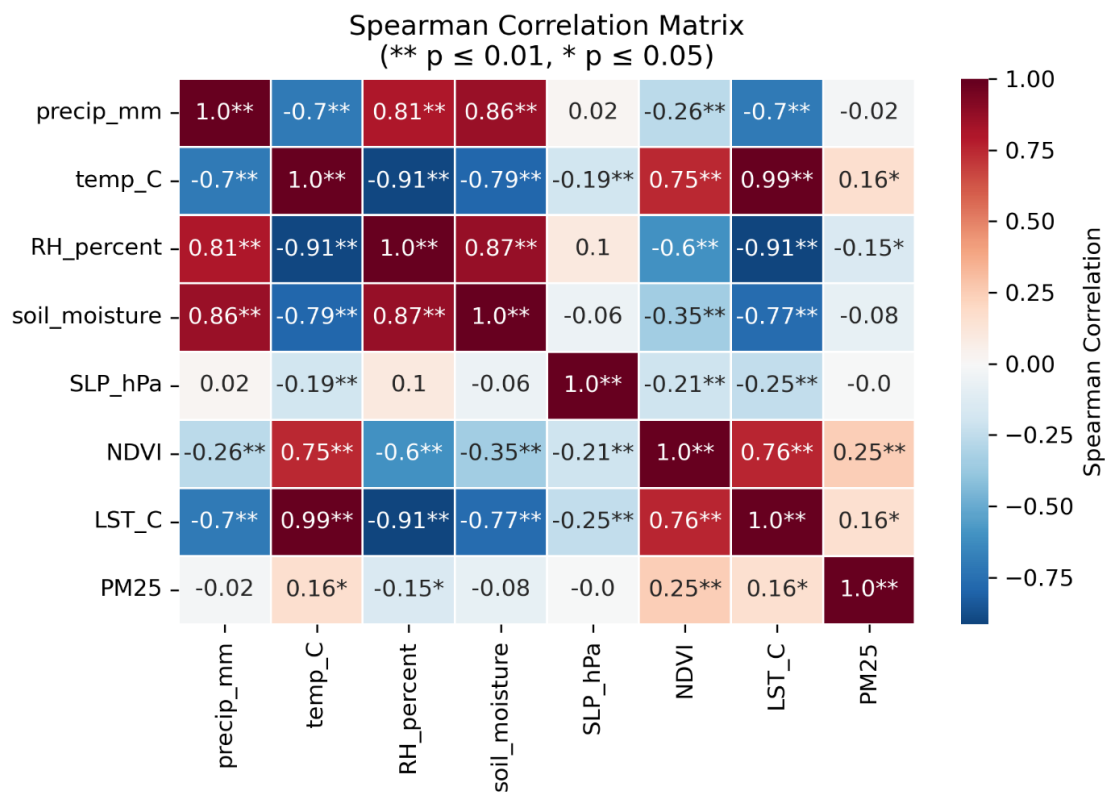
در میانگین بلندمدت (۲۰۰۳-۲۰۲۲) ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ماه فوریه (شکل ۸-د) کم‌ارتفاع نسبی ۵۶۰ هکتوپاسکال در منطقه مطالعه قرار دارد و در بالای عرض جغرافیایی ۳۵ درجه کم ارتفاع استقرار دارد. همچنین بی‌هنجاری همین ماه در سال‌های ۲۰۱۸ (پربارشی) و ۲۰۲۲ (کم بارشی) نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ مشاهده می‌شود (شکل ۸-ه، و). در الگوی بلندمدت ارتفاع ژئوپتانسیل در ماه فوریه در الگوی پربارشی در شرق ترکیه، روی سوریه، عراق، شمال دریای سرخ و شمال غرب و غرب ایران افزایش ارتفاع دیده می‌شود. در الگوی کم بارشی در منطقه افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال دیده می‌شود.

تعیین ارتباط میان بارش با کمیت‌های مورد بررسی

شکل ۹ نقشه ضریب همبستگی میان متغیرهای مورد بررسی را نشان می‌دهد. براساس نتایج، بارش با تمامی کمیت‌ها به جز غلظت ذرات معلق PM<sub>2.5</sub> و میانگین فشار



شکل ۸. مانند شکل ۶ برای ماه فوریه



شکل ۹. نقشه ضریب همبستگی میان متغیرهای مورد بررسی

نشان‌دهنده وجود رابطه علی یا سازوکار فیزیکی مستقیم نیستند. از این رو، تفسیر نتایج همبستگی در این پژوهش

لازم به ذکر است که ضرایب همبستگی صرفاً بیانگر میزان و جهت ارتباط آماری بین متغیرها هستند و لزوماً

شرایط رطوبتی و بارش‌های پیشین وابسته است. در  $Lag-1$  این ارتباط از بین می‌رود. این رفتار می‌تواند نشان‌دهنده اثرات غیرمستقیم و کند پوشش گیاهی بر چرخه رطوبتی یا بازتاب چرخه‌های فصلی مشترک بین بارش و رشد گیاهان باشد و نه یک کنترل مستقیم و کوتاه‌مدت بر بارش.

هر دو متغیر حرارتی دمای هوا و سطح زمین در  $Lag-1$  همبستگی منفی قوی و معنادار با بارش نشان می‌دهند ( $LST: R \approx -0.45, T2m: R \approx -0.47$ ). این نتیجه بیانگر آن است که شرایط گرم‌تر در ماه قبل معمولاً با کاهش بارش در ماه جاری همراه بوده است که می‌تواند ناشی از تقویت پرارتفاع جنب‌حاره‌ای در ماه‌های گرم یا کاهش نفوذ سامانه‌های همدیدی بارشی باشد. در  $Lag-2$  و  $Lag-3$ ، این رابطه تضعیف یا غیرمعنادار می‌شود که نشان می‌دهد اثر حرارتی عمدتاً کوتاه‌مدت است.

رطوبت نسبی یکی از مهم‌ترین پیش‌شرط‌های جوی برای بارش است. همبستگی مثبت و قوی در  $Lag-1$  ( $R=0.55$ ) نشان می‌دهد که افزایش رطوبت جو پایین در ماه قبل احتمال وقوع بارش در ماه جاری را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در  $Lag-2$  و  $Lag-3$ ، رابطه ضعیف‌تر و ناپایدارتر است که مجدداً بر نقش غالب حافظه کوتاه‌مدت جو تأکید می‌کند.

مقادیر همبستگی منفی و معنادار میان فشار هوا با تاخیرهای ۱، ۲ و ۳ ماهه و بارش نشان می‌دهد که وجود فشار کمتر در ماه‌های پیش، سبب افزایش بارش در منطقه می‌شود که می‌تواند ناشی از اثر سامانه‌های کم فشار بر بارش باشد.

برای  $PM_{2.5}$ ، هیچ همبستگی معناداری در لگ‌های منفی مشاهده نمی‌شود. این نتیجه نشان می‌دهد که غلظت ذرات معلق نقش پیش‌نشانگر قابل توجهی برای بارش ماهانه در منطقه ندارد و اثرات بالقوه میکروفیزیکی آن

با در نظر گرفتن شناخت موجود از فرآیندهای اقلیمی و برهم‌کنش‌های سطح-جو انجام شده و از استنباط روابط علی صرفاً براساس همبستگی آماری اجتناب شده است. به طور کلی، نتایج همبستگی حاکی از آن است که اگرچه بارش همچنان عامل اصلی کنترل‌کننده رطوبت خاک و کیفیت هوا در منطقه است، اما در ارتباط با وضعیت دریاچه ارومیه و کیفیت هوا، اثرات بلندمدت خشک شدن دریاچه و مداخلات انسانی بر نقش مستقیم بارش غالب شده‌اند.

بررسی ارتباط میان کمیت‌ها با تقدم زمانی و بارش

جدول ۳ همبستگی بارش با کمیت‌های مورد بررسی را با تقدم ۱ تا ۳ ماهه (نقش پیش‌شرطی متغیرها بر بارش) نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، از آنجا که برای بررسی خودهمبستگی سری‌های زمانی (autocorrelation) در داده‌ها، آزمون انجام نشده، ممکن است مقادیر  $R$  به دلیل ساختار سری‌زمانی بیش‌برآورد شده باشند. رطوبت خاک قوی‌ترین متغیر پیش‌نشانگر بارش در منطقه است. بیشترین همبستگی مثبت در  $Lag-1$  ( $R=0.73$ ) و  $Lag-2$  ( $R=0.38$ ) مشاهده می‌شود، در حالی که در  $Lag-3$  همبستگی معنادار نیست. این الگو نشان می‌دهد که حافظه زمانی رطوبت خاک در بازه حدود ۱ تا ۲ ماهه بیشترین تأثیر را بر بارش دارد. از دیدگاه فیزیکی، خاک مرطوب‌تر از طریق افزایش تبخیر-تعرق و شار رطوبت به لایه مرزی جو، شرایط مساعدتری برای رشد ابر و بارش فراهم می‌کند، اما این اثر در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر تضعیف می‌شود.

برای NDVI، الگوی متفاوتی مشاهده می‌شود. همبستگی مثبت و معنادار در  $Lag-3$  ( $R=0.45$ ) و  $Lag-2$  ( $R=0.25$ ) بیانگر آن است که وضعیت پوشش گیاهی چند ماه قبل می‌تواند با بارش ماه جاری مرتبط باشد. با این حال، این ارتباط به منزله یک رابطه علی مستقیم تفسیر نمی‌شود، زیرا NDVI به طور ذاتی به

(در صورت وجود) یا بسیار ضعیف‌اند یا در مقیاس زمانی ماهانه قابل تشخیص نیستند.

شاخص NAO در هیچ‌یک از لگ‌های بررسی شده همبستگی معناداری با بارش نشان نمی‌دهد که بیانگر ضعف ارتباط مستقیم این شاخص با بارش منطقه در

مقیاس ماهانه است. در مقابل، SOI در لگ ۳- همبستگی منفی و معنادار دارد ( $R = -0.181$ ) که نشان‌دهنده اثر تأخیری نوسانات اقیانوس آرام بر بارش منطقه است؛ به گونه‌ای که فازهای خاص ENSO می‌توانند با تأخیری چندماهه بر الگوهای بارش تأثیر بگذارند.

جدول ۳. همبستگی بارش با کمیت‌های مورد بررسی را با تقدم ۱ تا ۳ ماهه

| Lag(-3) |        | Lag(-2) |        | Lag(-1) |        |       |
|---------|--------|---------|--------|---------|--------|-------|
| P-value | R      | P-value | R      | P-value | R      |       |
| 0.000   | 0.379  | 0.434   | -0.051 | 0.000   | -0.449 | LST   |
| 0.000   | 0.332  | 0.166   | -0.090 | 0.000   | -0.471 | T2m   |
| 0.000   | -0.230 | 0.025   | 0.145  | 0.000   | 0.551  | RH2m  |
| 0.567   | 0.037  | 0.000   | 0.379  | 0.000   | 0.725  | SM    |
| 0.000   | -0.643 | 0.000   | -0.489 | 0.001   | -0.211 | SLP   |
| 0.000   | 0.449  | 0.000   | 0.252  | 0.627   | 0.032  | NDVI  |
| 0.812   | -0.016 | 0.373   | 0.058  | 0.303   | 0.067  | PM2.5 |
| 0.162   | -0.091 | 0.871   | -0.011 | 0.697   | 0.025  | NAO   |
| 0.005   | -0.181 | 0.146   | -0.094 | 0.223   | -0.079 | SOI   |

بررسی ارتباط میان کمیت‌ها با تاخر زمانی و بارش

جدول ۴ همبستگی بارش با کمیت‌های مورد بررسی را به صورت هم‌زمان (برهم‌کنش سطح-جو) و با تاخیر ۱ تا ۳ ماهه (پاسخ متغیرها به بارش) نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، از آنجا که برای بررسی خودهمبستگی سری‌های زمانی (autocorrelation) در داده‌ها، آزمونی انجام نشده، ممکن است مقادیر R به دلیل ساختار سری‌زمانی بیش‌برآورد شده باشند. در بررسی هم‌زمان کمیت‌ها بیشترین ضرایب همبستگی مشاهده می‌شود. در این حالت رطوبت خاک ( $R=0.86$ ) و رطوبت نسبی ( $R=0.81$ ) بیشترین همبستگی مثبت را با بارش دارند. دما و LST همبستگی منفی قوی نشان می‌دهند (حدود  $R=-0.70$ ).

رطوبت خاک همبستگی مثبت قوی در Lag+1 ( $R=0.64$ ) و Lag+2 ( $R=0.28$ ) نشان می‌دهد که بارش منجر به افزایش پایدار رطوبت خاک تا حدود دو ماه بعد می‌شود. در Lag+3، این اثر از بین می‌رود و حتی علامت همبستگی تغییر می‌کند که بیانگر محدود بودن حافظه رطوبتی خاک در منطقه است.

الگوی NDVI در لگ‌های مثبت بسیار شاخص است. همبستگی منفی و رو به افزایش از Lag0 تا Lag+2 نشان می‌دهد که پاسخ پوشش گیاهی به بارش با تاخیر زمانی مشخص و به شدت غیرهم‌زمان است. این رفتار احتمالاً ناشی از چرخه فصلی مشترک بارش و رشد گیاهان یا تأثیر عوامل محدودکننده دیگر (مانند دما یا مدیریت کشاورزی) بر NDVI است و نشان می‌دهد که

تفسیر ساده (افزایش بارش = افزایش NDVI) در مقیاس ماهانه همواره معتبر نیست.

همبستگی منفی قوی دما و LST در Lag+1 و Lag+2 نشان می‌دهد که بارش با کاهش دمای هوا و دمای سطح زمین در ماه‌های بعد همراه است؛ پدیده‌ای که می‌تواند ناشی از افزایش رطوبت خاک، افزایش ابرناکی و کاهش شار تابشی ورودی باشد. تضعیف این رابطه در Lag+3 بیانگر کوتاه‌مدت بودن این اثر است.

رطوبت نسبی در تمامی لگ‌های مثبت همبستگی مثبت و معنادار نشان می‌دهد، که بیانگر تداوم شرایط مرطوب جوی پس از وقوع بارش است. PM2.5 در لگ‌های مثبت، به ویژه در Lag+2 و Lag+3، همبستگی منفی و معنادار دارد. این نتیجه به وضوح بیانگر اثر شستشوی جوی ناشی از بارش و کاهش تدریجی غلظت ذرات معلق در ماه‌های بعد از دوره‌های بارشی است و نه اثر کنترلی PM2.5 بر بارش.

### نتایج مدل جنگل تصادفی

تحلیل ضریب تعیین ( $R^2$ ) خروجی مدل براساس فصل

از آنجا که هدف از کاربست مدل جنگل تصادفی پیش بینی مقادیر بارش تجمعی ماهانه نیست، نتایج این بخش صرفاً برای ارزیابی عملکرد مدل و میزان اعتماد به نتایج بخش بعدی که اهمیت ویژگی‌ها است ارائه شده است. البته معیارهای متعددی برای ارزیابی دقت مدل‌سازی وجود دارند مانند استفاده از شاخص-Kling-Gupta که می‌تواند به ارزیابی جامع‌تر و دقیق‌تر منجر شود (ژو و همکاران، ۲۰۲۴). در جدول ۵، مقدار  $R^2 = 0.65$  در کل دوره نشان می‌دهد که مدل حدود ۶۵٪ تغییرات بارش ماهانه در کل سال را توضیح می‌دهد. این مقدار بیانگر عملکرد قابل قبول مدل در برآورد

بارش سالانه با استفاده از متغیرهای سطحی و جو و lagهای مختلف است. در فصل زمستان (DJF) مقدار  $R^2 = 0.13$  نشان می‌دهد که مدل تنها حدود ۱۳٪ تغییرات بارش زمستانی را توضیح می‌دهد. کاهش شدید عملکرد در زمستان احتمالاً به دلیل غلبه عوامل همدیدی بزرگ مقیاس است که در مدل ماهانه به طور کامل شناسایی نمی‌شوند. در فصل بهار (MAM) مقدار  $R^2 = -0.07$  نشان‌دهنده عملکرد بسیار ضعیف مدل است. مقدار منفی ضریب تعیین در فصل بهار نشان‌دهنده آن است که مدل جنگل تصادفی در این بازه زمانی حتی نسبت به پیش‌بینی مبتنی بر میانگین نیز عملکرد ضعیف‌تری داشته است. این نتیجه می‌تواند ناشی از الگوهای غیرخطی شدید و ناپایداری بارش‌های بهاری به دلیل تاثیر از سامانه‌های متنوع جوی از جمله همرفت، جبهه‌ها و نوسانات محلی؛ تغییر سریع شرایط جوی و پوشش گیاهی در حال رشد و وابستگی بارش به عوامل همدیدی غیرقابل شناسایی در مدل باشد که روابط پیچیده غیرخطی یا فصلی را ایجاد می‌کنند و توسط مدل فعلی به خوبی شبیه‌سازی نمی‌شوند. در فصل تابستان (JJA) مقدار  $R^2 = 0.86$  عملکرد خوبی را نشان می‌دهد. در تابستان، کنترل بارش عمدتاً توسط عوامل سطحی مانند رطوبت خاک و پوشش گیاهی و تبخیر-تعرق انجام می‌شود که توسط مدل با lagهای مثبت و منفی به خوبی شناسایی شده است. این مقدار تأیید می‌کند که مدل جنگل تصادفی برای فصل گرم مناسب است و روابط سطح-جو را به خوبی نشان می‌دهد. در فصل پاییز (SON) مقدار  $R^2 = 0.81$  نیز نشان‌دهنده عملکرد قوی مدل است. پاییز نیز تحت تأثیر ترکیبی از عوامل سطحی و ورود سامانه‌های جوی مرطوب قرار دارد و مدل قادر است بخش اعظم تغییرات بارش را شبیه‌سازی کند.

نتایج نشان می‌دهد، ماهیت ناپستای سامانه‌های هیدرو-اقلیمی می‌تواند موجب تغییر در شدت و ساختار

روابط بین متغیرها در طول زمان شود، به طوری که  
عملکرد مدل‌های داده‌محور از جمله جنگل تصادفی در  
بازه‌های زمانی یا فصول مختلف متفاوت است (مدیر  
عزیزی و همکاران، ۲۰۲۳؛ کوسالی و همکاران، ۲۰۲۲).

جدول ۴. همبستگی بارش با کمیت‌های مورد بررسی به صورت هم زمان و با تاخیر ۱ تا ۳ ماهه

| Lag3    |       | Lag2    |       | Lag1    |       | Lag0    |       |       |
|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|-------|
| P-value | R     | P-value | R     | P-value | R     | P-value | R     |       |
| 0.000   | -0.32 | 0.000   | -0.60 | 0.000   | -0.74 | 0.000   | -0.70 | LST   |
| 0.000   | 0.281 | 0.000   | 0.575 | 0.000   | 0.736 | 0.000   | 0.698 | T2m   |
| 0.001   | 0.212 | 0.000   | 0.498 | 0.000   | 0.685 | 0.000   | 0.810 | RH2m  |
| 0.105   | 0.106 | 0.000   | 0.283 | 0.000   | 0.638 | 0.000   | 0.861 | SM    |
| 0.000   | 0.318 | 0.000   | 0.361 | 0.000   | 0.280 | 0.783   | 0.018 | SLP   |
| 0.000   | 0.654 | 0.000   | 0.753 | 0.000   | 0.587 | 0.000   | 0.264 | NDVI  |
| 0.003   | 0.194 | 0.000   | 0.254 | 0.064   | 0.120 | 0.755   | 0.020 | PM2.5 |

جدول ۵. ضریب تعیین ( $R^2$ ) مدل پیش‌بینی بارش براساس فصل

| دوره زمانی | کل دوره | بهار  | تابستان | پاییز | زمستان |
|------------|---------|-------|---------|-------|--------|
| $R^2$      | ۰/۶۵    | -۰/۰۷ | ۰/۸۶    | ۰/۸۱  | ۰/۱۳   |

#### تحلیل اهمیت ویژگی‌ها در پیش‌بینی بارش

نتایج جنگل تصادفی (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که رطوبت خاک در همان ماه (soil\_moisture\_lag0) با اهمیت بسیار بالا (حدود ۷۰٪) اصلی‌ترین عامل مؤثر بر بارش در منطقه اطراف دریاچه ارومیه است. این موضوع با یافته‌های همبستگی نیز مطابقت دارد و نشان می‌دهد که شرایط رطوبتی خاک در کوتاه‌مدت (همان ماه) نقش کلیدی در کنترل و پیش‌بینی بارش دارد. این اثر می‌تواند ناشی از افزایش تبخیر-تعرق و شار رطوبتی به لایه مرزی جو باشد که شرایط مساعدتری برای رشد ابر و تشکیل بارش فراهم می‌کند. رطوبت نسبی در همان ماه با اختلاف زیاد رتبه دوم اهمیت را دارد. پوشش گیاهی با تاخیر دو ماهه در رتبه بعدی قرار دارد و نشان می‌دهد که پوشش گیاهی ماه‌های قبل تا حدی می‌تواند پیش‌شرط

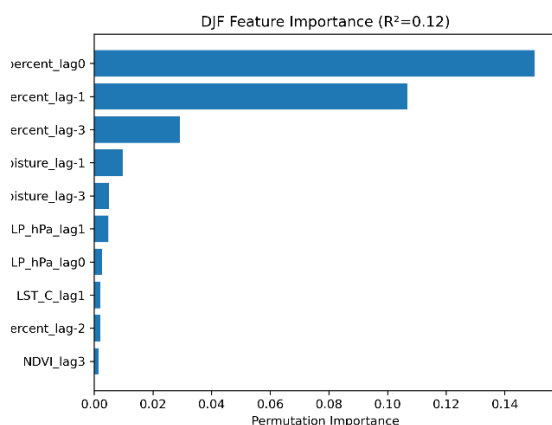
بارش باشد، اما پاسخ پوشش گیاهی به بارش (لگ مثبت) در پیش‌بینی ماهانه تأثیر بسیار کمی دارد. این الگو با نتایج همبستگی مثبت و منفی قبلی مطابقت دارد و نشان‌دهنده پاسخ تأخیری و چرخه فصلی NDVI است. پس از آن، میانگین فشار سطح دریا در همان ماه نسبت به سایر کمیت‌ها از اهمیت بیشتری برخوردار است که نشان دهنده نقش عوامل همدیدی و بزرگ‌مقیاس در بارش این منطقه است.

در فصل زمستان میزان رطوبت نسبی در همان ماه و ماه‌های پیشین بیشترین ارتباط را با بارش نشان داده‌اند. پس از آن رطوبت خاک در ماه‌های قبل و میانگین فشار سطح دریا در همان ماه و ماه بعد در رتبه‌های بعدی اهمیت قرار دارند.

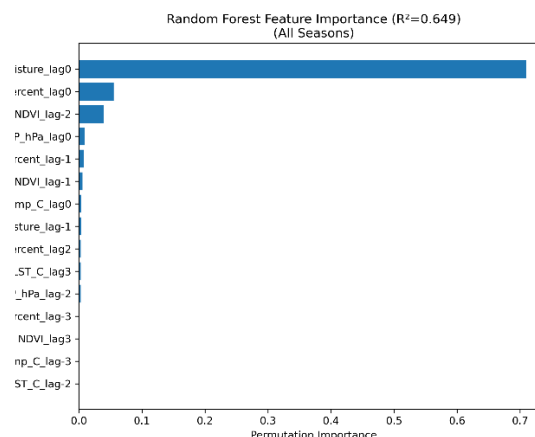
## بحث و نتایج

در این پژوهش، روندها، تغییرپذیری زمانی و روابط اقلیمی-محیطی مؤثر بر بارش در حوضه آبریز

(ب)



(الف)



شکل ۱۰. نتایج جنگل تصادفی برای اهمیت ویژگی‌ها در پیش‌بینی بارش

و رطوبت خاک مهم‌ترین پیش‌نشانگر کوتاه‌مدت بارش در مقیاس ماهانه است. همچنین، ارتباط NDVI با بارش بیشتر بازتاب‌دهنده چرخه‌های فصلی مشترک و پاسخ پوشش گیاهی به شرایط رطوبتی است تا یک رابطه علی مستقیم. عدم وجود رابطه معنادار میان بارش و  $PM_{2.5}$  در تقدم‌های زمانی بررسی‌شده نشان می‌دهد که اثر بارش بر غلظت ذرات معلق در مقیاس زمانی مورد مطالعه، احتمالاً به‌صورت کوتاه‌مدت و از طریق فرآیندهایی مانند شست‌وشوی مرطوب آشکار می‌شود؛ فرآیندی که می‌تواند با حذف ذرات معلق از ستون جو، موجب کاهش غلظت  $PM_{2.5}$  شود (وسترولت و همکاران، ۲۰۱۶).

نتایج مدل جنگل تصادفی نیز نقش غالب رطوبت خاک، رطوبت نسبی و فشار سطح دریا را در کنترل بارش تأیید کرد. عملکرد بهتر مدل در فصول گرم نسبت به زمستان بیانگر اهمیت بیشتر فرآیندهای

که اغلب متغیرهای اقلیمی و سطح زمین از جمله بارش، دما، رطوبت خاک و NDVI فاقد روند معنادار بلندمدت بوده‌اند، در حالی که غلظت  $PM_{2.5}$  روند افزایشی معناداری را نشان می‌دهد که بیانگر تشدید تدریجی افت کیفیت هوا در منطقه است.

تحلیل همدیدی بارش زمستانه نشان داد که سال‌های پر بارش با تضعیف پرفشار سبیری و تقویت سامانه‌های کم‌فشار مدیترانه‌ای همراه بوده‌اند، در حالی که سال‌های کم‌بارش تحت تأثیر الگوهای پرفشار و افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل قرار داشته‌اند. این نتایج بر نقش عوامل همدیدی بزرگ‌مقیاس در کنترل بارش فصل سرد منطقه تأکید دارد و با نتایج مطالعات پیشین در اقلیم‌شناسی ایران همخوانی دارد (علیجانی، ۲۰۰۲؛ ناظم‌السادات و کوردی، ۲۰۰۰). نتایج همبستگی اسپیرمن نشان داد که رطوبت خاک و رطوبت نسبی هوا بیشترین ارتباط را با بارش دارند

سطحی و بازخوردهای محلی در این فصول و نقش پررنگ تر عوامل همدیدی در فصل سرد است (موسوی و همکاران، ۲۰۱۸).

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بارش همچنان یکی از عوامل کلیدی در شرایط هیدرو-اقلیمی حوضه دریاچه ارومیه است؛ با این حال، براساس مطالعات پیشین، تغییرات وضعیت دریاچه را نمی‌توان صرفاً به نوسانات بارش نسبت داد. توسعه کشاورزی آبی، برداشت بی‌رویه منابع آب، سدسازی و تغییرات کاربری زمین نیز در کنار عوامل اقلیمی نقش مهمی در افت تراز دریاچه و تشدید پیامدهای زیست‌محیطی آن داشته‌اند (شولتر و همکاران، ۲۰۲۰؛ پارسی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۳). بنابراین، موفقیت برنامه‌های احیای دریاچه مستلزم مدیریت هم‌زمان عوامل اقلیمی و انسانی در سطح حوضه است.

از محدودیت‌های این پژوهش می‌توان به طول دوره آماری ۲۰ ساله و استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و بازتحلیل به جای مشاهدات مستقیم زمینی برای تمامی متغیرها اشاره کرد. دوره زمانی مطالعه براساس دسترس‌پذیری هم‌زمان و پیوسته داده‌های مورد استفاده انتخاب شده است. همچنین، تفاوت در تفکیک مکانی محصولات مختلف و استفاده از میانگین‌های حوضه‌ای ممکن است بخشی از ناهمگنی‌های مکانی موجود در حوضه دریاچه ارومیه را هموار کرده باشد. با این حال، این داده‌ها امکان بررسی یکپارچه تغییرات اقلیمی و محیطی حوضه را در یک دوره نسبتاً بلندمدت فراهم می‌کنند.

### منابع

۱. ابراهیمی، ز.، مفیدی، آ.، و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۲). پیش‌نگری بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه تحت شرایط تغییر اقلیم. نشریه آب و خاک، ۳۷(۵)، ۷۶۹-۷۸۵.

۲. ایمنی قشلاق، س.، آهنگران، ج.، و مریدی، س. (۱۳۹۵). اثرات خشک شدن دریاچه ارومیه بر گردشگری روستایی (مورد مطالعه: روستاها و بندر ساحلی ارومیه). نشریه گردشگری و اوقات فراغت، ۳(۴)، ۱۷-۲۹.

۳. رضایی بنفشه، م.، و جلالی، ط. (۱۳۹۷). بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر تغییرات زمانی و مکانی تغذیه آب زیرزمینی حوضه آبریز تسوج. نشریه جغرافیا و برنامه-ریزی، ۲۴(۶۴)، ۵۹-۷۹.

۴. زینالی، ب.، و اصغری سراسکانرود، ص. (۱۳۹۱). بررسی تغییرات خط ساحلی تراز آب دریاچه ارومیه و تاثیر آن بر شهرهای واقع در حوضه‌ی آن. فصلنامه علمی پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری، ۳(۶)، ۱۰۳-۱۱۶.

۵. عبدالعلی‌زاده، ف.، خورشیددوست، ع. م.، و جهانبخش، س. (۱۴۰۱). ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 برای شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۳(۱۱)، ۱۷-۳۰.

۶. کریمی، م.، حیدری، س.، و شریف، م. (۱۴۰۱). بررسی تغییرات محیطی و جوی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دو دهه ۲۰۱۹-۲۰۰۰. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۶(۸۱)، ۲۰۷-۱۹۱.

۷. کریمی، م.، و نبی‌زاده، ع. (۱۳۹۷). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سالهای ۲۰۱۱-۲۰۴۰ با استفاده از مدل WG-Lars. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۲(۶۵)، ۲۶۷-۲۸۵.

۸. گلزاری پرتو، ل. (۱۳۹۴). شبیه‌سازی اثر خشک شدن دریاچه ارومیه بر بارش منطقه شمال غرب ایران. نشریه جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۴، ۱۳۷-۱۴۷.

۹. مزیدی، ا.، دهقان، ح.، و طوفانی‌کوپائی، ه. (۱۴۰۴). ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی و رابطه آن بادما و بارش (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه). نشریه نیوار، ۴۹(۱۳۰-۱۳۱)، ۱۷۷-۱۹۴.

۱۰. یاراحمدی، ج.، و رستمی زاد، ق. (۱۳۹۸). تحلیل خشکسالی‌های هیدرولوژیک در شمال دریاچه‌ی ارومیه. نشریه هیدروژئومورفولوژی، ۶(۱۹)، ۷۹-۱۰۰.

- freshwater volume discharged into the Gorgan Bay, Iran. *Natural Resources Research*, 31(2), 835-847.
22. Modabber-Azizi, S., Salarijazi, M., & Ghorbani, K. (2023). A novel approach to recognize the long-term spatial-temporal pattern of dry and wet years over Iran. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 131, 103426.
  23. Moghim, S., & Ramezanpoor, R. (2019). Characterization of aerosol types over Lake Urmia Basin. In Proceedings of the E3S Web of Conferences, Central Asian Dust Conference (CADUC 2019), Dushanbe, Tajikistan, 99, 01006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199901006>.
  24. Mosavi, A., Ozturk P. & Chau K.W. (2018). Flood prediction using machine learning models. *Water*, 10(11), 1536 <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.02781>.
  25. Nazemosadat, M. J., & Cordery, I. (2000). On the relationships between ENSO and rainfall variability in Iran. *International Journal of Climatology*, 20, 1541-1552.
  26. Okhravi, S., Eslamian, S., & Esfahany, S. T. (2017). Drought in Lake Urmia. In Handbook of Drought and Water Scarcity. 1st Edition, CRC Press, 605-618.
  27. Parsinejad, M., Rosenberg, D. E., Ghale, Y. A. G., Khazaei, B., Null, S. E., Raja, O., & Wurtsbaugh, W. A. (2022). 40-years of Lake Urmia restoration research: Review, synthesis and next steps. *Science of the Total Environment*, 832, 155055.
  28. Ravan, P., Ahmady-Birgani, H., Solomos, S., Yassin, M.F., & Abaslinezhad, H. (2022). Wet Scavenging in Removing Chemical Compositions and Aerosols: A Case Study over the Lake Urmia. *Journal of Geophysics Research Atmosphere*. 127, e2021JD035896. <https://doi.org/10.1029/2021JD035896>.
  29. Rezaei, A., & Gurdak, J.J. (2020). Large-scale climate variability controls on climate, vegetation coverage, lake and groundwater storage in the Lake Urmia watershed using SSA and wavelet analysis. *Science of the Total Environment*, 724, 138273. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138273>.
  30. Sanikhani, H. (2022). Spatiotemporal Analysis of Precipitation and its Relationship with Teleconnection Patterns (Case study: Urmia Lake basin). *Irrigation and Water Engineering*, 13(1), 347-368.
  11. Abadi, A.R.S., Hamzeh, N.H., Shukurov, K., Opp, C., & Dumka, U.C. (2022). Long-term investigation of aerosols in the Urmia Lake region in the Middle East by ground-based and satellite data in 2000-2021. *Remote Sensing Journal*. 14, 3827.
  12. Abdolalizadeh, F., Mohammad Khorshiddoust, A., & Jahanbakhsh, S. (2023). Projection of the future outlook of temperature and precipitation in Urmia Lake basin by the CMIP6 models. *Physical Geography Research*, 55(1), pp.95-112.
  13. Abuduwaili, J., Liu, D., & Wu, G. (2010). Saline dust storms and their ecological impacts in arid regions. *Journal of Arid Land*, 2, 144-150.
  14. Ahmady-Birgani, H., Ravan, P., Schlosser, J.S., Cuevas-Robles, A., AzadiAghdam, M., & Sorooshian. (2020). On the chemical nature of wet deposition over a major desiccated lake: Case study for Lake Urmia basin. *Atmospheric Research Journal*. 234, 104762-104774. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104762>.
  15. Alijani, B. (2002). *Iran Climatology*. Tehran University Press.
  16. Boroughani, M., Hashemi, H., Hosseini, S.H., Pourhashemi, S., & Berndtsson, R. (2019). Desiccating Lake Urmia: A new dust source of regional importance. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter*. 17, 1483-1487.
  17. Chen, Z., Gao, X., & Lei, J. (2022). Dust emission and transport in the Aral Sea region. *Geoderma*. 428, 116-177.
  18. Gholampour, A., Nabizadeh, R., Hassanvand, M.S., Taghipour, H., Nazmara, S., & Mahvi, A.H. (2015). Characterization of saline dust emission resulted from Urmia Lake drying. *Journal of Environmental Health Science Engineering*. 13, 82.
  19. Hamzeh, N.H., Ranjbar Saadat Abadi, A., Ooi, M.C.G., Habibi, M., & Schöner, W. Analyses of a Lake Dust Source in the Middle East through Models Performance. *Remote Sensing*. 2022, 14, 2145.
  20. Karami, S., Hamzeh, N.H., Kaskaoutis, D.G., Rashki, A., Alam, K., & Ranjbar, A. (2021). Numerical simulations of dust storms originated from dried lakes in central and southwest Asia: The case of Aral Sea and Sistan Basin. *Aeolian Research Journal*. 50, 100679.
  21. Kousali, M., Salarijazi, M., & Ghorbani, K. (2022). Estimation of non-stationary behavior in annual and seasonal surface

31. Sattari, M.T., Mirabbasi, R., Jarhan, S., Shaker Sureh, F., & Ahmad, S. (2020). Trend and abrupt change analysis in water quality of Urmia Lake in comparison with changes in Lake water level. *Environmental Monitoring and Assessment*. 192, 623.
32. Soudi, M., Ahmadi, H., Yasi, M., & Hamidi, S.A. (2017). Sustainable restoration of the Urmia Lake: History, threats, opportunities and challenges. *European Water*. 60, 341–347.
33. Westervelt, D. M., Horowitz, L. W., Naik, V., Tai, A. P. K., Fiore, A. M., & Mauzerall, D. L. (2016). Quantifying PM<sub>2.5</sub>-meteorology sensitivities in a global climate model. *Atmospheric Environment*, 142, 43–56. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.040>
34. Zhou, X., Leng, Y., Salarijazi, M., Ahmadianfar, I., & Farooque, A. A. (2024). Development of forecasting of monthly SAR time series in river systems: A multivariate data decomposition-based hybrid approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 188, 1355-1375.

# Investigating of climatic factors affecting precipitation in Lake Urmia basin using Spearman correlation and random forest model

Sara Karami<sup>1</sup>, Zahra Ghassabi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, RIMAS, Tehran, Iran

\*Corresponding Author Email: [z.ghassabi@gmail.com](mailto:z.ghassabi@gmail.com), [zghassabi@rimas.ac.ir](mailto:zghassabi@rimas.ac.ir)

Received: 26 April 2026, Accepted: 22 July 2026

## Abstract

The aim of this study is to comprehensively investigate the climatic factors affecting precipitation in the Urmia Lake basin during the 20-year period from 2003 to 2022. For this purpose, a set of satellite and reanalysis data including CHIRPS, MODIS, ERA5-Land, PM2.5 concentrations, and NAO and SOI teleconnection indices were used. The trend of the time series was assessed using the Mann-Kendall test and the age-slope estimator. The relationships between precipitation and climatic-environmental variables were examined using Spearman correlation, simultaneously and considering time lags (–3 to +3 months). Subsequently, the random forest model was used to identify the relative importance of the variables. The results showed that most climatic and surface variables, including precipitation, temperature, soil moisture, and NDVI, lacked a significant trend during the study period, while PM2.5 concentrations and SLP showed a significant increasing trend. Synoptic analysis of winter precipitation showed that the rainy years were accompanied by the weakening of the Siberian high pressure and the strengthening of the Mediterranean low pressure and troughs. The examination of time lags and correlations shows that soil moisture and relative humidity have the greatest relationship with precipitation and play a short-term precondition role in its occurrence. Based on the results of the random forest model, the soil moisture of the current month is the most important factor controlling precipitation. Overall, the findings show that precipitation plays an important role in surface–atmosphere processes. However, the long-term effects of lake drying and human interventions have weakened this relationship. As a result, the direct link between precipitation variability and both lake conditions and air quality has declined. Consequently, even in years with high rainfall, the drying trend of Lake Urmia has not been reversed.

Keywords: Lake Urmia, precipitation, climatic variables, correlation, random forest

## HOW TO CITE THIS ARTICLE

Karami, S., Ghassabi, Z. (2026). *Investigating of climatic factors affecting precipitation in Lake Urmia basin using Spearman correlation and random forest model.*, 9(1): 1-25. Doi: 10.22034/jmas.2026.579472.

## COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

