

مقاله علمی-پژوهشی

# ارزیابی آماری ارتباط بین رودخانه‌های جوی و رخدادهای بارش حدی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

صبا نادری<sup>۱</sup>، مجید منتصری<sup>۲</sup>، سمیه حجابی<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۴

## چکیده

رودخانه‌های جوی مسیره‌های بلند و باریکی در تروپوسفر هستند که نقش مهمی در انتقال رطوبت جوی به مناطق مختلف جهان دارند و در صورتی که با شرایط همدیدی و ترمودینامیکی همراه شوند، می‌توانند موجب بارش‌های سنگین یا سیلاب در مناطق متأثر از این پدیده شوند. در این مطالعه، از یک رهیافت مبتنی بر الگوریتم پردازش تصویر THR در بسته پایتون IPART برای شناسایی رودخانه‌های جوی وارد شونده به محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده شد و ارتباط رخدادهای بارش حدی ماه‌های بارانی (نوامبر تا آوریل) با رودخانه‌های جوی در دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰ به صورت آماری بررسی شد. نتایج نشان داد که در این دوره آماری، ۲۸۸ رودخانه جوی از حوضه دریاچه ارومیه عبور کردند و بیشترین فراوانی رودخانه‌های جوی در ماه‌های آوریل (۳۲/۶۴ درصد) و مارس (۲۶/۷۴ درصد) و با منشأ دریای مدیترانه (۳۳/۶۸ درصد)، دریای سرخ (۱۷/۷۱ درصد) و خلیج عدن (۱۳/۸۹ درصد) بود. سهم رودخانه‌های جوی در تعداد رخدادهای بارش حدی حوضه به طور متوسط در ماه‌های مورد بررسی ۱۶/۹ درصد بود و در مورد ماه آوریل رودخانه‌های جوی بیشترین سهم (۲۵/۸ درصد) را در رخدادهای بارش‌های حدی داشتند. در مقیاس ایستگاه، ماه نوامبر در ایستگاه سراب، بیشترین تأثیرپذیری از نظر تعداد رخدادهای بارش حدی (۲۷/۵ درصد) و ماه مارس در ایستگاه مهاباد (۳۵/۰۳ درصد)، بیشترین تأثیرپذیری از نظر مجموع ارتفاع بارش حدی داشت. رهیافت مورد استفاده در این مطالعه می‌تواند برای تهیه نقشه‌های ریسک وقوع بارش‌های حدی و همچنین پیش‌بینی رخدادهای بارش حدی و سیلاب‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

**واژه‌های کلیدی:** بارش حدی، بسته پایتون IPART، رهیافت THR، منشأ رودخانه جوی.

## مقدمه

شناخته می‌شوند (Newell et al., 1992). رودخانه‌های جوی در نقاط مختلف جهان از منشأ گرمسیری و نیمه‌گرمسیری تشکیل شده‌اند و بیش‌تر انتقال نصف‌النهاری بخار آب در عرض‌های میانی را به عهده دارند. رودخانه‌های جوی مسئول ۹۰ درصد از انتقال افقی بخار آب یکپارچه به خارج از مناطق استوایی هستند و در هر زمان، حداقل سه تا پنج رودخانه جوی در سراسر جهان وجود دارد (Zhu and Newell, 1998). مهم‌ترین نقش رودخانه‌های جوی را می‌توان در توزیع بخار آب و بارش مشاهده کرد (Ralph et al., 2017) که می‌تواند منابع آب شیرین را به شکل باران و برف برای بسیاری از مناطق در سراسر جهان فراهم کند (Dettinger et al., 2011). این رودخانه‌ها در صورتی که با شرایط همدیدی<sup>۵</sup> و ترمودینامیکی همراه شوند، می‌توانند موجب بارش‌های سنگین یا سیلاب در مناطق متأثر از این پدیده شوند (Knippertz et al., 2013).

رودخانه‌های جوی<sup>۴</sup> (ARs) مسیره‌های بلند و باریکی در تروپوسفر هستند که حاوی مقادیر قابل توجهی از بخار آب بوده و نقش مهمی در انتقال رطوبت جوی به مناطق مختلف جهان دارند. این مفهوم، اولین بار در سال ۱۹۹۲ توسط نیوول و همکاران مطرح شد. این پدیده‌ها به دلیل حجم آب انتقالی بسیار زیاد، با بزرگترین رودخانه‌های جهان شباهت دارند. بنابراین، به عنوان رودخانه‌های تروپوسفری

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

۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

\*- ایمیل نویسنده مسئول: s.hejabi@urmia.ac.ir

DOI: [10.22034/ijid.2025.545846.2626](https://doi.org/10.22034/ijid.2025.545846.2626)

4- Atmospheric River

جوی از جنوب (۴۴/۷٪) و جنوب غربی (۲۲/۲٪) وارد ایران شدند و دریای سرخ و خلیج عدن، منبع اصلی رطوبت در ۵۲٪ موارد بودند (Esfandiari and Lashkari, 2020). اسفندیاری و لشکری تأثیر رودخانه‌های جوی بر رویدادهای بارشی شدید در ماه‌های سرد و بارانی در ایران را به مدت ۱۱ سال (۲۰۱۸-۲۰۰۷) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که لزوماً همه‌ی رودخانه‌های جوی شناسایی شده (۳۶۴ مورد) باعث بارش شدید در ایران، نشده‌اند (Esfandiari and Lashkari, 2021). دویتو و همکاران نشان دادند که تا ۴۰ درصد از بارش مشاهده‌شده در سواحل غرب اروپا را می‌توان به حضور رودخانه‌های جوی مرتبط دانست و هیچ روند معنی‌داری در وقوع رودخانه‌های جوی طی سال‌های مذکور یافت نشد (Doiteau et al., 2021). متلینگ و همکاران به شناسایی اثرات رودخانه‌های جوی مرتبط با بارش فصل سرد در یکی از مناطق ایالات متحده با استفاده از مشاهدات زمینی پرداختند. نتایج نشان داد که رودخانه‌های جوی اغلب در طول رویدادهای بارش در مقیاس بزرگ، رخ می‌دهند که با افزایش شدت بارندگی و احتمال بیش‌تر جایگزینی بارش باران به جای برف و دماهای گرم‌تر همراه هستند (Mateling et al., 2021). میشل و همکاران نشان دادند که حدود ۷۸/۵٪ از رویدادهای بارش شدید روزانه در جنوب غربی نروژ با رودخانه‌های جوی مرتبط است که این درصد در مناطق ساحلی شمالی‌تر به ۵۹٪ و در مناطق داخلی به ۴۰٪ کاهش می‌یابد (Michel et al., 2021). کینگستون و همکاران به بررسی چگونگی تأثیر، بزرگی و ساختار رودخانه جوی بر سیل جزیره‌ی جنوبی نیوزیلند پرداختند و نیز ارتباط بین رودخانه‌های جوی در سراسر جزیره‌ی مذکور و الگوهای آب و هوایی در مقیاس بزرگ را مورد بحث قرار دادند. نتایج نشان داد که شار رطوبت توسط رودخانه‌های جوی ارتباط مستقیمی با رویدادهای سیلابی در پنج حوضه اصلی در سراسر منطقه مورد مطالعه دارد (Kingston et al., 2022). تان و همکاران در پژوهشی به بررسی ویژگی‌های بارندگی مرتبط با سه نوع رودخانه جوی (جنوبی، میانی، شمالی) و عوامل اصلی تأثیرگذار بر بارش شدید مرتبط با رودخانه‌های جوی در مناطقی از غرب آمریکای شمالی بر اساس تحلیل‌های بیلان رطوبتی پرداختند (Tan et al., 2022). فرانسیس و همکاران یک رودخانه جوی را که در اواسط آوریل ۲۰۲۳ خاورمیانه را تحت تأثیر قرار داد و باعث خسارت مالی و تلفات جانی شد، مورد بررسی قرار دادند. رودخانه مذکور با حرکت از شمال شرق آفریقا به غرب ایران بارش‌های سنگینی در منطقه ایجاد کرد. همچنین ایشان دریافتند که رودخانه‌های جوی ممکن است حتی در آب و هوای گرم هم تأثیر به‌سزایی داشته باشند (Francis et al., 2024). در پژوهشی دیگر، کینگستون و همکاران به پیش‌بینی بارش‌های شدید ناشی از رودخانه‌های جوی در نیوزیلند پرداختند و دریافتند که رودخانه جوی منجر به تأثیرات عمده‌ای در بارش‌های شدید می‌شوند (Kingston et al., 2025).

محققان به‌طور گسترده روی شناسایی، ویژگی‌ها و اثرات اقلیمی رودخانه‌های جوی مطالعه کرده‌اند. برای نمونه، راموس و همکاران به‌منظور شناسایی و توصیف جامع رویدادهای اصلی رودخانه‌های جوی تأثیرگذار در شبه جزیره ایبری در طول دوره‌ی زمانی ۲۰۱۲-۱۹۸۴ از یک الگوریتم تشخیص خودکار رودخانه‌های جوی، برای حوضه اقیانوس اطلس شمالی استفاده کردند (Ramos et al., 2015). نتایج نشان داد که ارتباط بین رودخانه‌های جوی و روزهای بارش شدید برای حوضه‌های غربی منطقه مورد مطالعه، قابل توجه است در حالی که برای حوضه‌های شرقی و جنوبی، تأثیر رودخانه‌های جوی کاهش یافته است. کوری و همکاران تأثیر رودخانه‌های جوی را بر رودخانه‌های زمین، با استفاده از پیش‌بینی‌های مدل آب و هوایی بررسی کردند (Curry et al., 2019). نتایج نشان داد که رویدادهای بارندگی شدید ناشی از رودخانه‌های جوی ممکن است منجر به اوج سیل‌های سالانه با ابعاد تاریخی بی‌سابقه شود. وان و همکاران در راستای بررسی روند، تنوع و تأثیر رودخانه‌های جوی بر بارش شدید در نروژ، تغییرات فراوانی رویدادهای رودخانه‌های جوی را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که رویدادهای رودخانه‌های جوی آینده، در مقایسه با آب و هوای کنونی، فراوان‌تر می‌شود و شدت آن افزایش می‌یابد (Whan et al., 2020). طبق نتایج به‌دست آمده، میانگین دمای منطقه در طول رویدادهای رودخانه‌های جوی زمستانی در آینده افزایش می‌یابد و در بیش‌تر موارد، به جای بارش برف، بارش‌ها به صورت باران خواهد بود که می‌تواند اثرات شدیدی بر سیل و مخاطرات آن در مدیریت منابع آب سطحی داشته باشد. یونیتا و همکاران نقش گردش جوی بزرگ‌مقیاس و رودخانه‌های جوی را در ایجاد سیل و رویدادهای بارندگی شدید در یکی از حوضه‌های آبریز اروپا مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. آن‌ها برای اولین بار، نشان دادند که رودخانه‌های جوی از جمله عواملی هستند که برای شناسایی سیل‌های بالقوه آسیب‌رسان در داخل اروپا نقش به‌سزایی دارند (Ionita et al., 2020). دزفولی و ویژگی‌های رودخانه جوی نادری را که در ماه مارس سال ۲۰۱۹، باعث سیل بی‌سابقه در سراسر خاورمیانه از جمله ایران شد، مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که سیل مذکور، توسط یک رودخانه جوی قدرتمند و منشأ گرفته از اقیانوس اطلس، ایجاد شده و در حین عبور از رشته‌کوه‌های بلند زاگرس بارندگی‌های شدیدی تولید کرده است. مشخص شد که جنوب غربی ایران، بیشترین تأثیر را از سیل مذکور داشت که ۲۶ استان از ایران را تحت تأثیر قرار داد (Dezfuli, 2020). اسفندیاری و لشکری به شناسایی رودخانه‌های جوی ورودی به ایران، مسیر حرکت و عوامل همدیدی مؤثر بر تعیین آن پرداختند. آن‌ها رودخانه‌های جوی را در ایران در دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۷ در ماه‌های بارانی (آوریل - نوامبر)، شناسایی و همچنین تأثیر شرایط همدیدی بر مسیرهای رودخانه‌های جوی در ایران را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشتر رودخانه‌های

ریچاردز-توماس و دری در یک مطالعه موردی، به این نتیجه دست یافتند که رودخانه‌های جوی که به کوه‌های ساحلی بریتیش کلمبیا می‌رسند، منجر به بارندگی شدید می‌شوند که بر آب-اقلیم شناسی منطقه تأثیر می‌گذارد و بنابراین نقش مهمی در تجدید منابع آبی دارند که سیستم‌های اکولوژیکی، زیستگاه‌های آبی، تولید برق آبی و میزان مصرف آب خانگی را حفظ می‌کنند (Richards-Thomas and Dery, 2025).

بسیاری از مطالعات پیشین نقش دوگانه هیدرولوژیکی رودخانه-های جوی را هم به‌عنوان منبع آب شیرین برای برخی مناطق تحت تنش آبی (Dettinger et al. 2011; Rutz and Steenburg, 2012; Dettinger, 2013) و هم به‌عنوان یک محرک بالقوه برای سیل (Neiman et al., 2008; Moore et al., 2012; Lavers et al., 2012; Villarini, 2013) نشان دادند. راهبردهای سازگاری و همزیستی با بارندگی‌های مرتبط با رودخانه‌های جوی را می‌توان با شناسایی آن‌ها تعیین کرد، با این وجود مطالعات انجام‌شده در مورد ارتباط رودخانه‌های جوی و رخداد‌های حدی بارش و جریان رودخانه‌ای در ایران (برای نمونه، سلیمی و سلیقه، ۱۳۹۵؛ Esfandiari and Lashkari, 2020; Esfandiari and Lashkari, 2021) به‌صورت موردی و محدود بوده و اغلب پیرامون شناسایی ویژگی‌های رودخانه‌های جوی و یا تحلیل فراوانی کلی رودخانه‌های جوی با منشأهای مختلف بدون تأکید بر میزان تاثیرپذیری رخداد‌های حدی بارش و جریان رودخانه‌ای مناطق مختلف کشور از رودخانه‌های جوی مختلف بوده است.

حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از شش حوضه آبریز اصلی ایران است که در شمال غربی ایران قرار دارد. با وجود محدودیت منابع آب، تقاضای آب برای مصارف شرب و کشاورزی در حال افزایش است و این مسأله یکی از دلایل اصلی خشک شدن دریاچه ارومیه است. ویژگی‌های اقلیمی و الگوی بارش در این حوضه، بارندگی سالانه کم با نوسانات کوتاه‌مدت شدید است. با توجه به موقعیت جغرافیایی، این حوضه اغلب تحت تأثیر سیستم‌های غربی است که از چرخندهای مدیترانه‌ای منشأ می‌گیرند. علاوه بر سیستم‌های مدیترانه‌ای، این منطقه تحت تأثیر چرخندهای اطلس شمالی و چرخندهای دریای سیاه است که سبب می‌شود رژیم بارش غالب در این منطقه رژیم بهاره باشد (Sabziparvar et al., 2014). این حوضه می‌تواند در طول سال از طریق امواج گسترده تحت تأثیر رودخانه‌های جوی بسیاری قرار گیرد که از مسیرهای مختلف، وارد حوضه می‌شوند. بارش‌های شدید باعث ایجاد بارش‌های دور از دسترس به صورت سیل و خسارات هنگفت می‌شود که در کوتاه‌مدت قابل جبران نیست. اگرچه پیش‌بینی سیل‌ها پس از شروع بارش بر اساس روش‌های هیدرولوژیکی امکان‌پذیر است، اما معمولاً زمان کافی برای عملیات آماده‌سازی وجود ندارد و خسارت سیل در هر صورت اجتناب‌ناپذیر

است. با این حال، در صورت شناسایی سازوکار و الگوهای گردش جو مؤثر بر این رویداد، می‌توان وقوع آن را از طریق الگوهای سیلاب، پیش‌بینی کرد. دزفولی و همکاران در تحقیقی نشان دادند که سیل ویرانگر سال ۲۰۱۷ در شمال غربی ایران، ناشی از یک رودخانه جوی به طول حدود ۵۵۰۰ km و گسترش یافته از شمال شرق آفریقا تا آسیای مرکزی بود که دریای مدیترانه و دریای سرخ، از مهم‌ترین منابع رطوبتی آن محسوب می‌شدند. بر خلاف پیامدهای نامطلوب آن، این رویداد برای احیای دریاچه ارومیه مفید قلمداد گردید (Dezfuli et al., 2021).

در مطالعه حاضر، با هدف بررسی تأثیر رودخانه‌های جوی بر بارش‌های حدی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، از یک رهیافت مبتنی بر الگوریتم پردازش تصویر، برای شناسایی رودخانه‌های جوی استفاده گردید و با تمرکز بر تحلیل‌های آماری به بررسی میزان همبستگی بارش‌های حدی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با رودخانه‌های جوی پرداخته شد. شناسایی رودخانه‌های جوی که منجر به رویدادهای بارندگی شدید می‌شود، می‌تواند به ایجاد هشدارهای لازم برای سیل کمک کند و در نتیجه خسارات ناشی از آن را به حداقل برساند.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی برای شناسایی رودخانه‌های جوی، حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. این حوضه بسته با مساحت  $51876 \text{ km}^2$  یکی از شش حوضه آبریز اصلی ایران و شامل بخش‌هایی از استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان است. این حوضه عموماً کوهستانی بوده و دامنه ارتفاع در این حوضه از حدود ۱۲۶۵ m در دشت‌های اطراف دریاچه ارومیه آغاز شده و به سمت مرزهای حوضه افزایش می‌یابد و تا ۳۶۴۷ m می‌رسد. میانگین بارش سالانه حوضه  $302/8 \text{ mm}$  است و مشخصه اقلیمی حوضه دریاچه ارومیه زمستان‌های سرد (با میانگین دمای  $0/2^\circ \text{C}$  و ژانویه و فوریه به‌عنوان سردترین ماه‌ها) و تابستان‌های نسبتاً معتدل (با میانگین دمای  $23/9^\circ \text{C}$  و ژوئیه و اوت به‌عنوان گرم‌ترین ماه‌ها) است، در حالی که میانگین دمای سالانه حوضه  $12/3^\circ \text{C}$  است (Alizadeh-Choozari et al., 2016). این حوضه شامل هفت زیرحوضه (۱) سیمینه‌رود و زیرینه‌رود، (۲) آجی‌چای، (۳) رود گادار و رود مهاباد، (۴) غرب دریاچه، (۵) شمال دریاچه، (۶) جنوب غرب سهند و (۷) دریاچه ارومیه و جزایر آن است و رودهای آنها به دریاچه ارومیه منتهی می‌شوند. رودخانه‌های عمده حوضه در نیمه جنوبی آن قرار دارند و رودخانه‌های بخش شمالی عمدتاً کوچک و کم‌آب هستند. از آنجا که بخش قابل توجهی از بارش حوضه به صورت برف رخ می‌دهد، ذوب برف در بهار سبب می‌شود که دبی اوج بین ماه‌های آوریل و مه رخ دهد.

### روش شناسایی رودخانه‌های جوی

گام اول در اجرای این پژوهش، شناسایی رودخانه‌های جوی است. عموماً، دو رهیافت اصلی برای شناسایی رودخانه‌های جوی وجود دارد (Gimeno et al., 2014). یک رهیافت مبتنی بر داده‌های کل بخار آب یکپارچه<sup>۱</sup> (IWV) جو است و تنها بیانگر تمرکز و تراکم بخار آب در جو است. در حالی که رهیافت دوم مبتنی بر داده‌های انتقال بخار آب یکپارچه<sup>۲</sup> (IVT) است. مقدار IVT با استفاده از داده‌های روزانه مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری سرعت باد و رطوبت ویژه هوا در ترازهای مختلف فشار هوا قابل محاسبه است. بردارهای IVT برای عرض جغرافیایی ( $\varphi$ ) و طول جغرافیایی ( $\lambda$ ) و زمان (t) به صورت زیر است:

$$Q(\lambda, \varphi, t) = Q_{\lambda} i + Q_{\varphi} j \quad (1)$$

رودخانه‌های جوی با استفاده از انتقال بخار آب یکپارچه بین ترازهای فشار ۱۰۰۰ hPa و ۳۰۰ hPa تعیین می‌شوند. لذا، مؤلفه‌های مداری ( $Q_{\lambda}$ ) و نصف‌النهاری ( $Q_{\varphi}$ ) از روابط زیر بدست می‌آید:

$$Q_{\lambda} = - \int_{300}^{1000} qu \frac{dp}{g} \quad (2)$$

$$Q_{\varphi} = - \int_{1000}^{300} qv \frac{dp}{g} \quad (3)$$

که  $u$  مؤلفه مداری باد ( $m s^{-1}$ )،  $v$  مؤلفه نصف‌النهاری باد ( $m s^{-1}$ )،  $q$  رطوبت ویژه ( $kg kg^{-1}$ )،  $g$  ثابت گرانش ( $m s^{-2}$ ) و  $dp$  اختلاف فشار بین دو تراز مجاور است.

مقدار IVT ( $kg m^{-1} s^{-1}$ ) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$IVT = \sqrt{Q_{\varphi}^2 + Q_{\lambda}^2} \quad (4)$$

برای درک بهتر قدرت انتقال رطوبت توسط رودخانه جوی، برای نمونه می‌توان به رودخانه جوی که در مارس ۲۰۱۹ منجر به سیلاب گسترده در ایران شد، اشاره نمود که میزان آب انتقال یافته توسط این رودخانه جوی، با متوسط IVT حدود  $350 kg m^{-1} s^{-1}$  و پهنای تقریبی  $1000 km$  (برابر  $350000 m^3 s^{-1} = 10^3 m^3 kg^{-1} \times 350 kg m^{-1} s^{-1}$ ) بیش از  $150$  برابر جریان رودخانه اروندرود ( $10^6 m^3 s^{-1}$ ) بود (Dezfuli, 2020).

اغلب روش‌های مبتنی بر مقادیر IWV، IVT یا ترکیبی، مبتنی بر یک مقدار پیش‌فرض به عنوان آستانه، IVT، IWT یا طول و پهنای باریکه حاوی رطوبت برای شناسایی رودخانه جوی هستند. مثلاً رالف و همکاران پیشنهاد کردند که اگر  $IWV > 20 mm$  باشد و حداقل طول باریکه حاوی رطوبت  $2000 km$  بوده و پهنای آن بیشتر از  $1000 km$  نباشد، می‌توان آن را یک رودخانه جوی در نظر گرفت

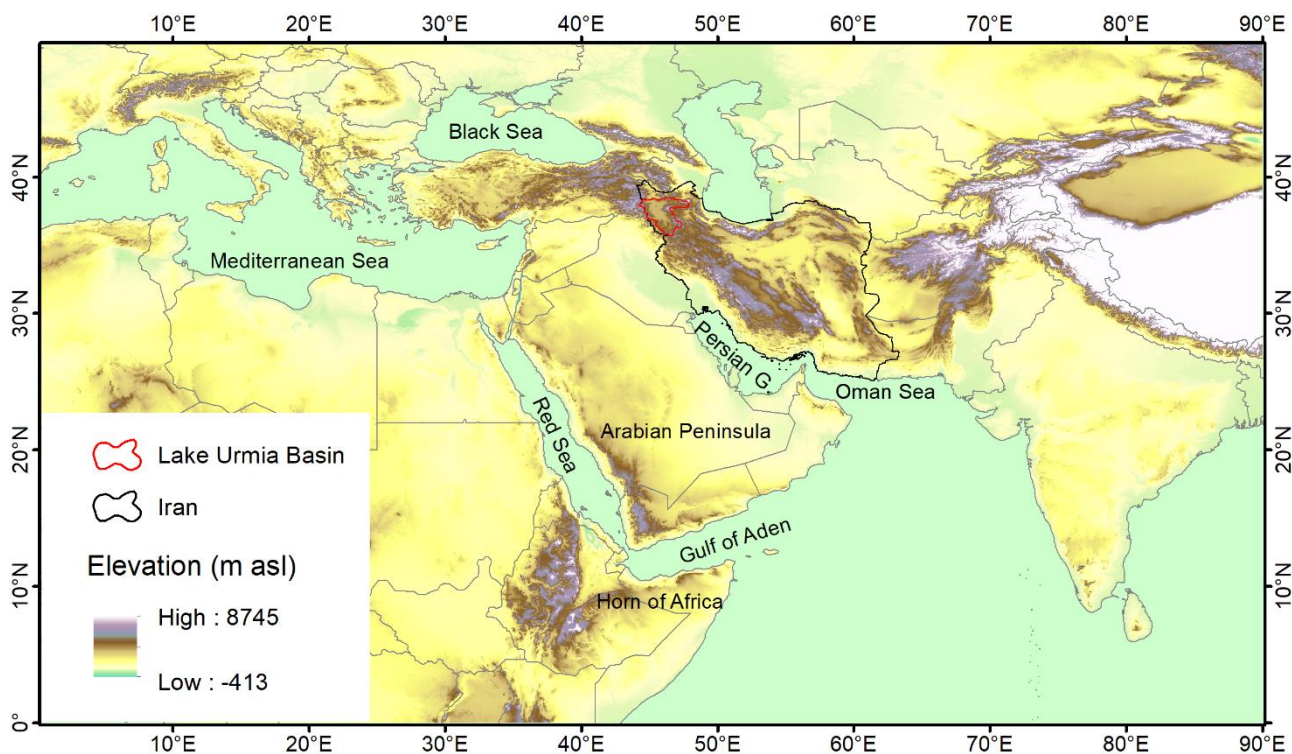
(Ralph et al., 2004). یک فرض به کار رفته در این‌گونه رهیافت‌ها عدم تغییر سطح رطوبت جوی طی دوره مورد بررسی است. لذا، با توجه به افزایش سطح رطوبت جو تحت تغییر اقلیم آینده، استفاده از یک مقدار آستانه ثابت برای شناسایی رودخانه‌های جوی با مشکل مواجه خواهد شد. به‌علاوه، انتخاب مقادیر متفاوت آستانه می‌تواند منجر به عدم قطعیت‌های قابل توجه شود. یک راه دیگر برای رهیافت‌های مبتنی بر آستانه، استفاده از یک صدک معین IVT یا IWV در یک مکان معین به عنوان آستانه است. مثلاً مطابق الگوریتم پیشنهادی گوان و والیسر، اگر مقدار IVT باریکه حاوی رطوبت از صدک ۸۵ ام IVT بیشتر باشد و حداقل مقدار آن  $kg m^{-1} s^{-1}$  باشد و طول آن حداقل  $2000 km$  باشد، می‌توان آن را یک رودخانه جوی در نظر گرفت (Guan and Waliser, 2015). این روش، حساسیت آستانه را به تفاوت‌های ممکن از نظر عرض جغرافیایی و فصلی تضمین می‌کند. با این وجود، این آستانه ممکن است نسبت به سازگاری با شرایط شدیداً متغیر همدیدی که رودخانه‌های جوی را احاطه می‌کنند، انعطاف‌پذیر نباشد.

یک رهیافت دیگر، استفاده از فرایندهای فیلترسازی روی میدان‌های IWV یا IVT است که توسط Xu et al. (2020) تحت عنوان روش مسیریابی رودخانه‌های جوی مبتنی بر پردازش تصویر<sup>۳</sup> (IPART; Xu et al., 2020) ارائه شده است. در این رهیافت، از الگوریتمی به نام تکنیک پردازش تصویر<sup>۴</sup> THR برای شناسایی مسیریابی رودخانه‌های جوی استفاده می‌شود. این روش حساسیت کمتری به انتخاب پارامترها داشته و کمتر مستعد مشکلات ناشی از ماهیت ناپیوستگی وضعیت رطوبتی جو، تحت شرایط گرمایش جهانی است. به‌علاوه، در این روش، یک رهیافت جدید برای شناسایی محور رودخانه جوی ارائه شده که مبتنی بر شناسایی جهت کلی جریان‌های رودخانه جوی بر اساس اطلاعات شار رطوبت است. جزئیات مربوط به این روش در Xu et al. (2020) تشریح شده است. در این پژوهش، برای شناسایی رودخانه‌های جوی از بسته پایتون IPART برای شناسایی خودکار رودخانه‌های جوی، بر اساس مقادیر IVT، برای یک دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱) استفاده شد. این رهیافت بر روی محدوده‌ای شبکه‌ای با تفکیک مکانی  $0.25 \times 0.25$  درجه، در بازه جغرافیایی صفر تا  $90^{\circ}E$  و صفر تا  $50^{\circ}N$ ، استفاده شد که دربرگیرنده رودخانه‌های جوی است که در محدوده شرق هند تا غرب آفریقا و خط استوا تا مناطق شمالی دریای خزر شکل می‌گیرند (شکل ۱).

در روش THR، فرایند تعیین رودخانه‌های جوی شامل دو گام کلیدی است: ۱) استخراج عارضه رودخانه جوی بر اساس بزرگی IVT در هر نقطه از شبکه مورد بررسی و ۲) به کارگیری معیار فیلترسازی

هندسی (شامل جهت IVT، طول IVT و نسبت طول به عرض عارضه). در اینجا، رودخانه‌های جوی شناسایی شده باید طولی مساوی یا بزرگتر از ۲۰۰۰ km و نسبت طول به عرض مساوی یا بزرگتر از ۲ داشته باشند. مساحت محدوده رودخانه باید در حدود  $10^3 \times (500-10000)$  باشد تا عارضه‌های خیلی بزرگ یا خیلی کوچک فیلتر شوند. نحوه اجرای الگوریتم در پایتون در

https://github.com/ihesp/IPART قابل دسترسی است. خروجی‌های این برنامه نه تنها شامل تعداد و مختصات نقاط محور رودخانه جوی بلکه شامل مشخصه‌های دیگری مانند مختصات نقاط مرزی و مرکز ثقل رودخانه جوی، طول، عرض، نسبت طول به عرض، مساحت رودخانه جوی و مسیرپایی رودخانه‌ها است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی محدوده اجرای بسته پایتون IPART برای استخراج رودخانه‌های جوی، کشور ایران و حوضه دریاچه ارومیه

در گام بعدی این پژوهش، با استفاده از مختصات نقاط محور و مرز رودخانه‌های جوی، شیپ‌فایل‌های محور و مرز رودخانه‌ها در محیط برنامه‌نویسی پایتون و با استفاده از بسته Arcpy تهیه شد و همچنین، کدی جهت بررسی میزان هم‌پوشانی محدوده حوضه دریاچه ارومیه با محدوده رودخانه‌های جوی نوشته شد تا رودخانه‌های وارد شده به حوضه مشخص گردد. شایان ذکر است که بر خلاف مطالعات پیشین که مبنای انتخاب رودخانه‌ها را هم‌پوشانی منطقه مورد مطالعه با محور رودخانه‌ها و یا حریمی به پهنای نصف عرض متوسط رودخانه جوی در دو طرف محور رودخانه لحاظ می‌کنند، در این مطالعه از هم‌پوشانی محدوده حوضه دریاچه ارومیه با محدوده واقعی رودخانه جوی (بر اساس شیپ‌فایل مرز رودخانه جوی) برای تعیین عبور/عدم عبور رودخانه جوی از حوضه دریاچه ارومیه استفاده شد. رودخانه‌های جوی وارد شونده به حوضه به تفکیک ماه‌های

بارانی (نوامبر تا آوریل) دسته‌بندی شد و پس از تهیه نقشه‌های پراکندگی رودخانه‌های جوی واردشونده به حوضه، فراوانی و منشأ پیدایش آنها در ماه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

### بررسی ارتباط بارش‌های حدی با رودخانه‌های جوی

پس از بررسی الگوهای مختلف رودخانه‌های جوی، بارش‌های حدی ناشی از رودخانه‌های جوی بررسی شد. برای این منظور از داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های هم‌دید گستره حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای دوره آماری مورد مطالعه برای تعیین بارش‌های حدی استفاده شد. در اینجا، بارش حدی به‌عنوان بارشی تعریف شد که مقدار آن بیشتر از صدک ۹۰ بارش روزانه ( $P > 0$  mm) در هر ایستگاه باشد. این تحلیل بر روی هر یک از ایستگاه‌ها به تفکیک انجام شد و ارتباط رودخانه‌های جوی ورودی به حوضه با رخداد‌های بارش حدی

بررسی شد. شایان ذکر است که جهت بررسی ورود رودخانه‌های جوی به محدوده ایستگاه‌ها نیز از طریق کدنویسی در محیط پایتون (Python)، همپوشانی شیپ‌فایل محدوده واقعی هر رودخانه جوی با شیپ‌فایل ایستگاه‌ها بررسی و تعداد ایستگاه‌های تحت پوشش رودخانه‌های جوی در تاریخ‌های مختلف نیز بررسی شد.

## داده‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

داده‌های مورد نیاز در این مطالعه شامل مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری ( $Q_\phi$  و  $Q_\lambda$ ) انتقال بخار آب یکپارچه (IVT) است که به عنوان ورودی بسته پایتون IPART برای محاسبه IVT (رابطه ۴) استفاده شدند. در این مطالعه، از داده‌های روزانه مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری IVT مربوط به نسل پنجم داده‌های بازتخلیل مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت وضع هوا<sup>۱</sup> (ECMWF) به نام ERA5 برای دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱ استفاده شد. این داده‌ها با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه از سال ۱۹۵۰ به بعد موجود هستند. داده‌های بازتخلیل جوی به عنوان کامل‌ترین برآوردهای تاریخی جو زمین در نظر گرفته می‌شوند که از طریق داده‌گواهی<sup>۲</sup> متغیرهای اندازگیری-شده در خشکی، اقیانوس، جو و همچنین تصاویر ماهواره‌ای، به سیستم‌های پیش‌بینی وضع هوا تولید می‌شوند. این نسل جدید از داده‌های بازتخلیل با تفکیک مکانی بهتر و دوره آماری طولانی‌تر امکان بررسی دقیق‌تر رفتار رودخانه‌های جوی را در بلندمدت ممکن می‌سازد. مطالعه روبرتر و همکاران نشان داده است که تفکیک‌های مکانی بهتر سبب شبیه‌سازی‌های واقع‌گرایانه‌تری از فرایندهای اقلیمی شده و در نتیجه بر مکان، شدت و فراوانی رخداد رودخانه‌های جوی اثر می‌گذارد (Roberts et al., 2018). علاوه بر داده‌های مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری IVT، داده‌های ارتفاع ژئوپتانسیل در سطح فشاری ۷۰۰ hPa نیز از پایگاه داده ERA5 برای بررسی ارتباط رودخانه‌های جوی با الگوهای همدیدی استفاده شد. علت انتخاب این سطح فشاری، همخوانی بهتر واچرخندهای جنب حاره عربی<sup>۳</sup> (ASA) با نقشه‌های ۷۰۰ hPa است (Esfandiari and Lashkari, 2020). داده‌های مورد نیاز برای بررسی ارتباط بارش‌های حدی با رودخانه‌های جوی شامل داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های همدید محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه با دوره آماری مشترک ۲۰۲۰-۱۹۹۱ است. داده‌های ایستگاه‌های همدید شامل مهاباد، تکاب، ارومیه، سراب، مراغه، تبریز، سهند و سقز از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد.

نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل بسته پایتون

## نتایج و بحث

### مشخصات رودخانه‌های جوی عبورکننده از حوضه

شکل (۲) توزیع مکانی محور رودخانه‌های جوی را که در ماه‌های مختلف از روی حوضه آبریز دریاچه ارومیه عبور کرده‌اند، نشان می‌دهد. علی‌رغم عدم هم‌پوشانی محور برخی از رودخانه‌ها با محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه، محدوده واقعی (مرز) رودخانه‌های مذکور با حوضه آبریز هم‌پوشانی داشته و لذا در شمارش رودخانه‌های جوی عبورکننده از حوضه لحاظ شده‌اند.

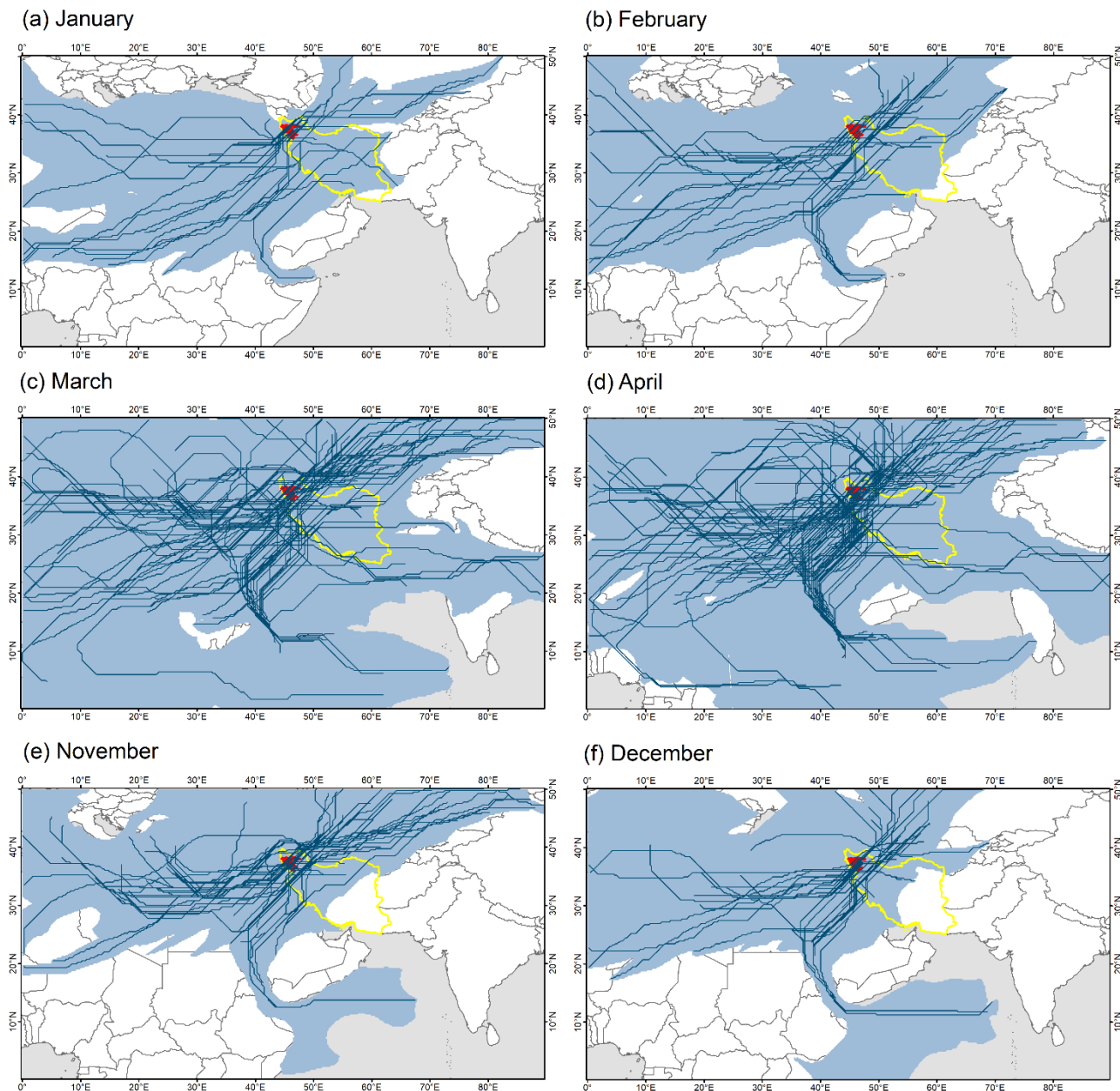
شکل (۳) فراوانی رودخانه‌های جوی عبورکننده از حوضه را در ماه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. مجموعاً ۲۸۸ رودخانه جوی در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱ در شش ماه مورد بررسی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه عبور کرده‌اند که از میان آنها، ماه‌های آوریل و مارس به ترتیب با ۹۴ و ۷۷ رودخانه (معادل ۳۲/۶۴، ۲۶/۷۴ درصد کل رودخانه‌ها)، دارای بیشترین تعداد رودخانه جوی و با اختلاف قابل توجه نسبت به سایر ماه‌ها بودند. بیشتر بودن تعداد رودخانه‌های جوی در ماه‌های آوریل و مارس با رژیم بارش بهاره حوضه هماهنگ است. همچنین، در تایید یافته‌های (Esfandiari and Lashkari, 2020) در ماه‌های آوریل و مارس، بیشترین تراکم رودخانه‌های جوی در بخش‌های شمال غربی کشور است که حوضه آبریز دریاچه ارومیه را نیز شامل می‌شود. با توجه به شکل (۲) رودخانه‌های جوی منشأهای مختلفی دارند و روی هم‌رفته، رودخانه‌های وارد شده به حوضه آبریز دریاچه ارومیه را می‌توان از نظر منشأ در شش گروه طبقه‌بندی نمود: (۱) اقیانوس اطلس، (۲) دریای مدیترانه، (۳) دریای سرخ، (۴) خلیج عدن، (۵) غرب آفریقا و (۶) شمال شرق آفریقا. شکل (۴) نمونه‌هایی از رودخانه‌های جوی عبورکننده از حوضه با منشأهای فوق‌الذکر را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (a) در تاریخ ۱ ژانویه ۱۹۹۴ یک رودخانه جوی به طول ۶۴۱۷ km با منشأ اقیانوس اطلس از منطقه مورد مطالعه عبور کرده است. سیستم واچرخند جنب حاره عربی در ترکیب با زبانه کم‌فشار مدیترانه‌ای، مسیر رودخانه جوی را تعیین کرده است. به نحوی که محور رودخانه هماهنگ با گرادیان فشار در جلوی زبانه کم‌فشار است. مرکز واچرخند کاملاً روی شبه جزیره عربستان قرار داشته و حرکت غرب‌سوی آن سبب جابه‌جایی زبانه کم‌فشار به سمت غرب دریای مدیترانه شده است. لذا، جریان‌ات ایجاد شده در جلوی

- 1- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- 2- Data Assimilation
- 3- Arabian Subtropical Anticyclone

و موقعیت سیستم واچرخند جنب حاره عربی و زبانه کم‌فشار مدیترانه-ای نسبت به هم، سبب فرارفت رطوبت در راستای محور رودخانه جوی شده است.

زبانه کم‌فشار، سبب ورود رودخانه جوی از غرب کشور شده است. شکل ۴(b) نمونه‌ای از رودخانه‌های جوی با منشأ دریای مدیترانه را نشان می‌دهد. این رودخانه جوی به طول ۶۴۰۰ km در تاریخ ۲۰ آوریل ۲۰۱۵ از طریق دریافت رطوبت از دریای مدیترانه شکل گرفته



شکل ۲- محور رودخانه‌های جوی وارد شده به محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه‌های مختلف در دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰. محدوده آبی رنگ، محدوده پوشش همه رودخانه‌های جوی وارد شده به محدوده حوضه را به صورت ادغام‌شده نشان می‌دهد.

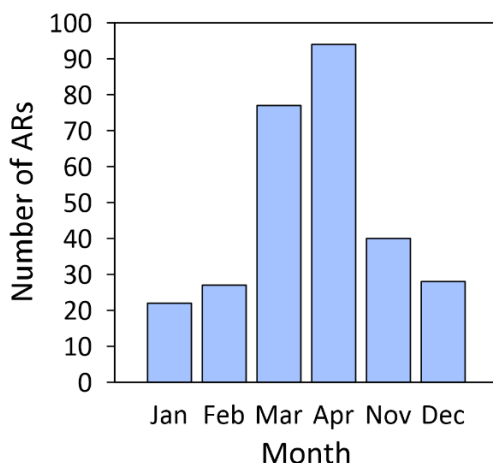
عربی و پیشروی زبانه کم‌فشار مدیترانه‌ای سبب شده است که رودخانه از جنوب غرب وارد ایران شود. شکل ۴(d) موقعیت رودخانه جوی با منشأ خلیج عدن را نشان می‌دهد که با طول ۸۵۳۸ km در

شکل ۴(c) نمونه‌ای از رودخانه‌های جوی با منشأ دریای سرخ را نشان می‌دهد که به طول ۴۶۲۲ km در تاریخ ۲۲ مارس ۲۰۰۰ از محدوده مورد مطالعه عبور کرده است. موقعیت واچرخند جنب حاره

های رودخانه‌های جوی در راستای مداری و نصف‌النهاری دارند. جدول (۱) فراوانی رودخانه‌های جوی را به تفکیک منشأ‌های مختلف در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱)، توزیع فراوانی رودخانه‌ها با منشأ‌های مختلف الگوی نسبتاً مشابهی را در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد. در مجموع، از ۲۸۸ رودخانه جوی عبور کرده از حوضه دریاچه ارومیه، ۹۷ رودخانه جوی (۳۳/۶۸ درصد) منشأ مدیترانه‌ای داشته و پس از آن رودخانه‌های جوی با منشأ دریای سرخ (۱۷/۷۱ درصد) و خلیج عدن (۱۳/۸۹ درصد) دارای بیشترین فراوانی هستند. رودخانه‌های مربوط به سایر منشأ‌ها، فراوانی نسبتاً یکسانی (حدود ۱۱ درصد) داشتند. نتایج این مطالعه، یافته‌های Akbari et al. (2019) مبنی بر سهم بیشتر اقیانوس اطلس در تشکیل رودخانه‌های جوی وارد شده به ایران را تأیید نمی‌کند. همچنین، در تأیید یافته‌های Esfandiari and Lashkari (2020) و Akbari et al. (2019) دریای سرخ و خلیج عدن منبع رطوبتی مهمی برای رودخانه‌های جوی وارد شونده به ایران است.

تاریخ ۲۲ نوامبر ۱۹۹۴ از منطقه مورد مطالعه عبور کرده است. با توجه به اینکه این رودخانه در ادامه مسیر خود از دریای سرخ نیز رطوبت دریافت کرده است، مقادیر و بردارهای IVT اندازه بزرگی نشان می‌دهند. شکل ۴(e) نمونه‌ای از رودخانه‌های جوی با منشأ غرب قاره آفریقا را نشان می‌دهد. این رودخانه جوی به طول ۵۷۳۱ km در تاریخ ۶ آوریل ۲۰۰۲ از روی منطقه مورد مطالعه عبور کرده و در مسیر خود از دریای مدیترانه نیز رطوبت دریافت کرده است و از شمال غرب ایران وارد شده است.

شکل ۴(f) یک رودخانه جوی با منشأ شمال شرق آفریقا را نشان می‌دهد که با طول ۵۱۰۴ km از شمال شرق آفریقا آغاز شده و در مسیر خود با دریافت رطوبت از دریای سرخ و دریای مدیترانه تقویت شده است و مقادیر قابل ملاحظه‌ای از IVT را نشان می‌دهد. در تأیید یافته‌های لشکری و اسفندیاری (۱۳۹۹) و Esfandiari and Lashkari (2020) جابه‌جایی مکانی و الگوی قرارگیری و اچرخند جنب حاره عربی با زبانه کم‌فشار مدیترانه نقش مهمی در جابه‌جایی-

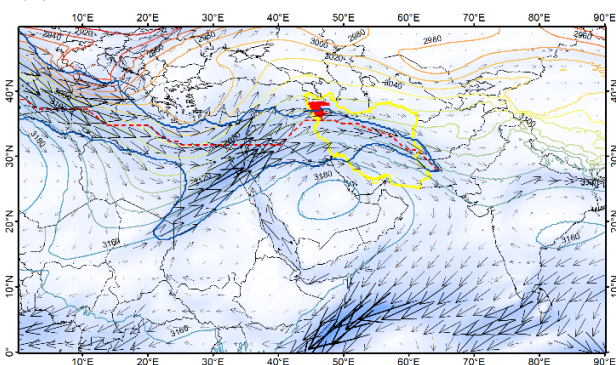


شکل ۳- فراوانی رودخانه‌های جوی وارد شده به محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه‌های مختلف در دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰

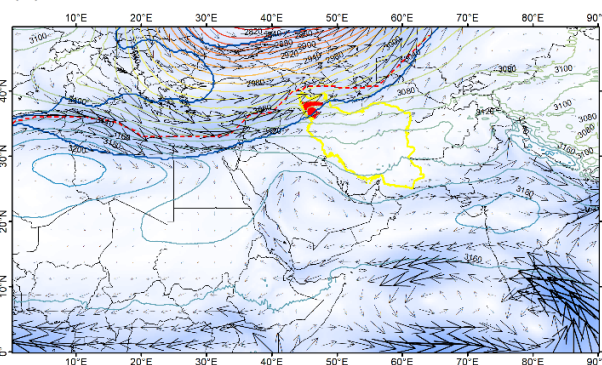
جدول ۱- فراوانی رودخانه‌های جوی وارد شده به حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه‌های مختلف و با منشأ‌های مختلف (NEA: شمال شرق آفریقا، WA: غرب آفریقا، RS: دریای سرخ، GA: خلیج عدن، MS: دریای مدیترانه، AO: اقیانوس اطلس) در دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰

ماه	مجموع	منشأ						درصد (%)
		AO	MS	GA	RS	WA	NEA	
ژانویه	۲۲	۴	۷	۱	۲	۶	۲	۷/۶۴
فوریه	۲۷	۷	۷	۴	۱	۵	۳	۹/۳۸
مارس	۷۷	۱۱	۲۳	۱۴	۸	۱۰	۱۱	۲۶/۷۴
آوریل	۹۴	۳	۲۶	۱۶	۲۲	۱۱	۱۶	۳۲/۶۴۳
نوامبر	۴۰	۱	۲۴	۱	۱۰	۳	۱	۱۳/۸۹
دسامبر	۲۸	۴	۱۰	۴	۸	۱	۱	۹/۷۲
مجموع	۲۸۸	۳۰	۹۷	۴۰	۵۱	۳۶	۳۴	۱۰۰
درصد (%)	۱۰۰	۱۰/۴۲	۳۳/۶۸	۱۳/۸۹	۱۷/۷۱	۱۲/۵۰	۱۱/۸۱	

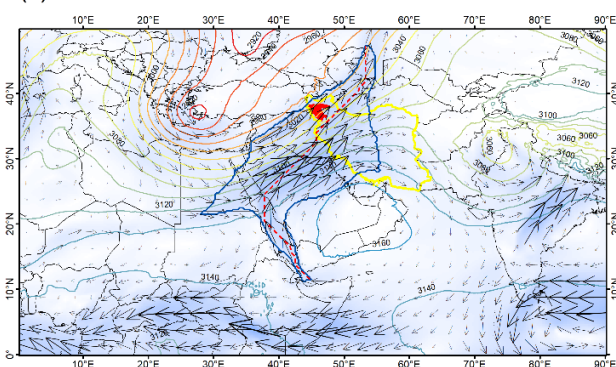
(a) Atlantic



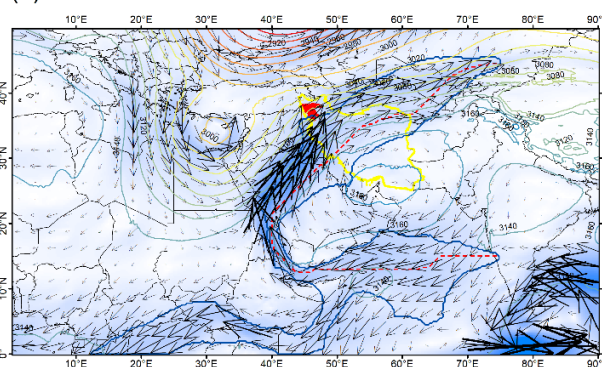
(b) Mediterranean Sea



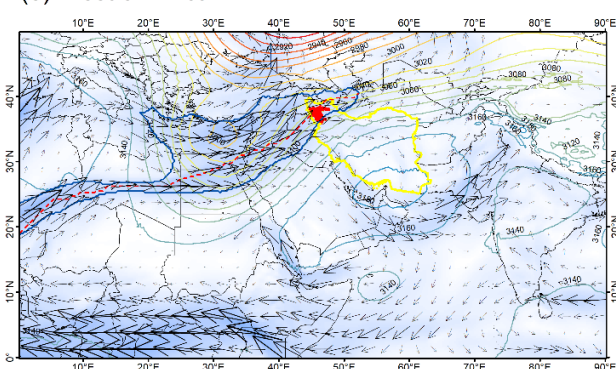
(c) Red Sea



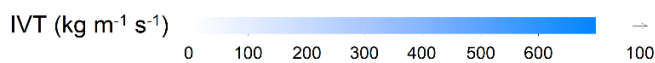
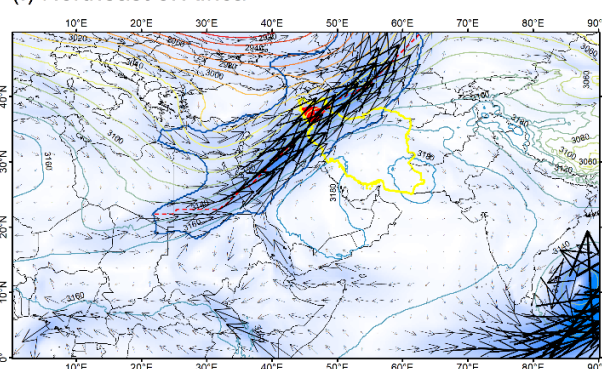
(d) Gulf of Aden



(e) West of Africa



(f) Northeast of Africa

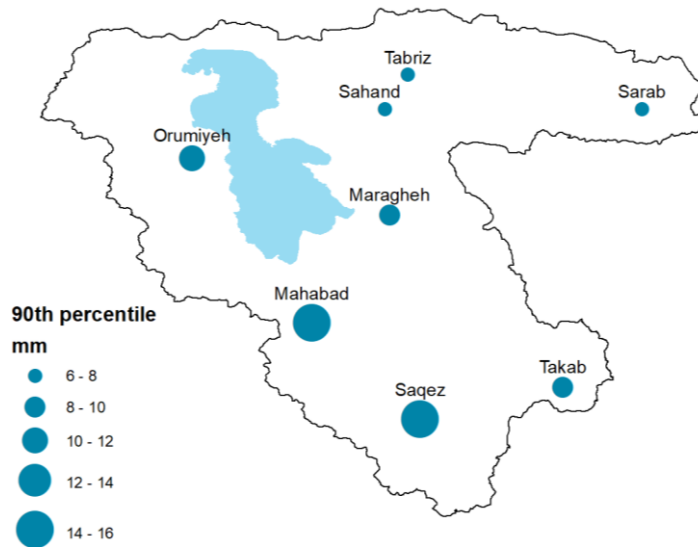


شکل ۴- نمونه‌هایی از رودخانه‌های جوی وارد شده به محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه با منشأهای مختلف: (a) اقیانوس اطلس، (b) دریای مدیترانه، (c) دریای سرخ، (d) خلیج عدن، (e) غرب آفریقا، (f) شمال شرق آفریقا. خطوط آبی: محدوده رودخانه و خطوط قرمز: محور رودخانه. خطوط کانتور: ارتفاع ژئوپتانسیل در سطح  $700 \text{ hPa}$ ، طیف رنگی: مقادیر IVT، پیکان: بردار IVT

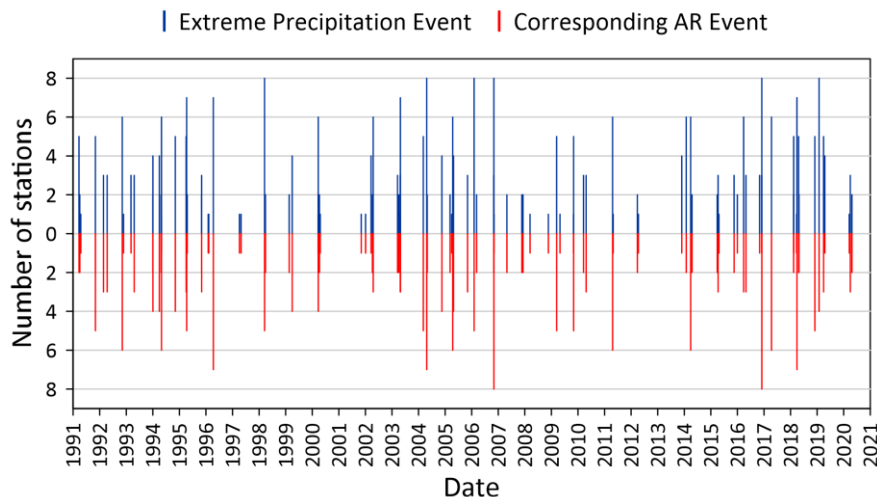
۱۱/۲ در رتبه بعد قرار می‌گیرد. به طور کلی، ایستگاه‌های استان آذربایجان غربی نسبت به ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی دارای صدک ۹۰ بیشتری هستند. مقادیر صدک ۹۰ بارش، به عنوان آستانه تعیین بارش‌های حدی در دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ مورد استفاده قرار گرفت.

#### ارتباط بارش‌های حدی با رودخانه‌های جوی

شکل (۵) توزیع مکانی صدک ۹۰ بارش روزهای تر ( $P > 0 \text{ mm}$ ) را بر اساس داده‌های بارش روزانه دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰ در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۵)، ایستگاه‌های سقز و مهاباد به ترتیب با  $15/15 \text{ mm}$  و  $15 \text{ mm}$  دارای بیشترین صدک ۹۰ بارش بوده و پس از آن ایستگاه ارومیه با  $\text{mm}$



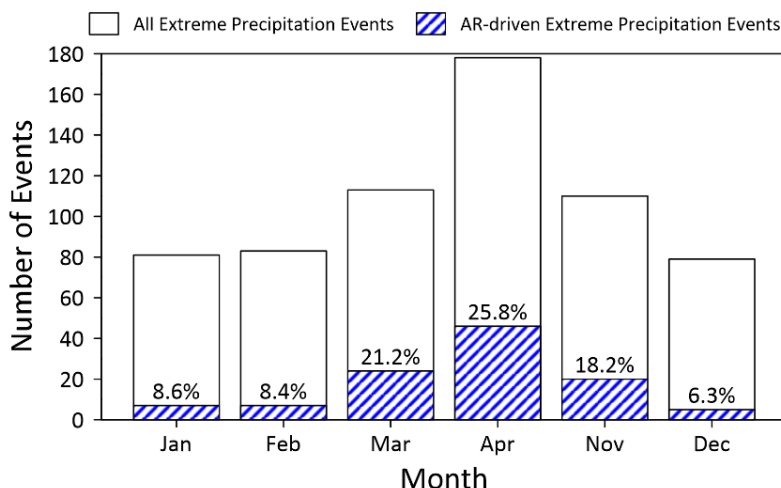
شکل ۵- صدک ۹۰ بارش روزانه در ایستگاه‌های مختلف سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه



شکل ۶- تعداد ایستگاه‌های دارای رخداد بارش حدی و تعدادی از آنها که مربوط به رخداد رودخانه جوی هستند، در روزهای مختلف دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰

بررسی و نقش پررنگ‌تر رودخانه‌های جوی تغذیه‌کننده از رطوبت دریای عرب و عمان، در رخداد بارش‌های حدی ایران است. نمودارهای ستونی آبی‌رنگ در شکل (۶) نشان می‌دهد که در دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰ در چه تاریخ‌هایی (۱۰۹ مورد)، چه تعداد ایستگاه رخداد بارش حدی را تجربه کرده‌اند. علاوه بر این، نمودارهای ستونی قرمز رنگ تعداد ایستگاه‌هایی را که در روزهای دارای بارش حدی، تحت پوشش رودخانه جوی نیز قرار گرفته‌اند، نشان می‌دهد. مقایسه نمودارهای شکل (۶) نشان می‌دهد که تقارن نسبتاً بالایی بین رخدادهای بارش حدی و عبور رودخانه جوی وجود دارد.

نتایج بررسی رخدادهای حدی نشان داد که در دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰ در ۶۴۴ تاریخ در محدوده زمانی ۶ ماه مورد بررسی بارش حدی در حداقل یک ایستگاه حوضه رخ داده است. در مرحله بعد، از میان ۶۴۴ تاریخ دارای رخداد بارش حدی، تاریخ‌هایی که در آنها رودخانه جوی نیز مشاهده شده است، مشخص گردید. در مجموع در ۱۰۹ تاریخ (معادل ۱۶/۹ درصد)، رخداد بارش حدی همراه با عبور رودخانه جوی از حوضه بوده است. نتایج مطالعه Esfandiari and Lashkari (2021) برای کل گستره ایران، بیانگر این بود که رودخانه‌های جوی به میزان ۳۰ درصد در کل بارش حدی دوره مورد بررسی سهم داشتند. تفاوت در نتایج ناشی از تفاوت در منطقه مورد



شکل ۷- تعداد روزهای دارای رخداد بارش حدی (در حداقل یک ایستگاه) در ماه‌های مختلف سال و تعداد روزهای مربوط به رخداد بارش حدی ناشی از رودخانه جوی در ماه‌های مختلف سال در دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰. اعداد بر حسب درصد بیانگر نسبت تعداد رخدادهای بارش حدی ناشی از رودخانه جوی به تعداد کل رخداد بارش حدی بر حسب درصد است.

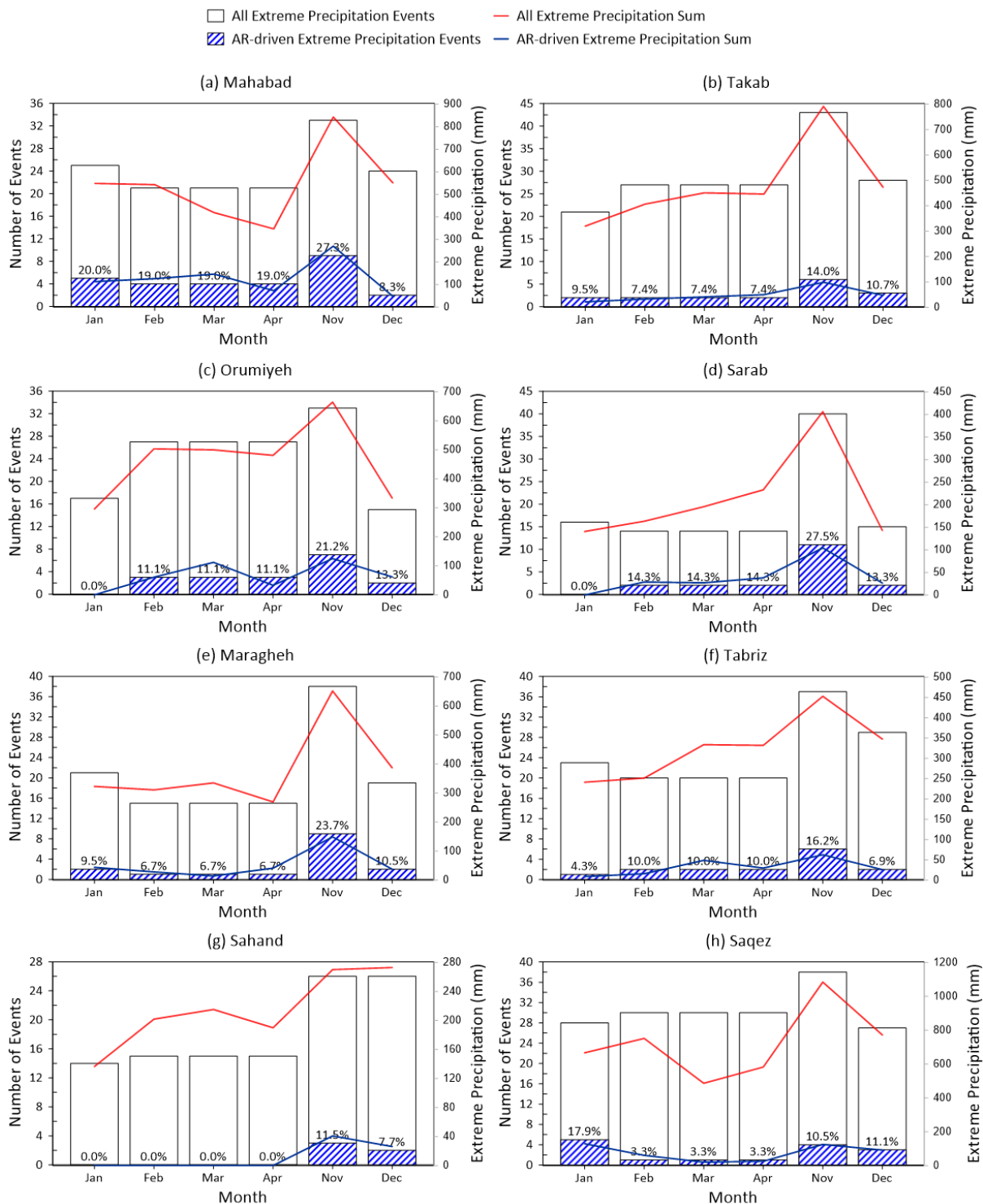
در تبریز و مهاباد تا ۰/۹۹ در مراغه است. مقادیر ضرایب همبستگی برای مجموع ارتفاع بارش متناظر با آنها بین ۰/۷۲ در سقز تا ۰/۹۹ در تکاب است.

نتایج فراوانی نسبی تعداد/مجموع ارتفاع بارش حدی ناشی از رودخانه جوی نسبت به مقادیر کل متناظر، در ماه‌های مختلف، بر حسب درصد، در جدول (۳) نشان داده شده است. برای نمونه، در ایستگاه مهاباد، از نظر تعداد رخدادهای جوی بودند و از نظر مجموع ارتفاع بارش حدی، ۳۵/۰۳ درصد مجموع ارتفاع بارش حدی ماه مارس ناشی از رودخانه‌های جوی بودند. هیچ درصدی از بارش‌های حدی ماه ژانویه در ایستگاه ارومیه و سراب و همچنین ماه‌های ژانویه تا آوریل در ایستگاه سهند ناشی از رودخانه جوی نبودند. از نظر تعداد رخداد بارش حدی، ماه نوامبر در ایستگاه سراب (۲۷/۵ درصد) و از نظر مجموع ارتفاع بارش حدی ماه مارس در ایستگاه مهاباد (۳۵/۰۳ درصد)، بیشترین تأثیرپذیری از رودخانه‌های جوی را داشتند.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه با هدف بررسی ارتباط بارش‌های حدی با رودخانه‌های جوی در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه، برای اولین بار از روش THR در بسته پایتون IPART برای شناسایی رودخانه‌های جوی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده شد. یافته‌های اصلی پژوهش به شرح زیر است:

شکل (۷) توزیع فراوانی رخداد بارش حدی در حداقل یک ایستگاه را در ماه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. همچنین، تعداد و درصد رخدادهای متأثر از رودخانه‌های جوی نیز نشان داده شده است. از میان ۶۴۴ مورد رخداد بارش حدی، ماه آوریل، مارس و نوامبر به ترتیب با ۱۷۸، ۱۱۳ و ۱۱۰ رخداد، دارای بیشترین فراوانی رخداد بارش حدی هستند. با توجه به شکل (۷)، ۲۵/۸ درصد بارش‌های حدی رخ داده در ماه آوریل، متأثر از رودخانه‌های جوی هستند. این مقدار برای ماه مارس و نوامبر، به ترتیب ۲۱/۲ و ۱۸/۲ درصد است. سهم رودخانه‌های جوی در بارش حدی سایر ماه‌ها کمتر از ۹ درصد است. نمودارهای مشابه شکل (۷) به تفکیک ایستگاه‌ها در شکل (۸) نشان داده شده است. علاوه بر این، تأثیر رودخانه‌های جوی بر کمیت بارش حدی در هر یک از ایستگاه‌ها نیز نشان داده شده است. جدول (۲) نیز ضرایب همبستگی نمودارهای توزیع ماهانه تعداد/مجموع ارتفاع بارش متناظر با رخدادهای حدی شکل (۸) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۸) و جدول (۲)، در مورد اغلب ایستگاه‌ها اولاً نمودار توزیع ماهانه تعداد رخدادهای حدی با نمودار توزیع ماهانه مجموع ارتفاع بارش حاصل از رخدادهای حدی، همبستگی زیادی (بین ۰/۷۱ در سقز تا ۰/۹۹ در تکاب) نشان می‌دهد. ثانیاً این شکل از همبستگی در مورد تعداد و مجموع ارتفاع بارش حدی ناشی از رودخانه‌های جوی نیز مشاهده می‌گردد (بین ۰/۸۲ در ارومیه و تبریز تا ۰/۹۹ در سهند). این نتایج، در تأیید یافته‌های (Esfandiari and Lashkari, 2021) مبنی بر هماهنگی و همبستگی تعداد رخدادهای رودخانه‌های جوی با مجموع ارتفاع بارش حدی حاصل از آنها است. علاوه بر این، ضریب همبستگی بین تعداد رخدادهای بارش حدی ناشی از رودخانه جوی با تعداد کل رخدادهای بارش حدی نیز به استثناء سقز (۰/۱۶) بین ۰/۸۳



شکل ۸- تعداد روزهای دارای رخداد بارش حدی در ماه‌های مختلف سال و تعداد روزهای مربوط به رخداد بارش حدی ناشی از رودخانه جوی در ماه‌های مختلف سال در دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰ در ایستگاه‌های مورد مطالعه (محور چپ). اعداد بر حسب درصد بیانگر نسبت تعداد رخداد‌های بارش حدی ناشی از رودخانه جوی به تعداد کل رخداد بارش حدی بر حسب درصد است. مجموع ارتفاع کل بارش‌های حدی (خط ممتد قرمز) و مجموع ارتفاع بارش حدی ناشی از رودخانه جوی (خط ممتد آبی) در ماه‌های مختلف سال در دوره آماری ۱۹۹۱-۲۰۲۰ در ایستگاه‌های مورد مطالعه (محور راست)

جدول ۲- ضرایب همبستگی بین تعداد رخدادهای بارش حدی و مجموع ارتفاع بارش متناظر آنها (a)، ضرایب همبستگی بین تعداد رخدادهای بارش حدی ناشی از رودخانه جوی و مجموع ارتفاع بارش متناظر آنها (b)، ضرایب همبستگی بین تعداد رخدادهای بارش حدی و تعداد رخدادهای بارش حدی ناشی از رودخانه جوی (c) و ضرایب همبستگی بین مجموع ارتفاع بارش حاصل از رخدادهای حدی و مجموع ارتفاع بارش حاصل از رخدادهای حدی ناشی از رودخانه جوی (d)

ضریب همبستگی	ایستگاه						
	مه‌آباد	تکاب	ارومیه	سراب	مراغه	تبریز	سهند
a	۰/۹۳	۰/۹۹	۰/۹۷	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۷۹	۰/۷۱
b	۰/۹۴	۰/۹۳	۰/۸۲	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۸۲	۰/۹۵
c	۰/۸۳	۰/۹۴	۰/۸۴	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۸۳	۰/۱۶
d	۰/۷۷	۰/۹۹	۰/۷۸	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۱	۰/۷۲

جدول ۳- نسبت تعداد رخدادهای بارش حدی متاثر از رودخانه‌های جوی به تعداد کل رخدادهای بارش حدی در ماه‌های مختلف در هریک از ایستگاه‌ها در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱ (تعداد) و نسبت مجموع ارتفاع رخدادهای بارش حدی متاثر از رودخانه‌های جوی به مجموع ارتفاع کل رخدادهای بارش حدی در ماه‌های مختلف در هریک از ایستگاه‌ها در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱ (ارتفاع بارش)

ایستگاه	تعداد (%)	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	نوامبر	دسامبر
مه‌آباد	تعداد	۲۰/۰۰	۱۹/۰۵	۱۹/۰۵	۱۹/۰۵	۲۷/۲۷	۸/۳۳
	ارتفاع بارش	۲۰/۶۷	۲۳/۲۵	۳۵/۰۳	۲۱/۰۷	۳۲/۱۰	۸/۷۸
تکاب	تعداد	۹/۵۲	۷/۴۱	۷/۴۱	۷/۴۱	۱۳/۹۵	۱۰/۷۱
	ارتفاع بارش	۶/۷۵	۸/۰۷	۹/۱۱	۱۱/۲۰	۱۲/۴۶	۱۰/۱۲
ارومیه	تعداد	۰/۰۰	۱۱/۱۱	۱۱/۱۱	۱۱/۱۱	۲۱/۲۱	۱۳/۳۳
	ارتفاع بارش	۰/۰۰	۱۲/۱۳	۲۲/۴۱	۶/۸۷	۱۸/۸۱	۱۸/۶۱
سراب	تعداد	۰/۰۰	۱۴/۲۹	۱۴/۲۹	۱۴/۲۹	۲۷/۵۰	۱۳/۳۳
	ارتفاع بارش	۰/۰۰	۱۷/۶۲	۱۳/۸۰	۱۶/۳۱	۲۵/۷۰	۱۸/۵۲
مراغه	تعداد	۹/۵۲	۶/۶۷	۶/۶۷	۶/۶۷	۲۳/۶۸	۱۰/۵۳
	ارتفاع بارش	۱۳/۶۳	۹/۰۱	۴/۲۴	۱۵/۲۲	۲۲/۸۵	۹/۷۱
تبریز	تعداد	۴/۳۵	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۶/۲۲	۶/۹۰
	ارتفاع بارش	۳/۷۳	۶/۳۷	۱۴/۶۸	۹/۰۴	۱۳/۸۷	۷/۵۴
سهند	تعداد	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۱/۵۴	۷/۶۹
	ارتفاع بارش	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۵/۱۱	۹/۶۰
سقز	تعداد	۱۷/۸۶	۲/۳۳	۲/۳۳	۳/۳۳	۱۰/۵۳	۱۱/۱۱
	ارتفاع بارش	۱۹/۴۹	۸/۱۱	۴/۳۱	۴/۴۶	۱۱/۵۷	۱۱/۹۴

- در دوره ۲۰۲۰-۱۹۹۱ در مجموع ۲۸۸ رودخانه جوی از حوضه آبریز دریاچه ارومیه عبور کردند و ماه‌های آوریل و مارس بیشترین فراوانی رودخانه‌های جوی را نسبت به سایر ماه‌ها داشتند.
- منشأ رودخانه‌های جوی عبورکننده از حوضه، اغلب دریای مدیترانه، دریای سرخ و خلیج عدن بودند.
- از میان ۶۴۴ مورد رخدادهای بارش حدی در هشت ایستگاه مورد بررسی، در مجموع در ۱۰۹ تاریخ، رخدادهای بارش حدی همراه با عبور رودخانه جوی از حوضه بوده است.
- در مقیاس حوضه، ۲۵/۸، ۲۱/۲، ۱۸/۲ درصد بارش‌های حدی رخ داده در ماه آوریل، مارس و نوامبر (ماه‌های دارای بیشترین
- رخدادهای بارش حدی، همبستگی معنی‌داری بین تعداد و مجموع ارتفاع بارش حدی متاثر از رودخانه‌های جوی در ماه‌های مورد بررسی وجود داشت.
- از نظر تعداد رخدادهای بارش حدی، ماه نوامبر در ایستگاه سراب و از نظر مجموع ارتفاع بارش حدی ماه مارس در ایستگاه مه‌آباد، بیشترین تأثیرپذیری از رودخانه‌های جوی را داشتند.
- نتایج مطالعه حاضر می‌تواند در پیش‌بینی‌های احتمالاتی رخدادهای بارش حدی و سیلاب‌های ناشی از رودخانه‌های جوی مفید باشد. همچنین، روش استفاده شده در این پژوهش در مقیاس بزرگتر و با استفاده از داده‌های شبکه‌ای مترکم‌تر می‌تواند برای تهیه نقشه-

- A dusty atmospheric river brings floods to the Middle East. *Geophysical Research Letters*. 48(23): e2021GL095441. doi: 10.1029/2021GL095441
- Doiteau, B., Dournaux, M., Montoux, N., and Baray, J. L. 2021. Atmospheric rivers and associated precipitation over France and western Europe: 1980–2020 climatology and case study. *Atmosphere*. 12(8): 1075. <https://doi.org/10.3390/atmos12081075>
- Esfandiari, N., and Lashkari, H. 2020. Identifying atmospheric river events and their paths into Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 140(3): 1125–1137. doi: 10.1007/s00704-020-03148-w
- Esfandiari, N., and Lashkari, H. 2021. The effect of atmospheric rivers on cold-season heavy precipitation events in Iran. *Journal of Water and Climate Change*. 12(2): 596–611. doi: 10.2166/wcc.2020.259
- Francis, D., Fonseca, R., Bozkurt, D., Nelli, N., and Guan, B. 2024. Atmospheric river rapids and their role in the extreme rainfall event of April 2023 in the Middle East. *Geophysical Research Letters*. 51(12): e2024GL109446. doi: 10.1029/2024GL109446
- Gimeno, L., Nieto, R., Vázquez, M and Lavers, D.A. 2014. Atmospheric rivers: a mini-review. *Frontiers in Earth Science*. 2: 1–6. doi: 10.3389/feart.2014.00002
- Guan, B., and Waliser, D. E. 2015. Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 120(24): 12514–12535. doi: 10.1002/2015JD024257
- Ionita, M., Nagavciuc, V., and Guan, B. 2020. Rivers in the sky, flooding on the ground: The role of atmospheric rivers in inland flooding in central Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*. 24(11): 5125–5147. doi: 10.5194/hess-24-5125-2020
- Kingston, D. G., Lavers, D. A., and Hannah, D. M. 2022. Characteristics and large-scale drivers of atmospheric rivers associated with extreme floods in New Zealand. *International Journal of Climatology*. 42(5): 3208–3224. doi: 10.1002/joc.7415
- Kingston, D. G., Cooper, L., Lavers, D. A., and Hannah, D. M. 2025. Brief communication: Forecasting extreme precipitation from atmospheric rivers in New Zealand. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 25(2): 675–682. doi: 10.5194/nhess-25-675-2025
- Knippertz, P., Wernli, H., and Gläser, G. 2013. A global climatology of tropical moisture exports. *Journal of Climate*. 26(10): 3031–3045. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00401.1
- Lavers, D. A., and Villarini, G. 2013. Atmospheric rivers and flooding over the central United States. *Journal of Geophysical Research*. 118: 1001–1010. doi: 10.1029/2012JD018001
- های ریسک وقوع بارش‌های حدی و یا سیلاب‌های مرتبط با رودخانه‌های جوی مورد استفاده قرار گیرد. لذا کاربست رهیافت مورد استفاده در این مطالعه، برای بررسی میزان تأثیر رودخانه‌های جوی با منشأهای مختلف بر بارش‌های حدی در مناطق مختلف کشور پیشنهاد می‌شود. همچنین، استفاده از روش‌های تحلیل احتمالات شرطی (قضیه بیز) برای تحلیل ریسک وقوع رخدادهای حدی بارش در ترکیب با رخداد رودخانه‌های جوی برای مطالعات آینده پیشنهاد می‌شود.
- ### منابع
- سلیمی، س. و سلیقه، م. ۱۳۹۵. تأثیر رودخانه‌های اتمسفری (ARS) بر آب و هوای ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. ۹۶: ۲۶۴–۲۴۷.
- لشکری، ح. و اسفندیاری، ن. ۱۳۹۹. شناسایی و تحلیل همدید بالاترین بارش‌های مرتبط با رودخانه‌های جوی در ایران. تحلیل فضایی مخاطرات طبیعی. ۷(۲): ۱۸۷–۲۰۶.
- Akbary, M., Salimi, S., Hosseini, S. A., and Hosseini, M. 2019. Spatio-temporal changes of atmospheric rivers in the Middle East and North Africa region. *International Journal of Climatology*. 39(10): 3976–3986. doi: 10.1029/2008WR007615.
- Alizadeh-Choobari, O., Ahmadi-Givi, F., Mirzaei, N., and Owlad, E. 2016. Climate change and anthropogenic impacts on the rapid shrinkage of Lake Urmia. *International Journal of Climatology*. 36(13): 4276–4286. doi: 10.1002/joc.4630
- Curry, C. L., Islam, S. U., Zwiers, F. W., and Déry, S. J. 2019. Atmospheric rivers increase future flood risk in Western Canada's largest Pacific river. *Geophysical Research Letters*. 46(3): 1651–1661. doi: 10.1029/2018GL080720
- Dettinger, M. D. 2013. Atmospheric rivers as drought busters on the US West Coast. *Journal of Hydrometeorology*. 14(6): 1721–1732. doi: 10.1175/JHM-D-13-02.1
- Dettinger, M. D., Ralph, F. M., Das, T., Neiman, P. J., and Cayan, D. R. 2011. Atmospheric rivers, floods and the water resources of California. *Water*. 3(2): 445–478. doi: 10.3390/w3020445
- Dezfuli, A. 2020. Rare atmospheric river caused record floods across the Middle East. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 101(4): E394–E400. doi: 10.1175/BAMS-D-19-0247.1
- Dezfuli, A., Bosilovich, M. G., and Barahona, D. 2021. 1 Bayes' theorem

- Ramos, A. M., Trigo, R. M., Liberato, M. L. R., and Tomé, R. 2015. Daily precipitation extreme events in the Iberian Peninsula and its association with atmospheric rivers. *Journal of Hydrometeorology*. 16(2): 579–597. doi: 10.1175/JHM-D-14-0103.1
- Richards-Thomas, T. S., and Déry, S. J. 2025. Moisture transport to British Columbia's upper Nechako Watershed associated with three atmospheric rivers. *Discover Atmosphere*. 3(1): 9. doi: 10.1007/s44292-025-00035-9
- Roberts, M. J. et al. 2018. The benefits of global high resolution for climate simulation: process understanding and the enabling of stakeholder decisions at the regional scale. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 99: 2341–2359. doi: 10.1175/BAMS-D-15-00320.1
- Rutz, J. J., and Steenburgh, W. J. 2012. Quantifying the role of atmospheric rivers in the interior western United States. *Atmospheric Science Letters*. 13(4): 257–261. doi: 10.1002/asl.392
- Sabziparvar, A. A., Movahedi, S., Asakereh, H., Maryanaji, Z., and Masoodian, S. A. 2014. Geographical factors affecting variability of precipitation regime in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 120: 367–376. doi: 10.1007/s00704-014-1174-3
- Tan, Y., Yang, S., Zwiers, F., Wang, Z., and Sun, Q. 2022. Moisture budget analysis of extreme precipitation associated with different types of atmospheric rivers over western North America. *Climate Dynamics*. 58 (3): 793–809. doi: 10.1007/s00382-021-05933-3
- Whan, K., Sillmann, J., Schaller, N., and Haarsma, R. 2020. Future changes in atmospheric rivers and extreme precipitation in Norway. *Climate Dynamics*. 54(3): 2071–2084. doi: 10.1007/s00382-019-05099-z
- Xu, G., Ma, X., Chang, P., and Wang, L. 2020. Image-processing-based atmospheric river tracking method version 1 (IPART-1). *Geoscientific Model Development*. 13(10): 4639–4662. doi: 10.5194/gmd-13-4639-2020
- Zhu, Y., and Newell, R. E. 1998. A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. *Monthly Weather Review*. 126(3): 725–735. doi: 10.1175/1520-0493(1998)126<0725:APAFMF>2.0.CO;2
- Journal of Climate*. 26(20): 7829–7836. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00212.1
- Lavers, D. A., Villarini, G., Allan, R. P., Wood, E. F., and Wade, A. J. 2012. The detection of atmospheric rivers in atmospheric reanalyses and their links to British winter floods and the large-scale climatic circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 117(D20). doi: 10.1029/2012JD018027
- Mateling, M. E., Pettersen, C., Kulie, M. S., Mattingly, K. S., Henderson, S. A., and L'Ecuyer, T. S. 2021. The Influence of Atmospheric Rivers on Cold-Season Precipitation in the Upper Great Lakes Region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 126(13): e2021JD034754. doi: 10.1029/2021JD034754
- Michel, C., Sorteberg, A., Eckhardt, S., Weijenborg, C., Stohl, A., and Cassiani, M. 2021. Characterization of the atmospheric environment during extreme precipitation events associated with atmospheric rivers in Norway-Seasonal and regional aspects. *Weather and Climate Extremes*. 34: 100370. doi: 10.1016/j.wace.2021.100370
- Moore, B. J., Neiman, P. J., Ralph, F. M., and Barthold, F. E. 2012. Physical processes associated with heavy flooding rainfall in Nashville, Tennessee, and vicinity during 1–2 May 2010: The role of an atmospheric river and mesoscale convective systems. *Monthly Weather Review*. 140(2): 358–378. doi: 10.1175/MWR-D-11-00126.1
- Neiman, P. J., Ralph, F. M., Wick, G. A., Lundquist, J. D., and Dettinger, M. D. 2008. Meteorological characteristics and overland precipitation impacts of atmospheric rivers affecting the West Coast of North America based on eight years of SSM/I satellite observations. *Journal of Hydrometeorology*. 9(1): 22–47. doi: 10.1175/2007JHM855.1
- Newell, R. E., Newell, N. E., Zhu, Y., and Scott, C. 1992. Tropospheric rivers?—A pilot study. *Geophysical Research Letters*. 19(24): 2401–2404. doi: 10.1029/92GL02916
- Ralph, F. M., Dettinger, M., Lavers, D., Gorodetskaya, I. V., Martin, A., Viale, M., White, A. B., Oakley, N., Rutz, J., and Spackman, J. R. 2017. Atmospheric rivers emerge as a global science and applications focus. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 98(9): 1969–1973. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0262.1

## Statistical Assessment of the Link Between Atmospheric Rivers and Extreme Precipitation Events in the Lake Urmia Basin

S. Naderi<sup>1</sup>, M. Montaseri<sup>2</sup>, S. Hejabi<sup>3\*</sup>

Received: Sep. 09, 2025

Accepted: Nov. 25, 2025

### Abstract

Atmospheric rivers are long, narrow pathways in the troposphere that play an important role in transporting atmospheric moisture to different regions of the world. When accompanied by favorable synoptic and thermodynamic conditions, they can cause heavy rainfall or flooding in the affected areas. In this study, an approach based on the THR image processing algorithm in the IPART Python package was used to identify atmospheric rivers entering the Lake Urmia Basin, and the relationship between extreme precipitation events during the rainy months (November to April) and atmospheric rivers in the 1991–2020 period was statistically analyzed. The results showed that during this period, 288 atmospheric rivers crossed the Lake Urmia Basin. The highest frequency occurred in April (32.64%) and March (26.74%), with the main sources being the Mediterranean Sea (33.68%), the Red Sea (17.71%), and the Gulf of Aden (13.89%). On average, atmospheric rivers contributed 16.9% to the total number of extreme precipitation events in the studied months, with the highest contribution (25.8%) occurring in April. At the station scale, November at Sarab Station showed the highest effect in terms of the number of extreme precipitation events (27.5%), while March at Mahabad Station had the highest effect in terms of the total amount of extreme precipitation. The approach used in this study can be applied to develop extreme precipitation risk maps and to predict extreme precipitation events and floods.

**Keywords:** Atmospheric river origin, Extreme precipitation, IPART Python package, THR approach

1- PhD student in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

3- Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

(\*- Corresponding Author E-mail: s.hejabi@urmia.ac.ir)