



Application of Spectral Analysis for Determination of Daily Rainfall Frequency in the Urmia Lake Basin

Kabiri, Sh.¹  Nasr Esfahani, M.A.²  Ghasemi Dastgerdi, A.R.

1. PhD student in the Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University.
2. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University.
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University.

Corresponding Author E-mail: kabiri.shiima@gmail.com

(Received: 22 Jun 2025, Revised: 05 Jan 2026, Accepted: 09 Feb 2026, Published online: 09 Feb 2026)

Abstract

Understanding long-term precipitation behavior, as one of the most variable climatic elements, plays a crucial role in water resource management and in reducing the vulnerability of agricultural and natural resource sectors. Since temporal and spatial variations in precipitation can lead to wide-ranging economic, social, and environmental consequences, the application of modern approaches such as spectral analysis to identify rainfall patterns and cycles is essential. In this study, spectral analysis was employed to investigate the dominant frequencies of daily precipitation within the Lake Urmia basin. Daily data from 11 selected meteorological stations across the basin, covering a minimum 20-year statistical period (1970–2022), were analyzed. Furthermore, three representative stations—Tabriz, Kahriz, and Mahabad—located at different positions around Lake Urmia, were examined in greater detail to assess precipitation behavior under normal, drought, and wet conditions. The research methodology was based on spectral analysis using the Fourier series, applied to daily precipitation data from the 11 stations with at least 20 years of records. After data collection from the Meteorological Organization, quality control procedures were carried out, and wet and dry years were identified using the Standardized Precipitation Index (SPI). The results revealed that annual and semi-annual cycles play a primary role in the temporal distribution of rainfall across most stations; however, their intensity and persistence vary depending on geographical location. Under normal conditions, stations exhibit relatively regular and concentrated precipitation patterns. During drought periods, cycles become weakened and more scattered, whereas in wet years, stronger long-term cycles emerge, leading to more coherent precipitation behavior. Return period analysis indicated that drought tends to recur annually in most of the 11 stations, while wet conditions display more diverse temporal patterns, sometimes appearing over short multi-day intervals. This variability in temporal distribution, particularly in stations with shorter cycles, reflects a more unstable climate and greater sensitivity to climatic fluctuations. The findings highlight the importance of tailoring water resource management strategies to the specific frequency characteristics of each region and demonstrate that spectral analysis can serve as a valuable decision-support tool for drought mitigation and optimizing water storage planning.

Keywords: Spectral Analysis, Urmia Lake, Draught, Wet Spell, Rainfall

Cite this article: Kabiri, S., Nasresfahani, M. and Ghasemi Dastgerdi, A. (2026). Application of Spectral Analysis for Determination of Daily Rainfall Frequency in the Urmia Lake Basin. (e240244). *Nivar*, (), e240244 doi: 10.30467/nivar.2026.530926.1341

E-mail: (2) mnasr@sku.ac.ir (3) ghasemiar@yahoo.com



کاربرد تحلیل طیفی برای تعیین بسامد غالب بارش روزانه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

شیمای کبیری^۱ | محمدعلی نصر اصفهانی^۲ | احمد رضا قاسمی دستگردی^۳

۱. دانشجوی دکتری گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲. استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳. دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

رایانامه نویسنده مسئول: kabiri.shiima@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱، بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰)

چکیده:

شناخت رفتار بارش در بلندمدت به‌عنوان یکی از متغیرترین عناصر اقلیمی، نقش کلیدی در مدیریت منابع آب و کاهش آسیب‌پذیری بخش‌های کشاورزی و منابع طبیعی دارد. از آنجا که تغییرات زمانی و مکانی بارش می‌تواند پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی گسترده‌ای به همراه داشته باشد، به‌کارگیری روش‌های نوین مانند تحلیل طیفی برای شناسایی الگوها و چرخه‌های بارش ضرورت دارد. در این پژوهش، با استفاده از تحلیل طیفی، فرکانس‌های غالب بارش روزانه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بررسی شد. داده‌های روزانه ۱۱ ایستگاه منتخب در این حوضه برای یک دوره آماری حداقل بیست‌ساله (۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲) تحلیل و به‌صورت جزئی‌تر در سه ایستگاه تبریز، کهریز و مهاباد (دارای پراکنندگی مناسب در اطراف دریاچه ارومیه) رفتار بارشی در سه وضعیت نرمال، خشکسالی و ترسالی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفت. روش تحقیق مبتنی بر تحلیل طیفی با استفاده از سری فوریه است که بر روی داده‌های بارش روزانه ۱۱ ایستگاه منتخب با دوره آماری حداقل ۲۰ سال اعمال شد. داده‌ها پس از گردآوری از سازمان هواشناسی، کنترل کیفی و انتخاب سال‌های تر و خشک بر اساس شاخص SPI، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان داد چرخه‌های سالانه و نیم سالانه در بیشتر ایستگاه‌ها نقش اصلی را در توزیع زمانی بارش دارند، اما شدت و پایداری آن‌ها بسته به موقعیت جغرافیایی متفاوت است. در شرایط نرمال، ایستگاه‌ها بارش‌های منظم و متمرکز دارند، در حالی که در خشکسالی چرخه‌ها پراکنده و تضعیف می‌شوند و در ترسالی چرخه‌های بلندمدت با دامنه قوی‌تر ظاهر شده و انسجام بارش افزایش می‌یابد. بررسی دوره‌های بازگشت نشان داد که خشکسالی در اکثر ۱۱ ایستگاه به‌صورت سالانه تکرار می‌شود، در حالی که ترسالی‌ها دارای الگوی زمانی متنوع‌تری هستند و می‌توانند حتی در بازه‌های کوتاه چندروزه نیز ظاهر شوند. این تفاوت در توزیع زمانی، به‌ویژه در ایستگاه‌هایی که چرخه‌های کوتاه‌تر دارند، نشانه‌ای از اقلیم ناپایدارتر و حساسیت بیشتر به تغییرات اقلیمی است. نتایج این مطالعه بر ضرورت مدیریت منابع آب متناسب با ویژگی‌های فرکانسی هر ناحیه تأکید دارد و نشان می‌دهد که تحلیل طیفی می‌تواند به‌عنوان ابزار تصمیم‌یار در طراحی استراتژی‌های مقابله با خشکسالی و بهینه‌سازی ذخیره‌سازی آب به کار رود.

کلمات کلیدی: تحلیل طیفی، دریاچه ارومیه؛ خشکسالی، ترسالی، بارندگی

استناد: کبیری، شیمای، نصر اصفهانی، محمدعلی و قاسمی دستگردی، احمدرضا. (۱۴۰۴). کاربرد تحلیل طیفی برای تعیین بسامد غالب بارش روزانه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

e240244 doi: 10.30467/nivar.2026.530926.1341 (۱), نیوار, (e240244)

رایانامه: (۲) mnasr@sku.ac.ir (۳) ghasemiar@yahoo.com



۱-مقدمه

شناسایی رفتار بارش در یک حوضه آبریز، یکی از مهم‌ترین پارامترها در اصول برنامه‌ریزی محیطی و مدیریت منابع آب به شمار می‌آید. شناخت رفتار بارش در بلندمدت می‌تواند زمینه لازم برای ارائه برنامه‌ای جامع در مدیریت حوضه را فراهم کند و به پیش‌بینی عوامل هواشناسی از جمله سیلاب، برآورد میزان ذخیره مخازن و نشت آب در خاک زراعی کمک نماید. تغییرات بارش در دوره‌های آماری مشخص، می‌تواند مخاطراتی برای حیات بشر، بخش‌های کشاورزی و منابع طبیعی ایجاد کند و نشان‌دهنده حساسیت بالای اکوسیستم به نوسانات اقلیمی است (ناظری تاهرودی، ۲۰۲۵؛ گرای و همکاران، ۲۰۲۱؛ آکتر و همکاران، ۲۰۲۳). بارش به‌عنوان متغیرترین عامل اقلیمی، با تغییرات زمانی و مکانی همراه است و پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی به همراه دارد (میرموسوی و همکاران، ۱۳۹۵). ویژگی‌ها و پیچیدگی‌های بارش که اغلب ناشی از توپوگرافی و شرایط غالب منطقه است، همواره مورد توجه اقلیم‌شناسان بوده است. دینامیک سیستم‌های اقلیمی، به‌ویژه بارش، به دلیل مشارکت مؤلفه‌های گوناگون، با نوسانات متنوع همراه است و این امر تحلیل دقیق و پیش‌بینی آن را پیچیده می‌کند (عسگری و رحیم‌زاده، ۱۳۸۲؛ موستاکیس و همکاران، ۲۰۲۰). با توجه به این پیچیدگی‌ها، نیاز به مدل‌ها و روش‌هایی است که بتوانند نوسانات آشکار و پنهان بارش را شناسایی کرده و تفسیر آن‌ها را تسهیل کنند. در این میان، تحلیل طیفی به‌عنوان یکی از روش‌های ریاضی کارآمد، توانایی آشکارسازی روند و دوره‌های تناوبی بارش را دارد و امکان شناسایی تغییرات موجود در سری‌های زمانی پیچیده را فراهم می‌سازد. کاربرد اصلی تحلیل طیفی در این پژوهش، تعیین فرکانس غالب بارش روزانه است که با حفظ پیوستگی داده‌ها و شناسایی چرخه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت، می‌تواند به بهبود برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب حوضه کمک کند. این روش، با ارائه تصویری روشن از نوسانات و الگوهای دوره‌ای، شکاف موجود در دانش ما از

رفتار بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف را کاهش می‌دهد و امکان مدیریت بهینه و کاهش ریسک مخاطرات اقلیمی را فراهم می‌سازد (دنگ و همکاران، ۲۰۲۴؛ الیاس و همکاران، ۲۰۲۵).

روش‌های مختلفی برای تحلیل ویژگی‌های زمانی یک سری زمانی وجود دارد که هدف آن‌ها شناسایی رفتار دوره‌ای عناصر اقلیمی است. یکی از مهم‌ترین این روش‌ها، تحلیل طیفی یا تحلیل در حوزه فرکانس است که با بررسی فرکانس‌های موجود در سری زمانی، امکان آشکارسازی چرخه‌ها و نوسانات بارش را فراهم می‌کند. تعیین تناوب غالب در داده‌های آماری، همواره مورد توجه محققان علوم مختلف بوده است، زیرا با شناسایی سیگنال غالب سری‌های زمانی-مکانی، داده‌هایی که بیشترین فراوانی را دارند، مشخص می‌شوند. در زمینه مدیریت منابع آب، شناخت این تناوب‌ها امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر و مدیریت بهینه منابع آب حوضه‌ها را فراهم می‌آورد و می‌تواند به پیش‌بینی رخدادهایی مانند سیلاب، خشکسالی یا دوره‌های ترسالی کمک کند (حقیقت‌جو میرهاشمی، ۲۰۲۲). مطالعات زیادی در خصوص تحلیل طیفی در منابع آبی صورت گرفته است. برای نمونه آدوو و همکاران (۲۰۲۳) به تجزیه و تحلیل بارش با استفاده از تحلیل موجک در مراکش پرداختند. در این پژوهش، حوضه اصلی مورد مطالعه با در نظر گرفتن مقادیر بارش غالب به زیر حوضه‌های مختلف با مقادیر بارش غالب تقسیم‌بندی شد. نتایج این روش نشان داد که می‌توان به ازای بازه‌ی زمانی مورد مطالعه مشخص، در حوضه اصلی، زیر حوضه‌هایی را در نظر گرفت که دارای دوره تناوب غالب یکسانی می‌باشند. از این رو، می‌توان مدیریت منابع آب حوضه اصلی را با توجه به بارش غالب بدست آمده برای زیر حوضه‌ها، با دقت بیشتری طرح ریزی کرد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد، که تبدیل حوضه‌ی اصلی به زیر حوضه‌ها، وابسته به زمان مورد مطالعه است و در صورت تغییر دوره‌ی زمانی مورد مطالعه، با تغییر بارش با سیگنال غالب، عمدتاً مرزبندی زیر

هستند. این یافته با نتایج پژوهش حاضر که نشان می‌دهد در شرایط نرمال چرخه سالانه (۳۶۵ روزه) پایدارترین الگو است، همخوانی دارد. جلیلی (۱۳۸۹) به تحلیل طیفی تراز آب دریاچه ارومیه پرداخت و با استفاده از روش‌های پیشرفته طیفی مانند SSA و MTM، دوره‌های نوسانی ۱.۲ تا ۴.۵ ساله را شناسایی کرد. وی همچنین نشان داد که تغییرات تراز دریاچه با تغییرات شاخص‌های اقلیمی جهانی مرتبط است. این پژوهش تأیید می‌کند که رفتار هیدرواقلمی حوضه دریاچه ارومیه تحت تأثیر عوامل مختلفی در مقیاس‌های زمانی متفاوت قرار دارد. علیجانی و همکاران (۱۳۹۰) در تحلیل طیفی سری‌های زمانی بارش سالانه ایران نشان دادند که چرخه‌های معنی‌دار ۲-۳ ساله، ۳-۵ ساله و ۶-۲ ساله بر بارش ایران حاکم است. آنها اشاره کردند که در شمال غرب کشور، به دلیل وجود کوه‌های سبلان و سهند، چرخه‌های متنوعی مشاهده می‌شود. این یافته می‌تواند توضیح‌دهنده تفاوت‌های مشاهده شده بین ایستگاه‌های مختلف در پژوهش حاضر باشد. رزمی جانبار و طالب‌شمکایی (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای بر روی دوره بازگشت بارش‌های حدی ۲۴ ساعته در جنوب شرق دریاچه ارومیه، از توزیع‌های آماری مختلف مانند لوگ پیرسون تپ ۳ استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که دوره‌های بازگشت کوتاه‌مدت در این منطقه وجود دارد که می‌تواند منجر به سیلاب‌های ناگهانی شود. این موضوع با یافته‌های پژوهش حاضر در مورد کاهش دوره تناوب به ۳.۶۱ روز در شرایط ترسالی در برخی ایستگاه‌ها (مانند بناب) همسو است. تقوی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از تحلیل موجک بر بارش ایستگاه‌های غرب ایران نشان دادند که در همه ایستگاه‌ها یک دوره بازگشت سالانه با سطح اطمینان بالا وجود دارد که تقویت تضعیف آن وقوع دوره‌های ترسالی و خشکسالی را نشان می‌دهد. آنها همچنین به وجود مولفه‌های درون‌سالی با دوره بازگشت نسبتاً طولانی‌مدت اشاره کردند. این نتایج با یافته‌های پژوهش حاضر در مورد غالب بودن چرخه سالانه در شرایط نرمال همخوانی دارد. رضائی بنفشه و همکاران (۱۳۹۳) در

حوضه‌ها تغییر خواهد کرد و این امر تأثیر مستقیم بر فرکانس بارش غالب خواهد گذاشت (ادو و همکاران، ۲۰۲۳). ذکر یا و همکاران (۲۰۲۲)، به بررسی فرکانس مناطق مختلف با الگوهای متفاوت بارش در حوضه پاکستان پرداختند. در این پژوهش، با استفاده از میانگین زمانی طیف توان موجکفرکانس بارش‌های مختلف تعیین شد. آنها بیان داشتند که منطقه‌بندی برای بارش اجازه می‌دهد تا مناطق در یک حوضه آبریز با ویژگی‌های بارش مرتبط در منطقه‌ای مشخص، محصور شود.

در ایران در بخش مدیریت منابع آب به دلیل نبود داده‌های آماری بر پایه‌ی مطالعات علمی، همواره نواقص و مشکلاتی را فراهم آورده است. از جمله تعیین تناوب غالب در داده‌های آماری، همواره مورد توجه محققان بسیاری از علوم بوده است برای نمونه احمدی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی و تحلیل دوره‌های بازگشت دما و بارش با استفاده از تحلیل طیفی و تأثیر آن بر مدیریت اراضی در منطقه‌ای واقع در استان آذربایجان شرقی پرداختند. نتایج حاصل از بررسی هر دو فراسنج نشان داد که کمینه مطلق سالانه دما، دارای چرخه‌های معنادار با دوره‌های بازگشت ۳/۸ ساله ۲/۴ ساله، متوسط دما دارای چرخه معنادار با دوره بازگشت ۳/۴ ساله و بیشینه مطلق دما دارای چرخه معنادار با دوره بازگشت ۲/۱ ساله است. همچنین بررسی دوره‌نگار مربوط به بارش مؤید چرخه معنادار با دوره بازگشت ۳/۴ ساله بود.

تحقیقات متعددی به بررسی رفتار بارش، خشکسالی و الگوهای اقلیمی در حوضه دریاچه ارومیه و مناطق شمال غرب ایران پرداخته‌اند که یافته‌های آنها می‌تواند در تفسیر نتایج این پژوهش مفید باشد. باهوشی و شایان (۱۳۸۸) با استفاده از شاخص استاندارد بارش (SPI) در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه نشان دادند که خشکسالی‌های حوضه دریاچه ارومیه عمدتاً در تداوم‌های کوتاه‌مدت (۳ تا ۶ ماهه) رخ می‌دهد. آنها همچنین اشاره کردند که سال‌های بارش نرمال از توالی و تداوم بیشتری نسبت به سال‌های مرطوب و خشک برخوردار

تغییرات دوره‌ای بارش روزانه در مقیاس حوضه‌ای با تمرکز بر هم‌پوشانی چرخه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت هنوز کمتر انجام شده است. نوآوری پژوهش حاضر در آن است که با به‌کارگیری تحلیل طیفی بر داده‌های روزانه و مقایسه شرایط ترسالی و خشکسالی، فرکانس غالب بارش و چرخه‌های مختلف آن در سراسر حوضه دریاچه ارومیه شناسایی شده و امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر برای مدیریت منابع آب فراهم شده است. این روش، ضمن حفظ پیوستگی داده‌ها، شکاف موجود در دانش رفتار بارش روزانه در مقیاس حوضه‌ای را کاهش می‌دهد و به مدیریت بهینه منابع آب و کاهش ریسک مخاطرات اقلیمی کمک می‌کند.

در این پژوهش، با استفاده از روش تحلیل طیفی بر میانگین روزانه بارش ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی حوضه دریاچه ارومیه (ایستگاه تبریز، کهریز و مهاباد)، فرکانس غالب بارش در این منطقه در دوره‌های نرمال، خشکسالی و ترسالی مورد بررسی قرار گرفت. در بحث مدیریت منابع آب، شناخت این تناوب‌ها می‌تواند شرایط مناسبی را برای مدیریت بهینه فراهم آورد.

۲- مواد و روش‌ها

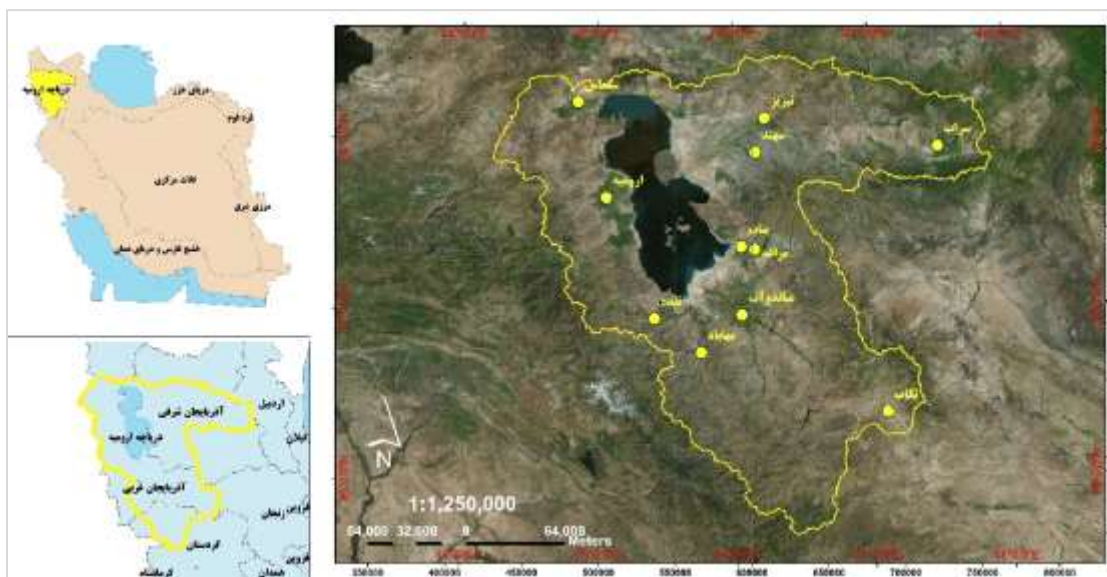
چارچوب کلی تحقیق بر اساس تحلیل سری‌های زمانی بارش و استخراج فرکانس غالب در مقیاس‌های زمانی مختلف طراحی گردید. داده‌های مورد نیاز تحقیق شامل آمار بارش روزانه ایستگاه‌های هواشناسی و باران‌سنجی منطقه است که از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. برای افزایش دقت نتایج، تنها ایستگاه‌هایی انتخاب شدند که دارای حداقل بیست سال داده آماری پیوسته بودند (دوره آماری: ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲). داده‌های خام پس از گردآوری، تحت کنترل کیفی (شامل حذف داده‌های مشکوک، بررسی ناسازگاری‌های زمانی و مکانی، و اصلاح خطاهای ثبت شده)، قرار گرفتند. پس از آماده‌سازی داده‌ها، ابتدا توصیف آماری بارش‌ها شامل میانگین، انحراف معیار، حداقل و حداکثر محاسبه شد تا دید اولیه از پراکندگی

مطالعه‌ای بر روی بارش‌های حدی غرب و شمال غرب ایران نشان دادند که چرخه فرین‌های بارش در درجه اول با چرخه شدت و ضعف کم‌فشار مدیترانه و چرخه‌های ۲ تا ۳ ساله آن مرتبط است. آنها همچنین تأثیر نمایه‌های دورپیوندی مانند ENSO با چرخه ۳ تا ۵ ساله را بر بارش‌های منطقه مورد تأیید قرار دادند. این یافته‌ها می‌تواند توضیح‌دهنده تغییرپذیری بالای بارش در برخی ایستگاه‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر باشد. احمدی و همکاران (۱۳۹۵) در بررسی دوره‌های بازگشت دما و بارش در منطقه خداآفرین (آذربایجان شرقی) با استفاده از تحلیل طیفی به چرخه‌های معنادار ۲.۱ تا ۳.۸ ساله برای دما و ۳.۴ ساله برای بارش دست یافتند. آنها تأکید کردند که شناخت این چرخه‌ها برای مدیریت پایدار اراضی کشاورزی ضروری است. این موضوع با تأکید پژوهش حاضر بر اهمیت دوره‌های بازگشت در مدیریت منابع آب همسو است. دانشمند و محمودی (۱۳۹۵) در تحلیل طیفی خشکسالی‌های ایران با استفاده از شاخص EDI به این نتیجه رسیدند که دوره‌های غالب خشکسالی در ایران بسیار متنوع بوده و از ۲ تا ۳۰ سال متغیر است. آنها دو دوره ۱۰ ساله و ۳۰ ساله را به‌عنوان دوره‌های غالب بلندمدت در کل ایران معرفی کردند. نکته جالب در پژوهش آنها عدم وجود چرخه‌های درون‌سالی در اکثر ایستگاه‌ها بود که با نتایج این پژوهش در مورد وجود چرخه‌های کوتاه‌مدت در برخی ایستگاه‌ها در شرایط خشکسالی و ترسالی متفاوت است. بر اساس مطالعات انجام شده، مشخص است که رفتار بارش در حوضه‌های آبریز ایران و به‌ویژه حوضه دریاچه ارومیه دارای چرخه‌های متنوع کوتاه‌مدت و بلندمدت است که تحت تأثیر عوامل توپوگرافی، شرایط اقلیمی منطقه و شاخص‌های دورپیوندی مانند ENSO قرار دارند. تحقیقات پیشین با استفاده از تحلیل طیفی و موجک نشان داده‌اند که چرخه‌های سالانه و چندساله بر الگوی بارش غالب هستند و دوره‌های ترسالی و خشکسالی نقش مهمی در تغییر نوسانات بارش دارند. با این حال، بیشتر مطالعات به بررسی ایستگاه‌ها یا زیرحوضه‌های محدود پرداخته و تحلیل دقیق

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به عنوان یکی از حوضه‌های آبریز درجه یک کشور است. از نظر موقعیت مکانی، حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت حدود ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع در ناحیه کوهستانی شمال غربی ایران و در بین بخش‌های شمالی رشته کوه‌های زاگرس و دامنه‌های جنوبی سهند و نیز دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی کوه سهند، واقع شده است (شکل ۱) (سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، ۱۳۹۸).

و تغییرپذیری داده‌ها به دست آید. سپس برای شناسایی رفتار دوره‌ای بارش، از تحلیل طیفی در حوزه فرکانس استفاده گردید. این روش با تبدیل سری زمانی بارش به دامنه فرکانسی، امکان آشکارسازی چرخه‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت را فراهم می‌سازد. تمامی مراحل با استفاده از محیط کدنویسی پایتون صورت گرفت. سپس میانگین روزانه بارش برای هریک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در طول دوره آماری صورت محاسبه شده و با کاربست روش تحلیل طیفی به سری زمانی میانگین بارش روزانه که بر اساس سال آبی کشور مرتب شده‌اند، فرکانس‌های غالب آن استخراج و تفسیر گردید. این کار برای سه حالت بارش نرمال، خشکسالی و ترسالی صورت پذیرفت و این سه دسته‌بندی نیز با استفاده از شاخص SPI تعیین گردید.



شکل ۱. حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های مورد مطالعه (پژوهشگران)

و استخراج فرکانس‌های غالب، ۱۱ ایستگاه واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در استان‌های آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی با دوره زمانی حداقل ۲۰ سال انتخاب شدند. در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌ها و دوره زمانی در دسترس داده‌های آن‌ها، ارائه شده است. به منظور رعایت اختصار، طیف فرکانس بارش برای سه ایستگاه به صورت تفضیلی بررسی شده و در اینجا

مساحت دریاچه ارومیه در حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع بوده و نسبت به کل سطح کشور حدود ۱۵.۳ درصد و منابع آب سطحی آن حدود ۷ درصد از کل منابع آب کشور است (فنی، ۲۰۱۷). متوسط میزان بارش در این حوضه حدوداً ۳۵۰ میلی متر تخمین زده می‌شود که بخش عمده بارش از فصل پاییز تا اواسط بهار رخ می‌دهد. به منظور بررسی و تحلیل طیفی الگوی بارش

می‌تواند امکان تحلیل جامعی را در وضعیت الگوی بارش و تغییرات آن‌ها در اطراف دریاچه ارومیه به دست دهد.

آورده شده است. این سه ایستگاه شامل تبریز، مهاباد و کهریز به ترتیب در شمال، شرق، جنوب و غرب دریاچه ارومیه انتخاب شده‌اند. پراکندگی مکانی موجود در ایستگاه‌ها انتخاب شده

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد بررسی در این پژوهش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه (مرجع: سازمان هواشناسی، ۱۴۰۱)

ردیف	نام ایستگاه	شهرستان	مختصات		دوره زمانی مورد بررسی
			طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	
۱	بناب	آذربایجان شرقی	۳۷.۳۷	۴۶.۰۵	۱۹۹۹-۲۰۲۲
۲	مهاباد	آذربایجان غربی	۳۶.۷۵	۴۵.۷۵	۱۹۸۵-۲۰۲۲
۳	مراغه	آذربایجان غربی	۳۷.۳۵	۴۶.۱۵	۱۹۸۳-۲۰۲۲
۴	میاندوآب	آذربایجان غربی	۳۶.۹۷	۴۶.۰۵	۲۰۰۲-۲۰۲۲
۵	نقده	آذربایجان غربی	۳۶.۹۵	۴۵.۴۱	۲۰۰۱-۲۰۲۲
۶	ارومیه	آذربایجان غربی	۳۷.۶۶	۴۵.۰۶	۱۹۷۰-۲۰۲۲
۷	سهند	آذربایجان شرقی	۳۷.۹۲	۴۶.۱۶	۱۹۸۵-۲۰۲۲
۸	سلماس	آذربایجان غربی	۳۸.۲۲	۴۴.۸۵	۲۰۰۱-۲۰۲۲
۹	سراب	آذربایجان شرقی	۳۷.۹۴	۴۷.۵۱	۱۹۸۶-۲۰۲۲
۱۰	تبریز	آذربایجان شرقی	۳۸.۱۲	۴۶.۲۳	۱۹۷۰-۲۰۲۲
۱۱	تکاب	آذربایجان غربی	۳۶.۳۹	۴۷.۱۰	۱۹۸۶-۲۰۲۲

۲-۲. تحلیل طیفی

کسینوسی و سینوسی با فرکانس‌های مختلف است. ضرایب a_0 ، a_n و b_n به ترتیب از روابط (۲)، (۳) و (۴) به دست می‌آیند (کوتسویانینس و همکاران، ۱۹۹۸).

$$a_0 = \frac{1}{2L} \int_{-L}^L f(x) dx \quad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \cos(n \times \pi/L) dx \quad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^L f(x) \sin(n \times \pi/L) dx \quad (4)$$

۲-۳. روش تحلیل طیفی جهت تعیین سیگنال غالب

در شرایط ترسالی و خشکسالی

به منظور ارزیابی تغییرات ویژگی‌های سری زمانی بارش در زمان وقوع شرایط حاد نظیر خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها، بررسی جداگانه‌ای برای این سال‌های خشک و تر انجام شد. برای شناسایی این سال‌ها از شاخص بارش استاندارد شده SPI به‌عنوان یک شاخص استاندارد و پذیرفته شده در مطالعات

یکی از روش‌های متداول تحلیل طیفی داده‌ها، استفاده از سری فوریه می‌باشد. در این مطالعه جهت تحلیل فرکانس غالب از سری فوریه، به‌عنوان ابزاری برای انتقال یک تابع یا سیگنال در حوزه زمان به حوزه فرکانس استفاده شد. مفهوم پایه در پیدایش سری‌های فوریه این است که توابع مختلف را می‌توان به کمک توابع سینوسی و کسینوسی بازنویسی کرد. فرم کلی یک سری فوریه برای نمایش یک تابع در رابطه (۱) نمایش داده شده است (کوتسویانینس و همکاران، ۱۹۹۸).

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n \times \pi/L) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n \times \pi/L) \quad (1)$$

در این سری، توابع پایه شامل سینوس و کسینوس با فرکانس‌های صحیح مضرب π/L هستند که در قالب مجموع وزنی، تابع اصلی را بازسازی می‌کنند. a_0 مولفه ثابت (میانگین تابع در بازه) و ضرایب a_n و b_n میزان مشارکت مولفه‌های

وضعیت خشکسالی منطقه به کمک جدول (۲) قابل برآورد می‌باشد. مقادیر مثبت (منفی) SPI مشخص کننده بارش بیشتر (کمتر) از میانه می‌باشد (کریمی و اکبری نودهی، ۱۳۹۸). لازم به ذکر است، در این مطالعه جهت بررسی خشکسالی هر سال، شاخص SPI با مقیاس ۱۲ ماهه منطبق بر سال آبی مورد استفاده قرار گرفته است تا وضعیت خشکسالی و ترسالی آن معین شود. باید در نظر داشت که این روش به‌عنوان یکی از روش‌های تعیین سیگنال یک داده‌های آماری بر پایه‌ی داده‌های هواشناسی بارش، می‌توان سیگنال خشکسالی یک منطقه را برآورد نمود.

جدول ۲. طبقه بندی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI (مرجع: (باهوشی و شایان، ۱۳۸۸)

طبقه خشکسالی	مقدار SPI
ترسالی	$SPI > +1$
نرمال	$-1 < SPI < 1$
خشکسالی	$SPI < -1$

(مانند بناب، مهاباد، مراغه، میاندوآب، نقده، ارومیه و تکاب) که بیانگر وجود یک چرخه سالانه پایدار در این ایستگاه‌هاست. این پایداری بارشی نشانه‌ای از ویژگی اقلیم مدیترانه‌ای منطقه است که تمرکز بارش در فصل سرد و کمبود بارش در فصل گرم سال رخ می‌دهد. در مقابل، برخی ایستگاه‌ها مانند سهند، سلماس، سراب و تبریز در شرایط نرمال چرخه‌ای کوتاه‌تر با تناوب ۱۸۲.۵ روزه را نشان دادند که می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری بیشتر این مناطق از سامانه‌های میان‌مدت جوی باشد.

در وضعیت خشکسالی، هرچند بسیاری از ایستگاه‌ها همچنان چرخه سالانه ۳۶۵ روزه را حفظ کرده‌اند (مانند مراغه، مهاباد، ارومیه، بناب، سهند و تبریز)، اما تغییرات چشمگیری نیز مشاهده می‌شود. برای مثال، ایستگاه نقده با دوره تناوب ۳۳ روزه نشان‌دهنده کاهش شدید نقش چرخه سالانه و افزایش سهم نوسانات کوتاه‌مدت است. چنین الگویی بیانگر افزایش

اقلیمی استفاده شده است (جهانگیری و همکاران، ۲۰۲۴). با در دسترس بودن شاخص SPI می‌توان دوره‌های ترسالی و خشکسالی را تشخیص داد و با تحلیل طیفی وضعیت سیگنال‌های غالب در این سال‌ها را بدست آورد.

شاخص SPI توسط مک کی و همکارانش در سال ۱۹۹۳، به جهت بررسی وضعیت خشکسالی در منطقه کلرادو^۱ ارائه شد تا به وسیله آن بتواند کمبود بارش را طبق احتمال رخداد بارش برای دوره‌های زمانی مختلف (از ۳ تا ۴۸ ماه) برآورد کنند.

۳. نتایج و بحث

نمودار طیف‌نگار بیانگر رابطه توان یا مجذور دامنه فرکانس است. بالا بودن توان در یک فرکانس نشان می‌دهد که این فرکانس در سری زمانی موردنظر در بخش طیفی غالب است. قله‌ها (پیک‌ها) در طیف‌نگار معرف فرکانس‌هایی هستند که در سری مورد بررسی وجود دارند. عکس فرکانس، دوره تناوب است؛ یعنی فراوانی یک رخداد در یک بازه زمانی معین را نشان می‌دهد. در این پژوهش، چون داده‌ها در مقیاس روزانه هستند، فرکانس برحسب day-1 بوده و دوره تناوب بر حسب روز محاسبه می‌شود که به آن گاهی دوره بازگشت نیز گفته می‌شود.

جدول (۳) نشان‌دهنده دوره تناوب (فرکانس) غالب در سه وضعیت نرمال، خشکسالی و ترسالی برای ۱۱ ایستگاه منتخب در حوضه دریاچه ارومیه است. در وضعیت نرمال، تقریباً تمامی ایستگاه‌ها دارای دوره بازگشت غالب ۳۶۵ روزه هستند

به‌طور کلی می‌توان گفت که ایستگاه‌هایی مانند مراغه، ارومیه و تکاب در هر سه وضعیت از پایداری بالایی برخوردارند و چرخه سالانه بارش در آن‌ها غالب است؛ در حالی که ایستگاه‌هایی نظیر نقده، بناب و سهند در شرایط خاص (خشکسالی یا ترسالی) دچار تغییرات چشمگیر شده و از پایداری کمتری برخوردارند. این مسئله نقاط ضعف و آسیب‌پذیری این ایستگاه‌ها را نسبت به نوسانات اقلیمی نشان می‌دهد و می‌تواند مبنایی برای مدیریت هدفمند منابع آب و برنامه‌ریزی سازگاری با تغییر اقلیم در حوضه دریاچه ارومیه باشد. تحلیل آماری جدول ۳ با روش فوریه نشان داده است که در مناطق جنوب دریاچه (مثل مهاباد)، دوره بازگشت سالانه به‌عنوان سیگنال غالب، نقش تعیین‌کننده در شرایط بارشی دارد. در حالی که در مناطق شمالی و شرقی (مثل شبستر و عجب‌شیر)، چرخه‌های کوتاه‌مدت‌تر بیشتر مشاهده می‌شود که بیانگر فراوانی بیشتر رخداد‌های بارشی است. نتایج بر این موضوع تأکید می‌کنند که مدیریت منابع آب در حوضه دریاچه ارومیه باید متناسب با الگوی فرکانسی هر ایستگاه تنظیم شود. در ایستگاه‌هایی با چرخه‌های سالانه غالب، تأکید باید بر ذخیره‌سازی بلندمدت آب باشد، در حالی که در مناطقی با فرکانس‌های کوتاه‌تر، مدیریت رواناب و کنترل سیلاب‌های ناگهانی در اولویت قرار گیرد.

غیرقابل‌پیش‌بینی بودن بارش‌ها و چالش‌های جدی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی در این منطقه است. همچنین ایستگاه سراب با دوره بازگشت ۱۸۲.۵ روزه در خشکسالی نسبت به وضعیت نرمال تغییر چندانی نداشته و نوعی ثبات نسبی را نشان می‌دهد. در وضعیت ترسالی، تنوع قابل‌توجهی در فرکانس‌ها دیده می‌شود. برخی ایستگاه‌ها مانند مراغه، ارومیه، نقده، تبریز و تکاب همچنان چرخه سالانه ۳۶۵ روزه را حفظ کرده‌اند و بیانگر استمرار الگوی پایدار بارش در شرایط ترسالی هستند. با این حال، ایستگاه‌هایی مانند میاندوآب و مهاباد دوره تناوب ۱۸۲.۵ روزه را نشان دادند که حاکی از افزایش رخداد‌های میان‌مدت بارش در این مناطق است. ایستگاه سراب نیز با تناوب ۱۲۲ روزه بارش‌های فصلی‌تر و متناوب‌تری را تجربه کرده است. بیشترین تغییر در ایستگاه بناب رخ داده که با دوره تناوب بسیار کوتاه ۳.۶ روزه، نشانه‌ای از رخداد‌های پی‌درپی بارش در بازه‌های زمانی کوتاه دارد. چنین الگویی در ترسالی‌ها می‌تواند پتانسیل وقوع سیلاب‌های ناگهانی را به‌ویژه در مناطق پایین‌دست افزایش دهد. همچنین ایستگاه سهند با تناوب ۱۴ روزه در ترسالی، بیانگر الگوی بارشی با تکرار بسیار سریع‌تر است که اهمیت آن در مدیریت ریسک سیلاب‌های مکرر قابل توجه است.

جدول ۳. دوره بازگشت‌های ایستگاه‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر به تفکیک نرمال، ترسالی و خشکسالی (مرجع: یافته‌های پژوهش)

دوره بازگشت (روز)			نام ایستگاه	ردیف
ترسالی	خشکسالی	نرمال		
۳۶۱	۳۶۵	۳۶۵	بناب	۱
۱۸۲	۳۶۵	۳۶۵	مهاباد	۲
۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	مراغه	۳
۱۸۲.۵	۳۶۵	۳۶۵	میاندوآب	۴
۳۶۵	۳۳.۱۸	۳۶۵	نقده	۵
۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	ارومیه	۶
۱۴	۳۶۵	۱۸۲.۵	سهند	۷
۳۶۵	۳۶۵	۱۸۲.۵	سلماس	۸

۱۲۱.۶۶	۱۸۲.۵	۱۸۲.۵	سراب	۹
۳۶۵	۳۶۵	۱۸۲.۵	تبریز	۱۰
۳۶۵	۳۶۵	۳۶۵	تکاب	۱۱

بارش‌های متوالی در دوره‌های کوتاه‌مدت است که از منظر منابع آب می‌تواند تهدیدی جدی برای بروز سیلاب‌های مخرب باشد. در مقابل، ایستگاه میاندوآب تغییرات معتدل‌تری را تجربه کرده و تناوب بارش آن در ترسالی به ۱۸۲ روز رسیده است که نشان‌دهنده وجود چرخه‌های نیم‌سالی نسبتاً پایدار است.

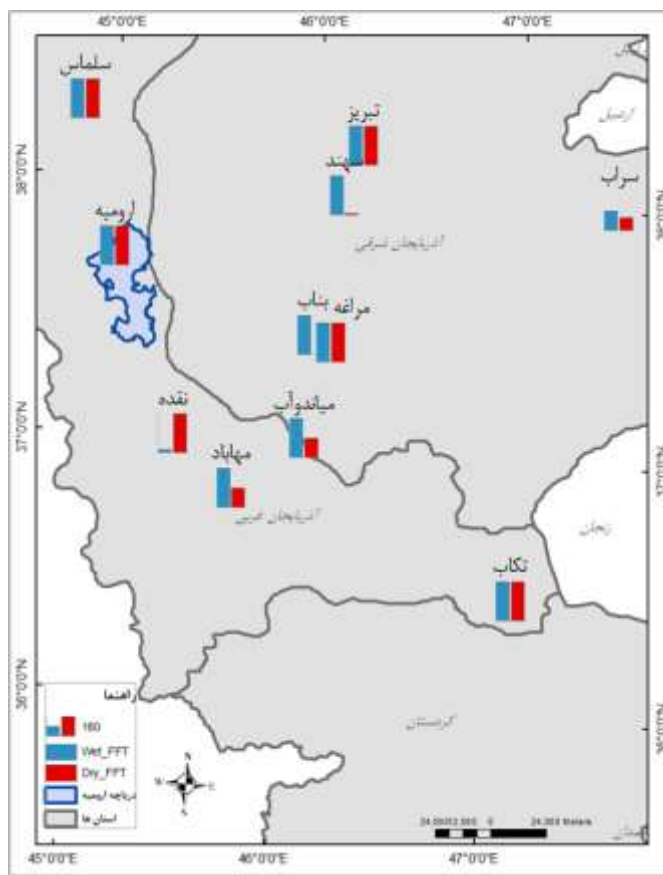
در غرب حوضه (مانند سلماس و مهاباد) پایداری نسبی بیشتری مشاهده می‌شود و بیشتر ایستگاه‌ها در تمام شرایط دارای چرخه‌های سالانه یا نیم‌سالی هستند. این امر حاکی از آن است که بارش در این بخش از حوضه نسبت به شرق و جنوب شرقی تغییرات کمتری دارد و از پیش‌بینی‌پذیری بالاتری برخوردار است.

به‌طور کلی، نتایج شکل (۲) نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی و غربی حوضه دارای الگوهای پایدار و قابل پیش‌بینی هستند، در حالی که شرق و جنوب شرقی حوضه (بستان‌آباد، سهند و نقده) نوسانات بارشی کوتاه‌مدت بیشتری را تجربه می‌کنند و از پتانسیل بالای وقوع رخداد‌های سیلابی و کاهش پیش‌بینی‌پذیری بارش برخوردارند. این موضوع می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی مدیریتی در حوضه باشد؛ به گونه‌ای که در مناطق پایدارتر بر بهینه‌سازی استفاده از منابع آب تأکید شود و در مناطق ناپایدارتر (شرق و جنوب‌شرق) راهکارهای کاهش خطر سیلاب و مدیریت بحران در اولویت قرار گیرد.

شکل (۲) مقایسه‌ای گرافیکی بین دوره‌های بازگشت غالب خشکسالی و ترسالی در ایستگاه‌های منتخب حوضه دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد. در مجموع، بخش زیادی از ایستگاه‌ها در شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی دارای چرخه سالانه ۳۶۵ روزه هستند (مانند ارومیه، مراغه، تبریز، سلماس و تکاب). این پایداری نشان‌دهنده وجود یک الگوی بارشی نسبتاً منظم در بخش‌های مرکزی و غربی حوضه است که می‌تواند شرایط مطلوبی را برای پیش‌بینی بارش و مدیریت منابع آب فراهم آورد.

با این حال، تفاوت‌های مکانی قابل توجهی نیز در حوضه مشاهده می‌شود. در شرق و شمال شرقی حوضه (مانند بستان‌آباد و سراب) تغییرات چشمگیری در تناوب بارش به‌ویژه در ترسالی دیده می‌شود. به طور خاص، ایستگاه بستان‌آباد دارای تناوب کوتاه ۴۵ روزه در ترسالی و ۱۸۲ روزه در خشکسالی است. این تغییر بیانگر حساسیت بالای این منطقه به عبور متوالی سامانه‌های بارشی و افزایش نوسانات کوتاه‌مدت است که می‌تواند خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی را افزایش دهد. همچنین در ایستگاه سراب، تناوب ترسالی به ۱۲۱ روز کاهش یافته که نشان‌دهنده افزایش نقش چرخه‌های میان‌مدت در بارش‌های منطقه است.

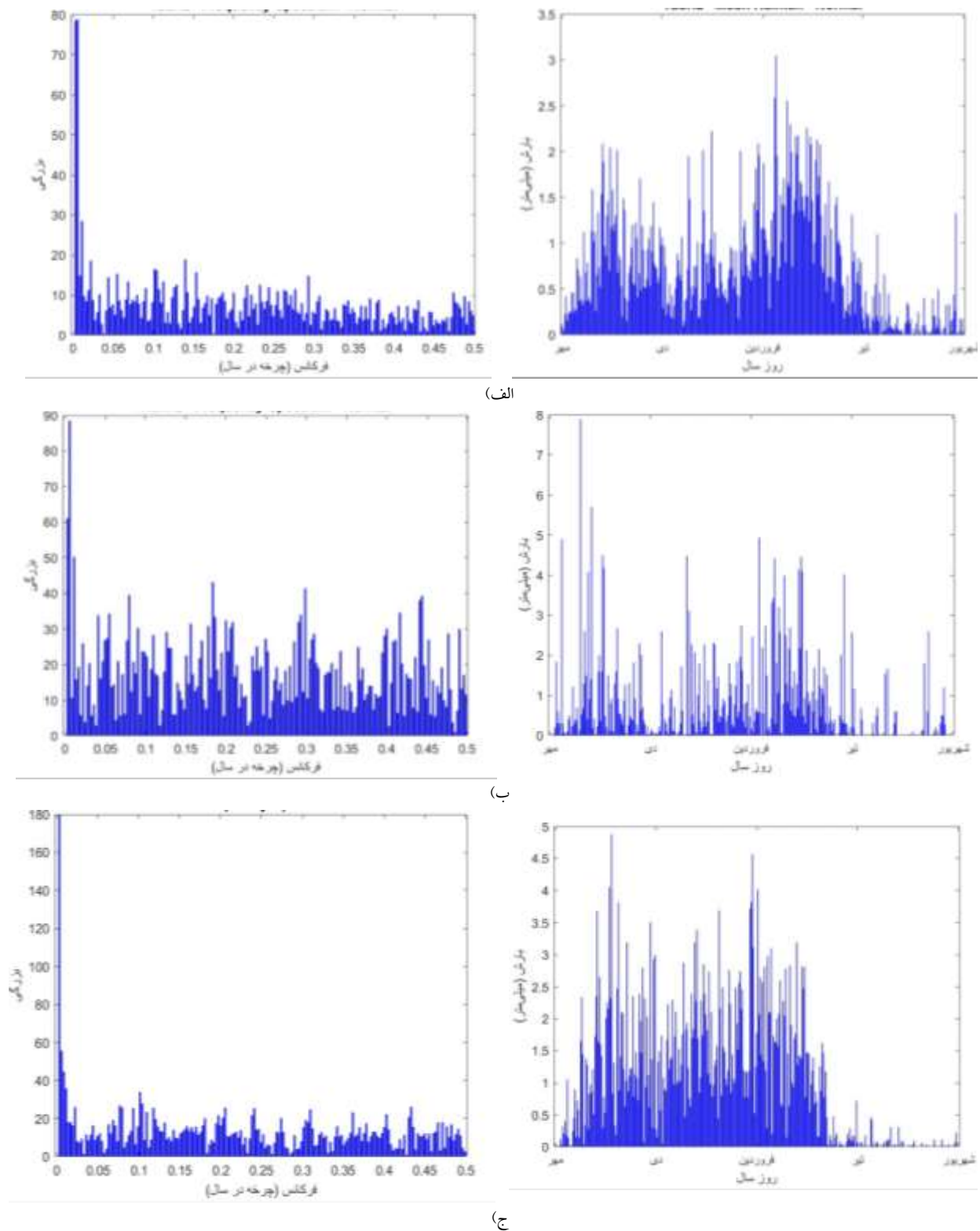
در جنوب و جنوب شرقی حوضه (مانند سهند، نقده و میاندوآب) نیز الگوهای متفاوتی دیده می‌شود. ایستگاه سهند در ترسالی تناوب بسیار کوتاه ۱۴ روزه و ایستگاه نقده تناوب ۳۳ روزه را نشان می‌دهند. چنین الگوهایی بیانگر وقوع



شکل ۲. دوره بازگشت ایستگاه‌های مورد مطالعه به تفکیک دوره‌های ترسالی و خشکسالی

در سال) و محور عمودی توان (دامنه طیفی) را نشان می‌دهد. بیشینه‌های موجود در نمودارها نمایانگر چرخه‌های زمانی تکرارشونده در بارش هستند که دوره تناوب آن‌ها از معکوس فرکانس محاسبه می‌شود.

نمودارهای شکل (۳) توزیع طیفی بارش روزانه را برای سه ایستگاه منتخب تبریز (شمال شرق)، کهریز (غرب) و مهاباد (جنوب) (که دارای پراکنندگی مناسب در حوضه آبریز هستند و به منظور بررسی جزئیات بیشتر انتخاب شدند) در دوره نرمال اقلیمی نمایش می‌دهند. محور افقی فرکانس (بر حسب سیکل



شکل ۳. مقادیر میانگین بارش دوره شمال و طیف فرکانس شمال برای ایستگاه‌های الف) تبریز، ب) کهریز، ج) مهاباد (یافته‌های پژوهش)

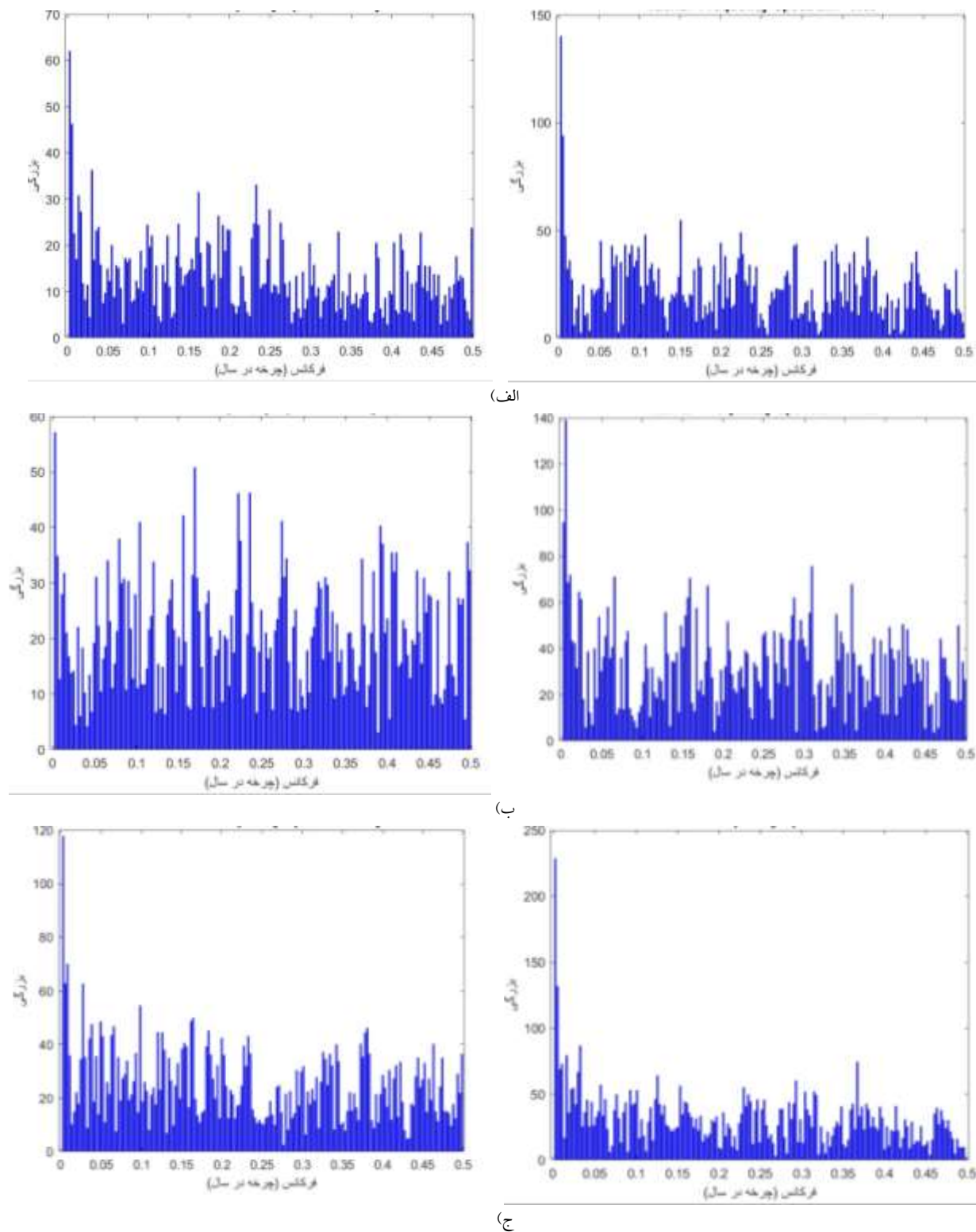
دامنه این فرکانس نسبت به سایر ایستگاه‌ها بالاتر است، که نشان می‌دهد مهاباد وابستگی شدیدی به بارش‌های سالانه و متمرکز در فصل سرد دارد. این تمرکز زمانی احتمالاً نتیجه شرایط اقلیمی نیمه‌خشک منطقه و نقش بارش‌های زمستانه است. پیک‌های فرعی در فرکانس‌های حدود ۰.۰۰۸ و ۰.۰۱ نیز وجود دارند (دوره‌های ۱۰۰ تا ۱۲۰ روزه)، که به بارش‌های میانه فصل یا نوسانات بارشی گذرا اشاره دارند، اما قدرت آن‌ها به مراتب کمتر از چرخه سالانه است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که در ایستگاه مهاباد، چرخه سالانه غالب‌ترین و پایدارترین سیگنال، در ایستگاه کهریز، چرخه شش‌ماهه نقش پررنگ‌تری دارد و احتمالاً معرف الگوی دو قله‌ای بارش (مثلاً پاییز و بهار) است و در ایستگاه تبریز، ترکیب چرخه‌های سالانه، شش‌ماهه و فصلی مشاهده می‌شود، که تنوع زمانی بارش در این ناحیه را تأیید می‌کند.

در تمامی ایستگاه‌ها، در انتهای محور فرکانسی (فرکانس‌های بالا معادل بازه‌های زمانی کوتاه‌تر از ۱۰ روز)، دامنه‌ها به شدت افت می‌کنند. این بیانگر چیره بودن گردش سالانه بر هر چرخه میان مدت و کوتاه مدت پایدار و سهم ناچیز بارش‌های ناشی از سامانه‌های نامنظم و روزانه دارد. در نهایت، این تحلیل نشان می‌دهد که موقعیت جغرافیایی هر ایستگاه، نقش مؤثری در نوع و قدرت سیگنال بارشی دارد. از نظر مدیریت منابع آب، این تفاوت‌ها به معنای نیاز به رویکردهای متفاوت در برنامه‌ریزی ذخیره‌سازی، بهره‌برداری و هشداردهی اقلیمی است.

مطابق شکل (۳)، ایستگاه تبریز دارای یک پیک واضح در فرکانس حدود ۰.۰۰۲۷ است که متناظر با چرخه سالانه (۳۶۵ روزه) است. پس از آن، دو قله فرعی در حدود فرکانس‌های ۰.۰۰۵۵ و ۰.۰۰۸ (به ترتیب متناظر با دوره‌های حدود ۱۸۰ روزه و ۱۲۰ روزه) دیده می‌شود. این مسئله نشان‌دهنده اهمیت ترکیبی چرخه‌های سالانه، نیم‌ساله و فصلی در رژیم بارشی تبریز است. قدرت غالب چرخه سالانه در این ایستگاه حاکی از آن است که بارش‌ها به‌طور منظم و متناوب حول تقویم بارشی سالانه رخ می‌دهند. دامنه نسبتاً بالا در این فرکانس بیانگر نقش پررنگ سامانه‌های فصلی و به‌ویژه زمستانه در تأمین بارش است.

در ایستگاه کهریز، واقع در بخش غربی حوضه، الگوی متفاوتی مشاهده می‌شود. بیشترین دامنه در فرکانس ۰.۰۰۵۵ سیکل/سال (معادل دوره شش‌ماهه) قرار دارد. این به آن معناست که بارش‌ها در این منطقه بیش از آن که بر چرخه سالانه متمرکز باشند، در دو بازه شش‌ماهه در سال تمرکز یافته‌اند. چرخه سالانه نیز با قدرتی کمتر، در رتبه دوم قرار دارد. این الگو ممکن است به دلیل اثرات موضعی ارتفاع، موقعیت توپوگرافی غرب دریاچه، و مسیر ورود سامانه‌های مدیترانه‌ای به حوضه باشد. فرکانس‌های میان‌مدت (فصلی یا ۳ تا ۴ ماهه) نیز در این ایستگاه با قدرت متوسط حضور دارند که نشانه‌ای از تنوع زمانی بارش در طول سال است.

در جنوب حوضه و در ایستگاه مهاباد، تحلیل طیفی نشان‌دهنده حضور بسیار قدرتمند چرخه سالانه است (فرکانس ۰.۰۰۲۷).



شکل ۴. مقادیر طیف بسامد خشک و تر برای ایستگاه‌های الف) تبریز، ب) کهریز، ج) مهاباد (یافته‌های پژوهش)

در شکل (۴)، تحلیل طیفی بارش روزانه برای ایستگاه‌های تبریز، کهریز و مهاباد به تفکیک دو وضعیت اقلیمی ترسالی و خشکسالی ارائه شده است. در دوره ترسالی، نمودار طیفی ایستگاه تبریز حاکی از یک پیک مشخص در فرکانس ۰.۰۰۲۷ سیکل در سال (۳۶۵ روز) است، که متناظر با چرخه سالانه بارش است. این پیک در مقایسه با نمودار خشکسالی، دامنه‌ی بالاتری دارد که نشان‌دهنده سهم بیشتر الگوی سالانه (بارش‌های زمستانه) در شرایط ترسالی است. به علاوه، در فرکانس‌های ۰.۰۰۵۵ (دوره شش ماهه) و ۰.۰۰۸ (دوره تقریبی ۱۲۰ روزه)، دامنه‌ها در دوره ترسالی قابل توجه هستند که بیانگر حضور هم‌زمان چرخه‌های میان‌مدت و بلندمدت در این شرایط است. به عبارت دیگر تداوم بارش‌ها در طول سال آبی را نشان می‌دهد. در مقابل، در دوره خشکسالی، اگرچه فرکانس غالب همچنان سالانه است، اما دامنه آن نسبت به حالت تر کاهش یافته است. که نشان می‌دهد کاهش سهم بارش‌های زمستانه در وقوع خشکسالی قابل ملاحظه می‌باشد. همچنین، حضور چند پیک نزدیک به یکدیگر در فرکانس‌های متوسط (۰.۰۰۵ تا ۰.۰۱) نشان‌دهنده افزایش آشفتگی بارش و احتمال وقوع رخداد‌های بارشی در بازه‌های کوتاه‌تر است. دامنه پایین‌تر در فرکانس غالب نیز به منزله کاهش سهم چرخه‌های پایدار در بارندگی کل سال در این وضعیت است. از منظر اقلیمی، این الگو بیانگر آن است که تبریز در شرایط ترسالی دارای الگوی بارش ساخت یافته‌تر و تحت تأثیر سامانه‌های با مقیاس وسیع‌تر (سالانه و نیم‌سالانه) است، اما در دوره خشکسالی، رخداد‌های بارشی به شدت پراکنده و نامنظم می‌شود.

در ایستگاه کهریز، وضعیت جالبی مشاهده می‌شود. در هر دو دوره ترسالی و خشکسالی، فرکانس غالب ۰.۰۰۵۵ (دوره بازگشت ۱۸۲ روزه، یا چرخه شش ماهه) باقی می‌ماند و نسبت به سایر فرکانس‌ها دارای دامنه قوی‌تری است. با این حال، در دوره تر، دامنه این فرکانس تقریباً دو برابر بیشتر از دوره خشک است، که بیانگر افزایش اهمیت چرخه شش ماهه در

تأمین بارش دوره تر است. به عبارت دیگر سهم بارش‌های پاییز و بهار در دوره ترسالی در بارش تجمعی سالانه افزایش یافته است. در دوره خشکسالی، توزیع دامنه‌ها در فرکانس‌های کوتاه‌مدت‌تر (حدود ۰.۰۱ تا ۰.۰۱۵) یکنواخت‌تر و بدون پیک شاخص است. این ویژگی معمولاً بیانگر بارش‌های کوتاه‌مدت، نامنظم و غیرساخت یافته است. از دیدگاه هواشناسی این وضعیت می‌تواند نشان‌دهنده تأثیرگذاری سامانه‌های محلی یا عدم نفوذ مؤثر سیستم‌های بارشی بزرگ‌مقیاس در دوره‌های خشکسالی باشد. مقایسه دو نمودار ایستگاه کهریز نشان می‌دهد که در دوره ترسالی، هم چرخه شش ماهه و هم چرخه‌های بلندمدت (سالانه و فصلی) دامنه بیشتری دارند، که نمایانگر نظم زمانی و توزیع بهتر بارش است. این ویژگی در مدیریت منابع آب، به ویژه در بخش کشاورزی و مخازن، قابل استفاده است. به طور خاص، سهم بالای چرخه‌های نیم‌سالانه در این منطقه می‌تواند به معنای توزیع دوبرخی بارش در سال برای مثال در پاییز و بهار باشد.

در جنوب حوضه، ایستگاه مهاباد دارای بارزترین رفتار سالانه است. در هر دو وضعیت خشکسالی و ترسالی، پیک غالب در فرکانس ۰.۰۰۲۷ (دوره سالانه) باقی می‌ماند، ولی دامنه آن در دوره ترسالی تقریباً دو برابر بیشتر است. این موضوع نشان می‌دهد که در مهاباد، بارش‌ها در هر دو شرایط به شدت تابع چرخه سالانه هستند، ولی در شرایط ترسالی، این چرخه قدرتمندتر و مؤثرتر است. در دوره خشکسالی، مشابه سایر ایستگاه‌ها، فرکانس‌های میان‌مدت (مثلاً حدود ۰.۰۰۸) دارای مقادیر یکنواخت‌تر و پیک‌های پراکنده هستند. این ویژگی نشان‌دهنده کاهش تمرکز بارش در یک بازه خاص زمانی و افزایش احتمال نوسانات کوتاه‌مدت یا بارش‌های غیرمنتظره است. در مجموع، تحلیل ایستگاه مهاباد نشان می‌دهد که این منطقه در شرایط تر، از چرخه بارشی بسیار ساخت یافته‌ای برخوردار است که بیشتر تحت تأثیر سامانه‌های فراگیر زمستانه قرار دارد. در شرایط خشک، افت دامنه فرکانس غالب، همراه با افزایش نوسانات کوتاه‌مدت، حاکی از شرایط بحرانی‌تر

به ترکیبی از چرخه‌های مختلف دارد. این تفاوت‌ها اهمیت موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی در شکل‌گیری رژیم بارشی حوضه را برجسته می‌کند.

نتایج حاصل از این پژوهش که مبتنی بر تحلیل طیفی سری‌های زمانی بارش در حوضه دریاچه ارومیه است، نشان می‌دهد که چرخه‌های غالب بارش در شرایط نرمال عمدتاً سالانه (۳۶۵ روزه) هستند. این یافته با نتایج باهوشی و شایان (۱۳۸۸) که از شاخص SPI برای تحلیل خشکسالی در همین حوضه استفاده کردند، همخوانی دارد. آن‌ها نیز به تداوم بیشتر چرخه‌های سالانه در مقایسه با دوره‌های خشک و تر اشاره کرده‌اند. با این حال، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در شرایط خشکسالی و ترسالی، برخی ایستگاه‌ها مانند نقده و بناب چرخه‌های کوتاه‌مدت ۳۳ روزه و ۳۰۶۱ روزه را تجربه می‌کنند که بیانگر تغییر رفتار بارش در این شرایط است. این موضوع با یافته‌های رضائی بنفشه و همکاران (۱۳۹۳) که به بررسی بارش‌های حدی در غرب و شمال غرب ایران پرداختند، مطابقت دارد. آن‌ها نیز اشاره کردند که تغییرات بارش‌های حدی تحت تأثیر نوسانات الگوهای جوی مانند NAO و ENSO است که می‌تواند منجر به افزایش ناپایداری و کاهش پیش‌بینی‌پذیری بارش شود.

از سوی دیگر، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در مناطق جنوبی حوضه (مانند مهاباد)، چرخه سالانه پایدارتر است، در حالی که در مناطق شمالی و شرقی (مانند تبریز و بناب)، چرخه‌های کوتاه‌مدت بیشتر مشاهده می‌شود. این یافته با تحقیق جلیلی (۱۳۸۹) که به تحلیل طیفی تراز آب دریاچه ارومیه پرداخت، همسو است. وی نیز به تفاوت‌های منطقه‌ای در رفتار هیدرو اقلیمی حوضه اشاره کرده و ارتباط آن با عوامل جغرافیایی و توپوگرافی را تأیید نموده است. علاوه بر این، دانشمند و محمودی (۱۳۹۵) در تحلیل طیفی خشکسالی‌های ایران به این نتیجه رسیدند که دوره‌های غالب بارش در شمال غرب کشور عمدتاً کوتاه‌مدت (۲ تا ۵ ساله) هستند که تا حدی

اقلیمی و نیاز به ذخیره‌سازی منابع آبی است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که در مهاباد، چرخه سالانه هم در خشکسالی و هم در ترسالی غالب‌ترین نقش را دارد، با دامنه بسیار بالاتر در دوره تر. در کهریز، چرخه شش‌ماهه غالب است و نقش کلیدی در هر دو دوره ایفا می‌کند، ولی تفاوت دامنه آن بین دو دوره مشهود است و در تبریز، یک الگوی ترکیبی دیده می‌شود؛ در دوره تر، چرخه سالانه غالب است ولی چرخه‌های میانه نیز نقش دارند؛ در دوره خشک، الگو پراکنده‌تر می‌شود.

به منظور مقایسه بهتر الگوهای بارشی سه ایستگاه تبریز، کهریز و مهاباد، نتایج تحلیل طیفی در شرایط مختلف (ترسالی، خشکسالی و نرمال) در شکل (۵) به صورت تجمیعی ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود:

- ایستگاه تبریز دارای الگویی ترکیبی است؛ در شرایط نرمال و ترسالی چرخه سالانه (فرکانس ۰.۰۰۲۷) غالب بوده و چرخه‌های میان‌مدت (شش‌ماهه و فصلی) نیز حضور پررنگی دارند. در شرایط خشکسالی این الگو به هم‌ریخته‌تر شده و پراکندگی بارش‌ها بیشتر است.
- ایستگاه کهریز بیشترین تمرکز در فرکانس شش‌ماهه (۰.۰۰۵۵) دارد. این موضوع در هر دو وضعیت ترسالی و خشکسالی پایدار است، ولی دامنه در ترسالی به‌طور چشمگیری بیشتر است. بنابراین، بارش این منطقه دو قله‌ای (پاییز و بهار) و ساخت یافته‌تر در دوره‌های ترسالی است.
- ایستگاه مهاباد در همه شرایط تحت سلطه چرخه سالانه است. این چرخه در ترسالی بسیار قدرتمندتر بوده و وابستگی شدید این ایستگاه به بارش‌های زمستانه را نشان می‌دهد. در خشکسالی، سهم نوسانات کوتاه‌مدت افزایش می‌یابد.

به‌طور کلی، مقایسه سه ایستگاه نشان می‌دهد که مهاباد بیشترین وابستگی را به چرخه سالانه، کهریز به چرخه نیم سالانه و تبریز

در بیشتر ایستگاه‌ها، فرکانس‌های بلندمدت مانند چرخه‌های سالانه و شش‌ماهه نقش غالب دارند، اما شدت و پایداری این چرخه‌ها در دوره‌های ترسالی، نرمال و خشکسالی متفاوت است. در مناطق جنوبی حوضه مانند مهاباد، بارش‌ها عمدتاً در قالب یک چرخه سالانه قوی ظاهر می‌شوند. این ویژگی در دوره ترسالی تقویت شده و به‌عنوان یک الگوی پایدار قابل‌اتکا در مدیریت آب محسوب می‌شود. در مناطق غربی مانند کهریز، چرخه‌های شش‌ماهه قدرت بیشتری دارند که احتمالاً به دلیل توزیع دوبخشی بارندگی در فصول سرد و گرم است. در شمال شرق حوضه (تبریز)، الگوهای بارش متنوع‌تر بوده و شامل چرخه‌های فصلی و میان‌مدت با دامنه‌های متوسط است که پیچیدگی بیشتری در پیش‌بینی و مدیریت منابع ایجاد می‌کند. در شرایط ترسالی، الگوی بارش همگن‌تر و ساخت یافته‌تر بوده، دامنه سیگنال‌ها در فرکانس‌های پایین‌تر (چرخه‌های بلندمدت) افزایش می‌یابد و سهم بیشتری در بارندگی کل سال دارد. برعکس، در دوره‌های خشکسالی، کاهش دامنه فرکانس‌های غالب و افزایش فرکانس‌های تصادفی کوتاه‌مدت نشان‌دهنده پراکندگی و ناپایداری الگوی بارشی است. این شرایط موجب کاهش کارایی سامانه‌های ذخیره‌سازی سنتی می‌شود و ضرورت بازطراحی الگوهای بهره‌برداری را برجسته می‌سازد.

منابع

- Ahmadi O, Alamdari P, Servati M, Khoshzaman T, Shahbaee kootenae A. Assessment and Analysis of Temperature and Precipitation Return Periods Using Spectral Analysis and its Effect on Land Management (A Case Study: Khodaafarin Area, East Azerbaijan). 2019. jwss; 23 (1):223-235. (In Persian)
- Amir Ahmadi A., Abbasnia M. (2022). Regionalization of Climate at Isfahan Province by Using New Statistical Techniques. Journal of Arid Regions

با نتایج این پژوهش در مورد چرخه‌های درون سالی همخوانی دارد.

در مورد دوره‌های بازگشت بارش‌های حدی، نتایج این تحقیق نشان داد که در شرایط ترسالی، برخی ایستگاه‌ها مانند بناب دوره بازگشت بسیار کوتاه (۳.۶۱ روز) دارند که می‌تواند نشان‌دهنده رخدادهای متوالی بارش باشد. این نتیجه با یافته‌های رزمی جانبار و طالش‌مکاییل (۱۳۹۱) که به بررسی دوره بازگشت بارش‌های ۲۴ ساعته در جنوب شرق دریاچه ارومیه پرداختند، قابل‌مقایسه است. آن‌ها نیز به وجود دوره‌های بازگشت کوتاه‌مدت در شرایط ترسالی اشاره کرده‌اند. باین‌حال، تفاوت اصلی این است که در تحقیق حاضر، دوره‌های بازگشت کوتاه‌مدت در مقیاس روزانه بررسی شده‌اند، درحالی‌که مطالعه مذکور بر بارش‌های حدی ۲۴ ساعته متمرکز بود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه باهدف بررسی تعیین فرکانس‌های غالب بارش روزانه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه از روش تحلیل طیفی استفاده شده است. به این منظور به بررسی و تحلیل طیفی الگوی بارش و فرکانس‌های آن در دوره‌های نرمال، ترسالی و خشکسالی در یک دوره حداقل بیست‌ساله در ۱۱ ایستگاه اطراف دریاچه ارومیه واقع در استان‌های آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی پرداخته شده است. نتایج نشان داد که تحلیل طیفی بارش روزانه می‌تواند تصویر دقیق‌تری از چرخه‌های زمانی غالب در مناطق مختلف حوضه آبریز دریاچه ارومیه ارائه دهد. همچنین الگوی بارش نه تنها تابع شرایط اقلیمی (تر، خشک یا نرمال) است، بلکه به شدت تحت‌تأثیر موقعیت جغرافیایی و ساختار توپوگرافی منطقه نیز قرار دارد.

تحلیل طیفی انجام‌شده بر داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های منتخب در حوضه دریاچه ارومیه (تبریز، مهاباد و کهریز) نشان داد که شناخت چرخه‌های زمانی بارندگی نقش مهمی در درک رفتار اقلیمی منطقه و طراحی راهکارهای مدیریتی دارد.

- Indices in Mazandaran Province. *Nivar*, 43 (107), 79-91. (In Persian)
12. Mirmousavi, S. H., Dostkamyani, M., & Sotoudeh, F. (2016). Investigation and Analysis of the Spatial Pattern of Decadal Changes in Heavy and Very Heavy Rainfall in Iran. *Geography and Environmental Planning Journal*, (3), 85-87. (In Persian)
 13. Moghbel, M., Davoodi, M., Naeistani, A., & Taghavi, F. (2011). Detection of Precipitation Regime Changes in Iran in Recent Decades. *Nivar*, 35 (73), 55-66. (In Persian)
 14. National Drought and Crisis Management Center. (2018). Drought Analysis Report of Lake Urmia Basin. Tehran: Ministry of Energy. (In Persian)
 15. Razmi Janayar, T., & Talshmi Kael, L. (2012). Investigation of Probability Distribution and Return Period of Maximum 24-Hour Precipitation and Peak Discharge in the Southeastern Region of Lake Urmia. The First National Conference on Tourism and Ecotourism of Iran, Hamadan, Iran. (In Persian)
 16. Rezaei Banafsheh, M., Najafi, M. S., Naghizadeh, H., & Abkharabat, S. (2014). Analysis of Extreme Precipitation Behavior in Relation to Factors Affecting Precipitation in the West and Northwest of Iran. *Geography and Development*, 4 (1), 1-20. (In Persian)
 17. Taghavi, F., Naeistani, A., Mohammadi, H., & Rostami Jalilian, S. (2012). Application of Wavelet Analysis in Identifying Precipitation Behavior in Western Regions of Iran. *Iranian Journal of Geophysics*, *6*(2), 1-15. (In Persian)
 18. Water Research Institute. (2017). Hydro-Climatic Analysis of Lake Urmia Basin. Tehran: Ministry of Energy. (In Persian)
 19. West Azerbaijan Provincial Management and Planning Organization. (2020). Comprehensive Plan for Water Resources Management of Lake Urmia Basin. Urmia: West Azerbaijan Governorate Publications. (In Persian)
 20. Geographic Studies. 1(1): 53-68. (In Persian)
 3. Bahoushi A., Shayan S. (2010). Analyzing the intensity, duration, frequency, and extent of droughts in the Lake Urmia basin using the standard precipitation index. National Conference on Water Crisis in Agriculture and Natural Resources, Tehran. (In Persian)
 4. Alijani, B., Bayat, A., Dostkamyani, M., & Bolyani, Y. (2011). Spectral Analysis of Iran's Annual Precipitation Time Series. *Journal of Physical Geography Research*, 43(75), 1-18. (In Persian)
 5. Asgari, A., & Rahimzadeh, F. (2003). The Prominence of Precipitation Fluctuations in the Country Relative to its Trend and Shift. In The Third Regional Conference on Climate Change. (In Persian)
 6. Daneshmand, H., & Mahmoudi, P. (2016). Spectral Analysis of Droughts in Iran. *Journal of Climate Research*, 7(25), 1-16. (In Persian)
 7. Fanai, Z. (2017). Investigating the Effects of Lake Urmia Drought on the Vulnerability of the Natural and Human Environment of the Surrounding Area. *Environmental and Trans-Sectoral Development*, (2), 1-16. (In Persian)
 8. Iran Meteorological Organization. (2016). Daily Precipitation Statistics of Lake Urmia Basin Stations. Tehran: Iran Meteorological Organization Publications. (In Persian)
 9. Iran Water Resources Management Company, West Azerbaijan Regional Water Authority. (2019). Report on the Status of Water Resources in Lake Urmia Basin. Urmia: West Azerbaijan Regional Water Authority Publications. (In Persian)
 10. Jalili, S. (2010). Spectral Analysis of Lake Urmia Water Level Time Series and the Impact of Climatic and Hydrological Variables on It (Doctoral dissertation). Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (In Persian)
 11. Karimi, V., & Akbari Nodehi, D. (2019). Comparison of Meteorological Drought

- Management Science & Engineering, 18, 85-97.
27. Jou, P. H., & Mirhashemi, S. H. (2023). Frequency analysis of extreme daily rainfall over an arid zone of Iran using Fourier series method. *Applied Water Science*, 13(1), 16.
 28. Koutsoyiannis, D., Kozonis, D., & Manetas, A. (1998). A mathematical framework for studying rainfall intensity-duration-frequency relationships. *Journal of Hydrology*, 206, 118-135.
 29. Mckee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. R. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179-184). Anaheim, CA: American Meteorological Society.
 30. Moustakis, Y., Onof, C. J., & Paschalis, A. (2020). Atmospheric convection, dynamics and topography shape the scaling pattern of hourly rainfall extremes with temperature globally. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 11.
 31. Nazeri Tahroudi, M. (2025). Comprehensive global assessment of precipitation trend and pattern variability considering their distribution dynamics. *Scientific Reports*, 15(1), 22458.
 32. Thomas, E., Joseph, I., & Abraham, N. (2023). Wavelet analysis of annual rainfall over Kerala and sunspot number. *New Astronomy*, 98, 101944.
 33. Zakaria, S. M., Huma, S., Hafeez, M., & Nadeem, S. (2022). Identification of precipitation zones in Pakistan by Global Wavelet Power Spectrum. *Journal of Earth and Space Science*, 9(3), 124-138.
 20. Zolghadr, M., Sanaee, B., & Ghaffarian, P. (2013). Investigating the Relationship Between Dry and Wet Periods in Lake Urmia Basin with the Teleconnection Pattern of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Oceanography*, 4 (13), 23-34. (In Persian)
 21. Ahmadi, O., Alamdari, P., Servati, M., Khoshzaman, T., & Shahbaee Kootenaee, A. (2019). Assessment and Analysis of Temperature and Precipitation Return Periods Using Spectral Analysis and its Effect on Land Management (A Case Study: Khodaafarin Area, East Azerbaijan). *Journal of Water and Soil Science*, 23, 223-235.
 22. Akter, N., Islam, M. R., Karim, M. A., Miah, M. G., & Rahman, M. M. (2023). Spatiotemporal rainfall variability and its relationship to flash flood risk in Northeastern Sylhet Haor of Bangladesh. *Journal of Water and Climate Change*, 14(11), 3985-3999.
 23. Ddou, R., Hanchane, M., Krakauer, N. Y., Kessabi, R., Obda, K., Souab, M., & Achir, I. E. (2023). Wavelet Analysis for Studying Rainfall Variability and Regionalizing Data: An Applied Study of the Moulouya Watershed in Morocco. *Applied Sciences*, 13, 3841.
 24. Deng, Y., Wang, X., Ruan, H., Lin, J., Chen, X., Chen, Y., ... & Deng, H. (2024). The magnitude and frequency of detected precipitation determine the accuracy performance of precipitation data sets in the high mountains of Asia. *Scientific Reports*, 14(1), 17251.
 25. Ilyés, C., Mohammed, M. A., Szabó, N. P., & Szűcs, P. (2025). A hybrid approach to exploring the spatiotemporal patterns of precipitation in Sudan: Insights from neural network clustering and Fourier-wavelet transform analysis. *Water Cycle*.
 26. Jahangiri, E., Motamedvaziri, B., & Kiadaliri, H. (2024). Investigating the Impact of Climate Change on Drought with SPI and SPEI Indices (Case Study of Karun 3 Watershed). *Iranian Journal of Watershed*