

تحلیل فراوانی سیلاب با استفاده از رویکرد قانون توانی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دز)

فرشاد احمدی^{۱*}، فریدون رادمنش^۲، غلام علی پرهام^۳ و رسول میرعباسی نجف‌آبادی^۴

چکیده

در مطالعه حاضر، تحلیل فراوانی سیلاب حوضه آبریز دز در دوره آماری ۹۱-۱۳۳۵ با استفاده از رویکردهای قانون توانی (PL) و توزیع‌های متداول آماری انجام شد. ابتدا سری‌های جزیی سیلاب با استفاده از قانون توانی با فواصل زمانی ۷، ۱۴، ۳۰ و ۶۰ روزه استخراج و با سری حداکثر سالانه مقایسه شد. نتایج نشان داد که سری حداکثر سالانه، برای تحلیل فراوانی سیلاب حوضه آبریز دز مناسب نیست و سری جزیی ۳۰ روزه حاصل از قانون توانی، مطابقت بهتری با وضعیت جریان این حوضه دارد. استقلال و ایستایی سری جزیی سیلاب ۳۰ روزه با استفاده از آزمون والد-ولفوویتز (W-W) بررسی و استقلال سری موردنظر تأیید شد. در مرحله بعد، توزیع توانی و توزیع‌های متداول آماری بر داده‌های سیلاب حوضه آبریز دز برازش داده و عملکرد هر توزیع با استفاده از آماره‌های جذر میانگین مربعات نرمال شده (NRMSE) و معیار نش-ساتکلیف (NS) بررسی شد. مقدار آماره‌های NS و NRMSE برای توزیع توانی در ایستگاه تنگ پنج بختیاری به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۲/۷۵ محاسبه شد که نسبت به سایر توزیع‌ها از عملکرد بسیار بهتری برخوردار بوده و در ایستگاه‌های تنگ پنج سزار (NS=۰/۹۶ و NRMSE=۵/۱۲) و تله زنگ (NS=۰/۹۸ و NRMSE=۳/۴۰) نیز با اختلاف بسیار اندکی در رتبه دوم بهترین توزیع قرار گرفت. با توجه به اینکه عملکرد توزیع توانی در برآورد سیلاب حوضه آبریز دز بسیار مناسب و محاسبه ضرایب و کاربرد آن نسبت به توزیع‌های احتمالاتی آسان است، می‌تواند به‌عنوان توزیع برتر حوضه آبریز دز پیشنهاد شود.

واژه‌های کلیدی: ایستایی، سیل، سری جزیی، فرکتال.

ارجاع: احمدی ف. رادمنش ف. پرهام غ. ع. و میرعباسی نجف‌آبادی ر. ۱۳۹۷. تحلیل فراوانی سیلاب با استفاده از رویکرد قانون توانی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دز). مجله پژوهش آب ایران. ۲۹: ۱۱۱-۱۲۰.

۱- دانشجوی دکترای مهندسی منابع آب، دانشکده علوم مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۲- دانشیار گروه مهندسی منابع آب، دانشکده علوم مهندسی آب، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۳- استاد گروه آمار، دانشکده علوم ریاضی و کامپیوتر، دانشگاه شهید چمران اهواز.

۴- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

* نویسنده مسئول: farshad.paper@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۱۰

مقدمه

سیل و خشکسالی، از جمله پدیده‌های هیدرولوژیکی هستند که تأثیرات بسیار عمیقی بر جوامع بشری دارند و زیان‌های اقتصادی ناشی از آنها در گوشه و کنار جهان با توسعه اقتصادی، تغییر کاربری اراضی، به ویژه در سیلاب-دشت‌ها و افزایش جمعیت روندی رو به رشد داشته است (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱). سیلاب‌ها در هر سال در سرتاسر دنیا، جان بسیاری را گرفته است و خسارت‌های اقتصادی زیادی به بار می‌آورند. پژوهش‌های صورت گرفته در مورد حوادث طبیعی (بین سال‌های ۹۲-۱۹۶۲) نشان می‌دهد که سیلاب‌ها بیشترین تلفات جانی (حدود ۲۶ درصد) را به همراه داشته و به لحاظ وسعت تأثیر بعد از خشکسالی، دومین بلای طبیعی محسوب می‌شود (نوری و همکاران، ۱۳۹۳). تحلیل فراوانی، یکی از روش‌های متداول برای برآورد سیلاب طرح است که در صورت وجود آمار کافی، به طور وسیع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه، به تعدادی از مطالعات انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود. کومار و چاترجی (۲۰۰۵) با استفاده از آزمون‌های ناهماهنگی و ناهمگنی، نمودارهای نسبت گشتاورهای خطی و آزمون نکویی برازش به تحلیل فراوانی سیلاب منطقه‌ای پرداختند. نتایج نشان داد که تابع توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته، بهترین برازش را با آمار سیلاب حوضه آبخیز براهماپوترای^۱ شمالی هند دارد. کومار و همکاران (۲۰۱۴) توزیع پیرسون تیپ سه را به‌عنوان توزیع برتر در تحلیل فراوانی سیلاب حوضه آبریز رودخانه گوداواری^۲ هند گزارش کردند. می و همکاران (۲۰۱۵) تغییرات جریان و فراوانی سیلاب‌های حوضه آبریز رودخانه کلانگ^۳ را تحت تأثیر تغییر اقلیم بررسی کردند و بیان داشتند که فراوانی سیلاب‌ها در دوره آماری پیش‌بینی شده از نظر تعداد و حجم نسبت به دوره تاریخی کاهش می‌یابد.

امروزه ثابت شده است که در بسیاری از پدیده‌های پیچیده، بین بزرگی پدیده و فراوانی آن رابطه توانی وجود دارد. از جمله این پدیده‌ها، می‌توان به زلزله (اکی، ۱۹۸۱)، آتش‌سوزی جنگل‌ها (مالمود و همکاران، ۲۰۰۵) و زمین لغزش (گوزتی و همکاران، ۲۰۰۲) اشاره کرد.

توزیع توانی برگرفته از تئوری فراکتال است. عبارت فراکتال در سال ۱۹۷۵ از کلمه Fractus به معنی "شکسته شده"^۴ گرفته شد (جیانویتوری و همکاران، ۲۰۰۱). تورکات و گرین (۱۹۹۳) توزیع توانی و شش توزیع فراوانی متداول را برای تحلیل فراوانی سیلاب ایستگاه‌های تحت نظارت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده^۵ به کار گرفته و نشان دادند که توزیع توانی و لوگ گامبل برازش خوبی به داده‌های سیلاب به خصوص مقادیر حدی بزرگ دارد. مالمود و تورکات (۲۰۰۶) در پژوهشی نشان دادند که بین بزرگی سیلاب و دوره بازگشت آن رابطه توانی برقرار بوده است و سری جزئی ۳۰ روزه به‌عنوان سری مناسب سیلاب برای تحلیل فراوانی انتخاب شد. کیدسون و همکاران (۲۰۰۶) کاربرد توزیع توانی برای سیلاب‌های تایلد را بررسی و برتری توزیع توانی در مقایسه با توزیع‌های متداول را تأیید کردند. باورز و همکاران (۲۰۱۲) برای تحلیل فراوانی سیلاب فصلی از توزیع‌های احتمالاتی متعددی استفاده کردند که از بین آنها، توزیع توانی و توزیع لوگ نرمال بهترین عملکرد را داشته‌اند. نوری و همکاران (۱۳۹۳) فراوانی سیلاب‌های دو ایستگاه هیدرومتری پیردان و پیشین واقع در رودخانه سرباز استان سیستان و بلوچستان را بررسی و عملکرد توزیع توانی را در تحلیل فراوانی سیلاب این رودخانه بسیار مناسب گزارش کردند.

با توجه به مطالعات پیشین، مشاهده می‌شود که وجود رفتار فراکتالی در اکثر پدیده‌های علوم زمین (از جمله بارش - رواناب و سیلاب) پذیرفته شده و به علت دارا بودن پشتوانه فیزیکی قوی، از این روش برای مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی استفاده می‌شود. قانون توانی نیز برگرفته از تئوری فراکتال است و از این‌رو می‌تواند روش مناسبی برای برآورد سیلاب طرح باشد. در روش سری حداکثر سالانه، به ازای هر سال (تقویمی یا آبی) یک مقدار حداکثر استخراج می‌شود؛ بنابراین در این روش از تعدادی از وقایع حدی روی داده طی یک سال، تنها یک مقدار انتخاب و سایر مقادیر حذف می‌شوند (وایت، ۲۰۰۷). حسن این روش، این است که داده‌های اخذ شده از یکدیگر مستقل هستند. این روش محدودیت‌هایی نیز دارد. از جمله اینکه در سال‌های پر آبی (سیلابی) مقادیری

1- Brahmaputra

2- Godavari

3- Klang River Basin

4- Broken

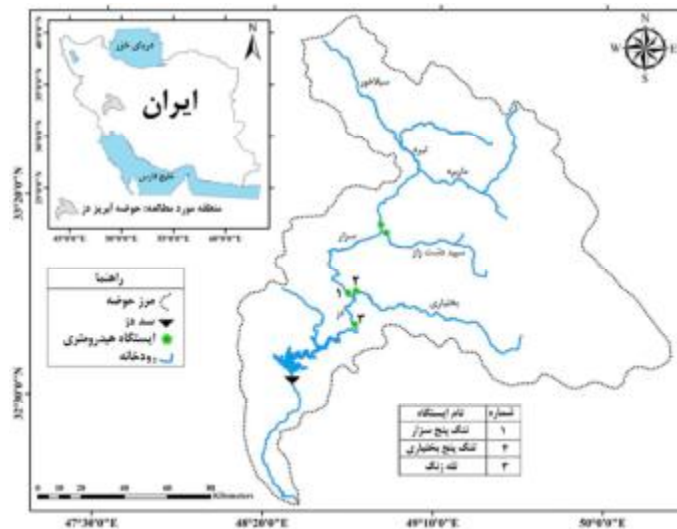
5- United States Geological Survey

مواد و روش‌ها

داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

شکل ۱ موقعیت حوضه دز را در ایران نشان می‌دهد. حوضه دز از لحاظ موقعیت جغرافیایی بین ۴۸ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۵۰ درجه ۲۵ دقیقه طول شرقی و ۳۱ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۴ درجه ۳۰ دقیقه عرض شمالی محدود است. مساحت کل حوضه بالغ بر ۲۱۷۲۰ کیلومترمربع و متوسط ارتفاع حوضه حدود ۱۶۰۰ متر است. محدوده مورد مطالعه در این پژوهش حوضه آبریز دز در بالادست سد دز که مساحت آن حدود ۱۷۳۶۵ کیلومترمربع است. همان‌گونه که شکل ۱ نشان داده شده است؛ جهت جریان آب در حوضه آبریز دز از سمت شمال به جنوب است. در این مطالعه، سه ایستگاه هیدرومتری تنگ پنج سزار، تنگ پنج بختیاری و تله زنگ به دلیل دارا بودن آمار طولانی مدت و مناسب در دوره آماری ۹۱-۱۳۳۵ برای انجام تحلیل فراوانی سیلاب انتخاب شدند.

که در مرتبه دوم و سوم به لحاظ بزرگی واقع می‌شوند، احتمال شرکت در سری زمانی حداکثر سالانه را از دست می‌دهند. از طرفی دیگر، در سال‌های خشک، مقادیر حداکثری که اتفاق می‌افتد که از مقادیر مذکور به مراتب کمتر هستند؛ بنابراین تطابق سری زمانی حداکثر سالانه با واقعیت مناسب نیست و این‌گونه انتخاب ممکن است موجب نادیده انگاشتن الگوی واقعی در مقادیر ثبت شده شود. در روشی دیگر از سری زمانی جزئی (یا سری زمانی مقادیر بالاتر از حد آستانه) استفاده می‌شود. در این روش نمونه‌گیری، آستانه معینی از دبی در نظر گرفته شده و تمام دبی‌هایی که بیشتر از آستانه قرار دارند، مورد توجه قرار می‌گیرند. در این مطالعه، برای انتخاب سری جزئی سیلاب از قانون توانی کمک گرفته شده است؛ بنابراین، هدف کلی در این پژوهش، استفاده از قانون توانی در الف) انتخاب سری جزئی سیلاب حوضه آبریز دز و ب) تحلیل فراوانی سیلاب است.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های منتخب در حوضه آبریز دز

منحنی توانی به سری‌های سیلاب به دست می‌آید. بر اساس رابطه (۱) عامل فراوانی سیلاب که با عنوان نسبت دو سیلاب با فاصله دوره بازگشت ۱۰ سال قابل تعریف است، از معادله زیر محاسبه می‌شود (مالمود و توکارت، ۲۰۰۶):

$$F = \frac{Q_{10}}{Q_1} = \frac{Q_{100}}{Q_{10}} = constant \quad (2)$$

مقدار ثابت فوق، تابع اقلیم منطقه و مقدار آن در مناطق خشک بزرگتر است. رفتار فرکتالی آستانه‌های مختلف

قانون توانی

بر اساس تئوری فراکتال برای دنباله انتهایی یا داده‌های حدی رابطه توانی برقرار است (مالمود و توکارت، ۲۰۰۶). این معادله برای پدیده سیلاب به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_T = cT^a \quad (1)$$

که در آن، Q_T دبی سیلاب با دوره بازگشت T ، c و a ضرایب ثابت هستند که با استفاده از برازش یک

قبل و ۳۰ داده بعد از سیلاب انتخاب شده حذف شد و دوباره در سری زمانی رواناب باقیمانده دومین سیلاب بزرگ (به عنوان دومین عدد در سری جزئی سیلاب) انتخاب و ۳۰ داده قبل و ۳۰ داده بعد از آن حذف و به همین ترتیب به تعداد سال‌های آماری سیلاب‌های بزرگ با حداقل فاصله زمانی ۳۰ روز انتخاب شد. در این روش، دوره بازگشت داده‌های سری جزئی، مشابه داده‌های حداکثر سیلاب سالانه محاسبه شد. این روند استخراج سری‌های جزئی برای فاصله زمانی ۷، ۱۴ و ۶۰ روز نیز تکرار می‌شود. سری جزئی سیلاب انتخاب شده باید شرط استقلال داده‌ها را نیز داشته باشد. در این مطالعه، استقلال و ایستایی سری‌های جزئی استخراج شده با استفاده از آزمون W^{-1} (W) بررسی شد (حامد و راو، ۱۹۹۹). برای انتخاب بهترین سری جزئی، به آنها رابطه توانی (۱) را برازش داده و مقدار توان آنها (a) محاسبه می‌شود. بر اساس رابطه (۴) هر کدام از سری‌های جزئی که مقدار پارامتر a در آن نزدیک به $1/q_D$ باشد، به عنوان سری جزئی مناسب‌تر انتخاب می‌شود (نوری و همکاران، ۱۳۹۳).

روش متداول تحلیل فراوانی سیلاب

در روش متداول برآورد سیلاب طرح، ابتدا داده‌های حداکثر سیلاب سالانه یا سری جزئی استخراج و سپس توزیع‌های نرمال (NOR)، لوگ نرمال (LN)، پیرسون تیپ سه (P3)، نمایی (EXP)، گاما (GAM)، توزیع مقادیر حدی تعمیم یافته (GEV)، ناکاگامی^۲ (NAK)، رایلی^۳ (RAY)، لجستیک (LOG)، لجستک تعمیم یافته (GLOG)، پارتوی تعمیم یافته (GPA) و ویبول (WEI) برازش داده می‌شود. پس از انتخاب توزیع آماری برتر، چندک‌های سیلاب به ازای دوره بازگشت مورد نظر برآورد می‌شود. در روش متداول، برآورد سیلاب طرح به روش تحلیل فراوانی، برآورد پارامترهای توزیع احتمالاتی از اهمیت خاصی برخوردار است. زمانی که طول نمونه آماری کم باشد یا احتمال وجود داده‌های پرت در نمونه آماری وجود داشته باشد، در این صورت روش گشتاورهای خطی از روش‌های پیشین من جمله روش متداول

سری زمانی در یک مقیاس، با استفاده از تابع توزیع احتمال تجربی قابل توصیف است. اگر در آستانه‌های بالا، دنباله توزیع احتمالاتی سری زمانی مورد بررسی از رابطه توانی زیر پیروی کند، می‌توان چنین نتیجه گرفت که سری مورد بررسی از رفتار فرکتالی تبعیت می‌کند (نوری و همکاران، ۱۳۹۳).

$$P_r(X > x) \propto x^{-q_D} \quad (3)$$

با مقایسه رابطه (۱) و رابطه توانی (۳) می‌توان نتیجه گرفت:

$$a = \frac{1}{q_D} \quad (4)$$

فرمول‌بندی سیلاب‌ها امری پیچیده و مشکل است؛ به همین علت، معمولاً از سری‌های حداکثر سالانه در تحلیل فراوانی سیلاب استفاده می‌شود. در سری‌های حداکثر سالانه، در هر سال فقط جریان اوج مربوط به آن سال در نظر گرفته می‌شود. استفاده از سری‌های حداکثر، ممکن است باعث کاهش اطلاعات شود؛ برای مثال ممکن است دومین یا سومین دبی اوج در یک سال، بزرگ‌تر از حداکثر جریان در سال‌های دیگر باشد که از آنها صرف‌نظر شده است. از طرف دیگر، جریان‌های حداکثر سالانه در سال‌های خشک، ممکن است خیلی کوچک باشند و به کار بردن این داده‌ها، به‌طور معنی‌داری نتایج تحلیل مقادیر حدی را دچار خطا کند (نوری و همکاران، ۱۳۹۳). این مشکلات وقتی که از سری‌های مقادیر جزئی یا اوج‌های بیشتر از یک حد آستانه استفاده شود، برطرف می‌شود. یکی از مشکلات اصلی کاربرد سری‌های جزئی، تعیین حد آستانه است. چون حد آستانه معیار مشخصی نداشته و طوری تعریف می‌شود که استقلال داده‌ها حفظ شود (آداموفسکی، ۲۰۰۰). مالمود و توکارت (۲۰۰۶). سری جزئی سیلاب را طوری تعیین کردند که اولاً فاصله زمانی رخداد سیلاب‌ها بیش از یک مقدار مشخص (مثلاً ۳۰ روز) و همچنین تعداد سیلاب‌های انتخابی برابر تعداد سال‌های آماری باشد. استخراج سری جزئی سیلاب با حداقل فاصله زمانی ۳۰ روز به شرح زیر است: ابتدا در سری زمانی رواناب ثبت شده (که در آن توالی زمانی رخداد رواناب حفظ شده است) بزرگ‌ترین سیلاب به‌عنوان اولین عدد در سری جزئی سیلاب انتخاب و سپس در سری زمانی رواناب باقیمانده ۳۰ داده

1- Wald-Wolfowitz

2- Nakagami

3- Rayleigh

مورد مطالعه ارائه شده است. با توجه به این شکل، مشاهده می‌شود که تابع احتمالی در قسمت انتهایی از یک تابع توانی تبعیت می‌کند؛ به عبارت دیگر، در سیستم مختصات لگاریتمی قسمت انتهایی به صورت خط راست است که این امر تأییدکننده وجود رفتار فراکتالی در داده‌های جریان رودخانه حوضه آبریز دز است.

در شکل ۲ توان رابطه توانی محاسبه شده (q_D) برای هر ایستگاه به صورت مجزا ارائه شده است. هرچه مقدار q_D در محل ایستگاه موردنظر کوچک‌تر باشد، تغییرات جریان در آن ایستگاه بیشتر خواهد بود (لابات و همکاران، ۲۰۰۲). با توجه به مقادیر q_D محاسبه شده برای ایستگاه‌های مورد بررسی حوضه آبریز دز، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که جریان در ایستگاه تنگ پنج بختیاری کمترین تغییرات را نسبت به ایستگاه‌های دیگر داشته است. در مطالعاتی نظیر تسیر و همکاران (۱۹۹۶) و پاندی و همکاران (۱۹۹۸) مقدار q_D برای ایستگاه‌های مورد بررسی از ۳/۲ تا ۳/۴ نیز محاسبه شده است.

در این مطالعه، از روش مالمود و تورکات (۲۰۰۶) برای استخراج سری‌های جزئی سیلاب استفاده شد. در این روش تعداد داده‌های سیلاب در سری جزئی برابر با تعداد سال‌های آماری بوده و حداقل فاصله زمانی بین سیلاب‌ها ۳۰ روز انتخاب شد. برای بررسی صحت انتخاب فاصله زمانی ۳۰ روز، سری جزئی سیلاب برای فواصل زمانی ۷، ۱۴ و ۶۰ روز نیز استخراج شد. شکل ۳ سری‌های جزئی استخراج شده و سری حداکثر سالانه حوضه آبریز دز را در مختصات لگاریتمی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که به ازای دوره‌های بازگشت کوچک‌تر، سری حداکثر سالانه مقادیر کوچک‌تری را نسبت به سری‌های جزئی به دست می‌دهد. با توجه به اینکه در سری حداکثر سالانه در هر سال، یک عدد به‌عنوان سیلاب انتخاب می‌شود، این امکان وجود دارد که سال موردنظر در دوران خشکی باشد یا در سال‌های قبل یا بعد، تعداد سیلاب‌های بیشتری به وقوع پیوسته، اما در سری حداکثر سالانه امکان انتخاب آنها وجود نداشته باشد. بنابراین می‌توان چنین انتظار داشت که به ازای دوره‌های بازگشت کوچک‌تر، سیلاب‌های کوچک‌تری نیز به وقوع پیوسته باشد. یک مقایسه ساده بین سری حداکثر سالانه و سری‌های جزئی استخراج شده به روشی نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره‌های بازگشت کم

گشتاورها و روش حداکثر درست‌نمایی، عملکرد بهتری دارد (هاسکینگ و والیس، ۱۹۹۳).

پس از برازش توزیع‌های آماری بر سری داده‌ها، می‌بایست نکویی برازش هر توزیع توسط آزمون کلموگروف-اسمیرنوف بررسی شود. در صورتی که برازش مدل‌ها توسط آزمون کلموگروف-اسمیرنوف در سطح احتمال ۵٪ مورد تأیید واقع شود، توزیع احتمالاتی موردنظر پذیرفته می‌شود. پس از کنترل آماری نکویی برازش و تعیین توزیع‌های مورد قبول، برای انتخاب بهترین مدل برازشی، جذر میانگین مربعات نرمال شده^۱ (NRMSE) (معادله (۹)) و معیار نش-ساتکلیف^۲ (معادله (۱۰)) محاسبه می‌شود. هر کدام از توزیع‌های برازشی که بیشترین مقدار معیار نش-ساتکلیف (NS) و کمترین NRMSE را داشته باشند، به‌عنوان توزیع مناسب برای تخمین چندک‌های سیلاب برگزیده می‌شود.

$$NRMSE = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}}{O_{\max} - O_{\min}} \quad (5)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

که در معادلات فوق، n تعداد داده‌ها، O_i مقدار نمونه مشاهده شده، O_{\max} و O_{\min} به ترتیب حداکثر و حداقل نمونه‌های مشاهده شده، \bar{O} میانگین مقادیر نمونه و S_i مقدار خروجی تابع توزیع مورد آزمون برای مقدار احتمال تجربی هر مقدار نمونه است.

نتایج و بحث

استخراج سری‌های جزئی سیلاب با استفاده از قانون توانی

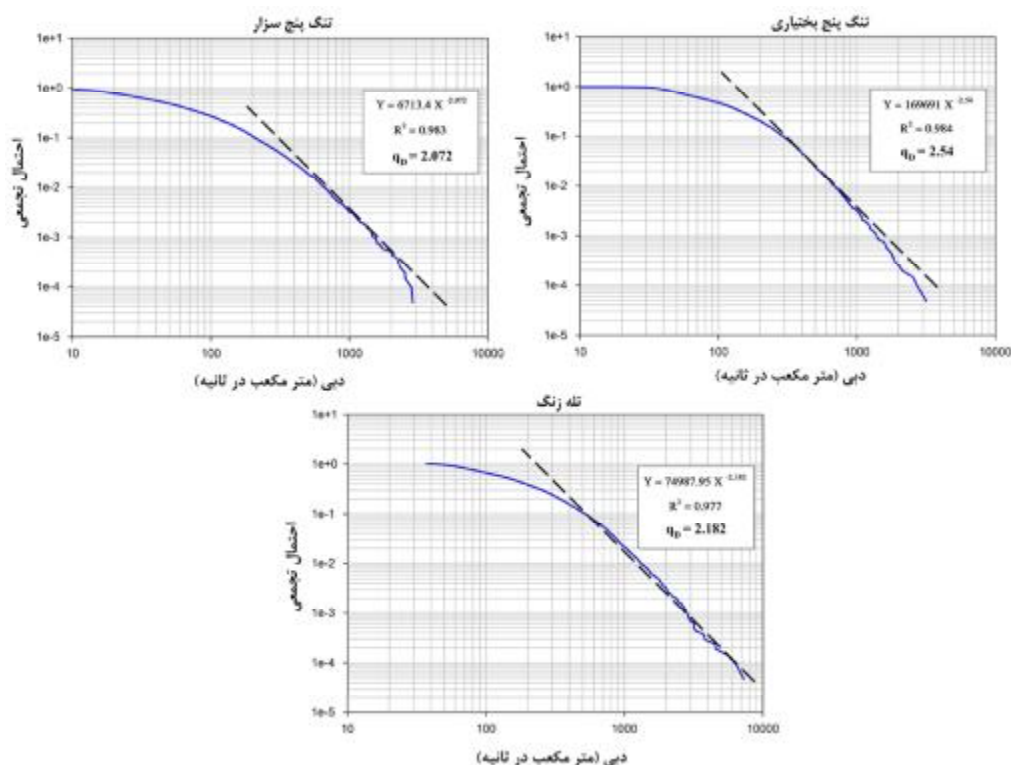
برای مطالعه ویژگی‌های فراکتالی، تابع احتمال تجربی تجاوز از حد یک آستانه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگر قسمت انتهایی تابع احتمال تجاوز در سیستم مختصات لگاریتمی خطی باشد، می‌توان چنین استنباط کرد که سری مورد بررسی از رفتار فراکتالی تبعیت می‌کند (نوری و همکاران، ۱۳۹۳؛ مالمود و توکارت، ۲۰۰۶). در شکل ۲ تابع احتمال تجربی برای ایستگاه‌های

1- Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)

2- Nash-Sutcliffe

براساس نتایج ارائه شده در جدول ۱، مقدار پارامتر $1/q_D$ در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه اختلاف ناچیزی با سری جزئی استخراج شده ۳۰ روزه دارد؛ بنابراین در این مطالعه با توجه به پیشنهاد مالمود و توکارت (۲۰۰۶) و نیز نتایج به دست آمده، انتخاب سری جزئی ۳۰ روزه برای تحلیل فراوانی سیلاب حوضه آبریز دز صحیح‌تر است. از جمله مشکلات اصلی کاربرد سری‌های جزئی، حفظ استقلال سری‌های استخراج شده است (آداموفسکی، ۲۰۰۰). در این مطالعه برای بررسی استقلال داده‌های سری‌های جزئی سیلاب از آزمون W-W در سطح معنی‌داری ۵ درصد استفاده شد. نتایج حاصله در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج نشان داد که مقدار آماره آزمون W-W در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه کمتر از مقدار بحرانی در سطح معنی‌داری ۵ درصد ($Z=1.96$) و این امر تأییدکننده استقلال سری‌های جزئی سیلاب حوضه آبریز دز است.

با کاهش حداقل فاصله زمانی بین سیلاب‌ها، بزرگی سیلاب افزایش می‌یابد؛ چون در این حالت احتمال حذف سیلاب‌های بزرگ کاهش یافته است. جدول ۱ نیز ضرایب رابطه توانی و مقدار ضریب تبیین هر رابطه را برای سایر سری‌های استخراج شده نشان می‌دهد. با توجه به ضریب تبیین ارائه شده در این جدول مشاهده می‌شود که رابطه توانی برازش بسیار خوبی با سری‌های جزئی دارد؛ اما دقت برازش در سری‌های حداکثر سالانه چندان مناسب نیست. همچنین، براساس نتایج ارائه شده در جدول ۱، مشاهده می‌شود که توان توزیع احتمالاتی در سری‌های جزئی نزدیک به هم است و می‌توان سری‌های استخراج شده را تقریباً با هم برابر دانست. براساس معادله (۴) هر کدام از سری‌های جزئی که توان a آن نزدیک به $1/q_D$ باشد، به‌عنوان سری جزئی برتر شناخته می‌شود (مالمود و توکارت، ۲۰۰۶). با ضرایب ارائه شده در جدول ۱ می‌توان دبی سیلاب را به ازای دوره‌های بازگشت مختلف حساب کرد.



شکل ۲- منحنی احتمال تجمعی جریان حوضه آبریز دز در محل ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۱- نتایج آزمون ایستایی W-W و ضرایب رابطه توانی برای سری‌های جزئی و حداکثر سالانه

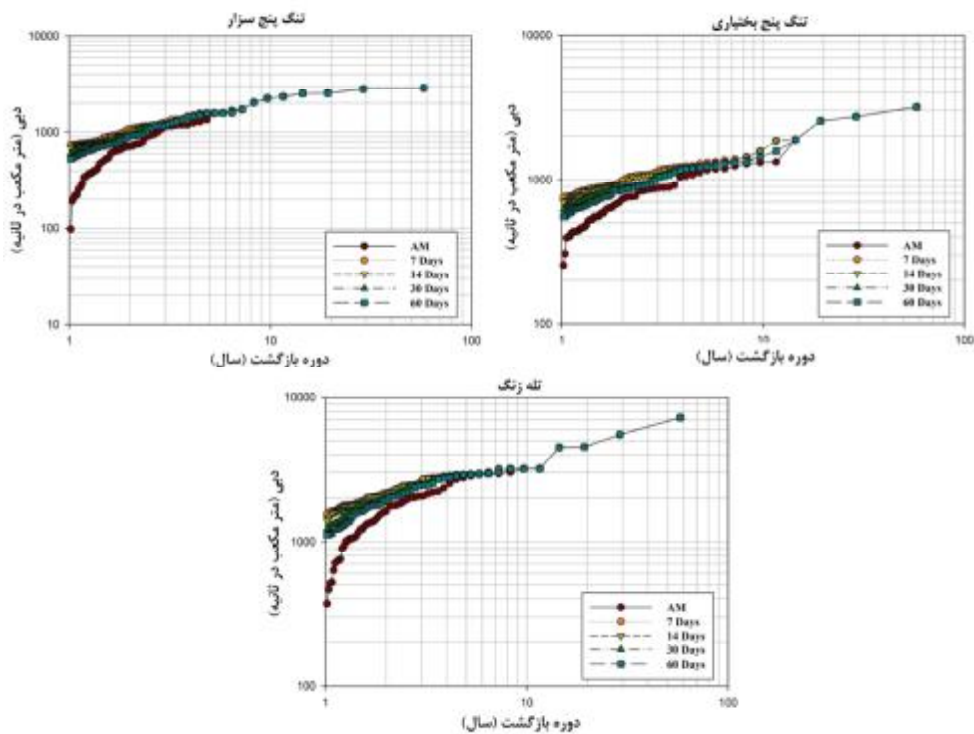
سری‌های سیلاب						ایستگاه
سری جزئی ۶۰	سری جزئی ۳۰	سری جزئی ۱۴	سری جزئی ۷	سری حداکثر	پارامتر	
روزه	روزه	روزه	روزه	سالانه		
۲/۰۷۲	۲/۰۷۲	۲/۰۷۲	۲/۰۷۲	۲/۰۷۲	q_D	تنگ پنج سزار
-۰/۴۸۲	-۰/۴۸۲	-۰/۴۸۲	-۰/۴۸۲	-۰/۴۸۲	$1/q_D$	
۱/۵۰۵	-۰/۸۱۰	۱/۰۵۱	۱/۵۴۰	۱/۶۱۰	W-W	
۲/۵۴۰	۲/۵۴۰	۲/۵۴۰	۲/۵۴۰	۲/۵۴۰	q_D	تنگ پنج بختیاری
-۰/۳۹۳	-۰/۳۹۳	-۰/۳۹۳	-۰/۳۹۳	-۰/۳۹۳	$1/q_D$	
-۰/۲۵۱	-۰/۰۲۱	-۰/۱۱۰	-۰/۸۲۰	-۰/۰۶۱	W-W	
۲/۱۸۲	۲/۱۸۲	۲/۱۸۲	۲/۱۸۲	۲/۱۸۲	q_D	تله زنگ
-۰/۴۵۸	-۰/۴۵۸	-۰/۴۵۸	-۰/۴۵۸	-۰/۴۵۸	$1/q_D$	
-۰/۱۹۱	-۰/۲۷۴	-۰/۰۵۱	-۱/۰۲۱	۰/۷۱	W-W	

تحلیل فراوانی سیلاب حوضه آبریز دز

پس از تأیید استقلال و ایستایی سری‌های جزئی سیلاب ۳۰ روزه حوضه آبریز دز، از قانون توانی (PL) و توزیع‌های RAY, NAK, GEV, GAM, EXP, P3, LN, NOR, LOG, GLOG, GPA و WEI برای انجام تحلیل فراوانی سیلاب بهره گرفته شد. برای برازش توزیع‌های احتمالاتی به سری‌های جزئی سیلاب ۳۰ روزه حوضه آبریز دز، ابتدا گشتاورهای خطی برای سری‌های استخراجی محاسبه و سپس با برابر قرار دادن آن‌ها با گشتاورهای خطی توزیع‌های احتمالاتی، ضرایب توزیع‌های موردنظر برآورد شد. در ابتدا باید نکویی برازش توزیع‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف از نظر آماری تأیید شود، سپس با استفاده از آماره‌های جذر میانگین مربعات نرمال شود و معیار نش-سانکلیف میزان دقت و کارایی توزیع‌های آماری در مدل کردن سری جزئی ۳۰ روزه سیلاب بررسی و در هر ایستگاه بهترین توزیع برای برآورد چندک‌های سیلاب انتخاب شود. نتایج حاصل از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف (K-S) در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به این جدول، مشاهده می‌شود که آزمون K-S نکویی برازش توزیع‌های احتمالاتی مورد استفاده برای تحلیل فراوانی سیلاب حوضه آبریز دز را در سطح معنی‌داری ۵ درصد مورد تأیید قرار می‌دهد.

پس از این مرحله باید دقت و عملکرد توزیع‌های احتمالاتی مورد استفاده بررسی شود. با توجه به جدول ۳، مشاهده می‌شود که توزیع آماری برتر برای ایستگاه تنگ پنج سزار توزیع GEV به دست آمد؛ چرا که بیشترین NS و کمترین مقدار NRMSE را داشته است. در رتبه دوم نیز توزیع توانی (PL) با اختلاف اندک قرار می‌گیرد. برای ایستگاه تنگ پنج بختیاری توزیع توانی (PL) بهترین عملکرد را داشته است و مقادیر آماره‌های NS و NRMSE به ترتیب برابر با ۰/۹۹۱ و ۲/۷۵ محاسبه شد. بعد از توزیع توانی، توزیع GEV بهترین عملکرد را در برآورد مقادیر سیلاب ایستگاه تنگ پنج بختیاری داشته است. در محل ایستگاه تله زنگ توزیع GEV از بالاترین دقت و کمترین خطا در برآورد جریان سیلابی برخوردار بوده و بعد از آن توزیع توانی مناسب‌ترین عملکرد را داشته است.

از دیگر معیارهای قابل قبول توزیع‌های آماری در تحلیل فراوانی جریان‌های سیلابی، ارائه نکردن مقادیر منفی به ازای دوره‌های بازگشت کوچک ($T < 2$) است. در این پژوهش، مقادیر چندک‌ها به ازای دوره بازگشت یک سال با استفاده از توزیع آماری منتخب در هر ایستگاه محاسبه شد که مقادیر منفی در هیچ‌یک از توزیع‌های به کار رفته مشاهده نشد؛ بنابراین در مرحله بعد، چندک‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال توسط توزیع‌های منتخب در هر ایستگاه محاسبه و نتایج حاصل، در جدول ۴ ارائه شد.



شکل ۳- سری های جزیی و حداکثر سالانه حوضه آبریز دز در مختصات لگاریتمی

جدول ۳- مقادیر آماره K-S, NS, NRMSE برای توزیع های آماری برازش داده شده بر سری های جزیی سیلاب ۳۰ روزه حوضه آبریز دز

توزیع آماری	ایستگاه			تنگ پنج بختیاری			تنگ پنج سزار		
	NRMSE	NS	K-S	NRMSE	NS	K-S	NRMSE	NS	K-S
NOR	۹/۰۲	۰/۹۰	۰/۱۵	۱۲/۰۲	۰/۸۲	۰/۲۰	۱۰/۳۷	۰/۸۷	۰/۱۷
LN	۳/۹۱	۰/۹۸	۰/۱۱	۶/۶۹	۰/۹۴	۰/۱۵	۶/۷۵	۰/۹۴	۰/۱۴
P3	۷/۸۳	۰/۸۵	۰/۱۸	۸/۶۵	۰/۸۸	۰/۲۷	۹/۹۸	۰/۸۹	۰/۱۸
EXP	۱۹/۹۲	۰/۵۲	۰/۴۱	۲۰/۹۳	۰/۴۷	۰/۴۴	۱۸/۰۲	۰/۶۱	۰/۴۱
GAM	۵/۳۵	۰/۹۶	۰/۱۴	۸/۴۲	۰/۹۱	۰/۲۰	۷/۸۸	۰/۹۲	۰/۱۶
GEV	۳/۳۱	۰/۹۸	۰/۰۶	۳/۰۰	۰/۹۸	۰/۱۵	۴/۵۴	۰/۹۷	۰/۱۱
LOG	۴/۹۴	۰/۹۷	۰/۱۴	۷/۱۲	۰/۹۴	۰/۲۱	۷/۶۷	۰/۹۳	۰/۱۸
GLOG	۳/۵۰	۰/۹۵	۰/۰۹	۴/۶۱	۰/۹۷	۰/۱۳	۵/۹۰	۰/۹۵	۰/۱۲
RAY	۸/۷۴	۰/۹۰	۰/۲۰	۱۱/۱۹	۰/۸۵	۰/۲۴	۸/۳۸	۰/۹۱	۰/۱۹
NAK	۷/۶۷	۰/۹۳	۰/۱۹	۱۰/۸۶	۰/۸۶	۰/۳۶	۹/۴۱	۰/۸۹	۰/۲۴
GPA	۱۶/۶۵	۰/۶۷	۰/۳۱	۱۷/۶۹	۰/۶۲	۰/۲۸	۱۳/۰۰	۰/۷۹	۰/۲۷
WEI	۸/۰۱	۰/۹۲	۰/۱۱	۱۰/۹۱	۰/۸۵	۰/۱۹	۸/۷۶	۰/۹۰	۰/۱۵
PL	۳/۴۰	۰/۹۸	۰/۰۸	۲/۷۵	۰/۹۹	۰/۱۱	۵/۱۲	۰/۹۶	۰/۱۲

جدول ۴- مقادیر چندک های برآورد شده سری جزیی سیلاب ۳۰ روزه حوضه آبریز دز

ایستگاه	توزیع آماری منتخب	دوره بازگشت				
		۱۰۰	۵۰	۲۰	۱۰	۵
تنگ پنج سزار	GEV	۱۱۱۵/۷۰	۱۱۰۸/۰۲	۱۰۸۹/۵۵	۱۰۶۴/۰۳	۱۰۱۹/۰۶
تنگ پنج بختیاری	PL	۴۱۸۶/۹۲	۳۱۶۴/۳۰	۲۱۸۵/۳۰	۱۶۵۱/۵۶	۱۲۴۸/۱۸
تله زنگ	GEV	۳۰۳۱/۹۵	۲۹۴۲/۲۷	۲۷۸۴/۹۶	۲۶۲۵/۱۶	۲۴۱۲/۲۶

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای انجام تحلیل فراوانی سیلاب حوضه آبریز دز علاوه بر روش‌های متداول از قانون توانی نیز بهره گرفته شد. ابتدا سری حداکثر سالانه با سری‌های جزئی حاصل از قانون توانی، برای انتخاب سری مناسب، جهت انجام تحلیل فراوانی سیلاب مقایسه شد. نتایج نشان داد که سری‌های حداکثر سالانه در دوره‌های بازگشت کوچک‌تر مقادیر کمتری را برای سیلاب ایستگاه‌های مورد مطالعه برآورد کردند؛ اما کاربرد سری‌های جزئی استخراج شده با استفاده از قانون توانی، به مشکل موجود در سری حداکثر سالانه فائق آمد. براساس نتایج به دست آمده سری جزئی ۳۰ روزه حاصل از قانون توانی، بیشترین مطابقت را با داده‌های جریان رودخانه دز داشت؛ در نتیجه به‌عنوان سری مناسب برای انجام تحلیل فراوانی انتخاب شد. پس از تأیید استقلال و ایستایی سری‌های جزئی سیلاب ۳۰ روزه حوضه آبریز دز، تحلیل فراوانی با استفاده از ۱۱ تابع توزیع مرسوم و تابع توانی انجام شد. نتایج حاصل از آزمون K-S و آماره‌های NS و NRMSE نشان داد که در محل ایستگاه تنگ پنج بختیاری قانون توانی بهترین عملکرد را نسبت به توزیع‌های متداول داشته است. در ایستگاه‌های تنگ پنج سزار و تله زنگ نیز توزیع GEV بالاترین دقت و کمترین خطا را در برآورد جریان سیلابی به خود اختصاص داد. پس از انتخاب توزیع‌های آماری مناسب، چندک‌های سیلاب با دوره بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال در هر ایستگاه محاسبه شد. با توجه به مقادیر چندک‌های محاسبه شده مشاهده شد که ایستگاه تنگ پنج بختیاری نسبت به وقوع سیل حساسیت بیشتری داشته است و با افزایش دوره بازگشت، مقدار سیلاب به شدت در این ایستگاه افزایش می‌یابد؛ به‌عبارت دیگر در حوضه منتهی به ایستگاه‌های تنگ پنج بختیاری نیاز بیشتری به توسعه سیستم‌های هشدار و اجرای برنامه‌های مهار سیلاب احساس می‌شود.

منابع

- نوری م. ح. دانکوع. و شهرکی م. ۱۳۹۳. کاربرد قانون توانی در تحلیل فراوانی سیلاب رودخانه سرباز. نشریه دانش آب و خاک. ۲۴(۴): ۴۵-۵۹.
- Adamowski K. 2000. Regional analysis of annual maximum and partial duration flood data by nonparametric and Lmoment methods. *Journal of Hydrology*. 229(3): 219-231.
- Aki K. 1981. A probabilistic synthesis of precursory phenomena. *Earthquake Prediction*. 1(1): 566-574.
- Bowers M. C. Tung W. W. and Gao J. B. 2012. On the distributions of seasonal river flows: Lognormal or power law? *Water Resources Research*. 48(1): 9685-9698.
- Gianvittorio J. P. Rahmat-Samii Y. and Romeu J. 2001. Fractal FSS: Various self-similar geometries used for dual-band and dual-polarized FSS. *Antenna and Propagation Society*. 3: 8-13.
- Guzzetti F. Malamud B. D. Turcotte D. L. and Reichenbach P. 2002. Power-law correlations of landslide areas in central Italy. *Earth and Planetary Sciences Letters*. 195(1): 169-183.
- Hamed K. and Rao A. R. 1999. *Flood Frequency Analysis*. CRC press. 260 p.
- Hosking J. R. M. and Wallis J. R. 1993. Some statistics useful in regional frequency analysis. *Water Resources Research*. 36(1): 953-963.
- Kidson R. Richards K. S. Carling P. A. Cello G. and Malamud B. D. 2006. Power-law extreme flood frequency. *Geological Society*. 261(1): 141-153.
- Kumar R. and Chatterjee C. 2005. Regional flood frequency analysis using L-Moments for North Brahmaputra region of India. *Journal of Hydrologic Engineering*. 10(1): 1-7.
- Labat D. Mangin A. and Ababou R. 2002. Rainfall-runoff relations for karstic springs: Multifractal analysis. *Journal of Hydrology*. 256(3): 176-195.
- Malamud B. D. and Turcotte D. L. 2006. The applicability of power-law frequency statistics to floods. *Journal of Hydrology*. 322(1): 160-180.
- Malamud B. D. Millington J. D. and Perry G. L. W. 2005. Characterizing wildfire regimes in the USA. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 102(1): 4694-4699.
- May R. Zainol Z. and Shukor M. F. B. 2015. Flood frequency analysis due to climate change condition at the Upper Klang River basin. *International Symposium on Flood Research and Management*, Springer, Singapore.
- Pandey G. Lovejoy S. and Schertzer D. 1998. Multifractal analysis of daily river flows including extremes for basins of five to two million square kilometers, one day to 75 years. *Journal of Hydrology*. 208(1): 62-81.
- Tessier Y. Lovejoy S. Hubert P. Schertzer D. and Pecknold S. 1996. Multifractal

- analysis and modeling of rainfall and river flows and scaling, casual transfer function. *Journal of Geographic Research*. 101(1): 26427-26440.
17. Turcotte D. L. and Greene L. 1993. A scale-invariant approach to flood-frequency analysis. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*. 7(1): 33-40.
 18. White C. J. 2007. *The Use of Joint Probability Analysis to Predict Flood Frequency in Estuaries and Tidal Rivers*. University of Southampton. 360 p.
 19. Zhang Q. Chen Y. D. Chen X. and Li J. 2011. Copula-based analysis of hydrological extremes and implications of hydrological behaviors in the Pearl River basin, China. *Journal of Hydrologic Engineering*. 16(7): 598-607.