

تحلیل طیف توانی (اسپکترومی) برای بررسی مقیاس پذیری بارش ماهانه ۳۳ ایستگاه باران سنجی ایران

مسعود غریب دوست^{۱*}، محمد علی قربانی^۲، محمد حسن فاضلی فرد^۳ و اسماعیل اسدی^۴

چکیده

بارش و مقیاس‌های زمانی مختلف آن از پارامترهای مهم در پژوهش‌های منابع آب به شمار می‌روند. دارا بودن مقیاس‌های زمانی مختلف با ماهیت فرکتالی قابل بیان است. یکی از ابزارهای استاندارد در بررسی فرکتالی فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده از تحلیل طیف توانی یا اسپکترومی است. در این روش، طیف توانی با انتقال مشاهدات از فضای زمان به فضای بسامد محاسبه شده و در صورتی که تمام یا بخشی از طیف، از توابع توانی پیروی کنند، داده‌ها در بازه مورد نظر دارای خصوصیات فرکتالی خواهند بود. در این پژوهش طیف توانی حاکم بر بارش‌های ماهانه ۳۳ ایستگاه باران سنجی در ایران بررسی و رژیم‌های مقیاس گذاری به همراه مقادیر توان طیفی برای هر ایستگاه مشخص گردید. نتایج نشان داد که ۸۱ درصد ایستگاه‌ها در دوره تناوب کمتر از یک سال دارای خاصیت مقیاس‌پذیری و ماهیت فرکتالی قوی هستند. همچنین علاوه بر رژیم مقیاس‌گذاری اول، ۱۷ ایستگاه دارای رژیم مقیاس‌گذاری دوم و ۳ ایستگاه دارای رژیم مقیاس‌گذاری سوم هستند. هیچ‌یک از ایستگاه‌ها در رژیم مقیاس‌گذاری دوم خود دارای ماهیت فرکتالی نبوده و فقط یک ایستگاه در رژیم مقیاس‌گذاری سوم خود ماهیت فرکتالی نشان داد.

واژه‌های کلیدی: ایران، بارش ماهانه، طیف توانی، فرکتال، مقیاس زمانی.

ارجاع: غریب دوست م.، قربانی م.، ع. فاضلی فرد م.، ح. و اسدی ا. ۱۳۹۴. تحلیل طیف توانی (اسپکترومی) برای بررسی مقیاس‌پذیری بارش ماهانه ۳۳ ایستگاه باران سنجی ایران. مجله پژوهش آب ایران. ۱۶: ۴۹-۵۸.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

۳- کارشناس ارشد مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

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

* نویسنده مسئول: Gharibdoust.m@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۱۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۰۴

مقدمه

بارش یکی از مهم ترین عوامل تأثیرگذار در مطالعه فرایند بارش- رواناب، برآورد اوج سیلابها، کنترل سیلاب، محاسبات بیلان، مدل سازی انتقال آلودگیها، طراحی فاضلابهای شهری و مدیریت منابع آب است. بارش می تواند مقیاس دقیقه ای تا مقیاس های بزرگ تری مانند ماهانه و سالانه را داشته باشد. از آنجایی که با کوچک شدن مقیاس اندازه گیری دقت شبیه سازی به طور عمده افزایش می یابد، از این رو لازم است داده های ثبت شده با مقیاس بزرگ تر را با مدل های ریاضی به مقیاس های کوچک تر تبدیل کرد. قابلیت تبدیل از مقیاسی به مقیاس دیگر به نوعی با ماهیت فرکتالی تعبیر می شود. فرکتال ساختاری است هندسی که تحت هر درجه بزرگنمایی، خود متشابه می باشد. به عبارت دیگر هر بخشی از آن یک کپی از ساختار کل است و الگویی مشابه در اجزا مختلف این اشیا به چشم می خورد و از نظر مهندسی آب می تواند به صورت هندسی و یا آماری استفاده شود مانند مطالعه شاخه های فرعی حوضه و تعمیم آن به کل حوضه، مطالعه رسوب رودخانه ها و یا مطالعه آماری سری های زمانی هیدرولوژیکی. ماهیت فرکتالی در سری زمانی به مفهوم داشتن خاصیت مقیاس گذاری است. به عبارت دیگر می توان از مقادیر ماهانه به روزانه رسید به شرطی که داده ها خاصیت مقیاس گذاری یا فرکتال داشته باشند که با استفاده از طیف توانی یا اسپکترومی مشخص می شود. طیف توانی با به کارگیری تبدیلات فوریه به بررسی پارامترهای مورد مطالعه در فضای بسامدی می پردازد. به عبارت دیگر طیف توانی روشی برای پی بردن به رژیم مقیاس گذاری و آشکار کردن وجود ویژگی های بالا است. پژوهش های وسیعی برای مشخص کردن خاصیت فرکتالی پارامترهای مختلف هواشناسی و هیدرولوژیکی انجام شده، که در جدول ۱ به برخی از آنها اشاره شده است. با مشخص شدن ماهیت فرکتالی و خاصیت مقیاس گذاری، امکان ریزمقیاس کردن داده ها و استفاده از یک نگرش فرکتالی به وجود می آید. در خصوص کمک به بالا بردن دقت مطالعات بدیهی است داده های با مقیاس ریزتر دقت بالاتری نسبت به داده های بزرگ مقیاس دارند و از آنجایی که استخراج داده های ریزمقیاس هزینه و زمان زیادی می خواهد از این رو این روش کمک زیادی به دقت مطالعات می کند. به عنوان مثال مطالعه فرآیند بارش-

رواناب براساس هیترگراف با مقیاس ریز (مانند دقیقه ای)، دقیق تر از مقیاس بزرگ (مانند ساعتی) می باشد و یا اندازه گیری رسوب در ایستگاهها در هر ماه دو یا سه بار انجام می شود. از این رو لازم است مقادیر رسوب در سایر روزها نیز تخمین زده شود. با داشتن حجم رسوب انباشته شده در مخازن سدها مقادیر رسوب در روزهای مختلف از طریق گسسته سازی قابل تعیین است. با توجه به اهمیت تحلیل طیف توانی بارشها و عدم انجام چنین مطالعه ای در کشور، این پژوهش به بررسی وجود رفتار فرکتالی داده های ماهانه بارش ۳۳ ایستگاه باران سنجی ایران به کمک تحلیل طیف توانی پرداخته است.

مواد و روش ها

طیف توانی از جمله روش های مرسوم در بررسی ویژگی فرکتالی در سری های زمانی بوده که به شرح زیر به آن پرداخته می شود.

طیف توانی

با استفاده از سری فوریه (رابطه ۱) می توان هر تابع متناوب را به صورت مجموعی از توابع نوسانی ساده سینوسی و کسینوسی بیان کرد.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin(2\pi nt) + b_n \cos(2\pi nt)) \quad (1)$$

که در آن $f(t)$ یک سیگنال نسبت به زمان a_n, b_n ضریب های ثابت سری هستند. بدین صورت تابع از دامنه زمان، به دامنه بسامد برده می شود. در تحلیل مقیاس گذاری مقدار اطلاعات ذخیره شده در یک بسامد خاص مورد نظر بوده و نوع سینوسی و یا کسینوسی بودن آنها مهم نیست. پس به جای a_n و b_n از $E(f) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ استفاده می شود که نشان دهنده انرژی یا توان بسامد است.

کردار مقادیر $E(f)$ در مقابل بسامد، کردار طیف توانی نام دارد (السون، ۱۹۹۵). روش معمول محاسبه ضریب های سری فوریه متناظر با سری زمانی، استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) است. رابطه حاکم در تمام فرآیندهای فرکتالی به شکل زیر می باشد.

است. توان طیفی یک سری زمانی (β) برای دستیابی به اطلاعات مهم و همچنین تشخیص وجود یا عدم وجود خاصیت فرکتالی استفاده قرار می‌شود. اگر توان مقیاس‌گذاری برای یک بازه از باند بسامد به طور تقریبی برابر با صفر باشد، طیف توانی به صورت مسطح و یکنواخت خواهد بود و به این معنا است که فرآیند مورد بحث یک فرآیند نوفه‌دار سفید است. اگر توان مقیاس‌گذاری منفی باشد، رفتار طیف توانی به صورت یک تابع صعودی از بسامد (f) خواهد بود یعنی با افزایش بسامد، انرژی بسامد نیز افزایش پیدا کرده و فرآیند همبستگی منفی و ناپایدار دارد. ناپایداری به این معناست که اگر در یک پریود سیگنال افزایش (یا کاهش) یابد، به احتمال قوی در پریود بعدی سیگنال کاهش (یا افزایش) خواهد یافت (یعنی به صورت متناوب و نامنظم ظاهر می‌شود). اگر توان مقیاس‌گذاری مثبت باشد، رفتار طیف توانی به صورت یک تابع کاهشی از بسامد خواهد بود یعنی با افزایش بسامد، انرژی بسامد کاهش می‌یابد که در نتیجه فرآیند، همبستگی مثبت و پایدار دارد. پایداری به این معنا است که اگر در یک پریود، سیگنال افزایش (یا کاهش) یابد به احتمال زیاد در پریود بعدی نیز سیگنال افزایش (یا کاهش) می‌یابد. ناپایداری، شاخص وجود سازوکار بازخورد منفی^۱ حاکم بر سیستم است و پایداری نشان دهنده وجود سازوکار بازخورد مثبت^۲ در سیستم است (تلسکا، ۲۰۱۲). شکل ۲- الف نشان دهنده سازوکار بازخورد منفی میان بارش و خشکسالی است. اگر بارش افزایش یابد خشکسالی کاهش می‌یابد و اگر خشکسالی‌ها زیاد شوند به این دلیل است که میزان بارش نسبت به گذشته کاهش یافته است، یعنی با افزایش یک پارامتر، پارامتر دیگر کاهش می‌یابد. در نتیجه سازوکار بازخورد منفی بر سیستم حاکم است. شکل ۲- ب نشان دهنده سازوکار بازخورد مثبت میان بارش و تبخیر است. اگر تبخیر افزایش پیدا کند به دنبال آن رطوبت موجود در هوا زیاد شده و بارش نیز افزایش می‌یابد و اگر بارش زیاد شود به دنبال آن تبخیر نیز افزایش پیدا می‌کند. یعنی با افزایش یک پارامتر، پارامتر دیگر هم افزایش می‌یابد، در نتیجه سازوکار بازخورد مثبت بر سیستم حاکم خواهد بود. بنابر تعریف، سازوکار بازخورد منفی زمانی است که به دنبال تغییرات (کاهشی/ افزایشی)

$$N(s) \propto s^{-D} \quad (2)$$

که در این رابطه $N(s)$ یک ویژگی مشخص سری زمانی با مقیاس S در نظر گرفته می‌شود. در اینجا منظور از مقیاس طول گام‌های سری زمانی است. به عنوان مثال در یک سری زمانی روزانه، S برابر با یک روز و پارامتر D نیز بعد فرکتالی است که در بعضی موارد به دلیل پیچیدگی بیشتر، به فرم یک تابع تعریف می‌شود. خطی بودن کردار لگاریتمی $N(S)$ در مقابل S نشان دهنده برقراری رابطه ۱ و وجود رفتار مقیاس‌گذاری است. در ساختارهای فرکتالی، بین توان طیفی $E(f)$ و بسامد f رابطه ۳ برقرار است. در روش طیف توانی بسامد به عنوان فاکتور مقیاس و توان طیفی به عنوان بعد فرکتال می‌باشد، همچنین رابطه ۳ از رابطه ۲ پیروی می‌کند.

$$E(f) \propto f^{-\beta} \quad (3)$$

توان β شیب خط برازش داده شده ما بین بسامد f و انرژی بسامد $E(f)$ در مقیاس لگاریتمی است. طیف توانی، ابزاری استاندارد در بررسی‌های فرکتالی در فرآیند هیدرولوژیک است (فردریک و لارندر، ۱۹۹۳ و اولسون و همکاران، ۱۹۹۳). زمانی که تمام یا بخشی از طیف، از توابع توانی پیروی کنند (رابطه ۳) داده‌ها در این بازه توانی دارای ویژگی‌های فرکتالی هستند. همچنین طیف توانی، به ویژه برای مطالعه نوسان‌های یک فرآیند، مفید است. در کل در ارتباط با یک فرآیند تصادفی، طیف توانی به شکلی تصادفی حول یک مقدار ثابت نوسان می‌کند، در حالیکه برای یک سری متناوب یا شبه متناوب، نقطه‌های اوج فقط در فرکانس‌هایی خاص وجود دارند. سیگنال‌ها در پدیده آشفته نیز ممکن است خطوط طیفی تیزی داشته هستند، ولی ممکن است حتی در نبود نوفه هم قسمتی پیوسته از طیف وجود داشته باشد. روش انجام آزمون طیف توانی بدین صورت است که کردار لگاریتمی طیف توانی در مقابل بسامد رسم می‌شود و بازه‌هایی که در آن‌ها کردار به صورت خطی باشد، رژیم‌های مقیاس‌گذاری نامیده می‌شوند. مقیاس‌گذاری بر این موضوع دلالت دارد که خصوصیات آماری فرآیند مشاهده شده در مقیاس‌ها یا گام‌های زمانی مختلف، با رابطه‌های یکسانی کنترل می‌شوند (هرشن هورن و ولهایز، ۱۹۸۷ و پریکا و جورجیو، ۱۹۹۶). الگوریتم این پژوهش که جهت بررسی طیف توانی سری‌های زمانی بارش ماهانه در ۳۳ ایستگاه باران‌سنجی کشور استفاده شده، در فلوچارت شکل ۱ نشان داده شده

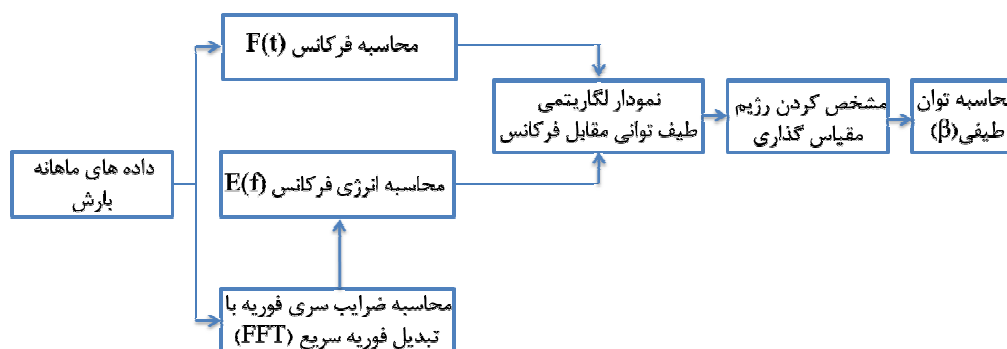
1- Negative mechanism
2- Positive mechanism

سازوکار دارند به عنوان ورودی به سازوکار بازخورد در نظر گرفته می شوند. به همین دلیل در بازخورد مثبت تغییرات سیگنال ها مشابه همدیگر و در بازخورد منفی عکس همدیگر هستند. شکل ۳ نشان می دهد که چگونه سازوکار باز خورد منفی به صورت نوسانی و نامنظم و سازوکار بازخورد مثبت به صورت منظم ظاهر می شود. وابستگی در سری های بارش ماهانه نشان از آن است که میزان بارش در هر ماه تا حدی به مقدار آن در ماه قبل یا ماه های قبل وابستگی دارد. یکی از کاربردهای سازوکار بازخورد توضیح این رخدادها در بارش است (الطهیر، ۱۹۸۹).

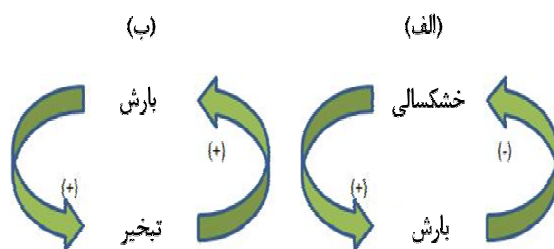
در برخی متغیرها، تغییرات معکوس (افزایشی/کاهشی) در متغیر بعدی انجام می شود (شکل ۳- الف) و سازوکار بازخورد مثبت زمانی است که به دنبال تغییرات (افزایشی/کاهشی) در برخی از متغیرها، تغییرات مشابه (افزایشی/کاهشی) در متغیر بعدی صورت پذیرد (شکل ۳- ب). در بازخورد مثبت بخشی از سیگنال های خروجی سازوکار که فاز یکسانی با سیگنال های ورودی سازوکار دارند به عنوان ورودی به سازوکار بازخورد در نظر گرفته می شوند اما در بازخورد منفی بخشی از سیگنال های خروجی سازوکار که فازی معکوس با سیگنال های ورودی

جدول ۱- نتایج حاصل از مطالعات مختلف انجام شده در مورد طیف توانی در فرایندهای هیدرولوژیکی

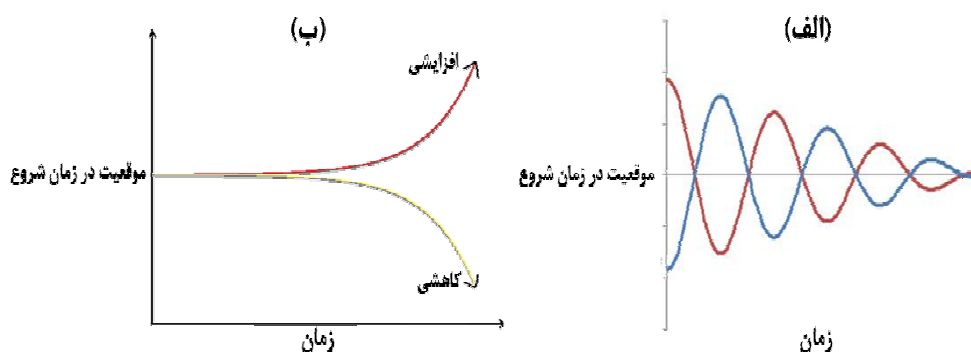
ردیف	پژوهش گر (پژوهش گران)	پارامتر	منطقه
۱	سیواکومار (۲۰۰۰)	بارش ۶ ساعته بارش روزانه بارش هفتگی	۱- حوضه رودخانه لیف، آمریکا ۲- سنگاپور
۲	مارین و هورنیرو (۲۰۰۸)	بارش ۱ ساعته	جنوب اسپانیا
۳	وانگ و همکاران (۲۰۰۸)	دبی روزانه	رودخانه یانگ ته سه
۴	روبر و همکاران (۲۰۰۸)	بارش روزانه	فرانسه
۵	شوک و پمروی (۲۰۱۰)	برف روزانه	کانادا
۶	وربر و همکاران (۲۰۱۰)	بارش موسمی	آفریقا
۷	دانیا و کومار (۲۰۱۰)	بارش روزانه	مالا پراپها هند ماهاندی هند کل هند
۸	کومار و دانیا (۲۰۱۱)	دبی روزانه	ماهاندی هند
۹	تلسکا و همکاران (۲۰۱۲)	دبی ماهانه	۱۱ ایستگاه در حوضه ابرو اسپانیا
۱۰	هوانگ و همکاران (۲۰۱۲)	بارش روزانه	فرانسه



شکل ۱- الگوریتم مورد استفاده در بررسی طیف توانی بارش های ماهانه



شکل ۲- سازوکار بازخورد میان (الف) بارش و خشکسالی و (ب) بارش و تبخیر



شکل ۳- سازوکار بازخورد (الف) منفی و (ب) مثبت

مشخصات ایستگاه‌ها و داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش داده‌های بارش ماهانه ۳۳ ایستگاه باران‌سنجی استفاده شده است. نحوه انتخاب ایستگاه‌ها بر این اساس بوده است که پراکندگی آن‌ها بتواند سطح کشور را پوشش دهد و شهرهای بزرگ را هم دربرگیرد. در جدول ۲ نام ایستگاه، مشخصات جغرافیایی، ارتفاع از

سطح دریا و طول دوره آماری مورد استفاده ارائه شده است. داده‌های بارش از سایت سازمان هواشناسی کشور گرفته شده است و با توجه به اینکه طیف توانی هر ایستگاه به صورت جداگانه بررسی می‌گردد، کل داده‌های موجود در هر ایستگاه مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۲- طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و طول دوره آماری بارش ماهانه ۳۳ ایستگاه مورد بررسی

شماره	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	شروع دوره آماری	پایان دوره آماری
۱	آبادان	۴۸° ۱۷'	۳۱° ۲۱' N	۶/۶	۱۹۵۱/۱	۲۰۰۵/۱۲
۲	اهواز	۴۸° ۴۰'	۳۱° ۲۰' N	۲۲/۵	۱۹۶۹/۳	۲۰۰۵/۱۲
۳	اراک	۴۹° ۴۶'	۰۶° ۳۴' N	۱۷۰/۸۰	۱۹۵۵/۳	۲۰۰۵/۱۲
۴	اردبیل	۴۸° ۱۷'	۳۸° ۱۵' N	۱۳۳۲/۰	۱۹۷۹/۷	۲۰۰۵/۱۲
۵	بابلسر	۵۲° ۳۹'	۳۶° ۴۳' N	-۲۱/۰	۱۹۵۱/۱	۲۰۰۵/۱۲
۶	بندرعباس	۵۶° ۲۲'	۲۷° ۱۳' N	۹/۸	۱۹۵۷/۱	۲۰۰۵/۱۲
۷	بندر انزلی	۴۹° ۲۸'	۳۷° ۲۸' N	-۲۶/۲	۱۹۵۵/۱	۲۰۰۵/۱۲
۸	بیرجند	۵۹° ۱۲'	۳۲° ۵۲' N	۱۴۹۱/۰	۱۹۵۵/۵	۲۰۰۵/۱۲
۹	بجنورد	۵۷° ۲۰'	۳۷° ۲۸' N	۱۰۹۱/۰	۱۹۷۷/۱	۲۰۰۵/۱۲
۱۰	بوشهر	۵۰° ۴۹'	۲۸° ۵۴' N	۸/۴	۱۹۸۶/۱	۲۰۰۵/۱۲
۱۱	اصفهان	۵۱° ۴۰'	۳۲° ۳۷' N	۱۵۵۰/۴	۱۹۵۱/۱	۲۰۰۵/۱۲
۱۲	قزوین	۵۰° ۰۳'	۳۶° ۱۵' N	۱۲۹۷/۲	۱۹۵۹/۱	۲۰۰۵/۱۲
۱۳	قم	۵۰° ۵۱'	۳۴° ۴۲' N	۸۷۷/۴	۱۹۸۶/۳	۲۰۰۵/۱۲
۱۴	گرگان	۵۴° ۱۶'	۳۶° ۵۱' N	۱۳/۳	۱۹۵۲/۱	۲۰۰۵/۱۲
۱۵	همدان	۴۸° ۴۳'	۳۵° ۱۲' N	۱۶۷۹/۷	۱۹۵۱/۱	۲۰۰۵/۱۲

ادامه جدول ۲-

شماره	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	شروع دوره آماری	پایان دوره آماری
۱۶	ایلام	۲۶° ۴۶' E	۳۸° ۳۳' N	۱۳۳۷/۰	۱۹۸۶/۴	۲۰۰۵/۱۲
۱۷	کاشان	۲۷° ۵۱' E	۵۹° ۳۳' N	۹۸۲/۳	۱۹۶۶/۶	۲۰۰۵/۱۲
۱۸	کرج	۵۴° ۵۰' E	۵۵° ۳۵' N	۱۳۱۲/۵	۱۹۸۵/۲	۲۰۰۵/۱۲
۱۹	کرمان	۵۸° ۵۶' E	۱۵° ۳۰' N	۱۷۵۳/۸	۱۹۵۱/۱	۲۰۰۵/۱۲
۲۰	کرمانشاه	۴۷° ۰۹' E	۲۱° ۳۴' N	۱۳۱۸/۶	۱۹۶۲/۶	۲۰۰۵/۱۲
۲۱	خرم آباد	۱۷° ۴۸' E	۲۶° ۳۳' N	۱۱۴۷/۸	۱۹۵۱/۱	۲۰۰۵/۱۲
۲۲	مشهد	۴۳° ۴۵' E	۴۶° ۳۶' N	۱۳۸۵/۰	۱۹۵۱/۱	۲۰۰۵/۱۲
۲۳	ارومیه	۴۵° ۰۵' E	۳۲° ۳۷' N	۱۳۱۵/۹	۱۹۶۳/۷	۲۰۰۵/۱۲
۲۴	سنندج	۴۷° ۰۰' E	۲۰° ۳۵' N	۱۳۷۳/۴	۱۹۵۹/۹	۲۰۰۵/۱۲
۲۵	سمنان	۳۳° ۵۳' E	۳۵° ۳۵' N	۱۱۳۰/۸	۱۹۶۵/۱	۲۰۰۵/۱۲
۲۶	شهرکرد	۵۱° ۵۰' E	۱۷° ۳۲' N	۲۰۴۸/۹	۱۹۵۶/۱	۲۰۰۵/۱۲
۲۷	شیراز	۳۶° ۵۲' E	۳۲° ۲۹' N	۱۴۸۴/۰	۱۹۵۱/۱	۲۰۰۵/۱۲
۲۸	تبریز	۱۷° ۴۶' E	۳۸° ۰۵' N	۱۳۶۱/۰	۱۹۵۱/۱	۲۰۰۵/۱۲
۲۹	تهران	۱۹° ۵۱' E	۴۱° ۳۵' N	۱۱۹۰/۸	۱۹۵۱/۱	۲۰۰۵/۱۲
۳۰	یاسوج	۴۱° ۵۱' E	۵۰° ۳۰' N	۱۸۳۱/۵	۱۹۸۷/۱	۲۰۰۵/۱۲
۳۱	یزد	۱۷° ۵۴' E	۵۴° ۳۱' N	۱۲۳۷/۲	۱۹۶۹/۴	۲۰۰۵/۱۲
۳۲	زاهدان	۵۳° ۶۰' E	۲۸° ۲۹' N	۱۳۷۰/۰	۱۹۵۸/۵	۲۰۰۵/۱۲
۳۳	زنجان	۲۹° ۴۸' E	۴۱° ۳۶' N	۱۶۶۳/۰	۱۹۵۵/۵	۲۰۰۵/۱۲

نتایج و بحث

تحلیل طیف توانی بارش ایستگاه‌ها

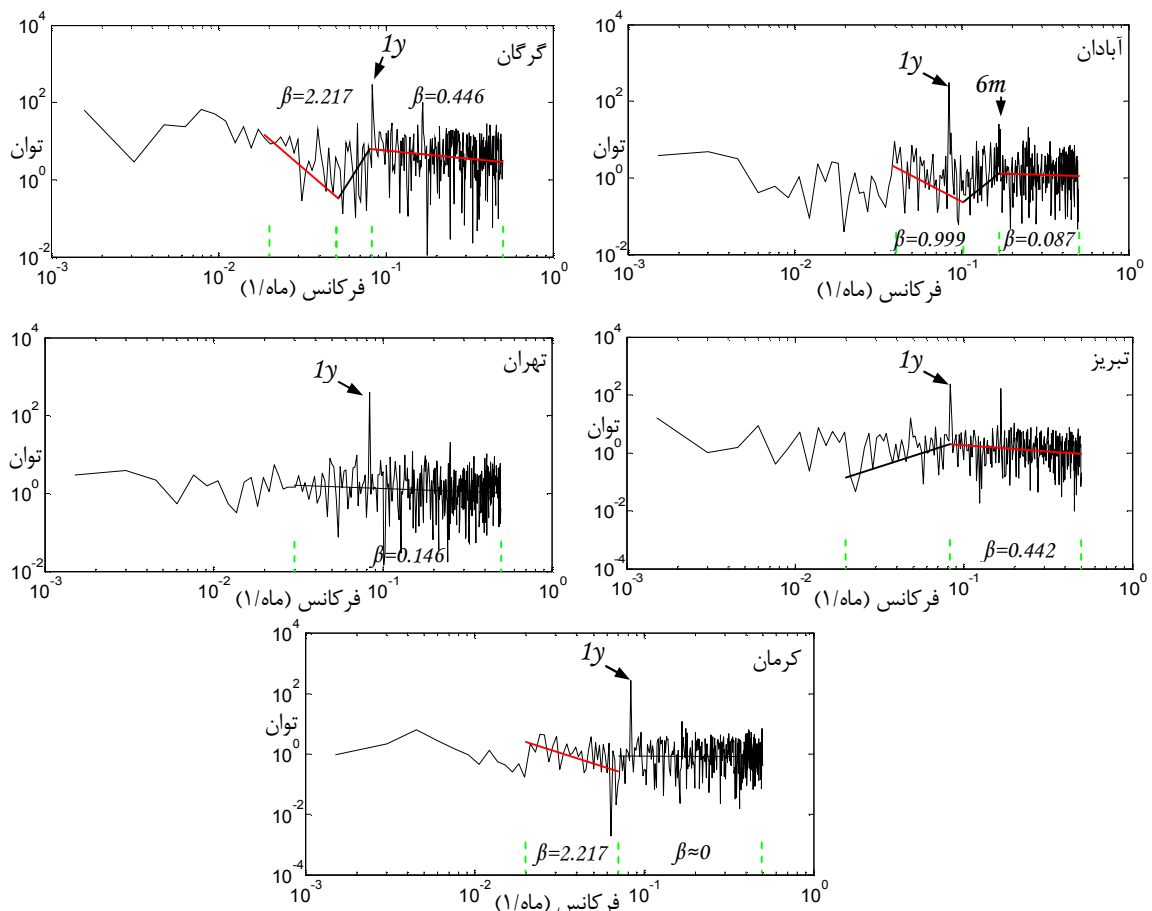
در این قسمت آمار بارش‌های ماهانه ۳۳ ایستگاه باران‌سنجی کشور بررسی و تحلیل شده است. به دلیل محدودیت تعداد صفحه‌های مقاله برای ارائه کردار طیفی همه ایستگاه‌های باران‌سنجی، به ارائه کردار طیف توانی چند ایستگاه اکتفا شده و نتایج بقیه ایستگاه‌ها در جدول‌ها آورده شده است. طیف توانی بارش ماهانه پنج ایستگاه تبریز، تهران، کرمان، آبادان و گرگان در شکل ۴ نشان داده شده است. برخی از ویژگی‌های طیف توانی بارش‌های ماهانه ایستگاه‌های ذکر شده را می‌توان به صورت زیر بیان کرد: ایستگاه گرگان با ۳ رژیم مقیاس‌گذاری (شکل ۴-ب) و ایستگاه تبریز (شکل ۴-ج) با ۲ رژیم مقیاس‌گذاری در باند بسامدهای بالا (دوره تناوب کمتر از چرخه سالانه) دارای توان طیفی مثبت با مقدار کمتر از یک هستند. به عبارتی ایستگاه‌های تبریز و گرگان در دوره تناوب کمتر از یک سال ماهیت فرکتالی قوی و خاصیت مقیاس‌گذاری دارند. همچنین سازوکار بازخورد مثبت بر سیستم حاکم است یعنی اگر بارش به طور مثال در یک ماه افزایش (یا کاهش) یافته باشد به احتمال قوی در ماه بعد نیز افزایش (یا کاهش) خواهد

یافت. ایستگاه‌های گرگان و تبریز به ترتیب در بازه‌های زمانی ۱۲ تا ۲۰ ماه و ۱۲ تا ۵۰ ماه دارای توان طیفی منفی هستند. یعنی در این بازه‌ها ماهیت فرکتالی ضعیفی بوده و خاصیت مقیاس‌گذاری در داده‌ها موجود نیست و همچنین فرآیند بارش ناپایدار است و در نتیجه سازوکار بازخورد منفی حاکم بر سیستم است. ایستگاه گرگان، در سومین رژیم مقیاس‌گذاری خود از ۲۰ تا ۵۰ ماه دارای توان طیفی مثبت است ولی ماهیت فرکتالی آن به دلیل توان طیفی بیشتر از یک ضعیف است. طیف توانی ایستگاه تهران (شکل ۴-د) فقط دارای یک رژیم مقیاس‌گذاری به صورت یک تابع کاهش بسامد f با توان طیفی مثبت و کمتر از یک است. در نتیجه ایستگاه تهران در دوره تناوب ۲ تا ۳۳ ماه دارای ماهیت فرکتالی است. رفتار مسطح و یکنواخت در باند بسامدهای بالای ایستگاه کرمان (شکل ۴-ر) به دلیل توان طیفی به طور تقریبی صفر ($\beta=0/01$) علاوه بر ماهیت فرکتالی قوی، نشان می‌دهد که ماهیت بارش در آن بسامدها نوفه‌دار سفید است و این یعنی برای دوره تناوب ۲ تا ۱۴ ماه سری زمانی کاملاً تصادفی است. طیف توانی در بازه ۱۴ تا ۵۰ ماه دارای توان طیفی مثبت با مقدار بیش از یک است که بیان کننده ماهیت فرکتالی ضعیف و فرآیند بارش پایدار است. طیف توانی ایستگاه

توان طیفی مثبت کمتر از یک و ماهیت فرکتالی قوی هستند. از این ۳۱ ایستگاه به جز ایستگاه‌های آبادان و اردبیل که در دوره تناوب ۲ تا ۶ ماه و ایستگاه‌های ایلام و بجنورد که در دوره تناوب ۲ تا ۱۰ ماه دارای ماهیت فرکتالی هستند در ۲۷ ایستگاه دیگر (۸۱ درصد ایستگاه‌ها) در باند بسامدهای بالا (بسامدهای بزرگتر از چرخه سالانه) توان طیفی مثبت کمتر از یک و ماهیت فرکتالی قوی دیده می‌شود. با توجه به جدول ۴ از ۱۷ ایستگاه دارای رژیم مقیاس‌گذاری دوم، توان طیفی ایستگاه کرمان مثبت و توان طیفی سایر ایستگاه‌ها منفی است یعنی بیشتر ایستگاه‌ها در رژیم مقیاس‌گذاری دوم خود فاقد ماهیت فرکتالی هستند. همان‌طور که از جدول ۵ مشاهده می‌شود از میان ۳ ایستگاه آبادان، گرگان و یاسوج که در طیف توانی آن‌ها رژیم مقیاس‌گذاری سوم وجود دارد فقط ایستگاه آبادان با توان طیفی ۰/۹۹۹ در دوره تناوب ۱۰ تا ۲۵ ماه دارای ماهیت فرکتالی است و ۲ ایستگاه دیگر به دلیل توان طیفی مثبت بیشتر از یک، ماهیت فرکتالی ضعیفی دارند.

آبادان (شکل ۴- الف) با ۳ رژیم مقیاس‌گذاری تنها ایستگاهی است که در دو رژیم مقیاس‌گذاری خود یعنی هم در باند بسامدهای بالا (ولی دوره تناوب کوچک‌تر از ۶ ماه) و هم در دوره تناوب ۱۰ تا ۲۵ ماه دارای توان طیفی مثبت کمتر از یک و در نتیجه ماهیت فرکتالی است و در دوره تناوب ۶ تا ۱۰ ماه به دلیل توان طیفی منفی، بدون ماهیت فرکتالی است و سازوکار بازخورد منفی بر آن حاکم است. با توجه به شکل ۴ در تمام ایستگاه‌ها انرژی بسامد در نقطه سالانه افزایش ناگهانی می‌یابد که به دلیل وجود تناوب در مقیاس سالانه است.

برای سایر ایستگاه‌های باران‌سنجی نیز نتایج در جدول‌های ۳، ۴ و ۵ آورده شده است. با توجه به مقادیر توان طیفی محاسبه شده برای ۳۳ ایستگاه باران‌سنجی کشور، بیشترین مقدار توان طیفی مربوط به ایستگاه گرگان در دوره تناوب ۲۰ تا ۵۰ ماه با مقدار ۲/۲۱۷ و کمترین مقدار مربوط به کرمان در دوره تناوب ۲ تا ۱۴ ماه با مقدار تقریبی صفر است. براساس جدول ۳ ایستگاه‌های اهواز و بابل‌سار دارای توان طیفی منفی و ۳۱ ایستگاه دیگر دارای



شکل ۴- طیف توانی بارش ماهانه ۵ ایستگاه ایران

جدول ۳- مقادیر توان طیفی، شروع و پایان رژیم مقیاس گذاری اول به همراه معادله طیف توانی بازه مربوطه

رژیم مقیاس گذاری اول					
شماره	ایستگاه	شروع (ماه)	پایان (ماه)	توان طیفی (β)	رابطه طیف توانی
۱	آبادان	۲	۶	۰/۰۸۷	$y = 1.087x^{-0.087}$
۲	اراک	۲	۱۶	۰/۵۲۹	$y = 1.415x^{-0.529}$
۳	بندرعباس	۲	۵۰	۰/۰۶۹	$y = 3.307x^{-0.069}$
۴	بندر انزلی	۲	۱۶	۰/۴۰۱	$y = 30.042x^{-0.401}$
۵	بیرجند	۲	۱۲	۰/۵۸۷	$y = 0.449x^{-0.587}$
۶	بجنورد	۲	۱۰	۰/۱۹۵	$y = 34.921x^{-0.195}$
۷	بوشهر	۲	۳۳	۰/۵۴۱	$y = 6.305x^{-0.541}$
۸	اصفهان	۲	۵۰	۰/۱۷۳	$y = 0.445x^{-0.173}$
۹	قزوین	۲	۵۰	۰/۰۸۱	$y = 12.171x^{-0.081}$
۱۰	قم	۲	۱۳	۰/۶۴۲	$y = 0.764x^{-0.642}$
۱۱	گرگان	۲	۱۲	۰/۴۴۶	$y = 2.055x^{-0.446}$
۱۲	همدان	۲	۲۵	۰/۲۶۵	$y = 1.298x^{-0.265}$
۱۳	ایلام	۲	۱۰	۰/۵۶۲	$y = 11.282x^{-0.562}$
۱۴	کاشان	۲	۴۰	۰/۳۱۸	$y = 0.688x^{-0.318}$
۱۵	کرج	۲	۳۳	۰/۳۰۴	$y = 2.530x^{-0.304}$
۱۶	کرمان	۲	۱۴	≈ 0	$y = 0.834$
۱۷	کرمانشاه	۲	۱۲	۰/۶۵۰	$y = 2.239x^{-0.650}$
۱۸	خرم آباد	۲	۵۰	۰/۲۴۷	$y = 2.730x^{-0.247}$
۱۹	مشهد	۲	۵۰	۰/۲۹۴	$y = 0.705x^{-0.249}$
۲۰	ارومیه	۲	۱۲	۰/۴۰۷	$y = 1.517x^{-0.407}$
۲۱	سنندج	۲	۳۵	۰/۲۱۰	$y = 2.663x^{-0.210}$
۲۲	سمنان	۲	۵۰	۰/۲۹۸	$y = 0.481x^{-0.298}$
۲۳	اردبیل	۲	۶	۰/۹۲۵	$y = 1.135x^{-0.925}$
۲۴	شهرکرد	۲	۵۰	۰/۲۷۶	$y = 1.539x^{-0.276}$
۲۵	تبریز	۲	۱۲	۰/۴۴۲	$y = 0.666x^{-0.442}$
۲۶	تهران	۲	۳۳	۰/۱۴۶	$y = 0.957x^{-0.146}$
۲۷	یاسوج	۲	۶	۰/۸۳۶	$y = 26.75x^{-0.836}$
۲۸	یزد	۲	۵۰	۰/۱۷۲	$y = 0.247x^{-0.172}$
۲۹	زاهدان	۲	۱۲	۰/۴۱۹	$y = 0.279x^{-0.419}$
۳۰	زنجان	۲	۱۲	۰/۳۳۹	$y = 1.22x^{-0.339}$
۳۱	شیراز	۲	۱۲	۰/۳۴۹	$y = 3.148x^{-0.349}$
۳۲ و ۳۳	اهواز و بابلسر	۲	۴۰	منفی	-----

* y انرژی بسامد یا E(f) و X بسامد(f) است.

جدول ۴- مقادیر توان طیفی، شروع و پایان رژیم مقیاس گذاری دوم به همراه معادله طیف توانی بازه مربوطه

رژیم مقیاس گذاری دوم					
شماره	ایستگاه	شروع (ماه)	پایان (ماه)	توان طیفی (β)	رابطه طیف توانی
۱	آبادان	۶	۱۰	منفی	-
۲	اراک	۱۶	۵۰	منفی	-
۳	بندر انزلی	۱۶	۵۰	منفی	-
۴	بیرجند	۱۲	۵۰	منفی	-
۵	بجنورد	۱۰	۵۰	منفی	-
۶	قم	۱۳	۵۰	منفی	-
۷	گرگان	۱۲	۲۰	منفی	-
۸	ایلام	۱۰	۵۰	منفی	-
۹	کرمانشاه	۱۲	۵۰	منفی	-
۱۰	ارومیه	۱۲	۴۰	منفی	-
۱۱	اردبیل	۶	۵۰	منفی	-
۱۲	تبریز	۱۲	۵۰	منفی	-
۱۳	یاسوج	۶	۹	منفی	-
۱۴	زاهدان	۱۲	۵۰	منفی	-
۱۵	زنجان	۱۲	۳۳	منفی	-
۱۶	شیراز	۱۲	۵۰	منفی	-
۱۷	کرمان	۱۴	۵۰	۱/۶۵۳	$y = 0.003x^{-1.653}$

* y انرژی بسامد یا E(f) و X بسامد(f) است.

جدول ۵- مقادیر توان طیفی، شروع و پایان رژیم مقیاس گذاری سوم به همراه معادله طیف توانی بازه مربوطه

رژیم مقیاس گذاری سوم					
شماره	ایستگاه	شروع (ماه)	پایان (ماه)	توان طیفی (β)	رابطه طیف توانی
۱	آبادان	۱۰	۲۵	۰/۹۹۹	$y = 0.085x^{-0.999}$
۲	گرگان	۲۰	۵۰	۲/۲۱۷	$y = 0.0019x^{-2.217}$
۳	یاسوج	۹	۲۰	۱/۷۹۱	$y = 1.442x^{-1.791}$

* y انرژی بسامد یا E(f) و X بسامد(f) است.

نتیجه گیری

هدف از این پژوهش محاسبه توان طیفی رژیم‌های مقیاس گذاری بارش در ۳۳ ایستگاه کشور بود که با محاسبه توان طیفی، وجود و یا عدم وجود ماهیت فرکتالی مشخص گردید. همچنین به کمک مقدار توان طیفی خصوصیات مهمی همچون پایداری بارش و سازوکار بازخورد حاکم بر سیستم نیز مشخص شد. از کاربردهای سازوکار بازخورد توضیح وابستگی در سری‌های بارش ماهانه است و حاکی از آن است که میزان بارش در هر ماه تا حدی به مقدار آن در ماه قبل یا ماه‌های قبل وابستگی دارد. در این پژوهش با استفاده از

انتقال داده‌ها از فضای زمان به فضای بسامد طیف توانی ۳۳ ایستگاه سینوپتیک کشور ترسیم شد و مقادیر توان طیفی برای هر ایستگاه محاسبه شد. با توجه به این که ۲۷ ایستگاه از ۳۳ ایستگاه مورد مطالعه (۸۱ درصد ایستگاه‌ها) در باند بسامدهای بالا (دوره تناوب کمتر از چرخه سالانه) دارای توان طیفی مثبت کمتر از یک و ماهیت فرکتالی قوی بودند می‌توان چنین نتیجه گرفت که بیشتر ایستگاه‌های ایران در باند بسامدهای بزرگ‌تر از ۰/۰۸۳ یا به عبارت دیگر در دوره تناوب کوچکتر از یک سال (۲ تا ۱۲ ماه) دارای ماهیت فرکتالی قوی بوده و خاصیت مقیاس پذیری بر بارش‌های ماهانه حاکم است. این

- prairies. *Hydrrol. Earth System Sciences Discuss.* 7: 1297-1303.
13. Sivakumar B. 2000. Fractal analysis of rainfall observed in two different climatic regions. *Hydrological Sciences Journal des Sciences Hydrologiques.* 45(5): 727-738.
14. Telesca L. Lovallo M. Lopez-Moreno I. and Vicente-Srrano S. 2012. Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index (SSI) time series in the Ebro basin (Spain). *Physica A* 391: 1662-1678.
15. Verrier S. de Montera L. Barthès L. and Mallet C. 2010. Multifractal analysis of African monsoon rain fields, taking into account the zero rain-rate problem. *Jornal of Hydrology.* 389: 111-120.
16. Wang G. Jiang T. Blender R. and Fraedrich K. 2008. Yangtze 1/f discharge variability and interacting river-lake system. *Jornal of Hydrology.* 351: 230-237.

نتایج می‌تواند کمک زیادی به بالا بردن دقت پژوهش‌های منابع آب در کشور نماید.

سپاس‌گزاری

بدین وسیله از سازمان هواشناسی کشور به خاطر در اختیار گذاشتن آمار و اطلاعات بارش‌های ماهانه ایستگاه‌ها تقدیر و تشکر می‌شود.

منابع

1. Dhanya C. T. and Kumar N. 2010. Nonlinear ensemble prediction of chaotic daily rainfall. *Advances in Water Resources.* 33: 327-347.
2. Eltahir E. A. B. 1989. A feedback mechanism in annual rainfall, Central Sudan. *Journal of Hydrology.* 110: 323-333.
3. Fraedrich K. and Larnder C. 1993. Scaling regimes of composite rain fall time series. *Tellus.* 45(4): 289-298.
4. Hershenhorn J. and Woolhiser D. A. 1987. Disaggregation of daily rainfall. *Journal of Hydrology.* 95: 299-322.
5. Hoang C. T. Tchiguirinskaia L. Schertzer D. Arnaud P. Lavabre J. and Lovejoy S. 2012. Assessing the high frequency quality of long rainfall series. *Journal of Hydrology.* 438-439: 39-51.
6. Kumar D. N. and Dhanya C. T. 2011. Predicatability and chaotic nature of daily Predicatability and chaotic nature of daily stream flow. 10th *Hydraulics Conference.* Brisbane Australia. 1427-1434.
7. Marin A. P. and Hornero F. J. 2008. Universal multifractal description of an hourly rainfall time series from a location in southern Spain. *Atmosfera.* 21(4): 347-355.
8. Olsson J. Niemczynowicz J. and Berndtsson R. 1993. Fractal analysis of high-resolution rainfall time series. *Journal Geophys Resources.* 98(DI2)232: 65-74.
9. Olsson J. 1995. Limits and characteristics of the multifractal behaviour of a high resolution rainfall time series. *Nonlinear Processes in Geophysics.* 2: 23-29.
10. Perica S. and Georgiou F. E. 1996. Model for multiscale disaggregation of spatial rainfall based on coupling descriptions. *Journal Geophys Resources.* 101: 26347-26361.
11. Royer J. F. Biaou A. Chauvin F. Schertzer D. and Lovejoy S. 2008. Multifractal analysis of the evolution of simulated precipitation over France in a climate scenario. *C R Geoscience.* 340: 431-440.
12. Shook K. R. and Pomeroy J. W. 2010. Hydrological effects of the temporal variability of the multiscaling of snowfall on the Canadian