

جغرافیا (فصلنامه علمی - پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران)
دوره جدید، سال چهاردهم، شماره ۵۰، پاییز ۱۳۹۵

تغییرات بارش روزانه با استناد به تحلیل‌های آشوبی در شیراز

احمد مزیدی^۱، عبدالعلی کمانه^۲، غلامعلی مظفری^۳ و مهدی نارنگی فرد^۴

تاریخ وصول: ۱۳۹۵/۴/۱۲، تاریخ تایید: ۱۳۹۵/۷/۲۲

چکیده

به منظور بررسی تغییرات و ساختار حاکم بر بارش روزانه ایستگاه همدید شیراز، داده‌های بلندمدت بارش در بازه زمانی ۵۸ ساله (۱۹۵۶-۲۰۱۳) به‌کار گرفته شد و بر اساس روش کمی - تحلیلی بر مبنای محاسبات استقرایی و قیاسی مبنای سه و ماتریس یک متغیره با دو خروجی محاسبات انجام پذیرفت. با اعمال ضوابط خطی بر روی داده‌های ۵۸ ساله روزانه دما، بارش و فشار دامنه ورودی‌ها و برد خروجی‌ها محاسبه گردید، نتایج پژوهش نشان داد اگرچه نوسانات روزانه فشار و دما از ساختاری کاملاً برخالی پیروی می‌نماید، که این یافته گواه دینامیک دو فراسنج آب و هوایی فشار و دما از ناتعادلی به عدم تعادل می‌باشد؛ این در حالی است که روند بارش روزانه شیراز در محدوده ۰/۲ و ۰/۳ بر روی محور طولی از ساختار برخالی تبعیت نمی‌نماید. بنابراین باید در تحلیل دینامیک تغییرات بارش از منطق آشوبی استفاده نمود. دینامیک بارش شیراز با استدلال به جبر سیمپلکسی به صورت تابع $Y = 5.0123 x^{0.231}$ دانشیار گروه جغرافیا طبیعی - آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، ایران با همبستگی ۹۷/۹۸ درصد تعریف می‌شود، که این تابع دارای پایداری حقیقی و روند می‌باشد؛ چنانچه از روند مذکور روی هر یک از داده‌ها در ساختار چرخشی آشوبی ورودی و خروجی گرفته شود تابع روی کمیت ریاضی ۸/۱۳۹۹۰۶ ثابت خواهد شد. این نکته بیانگر آشوبی بودن سیستم بارشی حاکم بر نوسانات ایستگاه همدید شیراز می‌باشد. در نتیجه ساختار بارشی شیراز از جبر آشوبی پیروی می‌نماید، در حقیقت منطق آشوبی بارش بیانگر روند دینامیکی متغیر مورد مطالعه از حالت تعادل به ناتعادلی است، که دینامیسم عدم تعادلی برخالی فشار و دمای ایستگاه شیراز مکمل ناتعادلی در سیر نوسانی بارش این ایستگاه می‌باشد.

کلیدواژگان: آشوب، بارش، برخال، شیراز.

۱. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی - آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، ایران

۲. استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز، ایران

۳. دانشیار گروه جغرافیای طبیعی - آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، ایران

۴. دانشجوی دوره دکتری، جغرافیای طبیعی - آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، ایران

مقدمه

آشوب^۱ مفهومی است که به بیان نوعی نظم در چارچوب روندی بی‌نظم می‌پردازد اگر چه از دیدگاه فلسفی چنین مفهومی بیشتر به یک مغالطه شبیه است، ولی از بیان این نظریه اندکی نگذشت که رشد و گسترش یافت و بنا به گفته تسونیس (Tsonis, 1989: 258-263) پس از نظریه کوانتم و نسبیت مهم‌ترین کشف علمی در قرن بیستم تلقی شد (رامشت، ۱۳۸۲: ۱۴). نظریه آشوب به مطالعه سیستم‌هایی می‌پردازد که در نگاه اول به نظر می‌رسد رفتار تصادفی دارند اما در واقع همین سامانه تحت حاکمیت قوانین مشخصی است و یا به عبارتی در هر بی‌نظمی، نظمی نهفته است. چنین سامانه‌ای به شرایط اولیه بسیار حساس است، به گونه‌ای که ورودی‌های ظاهراً ناچیز و دلخواه، قادرند تأثیرات شگرفی بر روی سامانه داشته باشند. به چنین سامانه‌هایی، سامانه‌های آشوبناک گفته می‌شود. پس ناپایداری، رفتار غیردوره‌ای، سامانه‌های قطعی و غیرخطی بودن جمعاً مشخصات یک سامانه آشوبناک‌اند (قاهری و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۱۸). بیش از دو دهه مطالعه دقیق بر روی سامانه‌های دینامیکی نشان داده است که آشوب به‌طور گسترده در سامانه‌های طبیعی و مهندسی وجود دارد. از نظر تاریخی آشوب همواره به‌عنوان مزاحم در نظر گرفته شده و رفتار آشوبی به‌عنوان رفتاری پیچیده، غیرعادی و پیش‌بینی‌ناپذیر شناخته شده بود و اغلب آن را به تأثیرات تصادفی محیط نسبت می‌دادند اما مطالعات بیش‌تر نشان داد که پدیده‌های آشوبی، کاملاً معین می‌باشند (پری زنگنه و همکاران، ۱۳۸۸: ۳).

هرچند نظریه آشوب در دهه‌های اخیر جزء پژوهش‌های علمی رشته‌های گوناگون قرار گرفته، اما مفهوم ساده آن ریشه در برداشت‌های اولیه انسان در مورد جهان دارد. برابر این دیدگاه اگر چه امور جهان بی‌نظم، تصادفی و در نتیجه، غیرقابل پیش‌بینی به نظر می‌رسند، اما در عین حال از یک نظم و قطعیت برخوردار هستند (علمی‌زاده و شایان، ۱۳۹۳: ۲۱۹). نظریه آشوب یا نظم در بی‌نظمی کوشش دارد ابزار حل مسائل پیچیده در محیط پرآشوب و آکنده از تغییر و تحول امروز و فردا را در اختیار انسان قرار دهد (کرم، ۱۳۸۹: ۶۸).

1. Choas

فراسنج‌های آب و هوایی از رفتاری پیچیده، غیرخطی، تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی برخوردار هستند، به دلیل وجود همین ساختار آشوبناک بارش، بررسی رفتار آن نسبت به دیگر فراسنج‌های آب‌وهوایی با پیچیدگی بیش‌تری همراه است. بارش، پدیده‌ی حاصل از اندرکنش‌های پیچیده‌ی هواسپهر (محمدی و مسعودیان، ۱۳۸۹: ۴۷) و از اصلی و مهم‌ترین فراسنج‌های آب‌وهوایی به شمار می‌رود. عنصر بارش ماهیت آشوبناک و تصادفی داشته و از این نظر دارای تغییرات ساختاری در زمان‌های مختلف است. در این راستا به دلیل عدم قطعیت‌هایی که وجود دارد، نوسان‌های زیادی در مقدار بارش ایجاد می‌شود که پیش‌بینی این کمیت مهم را با مشکل مواجه نموده است (ایلدرومی، ۱۳۹۲: ۲۱).

پدیده‌های ژئوفیزیکی مانند زلزله، سیل و بارندگی نشان‌دهنده سامانه‌های پیچیده‌ای است که معمولاً توسط متغیرهای زیادی اداره می‌شود. این سامانه‌ها غیرخطی دارای عدم قطعیت و غیرقابل پیش‌بینی هستند (Damle and Yalcin, 2007: 305). بررسی و واکاوی رفتار پیچیده بارش یکی از موارد بنیادی و موثر در تعریف قانون حاکم بر رخداد انواع بارش (بارش سنگین، بارش رگباری و غیره)، سیلاب و روان‌آب‌های متاثر از آن می‌باشد؛ در این راستا تاکنون مدل‌ها و روش‌های پیش‌بینی و برآورد بارش نتوانسته است به‌طور کامل رفتار بارش را شناسایی نماید؛ بنابراین، با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در جهت آشکارسازی روند، تغییرات و نوسانات فراسنج‌های آب‌وهوایی با روش‌های گوناگون در پژوهش‌های مختلف؛ در این پژوهش افزون بر شناسایی چگونگی این تغییرات در گذشته، به شناسایی گذار رفتار بارش در حالت‌های مختلف تعادل، ناتعادلی، عدم تعادل و ناپایداری در رخداد بارش در ایستگاه همدید شیراز با بکارگیری نظریه آشوب اقدام خواهد شد.

با توجه به موارد مطروحه هدف در این پژوهش عبارت از تعیین موقعیت فضایی ساختار حاکم بر تغییرات بارش ایستگاه شیراز در بازه پایداری و ناپایداری با کاربست نظریه آشوب می‌باشد. نخستین بار مفهوم آشوب در آب و هواشناسی و هواشناسی توسط نیولیس^۱ در سال ۱۹۸۴ مطرح گردید، سپس تبیین و توسعه نظریه آشوب در سال ۱۹۸۶ توسط هریسون^۲ و بیسواس^۱ در فیزیک

-
1. Niolis
 2. Harison

و استوارت^۲ و تورکوت^۳ در مکانیک مایعات صورت پذیرفت. از آن پس در موارد گوناگونی این نظریه مطرح گردید. برای مثال گریک^۴ و پرسپول^۵ سیر تاریخی آن را تبیین نمودند. استوارت و جنسین^۶ به توضیح و تشریح مبانی اساسی این نظریه پرداختند. همچنین افراد دیگری چون دیوینی^۷ و کونراد^۸، شوستر^۹ و کنلی^{۱۰}، ریساد^{۱۱} در گسترش مفهوم آشوب تلاش ارزشمندی انجام دادند (رامشت، ۱۳۸۲: ۱۵). پژوهش در زمینه سامانه‌های دینامیک غیرخطی تقریباً در تمام علوم طبیعی و انسانی اعم از اقتصاد و زبان‌شناسی، فیزیک و ژئومورفولوژی رشد کرده است (Baas, 2002: 309)؛ و در دامنه‌ی گسترده‌ای از رشته‌های علمی از جمله نجوم، زیست‌شناسی، شیمی، محیط‌زیست، مهندسی و فیزیک گزارش شده است (Bigdeli and Afshar, 2009: 1579). سیواکومار^{۱۲} و همکاران (۱۹۹۹) و (۲۰۰۱) در پژوهشی وجود آشوب در روند بارش-رواناب به‌طور جداگانه در حوضه رودخانه گوتا در سوئد مورد بررسی قرار دادند. دامل^{۱۳} و یالکین^{۱۴} (۲۰۰۷) به پیش‌بینی حجم سیلاب‌ها با استفاده از نظریه آشوب پرداختند و نشان دادند که مقادیر محاسبه شده با نظریه آشوب در مقایسه با مقادیر پیش‌بینی شده با مدل سری‌های زمانی، از دقت قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. وو^{۱۵} و همکاران (۲۰۰۹) با به‌کارگیری مدل آشوب و برخال با شبیه‌سازی و پیش‌بینی سری زمانی، کیفیت آب را مورد بررسی قرار دادند، نتایج نشان داد که دقت محاسباتی درمنطق آشوبی نسبت به دیگر روش‌ها بالاتر و دارای نتایج رضایت بخش تر می‌باشد. بی‌کیانگ^{۱۶} و همکاران (۲۰۱۰) به‌منظور بهبود دقت در پایش تغییرات کاربری زمین و طبقه‌بندی تصویر

1. Biswas
2. Stewart
3. Turcotte
4. Gleick
5. Percival
6. Jensen
7. Devaney
8. Conrad
9. Schuster
10. Canly
11. Rasbad
12. Sivakumar
13. Damle
14. Yalcin
15. Wu
16. Yiqiang

سنجده TM در منطقه هوآی نان^۱ از خوارزمیک ژنتیک آشوب^۲ استفاده شد، یافته‌های این پژوهش نشان داد این خوارزمیک نسبت به دیگر خوارزمیک‌ها از ضریب کاپا و دقت بالاتری برخوردار است. خطیبی^۳ و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی، وجود رفتار آشوبناک رودخانه سوقوتهان در ترکیه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش بیانگر آشوب کم بُعد در سری زمانی داده‌های مورد مطالعه است. دومنیکو^۴ و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای به مقایسه نظریه آشوب و روش خود رگرسیون انباشته و میانگین متحرک جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی تغییرات سطح آب دریا پیرامون جزایر کوکوس^۵ در بازه زمانی روزانه، هفتگی، ده روزه و ماهانه در طی سال‌های (۱۹۹۲-۲۰۰۱) پرداختند. تحلیل مقایسه‌ای نتایج نشان داد هر دو روش از نتایج قابل قبولی برخوردارند که البته روش پیش‌بینی مبتنی بر نظریه آشوب از میزان خطای کمتری برخوردار است. ذونعمت کرمانی^۶ و کیشی^۷ (۲۰۱۵) در پژوهشی، ویژگی‌های امواج دریایی را در دریاچه مازندران مازندران با بکارگیری نظریه آشوب مورد بررسی قرار دادند، نتایج پژوهش رفتار آشوبی امواج باد را نشان می‌داد.

همانطور که پیش‌تر اشاره شد نظریه آشوب در علوم گوناگون به‌کار گرفته شده است، افزون بر بررسی‌هایی که در زمینه علوم طبیعی انجام گرفته است می‌توان به دیگر پژوهش‌های صورت گرفته در علوم انسانی اشاره کرد از جمله: نظریه آشوب توسط وایسبرگ^۸ (۱۹۸۸) جهت مطالعه مطالعه رفتار سیاسی انتخاباتی مورد استفاده قرار گرفت. کایریزایس^۹ (۱۹۹۱) مبانی این نظریه را در زیست‌شناسی مولکولی در توضیح و شناسایی سازوکار به‌تاخیر انداختن پیری مورد بررسی قرار داد. مک‌کیچر^{۱۰} (۱۹۹۹) در پژوهشی گردشگری را به‌عنوان یک روش غیرخطی و شیوه‌ای

-
1. Huainan
 2. Chaos Genetic Algorithm
 3. Khatibi
 4. Domenico
 5. Cocos (Keeling) Islands
 6. Zounemat-Kermani
 7. Kisi
 8. Weisberg
 9. Kyriazis
 10. McKercher

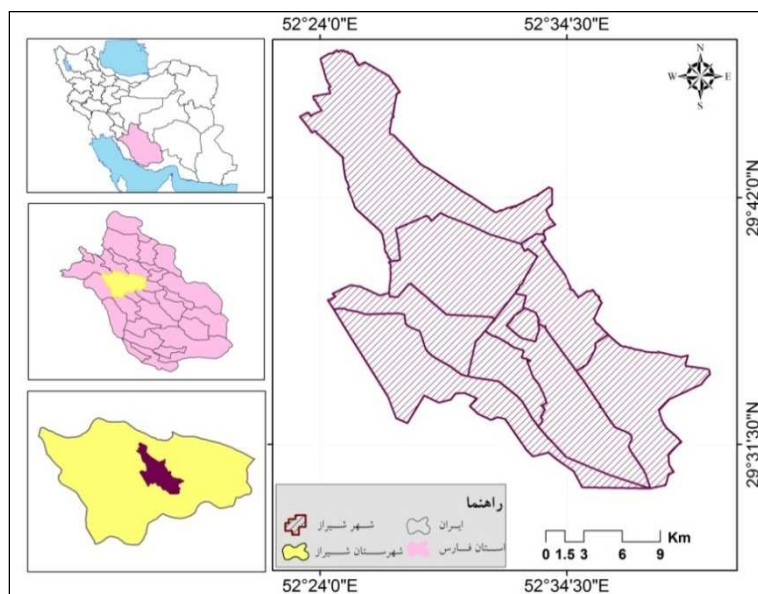
غیرقطعی آشوبناک معرفی می‌نماید به طوری که به‌کارگیری اصول نظریه آشوب در این روند غیرخطی می‌تواند ویژگی‌های گردشگری را کاملاً تحلیل نماید.

در ایران برای نخستین بار استفاده از سبیرنتیک سیستمی توسط رامشت و توانگر (۱۳۸۱) و رامشت (۱۳۸۲) مطرح گردید. همچنین، در پژوهشی دیگر (رامشت و همکاران، ۱۳۸۶) به تبیین نقش منطق فازی در تبیین فرآیندهای ژئوکلیماتیک اقدام نمودند. در مطالعات دیگر، شقاقیان و طالب بیدختی (۱۳۸۸)، قاهرایی و همکاران (۱۳۹۱) و علمی‌زاده و شایان (۱۳۹۳) بررسی و ارزیابی وجود آشوب در جریان رودخانه‌ای را مورد بررسی قرار دادند؛ در پژوهش قاهرایی و همکاران (۱۳۹۱) نتایج حاصل حاکی از دقت قابل قبول و مناسب نظریه آشوب در تعریف قوانین حاکم بر جریان رودخانه‌ی اهر چای بود. همچنین پژوهش شقاقیان و طالب بیدختی (۱۳۸۸) نشان داد که جریان رود در مقیاس‌های زمانی کوچک (۱۵ دقیقه‌ای) رفتاری کاملاً آشوبی، در مقیاس‌های زمانی بزرگ (هفتگی) رفتاری کاملاً تصادفی و در مقیاس‌های میانی رفتاری بین این دو از خود نشان می‌دهد. حسن‌زاده و همکاران (۱۳۹۱) پیش‌بینی سری زمانی شاخص خشکسالی بر پایه خوارزمیک موجک و نظریه آشوب در شهر تبریز پرداختند. در این پژوهش جهت تحلیل مقادیر خشکسالی با به‌کارگیری نظریه آشوب از خوارزمیک نزدیک‌ترین همسایگی کاذب استفاده شد. نتایج صحت سنجی حاکی از دقت بالای پیش‌بینی نظریه آشوب بوده و بر این اساس میزان و شدت خشکسالی شهر تبریز برای ۳ سال آینده پیش‌بینی گردید.

کاربست نظریه آشوب در تحلیل‌های اقتصادی نیز مورد توجه پژوهشگران بوده است (نویخت و همکاران، ۱۳۹۰؛ عباسی‌نژاد و نادری، ۱۳۹۱). همچنین بررسی رفتار و نوسانات بازده و قیمت سهام در بورس اوراق بهادار با استفاده از سامانه‌های آشوبناک (بابازاده و همکاران، ۱۳۸۸؛ زرانژاد و تیموری اصل، ۱۳۹۰؛ رستمی و همکاران، ۱۳۹۰) نیز از جمله موارد به‌کارگیری این نظریه در پژوهش‌های گوناگون بوده است. به‌طورکلی یافته‌های کاربردی و به‌کارگیری نظریه آشوب جهت پیش‌بینی فراسنج‌های گوناگون نتایج قابل قبولی به‌همراه داشته است، بنابراین در این پژوهش شناخت رفتار بارش در شهر شیراز با به‌کارگیری نظریه آشوب مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

مواد و روش کار

ایستگاه همدید شهر شیراز مرکز استان فارس با طول جغرافیایی ۵۲ درجه ۳۳ دقیقه خاوری و عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۳۶ دقیقه شمالی و با میانگین ارتفاع ۱۵۰۰ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). با توجه به اینکه مطالعه حاضر دارای ساختار بنیادی کاربردی است، بنابراین به‌عنوان نخستین راهکار منطقی باید مطالعات روی تنها یک ایستگاه انجام شود بدیهی است در مراحل تکمیلی باید برای دیگر ایستگاه همدید کشور این محاسبات انجام شده و نقشه پهنه‌بندی تهیه گردد. بنابراین شاید همگن به‌نظر نرسد که ایستگاه همدید شیراز به‌عنوان نماینده محدوده شهر و شهرستان شیراز در نظر گرفته شود. به‌عبارتی اگر بنا به دریافت عملکرد جبری بارش در این ایستگاه یا هر ایستگاه دیگر باشد، به‌ناچار باید بارش را به‌عنوان یکی از زیر سیستم‌های آب و هوایی در نظر گرفت، سیستمی که دیگر زیر سیستم‌های آن شامل فشار و دما در آن ایستگاه همدید می‌باشد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی سرزمین پژوهش

روش‌شناسی ساختار آشوبی به تنهایی یکی از اصول حاکم بر فرآیند تغییرات و نوسانات آب و هوایی و زیر سیستم‌های آن می‌باشد. این تغییرات و نوسانات می‌تواند از ضوابط خطی یا غیرخطی پیروی نماید؛ به تجربه ثابت شده است بیش‌تر کارکرد سیستم‌های طبیعی و به‌ویژه سیستم آب و هوایی از ساختار غیرخطی پیروی می‌نمایند. در این فرآیند نخست داده‌های بلندمدت روزانه بارش، دما و فشار ایستگاه همدید شیراز در بازه زمانی ۵۸ ساله (۱۹۵۶-۲۰۱۳) با ساختارهای خطی و غیرخطی بررسی می‌گردد و بر حسب اینکه کدام ساختار از همبستگی همگن‌تری برخوردار باشد آن ساختار در حقیقت چارچوب حاکم بر روند تغییرات و نوسانات فراسنج‌های آب و هوایی خواهد بود، بدیهی است که برآیند کارکرد هر سه فراسنج نماینده رفتار جبری ایستگاه می‌باشد، اما نکته مهم در بررسی آشوبی بارش در ایستگاه همدید شیراز این است که در صورتی تغییرات فراسنج بارش ایستگاه از منطق آشوبی پیروی می‌کند که در توابع غیرخطی تعریف گردد.

منطق جبری محاسبات مذکور از ماتریس‌بندی بر روی هر یک از فراسنج‌های آب و هوایی آغاز می‌شود، این ماتریس به صورت جبری به شرح زیر تعریف می‌گردد.

$$\begin{array}{ccccccc} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & \dots & a_{m+1} & \\ a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & \dots & a_{m+2} & \\ a_3 & a_4 & a_5 & a_6 & \dots & a_{m+3} & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \\ a_n & a_n & a_n & a_n & \dots & a_{nm} & \end{array} \quad \text{معادله (۱)}$$

در این ماتریس ستون موردنیاز در محاسبات آشوب بارش ستون آخر خواهد بود. این ستون در حقیقت داده‌های فراسنج آب و هوایی موردنظر را نشان می‌دهد که باید در یک ساختار انباشتگی^۱ بسیط (سیمپلکسی)^۲ محاسبه گردد. ویژگی منحصر به فرد این محاسبات، برخلاف محاسبات مرکب (کمپلکسی)^۳ این است که داده‌های نخستین به صورت ضمنی دیگر ویژگی‌های یک نمایه اقلیمی اعم از زمان و خود نمایه را دربرمی‌گیرد.

-
1. cumulation
 2. simplex
 3. complex

am + 1	operation	x1	y1	...	function	
am + 2	operation	x2	y2	...	function	
am + 3	operation	x3	y3	...	function	معادله (۲)
⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	
anm	operation	xn	yn	...	Conclusion	

بهترین راهکار تحلیلی معادله (۲) راهکار مثلثاتی^۱ می‌باشد. در تحلیل‌های مثلثاتی باید در نظر داشت که بنیان تفسیر بر اساس فرآیندهای مبنای سه می‌باشد؛ این در حالی که زمینه مطالعاتی از هندسه مخروطی^۲ متأثر می‌گردد. به عبارت دیگر پژوهشگر در این تفاسیر با سه بعد (مثلثاتی) واقع بر سطح اساس مخروطی روبه‌رو است. ذکر این نکته لازم است که پژوهشگر با گزینش این ضابطه محاسباتی قادر به دستاویزی به دیگر زیر ساختارهای هیپربولیک^۳ (هذلولی) و پارابولیک^۴ (سه‌می) نیز می‌باشد. در هر یک از ساختارهای مذکور ضوابط حاکم بر تعامل درون‌دادها (x) و برون‌دادها (y) معادله (۲) به‌طور بالقوه تعیین خواهد گردید. پس از تعریف ضوابط باید ضابطه‌ای که بیشترین حد همبستگی بین درون‌داد و برون‌دادها را دارا می‌باشد، به عنوان ضابطه بالفعل برگزید. جای تاکید اینکه حتی ممکن است که این ضابطه بالفعل نیز به‌طور ۱۰۰ درصد دارای همبستگی کامل نباشد. بنابراین، پژوهشگران، مدیران و برنامه‌ریزان عمران و ناحیه‌ای باید توجه داشته باشند که از نتایج محاسبات سیمپلکسی به‌ویژه در حالت آشوبی به هیچ‌عنوان به‌عنوان ضوابط پیش‌بینی رخداد پدیده‌های طبیعی در آینده نباید استفاده شود، به سخن دیگر این توابع فقط ساختارهای حاکم بر عامل موردنظر را نمایان می‌کند و بیان می‌دارد که زیر سیستم در کدام یک از حالات تعادلی واقع شده است. در معادله (۲) عملگرها، ساختار هم مرجع‌سازی جبری را به‌عهده دارند. به‌ناچار و فقط در هم مرجع‌سازی سیمپلکسی از ساختار خطی استفاده می‌شود و در تاکید این اصل باید مطرح شود که این هم مرجع‌سازی چون براساس مختصات حد‌آستانه انجام می‌گیرد، از طریق ساختارهای غیرخطی نیز می‌تواند محاسبه گردد؛ با وجود این تفاوت در نوع ضابطه در همه موارد نتیجه یکسان است، در نتیجه در تمام حالات همبستگی‌ها به‌طور کامل مثبت یا منفی خواهد بود. حد آستانه‌های موردنیاز در هم مرجع

-
1. trigonometry
 2. conical
 3. hyperbolique
 4. Parabolic

نمودن جبری مذکور حد آستانه مثلثاتی (2Π) می‌باشد که با اعمال ستون دوم از ماتریس معادله (۲) در ساختار معادله (۳) محاسبه خواهد شد:

$$y - y_0 = a(x - x_0) \quad \text{معادله (۳)}$$

نتایج حاصل از ستون دوم معادله (۲) به‌عنوان درون‌داد در تابع مخروطی معادله (۴) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$y = \sqrt{m - x^2} \quad \text{معادله (۴)}$$

به‌طور خودکار تابع مذکور برد^۱ برون‌دادها را تعیین خواهد نمود. همانگونه که مشخص است معادله (۴) دامنه^۲ عملیاتی هم مرجع شده تا (2Π) را نمی‌تواند پوشش دهد، چون معادله (۵) از سری توابع سهمی می‌باشد که معمولاً در عملگرهای مثلثاتی در پیرامون مختصات Π و 2Π به ابهام می‌رسد و حد می‌پذیرد.

$$x^2 + y^2 - m = 0 \quad \text{معادله (۵)}$$

منطق فوق کاملاً منطقی مرکب (کمپلکسی) می‌باشد برای رفع این نقص پژوهشگر مجبور به اعمال راهکارهای مثلثاتی سیمپلکسی خواهد شد. به‌عبارت دیگر از ستون دوم ماتریس معادله ۲ (زیر عنوان داده‌های هم مرجع شده مثلثاتی) درون‌دادها و برون‌دادها (ستون‌های سوم و چهارم ماتریس معادله ۲) محاسبه خواهد شد. به‌سختی دیگر، اگر عملگرهای ستون دوم به‌عنوان گوشه^۳‌های مختصات مثلثاتی یکه، در نظر گرفته شود با یک تجزیه‌برداری، دامنه و برد تابع سیمپلکسی مورد نظر معین خواهد شد.

$$Y = a \sin \theta \quad \text{معادله (۶)}$$

$$X = a \cos \theta \quad \text{معادله (۷)}$$

دو موضوع مهم که در تعابیر غیرخطی باید مدنظر پژوهشگر باشد عبارتند از:

1. Range
2. Domain
3. θ angel

- ۱- در ضابطه‌یابی‌ها حتماً دامنه درون‌دادها باید به قسمی باشد که از صفر بزرگتر و از $\frac{\pi}{2}$ کوچکتر باشد بدیهی است با منفی شدن برون‌داد در این ضابطه‌یابی می‌توان دامنه درون‌دادها را از $\frac{3\pi}{2}$ تا 2π با رعایت قانون مرحله اول بلامانع انجام داد.
- ۲- پژوهشگر می‌تواند با اعمال ابعاد دیگر روی دامنه و برد ضوابط مذکور موثر باشد بدون اینکه به ساختار تعادلی ضابطه آسیبی وارد آید. همچنین این ابعاد می‌تواند به صورت مسطحاتی و یا فضایی تعریف گردد. البته بنا به هدف پژوهشگر پرسپکتیو‌های (تجسم‌های فضایی) خروجی می‌تواند متنوع باشد.

نتایج تحقیق

در این پژوهش دامنه داده‌های اقلیمی دارای تناوب ۵۸ ساله می‌باشد، اگرچه به‌طور انتزاعی پژوهش بر روی بارش ایستگاه همدید شیراز می‌باشد، ولی به‌طور قیاسی به نظر می‌رسد که اگر مقایسه‌ای میان دیگر فراسنج‌های آب‌وهوایی مانند فشار و دما با عنصر بارش صورت گیرد نتایج مجسم‌تر خواهد بود. به این منظور، نخست حد آستانه‌های بیشینه و کمینه دما، بارش و فشار در ضابطه خطی معادله (۸) در دامنه‌های جبری $0/4$ منفی تا مثبت هم مرجع می‌گردد.

$$F(x) = \left[\left(\frac{\Delta f(x)}{\Delta x} x - \frac{\Delta f(x)}{\Delta x} x_0 \right) + f(x_0) \right] \quad \text{معادله (۸)}$$

نتیجه حاصل روی هر یک از داده‌های بارش، فشار و دما اعمال می‌گردد. روشن است ضابطه خطی مذکور در حد آستانه‌های مثبت و منفی (کمینه و بیشینه) می‌تواند به صورت نیمه لگاریتمی، تمام لگاریتمی، توانی و معکوس نیز اعمال گردد که نتیجه یکسان خواهد بود، فقط باید در نظر داشت که در حد آستانه‌های کمینه به‌جز ضابطه بالا دیگر ضوابط در کمینه‌های صفر و کوچکتر از صفر از نظر ساختاری قادر به پاسخگویی نمی‌باشند.

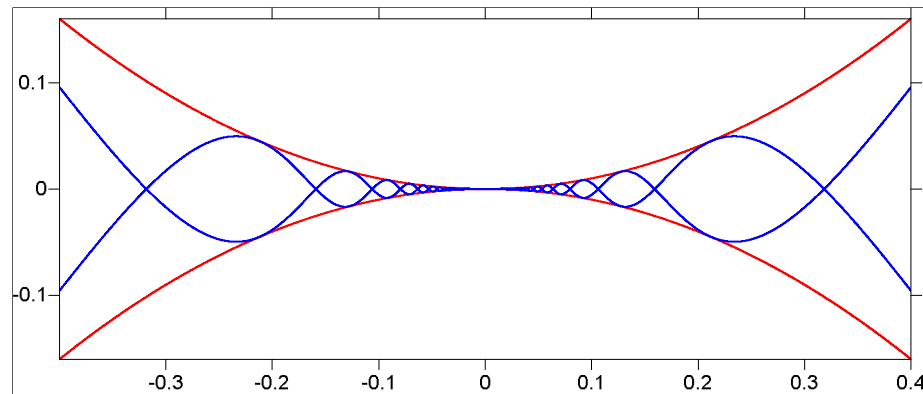
جدول ۱: آستانه‌های آب‌وهوایی و ضوابط خطی حاکم بر آن در ایستگاه همدید شیراز

فراسنج	بارش	فشار	دما
بیشینه	۹۹	۸۳۳/۴	-۵/۵
کمینه	۰	۸۶۲	۳۷
ضابطه	$L = (g * 0.0081) - 0.4$	$M = (h * 0.028) - 23.712$	$K = (f * 0.0188) - 0.2965$

با اعمال ضوابط خطی مذکور روی داده‌های ۵۸ ساله روزانه دما، بارش و فشار و اجرای آن بر روی فراسنج‌های مرتب شده طی دوره بلندمدت آماری دامنه درون‌دادها و برد برون‌دادها محاسبه شد، که در حقیقت این فرآیند یک ساختار سیمپلکسی مرکب است که منجر به دسترسی هر درون‌داد از دامنه به یک برد برون‌داد خواهد شد. بی‌گمان این تعبیر به‌تنهایی دارای اساس هندسی می‌باشد، به‌همین دلیل باید با رعایت اصل ضابطه‌یابی رادیانی بین صفر تا $2k\Pi$ که در قسمت پیشین به آن اشاره شد، نخست به ضابطه‌یابی برخالی^۱ اقدام می‌گردد؛ شاید برای مخاطب این پرسش پیش آید که چرا هر سه فراسنج آب‌وهوایی در بار نخست در ساختار برخال مورد بررسی واقع شده‌اند؟ با توجه به اینکه اصولاً پدیده‌های طبیعی اکثراً از رابطه خطی پیروی نمی‌نمایند و اگر هم پیروی نمایند همبستگی حداکثری نخواهند داشت، بنابراین سیمپلکسیون داده‌ای آب‌وهوایی مذکور در ساختاری غیرخطی از همبستگی بیشتری برخوردار خواهند بود و در سه مورد اخیر (دما، فشار و بارش ایستگاه همدید شیراز) این ساختار با رعایت دوره گردش $2k\Pi$ در ضابطه پولی نومیال^۲ (چند جمله‌ای) مثلثاتی با درجه دو در حالت کلاسیک خود نسبت به بردارهای x & y با همبستگی حداقل ۹۵ درصدی کاملاً معنی‌دار خواهد بود، که از اعمال ساختار نپرین بر روی دامنه و بردهای داده‌های هم مرجع شده آب‌وهوایی جدول (۱) محاسبه می‌گردند، نتیجه گرافیکی کلاسیک و بالفعل عملکرد نوسانی فراسنج‌های آب‌وهوایی بالا روی نمودار زیر مشخص می‌باشد (شکل ۲). در این شکل عملکرد برخالی جبری در حالت محض نمایان است. مسئله مهم این است که دیگر فراسنج‌های آب‌وهوایی

-
1. Fractal
 2. Polynomial

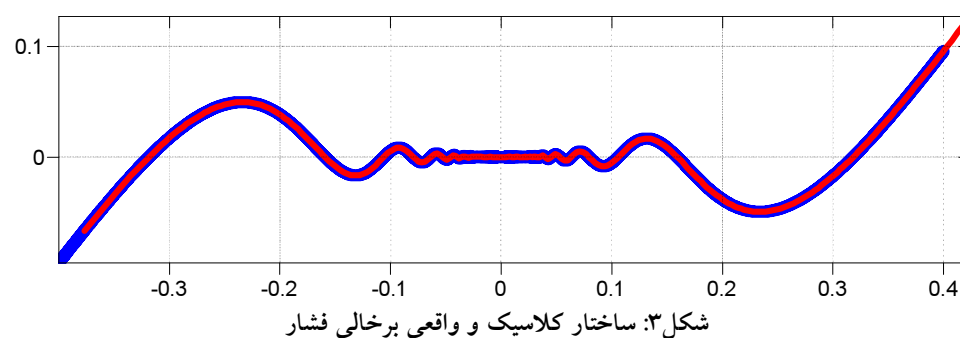
ایستگاه همدید شیراز نخست باید به صورت جبری برای هر روز از ۵۸ سال داده‌های آب و هوایی روی نمودار کلاسیک همپوشانی داده شود. در این صورت اگر کل داده‌های واقع شده روی ایستگاه طی دوره آماری مذکور روی نمودار همسان گردد در آن صورت می‌توان بیان نمود که آن فراسنج آب و هوایی از ساختار برخالی پیروی می‌نمایند.



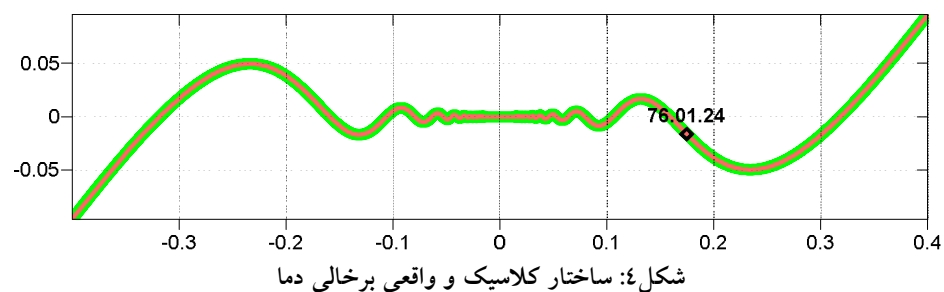
شکل ۲: ساختار کلاسیک برخالی دو بعدی

برای عامل فشار با استناد به متمتیکال رفرنس^۱ (هم مرجع نمودن ریاضی) ردیف چهار جدول (۱) روی ستون ۵۸ ساله داده‌های روزانه فشار ایستگاه همدید شیراز این نتیجه حاصل آمد که دقیقاً نوسانات فشار ایستگاه طی دوره آماری ساختاری کاملاً برخالی دارد (شکل ۳). در این شکل ساختار واقعی با رنگ سرخ روی ساختار کلاسیک با رنگ آبی ترانما^۲ شده است.

-
1. Mathematical Reference (MR)
 2. Transparent

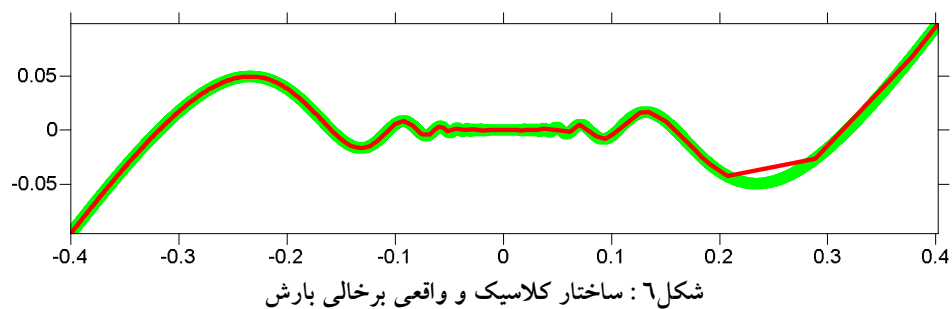
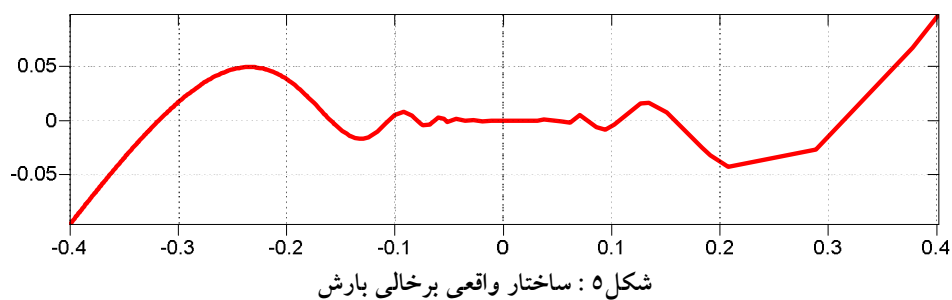


همین فرآیند جبری روی فراسنج دما هم نتیجه عملکرد بر خالی فراسنج مذکور را تایید می‌نماید. بنابراین همانگونه که از شکل (۴) برمی‌آید، فراسنج آب‌وهوایی دما نیز کاملاً ساختاری بر خالی دارد. جای تاکید اینکه اگر پژوهشگر در نظر داشته باشد حتی موقعیت دمایی یک روز از ۲۱۰۰۰ روز دوره آماری را روی منحنی کلاسیک بر خالی معین نماید کافی است با انتقال^۱ مختصات هندسی داده‌ی دمایی روز مورد نظر موقعیت آن را روی کل منحنی بر خالی تحلیل نماید. برای مثال موقعیت دما روز ۲۴ فروردین سال ۱۳۷۶ روی نمودار کاملاً مشخص و معلوم است که ساختار دمای آن روز عملکردی کاملاً بر خالی دارد. در این شکل ترانمای سبز عملکرد بر خال کلاسیک و ترانمای نارنجی گواه عملکرد نوسانی دمای ایستگاه شیراز می‌باشد که ساختار بر خالی آن کاملاً از ساختار جبری پیروی می‌نماید.



1. post

در شکل‌های ۳ و ۴ هدف قیاس دو فراسنج آب‌وهوایی دما و فشار در برهمکنش^۱ با فراسنج بارش بوده است، به عبارت دیگر اگر فقط فراسنج بارش در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گرفت شاید مخاطب از این روند منطقی چشم‌اندازی استقرایی پیدا می‌نمود، به همین دلیل اعمال منطق قیاسی نتیجه تحلیلی منطقی‌تری را باعث خواهد شد. بر اساس یافته‌های این پژوهش بارش در ایستگاه همدید شیراز با اعمال ساختارهای جبری مذکور از منطق برخالی پیروی نمی‌نمایند (شکل ۵) و (شکل ۶). همانگونه که نمودار مذکور نشان می‌دهد روند بارشی شیراز در محدوده ۰/۲ و ۰/۳ بر روی محور طولی از ساختار برخالی تبعیت نمی‌کند که در مقایسه با روند کلاسیک برخالی این قیاس روی نمودار (شکل ۶) نمایش داده شده است.



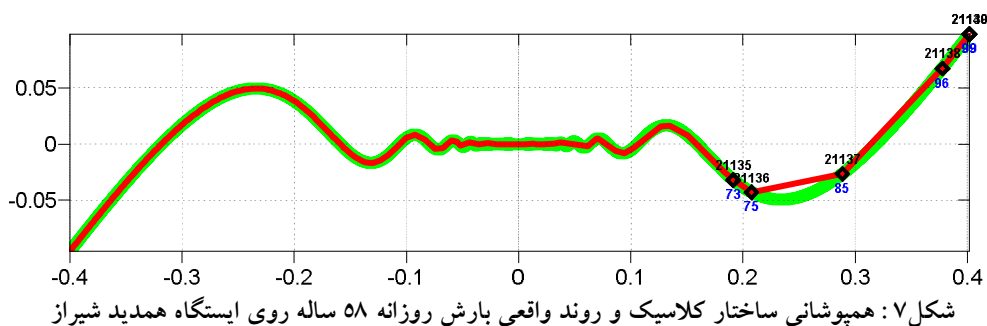
اما مسئله مهم‌تر این است که پژوهشگر بداند کدام محدوده‌ها سبب عدم پیروی روند نوسان‌های بارشی ایستگاه همدید شیراز از ساختار برخالی شده است، جهت این محاسبه با انتقال کل دوره

1 . interaction

آماري روی منحنی می‌توان به این عدم تعادل دست یافت. بنابراین با استناد به یافته‌های پژوهش (شکل ۷) و (جدول ۲) آشکار است که روند نوسان‌های ایستگاه همدید شیراز از ساختار برخالی تبعیت نمی‌نماید. به عبارت دیگر همانگونه که مشخص است از ردیف تنظیمی صعودی ۲۱۱۳۵ تا ۲۱۱۴۰ که شامل بارش‌های بالا ۷۳ میلی‌متر می‌باشد، قسمتی از محدوده بارش‌ها که در مجموعه بارشی شیراز از ساختار برخالی تبعیت نمی‌نماید در (شکل ۷) با ترانمای سرخ رنگ مشخص شده است، مربوط به روزهای ۱۴ تا روز ۱۳۵۰۵ از طول دوره آماری می‌باشد. اصولاً همین علت سبب عدم عملکرد برخالی متغیر بارش ایستگاه همدید شیراز شده است. روند تجسمی منطق مذکور در (شکل ۷) با ترانمای سبز نشان داده شده است.

جدول ۲: محدوده بارشی، جبری و زمانی ناتعادلی بارش روزانه ایستگاه همدید شیراز

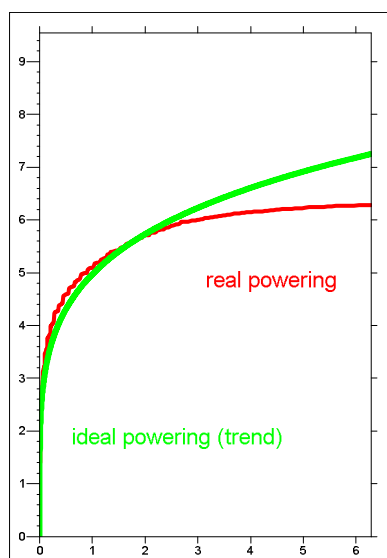
ردیف صعودی	روز وقوع در طول دوره آماری	$Y = m^2 * \sin(1/m)$	MR	بارش (میلیمتر)
۲۱۱۳۵	۳۳۱۷	-۰/۰۳۱۸۵	۰/۱۹۱۳	۷۳
۲۱۱۳۶	۱۳۵۰۵	-۰/۰۴۲۸۱	۰/۲۰۷۵	۷۵
۲۱۱۳۷	۱۴	-۰/۰۲۶۵۵	۰/۲۸۸۵	۸۵
۲۱۱۳۸	۱۱۲۹۴	۰/۰۶۷۵۱۶	۰/۳۷۷۶	۹۶
۲۱۱۳۹	۶۹۹	۰/۰۹۸۱۹	۰/۴۰۱۹	۹۹
۲۱۱۴۰	۱۱۲۹۳	۰/۰۹۸۱۹	۰/۴۰۱۹	۹۹



شکل ۷: همپوشانی ساختار کلاسیک و روند واقعی بارش روزانه ۵۸ ساله روی ایستگاه همدید شیراز

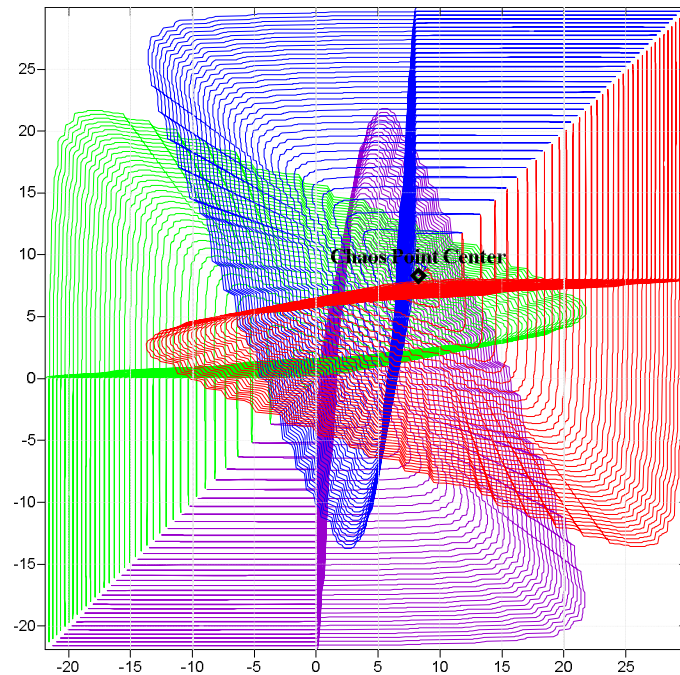
با توجه به اینکه ساختار بارش ایستگاه همدید شیراز منطبق با منطق برخالی نمی‌باشد، بنابراین باید در تحلیل دینامیک تغییرات بارش از منطق‌های آشوب و در صورت لزوم از منطق فازی

استفاده نمود (جای تاکید اینکه در انتخاب منطق حاکم بر روند نوسانات فراسنج‌های آب‌وهوایی باید با یک منطق شروع و صورت نیاز به منطق‌های دیگر مراجعه نمود)؛ به‌همین منظور در تحلیل منطق حاکم بر بارش ایستگاه شیراز از ساختار آشوبناک استفاده می‌گردد. در این روند جبری فراوانی رخداد هر یک از مقادیر واقعی بارش حتی در مقیاس روزانه در یک ماتریس وتری محاسبه گردید، ویژگی مهم جبری ماتریس وتری (روابط ۱ و ۲) این است که نتایج به‌طور خودکار به صورت فراوانی‌های رخداد تجمعی صعودی مرتب می‌گردند. سپس با استفاده از روابط (۵) و (۸) نتایج حاصل در یک ساختار جبری مخروطی هم مرجع می‌گردد. در مورد بارش ایستگاه همدید شیراز ساختار مورد استفاده روند شلمجی می‌باشد، به این دلیل که همبستگی بین درون‌داد و برون‌داد سیمپلکسی ناشی از ماتریس وتری مقادیر مطلق بارش و فراوانی وقوع آن روی ایستگاه شیراز در بالاترین حد خود یعنی ۹۷/۹۸ درصد می‌باشد. روشن است در صورتی که همبستگی مذکور کم‌تر از ۷۰ درصد باشد، ناگزیر پژوهشگر باید از منطق فازی استفاده نماید. با توجه به‌میزان همبستگی محاسبه شده، دینامیک بارش شیراز با استدلال جبر سیمپلکسی به‌صورت تابع $Y = 5.0123 x^{0.2315}$ با همبستگی ۹۷/۹۸ درصد تعریف می‌شود. این تابع دارای پایایی‌های حقیقی و روند می‌باشد، که چشم‌انداز گرافیکی آن در نمودار (شکل ۸) نشان داده شده است.



شکل ۸: پایایی حقیقی و روند بارش ایستگاه همدید شیراز

در صورتی که از روند مذکور روی هر یک از داده‌ها در ساختار چرخشی آشوبی درون‌داد و برون‌داد گرفته شود تابع روی کمیت ریاضی $۸/۱۳۹۹۰۶$ ثابت خواهد شد. این نکته بیانگر آشوبی بودن سیستم بارشی حاکم بر نوسانات ایستگاه همدید شیراز می‌باشد. جهت درک بهتر از حالت آشوبی بودن نمایه بارش ایستگاه همدید شیراز نتیجه چرخش تابع $Y = 5.0123 x^{0.2315}$ در ابعاد سیمپلکس سه بعدی با توجه به مرکزیت کمیت $۸/۱$ آشوبی در (شکل ۹) کاملاً مشخص است. در این نمودار، پژوهشگر توانایی جانمایی تمام بارش‌های واقع شده برای روز و مقدار بارش روی نمودار را دارد. بدین ترتیب مشخص می‌گردد که آیا بارش موردنظر به طرف تعادل پیش می‌رود یا ناتعادلی به عبارت دیگر اگر بارش گرایش به مرکز داشته باشد معلوم می‌شود که مقدار مذکور به طرف تعادل پیش می‌رود و اگر روند، دورگردی داشته باشد معلوم می‌شود بارش به سوی ناتعادلی در حال حرکت می‌باشد.



شکل ۹: ابعاد سیمپلکس سه بعدی بارش در ایستگاه همدید شیراز

نتیجه‌گیری

نظر به اهمیت بارش، به‌عنوان مهمترین عامل در تأمین آب صنعتی، شهری و کشاورزی در چارچوب مدیریت منابع آب به‌ویژه در مناطق نیمه خشک، شناخت نوسانات، تغییرات و ساختار بارش ضروری است. در این پژوهش، مقادیر بارش روزانه ایستگاه همدید شیراز در بازه زمانی ۵۸ ساله (۱۹۵۶-۲۰۱۳) جهت شناسایی رفتار آشوبناک و ساختارهای حاکم بر این متغیر مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مقایسه‌ای میان فراسنج آب و هوایی فشار و دما با فراسنج بارش انجام شد که با استناد به نتایج تحلیل‌های کمی سیمپلکسی ثابت گردید که اعمال منطق آشوب، برخال و فازی به‌هیچ‌عنوان نمی‌تواند در پیش‌بینی‌ها حتی کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار گیرد. به‌عبارت دیگر ساختارهای مذکور فقط می‌تواند گواه رفتارهای مختلف تعادلی متغیر مورد نظر اعم از بارش، فشار و دما و یا ساختار کلی اقلیم باشد؛ چون این توابع فقط ساختارهای حاکم بر عامل موردنظر را نمایان می‌کند و بیان می‌دارد که زیرسیستم در کدام یک از حالات تعادلی واقع شده است. براساس یافته‌های این پژوهش ساختار کاملاً کلاسیک دما و فشار

ایستگاه همدید شیراز گواه عملکرد جبری روند دینامیکی این دو متغیر از ناتعادلی^۱ به طرف عدم تعادل^۲ می‌باشد. اما در مقایسه ساختار بارشی ایستگاه متأثر از جبر آشوبی می‌باشد که در حقیقت بیانگر دینامیک متغیر مورد مطالعه از تعادل^۳ به طرف ناتعادلی است. بنابراین روشن است که دینامیک عدم تعادل در متغیرهای دما و فشار روی ایستگاه سبب پویایی ناتعادلی متغیر بارش در مختصات نقطه‌ای - مکانی ایستگاه گردیده است. در نتیجه کاملاً ضروری به نظر می‌رسد این محاسبات جبری باید روی تمام ایستگاه‌های همدید کشور و حتی منطقه انجام شود و سپس روی نتایج حاصله در هر یک از ساختارهای برخال، آشوب و فازی پهنه‌بندی مقتضی اجرا گردد و نتایج به صورت قیاسی و نه به صورت استقرایی تحلیل شود.

-
- 1 . Disequilibrium
 - 2 . Nonequilibrium
 - 3 . Equilibrium

کتابشناسی

۱. ایلدرومی، علیرضا؛ زارع ایبانه، حمید و مریم بیات ورکشی (۱۳۹۲)، برآورد بارش به کمک شبکه عصبی مصنوعی با داده‌های هواشناسی غیربارشی در سه منطقه شیراز، مشهد و کرمان، جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۱۷، شماره ۴۳، صص ۲۱-۴۰؛
۲. بابازاده، محمد؛ معمارنژاد، عباس و سیامک علمی (۱۳۸۸)، بررسی ماکزیم نمای لیپانوف در نرخ ارز ایران با استفاده از تئوری آشوب، پول و اقتصاد، شماره ۲، صص ۵۳-۷۷؛
۳. پری‌زنگنه، مریم؛ عطایی، محمد و پیمان معلم (۱۳۸۸)، بازسازی فضای حالت سری‌های زمانی آشوبی با استفاده از یک روش هوشمند، نشریه الکترونیک و قدرت دانشکده مهندسی برق، سال اول، شماره دو، صص ۳-۱۰؛
۴. حسن‌زاده، یوسف؛ لطف‌اللهی یقین، محمدعلی؛ شاهوردی، سجاد؛ فرزین، سعید و نیما فرزین (۱۳۹۱)، نوپزدایی و پیش‌بینی سری زمانی بر پایه الگوریتم موجک و نظریه آشوب (مطالعه موردی: شاخص پایش خشکسالی SPI شهر تبریز)، تحقیقات منابع آب ایران، سال هشتم، شماره ۳، صص ۱-۱۳؛
۵. رامشت، محمدحسین (۱۳۸۲)، نظریه کیاس در ژئومورفولوژی، مجله جغرافیا و توسعه، شماره ۱، صص ۱۳-۳۶؛
۶. رامشت، محمدحسین؛ توانگر، منوچهر (۱۳۸۱)، مفهوم تعادل در دیدگاه‌های فلسفی ژئومورفولوژی، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۶۵ و ۶۶، صص ۷۹-۹۴؛
۷. رامشت، محمدحسین؛ عبدالعلی، کمانه؛ فتوحی، صمد (۱۳۸۶)، معرفت‌شناسی و مدل‌سازی در ژئومورفولوژی، پژوهش‌های جغرافیایی، دوره ۳۹، شماره ۶۰، صص ۳۱-۴۸؛
۸. رستمی، محمدرضا؛ باقی‌نیری، فرزانه و جواد قاسمی (۱۳۹۰)، بررسی رفتار قیمت سهام شرکت‌های پذیرفته شده در بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از تئوری آشوب، مجله مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار، شماره هفتم، صص ۱-۱۷.
۹. زرانژاد، منصور و یاسر تیموری اصل (۱۳۹۰)، بررسی نوسانات بازده سهام در بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از سیستم‌های آشوبناک، دوفصلنامه اقتصاد پولی، مالی، سال اول، شماره ۱، صص ۱-۱۶؛
۱۰. شقاقیان، محمودرضا و ناصر طالب‌بیدختی (۱۳۸۸)، بررسی وجود آشوب در جریان رود در مقیاس‌های زمانی گوناگون، مجله مهندسی آب، سال دوم، شماره ۳، صص ۱-۷؛
۱۱. عباسی‌نژاد، حسین و اسماعیل نادری (۱۳۹۱)، تحلیل آشوب، تجزیه موجک و شبکه عصبی در پیش-بینی شاخص بورس تهران، فصلنامه تحقیقات مدل‌سازی اقتصادی، شماره ۸، صص ۱۱۹-۱۴۰؛

۱۲. علمی‌زاده، هیوا و سیاوش شایان (۱۳۹۳). نظریه آشوب در ژئومورفولوژی جریانی (مطالعه موردی تغییرات بستر رود کل، هرمزگان)، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۵، شماره ۳، صص ۲۱۷-۲۳۰؛
۱۳. قاهری، عباس؛ قربانی، محمدعلی؛ دلافروز، هادی و لیلا ملکانی (۱۳۹۱). ارزیابی جریان رودخانه با استفاده از نظریه آشوب، مجله پژوهش آب ایران، سال ششم، شماره دهم، صص ۱۱۷-۱۲۶؛
۱۴. کرم، امیر (۱۳۸۹). نظریه آشوب، فرکتال (برخال) و سیستم غیرخطی در ژئومورفولوژی، جغرافیای طبیعی، سال سوم، شماره ۸، صص ۶۷-۸۲؛
۱۵. محمدی، بختیار؛ مسعودیان، ابوالفضل (۱۳۸۹). تحلیل همیدید بارش‌های سنگین ایران مطالعه موردی: آبان ماه ۱۳۷۳، جغرافیا و توسعه، شماره ۱۹، صص ۷۰-۴۷؛
۱۶. مرکز آمار و اطلاعات ایران (۱۳۹۰):
۱۷. نویخت محمدباقر؛ غلامی‌تاج امیری، سعید و رضا مجیدزاده (۱۳۹۰). ارزیابی روند توسعه ایران در سده اخیر با تأکید بر نظریه آشوب و نظریه بازی، فصلنامه راهبرد، سال بیستم، شماره ۵۹، صص ۲۷۱-۳۱۷؛
18. Baas, A. C. (2002), *Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments*. *Geomorphology*, 48(1), 309-328;
19. Bigdeli, N., & Afshar, K. (2009), *Characterization of Iran electricity market indices with pay-as-bid payment mechanism*. *Physical A: Statistical Mechanics and its Applications*, 388(8), 1577-1592;
20. Damle, C., & Yalcin, A. (2007), *Flood prediction using time series data mining*. *Journal of Hydrology*, 333(2), 305-316;
21. De Domenico, M., Ghorbani, M. A., Makarynsky, O., Makarynska, D., & Asadi, H. (2013), *Chaos and reproduction in sea level*. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 3687-3697;
22. Devaney, R. L. (1986), *An Introduction to Chaotic Dynamical Systems*. Menlo Park, CA: Cummings Co;
23. Harrison, R. G. and Biswas, D. J. (1986), *Chaos in light*. *Nature*, Vol.321.
24. Hu, Z., Zhang, C., Luo, G., Teng, Z., & Jia, C. (2013), *Characterizing cross-scale chaotic behaviors of the runoff time series in an inland river of Central Asia*. *Quaternary International*, 311, 132-139;
25. Jensen, R. V., (1987), *Classical chaos*. *American Scientist*, Vol. 75.
26. Khan, S., Ganguly, A. R., & Saigal, S. (2005), *Detection and predictive modeling of chaos in finite hydrological time series*. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12(1), 41-53;
27. Khatibi, R., Sivakumar, B., Ghorbani, M. A., Kisi, O., Koçak, K., & Zadeh, D. F. (2012), *Investigating chaos in river stage and discharge time series*. *Journal of Hydrology*, 414, 108-117;
28. Kyriazis, M. (1991), *Applications of chaos theory to the molecular biology of aging*. *Experimental gerontology*, 26(6), 569-572;

29. Malyutina, E. I., & Shiryaev, V. I. (2014), Time Series Forecasting Using Nonlinear Dynamic Methods and Identification of Deterministic Chaos. *Procedia Computer Science*, 31, 1022-1031;
30. McKercher, B. (1999), A chaos approach to tourism. *Tourism Management*, 20(4), 425-434;
31. Shen, W., Fang, C., & Zhang, D. (2009), Fractal and chaos research of geomagnetic polarity reversal. *Earth Science Frontiers*, 16(5), 201-206.
32. Sivakumar, B., Berndtsson, R., Olsson, J., & Jinno, K. (2001), Evidence of chaos in the rainfall-runoff process. *Hydrological Sciences Journal*, 46(1), 131-145;
33. Sivakumar, B., Berndtsson, R., Olsson, J., Jinno, K., & Kawamura, A. (1999), Dynamics of monthly rainfall-runoff process at the Gota basin: A search for chaos. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(3), 407-417;
34. Stewart, C.A. and Turcotte, D. L. (1989). *Does God Play Dice?* Oxford: Blackwell;
35. Weisberg, H. F. (1998), Nonlinear models of electoral change: the implications of political time and chaos theory for the study of mass political behavior. *Electoral Studies*, 17(3), 369-382.
36. Wu, J., Lu, J., & Wang, J. (2009), Application of chaos and fractal models to water quality time series prediction. *Environmental Modelling & Software*, 24(5), 632-636;
37. Yiqiang, G., Yanbin, W., Zhengshan, J., Jun, W., & Luyan, Z. (2010), Remote sensing image classification by the Chaos Genetic Algorithm in monitoring land use changes. *Mathematical and Computer Modelling*, 51(11), 1408-1416;
38. Zounemat-Kermani, M., & Kisi, O. (2015), Time series analysis on marine wind-wave characteristics using chaos theory. *Ocean Engineering*, 100, 46-53.