

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

## پیش‌بینی سری‌های زمانی آشوبناک در فضای فاز بازسازی شده به روش‌های غیرخطی

دانشجو : محمد رضا شفیعی چافی

استاد راهنما : دکتر حسین قلی زاده نرم

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

دی ۱۳۹۱

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

## سخن اول

خداوند را بخاطر همه نعمتهایی که به این بنده ناچیز خود عطا فرموده سپاس می گویم و از کوتاهی خود در بندگی او پوزش می طلبم....

از پدر و مادر عزیزم بخاطر همه فداکاری ها و زحماتی که تا کنون برای این حقیر متحمل شده اند قدردانی می نمایم و امیدوارم که بتوانم قدر شناس زحمات ایشان باشم....

از جناب آقای دکتر قلی زاده، که مرا در طی مراحل مختلف این پایان نامه هدایت و راهنمایی نمودند بسیار سپاسگزارم. اگر چه بموجب فضایل اخلاقی بی شمار ایشان توشه خود را از شاگردی شان بسیار فراتر از این پایان نامه می دانم....

از همکاری استاتید برجسته پروفسور هنری آباربانل از دانشگاه کالیفرنیا، پروفسور هنری چونگ از دانشگاه هونگ کونگ و پروفسور جون ژنگ از دانشگاه سان یوت سن و دکتر غلامرضا داوودی از دانشگاه علوم پزشکی تهران که با ارائه نظرات و پیشنهادات و ارسال مجموعه مقالات ما را در پیشبرد این پایان نامه یاری نمودند، بسیار سپاسگزارم....

از داوران محترم، جناب آقای دکتر اکبرزاده و جناب آقای دکتر طوسیان که زحمت بازخوانی و داوری این مجموعه را به عهده داشتند و با ارائه نظرات ارزشمندشان ما را در بهبود این پایان نامه یاری نمودند صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم....

همچنین از خواهر عزیزم مهندس زهرا شفیعی چافی که در تهیه و تنظیم و ویراستاری این پایان نامه مرا یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم....

از دوستان ارجمند، آقایان محمد هاشم زاده، ایمان خسرویان، منصور شریفی، سعید خراشادیزاده، حمید بهزاد، محمد برادران، امیر نگهداری و رضا میقانی که در این مدت سعادت همنشینی با ایشان را در خوابگاه دانشجویی داشته ام، صمیمانه سپاسگزارم....

همچنین از کمکها و راهنماییهای همه معلمان، اساتید و سایر بزرگوارانی که در طول زندگی خود چگونه زیستن را از ایشان آموخته ام، بسیار سپاسگزارم....

## چکیده

---

سری زمانی دنباله‌ای از اعداد است که با نمونه برداری منظم از خروجی مشاهده شده‌ی یک سیستم بدست می‌آید. از میان انواع گوناگون سری‌های زمانی، سری‌های زمانی آشوبی اغلب در پدیده‌های طبیعی یافت می‌شوند. حساسیت بیش از حد سیستم‌های آشوبی به شرایط اولیه سبب بروز مشکل افق پیش‌بینی در پیش‌بینی بلند مدت و دقت پیش‌بینی در پیش‌بینی کوتاه مدت برای روش‌های مذکور شده است. بنابراین محور فعالیت‌های انجام شده در این پایان‌نامه بر اصلاح دقت در پیش‌بینی کوتاه مدت و افزایش افق پیش‌بینی در عین دقت مناسب، در پیش‌بینی بلند مدت قرار گرفته است. تلاش‌های انجام شده در این راستا منجر به ارائه‌ی دو روش در پیش‌بینی کوتاه مدت و چهار روش در پیش‌بینی بلند مدت شده است. بمنظور حصول اطمینان و بررسی بیشتر از روش‌های مطرح شده برای پیش‌بینی سری-های زمانی فوق آشوبی قلب و HRV نیز استفاده شد.

سرانجام به منظور نشان دادن یکی دیگر از کاربردهای عملی روش‌های پیشنهادی در زمینه‌های پزشکی از آن برای طبقه‌بندی ۵ دسته از آریتمی‌های قلبی استفاده شد که نتایج حاصله بیانگر توانمندی روش پیشنهادی در تفکیک ضربانات قلبی بر اساس ویژگی‌های نوظهور فازی است.

**کلمات کلیدی:** آشوب - سری زمانی - پیش‌بینی - بازسازی فضای فاز

## فهرست مطالب

| صفحه  | عنوان   |
|-------|---|
| ج     | فهرست جدول‌ها   |
| د     | فهرست شکل‌ها  |
| ۱     | فصل ۱- مقدمه  |
| ۱-۱   | ۱-۱- سری زمانی  |
| ۱-۲   | ۱-۲- سری زمانی آشوبی                                    |
| ۱-۲-۱ | ۱-۲-۱- بررسی اثر حساسیت :                               |
| ۱-۲-۲ | ۱-۲-۲- بررسی اثر حضور نمای لیاپانوف مثبت:               |
| ۱-۲-۱ | ۱-۲-۱- تحلیل طیفی :                                     |
| ۳-۱   | ۳-۱- پیش بینی سری های زمانی:                            |
| ۴-۱   | ۴-۱- بازسازی فضای فاز                                   |
| ۱-۴-۱ | ۱-۴-۱- تأخیر زمانی                                      |
| ۲-۴-۱ | ۲-۴-۱- بعد جاسازی                                       |
| ۵-۱   | ۵-۱- روش همانندی یا نزدیکترین همسایه:                   |
| ۶-۱   | ۶-۱- روش تقریب خطی                                      |
| ۷-۱   | ۷-۱- اهداف کلی پایان نامه                               |
| ۸-۱   | ۸-۱- ساختار پایان نامه                                  |
| ۱۵    | پیشینه تحقیق  |
| ۱۶    | فصل ۲- پیشینه تحقیق                                     |
| ۲۰    | فصل ۳- روشهای پیشنهادی در پیش بینی سری های زمانی        |
| ۱-۳   | ۱-۳- مقدمه  |
| ۲-۳   | ۲-۳- پیش بینی کوتاه مدت :                               |
| ۱-۲-۳ | ۱-۲-۳- روش فازی برخط :                                  |
| ۲-۲-۳ | ۲-۲-۳- روش فازی حافظه دار :                             |
| ۳-۳   | ۳-۳- پیش بینی بلند مدت :                                |
| ۱-۳-۳ | ۱-۳-۳- روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده :                 |
| ۲-۳-۳ | ۲-۳-۳- روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده با کمک روش عصبی:  |
| ۳-۳-۳ | ۳-۳-۳- روش تقریب غیرخطی                                 |
| ۴-۳-۳ | ۴-۳-۳- روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده با کمک تبدیل موجک |
| ۴۶    | فصل ۴- تفکیک آریتمی و پیش بینی سری زمانی قلب            |

|    |   |
|----|---|
| ۴۶ | ۱-۴ - قلب.....  |
| ۴۶ | ۲-۴ - مروری بر الکتروفیزیولوژی قلب.....                 |
| ۴۶ | ۱-۲-۴ - جریانات الکتریکی قلب.....                       |
| ۴۷ | ۲-۲-۴ - انتشار جریان های الکتریکی در اطراف قلب.....     |
| ۴۷ | ۳-۲-۴ - سیستم تولید و انتقال ایمپالس در داخل قلب.....   |
| ۴۹ | ۴-۲-۴ - اختلال در تولید ایمپالس در قلب.....             |
| ۴۹ | ۳-۴ - الکتروکاردیوگرافی.....                            |
| ۴۹ | ۱-۳-۴ - معرفی.....                                      |
| ۵۰ | ۲-۳-۴ - شکل ECG و نام گذاری اجزای آن.....               |
| ۵۱ | ۴-۴ - آریتمی.....                                       |
| ۵۱ | ۱-۴-۴ - چند نمونه از آریتمی ها.....                     |
| ۵۳ | ۵-۴ - پیش بینی سری های زمانی زیستی.....                 |
| ۵۴ | ۱-۵-۴ - پیش بینی کوتاه مدت سری زمانی ECG.....           |
| ۵۶ | ۲-۵-۴ - پیش بینی کوتاه مدت سری زمانی HRV.....           |
| ۵۸ | ۳-۵-۴ - پیش بینی بلند مدت سری زمانی ECG.....            |
| ۵۹ | ۴-۵-۴ - پیش بینی بلند مدت سری زمانی HRV.....            |
| ۶۱ | ۶-۴ - روش پیش بینی تک گام در تفکیک آریتمی های قلبی..... |
| ۶۱ | ۱-۶-۴ - روش پیشنهادی.....                               |
| ۶۲ | ۲-۶-۴ - نتایج حاصل از شبیه سازی ها.....                 |
| ۶۵ | ۵ - نتیجه گیری و ارایه پیشنهادات.....                   |
| ۶۵ | ۱-۵ - نتیجه گیری:.....                                  |
| ۶۶ | ۲-۵ - پیشنهادات.....                                    |
| ۶۹ | مراجع.....  |
| ۷۳ | واژه نامه فارسی به انگلیسی.....                         |
| ۷۴ | واژه نامه انگلیسی به فارسی.....                         |

## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

---

|          |   |    |
|----------|---|----|
| جدول ۱-۳ | مقایسه میان نتایج پیش بینی تک گام سری زمانی لورنز توسط روش فازی برخط و دو روش مبتنی بر شبکه عصبی .....                                  | ۲۵ |
| جدول ۲-۳ | مقایسه خطای حاصل از پیش بینی سری زمانی لورنز میان روش فازی حافظه دار و سه روش مبتنی بر شبکه عصبی .....                                  | ۲۷ |
| جدول ۳-۳ | مقایسه میان خطای پیش بینی بلند مدت (۷۰۰ نقطه) سری زمانی روسلر توسط دو روش تقریب خطی و نزدیکترین همسایه اصلاح شده به کمک شبکه عصبی ..... | ۳۷ |
| جدول ۴-۳ | مقایسه میان خطای پیش بینی بلند مدت (۷۰۰ نقطه) سری زمانی روسلر توسط دو روش تقریب خطی و تقریب غیرخطی .....                                | ۳۹ |
| جدول ۵-۳ | مقدار بعد جاسازی و تاخیر زمانی محاسبه شده برای سری زمانی ناشی از ضرایب موجک. ۴۳   |    |
| جدول ۶-۳ | مقایسه میان خطای پیش بینی بلند مدت سری زمانی روسلر توسط دو روش تقریب خطی و نزدیکترین همسایه اصلاح شده به کمک تبدیل موجک .....           | ۴۴ |
| جدول ۱-۴ | سرعت تولید ضربان در بخش های مختلف بر حسب ضربان بر دقیقه .....   | ۴۹ |
| جدول ۲-۴ | بررسی عوامل تاثیر گذار در دقت پیش بینی سری زمانی لورنز توسط روش فازی حافظه دار .....  | ۵۶ |
| جدول ۳-۴ | صحت روش پیشنهادی برای هر پنج نوع آریتمی ها با ویژگی های فازی .....  | ۶۲ |
| جدول ۴-۴ | میزان اختصاصی بودن روش پیشنهادی برای هر پنج نوع آریتمی ها با ویژگی های فازی .....   | ۶۲ |
| جدول ۵-۴ | میزان حساسیت روش پیشنهادی برای هر پنج نوع آریتمی ها با ویژگی های فازی .....   | ۶۲ |
| جدول ۶-۴ | مقایسه روش انجام شده در این تحقیق با سایر مقالات .....  | ۶۳ |



## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۱: سری زمانی لورنز به ازای دو شرایط اولیه ی بسیار نزدیک به هم ..... ۲
- شکل ۱-۲: کلیه ی نماهای لیاپانوف مربوط به سیستم لورنز ..... ۳
- شکل ۱-۳: طیف شدت متناظر با سری زمانی لورنز ..... ۴
- شکل ۱-۴: طیف شدت مربوط تابع  $yt = \sin 50\pi t + \sin(120\pi t)$  ..... ۴
- شکل ۱-۵: جاذب آشوبی لورنز و مولفه های آن بر حسب زمان ..... ۶
- شکل ۱-۶: بازسازی جاذب آشوبی لورنز توسط مختصات تاخیری ..... ۷
- شکل ۱-۷: بازسازی جاذب آشوبی لورنز توسط مختصات مشتقی ..... ۷
- شکل ۱-۸: روش نزدیکترین همسایه ..... ۱۲
- شکل ۳-۱: ساختار کلی سیستم مورد بررسی ..... ۲۱
- شکل ۳-۲: نحوی آرایش ورودی که که توسط بخش آفلاین انجام می شود. .... ۲۲
- شکل ۳-۳: الگوریتم بخش فازی برخط که شامل دو بخش بهنگام ساز و پیشگو می باشد. .... ۲۳
- شکل ۳-۴: پیش بینی تک گام سری زمانی لورنز توسط روش فازی برخط ..... ۲۴
- شکل ۳-۵: پیش بینی تک گام سری زمانی روسلر توسط روش فازی برخط ..... ۲۴
- شکل ۳-۶: پیش بینی تک گام سری زمانی لورنز توسط روش فازی حافظه دار ..... ۲۷
- شکل ۳-۷: پیش بینی تک گام سری زمانی روسلر توسط روش فازی حافظه دار ..... ۲۷
- شکل ۳-۸: الگوریتم روش نزدیکترین همسایه ی اصلاح شده ..... ۳۰
- شکل ۳-۹: پیش بینی بلند مدت سری زمانی لورنز در شرایط ی که تعداد نقاط جاذب بسیار کم انتخاب شده باشد. الف - پیش بینی سری به روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده. ب- پیش بینی توسط روش استاندارد. .... ۳۱
- شکل ۳-۱۰: پیش بینی بلند مدت سری زمانی روسلر در شرایط ی که تعداد نقاط جاذب بسیار کم انتخاب شده باشد. الف - پیش بینی سری به روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده. ب- پیش بینی توسط روش استاندارد. .... ۳۱
- شکل ۳-۱۱: پیش بینی بلند مدت سری زمانی آشوبی لورنز در شرایط بازسازی غلط فضای فاز. الف- روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده. ب- روش استاندارد. .... ۳۲
- شکل ۳-۱۲: پیش بینی بلند مدت سری زمانی آشوبی روسلر در شرایط بازسازی غلط فضای فاز. الف- روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده. ب- روش استاندارد. .... ۳۲
- شکل ۳-۱۳: الگوریتم روش نزدیکترین همسایه و روش عصبی ..... ۳۵
- شکل ۳-۱۴: پیش بینی بلند مدت سری زمانی آشوبی لورنز که توسط روش نزدیکترین همسایه ی اصلاح شده به همراه شبکه ی عصبی ..... ۳۶

شکل ۳-۱۵: پیش بینی بلند مدت سری زمانی آشوبی روسلر که توسط روش نزدیکترین همسایه ی اصلاح شده به همراه روش شبکه ی عصبی ..... ۳۶

شکل ۳-۱۶: پیش بینی بلند مدت سری زمانی آشوبی روسلر به روش تقریب غیرخطی ..... ۳۸

شکل ۳-۱۷: پیش بینی بلند مدت سری زمانی آشوبی روسلر به روش تقریب غیرخطی ..... ۳۹

شکل ۳-۱۸: الگوریتم روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده به کمک تبدیل موجک ..... ۴۱

شکل ۳-۱۹: محاسبه ی بعد ناشی از ضرایب موجک سری زمانی لورنز توسط الگوریتم گرسبرگر و پروکاسیا ..... ۴۲

شکل ۳-۲۰: نمودار تغییرات شیب شکل ۳-۱۹ نسبت به تغییرات بعد جاسازی ..... ۴۲

شکل ۳-۲۱: پیش بینی بلند مدت سری زمانی آشوبی لورنز که توسط روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده به کمک تبدیل موجک ..... ۴۳

شکل ۳-۲۲: پیش بینی بلند مدت سری زمانی آشوبی روسلر که توسط روش نزدیکترین همسایه روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده به کمک تبدیل موجک ..... ۴۴

شکل ۴-۱: ساختار قلب ..... ۴۶

شکل ۴-۲: انتشار جریان الکتریکی در قلب و قفسه سینه ..... ۴۷

شکل ۴-۳: سیستم انتقال پالس الکتریکی در عضله ی قلب ..... ۴۸

شکل ۴-۴: تاخیر زمانی انتقالی ایмпالس در عضله قلب بر حسب صدم ثانیه ..... ۴۸

شکل ۴-۵: شکل ECG نرمال ..... ۵۰

شکل ۴-۶: شکل ECG به همراه نامگذاری اجزای آن ..... ۵۰

شکل ۴-۷: یک نمونه از الکتروکاردیوگرافی آریتمی های بررسی شده در این تحقیق. الف - بلوک شاخهای راست. ب - بلوک شاخهای چپ. ج - ضربان زودرس بطنی. د - پس ریتم. ه - ضربان سینوسی نرمال ..... ۵۲

شکل ۴-۸: سری زمانی ناشی از قلب یک انسان که در آن فاصله ی R-R نشان داده شده است. ..... ۵۳

شکل ۴-۹: پیش بینی تک گام سری زمانی قلب توسط روش فازی حافظه دار ..... ۵۴

شکل ۴-۱۰: پیش بینی تک گام سری زمانی قلب توسط روش فازی برخط ..... ۵۴

شکل ۴-۱۱: خطای حاصل از پیش بینی تک گام سری زمانی قلب توسط روش فازی برخط ..... ۵۵

شکل ۴-۱۲: پیش بینی تک گام سری زمانی HRV توسط روش فازی حافظه دار ..... ۵۶

شکل ۴-۱۳: پیش بینی تک گام سری زمانی HRV توسط روش فازی برخط ..... ۵۷

شکل ۴-۱۴: خطای حاصل از پیش بینی تک گام سری زمانی HRV توسط روش فازی برخط ..... ۵۷

شکل ۴-۱۵: پیش بینی بلند مدت سری زمانی ECG توسط روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده ..... ۵۸

شکل ۴-۱۶: پیش بینی بلند مدت سری زمانی ECG توسط روش نزدیکترین همسایه اصلاح شده به کمک تبدیل موجک ..... ۵۸

شکل ۴-۱۷: پیش بینی بلند مدت سری زمانی HRV توسط روش نزدیکترین همسایه توسعه یافته ..... ۵۹

شکل ۴-۱۸: پیش بینی بلند مدت سری زمانی HRV توسط روش نزدیکترین همسایه توسعه یافته به کمک تبدیل موجک ..... ۶۰

# فصل ١ - مقدمه

## فصل ۱ - مقدمه

### ۱-۱ - سری زمانی

سری زمانی یک سلسله از اعداد است که به وسیله ی نمونه برداری منظم از خروجی مشاهده شده ی یک سیستم بدست می آید و به عنوان یک منبع مفید برای کشف و مطالعه ی رفتار یک سیستم، اعم از تصادفی، آشوبی<sup>۱</sup> و قطعی<sup>۲</sup> محسوب می شود [۱]. از میان انواع گوناگون سری های زمانی، سری های آشوبی به سری هایی اطلاق می شود که اغلب در پدیده های طبیعی یافت می شوند [۲].

### ۲-۱ - سری زمانی آشوبی

تحوّل زمانی نامنظم و غیرقابل پیش بینی برخی از سیستم های غیرخطی آشوب نامیده می شود. ویژگی اصلی آشوب این است که چنین سیستم هایی رفتار قبلی خود را حتی به صورت تقریبی نیز تکرار نمی کنند<sup>۳</sup>. از دیگر ویژگی های چنین سیستم هایی می توان وابستگی شدید به شرایط اولیه و محدود بودن<sup>۴</sup> (به این معنی که هیچ کدام از متغیرهای حالت در یک سیستم آشوبی به سمت بی نهایت میل نخواهند کرد) را نام برد. روش های گوناگونی برای اثبات آشوبی بودن یک سری زمانی وجود دارد که عبارتند از: الف- بزرگترین نمای لیاپانوف<sup>۵</sup> مثبت: به عنوان معیاری برای نشان دادن حساسیت شدید سیستم های آشوبی به شرایط اولیه یا اثر پروانه ای<sup>۶</sup> بکار می رود. [۳]. ب- طیف فرکانسی گسترده و شبیه به نویز: البته از آنجا که طیف فرکانسی سیگنال های آشوبی و نویزی در مقایسه با سیگنال های دوره ای گسترده بوده لذا نمی توان تنها از طریق مشاهده ی طیف فرکانسی در مورد آشوبی بودن و یا نویزی بودن سیگنال مولد طیف قضاوت نمود. [۴] ج- ابعاد غیر صحیح (فراکتالی): داشتن بعد غیر صحیح نشان دهنده ی حضور آشوب در سیستم مورد بررسی و شگفت بودن رباینده ی<sup>۷</sup> آن است. [۵] یک نمونه از سیستم های آشوبی سیستمی است که توسط لورنز<sup>۸</sup> برای بیان رابطه میان تغییرات دما و حرکت همرفتی توسط دستگاه معادلات (۱-۱) بیان شده است.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\sigma x + \sigma y \\ \frac{dy}{dt} &= -xy + rx - y \end{aligned} \quad (1-1)$$

<sup>1</sup> Chaotic

<sup>2</sup> Deterministic

<sup>3</sup> Aperiodic

<sup>4</sup> Bounded

<sup>5</sup> Largest Lyapunov Exponent

<sup>6</sup> Butterfly Effect

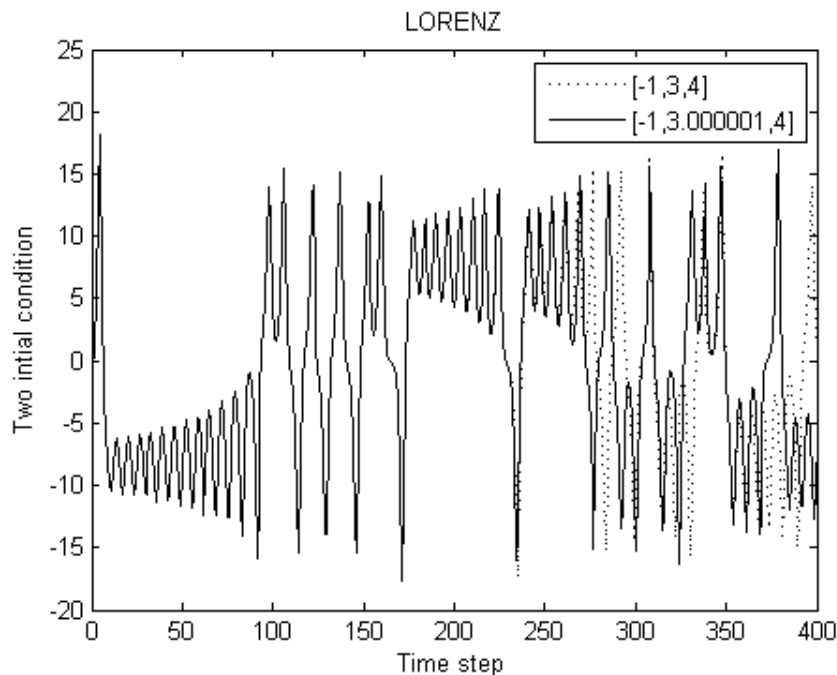
<sup>7</sup> Strange Attractor

<sup>8</sup> Lorenz

$$\frac{dz}{dt} = xy - bz$$

### ۱-۲-۱- بررسی اثر حساسیت :

دستگاه معادلات (۱-۱) را دو بار با دو شرایط اولیّه‌ی بسیار نزدیک به هم [۱۳و۴] و [۴و۳/۰۰۰۰۰۱] حل شده که نتایج آن در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ سری زمانی لورنز به ازای دو شرایط اولیه‌ی بسیار نزدیک به هم

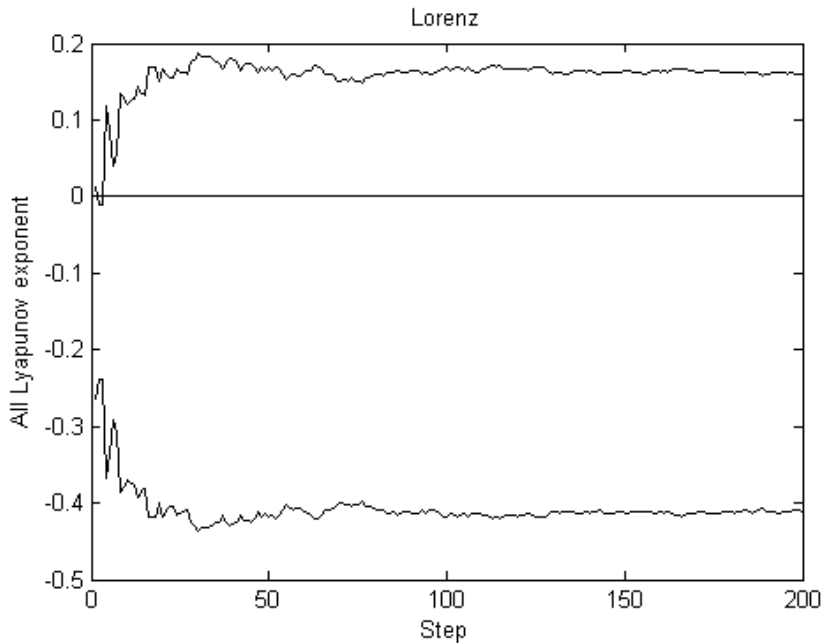
همان‌طور که در شکل (۱-۱) مشاهده شد با وجود شرایط اولیّه‌ی بسیار نزدیک به هم که می‌توان آن را در اثر خطای اندازه‌گیری دانست، دو سری زمانی بعد از گذشت زمان اندکی به طور کلی از یکدیگر جدا شده و مسیرهای متفاوتی را پیموده‌اند.

بنابراین وابستگی شدید به شرایط اولیّه را می‌توان یکی از ویژگی‌های سری زمانی آشوبی دانست. وابستگی به شرایط اولیه مشکلات قابل توجهی را برای محققان در این زمینه فراهم کرده است. اولین کسی که متوجه چنین ویژگی در سیستم‌های آشوبی شد ریاضیدان و منجم برجسته، هنری پوانکاره<sup>۱</sup> بود که در حال مطالعه‌ی سیستم‌های دینامیکی بود. او این پدیده را چنین توصیف می‌کند "ممکن است اختلاف اندکی در شرایط اولیّه باعث تفاوت بسیار بزرگی در پدیده‌های نهایی شود. همچنین یک خطای کوچک در حالت قبلی، خطای بزرگی در حالت بعدی را بوجود می‌آورد" [۴].

<sup>۱</sup> Henri Poincare

### ۲-۲-۱- بررسی اثر حضور نمای لیاپانوف مثبت:

وابستگی بسیار شدید سیستم‌های آشوبی به شرایط اولیه را در نظریه‌ی آشوب توسط معیاری به نام نمای لیاپانوف مثبت معین می‌شود [۶]. نماهای لیاپانوف سیستم آشوبی لورنز در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.

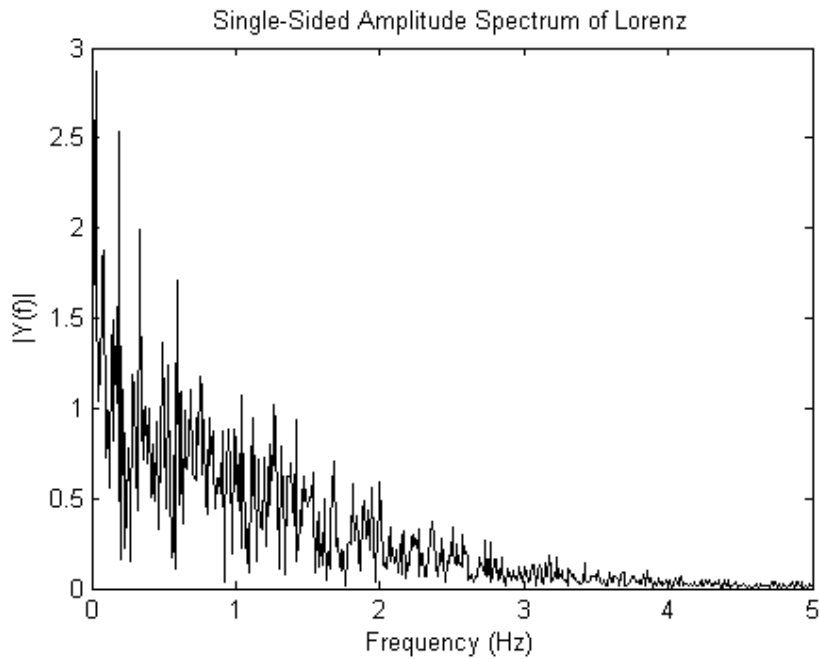


شکل ۲-۱: کلیه ی نماهای لیاپانوف مربوط به سیستم لورنز

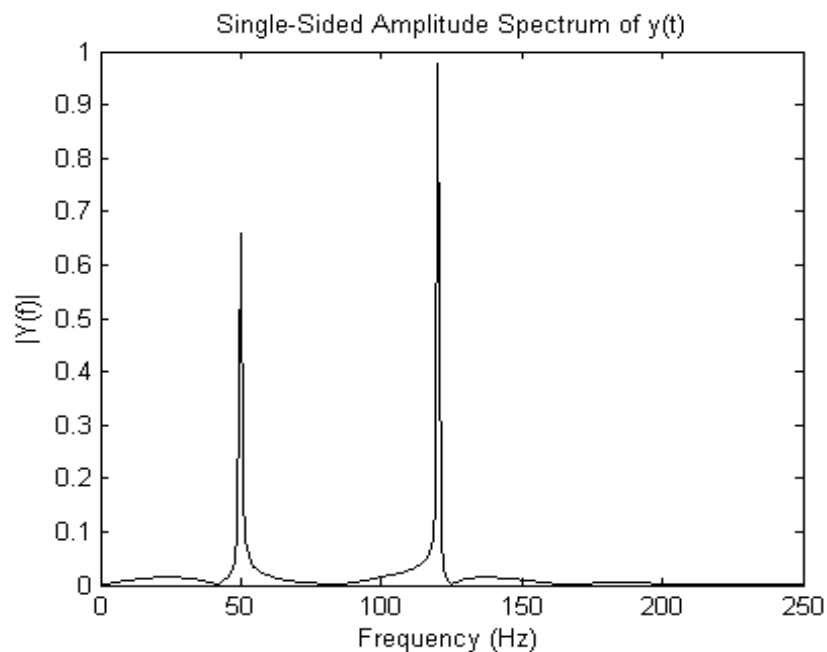
همانطور که در شکل (۲-۱) مشاهده شد از سه نمای لیاپانوف مربوط به سیستم آشوبی لورنز، یکی از نماهای لیاپانوف در تمام گام‌ها مثبت بوده که حاکی از آشوبی بودن سیستم مورد بررسی است. روش‌های گوناگونی برای محاسبه‌ی تمام نماهای لیاپانوف وجود دارند که برای رعایت اختصار و خلاصه-گویی از پرداختن به آن‌ها صرف‌نظر شده است [۷].

### ۱-۲-۱- تحلیل طیفی :

طیف شدت دوسری زمانی آشوبی و پریودیک در اشکال زیر نشان داده شده است.



شکل ۳-۱: طیف شدت متناظر با سری زمانی لورنز



شکل ۴-۱: طیف شدت مربوط تابع  $y(t) = \sin(50\pi t) + \sin(120\pi t)$

طیف شدت سری زمانی لورنز در شکل (۳-۱) و تابع  $y(t) = \sin(50\pi t) + \sin(120\pi t)$  در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. با توجه به ماهیت آشوبی سری زمانی لورنز همانطور که انتظار می رفت، طیف آن گسترده و شبیه نویز بوده و فرکانس غالبی در آن مشاهده نمی شود اما در مورد تابع سینوسی، طیف فرکانسی بصورت سوزنی بوده و فرکانس های غالب در آن براحتی قابل تشخیص است.

### ۱-۳- پیش‌بینی سری‌های زمانی:

سقوط بازار سهام آمریکا در اکتبر سال ۱۹۸۷ و عوامل دیگر باعث شد که تحقیقات در مباحث مالی سمت و سوی تازه‌ای بیابد. نتایج حاصل از این تحقیقات در قالب سمینارها و سمپوزیوم‌های متعدد در کشورهای دارای سرمایه‌ی پیشرفته منتشر و اعتبار تئوری‌های دهه‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۰ را که مبتنی بر سیستم‌های خطی و توزیع نرمال بودند، مورد تردید قرار داد.

از آنجا که بازارهای سرمایه دارای نظم مشخصی نمی‌باشند، لذا استفاده از ریاضیات پیچیده در سیستم‌های غیرخطی و دینامیکی می‌تواند مدل‌هایی را ایجاد کند که نظریه‌های گذشته را منسوخ سازد. نتایجی که تاکنون از این رهگذر بدست آمده است به امکان پیش‌بینی قیمت تحت شرایطی اذعان دارد [۸].

پیش‌بینی سری‌های زمانی عبارتند از پیش‌بینی رفتار سیستم در آینده، بر اساس اطلاعات حاصل از زمان حال و گذشته‌ی سیستم که کاربردهای فراوانی در اغلب زمینه‌های علمی از جمله علوم مهندسی، پزشکی، اقتصادی و ... دارد [۱۰ و ۱۲]. پیش‌بینی قیمت فولاد [۹] و همچنین پیش‌بینی قیمت سهام در بازار بورس [۱۰] را می‌توان به عنوان مثالهایی از کاربرد پیش‌بینی سری‌های زمانی نام برد. ماهیت آشوبی نوسانات قیمت‌ها در بازارهای سهام و عوامل دیگر سبب شد که از سال ۱۹۸۰ پیش‌بینی سری‌های زمانی آشوبی به یکی از موضوعات مورد علاقه‌ی محققان مبدل گردد [۱۱].

### ۱-۴- بازسازی فضای فاز

در پیش‌بینی سری‌های زمانی حالاتی اتفاق می‌افتند که در آن‌ها معادلات سیستم در دسترس نبوده و یا این‌که به‌دست آوردن معادلات سیستم بسیار دشوار و یا غیر ممکن است. در چنین حالاتی اطلاعات ما از سیستم مورد بررسی تنها محدود به یک سری زمانی تجربی است که از خروجی مشاهده شده‌ی سیستم به‌دست می‌آید. سری زمانی ناشی از لکه‌های خورشیدی را می‌توان به عنوان نمونه‌ای از چنین سری‌هایی برشمرد. یک سری زمانی تجربی از تمام متغیرهای دینامیکی موجود تأثیر پذیرفته و بنابراین تاریخچه‌ی نسبتاً کاملی از اطلاعات را دربر دارد [۴]. در سال ۱۹۸۰ پاکارد<sup>۱</sup> و همکاران [۱۲] روشی ارائه کردند که در آن بدون مراجعه به سایر متغیرهای فیزیکی و تنها با استفاده از یک سری زمانی امکان حصول به دینامیک مسئله را فراهم می‌ساخت. این روش در سال ۱۹۸۱ با مطرح شدن مبانی ریاضی دقیقی برای آن به توسط تیکن<sup>۲</sup> و مانه<sup>۳</sup> به تکامل رسید [۱۳ و ۱۴]. بر اساس این روش در بازسازی رباینده از یک سری زمانی فقط نیاز به تولید متغیرهای اضافی است. برای بعضی از سیستم‌های تجربی با درجه‌ی کم آزادی مؤثر می‌توان با تعریف یک فضای فاز با بعد کم دینامیک را در یک ساختار هندسی درون آن فضا توصیف کرد. این مجموعه‌ی هندسی جاسازی شده جاذب بازسازی شده نام دارد و معمولاً از لحاظ هندسی، جاذب بازسازی شده با جاذب اصلی هم‌ارز است. همچنین ویژگی‌های آشوبی رباینده‌ی اصلی و بازسازی شده همانند نمای لیاپانوف، در صورت استفاده از پارامترهای صحیح بازسازی تقریباً

<sup>۱</sup> Pakard

<sup>۲</sup> Taken

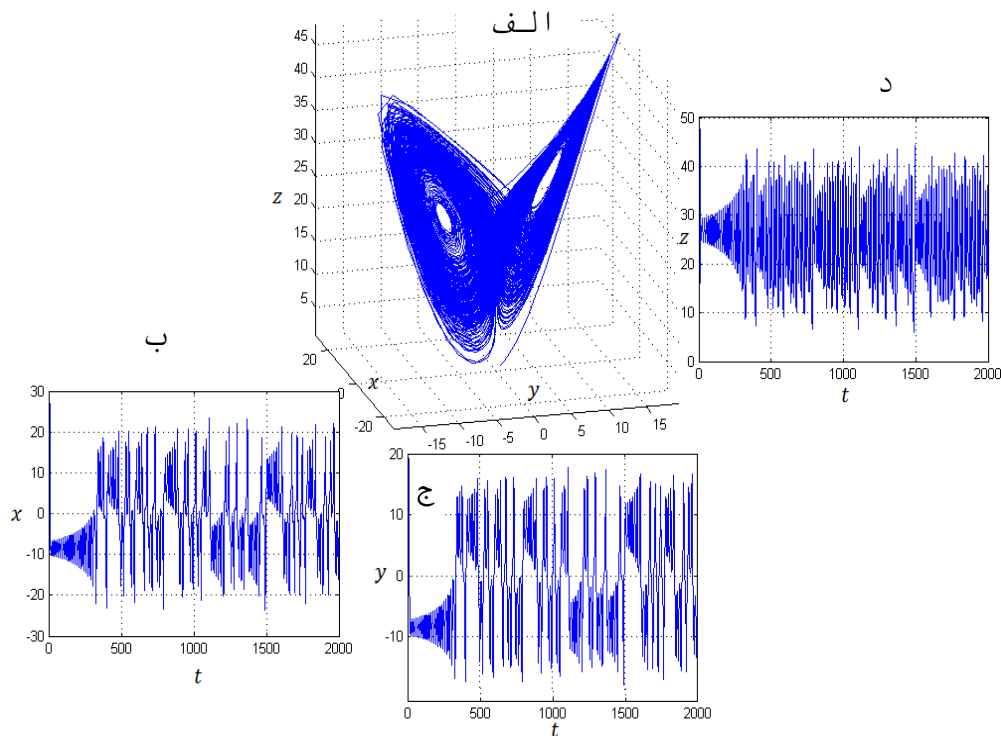
<sup>۳</sup> Mane



یکسان هستند. هنگام مواجهه با یک سری زمانی با دینامیک ناشناخته، بعد فضای فاز معمولاً از پیش معلوم نیست. برای این که رباينده قابل بازسازی باشد، بعد باید نسبتاً بزرگ بوده و برای انتخاب محورهای مختصات نیز باید دنبال اطلاعات نسبتاً مستقل بود. استفاده از مشتق و همچنین تأخیر زمانی می‌توانند به عنوان دو گزینه‌ی مناسب برای انتخاب محورهای مختصات در فضای بازسازی شده محسوب شوند. اما به دلیل حضور نویز در سری‌های زمانی تجربی تأخیر زمانی مناسب‌تر به نظر می‌رسد. برای مثال در سری زمانی  $X(t)$  بردار داده در فضای فاز بازسازی شده به صورت زیر نشان داده می‌شود که در آن  $m$  بعد جاسازی و  $T$  تأخیر زمانی هستند.

$$\{x(t), x(t - T), x(t - 2T), \dots, x(t - mT)\} \quad (2-1)$$

بمنظور روشن‌تر شدن موضوع، بازسازی فضای فاز، در غالب یک مثال توضیح داده می‌شود. در شکل زیر جاذب لورنز در فضای فاز سه بعدی نشان داده شده است. همانطور که می‌دانیم می‌توان مولفه‌ی هر یک از محورهای مختصات را نیز بر حسب مولفه‌ی زمانی نشان داد که این مولفه در آرایش فضای فاز سه بعدی محذوف می‌باشد.



شکل ۱-۵: جاذب آشوبی لورنز و مولفه‌های آن بر حسب زمان - الف: جاذب لورنز، ب: مولفه X بر حسب زمان، مولفه Y بر حسب زمان، د: مولفه Z بر حسب زمان

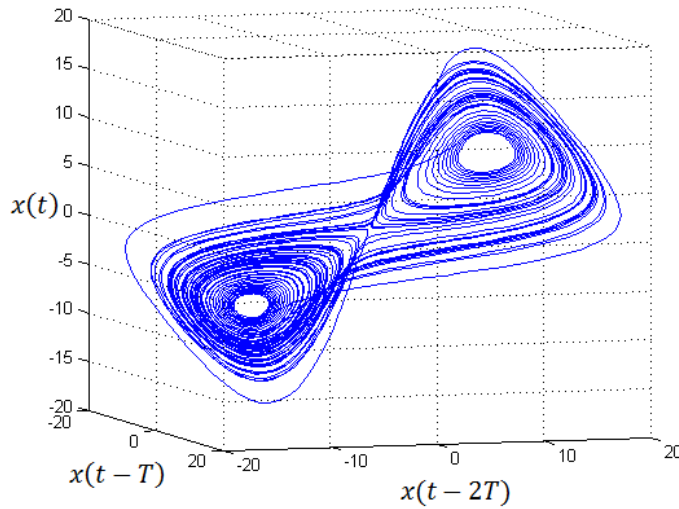
اکنون شرایطی را در نظر بگیرید که در آن تنها یکی از مولفه‌های زمانی در دسترس باشند و بخواهیم جاذب سه بعدی را تنها با استفاده از آن بازسازی نماییم. بدیهی است که در چنین شرایطی تنها نیاز به تولید متغیرهای اضافی داریم. اما مسائلی بعد از احساس نیاز به تولید متغیرهای اضافی مطرح می‌شود عبارتند از:

۱- چگونگی تولید متغیرهای اضافی

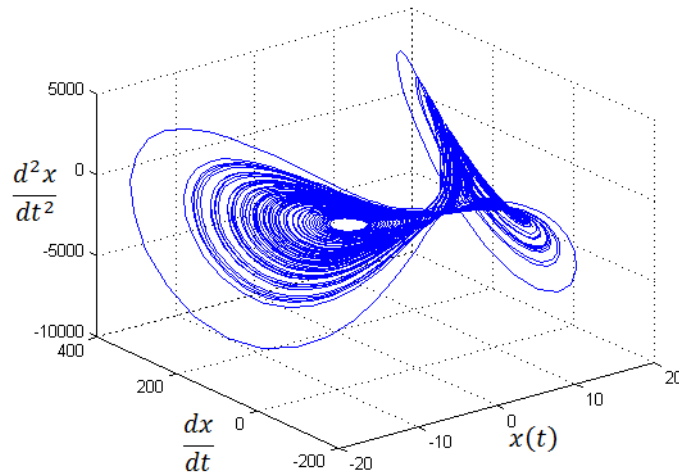
۲- تعداد متغیرهای اضافی

۳- استقلال متغیرها نسبت به هم

دو رهیافت موثر در زمینه تولید متغیرهای اضافی که دارای استقلال خطی نسبت به هم نیز باشند عبارتند از: استفاده از مشتق و استفاده از تاخیر. البته با توجه به عامل نویز که در سری‌های زمانی تجربی، استفاده از روش‌های مبتنی بر تاخیر مناسب‌تر به نظر می‌رسد.



شکل ۱-۶: بازسازی جاذب آشوبی لورنز توسط مختصات تاخیری



شکل ۱-۷: بازسازی جاذب آشوبی لورنز توسط مختصات مشتقی

با توجه به کران‌ها در جاذب اصلی و دو نمونه جاذب بازسازی شده، که در شکل‌های ۱-۶ و ۱-۷ نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که استفاده از مختصات تاخیر گزینه بهتری محسوب می‌شود. همانطور که عنوان شد، نظریه بازسازی فضای فاز، تنها وجود بعد و تاخیر مناسب را به منظور بازسازی فضای فاز تضمین می‌کند و از ارائه‌ی روشی مدون که برای تمام سری‌های زمانی بعد و تاخیر مناسب

بیابد، ناتوان است. لذا از سال ۱۹۸۱ روش‌های گوناگونی برای تعیین بعد جاسازی و تأخیر زمانی پیش-نهاد شده‌اند که در بخش‌های بعد به تفصیل به آن پرداخته می‌شود.

#### ۱-۴-۱- تأخیر زمانی

انتخاب تأخیر زمانی مناسب در بازسازی رباینده از اهمیت بسزایی برخوردار است. اگر  $T$  بسیار کوچک باشد مختصات مربوط به نقاط در فضای فاز بازسازی شده تقریباً در امتداد قطر قرار می‌گیرند و در این-صورت بازسازی بی‌فایده است. به عبارت دیگر در چنین حالاتی فاصله‌ی نقاط نمونه‌برداری شده از سری زمانی  $w(t)$ ، به اندازه‌ای کم است که نمی‌توانند اطلاعاتی راجع به دینامیک مسئله تولید نماید. از طرف دیگر انتخاب مقدار بزرگ  $T$  نیز به نوبه‌ی خود مشکلات فراوانی را تولید می‌کند. می‌دانیم که همبستگی میان حالت‌های دینامیکی در یک سیستم آشوبناک برای مدت کوتاهی دوام می‌آورد که عمر آن به نمای لیاپانوف مثبت بستگی دارد. لذا با انتخاب مقدار بزرگ برای  $T$ ، کشیدگی‌ها<sup>۱</sup> و تاخوردگی‌های فراوانی در سیستم اتفاق می‌افتد که منجر به هیچ رابطه‌ی منطقی میان داده‌های مورد استفاده (برای تشکیل فضای فاز) نمی‌شود. بعبارت دیگر انتخاب بزرگ  $T$  سبب ایجاد ناهمبستگی میان نقاط در فضای فاز بازسازی شده خواهد شد.

روش‌های گوناگونی برای انتخاب تأخیر زمانی در مراجع ذکر شده است که در ادامه به چند نمونه از آن‌ها اشاره خواهیم کرد.

۱ - در بررسی سیستم‌های آشوبی شرایطی اتفاق می‌افتد که در آن سری‌های زمانی حاصل، تقریباً دوره‌ای به نظر می‌رسند. مشاهده‌ی چنین حالتی خود مبتنی بر حضور یک دوره‌ی تناوب غالب در سری زمانی مورد بررسی است. در چنین حالاتی مقدار قابل مقایسه اما تا اندازه‌ای کوچکتر از دوره‌ی تناوب تقریبی مشاهده شده را به‌عنوان مقدار تأخیر زمانی انتخاب می‌کنند [۱۵].

۲ - اگر همانند روش اول فرکانس غالبی وجود نداشته باشد، از روش پیچیده‌تری برای انتخاب مقدار تأخیر زمانی استفاده می‌شود. یک روش مفید در این حال استفاده از همبستگی میان داده‌های متوالی بر حسب فاصله‌ی زمانی بین آن‌ها است. اگر تابع همبستگی بصورت زیر تعریف شود:

$$f(T) = \frac{\langle w(t) \cdot w(t+T) \rangle_t}{\langle w(t)^2 \rangle_t} \quad (۳-۱)$$

که در آن  $\langle \rangle_t$  میانگین تمام نقطه‌های یک سری زمانی را نشان می‌دهد. اگر نمودار تغییرات  $f(T)$  را بر حسب  $T$  رسم شود،  $T_0$  که در آن اولین عبور  $f(T)$  از صفر رخ می‌دهد، به‌عنوان معیاری برای انتخاب تأخیر استفاده می‌شود [۱۶].

<sup>۱</sup> Stretching

<sup>۲</sup> Folding

۳- روش دیگری برای انتخاب مقدار تأخیر در سال ۱۹۸۶ توسط فریز<sup>۱</sup> و سوینی<sup>۲</sup> مطرح شده که در آن از اطلاعات دوجانبه<sup>۳</sup> مطابق رابطه‌ی زیر استفاده شده است.

$$I(T) = \sum_t p(w(t), w(t+T)) \cdot \log \frac{p(w(t) \cdot w(t+T))}{p(w(t)) \cdot p(w(t+T))} \quad (۴-۱)$$

که در رابطه‌ی قبل  $p(w(t))$  و  $p(w(t+T))$  توزیع احتمال جداگانه‌ی نقطه‌های داده‌ی مجاور و  $p(w(t) \cdot w(t+T))$  توزیع احتمال مشترک نقاط داده‌ی مجاور است. لازم به ذکر است که اطلاعات دوجانبه معیاری از این احتمال است که نقطه‌های داده‌ی مجاور  $w(t)$  و  $w(t+T)$  به لحاظ آماری مستقل نباشند [۱۷].

۴- از آنجا که قاعده‌ی کلی برای انتخاب  $T$  در تمام موارد وجود ندارد گاهی  $T$  را طوری انتخاب می‌کنند که به نتیجه‌ی رضایت‌بخشی، بسته به کاربرد مورد نظر، برسند [۱۸].

#### ۱-۴-۲- بعد جاسازی

در بازسازی یک رباینده از یک سری زمانی تجربی با دینامیک ناشناخته، بعد رباینده نامشخص است. برای نمایش کامل دینامیک، بازسازی باید در فضایی که بعد آن به اندازه‌ی کافی بزرگ است صورت پذیرد. بنا بر قضیه‌ی تیکن، هرگاه بعد فراکتالی جاذب اصلی مولد سری زمانی  $d$  و بعد جاسازی  $m$  باشد آن‌گاه برقراری شرایط  $m > 2d + 1$  وضوح کامل جاذب را با تمام ویژگی‌ها در فضای فاز بازسازی شده تضمین می‌کند. البته اشکالاتی نیز به قضیه‌ی مورد نظر وارد است که عبارتند از:

الف- در شرایطی که با سری‌های زمانی تجربی مواجه هستیم بعد جاذب اصلی در دسترس نیست.  
ب- در سال ۱۹۹۳ دینگ و همکاران نشان دادند که در محاسبه‌ی بعد جاسازی برای یک سری زمانی بلند با نویز کم کافی است که بعد فضای فاز بزرگتر از بعد رباینده باشد و لذا نیازی برقراری شرایط سخت تیکن نیست [۱۹].

روش‌های گوناگونی برای تعیین مقدار بعد جاسازی در منابع گوناگون معرفی شده‌اند که در زیر به بعضی از آن‌ها اشاره می‌کنیم.

۱- در این روش ابتدا سری زمانی مورد بررسی با  $N$  دایره به شعاع  $r$  کاملاً پوشانده می‌شود آن‌گاه بعد فراکتالی توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$d = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log(N(L))}{\log\left(\frac{1}{2r}\right)} \quad (۵-۱)$$

که در رابطه‌ی قبل  $N(L)$  تعداد دایره‌های لازم به شعاع  $r$  برای پوشاندن سری زمانی مورد بررسی است. بنا بر مطالب عنوان شده در قبل کافی است بعد جاسازی از  $d$  بزرگتر باشد [۱۹].

<sup>۱</sup> Fraser

<sup>۲</sup> Swinney

<sup>۳</sup> Mutual Information