



تن آدمی شریف است، به جان آدمیت

نه همین لباس زیباست، نشان آدمیت

رسد آدمی به جایی، که به جز خدا نبیند

بنگر که تا چه حد است، مکان آدمیت



دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

عنوان رساله:

پیش‌بینی سری زمانی آشوبی با بازسازی فضای فاز به کمک ویژگی‌های فرکانسی

دانشجو: امین زارعی

استاد راهنما:

دکتر حسین قلی زاده نرم

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۹۲

(( آدمی را حق تعالی هر لحظه از نو می آفریند و در باطن او چیزی دیگر، تازه تازه، می فرستد که اول به دوم نمی ماند و دوم به سوم. الا او از خویشتن غافل است و خود را نمی شناسد... ))

« فیه مافیه »

تقدیم به

اسطوره‌های جاودان زندگی

پدر مهربان

و مادر فداکارم

## تقدیر و تشکر

با نهایت تقدیر و تشکر از استاد محترم جناب آقای دکتر قلی زاده نرم که با راهنمایی‌های مفید و ارزنده‌ی خود این جانب را مورد لطف و عنایت خویش قرار دادند. تکمیل این اثر بدون کمک و زحمات ایشان به هیچ عنوان مقدور نبود. همچنین لازم است از اساتید محترمی که کار داوری این پایان‌نامه را بر عهده داشتند، صمیمانه تشکر نمایم.

## تعهد نامه

اینجانب ..... دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته  
..... دانشکده ..... دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه  
..... تحت راهنمایی  
..... متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « **Shahrood University of Technology** » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت‌های آن‌ها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده:

در این پایان‌نامه، پیش‌بینی سری زمانی آشوبی به کمک بازسازی فضای فاز با استفاده از معادلات مرکز جرم مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای بازسازی فضای فاز از فیلترهای فرکانسی غیرخطی استفاده می‌شود که تعیین مناسب این فیلترها یک بازسازی فضای فاز مفید را به همراه خواهد داشت. به کمک فضای فاز بازسازی شده و استفاده از نزدیک‌ترین همسایه‌ها، مسیر همسایه‌ی معادل و مسیر کمی تشکیل شده، سپس با استفاده از معادلات مرکز جرم دو روش ایستا و پویا برای پیش‌بینی سری زمانی آشوبی پیشنهاد می‌شود. در حالت ایستا معادلات به صورت غیر بازگشتی و در حالت پویا به صورت بازگشتی عمل پیش‌بینی را انجام می‌دهند. معادلات غیرخطی و متغیر با زمان گسسته دارای ساختاری منسجم هستند که همزمان با ردیابی مسیر همسایه‌ی معادل، پیش‌بینی مسیر اصلی و کمی را میسر می‌سازند. یکی از ویژگی‌های روش پیشنهادی معادلات مرکز جرم بازگشتی، قابلیت دو منظوره‌ی پیش‌بینی کوتاه مدت و بلند مدت سری زمانی آشوبی است. مزیت روش پیشنهادی آن است که با تعریف مناسب معادلات، می‌توان خطای پیش‌بینی را تا آن‌جا که نیاز باشد کاهش داد.

کلمات کلیدی: سری زمانی آشوبی، بازسازی فضای فاز، نزدیک‌ترین همسایه، مسیرهای کمی،

معادلات مرکز جرم بازگشتی

۱	فصل اول
۲	۱-۱ پیشگفتار
۳	۲-۱ ساختار پایان نامه
۵	فصل دوم
۶	۱-۲ مقدمه
۶	۲-۲ پدیده‌ی آشوب
۹	۳-۲ آشوب در طبیعت
۱۰	۴-۲ تشخیص آشوب و تفاوت آن با سایر پدیده‌ها
۱۰	۱-۴-۲ آزمون بعد همبستگی
۱۱	۵-۲ نمایی لیاپانوف
۱۳	۶-۲ حساسیت بسیار زیاد به شرایط اولیه
۱۴	۷-۲ سیستم‌های آشوبی و سری‌های زمانی آشوبی
۱۴	۸-۲ سیستم آشوبی راسلر
۱۵	۹-۲ سیستم آشوبی جنسیو-تسی
۱۶	۱۰-۲ سیستم آشوبی آرنودو
۱۷	۱۱-۲ بازسازی فضای فاز
۲۲	۱۲-۲ نزدیک‌ترین همسایه‌ها و پیش‌بینی سری زمانی آشوبی
۲۳	۱۳-۲ شبکه‌ی عصبی بازگشتی و پیش‌بینی سری زمانی آشوبی
۲۵	فصل سوم
۲۶	۱-۳ مقدمه
۲۶	۲-۳ ویونت و کاهش نویز
۲۷	۳-۳ شبکه‌ی عصبی - موجک تک بعدی
۲۹	۴-۳ شبکه‌ی عصبی - موجک چند بعدی
۳۰	۵-۳ الگوریتم آموزش
۳۱	۶-۳ الگوریتم گرادیان تصادفی برای ویونت
۳۱	۷-۳ بازسازی فضای فاز به کمک ویژگی‌های فرکانسی
۳۳	۸-۳ مسیравلی، مسیر همسایه و مسیر کمکی
۳۴	۹-۳ تشکیل مسیر همسایه
۳۶	۱۰-۳ مرکز جرم ذرات



۳۷	تشکیل مسیر همسایه‌ی معادل	۱۱-۳
۳۸	تشکیل مسیر کمکی	۱۲-۳
۳۹	پیش‌بینی به کمک معادلات مرکز جرم غیربازگشتی	۱۳-۳
۴۲	پیش‌بینی به کمک معادلات مرکز جرم بازگشتی	۱۴-۳
۴۹	اثبات همگرایی	۱۵-۳

## ۵۳

### فصل چهارم

۵۴	مقدمه	۱-۴
۵۴	پیش‌بینی به کمک معادلات مرکز جرم غیر بازگشتی	۲-۴
۵۴	سری زمانی لورنز	۱-۲-۴
۵۷	مقایسه با شبکه‌ی عصبی	۲-۲-۴
۵۸	سری زمانی راسلر	۳-۲-۴
۶۰	مقایسه با شبکه‌ی عصبی	۴-۲-۴
۶۱	پیش‌بینی به کمک معادلات مرکز جرم بازگشتی	۳-۴
۶۲	سری زمانی لورنز	۱-۳-۴
۶۴	مقایسه با شبکه‌ی عصبی	۲-۳-۴
۶۵	سری زمانی آرنئودو	۳-۳-۴
۶۷	مقایسه با شبکه‌ی عصبی	۴-۳-۴
۶۸	آنالیز حساسیت	۴-۴

## ۷۱

### فصل پنجم

۷۲	نتیجه‌گیری	۱-۵
۷۲	پیشنهادات	۲-۵

## ۷۴

### منابع و مراجع

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: نمود واقعی دینامیک لورنز ..... ۷
- شکل ۲-۲: جاذب آشوبی لورنز ..... ۸
- شکل ۳-۲: مدار چوآ ..... ۹
- شکل ۴-۲: نمایی‌های لیاپانوفی سیستم لورنز ..... ۱۳
- شکل ۵-۲: حساسیت به شرایط اولیه ..... ۱۴
- شکل ۶-۲: سیستم آشوبی راسلر ..... ۱۵
- شکل ۷-۲: سری زمانی آشوبی راسلر ..... ۱۵
- شکل ۸-۲: سیستم آشوبی جنسیو - تسی ..... ۱۶
- شکل ۹-۲: سری زمانی آشوبی جنسیو - تسی ..... ۱۶
- شکل ۱۰-۲: سیستم آشوبی آرنئودو ..... ۱۷
- شکل ۱۱-۲: سری زمانی آشوبی آرنئودو ..... ۱۷
- شکل ۱۲-۲: بازسازی فضای فاز برای سری زمانی لورنز با یک زمان تأخیر مناسب ( $\tau = 50$ ) ..... ۲۱
- شکل ۱۳-۲: بازسازی فضای فاز برای سری زمانی لورنز با یک زمان تأخیر خیلی کوچک ( $\tau = 5$ ) ..... ۲۱
- شکل ۱۴-۲: بازسازی فضای فاز برای سری زمانی لورنز با یک زمان تأخیر خیلی بزرگ ( $\tau = 200$ ) ..... ۲۱
- شکل ۱۵-۲: پیش‌بینی به کمک نزدیک‌ترین همسایه ..... ۲۲
- شکل ۱۶-۲: پیش‌بینی به کمک نزدیک‌ترین همسایه برای سری زمانی لورنز ..... ۲۳
- شکل ۱۷-۲: شبکه‌ی عصبی بازگشتی ..... ۲۴
- شکل ۱۸-۲: پیش‌بینی به کمک شبکه‌ی عصبی بازگشتی برای سری زمانی جنسیو-تسی ..... ۲۴
- شکل ۱-۳: شبکه‌ی عصبی - موجک ..... ۲۷
- شکل ۲-۳: شبکه‌ی عصبی - موجک تک بعدی ..... ۲۸
- شکل ۳-۳: شبکه‌ی عصبی - موجک تک بعدی ..... ۲۸
- شکل ۴-۳: شبکه‌ی عصبی - موجک چند بعدی ..... ۲۹
- شکل ۵-۳: فضای فاز سیستم لورنز ..... ۳۳
- شکل ۶-۳: فضای فاز بازسازی شده‌ی سیستم لورنز به کمک فیلترهای غیرخطی ..... ۳۳
- شکل ۷-۳: چگونگی تشکیل مسیر همسایه با یک نقطه‌ی همسایگی برای هر نقطه از مسیравصلی ..... ۳۵

- شکل ۳-۸ : چگونگی تشکیل دسته مسیر همسایه با ۲ نقطه‌ی همسایگی برای هر نقطه از مسیر اصلی ..... ۳۶
- شکل ۳-۹ : چگونگی تشکیل دسته مسیر همسایه با نقاط همسایگی متغیر برای هر نقطه از مسیر اصلی ..... ۳۶
- شکل ۳-۱۰ : چگونگی تشکیل مسیر همسایه‌ی معادل از دسته مسیرهای همسایه ..... ۳۷
- شکل ۳-۱۱ : مسیر اصلی، مسیر همسایه و مسیر کمکی ..... ۳۸
- شکل ۳-۱۲ : چگونگی تشکیل مسیر کمکی ..... ۳۹
- شکل ۳-۱۳ : نقاط روی مسیره ..... ۴۰
- شکل ۳-۱۴ : پیش‌بینی نقطه‌ی  $S_a(k+1)$  و تصحیح نقطه‌ی  $S_o(k+1)$  توسط جرم‌ها ..... ۴۱
- شکل ۳-۱۵ : چگونگی تشکیل مسیره برای تخمین جرم  $m_2$  ..... ۴۲
- شکل ۳-۱۶ : نقاط روی مسیره ..... ۴۳
- شکل ۳-۱۷ : حرکت نقاط و مرکز جرم آن‌ها ..... ۴۴
- شکل ۳-۱۸ : قسمتی از سری زمانی و پیش‌بینی آن ..... ۴۵
- شکل ۴-۱ : جرم  $m_2$  ..... ۵۴
- شکل ۴-۲ : جرم  $m_2$  ..... ۵۵
- شکل ۴-۳ : تخمین جرم  $m_2$  ..... ۵۵
- شکل ۴-۴ : ضرایب تصحیح جهت پیش‌بینی ..... ۵۶
- شکل ۴-۵ : پیش‌بینی سری زمانی لورنز ..... ۵۶
- شکل ۴-۶ : خطای پیش‌بینی ..... ۵۶
- شکل ۴-۷ : تصحیح جرم  $m_2$  ..... ۵۷
- شکل ۴-۸ : پیش‌بینی سری زمانی لورنز به کمک شبکه‌ی عصبی بازگشتی ..... ۵۷
- شکل ۴-۹ : خطای پیش‌بینی به کمک شبکه‌ی عصبی بازگشتی ..... ۵۷
- شکل ۴-۱۰ : خطای پیش‌بینی به کمک معادلات مرکز جرم غیر بازگشتی ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۱ : تخمین جرم  $m_2$  ..... ۵۸
- شکل ۴-۱۲ : ضرایب تصحیح جهت پیش‌بینی ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۳ : پیش‌بینی سری زمانی راسلر ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۴ : خطای پیش‌بینی ..... ۵۹
- شکل ۴-۱۵ : تصحیح جرم  $m_2$  ..... ۶۰

- شکل ۴-۱۶ : پیش‌بینی سری زمانی راسلر به کمک شبکه‌ی عصبی بازگشتی ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۷ : خطای پیش‌بینی به کمک شبکه‌ی عصبی بازگشتی ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۸ : خطای پیش‌بینی به کمک معادلات مرکز جرم غیر بازگشتی ..... ۶۰
- شکل ۴-۱۹ : پیش‌بینی سری زمانی لورنز ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۰ : قسمتی از پیش‌بینی سری زمانی لورنز ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۱ : خطای پیش‌بینی سری زمانی لورنز ..... ۶۲
- شکل ۴-۲۲ : پیش‌بینی یک نقطه‌ی سری زمانی لورنز - مسیравلی ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۳ : ردیابی یک نقطه‌ی سری زمانی لورنز - مسیره‌مسایه ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۴ : پیش‌بینی یک نقطه‌ی سری زمانی لورنز - مسیرکمکی ..... ۶۳
- شکل ۴-۲۵ : تغییرات جرم  $m_5(i)$  ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۶ : پیش‌بینی در بازه‌هایی با ۱۵۰ تکرار ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۷ : خطای پیش‌بینی به کمک شبکه‌ی عصبی بازگشتی ..... ۶۴
- شکل ۴-۲۸ : خطای پیش‌بینی سری زمانی لورنز ..... ۶۵
- شکل ۴-۲۹ : پیش‌بینی سری زمانی آرنئودو ..... ۶۵
- شکل ۴-۳۰ : قسمتی از پیش‌بینی سری زمانی آرنئودو ..... ۶۵
- شکل ۴-۳۱ : خطای پیش‌بینی سری زمانی آرنئودو ..... ۶۶
- شکل ۴-۳۲ : پیش‌بینی یک نقطه‌ی سری زمانی آرنئودو - مسیравلی ..... ۶۶
- شکل ۴-۳۳ : ردیابی یک نقطه‌ی سری زمانی آرنئودو - مسیره‌مسایه ..... ۶۶
- شکل ۴-۳۴ : پیش‌بینی یک نقطه‌ی سری زمانی آرنئودو - مسیرکمکی ..... ۶۶
- شکل ۴-۳۵ : تغییرات جرم  $m_5(i)$  ..... ۶۷
- شکل ۴-۳۶ : پیش‌بینی سری زمانی آرنئودو به کمک شبکه‌ی عصبی بازگشتی ..... ۶۷
- شکل ۴-۳۷ : خطای پیش‌بینی سری زمانی آرنئودو به کمک شبکه‌ی عصبی بازگشتی ..... ۶۷
- شکل ۴-۳۸ : خطای پیش‌بینی سری زمانی آرنئودو ..... ۶۸
- شکل ۴-۳۹ : خطای پیش‌بینی سری زمانی لورنز به ازای تغییرات  $\lambda_3$  ..... ۶۹
- شکل ۴-۴۰ : پیش‌بینی مسیر اصلی در یک نقطه به ازای تغییرات  $\lambda_3$  ..... ۶۹



مشخصه‌ی دینامیکی تعداد زیادی از سیستم‌های غیرخطی شناخته شده‌ی واقعی آشوبی<sup>۱</sup> است. یک سیستم آشوبی دارای رفتاری پیچیده بوده و بررسی آن به کمک یک روش محض تقریباً غیر ممکن است. سری زمانی یک سیستم آشوبی می‌تواند برخی از ویژگی‌های خاص سیستم‌های آشوبی را به ما نشان دهد [۱] و تا حدودی قادر است وضعیت آینده‌ی سیستم و نیز دینامیک‌های تأثیرگذار در عملکرد غیرخطی آن را نمایان سازد. نخستین فردی که به کار پیش‌بینی سری‌های زمانی آشوبی پرداخته است لاپدیز<sup>۲</sup> نام دارد. بعد از او افراد دیگری به ارائه‌ی روش‌هایی جهت پیش-بینی سری‌های زمانی پرداختند. اما پاکارد<sup>۳</sup> و سایرین در سال ۱۹۸۰ برای اولین بار بحث بازسازی فضای فاز را بیان کردند طوری که تا امروز پیش‌بینی سری‌های زمانی سیستم‌های غیرخطی، اصولاً با همین روش و راه‌کار انجام می‌گیرد [۲]. برای این منظور پس از رسم نمودار فاز سیستم، متغیرهای مشخصه‌ی سری زمانی همانند بعد همبستگی<sup>۴</sup> و بزرگ‌ترین نمایی لیاپانوف<sup>۵</sup> محاسبه می‌شوند. پس از تعیین آن‌ها رفتار آشوبی سری زمانی به راحتی ثابت خواهد شد. بزرگ‌ترین نمایی لیاپانوف یکی از ویژگی‌های سیستم‌های آشوبی است [۳]. در مرحله‌ی بعد، بازسازی فضای-فاز<sup>۶</sup> انجام می‌شود. آن چه در بازسازی فضای فاز بیش از همه اهمیت دارد، تعیین مقدار مناسب و هم‌زمان دو متغیر زمان تأخیر و بعد تعبیه<sup>۷</sup> است [۴] که با تعیین درست آن‌ها تا حدود زیادی می‌توان مدل دینامیکی سیستم غیرخطی را توسط هر کدام از متغیرهای سری زمانی بیان کرد. قضیه‌ای به نام تِکنز<sup>۸</sup> ثابت می‌کند که یک بعد تعبیه‌ی مناسب همواره وجود دارد [۵]. روش‌هایی که در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند سعی در تعیین هم‌زمان زمان تأخیر و بعد تعبیه‌ی

<sup>1</sup>Chaotic

<sup>2</sup>Lapedes

<sup>3</sup>Packard

<sup>4</sup>Correlation dimension

<sup>5</sup>Lyapanov exponent

<sup>6</sup>Phase space reconstruction

<sup>7</sup>Embedding dimension

<sup>8</sup>Takens

مطلوب دارند. مهم‌ترین روش‌های پیش‌بینی سری زمانی آشوبی، روش نزدیک‌ترین همسایه‌ها<sup>۱</sup> و روش خطی‌سازی محلی<sup>۲</sup> هستند که به ترتیب توسط لورنز<sup>۳</sup> در سال ۱۹۶۳ و آباربانل<sup>۴</sup> و دیگران در سال ۱۹۹۳ ارائه شده است. روش نزدیک‌ترین همسایه‌ها روشی بسیار ساده است که از همانندی داده‌ها برای پیش‌بینی کمک می‌گیرد. در روش خطی‌سازی محلی که به آن روش تقریب خطی نیز گفته می‌شود، با استفاده از روش کم‌ترین مربعات<sup>۵</sup> دینامیک غیرخطی موضعی با نگاشتی خطی تقریب زده می‌شود. تلاش‌هایی نیز برای پیش‌بینی حالت‌های آشوبناک در شبکه‌های عصبی صورت گرفته است. به رغم هیجان‌انگیز بودن این تحولات، همان‌طور که نماهای لیپانوف مثبت نشان می‌دهند، حساسیت سیستم‌های آشوبی نسبت به شرایط اولیه، دقت پیش‌بینی سری‌های زمانی را کاملاً محدود می‌کند [۹,۸,۷,۶].

## ۲-۱ ساختار پایان نامه

این پایان‌نامه شامل پنج فصل است که در فصل دوم ابتدا با مفهوم آشوب<sup>۶</sup>، رفتار آشوبی و تفاوت آن با سایر سیستم‌ها آشنا شده، سپس سری‌های زمانی آشوبی<sup>۷</sup> را تعریف کرده و به بررسی چند نمونه از مهم‌ترین سری‌های زمانی آشوبی پرداخته خواهد شد. در ادامه‌ی این فصل به تشریح عمل بازسازی فضای فاز از روی سری زمانی پرداخته و پس از آن پیش‌بینی سری زمانی<sup>۸</sup> بر مبنای نزدیک‌ترین همسایه‌ها در فضای فاز مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین روش پیش‌بینی به کمک شبکه‌ی عصبی بازگشتی برخط نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ضمن توانایی‌ها و نیز ضعف‌های این روش‌ها بیان خواهد شد. در فصل سوم، با توجه به موضوعات بیان شده در فصل دوم، روش‌های پیشنهادی پیش‌بینی سری زمانی آشوبی تشریح می‌شود. روش‌های پیشنهادی به همراه شکل

---

<sup>۱</sup>nearest neighbor

<sup>۲</sup>Local linearization

<sup>۳</sup>Lorenz

<sup>۴</sup>Abarbanel

<sup>۵</sup>Least square

<sup>۶</sup>Chaos

<sup>۷</sup>Chaotic time series

<sup>۸</sup>Time series prediction

توضیح داده شده و سعی شده است تا علت استفاده از چنین روش‌هایی بیان شود. برای آن که کارایی روش‌های پیشنهادی مورد آزمایش قرار بگیرد، تعدادی از معروف‌ترین سری‌های زمانی آشوبی به کمک این روش‌ها پیش‌بینی شده و عملکرد روش‌های پیشنهادی با روش‌های متداول پیش‌بینی مقایسه شده است که نتایج این شبیه‌سازی‌ها در فصل چهارم بیان می‌شود. در نهایت در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات مناسب جهت بهبود کار و نیز تحقیقات آینده مطرح شده‌اند.



## فصل دوم

آشوب، سری‌های زمانی،  
بازسازی فضای فاز و پیش‌بینی

در این فصل به بررسی مختصر آشوب و سیستم‌های آشوبی پرداخته می‌شود. پس از شناختی کلی از مبحث آشوب، سری زمانی و پیش‌بینی سری زمانی تعریف می‌شود. در ادامه‌ی فصل دو نمونه از روش‌های متداول پیش‌بینی سری‌های زمانی آشوبی مورد بررسی قرار گرفته و با یکدیگر مقایسه می‌گردد.

## ۲-۲ پدیده‌ی آشوب

مفهوم آشوب یکی از مفاهیم جدید و بنیادی علم نوین است که افق درک ما نسبت به هستی را بسیار گسترش داده است. آشوب همان‌طور که از نامش پیداست رفتاری به ظاهر تصادفی و بی‌نظم<sup>۱</sup> است که در بسیاری از پدیده‌های دنیای واقعی رخ می‌دهد. پدیده‌های معروفی چون اثر پروانه‌ای از ویژگی‌های خاص آشوب است [۱۰].

ابزار تحلیل پدیده‌های طبیعی برای فیزیک‌دانان، مهندسان و سایر علومی که نیاز به مدل‌سازی و تحلیل پدیده‌ها دارند، معادلات دیفرانسیل است. این معادلات که می‌توانند به صورت جزئی یا معمولی باشند، چارچوب تحلیلی قوی و مطمئنی برای پژوهشگران فراهم می‌کنند [۱۱]. در بسیاری از موارد برای سادگی تحلیل، مدل‌ها به صورت خطی تقریب زده می‌شوند. اثرهای نمایی و نوسانی یا دوره‌ای در اکثر پدیده‌های خطی دیده می‌شود. در مدل‌های غیر خطی پدیده‌های جدیدی چون چرخه‌های حدی علاوه بر اثرهای نمایی و دوره‌ای دیده می‌شوند. اما این تنها رفتار متفاوت دینامیک غیر خطی با خطی نیست [۱۲].

مدت‌ها به دلیل وجود قضیه‌ی پوانکاره- بندیکسون<sup>۲</sup> تصور می‌شد که یک سیستم یا دارای نقطه‌ی تعادل ( پایدار یا ناپایدار ) است و یا دارای چرخه‌ی حدی است. البته این قضیه تنها برای سیستم‌های مرتبه‌ی دوم صادق بود، اما باور عموم بر آن بود که چنین قضیه‌ای برای سیستم‌های

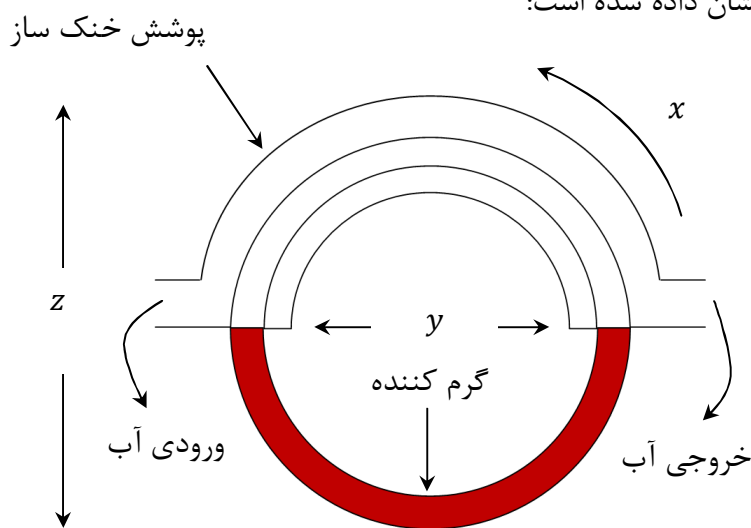
<sup>۱</sup>Irregular

<sup>۲</sup>Poincare - Bendixson

مرتبه‌ی بالاتر نیز برقرار است. با این حال مشاهده شد که برای سیستم‌های مرتبه‌ی سوم به بالا، پدیده‌ای جالب و دور از انتظار می‌تواند اتفاق افتد که به پدیده‌ی آشوب مشهور شد [۱۳].

آشوب به مفهوم دقیق و ریاضی آن پدیده‌ای است که به ظاهر تصادفی و پیچیده آمده اما در باطن طبیعتی قطعی<sup>۱</sup> (در تقابل با تصادفی) دارد. به عبارت ساده‌تر از یک معادله‌ی دیفرانسیل مشخص و در عین حال نسبتاً ساده و فرآیندی بدون نویز بدست می‌آید [۱۴].

ادوارد لورنز هواشناسی بود که در سال ۱۹۶۳ نخستین دینامیک آشوبی را هنگام کار با داده‌های هواشناسی در رایانه‌اش مشاهده کرد. داده‌هایی که حاصل از گرد کردن اعشار بود و به نحوی باور نکردنی اختلاف عجیب در نتایج حاصل از آن‌ها را در دوره‌های طولانی زمانی ملاحظه نمود. سیستمی که بعدها به نام لورنز لقب گرفت و به طور کلی بیانگر جریان هم رفت در مایعاتی است که گرما از طریق منبعی به آن‌ها تزریق می‌شود. نمونه‌ای از چنین ترکیب‌بندی که منجر به دینامیک لورنز شد، در شکل ۱-۲ نشان داده شده است:



شکل ۱-۲: نمود واقعی دینامیک لورنز

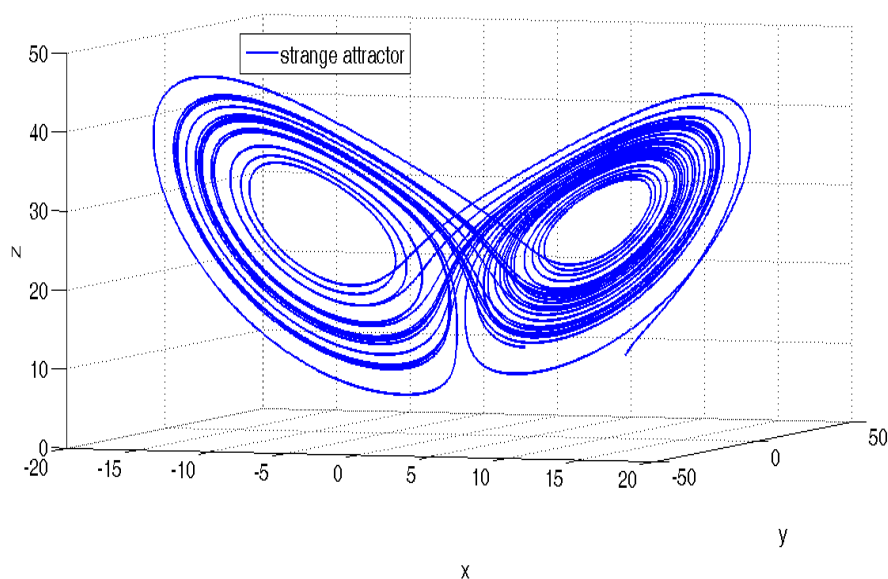
در شکل ۱-۲  $x$  متوسط سرعت چرخش سیال،  $y$  تفاوت دمای افقی و  $z$  تفاوت دمای عمودی است. شکل کلی چنین دینامیکی با معادلات ۱-۲ بیان می‌شود:

<sup>1</sup>Deterministic

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y - x) + u \\ \dot{y} = rx - y - xz \\ \dot{z} = -bz + xy \end{cases} \quad (1-2)$$

که با انتخاب مقادیر  $\sigma = 10$  ,  $r = 28$  ,  $b = \frac{8}{3}$  رفتار آشوبی در معادلات دیده خواهد شد. در

شکل ۲-۲ دینامیک آشوبی لورنز برای برخی شرایط اولیه نشان داده شده است [۱۶, ۱۵]:



شکل ۲-۲: جاذب آشوبی لورنز

یکی از ویژگی‌های دینامیک آشوبی چیزی است که به حساسیت بالا به شرایط اولیه مشهور شده است. یک دینامیک آشوبناک برخلاف دینامیک دارای چرخه‌ی حدی یا نقطه‌ی تعادل پایدار به تغییرات کوچک در شرایط اولیه حساس است. تغییر بسیار اندکی در حالت اولیه باعث تغییرات بسیار قابل توجه در شرایط نهایی می‌شود. نمونه‌ی معروف چنین پدیده‌ای، وضعیت آب و هوا و پدیده‌ای معروف به اثر پروانه‌ای است. دینامیک غیر خطی جو باعث می‌شود که به دلیل نداشتن همه‌ی شرایط اولیه در زمان شروع محاسبات (مثلاً نبود دقت کافی در اندازه‌گیری عواملی مثل دما، رطوبت و ... در همه‌ی نقاط سطح زمین) پیش‌بینی طولانی مدت<sup>۱</sup> امکان‌ناپذیر باشد [۱۷].

ویژگی دیگر سیستم‌های آشوبی داشتن جاذب‌های شگفت<sup>۲</sup> است. جاذب‌های شگفت، جاذب-

<sup>۱</sup>Long term prediction

<sup>۲</sup>Strange attractor