تن آدمی شریف است، به جان آدمیت

نه همین لباس زیباست، نشان آدمیت

رسد آدمی به جایی، که به جز خدا نبیند

بنگـر کـه تا چه حـد 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 مـی آفرینـد و در بـاطن او چیـزی دیگـر، تـازه تـازه، می‌فرستد که اول بـه دوم نمـی‌مانـد و دوم بـه سـوم. الاّ او از خویشـتن غـافـل اسـت و خود را نمی‌شناسد...))

« فیه مافیه »

تقدیم به

اسطوره‌های جاودان زندگیم

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

اینجانـــــب .... دانشـــــجوی دوره کارشناســـــی ارشـــــد رشـــــته .... دانشکده .... دانشگاه صـنعتی شـاهرود نویسـنده پایـان نامـه .... تحـــــت راهنمـــــائی .... 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 هـیچ جـا ارائـه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقـالات مسـتخرج بـا نـام « دانشـگاه صـنعتی 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 نامـه 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 شـده اسـت 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 ، نـرم افـزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحـو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

دراین پایان‌نامه، پیش‌بینی سـری زمـانـی آشوبـی به کمک بازسـازی فضـای فـاز 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، مسیرهمسایه‌ی معادل و مسیرکمکی 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 مسیرهمسایه‌ی معادل، پیش‌بینی مسیراصلی و کمکی 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 کمکـی، معادلات مرکز جرم بازگشتی

فهرست مطالب

عنوان صفحه

فهرست شکل‌ها

۱

فصل اول

مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

مشخصه‌ی دینامیکی تعداد زیادی از سیستم‌های غیرخطی شناخته شده‌ی واقعی آشوبی[1] 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 لاپِدِز[2] نام دارد. بعد از او افراد دیگری به ارائه‌ی روش‌هایی جهت پیش‌بینی سری‌های زمانی پرداختند. اما پاکارد[3] و سایرین در سال ۱۹۸۰ برای اولین‌بار 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 نمودارفاز سیستم، متغیرهای مشخصه‌ی سری زمانی همانند بعد همبستگی[4] و بزرگ‌ترین نمایی لیاپانوف[5] محاسبه می‌شوند. پس از تعیین آن‌ها رفتار آشوبی سری زمانی به راحتی ثابت خواهد شد. بزرگ ترین نمایی لیاپانوف یکی از ویژگی‌های سیستم‌های آشوبی است[۳]. در مرحله‌ی بعد، بازسازی فضای‌فاز[6] انجام می‌شود. آن چه در بازسازی فضای‌فاز بیش از همه اهمیت دارد، تعیین مقدار مناسب و هم‌زمان دو متغیر زمان تأخیر و بعد تعبیه[7] 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 تِکِنز[8] 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

---

[1] Chaotic
[2] Lapedes
[3] Packard
[4] Correlation dimension
[5] Lyapanov exponent
[6] Phase space reconstruction
[7] Embedding dimension
[8] Takens

مطلوب دارند. مهم‌ترین روش‌های پیش‌بینی سری زمانی آشوبی، روش نزدیک‌ترین همسایه‌ها[1] و روش خطی‌سازی محلی[2] هستند که به ترتیب توسط لورنز[3] در سال ۱۹۶۳ و آباربانل[4] 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[5] 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 لیاپانوف مثبت نشان می‌دهند، حساسیت سیستم‌های آشوبی نسبت به شرایط اولیه، دقت پیش‌بینی سری‌های زمانی را کاملاً محدود می‌کند[۹,۸,۷,۶].

۱-۲ ساختار پایان نامه

این پایان‌نامه شامل پنج فصل است که در فصل دوم ابتدا با مفهوم آشوب[6]، رفتار آشوبی و تفاوت آن با سایر سیستم‌ها آشنا شده، سپس سری‌های زمانی آشوبی[7] 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[8] 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

---

[1]nearest neighbor
[2]Local linearization
[3]Lorenz
[4]Abarbanel
[5]Least square
[6]Chaos
[7]Chaotic time series
[8]Time series prediction

توضیح داده شده و سعـی شده است تا علت استفـاده از چنین روش‌هـایـی بیـان شـود. بـرای آن کـه کارایی روش‌های پیشنهادی مورد آزمایش قرار بگیرد، تعدادی از معروف‌ترین سری‌های زمـانی آشـوبی به کمک این روش‌ها پیش‌بینی شـده و عملکـرد روش‌های پیشنهـادی با روش‌های متداول پیش‌بینـی مقایسه شده است که نتایج این شبیه سازی‌ها درفصل چهارم بیان می‌شود. در نهایت در فصـل پـنجم نتیجه‌گیـری و پیشنهادات مناسب جهت بهبود کار و نیز تحقیقات آینده مطرح شده‌اند.

۲

فصل دوم

آشوب، سری‌های زمانی،

بازسازی فضای فاز و پیش‌بینی

۲-۱ مقدمه

در این فصل به بررسی مختصر آشوب و سیستم‌های آشوبی پرداخته می‌شـود. پـس از شـناختی کلی از مبحث آشوب، سری زمانی و پیش‌بینی سری زمانی تعریف می‌شود. در ادامه‌ی فصـل دو نمونـه از روش‌های متداول پیش‌بینی سری‌های زمانی آشوبی مورد بررسی قرار گرفتـه و بـا یکـدیگر مقایسـه 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[۱] 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 جزئـی یا معمولـی باشند، چـارچوب تحلـیلی قـوی و مطمئـنی برای پژوهشـگران فراهـم 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[۲] 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

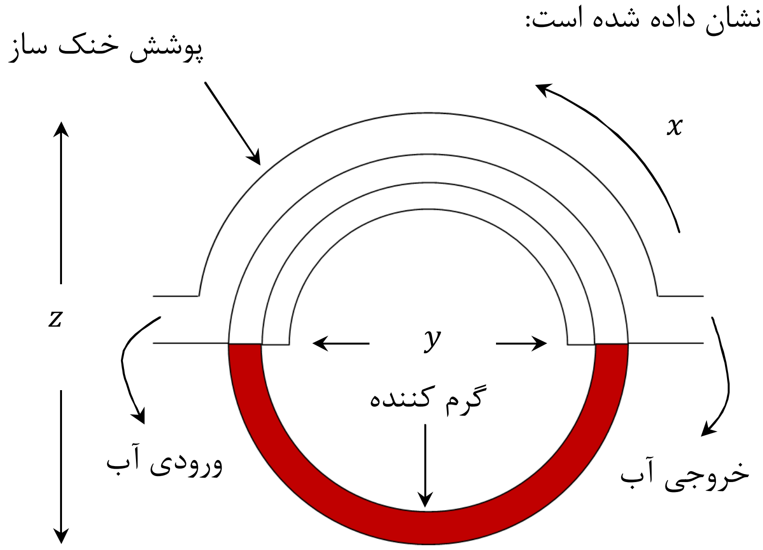
---

[1] Irregular
[2] Pioncare - 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[1] (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 ۲-۱ نشان داده شده است:



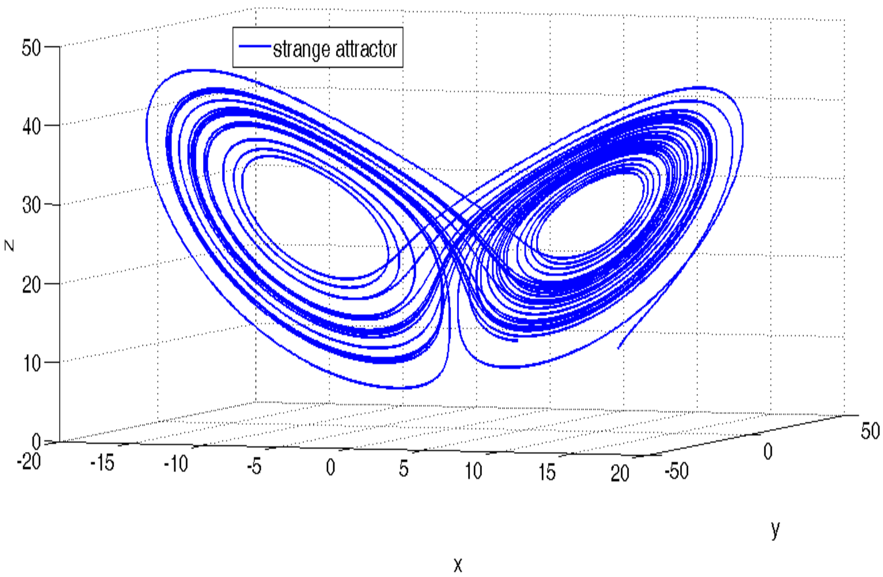
شکل ۲-۱ : نمود واقعی دینامیک لورنز

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

[1] Deterministic

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y-x) + u \\ \dot{y} = rx - y - xz \\ \dot{z} = -bz + xy \end{cases} \tag{۱-۲}$$

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 بـه شـرایط اولیـه مشـهور شده است. یک دینامیک آشوبناک برخلاف دینامیک دارای چرخه‌ی حدی یا نقطه‌ی تعـادل پایـدار بـه تغییرات کوچک در شرایط اولیه حساس است. تغییر بسیار اندکی در حالت اولیه باعث تغییـرات بسـیار قابل توجه در شرایط نهایی می‌شود. نمونه‌ی معروف چنـین پدیـده‌ای، وضـعیت آب و هـوا و پدیـده‌ای معروف به اثر پروانه‌ای است. دینامیک غیر خطی جو باعث می‌شود که به دلیل نداشتن همه‌ی شـرایط اولیه در زمان شروع محاسبات (مثلاً نبود دقت کافی در اندازه‌گیری عواملی مثل دمـا، رطوبـت و ... در همه‌ی نقاط سطح زمین) پیش‌بینی طولانی مدت[۱] امکان‌ناپذیر باشد[۱۷].

ویژگی دیگر سیستم‌هـای آشوبی داشتن جاذب‌هـای شگفت[۲] است. جاذب‌ها ی شگفت، جاذب-

[1]Long term prediction
[2]Strange attractor