

مطالعه تاب‌آوری اکوسیستم شهر تهران در برابر آلاینده‌های هوا

حمید آماده*

محمدعلی قدسی‌ماب**، مهدی احراری***

چکیده

اکوسیستم شهری تهران توانایی جذب و تصفیه میزان مشخصی از حجم آلاینده‌ها دارد که همین توانایی نیز روزبه‌روز در حال کم شدن است. در روند رشد اقتصادی هر شهر یا کشور باید قابلیت‌های اکوسیستمی آن منطقه نیز لحاظ شود تا مشکلات زیست‌محیطی کم‌تری حاصل شود. هدف از نگارش این مقاله ارائه و بسط روشی برای اندازه‌گیری تاب‌آوری اکوسیستم شهر تهران در برابر آلاینده‌های وارد شده به هوای آن است. برای محاسبه تاب‌آوری از بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف استفاده شده است، به طوری که بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف مثبت، به معنی وجود رفتار آشوبی در سری زمانی مورد مطالعه و به تبع آن کاهش میزان تاب‌آوری سیستم است. اطلاعات مورداستفاده در این پژوهش مربوط به شاخص کیفیت هوا (AQI) برای بازه زمانی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ است که به صورت میانگین روزانه و شامل ۱۸۲۶ داده است. نتایج نشان‌دهنده وجود آشوب در سری زمانی شاخص کیفیت هوا (AQI) است. از نظر تاب‌آوری نیز اکوسیستم شهر تهران در برابر آلاینده‌های وارد شده تاب‌آوری بالایی ندارد و توان کافی را برای مقابله با شوک‌های وارد شده ندارد. از این رو، توجه به تاب‌آوری در تصمیم‌گیری‌های اقتصادی و مدیریت شهری بسیار مهم است.

کلیدواژه‌ها: آلودگی هوا، اکوسیستم، آشوب، تاب‌آوری، بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف.

طبقه‌بندی JEL: Q53، Q54.

* استادیار اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبایی، amadeh@gmail.com

** کارشناس ارشد اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبایی (نویسنده مسئول)، ma.ghodsi1369@gmail.com

*** دانشجوی دکتری اقتصاد نفت و گاز، گرایش بازارها و مالیه، دانشگاه علامه طباطبایی،

meahrari@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۵

۱. مقدمه

یکی از بزرگ‌ترین مشکلات کلان‌شهر تهران در سال‌های گذشته و به‌خصوص دهه اخیر بحث آلودگی هوای شهر تهران بوده است. تهران، به‌منزله اصلی‌ترین مرکز اقتصادی ایران و نماد رشد و توسعه ایران، وضعیت مناسبی از لحاظ آلاینده‌های هوا ندارد. گسترش شهرنشینی و توسعه شهرها به‌همراه افزایش شتابان جمعیت و توسعه فعالیت‌های صنعتی با مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی آلودگی‌ها را به‌شدت افزایش داده است که عواقب آن در درجه اول به‌صورت امراض و بیماری‌های تنفسی و تشدید بیماری‌های قلبی و ریوی متوجه ساکنان شهرها می‌شود و در مرحله بعد، به‌منزله عاملی در تشدید نوسان‌های اقلیمی و تأثیرات زیست‌محیطی نقش ایفا می‌کند (Chappelka 2007).

در حال حاضر، تهران یکی از آلوده‌ترین شهرهای جهان معرفی شده است (Graedel and Crutzen 1993). تهران دارای بالاترین سهم فعالیت آموزشی، اداری، اجتماعی، و فرهنگی است. باتوجه به آمار به‌دست‌آمده در مورد بیماری‌های مختلف و مرگ‌ومیر ناشی از آلودگی، پایتخت ایران بالاترین مرگ‌ومیر را دارد. از سوی دیگر، به‌واسطه آلودگی بازده نیروی انسانی کاهش داشته است و خستگی اعصاب جزئی جدایی‌ناپذیر از زندگی شهروندان تهرانی شده است. یکی از مهم‌ترین تأثیرهای آلودگی هوا تأثیر در نوسان‌های اقلیمی شهر تهران و پی‌آمدهای مختلف ناشی از آن است (روشن و دیگران ۱۳۸۸). در بیش از دویست روز از ایام سال غلظت ذرات معلق آن‌چنان بالاست که گستره دید کامل را به کم‌تر از پانصد متر کاهش می‌دهد. نخستین زنگ خطر جدی درباره آلودگی هوای تهران در سال ۱۳۷۴ به‌صدا درآمد. در آن هنگام نزدیک به یک‌صد نفر از کارشناسان و مدرسان حوزه‌های مرتبط محیط‌زیست، جغرافیا، و شهرسازی در پی نشست‌های در سالن اجتماعات پارک شهر متنی موسوم به بیانیه «هوای تهران، ۱۳۷۴» منتشر کردند که در آن برای نخستین‌بار از آلودگی هوای تهران به‌منزله یک «بحران ملی»، که راه مقابله با آن «عزم ملی» است، نام برده شد. این بیانیه عمدتاً بر آثار بهداشتی و بیماری‌زای آلودگی هوا تأکید داشت و نویسندگان آن کوشیدند بر این نکته پافشاری کنند که یکی از عوامل عمده شیوع نگران‌کننده بیماری‌هایی هم‌چون افسردگی، اضطراب، و انواع ناراحتی‌های تنفسی در تهران آلودگی هوا بوده است و باید این پدیده را از جمله عوامل قابل توجه مرگ‌ومیر در تهران به‌شمار آورد. البته، این بیانیه آن‌قدر بازتاب نیافت که بتوان تصور کرد هم‌چون مانیفستی برای همه فعالیت‌های بعدی مقابله با آلودگی هوا بود که مورد توجه قرار می‌گرفت. آثار زیست‌محیطی، اقتصادی،

اجتماعی، و فرهنگی (از نظر تأثیری که در تخریب و رنگ‌باختگی آثار تاریخی، معماری، و فرهنگی دارد) این پدیده فراموش شده است. علت این امر شاید این باشد که آماري که سه سال بعد از بیانیه «هوای تهران، ۱۳۷۴» توسط جایکا (کنسرسیوني از مشاوران بین‌المللی که با محوریت کارشناسان ژاپنی طرح جامعی را برای کاهش آلودگی هوای تهران تدوین کردند) منتشر شده بود، بسیار هول‌ناک بود: آلودگی هوا سالانه بین هفت تا نه هزار نفر را در تهران می‌کشد، یعنی به‌طور متوسط سالانه هشت هزار نفر و تقریباً هر ساعت یک نفر (بخشی خانگی).

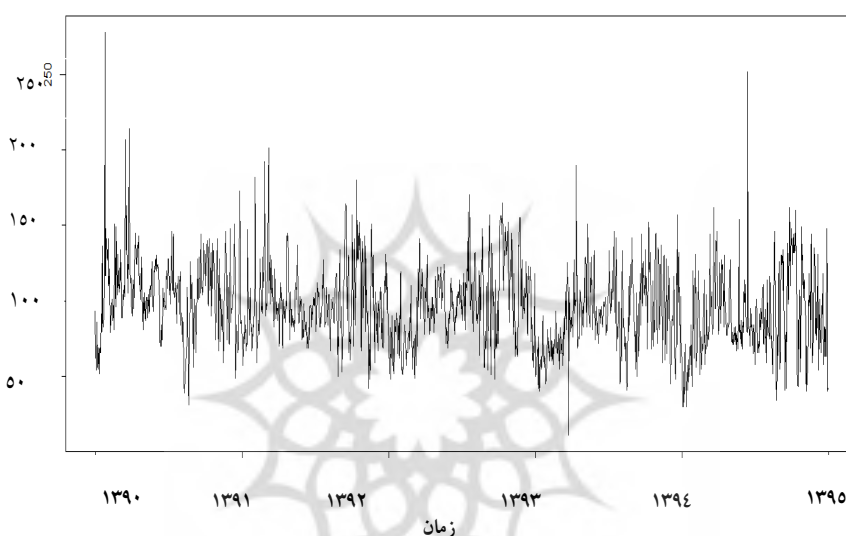
به گزارش بانک جهانی ضرر و زیان مالی ناشی از آلودگی هوا در ایران در ۲۰۰۱ میلادی (۱۳۷۹ ش) حدود هفت میلیارد دلار ارزیابی و برآورد شد که اگر سیاست‌های تولید و مصرف انرژی در ایران اصلاح نشود، ضرر و زیان ناشی از آلودگی هوا توسط بخش حمل‌ونقل به ۸/۴ میلیارد دلار خواهد رسید. مبلغ ۱/۱ میلیارد دلار هزینه‌های جانبی آلودگی هوا بر اساس محاسبه یادشده و با احتساب هر دلار ۸۶۵ تومان معادل ۹۸۱/۵ میلیارد تومان می‌شود. این رقم دو برابر کل فصل خدمات درمانی در بودجه سال ۱۳۸۳ است که معادل ۴۱۵ میلیارد تومان است. مقایسه این رقم با بودجه‌های درمانی سال ۱۳۸۳ کشور اهمیت این موضوع را نشان می‌دهد (همان).

سؤال اصلی در این تحقیق بررسی تاب‌آوری اکوسیستم شهر تهران در برابر آلاینده‌های واردشده به آن است. این‌که آیا اکوسیستم شهر تهران می‌تواند در برابر این حجم از آلاینده‌ها تاب‌آور باشد و عملکرد اکوسیستمی خود را به‌خوبی انجام دهد؟ برای این منظور ابتدا مفهوم تاب‌آوری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است و پس از آن با استفاده از بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف به سنجش و محاسبه تاب‌آوری پرداخته شده است. برای این منظور از اطلاعات پنج‌ساله (۱۳۹۰-۱۳۹۴) مربوط به شاخص کیفیت هوا (Air Quality Index) استفاده شده است که شامل ۱۸۲۶ داده است که به‌صورت میانگین روزانه هستند.

پژوهش حاضر یکی از اولین مطالعات مربوط به تاب‌آوری با استفاده از نمای لیاپانوف در ایران است و در سطح بین‌المللی نیز مطالعات تاب‌آوری با این شیوه بسیار نادر است و از آنجایی که در تحقیقات پیشین به‌صورت مشخص به بحث اندازه‌گیری و سنجش تاب‌آوری با استفاده از نمای لیاپانوف برای مباحث زیست‌محیطی پرداخته نشده است، پژوهش حاضر از مجموعه‌ای از مطالعات مربوط به مسائل زیست‌محیطی و مقالات مربوط به سنجش آشوب بهره برده است.

۱.۱ داده‌ها و اطلاعات

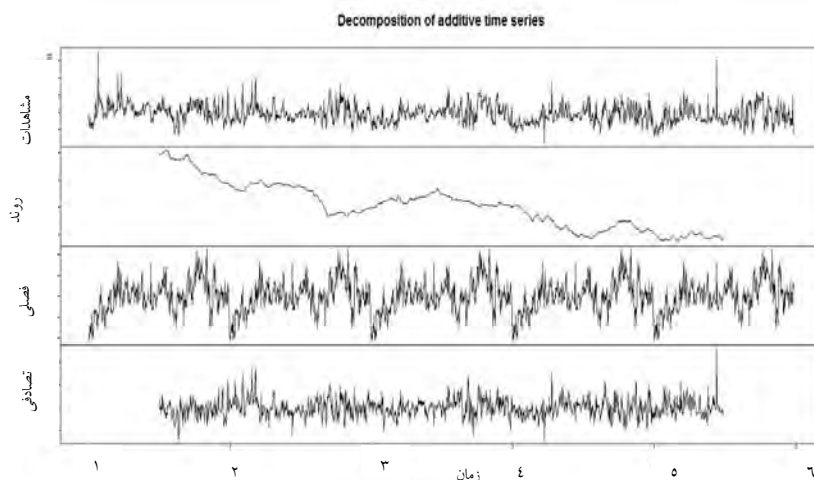
اطلاعات موردنیاز از (وبسایت) شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران دریافت شده است. بازه زمانی مورد مطالعه از ۱۳۹۰/۱/۱ تا ۱۳۹۴/۱۲/۲۹ است. این داده‌ها به صورت میانگین روزانه شاخص کیفیت هوا بوده‌اند و شامل ۱۸۲۶ داده (روز) هستند.



شکل ۱. شاخص کیفیت هوا برای بازه زمانی ۱۳۹۰-۱۳۹۴
مأخذ: شرکت کنترل کیفیت هوای شهر تهران

از آنجایی که ممکن است رفتارهای فصلی مربوط به انتشار آلاینده‌ها بر مقادیر محاسبه شده اثرگذار باشد و باعث گمراهی محققان شود، با استفاده از دو روش روند خطی موجود از سری زمانی جدا شده است و محاسبات روی پس‌ماندهای حاصل شده انجام شده است.

در روش اول سری زمانی توسط دستور Decompose در نرم‌افزار R به سه بخش روند، تأثیر فصلی، و بخش پس‌ماند (تصادفی) تجزیه شد و بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف برای بخش روند و پس‌ماند محاسبه شد تا تأثیر روندهای فصلی از محاسبات خارج شود.



شکل ۲. سری زمانی شاخص کیفیت هوا (AQI) و بخش‌های روند، فصلی، و تصادفی
 مأخذ: یافته‌های تحقیق

در روش دوم، مانایی سری زمانی موجود توسط آماره دیکی – فولر تعمیم‌یافته (ADF) بررسی شد. سری زمانی مورد مطالعه مانا بود و مدل A انتخاب شد. در این روش نیز محاسبات بر پس‌ماند حاصل شده انجام گرفته است تا از درستی محاسبات اطمینان حاصل شود.

۲. مبانی نظری و مروری بر مطالعات گذشته

برای سنجش وضعیت هوا از شاخص کیفیت هوا (AQI) استفاده می‌شود. این شاخص براساس میزان انتشار شش آلاینده محاسبه می‌شود. در جدول ۱ نحوه طبقه‌بندی کیفیت هوا با توجه به میزان این شاخص نشان داده شده است.

جدول ۱. شاخص کیفیت هوا (AQI)، رنگ‌های مربوط به هر گروه

مقدار	کیفیت هوا	رنگ مشخص‌کننده
۰-۵۰	پاک	سبز
۵۱-۱۰۰	متوسط (سالم)	زرد
۱۰۱-۱۵۰	ناسالم برای گروه‌های حساس	نارنجی

۱۵۱-۲۰۰	ناسالم	قرمز
۲۰۱-۳۰۰	بسیار ناسالم	بنفش
۳۰۱-۵۰۰	خطرناک	قهوه‌ای

مأخذ: گزارش‌های سالیانه کیفیت هوای شهر تهران، سازمان کنترل کیفیت هوای شهر تهران

براساس گزارش کیفیت هوای تهران در سال ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۴ تعداد روزهای پاک در تهران در یک‌سال، از لحاظ شاخص کیفیت هوا به بیش از ۲۵ روز نرسیده است و اصلی‌ترین عامل آلودگی هوا در این پنج سال ذرات معلق بوده‌اند.

بنابراین، هوای پاک برای تهران بسیار ارزشمند است. از آنجایی که هوا جزء کالاهای عمومی است، پس برای آن بازاری وجود ندارد و نمی‌توان آن را قیمت‌گذاری کرد. در این مواقع، در اقتصاد محیط‌زیست بحث ارزش‌گذاری مطرح می‌شود و اولین قدم در بحث ارزش‌گذاری بررسی ظرفیت اکوسیستم شهر تهران در مقابل این آلاینده‌هاست.

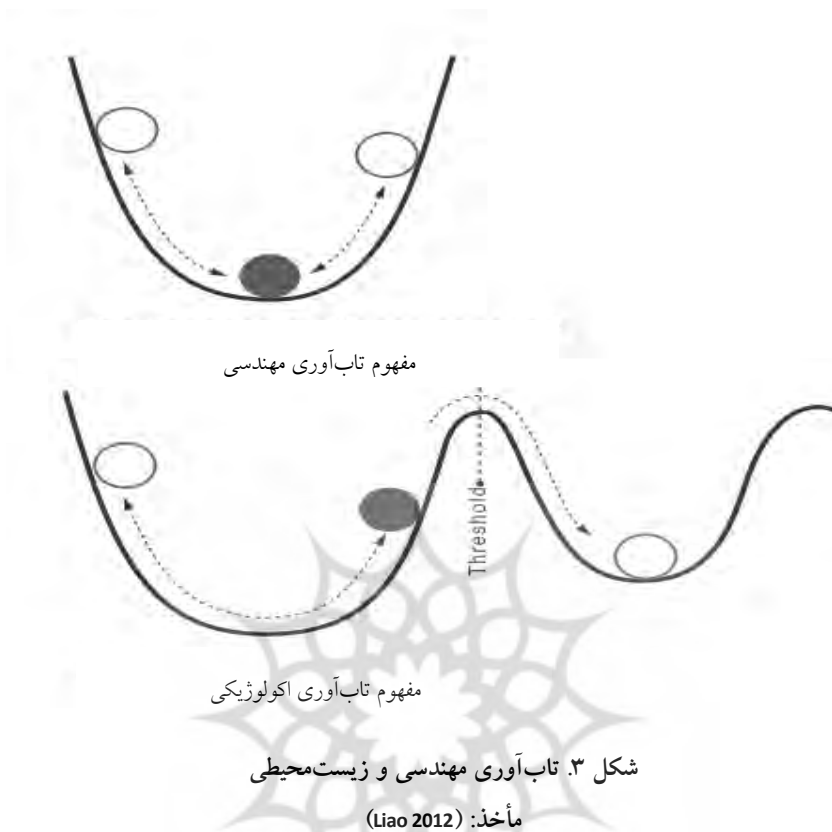
مفهوم تاب‌آوری به‌طور عمده بر این فرضیه بنا شده است که حالات مختلف سیستم شامل نقاط تعادل گوناگون است. به عبارت دیگر، فرض می‌شود که تکامل سیستم‌ها (اقتصادی، زیست‌محیطی، و ...) با جابه‌جایی این سیستم‌ها از یک حالت تعادل (یا دامنه پایداری) به حالت تعادل دیگر انجام می‌شود.

در این زمینه دو راه مختلف برای تعریف تاب‌آوری در پیش گرفته می‌شود:

۱. **تعریف پرینگ:** این تعریف به خواص سیستم حول تعادل پایدار برمی‌گردد که عمدتاً برگرفته از تعریف پیم (Pimm 1984) است که تاب‌آوری سیستم را عبارت از اندازه‌گیری سرعت بازگشت سیستم به حالت تعادل می‌داند (Pimm 1984; Perrings 1994).

۲. **تعریف هولینگ:** این تعریف به میزان اختلالی (شوک) اشاره دارد که یک سیستم می‌تواند قبل از حرکت از یک حالت به حالت دیگر جذب کند (Holling 1992).

هولینگ نوع دیگری از تقسیم‌بندی را نیز ارائه کرده است که در مقایسه با دو تعریف قبل کاربردی‌تر است. هولینگ در مقاله خود تاب‌آوری را به «تاب‌آوری مهندسی» (engineering resilience) و «تاب‌آوری زیست‌محیطی» (resilience ecological) تقسیم‌بندی می‌کند (Holling 1996).



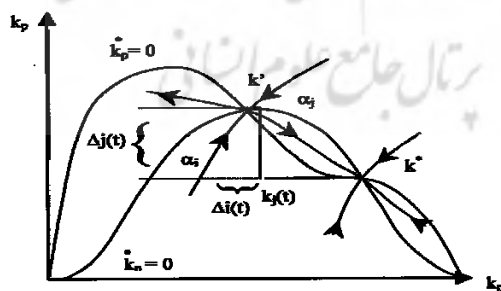
برای تبیین این مدل از شکل ۳ استفاده می‌شود که در آن توپ نماد سیستم و سطحی که توپ روی آن قرار دارد بیان‌گر حالت (محیط و فضای که سیستم در آن است) و بخش U شکل هم بیان‌گر دامنه پایداری سیستم است. نکته اصلی در تعریف تاب‌آوری مهندسی قرار گرفتن سیستم در (یا نزدیک) یک نقطه تعادل کلی است. در این مدل تاب‌آوری مهندسی رابطه‌ای معنادار با شیب بخش U شکل خواهد داشت. در طرف دیگر، تاب‌آوری زیست‌محیطی بیان‌کننده این است که برای یک سیستم می‌تواند دو یا چند نقطه تعادل وجود داشته باشد (منظور از نقطه تعادل بخش زیرین قسمت U شکل است که در صورت افتادن توپ در آن، توپ پس از نوسان در قسمت زیرین ساکن می‌شود). در این جا فرض می‌شود که سیستم پویاست و توپ مدام در حال حرکت است و یک اختلال (شوک) باعث خواهد شد توپ در دامنه خود نوسان کند یا به دامنه دیگر منتقل شود و در آن جا نوسان کند. اندازه‌گیری تاب‌آوری زیست‌محیطی نیازمند تعداد بیش‌تری متغیر و داشتن اطلاعات بیش‌تر از وضعیت سیستم است (Walker et al. 2004; Desjardins et al. 2015).

بررسی و محاسبه تاب‌آوری زیست‌محیطی به علت وجود متغیرهای فراوان که در رفتار آن دخیل‌اند به مراتب دشوارتر از بررسی و محاسبه تاب‌آوری مهندسی است. محققان حوزه تاب‌آوری معتقدند به‌طور کلی دو عامل در تاب‌آوری سیستم‌ها مؤثرند (Perrings 2006):

۱. ظرفیت انعطاف‌پذیری (adaptive capacity): که عمدتاً به تجانس‌نداشتن و ناسازگاری موجود در یک سیستم مربوط می‌شود؛ به عبارتی، به تنوع نهادها و سرمایه‌های موجود در یک سیستم اجتماعی اشاره دارد (Carpenter et al. 2001; Bengtsson et al. 2003).
۲. مقاومت (robustness): که به آن دسته از ویژگی‌های سیستم اشاره می‌کند که به سیستم اجازه می‌دهد در مقابل شوک‌های واردشده، بدون دخالت خارجی، رفتار تطابقی مناسب را انجام دهد (Webb and Levin 2005).

در شکل ۴ $Kp(t)$ و $Kn(t)$ متغیرهای حالت هستند درحالی‌که K^* نشان‌دهنده نقطه تعادل است که توسط یک مخروط جاذب با مختصات α_i و α_j و ... احاطه شده است. از این شکل می‌توانیم بلافاصله یک عنصر جالب را که معرف تفاوت تعاریف تاب‌آوری و تعریف معمول پایداری است تشخیص دهیم و آن این‌که «اندازه‌گیری تاب‌آوری در همان سیستم می‌تواند با تغییر جهت اختلال تغییر یابد». در این‌جا اجازه دهید تا تعریف پرینگ را مورد توجه قرار دهیم (Perrings 1994):

تاب‌آوری یک سیستم در بعضی نقاط در مخروط تعادل پایدار موضعی K^* نسبت به تغییر در هر یک از متغیرهای حالت آن سیستم عبارت است از حداکثر اختلالی که آن متغیرها می‌توانند بدون آن‌که باعث شوند سیستم همسایگی α_j - را ترک کند، تحمل کند (Reggiani et al. 2002).



شکل ۴. اندازه‌گیری تاب‌آوری سیستم براساس نظر هولینگ

مأخذ: (Perrings 1994)

اندازه‌گیری تاب‌آوری سیستم در جهت i یا j برابر است با $\alpha_i - K_i(t)$ و $\alpha_j - K_j(t)$. این بدین معنی است که:

الف) نقطه‌ای از سیستم که در نزدیکی مرز مخروط جاذب قرار دارد تاب‌آوری کم‌تری از نقطه‌ای در نزدیکی نقطه تعادل دارد؛

ب) تاب‌آوری برای جهت‌های مختلف اختلال متفاوت است؛

ج) اگر سیستم بر اثر مقداری اختلال تاب‌آوری را از دست بدهد (یعنی $\alpha_i - K_i(t)$ منفی باشد)، در نتیجه، سیستم از یک مخروط جاذب به مخروط جاذب دیگر از مجرای α ، i جابه‌جا خواهد شد (یعنی K در شکل ۴) (Reggiani et al. 2002).

اجازه دهید در این جا برای مثال معادله شناخته‌شده لجستیک و رهولست را در فضای گسسته مورد توجه قرار دهیم:

$$y(t+1) = ry(t)(1-y(t))$$

با تحلیل فازی - فضایی مربوط (y نسبت به r) کاملاً واضح است که برای مقادیر $3 < r < 3/824$ معادله لجستیک قبل از رسیدن به زمان شوک در $r = 3/82$ شروع به نوسان می‌کند.



شکل ۵. تاب‌آوری زیست‌محیطی و مهندسی برای معادله لجستیک در حالت گسسته

مأخذ: (Reggiani et al. 2002)

تاب‌آوری مهندسی را که پیش از این تعریف شد، می‌توان با دوره پایداری و دوره نوسانات برای تابع لجستیک مورد تجزیه و تحلیل قرار داد، اما علاوه بر دو دوره یادشده، برای سیستم زیست‌محیطی می‌توان در دوره آشوب نیز خواص سیستم برای پافشاری، یعنی ظرفیت آن را برای جذب امواج سهمگین نوسانات منعکس کرد.

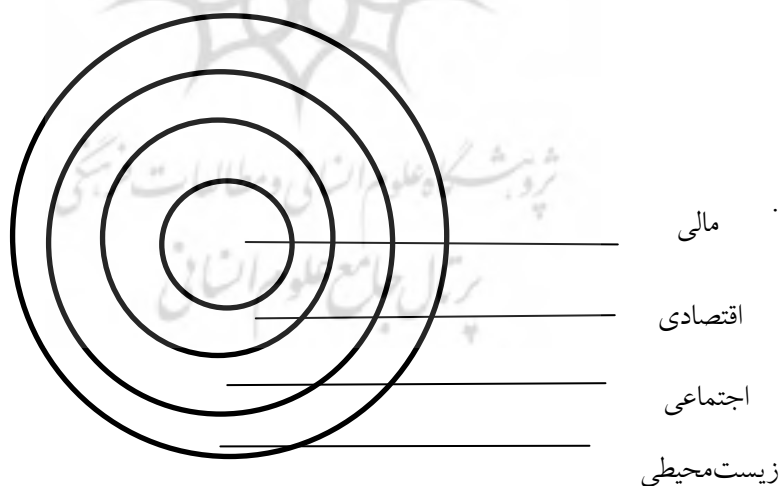
حال می‌توانیم تفاسیر مفهوم تاب‌آوری را با استفاده از معادله لجستیک گسسته به منزله مثالی قوی مرور کنیم (شکل ۵)؛ اما چگونه می‌توان ظرفیت یک سیستم را که در برابر یا

نمایش دهنده این ناحیه چندتعدالی (یعنی دامنه تاب‌آوری) قرار می‌گیرد قبل از تغییر ساختارش اندازه‌گیری کرد؟ واضح است که برای تحلیل تاب‌آوری سیستم‌های پویای با ابعاد بزرگ یا شبکه‌هایی با تعداد توالی پارامتر، که اصطلاحاً «پیچیده» نامیده می‌شوند، به‌خصوص در مطالعات تجربی مشکلاتی رخ خواهد داد (ibid.).

روشن است که ازدیدگاه تجربی در به‌کارگیری روش هولینگ برای اندازه‌گیری تاب‌آوری مشکلاتی ظاهر می‌شود؛ مثلاً این‌که چگونه می‌توان اندازه‌مخروط جاذب را اندازه‌گیری کرد؟ پرینگ برای این کار نمای لیاپانوف را مطرح کرده است که در نوع خود بسیار مهم است. اگرچه در این زمینه تعریف پیم عملی‌تر است، باید توجه داشت که موضوع اندازه‌گیری تاب‌آوری به‌خصوص در موضوع‌های اقتصادی – اجتماعی هم‌چنان بسیار مشکل است و به توجه بیش‌تری نیاز دارد (ibid.).

برای نشان‌دادن اهمیت بررسی تاب‌آوری در حوزه‌های مختلف شکل ۶ ارائه شده است. سیستم‌های اجتماعی و اقتصادی را نمی‌توان مجموعه‌ای جدا از سیستم زیست‌محیطی دانست (Greenham et al. 2013).

بنابراین، بررسی تاب‌آوری زیست‌محیطی را می‌توان قدمی برای رسیدن به بررسی تاب‌آوری در حوزه‌های اقتصادی و مالی دانست.



شکل ۶. رابطه تاب‌آوری در حوزه‌های مختلف با هم

مأخذ: (Greenham et al. 2013)

در ادامه، برای اندازه‌گیری تاب‌آوری مهندسی از نمای لیاپانوف استفاده شده است. اندازه‌گیری تاب‌آوری مهندسی قدم اول برای اندازه‌گیری تاب‌آوری زیست‌محیطی است. در این مقاله، این مهم با استفاده از اطلاعات شاخص کیفیت هوا (AQI) محاسبه شده است. با محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف می‌توان روند غیرتاب‌آور را (ناپایدار) در زمینه تاب‌آوری مهندسی نشان داد. بنابراین، مثبت بودن نمای لیاپانوف^۱ به معنای تاب‌آور نبودن سیستم در برابر شوک‌های وارد شده به آن تلقی می‌شود.

ابریشمی و هم‌کاران وجود آشوب را در سری زمانی قیمت‌های آتی نفت (۱۹۹۶-۱۹۹۹) بررسی کردند (ابریشمی و دیگران ۱۳۸۱). بدین منظور، از دو روش تخمین بعد هم‌بستگی (CD) و بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف (LLE) برای اثبات وجود آشوب و از تحلیل R/S یا نمای هرست (HE) برای تشخیص غیرتصادفی بودن سری استفاده شد. به این ترتیب، فرضیه غیرتصادفی و غیرخطی بودن ساختار سری زمانی قیمت‌های آتی نفت مورد آزمون قرار گرفت. به عبارت دیگر، بررسی شد که آیا می‌توان یک مدل غیرخطی دینامیکی برای سری زمانی قیمت‌های آتی نفت پیشنهاد کرد تا به تبع آن بتوان یک پیش‌بینی تعیینی دقیق و صحیح را برآورد کرد یا خیر.

مشیری و فروتن وجود آشوب را در ساختار سیستم مولد قیمت نفت خام شاخص WTI در بازه زمانی ۱۹۸۳ تا ۲۰۰۳ بررسی کرده‌اند (مشیری و فروتن ۱۳۸۳). آن‌ها بدین منظور از نمای لیاپانوف و بعد هم‌بستگی به منزله آزمون‌های مستقیم آشوب و آزمون‌های BDS و شبکه عصبی به منظور مطالعه غیرخطی بودن این ساختار استفاده کرده‌اند. نمای لیاپانوف به دست آمده مثبت بود و مقدار بعد هم‌بستگی حاصل شده نیز حدود ۰/۵ بوده است که این دو مورد نشان‌دهنده آشوب در این سری زمانی هستند.

مشیری و مروت در مقاله‌ای وجود آشوب را در شاخص‌های بازدهی روزانه و هفتگی قیمت سهام بازار بورس تهران (TEPIX) در بازه زمانی ۱۳۷۷ تا ۱۳۸۲ بررسی کردند (مشیری و مروت ۱۳۸۴). نتایج آزمون بزرگ‌ترین نماهای لیاپانوف که آزمون مستقیمی برای فرایندهای غیرخطی معین است، دلالت بر وجود آشوب در شاخص‌های بازدهی قیمت کل سهام بازار بورس تهران دارد. این نتیجه دلالت بر ناکارایی بازار سهام و در نتیجه، قابلیت پیش‌بینی کوتاه‌مدت آن دارد که می‌تواند رهنمودی سیاستی مبنی بر شناخت عوامل ناکارایی بازار، مانند شفاف نبودن جریان اطلاعات و اقدام به منظور رفع آن‌ها داشته باشد. هم‌چنین، برای مدل‌سازی، و به‌ویژه پیش‌بینی شاخص قیمت‌های سهام، استفاده از مدل‌های غیرخطی به جای مدل‌های معمول خطی مناسب‌تر است.

معینی و هم‌کاران در مقاله‌ای آشوب‌ناکی سری زمانی قیمت نفت را در سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۰ بررسی کرده‌اند و پس از آن برای پیش‌بینی قیمت نفت از ترکیب نمای لیپانوف با تابع لجستیک بهره برده‌اند و مقدار نمای لیپانوف را $1/25$ به‌دست آورده‌اند (معینی و دیگران ۱۳۸۵).

قاهری و هم‌کاران در مقاله خود آشوب‌ناکی جریان آب رودخانه اهرچای را در بازه زمانی نوزده‌ساله بررسی کرده‌اند (قاهری و دیگران ۱۳۹۱). زمان تأخیر و بعد محاط محاسبه‌شده به ترتیب ۶۵ و ۱۳ و بعد فراکتالی نیز ۴ بوده است. نتایج آن‌ها حاکی از دقت مناسب نظریه آشوب در پیش‌بینی جریان آب این رودخانه است.

رستمی و هم‌کاران در مقاله‌ای رفتار قیمت سهام شرکت‌های پذیرفته‌شده را در بورس تهران با تئوری آشوب بررسی کردند (رستمی و دیگران ۱۳۹۰). آن‌ها اطلاعات ۳۱ شرکت را برای بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۸ مطالعه کردند و نمای لیپانوف را با دو روش روزن‌اشتاین و تیلور تخمین زدند که هر دو روش تأییدکننده وجود آشوب بوده‌اند.

پریور و هم‌کاران در مقاله‌ای بسط راهبردهای پایداری اکولوژیک را برای افزایش تاب‌آوری محیط‌زیست برای مناطق شهری ۱ و ۳ تهران بررسی کردند (پریور و دیگران ۱۳۹۲). آن‌ها از مدل مفهومی البرتی و هم‌کارانش بهره بردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده این است که در مدت ۲۲ سال فضای سبز ۱۴۱۲ هکتار کاهش یافته است و درمقابل، اراضی ساخته‌شده ۲۴۳۵ هکتار افزایش یافته است.

پریور و هم‌کاران در مقاله‌ای چهارچوب ارزیابی راهبردی محیط‌زیستی طرح‌های توسعه شهری را براساس تفکر تاب‌آوری بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که چهارچوب‌هایی که تاکنون به کار گرفته شده کارایی لازم را برای تحلیل سیستم‌های پیچیده اجتماعی اکولوژیک، به‌ویژه برای شهرها ندارد. ازاین‌رو، ضرورت دارد از رویکردهای جدید، مانند تفکر تاب‌آوری و اکولوژی شهری در ارزیابی راهبردی محیط‌زیستی به‌منظور برآورد اهداف توسعه پایدار و کاهش نبود قطعیت استفاده شود. درنهایت، آن‌ها چهارچوبی سه مرحله‌ای را پیش‌نهاد می‌کنند که در مرحله اول این چهارچوب تاب‌آوری عمومی بستر محیط‌زیست شهری به‌صورت کلی از طریق معیارهای سنجش تاب‌آوری عمومی ارزیابی می‌شود، مرحله دوم سنجش تاب‌آوری بستر درمورد طرح توسعه پیش‌نهادی است، و مرحله سوم عبارت است از بسط مدیریت تطبیقی برای فراهم‌آوردن سیستمی انعطاف‌پذیر به‌منظور مشارکت افراد ذی‌نفع و ذی‌نفوذ و نیز پایش اثرات (پریور و دیگران ۱۳۹۱).

طباطبایی در مقاله‌ای مدیریت شهری - زیست‌محیطی تهران را در سه دوره قاجار، پهلوی، و انقلاب اسلامی بررسی کرده است (طباطبایی ۱۳۹۲). او برای کار خود از روش SWOT استفاده کرده است و نتایج تحقیق او بیان‌گر این است که سیاست‌های اجتماعی شهر تهران به‌طور کامل در مسیر سیاست‌های زیست‌محیطی قرار نگرفته است و همین امر پایداری زیست‌محیطی تهران را به‌تعویق می‌اندازد.

جعفریان و هم‌کاران در مقاله خود الگویی را استخراج کرده‌اند که الگوی معرفی شده در مقاله آن‌ها از اهداف سند توقف کامل تخریب سرزمین اقتباس شده است (جعفریان و دیگران ۱۳۹۳). این سند به‌طور خاص الگوی جامعی را برای استقرار مدیریت پایدار سرزمین و نیز احیای اراضی تخریب‌یافته معرفی کرده است و عواملی را معرفی کرده است که برای تعمیم نتایج حاصل از مدیریت پایدار سرزمین به‌کار گرفته می‌شوند.

یو و هم‌کاران در مقاله‌ای روند ده‌ساله شاخص آلودگی هوا را برای شهر لانژو چین بررسی کردند (Yu et al. 2011). آن‌ها برای بازسازی فضای فاز، پارامترهای بعد نشاننده و زمان تأخیر را به‌ترتیب با روش‌های کائو و تابع اطلاعات متقابل به‌دست آوردند ($m=11, \tau=3$). بزرگ‌ترین نمای لیپانوف محاسبه شده مثبت بوده است و این یعنی شاخص آلودگی هوا روندی آشوب‌ناک داشته است و مقدار بعد هم‌بستگی (بعد جاذب) برابر $3/49$ بوده است و این یعنی عوامل اصیل دخیل در روند انتشار آلاینده‌های شهر لانژو چهار مورد بوده است.

لی و لین در مقاله‌ای آشوب‌ناک بودن سری‌های زمانی انتشار آلاینده‌های هوا را بررسی کردند (Lee and Lin 2008). آن‌ها در مقاله خود هر پنج آلاینده را ($NO, NO_2, SO_2, PM_{10}, CO$) بررسی کردند و پارامترهای نمای لیپانوف، بعد هم‌بستگی، و انتروپی کولموگروف را برای این آلاینده‌ها محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده آشوب‌ناکی این سری‌های زمانی برای هر پنج آلاینده، از منظر هر سه پارامتر مورد محاسبه، بوده است.

مشیری و فروتن در مطالعه‌ای وجود آشوب را در سری زمانی قیمت آتی نفت خام (NYMEX) برای بازه زمانی ۴ آوریل ۱۹۸۳ تا ۱۳ ژانویه ۲۰۰۳ بررسی کردند (Moshiri and Foroutan 2004). آن‌ها برای کشف ساختار غیرخطی و آشوب‌ناک از بعد محاط آزمون BDS، آزمون بزرگ‌ترین نمای لیپانوف، و آزمون شبکه‌های عصبی بهره بردند. نتایج نشان‌دهنده وجود رفتار آشوبی در سری زمانی مورد مطالعه بودند و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) نیز در پیش‌بینی عملکرد قابل قبولی داشتند.

سالیانی و پرز در مقاله خود آشوب‌ناکی آلاینده ذرات کم‌تر از $2/5$ میکرون را ($PM_{2.5}$) در شهر سانتیاگو شیلی بررسی کردند (Salini and Pérez 2015). بازه زمانی مورد مطالعه آن‌ها سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ بود. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده وجود آشوب و مقدار بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف بین $0/3$ و $0/5$ بوده است.

اسپینوسا و گوریگویتا در پژوهشی پایداری کشورهای حوزه یورو را در مقابل بحران مالی سال ۲۰۰۷ بررسی کردند (Espinosa and Gorigoitia 2012). آن‌ها این پایداری را با محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف در پنج سال محاسبه کردند که برای داده‌های CDS (Credit Default Swap) بود و نتایج آن‌ها نشان‌دهنده اقدامات مناسب و به‌موقع آلمان در مقابل این بحران‌ها بود و کوچک‌ترین نماهای لیاپانوف برای آلمان و به تبع آن پایداری‌ترین اقتصاد هم برای آن کشور بوده است (ibid.).

رجیانی و هم‌کاران در مقاله خود تاب‌آوری آلمان غربی را در حوزه بازار کار بررسی کردند (Reggiani et al. 2002). آن‌ها برای این منظور از نمای لیاپانوف بهره بردند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده پایداری کم صنایع تولیدی (مصرفی) و ساختمان‌سازی در مقایسه با دیگر بخش‌ها بود.

۳. روش پژوهش

۱.۳ بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف

آزمون توان لیاپانوف براساس این ویژگی سری‌های آشوبی است که نقاط مجاور در این سری‌ها به مرور زمان از هم جدا می‌شود و نسبت به هم واگرا می‌شوند. توان لیاپانوف این واگرایی را با یک تابع نمایی اندازه‌گیری می‌کند. محاسبه توان لیاپانوف از طریق اندازه‌گیری مقدار کشیدگی یا خمیدگی ای که در حرکت سیستم رخ می‌دهد انجام می‌شود. در واقع، در این روش سرعت متوسطی که مسیرهای انتقالی دونقطه‌ای که در ابتدا به هم نزدیک بوده‌اند به‌طور نمایی از یک‌دیگر منحرف می‌شوند، محاسبه می‌شود. اگر بزرگ‌ترین توان محاسبه‌شده لیاپانوف مقدار مثبتی داشته باشد، سیستم دارای رفتار آشوبی است و بالعکس (مشیری ۱۳۸۱). ماکزیمم نمای لیاپانوف یکی از مهم‌ترین معیارهای تشخیص پایداری یا نبود پایداری یک سیستم پویاست. برای آن‌که یک سیستم پویا آشوبی باشد، شرط لازم آن است که ماکزیمم توان لیاپانوف مثبت باشد (مشیری و فروتن ۱۳۸۳؛ Vandrovysh 2006).

اگرچه یکی از ویژگی‌های مهم سیستم‌های پویا حساسیت آن‌ها به وضعیت اولیه است، تعیین کمی میزان این حساسیت کار ساده‌ای نیست. نمای لیاپانوف یکی از ابزارهایی است

که برای این منظور به کار می‌رود. نمای لیاپانوف به همان سبک و سیاق محاسبه مقادیر ویژه (eigenvalues) سیستم‌های پویا محاسبه می‌شود و تاحدودی از نظر مفهوم با آن نزدیک است. مقادیر ویژه معمولاً در یک نقطه در فضای حالت، نظیر نقطه تعادل، محاسبه می‌شوند، حال آن‌که نمای لیاپانوف متوسط‌گیری هندسی در مسیر پایدار سیستم است. برخلاف مقادیر ویژه، که می‌تواند مختلط نیز باشد، نمای لیاپانوف همواره عددی حقیقی است، نظیر مقادیر ویژه تعداد نمای لیاپانوف با بُعد سیستم برابر است (معینی و دیگران ۱۳۸۵).

نمای لیاپانوف متوسط نمای یک فرایند دینامیک است که نرخ واگرایی یا هم‌گرایی مسیرهای حالت را در فضای فاز نشان می‌دهد. واگرایی مسیر حالت نشان‌دهنده آن است که سیستمی با تفاوت‌هایی جزئی در وضعیت اولیه با گذشت زمان دارای مسیرهای حالتی بسیار متفاوت با هم است و قابلیت پیش‌بینی در این‌گونه فرایندها به سرعت از بین می‌رود. طبق تعریف، هر سیستمی با داشتن حداقل یک نمای لیاپانوف مثبت سیستمی آشوب‌گونه خوانده می‌شود. عکس اندازه نمای مربوط متناسب با زمانی است که بعد از آن زمان فرایند دینامیک پیش‌بینی‌ناپذیر خواهد شد (Takens 1981). برای سیستم‌هایی که معادلات حرکت آن‌ها مشخص و شناخته‌شده است روش سراسری برای محاسبه نماهای لیاپانوف آن وجود دارد (Wolf et al. 1985; Kaplan and Yorke 1979). این روش برای سری‌های زمانی قابل استفاده نیست.

λ می‌تواند مقادیر مثبت، منفی، و صفر را به شرح ذیل اختیار کند:

۱. اگر $\lambda < 0$ باشد، آن‌گاه یک نقطه ثابت یا یک چرخه متناوب پایدار خواهیم داشت. به عبارت دیگر، تمامی نقاط اولیه انتخابی به سمت یک نقطه ثابت یا چرخه متناوب هم‌گرا خواهند شد. به این سیستم‌ها پایدار مجانب (asymptotic stability) اطلاق می‌شود. با افزایش منفی $(-\infty - \lambda)$ پایداری سیستم افزایش می‌یابد، به طوری که برای $\lambda = -\infty$ ، یک نقطه ثابت یا یک چرخه متناوب فوق پایدار (super stable) وجود دارد.

۲. اگر $\lambda = 0$ باشد، سیستم فقط حول یک نقطه ثابت نوسان می‌کند. در این حالت، هر نقطه اولیه انتخابی حول یک چرخه حدی پایدار نوسان می‌کند. این نوع سیستم موسوم به پایدار لیاپانوف (Lyapunov Stability) است.

۳. اگر $\lambda > 0$ باشد، هیچ نقطه ثابت یا چرخه متناوب پایدار وجود ندارد. درحقیقت، نقاط ناپایدار (unstable)، ولی سیستم کران‌دار و آشوب‌ناک است. در این حالت، به علت حساسیت بالا به وضعیت اولیه، مسیرهای نزدیک به هم به سرعت واگرا می‌شوند (معینی و دیگران ۱۳۸۵).

برای محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیپانوف دو روش وجود دارد:

۱. روش‌هایی براساس ژاکوبین؛

۲. روش‌های مستقیم.

روش‌های مبتنی بر ژاکوبین زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که معادلات سیستم‌های دینامیکی شناخته شده باشند (Parlitz 2016) و برای سری‌های زمانی‌ای که معادلات دینامیکی آن‌ها نامشخص است از روش‌های مستقیم استفاده می‌شود.

روزن‌اشتاین و هم‌کارانش در مقاله خود به سه مشکل اصلی روش‌های موجود برای محاسبه نمای لیپانوف اشاره می‌کنند: ۱. پاسخ‌های غیرقابل اعتماد برای داده‌های کم؛ ۲. محاسبات سخت و فشرده؛ و ۳. نسبتاً دشوار برای پیاده‌سازی. آن‌ها روش جدیدی را برای محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیپانوف ارائه می‌دهند که برای داده‌های با حجم کم است و حساسیت کم‌تری به نویز دارد؛ مثلاً، الگوریتم ولف مستلزم وجود داده‌های زیاد است و به نویز حساس است (ملا بهرامی و دیگران ۱۳۹۲). کانتز و هم‌کاران (۱۹۹۱) با استفاده از مجموعه برنامه کامپیوتری تیسان (TISEAN) بزرگ‌ترین نمای لیپانوف را با روش روزن‌اشتاین محاسبه کرده‌اند.

۱.۱.۳ روش ولف

برای محاسبه نمای لیپانوف براساس الگوریتم ولف ابتدا ماتریس $m^*(N-m+1)$ بعدی از N داده اسکالر سری زمانی را ایجاد می‌کنیم. از میان این ماتریس، تمامی جفت بردارهای x_i و x_j را که در رابطه‌ای که خواهد آمد صدق می‌کنند، مشخص می‌کنیم (ابریشمی و دیگران ۱۳۸۱):

$$r_0(m; i, j) = |x_i - x_j| < \varepsilon$$

که در آن ε مقدار کوچک مثبت است. با رشد طول زمانی n $r_n(m; i, j)$ را به این صورت محاسبه می‌کنیم:

$$r_n(m; i, j) = |x_{i+n} - x_{j+n}|$$

سپس میزان واگرایی $dn(m; i, j)$ نقاط نزدیک به هم را در فضای m بعدی به این صورت:

$$d_n(m; i, j) = \frac{r_n}{r_0} = \frac{|x_{i+n} - x_{j+n}|}{|x_i - x_j|} \quad (1)$$

به دست می‌آوریم. آن‌گاه بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف λ را از این رابطه محاسبه می‌کنیم:

$$\lambda = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N - n} \sum_{n=0}^{N-1} \log d_n(m; i, j) \quad (2)$$

۲.۱.۳ روش روزناشتاین

اگر $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ یک سری زمانی مورد بررسی با حجم N باشد و x_i به صورت $X = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_M]^T$ یک $x_i = [x_i, x_{i+j}, \dots, x_{i+(m-1)j}]$ تعریف شود، آن‌گاه $M \times m$ ماتریس است، که در آن $M = N - (m-1)j$ است. اگر کوچک‌ترین فاصله بین نقطه X_j و نزدیک‌ترین همسایگی این نقطه، یعنی X_j برابر $d_j(0)$ باشد، در این صورت: $d_j(0) = \min_{x_j} \|X_j - X_j\|$ که در آن $\|\dots\|$ نرم اقلیدسی است. در این صورت، بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف به صورت زیر تعریف می‌شود (مشیری ۱۳۸۱):

$$\lambda_{\max}(i) = \frac{1}{i \Delta t} \frac{1}{(M-i)} \sum_{j=1}^{M-i} \ln \left(\frac{d_j(i)}{d_j(0)} \right) \quad (3)$$

که در آن Δt فاصله زمانی نمونه مورد مطالعه و $d_j(i)$ بیان‌گر کوچک‌ترین فاصله بین X_j و نزدیک‌ترین همسایگی این نقطه بعد از i مرحله زمانی است، یعنی $i \Delta t$ (ملا بهرامی و دیگران ۱۳۹۲).

روزناشتاین و هم‌کارانش در مقاله خود این معادله را به‌منزله تعریفی از بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف ارائه می‌دهند:

$$d(t) = Ce^{\lambda t}$$

که در آن $d(t)$ میانگین واگرایی در زمان t و C مقدار ثابتی است که میزان فاصله اولیه را نرمال‌سازی می‌کند. با توجه به رابطه پیش‌گفته فرض می‌کنیم که زامین جفت از نزدیک‌ترین همسایگی‌ها، در نمای لیاپانوف داده‌شده تقریباً از هم دور می‌شوند.

$$d_j(i) \approx C_j e^{\lambda_1(i \Delta t)} \quad (4)$$

با گرفتن لگاریتم از دو طرف این معادله به این رابطه می‌رسیم:

$$\ln d_j(i) \approx \ln C_j + \lambda_1(i \Delta t) \quad (5)$$

این معادله نشان‌دهنده مجموعه‌ای از خطوط (برای هر $j=1, 2, \dots, M$) تقریباً موازی است که شیب هر کدام به λ_1 بستگی دارد. حال می‌توان بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف را با برازش یک خط با روش حداقل مربعات (LS) بر خط میانگین که در این جا تعریف شده به دست آورد.

$$y(i) = \frac{1}{\Delta t} \langle \ln d_j(i) \rangle \quad (6)$$

که در آن علامت $\langle \rangle$ بیان‌گر میانگین تمامی مقادیر j است. بخش کلیدی محاسبات همین پروسه میانگین‌گیری در این عبارت است که به ما در محاسبه مقدار دقیق λ_1 در مجموعه‌های نویزدار و با حجم کوچک کمک می‌کند. عبارت C_j در معادله (۴) عمل نرمال‌سازی را انجام می‌دهد، اما همان‌طور که در رابطه (۵) مشاهده می‌شود، عمل نرمال‌سازی برای تخمین بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف ضروری نیست (Rosenstein et al. 1993).

به منظور محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف باید وقفه زمانی τ (time lag) و بعد محاط m (embedded dimension) را محاسبه کرد و از این مقادیر برای محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف استفاده کرد. برای محاسبه وقفه زمانی روش مناسب‌تر روش میانگین اطلاعات متقابل (AMI) و برای محاسبه بعد محاط روش مناسب‌تر روش کائو (Cao) است. به منظور از بین بردن تأثیر روندهای ناشی از رفتار فصلی و چرخه‌ای روی بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف توسط مدل ARMA و تجزیه سری زمانی روندهای موجود در سری‌های زمانی استخراج شده است و بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف برای پس‌ماندهای حاصل شده محاسبه شده است.

۲.۳ وقفه زمانی

به دست آوردن برآوردی مناسب از زمان تأخیر τ بسیار با اهمیت است. به طوری که انتخاب مناسب آن تجزیه و تحلیل داده‌ها را آسان می‌کند. اگر τ در مقایسه با مقیاس زمانی داخلی سیستم بسیار کوچک انتخاب شود، مؤلفه‌های متوالی در بردار تأخیر به شدت به هم نزدیک و

وابسته می‌شوند. بنابراین، تمامی بردارهای x_n در فضای نشاننده m بعدی در اطراف محور قطری در فضا متمرکز می‌گردند. این پدیده در مطالعات کاسداگلی (Casdagli 1991) با عنوان «افزونگی» نامیده شده است (Kantz and Schreiber 2004). از سوی دیگر، اگر τ بسیار بزرگ باشد، عناصر متوالی تقریباً مستقل هستند و نقاط ابری بزرگ را در m (اعداد حقیقی در بُعد m) پر می‌کنند. در این حالت، حتی اگر جاذب واقعی سیستم ساده باشد، جاذب بازسازی شده ممکن است بسیار پیچیده باشد (ibid.).

برای تقریب زمان تأخیر معمولاً از دو روش استفاده می‌شود:

۱. میانگین اطلاعات متقابل (Average Mutual Information/ AMI)؛

۲. تابع خودهم‌بستگی (Autocorrelation Function/ ACF).

۱.۲.۳ تابع خودهم‌بستگی (ACF)

در روش ACF محلی که در آن اولین مقدار ACF به صفر یا کم‌تر از مقدار کوچکی (مانند $0/1$ یا $0/2$) می‌رسد برابر زمان تأخیر انتخاب می‌شود (قاهری و دیگران ۱۳۹۱). تابع خودهم‌بستگی وابستگی خطی بین دو سری زمانی را نشان می‌دهد که با استفاده از زمان تأخیر از هم جدا شده‌اند. در روش تابع خودهم‌بستگی اگر زمان تأخیری‌ای که در آن مقدار ACF یک مقدار خاص آستانه است و نشان‌دهنده استقلال خطی است به دست آید، زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌شود. آستانه توصیه شده عبارت است از اولین مقدار زمان تأخیر که در آن ACF برابر صفر یا در صورتی که خودهم‌بستگی به‌طور نمایی تقلیل کند، مقدار کوچکی حدود $\frac{1}{e} = 0/368$ باشد (Kantz and Schreiber 2004).

۲.۲.۳ میانگین اطلاعات متقابل (AMI)

در روش AMI زمان رخ دادن اولین مینیمم در تابع میانگین اطلاعات متقابل به‌منزله زمان تأخیر مناسب و در روش دوم محلی که در آن اولین مقدار ACF به صفر یا کم‌تر از مقدار کوچکی (مانند $0/1$ یا $0/2$) می‌رسد برابر زمان تأخیر انتخاب می‌شود (قاهری و دیگران ۱۳۹۱).

استفاده از روش AMI در مقایسه با روش ACF پرکاربردتر و مناسب‌تر است؛ چراکه روش میانگین اطلاعات متقابل علاوه بر هم‌بستگی خطی، هم‌بستگی و ساختار غیرخطی را به حساب می‌آورد، ولی روش خودهم‌بستگی فقط هم‌بستگی خطی داده‌ها را بررسی می‌کند.

بنابراین، در بررسی سری‌های زمانی غیرخطی استفاده از AMI مناسب‌تر است و این روش را در سال ۱۹۸۶ فریزر و سویینی (Fraser and Swinney) برای انتخاب زمان تأخیر مناسب در تجزیه و تحلیل‌های غیرخطی معرفی کردند.

در روش AMI از تابع میانگین اطلاعات متقابل به‌منزله یک تابع هم‌بستگی غیرخطی برای تعیین زمان تأخیر مناسب استفاده می‌شود. به‌نحوی که $x(t)$ و $x(t+\tau)$ به میزان کافی از هم مستقل‌اند، اما حداقل هم‌بستگی ممکن را داشته باشند، نه به‌شکلی که هیچ ارتباطی با یکدیگر نداشته باشند. بنابراین، در روش میانگین اطلاعات متقابل زمان رخ دادن اولین مینیمم در تابع میانگین اطلاعات متقابل زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌شود. اطلاعات متقابل برگرفته از تئوری اطلاعات یا آنتروپی شانون (Shannon entropy) است. بدین ترتیب که با در اختیار داشتن سری مشاهدات $x(t)$ تابع چگالی احتمال $P(x(t))$ قابل محاسبه است. در نتیجه، تابع آنتروپی یا تابع اطلاعات $H(x(t))$ به این شکل تعریف می‌شود:

$$H(x(t)) = - \sum_{t=1}^N P(x(t)) \cdot \log_2 P(x(t)) \quad (7)$$

مفهوم آنتروپی عبارت است از میزان نبود حتمیتی که اندازه‌گیری‌های $x(t)$ به‌هم‌راه دارد. به‌بیان دیگر، نشان‌دهنده مقدار اطلاعاتی است که از اندازه‌گیری‌ها کسب می‌شود. به‌طوری‌که اندازه‌گیری‌های با احتمال پایین (دور از انتظار) به‌نسبت اندازه‌گیری‌های محتمل‌تر، اطلاعات بیشتری را در اختیار قرار می‌دهند. حال برای محاسبه وابستگی بین $x(t)$ و $x(t+\tau)$ به‌عبارتی میزان اطلاعاتی که به‌طور متقابل از مشاهدات $x(t)$ و $x(t+\tau)$ (که با τ به هم مرتبط می‌شوند) به‌دست می‌آید، تابع میانگین اطلاعات متقابل (AMI) بین $x(t)$ و $x(t+\tau)$ بدین صورت تعریف می‌شود (Cover and Thomas 1991).

$$AMI = \sum_{t=1}^N P(x(t), x(t+\tau)) \cdot \log_2 \frac{P(x(t), x(t+\tau))}{P(x(t))P(x(t+\tau))} \quad (8)$$

اندازه‌گیری اطلاعات متقابل دو متغیر نیازمند دانستن تابع چگالی احتمال توأم است. از روش‌های متداول برای تخمین این مقدار می‌توان به روش‌های مبتنی بر هیستوگرام اشاره کرد (اسکات ۱۹۹۲). در نهایت، پس از به‌دست آوردن میانگین اطلاعات متقابل با رسم نمودار تابع میانگین اطلاعات متقابل به‌ازای زمان تأخیرهای مختلف، اولین کمینه نسبی (حداقل نسبت به نقاط همسایه) نمودار به‌منزله زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌شود^۲ (قره‌باغ و دیگران ۱۳۹۳).

۳.۳ تعیین بعد محاط

یکی از پارامترهای مهم در بازسازی فضای فاز بعد محاط (embedded dimension) است. به علت حرکات ناپایدار در سیستم‌های آشوب‌ناک اگر m بزرگ انتخاب شود، ریسک مغشوش شدن الگوریتم افزایش خواهد یافت (Kantz and Schreiber 2004).

یک سیستم دینامیکی N بعدی را می‌توان با استفاده از N معادله دیفرانسیلی درجه یک با N متغیر $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ توصیف کرد. به طوری که تکامل سیستم در طول زمان مشخص شود. به عبارت دیگر، سیستم دینامیکی را می‌توان با استفاده از نمودار فضای حالت نمایش داد که سیر تکامل سیستم را از چند حالت اولیه نشان می‌دهد. در نمودار فضای حالت سیر تکامل سیستم توسط مسیرهای حالت (trajectory) یا مدارهایی نمایش داده می‌شود (قره‌باغ و دیگران ۱۳۹۳).

بدین ترتیب، بعد نشاننده همان تعداد N معادله دیفرانسیلی درجه یک است که توصیف‌کننده وضعیت سیستم در فضای فازی است. برای یافتن حداقل بعد محاط از دو روش استفاده می‌شود:

۱. روش FNN که کنل (Kennel) و هم‌کارانش در سال ۱۹۹۲ معرفی کردند؛
۲. روش Cao که کائو در سال ۱۹۹۷ معرفی کرد و به نوعی بهینه‌شده روش FNN است.

۱.۳.۳ روش شمارش نزدیک‌ترین همسایگی‌های کاذب (FNN)

یکی از روش‌های متداول تعیین کوچک‌ترین بعد محاط روش نزدیک‌ترین همسایگی محذوف یا FNN است. فرض کنید کوچک‌ترین بعد محاط برای سری زمانی $\{s_n\}$ برابر با m_0 باشد؛ این بدین معنی است که جاذب بازسازی شده در فضای تأخیر m_0 - بعدی تصویری یک‌به‌یک از جاذب در فضای حالت اصلی بوده است، به طوری که ویژگی‌های آن محفوظ بماند. بنابراین، همسایگی‌های نقطه‌ای مشخص بر روی همسایگی‌های همان نقطه در فضای تأخیر قرار می‌گیرند. با توجه به این تکرار ممکن است ساختار جاذب در ابعاد بالاتر به مدت طولانی حفظ نشود و در این حالت نقاط بر روی همسایگی‌های دیگر نقاط تصویر شوند، که آن‌ها را همسایگی‌های کاذب می‌نامند. ایده الگوریتم بدین صورت است که برای هر نقطه (x_i) در سری زمانی، نزدیک‌ترین همسایگی (x_j) آن در فضای m - بعدی جست‌وجو می‌شود و فاصله آن دو (یعنی $\|x_i - x_j\|$) محاسبه می‌شود. با تکرار این فرایند این آماره محاسبه می‌شود:

$$R_i = \frac{|x_{i+1} - x_{j+1}|}{\|x_i - x_j\|}$$

اگر R_i از آستانه‌ای هم‌چون \mathcal{E} تجاوز کند، این نقطه (x_j) به‌منزله نزدیک‌ترین همسایه کاذب مشخص می‌شود (Hegger et al. 1999). برای کاربرد صحیح این روش، لازم است قبلاً مقادیر τ و \mathcal{E} برآورد شوند. درعمل، رفتار کسری از همسایگی‌های کاذب (در دو بعد هم‌بستگی متوالی) درمقابل مقادیر مختلفی از بعد نشاننده ترسیم شده است و در هر بعد که منحنی بر محور افقی مماس شود (به صفر نزدیک شود)، مقدار آن m ، به‌مثابه بعد نشاننده متتخ (حداقل بعد) در نظر گرفته می‌شود (اسلامی و دیگران ۱۳۹۵).

۲.۳.۳ روش کائو

یکی از مشکلات اصلی روش FNN برآورد مقدار \mathcal{E} بود که باعث شد کائو این روش را بهبود بخشد و روش میانگین همسایگی‌های محذوف (averaged false nearest neighbor) را ارائه دهد که به روش کائو (Cao's Method) معروف شده است. اساس این روش برپایه محاسبه میانگین فواصل بردارهای تأخیر $E1(d)$ است. نقطه‌ای که در آن $E1(d)$ به اشباع برسد به‌منزله بعد محاط در نظر گرفته می‌شود، اما بررسی $E1(d)$ برای داده‌های تصادفی (stochastic) مناسب نیست و در این داده‌ها $E1(d)$ به سطح اشباع نخواهد رسید و با افزایش d سیر صعودی خواهد داشت. یکی دیگر از مشکلات دشوار بودن تشخیص نقطه‌ای است که $E1(d)$ با افزایش d در آن به حد اشباع می‌رسد و در داده‌های تصادفی هم (بیش‌تر در صورت کم‌بودن حجم نمونه و داده‌ها) ممکن است $E1(d)$ باوجود تصادفی بودن داده‌ها باز هم به حد اشباع برسد. برای رفع این مشکل کائو $E2(d)$ را ارائه کرد.

برای هر نقطه بازسازی‌شده $x_i(d)$ در فضای d بعدی تعریف می‌شود (کائو ۱۹۹۷):

$$\alpha(i, d) = \frac{R_i(d+1)}{R_i(d)}$$

که در آن $R_i(d)$ فاصله بین $x_i(d)$ و نزدیک‌ترین همسایگی آن $x_{n(i,d)}(d)$ است و $R_i(d)$ به این صورت محاسبه می‌شود:

$$R_i(d) = \|x_i(d) - x_{n(i,d)}(d)\| = \max_{0 \leq k \leq d-1} |x_{i+k\tau} - x_{n(i,d)+k\tau}|$$

و بدین ترتیب، $E(d)$ به منزله میانگین تغییرات نسبی فواصل بین دو جفت نقطه همسایه به صورت زیر تعریف می‌شود و مقدار آن فقط به τ و d بستگی دارد:

$$E(d) = \frac{1}{N - d\tau} \sum_{i=1}^{N-d\tau} \alpha(i, d)$$

و بنابراین:

$$E1(d) = \frac{E(d+1)}{E(d)}$$

و همان‌طور که گفته شد، برای تفکیک سری‌های زمان معین و قطعی (deterministic) از سری‌های زمانی تصادفی $E2(d)$ بدین گونه ارائه شد:

$$E^*(d) = \frac{1}{N - d\tau} \sum_{i=1}^{N-d\tau} |x_{i+d\tau} - x_{n(i,d)+d\tau}|$$

و $E^*(d)$ به منزله میانگین تغییرات مطلق فواصل بین دو جفت نقطه همسایه را اندازه‌گیری می‌کند و $E2(d)$ این گونه تعرف می‌شود:

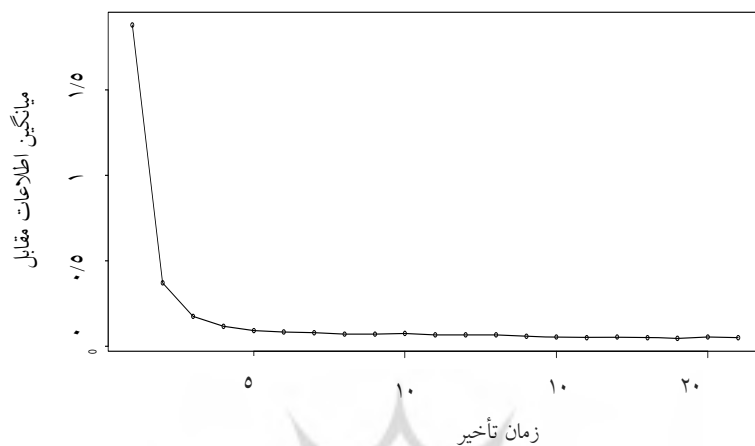
$$E2(d) = \frac{E^*(d+1)}{E^*(d)}$$

باتوجه به این‌که در داده‌های تصادفی مقادیر آتی و گذشته رابطه‌ای با هم ندارند، پس مقدار $E2(d)$ برای آن‌ها به‌ازای اکثر مقادیر d مساوی با یک خواهد بود و برای سری‌های زمانی معین مقدار $E2(d)$ به مقدار d مربوط خواهد بود و برای همه مقادیر یک‌سان و برابر نخواهد بود و مقادیری از d وجود خواهند داشت که در آن‌ها $E2(d) \neq 1$ می‌شود. نقطه‌ای که از آن به بعد $E2(d)$ و $E1(d)$ به سطح اشباع برسند و برهم منطبق شوند، به‌منزله بعد محاط مناسب انتخاب می‌شود. روش کائو برخی نارسایی‌های روش FNN را برطرف کرد، از جمله نیاز به داده‌های زیاد، ممکن نبودن کاربرد در داده‌های مربوط به سیستم‌های با بعد بالا (پیچیده)، ناتوانی تفکیک سری‌های نویزدار و معین، و امکان حساسیت به مقدار شعاع انتخابی.

۴. یافته‌های تحقیق

بدین ترتیب، وقفه زمانی متناسب با روش میانگین اطلاعات متقابل و بعد محاط با روش کائو محاسبه شده‌اند و پس از آن بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف با دو روش ولف و

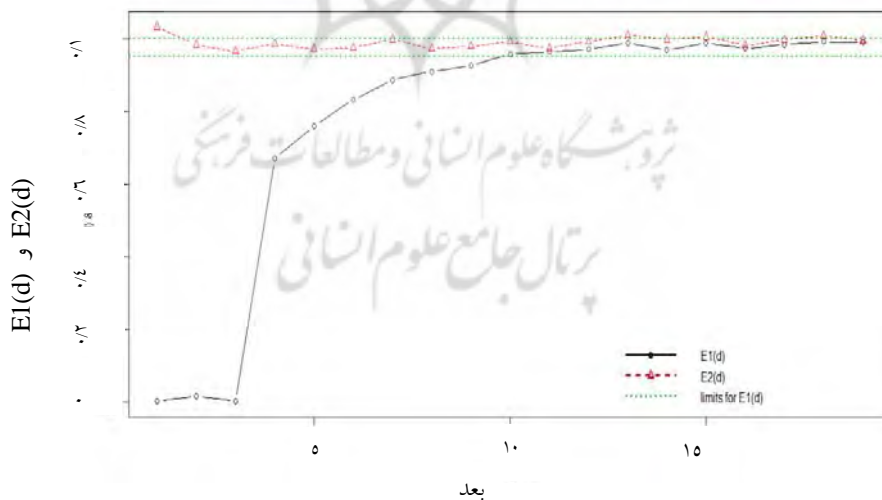
روزن‌اشتاین محاسبه شده است. مقادیر به دست آمده برای وقفه زمانی برابر ۸ و برای بعد محاط ۱۰ است ($\tau = 8, m = 10$).



شکل ۷. وقفه زمانی محاسبه شده با روش AMI

مأخذ: یافته‌های تحقیق

شکل ذیل نشان‌دهنده بعد محاط محاسبه شده برای شاخص کیفیت هوای شهر تهران با روش کائوست. نقطه‌ای را که $E(1)$ به اشباع می‌رسد به منزله بعد محاط انتخاب می‌کنیم.



شکل ۸. بعد محاط محاسبه شده با روش Cao

مأخذ: یافته‌های تحقیق

مطالعه تاب‌آوری اکوسیستم شهر تهران در برابر آلاینده‌های هوا ۵۱

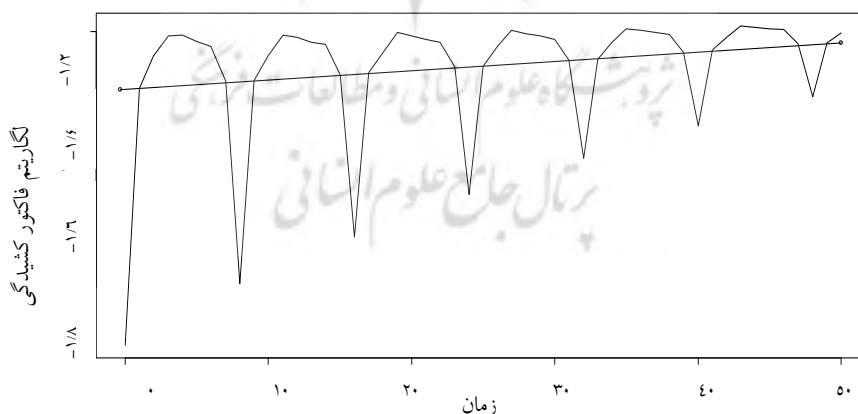
پس از محاسبه وقفه زمانی و بعد محاط بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف را محاسبه کرده‌ایم. محاسبات بعد محاط، وقفه زمانی، و نمای لیاپانوف با روش روزن‌اشتاین در نرم‌افزار R صورت گرفته است و محاسبه نمای لیاپانوف با روش ولف در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.

جدول ۲. بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف شاخص AQI محاسبه شده با روش ولف

بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف	بعد محاط
۰/۰۰۱۵	M = ۱
۰/۰۰۵۶	M = ۲
۰/۰۰۱۳	M = ۳
۰/۰۰۱۳	M = ۴
۰/۰۰۰۴	M = ۵
۰/۰۰۰۹	M = ۶
۰/۰۰۰۱	M = ۷
۰/۰۰۰۱	M = ۸
۰/۰۰۰۶	M = ۹
۰/۰۰۰۶	M = ۱۰

مأخذ: یافته‌های تحقیق

و در این جا شکل و مقادیر مربوط به محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف با روش روزن‌اشتاین آورده شده است:



شکل ۹. محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف با روش روزن‌اشتاین
مأخذ: یافته‌های تحقیق

شیب خط برازش شده به منظور محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف در جدول ۳ آورده شده است:

جدول ۳. محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف با روش روزناشتاین

آلاینده	بعد محاط بهینه m	زمان تأخیر T	λ
AQI	۱۰	۸	۰/۰۰۳۱۵

مأخذ: یافته‌های تحقیق

برای حصول از درست بودن نتایج به دست آمده مقدار بزرگترین نمای لیاپانوف برای پس ماندها و قسمت روند (بخش ۱.۱) محاسبه شد.

جدول ۴. محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف بر روی پس ماندهای مدل $ARMA(4,1)$

بزرگترین نمای لیاپانوف محاسبه شده بر روی پس ماند مدل $ARMA(4,1)$
۰/۰۰۵۰۱

مأخذ: یافته‌های تحقیق

جدول ۵ نیز نشان دهنده مقدار بزرگترین نمای لیاپانوف محاسبه شده برای بخش روند و پس ماند حاصل از تجزیه سری زمانی شاخص کیفیت هوای شهر تهران است.

جدول ۵. محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف برای بخش روند و پس ماند (تصادفی)

سری زمانی	بزرگترین نمای لیاپانوف
Trend	۰/۰۰۰۲۵۸
Random	۰/۰۰۲۱۷

مأخذ: یافته‌های تحقیق

۵. نتیجه گیری

به منظور محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف به محاسبه، وقفه زمانی، و بعد محاط نیاز است. برای محاسبه وقفه زمانی عموماً از دو روش تابع خودهم بستگی ACF و تابع میانگین اطلاعات متقابل AMI استفاده می شود که روش AMI به علت مورد توجه قرار دادن ساختار

غیرخطی در مدل‌های غیرخطی مناسب‌تر است. برای محاسبه بعد محاط نیز از دو روش شمارش نزدیک‌ترین همسایگی کاذب و روش Cao استفاده می‌شود که روش کائو به علت حساسیت کم‌تر به نویز داده‌ها و امکان استفاده با داده‌های کم مناسب‌تر است. برای محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیپانوف نیز از روش روزن‌اشتاین استفاده شد که در مقایسه با روش ولف معتبرتر است. مقدار عددی بزرگ‌ترین نمای لیپانوف برای سری زمانی شاخص کیفیت هوای شهر تهران برای بازه زمانی پنج‌ساله مورد مطالعه برابر با 0.00315 به دست آمد و مقدار نمای لیپانوف محاسبه شده برای پس‌مانده‌های حاصل شده نیز همگی مثبت بودند و جداسازی روندهای فصلی و خطی نیز اثری بر این مثبت بودن نداشته است. باتوجه به مثبت بودن بزرگ‌ترین نمای لیپانوف (و آشوب‌ناک بودن سری زمانی شاخص کیفیت هوا) می‌توان گفت که اکوسیستم شهر تهران در برابر آلاینده‌های هوا که به آن وارد می‌شوند تاب‌آور (تاب‌آوری مهندسی) نیست و این بدین معنی است که در صورت وارد آمدن یک شوک از سمت منابع انتشاردهنده آلاینده‌ها وضعیت آلودگی هوای تهران بدتر خواهد شد و اکوسیستم شهر تهران برای ارائه خدمات اکوسیستمی (مثل هوای پاک) دچار اختلال خواهد شد. این امر لزوم توجه هرچه بیشتر به عوامل تضعیف‌کننده اکوسیستم تهران را نشان می‌دهد. هرچند رشد و توسعه اقتصادی برای هر کشور و هر شهری امری مطلوب است، بی‌توجهی به ظرفیت‌های اکوسیستم منطقه یا تضعیف و تخریب منابع زیست‌محیطی می‌تواند پی‌آمدهای ناگواری را در پی داشته باشد و مفهوم رفاه و مطلوبیت ناشی از رشد و توسعه را به کام مردم و شهروندان تلخ کند. مدیران شهری و تصمیم‌گیران اقتصادی تهران باید به بحث تاب‌آوری اکوسیستم این شهر در برابر آلاینده‌های هوا توجه کنند و این مهم را در تصمیمات خود دخیل گردانند.

پی‌نوشت‌ها

۱. ازسوی دیگر، بزرگ‌ترین نمای لیپانوف یکی از مهم‌ترین آزمون‌های کشف آشوب در سری‌های زمانی است (برای مطالعه بیشتر بنگرید به مشیری ۱۳۸۱).
۲. برای بخش AMI بیش‌تر از مقاله قره‌باغ و دیگران (۱۳۹۳) استفاده شد.

کتاب‌نامه

- ابریشمی، حمید، علی معینی، و مهدی احراری (۱۳۸۱)، «آزمون ناخطی معین برای قیمت‌های آتی نفت»، فصل‌نامه پژوهش‌های اقتصادی ایران، دانشکده اقتصاد علامه طباطبایی، ش ۱۰.

اسلامی، امیر، بیژن قهرمان، علی ضیایی، و پیمان اسلامی (۱۳۹۵)، «تأثیر کاهش نوفه در تحلیل پویایی غیرخطی سری زمانی دمای حداکثر روزانه در ایستگاه کرمان»، مجله علمی - پژوهشی تحقیقات منابع آب/ایران، دوره ۱۲، ش ۱.

بخشی خانیکی، غلامرضا (بی تا)، آلودگی محیط زیست، دانشگاه پیام نور.

پریور، پرستو، شهرزاد فریادی، احمدرضا یاور، اسماعیل صالحی، و پگاه هراتی (۱۳۹۲)، «بسط راهبردهای پایداری اکولوژیک برای افزایش تاب آوری محیط زیست شهری (نمونه موردی: مناطق ۱ و ۳ شهرداری تهران)» محیط شناسی، س ۳۹، ش ۱.

پریور، پرستو، شهرزاد فریادی، اسماعیل صالحی، احمدرضا یاور، و احد ستوده (۱۳۹۱)، «بسط چهارچوب ارزیابی راهبردی محیط زیستی طرح های توسعه شهری براساس تفکر تاب آوری»، نامه معماری و شهرسازی، ش ۱۱.

جعفریان، وحید، علی اکبر دماوندی، و محمدرضا یزدانی (۱۳۹۳)، «مفهوم تاب آوری و ارتباط آن با مدیریت پایدار سرزمین»، دومین همایش ملی بیابان با رویکرد مدیریت مناطق خشک و کویری، دانشکده کویرشناسی دانشگاه سمنان با همکاری مرکز بین المللی بیابان دانشگاه تهران.

رستمی، محمدرضا، فرزانه باقی نبیری، و جواد قاسمی (۱۳۹۰)، «بررسی رفتار قیمت سهام شرکت های پذیرفته شده در بورس اوراق بهادار تهران با استفاده از تئوری آشوب»، فصل نامه علمی - پژوهشی مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار، ش ۷.

روشن، غلامرضا، فرامرز خوش اخلاق، سعید نگهبان، و جعفر میرتوکلی (۱۳۸۸)، «تأثیر آلودگی هوا بر نوسانات اقلیمی شهر تهران»، علوم محیطی، س ۷، ش ۱.

شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (۱۳۹۰)، گزارش کیفیت هوای شهر تهران.

شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (۱۳۹۱)، گزارش کیفیت هوای شهر تهران.

شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (۱۳۹۲)، گزارش کیفیت هوای شهر تهران.

شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (۱۳۹۳)، گزارش کیفیت هوای شهر تهران.

شرکت کنترل کیفیت هوای تهران (۱۳۹۴)، گزارش کیفیت هوای شهر تهران.

طباطبایی، شیما (۱۳۹۲)، «بررسی مدیریت شهری - زیست محیطی تهران در طی ۳ دوره تاریخی قاجار، پهلوی، و انقلاب اسلامی»، نشریه سپهر، دوره ۲۲، ش ۸۸.

قاهری، عباس، محمدعلی قربانی، هادی دلفروز، و لیلا ملکانی (۱۳۹۱)، «ارزیابی جریان رودخانه با استفاده از نظریه آشوب»، مجله پژوهش آب/ایران، ش ۱۰.

قره باغ، ثمین، حسین رضایی، و بایرامعلی محمدنژاد (۱۳۹۳)، «مقایسه فضای حالت بازسازی شده و آشوب ناکی جریان رودخانه نازلوچای در مقیاس های زمانی مختلف»، نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ج ۲۲، ش ۵.

مشیری، سعید و حبیب مروت (۱۳۸۴)، «بررسی وجود فرایند آشوبی در شاخص بازدهی کل قیمت سهام بازار بورس تهران»، پژوهش های اقتصادی ایران، دوره ۷، ش ۲۵.

- مشیری، سعید و فائزه فروتن (۱۳۸۳)، «آزمون آشوب و پیش‌بینی قیمت آتی نفت خام»، فصل‌نامه پژوهش‌های اقتصادی ایران، ج ۴، ش ۲۱.
- مشیری، سعید (۱۳۸۱)، «مروری بر نظریه‌های آشوب و کاربردهای آن در اقتصاد»، فصل‌نامه پژوهش‌های اقتصادی ایران، س ۱۲، ش ۴.
- معینی، علی، حمید ابریشمی، و مهدی احراری (۱۳۸۵)، «به‌کارگیری نمای لیاپانوف برای مدل‌سازی سری زمانی قیمت آتی نفت بر پایه توابع پویا»، فصل‌نامه تحقیقات اقتصادی دانشکده اقتصاد تهران، ش ۷۶.
- معینی، علی، حمید ابریشمی، و مهدی احراری (۱۳۸۵)، «به‌کارگیری نمای لیاپانوف برای مدل‌سازی سری زمانی قیمت نفت خام بر پایه توابع پویا»، مجله تحقیقات اقتصادی، ش ۷۶.
- ملاپهرامی، احمد، حسن خداویسی، و رضا حسینی (۱۳۹۲)، «پیش‌بینی تورم بر پایه معادلات دیفرانسیل تصادفی با مدل‌های رقیب»، فصل‌نامه پژوهش‌های اقتصادی، ش ۱.
- Bengtsson, J., P. Angelstam, T. Elmqvist, U. Emanuelsson, C. Folke, M. Ihse, F. Moberg, and M. Nystrom (2003), "Reserves, Resilience, and Dynamic Landscapes", *Ambio*, vol. 32, no. 6.
- Bo Yu, Chengmin Huang, Zuhan Liu, Haipeng Wang, and Lili Wang (2011), "A Chaotic Analysis on Air Pollution Index Change Over Past 10 Years in Lanzhou, Northwest China", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 25.
- Carpenter S., B. Walker, J. M. Anderies, and N. Abel (2001), "From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What?", *Ecosystems*, vol. 4.
- Chappelka, H. and S. Pan (2007), "Influence of Ozone Pollution and Climate Variability on Net Primary Productivity and Carbon Storage in China's Grassland Ecosystems from 1961 to 2000", *Environmental Pollution*, no. 149.
- Cover, T. M. and J. A. Thomas (1991), *Elements of Information Theory*, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Desjardins, E., G. Barker, and Z. Lindo (2015), "The Quarterly Review of Biology", *Promoting Resilience*, vol. 90, no. 2.
- Espinosa, Christian E. and Juan Gorioitía (2012), *Stability of Sovereign Risk in the Eurozone Through the Lyapunov Exponent*, Universidad Diego Portales, Working Paper.
- Fraser, A. M. and H. L. Swinney (1986), "Independent Coordinates for Strange Attractors from Mutual Information", *Physical Review A*, vol. 33.
- Graedel, T. E. and P. J. Crutzen (1993), *Atmospheric Change: An Earth System Perspective*, New York: Freeman Company Press.
- Greenham, T., E. Cox, and J. Ryan (2013), *Mapping Economic Resilience*, Friends Provident Foundation Tower House Fishergate.
- Holling, C. S. (1992), "Cross-Scale Morphology Geometry and Dynamics of Ecosystems", *Ecological Monographs*, vol. 62.

- Holling, C. S. (1996), "Engineering Resilience Versus Ecological Resilience", in: *Engineering Within Ecological Constraints*, P. Schulze (ed.), Washington (DC.): National Academy Press.
- Kantz, Holger and Thomas Schreiber (2004), *Nonlinear Time Series Analysis*, Cambridge University Press.
- Kaplan, J. and J. Yorke (1979), "Chaotic Behavior of Multidimensional Difference Equations", *Functional Differential Equations and Approximation of Fixed Points*, Springer, Heidelberg New York.
- Lee, Chung-Kung and Shu-Chen Lin (2008), "Chaos in Air Pollutant Concentration (APC) Time Series", *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 8, no. 4.
- Liao, K. H. (2012), "A Theory on Urban Resilience to Floods—A Basis for Alternative Planning Practices", *Ecology and Society*, vol. 17.
- Moshiri, S. and F. Foroutan (2004), "Testing for Deterministic Chaos in Futures Crude Oil Price: Does Neural Network Lead to Better Forecast?", *Canadian Economics Association*.
- Parlitz, Ulrich (2016), "Estimating Lyapunov Exponents from Time Series", *Chaos Detection And Predictability*, Springer Berlin Heidelberg.
- Perrings, C. (1994), "Ecological Resilience in the Sustainability of Economic Development", in: *International Symposium on Models of Sustainable Development*, Paris, vol. II.
- Perrings, C. (2006), "Resilience and Sustainable Development", *Environment and Development Economics*, vol. 11.
- Perrings, C. (1998), "Resilience in the Dynamics of Economy–Environment Systems", *Environmental and Resource Economics*, vol. 11. Pimm, S. L. (1984), "The Complexity and Stability of Ecosystems", *Nature*, vol. 307.
- Rainer Hegger, Holger Kantz, and Thomas Schreiber (1999), "Practical Implementation of Nonlinear Time Series Methods: The TISEAN Package", *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol. 9, no. 2.
- Reggiani, Aura, Thomas D. Graaff, and Peter Nijkamp (2002), "Resilience: An Evolutionary Approach to Spatial Economic Systems", *Networks and Spatial Economics*, no. 2.
- Rosenstein, M. T., J. J. Collins, and C. J. De Luca (1993), "A Practical Method for Calculating Largest Lyapunov Exponents from Small Data Sets", *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 65.
- Salini, A. Giovanni and Patricio Pérez (2015), "A Study of the Dynamic Behaviour of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile", *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 15, no. 1.
- Takens, F. (1981), "Detecting Strange Attractors in Turbulence", in: *Dynamical Systems and Turbulence*, Lecture Notes in Mathematics, D. A. Rand and L. S. Young (eds.), vol. 898.
- Vandrovysh, V. (2006), "Nonlinearities in Exchange-Rate Dynamics: Chaos?", <<https://ssrn.com/abstract>>.
- Walker, B., C. S. Holling, S. R. Carpenter, and A. Kinzig (2004), "Resilience, Adaptability, and Transformability in Social-Ecological Systems", *Ecology and Society*, vol. 9, no. 2.
- Webb, C. T. and S. A. Levin (2005), "Cross-System Perspectives on The Ecology and Evolution of Resilience", in: *Robust Design: A Repertoire of Biological, Ecological, and Engineering Case Studies*, E. Jen (ed.), SFI Lecture Note Series, Oxford University Press.
- Wolf, A., J. B. Swift, and H. L. Swinny (1985), "Determining Lyapunov Exponents from a Time Series", *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 16.