



مقاله پژوهشی

مطالعه تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی ایران^۱تیمور محمدی^۲حمید آماده^۳عاطفه تکلیف^۴خلیل قدیمی دیزج^۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۶

چکیده

جایگزینی مصرف گاز طبیعی با سایر سوخت‌های فسیلی طی سال‌های گذشته، موجب افزایش چشمگیر آن، در سبد مصرف انرژی ایران شده است؛ لذا بررسی تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی در ایران هدف اصلی پژوهش می‌باشد. در روزهای سرد سال تا ۸۵ درصد گاز طبیعی در بخش خانگی به مصرف می‌رسد؛ بنابراین جهت سنجش تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی، نمای لیاپانوف، بر اساس مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی، در اثر نوسانات دما، محاسبه می‌شود. برای محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف نیاز به محاسبه وقفه زمانی و بعد محاط است. برای محاسبه وقفه زمانی از تابع میانگین اطلاعات متقابل و برای محاسبه بعد محاط از روش کائو و در نهایت برای محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف از روش اشتاین استفاده گردید. به طوری که نتایج نشان می‌دهد؛ مصرف گاز طبیعی دارای فرآیند آشوبی بوده و به تبع آن، سیستم توزیع گاز طبیعی ایران، تاب‌آوری لازم را ندارد. همچنین محاسبات مربوط به نمای لیاپانوف، حاکی از بهبود تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی ایران، بعد از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها است.

واژگان کلیدی: آزاد سازی قیمت گاز طبیعی، نمای لیاپانوف، تاب‌آوری، مصرف گاز طبیعی، سیستم توزیع گاز طبیعی.

Keywords: Liberalization of gas price, Lyapanof exponent, Resiliency, Natural gas consumption, Natural gas distribution.

JEL Classification: Q41, Q48.

۱. این مقاله مستخرج از رساله دکتری با عنوان "اثر آزادسازی قیمت گاز طبیعی بر تاب‌آوری سیستم توزیع گاز ایران" می‌باشد و با حمایت "شرکت مهندسی و توسعه گاز ایران" انجام شده است.

Atmahmadi@gmail.com

۲. دانشیار اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبایی (نویسنده مسئول)

Amadeh@gmail.com

۳. استادیار اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبایی

At.taklif@gmail.com

۴. استادیار اقتصاد، دانشگاه علامه طباطبایی

Khghadimi7@gmail.com

۵. دانشجوی دکتری اقتصاد نفت و گاز، دانشگاه علامه طباطبایی

۱- مقدمه

از آن‌جا که تاب‌آوری، یک موضوع بین‌رشته‌ای است؛ در علوم مختلف نظیر روانشناسی، فیزیک، مهندسی، مدیریت و اقتصاد تعاریف متفاوتی از آن، ارائه شده است. در لغت‌نامه وبستر^۱ تاب‌آوری به معنای "توانایی برای بازیابی بعد از وقوع فاجعه یا تغییر" تعریف شده است. تاب‌آوری در مهندسی سازه‌ها به مفهوم "بازگشت سریع پس از تنش، تحمل تنش بیشتر و کاهش تخریب در اثر مقدار معینی از تنش" ارائه شده است (بیوجونز^۲ و همکاران، ۲۰۱۳). تاب‌آوری در روانشناسی یعنی "تمایل افراد، جهت حل و فصل مشکلات و استرس‌ها، توان فرد جهت مقابله با مشکلات و استرس‌ها و یا توان فرد جهت جلوگیری از بروز مشکلات و استرس‌ها" می‌باشد. یک سیستم اجتماعی در شرایطی تاب‌آور محسوب می‌شود که بتواند؛ شوک‌های موقت یا دائم را جذب کرده و خود را با شرایط به سرعت در حال تغییر وفق دهد، یا تاب‌آوری می‌تواند کارکرد سیستم در هنگامه آشفتگی باشد (ابونوری و لاجوردی، ۱۳۹۵).

اتفاقات و حوادث پیش‌بینی نشده، همواره حیات بشری را تحت‌الشعاع قرار داده‌اند؛ لیکن بازگشت به مسیر و احیاء و بازپروری خود، فرآیندی است که سرعت و کیفیت آن از فردی به فردی دیگر و از جامعه‌ای به جامعه‌ای دیگر متفاوت است. اقتصاددانان با معرفی مفهوم تاب‌آوری و به دنبال آن شاخص تاب‌آوری اقتصادی، به دنبال توضیح و توصیف تفاوت مذکور هستند. آن‌ها معتقدند آسیب‌پذیری و سرعت بازگشت و احیای جوامع بشری را می‌توانند با شاخص تاب‌آوری اقتصادی توضیح دهند. به باور اقتصاددانان، اقتصادهایی که به دنبال حوادث پیش‌بینی نشده (ناگوار)، کمتر آسیب می‌بینند و یا سریع‌تر به شرایط باثبات باز می‌گردند؛ تاب‌آوری اقتصادی بالاتری دارند (آماده و همکاران، ۱۳۹۵).

یکی از اتفاقات مهم مربوط به نوسانات دما به ویژه در ماه‌های سرد سال است؛ که منجر به افزایش چشمگیر سهم مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی (۸۵ درصد تولید روزانه) می‌گردد؛ به طوری که به دنبال آن، قطعی گاز صنایع عمده و نیروگاه‌ها و حتی کاهش گاز صادراتی رخ می‌دهد. تا جایی که تداوم مصرف بالای گاز طبیعی در بخش خانگی در اثر سرمای شدید، می‌تواند منجر به قطعی گاز خانوارها در برخی مناطق کشور شده و مشکلات اقتصادی-اجتماعی گوناگونی را به

1. Webster

2. Bujones (2013)

وجود آورد. در واقع شوک ناشی از نوسانات دما در ماه‌های سرد سال، منجر به افزایش چشمگیر مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی و به تبع آن، محدودیت مصرف در سایر بخش‌ها از جمله نیروگاه‌ها و صنایع می‌گردد.

پژوهش حاضر، یکی از اولین مطالعات مربوط به تاب‌آوری، با استفاده از نمای لیاپانوف، در حوزه انرژی ایران می‌باشد و در سطح بین‌المللی نیز مطالعات اندکی در حوزه تاب‌آوری با این شیوه انجام شده است؛ به طوری که سنجش میزان تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی در ایران از یک سو و مطالعه فرآیند آشوبی مصرف گاز طبیعی بر مبنای نظریه آشوب از سوی دیگر، از دلایل اصلی جدید بودن و نوآوری پژوهش، محسوب می‌گردد.

هدف اصلی از تحقیق حاضر، سنجش میزان تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی در ایران طی سال‌های ۱۳۸۴-۱۳۹۶ می‌باشد. همچنین بررسی وضعیت مصرف گاز طبیعی از دیدگاه نظریه آشوب، از دیگر اهداف تحقیق محسوب می‌گردد. به همین منظور، برای سنجش تاب‌آوری سیستم گازرسانی و نیز بررسی فرآیند آشوبی مصرف گاز طبیعی، از متغیر مصرف روزانه گاز طبیعی در بخش خانگی، با بکارگیری نمای لیاپانوف، در دوره‌های زمانی قبل و بعد از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها (واقعی شدن قیمت گاز طبیعی) و کل دوره زمانی (۱۳۸۴-۱۳۹۶) استفاده شده است.

ساختار مقاله به این شکل است که پس از مقدمه، ابتدا مبانی نظری و پیشینه تحقیق مرتبط با "تاب‌آوری" و همچنین "نظریه آشوب" ارائه می‌شود و سپس روش پژوهش و بعد از آن، یافته‌های تحقیق تبیین شده است و در نهایت نتایج و پیشنهادها، تحقیق، بیان می‌گردد.

۲- مبانی نظری و مروری بر مطالعات گذشته

مفهوم تاب‌آوری بطور عمده بر این فرضیه که حالات مختلف سیستم شامل نقاط تعادل گوناگون می‌باشد، بنا شده است. به عبارت دیگر، فرض می‌شود که تکامل سیستم‌ها (اقتصادی، زیست‌محیطی و غیره) با جابجایی 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 (رجیانی، گراف و نیجکامپ^۱، ۲۰۰۲).

الف) تعریف هولینگ^۲ (۱۹۹۲): این تعریف به اختلالی که سیستم می‌تواند؛ قبل از جابجایی از یک حالت به حالت دیگر جذب نماید؛ برمی‌گردد. این تعریف بستگی به حضور سیستم در یک نقطه تعادل و یا نزدیکی آن ندارد و فرض می‌کند که سیستم‌های زیست‌محیطی بوسیله تعادل پایدار موضعی چندگانه، مشخص می‌شوند و اندازه‌گیری تاب‌آوری سیستم در هر دامنه پایدار موضعی عبارتست از میزان شوکی که سیستم می‌تواند قبل از تغییر وضعیت و جابجایی به دامنه پایدار موضعی دیگر جذب نماید. "اختلال" ممکن است به جابجایی سیستم از یک دامنه پایدار به دامنه پایدار دیگر منجر شود. اگر این "اختلال" باعث جابجایی سیستم به دامنه پایدار دیگر نگردد؛ در این صورت سیستم در برابر آن "اختلال" تاب‌آور است.



نمودار ۱: تاب‌آوری مهندسی و زیست‌محیطی

منبع: لیاو^۳ و همکاران، ۲۰۱۲

همان‌طور که در نمودار ۱ ملاحظه می‌گردد؛ سیستم بعد از وارد آمدن شوک، در صورت تاب‌آور بودن، به وضعیتی جدید منتقل می‌شود.

^۱ Reggiani, Graaff & Nijkamp (2002)

^۲ Holling

^۳ Liao

ب) تعریف پرینگز^۱ (۱۹۹۴): این تعریف به خواص سیستم حول تعادل پایدار برمی‌گردد که برگرفته از تعریف پیم^۲ (۱۹۸۴) است که تاب‌آوری سیستم را اندازه‌گیری سرعت بازگشت سیستم به حالت تعادل می‌داند (پیم، ۱۹۸۴ و پرینگز، ۱۹۹۴).

روشن است که از نقطه نظر تجربی، در بکارگیری روش هولینگ برای اندازه‌گیری تاب‌آوری، مشکلاتی ظاهر می‌گردد. به طور مثال، اینکه چگونه می‌توان اندازه مخروط جاذب را اندازه‌گیری کرد؟ پرینگز برای این کار، نمای لیاپانوف^۳ را مطرح کرده است.

اخیراً نویسندگان بسیاری^۴ اذعان کرده‌اند که مفهوم تاب‌آوری نه تنها در سیستم‌های زیست‌محیطی، بلکه بطور کامل^۵ موثری، می‌تواند؛ در توضیح، تشریح و مطالعه سیستم‌های اقتصادی - اجتماعی به کار رود؛ زیرا اصول حاکم، بر کلیه این سیستم‌ها، یکسان است (رجیانی، گراف و نیجکامپ، ۲۰۰۲).

پترسون^۵ (۱۹۹۸) تعریف دیگری از تاب‌آوری ارائه می‌دهد:

الف) تاب‌آوری مهندسی: عبارتست از نرخ بازگشت سیستم به حالت یگانه پایدار یا حالت سیکلی پایدار، بعد از یک اختلال (هولینگ، ۱۹۸۶) که این تفسیر کاملاً بر اساس نظر پیم می‌باشد (رجیانی، گراف و نیجکامپ، ۲۰۰۲).

ب) تاب‌آوری زیست محیطی: میزان اختلالی که سیستم قبل از تغییر ساختار، به علت تغییر در متغیرها و روندی که رفتار را کنترل می‌نماید، می‌تواند جذب کند (گوندرسون و هولینگ، ۲۰۰۱، رجیانی، گراف و نیجکامپ، ۲۰۰۲).

اگر با توجه به دو تعریف بالا تاب‌آوری مورد توجه قرار گیرد؛ می‌توان یک تصویر روشن از مفهوم تاب‌آوری و اندازه‌گیری‌های مربوط به آن، در سیستم معین به دست آورد (رجیانی، گراف و نیجکامپ، ۲۰۰۲).

به عنوان مثال؛ معادله شناخته شده لجستیک ورهولست^۶ در فضای گسسته مورد توجه قرار می‌گیرد:

1. Perrings (1994)

2. Pimm (1984)

3. Lyapunov Exponent

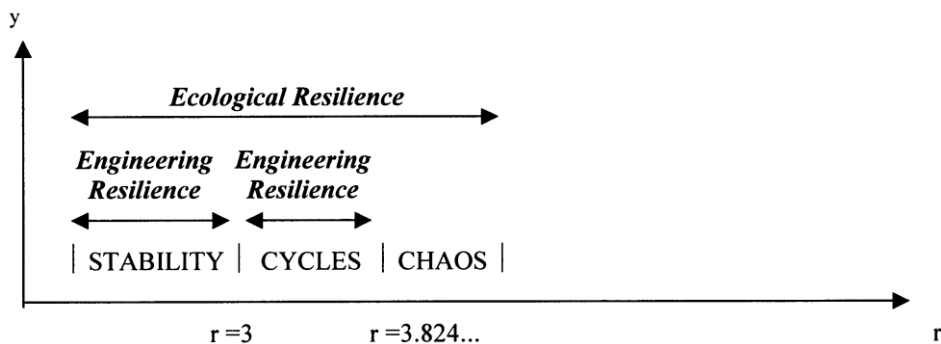
۴. به باتایال ۱۹۹۸؛ ۱۹۹۹ و لوین ۱۹۹۸ رجوع شود.

5. Patterson (1998)

6. Varhoulst

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

با تحلیل فازی-فضایی مربوطه؛ (y نسبت به r) کاملاً واضح است که برای مقادیر $3 < r < 3.824$ معادله لجستیک قبل از رسیدن به زمان شوک در $r = 3.824$ شروع به نوسان می‌کند (رجیانی، گراف و نیجکامپ، ۲۰۰۲).



نمودار ۲: تاب‌آوری زیست‌محیطی و مهندسی برای معادله لجستیک

منبع: رجیانی و همکاران، ۲۰۰۲

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

از ملاحظات پیشین روشن می‌گردد؛ هر دو مفهوم تاب‌آوری مهندسی و زیست‌محیطی؛ به شدت برای تحلیل سیستم‌های اقتصادی و تعیین مشخصه‌های مراحل تکاملی آن‌ها، مفید خواهد بود (رجیانی، گراف و نیجکامپ، ۲۰۰۲).

لوین^۱ (۱۹۹۸) در مقاله‌ای نشان داد؛ سیستم‌های اقتصادی - اجتماعی و چند بعدی (فضایی) باید به اندازه کافی در برابر چالش‌ها و تغییرات ناگهانی، مجهز باشند؛ در حالی که معمولاً تشخیص سیگنال‌های قوی، برای فهمیدن به موقع تغییرات، تحرک‌ها و انجام راه‌حل‌های موثر، مشکل خواهد بود. در برخورد با چنین مسائلی، به یک سیستم واکنشی که انعطاف‌پذیر و سازگار باشد،

^۱. Levin (1998)

نیاز است. در سیستم‌های زیست‌محیطی و اقتصادی- اجتماعی به طور مشابه، فعالیت‌های بشر می‌تواند منجر به جابجایی کیفی ساختار و عملکرد شود. واضح است که سیستم در معرض از دست دادن تاب‌آوری است؛ یعنی، دیگر در برابر تنش‌ها و شوک‌های ناشی از فعالیت‌های بشر، ظرفیت جذب شوک و تنش را ندارد؛ به طوری که منجر به تغییرات اساسی و از دست دادن عملکرد و غالباً از دست دادن بهره‌وری می‌گردد. تاب‌آوری؛ توانایی تجربه تغییر و اختلالات بدون تغییرات کمی فاجعه‌آمیز، در ساختار اساسی عملکرد سیستم و ابزاری برای اندازه‌گیری همبستگی سیستم می‌باشد (لوین، ۱۹۹۸).

پرینگز (۱۹۹۸) اهمیت تاب‌آوری در سیستم‌های محیطی- اقتصادی را با تاکید بر لزوم تحقیق در حوزه نظریه تکاملی تصادفی با اتخاذ نظریه نوسازی و با نظریه مارکوف^۱ بیان می‌دارد. بدون شک این یک گام به جلو است؛ چون در این راه، یک تمرکز نیز بر روی پویایی گذرای سیستم‌های چند تعادلی تصادفی، با غلبه بر اشکالات ضمنی تعاریف پیم و هولینگ، صورت گرفته است. در این زمینه پرینگز نیز بین حالت‌های جذب و حالت‌های گذار، تمایز قایل شده است (رجیانی، گراف و نیجکامپ، ۲۰۰۲).

در کل لازم است که تحقیقات تئوریک (نظری) و روش‌شناختی بیشتری درباره تاب‌آوری و همچنین ترکیب آن با مفاهیم ذکر شده در بالا که در فضای اقتصاد مورد استفاده قرار می‌گیرد، انجام شود. بطور تجربی؛ هنوز دانش ما در بکارگیری اندازه‌گیری تاب‌آوری در موارد عملی واقعی مطالعاتی در علوم (شامل تمامی رشته‌ها و زمینه‌ها) جای کار زیادی دارد. در این زمینه امکان بکارگیری روش‌های اندازه‌گیری تاب‌آوری مهندسی در موارد تجربی، گام اول است (رجیانی، گراف و نیجکامپ، ۲۰۰۲).

در تعریفی که توسط لینو بریگوگلیو^۲ (۲۰۰۹) ارائه شده؛ برای تعریف تاب‌آوری از نحوه تعامل انسان با ویروس آنفولانزا کمک گرفته شده است. در چنین رویکردی، سه مفهوم از تاب‌آوری قابل استنباط است: الف) بیمار می‌شود؛ اما سریع بهبود می‌یابد. ب) در مقابل اثرات منفی ویروس مقاومت می‌کند؛ حتی شده با روش‌های درمانی و تقویتی (ث) ویروس را پس می‌زند؛ چه در داخل بدن و چه با دوری از منابع پر خطر. در قیاس این وضعیت با اقتصاد برای

1. Markov

2. Lino Briguglio (2009)

تاب‌آوری اقتصادی، در حالت الف، این تعریف، یعنی "توانایی اقتصاد برای ترمیم سریع پس از شوک‌های خسارت بار" می‌تواند استخراج شود. در حالت ب، تاب‌آوری اقتصادی به شکل "عدم تأثیرپذیری از شوک‌های اقتصادی" می‌تواند تعریف شود و در حالت ث نیز "توانایی اقتصاد در پس زدن شوک‌های مخرب" قابل تعمیم است.

جدول ۱: تعاریف رشته‌ای - تخصصی از تاب‌آوری

نویسنده اول	حوزه	تعریف
گوردون ^۱ ، ۱۹۷۸	فیزیک	توانایی دوام آوردن در برابر انرژی فشار آورنده و به طور ارتجاعی منحرف شدن، بدون شکستن یا تغییر شکل دادن.
کافیناس ^۲ ، ۲۰۰۳	اجتماعی	دو نوع تاب‌آوری اجتماعی: الف) ظرفیت یک سیستم اجتماعی در تسهیل تلاش‌های انسانی در جهت ردیابی روندهای تغییر، کاهش آسیب‌پذیری‌ها و تسهیل سازگاری ب) ظرفیت یک سیستم (اجتماعی-بوم‌شناختی) در حفظ حالت‌های مرجح یک فعالیت اقتصادی
برایتو ^۳ ، ۲۰۰۳	جامعه	توانایی واحدهای اجتماعی در آرام کردن مخاطرات، شامل اثرهای فجاج و انجام فعالیت‌های بازایی در روش‌هایی که گسست اجتماعی را حداقل کند و اثرات بحران‌های آتی را کاهش دهد.
لانگستف ^۴ ، ۲۰۰۵	سیستم بوم‌شناختی	توانایی فرد، گروه یا سازمان در استمرار موجودیت خود (یا حفظ کم و بیش ثابت) در مواجهه با انواع متعدد شوک‌های ناگهانی ^۴ . تاب‌آوری در سیستم‌هایی که در سطح بالایی قابل سازگاری هستند (به استراتژی‌های خاص محدود نمی‌شود) و منابع متنوعی دارند، یافت می‌شود.
روز ^۵ ، ۲۰۰۷	اقتصادی (نهاد یا سیستم)	تاب‌آوری (پویا): سرعت بازایی از شوک شدید، جهت تحقق یک حالت مطلوب. تاب‌آوری اقتصادی ایستا: توانایی حفظ عملکرد (مثل؛ استمرار تولید) هنگام وارد شدن شوک. تاب‌آوری ذاتی: توانایی رتخ و فتح بحران‌ها تاب‌آوری سازگار شونده: توانایی در وضعیت‌های بحرانی در جهت حفظ عملکرد بر مبنای نبوغ یا تلاش فوق‌العاده.
باتلر ^۶ ، ۲۰۰۷	فرد	سازگاری مناسب تحت شرایط کم توان شدن ^۸

منبع: وایت^۹ و همکاران، ۲۰۱۵

1. Gordon (1978)
2. Kofinas (2003)
3. Longstaff (2005)
4. Surprise
5. Rose (2007)
6. Inheren
7. Butler (2007)
8. Extenuating Circumstances
9. White (2015)

در ادبیات تاب‌آوری، به سطوح سه‌گانه‌ای از تاب‌آوری اشاره شده است: تاب‌آوری فرد، اجتماع^۱ و ملی. در برخی مطالعات، دو سطح آخر به عنوان تاب‌آوری اجتماعی^۲ در نظر گرفته شده‌اند (کیم‌هی،^۳ ۲۰۱۴).

برخی از پژوهش‌ها نیز تاب‌آوری را دارای سطوح چندگانه‌ای مثل؛ فردی، اجتماعی، نهادی، ملی، منطقه‌ای و جهانی دانسته‌اند.

پژوهش دیگری تاب‌آوری را با سطوح و اجزای متفاوت‌تری بررسی کرده است. این پژوهش، تاب‌آوری ملی را دارای زیرسیستم‌های زیر می‌داند:

۱. زیرسیستم اقتصادی: مشتمل بر جنبه‌هایی از قبیل محیط اقتصاد کلان، بازار کالا و خدمات، بازار مالی، بازار کار، پایدارپذیری و بهره‌وری و مانند آن‌ها.

۲. زیرسیستم زیست‌محیطی: مشتمل بر جنبه‌هایی مانند منابع طبیعی، شهرسازی و سیستم زیست‌بوم شناختی.

۳. زیرسیستم حکمرانی: مشتمل بر جنبه‌هایی همچون نهادها، دولت، رهبری، سیاست‌ها و قوانین.

۴. زیرسیستم زیرساخت‌ها: مشتمل بر جنبه‌هایی همچون زیرساخت‌های حساس (مخابرات، انرژی، سلامت، حمل و نقل و آب).

۵. زیرسیستم اجتماعی: مشتمل بر جنبه‌هایی همچون سرمایه‌انسانی، سلامت، اجتماع و افراد (غیاثوند و همکاران، ۱۳۹۳).

با توجه به مطالب مذکور، در این مقاله تاب‌آوری زیرساخت سیستم توزیع گاز طبیعی ایران به عنوان مهم‌ترین زیرساخت انرژی (به دلیل دارا بودن بیشترین سهم در سبد انرژی ایران) بر مبنای مفهوم تاب‌آوری مهندسی و با استفاده از نمای لیاپانوف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

لازم به توضیح است؛ مفهوم نمای لیاپانوف، قبل از ظهور نظریه آشوب، جهت مشخص نمودن پایداری سیستم‌های غیر خطی به کار می‌رفت (معینی و همکاران، ۱۳۸۵). همچنین در مطالعات تجربی از جمله؛ رجیانی، گراف و نیجکامپ (۲۰۰۲) برای بررسی تاب‌آوری آلمان غربی در

1. Community

2. Social Resilience

3. Kimhi (2014)

حوزه بازار کار و نیز اسپینوسا و گوریگوتیا^۱ (۲۰۱۲) در بررسی پایداری کشورهای حوزه یورو، در مقابل بحران مالی سال ۲۰۰۷، از نمای لیاپانوف استفاده کردند.

مفهوم ساده آشوب، ریشه در برداشت‌های اولیه انسان در مورد جهان دارد. کلمه یونانی Chaos که به آشوب و هرج و مرج یا بی‌نظمی ترجمه شده است؛ تلقی یونانیان باستان را نسبت به هستی، می‌رساند. طبق این دیدگاه، هر چند که امور جهان بی‌نظم، تصادفی و در نتیجه غیر قابل پیش‌بینی به نظر می‌رسد؛ در عین حال از یک نظم و قطعیت برخوردار است (مشیری، ۱۳۸۱).

هیلز^۲ (۱۹۹۰) آشوب یا بی‌نظمی را این‌گونه تعریف می‌کند؛ بی‌نظمی و آشوب، نوعی بی‌نظمی منظم یا نظم در بی‌نظمی است. بی‌نظم، از آن رو که نتایج آن غیر قابل پیش‌بینی است و منظم، بدان جهت که از نوعی قطعیت برخوردار است. بی‌نظمی در مفهوم علمی، یک مفهوم ریاضی محسوب می‌شود؛ شاید نتوان خیلی دقیق آن را تعریف کرد. اما می‌توان، آن را نوعی اتفاقی بودن، همراه با قطعیت دانست. قطعیت آن، به خاطر آن است که بی‌نظمی دلایل درونی دارد و به علت اختلالات خارجی رخ نمی‌دهد. اتفاقی بودن، به دلیل آن که رفتار بی‌نظمی، بی‌قاعده و غیر قابل پیش‌بینی دقیق است (هیلز، ۱۹۹۰).

انگاره اصلی و کلیدی تئوری آشوب این است که در هر بی‌نظمی، نظم نهفته است؛ به این معنا که نباید نظم را تنها در یک مقیاس جستجو کرد، پدیده‌ای که در مقیاس محلی، کاملاً تصادفی و غیر قابل پیش‌بینی به نظر می‌رسد، چه بسا در مقیاس بزرگتر، کاملاً پایا (Stationary) و قابل پیش‌بینی باشد. نظریه آشوب، بخشی از سیستم‌های پویا محسوب می‌شود. سیستم پویا؛ شامل مجموعه حالات ممکن، همراه با یک ضابطه می‌باشد؛ به گونه‌ای که حالت حاضر را با حالاتی از دوره‌های گذشته تعیین می‌کند (علی‌گودر، ۱۹۹۶).

تئوری آشفتگی یا آشوب^۴ برای اولین بار در سال ۱۹۶۵ توسط دانشمندی بنام ادوارد لورنز^۵ در هواشناسی به کار برده شده و آن را به یک علم تبدیل نموده و سپس در حیطه تمام علوم و مباحث تجربی، ریاضی، رفتاری، مدیریتی و اجتماعی وارد شده و اساس تغییرات بنیادی در علوم بویژه؛

1. Espinosa and Gorigitia (2012)

2. Hills (1990)

3. Alligood (1996)

4. Chaos Theory

5. Edward Lorenz

هواشناسی، نجوم، مکانیک، فیزیک، ریاضی، زیست‌شناسی، اقتصاد و مدیریت را فراهم آورده است.

تئوری آشوب به شاخه‌ای از ریاضیات گفته می‌شود که در ارتباط با سیستم‌هایی است که دینامیک آن‌ها در برابر مقادیر اولیه رفتار بسیار حساسی نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که رفتارهای آینده آن قابل پیش‌بینی نیست. به این سیستم‌ها، سیستم‌های آشوبی گفته می‌شود که از نوع سیستم‌های غیر خطی دینامیک هستند و بهترین مثال برای آن‌ها اثر پروانه‌ای، جریانات هوایی و دوره اقتصادی می‌باشد.

در دیدگاه نظریه آشوب، سیستم‌های پیچیده صرفاً ظاهری پر آشوب دارند و در نتیجه، نامنظم و تصادفی به نظر می‌رسند، در حالی که در واقعیت تابع یک جریان معین با یک فرمول ریاضی مشخص هستند؛ از همین رو، موضوع آشوب در ریاضیات، معمولاً با عنوان آشوب معین، مطرح می‌شود؛ که بر پایه نظریه رشد غیر خطی با بازخورد^۱ شکل گرفته است (مشیری، ۱۳۸۱). به عنوان نمونه؛ ارتباط میان مصرف انرژی و رشد اقتصادی از یک فرآیند خطی تبعیت ننموده و تحت شرایط مختلف، تغییر جهت می‌دهد. بنابراین استفاده از مدل‌های غیر خطی، جهت تخمین رابطه مصرف انرژی و تولید ناخالص داخلی، می‌تواند نتایج دقیق و قابل اعتمادی ایجاد نماید (هاتفی مجومرد و همکاران، ۱۳۹۷).

آزمون‌های متفاوتی برای وجود آشوب در سری‌های زمانی وجود دارد که از جمله این آزمون‌ها؛ بعد همبستگی و حداکثر نمای لیاپانوف است. یکی از مشخصه‌های سیستم‌های پویا "خاصیت حساسیت نسبت به شرایط اولیه" می‌باشد. مهمترین وسیله برای تشخیص وجود حساسیت نسبت به شرایط اولیه در یک سیستم پویا، استفاده از نمای لیاپانوف است. میزان آشوبناکی سیستم و نرخ واگرایی مسیرهای همسایه در فضای فاز را نمای لیاپانوف، مشخص می‌کند. در واقع در این روش، میانگین نمایی واگرایی یا همگرایی نقاط نزدیک به هم اما نه با شرایط اولیه یکسان، اندازه‌گیری می‌شود؛ یعنی نمای لیاپانوف مثبت، میانگین نمایی واگرایی نقاط نزدیک به هم، اما نه با شرایط اولیه یکسان و نمای لیاپانوف منفی، میانگین نمایی همگرایی نقاط نزدیک به هم، اما نه با شرایط اولیه یکسان را اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین با توجه به ویژگی "حساسیت نسبت به شرایط اولیه"، نمای لیاپانوف مثبت می‌تواند به عنوان تعریفی برای آشوب معین سیستم بیان شود؛ که به طور

^۱. Nonlinear Growth with Feedback

خاص تر در تعریف حداکثر نمای لیاپانوف مطرح می‌شود. همچنین این آزمون می‌تواند پایداری یک سیستم پویا را اندازه‌گیری کند (باسک^۱، ۱۹۹۷).

نظریه "پایداری" نقشی اساسی در نظریه و مهندسی سیستم‌ها دارد. معمولاً پایداری نقاط تعادل را از دید لیاپانوف (ریاضیدان روسی) بررسی می‌کنند. یک نقطه تعادل را پایدار می‌گوئیم اگر همه پاسخ‌هایی که از نقاط نزدیک به آن آغاز می‌شود در همان نزدیکی باقی بماند؛ در غیر این صورت، آن نقطه تعادل ناپایدار است. این نقطه را پایدار مجانبی می‌گوئیم؛ اگر تمامی پاسخ‌هایی که از نقاط نزدیک به آن آغاز شود؛ نه تنها در همان نزدیکی باقی بماند؛ بلکه با افزایش زمان، به سوی نقطه تعادل، سوق یابد.^۲

۲-۱- مطالعات پیشین

ابریشمی و همکاران (۱۳۸۱) وجود آشوب در سری زمانی قیمت‌های آتی نفت (۹۹-۱۹۹۶) را بررسی کردند. 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 غیر تصادفی بودن سری استفاده شد. به این ترتیب فرضیه غیر تصادفی و غیر خطی بودن ساختار سری زمانی قیمت‌های آتی نفت مورد آزمون قرار گرفت. به عبارت دیگر بررسی گردید که آیا می‌توان یک مدل غیر خطی دینامیکی برای سری زمانی قیمت‌های آتی نفت پیشنهاد کرد؟ تا به تع آن بتوان یک پیش‌بینی دقیق و صحیح را برآورد نمود.

مشیری و فروتن (۱۳۸۳) وجود آشوب در ساختار سیستم مولد قیمت نفت خام شاخص WTI را در بازه زمانی ۲۰۰۳-۱۹۸۳ مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها بدین منظور از نمای لیاپانوف و بعد همبستگی به عنوان آزمون‌های مستقیم آشوب و آزمون‌های BDS و شبکه عصبی به منظور مطالعه غیر خطی بودن این ساختار استفاده کرده‌اند. نمای لیاپانوف مثبت، مقدار بعد همبستگی حاصله نیز حدود ۰,۵ بوده است که این دو نشان‌گر آشوب در این سری زمانی می‌باشند.

^۱. Bask (1997)

^۲. خلیل، حسن، کتاب سیستم‌های غیر خطی، ترجمه منتظر غلامعلی، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۰.

مشیری و مروت (۱۳۸۴) در مقاله‌ای به بررسی وجود آشوب در شاخص‌های بازدهی روزانه و هفتگی قیمت سهام بازار بورس تهران در بازه زمانی ۱۳۸۲-۱۳۷۷ پرداختند. نتایج آزمون بزرگترین نماهای لیاپانوف که آزمون مستقیمی برای فرآیندهای غیر خطی 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 یک رهنمود سیاستی مبنی بر شناخت عوامل ناکارایی بازار مانند شفاف نبودن جریان اطلاعات و اقدام در جهت رفع آن‌ها داشته باشد. همچنین برای مدل‌سازی و به ویژه پیش‌بینی شاخص قیمت‌های سهام، استفاده از مدل‌های غیر خطی به جای مدل‌های معمول خطی مناسب‌تر است.

معینی و همکاران (۱۳۸۵) در مقاله‌ای به بررسی آشوبناکی سری زمانی قیمت نفت در سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۹۸ پرداخته‌اند و پس از آن برای پیش‌بینی قیمت نفت از ترکیب نمای لیاپانوف با تابع لجستیک بهره برده‌اند و مقدار نمای لیاپانوف را ۱,۲۵ بدست آورده‌اند.

بابازاده و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از تئوری آشوب و ماکزیمم نمای لیاپانوف، حساسیت نرخ ارز ایران نسبت به شرایط اولیه را در برابر دلار آمریکا، کانادا، پوند انگلیس، یورو اروپا و درهم امارات، در بازه زمانی ۱۳۷۱/۱/۵ تا ۱۳۸۶/۳/۲ مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج، حاکی از آن است که نرخ ارز ایران در برابر دلار آمریکا از حساسیت کمتری نسبت به شرایط اولیه برخوردار است و نیز از یک فرایند آشوبی تبعیت می‌کند. بنابراین، استفاده از روش‌های خطی برای پیش‌بینی این متغیر مناسب نمی‌باشد. لذا با استفاده از مدل غیر خطی شبکه عصبی، به پیش‌بینی نرخ ارز ایران در برابر دلار آمریکا پرداخته و نتایج حاصل از الگوریتم شبکه عصبی، نشان می‌دهد که قیمت‌های روزانه ارز انتخابی، در یک بازه کوتاه‌مدت بر اساس قیمت‌های گذشته، با دقت بالایی قابل پیش‌بینی است.

رستمی و همکاران (۱۳۹۰) در مقاله‌ای به بررسی رفتار قیمت سهام شرکت‌های پذیرفته شده در بورس تهران با تئوری آشوب پرداختند. آن‌ها اطلاعات ۳۱ شرکت برای بازه زمانی ۱۳۸۸-۱۳۸۰ را مورد مطالعه قرار دادند و نمای لیاپانوف را با دو روش اشتاین و تیلور تخمین زدند که هر دو روش تایید کننده وجود آشوب بوده است.

پرریور و همکاران (۱۳۹۱) در مقاله‌ای به بررسی چارچوب ارزیابی راهبردی محیط زیستی طرح‌های توسعه شهری بر اساس تفکر تاب‌آوری پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که

چارچوب‌هایی که تاکنون به کار گرفته شده از کارآیی لازم برای تحلیل سیستم‌های پیچیده اجتماعی-اکولوژیکی به ویژه شهرها برخوردار نیست. از این رو ضرورت دارد از رویکردهای نوین مانند تفکر تاب‌آوری و اکولوژی شهری در ارزیابی راهبردی محیط زیستی جهت برآورد اهداف توسعه پایدار و کاهش عدم قطعیت استفاده شود. در نهایت آن‌ها یک چارچوب سه مرحله‌ای پیشنهاد می‌کنند که در مرحله اول این چارچوب، تاب‌آوری عمومی بستر محیط زیست شهری به صورت کلی از طریق معیارهای سنجش تاب‌آوری عمومی ارزیابی می‌شود. مرحله دوم سنجش تاب‌آوری بستر نسبت به طرح توسعه پیشنهادی است و مرحله سوم عبارت است از بسط مدیریت تطبیقی برای فراهم آوردن سیستمی انعطاف‌پذیر جهت مشارکت افراد ذی‌نفع و ذی‌نفع و نیز پایش اثرات.

قاهری و همکاران (۱۳۹۱) در مقاله‌ای به بررسی آشوبناکی جریان آب رودخانه اهر چای (بازه زمانی ۱۹ ساله) پرداخته‌اند. زمان تاخیر و بعد محاط به ترتیب ۶۵ و ۱۳ و بعد فراکتالی نیز ۴ بوده است. نتایج مطالعه حاکی از دقت مناسب نظریه آشوب در پیش‌بینی جریان آب این رودخانه می‌باشد.

ابونوری و لاجوردی (۱۳۹۵) در مقاله‌ای به برآورد شاخص‌های آسیب‌پذیری و تاب‌آوری اقتصادی پرداخته‌اند. آسیب‌پذیری از ویژگی‌های ساختاری است که منجر به افزایش نقاط ضعف اقتصاد در برابر شوک‌های برونزا می‌شود. تاب‌آوری اقتصادی نیز به توانایی سیاستی یک اقتصاد برای مقاومت در برابر شوک و میزان بازیابی پس از شوک اطلاق می‌شود. در این مقاله با استفاده از روش حداکثر راستنمائی، شاخص آسیب‌پذیری و تاب‌آوری اقتصادی کشورهای عضو اوپک برای ۱۳۹۲-۱۳۷۴ برآورد شده است. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که کشورهای عراق، آنگولا، لیبی و نیجریه دارای آسیب‌پذیری بالا و امارات، قطر، کویت و عربستان سعودی دارای آسیب‌پذیری پایین‌تری هستند. رتبه ایران در شاخص خالص تاب‌آوری و در میان ۱۴ کشور عضو اوپک برابر ۶ برآورد شده است.

شاکری و همکاران (۱۳۹۴) در مقاله‌ای به بررسی سری زمانی روزانه قیمت سکه تمام بهار آزادی در ایران طی دوره زمانی ۱۳۸۵/۸/۱۰ تا ۱۳۹۲/۱۱/۹ بر اساس نظریه آشوب پرداخته‌اند. برای وجود روند معین یا تصادفی بودن سری زمانی از آزمون BDS، در سه مرحله استفاده شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که سری زمانی قیمت سکه، قابل پیش‌بینی است و فرض عدم وجود

توابع غیر خطی در پسماند الگوهای ARIMA و GARCH با استفاده از آزمون مذکور رد می‌شود. همچنین برای بررسی روند آشوبی در این سری زمانی، از آزمون حداکثر نمای لیاپانوف استفاده شده است که نتیجه این آزمون نشان می‌دهد؛ داده‌ها دارای روند آشوبی می‌باشند؛ از این رو امکان وجود توابع غیر خطی در سری زمانی قیمت سکه پذیرفته شده و قابلیت پیش‌بینی قیمت آن تأیید می‌شود.

آماده و همکاران (۱۳۹۵) به مطالعه تاب‌آوری اکوسیستم شهر تهران در برابر آلاینده‌های هوا با استفاده از بزرگترین نمای لیاپانوف پرداخته‌اند. به طوری که بزرگترین نمای لیاپانوف مثبت به معنی وجود آشوب و به تبع آن کاهش میزان تاب‌آوری سیستم می‌باشد. اطلاعات مورد استفاده در این پژوهش مربوط به شاخص کیفیت هوا (AQI) برای بازه زمانی ۱۳۹۴-۱۳۹۰ می‌باشد که به صورت میانگین روزانه و شامل ۱۸۲۶ داده است. نتایج نشان‌گر وجود آشوب در سری زمانی شاخص کیفیت هوا (AQI) می‌باشد. از نظر تاب‌آوری نیز اکوسیستم شهر تهران در برابر آلاینده‌های وارد شده از تاب‌آوری بالایی برخوردار نیست و توان کافی برای مقابله با شوک‌های وارده را ندارد؛ از این رو توجه به تاب‌آوری در تصمیم‌گیری‌های اقتصادی و مدیریت شهری، بسیار مهم است.

مغاری و همکاران (۱۳۹۵) در مقاله‌ای اثر آسیب‌پذیری و تاب‌آوری اقتصادی بر تولید ناخالص داخلی کشورهای منتخب عضو اوپک را مورد مطالعه قرار داده‌اند. نتایج حاصل از مطالعه نشان می‌دهد کشورهای ایران، الجزایر، اکوادور، نیجریه و ونزوئلا در وضعیت پسر و لخرج قرار داشته؛ اما پتانسیل افزایش تاب‌آوری را در سال‌های آینده خواهند داشت و کویت در بهترین وضعیت و امارات در وضعیت خودساخته قرار دارد. همچنین نتایج نشان می‌دهد آسیب‌پذیری اقتصادی رابطه‌ای عکس و تاب‌آوری اقتصادی رابطه‌ای مستقیم با تولید ناخالص داخلی دارد.

میرجلیلی و بزرگی (۱۳۹۷) در مقاله‌ای به بررسی شاخص ترکیبی تاب‌آوری اقتصادی ایران طی سال‌های ۱۳۹۴-۱۳۸۴ پرداخته‌اند. به همین منظور یک شاخص ترکیبی بومی متشکل از متغیرهای نرخ تورم، نرخ بیکاری، نرخ ارز، نسبت کسری بودجه به تولید ناخالص داخلی، سهم نفت در بودجه، نسبت صادرات غیر نفتی به واردات، نسبت واردات کالاهای واسطه‌ای و اولیه به کل واردات، نسبت بودجه کل کشور به تولید ناخالص داخلی، نسبت مصرف دولت به مصرف کل اقتصاد، نسبت صادرات و واردات به تولید ناخالص داخلی، اقتصاد زیرزمینی، نسبت شاغلان با

تحصیلات عالی به کل شاغلان دولت، ضریب جینی، نرخ باسودای، تعداد بیمه‌شدگان اصلی تأمین اجتماعی، تاب‌آوری اقتصادی متناسب با شرایط اقتصاد ایران، محاسبه شده و تفسیر می‌شود. نتایج نشان‌دهنده روند افزایشی شاخص مقاومت اقتصاد ایران با شیب ملایم است. بیشترین میزان شاخص در سال ۱۳۹۳ و کمترین آن در سال ۱۳۸۴ می‌باشد. بررسی ارتباط میان شاخص تاب‌آوری و تولید ناخالص داخلی سرانه، بیان‌گر وجود رابطه مثبت در دوره مورد بررسی است؛ به این صورت که با افزایش تاب‌آوری اقتصادی، تولید ناخالص داخلی سرانه کشور نیز افزایش می‌یابد.

رجیانی و همکاران (۲۰۰۲) در مقاله خود به بررسی تاب‌آوری آلمان غربی در حوزه بازار کار پرداختند. آن‌ها برای این منظور از نمای لیاپانوف بهره بردند. نتایج مطالعه نشان‌گر پایداری کم صنایع تولیدی (مصرفی) و ساختمان‌سازی نسبت به سایر بخش‌ها بود.

روز (۲۰۰۴) در مقاله خود تاب‌آوری اقتصادی آب منطقه‌ای پورتلند در ایالت اورگان آمریکا در برابر زمین لرزه را با پیش فرض ۶/۴ ریشتر و با قطعی آب برای مدت ۳ تا ۹ هفته قبل و بعد از بازسازی، با بکارگیری مدل تعادل عمومی قابل محاسبه، شبیه‌سازی و برآورد کرده است. نتایج حاکی از آن است که وجود یک مکانیزم قیمتی در شرایط بحرانی می‌تواند در افزایش تاب‌آوری اقتصادی موثر باشد.

لی و لین^۱ (۲۰۰۸) در مقاله‌ای به بررسی آشوبناک بودن سری‌های زمانی انتشار آلاینده‌های هوا پرداختند. آن‌ها در مقاله خود هر ۵ آلاینده (NO , NO_2 , SO_2 , PM_{10} , CO) را بررسی کردند و پارامترهای نمای لیاپانوف، بعد همبستگی و آنتروپی کولموگروف را برای این آلاینده‌ها محاسبه کردند؛ که نتایج نشان‌گر آشوبناکی این سری‌های زمانی برای هر ۵ آلاینده؛ از منظر هر سه پارامتر مورد محاسبه بوده است.

یو و لیو^۲ (۲۰۱۱) در مقاله‌ای به بررسی روند ۱۰ ساله شاخص آلودگی هوا برای شهر لائو چین پرداختند. آن‌ها برای بازسازی فضای فاز، پارامترهای بعد محاط و زمان تاخیر را به ترتیب با روش‌های کائو و تابع اطلاعات متقابل، به دست آوردند. بزرگترین نمای لیاپانوف حاصله، مثبت بوده و این یعنی شاخص آلودگی هوا روندی آشوبناک داشته است. همچنین مقدار بعد همبستگی

1. Lee and Lin (2008)

2. Yu and Liu (2011)

(بعد محاط) برابر ۳/۴۹ بوده است و این یعنی عوامل اصلی دخیل در روند انتشار آلاینده‌های شهر لانژو ۴ مورد بوده است.

اسپینوسا و گوریگویتا (۲۰۱۲) در پژوهشی به بررسی پایداری کشورهای حوزه یورو در مقابل بحران مالی ۲۰۰۷ پرداختند. آن‌ها این پایداری را با محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف، در طول چند سال محاسبه کردند؛ نتایج مطالعه نشان‌گر اقدامات مناسب و به موقع آلمان در مقابل این بحران‌ها بود. کوچکترین نماهای لیاپانوف برای آلمان و به تبع آن پایدارترین اقتصاد هم، برای آن کشور بوده است.

بورمن^۱ و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از شاخص ترکیبی و با بکارگیری ۱۰ مولفه و ۵۲ متغیر، تاب‌آوری ۵ گروه از کشورهای توسعه یافته، اروپای مرکزی و شرقی، مستقل مشترک المنافع، در حال توسعه آسیایی، شمال و شرق میانه آفریقا، جنوب صحرای آفریقا و نیم کره غربی را در دوره زمانی ۲۰۱۱-۱۹۹۷ برآورد نمودند.

سالینی و پرز^۲ (۲۰۱۵) در مقاله‌ای به بررسی آشوبناکی آلاینده ذرات کمتر از ۲/۵ میکرون ($PM_{2.5}$) در شهر سانتیاگو شیلی پرداختند. بازه زمانی مورد مطالعه آن‌ها سال‌های ۲۰۰۶-۲۰۰۰ بود. نتایج مطالعه نشان‌گر وجود آشوب و مقدار بزرگترین نمای لیاپانوف بین ۰/۳ و ۰/۵ بوده است. آنگیون و باتیس^۳ (۲۰۱۵) با استفاده از روش شاخص ترکیبی و با بکارگیری ۴۲ متغیر خالص تاب‌آوری آسیب‌پذیری ۹۵ کشور را برای دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۰ محاسبه کردند. نتایج نشان می‌دهد کشورهای توسعه یافته تاب‌آوری بالا و کشورهای کمتر توسعه یافته آسیب‌پذیری بالایی دارند.

۳- روش پژوهش

در این پژوهش، با استفاده از نمای لیاپانوف، بر اساس مصارف روزانه گاز طبیعی در بخش خانگی، طی دوره ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۶ تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی در ایران محاسبه می‌گردد. بدیهی است در صورت مثبت بودن نمای لیاپانوف، علاوه بر سنجش میزان تاب‌آوری سیستم گازرسانی، وضعیت مصرف گاز طبیعی، از دیدگاه نظریه آشوب نیز مشخص می‌گردد.

¹. Boormanl (2013)

². Salini & Pérez (2015)

³. Angeon & Bates (2015)

آزمون نمای لیاپانوف بر اساس این ویژگی سری‌های آشوبی است که نقاط مجاور در این سری‌ها به مرور زمان، از هم جدا شده و نسبت به هم، واگرا می‌شوند. توان لیاپانوف، این واگرایی را به وسیله یک تابع نمایی، اندازه‌گیری می‌کند. محاسبه توان لیاپانوف از طریق اندازه‌گیری مقدار کشیدگی یا خمیدگی که در حرکت سیستم رخ می‌دهد؛ انجام می‌شود. در واقع، در این روش سرعت متوسطی که مسیرهای انتقالی دو نقطه‌ای که در ابتدا به هم نزدیک بوده‌اند؛ به طور نمایی از یکدیگر منحرف می‌شوند؛ محاسبه می‌شود. اگر بزرگترین توان محاسبه شده لیاپانوف، مقدار مثبتی داشته باشد؛ سیستم دارای رفتار آشوبی است و بالعکس (مشیری، ۱۳۸۱). بنابراین مثبت بودن نمای لیاپانوف، هم نشان‌گر آشوبناکی و هم بیانگر عدم تاب‌آوری (ناپایداری) سیستم است. برای محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف نیاز به محاسبه وقفه زمانی و بعد محاط است. برای محاسبه وقفه زمانی از دو روش تابع خودهمبستگی و تابع میانگین اطلاعات متقابل استفاده می‌شود. در روش میانگین اطلاعات متقابل علاوه بر همبستگی خطی، همبستگی و ساختار غیر خطی نیز محاسبه می‌گردد. ولی در روش خودهمبستگی، فقط همبستگی خطی داده‌ها بررسی می‌شود. بنابراین در بررسی سری‌های زمانی غیر خطی، استفاده از میانگین اطلاعات متقابل، مناسب‌تر است و این روش در سال ۱۹۸۶ توسط فریزر و سویینی^۱ برای انتخاب زمان تاخیر مناسب، در تجزیه و تحلیل‌های غیر خطی معرفی شد.

در روش میانگین اطلاعات متقابل، از تابع میانگین اطلاعات متقابل به عنوان یک تابع همبستگی غیر خطی برای تعیین زمان تأخیر مناسب استفاده می‌شود؛ به نحوی که $x(t)$ و $x(t+\tau)$ به میزان کافی از هم مستقل بوده؛ اما حداقل همبستگی ممکن را دارا باشند. بنابراین در روش میانگین اطلاعات متقابل زمان رخ دادن اولین مینیمم در تابع میانگین اطلاعات متقابل به عنوان زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌گردد. میانگین اطلاعات متقابل، برگرفته از تئوری اطلاعات یا آنتروپی شانون^۲ 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 شکل زیر تعریف می‌شود:

1. Fraser and Swinney

2. Shannon Entropy

$$H(X(t)) = \left(\sum_{t=1}^N P(x(t)) \right) \cdot \log_2 P(x(t)) \quad (1)$$

مفهوم آن‌تروپی عبارت است از میزان عدم حتمیتی که اندازه‌گیری‌های $x(t)$ به همراه دارد. به بیان دیگر، نشان‌دهنده مقدار اطلاعاتی است که از اندازه‌گیری‌ها کسب می‌شود؛ به طوری که اندازه‌گیری‌های با احتمال پایین (دور از انتظار) به نسبت اندازه‌گیری‌های محتمل‌تر، اطلاعات بیشتری را در اختیار قرار می‌دهند. حال برای محاسبه وابستگی بین $x(t)$ و $x(t+\tau)$ به عبارتی میزان اطلاعاتی که به طور متقابل از مشاهدات $x(t)$ و $x(t+\tau)$ (که با τ به هم مرتبط می‌شوند) به دست می‌آید، تابع میانگین اطلاعات متقابل بین $x(t)$ و $x(t+\tau)$ بدین صورت تعریف می‌گردد (کاور و توماس^۱، ۱۹۹۱).

$$AMI = \sum_{t=1}^N P(x(t), x(t+\tau)) \cdot \log_2 \frac{P(x(t), x(t+\tau))}{P(x(t))P(x(t+\tau))} \quad (2)$$

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^۲، ۱۹۹۲). در نهایت پس از به دست آوردن میانگین اطلاعات متقابل، با رسم نمودار تابع میانگین اطلاعات متقابل به ازای زمان تأخیرهای مختلف، اولین کمینه نسبی (حداقل نسبت به نقاط همسایه) نمودار به عنوان زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌گردد^۳ (قره باغ و همکاران، ۱۳۹۳).

برای محاسبه بعد محاط نیز از دو روش شمارش نزدیک‌ترین همسایگی کاذب و روش کائو^۴ استفاده می‌شود که روش کائو به دلیل حساسیت کمتر به نویز داده‌ها و امکان استفاده با داده‌های کم، مناسب‌تر است.

1. Cover and Thomas (1991)

2. Scott (1992)

۳. برای بخش AMI بیشتر از مقاله قره باغ، رضایی و محمد نژاد با عنوان "مقایسه فضای حالت بازسازی شده و آشوبناکی جریان رودخانه نازلوچای در مقیاس‌های زمانی مختلف" استفاده شد.

4. Cao

اساس این روش، بر پایه محاسبه میانگین فواصل بردارهای تاخیر $E1(d)$ است. نقطه‌ای که در آن $E1(d)$ به اشباع برسد؛ به عنوان بعد محاط در نظر گرفته می‌شود. اما بررسی $E1(d)$ برای داده‌های تصادفی^۱ 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. در داده‌های تصادفی هم (بیشتر در صورت کم بودن حجم نمونه و داده‌ها) ممکن است $E1(d)$ با وجود تصادفی بودن داده‌ها، باز هم، به حد اشباع برسد. برای رفع این مشکل کائو $E2(d)$ را ارائه کرد. برای هر نقطه بازسازی شده $x_i(d)$ در فضای d بعدی، تعریف می‌شود (کائو، ۱۹۹۷):

$$\alpha_{(i,d)} = \frac{R_i(d+1)}{R_i(d)} \quad (۳)$$

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

$$R_i(d) = \|x_i(d) - x_{n(i,d)}(d)\| = \max_{0 \leq k \leq -1} |x_{i+k\tau} - x_{n(i,d)+k\tau}| \quad (۴)$$

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

$$E(d) = \frac{1}{N - d\tau} \sum_{i=1}^{n-d\tau} \alpha(i,d) \quad (۵)$$

و داریم

$$E_1(d) = \frac{E(d+1)}{E(d)} \quad (۶)$$

^۱. Stochastic

$$E^*(d) = \frac{1}{N - d\tau} \sum_{i=1}^{N-d\tau} |x_{i+d\tau} - x_{n(i,d)+d\tau}| \quad (7)$$

و $E^*(d)$ به عنوان میانگین تغییرات مطلق فواصل بین دو جفت نقطه همسایه را اندازه‌گیری می‌کند و $E_2(d)$ به قرار زیر تعریف می‌شود:

$$E_2(d) = \frac{E^*(d+1)}{E^*(d)} \quad (8)$$

با توجه به اینکه در داده‌های تصادفی مقادیر آتی و گذشته رابطه‌ای با هم ندارند، پس مقدار $E_2(d)$ برای آن‌ها به ازای اکثر مقادیر d مساوی با یک خواهد بود و برای سری‌های زمانی معین مقدار $E_2(d)$ 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 $E_2(d)$ مخالف یک می‌شود. نقطه‌ای که از آن به بعد $E_2(d)$ و $E_1(d)$ به سطح اشباع برسند و بر هم منطبق شوند؛ به عنوان بعد محاط مناسب، انتخاب می‌شود.

برای محاسبه بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف نیز از روش روزن اشتاین^۱ استفاده می‌گردد که نسبت به روش ولف^۲، معتبرتر است.

اگر $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ یک سری زمانی مورد بررسی با حجم N باشد و X_i به صورت $X = [X_1, X_2, \dots, X_M]^T$ 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 $M = N - (m-1)j$. اگر کوچک‌ترین فاصله بین نقطه X_j و نزدیک‌ترین همسایگی این نقطه یعنی برابر $d_j(0)$ باشد، در این صورت:

$$d_j(0) = \min_{\hat{x}_j} \|x_j - \hat{x}_j\|$$

است. در این صورت بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف به صورت زیر تعریف می‌شود (مشیری، ۱۳۸۱):

1. Rosenstein

2. Wolfe

$$\lambda_{\max}(i) = \frac{1}{i\Delta t} \frac{1}{(M-i)} \sum_{j=1}^{M-i} \ln\left(\frac{d_j(i)}{d_j(0)}\right) \quad (9)$$

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 می‌باشد، یعنی $i\Delta t$.

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

۱- اگر $\lambda < 0$ آن‌گاه یک نقطه ثابت یا یک چرخه متناوب پایدار خواهیم داشت؛ به عبارت دیگر، تمام نقاط اولیه انتخابی، به سمت یک نقطه ثابت یا چرخه متناوب، همگرا خواهند شد. به این سیستم‌ها، پایدار مجانب^۱ اطلاق می‌شود. با افزایش منفی $(\lambda \rightarrow -\infty)$ ، پایداری سیستم می‌یابد؛ به طوری که برای $\lambda = -\infty$ یک نقطه ثابت یا یک چرخه متناوب فوق پایدار^۲ 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^۳ است.

۳- اگر $\lambda > 0$ هیچ نقطه ثابت و یا چرخه متناوب پایداری وجود ندارد؛ در حقیقت، نقاط ناپایدار^۴ ولی سیستم کران‌دار و آشوبناک است. در این حالت، به دلیل حساسیت بالا به شرایط اولیه، مسیرهای نزدیک به هم به سرعت واگرا می‌شوند (معینی و همکاران، ۱۳۸۵).

۴- یافته‌های پژوهش

بر اساس اطلاعات موجود، از اول فروردین ماه ۱۳۸۴ تا آخر اسفند ماه ۱۳۹۶ مصارف روزانه گاز طبیعی در نمودار ۳ ملاحظه می‌گردد؛ به طوری که مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی طی دوره مذکور، دارای روند صعودی می‌باشد. همچنین در طول روزهای مختلف سال، مصرف گاز طبیعی

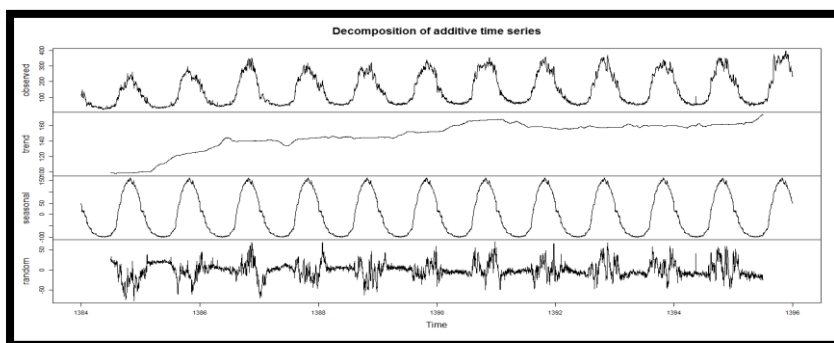
1. Asymptotic Stability

2. Super Stable

3. Lyapunov Stability

4. Unstable

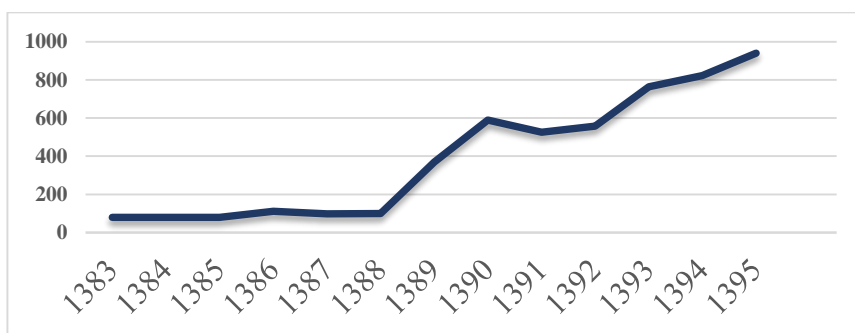
در بخش خانگی، دارای نوسان شدیدی است؛ به طوری که مصرف گاز خانگی در روزهای سرد سال، حدود ۵ برابر مصرف، در روزهای گرم سال می‌باشد.



نمودار ۳: مصرف روزانه گاز طبیعی در بخش خانگی

منبع: گزارش مدیریت گازرسانی شرکت ملی گاز ایران و محاسبات محقق

بر اساس قانون هدفمندی یارانه‌ها در سال ۱۳۸۹، قیمت گاز طبیعی افزایش چشمگیری یافت؛ بعد از این سال انتظار می‌رفت تا حدی از مصارف خارج از الگوی مصرف، در مناطق مختلف جغرافیایی، به ویژه در ماه‌های سرد سال، کم شود.



نمودار ۴: قیمت گاز طبیعی در بخش خانگی (ریال)

منبع: گزارش مدیریت گازرسانی شرکت ملی گاز ایران

آزادسازی قیمت گاز طبیعی در اثر اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها از جمله سیاست‌های دولت در راستای بهینه سازی مصرف انرژی می‌باشد؛ لیکن در کنار اعمال سیاست قیمتی مناسب، توجه به

فرهنگ‌سازی، افزایش راندمان وسایل گاز سوز از راهکارهای کاهش مصرف بی‌رویه گاز طبیعی در راستای گازرسانی پایدار و مطمئن، محسوب می‌گردد (قدیمی دیزج و دهقانی، ۱۳۹۴). به طوری که افزایش مصرف از طریق افزایش شدت استفاده از منابع تجدیدناپذیر انرژی، باعث افزایش ضایعات و انتشار گازهای گلخانه‌ای و نابودی محیط زیست می‌گردد (نصراللهی و سعیدی، ۱۳۹۶).

به منظور بررسی تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی ایران، نمای لیاپانوف، برای دوره‌های زمانی به شرح ذیل، محاسبه شده است:

(الف) قبل از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها (۱۳۸۴/۱/۱ تا ۱۳۸۹/۹/۲۸)

(ب) دوره بعد از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها (۱۳۸۹/۹/۲۹ تا ۱۳۹۶/۱۲/۲۹)

(ج) کل دوره مورد مطالعه (۱۳۸۴/۱/۱ تا ۱۳۹۶/۱۲/۲۹)

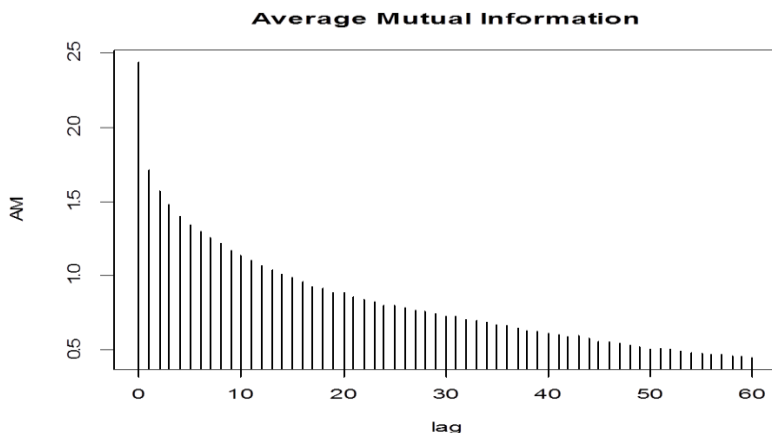
(د) فصول سرد سال (۱۳۸۴-۱۳۹۶)

(الف) محاسبه نمای لیاپانوف قبل از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها: بر اساس آمار موجود، مصارف روزانه گاز طبیعی در بخش خانگی از ۱۳۸۴/۱/۱ تا ۱۳۸۹/۹/۲۸ (۲۱۰۰ داده) جهت محاسبه نمای لیاپانوف، انتخاب گردید. به منظور محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف، باید وقفه زمانی^۱ و بعد محاط^۲ را محاسبه کرد. برای محاسبه وقفه زمانی، از روش میانگین اطلاعات متقابل و برای محاسبه بعد محاط، از روش کائو استفاده می‌گردد.

در روش میانگین اطلاعات متقابل، زمان رخ دادن اولین مینیمم در تابع میانگین اطلاعات متقابل، به عنوان وقفه زمانی مناسب، انتخاب می‌گردد. همان‌گونه که در نمودار ۵ ملاحظه می‌شود؛ مقدار وقفه زمانی با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل، در این دوره (قبل از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها) ۴۲ تعیین می‌گردد.

1. Time Lag

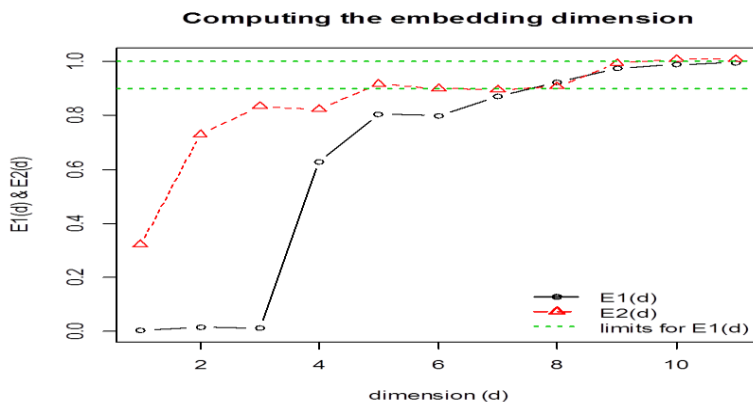
2. Embedded Dimension



نمودار ۵: وقفه زمانی محاسبه شده با روش AMI

منبع: محاسبات محقق

یکی از پارامترهای مهم در بازسازی فضای فاز، بعد محاط می‌باشد. اساس این روش بر پایه محاسبه میانگین فواصل بردارهای تاخیر $E_1(d)$ است. نقطه‌ای که در آن $E_1(d)$ به اشباع برسد به عنوان بعد محاط در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که در نمودار ۶ ملاحظه می‌شود؛ بعد محاط با استفاده از روش کائو در این دوره (قبل از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها) مقدار ۸ تعیین گردید؛ یعنی ۸ عامل اصلی در فرآیند آشوبی مصرف گاز طبیعی دخالت دارند.

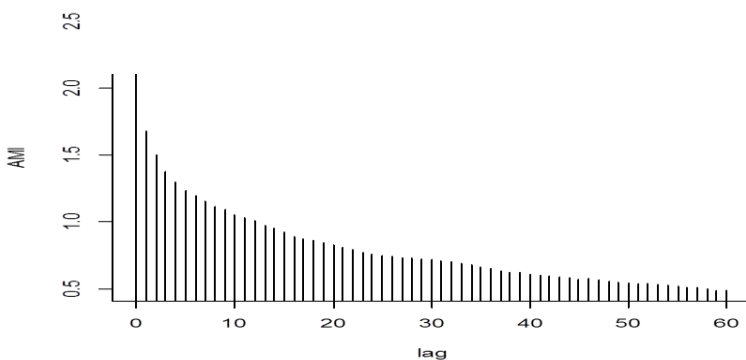


نمودار ۶: بعد محاط محاسبه شده با روش Cao

منبع: محاسبات محقق

بنابراین در این دوره بر اساس وقفه زمانی $m=42$ و بعد محاط $\tau = 8$ بزرگترین نمای لیاپانوف با استفاده از روش روزن اشتاین $0/000485$ محاسبه گردید؛ مقدار مثبت نمای لیاپانوف نشان می‌دهد در این دوره مصرف گاز طبیعی دارای فرآیند آشوبی است و همچنین سیستم گازرسانی، تاب‌آور نیست.

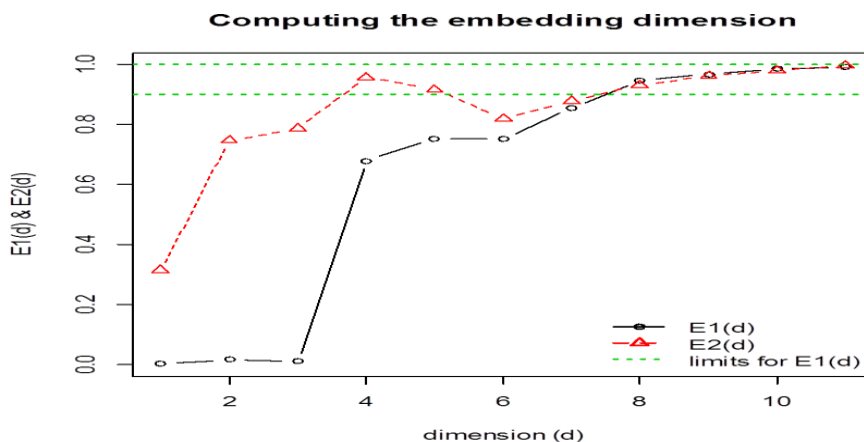
ب) محاسبه نمای لیاپانوف بعد از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها: به منظور محاسبه نمای لیاپانوف بعد از اجرایی شدن قانون هدفمندی یارانه‌ها، مصارف روزانه گاز طبیعی از تاریخ $1389/9/29$ تا $1396/12/29$ (تعداد داده: ۲۶۴۸) مد نظر قرار گرفت. همان‌گونه که در نمودار ۷ ملاحظه می‌گردد؛ مقدار وقفه زمانی، با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل در این دوره (بعد از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها) ۴۵ تعیین گردید.



نمودار ۷: وقفه زمانی محاسبه شده با روش AMI

منبع: محاسبات محقق

همان‌گونه که در نمودار ۸ ملاحظه می‌گردد؛ بعد محاط با استفاده از روش کائو، در این دوره (بعد از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها) مقدار ۸ تعیین شد؛ لذا در این دوره نیز تعداد متغیر اصلی در فرآیند آشوبی مصرف گاز طبیعی ۸ متغیر می‌باشد.

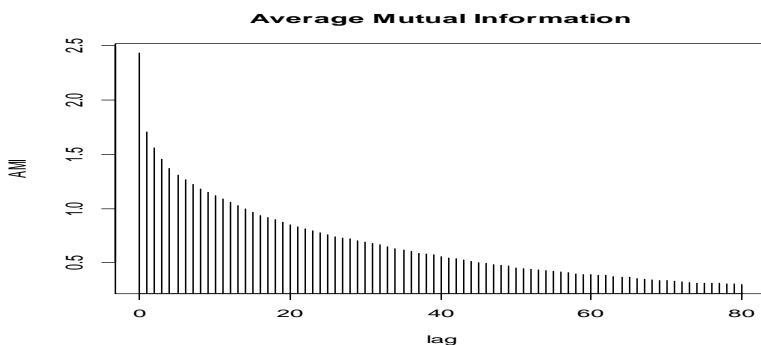


نمودار ۸: بعد محاط محاسبه شده با روش Cao

منبع: محاسبات محقق

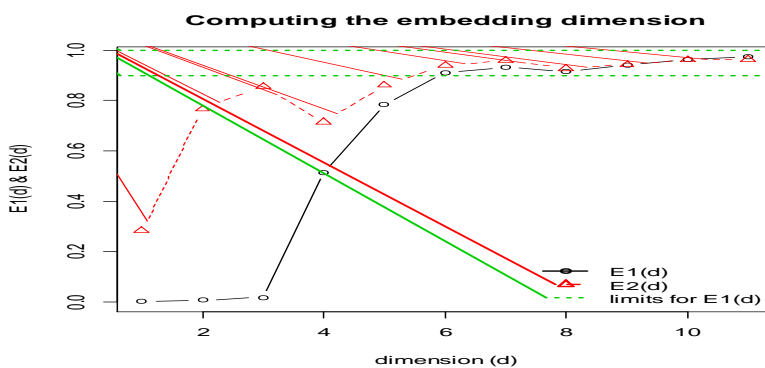
بر اساس مقادیر مذکور، بزرگترین نمای لیاپانوف با استفاده از روش روزن اشتاین در این دوره (بعد از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها) ۰/۰۰۰۴۵۶ محاسبه گردید. لذا می‌توان نتیجه گرفت؛ سیستم توزیع گاز طبیعی تاب‌آوری لازم را ندارد و نیز مصرف گاز طبیعی دارای فرآیند آشوبی است.

ج) محاسبه نمای لیاپانوف برای کل دوره مورد مطالعه: بر اساس آمار موجود از ۱۳۸۴/۱/۱ تا ۱۳۹۶/۱۲/۲۹ بزرگترین نمای لیاپانوف، با استفاده از روش روزن اشتاین معادل ۰/۰۰۲۷۶۱ تعیین گردید؛ به طوری که در کل دوره مورد مطالعه، وقفه زمانی با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل، ۶۹ و بعد محاط نیز با استفاده از روش کائو، مقدار ۶ بدست آمد؛ که به ترتیب در نمودارهای ۹ و ۱۰ نمایش داده شده است.



نمودار ۹: وقفه زمانی محاسبه شده با روش AMI

منبع: محاسبات محقق



نمودار ۱۰: بعد محاط محاسبه شده با روش Cao

منبع: محاسبات محقق

همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌گردد؛ در سه دوره مورد نظر حداکثر نمای لیاپانوف بر اساس مقادیر وقفه زمانی و بعد محاط محاسبه شده است؛ به طوری که در تمام دوره‌های زمانی مورد نظر مقدار مثبت نمای لیاپانوف، بیانگر دو نتیجه مهم و اساسی است؛ اول اینکه؛ مقدار مثبت نمای لیاپانوف به معنای عدم تاب‌آوری (پایداری) سیستم‌گازرسانی است؛ به طوری که در تمام دوره‌ها این نتیجه تأیید می‌شود. به عبارت دیگر، در صورت وارد شدن هر

گونه شوک به سیستم گازرسانی، نمی‌توان اطمینان داشت که سیستم توزیع گاز طبیعی ایران بتواند تاب‌آوری لازم را داشته باشد.

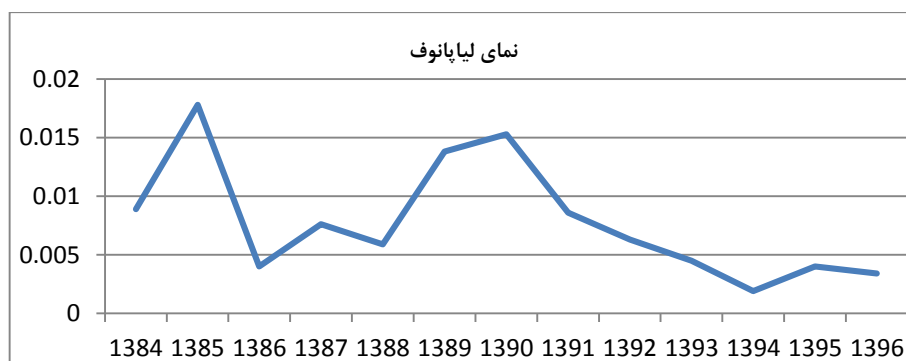
دوم اینکه؛ نمای لیاپانوف مثبت یعنی مصرف گاز طبیعی، دارای فرایند آشوبی است. لذا مصرف گاز طبیعی، دارای روند تصادفی نبوده و با استفاده از سیستم‌های غیر خطی، قابلیت پیش‌بینی دارد.

جدول ۲: محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف با روش روزن اشتاین

حد اکثر نمای لیاپانوف λ_{max}	وقفه زمانی τ	بعد محاط بهینه m	مصرف گاز طبیعی دوره مصرف
۰/۰۰۰۴۸۵	۸	۴۲	قبل از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها
۰/۰۰۰۴۵۶	۸	۴۵	بعد از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها
۰/۰۰۲۷۶۱	۶	۶۹	کل دوره (از اول سال ۱۳۸۴ تا پایان سال ۱۳۹۶)

منبع: محاسبات محقق

د) محاسبه نمای لیاپانوف برای فصول سرد سال (۱۳۸۴-۱۳۹۶): براساس روش مذکور، حداکثر نمای لیاپانوف، برای ماه‌های سرد سال (۱۳۸۴-۱۳۹۶) نیز محاسبه شد؛ نتایج آن در نمودار ۱۱ نشان داده شده است؛ به طوری که در تمام فصول سرد سال، حداکثر نمای لیاپانوف، هم مثبت بوده و هم دارای نوسان است.



نمودار ۱۱: نمای لیاپانوف در فصول سرد سال طی سال‌های ۱۳۸۴-۱۳۹۶

منبع: محاسبات محقق

از مثبت بودن نمای لیاپانوف در ماه‌های سرد سال می‌توان نتیجه گرفت؛ سیستم توزیع گاز طبیعی تاب‌آوری لازم را ندارد. همچنین مصرف گاز طبیعی، به دلیل مثبت بودن نمای لیاپانوف، دارای

فرآیند آشوبی است. لذا مصرف گاز طبیعی بر اساس سیستم‌های غیر خطی قابل پیش‌بینی است. در ضمن، همان‌گونه که در نمودار ۱۱ ملاحظه می‌گردد؛ مقدار مثبت نمای لیاپانوف، در فصول سرد سال، بعد از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها، روند نزولی داشته است. لذا آزادسازی قیمت گاز طبیعی، منجر به بهبود تاب‌آوری سیستم گازرسانی شده است.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به این‌که فرآیند تامین گاز طبیعی از استخراج، پالایش، انتقال و توزیع تشکیل می‌گردد؛ به طوری که تامین گاز مطمئن و پایدار اصلی‌ترین وظیفه و رسالت شرکت ملی گاز ایران است؛ این در حالی است که در روزهای سرد سال تا ۸۵ درصد مصرف گاز طبیعی در بخش خانگی به مصرف می‌رسد؛ به طوری که این بخش، بیشترین سهم را از مصرف، به خود اختصاص می‌دهد. بنابراین از متغیر مصرف روزانه گاز طبیعی در بخش خانگی، به عنوان شاخصی جهت سنجش تاب‌آوری سیستم گازرسانی با بکارگیری نمای لیاپانوف، استفاده شد.

نتایج حاصل از محاسبات انجام شده، به شرح ذیل می‌باشد:

- ۱- سیستم توزیع گاز طبیعی از تاب‌آوری لازم (به دلیل مثبت بودن نمای لیاپانوف) در تمام دوره‌های زمانی مورد مطالعه، برخوردار نیست. بنابراین در صورت وارد شدن هر گونه شوک به سیستم گازرسانی، نمی‌توان اطمینان داشت که سیستم توزیع گاز طبیعی ایران بتواند تاب‌آوری لازم را داشته باشد.
- ۲- مثبت بودن نمای لیاپانوف؛ یعنی مصرف گاز طبیعی دارای فرآیند آشوبی است؛ لذا مصرف گاز طبیعی دارای روند تصادفی نبوده و بر اساس سیستم‌های غیر خطی قابل پیش‌بینی است.
- ۳- تفاوت مقادیر نمای لیاپانوف، در دوره‌های زمانی مختلف، حاکی از نوسان میزان تاب‌آوری سیستم گازرسانی است؛ به طوری که در برخی سال‌ها سیستم گازرسانی به سمت تاب‌آوری بیشتر (به دلیل کاهش مقدار نمای لیاپانوف) حرکت کرده است.
- ۴- بعد از اجرایی شدن قانون هدفمندی یارانه‌ها، میزان تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی نسبت به سال‌های قبل بهبود یافته است؛ به طوری که نمای لیاپانوف دارای مقادیر

کمتری است. لذا اعمال سیاست قیمتی مناسب، می‌تواند باعث ارتقای تاب‌آوری سیستم گازرسانی گردد.

بنابراین عدم تاب‌آوری سیستم گازرسانی؛ به دلیل توسعه گازرسانی و افزایش سهم گاز طبیعی در سبد انرژی، از مهم‌ترین چالش‌های صنعت گاز ایران، محسوب می‌گردد؛ به طوری که در صورت بروز هرگونه اختلال و یا شوک ناشی از عوامل طبیعی، حوادث غیر مترقبه و یا اشکالات فنی در سیستم گازرسانی ممکن است پیامدهای ناگواری در اثر قطعی در سیستم گاز طبیعی حتی به صورت بحران، در ابعاد اجتماعی و امنیتی، در پی داشته باشد؛ لذا اتخاذ تدابیر لازم، برای افزایش تاب‌آوری سیستم گازرسانی ایران، از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌آید. به منظور ارتقای تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی، توصیه‌های سیاستی به شرح ذیل پیشنهاد می‌گردد:

- ۱- تعیین سهم بهینه گاز طبیعی در سبد انرژی ایران با افزایش سهم انرژی‌های نو، هسته‌ای و غیره.
 - ۲- ارتقای توان تولیدی و پالایشی گاز طبیعی، تقویت طول خطوط لوله گاز سراسری و شبکه‌های انتقال، توزیع و افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی گاز طبیعی.
 - ۳- ضرورت اعمال سیاست‌های مناسب جهت قیمت‌گذاری گاز طبیعی با رویکرد بهینه‌سازی مصرف آن در تمام بخش‌های مصرف‌کننده.
 - ۴- فرهنگ‌سازی به منظور رعایت الگوی مصرف در تمام بخش‌های مصرف گاز طبیعی و جلوگیری از مصارف غیر ضروری به ویژه در ماه‌های سرد سال.
 - ۵- پیش‌بینی مصرف گاز طبیعی با استفاده از سیستم‌های غیر خطی به منظور مدیریت مصرف بهینه در راستای ارتقای تاب‌آوری سیستم گازرسانی.
 - ۶- افزایش راندمان وسائل گازسوز در تمام بخش‌های مصرف.
 - ۷- جلوگیری از واردات وسائل گاز سوز با راندمان پایین.
- در اعمال سیاست‌ها و تدابیر پیشنهادی، نکته حائز اهمیت آن است که همه موارد، بایستی به صورت هماهنگ و منسجم، در قالب برنامه‌ریزی کلان و با همکاری دستگاه‌های اجرایی مرتبط و هم‌یاری مردم، در راستای افزایش تاب‌آوری سیستم توزیع گاز طبیعی، صورت پذیرد.

منابع و مأخذ

۱. آماده، حمید. احراری، مهدی. و قدسی ماب، محمدعلی (۱۳۹۵). "مطالعه‌ی تاب‌آوری اکوسیستم شهر تهران در برابر آلاینده‌های هوا". اقتصاد و تجارت نوین، پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی ۱۱(۳): ۲۳-۵۴.
۲. ابریشمی، حمید. معینی، علی. و احراری، مهدی (۱۳۸۱). "آزمون ناخطی معین برای قیمت‌های آتی نفت". فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران دانشکده اقتصاد علامه طباطبایی (۱۰): ۱۲۳-۱۰۵.
۳. ابونوری، اسمعیل. و لاجوردی، حسن (۱۳۹۵). "برآورد شاخص آسیب‌پذیری و تاب‌آوری اقتصادی به روش پارامتریکی: بررسی موردی کشورهای عضو اوپک". فصلنامه نظریه‌های کاربردی اقتصاد ۳(۳): ۲۵-۴۴.
۴. بابازاده، محمد. معمارنژاد، عباس. و علمی، سیامک (۱۳۸۹). "بررسی ماکزیم‌نمای لیاپانوف در نرخ ارز ایران با استفاده از تئوری آشوب". فصلنامه پول و اقتصاد (۲): ۵۴-۷۷.
۵. بابازاده، محمد. قدیمی دیزج، خلیل. و قربانی، وحید (۱۳۹۳). "برآورد تابع تقاضای کوتاه مدت و بلندمدت گاز طبیعی در بخش خانگی". فصلنامه مدل‌سازی اقتصادی (۲۵): ۱۱۳-۱۰۱.
۶. پریور، پرستو. فریادی، شهرزاد. صالحی، اسماعیل. یاوری، احمدرضا. و ستوده، احد (۱۳۹۱). "بسط چارچوب ارزیابی راهبردی محیط زیستی طرح‌های توسعه شهری بر اساس تفکر تاب‌آوری". فصلنامه معماری و شهرسازی (۱۱): ۱۶۷-۱۵۵.
۷. شاکری، زهرا. همایونفر، مسعود. فلاحی، محمدعلی. و شرعاف تبریزی، سعید (۱۳۹۴). "بررسی نظریه آشوب در قیمت سکه تمام بهار آزادی در ایران". دو فصلنامه اقتصاد پولی، مالی (۱۰): ۸۴-۱۰۳.
۸. شرکت ملی گاز ایران (۱۳۹۶). گزارش آماری مدیریت گازرسانی.
۹. خلیل، حسن (۱۳۸۰). کتاب سیستم‌های غیرخطی؛ غلامعلی منتظر، تهران، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس.
۱۰. قدیمی دیزج، خلیل. و دهقانی، ابوالفضل (۱۳۹۴). "نقش گاز طبیعی در مدل اقتصاد مقاومتی". مجموعه مقالات همایش اقتصاد مقاومتی، پژوهشگاه صنعت نفت.
۱۱. قاهری، عباس. قربانی، محمد علی. دل افروز، هادی. و ملکانی، لیلیا (۱۳۹۱). "ارزیابی جریان رودخانه با استفاده از نظریه آشوب". مجله پژوهش آب ایران (۱۰): ۱۷۷-۱۸۶.

۱۲. غیاثوند، ابوالفضل. صداقت‌پرست، الدار. غلامرضا، سمیرا. و ثنائی اقدم، محسن (۱۳۹۳). دربارهٔ سیاست‌های کلی اقتصاد مقاومتی - مروری بر ادبیات جهانی دربارهٔ تاب‌آوری ملی، گزارش دفتر مطالعات اقتصادی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی [نسخه الکترونیکی]. قابل دسترس در: <http://rc.majlis.ir/fa/report/show/881024> [15/10/1396]
۱۳. مشیری، سعید (۱۳۸۱). "مروری بر نظریه‌های آشوب و کاربردهای آن در اقتصاد". فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران (۱۲): ۲۹-۲۶.
۱۴. مشیری، سعید. و فروتن، فایزه (۱۳۸۳). "آزمون آشوب و پیش‌بینی قیمت آتی نفت خام". فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران ۴(۲۱): ۹۰-۶۷.
۱۵. مشیری، سعید. و مروت، حبیب (۱۳۸۴). "بررسی وجود فرایند آشوبی در شاخص بازدهی کل قیمت سهام بازار بورس تهران". پژوهش‌های اقتصادی ایران ۴(۲۵): ۶۴-۴۷.
۱۶. معینی، علی. ابریشمی، حمید. و احراری، مهدی (۱۳۸۵). "به کارگیری نمای لیاپانوف برای مدل‌سازی سری زمانی قیمت آتی نفت بر پایه توابع پویا". فصلنامه تحقیقات اقتصادی دانشکده اقتصاد تهران (۷۶): ۱۰۰-۸۴.
۱۷. مغاری، مریم. فریدزاد، علی. و خورسندی، مرتضی (۱۳۹۵). "اثر آسیب‌پذیری و تاب‌آوری اقتصادی بر تولید ناخالص داخلی کشورهای منتخب عضو اوپک". فصلنامه سیاست‌گذاری پیشرفت اقتصادی دانشگاه الزهراء (س) ۴(۱۱): ۱۰۴-۷۷.
۱۸. میرجلیلی، سید حسین. و بزرگی، روشنک (۱۳۹۷). "بررسی شاخص ترکیبی تاب‌آوری اقتصادی ایران طی سال‌های ۱۳۸۴ - ۱۳۹۴". فصلنامه علمی پژوهشی جستارهای اقتصادی ایران (۲۹): ۹۴-۶۹.
۱۹. نصراللهی، زهرا. و سعیدی، فائزه (۱۳۹۶). "بررسی تعامل بین مصرف و انتشار گاز گلخانه‌ای با استفاده از کالیبراسیون یک الگوی بهینه‌یابی پویا". نشریه علمی پژوهشی سیاست‌گذاری اقتصادی ۹(۱۷): ۲۹۶-۲۶۹.
۲۰. هانفی مجومرد، مجید. جلالی، ام‌البنین. و اشرف گجویی، رضا (۱۳۹۷). "بررسی تاثیر غیر خطی مصرف انواع انرژی بر تولید ناخالص داخلی در ایران". نشریه علمی پژوهشی سیاست‌گذاری اقتصادی ۱۰(۱۹): ۱۶۵-۱۴۱.

22. Angeon, V. and Bates, S. (2015). "Reviewing Composite Vulnerability and Resilience Indexes: A Sustainable Approach and Application". World Development **72**: 140-162.
23. Bask, M. (1998). *Essays on Exchange Rates: Deterministic Chaos and Technical Analysis*, UES 465, PhD Thesis.
24. Batabyal, A.A. (1999). "The Stability of Stochastic Systems: The Case of Persistence and Resilience". Mathematical and Computer Modelling **30**: 27-34.
25. Boorman, J. Faajgenbaum, J. Ferhani, H. Bhaskaran, M. Arnold, D. and Kohli, H. A. (2013). "The Centennial Resilience Index: Measuring Counties Resilience to Shok". Global Journal of Emerging Markey Economies **5**(2): 57-98.
26. Briguglio, L. Cordina, G. Farrugia, N. & Vella, S. (2009). "Economic Vulnerability and Resilience: Concepts and Measurements". Oxford Development Studies **37**(3): 229-247.
27. Espinosa, C. and Gorigoitia, J. (2012). "Stability of Sovereign Risk in the Eurozone through the Lyapunov Exponent". Working Papers **36**, Facultad de Economía y Empresa, Universidad Diego Portales
28. Lee, C. K. and Lin, C. S. (2008). "Chaos in Air Pollutant Concentration (APC) Time Series". Aerosol and Air Quality Research **8**(4): 381-391.
29. Holling, C. S. (1992). "Cross-scale Morphology, Geometry, and Dynamics of Ecosystems". Ecological Monographs **62**(4): 447-502.
30. Jen, E. (Ed.) (2005). *Robust Design: A Repertoire of Biological, Ecological, and Engineering Case Studies*, Oxford University Press.
31. Kimhi, S. (2016). "Levels of Resilience: Associations among Individual, Community, and National Resilience". Journal of Health Psychology **21**(2): 164-170.
32. Liao, K. H. (2012). "A Theory on Urban Resilience to Floods-a Basis for Alternative Planning Practices". Ecology and society **17**(4).
33. Longstaff, P.H. Armstrong, N.J. Perrin, K. Parker, W.M. & Hidek, A.M. (2010). "Building Resilient Communities: A Preliminary Framework for Assessment". Home land Security Affairs **6**(3).
34. Parlitz, U. (2016). *Estimating Lyapunov Exponents from Time Series. In Chaos Detection and Predictability* (pp. 1-34). Springer, Berlin, Heidelberg.
35. Patterson, E. L. Smith, R. E. Everett, J. J. & Ptacek, J. T. (1998). "Psychosocial Factors as Predictors of Ballet Injuries: Interactive Effects of Life Stress and Social Support". Journal of Sport Behavior **21**(1): 101.

36. Perrings, C. (1994). "Ecological Resilience in the Sustainability of Economic Development. In Models of Sustainable Development: Exclusive or Complementary Approaches of Sustainability?". International Symposium (pp. 27-41).
37. Perrings, C. (1998). "Resilience in the Dynamics of Economy-Environment Systems". Environmental and Resource Economics **11**(3-4): 503-520.
38. Perrings, C. (2006). "Resilience and Sustainable Development". Environment and Development Economics **11**(4): 417-427.
39. Pimm, S. L. (1984). "The Complexity and Stability of Ecosystems". Nature 307(5949), 321.
40. Walker, B. Holling, C. S. Carpenter, S. & Kinzig, A. (2004). "Resilience, Adaptability and Transformability in Social-Ecological Systems". Ecology and society **9**(2).
41. Reggiani, A. De Graaff, T. & Nijkamp, P. (2002). "Resilience: an Evolutionary approach to Spatial Economic Systems". Networks and Spatial Economics **2**(2): 211-229.
42. Ren, W. Tian, H. Chen, G. Liu, M. Zhang, C. Chappelka, A. H. & Pan, S. (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 **149**(3): 327-335.
43. Rose, A. & Liao, S. Y. (2002). "Modeling Regional Economic Resiliency to Earthquakes: A Computable General Equilibrium Analysis of Lifeline Disruptions". Nist Special Publication SP 91-106.
44. Salini, G. A. & Pérez, P. (2015). "A Study of the Dynamic Behaviour of Fine Particulate Matter in Santiago, Chile". Aerosol and Air Quality Research **15**(1): 154-165.
45. White, R. K. Edwards, W. C. Farrar, A. & Plodinec, M. J. (2015). "A Practical approach to Bulding Resilience in America's Communities". American Behavioral Scientist **59**(2): 200-219.
46. Yu, B. Huang, C. Liu, Z. Wang, H. & Wang, L. (2011). "A Chaotic Analysis on Air Pollution Index Change over Past 10 Years in Lanzhou, Northwest China". Stochastic Environmental Research and Risk Assessment **25**(5): 643-653.

Original Research Article**The study of the resilience of the gas distribution system in Iran****Teimour Mohammadi¹****Hamid Amadeh^{2*}****Atefeh Taklif³****Khalil Ghadimidizaj⁴**

Received: 17-11-2018Accepted: 31-12-2018

Abstract

The substitution of the natural gas for other fossil fuels during last few years has led to a significant increase in its share in the energy mix. The main goal of this research is to investigate the resiliency of the Iranian gas distribution system using Lyapunov exponent. On cold days of the year, up to 85% of natural gas is consumed in the household sector. Therefore, temperature fluctuation, as a shock to the consumption of natural gas in the household sector, was considered as an indicator for measuring the resilience of the natural gas distribution system. In order to calculate the biggest Lyapunov power, the time delay and the encompassing dimension need to be calculated. To calculate the time delay, mutual information average function was used. Kao method was also used to calculate the encompassing dimension. Finally, Rosenstein method was used to calculate the biggest Lyapunov power. The results showed that the consumption of natural gas occurs in a chaotic process. Therefore, the gas distribution system is not resilient enough. Moreover, regarding Lyapunov power before and after the subsidies reform, an improvement was observed in the resilience of the Iranian gas distribution system after the implementation of the law of subsidies reform in Iran.

Keywords: Liberalization of gas price, Lyapunov exponent, Resiliency, Natural gas consumption, Natural gas distribution.

JEL Classification: Q41, Q48.

1- Associate Professor, Faculty of Economics, Allameh Tabatabai University
Email: Atmahmadi@gmail.com

2- Assistant Professor, Faculty of Economics, Allameh Tabatabai University

3- Assistant Professor, Faculty of Economics, Allameh Tabatabai University

4- PhD student in Oil and Gas Economics, Allameh Tabatabai University