فصلنامه پژوهش‌های پولی- بانکی

نظریه‌ آشوب، روند حاکم بر رفتار انباشت سرمایه‌ فیزیکی (رهیافتی از اقتصادفیزیک)

دکتر احمد گوگردچیان[[1]](#footnote-2)

سیده دل‌آرا موسوی[[2]](#footnote-3)

تاریخ:

چکیده[[3]](#footnote-4)

اصطلاح آشوب را می‌توان برای توصیف رفتار یک سیستم آشفته و ظاهراً تصادفی که به‌شدت به شرایط اولیه حساس است، تعریف کرد. دو نوع آشوب وجود دارد: قطعی و غیرقطعی. آشوب قطعی نشان‌دهنده حرکت آشفته سیستم‌های غیرخطی بر پایه قوانین مشخص اما با نتایج غیرقابل پیش‌بینی است، در حالی که در آشوب غیرقطعی، معادلات توصیف‌کننده سیستم ناشناخته بوده و رفتار آشفته ناشی از عدم قطعیت قوانین یا تأثیر عوامل تصادفی است. در هر دو حالت، سیستم در کوتاه‌مدت قابل پیش‌بینی اما در بلندمدت غیرقابل پیش‌بینی است. در این مقاله، رفتار آشوبناک متغیر انباشت سرمایه به‌عنوان عاملی کلیدی در پویایی رشد اقتصادی بررسی شده است. همچنین نوسانات آشوبناک انباشت سرمایه می‌تواند بر تقاضای تسهیلات، نقدینگی بانک‌ها، نرخ بهره و جریان سرمایه‌گذاری اثر بگذارد و تصمیم‌گیری‌های سیاست‌گذاران پولی را پیچیده‌تر کند. برای این منظور، داده‌های سری زمانی انباشت سرمایه در اقتصاد ایران طی سال‌های 1358 تا 1401 تحلیل شد. نتایج آزمون BDS نشان داد که این متغیر رفتاری غیرخطی دارد. محاسبه نمای لیاپانوف، آشوبناکی سری زمانی را تأیید کرد. همچنین، آزمون نمای هرست نشان داد که این متغیر دارای حافظه بلندمدت است.

واژه‌های کلیدی: پویایی آشوبناک، توپولوژیکی متعدی، اثر پروانه‌ای، آنتروپی کولموگروف-سینای، نگاشت پوانکاره.

طبقه‌بندی JEL: C60، C61، D81، D89، C69.

۱ مقدمه

تئوری آشوب در فیزیک و ریاضیات به مطالعه رفتارهای ظاهراً تصادفی یا غیرقابل پیش‌بینی در سیستم‌هایی می‌پردازد که به‌رغم پیچیدگی، توسط قوانین کاملاً قطعی اداره می‌شوند. این نظریه، افق تازه‌ای در تحلیل پدیده‌های پیچیده گشوده است و نشان می‌دهد که در درون رفتار آشوبناک سیستم‌های پیچیده، الگوهایی منظم، خودتشابهی، بازخوردهای درونی و ساختارهای خودسازمان‌یافته قابل شناسایی هستند (جیمزگلیک، 1987). پدیده‌هایی در عالم طبیعت هستند که پویایی غیر‌خطی داشته و به کارگیری منطق محدود خطی برای آن‌ها، پاسخ‌های صحیحی را رقم نخواهد زد و بشر، قادر به درک صحیحی از آن‌ها نخواهد بود. این مهم، در علوم انسانی، اجتماعی، فضایی، پزشکی، برق، مکانیک، پلاسما و... ورود کرده است و در توجیه و شناخت بسیاری از نوسانات، به‌ویژه نوسانات اقتصادی، مالی و تغییرات حجم سرمایه، وارد شده و تئوری‌های قبلی را دستخوش تغییر نموده است. در بررسی آشوبناکی یک سری زمانی، ابتدا با کمک آزمون‌های لازم، مانایی[[4]](#footnote-5) و سپس غیرخطی بودن سری مورد بررسی قرار گرفته و سپس در صورت تأیید غیرخطی بودن سیستم مولد آن، واگرایی یا همگرایی مسیرهای مجاور موجود در فضای حالت سیستم و نیز حافظه‌ی بلندمدت آن با کمک آزمون‌هایی همچون نمای لیاپانوف و نمای هرست و... مورد بحث قرار می‌گیرد. داشتن حداقل یک نمای مثبت لیاپانوف، حاکی از آشوبناکی سری زمانی مورد نظر است (لیتنبرگ[[5]](#footnote-6)، 1992).

مسأله اصلی این پژوهش آن است که آیا سری زمانی انباشت سرمایه فیزیکی در اقتصاد ایران دارای ویژگی‌های آشوبناک است یا خیر؛ به عبارت دیگر، آیا نوسانات آن ناشی از نویز تصادفی و عوامل بیرونی است، یا این‌که دارای ساختار درونی پیچیده‌ای است که از دینامیک‌های غیرخطی و وابستگی حساس به شرایط اولیه پیروی می‌کند؟ تحلیل این پرسش، می‌تواند پیامدهای مهمی در سطح نظری و سیاست‌گذاری به‌همراه داشته باشد. شناخت ماهیت دینامیک متغیرهای کلان اقتصادی، به‌ویژه در زمینه‌هایی چون انباشت سرمایه، برای طراحی سیاست‌های پایدار و تاب‌آور در برابر شوک‌های بیرونی امری اساسی است. در صورتی که این متغیر رفتاری آشوبناک داشته باشد، استفاده از ابزارهای پیش‌بینی خطی و سیاست‌گذاری سنتی نه‌تنها ناکارآمد، بلکه ممکن است منجر به اختلالات شدیدتر در اقتصاد گردد. از این‌رو، بهره‌گیری از چارچوب‌های تحلیلی پیشرفته مبتنی بر نظریه آشوب می‌تواند به فهم عمیق‌تری از پویایی سرمایه در اقتصاد کلان ایران منجر شود.

شکاف اصلی پژوهش در اینجاست که علی‌رغم اهمیت انباشت سرمایه در تحلیل‌های رشد اقتصادی، تاکنون در ادبیات اقتصاد ایران، هیچ مطالعه‌ای این متغیر را با رویکرد آشوب و از منظر تحلیل غیرخطی بررسی نکرده است. عمده مطالعات پیشین، محدود به تکنیک‌های اقتصادسنجی خطی یا تحلیل‌های سری زمانی متعارف بوده‌اند و از ابزارهای پیشرفته نظریه آشوب همچون نمای لیاپانوف، نمای هرست و... بهره نبرده‌اند. لذا دستاورد علمی مقاله حاضر این است که با استفاده از مجموعه‌ای از آزمون‌های آماری و ابزارهای تحلیل آشوب، برای نخستین‌بار وجود یا عدم وجود رفتار آشوبناک در سری زمانی انباشت سرمایه فیزیکی در اقتصاد ایران را بررسی کرده و آثار آن را برای سیاست‌گذاری اقتصادی تحلیل می‌کند. این پژوهش تلاش می‌کند تا مفاهیم نظری پیچیده اقتصاد فیزیک را به زبان قابل فهم برای اقتصاددانان کاربردی و سیاست‌گذاران تبیین نماید و با ارائه شواهد تجربی مستند، بستر لازم برای گسترش تحلیل‌های غیرخطی در اقتصاد ایران را فراهم سازد. در ادامه، ساختار مقاله بدین شرح است که در بخش دوم، مروری بر ادبیات نظری و مطالعات پیشین مرتبط با موضوع صورت می‌گیرد. بخش سوم به معرفی روش‌شناسی تحقیق و ابزارهای تحلیل آشوب اختصاص دارد. در بخش چهارم، یافته‌های تجربی ارائه و تحلیل می‌شود. در نهایت، در بخش پنجم، جمع‌بندی، بحث و پیشنهادهای سیاستی ارائه می‌گردد.

۲ ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

2.1 تئوری آشوب

آشوب به رفتار غیرخطی و پیچیده‌ای اطلاق می‌شود که در سیستم‌های پویا و قطعی، تحت تأثیر حساسیت به شرایط اولیه، برای دوره‌های زمانی طولانی مشاهده می‌شود. منظور از سیستم قطعی، سیستمی است که معادلات توصیف‌کننده تکامل آن کاملاً مشخص هستند و نتایج آن به‌طور کامل وابسته به شرایط اولیه است. رفتار غیردوره‌ای این سیستم‌ها نشان‌دهنده آن است که با گذر زمان، مسیرها به مدارهای دوره‌ای یا نقاط ثابت همگرا نمی‌شوند. تفاوت کلیدی میان سیستم‌های آشوبناک و غیرآشوبناک، حساسیت به شرایط اولیه است. در سیستم‌های آشوبناک، تغییرات جزئی در شرایط اولیه می‌تواند به واگرایی سریع و تصاعدی مسیرهای مجاور منجر شود؛ درحالی‌که در سیستم‌های غیرآشوبناک، این تغییرات به‌طور خطی و متناسب با زمان رشد می‌کنند (الیگود، 1996). تئوری آشوب ادعا می‌کند که هیچ پدیده‌ای کاملاً تصادفی نیست. رفتارهای ظاهراً غیرقابل پیش‌بینی سیستم‌های آشوبناک، ناشی از تفکر قطعی‌گرای انسان است و نمی‌توان شرایط اولیه را با دقت بی‌نهایت تعیین کرد. به همین دلیل، پیش‌بینی بلندمدت رفتار چنین سیستم‌هایی اساساً غیرممکن است. حساسیت به شرایط اولیه باعث می‌شود تغییرات کوچک (مانند اثر پروانه‌ای[[6]](#footnote-7)) به پیامدهای بزرگی منجر شوند، مانند تغییرات اقلیمی ناشی از یک تغییر کوچک در جو زمین. در حوزه اقتصاد، بسیاری از روش‌های سنتی پیش‌بینی بر فروض قطعی و خطی استوارند که در غیاب این فروض، نتایج ممکن است گمراه‌کننده باشند. تئوری آشوب امکان تحلیل رفتارهای غیرخطی و پیش‌بینی‌ناپذیری را در اقتصاد، به‌ویژه در تحلیل سری‌های زمانی، فراهم می‌کند و ابزارهای قدرتمندی را برای توضیح بی‌نظمی‌های اقتصادی و شناسایی الگوهای پنهان بدون نیاز به فروض تصادفی صرف ارائه می‌دهد (گارسیا و همکاران، 2004).

2.2 اقتصادفیزیک

اقتصادفیزیک[[7]](#footnote-8) به‌عنوان یکی از شاخه‌های میان‌رشته‌ای نوظهور، پلی بین فیزیک و اقتصاد ایجاد کرده است. این رویکرد با بهره‌گیری از اصول بنیادی و ابزارهای تحلیلی فیزیک، به‌ویژه مکانیک آماری، تئوری آشوب، سیستم‌های پیچیده، و فرآیندهای تصادفی، تلاش می‌کند تا به درک عمیق‌تر و مدل‌سازی دقیق‌تر پدیده‌های اقتصادی بپردازد. در این حوزه، سیستم‌های اقتصادی به‌عنوان مجموعه‌ای از عوامل متعامل با رفتارهای غیرخطی و گاه آشوبناک در نظر گرفته می‌شوند که بسیاری از آن‌ها مشابهت قابل‌توجهی با سیستم‌های فیزیکی دارند. این شباهت‌ها، شامل تعاملات چندعاملی، ظهور رفتارهای جمعی، و اثرات شبکه‌ای، زمینه‌ساز استفاده از مدل‌های فیزیکی در تحلیل رفتارهای اقتصادی شده است. یکی از جنبه‌های مهم اقتصادفیزیک، مطالعه پویایی‌های غیرخطی و آشوب در بازارهای مالی و بین متغیرهای اقتصادی است. نوسانات شدید قیمت‌ها، توزیع غیرطبیعی بازدهی دارایی‌ها، و پویایی‌های غیرقابل‌پیش‌بینی در برخی متغیرها، نمونه‌هایی از رفتارهای پیچیده‌ای هستند که با ابزارهایی مانند تحلیل سری‌های زمانی، بازسازی فضای فاز، و محاسبه نمای لیاپانوف، مدل‌سازی می‌شوند. علاوه بر این، اقتصادفیزیک به تحلیل ساختارهای فرکتالی در توزیع ثروت، نقش خودسازماندهی در شبکه‌های مالی، و شناسایی الگوهای بحرانی در سیستم‌های اقتصادی می‌پردازد. برای مثال، روش‌های برگرفته از نظریه شبکه‌های پیچیده برای بررسی تعاملات بین بازیگران اقتصادی، مانند شرکت‌ها، بانک‌ها، و دولت‌ها، در شرایط بحران مالی بسیار مؤثر بوده است. اقتصادفیزیک همچنین با استفاده از داده‌های بزرگ و الگوریتم‌های پیشرفته مانند یادگیری ماشین، سعی دارد تا مرزهای دانش اقتصادی را گسترش دهد(کیلرت[[8]](#footnote-9)و همکاران، 1993). برخلاف روش‌های سنتی اقتصاد که اغلب به مدل‌های تعادلی محدود می‌شوند، اقتصادفیزیک بر رفتارهای دور از تعادل، پویایی‌های گذرا، و تأثیرات غیرخطی تأکید دارد. این رویکرد به درک بهتر از چگونگی وقوع بحران‌های مالی، چرخه‌های تجاری، و حتی مسائل کلان‌تری مانند پایداری رشد اقتصادی و توزیع منابع کمک می‌کند. لذا اقتصادفیزیک نه‌تنها به عنوان یک ابزار تحلیلی نوین، بلکه به‌عنوان یک پارادایم جدید، امکان بازاندیشی درباره مفاهیم بنیادی اقتصاد را فراهم کرده است. این حوزه با فراهم کردن دیدگاهی تجربی و داده‌محور، زمینه‌ساز بهبود سیاست‌گذاری‌های اقتصادی و افزایش کارایی در مدیریت ریسک و تصمیم‌گیری‌های استراتژیک شده و با ارائه تحلیل‌هایی که نشان می‌دهند سیستم‌های اقتصادی تمایل به حرکت به سمت "لبه آشوب" دارند، اهمیت بررسی رفتارهای غیرخطی و پیچیدگی‌های اقتصادی را برجسته می‌کند. از طرفی، استفاده از روش‌های فیزیکی می‌تواند اقتصاددانان را از بارهای ایدئولوژیک غیرضروری رها کند و شفافیت استدلال‌ها را افزایش دهد (جکی موویچ[[9]](#footnote-10)، 2016).

2.3 انباشت سرمایه

انباشت سرمایه یکی از مفاهیم بنیادی در علم اقتصاد است که نقش محوری در فرآیندهای رشد اقتصادی، توسعه پایدار، و کاهش نابرابری‌های اقتصادی ایفا می‌کند. این مفهوم به افزایش خالص دارایی‌های سرمایه‌ای اشاره دارد و می‌تواند از منابع متعددی همچون سود انباشته، سرمایه‌گذاری داخلی و خارجی، و بهبود بهره‌وری حاصل شود (گتس، 1968). از منظر نظری، انباشت سرمایه یکی از ارکان اساسی مدل‌های رشد اقتصادی کلاسیک و نئوکلاسیک محسوب می‌شود. در مدل هارود-دومار، انباشت سرمایه به‌عنوان موتور رشد اقتصادی مطرح شده و فرض می‌شود که تداوم رشد اقتصادی مستلزم برقراری تعادل میان نرخ سرمایه‌گذاری و نرخ رشد تولید است. در مقابل، مدل رشد سولو نشان می‌دهد که انباشت سرمایه در کنار پیشرفت فناوری و نیروی کار، تنها یک عامل موقت در رشد اقتصادی به شمار می‌رود. بر اساس این مدل، در بلندمدت، رشد اقتصادی عمدتاً تحت تأثیر پیشرفت فناوری قرار دارد، درحالی‌که در کشورهای در حال توسعه، که ظرفیت جذب فناوری‌های پیشرفته محدود است، انباشت سرمایه همچنان به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در رشد اقتصادی عمل می‌کند.

علاوه بر دیدگاه‌های نئوکلاسیک، اقتصاد نهادی نیز بر نقش ساختارهای حکمرانی و سیاست‌گذاری‌های اقتصادی در پایداری و اثربخشی انباشت سرمایه تأکید دارد. ضعف در حکمرانی اقتصادی، فساد مالی، و نااطمینانی در فضای کسب‌وکار از جمله عواملی هستند که می‌توانند انگیزه‌های سرمایه‌گذاری را تضعیف کرده و منجر به کاهش انباشت سرمایه شوند. در کشورهای در حال توسعه، از جمله ایران، این چالش‌ها به‌ویژه در شرایط نوسانات کلان اقتصادی و عدم ثبات سیاست‌های اقتصادی، از اهمیت مضاعفی برخوردارند.

2.4 رفتار آشوبناک انباشت سرمایه و ناپایداری‌های اقتصادی

چنانچه متغیر انباشت سرمایه فیزیکی در یک اقتصاد، دارای پویایی آشوبناک باشد، به طور اخص از طریق تأثیر بر شاخص رشد اقتصادی می‌تواند اثرات خود را نمایان سازد؛ به گونه‌ای که به‌جای رسیدن به یک نرخ رشد پایدار، ممکن است وارد یک حلقه بی‌پایان از نوسانات و تغییرات غیرقابل پیش‌بینی شود. این بی‌ثباتی می‌تواند موجب شود که حتی اگر سرمایه‌گذاری‌ها در کوتاه‌مدت افزایش یابند، در بلندمدت تأثیرات منفی بر رشد اقتصادی و تولید داشته باشند. برای نمونه؛ مدل رشد سولو که در آن انباشت سرمایه (K(t)) به‌طور مستقیم بر رشد اقتصادی اثر می‌گذارد، به شکل معادله شماره (1) است:

Y(t)=A(t)K(t)αL(t)1−α

(1)

که در آن Y(t) تولید کل در زمان t، A(t) فناوری، K(t) انباشت سرمایه،L(t) نیروی کار و α ضریب سرمایه در تابع تولید است. در این مدل، معادله تغییرات انباشت سرمایه به صورت معادله شماره (2) است:

(t)=sY(t)−δK(t)

(2)

که در آن s نرخ پس‌انداز است و δ نرخ استهلاک سرمایه. چنانچه متغیر انباشت سرمایه آشوبناک باشد، معادله تغییرات سرمایه به‌صورت غیرخطی و حساس به شرایط اولیه تغییر می‌کند:

(t)=f(K(t), A(t), L(t), ϵ)

(3)

که در آن ϵ پارامترهای آشوبناک و شرایط اولیه می‌باشد وf(K(t), A(t), L(t), ϵ) تابعی است که ویژگی‌های غیرخطی و حساسیت به شرایط اولیه را شامل می‌شود. اگر K(t) به‌صورت آشوبناک تغییر کند، این ویژگی باعث می‌شود که سیستم از تعادل خطی خود خارج شود و به‌جای همگرایی به یک نرخ رشد ثابت، به سمت نوسانات تصادفی حرکت کند. یک فرم پیشنهادی برای تقویت مدل رشد سولو که عوامل آشوبناکی (و عامل ایجاد نقاط جاذب در سیستم) را در خود بگنجاند، می‌تواند به شرح معادله شماره (4) باشد؛

(f(K(t),A(t),L(t),ϵ)= αK(t)2+βA(t)sin(K(t))+γL(t)+ϵ)

(4)

به‌عبارت دیگر، از آنجا که مدل سولو بر مبنای همگرایی سرمایه به یک حالت تعادلی پایدار بنا شده است، در حضور رفتارهای آشوبناک این همگرایی از میان می‌رود. افزودن مؤلفه‌های غیرخطی به مدل، نظیر تابعی چون ‎sin(K(t))‎، می‌تواند موجب شود که سیستم به‌جای حرکت به‌سوی یک نرخ رشد ثابت، دچار نوسانات نامنظم و غیرقابل پیش‌بینی گردد. به‌عبارتی، اگر نرخ تغییر سرمایه (K̇(t)) به‌صورت غیرخطی و شدیدی به K(t) و A(t) وابسته باشد، نوسانات شدید و ناپایداری‌هایی در فرآیند انباشت سرمایه و در نتیجه در نرخ رشد اقتصادی ایجاد خواهد شد.

2.5 پیشینه‌ پژوهش

در سال‌های اخیر، ادبیات اقتصادی به‌طور گسترده و تخصصی به بررسی نوسانات درون‌زا در مدل‌های رشد اقتصادی پرداخته است؛ به‌ویژه مدل‌های رشد از نوع سولو و توسعه‌های پس از آن که به تحلیل رفتار پیچیده و غیرخطی متغیرهای کلان اقتصادی مانند انباشت سرمایه توجه دارند. این جریان پژوهشی بر این نکته تأکید دارد که نوسانات و بی‌ثباتی‌های اقتصادی مشاهده‌شده، صرفاً ناشی از شوک‌های بیرونی نیست، بلکه ریشه در پویایی‌های غیرخطی و آشوبناک درون مدل‌های اقتصادی دارد که توانایی تولید نوسانات نامنظم، حساسیت به شرایط اولیه و بی‌ثباتی‌های بلندمدت را دارا هستند.

ریچارد دی[[10]](#footnote-11) (۱۹۸۳) در مقاله کلاسیک خود نشان داد که حتی مدل‌های رشد سولو در چارچوب گسسته زمانی و بدون دخالت شوک‌های بیرونی، قادر به ایجاد نوسانات نامنظم و پایدار (آشوب) در مسیر رشد سرمایه هستند. این یافته، بنیان نظری جدیدی برای توضیح تفاوت رفتارهای اقتصادی در شرایط اولیه مشابه ایجاد کرد و اهمیت پویایی‌های داخلی سیستم‌های اقتصادی را در شکل‌گیری بی‌ثباتی‌های کلان برجسته ساخت.

تحقیقات بعدی با توسعه ساختارهای مدل سولو، به بررسی عوامل پیچیده‌تر از جمله توزیع نامتقارن پس‌انداز میان طبقات مختلف اقتصادی پرداختند. بوم و کاس[[11]](#footnote-12) (۲۰۰۰) با تفکیک جمعیت به گروه‌های کارگر و سرمایه‌دار با نرخ‌های پس‌انداز متفاوت، نشان دادند که چنین عدم تقارن ساختاری می‌تواند منشأ چرخه‌های محدود و آشوب در سرمایه‌گذاری و رشد اقتصادی باشد، که بیانگر نقش کلیدی ساختارهای داخلی اقتصاد در شکل‌گیری نوسانات غیرخطی است.

همچنین در حوزه کاربردی‌تر، سوشکو، گاردینی و پوو[[12]](#footnote-13) (۲۰۱۰) مدل چرخه تجاری غیرخطی را با محدودیت‌های ظرفیت تولید توسعه دادند و نشان دادند که این محدودیت‌ها می‌توانند منجر به چندپایداری و رفتارهای آشوبناک شوند؛ جایی که رشد اقتصادی به جای مسیرهای یکنواخت، به نوسانات شبه‌دوره‌ای و پیچیده تبدیل می‌شود. این تحقیقات اهمیت توجه به محدودیت‌های واقعی اقتصاد و اثرات غیرمحدب را به‌عنوان عوامل تعیین‌کننده در رفتار پویای سیستم‌های اقتصادی یادآور می‌شوند.

دوهتانی[[13]](#footnote-14) (۲۰۱۰) نیز با واردکردن انتظارات تطبیقی در مدل رشد سولو، نشان داد که سرعت بالای رشد اقتصادی می‌تواند حتی در شرایط تعادل ظاهری پایدار، منجر به نوسانات چرخه‌ای و آشوبناک شود؛ که این امر درک رابطه پیچیده میان رشد اقتصادی و ثبات مدل‌های رشد را گسترش می‌دهد.

مطالعات نوین‌تر، نقش تغییرات تکنولوژیک و خطاهای اطلاعاتی را نیز در تولید نوسانات پیچیده بررسی کرده‌اند. به‌طور نمونه، ژانگ و یوکو[[14]](#footnote-15) (۲۰۲۴) با واردکردن انتخاب‌های فناورانه متغیر و خطاهای اطلاعاتی به مدل سولو، نشان دادند که این عوامل می‌توانند منجر به رفتارهای آشوبناک و توزیع‌های ایستا شوند که ابعاد جدیدی از نوسانات اقتصادی را در قالب آماری تحلیل‌پذیر می‌کند.

در زمینه مدل‌سازی ریاضی رفتار انباشت سرمایه، گالانیس و همکاران[[15]](#footnote-16) (۲۰۲۳) با استفاده از نگاشت لجستیکی ساده، نشان دادند که افزایش شدت انباشت (پارامتر r) منجر به بای‌فورکیشن (bifurcation) و ظهور رفتارهای آشوبناک می‌شود؛ که این یافته‌ها با نوسانات شدید مشاهده‌شده در اقتصادهای سرمایه‌داری هماهنگ است و بیانگر استعداد ذاتی سیستم سرمایه‌محور در بروز آشوب و بی‌ثباتی‌های پیچیده است.

از منظر کاربرد شاخص‌های پیچیدگی و آشوب، پژوهش‌های ایرانی مانند رنانی و همکاران (۱۳۹۹) با تمرکز بر کاربرد شاخص آنتروپی در اقتصاد کلان، نشان داده‌اند که این شاخص قادر است عدم تقارن و توزیع نابرابر ثروت و درآمد را به‌خوبی تحلیل کند و ابزاری مؤثر برای فهم عمیق‌تر ساختارهای ناپایدار اقتصادی باشد. همچنین، کاوه (۱۳۹۷) در مطالعات کنترل سیستم‌های گسسته زمانی، با استفاده از روش‌های پیشرفته‌ای مانند مود لغزشی و نگاشت پوانکاره، پایداری نقاط سکون و مدارهای ناپایدار را بهبود بخشیده و راهکارهای کنترلی برای سیستم‌های اقتصادی آشوبناک ارائه کرده است.

در حوزه اقتصاد کلان جهانی، مدل‌های چرخه‌ای و هژمونیک، مانند چارچوب «چرخه‌های سیستمی انباشت» (SCA) مطرح شده توسط آریگی[[16]](#footnote-17) (۲۰۱۰) و آریگی و سیلور[[17]](#footnote-18) (۱۹۹۹)، به توضیح مراحل انباشت سرمایه و بحران‌های مالی مرتبط با بی‌ثباتی‌های ساختاری پرداخته‌اند. در این چارچوب، فاز نهایی هر چرخه هژمونیک با وضعیت «آشوب سیستمی» شناخته می‌شود که بحران‌های شدید و نوسانات غیرقابل پیش‌بینی را به دنبال دارد.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه فوق، کمبود مطالعات جامع و تلفیقی در بررسی رفتار آشوبگونه متغیر انباشت سرمایه در اقتصاد ایران به چشم می‌خورد. بنابراین، پژوهش حاضر با تکیه بر رویکردهای نظری و تجربی اقتصاد فیزیک و استفاده از ابزارهای تحلیل غیرخطی و سری‌های زمانی، به‌دنبال پرکردن این خلأ علمی و ارائه تصویری دقیق‌تر از پویایی‌های درون‌زا و آشوبناک انباشت سرمایه در اقتصاد کشور است.

۳ روش پژوهش

جهت تشخیص یک فرآیند آشوبی از یک فرآیند تصادفی، دو روش مستقیم و غیر مستقیم وجود دارد؛ در روش مستقیم، از آزمون‌هایی استفاده می‌گردد که بر روی میزان حساسیت سیستم به شرایط اولیه، تمرکز داشته و در واقع گرفتن تأییدیه از این آزمون‌ها، دال بر وجود یک فرآیند آشوبی است. در روش غیرمستقیم، معمولاً از ابزارهایی مانند تحلیل‌های آماری و مدل‌های ریاضی استفاده می‌شود که به شناسایی ویژگی‌های پیچیده و غیرخطی سیستم پرداخته و به‌طور غیرمستقیم به آشوبی بودن آن پی برده می‌شود. در مطالعه حاضر، از روش مستقیم برای تحلیل رفتار متغیر انباشت سرمایه فیزیکی اقتصاد کشور ایران در بازه زمانی 1358 الی 1401 استفاده شده و سه آزمون BDS[[18]](#footnote-19)، آزمون لیاپانوف[[19]](#footnote-20) و آزمون نمای هرست[[20]](#footnote-21) مورد استفاده قرار گرفته‌است.

همچنین، از آنجا که یک سیستم ممکن است ویژگی‌های مانایی[[21]](#footnote-22) و آشوبی[[22]](#footnote-23) را به طور همزمان داشته باشد، لذا آزمون‌های مانایی[[23]](#footnote-24) به دو دلیل اساسی پیش از تحلیل‌های غیرخطی و آشوبناکی، ضروری هستند:

الف) اجتناب از نتایج کاذب در آزمون‌های غیرخطی: بسیاری از آزمون‌های غیرخطی بر این فرض استوارند که داده‌ها از یک فرآیند مانا نشأت می‌گیرند. اگر سری زمانی غیرمانا (دارای ریشه واحد) باشد، وجود روندهای تصادفی یا دترمینیستی می‌تواند به اشتباه به عنوان وابستگی غیرخطی تفسیر شود.

ب) تفکیک آشوب از ناپایداری ساختاری: هدف اصلی پژوهش‌های آشوبی، شناسایی حساسیت به شرایط اولیه و وابستگی غیرخطی ذاتی در سیستم است، نه نوسانات ناشی از روندها یا شوک‌های بیرونی. آزمون مانایی به جداسازی این دو مؤلفه کمک می‌کند؛ اگر داده‌ها غیرمانا باشند، ابتدا باید با تفاضل‌گیری یا حذف روند، آن‌ها را به حالت پایا تبدیل کرد تا اطمینان حاصل شود که نتایج آزمون‌های غیرخطی، منعکس‌کننده رفتار غیرخطی ذاتی سیستم است. مانایی در تحلیل سری‌های زمانی به حالتی اطلاق می‌شود که ویژگی‌های آماری مانند میانگین، واریانس و خودهمبستگی با گذر زمان ثابت باقی بمانند. به بیان دیگر، یک سری زمانی مانا فاقد روند سیستماتیک، تغییر ساختاری یا نوسانات متغیر در طول زمان است و رفتار آماری آن در طول بازه مشاهده‌شده تغییر نمی‌کند.

در این پژوهش برای آزمون مانایی داده‌های سری زمانی، از آزمون ریشه واحد لی–استرازیچیچ[[24]](#footnote-25) بهره گرفته شده است. این آزمون نسخه‌ای اصلاح‌شده از آزمون‌های ریشه واحد با شکست ساختاری است که با رویکردی متفاوت نسبت به آزمون‌های کلاسیکی عمل می‌کند. ویژگی ممتاز این آزمون، درون‌زا بودن زمان شکست ساختاری است؛ بدین معنا که نقطه یا نقاط شکست در داده‌ها بر اساس خود اطلاعات سری زمانی تعیین می‌شوند. همچنین، این آزمون امکان لحاظ دو شکست همزمان در سطح و روند متغیر را فراهم می‌کند.

از نظر آماری، فرضیه صفر این آزمون بیانگر وجود ریشه واحد (یعنی نامانایی سری زمانی) و فرضیه مقابل آن حاکی از مانایی با وجود شکست‌های ساختاری است. نتایج آزمون بر اساس آماره آزمون و مقدار احتمال (p-value) تفسیر می‌شوند. چنانچه مقدار p-value کمتر از سطح معنی‌داری (مثلاً ۵ درصد) باشد، فرض صفر رد شده و سری زمانی مانا تلقی می‌گردد. استفاده از این آزمون برای متغیرهایی نظیر انباشت سرمایه فیزیکی که به‌واسطه سیاست‌گذاری‌ها، تحریم‌ها یا شوک‌های اقتصادی دچار تغییرات ساختاری می‌شوند، به‌ویژه در حوزه اقتصاد کلان و اقتصاد ایران، از دقت و اعتبار بالاتری نسبت به سایر آزمون‌های مانایی، برخوردار است.

3.1 آزمون BDS

BDS یک آزمون ناپارامتریک است که در اصل برای آزمایش استقلال و توزیع یکسان (iid) طراحی شده است و وابستگی سریالی موجود در یک سری زمانی را مورد بررسی قرار داده و کمک می‌کند میان دو فرضیه (توزیع یکسان داشتن سری زمانی) و (نا مشخص بودن توزیع سری زمانی) فرضیه صحیح را انتخاب کرده و نخستین گام جهت تعیین نحوه‌ی توزیع مشاهدات در سری زمانی است. غیر‌خطی بودن مدل بسته به مقدار آماره‌ی Z دارد.

چناچه مقدار آن بزرگ و معنادار باشد، غیر‌خطی و اگر به صفر نزدیک باشد، تصادفی است. برای یک سری زمانی {xt}t = 1,…,Tابتدا m مقدار پیشین (Xt , Xt-1 , … , Xt-m+1)= در نظر گرفته می‌شود و پس از آن انتگرال همبستگی محاسبه می‌شود. می‌توان با کمک بعد محاطی، سری زمانی اسکالر را به یک سری از بردار ها (نقاط به شکل چندتایی مرتب) تبدیل کرد. بعد محاطی m، عبارت است از بردن N نقطه متوالی موجود در سری زمانی به نقاط درفضای m بعدی. این فرآیند برای سری زمانی ما به شکل معادلات شماره (5) و (6) و (7) است:

(5)

(6)

(7)

= (x1 , x2 , . . ., xm)

= (x2 , x3 , . . ., xm+1)

= (xN-m+1 , xN-m+2, … , xN)

پس در در فضای mبعدی به میزان N-m+1 نقطه وجود دارد. با کمک انتگرال همبستگی[[25]](#footnote-26)، میزان همبستگی فضایی[[26]](#footnote-27) در بین نقاط قابل اندازه‌گیری هست. این اندازه‌گیری به این ترتیب است که فاصله بینN تا مشاهده( نقطه) به صورت دو به دو درفضای mبعدی در نظر گرفته می‌شود؛ که این نقاط بسته هستند، یعنی فاصله بین آن‌ها از هم دارای شعاع یا آستانه‌ای[[27]](#footnote-28) برابر ɛ است:

(8)

= (ɛ) Cm.N

I(i,j;ɛ)=

(9)

دراینجا (ɛ) Cm.Nانتگرال همبستگی است، Nm= N-m+1 است. براک و همکاران ( ۱۹۸۷) نشان دادند که چنانچه یک سری زمانی IID( دارای توزیع مستقل و مشابه) باشد، آنگاه انتگرال همبستگی در بعد محاطی m، تقریبا برابر با انتگرال همبستگی در بعد محاطی واحد به توان mخواهد بود. در رابطه‌ی فوق، اختلاف میان تقریب Cm,N(ɛ) ≈ [C1,N(ɛ)]m مشاهده می‌شود. نیز انحراف معیار برای عبارت داخل پرانتز را نشان می‌دهد.

چنانچه سری زمانی IID باشد، مقدار{N\*[ Cm,N(ɛ) – C1,N(ɛ)m به صفر نزدیک بوده و در پی آن آماره‌ی آزمون BDS نیز مقدار نزدیک به صفر می‌گیرد.

Wm,N (ɛ)={ N\*[ Cm,N(ɛ) – C1,N(ɛ)m] / σm,N(ɛ)}0.5

(10)

این آزمون دو دنباله دارد، بدان معنا که آماره‌ی BDSمیان دو مقدار بحرانی( 1.96+ ,1.96-) قرار می‌گیرد و فرضیه که مبنی بر IIDبودن سری زمانی هست، مورد پذیرش واقع می‌شود و می‌توان دریافت که یک وابستگی( خطی یاغیرخطی) در ساختار سیستم هست (نسرین دوست،۱۳۸۸). در این پژوهش، آزمون BDS به دو شیوه‌ی مستقل پیاده‌سازی شد؛ یک‌بار با استفاده از نرم‌افزار متلب[[28]](#footnote-29) و بار دیگر با استفاده از نرم‌افزار اکسل و افزونه‌های آماری تکمیلی و قابل کنترل. هدف از این دو پیاده‌سازی مستقل، حصول اطمینان از صحت و قابلیت تکرار نتایج و نیز بررسی سازگاری آماری بین دو روش محاسباتی می‌باشد.

3.2 آزمون بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف

یک راه مطمئن تر برای تشخیص پدیده آشوب در یک سری زمانی غیرخطی، محاسبه توان لیاپانوف آن است، که معیاری برای سنجش حساسیت سری زمانی به شرایط اولیه است. چنانچه یک سیستم حداقل دارای یک لیاپانوف مثبت باشد، آن را سیستم آشوبناک می‌نامند( خلیل[[29]](#footnote-30)، ۱۳۸۰). برای محاسبه‌ی نمای لیاپانوف از بردار‌های m جزئی معادله [, X(ti+m) ... , X (ti+1), ([X (ti = Xi استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، توان لیاپانوف یک سری زمانی تولید شده توسط یک سیستم یک بعدی که با معادله Xt+1=f (Xt) به دست می‌آید، به صورت معادله شماره (11) تعریف می‌شود؛

(11)

که در آن f'(xt) گرادیان تابع f(xt) است. یک سیستم چندبعدی دارای یک نمای لیاپانوف برای هر بعد است. نماهای لیاپانوف میزان واگرایی نمایی مسیرهای اولیه نزدیک را در طول زمان اندازه‌گیری می‌کنند. وجود حداقل یک نمای لیاپانوف مثبت نشان‌دهنده حساسیت سیستم به شرایط اولیه است که پیش‌بینی رفتار زمانی آن را، به‌جز در کوتاه‌مدت، دشوار می‌سازد. سیستمی که حداقل یک نمای لیاپانوف مثبت داشته باشد، به‌عنوان یک سیستم آشوبناک شناخته می‌شود.

از روی بردار‌های با فاصله کمتر از r به شکل m; i: j) = ||Xim – Xjm || ≤ r ) r0مقدار این واگرایی dn(m: i,j) که در نقاط مجاور هم هستند، درفضای m بعدی به شکل معادله شماره (12) محاسبه می‌شود؛

dn (m;i: j) =

(12)

پس از آن ‌بیشینه‌ی توان لیاپانوف محاسبه می‌گردد:

Le (m, n) =

(13)

مسیرهای استثنایی، مانند آن‌هایی که به یک نقطه ثابت ناپایدار برای t ختم می‌شوند، ممکن است نماهای لیاپانوف دیگری داشته باشد، اما عموماً برای نقاط جاذب معمولی نیستند و تعداد آن‌ها صفر است. می‌توان زمان تأخیر را برای یک خطای شناخته شده در شرایط اولیه  تخمین زد؛

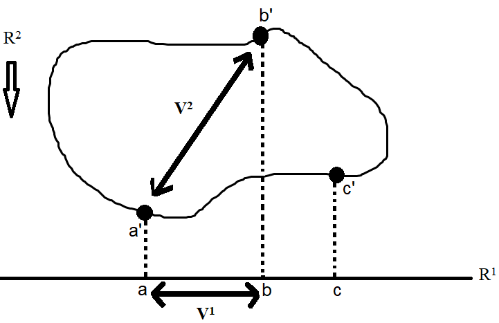
(14)

که در آن بزرگترین توان لیاپانوف است و L طول مشخصه‌ی نقطه جاذب است. زمان تأخیر زمانی است که پس از آن دیگر هیچ ارتباطی بین حالت اولیه x(0) و حالت فعلی x(t) وجود ندارد. لذا برای محاسبه‌ی نمای لیاپانوف، نیاز به محاسبه دو پارامتر زمان تأخیر(τ) و بعد محاط بهینه(m) است. بدین معنا که در یک سری زمانی، برای پاسخ به این سؤال که از میان اعداد، مجموعه‌های چندتایی جدا گردد، از مقدار بهینه بعد محاط استفاده شده و نیز در پاسخ بدین سؤال که، میزان تأخیر در انتخاب مؤلفه‌های هر مجموعه، چه میزان باشد، از پارامتر تأخیر زمانی استفاده می‌گردد. به منظور تعیین زمان تأخیر(τ) روش های مختلف وجود دارد که در مقاله حاضر از روش [[30]](#footnote-31)AMI استفاده شده است. در این روش سعی بر آن است که زمان تأخیری انتخاب گردد که بر اساس آن، بردارهای حالت تا حدامکان از یکدیگر مستقل باشند. به این منظور بردارهای حالت ( x(tو (x(t+ τ را در نظر گرفته و سپس تابع اطلاعات متقابل (I(τ یا همان I(x(t), x(t+τ)) را تشکیل داده و اولین مینیمم این تابع به عنوان تخمینی مناسب برای زمان تأخیر در نظر گرفته می‌شود. تابع اطلاعات متقابل I(x(t),x(t+τ))که بیان کننده تأثیر دو جانبه این دو بردار بر یکدیگر است، به شکل معادله شماره (15) تعریف می‌شود:

I(x(t),x(t+τ))

(15)

که در آن توزیع احتمال مشترک x(t) و x(t+τ) است و به ترتیب، توزیع‌های احتمال حاشیه‌ایx(t) و x(t+τ) هستند. در یک سیستم پویا، با در نظر گرفتن دو مسیر یا دو نقطه‌ نزدیک به هم، لازم است تبیین گردد که این دو مسیر، به لحاظ ویژگی‌های ذاتی سیستم پویا، در نزدیکی یکدیگر قرار گرفته‌اند یا فاصله کم آ‌ن‌ها به دلیل محاط گشتن در بعدی نامناسب است؟!. لذا برای محصور کردن جاذب سیستم در فضایی مناسب، لازم است بعد محاط بهینه برای سری زمانی مورد نظر، لحاظ گردد که در پژوهش حاضر از روش شمارش نزدیک‌ترین نقاط همسایه کاذب یا [[31]](#footnote-32)FNN استفاده شده است. در این روش، چنانچه با افزایش بعد محاط، درصد نقاطFNN به سمت صفر میل کند در این حالت امکان آشکار شدن جاذب سیستم در یک بعد محاط مناسب وجود دارد. اما اگر هیچ‌گاه این اتفاق رخ ندهد؛ یعنی همچنان تعداد نقاط FNN از یک مقدار آستانه (که معمولاً در آزمایشات برابر 15 در نظر گرفته می‌شود) بیشتر باشد، داده‌های موجود دارای اختلالات تصادفی فراوان بوده و امکان محصور کردن آن در یک بعد محاط m وجود ندارد. مفهوم همسایگی کاذب در شکل شماره (1)، نمایش داده شده است؛ بدین صورت که در فضای R1 نقطه b، نزدیک‌ترین همسایه به نقطه a می‌باشد و به مقدار v1 فاصله دارند. چنانچه بعد را به R2 افزایش بدهیم، فاصله این دو نقطه با یکدیگر، v2 خواهد بود که بسیار بزرگ‌تر از مقدار قبلی است. لذا b' همسایه واقعی (TNN[[32]](#footnote-33)) نقطه a' محسوب نشده و همسایه کاذب است، چرا که v2>> v1 بوده و این فاصله نزدیک به دلیل انتخاب بعد محاط اشتباهی رخ داده است و نه به خاطر ویژگی‌های جاذب سیستم. بنابراین برای یك نقطه، همسایه‌هایی واقعی محسوب می‌شوند كه با افزایش بعد، فاصله بین آن‌ها تفاوت چشم‌گیری نداشته باشد (وان باسیرک[[33]](#footnote-34)، 1985).



*شکل 1.* مفهوم همسایگی کاذب

در روش FNNابتدا برای بعد mمقدار دلخواهی را انتخاب و از روی جاذب ساخته شده در فضای حالت با بعد m دو نقطه نزدیك به هم را برگزیده و سپس بعد محاط، یک درجه بهm+1 افزایش داده می‌شود. حال در فضای حالت جدید، فاصله دو نقطه نسبت به یکدیگر مجددأ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اگر این دو نقطه همچنان نزدیك به یکدیگر باقی بمانند حالت نزدیک‌ترین همسایه‌های واقعی(TNN) و اگر این دو نقطه از یکدیگر دور شوند حالت نزدیک‌ترین همسایه‌های غلط رخ می‌دهد. اگر درصد تعداد نقاط FNN به سمت صفر میل كند بعد m، بعد مناسب برای محاط كردن سیستم می‌باشد. mرا تا جایی ادامه می‌دهیم كه درصد تعداد نقاط FNNبه سمت صفر برود. اگر با افزایش بعد محاط درصد نقاط FNNبه سمت صفر میل كند، در این حالت امکان آشکار شدن جاذب سیستم در یك بعد محاط مناسب وجود دارد. اما اگر هیچ گاه این اتفاق رخ ندهد یعنی همچنان تعداد نقاط FNNاز یك مقدار آستانه بیشتر باشد، داده‌های موجود دارای اختلال فراوان بوده و امکان محصور كردن آن در یك بعد محاط mوجود ندارد. برای این مقدار آستانه بر اساس تجربه‌ی حاصل از اعمال روش بر روی سیستم‌های آشوبی مقادیر متفاوت پیشنهاد شده است.

با این نحوه تشخیص همسایه‌های كاذب، وضعیت همسایه برای هریك از بردارهای تأخیر به ازای بعدهای متوالی محاط بررسی می‌گردد تا اينكه تعداد همسایه‌های كاذب، كه از تصویر نمودن جاذب در فضای كوچك ناشی می گردد، به حدود صفر برسد. عملیات جبری روش FNN به شرح معادله شماره (16) است؛

Yi(t) = [y(t); y(t − τ); … ; y(t − (m − ١)τ)]T

(16)

Yi(t) برداری در فضای حالت است و

(17)

Y'i (t) = [y′(t); y′(t − τ); · · · ; y′(t − (m − ١)τ)]T

یك همسایه نزدیك به Yi(t) باشد. اگر فاصله نقاط در فضای m+1 بعدی افزایش یابد، حالت نزدیک‌ترین همسایه‌های غلط رخ داده است. مربع فاصله اقلیدسی این نقاط در فضاهای محاط m و m+1 به ترتیب به صورت معادلات شماره (18) و (19) نمایش داده می‌شود؛

(18)

(19)

=[y(t + (d − ١)τ) − y′(t + (d − ١)τ)]2

=[y(t + (d − ١)τ) − y′(t + (d − ١)τ)]2=

رابطه بین فاصله نقاط در فضایm بعدی و m+1 بعدی یا خطای نسبی فاصله به صورت معادله شماره (20) می‌باشد؛

(20)

برای هركدام از مقادیر mمقدار معادله شماره (20) را محاسبه می‌کنیم. هرگاه كمیت فوق الذكر از یك مقدار آستانه (حدود10 الی 15) فراتر برود همسایه تحت بررسی، كاذب درنظر گرفته می‌شود.

3.3 آزمون نمای هرست

نمای هرست معیاری برای حافظه بلند مدت یک سری زمانی است که جهت تجزیه و تحلیل تداوم روندها یا چرخه ها در داده ها به ویژه در امور مالی و اقتصادی حائز اهمیت است. در پژوهش حاضر، جهت محاسبه‌ی نمای هرست، از روش تجدید مقیاس‌بندی[[34]](#footnote-35) استفاده می‌گردد، بدین صورت که ابتدا سری ‌زمانی ‌‌X به ‌طول ‌‌N را ‌به‌‌ ‌ dسری ‌زمانی ‌کوتاه‍تر ‌با ‌طول‌ N/10 ,…n= N, N/2, N/4 تبدیل کرده و نام هر زیر بخش m نامیده می‌شود( سری زمانی با طول Lبه d زیرمجموعه با طول τ تقسیم می‌شود). هر یک از این زیرمجموعه‌ها نام دارد که 𝑚 = 1,…, dو 𝑖 = 1,…, است. اکنون برای ‌هر‌کدام ‌از ‌زیر‌سری‌های ‌‌ m=1, 2, ...,dمقدار میانگین و انحراف معیار محاسبه می‌گردد؛

Em=

(21)

(22)

سپس مقدار نرمال شده‌ی داده‌ها به شکل معادله شماره (23) نرمال می‌گردند؛

(23)

و اکنون سری ‌زمانی تجمعی ‌جدیدی ‌به‌ ‌صورت‌ معادله شماره (24) محاسبه‌ می گردد؛

(24)

سپس R( دامنه تعدیل‌شده یا انحراف داده‌ها از میانگین محلی (میانگین هر زیرسری))، بر اساس اختلاف بین بیشینه و کمینه مقدار ، مطابق با رابطه شماره (25) محاسبه می‌شود؛

(25)

در گام بعد، مقدار‌دامنه‌ی‌ تغییر ‌مقیاس‌ داده ‌شده و یا به عبارتی، برای هر زیرمجموعه با طول مشخص مقدار محاسبه شده و برای تمام زیرمجموعه‌ها با طول τ مقدار میانگین به صورت معادله شماره (26) محاسبه می‌گردد؛

(26)

لذا نمای هرست را میتوان از رابطه شماره (27) تعریف کرد:‌

(27)

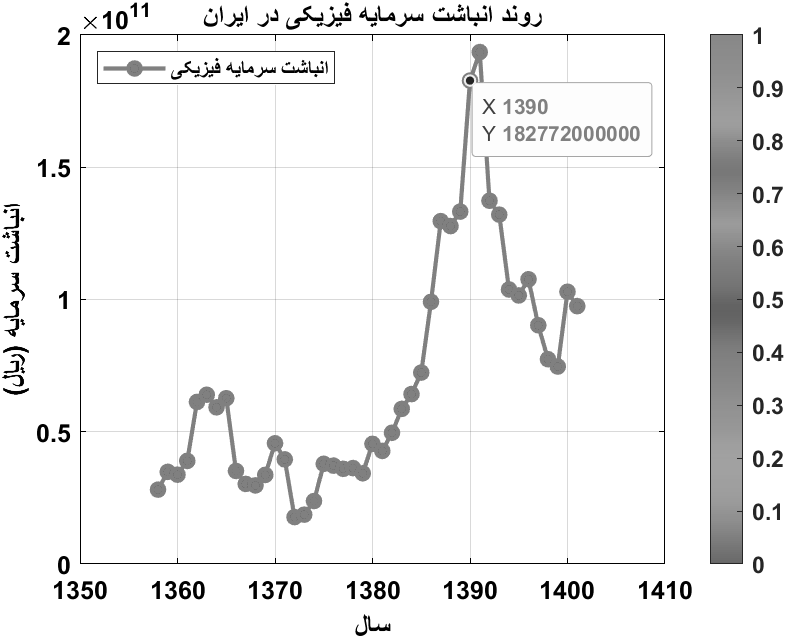
که ‌در ‌آن دامنه‌ی ‌تجدید ‌مقیاس‌ شده،‌ عدد‌ثابت و n تعداد مشاهدات و منظور از Hنیز نمای هرست می‌باشد.

4 نتایج

در راستای پاسخ به پرسش اصلی پژوهش مبنی بر وجود رفتار آشوبناک در سری زمانی انباشت سرمایه فیزیکی ایران، تحلیل‌های تجربی مبتنی بر چارچوب اقتصادفیزیک و ابزارهای تشخیص آشوب انجام پذیرفت. این بخش با به‌کارگیری آزمون‌های BDS، نمای لیاپانوف و هرست، به بررسی ویژگی‌های غیرخطی، حساسیت به شرایط اولیه و حافظه بلندمدت متغیر مذکور طی بازه ۱۳۵۸ تا ۱۴۰۱ می‌پردازد.

4.1 بررسی روند متغیر انباشت سرمایه فیزیکی

برای تحلیل رفتار سری زمانی متغیر انباشت سرمایه فیزیکی[[35]](#footnote-36) در اقتصاد ایران، ابتدا به‌منظور کاهش ناهمگنی مقیاس داده‌ها و بهبود قابلیت تفسیر نتایج، از تبدیل لگاریتم طبیعی استفاده شد. این تبدیل با تعدیل پراکندگی داده‌ها (کاهش واریانس و انحراف معیار)، امکان شناسایی دقیق‌تر الگوهای غیرخطی پنهان در سری زمانی را فراهم می‌کند. به‌علاوه، نرمالسازی داده‌ها از طریق لگاریتم‌گیری، پایایی نتایج آزمون‌های غیرخطی را افزایش می‌دهد، چراکه واریانس بالای داده‌های خام ممکن است برآورد پارامترهای مدل را تحت تأثیر قرار دهد. بر این اساس، سری زمانی لگاریتم‌شدهٔ انباشت سرمایه در نمودار ۱ نمایش داده شده است. این نمودار نه‌تنها روند کلی انباشت سرمایه را طی چهار دهه نشان می‌دهد، بلکه نوسانات ادواری و نقاط شکست ساختاری (مانند تأثیر تحریم‌ها) را نیز آشکار می‌سازد؛



*نمودار 1.* روند متغیر انباشت سرمایه فیزیکی در اقتصاد ایران

نمودار روند انباشت سرمایه فیزیکی در ایران، با نمایش مقادیر لگاریتمی این متغیر طی شش دهه، الگوی پیچیدهای از رشد، رکود و نوسانات شدید را نشان می‌دهد که بازتابی از تعامل عوامل داخلی و خارجی در اقتصاد ایران است. در دهه‌های نخست (۱۳۵۰ تا ۱۳۷۰)، روند انباشت سرمایه عمدتاً تحت تأثیر درآمدهای نفتی و سیاست‌های بازسازی پس از جنگ تحمیلی شکل گرفت. پایان جنگ در سال ۱۳۶۷ و تمرکز بر بازسازی زیرساخت‌ها و توسعه صنایع پایه، به‌ویژه در بخش انرژی و پتروشیمی، موجب رشد چشمگیر سرمایه‌گذاری شد. اوج این روند در سال ۱۳۷۵ همزمان با افزایش قیمت نفت و ثبات نسبی سیاسی بود که منابع مالی قابل توجهی را به بخش‌های مولد اقتصاد تزریق کرد. با ورود به دهه ۱۳۸۰، روند صعودی سرمایه‌گذاری با چالش‌های جدی مواجه شد. تشدید تحریم‌های بین‌المللی، به‌ویژه پس از قطعنامه‌های شورای امنیت در سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۸، دسترسی به فناوری و سرمایه خارجی را محدود کرد. همزمانی این تحریم‌ها با کاهش قیمت نفت در بازارهای جهانی، درآمدهای ارزی را کاهش داد و موجب افت محسوس در انباشت سرمایه شد. این دوره نشان‌دهنده وابستگی ساختاری اقتصاد ایران به درآمدهای نفتی و آسیب‌پذیری آن در برابر شوک‌های بیرونی است. در دهه ۱۳۹۰، اگرچه بهبود موقت قیمت نفت و سیاست‌های انبساطی مالی موجب افزایش نسبی سرمایه‌گذاری در سال ۱۳۹۰ شد، اما تشدید تحریم‌ها پس از خروج آمریکا از برجام در سال ۱۳۹۷، همراه با نوسانات شدید نرخ ارز و تورم افسارگسیخته، بی‌ثباتی را به محیط سرمایه‌گذاری تحمیل کرد. این عوامل نه‌تنها جذب سرمایه خارجی را مختل ساخت، بلکه اعتماد بخش خصوصی به سیاست‌های کلان اقتصادی را نیز تضعیف نمود. ورود به دهه ۱۴۰۰ با همزمانی شوک‌های بی‌سابقه‌تری همراه بود. همه‌گیری کووید-۱۹ در سال ۱۳۹۹، اختلال در زنجیره تأمین جهانی و کاهش تقاضای نفتی را به همراه آورد که با تشدید تحریم‌های مالی و خروج سرمایه‌گذاران خارجی، افت شدیدتری در انباشت سرمایه ایجاد کرد. این روند نشان می‌دهد که اقتصاد ایران، علاوه بر وابستگی به نفت، در برابر بحران‌های چندلایه (سیاسی، بهداشتی و اقتصادی) آسیب‌پذیر است.

4.2 آزمون ریشه واحد لی–استرازیچیچ (Lee–Strazicich)

به‌منظور بررسی مانایی سری‌زمانی لگاریتم متغیر انباشت سرمایه، از آزمون لی–استرازیچیچ (Lee–Strazicich) با لحاظ ساختار شکست ساختاری استفاده شد. نتایج آزمون مطابق با اطلاعات به‌دست آمده در جدول شماره (1)، نشان داد که این سری در سطح دارای ریشه واحد بوده و نامانا است. اما پس از اعمال تفاضل‌گیری بر روی لگاریتم این متغیر، سری ‌زمانی مانا گردید که نشان‌دهنده مانایی آن در تفاضل مرتبه اول)) ۱ (I(می‌باشد و از نسخه‌ی دوم آزمون Lee-Strazicich با دو نقطه شکست ساختاری استفاده گردید؛

جدول 1

نتایج آزمون مانایی لی–استرازیچیچ با شکست ساختاری

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| متغیر | آماره آزمون Lee–Strazicich در سطح | سطح احتمال | نتیجه | آماره آزمون PP با تفاضل 2 | سطح احتمال | نتیجه |
| لگاریتم انباشت سرمایه (log(PC)) | ۰٫۳۳۸۵− | 0.7362 | عدم مانایی | ۳٫۴۷۱۹ | 0.0010 | مانا در سطح یک( I1) |

*منبع: یافته‌های تحقیق*

4.3 آزمون BDS

فرضیه‌های آزمون BDS به شرح جدول شماره (2) است:

جدول 2

فرضیه‌های آزمون BDS

|  |  |
| --- | --- |
| H0 | داده‌ها دارای توزیع یکنواخت و مستقل (IID) هستند. |
| H1 | داده‌ها IIDنیستند، بدان معنا که در سری زمانی متغیر، وابستگی خطی یا غیرخطی وجود دارد. |

در این آزمون، سطح معناداری α برابر با 0.05 در نظر گرفته شده است. نتایج حاصل از آزمون BDS برای تفاضل مرتبه اول لگاریتم طبیعی انباشت سرمایه فیزیکی اقتصاد ایران، در جدول شماره (3) ارائه شده است:

جدول 3

نتایج روش اول آزمون BDS

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| تعداد بُعد محاط | 2m= | 3m= | 4m= |
| آماره‌ی آزمون BDS | 22.30 | 11.58 | 48.08 |
| میزان احتمال  (p-value) | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

*منبع: یافته‌های تحقیق*

بر اساس نتایج جدول فوق، در تمامی ابعاد محاط (m=2، m=3 و m=4)، مقدار p-value کمتر از سطح معناداری 0.05 بوده و بنابراین فرضیه صفر رد می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهند که سری زمانی مورد مطالعه از ویژگی‌های یک فرآیند IID برخوردار نیست و دارای ساختار وابستگی (خطی یا غیرخطی) می‌باشد. همچنین، به‌منظور صحت‌سنجی و افزایش دقت تحلیل، آزمون BDS به روش دوم نیز انجام گرفت و نتایج آن در جدول شماره (4) آورده شده است:

جدول 4

نتایج روش دوم آزمون BDS

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **m = 4** | **m = 3** | **m=2** | **بعد محاط** |
| 97.33 % | 67.48 % | 68.21 % | **C(m,n)** |
| 35.65 % | 72.33 % | 70.64 % | **c(m,n)** |
| 84.62 % | 15.15 % | 18.30 % | **Differen(اختلاف)** |
| 0.02 | 0.0066 | 0.0026 | **واریانس** |
| 1.76 % | 1.31 % | 0.82 % | **انحراف معیار** |
| 48.08 | 0.11 | 0.22 | **z-state** |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | **میزان احتمال** |

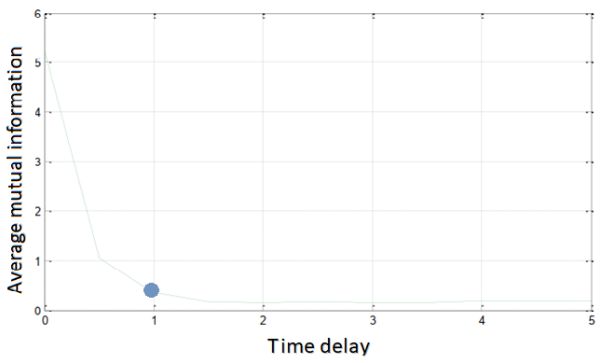
منبع: یافته‌های تحقیق

بر مبنای جدول فوق، مقادیر آماره‌ی z در ابعاد دوم و سوم به صفر نزدیک‌اند، اما در بعد چهارم مقدار آن بسیار بالا و معنادار است. همچنین، در هر سه بعد، مقدار احتمال (p-value) کمتر از 0.05 گزارش شده که مؤید رد فرضیه صفر در آزمون BDS و وجود ساختار وابستگی در سری زمانی است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که داده‌های سری زمانی انباشت سرمایه از توزیع IID پیروی نمی‌کنند و ساختار غیرخطی در آن‌ها مشاهده می‌شود.

شایان ذکر است که اثبات غیرخطی بودن یک سری زمانی لزوماً به معنای آشوبناک بودن آن نیست. برای تحلیل ویژگی‌های آشوبی لازم است از آزمون‌های مکمل مانند آزمون نمای لیاپانوف و سایر روش‌ها استفاده شود.

4.4 آزمون نمای لیاپانوف

هر سیستم غیرخطی، الزامأ آشوبناک نیست و آزمون BDS نیز به تنهایی قادر به اثبات آشوبناکی سیستم نمی‌باشد، لذا لازم است جهت تأیید آشوبناکی سیستم، از آزمون‌های مکمل همچون نمای هرست، نمای لیاپانوف، بازسازی فضای فاز و... استفاده شود. آنچه نمای لیاپانوف در یک سیستم پویا مشخص می‌سازد، میزان همگرایی یا واگرایی مدار‌های مجاور (مسیر‌هایی که در ابتدا، تفاوت بسیار کمی در مقدار اولیه دارند) در فضای فاز می‌باشد؛ توان مثبت لیاپانوف نشان‌دهنده واگرایی مسیرها و توان منفی آن نمایانگر همگرایی مسیرها است. لذا نسبت واگرایی مدار‌های نزدیک به هم، و به عبارتی، میزان حساسیت سیستم به شرایط اولیه، توسط نمای لیاپانوف اندازه‌گیری می‌شود. چنانچه نماهای لیاپانوف مثبت باشند، در صورتی که تغییر کوچکی در شرايط اولیه سیستم رخ دهد، اثر اين تغییر با گذشت زمان مشخص‌تر خواهد شد، تا جايی که باعث به وجود آمدن مسیر زمانی می‌شود که با مسیر زمانی قبلی کاملا متفاوت خواهد بود. اين ويژگی به "اثر پروانه‌ای" مشهور است و با تخمین نمای لیاپانوف قابل بررسی است. در واقع، در جاذب‌های عجیب مسیرهای نزديک به هم با گذشت زمان از يکديگر دور می‌شوند و اين فاصله با گذشت زمان به طور نمايی افزايش می‌يابد. بزرگترین نمای لیاپانوف، میزان حساسیت سیستم به شرایط اولیه را ارائه می‌دهد، همچنین قادر است میزان پیش‌بینی پذیری سیستم را نشان دهد. اگرچه یک سیستم m بعدی، به میزان m نمای لیاپانوف دارد، در اکثر کاربردها، تنها محاسبه بزرگترین نمای لیاپانوف کفایت می‌کند (جعفری نیا، 1390). در پژوهش حاضر، چنانچه بزرگترین نمای لیاپانوف، بزرگتر از مقدار بحرانی نمای لیاپانوف باشد، چنین نتیجه می‌دهد که سیستم، آشوبناک است. انتخاب زمان تأخیر مناسب برای سری زمانی از این جهت دارای اهمیت است که اگر این مقدار، کوچک انتخاب شود، مختصات بردارهای حالت در فضای فاز بازسازی شده بسیار به هم شبیه هستند و جاذب در طول یک قطر پخش شده و به راحتی توسط نوسانات تصادفی دچار اختلال می‌شوند. در مقابل اگر این مقدار به شکل نامناسبی بزرگ انتخاب شود؛ منجر به از دست دادن بسیاری از اطلاعات و جزئیات مفید داده‌ها شده و به این ترتیب وابستگی ذاتی موجود در داده‌ها نادیده گرفته شده و در نتیجه محاسبات قابل اتکا نخواهند بود. انتخاب زمان تأخیر مناسب برای پژوهش حاضر، همانگونه که در بخش (3-2) شرح داده شد، مطابق روش AMI انجام گرفته که بر اساس این روش، میزان تأخیر زمانی بهینه برای سری زمانی متغیر انباشت سرمایه، مقدار (1) به دست آمده است.



*نمودار 2.* انتخاب زمان تأخیر مناسب به روش AMI

برای انتخاب بعد محاط بهینه نیز از روش نزدیک‌ترین همسایه‌ی کاذب استفاده شده است؛ که بر اساس تئوری شرح داده شده در بخش (3-2)، این مقدار برابر با عدد 2 به دست آمده است. اما در مطالعه حاضر، به منظور دقت بیشتر، نمای لیاپانوف برای ابعاد سوم و چهارم نیز محاسبه شده است. لذا بر اساس الگوریتم مذکور، نمای لیاپانوف به ازای تأخیر زمانی 1 و بعد محاط بهینه 2 و نیز به دلخواه، برای ابعاد 3 و 4 برآورد شده که به شرح جدول شماره (5) است؛

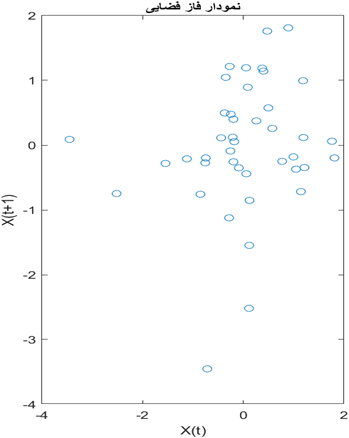
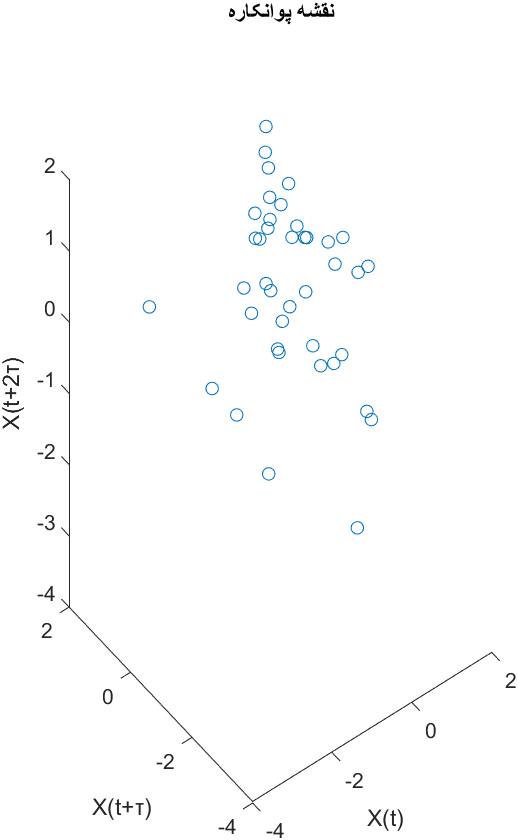
جدول 5

نتایج آزمون لیاپانوف

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **m=4** | **m=3** | **m=2** | **بعد محاط(m)** |
| 0.940 | 0.893 | 0.852 | بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف |

منبع: یافته‌های تحقیق

در جدول فوق، که مقادیر با نرم افزار متلب برآورد شده‌اند، نتایج حاکی از آن است که بزرگترین نمای لیاپانوف، به ازای بعد محاط 2، عددی کوچک و اما مثبت است، که دلیل محکمی بر آشوبناکی سری زمانی متغیر انباشت سرمایه می‌باشد. این مقدار برای ابعاد 3 و 4 نیز برآورد شده که همچنان عددی مثبت است. ضمنأ در هر بعد محاط، حتی اگر یکی از نماهای لیاپانوف، عددی مثبت باشد، نمایانگر دور شدن دو مسیر از یکدیگر در صفحه‌ی فاز می‌باشد که قادر است سیستم را به سمت رفتاری غیر خطی و آشوبناک هدایت کند.بازسازی فضای فازی امکان مشاهده ساختار دینامیکی داده‌ها را فراهم کرده و نشان می‌دهد که مسیرهای سری زمانی دارای رفتار پیچیده و غیرخطی هستند. همچنین، نگاشت پوانکاره[[36]](#footnote-37) الگوی پراکندگی نقاط را نشان می‌دهد که گواهی بر وجود رفتار آشوبناک در سیستم است. این نتایج با تحلیل نمای لیاپانوف و آزمون BDS نیز تأیید شده‌اند.



4.5 آزمون نمای هرست

نمای ‌هرست ‌به ‌عنوان ‌معیاری‌ جهت‌ تعیین ‌آشوبناکی ‌سری‌های ‌زمانی‌ مورد ‌استفاده ‌قرار ‌می‌گیرد. به عبارت دیگر، معیاری جهت ارزیابی میزان آشوبناک بودن سیستم‌ها و کمی‌سازی بعد فرکتال سیستم‌های آشوبناک است و درجه ناهمگنی یک فرآیند دارای خاصیت فرکتالی را اندازه‌گیری می‌کند (دیونی[[37]](#footnote-38)، 1989). مقادیر مورد انتظار برای این ضریب، بین صفر و یک می‌باشند. براساس محاسبات انجام‌شده در این پژوهش، برای سری زمانی متغیر انباشت سرمایه در اقتصاد ایران، در بازه‌ی زمانی مورد نظر، مقدار نمای هرست برابر با 0.7 به‌دست آمده است. این مقدار که در بازه‌ی 0.5 تا 1 قرار دارد، نشان‌دهنده‌ی غیرتصادفی بودن فرآیند مولد سری زمانی انباشت سرمایه است و دلالت بر وجود حافظه طولانی‌مدت در این سری زمانی دارد. به عبارت دیگر، مقادیر گذشته داده‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر مقادیر آینده دارند و این تأثیر برای مدت زمان طولانی ادامه می‌یابد. بنابراین، رفتار حال و آینده سری زمانی تحت تأثیر وقایع و وضعیت‌های گذشته قرار دارد. این نتیجه، به‌علاوه نتیجه‌ای که از آزمون نمای لیاپانوف نیز حاصل شد، نشان‌دهنده‌ی آشوبی بودن سری زمانی متغیر انباشت سرمایه در دوره زمانی موردنظر است، و بر پویایی پیچیده و غیرخطی فرآیند اقتصادی حاکم بر آن دلالت می‌کند.

5 بحث و جمع‌بندی

مقاله‌ی حاضر به بررسی ویژگی‌های آشوبی در فرآیند مولد سری زمانی متغیر انباشت سرمایه‌ فیزیکی در اقتصاد ایران، در بازه زمانی 1358 تا 1401 هجری شمسی پرداخته است. نتایج آزمون مانایی نشان‌دهنده عدم مانایی اولیه سری زمانی متغیر انباشت سرمایه بود، که پس از انجام تفاضل‌گیری اول، سری زمانی به سطح مانا رسید و ویژگی‌های پایدار آماری خود را به نمایش گذاشت. همچنین، آزمون BDS بر روی تفاضل مرتبه اول سری زمانی، وجود وابستگی‌های غیرخطی در داده‌ها را تأیید کرد، به‌طوری که تمامی ابعاد محاط با سطح احتمال 0.00، نشان‌دهنده وجود روابط غیرخطی و پیچیده در سری زمانی انباشت سرمایه بودند. در راستای بررسی آشوب‌ناکی رفتار سری زمانی مذکور، ارزیابی بزرگترین نمای لیاپانوف نشان داد که سری زمانی انباشت سرمایه از ویژگی‌های آشوبی برخوردار است. نتایج این آزمون با مقادیر مثبت بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف در ابعاد مختلف، حاکی از حساسیت بالای رفتار سیستم به شرایط اولیه و اثرات بلندمدت تغییرات در این شرایط بود. علاوه بر این، در آزمون نمای هرست که به ارزیابی سطح غیرتصادفی بودن و حافظه طولانی‌مدت پرداخته است، مقدار 0.7 برای سری زمانی انباشت سرمایه بدست آمده که نشان‌دهنده وجود حافظه بلندمدت و اثرات قابل توجه مقادیر گذشته بر مقادیر آینده در فرآیند انباشت سرمایه بود. این مقدار از نمای هرست، تأکیدی بر پیچیدگی و عدم تصادفی بودن رفتار سری زمانی انباشت سرمایه دارد. نتایج این پژوهش، به‌ویژه با تأکید بر آزمون‌های نمای لیاپانوف و نمای هرست، نشان‌دهنده وجود آشوب در رفتار سری زمانی متغیر انباشت سرمایه (به رغم مانایی آن)، در بازه زمانی مذکور بوده و تأیید می‌کنند که آشوب نقش محوری در ناپایداری انباشت سرمایه ایران ایفا می‌کند.

این نتایج برای اقتصاد ایران سه دلالت کلیدی دارد:

۱. در سری زمانی متغیر انباشت سرمایه‌ی ایران، نوعی ناپایداری ذاتی در سیاست‌های شوک‌محور بروز می‌دهد؛ بدین معنا که هرگونه مداخله سیاستی بدون در نظر گرفتن اثرات غیرخطی (مانند آزادسازی یکباره قیمت‌ها یا تغییرات ناگهانی نرخ ارز) می‌تواند سیستم را از آستانه‌های بحرانی عبور داده و به فازهای آشوبی جدیدی سوق دهد؛ همان‌گونه که در بخش 4/2 نمونه این فرآیند انتقال در مدل لجستیک مطرح شد. در اقتصاد ایران، رشد شتابان سرمایه در دهه ۱۳۸۰ (با پارامتر r بالا) و تشدید تحریم‌ها در دهه ۱۳۹۰، نمونه‌ای عینی از این انتقال محسوب می‌شوند.

۲. نتایج این مطالعه علامت‌هایی بابت لزوم بازتعریف ثبات اقتصادی را ارائه می‌دهد. مانایی آماری انباشت سرمایه پس از تفاضل‌گیری، به معنای بازگشت سیستم به تعادل خطی نیست، بلکه نشانگر وجود جاذب‌های چندگانه[[38]](#footnote-39) در فضای فاز است. بدین معنا که حتی اگر سری زمانی در ظاهر مانا شده باشد (مثل (I(1) ← I(0) رفتار درونی سیستم هنوز غیرخطی، پیچیده، و وابسته به مسیر[[39]](#footnote-40) است. وجود «جاذب‌های چندگانه» یعنی این سیستم می‌تواند در حالت‌های مختلف پایدار شود، بدون اینکه از نظر آماری مانا بودن سری با این پدیده تناقض داشته باشد. این یافته توضیح می‌دهد چرا اقتصاد ایران علی‌رغم اجرای برنامه‌های تعدیل ساختاری، همواره بین فازهای رونق و رکود آشوبی نوسان می‌کند.

۳. آشوبناکی سری زمانی انباشت سرمایه به نوعی اهمیت داده‌های پرسرعت در حکمرانی را خاطرنشان می‌کند. چرا که با توجه به ماهیت پیش‌بینی‌ناپذیر سیستم، مدل‌های کلان سنتیمحدودیت دارند و به مکمل‌هایی از جنس مدل‌های آشوبی یا شبکه‌ای نیاز است. برای نمونه، مدل‌های سنتی معمولاً پویایی بازدهی به مقیاس را هموار و ساختاری فرض می‌کنند، در حالی که در واقعیت، تعاملات غیرخطی میان سرمایه، نیروی کار و فناوری ممکن است به رفتارهای نامنظم و پرنوسان منجر شود.

در جمع‌بندی، این پژوهش نشان می‌دهد که کلید فهم بحران‌های ساختاری اقتصاد ایران (مانند فرار سرمایه‌گذاری یا نوسانات شدید تشکیل سرمایه ثابت) نه در تحلیلی خطی، بلکه در شناسایی امضای آشوبی[[40]](#footnote-41) سیستم نهفته است. این یافته، پشتوانه علمی محکمی برای انتقال پارادایمی از «سیاست‌گذاری قطعیت‌گرا» به «حکمرانی تطبیقی مبتنی‌بر ریسک» فراهم می‌کند. نتایج پژوهش حاضر حاکی از آن است که اقتصاد ایران در چرخه‌های انباشت سرمایه، نه بر اساس منطق تعادل‌های پایدار، بلکه تحت حاکمیت پویایی‌های آشوبیِ وابسته به مسیر عمل می‌کند. این یافته، پشتوانه علمی محکمی برای انتقال پارادایمی از «سیاست‌گذاری قطعیت‌گرا» به حکمرانی تطبیقی مبتنی‌بر ریسک فراهم می‌کند.

6 نتایج کاربردی و توصیه‌های سیاستی

شناسایی رفتار آشوبناک در انباشت سرمایه اقتصاد ایران، مستلزم بازنگری بنیادین در چارچوب‌های سیاستی مرسوم است. نخست، حساسیت فوق‌العاده سیستم به شرایط اولیه به‌عنوان هسته نظریه آشوب، هشدار می‌دهد که تغییرات ظاهراً جزئی در پارامترهای کلیدی (مانند نرخ بهره، قوانین مالیاتی، یا شوک‌های خارجی نظیر تحریم‌ها) می‌توانند با تقویت اثرات غیرخطی، منجر به نوسانات گسترده و غیرقابل بازگشت در مسیر انباشت سرمایه شوند. این یافته، لزوم اجرای سیاست‌های اقتصادی با رویکرد تدریجی و پلکانی را آشکار می‌سازد تا از تشدید ناخواسته بی‌ثباتی جلوگیری شود. دوم، وجود حافظه بلندمدت در این متغیر نشان می‌دهد که آثار سیاست‌های کنونی می‌تواند برای دهه‌ها در اقتصاد باقی بماند؛ بنابراین، طراحی سیاست‌ها باید مبتنی بر تحلیل‌های پویا و بلندمدت باشد، نه مدل‌های ایستای مرسوم؛ لذا استفاده از چارچوب‌های هدف‌گذاری تورمی پویا[[41]](#footnote-42) که اثرات غیرخطی سیاست‌های قبلی را در نظر می‌گیرند، پیشنهاد می‌شود. یعنی مدل‌هایی که بانک مرکزی با استفاده از آن‌ها، تورم را نه فقط در یک مقطع خاص، بلکه در مسیر زمانی بلندمدت، هدف‌گذاری و کنترل می‌کند. این مدل‌ها اغلب شامل انتظارات تطبیقی، شوک‌های ساختاری، و روابط پویای بین نرخ بهره، تورم و تولید می‌باشند.

سوم، ماهیت غیرقابل پیش‌بینی سیستم در بلندمدت، ضرورت به‌کارگیری ابزارهای نظارتی پیشرفته (مانند سیستم‌های پایش لحظه‌ای و شبیه‌سازی‌های مبتنی بر نظریه آشوب) را برای رصد اثرات سیاستی و تعدیل به موقع آن‌ها تقویت می‌کند. اولأ ایجاد صندوقی با مکانیزم خودتطبیقی[[42]](#footnote-43) که در فازهای رونق، منابع مازاد را ذخیره و در فازهای رکود، با تزریق هدفمند سرمایه، از فروپاشی حلقه های مثبت سرمایه گذاری جلوگیری کند. این صندوق می‌تواند بر اساس شاخص های آشوبی (مانند مقدار نمای لیاپانوف) فعال شود. ثانیأ؛ ایجاد «سامانه پایش بلادرنگ سرمایه‌گذاری» با قابلیت رصد شاخص‌های کلیدی (مانند نرخ بهره واقعی، جریان سرمایه‌گذاری خارجی، و نوسانات بازار سهام) و تحلیل آن‌ها با روش‌های اقتصادفیزیک (مانند محاسبه نمای لیاپانوف در لحظه) می‌تواند هشدارهای زودهنگام برای جلوگیری از ورود سیستم به فاز آشوب ارائه دهد. به‌طور مشخص، طراحی چارچوب‌های سیاستی مقاوم به آشوب؛ شامل مکانیسم‌های هشدار سریع مبتنی بر یادگیری ماشین نیز می‌تواند اثرات مخرب نوسانات غیرخطی را کاهش دهد. با استفاده از داده‌های تاریخی، شاخص‌های کلان، و شاخص‌های آشوبی، مدل‌های یادگیری ماشین (مانند مدل Random Forest (جنگل تصادفی)، مدل XGBoost (افزایش گرادیانی شدید)[[43]](#footnote-44) یا مدل LSTM (حافظه بلند-کوتاه‌مدت)[[44]](#footnote-45)) آموزش می‌بینند تا الگوهای ورود به فاز ناپایدار سرمایه‌گذاری را تشخیص دهند. این سیستم‌ها به سیاست‌گذار هشدار می‌دهند که اگر روند فعلی ادامه یابد، در طی (به طور مثال) ۳ ماه آینده، سرمایه‌گذاری ممکن است به‌طور بی‌ثبات سقوط کند یا به حباب تبدیل شود و پیشنهاد می‌دهند چه اقداماتی (مثل کاهش نرخ بهره، تزریق نقدینگی، اصلاح سیاست مالیاتی) می‌تواند از بحران جلوگیری کند.

فهرست منابع

جعفری نیا، س. ( 1390). برآورد ناپارامتری شبکه‌های عصبی به کمک نمای لیاپانوف و آزمون مستقیم برای تئوری آشوب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده علوم پایه، گرایش ریاضی محض.

رنانی، م؛ صادقی، ب. ( 1399). طبقه بندی شاخص آنتروپی اقتصادی در یک مدل کلان اقتصادی، نشریه مدلسازی اقتصادی، دوره 14، ص 1-24.

رنانی، م؛ حسینی، ع. ( 1396). نقد روش شناختی اقتصاد فیزیک و کاربرد آن در تحلیل نظام توزیعی سرمایه داری، مقاله علمی وزارت علوم.

کاوه، ح. ( 1397). کنترل آشوب در سیستم‌های پیوسته زمان به کمک فضای حالت تأخیردار ساخته شده با تئوری تكنز. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه طراحی کاربردی.

مشیری، س. (1381). مروری بر نظریه آشوب و کاربردهای آن در اقتصاد. فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی.

نسرین دوست، م. ( 1388). بررسی پویایی شدت انرژی بری تولید در اقتصاد کشور‌های عضو سازمان کشور‌های صادر کننده نفت (OPEC) با رویکرد نظریه آشوب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده اقتصاد و علوم اجتماعی، گروه اقتصاد.

Brock, W. A., Scheinkman, J. A., Dechart, W. D., & LeBaron, B. (1996). A test for independence based on the correlation dimension. *Econometric Reviews*, 15(2), 197-235.

Brock, W. A., & Hommes, C. H. (1997). A Rational Route to Randomness. Econometrica.

Devaney, R., & Keen, L. (Eds.). (1989). *Chaos and fractals: The mathematics behind the computer graphics*. American Mathematical Society.

Garcia, M. M., Queral, R., Sanz, P., & Vazquez, F. J. (2004). A generalized BDS statistic. *Journal of Computational Economics*, 24(3), 277-300.

Giannerini, S., & Goracci, G. (2023). Entropy-based tests for complex dependence in economic and financial time series with the R package tseriesEntropy. *Mathematics*, 11(3), 757.

Galileo Galilei. (1618). II Saggiatore. In S. Drake & C. D. O'Malley (Trans.), *The controversy on the comets of 1618* (5th ed., pp. 67-85). University of Pennsylvania Press.

Gleick, J. (1987). *Chaos: Making a new science*. Viking.

Gallegati, M., et al. (2011). The Crisis of 2008: Structural Lessons for and from Economics. Cambridge Journal of Economics.

Holden, A. V. (1986). *Chaos*. Manchester University Press.

Lorenz, E. N. (1963). Deterministic non-periodic flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.

Lorenz, E. N. (1979). Predictability: Does the flap of a butterfly's wings in Brazil set off a tornado in Texas?

May, R. M. (1976). Simple mathematical models with very complicated dynamics. Nature, 261(5560), 459.

Paper presented at the Annual Meeting of the American Association for the Advancement of Science.

Lichtenberg, A. J., & Lieberman, M. A. (1992). *Regular and chaotic dynamics* (2nd ed.). Springer-Verlag.

Li, S. (2013). FNN: Fast nearest neighbor search algorithms and applications (Version 1.1). Retrieved from https://cran.r-project.org/web/packages/FNN/index.html

Patricia, F. (2002). *Newton: The making of genius*. Columbia University Press.

Strogatz, S. (1994). Nonlinear dynamics and chaos.

Sandubete, J. E., Beleña, L., & García-Villalobos, J. C. (2023). Testing the efficient market hypothesis and the model-data paradox of chaos on top currencies from the foreign exchange market (FOREX).

Sornette, D. (2003). Why Stock Markets Crash: Critical Events in Complex Financial Systems. Princeton University Press.

*Mathematics*, 11(2), 286. https://doi.org/10.3390/math11020286

Van Buskirk, R., & Jeffries, C. (1985). Observation of chaotic dynamics of coupled nonlinear oscillators. Physical Review A, 31, 3332-3357.

Journal of Monetary & Banking Research  
Vol. .., No. .., Summer..  
pages

Chaos Theory, Governing Dynamics of Physical Capital Accumulation

(An Approach from Econophysics)

Ahmad Googerdchian [[45]](#footnote-46) Seyedeh DelAra Mousavi[[46]](#footnote-47)

Received: Accepted:

Abstract

The term "chaos" can be used to describe the behavior of a turbulent and seemingly random system that is highly sensitive to initial conditions. There are two types of chaos: deterministic and non-deterministic. Deterministic chaos represents the erratic motion of nonlinear systems governed by specific laws but yielding unpredictable outcomes due to sensitivity to initial conditions. In contrast, non-deterministic chaos arises when the equations governing a system's evolution are unknown, and its chaotic behavior results from uncertainties in the governing laws or the influence of random factors, leading to rapidly diverging trajectories. In both cases, the system remains predictable in the short term but becomes highly unpredictable in the long run due to its inherent complexity. This study examines the chaotic behavior of capital accumulation as a key factor in economic growth dynamics. Additionally, the chaotic fluctuations of capital accumulation can impact credit demand, banking liquidity, interest rates, and investment flows, thereby complicating monetary policymakers' decision-making processes. To analyze this, time series data on capital accumulation in Iran’s economy from 1979 to 2022 were examined. The results of the BDS test confirm the nonlinear behavior of this variable. The calculation of the Lyapunov exponent further validates the chaotic nature of the time series. Moreover, the Hurst exponent test indicates that this variable exhibits long-term memory.

Keywords: Chaotic Dynamics, Topological Transitivity, Butterfly Effect, Kolmogorov-Sinai Entropy, Poincaré Map.

JEL Classification: C60, C61, D81, D89, C69.

1. عضو هیئت علمی و دانشیار دانشکده اقتصاد، دانشگاه اصفهان، a.googerdchian@ase.ui.ac.ir، شماره تماس 09132259791، نویسنده مسئول [↑](#footnote-ref-2)
2. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد اقتصادنظری، دانشکده اقتصاد، دانشگاه اصفهان، eraunavi@ase.ui.ac.ir ، 09135841602 [↑](#footnote-ref-3)
3. [↑](#footnote-ref-4)
4. stationary [↑](#footnote-ref-5)
5. Lichtenberg [↑](#footnote-ref-6)
6. Butterfly Effect [↑](#footnote-ref-7)
7. Econophysics [↑](#footnote-ref-8)
8. Kellert [↑](#footnote-ref-9)
9. A. Jakimowicz [↑](#footnote-ref-10)
10. Richard Day [↑](#footnote-ref-11)
11. Boum and Cass [↑](#footnote-ref-12)
12. Sushko, Gardini, and Puu [↑](#footnote-ref-13)
13. Dohutani [↑](#footnote-ref-14)
14. Zhang and Yuko [↑](#footnote-ref-15)
15. Galanis et al. [↑](#footnote-ref-16)
16. Giovanni Arrighi [↑](#footnote-ref-17)
17. Giovanni Arrighi and Beverly J. Silver [↑](#footnote-ref-18)
18. Brock–Dechert–Scheinkman (BDS) Test [↑](#footnote-ref-19)
19. Largest Lyapunov Exponent (LLE) Analysis [↑](#footnote-ref-20)
20. Estimation of the Hurst Exponent [↑](#footnote-ref-21)
21. Stationarity [↑](#footnote-ref-22)
22. chaotic [↑](#footnote-ref-23)
23. Unit Root Tests [↑](#footnote-ref-24)
24. Lee–Strazicich [↑](#footnote-ref-25)
25. Correlation integral [↑](#footnote-ref-26)
26. Spatial correlation [↑](#footnote-ref-27)
27. Tolerance [↑](#footnote-ref-28)
28. MATLAB [↑](#footnote-ref-29)
29. Khalil Hassam [↑](#footnote-ref-30)
30. Average mutual information (میانگین اطلاعات متقابل) [↑](#footnote-ref-31)
31. False Nearest Neighbours [↑](#footnote-ref-32)
32. True Nearest Neighbours [↑](#footnote-ref-33)
33. Van Buskirk [↑](#footnote-ref-34)
34. Rescaled range analysis [↑](#footnote-ref-35)
35. Physical capital accumulation [↑](#footnote-ref-36)
36. Poincaré Map [↑](#footnote-ref-37)
37. Devaney [↑](#footnote-ref-38)
38. Multiple Attractors [↑](#footnote-ref-39)
39. path-dependent [↑](#footnote-ref-40)
40. Chaotic Signature [↑](#footnote-ref-41)
41. Dynamic Inflation Targeting Frameworks [↑](#footnote-ref-42)
42. Self-Adjusting [↑](#footnote-ref-43)
43. Extreme Gradient Boosting [↑](#footnote-ref-44)
44. Long Short-Term Memory [↑](#footnote-ref-45)
45. Faculty Member and Associate Professor, Faculty of Economics, University of Isfahan, a.googerdchian@ase.ui.ac.ir, Corresponding Author, 0913-225-9791 [↑](#footnote-ref-46)
46. Master’s Graduate in Theoretical Economics, Faculty of Economics, University of Isfahan, eraunavi@ase.ui.ac.ir, 0913-584-1602 [↑](#footnote-ref-47)