The Journal of
Qazvin University of Medical Sciences (JQUMS)
June, July 2020. Vol 24. Num 2

Research Paper

Predicting the Prevalence of COVID-19 and its Mortality Rate in Iran Using Lyapunov Exponent

*Fatemeh Mohammadi[1], Saeedeh Kouzehgari[2]

1. Department of Biomedical Engineering, Faculty of Medical Science and Technologies, Science and Research Branch, Azad University, Tehran, Iran.
2. Department of International Relations, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Use your device to scan and read the article online

Citation Mohammadi F, Kouzehgari S. Predicting the Prevalence of COVID-19 and its Mortality Rate in Iran Using Lyapunov Exponent. The Journal of Qazvin University of Medical Sciences. 2020; 24(2):108-123. https://doi.org/10.32598/JQUMS.24.2.2415.1

doi https://doi.org/10.32598/JQUMS.24.2.2415.1

CC BY NC

Received: 9 Jun 2020
Accepted: 25 Jun 2020
Available Online: 30 Jun 2020

Keywords:
COVID-19, Prevalence, Mortality, Iran, Chaos theory, Lyapunov exponent

ABSTRACT

Background COVID-19 was first reported in late December 2019 in Wuhan, China, and spread rapidly throughout the world including Iran.

Objective The purpose of this paper is to predict the prevalence of coronavirus and the number of confirmed cases and deaths in Iran based on the theory of chaos and measuring the Lyapunov exponent.

Methods In this analytical study, the number of confirmed cases, recovered patients, total tests, and deaths between February 20 and May 30, 2020 were collected daily from the website of the Iranian Ministry of Health and Medical Education. The prevalence rate and the time to reach saturation in a short period were estimated using a formula using Lyapunov exponent and the initial and final number of confirmed cases in Matlab software.

Findings Simulation of all confirmed cases between 20 February 2020 to 4 May 2020 show the number of people infected with the coronavirus would be close to saturation, but in end of May 2020 the number of people with the disease re-entered the second phase of increase. The slope of the simulation curve decreases in the second phase and the virus spreads in May at a slower rate than in the first phase (April). The simulation diagram of the total confirmed patients to the total number of tests performed also shows the entry into the second phase of increasing in May.

Conclusion Simulation results of all confirmed cases and total deaths in Iran, using chaos theory and the Lyapunov-based model, can properly represent the real data and can predict the trend of spread and time to approach saturation in a short time. Sensitivity to the initial condition in the equation by changing the quarantine restrictions and the observance of health protocols causes a change in the rate of total number of confirmed patients enters the third or fourth increasing phase. Also, based on the calculated deaths, it is predicted that the total number of deaths at the end of May will reach less than 5% of the total number of people who have recovered and died.

Extended Abstract

1. Introduction

The prevalence of infectious and epidemic diseases has always been associated with many adverse effects and changes. Mathematical modeling of the spatial and temporal spread of infectious diseases and their epidemic simulation has been the subject of a number of studies [1-4]. Most models are based on solving the governing differential equations by simplifying the problem [9, 10]. Others try to study this process using the statistics and

* Corresponding Author:
Fatemeh Mohammadi
Address: Department of Biomedical Engineering, Faculty of Medical Science and Technologies, Science and Research Branch, Azad University, Tehran, Iran.
Tel: +98 (917) 3873274
E-Mail: fateme.mohammadi86@gmail.com

probability [8], but unfortunately these models are usually not able to explain the details and study them properly due to many simplifications.

The behavior of epidemics, like all living and biological systems, is chaotic. Chaos reflects the behavior of natural and living systems over time. This behavior occurs in natural and biological systems due to the interactions and the emergent properties and sensitivity to initial conditions; therefore, the spread of the virus reflects a chaotic behavior. Given the recent and serious crisis of Covid-19 virus in Iran and many countries around the world, we need a scientific analysis to be able to estimate the necessary predictions of the spread of this disease. Using chaos theory and calculating Lyapunov exponent, this paper aimed to predict the number of coronavirus cases in Iran in a short period and estimate the time of reaching saturation. It also analyzes the recovered and death rates.

2. Materials and Methods

In this analytical study, all statistics including the total number of coronavirus confirmed cases, recovered cases, tests, and deaths were collected from the website of the Iranian Ministry of Health and Medical Education from February 20 to May 30, 2020, and then entered into the MATLAB software. The theory of chaos (derived from the principle of chaos that governs the behavior of nature) emerged as a mathematical approach in the natural sciences and was used to model dynamic and complex systems in order to establish a kind of adaptation in relation to the environment, like living organisms, and to create effects similar to reality [18]. One of the characteristics of nonlinear dynamic systems is the sensitivity to initial condition. A slight change in the initial conditions of such systems can cause many changes in the next step [19]. Therefore, the behavior of nonlinear dynamic systems cannot be predicted in the long run. It can only be estimated and predicted in a short time. Sensitivity to initial conditions can be measured by Lyapunov exponents [23]. It provides a valuable tool for measuring chaos in the environment or genetics that are important in shaping social diversity, determining the spread of epidemics, or establishing a new mutation [27]. Therefore, Lyapunov exponent was used in this study to estimate the chaotic prevalence of coronavirus. It can estimate the time the coronavirus outbreak needs to reach saturation and the increasing trend of its cases in a short period. Using the Formula 1, which is based on the calculation of Lyapunov exponent from time-series data, the trend of increase in the number of confirmed cases is simulated in specific time intervals:

$$1.\ N(d) = \frac{d_0 d_\infty}{d_0 + d_\infty e^{-\lambda d}}$$

Where, d represents days (the number of days in the time interval), N(d) indicates the total number of infected cases per day, d0 is the initial number of infected cases, d∞ is the final number of infected cases, and λ represents Lyapunov exponent (growth rate of the curve).

3. Results

Simulation of all confirmed cases between 20 February 2020 to 4 May 2020 show the number of people infected with the coronavirus would be close to saturation, but in end of May 2020 the number of people with the disease re-entered the second phase of increase. The slope of the simulation curve decreases in the second phase and the virus spreads in May at a slower rate than in the first phase (April). The simulation diagram of the total confirmed patients to the total number of tests performed also shows the entry into the second phase of increasing in May.

4. Discussion

In the present study, simulation of the total number of confirmed cases, deaths and recovered cases in Iran based on chaos theory and Lyapunov exponent was able to properly represent the real data of the disease cases, and could predict the prevalence and spread of the disease and the time to reach saturation in a short period. According to the results, the total number of coronavirus confirmed cases in Iran was expected to be saturated in the second half of April 2020, but with the change of social conditions and reduction of restrictions, the total number of coronavirus cases entered its second increasing phase and was expected to increase in May. The results showed an increase in the rate of recovered cases from the second half of March to the second half of May (from 82% to 93%), and the mortality rate was expected to reach less than 5% of the total number of deaths and recovered cases by June.

Due to the chaotic spread of the virus, a little change in the initial conditions, (imposing or relaxing restrictions, people's observance of health protocols, genetic mutation of the virus, gathering in public places, finding definitive treatment/vaccine and etc.) causes many changes in disease outbreak. The findings of the present study can be useful for short-term strategic decisions and providing solutions on how to deal with the virus and how it spreads.

Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

There were no ethical considerations to be considered in this research.

Funding

This research did not receive any grant from funding agencies in the public, commercial, or non-profit sectors.

Authors' contributions

Writing, methodology and aata analysis: Both authors; Resources and validation: Fatemeh Mohammadi; Project administration, writing – review & editing: Saeedeh Kouzehgari.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

پیش‌بینی شیوع بیماری کووید ـ ۱۹ و مرگ‌ومیرهای ناشی از آن در ایران بر اساس نمای لیاپانوف

*فاطمه محمدی[۱]، سعیده کوزه‌گری[۲]

۱. گروه مهندسی پزشکی، دانشکده علوم و فنون پزشکی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد، تهران، ایران.
۲. گروه روابط بین‌الملل، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۲۰ خرداد ۱۳۹۹
تاریخ پذیرش: ۰۵ تیر ۱۳۹۹
تاریخ انتشار: ۱۰ تیر ۱۳۹۹

چکیده

زمینه بیماری کووید ـ ۱۹ در اواخر دسامبر ۲۰۱۹ در شهر ووهان چین مشاهده شد و خیلی سریع در کل دنیا از جمله ایران گسترش پیدا کرد.

هدف این مقاله با هدف پیش‌بینی شیوع ویروس کرونا و روند افزایش تعداد کل مبتلایان و مرگ‌ومیر ناشی از بیماری در ایران با استفاده از نظریه آشوب، بر اساس محاسبه مقدار نمای لیاپانوف انجام شده است.

مواد و روش‌ها در این مطالعه تحلیلی آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا، جان‌باختگان، افراد بهبودیافته و تعداد کل تست‌های انجام‌شده که به طور رسمی در وب‌سایت وزارت بهداشت اعلام شده‌اند، در بازه زمانی ۱ اسفند ۱۳۹۸ تا ۱۰ خرداد ۱۳۹۹ به صورت روزانه جمع‌آوری شده و روند شیوع ویروس و زمان نزدیک شدن به حالت اشباع بر اساس معادله مبتنی بر نمای لیاپانوف و پارامترهای تعداد اولیه و نهایی کل مبتلایان در هر بازه زمانی، با استفاده از نرم‌افزار مهندسی متلب، در کوتاه‌مدت پیش‌بینی شد.

یافته‌ها شبیه‌سازی آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا در بازه زمانی ۱ اسفند ۱۳۹۸ تا ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۹ نشان می‌دهد آمار کل مبتلایان در پایان اردیبهشت در حال نزدیک شدن به حالت اشباع و ثابت باقی ماندن تعداد کل مبتلایان بوده است؛ اما در خرداد ماه مجدداً وارد فاز دوم افزایشی شده است. محاسبه نمای لیاپانوف نشان می‌دهد شیب منحنی شبیه‌سازی در فاز دوم (خرداد ماه) کاهش یافته و ویروس در خرداد ماه با سرعت کمتری نسبت به فاز اول (فروردین ماه) شیوع پیدا کرده است. نمودار شبیه‌سازی تعداد کل مبتلایان به تعداد کل تست‌های انجام شده نیز وارد شدن به فاز دوم افزایش آمار کل مبتلایان در خرداد ماه را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری نتایج حاصل از شبیه‌سازی آمار کل مبتلایان به ویروس کووید ـ ۱۹ و تعداد کل جان‌باختگان در ایران، با استفاده از نظریه آشوب و مدل مبتنی بر نمای لیاپانوف، قادر به بازنمایی مناسب داده‌های واقعی بیماری است و می‌تواند در بازه‌های زمانی کوتاه، روند شیوع و گسترش بیماری و زمان نزدیک شدن به حالت اشباع را پیش‌بینی کند. حساسیت به شرط اولیه در معادله با تغییر محدودیت‌های قرنطینه و نحوه رعایت پروتکل‌های بهداشتی، می‌تواند سبب تغییر سرعت شیوع بیماری شده و آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا وارد فاز سوم و یا چهارم افزایشی شود. همچنین بر اساس محاسبه نرخ مرگ‌ومیر ناشی از بیماری پیش‌بینی می‌شود آمار کل جان‌باختگان در خرداد ماه به کمتر از ۵ درصد مجموع افراد بهبودیافته و جان‌باخته برسد.

کلیدواژه‌ها:
ویروس کووید ـ ۱۹، پیش‌بینی شیوع و نرخ مرگ‌ومیر، ایران، نظریه آشوب، نمای لیاپانوف

مقدمه

برای اولین‌بار در دسامبر سال ۲۰۱۹ در شهر ووهان چین، پس از اینکه مردم بدون علت مشخصی دچار سینه‌پهلو شدند و واکسن‌ها و درمان‌های موجود مؤثر نبودند، نوع جدیدی از کروناویروس شناسایی شد. با عبور تعداد قربانیان ویروس کرونا از مرز هزار نفر سازمان جهانی بهداشت برای بیماری نام رسمی کووید ـ ۱۹ را انتخاب کرد. در ۳۰ ژانویه ۲۰۲۰، سازمان جهانی بهداشت با انتشار بیانیه‌ای، شیوع کروناویروس جدید را یک وضعیت اضطراری بهداشت عمومی اعلام کرد که تهدیدی برای تمام جهان و نه‌فقط چین، به شمار می‌رفت. در عرض کمتر از یک ماه شیوع ویروس در بیش از ۱۵۶ کشور جهان تأیید شد و بیشترین موارد ابتلا در کشورهای آمریکا، چین، ایتالیا، اسپانیا، کره جنوبی، ایران و ژاپن بود.

شیوع بیماری‌های واگیردار و همه‌گیر همواره با تأثیرات و تغییرات بسیاری در حیات تمدنی بشر همراه بوده است و جوامع انسانی را با تحولات عمیق و پیچیده مواجه کرده است. این تغییرات که ناشی از تلفات و مرگ‌ومیر فراوان، ایجاد بیکاری و رکود اقتصادی است، ساختارهای تمدنی در جوامع بشری را نیز مختل می‌کند؛ از این رو، مدل‌سازی ریاضی اپیدمی‌ها و گسترش مکانی و زمانی بیماری‌های واگیردار در جوامع انسانی اهمیت

* **نویسنده مسئول:**
دکتر فاطمه محمدی
نشانی: تهران، واحد علوم و تحقیقات، دانشکده علوم و فنون پزشکی، گروه مهندسی پزشکی.
تلفن: ۳۸۷۳۲۷۴ (۹۱۷) ۹۸+
رایانامه: fateme.mohammadi86@gmail.com

فراوانی دارد. فرموله کردن و شبیه‌سازی اپیدمیک بیماری‌های مسری، موضوع تعدادی از مطالعات بوده است [۴-۱]؛ به عنوان مثال تا سال ۱۹۸۴ شبکه بیماری‌های واگیردار فرانسوی[1] که بر اساس داده‌های هشت بیماری واگیردار، طراحی و پیشنهاد شده بود، به بررسی پویایی فضایی ـ زمانی پیچیده بیماری‌های شبه‌آنفلوانزا کمک می‌کرد. [۵] در سال ۱۹۹۸، توبیانا و ویبرت[2] یک مدل مبتنی بر شبکه عصبی برای شبیه‌سازی انتشار چنین بیماری‌های همه‌گیری پیشنهاد کردند که تکامل مکانی و زمانی اپیدمی‌آنفلوانزا را شبیه‌سازی می‌کرد و با داده‌های واقعی مشاهده‌شده از نظر کیفی مطابقت داشت. [۶] پیرز و دراجسویک[3] نیز در سال ۲۰۰۹ یک مدل اپیدمیولوژیک مبتنی بر عامل سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی[4] (GIS) برای شبیه‌سازی شیوع بیماری در محیط شهری را مورد مطالعه قرار دادند که به عنوان یک نتیجه از تعاملات افراد در یک محیط مکانی، شبیه‌سازی می‌شود. مدل ارائه‌شده، دینامیک مکانی و زمانی انتشار بیماری‌های مسری را شبیه‌سازی می‌کند و با استفاده از شیوع سرخک در یک محیط شهری به عنوان یک مطالعه موردی پیاده‌سازی شده است [۷].

بحران ویروس کرونا در ابتدای سال ۲۰۲۰ میلادی در جهان سبب شد تا تحقیقات علمی، چگونگی گسترش ویروس و نحوه مواجهه با آن و راهبردهای لازم جهت مقابله با گسترش بیشتر آن را مورد بررسی قرار دهند و با استفاده از شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای و مدل‌سازی ریاضی، راهکارهایی ارائه دهند. روبرت وریتی[5] و همکارانش در مارس ۲۰۲۰، شدت بیماری کرونا را بر اساس یک آنالیز مبتنی بر مدل، تخمین زدند. آن‌ها مدت‌زمان بین شروع علائم بیماری تا نتیجه حاصل (مرگ یا ترخیص از بیمارستان) را مورد بررسی قرار داده و سپس ارتباط سن با آمار مرگ‌ومیر را طبقه‌بندی کردند. آن‌ها متوسط مدت‌زمان بروز علائم تا مرگ را ۱۷/۸ روز و متوسط مدت‌زمان بروز علائم تا ترخیص از بیمارستان را ۲۴/۷ روز گزارش کردند. همچنین نسبت مرگ‌ومیر در سرزمین اصلی چین را ۳/۶۷ درصد برآورد کردند که این میزان در افراد زیر ۶۰ سال ۱/۳۸ درصد، در افراد ۶۰ تا ۸۰ سال ۶/۴ درصد و در افراد مسن بالای ۸۰ سال برابر ۱۳/۴ محاسبه شده است [۸].

سیلورمن[6] و همکارانش با استفاده از شبکه‌های نظارت بر آنفلوانزا، شیوع ویروس کرونا در ایالات متحده را برآورد کردند و نشان دادند بیماری‌های مشابه آنفلوانزا را می‌توان با استفاده از شبیه‌سازی‌های تصادفی، در معرض، عفونی و بازیابی شده[7] مورد بررسی قرار داد [۹]. نتایج مدل مفهومی‌آن‌ها حاکی از آن است که اپیدمی کووید ـ ۱۹ در ایالات متحده با گسترش سریع ظاهر می‌شود و ۸۰ درصد افراد آلوده هنوز کشف نشده‌اند [۱۰].

چن[8] و همکارانش یک مدل ریاضی برای شبیه‌سازی قابلیت انتقال مبتنی بر فاز[9] ویروس جدید کرونا را پیشنهاد کردند. مدل شبکه انتقال از ناقل به افراد[10] نشان داد قابلیت انتقال ویروس کرونا از سندرم حاد تنفسی خاورمیانه بیشتر و از سندرم حاد تنفسی در جمهوری کره، کمتر است [۱۱].

مروری بر این مطالعات و پژوهش‌های مشابه نشان می‌دهد در مدل‌ها اغلب از معادلات دیفرانسیلی استفاده می‌شود و با ساده کردن مسئله به حل و بررسی آن می‌پردازند [۹، ۱۰]. برخی دیگر نیز با استفاده از ابزارهای آمار و احتمالات سعی در بررسی این فرایند دارند. اما متأسفانه این مدل‌ها به دلیل ساده‌سازی‌های زیاد معمولاً قادر به تشریح بسیاری از جزئیات و بررسی صحیح آن‌ها نیستند [۸].

رفتار اپیدمی‌ها مانند تمام سیستم‌های زنده و بیولوژیکی، آشوبگون است. آشوب نشان‌دهنده رفتار سیستم‌های طبیعی و زنده در طول زمان است. این رفتار به واسطه وجود تعاملات و خاصیت اضطراری و حساسیت به شرایط اولیه، در سیستم‌های طبیعی و بیولوژیکی به وجود می‌آید؛ بنابراین هنگام شیوع، ویروس رفتاری آشوبگون از خود نشان می‌دهد؛ چراکه ویروس‌ها با استفاده از افرادی که آلوده شده‌اند، پخش می‌شوند. درنتیجه، حرکت افراد باعث زنده ماندن ویروس‌ها می‌شود. پویایی بیماری‌های واگیردار را می‌توان به عنوان یک پدیده پیچیده توصیف کرد؛ به واسطه وجود بالای تعاملات در جوامع انسانی، هر فرد مبتلا، ویروس را به افراد دیگر که با آن‌ها در ارتباط است، منتقل می‌کند. این افراد بسته به حساسیتشان به این بیماری مبتلا می‌شوند و ویروس را به دیگران منتقل می‌کنند. افراد ممکن است آلوده باشند یا نباشند؛ درنتیجه آن‌ها به روش غیرخطی عمل می‌کنند. افراد شبکه‌ای از موجودیت‌های غیرخطی متصل به ویروس را تشکیل می‌دهند که با گذشت زمان، پیچیده، بی‌نظم و غیرقطعی خواهند بود [۶].

با توجه به بحران اخیر و جدی ویروس کووید ـ ۱۹ در ایران و بسیاری از کشورهای جهان، نیازمند یک تحلیل علمی‌هستیم تا بتواند شفاف‌سازی و پیش‌بینی‌های لازم را انجام دهد و به نوعی آرامش افکار عمومی و در عین حال نشانه‌هایی از روند گسترش و شیوع این بیماری را تخمین بزند. در ایران پژوهش هایی در خصوص پیشگیری از عوارض بیماری و درمان‌های احتمالی، سلامت روانی و اجتماعی و تأثیرات اقتصادی و غیره در

1. French Communicable Disease Network (FCDN)
2. Toubiana & Vibert
3. Perez, L & Dragicevic
4. Geographic Information Systems (GIS)
5. Robert Verity
6. Justin D. Silverman
7. Stochastic Susceptible, Exposed, Infectious, and Recovered (SEIR)
8. Tian-Mu Chen
9. Simulating the phase-based transmissibility
10. Reservoir-People (RP) transmission network model

خصوص اپیدمی ویروس کووید ـ ۱۹ انجام شده [۱۴-۱۲]، اما شیوع ویروس و پیش‌بینی آمار مبتلایان با استفاده از مدل‌های ریاضی مورد بررسی قرار نگرفته است.

هدف مطالعه حاضر پیش‌بینی شیوع ویروس کرونا در ایران و روند افزایش آمار کل مبتلایان و افزایش مرگ‌ومیر ناشی از آن، با استفاده از نظریه آشوب بر اساس معادله مبتنی بر نمای لیاپانوف است.

نمای لیاپانوف نمایانگر میزان حساسیت به شرط اولیه در سیستم‌های دینامیکی غیرخطی و آشوبگون است و میانگین سرعت هم‌گرایی نمایی یا واگرایی مسیرها را در نزدیکی فضای فاز محاسبه می‌کند. این مقاله با بهره‌گیری از نظریه آشوب و محاسبه نمای لیاپانوف، به پیش‌بینی آمار مبتلایان به ویروس کرونا در کوتاه‌مدت و تخمین زمان سیر افزایشی شیوع و نزدیک شدن به حالت اشباع می‌پردازد. همچنین نرخ بهبود و نرخ مرگ‌ومیر اپیدمی را مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد.

مواد و روش‌ها

در این مطالعه تحلیلی تمام اعداد و ارقام شامل آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا، تعداد جان‌باختگان، تعداد افراد بهبودیافته و تعداد کل تست‌های انجام‌شده بر اساس اطلاعات رسمی اعلام‌شده در وب‌سایت وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی کشور در بازه زمانی اول اسفند ۱۳۹۸ تا ۱۰ خرداد ۱۳۹۹ (زمان نگارش مقاله) جمع‌آوری شد و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

نظریه آشوب و نمای لیاپانوف

آشوب در لغت به معنی فقدان سازمان‌دهی، بی‌نظمی؛ توده بی‌شکل، هرج و مرج و آشفتگی کامل، به کار می‌رود [۱۵]؛ اما آشوب در طبیعت اشاره به جنبه‌های غیرقابل پیش‌بینی در پدیده‌های پویایی دارد که ویژگی‌های خاصی را دارند؛ به عنوان مثال، در پدیده‌هایی مانند توربولانس، یک حرکت بی‌قاعده (غیرمعمول) است که عموماً در مایعات، گازها و سیالات ظاهر می‌شود. زمانی که مایعات از روی سطوح جامد عبور کرده و یا جریان‌های سیالات از کنار یکدیگر می‌گذرند، پدیده توربولانس روی می‌دهد [۱۶]. این جریان، بی‌نظم و تصادفی نیست، بلکه نظمی نهفته در خود دارد، به همین دلیل جریان توربولانس وجود آشوب را نشان می‌دهد [۱۷].

درواقع در طبیعت و سیستم‌های بیولوژیکی، تعاملات و خلق اطلاعات منجر به رفتارهای غیرقطعی و بی‌نظم و پیچیده می‌شود که به رفتار آشوبگون معروف است. پی بردن به رفتار آشوبگون در سیستم‌های طبیعی و زنده، تحولی در اندیشه‌های بشری پدید آورد و منجر به تفکرات عمیق و درک پدیده‌هایی شد که تا پیش از این به عنوان غیرقابل شناخت معرفی می‌شده‌اند؛ بنابراین نظریه آشوب (برگرفته از ایده اصل آشوب که بر رفتار طبیعت حاکم است)، به عنوان یک رهیافت ریاضی در علوم طبیعی سربرآورد و توسط مدل‌های ریاضی برای مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی و پیچیده به کار گرفته شد تا بتواند در ارتباط با محیط، همانند موجودات زنده، نوعی تطابق و سازگاری برقرار کند و آثاری شبیه به واقعیت به وجود آورد [۱۸].

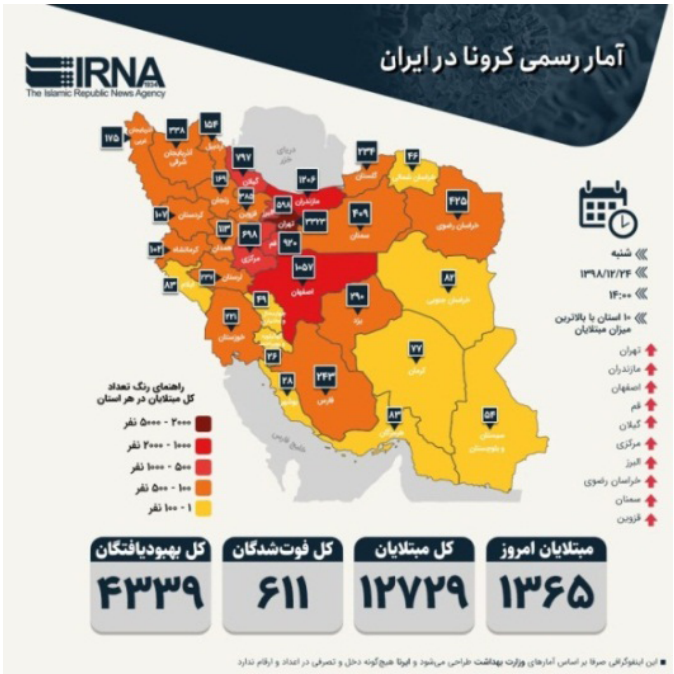
نظریه آشوب برخلاف رهیافت‌های پیشین که به تحلیل تک‌سویه و خطی از جهان می‌پرداختند، می‌تواند در تحلیل پدیده‌های پویا و غیرقابل پیش‌بینی مورد استفاده قرار گیرد. درواقع وارد کردن دینامیک غیرخطی میان عناصر و عوامل سیستم و پیچیده کردن روابط درونی آن توانسته برخی ویژگی‌های سیستم‌های طبیعی مانند تعامل میان اجزا، حساسیت به شرط اولیه و غیره را با معادلات و الگوهای ریاضی شبیه‌سازی کرده و پیشرفت‌هایی در زمینه‌های مختلف کسب کند [۱۹].

همان‌طور که اشاره شد، یکی از ویژگی‌های سیستم‌های دینامیکی غیرخطی، حساسیت به شرط اولیه است. تغییر اندکی در شرایط اولیه چنین سیستم‌هایی باعث دگرگونی‌های بسیار در مرحله بعدی خواهد شد. این پدیده در نظریه آشوب به اثر پروانه‌ای[11] مشهور است که در آن بال زدنِ یک پروانه در برزیل می‌تواند (در شرایطی) باعث ایجاد گردباد در تگزاس شود [۲۰].

به بیان دیگر حساسیت به شرط اولیه بدین معناست که هر تغییر کوچکی در داده‌های اولیه سیستم، به طور چشمگیری توسط تکرار، بزرگ‌نمایی می‌شود. تکرار در اینجا اهمیت زیادی دارد و بدین معنی است که خروجی (نتایج) یک معادله، دوباره به صورت ورودی به آن داده می‌شود و این عمل بارها و بارها تکرار می‌شود. این فرایند را بازخورد مثبت می‌نامند. به دلیل بازخورد مثبت، سیستم‌های پویا به کوچک‌ترین تغییرات حساس‌اند. تقریباً تمام ساختارهایی که از طریق تکرار یک عملیات حاصل می‌شوند، نتایج غیرقابل پیش‌بینی تولید می‌کنند. به همین علت رفتار سیستم‌های دینامیکی غیرخطی را نمی‌توان در بلندمدت پیش‌بینی کرد. درواقع، رفتار آن‌ها تنها در مدت کوتاهی قابل تخمین و پیش‌بینی است. اگرچه به نظر می‌رسد اثر پروانه‌ای یک رفتار مبهم و غیرمعمول است، اما توسط سیستم‌های زنده و بیولوژیکی به‌سادگی نمایش داده می‌شود؛ برای مثال ابتلای چند نفر به یک ویروس جدید ناشناخته در بازار ماهی‌فروشان شهر ووهان چین، به یک اپیدمی همه‌گیر و بحران جهانی تبدیل می‌شود.

رفتار به‌ظاهر تصادفی سیستم‌های آشوبگون ناشی از رشدِ نمایی اختلالات بی‌نهایت کوچک یا همان حساسیت به شرطِ اولیه است. برای یک سیستم دینامیکی غیرخطی، حساسیت به شرایط اولیه با نماهای لیاپانوف اندازه‌گیری می‌شود. نماهای

11. Butterfly effect



شکل ۱. نحوه پراکندگی آمار مبتلایان به ویروس کرونا در استان‌های کشور ایران در تاریخ ۲۴ اسفند ۱۳۹۸

مجله‌علمی
دانشگاه‌علوم‌پزشکی قزوین

لیاپانوف، ناپایداری ذاتی مسیرها (تراژکتوری‌ها) را در یک سیستم نشان می‌دهند و میانگین سرعت هم‌گرایی نمایی یا واگرایی مسیرهایی که در نزدیکی فضای فاز هستند را محاسبه می‌کنند [۲۱]. فضای فاز در سیستم‌های آشوبگون، یک فضای محدود بوده و مسیرها (تراژکتوری‌ها) همواره در این ناحیه محدود باقی می‌مانند. محدود بودن فضای فاز و قوانین حاکم بر حفاظت انرژی در سیستم‌های دینامیکی غیرخطی نشان می‌دهد هر سیستم آشوبی به یک مقدار محدود اشباع می‌شود [۲۲].

درواقع، نمای لیاپانوف، نرخ واگرایی مسیرهای (تراژکتوری) بعدی است. یک سیستم محدود با یک نمای لیاپانوف مثبت یک تعریف عملیاتی از رفتار آشوبگون است. با محاسبه نمای لیاپانوف غالب، قادر هستیم مدل‌های دینامیکی را بر سری‌های زمانی منطبق کنیم و بدون پیش‌فرض اینکه سیستم قطعی است، درجه آشوبی تابع را تخمین بزنیم [۲۳].

برای نشان دادن ویژگی‌های سیستم‌های دینامیکی غیرخطی، نمای لیاپانوف نقش حیاتی دارد. یک سیستم گسسته در زمان که تمام نماهای لیاپانوف آن منفی است، یک جاذب نقطه ثابت یا چرخه تناوبی خواهد داشت و رفتار آشوبی ایجاد نخواهد کرد. نماهای لیاپانوف می‌توانند انعطاف‌پذیری جاذب‌ها در واکنش به آشفتگی‌های خارجی را تعیین کنند. به عبارت دیگر، محاسبه نماهای لیاپانوف محلی در کنار جاذب‌ها، نشان می‌دهد یک سیستم در کجا یک سیگنال خارجی را نادیده می‌گیرد و کجا به آن پاسخ می‌دهد. برای نشان دادن تعریف ریاضی نمای لیاپانوف، دو نقطه در یک فضا، X_0 و $X0 + \Delta X_0$ را در نظر بگیرید. برای مطالعه میانگین نرخ نمایی واگرایی دو مدار که از ابتدا نزدیک به یکدیگر هستند، استفاده از فرمول شماره ۱ مفید است [۲۱].

$$\lambda = \lim_{\substack{t=\infty \\ |\Delta x_0| \to 0}} \frac{1}{t} In \frac{|\Delta x(x_0, t)|}{\Delta x_0} \quad .۱$$

پارامتر نمای لیاپانوف در مطالعات و تحقیقات بی‌شماری، معیاری برای ارزیابی و تحلیل رفتار سیستم دینامیکی غیرخطی بوده است، از جمله بررسی حرکات غیرخطی کشتی، مدل‌سازی سری زمانی قیمت نفت، تحلیل غیرخطی پایداری دینامیکی کمر و غیره [۲۶-۲۴]. در مطالعات زیست‌شناسی جمعیت نیز ویژگی‌های ریاضی نمای لیاپانوف مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که مفهوم نمای لیاپانوف ابزاری ارزشمند برای بررسی فرایندهای تهاجم به محیط زیست یا ژنتیک فراهم می‌کند که در شکل‌گیری تنوع اجتماعی، تعیین گسترش بیماری‌های همه‌گیر یا تثبیت یک جهش جدید، حائز اهمیت هستند [۲۷]. از این رو نمای لیاپانوف برای تخمین شیوع آشوبگون ویروس کرونا، در این پژوهش استفاده شده است. برای این منظور با استفاده از نرم‌افزار مهندسی متلب، بر اساس معادله مبتنی بر نمای لیاپانوف و پارامترهای تعداد اولیه و نهایی مبتلایان در یک بازه زمانی مشخص، روند افزایش تعداد کل مبتلایان به ویروس کرونا شبیه‌سازی می‌شود و مدت‌زمان تقریبی لازم برای رسیدن به حالت اشباع در صورت عدم تغییر شرایط اولیه، پیش‌بینی می‌شود.

جدول ۱. اطلاعات آماری ویروس کرونا در ۸ کشور اول جهان که بیشترین آمار مبتلا به ویروس را در تاریخ ۲۸ اسفند ۱۳۹۸ثبت کرده‌اند.

کشورها	کل افراد مبتلا	موارد جدید	کل افراد فوت‌شده
چین	۸۰۸۹۴	۱۳	۳۲۳۷
ایتالیا	۳۱۵۰۶		۲۵۰۳
ایران	۱۶۱۶۹		۹۸۸
اسپانیا	۱۱۸۲۶		۵۳۳
المان	۹۳۶۷		۲۶
کره جنوبی	۸۴۱۳	۹۳	۸۴
فرانسه	۷۷۳۰		۱۷۵
آمریکا	۶۵۱۵	۱۰۴	۱۱۵

مجله‌علمی
دانشگاه‌علوم‌پزشکی قزوین

شیوع ویروس کرونا در ایران

در پی بحران جهان‌گیری بیماری کروناویروس در نقاط مختلف جهان، در ۳۰ بهمن ۱۳۹۸، ابتلای دو نفر به این ویروس در ایران به صورت رسمی‌تأیید شد. برخی گزارش‌های اولیه حاکی از آن بود که ویروس کرونا توسط بازگانانی که بین قم و ووهان رفت و آمد داشتند، به ایران وارد شده است. ایران، کشوری با ۸۳ میلیون نفر جمعیت، در عرض ۱۰ روز به یکی از مراکز اصلی شیوع ویروس کرونا تبدیل شد و بیشترین نرخ مرگ‌ومیر ناشی از ابتلا به این بیماری در جهان را به خود اختصاص داد. طبق آمارهای رسمی، نرخ مرگ‌ومیر در ایران چیزی بین ۸ تا ۱۸ درصد است که در قیاس با نرخ ۳درصدی مرگ‌ومیر در چین و سایر کشورهای جهان بسیار بالاست. در ۱۴ اسفند ۱۳۹۸، رئیس‌جمهور ایران اعلام کرد شیوع ویروس جدید کرونا تقریباً تمامی‌استان‌های کشور را دربر گرفته است [۲۸]. ده روز بعد سخنگوی وزارت بهداشت آمار کل مبتلایان به کووید ـ ۱۹ در کشور را ۱۲ هزار و ۷۲۹ نفر و مجموع جان‌باختگان را ۶۱۱ مورد اعلام کرد، نقشه توزیع آمار کل مبتلایان در استان‌های مختلف کشور در شکل شماره ۱ نشان داده شده است.

سرعت گسترش ویروس کرونا در ایران تا حدی سریع بود که در اواخر اسفند ۱۳۹۸، ایران در رتبه سوم از نظر ابتلا به ویروس کرونا بعد از کشور چین و ایتالیا قرار گرفت. در جدول شماره ۱، هشت کشور اول که بیشترین آمار مبتلایان به ویروس کرونا را در تاریخ ۱۸ مارس ۲۰۲۰ (۲۸ اسفند ۱۳۹۸) ثبت کرده‌اند، نشان داده شده است [۲۹].

در همان روزهای ابتدایی همه‌گیری ویروس کرونا در ایران، بسیاری از مکان‌ها و رخدادهای عمومی از جمله مدارس، مراکز آموزش عالی و دانشگاه‌ها، اکران‌های سینمایی، کنسرت‌ها و نمایش‌های تئاتر، مسابقات و لیگ‌های ورزشی کشوری، در تهران و سایر شهرها دیگر تعطیل شدند و ساعت کاری ادارات و سازمان‌ها در چندین استان کاهش یافت. عفونت‌زدایی بخش‌هایی از استان‌های تهران، قم و گیلان، راه‌اندازی بیش از ۵۶ آزمایشگاه برای تشخیص ویروس کرونا، تولید و انجام روزانه دست‌کم شش هزار آزمایش رایگان تشخیص برای بیماران بستری مشکوک به کرونا، از دیگر اقدامات دولت ایران برای مقابله با شیوع این ویروس بود.

در ۲ فروردین سال ۱۳۹۹ با افزایش تعداد مبتلایان به کرونا در اروپا، رتبه ایران در جمع کشورهای جهان از سه، به پنج سقوط کرد، همچنان چین در رده اول آمار مبتلایان، ایتالیا در رده دوم، اسپانیا در رده سوم، آلمان چهارم و ایران در رده پنجم قرار گرفت. با شیوع سریع ویروس در آمریکا و سایر کشورهای اروپایی، در اول اردیبهشت ماه ۱۳۹۹ ایران در جایگاه هشتم از نظر آمار مبتلایان به ویروس کرونا، بعد از آمریکا، اسپانیا، ایتالیا، فرانسه، آلمان، انگلستان و ترکیه قرار گرفت.

آخرین آمارها طبق اعلام وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی نشان می‌دهد تا تاریخ ۱۰ خرداد ۱۳۹۹ (زمان نگارش این مقاله)، ۱۴۸هزار و ۹۵۰ نفر به بیماری کرونا مبتلا شده‌اند که از این تعداد ۷۷۳۴ نفر جان باخته و ۱۱۶ هزار و ۸۲۷ نفر بهبود یافته‌اند.

تخمین شیوع ویروس کرونا در ایران بر اساس نمای لیاپانوف

افزایش سریع و چشمگیر آمار مبتلایان به ویروس کرونا در ایران، نیازمند انجام بررسی‌های دقیق علمی و تخمین نحوه شیوع و سرعت گسترش بیماری است تا بتوان راهکارها و تمهیداتی در خصوص مواجه با این اپیدمی جهان‌گیر ارائه کرد. با توجه به اینکه روند شیوع ویروس آشوبگون است و به دلیل حساسیت به شرط اولیه، تغییرات کوچک در شرایط اولیه، بازخورد زیادی در غایت ایجاد شده و منجر به تغییرات اساسی می‌شود. همین ویژگی امکان پیش‌بینی بلندمدت را غیرممکن می‌کند، ولی پیش‌بینی

در کوتاه‌مدت از طریق برخی مدل‌های ریاضی امکان‌پذیر است.

مقدار نمای لیاپانوف می‌تواند زمان رسیدن به اشباع شیوع ویروس کرونا و روند افزایش آمار مبتلایان به این بیماری را در کوتاه‌مدت تخمین بزند. با استفاده از فرمول شماره ۲ که مبتنی بر محاسبه نمای لیاپانوف در یک سری زمانی از داده‌هاست، روند افزایش آمار مبتلایان به ویروس کرونا، در بازه‌های زمانی مشخص شبیه‌سازی می‌شود. سپس می‌توان در کوتاه‌مدت پیش‌بینی کرد سیر صعودی نمودار به چه صورت ادامه خواهد یافت و چه زمانی تعداد کل مبتلایان به حالت اشباع منحنی نزدیک خواهد شد. در این بخش کلیه محاسبات و تجزیه و تحلیل داده‌ها و رسم نمودارها با استفاده از نرم‌افزار مهندسی متلب انجام شده است.

در فرمول شماره ۲، یک آشفتگی کوچک که ما آن را به عنوان d_0 در نظر می‌گیریم، با ضریب λ (نمای لیاپانوف) رشد می‌کند و در آخر به حالت اشباع می‌رسد تا جایی که $d_\infty >> d_0$ [۳۰].

۲.

$$N(d)=\frac{d_0 d_\infty}{d_0+d_\infty e^{\lambda d}}$$

پارامترهای فرمول شماره ۲:

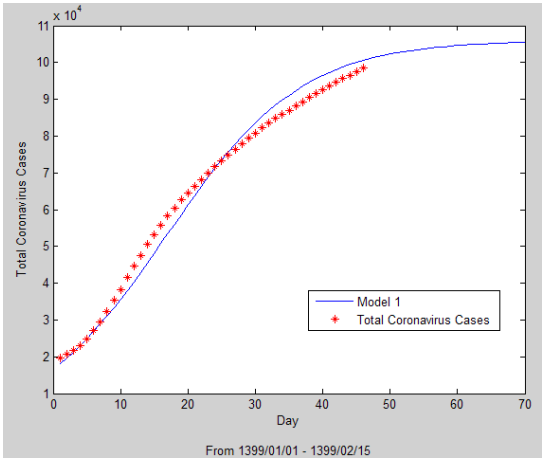
d نمایانگر روزها (به تعداد روزهای بازه زمانی در نظر گرفته شده)

N(d) تعداد کل مبتلایان به ویروس در هر روز

d_0 تعداد اولیه افراد مبتلا به ویروس

d_∞ تعداد نهایی افراد مبتلا به ویروس

λ نمای لیاپانوف (ضریب رشد منحنی)



مجله‌علمی
دانشگاه‌علوم‌پزشکی قزوین

شکل ۲. تعداد کل مبتلایان به ویروس کرونا در هر روز با ستاره‌های قرمز و مدل ارائه‌شده با خط آبی نشان داده شده است.

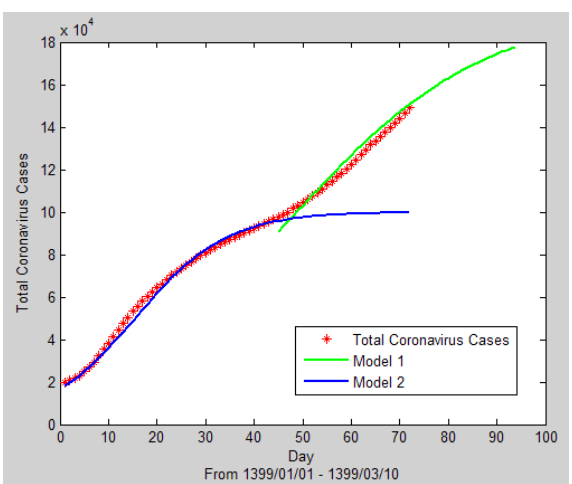
در فاز اول پژوهش، آمار کل مبتلایان به کروناویروس طبق اعلام وزارت بهداشت در بازه زمانی ۱ فروردین تا ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۹ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در شکل شماره ۲ افزایش آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا و نحوه انطباق معادله ارائه‌شده و درنهایت به اشباع رسیدن آن، نشان داده شده است. در این منحنی مقدار نمای لیاپانوف برابر λ=۰/۱۰۰۸۷۳ است که سرعت انتشار ویروس را نشان می‌دهد.

در فاز دوم، آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا در بازه زمانی ۱۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد، توسط معادله مبتنی بر نمای لیاپانوف مجدداً شبیه‌سازی شد. زیرا در این بازه زمانی محدودیت‌های قرنطینه کاهش یافته و تردد افراد در جامعه افزایش پیدا کرد. نتایج شبیه‌سازی هر دو فاز بر اساس نمای لیاپانوف محاسبه شده در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. مقدار نمای لیاپانوف در فاز اول برابر λ_1=۰/۱۰۵۶ و در فاز دوم برابر λ_2=۰/۰۵۰۶ محاسبه شده است.

در شکل شماره ۴ آمار کل جان‌باختگان در اثر ابتلا به ویروس کرونا، از ۱ فروردین تا ۳۱ اردیبهشت (ستاره‌های قرمز) و شبیه‌سازی روند افزایش این آمار بر اساس مدل مبتنی بر نمای لیاپانوف (خط آبی)، نشان داده شده است.

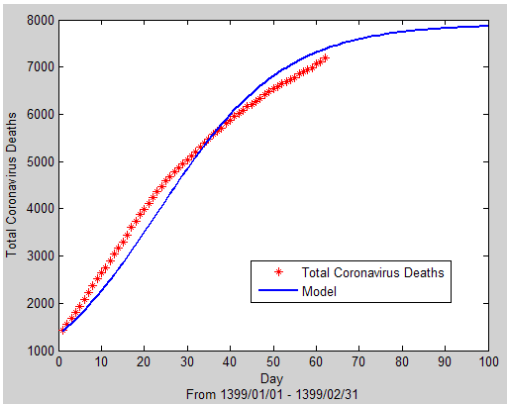
شبیه‌سازی آمار کل جان‌باختگان در اوایل خرداد ماه در شکل شماره ۵ نشان داده شده است که حاکی از تغییر رفتار نمودار به علت حساسیت به شرط اولیه و افزایش مجدد آمار کل جان‌باختگان است.

به منظور تجزیه و تحلیل دقیق‌تر داده‌ها و امکان مقایسه صحیح‌تر آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا در طول روزهای



مجله‌علمی
دانشگاه‌علوم‌پزشکی قزوین

شکل ۳. نمودار شبیه‌سازی آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا (ستاره‌های قرمز) در دو فاز با استفاده از دو مدل مبتنی بر نمای لیاپانوف (مدل ارائه‌شده در فاز اول خط آبی و مدل ارائه‌شده در فاز دوم خط سبز) در بازه زمانی ۱ فروردین تا ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۹.



مجله‌علمی
دانشگاه‌علوم‌پزشکی قزوین

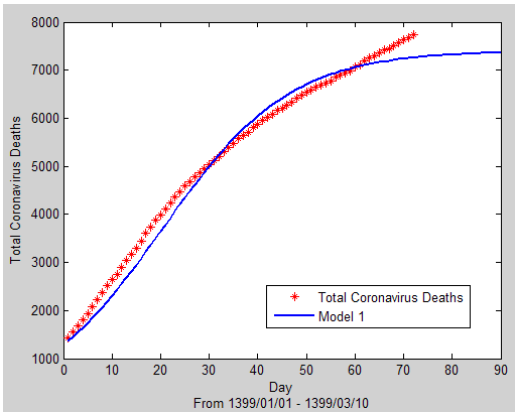
شکل ٤. نمودار شبیه‌سازی آمار کل جان‌باختگان (ستاره‌های قرمز) بر اساس مدل مبتنی بر نمای لیاپانوف (خط آبی) در بازه زمانی ۱ فروردین تا ۳۱ اردیبهشت ۱۳۹۹. در این معادله، نمای لیاپانوف برابر λ=۰/۰۶۸۶ محاسبه شده است که نمایانگر سرعت آهسته سیر افزایشی تعداد جان باختگان است.

متوالی، بهتر است تعداد کل آزمایش‌های انجام‌شده در هر روز ثابت باشد؛ چراکه تعداد کل افرادی که آزمایش آن‌ها مثبت شده، وابستگی مستقیم به تعداد آزمایشات انجام‌شده در هر روز دارد. واضح است با افزایش تعداد آزمایشات و غربالگری جمعیت بیشتری از جامعه در یک روز، آمار افرادی که مبتلا به ویروس تشخیص داده می‌شوند، افزایش یافته و بر روی آمار کل مبتلایان تأثیر بسزایی خواهد گذاشت.

طبق آمار اعلام‌شده از طرف وزارت بهداشت، تعداد کل آزمایشات انجام‌شده در هر روز از تاریخ ۲۰ فروردین به بعد به طور رسمی در دسترس است و آمار کل تست‌های انجام‌شده قبل از تاریخ ۲۰ فروردین فاقد اعتبار است؛ بنابراین تجزیه و تحلیل داده‌ها بر اساس نسبت آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا نسبت به کل تست‌های انجام‌شده، در بازه زمانی ۲۰ فروردین تا ۱۰ خرداد در شکل شماره ۶ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل شماره ۶ مشاهده می‌شود، نسبت تعداد مبتلایان به ویروس کرونا به کل تست‌های انجام‌شده در هر روز تا تاریخ ۱۵ اردیبهشت سیر کاهشی داشته، اما پس از آن تغییر رفتار پیدا کرده است. در این نمودار نیز انتظار می‌رفت که در اواخر اردیبهشت تعداد مبتلایان به ویروس نسبت به کل تست‌های انجام‌شده در هر روز کاهش یابد و طبق مدل ۱ به سیر نزولی خود ادامه دهد. تغییر در عوامل و شرایط اولیه، سبب شد سیستم وارد فاز دوم سیر تغییر رفتار خود شود.

مدل اول (خط آبی) در این نمودار دارای یک نمای لیاپانوف منفی با مقدار λ=-۰/۰۱۷ است که چنانچه داده‌های واقعی منطبق بر این معادله، سیر نزولی پیدا می‌کردند، نمودار به حالت اشباع نزدیک شده و شرایط به حالت پایدار می‌رسید. اما با تغییر رفتار سیستم، نسبت کل مبتلایان به تعداد کل تست‌های انجام‌شده،

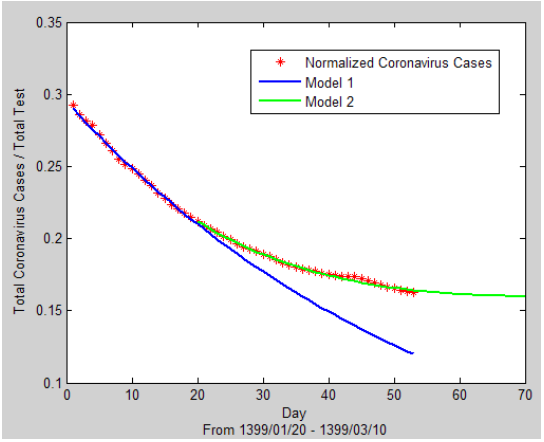


مجله‌علمی
دانشگاه‌علوم‌پزشکی قزوین

شکل ٥. نمودار شبیه‌سازی آمار کل جان‌باختگان (ستاره‌های قرمز) بر اساس مدل مبتنی بر نمای لیاپانوف (خط آبی) در بازه زمانی ۱ فروردین تا ۱۰ خرداد ۱۳۹۹. تغییر رفتار آمار کل جان‌باختگان در دهه اول خرداد ناشی از تغییرات عوامل و حساسیت به شرط اول سیستم

دوباره روند افزایشی پیدا کرد. مدل ۲ بر مبنای دو نمای لیاپانوف λ_1=۰/۰۰۳ و λ_2=-۰/۰۳۶ که یکی از آن‌ها منفی و دیگری مثبت است، تغییر رفتار سیستم را شبیه‌سازی کرده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد چنانچه یکی از نماهای لیاپانوف مثبت شود، سیستم رفتار آشوبی از خود نشان می‌دهد.

پارامترهای دیگری که می‌توان جهت بررسی وضعیت بیماری کووید ـ ۱۹ محاسبه کرد، نرخ بهبود و نرخ مرگ‌ومیر مبتلایان به بیماری است. نرخ بهبود واحدی برای اندازه‌گیری میزان بهبود بیماری در یک جامعه آماری است که در دانش اپیدمیولوژی یا همه‌گیرشناسی برای آن فرمول مشخصی مورد استفاده قرار می‌گیرد



مجله‌علمی
دانشگاه‌علوم‌پزشکی قزوین

شکل ٦. نمودار شبیه‌سازی روند تعداد کل افراد مبتلا به ویروس کرونا نسبت به تعداد کل تست‌های انجام‌شده در هر روز (ستاره‌های قرمز) در دو فاز با استفاده از دو مدل مبتنی بر نماهای لیاپانوف (مدل ارائه‌شده در فاز اول خط آبی و مدل ارائه‌شده در فاز دوم خط سبز) در بازه زمانی ۲۰ فروردین تا ۱۰ خرداد ۱۳۹۹.

تا با کمک این نرخ بتوان به تصویری روشن‌تر از وضعیت فراگیری و اثرگذاری یک بیماری دست یافت.

اپیدمیولوژیست‌ها برای محاسبه نرخ بهبود، شمار بهبودیافتگان یک بیماری را بر مجموع فوتی‌ها و بهبود یافته‌ها تقسیم می‌کنند. به بیان دیگر آن‌ها تعداد افراد بهبودیافته را بر مجموع بیمارانی که سرنوشتشان مشخص شده است، تقسیم می‌کنند (فرمول شماره ۳).

۳.

$$\text{نرخ بهبود (٪)} = \frac{\text{آمار بهبود یافتگان}}{\text{آمار بهبود یافتگان + آمار فوتی ها}} \times ۱۰۰$$

همچنین جهت محاسبه نرخ مرگ‌ومیر، تعداد افراد فوت‌شده به مجموع تعداد افراد بهبودیافته و فوت‌شده تقسیم شده و بر حسب درصد مطابق فرمول شماره ۴ بیان می‌شود.

۴.

$$\text{نرخ مرگ و میر (٪)} = \frac{\text{آمار فوتی ها}}{\text{آمار بهبود یافتگان + آمار فوتی ها}} \times ۱۰۰$$

نرخ بهبود و نرخ مرگ‌ومیر بیماران مبتلا به ویروس کرونا در هر روز در بازه زمانی ۱ فروردین تا ۱۰ خرداد ۱۳۹۹ در شکل شماره ۷ نشان داده شده است تا بتوان نحوه تغییرات این دو پارامتر را بررسی کرد.

نرخ مرگ‌ومیر کل مبتلایان به ویروس کرونا (سمت راست به رنگ قرمز) نشان می‌دهد از نیمه فروردین به بعد تعداد مرگ‌ومیر افراد در اثر ابتلا به ویروس کرونا کاهش چشمگیری داشته است و این میزان از اوایل اردیبهشت به کمتر از ۷ درصد رسیده است.

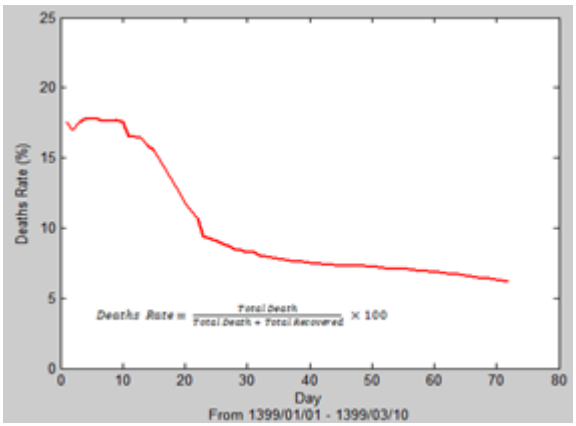
شیب نزولی منحنی در اوایل خرداد نشان می‌دهد نرخ مرگ‌ومیر افراد می‌تواند به کمتر از ۵ درصد نیز برسد (شکل شماره ۷).

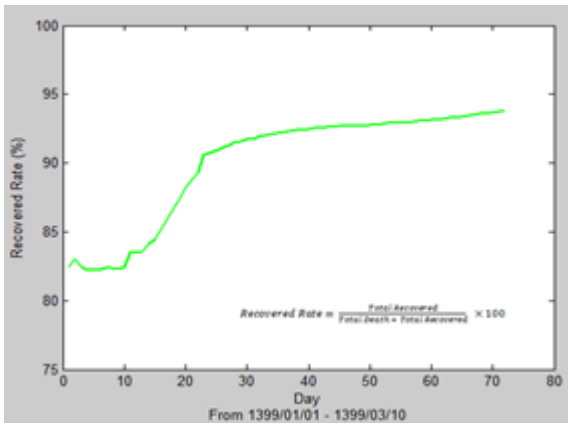
نرخ بهبودیافتگان مبتلا به ویروس کرونا (سمت چپ به رنگ سبز) نمایانگر افزایش درصد بهبود یافتگان از دهه اول فروردین به بعد است. در اوایل فروردین ماه، از مجموع آمار بهبودیافتگان و فوتی‌ها، به طور متوسط ۸۲ درصد افراد بهبود یافته و سلامتی خود را به دست می‌آوردند، در حالی که در اوایل خرداد این احتمال به بیش از ۹۳ درصد افزایش یافته است.

با وجود اینکه در نیمه اردیبهشت همچنان ایران در جمع ۱۰ کشور اول از نظر بیشترین تعداد مبتلا به ویروس کرونا قرار دارد، میزان بهبودیافتگان این بیماری در ایران قابل توجه است. چین با ۹۳/۶ درصد بهبودی مبتلایان در رده اول قرار دارد و ایران با ۷۹/۷۹ درصد بهبودی در رتبه دوم جدول درمان کرونا در جهان جای گرفته است. بعد از ایران، سوئیس با ۷۸/۷ درصد و آلمان با ۷۷/۸ درصد بهبود در رتبه‌های سوم و چهارم قرار دارند [۲۷].

یافته‌ها

در این پژوهش، تعداد کل مبتلایان به ویروس کرونا و تعداد کل جان‌باختگان بر اساس معادله مبتنی بر نمای لیاپانوف، در دو بازه زمانی ۱ اسفند تا ۱۵ اردیبهشت و ۱۵ اردیبهشت تا ۱۰ خرداد شبیه‌سازی شده است. مدل ارائه‌شده، افزایش آمار کل مبتلایان در فروردین و نیمه اول اردیبهشت و زمان نزدیک شدن به حالت اشباع در نیمه دوم اردیبهشت را نشان می‌دهد (شکل شماره ۲). در بازه زمانی دوم، تعداد کل مبتلایان وارد فاز دوم افزایشی شده، بنابراین در این بازه شبیه‌سازی توسط مدل ۲ انجام می‌شود. نتایج شبیه‌سازی هر دو فاز در شکل شماره نشان داده شده است. نکته حائز اهمیت در شبیه‌سازی فاز دوم این است که مقدار نمای





مجله‌علمی
دانشگاه‌علوم‌پزشکی قزوین

شکل ۷. نمودار نرخ مرگ‌ومیر ویروس کرونا در سمت راست به رنگ قرمز و نرخ بهبود ویروس کرونا در سمت چپ به رنگ سبز در بازه زمانی ۱ فروردین تا ۱۰ خرداد ۱۳۹۹.

لیاپانوف محاسبه‌شده و شیب منحنی در فاز دوم کمتر از فاز اول است.

شبیه‌سازی تعداد کل جان‌باختگان در بازه زمانی اول (شکل شماره ۴) نزدیک شدن به حالت اشباع و ثابت ماندن تعداد روزانه مرگ‌ومیر در اثر ویروس را نشان می‌دهد. در بازه زمانی دوم (شکل شماره ۵)، تعداد کل جان‌باختگان وارد فاز دوم افزایشی شده و مدل ارائه‌شده در شیب صعودی نمودار قرار گرفته است. تعداد کل مبتلایان به تعداد کل تست‌های انجام‌شده در هر روز (شکل شماره ۶) مانند تعداد کل مبتلایان در نیمه دوم اردیبهشت ماه در حال نزدیک شدن به حالت اشباع بود که با تغییر شرایط اولیه، نسبت تعداد کل مبتلایان به تعداد کل تست‌های انجام‌شده افزایش یافت. محاسبه نرخ مرگ‌ومیر ناشی از ویروس در بازه زمانی ۱ فروردین تا ۱۰ خرداد نشان می‌دهد از نیمه فروردین به بعد، تعداد مرگ‌ومیر افراد در اثر ابتلا به ویروس کرونا کاهش چشمگیری داشته است و این میزان در اوایل اردیبهشت به کمتر از ۷ درصد رسیده است. شیب نزولی منحنی در اوایل خرداد ماه نشان می‌دهد این نرخ می‌تواند به کمتر از ۵ درصد نیز برسد. نرخ بهبودیافتگان در اوایل فروردین ماه، به طور متوسط ۸۲ درصد بوده است. این نرخ در اوایل خرداد به بیش از ۹۰ درصد افزایش یافته است (شکل شماره ۷).

بحث و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا و تعداد جان‌باختگان و بهبودیافتگان در ایران، بر اساس نظریه آشوب و مدل مبتنی بر نمای لیاپانوف، قادر به بازنمایی مناسب داده‌های واقعی بیماری است و می‌تواند در بازه‌های زمانی کوتاه، روند شیوع و گسترش بیماری و زمان نزدیک شدن به حالت اشباع را پیش‌بینی کند.

با شروع بحران اخیر و جدی ویروس کووید ـ ۱۹ در تمام کشورهای جهان از جمله ایران، پژوهشگران به دنبال تحلیل‌های علمی مختلف در خصوص شیوع، شبکه انتقال، تأثیر محدودیت‌های قرنطینه و غیره بر اساس معادلات و مدل‌های ریاضی هستند تا نشانه‌هایی از روند گسترش و شیوع بیماری، آمار کل مبتلایان و جان‌باختگان، مدت‌زمان بیماری و غیره را تخمین بزنند. اغلب مدل‌های ارائه‌شده جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی شیوع بیماری‌های واگیردار، با معادلات دیفرانسیل و یا استفاده از ابزارهای احتمالات، سعی در ساده‌سازی مسئله دارند و به‌خوبی نمی‌توانند اکثر جزئیات و عوامل مؤثر در شیوع و گسترش بیماری را بررسی کنند؛ در حالی که شیوع اپیدمی‌ها مانند تمام سیستم‌های زنده و بیولوژیکی، آشوبگون است.

از آغاز شیوع ویروس کرونا در ایران، اعمال محدودیت‌های قرنطینه و تعطیلی ادارات، سازمان‌ها، مدارس و دانشگاه ها، سبب شد روند افزایشی آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا تا حد زیادی در فروردین ماه ۱۳۹۹ کنترل شود. بر اساس معادله مبتنی بر نمای لیاپانوف آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا از ۱ اسفند ۱۳۹۸ تا ۱۵ اردیبهشت ۱۳۹۹ شبیه‌سازی شده است و انتظار می‌رفت آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا در نیمه اول اردیبهشت ماه ۱۳۹۹ به حالت اشباع نزدیک شده و در اواخر اردیبهشت ماه تعداد کل مبتلایان در هر روز تفاوت چشمگیری با روزهای بعدی نداشته باشد؛ اما با توجه به وضعیت جامعه و شرایط اقتصادی افراد، امکان ادامه یافتن محدودیت‌های قرنطینه وجود نداشت و برخی کسب و کارها بازگشایی شده و تعاملات و تردد افراد در اردیبهشت ماه افزایش یافت. این مسئله سبب شد آمار کل مبتلایان، وارد فاز دوم افزایش خود شود.

مقدار نمای لیاپانوف محاسبه‌شده در فاز دوم افزایش آمار کل مبتلایان، کمتر از مقدار آن در فاز اول است. این مسئله حاکی از آن است که سرعت شیوع ویروس در فاز دوم کمتر از فاز اول بوده و آمار کل مبتلایان به ویروس کرونا با شیب آهسته‌تری افزایش خواهد یافت. درنتیجه مدت‌زمان رسیدن به حالت اشباع نیز طولانی‌تر خواهد بود. در فاز اول انتظار داشتیم ظرف مدت ۱۵ الی ۲۰ روز نمودار به حالت اشباع خود نزدیک شود، اما در فاز دوم که مقدار نمای لیاپانوف کوچک‌تر است، پیش‌بینی می‌شود نمودار در مدت ۳۰ الی ۳۵ روز به حالت اشباع برسد.

در خصوص آمار کل جان‌باختگان نیز نتایج به همین صورت است و پیش‌بینی می‌شد در روزهای پایانی اردیبهشت ماه ۱۳۹۹ آمار کل جان‌باختگان به حالت اشباع نزدیک شده و تعداد جان‌باختگان در هر روز کاهش یابد. اما همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد به دلیل حساسیت به شرایط اولیه و کاهش محدودیت‌های قرنطینه، تعداد کل جان‌باختگان از اوایل خرداد ماه وارد فاز دوم افزایش شد.

کنترل آمار کل مبتلایان و شناسایی داروهای مؤثر بر کاهش عوارض بیماری توسط کادر درمان، سبب کاهش نرخ مرگ‌ومیر ناشی از بیماری و افزایش آمار بهبود یافتگان می‌شود. نمودار پارامترهای نرخ بهبودیافتگان و نرخ مرگ‌ومیر بیماران مبتلا به ویروس کرونا نشان داد نرخ بهبود بیماران از اوایل فروردین تا دهه اول خرداد از مقدار متوسط ۸۲ به ۹۳ درصد افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود نرخ مرگ‌ومیر نیز تا پایان خرداد به کمتر از ۵ درصد کل جان‌باختگان و بهبودیافتگان برسد؛ اما افزایش آمار کل مبتلایان به کووید ـ ۱۹ و احتمال جهش ژنتیکی در ویروس و مقاومت در برابر داروهای شناسایی‌شده جهت کاهش عوارض بیماری، می‌تواند سبب شود نرخ مرگ‌ومیر ناشی از بیماری مجدد افزایش یافته و آمار بهبودیافتگان کاهش پیدا کند.

به دلیل آشوبگون بودن شیوع ویروس، تغییر بسیار اندک در شرایط اولیه از جمله اعمال یا اتمام محدودیت‌های قرنطینه،

رعایت نکات بهداشتی توسط مردم، جهش ژنتیکی ویروس، تراکم جمعیت در مکان‌های عمومی، یافتن روش درمان قطعی و یا کشف واکسن بیماری و غیره تغییرات زیادی در روند شیوع بیماری ایجاد می‌کند. از آنجا که ویروس کرونا جدید و ناشناخته است و مطالعات و تحقیقات نتوانسته درمان قطعی برای ویروس پیدا کند، بهترین روش برای کنترل بیماری، جلوگیری از شیوع آن است. تجزیه و تحلیل‌های ارائه شده در پژوهش حاضر می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های راهبردی در کوتاه‌مدت و ارائه راهکار در خصوص نحوه مواجهه با همه‌گیری ویروس و چگونگی گسترش آن مؤثر واقع شود. استفاده از نظریه آشوب و معادله مبتنی بر نمای لیاپانوف، آمار کل مبتلایان به ویروس کووید ـ ۱۹ و تعداد کل جان‌باختگان را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده و می‌تواند پیش‌بینی مناسبی از شیوع بیماری ارائه دهد.

یکی از محدودیت‌های جمع‌آوری و آنالیز داده‌ها، در دسترس نبودن تعداد کل آزمایش‌های انجام‌شده از ابتدای بازه زمانی پژوهش است؛ چراکه با استفاده از نسبت تعداد کل مبتلایان به تعداد کل آزمایش‌های انجام‌شده می‌توان نتایج دقیق‌تری به دست آورد؛ بنابراین به‌اجبار برای تجزیه و تحلیل این پارامتر بازه زمانی ۲۰ فروردین تا ۱۰ خرداد ۱۳۹۹ در نظر گرفته شده است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

این مقاله از نوع فراتحلیل است و نمونه انسانی و حیوانی نداشته است.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سازمانی‌های دولتی، خصوصی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، نظارت و مدیریت پروژه: سعیده کوزه‌گری؛ تحلیل، تحقیق و بررسی، نگارش پیش‌نویس، ویراستاری و نهایی‌سازی نوشته: سعیده کوزه‌گری و فاطمه محمدی؛ اعتبارسنجی و منابع: فاطمه محمدی.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

[1] Bauch CT. The role of mathematical models in explaining recurrent outbreaks of infectious childhood diseases. In: Brauer F, van den Driessche P, Wu J, editors. Mathematical Epidemiology. Berlin: Springer; 2008. p. 297-319. [DOI:10.1007/978-3-540-78911-6_11]

[2] Pourbohloul B, Meyers LA, Skowronski DM, Krajden M, Patrick DM, Brunham RC. Modeling control strategies of respiratory pathogens. Emerg Infect Dis. 2005; 11(8):1249-56. [DOI:10.3201/eid1108.040449] [PMID] [PMCID]

[3] Ssematimba A, Hagenaars TJ, de Jong MCM. Modelling the wind-borne spread of highly pathogenic avian influenza virus between farms. PLoS One. 2012; 7(2):e31114. [DOI:10.1371/journal.pone.0031114] [PMID] [PMCID]

[4] Briggs ADM, Wolstenholme J, Blakely T, Scarborough P. Choosing an epidemiological model structure for the economic evaluation of non-communicable disease public health interventions. Popul Health Metr. 2016; 14:17. [DOI:10.1186/s12963-016-0085-1] [PMID] [PMCID]

[5] Garnerin P, Valleron AJ. The French communicable diseases computer network: A technical view. Comput Biol Med. 1992; 22(3):189-200. [DOI:10.1016/0010-4825(92)90015-F]

[6] Toubiana L, Vibert JF. A neural network model for the spread of communicable diseases. In: Gierl L, Cliff AD, Valleron AJ, Farrington P, Bull M, editors. Geomed' 97. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag; 1998. p. 249-259. [DOI:10.1007/978-3-322-95397-1_19]

[7] Perez L, Dragicevic S. An agent-based approach for modeling dynamics of contagious disease spread. Int J Health Geogr. 2009; 8:50. [DOI:10.1186/1476-072X-8-50] [PMID] [PMCID]

[8] Verity R, Okell LC, Dorigatti I, Winskill P, Whittaker C, Imai N, et al. Estimates of the severity of coronavirus disease 2019: A model-based analysis. Lancet Infect Dis. 2020; 20(6):669-77. [DOI:10.1016/S1473-3099(20)30243-7]

[9] Silverman JD, Hupert N, Washburne AD. Using influenza surveillance networks to estimate state-specific prevalence of SARS-CoV-2 in the United States. Sci Transl Med. 2020; 12(554):eabc1126. [DOI:10.1126/scitranslmed.abc1126] [PMID] [PMCID]

[10] Cao S, Feng P, Shi P. Study on the epidemic development of COVID-19 in Hubei province by a modified SEIR model. J Zhejiang Univ (Med Sci). 2020; 49(2):178-84. http://www.zjujournals.com/med/EN/10.3785/j.issn.1008-9292.2020.02.05

[11] Chen TM, Rui J, Wang QP, Zhao ZY, Cui JA, Yin L. A mathematical model for simulating the phase-based transmissibility of a novel coronavirus. Infect Dis Poverty. 2020; 9(1):24. [DOI:10.1186/s40249-020-00640-3] [PMID] [PMCID]

[12] Basiri MR. Theory about treatments and morbidity prevention of corona virus disease (covid-19). J Pharm Pharmacol. 2020; 8:89-90. [DOI:10.17265/2328-2150/2020.03.004]

[13] Alipour A, Ghadami A, Alipour Z, Abdollahzadeh H. Preliminary validation of the Corona Disease Anxiety Scale (CDAS) in the Iranian sample. J Health Psychol. 2020; 8(32):163-75. [In Persian] http://hpj.journals.pnu.ac.ir/article_6571_en.html

[14] Pourghaznein T, Salati S. National approach in response to the COVID-19 pandemic in Iran. Int J Community Based Nurs Midwifery. 2020; 8(3):275-6. [DOI:10.30476/IJCBNM.2020.85928.1308] [PMID] [PMCID]

[15] Pearsall J. The concise Oxford English dictionary. Oxford: Oxford University Press; 2002. https://books.google.com/books?id=a4rlAAAAMAAJ&dq

[16] Chaté H, Villermaux E, Chomaz JM. Mixing: Chaos and turbulence. Berlin: Springer Science & Business Media; 2012. https://books.google.com/books?id=0awJCAAAQBAJ&dq

[17] Redondo JM. Turbulence, entropy and dynamics [Internet]. 2014 [Updated 2014 December]. Available from: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/86131/Turbulence_Entropy_and_Dynamics.pdf

[18] Hashemi Golpayegani SMR. Chaos and its applications in engineering. Tehran: Amirkabir University of Technology; 2009. [In Persian] http://opac.nlai.ir/opac-prod/bibliographic/1906260

[19] Kouzehgari S. Explanation of international system behavior based on chaos principal, case study the Middle East region [PhD. dissertation]. Tehran: Tarbiat Modares University; 2015. [In Persian] https://ganj.irandoc.ac.ir//#/articles/4acf14d31a125de353490e2fc2c09d47

[20] Kinsner W. Characterizing chaos through Lyapunov metrics. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews). 2006; 36(2):141-51. [DOI:10.1109/TSMCC.2006.871132]

[21] Nazarimehr F, Jafari S, Hashemi Golpayegani SMR, Sprott JC. Can Lyapunov exponent predict critical transitions in biological systems? Nonlinear Dyn. 2017; 88(2):1493-500. [DOI:10.1007/s11071-016-3325-9]

[22] Schuster HG. Deterministic chaos. Hoboken: Wiley; 1995. https://books.google.com/books?id=mZzvAAAAMAAJ&q

[23] Nychka D, Ellner S, Gallant AR, McCaffrey D. Finding chaos in noisy systems. J R Stat Soc B. 1992; 54(2):399-426. [DOI:10.1111/j.2517-6161.1992.tb01889.x]

[24] McCue LS, Troesch AW. Use of Lyapunov exponents to predict chaotic vessel motions. In: Almeida Santos Neves M, Belenky VL, de Kat JO, Spyrou K, Umeda N, editors. Contemporary Ideas on Ship Stability and Capsizing in Waves. Dordrecht: Springer; 2011. p. 415-432. [DOI:10.1007/978-94-007-1482-3_23]

[25] Moeini A, Abrishami H, Ahrari M. Using lyapunov exponent for modeling time series of oil price based on logistic map. Tahghighat- E- Eghtesadi. 2006; (76):77-100. [In Persian] https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?ID=58646

[26] Moeini Sedeh S, Arjmand N, Sanjari MA, Mokhtarinia HR, Asgari M, Parnianpour M. Nonlinear analysis of dynamic lumbar stability during repetitive trunk flexion extension at symmetric and asymmetric directions. Iran J Biomed Engr. 2013; 7(4):333-40. [In Persian] http://www.ijbme.org/article_13281_en.html

[27] Ferriere R, Gatto M. Lyapunov exponents and the mathematics of invasion in oscillatory or chaotic populations. Theor Popul Biol. 1995; 48(2):126-71. [DOI:10.1006/tpbi.1995.1024]

[28] Dehghanpisheh B. Coronavirus has spread to nearly all Iran provinces: President [Internet]. 2020 [Updated 2020 March 4]. Available from: https://www.reuters.com/article/us-health-coronavirus-iran-rouhani-idUSKBN20R1ES

[29] Worldometer. COVID-19 coronavirus pandemic [Internet]. 2020. [Updated 2020 September 23]. Available from: https://www.worldometers.info/coronavirus/

[30] Bonasera A, Zhang S. Chaos, percolation and the coronavirus spread. Front Phys. 2020; 8:171. [DOI:10.3389/fphy.2020.00171]

This Page Intentionally Left Blank