

## The effect of Parkinson's disease progression on RQA chaotic features

Hasani, Elham<sup>1</sup> / Maleki, Ali<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> – Master of Science in Biomedical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

<sup>2</sup> - Associate Professor, Biomedical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

### ARTICLE INFO

DOI: 10.22041/ijbme.2022.560449.1793

Received: 18 August 2022

Revised: 8/10/2022 – 23/11/2022

Accepted: 27 November 2022

### KEYWORDS

*Finger Tapping Test*  
*Parkinson Disease*  
*RQA Features*

### ABSTRACT

Parkinson's disease is a neurodegenerative disease that causes severe movement disorders including bradykinesia, rigidity, and tremors. There is no cure for Parkinson's disease, only the symptoms can be managed. Parkinson's disease is diagnosed using the MDS-UPDRS global grading scale. In this scale, four levels including slight, mild, moderate, and severe levels are defined for the disease. Recurrence plots and RQA features are tools for describing the behavior of chaotic systems and revealing hidden patterns in system dynamics. In this paper, the effect of Parkinson's disease progression on RQA chaotic features is studied. For this purpose, the dataset of the accelerometer mounted on the hand during the finger tapping test was used, which included 67 healthy data, 54 level one data, 66 level two data, 59 level three data, and 14 level four data. After pre-processing, the recurrence plots of the data were drawn and their RQA characteristics were calculated. Patterns of recurrence plots including separate recurrence points, diagonal lines, vertical lines, black squares, and horizontal and vertical white bands were investigated. According to the obtained results, the patterns of recurrence plots had significant differences among different levels of Parkinson's disease. Therefore, RQA features can be used to automatically determine the level of Parkinson's disease.

### \*Corresponding Author

**Address** Biomedical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

**Postal Code** 35131-19111

**Tel** +98-23-31532684

**E-Mail** amaleki@semnab.ac.ir

**Fax** +98-23-31532684



## اثر پیشرفت بیماری پارکینسون بر ویژگی‌های آشوبی RQA

حسینی، الهام<sup>۱</sup> / مالکی، علی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> - کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

<sup>۲</sup> - دانشیار، گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

### مشخصات مقاله

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22041/ijbme.2022.560449.1793

پذیرش: ۶ آذر ۱۴۰۱

بازنگری: ۱۶/۷/۱۴۰۱ - ۲/۹/۱۴۰۱

ثبت در سامانه: ۲۷ مرداد ۱۴۰۱

### چکیده

### واژه‌های کلیدی

بیماری پارکینسون یک بیماری تخریب‌کننده عصبی است که باعث اختلالات حرکتی شدیدی از جمله برادی‌کینزی، سفتی و لرزش می‌شود. هیچ درمانی برای بیماری پارکینسون وجود ندارد و تنها می‌توان با علائم آن مقابله کرد. تشخیص بیماری پارکینسون با استفاده از مقیاس جهانی سطح‌بندی MDS-UPDRS صورت می‌گیرد. در این مقیاس، چهار سطح جزئی، خفیف، متوسط و شدید برای بیماری تعریف می‌شود که آزمون نواخت انگشتان یکی از موارد مقیاس سطح‌بندی است. نگاشت بازخداد و ویژگی‌های RQA، ابزاری برای توصیف رفتار سامانه‌های آشوبناک و آشکار ساختن الگوهای پنهان در پویایی سامانه می‌باشند. در این مقاله، اثر پیشرفت سطح بیماری پارکینسون بر ویژگی‌های آشوبی RQA مورد مطالعه قرار گرفته است. به این منظور، از مجموعه دادگان شتاب‌سنج نصب شده روی دست حین انجام آزمون نواخت انگشت استفاده شده که شامل ۶۷ داده سالم، ۵۴ داده سطح یک، ۶۶ داده سطح دو، ۵۹ داده سطح سه و ۱۴ داده سطح چهار بیماری است. پس از انجام پیش‌پردازش، نگاشت‌های بازخداد دادگان رسم و ویژگی‌های RQA آن‌ها محاسبه شد. الگوهای نگاشت‌های بازخداد شامل نقاط بازخداد مجزا، خطوط قطری، خطوط عمودی، مربع‌های سیاه رنگ و نوارهای سفید رنگ افقی و عمودی بررسی شدند. طبق نتایج به دست آمده، الگوهای نگاشت‌های بازخداد دارای تفاوت‌های معناداری در بین سطوح مختلف بیماری پارکینسون بودند. بنابراین می‌توان از ویژگی‌های RQA برای تعیین خودکار سطح بیماری پارکینسون بهره برد.

آزمون نواخت انگشتان  
بیماری پارکینسون  
تحلیل کمی بازخداد

### \*نویسنده‌ی مسئول

نشانی	گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
کد پستی	۳۵۱۳۱-۱۹۱۱۱
پست الکترونیک	amaleki@semnan.ac.ir
تلفن	+۹۸-۲۳-۳۱۵۳۲۶۸۴
دورنگار	+۹۸-۲۳-۳۱۵۳۲۶۸۴

## ۱- مقدمه

پارکینسون، یک بیماری تخریب‌کننده عصبی و ناتوان‌کننده است که در سطح جهانی در حال افزایش است و تأثیر قابل توجهی بر کیفیت زندگی دارد [۱]. در بیماری پارکینسون، سامانه عصبی مرکزی بیماران تحت تأثیر قرار می‌گیرد و نورون‌های حامل دوپامین<sup>۱</sup> به تدریج از بین می‌روند اما هنوز علت بروز آن مشخص نیست. در اثر این بیماری، اختلالات حرکتی شدید به صورت علائمی مانند لرزش، برادی‌کینزی<sup>۲</sup>، سفتی و بی‌ثباتی وضعی ایجاد می‌شود [۱]. لرزش به عنوان یک حرکت غیرارادی و آهنگین تعریف می‌شود و یکی از بارزترین و آزاردهنده‌ترین علائم بیماران پارکینسون است [۱]. برادی‌کینزی یکی دیگر از علائم این بیماری و به معنای کندی حرکت است و بیشتر ناشی از ضعف ماهیچه‌ها، سفتی ماهیچه‌ها یا لرزش می‌باشد [۱]. این عارضه به صورت کاهش سرعت یا دامنه حرکات تکراری یا به صورت تردید بیمار در انجام حرکت بروز می‌یابد [۲]. برادی‌کینزی ممکن است بالاترین پتانسیل را به عنوان نشانگر حرکتی پیشرفت بیماری پارکینسون داشته باشد. پزشکان با مشاهده توانایی بیمار در انجام حرکات سریع، تکراری و متناوب دست مانند نواخت انگشتان، به دنبال علائم برادی‌کینزی هستند [۳]. سفتی یکی دیگر از علائم این بیماری است و باعث انعطاف‌ناپذیری ماهیچه‌ها می‌شود [۴]. هیچ درمانی برای بیماری پارکینسون وجود ندارد، فقط می‌توان با علائم آن مقابله کرد. با این حال، داروی اصلی، لوودوپا<sup>۳</sup>، دارای یک عارضه جانبی است که به موجب آن بیماران که به طور طولانی مدت از این دارو استفاده می‌کنند دچار اختلالات حرکتی به نام "دیس‌کینزی<sup>۴</sup> ناشی از لوودوپا" می‌شوند. مدیریت مصالحه بین این علائم و علائم پارکینسون می‌تواند بسیار چالش‌برانگیز باشد. در نتیجه، تشخیص زودهنگام و دقیق، کلید کنترل موفقیت‌آمیز بیماری است. وجود یک سامانه عینی و دقیق برای تشخیص و نظارت بر بیماری بسیار مفید خواهد بود [۵].

تشخیص بالینی لرزش پارکینسون و برادی‌کینزی با استفاده از مقیاس‌های سطح‌بندی انجام می‌شود [۱]. مقیاس جهانی

سطح‌بندی بیماری پارکینسون<sup>۵</sup> (UPDRS) ابتدا در سال ۱۹۸۰ ایجاد و به پرکاربردترین مقیاس بالینی سطح‌بندی برای بیماری پارکینسون تبدیل شد [۶]. شدت بیماری پارکینسون با استفاده از این مقیاس از طریق انجام فعالیت‌هایی شامل حرکت انگشتان و دست و از طریق ارزیابی پارامترهایی مانند سرعت، دامنه و نظم حرکت‌ها تعیین می‌شود [۳]. این مقیاس از بخش‌های (۱) رفتار، (۲) فعالیت‌های روزانه، (۳) توانایی‌های حرکتی و (۴) دیس‌کینزی تشکیل می‌شود [۷]. در سال ۲۰۰۱ این مقیاس با حمایت انجمن اختلال حرکتی<sup>۶</sup> بازبینی شد و نسخه جدیدی از آن با عنوان MDS-UPDRS منتشر شد.

آزمون نواخت انگشتان<sup>۷</sup>، آزمایشی برای ارزیابی عملکرد حرکتی، به ویژه سرعت و هماهنگی [۴] و فعالیتی متداول برای ارزیابی برادی‌کینزی در بیماری پارکینسون است [۲]. کند شدن حرکت، کاهش دامنه و تاخیر در نواخت انگشتان همگی نشانه‌های برادی‌کینزی هستند [۴]. مطابق دستورالعمل انجمن بین‌المللی اختلالات حرکتی و پارکینسون، آزمون نواخت انگشتان به صورت ده بار نواختن یا ضربه زدن انگشت اشاره بر روی انگشت شست با بیش‌ترین سرعت و دامنه ممکن صورت می‌گیرد [۸]. در آزمون نواخت انگشتان پارامترهای سرعت، دامنه، تردیدها<sup>۸</sup>، توقف‌ها<sup>۹</sup> و کاهش دامنه ارزیابی می‌شود. در صورتی که آزمون بدون هیچ مشکلی انجام شود فرد سالم و طبیعی ارزیابی می‌شود. در صورت بروز الف) شکسته شدن آهنگ منظم انجام آزمون با یک یا دو وقفه یا تردید ب) کند شدن جزئی پ) کاهش‌های دامنه در نزدیکی پایان ده نواخت، بیماری سطح یک یا جزئی ارزیابی می‌شود. در صورت بروز الف) سه تا پنج وقفه یا تردید ب) کند شدن خفیف پ) شروع کاهش‌های دامنه در میانه مدت زمان، بیماری سطح دو یا خفیف ارزیابی می‌شود. در صورت بروز الف) بیش از پنج وقفه یا تردید یا حداقل یک توقف طولانی ب) کند شدن متوسط پ) شروع کاهش‌های دامنه پس از اولین نواخت، بیماری سطح سه یا متوسط ارزیابی می‌شود. در صورتی که به دلیل کندی، وقفه‌ها یا کاهش‌ها آزمون به سختی انجام شود یا انجام آن امکان‌پذیر نباشد، بیماری سطح چهار یا شدید ارزیابی می‌شود [۸].

۶ Movement disorder society

۷ Finger tapping test

۸ hesitation

۹ halts

<sup>۱</sup> Dopamine

<sup>۲</sup> Bradykinesia

<sup>۳</sup> Levodopa

<sup>۴</sup> Dyskinesia

<sup>۵</sup> Unified Parkinson's Disease Rating Scale



ویژگی‌های غیرخطی آنتروپی نمونه، نرخ بازخداد، قطعیت و بعد همبستگی محاسبه شدند. مقدار  $p$  برای نرخ بازخداد کم‌تر از  $0/01$  و برای قطعیت کم‌تر از  $0/01$  به دست آمد. در نتیجه نشان داده شد که ویژگی‌های غیرخطی، تفاوت معناداری در بین افراد سالم و بیمار دارند.

میگل و همکارانش [۱۲] کاربرد پارامترهای غیرخطی را در توصیف دادگان الکترومایوگرام سطحی مرور کردند. پارامترهای آنتروپی، قطعیت و بعد همبستگی در سیگنال SEMG برای افراد سالم و بیماران پارکینسون مقایسه شدند. برای بیماران، قطعیت بسیار بالاتر، آنتروپی و بعد همبستگی پایین‌تر به دست آمد. بالاتر بودن درصد قطعیت نشان‌دهنده بیش‌تر بودن بخش‌های تکراری و بازخداد بیش‌تر در سیگنال SEMG است. در نتیجه، قابلیت پارامترهای غیرخطی در تشخیص الگوهای پنهان و تشخیص زود هنگام بیماری پارکینسون نشان داده شد.

فام [۱۳] برای تشخیص بیماری پارکینسون در مراحل اولیه، سری‌های زمانی فشردن صفحه کلید افراد سالم و بیماران پارکینسون را با رویکرد پویایی غیرخطی بررسی کرد. این دادگان، سری‌هایی از زمان‌های نگه داشتن یعنی زمان‌های بین فشردن و رها کردن کلید رایانه حین تایپ توسط داوطلب هستند. در این پژوهش، نگاشت‌های بازخداد، ۱۱ ویژگی تحلیل کمی بازخداد و نگاشت‌های بازخداد فازی محاسبه شدند. مقدار  $p$  برای ویژگی‌های RQA در بین افراد سالم و بیماران پارکینسون برابر با ۰ به دست آمد.

شریچ و همکاران [۱۴]، به منظور تشخیص ثبات و انعطاف‌پذیری عملکرد حرکتی، RQA را برای اندازه‌گیری تغییرات الگوهای فعالیت عصبی غیرخطی مغز به کار گرفتند. دادگان EEG برای دو آهنگ متفاوت نواخت انگشت ثبت شد. مقدار  $p$  برای بررسی تاثیر دو آهنگ متفاوت نواخت بر خود-بازخداد مغزی برابر با  $0/02$  به دست آمد.

اگرچه در پژوهش‌های پیشین، برخی از ویژگی‌های RQA برای مقایسه گروه سالم و بیماران پارکینسون به کار گرفته شده‌اند اما تاکنون تاثیر پیشرفت سطح بیماری پارکینسون بر چگونگی تغییرات ویژگی‌های RQA ارزیابی نشده است. در این مقاله، روند تغییرات ویژگی‌های RQA حاصل از دادگان شتاب آزمون

بازخداد<sup>۱۰</sup>، پدیده‌ای است که الگوهای زمانی و فضایی آن در ساختارها و رویدادهای فیزیکی مشاهده می‌شود [۹]. این پدیده، یکی از ویژگی‌های اساسی سامانه‌های پویا است که تمامی اطلاعات مرتبط با رفتار سامانه را در بر دارد [۱۰]. تحلیل بازخداد یکی از روش‌های مدرن تحلیل داده است که برای درک پویایی پیچیده سامانه به کار می‌رود. نگاشت بازخداد، نمایش دو بعدی از پویایی چند بعدی است [۹]. ماتریس بازخداد، ماتریس مربعی متقارن باینری است که زمان‌های وقوع حالت‌های مجاور را رمزگذاری می‌کند. با استفاده از ماتریس بازخداد می‌توان اطلاعات زیاد و متنوعی را در مورد پویایی سامانه استخراج کرد. نگاشت بازخداد، نمایش گرافیکی ماتریس بازخداد است. با استفاده از نگاشت بازخداد می‌توان داده‌های سری زمانی را تجسم کرد و رفتار سامانه را در فضای فاز توصیف نمود [۱۰]. برای درک پویایی زیربنایی باید الگوهای سازنده نگاشت بازخداد را تفسیر کرد. الگوهای پیچیده در نگاشت بازخداد از ترکیب و تلفیق الگوهای اولیه خطوط قطری، عمودی و افقی ایجاد می‌شوند [۹]. نقاط بازخداد مجزا، نشان‌دهنده نوسان در فرایند، خطوط قطری، نشان‌دهنده وجود مسیرهای موازی در طول سری زمانی و خطوط عمودی/افقی نشان‌دهنده حالت‌های لایه‌ای هستند [۱۰]. مربع‌های سیاه رنگ، یکی از الگوهای ترکیبی هستند که نشان‌دهنده رشته‌ای از مقادیر تکراری در سری زمانی هستند [۹].

ویژگی‌های تحلیل کمی بازخداد<sup>۱۱</sup> (RQA)، مقادیری هستند که برای کمی‌سازی ساختارها با مقیاس کوچک در نگاشت بازخداد محاسبه می‌شوند. این ویژگی‌ها براساس تراکم نقاط بازخداد و ساختارهای خطی قطری و عمودی به دست می‌آیند. با استفاده از ویژگی‌های RQA می‌توان گذار پویایی سامانه را براساس سری زمانی به دست آورد [۱۰].

میگل و همکارانش [۱۱] با ثبت و بررسی دادگان شتاب و الکترومایوگرام سطحی (SEMG<sup>۱۲</sup>) به ارزیابی ویژگی‌های خطی و غیرخطی لرزش دست بیماران پارکینسون پرداختند. دادگان شتاب از میچ و دادگان SEMG از عضله دو سر بازویی حین انجام آزمون نگه‌داری وزنه ایزومتریک ثبت شدند. در این پژوهش، ویژگی‌های خطی دامنه، فرکانس قله و مجموع توان و

<sup>۱۱</sup> Recurrence quantification analysis

<sup>۱۲</sup> Surface EMG

<sup>۱۰</sup> Recurrence

یکسان برای مقایسه علمی دادگان سطوح متفاوت بیماری و نیز محدودیت نرم‌افزاری در پیاده‌سازی محاسبات، نمونه‌های از ثانیه ۵ تا ۱۰ برای تمامی دادگان به منظور ادامه مراحل پردازشی، جدا و انتخاب شدند. سپس، نگاشت بازخداد دادگان شتاب برای افراد سالم و بیماران پارکینسونی سطوح یک تا چهار رسم و به صورت کیفی، روند تغییرات الگوهای نگاشت بازخداد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. در ادامه، ویژگی‌های کمی RQA شامل نرخ بازخداد، قطعیت، میانگین طول خطوط قطری، طول بلندترین خط قطری، لامیناریتی، زمان در دام افتادن، طول بلندترین خط عمودی، زمان بازخداد نوع دوم، آنژیوبی تراکم دوره بازخداد، ضریب خوشه‌بندی و گذرایی محاسبه گردید و بر اساس آن، به صورت کمی به بررسی روند تغییرات این ویژگی‌ها با پیشرفت بیماری پارکینسون پرداخته شد. در نهایت با تحلیل آماری ANOVA، معناداری تفاوت ویژگی‌های RQA در بین گروه سالم و شدت‌های مختلف بیماری پارکینسون بررسی شد.

## ۲-۱- پایگاه دادگان

در این مقاله از پایگاه دادگان ثبت شده در مرجع [۱۵] استفاده شده است که شامل دادگان ۲۶ فرد سالم و ۶۴ بیمار مبتلا به پارکینسون با سطوح یک تا چهار است که آزمون نواخت انگشتان را مطابق مقیاس MDS-UPDRS انجام داده‌اند. دادگان با استفاده از دستگاه مبتنی بر شتابسنج برای تشخیص خودکار بیماری پارکینسون<sup>۱۳</sup> [۱۶] ثبت شده است. این دستگاه از یک شتابسنج خطی سه محوره، پردازنده و سامانه ارسال اطلاعات تشکیل شده است و به گونه‌ای بر روی دست شرکت‌کنندگان قرار گرفته که راستای z شتابسنج موازی با سطح افق، راستای x عمود بر سطح افق و خلاف جهت شتاب گرانش زمین و راستای y در جهت انگشت اشاره بوده است. برای هر یک از شرکت‌کنندگان، دادگان شتاب حاصل از انجام آزمون نواخت انگشت به مدت ۲۵ ثانیه با نرخ نمونه‌برداری ۸۰۰ هرتز ثبت شده است. این پایگاه داده حاوی ۲۶۰ داده است که شامل ۶۷ داده سالم، ۵۴ داده سطح یک، ۶۶ داده سطح دو، ۵۹ داده سطح سه و ۱۴ داده سطح چهار می‌باشد.

## ۲-۲- پیش‌پردازش

ابتدا با حذف بهترین خط برازش شده بر داده از آن، اثرات روند<sup>۱۴</sup> حذف و داده‌ای با میانگین صفر تولید شد. سپس، فیلتر میان‌گذر باترورث مرتبه ۸ با فرکانس‌های قطع ۰/۲ و ۱۳۰ هرتز

نواخت انگشتان در اثر پیشرفت سطح بیماری پارکینسون بررسی شد. به این منظور، دادگان شتاب حاصل از آزمون نواخت انگشتان [۱۵] به کار گرفته شدند و پس از پیش‌پردازش، نگاشت‌های بازخداد و ویژگی‌های RQA دادگان محاسبه و مقایسه شدند. سپس، با استفاده از تحلیل ANOVA، کارایی ویژگی‌های RQA در تشخیص سطح بیماری پارکینسون نشان داده شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

شکل (۱) نمودار بلوکی مراحل ارزیابی روند تغییرات ویژگی‌های RQA دادگان شتاب انگشتان دست حین آزمون نواخت انگشت با پیشرفت بیماری پارکینسون را نشان می‌دهد.



شکل (۱) - طرح‌واره کلی روش پیشنهادی که در آن مراحل پیاده‌سازی مقاله نشان داده شده است.

در ابتدا، دادگان شتاب آزمون نواخت انگشت با حذف روند و اعمال یک فیلتر میان‌گذر پیش‌پردازش شدند. با توجه به طول زیاد و متفاوت نمونه دادگان مختلف و به علت ایجاد شرایط

<sup>۱۴</sup> trend

<sup>۱۳</sup> Acceleration-based Parkinson Detection System (APaDS)



می‌دهند به تمامی نقاط بازرخداد، مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود [۱۰].

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P(l)}{\sum_{l=1}^N l P(l)} \quad (3)$$

که در این رابطه،  $l$  طول ساختار قطری،  $l_{min}$  حداقل طول ساختارهای قطری،  $N$  طول سری زمانی و  $P$  هیستوگرام طول ساختارهای قطری می‌باشد. هیستوگرام خطوط قطری به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌شود که نماد  $\varepsilon$  برای سادگی در اندازه‌گیری‌های RQA حذف می‌شود.

$$P(\varepsilon, l) = \sum_{i,j=1}^N (1 - R_{i-1,j-1}(\varepsilon)) (1 - R_{i+l,j+l}(\varepsilon)) \prod_{k=0}^{l-1} R_{i+k,j+k}(\varepsilon) \quad (4)$$

$$P(\varepsilon, l) = P(l)$$

### ۲-۳-۲- متوسط طول قطری

متوسط طول قطری، یکی از ویژگی‌های مربوط به خطوط قطری می‌باشد و براساس هیستوگرام خطوط قطری به دست می‌آید. یک خط قطری به طول  $l$  به این معنا است که بخشی از مسیر به طول  $l$  گام زمانی نسبتاً نزدیک به بخش دیگری از مسیر در زمان متفاوت است. متوسط طول خط قطری، متوسط زمانی است که دو بخش از مسیر نزدیک به یکدیگر هستند و می‌تواند نشان‌دهنده زمان پیش‌بینی باشد. این ویژگی به صورت رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$L = \frac{\sum_{l=l_{min}}^N l P(l)}{\sum_{l=l_{min}}^N P(l)} \quad (5)$$

### ۲-۳-۴- طول بلندترین خط قطری

طول بلندترین خط قطری و معکوس آن با عنوان واگرایی، ویژگی‌های مربوط به خطوط قطری می‌باشد که به ترتیب به صورت رابطه‌های (۶) و (۷) به دست می‌آیند.

$$L_{max} = \max\{l_i; i = 1, \dots, N_l\} \quad (6)$$

$$DIV = \frac{1}{L_{max}} \quad (7)$$

که در این روابط، پارامتر  $N_l$  تعداد کل خطوط قطری است و به صورت رابطه (۸) به دست می‌آید.

$$N_l = \sum_{l \geq l_{min}} P(l) \quad (8)$$

### ۲-۳-۵- آنتروپی طول قطری

ویژگی آنتروپی طول قطری بر اساس احتمال یافتن یک خط قطری به طول مشخص  $l$  و به صورت رابطه (۹) به دست می‌آید.

$$ENT = - \sum_{l=l_{min}}^N p(l) \ln(p(l)) \quad (9)$$

به ترتیب برای حذف تاثیر شتاب زمین و حذف نویز فرکانس بالا استفاده شد.

### ۲-۳-۲- نگاشت بازرخداد

ابتدا، ماتریس بازرخداد به صورت رابطه (۱) محاسبه شد.

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \theta(\varepsilon - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad i, j = 1, \dots, N \quad (1)$$

$$\theta(x) = 0 \text{ if } x < 0, \theta(x) = 1 \text{ otherwise}$$

$$\vec{x}_i \approx \vec{x}_j \Leftrightarrow R_{i,j} \equiv 1$$

که در این رابطه،  $\vec{x}_i$  مسیر فضای فاز،  $N$  تعداد نقاط اندازه‌گیری شده در مسیر فضای فاز،  $\varepsilon$  آستانه فاصله،  $\theta$  تابع هویساید و  $\|\cdot\|$  نشانگر نرم است. بازرخداد برای حالت‌هایی که در همسایگی  $\varepsilon$  قرار دارند، برابر با ۱ و در غیر اینصورت برابر با ۰ می‌شود.

نگاشت بازرخداد با رسم ماتریس بازرخداد به دست می‌آید. نقاط مربوط به بازرخداد با مقدار یک به رنگ سیاه و نقاط مربوط به بازرخداد با مقدار صفر به رنگ سفید رسم می‌شود. در قطر اصلی هر نگاشت، خطی سیاه رنگ به نام خط شناسایی ایجاد می‌شود. هر دو نقطه با مختصات قرینه دارای بازرخداد یکسانی هستند و نقاط نسبت به خط شناسایی متقارن هستند. در این پژوهش، نگاشت بازرخداد و ویژگی‌های آشوبی RQA با استفاده از جعبه‌ابزار CRP تعیین شده است [۱۷]. بعد محاط بهینه و زمان تاخیر بهینه، پارامترهای موردنیاز برای تعیین نگاشت بازرخداد و ویژگی‌های آشوبی RQA هستند که به ترتیب با استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب و الگوریتم اطلاعات متقابل تخمین زده شدند [۱۸].

### ۲-۳-۱- نرخ بازرخداد

نرخ بازرخداد ساده‌ترین پارامتر RQA و معیاری برای اندازه‌گیری تراکم نقاط بازرخداد در نگاشت بازرخداد است که به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۰].

$$RR(\varepsilon) = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}(\varepsilon) \quad (2)$$

که در این رابطه، عبارت  $\sum_{i,j=1}^N R_{i,j}(\varepsilon)$  حاصل جمع درایه‌های ماتریس بازرخداد یا به بیان دیگر تعداد نقاط بازرخداد، متغیر  $N$  طول سری زمانی و عبارت  $N * N = N^2$  تعداد کل نقاط نگاشت را نشان می‌دهد.

### ۲-۳-۲- قطعیت

قطعیت یا پیش‌بینی‌پذیری یکی از ویژگی‌های مبنی بر هیستوگرام خطوط قطری است و به صورت نسبت نقاط بازرخدادی که ساختارهای قطری با حداقل طول را تشکیل

$$R_i = \{\vec{x}_{j_1}, \vec{x}_{j_2}, \dots, |R_{i,j_k} = 1\} \quad (15)$$

که در این رابطه،  $\vec{x}$  مسیر،  $\varepsilon$  همسایگی و  $i$  نقطه دلخواه است. عناصر این مجموعه، مربوط به نقاط بازرخداد ستون  $i$  ام  $\{R_{i,j}\}_{j=1}^N$  از یک نگاهت بازرخداد است. زمان‌های بین این نقاط بازرخداد، زمان‌های بازرخداد نوع اول هستند و به صورت رابطه (۱۶) به دست می‌آیند.

$$\{T_k^{(1)} = j_{k+1} - j_k\}_{k \in N} \quad (16)$$

به دلیل حرکت مماسی احتمالی، برخی از نقاط بازرخداد در  $R_i$ ، مربوط به زمان‌های بازرخداد  $T_k^{(1)} = 1$  هستند. برای به دست آوردن نقاط بازرخداد واقعی، تمامی نقاط بازرخداد متوالی با  $T_k^{(1)} = 1$  از مجموعه  $R_i$  حذف می‌شوند و مجموعه جدیدی به صورت رابطه (۱۷) به دست می‌آید.

$$R'_i = \{\vec{x}'_{j'_1}, \vec{x}'_{j'_2}, \dots\} \quad (17)$$

سپس زمان‌های بازرخداد نوع دوم از نقاط بازرخداد باقی‌مانده ( $R'_i$ ) به صورت رابطه (۱۸) [۱۰] یا به صورت (۱۹) از نقاط بازرخداد ( $R_i$ ) [۱۹] به دست می‌آیند.

$$\{T_k^{(2)} = j'_{k+1} - j'_k\}_{k \in N} \quad (18)$$

$$T_j^2 = |\{i, j: \vec{x}_i, \vec{x}_j \in R_i; \vec{x}_{j-1} \notin R_i\}| \quad (19)$$

به این ترتیب، زمان بازرخداد نوع دوم، فاصله زمانی بین شروع ساختارهای بازرخداد عمودی متوالی در نگاهت بازرخداد را اندازه می‌گیرد.

### ۹-۳-۲- آنتروپی تراکم دوره بازرخداد

آنتروپی تراکم دوره بازرخداد<sup>۱۶</sup> ( $RPDE$ ) آنتروپی نرمال شده توزیع زمان بازرخداد سری زمانی می‌باشد [۱۹] و درجه پیچیدگی یک سامانه را نشان می‌دهد [۲۰]. این پارامتر به صورت رابطه (۲۱) به دست می‌آید [۲۱].

$$H_{norm} = \frac{-\sum_{i=1}^{T_{max}} P(i) \ln P(i)}{\ln T_{max}} \quad (21)$$

که در این رابطه،  $T_{max}$  بیش‌ترین زمان بازرخداد و  $P$  تراکم احتمال زمان بازرخداد است و به صورت رابطه (۲۲) به دست می‌آید [۲۱].

$$P(T) = \frac{R(T)}{\sum_{i=1}^{T_{max}} R(i)} \quad (22)$$

که در این رابطه،  $R(T)$  هیستوگرام زمان‌های بازرخداد است.

### ۱۰-۳-۲- ضریب خوشه‌بندی

ضریب خوشه‌بندی یکی از ویژگی‌هایی است که شبکه پیچیده بازرخداد را توصیف می‌کند. این شبکه از گره‌ها و یال‌هایی تشکیل می‌شود که گره‌ها نشان‌دهنده بردارهای فضای حالت و یال‌ها نشان‌دهنده بازرخدادها هستند.

که در این رابطه،  $p(l)$  احتمال یافتن یک خط قطری به طول مشخص  $l$  می‌باشد و به صورت رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$p(l) = P(l)/N_l \quad (10)$$

### ۶-۳-۲- لامیناریتی

ویژگی لامیناریتی، وقوع وضعیت‌های لایه‌ای در سامانه را بدون توصیف طول این فازهای لایه‌ای نشان می‌دهد. این ویژگی به صورت نسبت بین نقاط بازرخدادی که ساختارهای عمودی را تشکیل می‌دهند و کل مجموعه نقاط بازرخداد، مطابق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N v P(v)}{\sum_{v=1}^N v P(v)} \quad (11)$$

که در این رابطه،  $v$  طول ساختار عمودی،  $v_{min}$  حداقل طول ساختارهای عمودی،  $N$  طول سری زمانی،  $P$  هیستوگرام طول ساختارهای عمودی می‌باشد. تعداد کل خطوط عمودی به طول  $v$  در نگاهت بازرخداد به صورت هیستوگرام خطوط عمودی مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$P(v) = \sum_{i,j=1}^N (1 - R_{i,j-1})(1 - R_{i,j+v}) \prod_{k=0}^{v-1} R_{i,j+k} \quad (12)$$

### ۷-۳-۲- زمان در دام افتادن

زمان در دام افتادن<sup>۱۵</sup> ( $TT$ ) به صورت میانگین طول ساختارهای عمودی و مطابق رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{min}}^N v P(v)}{\sum_{v=v_{min}}^N P(v)} \quad (13)$$

محاسبه زمان در دام افتادن نیز مانند لامیناریتی نیازمند در نظر گرفتن حداقل طول ساختارهای عمودی است. زمان در دام افتادن، میانگین زمانی که حالت در دام می‌افتد را تخمین می‌زند.

### ۸-۳-۲- طول بلندترین خط عمودی

طول بلندترین خط عمودی شبیه طول بلندترین خط قطری به صورت رابطه (۱۴) به دست می‌آید.

$$V_{max} = \max\{v_l\}_{l=1}^{N_v} \quad (14)$$

که در این رابطه،  $N_v$  تعداد خطوط عمودی است [۱۰].

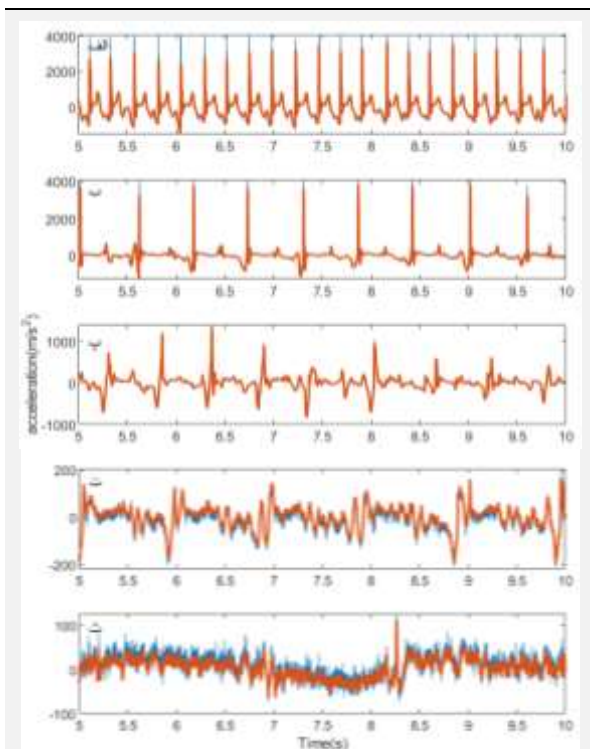
### ۹-۳-۲- زمان‌های بازرخداد

زمان‌های بازرخداد را می‌توان به طور مستقیم از نگاهت بازرخداد به دست آورد. ابتدا مجموعه نقاطی از مسیر که در همسایگی  $\varepsilon$  از نقطه دلخواه قرار می‌گیرند، به صورت رابطه (۱۵) در نظر گرفته می‌شود.

<sup>۱۶</sup> Recurrence Period Density Entropy

<sup>۱۵</sup> Trapping Time

تعداد و طول خطوط عمودی افزایش، تعداد مربعات بازخداد کاهش و مساحت آن‌ها افزایش یافته است. از آن جایی که با پیشرفت سطح بیماری، دامنه شتاب و فاصله بین مقدار نمونه‌های پشت سر هم سری زمانی شتاب کاهش می‌یابد، در نتیجه تعداد نقاط بازخداد افزایش می‌یابد. تماس‌های بین انگشتان در نگاشت بازخداد به صورت نوارهای سفید رنگ عمودی و افقی ظاهر شده‌اند که هر چقدر فرکانس تماس‌ها بیش‌تر بوده، ضخامت نوارهای سفید تر شده است. با پیشرفت سطح بیماری، تعداد و فرکانس تماس‌ها کاهش و در نتیجه تعداد و ضخامت نوارهای سفید رنگ کاهش یافته است. ویژگی‌های RQA با در نظر گرفتن حداقل طول خطوط قطری برابر با ۲۰ و حداقل طول خطوط عمودی برابر با ۵ محاسبه شدند. در شکل (۴)، نمودارهای جعبه‌ای این ویژگی‌ها برحسب سطوح بیماری پارکینسون رسم شده است. روند تغییرات برای هر یک از ویژگی‌ها در جدول (۱) خلاصه شده است.



شکل (۲) - نمایش نمونه داده شتاب به ترتیب برای (الف) فرد سالم، (ب) بیمار سطح یک، (پ) بیمار سطح دو، (ت) بیمار سطح سه و (ث) بیمار سطح چهار به صورت خام (به رنگ آبی) و پس از اعمال حذف-روند و فیلتر میان‌گذر (به رنگ قرمز)

$$A_{ij} = A_{ji} = \begin{cases} 1, & (i, j) \in E \\ 0, & (i, j) \notin E \end{cases} \quad (۲۳)$$

که در این رابطه،  $A$  ماتریس مجاورت،  $i$  و  $j$  گره‌هایی عضو  $V$  مجموعه رئوس و  $E$  مجموعه یال‌های شبکه است. ضریب خوشه‌بندی، احتمال این است که دو بازخداد از هر حالتی، همسایه نیز باشند [۲۲] و به صورت رابطه (۲۴) به دست می‌آید [۱۷].

$$C = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{j,k=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} R_{j,k}^{m,\varepsilon} R_{k,i}^{m,\varepsilon}}{RR_i} \quad (۲۴)$$

$$RR_i = \sum_{j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}$$

### ۱۱-۳-۲- گذرایی

گذرایی، احتمال این است که دو همسایه یک حالت، نیز همسایه باشند [۲۳] و رابطه بین سه گره را به صورت رابطه (۲۵) بیان می‌کند [۲۲].

$$A_{ij} = A_{ik} = 1, A_{jk} = 1 \quad (۲۵)$$

در این رابطه،  $i, j$  و  $k$  گره‌هایی عضو  $V$  مجموعه راس‌ها هستند. ویژگی گذرایی به صورت رابطه (۲۵) به دست می‌آید [۱۷].

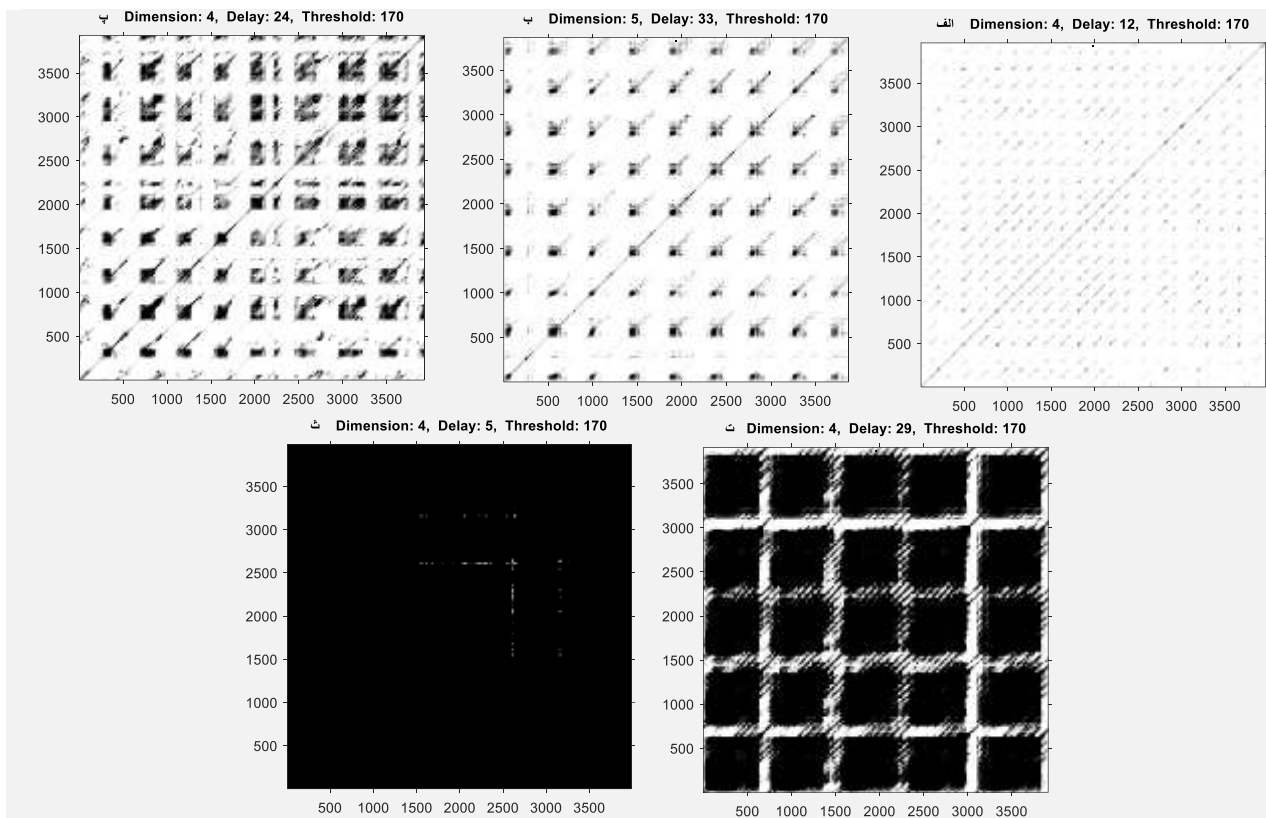
$$C = \frac{\sum_{i,j,k=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} R_{j,k}^{m,\varepsilon} R_{k,i}^{m,\varepsilon}}{\sum_{i,j,k=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} R_{k,i}^{m,\varepsilon}} \quad (۲۵)$$

## ۳- یافته‌ها و بحث

در شکل (۲) نمونه داده شتاب به ترتیب از بالا به پایین برای فرد سالم، بیمار سطح یک، بیمار سطح دو، بیمار سطح سه و بیمار سطح چهار به صورت خام و همچنین پس از اعمال کاهش روند و فیلتر میان‌گذر نشان داده شده است. با افزایش سطح بیماری پارکینسون، تعداد نواخت‌ها کاهش، فاصله بین نواخت‌ها افزایش، دامنه شتاب کاهش، بی‌نظمی افزایش و لرزش در حین نواخت افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش سطح بیماری پارکینسون، دامنه در فرکانس‌های بالا کاهش می‌یابد. فرکانس‌های بالا نشان‌دهنده حرکات سریع یعنی تماس بین انگشتان بوده و کاهش دامنه در فرکانس‌های بالا همراه با افزایش زمان تماس بین انگشتان می‌باشد.

در شکل (۳)، نگاشت‌های بازخداد نمونه دادگان فرد سالم و بیماران سطوح یک تا چهار به ازای بعد محاط بهینه، زمان تأخیر بهینه، آستانه ۱۷۰ و نرم اقلیدسی رسم شده است. با پیشرفت سطح بیماری، تعداد نقاط بازخداد افزایش، تعداد و ضخامت نوارهای سفید رنگ عمودی و افقی کاهش، تعداد نقاط بازخداد مجزا کاهش، تعداد و طول خطوط قطری افزایش،





شکل (۲) - نگاشت بازخداد الف) فرد سالم، ب) بیمار سطح یک و پ) بیمار سطح دو، ت) بیمار سطح سه و ث) بیمار سطح چهار. مقادیر تعیین شده برای بعد و تاخیر در هر مورد در عنوان شکل مشخص شده است.

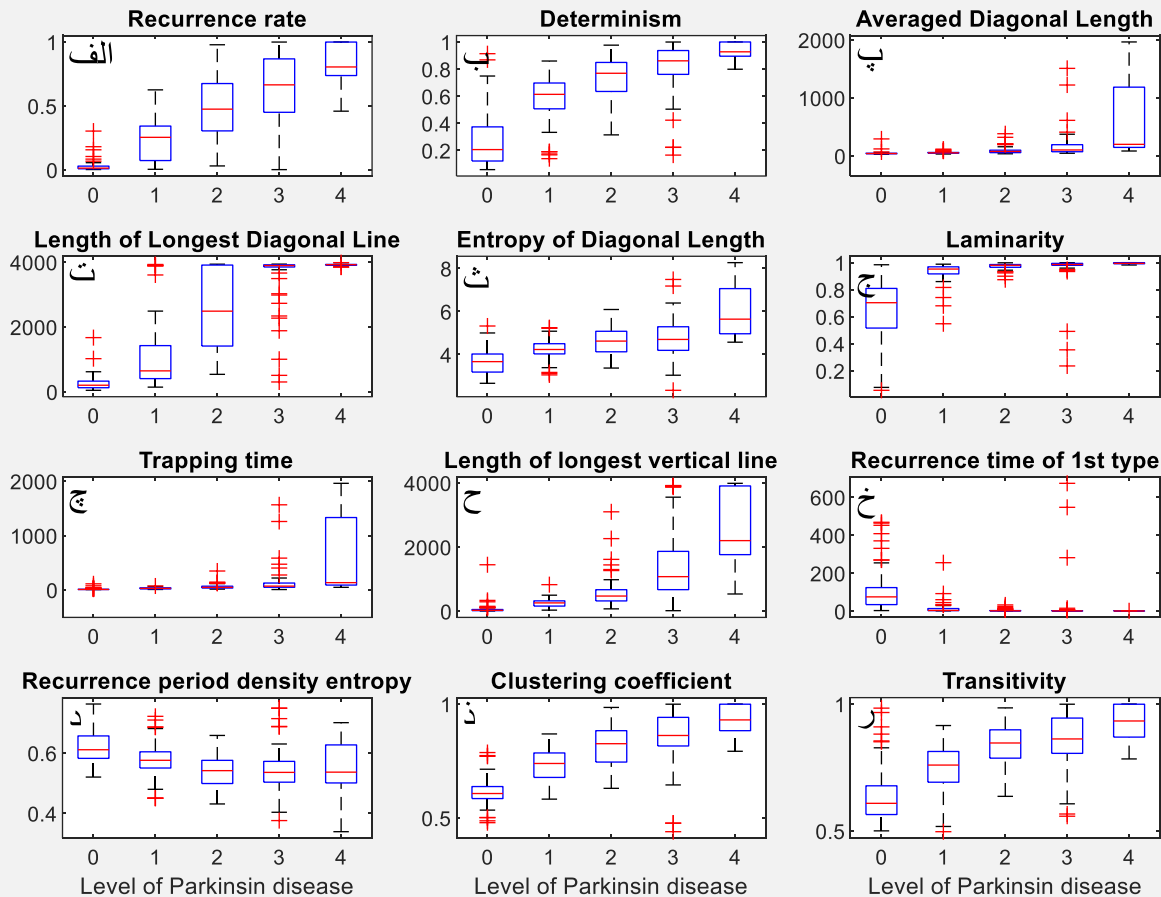
ویژگی نرخ بازخداد افزایش می‌یابد. همچنین از آنجا که با پیشرفت سطح بیماری، علاوه بر افزایش تعداد کل نقاط بازخداد، تعداد و طول خطوط قطری به نسبت بیشتری افزایش می‌یابد، ویژگی قطعیت با پیشرفت سطح بیماری افزایش می‌یابد. بعلاوه با پیشرفت سطح بیماری، به دلیل افزایش تعداد و طول خطوط قطری، ویژگی‌های متوسط طول خطوط قطری و طول بلندترین خط قطری افزایش می‌یابند.

در نگاشت بازخداد با پیشرفت سطح بیماری، تعداد و طول خطوط قطری افزایش و در نتیجه احتمال یافتن یک خط قطری به طول مشخص  $l$  و آنتروپی طول خطوط قطری افزایش می‌یابد و در نتیجه، پیچیدگی سامانه بیش‌تر می‌شود. همچنین با پیشرفت سطح بیماری، تعداد کل نقاط بازخداد و تعداد و طول خطوط عمودی افزایش می‌یابد اما از آن جایی که افزایش نسبی تعداد نقاط بازخداد تشکیل‌دهنده ساختارهای عمودی بیش‌تر از افزایش نسبی تعداد کل نقاط بازخداد می‌باشد، مقدار ویژگی ساختار لایه‌ای با پیشرفت سطح بیماری افزایش می‌یابد. بعلاوه از آنجا که با پیشرفت سطح بیماری، تعداد و طول خطوط عمودی افزایش می‌یابد ویژگی‌های زمان در دام افتادن و طول بلندترین خط عمودی افزایش می‌یابند.

جدول (۱) - روند تغییرات ویژگی‌های RQA با پیشرفت سطح بیماری پارکینسون

ویژگی RQA	روند تغییرات
نرخ بازخداد	افزایشی
قطعیت	افزایشی
میانگین طول خطوط قطری	افزایشی
طول بلندترین خط قطری	افزایشی
آنتروپی طول خطوط قطری	افزایشی
لامیناریتی	افزایشی
زمان در دام افتادن	افزایشی
طول بلندترین خط عمودی	افزایشی
زمان بازخداد نوع اول	کاهشی
زمان بازخداد نوع دوم	بدون روند
آنتروپی تراکم دوره بازخداد	بدون روند
ضریب خوشه‌بندی	افزایشی
گذرابی	افزایشی

در نگاشت بازخداد با پیشرفت سطح بیماری، تعداد کل نقاط نگاشت ثابت است اما تعداد کل نقاط بازخداد و در نتیجه



شکل (۳) - نمودار جعبه‌ای ویژگی‌های RQA بر حسب شدت بیماری برای الف) ویژگی نرخ بازخداد، ب) قطعیت، پ) متوسط طول خطوط قطری، ت) طول بلندترین خط قطری، ث) آنترپی طول خطوط قطری، ج) لامیناریتی، چ) زمان در دام افتادن، ح) طول بلندترین خط عمودی، خ) زمان بازخداد نوع اول، د) آنترپی چگالی دوره بازخداد، ذ) ضریب خوشه‌بندی و ر) گذرایبی

ویژگی‌ها با استفاده از تحلیل ANOVA به دست آمد. سپس، آستانه‌ای برای مقدار  $p$  تعریف شد و ویژگی‌های دارای مقدار  $p$  بزرگ‌تر از آستانه، انتخاب شدند. آستانه مناسب، با استفاده از روش آزمون و خطا تعیین شد. در این روش، مقادیر مختلفی برای آستانه در نظر گرفته شد و به ازای هر یک از مقادیر، ویژگی‌های مناسب انتخاب شدند. سپس، طبقه‌بند نزدیک‌ترین همسایه‌ها با ویژگی‌های انتخاب شده آموزش داده شد و صحت طبقه‌بندی دادگان محاسبه شد. آستانه‌ای که به ازای آن بالاترین صحت طبقه‌بندی به دست آمد، تعیین شد و بر این اساس، ویژگی‌های مناسب انتخاب شدند. طبقه‌بند ماشین بردار پشتیبان با ویژگی‌های مناسب انتخاب شده و با در نظر گرفتن ۱۰ fold آموزش داده شد و دادگان با صحت ۹۳/۱٪ طبقه‌بندی شدند.

مقدار  $p$  حاصل از تحلیل ANOVA برای مقایسه هر یک از ویژگی‌ها در بین سطوح مختلف بیماری در بازه اعداد کوچک‌تر از ۰/۰۰۱ به دست آمد که نشان می‌دهد تفاوت معناداری در بین میانگین هر یک از ویژگی‌ها برای سطوح مختلف بیماری وجود دارد. ویژگی‌های طول بلندترین خط قطری، نرخ بازخداد، قطعیت، ضریب خوشه‌بندی و طول بلندترین خط عمودی دارای بیش‌ترین تفاوت معنادار در بین سطوح مختلف بیماری می‌باشند.

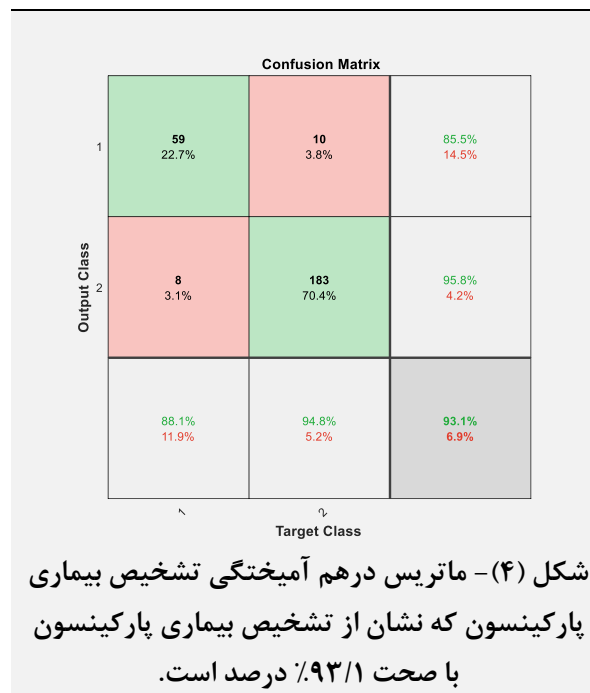
به منظور ارزیابی کارایی ویژگی‌های مورد مطالعه در این مقاله، طبقه‌بندی دو و پنج سطحی بیماری مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ابتدا دادگان سطوح مختلف بیماری پارکینسون به دو گروه تقسیم شدند. دادگان گروه سالم در کلاس ۱ و دادگان بیماران سطوح یک، دو، سه و چهار در کلاس دو در نظر گرفته شدند. در مرحله انتخاب ویژگی، مقدار  $p$  برای هر یک از

#### ۴- نتیجه‌گیری

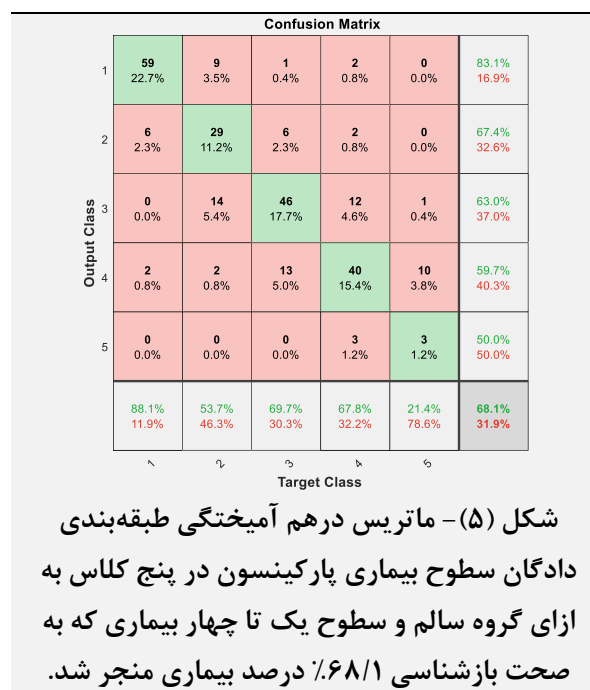
در این پژوهش، نگاشت‌های بازخداد دادگان شتاب حاصل از آزمون نواخت انگشتان مربوط به فرد سالم و بیماران پارکینسونی سطوح یک تا چهار بررسی شد و ویژگی‌های RQA آن‌ها مورد ارزیابی تحلیلی و همچنین ارزیابی آماری با استفاده از تحلیل ANOVA قرار گرفت. با پیشرفت سطح بیماری، بازخداد بیش‌تری روی داد که در نتیجه، نقاط بازخداد مجزا کاهش، تعداد و طول خطوط قطری و عمودی افزایش، تعداد مربع‌های سیاه رنگ کاهش، مساحت آن‌ها افزایش، و تعداد و ضخامت نوارهای سفید رنگ عمودی و افقی کاهش یافت. ۱۱ مورد از ویژگی‌های RQA دارای روند تغییرات در بین سطوح بیماری بودند. تفاوت‌های معناداری در بین الگوهای نگاشت‌های بازخداد سطوح مختلف بیماری و ویژگی‌های RQA آن‌ها مشاهده شد. در نتیجه این پژوهش مشخص شد که نگاشت بازخداد و ویژگی‌های RQA، توانایی آشکار ساختن الگوهای پنهان در پویایی دادگان آزمون نواخت انگشتان را دارند و می‌توان آن‌ها را به منظور تشخیص سطوح بیماری پارکینسون به کار گرفت.

#### ۶- مراجع

- [1] A. Channa, R. Ifrim, D. Popescu, and N. Popescu, "A-WEAR Bracelet for Detection of Hand Tremor and Bradykinesia in Parkinson ' s Patients," *Sensors*, pp. 1–23, 2021.
- [2] S. A. Muhamed, R. Newby, S. L. Smith, J. Alty, S. Jamieson, and P. Kempster, "Objective Evaluation of Bradykinesia in Parkinson's Disease using Evolutionary Algorithms," In Proceedings of the 11th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies (BIOSTEC), vol. 4, no. Biostec, pp. 63–69, 2018.
- [3] F. Luft *et al.*, "Deficits in tapping accuracy and variability in tremor patients," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* vol. 6, pp. 1–11, 2019.
- [4] M. Navada, D. Mishra, S. Parkar, P. Patil, and C. Jage, "Early Stage Detection of Parkinson Disease," *ITM Web of Conference*, vol. 03050, pp. 1–5, 2021.
- [5] S. E. Lacy, M. A. Lones, and S. L. Smith, "Characterisation of Movement Disorder in Parkinson ' s Disease using Evolutionary Algorithms Categories and Subject Descriptors," In Proceedings of the 15th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation, pp. 1479–1485, 2013.
- [6] C. G. Goetz *et al.*, "Movement Disorder Society-Sponsored Revision of the Unified Parkinson ' s Disease Rating Scale ( MDS-UPDRS ):Scale Presentation and Clinimetric Testing Results," *International Parkinson and Movement Disorder Society*, vol. 23, no. 15, pp. 2129–2170, 2008.



سپس، دادگان گروه سالم در کلاس یک و دادگان سطوح یک تا چهار بیماری پارکینسون در کلاس‌های دو تا پنج در نظر گرفته شدند. ویژگی‌های مناسب برای طبقه‌بندی پنج-کلاسی دادگان سطوح مختلف بیماری پارکینسون با استفاده از روش به‌کار رفته در طبقه‌بندی دو-کلاسی، انتخاب شدند. طبقه‌بند ماشین بردار پشتیبان با ویژگی‌های مناسب انتخاب شده و با در نظر گرفتن ۱۰ fold آموزش داده شد و دادگان با صحت ۶۸/۱٪ طبقه‌بندی شدند.



- [20] M. Little, P. McSharry, I. Moroz, and S. Roberts, "Nonlinear, biophysically-informed speech pathology detection," ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings, vol. 2, 2006.
- [21] M. A. Little, P. E. McSharry, S. J. Roberts, D. A. E. Costello, and I. M. Moroz, "Exploiting nonlinear recurrence and fractal scaling properties for voice disorder detection," BioMedical Engineering Online, vol. 6, pp. 1–35, 2007.
- [22] R. V. Donner, J. Heitzig, J. F. Donges, Y. Zou, N. Marwan, J. Kurths, "The geometry of chaotic dynamics – a complex network perspective," The European Physical Journal B, 2011.
- [23] S. Martin-Gonzalez, J. L. Navarro-Mesa, G. Julia-Serda, G. M. Ramirez-Avila, A. G. Ravelo-Garcia, "Improving the understanding of sleep apnea characterization using Recurrence Quantification Analysis by defining overall acceptable values for the dimensionality of the system, the delay, and the distance threshold," PLOS, 2018.
- [7] K. Akazawa, "Finger taps movement acceleration measurement system for quantitative diagnosis of Parkinson's disease," 2006 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, no. June, 2014.
- [8] C. G. Goetz, P. Martinez-martin, G. T. Stebbins, M. B. Stern, B. C. Tilley, and A. E. Lang, "MDS-UPDRS," International Parkinson and Movement Disorder Society, vol. 1, no. 414, 2008.
- [9] C. L. Webber and J. P. Zbilut, "RECURRENCE QUANTIFICATIONS: FEATURE EXTRACTIONS FROM RECURRENCE PLOTS," International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 17, No. 10, pp. 3467–3475, 2007.
- [10] N. Marwan, M. Carmen Romano, M. Thiel, and J. Kurths, "Recurrence plots for the analysis of complex systems," Physics Reports, vol. 438, no. 5–6. pp. 237–329, Jan. 2007.
- [11] A. Y. Meigal *et al.*, "Linear and nonlinear tremor acceleration characteristics in patients with Parkinson's disease," Physiological Measurement, vol. 33, no. 3, pp. 395–412, 2012.
- [12] A. Y. Meigal, S. M. Rissanen, Y. R. Zaripova, G. G. Miroschnichenko, and P. Karjalainen, "Nonlinear parameters of surface electromyogram for diagnostics of neuromuscular disorders and normal conditions of the human motor system," Human Physiology, vol. 41, no. 6. Maik Nauka Publishing / Springer SBM, pp. 672–679, Nov. 01, 2015.
- [13] T. D. Pham, "Pattern analysis of computer keystroke time series in healthy control and early-stage Parkinson's disease subjects using fuzzy recurrence and scalable recurrence network features," Journal of Neuroscience Methods, vol. 307, pp. 194–202, 2018.
- [14] R. Scheurich, A. P. Demos, A. Zamm, and B. Mathias, "Capturing Intra-and Inter-Brain Dynamics with Recurrence Quantification Analysis Status of Science View project Head Movements Encode Emotions View project," CogSci, 2019.
- [۱۵] عرب زاده نسری، سعید و مالکی، علی و فلاح، علی، ۱۳۹۶، ارایه معیار کمی پیوسته ای برای پارکینسون بر اساس معیار گسسته MDS-UPDRS، بیست و چهارمین کنفرانس ملی و دومین کنفرانس بین المللی مهندسی زیست پزشکی ایران، ۱۳۹۶.
- [۱۶] علی مالکی، محمدرضا عقیلی، "دستگاه مبتنی بر شتاب‌سنج برای تشخیص خودکار بیماری پارکینسون،" اداره ثبت اختراعات، شماره ثبت ۸۹۴۰۸، ۱۳۹۳.
- [17] N. Marwan: Cross Recurrence Plot Toolbox for MATLAB®, Ver. 5.24 (R34), from <https://toetsy.pik-potsdam.de/CRPtoolbox/>, accessed 2022-07-24.
- [18] J. de Pedro-Carracedo, A.M. Ugena and A.P. Gonzalez-Marcos, "Phase space reconstruction from a biological time series," Applied Science, 2020.
- [19] R. B. J. Brinkgreve and S. Kumarswamy, "Reference Manual Reference Manual," Technology (Singap World Sci), vol. 1, no. November, pp. 720–766, 2008.