



The Effect of Parkinson's Disease Progression on RQA Chaotic Features

Hasani, Elham¹ / Maleki, Ali^{2*}

¹ - M.Sc., Biomedical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

² - 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's Disease
RQA Features

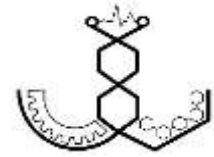
ABSTRACT

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^۱ / مالکی، علی^{۲*}

^۱ - کارشناسی ارشد، گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

^۲ - دانشیار، گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

مشخصات مقاله

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22041/ijbme.2022.560449.1793

پذیرش: ۶ آذر ۱۴۰۱

بازنگری: ۱۴۰۱/۷/۱۶ - ۱۴۰۱/۹/۲

ثبت در سامانه: ۲۷ مرداد ۱۴۰۱

چکیده

واژه‌های کلیدی

بیماری پارکینسون یک بیماری تخریب کننده‌ی عصبی است که باعث اختلالات حرکتی شدیدی مانند برادی کینزی، 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 شده 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. بدین منظور از مجموعه‌ی دادگان شتاب‌سنج نصب شده روی دست حین انجام آزمون نواخت انگشت استفاده شده که شامل ۶۷ داده‌ی سالم، ۵۴ داده‌ی سطح یک، ۶۶ داده‌ی سطح دو، ۵۹ داده‌ی سطح سه و ۱۴ داده‌ی سطح چهار بیماری است. پس از انجام پیش‌پردازش، نگاشت‌های بازخداد دادگان رسم شده و ویژگی‌های RQA آن‌ها محاسبه شده است. الگوهای نگاشت‌های بازخداد شامل نقاط بازخداد مجزا، خطوط قطری، خطوط عمودی، مربع‌های سیاه رنگ و نوارهای سفید رنگ افقی و عمودی بررسی شده است. طبق نتایج به دست آمده، الگوهای نگاشت‌های بازخداد دارای تفاوت‌های معناداری در بین سطوح مختلف بیماری پارکینسون است. بنابراین می‌توان از ویژگی‌های RQA برای تعیین خودکار سطح بیماری پارکینسون بهره گرفت.

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 تخریب کننده‌ی عصبی و ناتوان کننده بوده که در سطح جهانی در حال افزایش است و تاثیر قابل توجهی بر کیفیت زندگی دارد [۱]. در بیماری پارکینسون، سامانه‌ی عصبی مرکزی بیماران تحت تاثیر قرار گرفته و نورون‌های حامل دوپامین^۱ به تدریج از بین می‌روند اما هنوز دلیل بروز آن مشخص نیست. در اثر این بیماری، اختلالات حرکتی شدید به صورت علائمی مانند لرزش، برادی‌کینزی^۲، سفتی و بی‌ثباتی وضعی ایجاد می‌شود [۱]. لرزش به عنوان یک حرکت غیرارادی و آهنگین تعریف شده و یکی از بارزترین و آزاردهنده‌ترین علائم بیماری پارکینسون است [۱]. برادی‌کینزی یکی دیگر از علائم این بیماری و به معنای کندی حرکت است که بیش‌تر ناشی از ضعف ماهیچه‌ها، سفتی ماهیچه‌ها یا لرزش می‌باشد [۱]. این عارضه به صورت کاهش سرعت یا دامنه‌ی 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 مشاهده‌ی 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 و تنها می‌توان با علائم آن مقابله کرد. با این حال داروی اصلی این بیماری لوودوپا^۳ بوده که دارای یک عارضه‌ی جانبی است که به موجب آن بیمارانی که به طور طولانی مدت از این دارو استفاده می‌کنند دچار اختلالات حرکتی به نام دیس‌کینزی^۴ ناشی از لوودوپا می‌شوند. مدیریت مصلحه بین این علائم و علائم پارکینسون می‌تواند بسیار چالش‌برانگیز باشد. در نتیجه تشخیص زودهنگام و دقیق، کلید کنترل موفقیت‌آمیز بیماری است. وجود یک سامانه‌ی 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^۵ (UPDRS) در سال ۱۹۸۰ ایجاد شده و به پرکاربردترین مقیاس بالینی سطح‌بندی برای بیماری پارکینسون تبدیل شده است [۶]. شدت بیماری

پارکینسون با استفاده از این مقیاس از طریق انجام فعالیت‌هایی شامل حرکت انگشتان و دست و با ارزیابی پارامترهایی مانند سرعت، دامنه و نظم حرکت‌ها تعیین می‌شود [۳]. این مقیاس از ۴ بخش رفتار، فعالیت‌های روزانه، توانایی‌های حرکتی و دیس‌کینزی تشکیل شده است [۷]. در سال ۲۰۰۱ این مقیاس با حمایت انجمن اختلال حرکتی^۶ بازبینی شده و نسخه‌ی جدیدی از آن با عنوان MDS-UPDRS منتشر شده است.

آزمون نواخت انگشتان^۷، آزمایشی برای ارزیابی عمل‌کرد حرکتی، به ویژه سرعت و هماهنگی [۴] و فعالیت‌های متداول برای ارزیابی برادی‌کینزی در بیماری پارکینسون است [۲]. کند شدن حرکت، کاهش دامنه و تاخیر در نواخت انگشتان از جمله نشانه‌های برادی‌کینزی هستند [۴]. مطابق دستورالعمل انجمن بین‌المللی اختلالات حرکتی و پارکینسون، آزمون نواخت انگشتان به صورت ۱۰ بار نواختن یا ضربه زدن انگشت اشاره روی انگشت شست با بیش‌ترین سرعت و دامنه‌ی ممکن صورت می‌گیرد [۸]. در آزمون نواخت انگشتان پارامترهای سرعت، دامنه، تردیدها^۸، توقف‌ها^۹ و کاهش دامنه ارزیابی می‌شود. در صورتی که آزمون بدون هیچ مشکلی انجام شود فرد سالم و طبیعی ارزیابی می‌شود. در صورت بروز علائمی مانند شکسته شدن آهنگ منظم انجام آزمون با یک یا دو وقفه یا تردید، کند شدن جزئی و کاهش‌های دامنه در نزدیکی پایان ۱۰ نواخت، بیماری در سطح ۱ یا جزئی ارزیابی می‌شود. در صورت بروز علائمی مانند ۳ تا ۵ وقفه یا تردید، کند شدن خفیف و شروع کاهش‌های دامنه در میانه‌ی مدت زمان، بیماری در سطح ۲ یا خفیف ارزیابی می‌شود. در صورت بروز علائمی مانند بیش از ۵ وقفه یا تردید یا حداقل یک توقف طولانی، کند شدن متوسط و شروع کاهش‌های دامنه پس از اولین نواخت، بیماری در سطح ۳ یا متوسط ارزیابی می‌شود. در صورتی که به دلیل کندی، وقفه‌ها یا کاهش‌ها آزمون به سختی انجام شود یا انجام آن ممکن نباشد، بیماری در سطح ۴ یا شدید ارزیابی می‌شود [۸]. بازرخداد^{۱۰}، 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 تمام اطلاعات مرتبط با رفتار سامانه را در بر دارد [۱۰]. تحلیل بازرخداد یکی از روش‌های مدرن تحلیل داده است که برای درک پویایی پیچیده‌ی سامانه به کار می‌رود. نگاشت بازرخداد،

^۶ Movement Disorder Society

^۷ Finger Tapping Test

^۸ Hesitation

^۹ Halts

^{۱۰} Recurrence

^۱ Dopamine

^۲ Bradykinesia

^۳ Levodopa

^۴ Dyskinesia

^۵ Unified Parkinson's Disease Rating Scale



قطعیت نشان دهنده‌ی بیش‌تر بودن بخش‌های تکراری و بازرخداد بیش‌تر در سیگنال SEMG است. در نتیجه قابلیت پارامترهای غیرخطی در تشخیص الگوهای پنهان و تشخیص زود هنگام بیماری پارکینسون نشان داده شده است.

فام [۱۳] برای تشخیص بیماری پارکینسون در مراحل اولیه، سری‌های زمانی فشرده صفحه کلید افراد سالم و بیماران پارکینسون را با رویکرد پویایی غیرخطی بررسی کرده است. 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 بازرخداد، ۱۱ ویژگی تحلیل کمی بازرخداد و نگاشت‌های بازرخداد فازی محاسبه شده است. مقدار p برای ویژگی‌های RQA در بین افراد سالم و بیماران پارکینسون برابر با صفر به دست آمده است.

شریح و هم‌کارانش [۱۴] برای تشخیص ثبات و انعطاف‌پذیری عمل‌کرد حرکتی، RQA را برای اندازه‌گیری تغییرات الگوهای فعالیت عصبی غیرخطی مغز به کار گرفتند. در این پژوهش دادگان EEG برای دو آهنگ متفاوت نواخت انگشت ثبت شده است. مقدار p برای بررسی تاثیر دو آهنگ متفاوت نواخت بر خود-بازرخداد مغزی برابر با $0/002$ به دست آمده است.

اگرچه در پژوهش‌های پیشین برخی از ویژگی‌های RQA برای مقایسه‌ی گروه سالم و بیماران پارکینسون به کار گرفته شده اما تا کنون 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 نواخت انگشتان در اثر پیشرفت سطح بیماری پارکینسون بررسی شده است. به این منظور دادگان شتاب حاصل از آزمون نواخت انگشتان [۱۵] به کار گرفته شده و پس از پیش‌پردازش، نگاشت‌های بازرخداد و ویژگی‌های RQA دادگان محاسبه و مقایسه شده است. سپس با استفاده از تحلیل ANOVA کارایی ویژگی‌های RQA در تشخیص سطح بیماری پارکینسون نشان داده شده است.

۲- مواد و روش‌ها

نمودار بلوکی مراحل ارزیابی روند تغییرات ویژگی‌های RQA دادگان شتاب انگشتان دست حین آزمون نواخت انگشت با پیشرفت بیماری پارکینسون در شکل (۱) ارائه شده است. ابتدا دادگان شتاب آزمون نواخت انگشت با حذف روند و اعمال یک فیلتر میان‌گذر پیش‌پردازش شده است. با توجه به طول زیاد و متفاوت نمونه‌ی دادگان مختلف و به علت ایجاد شرایط

نمایش دوبعدی از پویایی چندبعدی است [۹]. ماتریس بازرخداد، ماتریس مربعی متقارن باینری است که زمان‌های وقوع حالت‌های مجاور را رمزگذاری می‌کند. با استفاده از ماتریس بازرخداد می‌توان اطلاعات زیاد و متنوعی را در مورد پویایی سامانه استخراج کرد. نگاشت بازرخداد، نمایش گرافیکی ماتریس بازرخداد است. با استفاده از نگاشت بازرخداد می‌توان داده‌های سری زمانی را تجسم کرد و رفتار سامانه را در فضای فاز توصیف نمود [۱۰]. برای درک پویایی زیربنایی باید الگوهای سازنده‌ی نگاشت بازرخداد را تفسیر کرد. الگوهای پیچیده در نگاشت بازرخداد از ترکیب و تلفیق الگوهای اولیه‌ی خطوط قطری، عمودی و افقی ایجاد می‌شوند [۹]. نقاط بازرخداد مجزا نشان دهنده‌ی نوسان در فرایند، خطوط قطری نشان دهنده‌ی وجود مسیرهای موازی در طول سری زمانی و خطوط عمودی/افقی نشان دهنده‌ی حالت‌های لایه‌ای هستند [۱۰]. مربع‌های سیاه رنگ یکی از الگوهای ترکیبی بوده که نشان دهنده‌ی رشته‌ای از مقادیر تکراری در سری زمانی هستند [۹]. ویژگی‌های تحلیل کمی بازرخداد^۱ (RQA) مقادیری هستند که برای کمی‌سازی ساختارها با مقیاس کوچک در نگاشت بازرخداد محاسبه می‌شوند. این ویژگی‌ها بر اساس تراکم نقاط بازرخداد و ساختارهای خطی قطری و عمودی به دست می‌آیند. با استفاده از ویژگی‌های RQA می‌توان گذار پویایی سامانه را بر اساس سری زمانی به دست آورد [۱۰].

میگل و هم‌کارانش [۱۱] با ثبت و بررسی دادگان شتاب و الکترومایوگرام سطحی^۲ (SEMG) به ارزیابی ویژگی‌های خطی و غیرخطی لرزش دست بیماران پارکینسون پرداختند. در این پژوهش دادگان شتاب از مچ و دادگان SEMG از عضله‌ی دو سر بازویی حین انجام آزمون نگه‌داری وزنه‌ی ایزومتریک ثبت شده است. ویژگی‌های خطی دامنه، فرکانس قله و مجموع توان و ویژگی‌های غیرخطی آنتروپی نمونه، نرخ بازرخداد، قطعیت و بعد همبستگی محاسبه شده است. مقدار p برای نرخ بازرخداد کم‌تر از $0/01$ و برای قطعیت کم‌تر از $0/001$ به دست آمده است. در نتیجه نشان داده شده است که ویژگی‌های غیرخطی، تفاوت معناداری در بین افراد سالم و بیمار دارد.

میگل و هم‌کارانش [۱۲] کاربرد پارامترهای غیرخطی در توصیف دادگان الکترومایوگرام سطحی را مرور کردند. در این پژوهش پارامترهای آنتروپی، قطعیت و بعد همبستگی در سیگنال SEMG برای افراد سالم و بیماران پارکینسون مقایسه شده است. برای بیماران، قطعیت بسیار بالاتر و آنتروپی و بعد همبستگی پایین‌تر به دست آمده است. بالاتر بودن درصد

^۲ Surface EMG

^۱ Recurrence Quantification Analysis

پارکینسون با سطوح ۱ تا ۴ 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^۱ [۱۶] ثبت شده است. این دستگاه از یک شتاب‌سنج خطی سه‌محوره، پردازنده و سامانه‌ی ارسال اطلاعات تشکیل شده و به گونه‌ای 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 شامل ۶۷ داده‌ی سالم، ۵۴ داده‌ی سطح ۱، ۶۶ داده‌ی سطح ۲، ۵۹ داده‌ی سطح ۳ و ۱۴ داده‌ی سطح ۴ است.

۲-۲- پیش پردازش

ابتدا با حذف بهترین خط برازش شده بر داده، اثرات روند^۲ از آن حذف شده و داده‌ای با میانگین صفر تولید شده است. سپس از فیلتر میان‌گذر باترورث مرتبه‌ی ۸ با فرکانس‌های قطع ۰/۲ و ۱۳۰ هرتز به ترتیب برای حذف تاثیر شتاب زمین و حذف نویز فرکانس بالا استفاده شده است.

۲-۳- نگاشت بازخداد

ابتدا ماتریس بازخداد به صورت رابطه‌ی (۱) محاسبه شده که در آن \vec{x}_i مسیر فضای فاز، N تعداد نقاط اندازه‌گیری شده در مسیر فضای فاز، ε آستانه‌ی فاصله، Θ تابع هویساید و $\|\cdot\|$ نشان‌گر نرم است. بازخداد برای حالت‌هایی که در همسایگی ε قرار دارند برابر با ۱ و در غیر این صورت برابر با صفر است.

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

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

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

نگاشت بازخداد با رسم ماتریس بازخداد به دست آمده است. نقاط مربوط به بازخداد با مقدار ۱ به رنگ سیاه و نقاط مربوط به بازخداد با مقدار صفر به رنگ سفید رسم شده است. در قطر اصلی هر نگاشت، خطی سیاه رنگ به نام خط شناسایی ایجاد شده است. هر دو نقطه با مختصات قرینه دارای بازخداد یکسانی بوده و نقاط نسبت به خط شناسایی متقارن هستند. در این پژوهش نگاشت بازخداد و ویژگی‌های آشوبی RQA با

یکسان برای مقایسه‌ی علمی دادگان سطوح متفاوت بیماری و نیز محدودیت نرم‌افزاری در پیاده‌سازی محاسبات، نمونه‌های از ثانیه‌ی ۵ تا ۱۰ برای تمام دادگان برای ادامه‌ی مراحل پردازشی، جدا و انتخاب شده است. سپس نگاشت بازخداد دادگان شتاب برای افراد سالم و بیماران پارکینسون سطوح ۱ تا ۴ رسم شده و به صورت کیفی روند تغییرات الگوهای نگاشت بازخداد مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. 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 اول، زمان بازخداد نوع دوم، آنتروپی تراکم دوره بازخداد، ضریب خوشه‌بندی و گذرایی محاسبه شده و بر اساس آن به صورت کمی به بررسی روند تغییرات این ویژگی‌ها با پیش‌رفت بیماری پارکینسون پرداخته شده است. در نهایت با تحلیل آماری ANOVA، معناداری تفاوت ویژگی‌های RQA در بین گروه سالم و شدت‌های مختلف بیماری پارکینسون بررسی شده است.



۲-۱- پایگاه دادگان

در این مقاله از پایگاه دادگان ثبت شده در مرجع [۱۵] استفاده شده که شامل دادگان ۲۶ فرد سالم و ۶۴ بیمار مبتلا به

^۲ Trend

^۱ Acceleration-Based Parkinson Detection System (APaDS)



خط قطری به طول 1 به این معنا است که بخشی از مسیر به طول 1 گام زمانی نسبتاً نزدیک به بخش دیگری از مسیر در زمان متفاوت می‌باشد. متوسط طول خط قطری، متوسط زمانی است که دو بخش از مسیر نزدیک به یکدیگر هستند و می‌تواند نشان دهنده‌ی زمان پیش‌بینی باشد. این ویژگی به صورت رابطه‌ی (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 بوده که به ترتیب به صورت رابطه‌های (۶) و (۷) به دست می‌آیند.

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

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

در این روابط پارامتر N_i تعداد کل خطوط قطری است و به صورت رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید.

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

۲-۳-۵- آنتروپی طول قطری

آنتروپی طول قطری بر اساس احتمال یافتن یک خط قطری به طول مشخص 1 و به صورت رابطه‌ی (۹) به دست می‌آید.

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

در این رابطه $p(l)$ احتمال یافتن یک خط قطری به طول مشخص 1 بوده و به صورت رابطه‌ی (۱۰) به دست می‌آید.

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

۲-۳-۶- لامیناریتی

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

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

استفاده از جعبه‌ابزار CRP تعیین شده است [۱۷]. بعد محاط بهینه و زمان تاخیر بهینه، پارامترهای مورد نیاز برای تعیین نگاشت بازخداد و ویژگی‌های آشوبی RQA بوده که به ترتیب با استفاده از الگوریتم نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب و الگوریتم اطلاعات متقابل تخمین زده شده است [۱۸].

۲-۳-۱- نرخ بازخداد

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

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

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

۲-۳-۲- قطعیت

قطعیت یا پیش‌بینی‌پذیری از ویژگی‌های مبنی بر هیستوگرام خطوط قطری است و به صورت نسبت نقاط بازخدادی که ساختارهای قطری با حداقل طول را تشکیل می‌دهند به تمام نقاط بازخداد، مطابق رابطه‌ی (۳) تعریف می‌شود [۱۰].

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

در این رابطه 1 طول ساختار قطری، l_{min} حداقل طول ساختارهای قطری، N طول سری زمانی و P هیستوگرام طول ساختارهای قطری است. هیستوگرام خطوط قطری به صورت رابطه‌ی (۴) محاسبه می‌شود.

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

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

در این رابطه نماد ε برای سادگی در اندازه‌گیری‌های RQA حذف می‌شود.

۲-۳-۳- متوسط طول قطری

متوسط طول قطری یکی از ویژگی‌های مربوط به خطوط قطری بوده و بر اساس هیستوگرام خطوط قطری به دست می‌آید. یک

به دلیل حرکت مماسی احتمالی، برخی از نقاط بازخداد در R_i مربوط به زمان‌های بازخداد $T_k^{(1)}=1$ هستند. برای به دست آوردن نقاط بازخداد واقعی، تمام نقاط بازخداد متوالی با $T_k^{(1)}=1$ از مجموعه‌ی R_i حذف شده و مجموعه‌ی جدیدی به صورت رابطه‌ی (۱۷) به دست می‌آید.

$$R_i' = \{\vec{x}_{j_1}, \vec{x}_{j_2}, \dots\} \quad (17)$$

سپس زمان‌های بازخداد نوع دوم از نقاط بازخداد باقی‌مانده (R_i') به صورت رابطه‌ی (۱۸) [۱۰] یا به صورت رابطه‌ی (۱۹) از نقاط بازخداد (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 بازخداد نوع دوم، فاصله‌ی زمانی بین شروع ساختارهای بازخداد عمودی متوالی در نگاشت بازخداد را اندازه می‌گیرد.

۲-۳-۱۰- آنتروپی تراکم دوره‌ی بازخداد

آنتروپی تراکم دوره‌ی بازخداد^۲ (RPDE) آنتروپی نرمال شده‌ی توزیع زمان بازخداد سری زمانی بوده [۱۹] و درجه‌ی پیچیدگی یک سامانه را نشان می‌دهد [۲۰]. این پارامتر به صورت رابطه‌ی (۲۰) به دست می‌آید [۲۱].

$$H_{norm} = \frac{-\sum_{i=1}^{T_{max}} P(i) \ln P(i)}{\ln T_{max}} \quad (20)$$

در این رابطه T_{max} بیش‌ترین زمان بازخداد و P تراکم احتمال زمان بازخداد است و با رابطه‌ی (۲۱) به دست می‌آید [۲۱].

$$P(T) = \frac{R(T)}{\sum_{i=1}^{T_{max}} R(i)} \quad (21)$$

در این رابطه $R(T)$ هیستوگرام زمان‌های بازخداد است.

۲-۳-۱۱- ضریب خوشه‌بندی

ضریب خوشه‌بندی یکی از ویژگی‌هایی است که شبکه‌ی پیچیده‌ی بازخداد را توصیف می‌کند. این شبکه از گره‌ها و یال‌هایی تشکیل شده که گره‌ها نشان دهنده‌ی بردارهای فضای حالت و یال‌ها نشان دهنده‌ی بازخدادها هستند.

$$A_{ij} = A_{ji} = \begin{cases} 1, & (i, j) \in E \\ 0, & (i, j) \notin E \end{cases} \quad (22)$$

در این رابطه v طول ساختار عمودی، v_{min} حداقل طول ساختارهای عمودی، N طول سری زمانی و P هیستوگرام طول ساختارهای عمودی است. تعداد کل خطوط عمودی به طول v در نگاشت بازخداد به صورت هیستوگرام خطوط عمودی مطابق رابطه‌ی (۱۲) محاسبه می‌شود.

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

۲-۳-۷- زمان در دام افتادن

زمان در دام افتادن^۱ (TT) به صورت میانگین طول ساختارهای عمودی و مطابق رابطه‌ی (۱۳) به دست می‌آید.

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

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

۲-۳-۸- طول بلندترین خط عمودی

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

$$V_{max} = \max(\{v_i\}_{i=1}^{N_v}) \quad (14)$$

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

۲-۳-۹- زمان‌های بازخداد

زمان‌های بازخداد را می‌توان به طور مستقیم از نگاشت بازخداد به دست آورد. ابتدا مجموعه‌ی نقاطی از مسیر که در همسایگی ϵ از نقطه‌ی دلخواه قرار می‌گیرند، به صورت رابطه‌ی (۱۵) در نظر گرفته می‌شود.

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

در این رابطه \vec{x} مسیر، ϵ همسایگی و i نقطه‌ی دلخواه است. عناصر این مجموعه، مربوط به نقاط بازخداد ستون i -ام $\{R_{i,j}\}_{j=1}^N$ از یک نگاشت بازخداد است. زمان‌های بین این نقاط بازخداد، زمان‌های بازخداد نوع اول بوده و به صورت رابطه‌ی (۱۶) به دست می‌آیند.

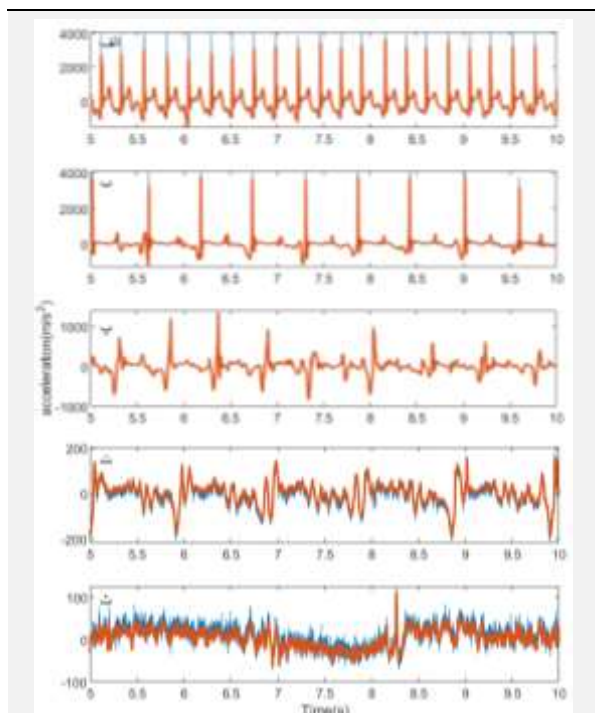
$$\{T_k^{(1)} = j_{k+1} - j_k\}_{k \in N} \quad (16)$$

^۲ Recurrence Period Density Entropy

^۱ Trapping Time



بین مقدار نمونه‌های پشت سر هم سری زمانی شتاب کاهش یافته، تعداد نقاط بازخداد افزایش یافته است. تماس‌های بین انگشتان در نگاشت بازخداد به صورت نوارهای سفید رنگ عمودی و افقی ظاهر شده که هر چقدر فرکانس تماس‌ها بیشتر بوده، ضخامت نوارهای سفید بیشتر 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 شده است. در شکل (۴) نمودارهای جعبه‌ای این ویژگی‌ها بر حسب سطوح بیماری پارکینسون رسم شده است. روند تغییرات برای هر یک از ویژگی‌ها نیز در جدول (۱) خلاصه شده است. در نگاشت بازخداد با پیشرفت سطح بیماری، تعداد کل نقاط نگاشت ثابت بوده اما تعداد کل نقاط بازخداد و در نتیجه ویژگی نرخ بازخداد افزایش یافته است. همچنین از آنجا که با پیشرفت سطح بیماری علاوه بر افزایش تعداد کل نقاط بازخداد، تعداد و طول خطوط قطری به نسبت بیشتری افزایش یافته، ویژگی قطعیت با پیشرفت سطح بیماری افزایش یافته است. به علاوه با پیشرفت سطح بیماری، به دلیل افزایش تعداد و طول خطوط قطری، ویژگی‌های متوسط طول خطوط قطری و طول بلندترین خط قطری افزایش یافته است.



شکل (۲) - نمونه‌ی داده‌ی شتاب به ترتیب برای الف) فرد سالم، ب) بیمار سطح ۱، پ) بیمار سطح ۲، ت) بیمار سطح ۳ و ث) بیمار سطح ۴ به صورت خام (به رنگ آبی) و پس از اعمال حذف-روند و فیلتر میان‌گذر (به رنگ قرمز)

در این رابطه A ماتریس مجاورت، i و j گره‌های عضو V مجموعه‌ی رئوس و E مجموعه‌ی یال‌های شبکه است. ضریب خوشه‌بندی، احتمال این است که دو بازخداد از هر حالتی، همسایه باشند [۲۲] و با رابطه‌ی (۲۳) به دست می‌آید [۱۷].

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j,k=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} R_{j,k}^{m,\varepsilon} R_{k,i}^{m,\varepsilon}}{RR_i} \quad (23)$$

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

۲-۳-۱۲- گذرایی

گذرایی، احتمال این است که دو همسایه‌ی یک حالت نیز همسایه باشند [۲۳] و رابطه‌ی بین سه گره را به صورت رابطه‌ی (۲۴) بیان می‌کند [۲۲].

$$A_{ij} = A_{ik} = 1, A_{jk} = 1 \quad (24)$$

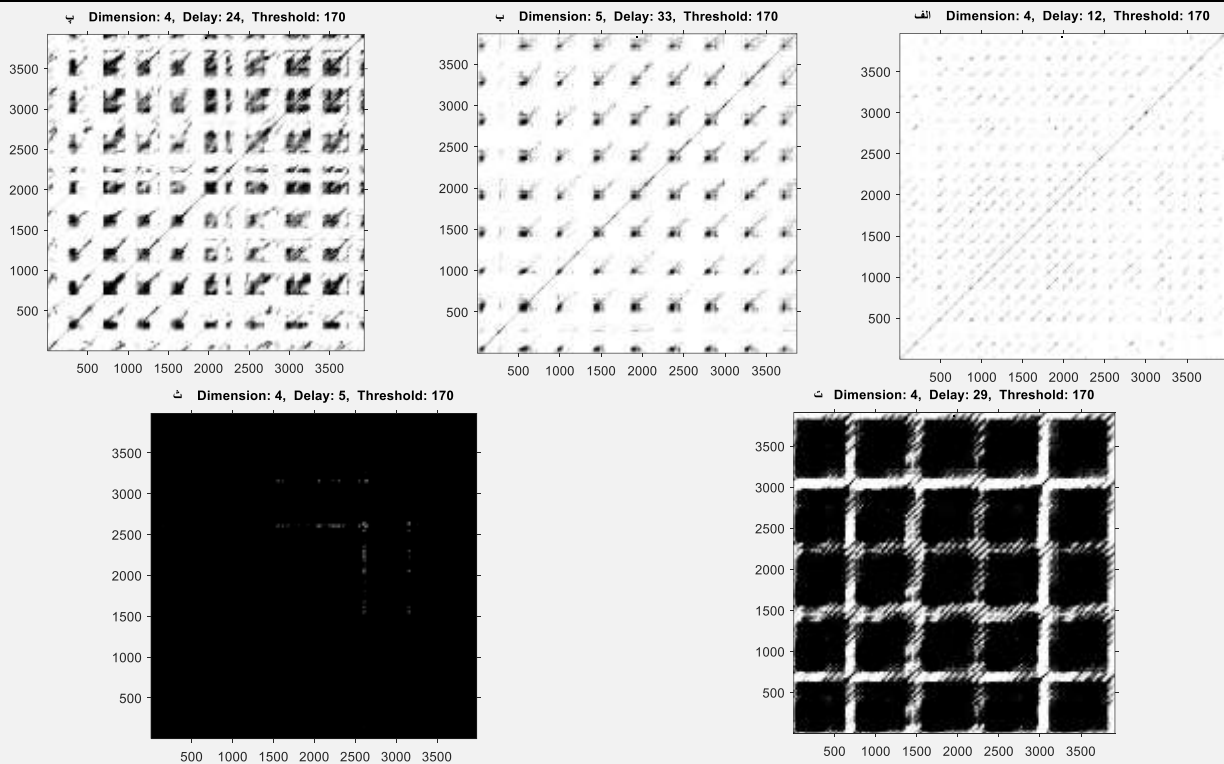
در این رابطه i ، j و k گره‌های عضو V مجموعه‌ی رئوس هستند. ویژگی گذرایی به صورت رابطه‌ی (۲۵) به دست می‌آید [۱۷].

$$C = \frac{\sum_{i,j,k=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} R_{j,k}^{m,\varepsilon} R_{k,i}^{m,\varepsilon}}{\sum_{i,j,k=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} R_{k,i}^{m,\varepsilon}} \quad (25)$$

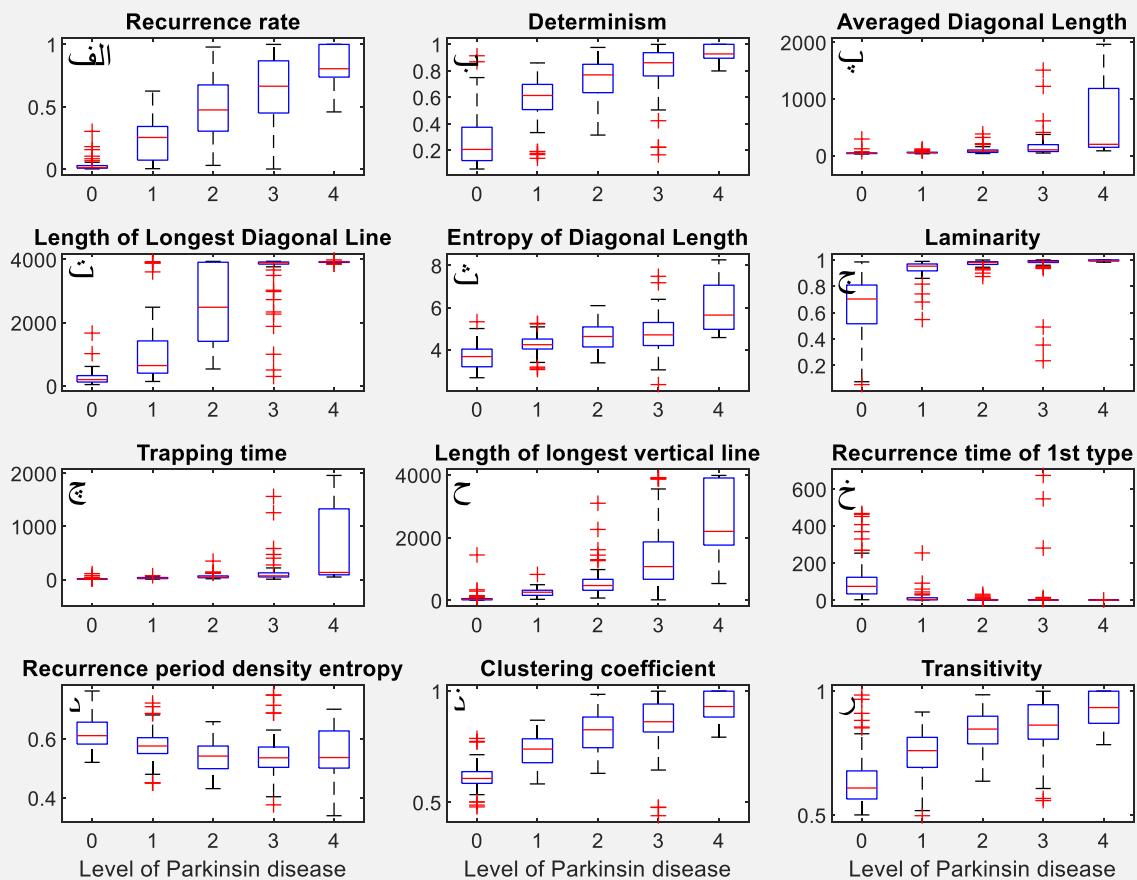
۳- یافته‌ها و بحث

در شکل (۲) نمونه‌ی داده‌ی شتاب به ترتیب از بالا به پایین برای فرد سالم، بیمار سطح ۱، بیمار سطح ۲، بیمار سطح ۳ و بیمار سطح ۴ به صورت خام و نیز پس از اعمال کاهش روند و فیلتر میان‌گذر ارائه شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سطح بیماری پارکینسون، تعداد نواخت‌ها کاهش، فاصله‌ی بین نواخت‌ها افزایش، دامنه‌ی شتاب کاهش، بی‌نظمی افزایش و لرزش در حین نواخت افزایش یافته است. همچنین با افزایش سطح بیماری پارکینسون، دامنه در فرکانس‌های بالا کاهش یافته است. فرکانس‌های بالا نشان دهنده‌ی 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 نمونه‌ی دادگان فرد سالم و بیمارانی سطوح ۱ تا ۴ به ازای بعد محاط بهینه، زمان تاخیر بهینه، آستانه‌ی ۱۷۰ و نرم اقلیدسی رسم شده است. مشاهده می‌شود که 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، تعداد و طول خطوط عمودی افزایش، تعداد مربعات بازخداد کاهش و مساحت آن‌ها افزایش یافته است. از آنجا که با پیشرفت سطح بیماری، دامنه‌ی شتاب و فاصله‌ی



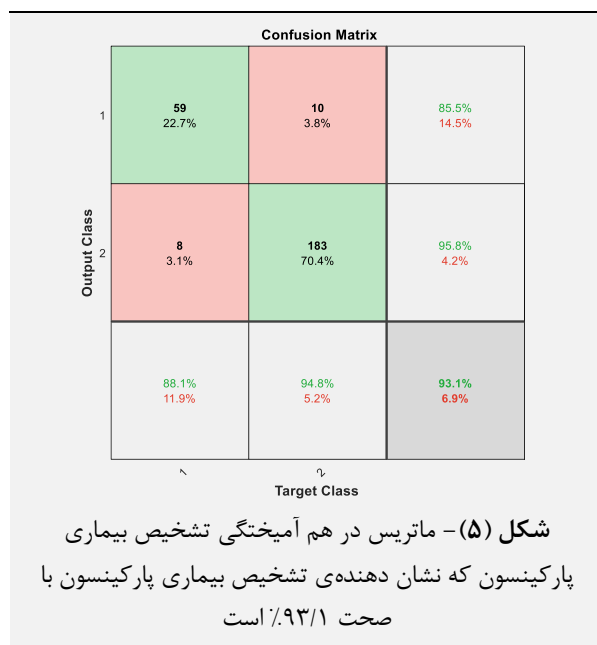
شکل (۳) - نگاهت بازرخداد (الف) فرد سالم، (ب) بیمار سطح ۱، (پ) بیمار سطح ۲، (ت) بیمار سطح ۳ و (ث) بیمار سطح ۴، مقادیر تعیین شده برای بعد و تاخیر در هر مورد در عنوان شکل مشخص شده است



شکل (۴) - نمودار جعبه‌ای ویژگی‌های RQA بر حسب شدت بیماری برای الف) ویژگی نرخ بازرخداد، ب) قطعیت، پ) متوسط طول خطوط قطری، ت) طول بلندترین خط قطری، ث) آنتروپی طول خطوط قطری، ج) لامیناریتی، چ) زمان در دام افتادن، ح) طول بلندترین خط عمودی، خ) زمان بازرخداد نوع اول، د) آنتروپی چگالی دوره‌ی بازرخداد، ذ) ضریب خوشه‌بندی و ر) گذرایی



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



سپس دادگان گروه سالم در کلاس یک و دادگان سطوح ۱ تا ۴ بیماری پارکینسون در کلاس‌های دو تا پنج در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های مناسب برای طبقه‌بندی پنج-کلاسی دادگان سطوح مختلف بیماری پارکینسون با استفاده از روش به کار رفته در طبقه‌بندی دو-کلاسی انتخاب شده است. طبقه‌بند ماشین بردار پشتیبان با ویژگی‌های مناسب انتخاب شده و با در نظر گرفتن ۱۰ fold آموزش داده شده و دادگان با صحت ۶۸/۱٪ طبقه‌بندی شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش نگاشت‌های بازخداد دادگان شتاب حاصل از آزمون نواخت انگشتان مربوط به فرد سالم و بیماران پارکینسون

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
آنترویی 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
آنترویی تراکم دوره‌ی بازخداد	بدون روند
ضریب خوشه‌بندی	افزایشی
گذرایی	افزایشی

در نگاشت بازخداد با پیشرفت سطح بیماری، تعداد و طول خطوط قطری افزایش و در نتیجه احتمال یافتن یک خط قطری به طول مشخص 1 و آنترویی طول خطوط قطری افزایش یافته و در نتیجه پیچیدگی سامانه بیش‌تر شده است. هم‌چنین با پیشرفت سطح بیماری، تعداد کل نقاط بازخداد و تعداد و طول خطوط عمودی افزایش یافته اما از آن‌جا که افزایش نسبی تعداد نقاط بازخداد تشکیل دهنده‌ی ساختارهای عمودی بیش‌تر از افزایش نسبی تعداد کل نقاط بازخداد می‌باشد، مقدار ویژگی ساختار لایه‌ای با پیشرفت سطح بیماری افزایش یافته است. به علاوه از آن‌جا که با پیشرفت سطح بیماری، تعداد و طول خطوط عمودی افزایش یافته ویژگی‌های زمان در دام افتادن و طول بلندترین خط عمودی افزایش یافته است.

مقدار p حاصل از تحلیل ANOVA برای مقایسه‌ی هر یک از ویژگی‌ها در بین سطوح مختلف بیماری در بازه‌ی اعداد کوچک‌تر از ۰/۰۰۱ به دست آمده 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.

برای ارزیابی کارایی ویژگی‌های مد نظر در این مقاله، طبقه‌بندی دو و پنج سطحی بیماری مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا دادگان سطوح مختلف بیماری پارکینسون به دو گروه تقسیم شده است. دادگان گروه سالم در کلاس یک و دادگان بیماران سطوح ۱، ۲، ۳ و ۴ در کلاس دو در نظر گرفته



- 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.
- [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. Miroshnichenko, 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

سطوح ۱ تا ۴ بررسی شده و ویژگی‌های RQA آن‌ها مورد ارزیابی تحلیلی و هم‌چنین ارزیابی آماری با استفاده از تحلیل ANOVA قرار گرفته است. با پیش‌رفت سطح بیماری، بازخداد بیش‌تری روی داده 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 یافته است. تعداد ۱۱ مورد از ویژگی‌های RQA دارای روند تغییرات در بین سطوح بیماری بوده است. تفاوت‌های معناداری در بین الگوهای نگاشت‌های بازخداد سطوح مختلف بیماری و ویژگی‌های RQA آن‌ها مشاهده شده است. در نتیجه‌ی این پژوهش مشخص شده است که نگاشت بازخداد و ویژگی‌های RQA توانایی آشکار ساختن الگوهای پنهان در پویایی دادگان آزمون نواخت انگشتان را داشته و می‌توان از آن‌ها به منظور تشخیص سطوح بیماری پارکینسون استفاده کرد.

	1	2	3	4	5	
1	59 22.7%	9 3.5%	1 0.4%	2 0.8%	0 0.0%	83.1% 16.9%
2	6 2.3%	29 11.2%	6 2.3%	2 0.8%	0 0.0%	67.4% 32.6%
3	0 0.0%	14 5.4%	46 17.7%	12 4.6%	1 0.4%	63.0% 37.0%
4	2 0.8%	2 0.8%	13 5.0%	40 15.4%	10 3.8%	59.7% 40.3%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	3 1.2%	3 1.2%	50.0% 50.0%
	88.1% 11.9%	53.7% 46.3%	69.7% 30.3%	67.8% 32.2%	21.4% 78.6%	68.1% 31.9%
	1	2	3	4	5	

شکل (۶) - ماتریس در هم آمیختگی طبقه‌بندی دادگان سطوح بیماری پارکینسون در ۵ کلاس به ازای گروه سالم و سطوح ۱ تا ۴ بیماری که به صحت بازشناسی ۶۸/۱٪ منجر شده است

۵- 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

- [19] R. B. J. Brinkgreve and S. Kumarswamy, "Reference Manual Reference Manual," Technology (Singap World Sci), vol. 1, no. November, pp. 720–766, 2008.
- [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.
- 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://tocsy.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.