

Chaotic Analysis of Human Random Number Generation: A Novel Approach for Identifying Age-Related Cognitive Differences

Esmaili Jami, Ali¹ / Mikaeili, Mohammad² / Noroozian, Maryam³ / Mazrooei Rad, Elias^{1*}

¹ - Department of Biomedical Engineering, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

² - Department of Biomedical Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

³ - Department of Psychiatry, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

DOI: 10.22041/ijbme.2026.2088472.2029

Received: 11-5-2026

Revised: 24-7-2026

Accepted: 30-7-2026

KEYWORDS

*Human random number generation
chaotic analysis
recurrence plots
fractal dimensions
cognitive aging*

ABSTRACT

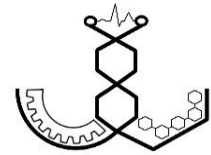
Human Random Number Generation (RNG) engages several components of executive functions, including working memory, response inhibition, and cognitive flexibility. Human-generated numerical sequences can be conceptualized as bio cognitive signals with chaotic properties. The complexity reduction hypothesis suggests that aging is associated with a decline in the dynamical complexity of cognitive systems. The present study aimed to quantify these dynamical changes in healthy young and older adults using nonlinear dynamical analyses. Thirty healthy participants, including 15 young adults and 15 older adults, were recruited. Each participant performed a Random Number Generation task producing a sequence of 200 numbers (1–9). The resulting time series were analyzed using phase space reconstruction. Measures from Recurrence Quantification Analysis (RQA) and fractal analysis were extracted. Group classification was performed using a Support Vector Machine (SVM). Compared with the young group, the older group showed significantly higher values of Determinism (DET), Mean Diagonal Line Length (L), and Laminarity (LAM), indicating increased repetitive patterns and reduced behavioral variability. The correlation dimension and Lyapunov exponent were significantly lower in the older group, suggesting reduced dynamical complexity and lower sensitivity to initial conditions. The Hurst exponent was higher in the older group, reflecting stronger long range correlations and decreased randomness. The classification accuracy between the two groups reached 91.3%. These findings provide quantitative evidence supporting the complexity reduction hypothesis in cognitive aging. Given its simplicity and low cost, this approach may offer a promising basis for developing cognitive screening tools for older adults.

***Corresponding Author**

Address: Department of Biomedical Engineering, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

E-Mail: elias_mazrooei@yahoo.com





تحلیل آشوبی تولید اعداد تصادفی انسانی: رویکردی نوین برای شناسایی تفاوت‌های شناختی وابسته به سن

اسماعیلی جامی، علی^۱ / میکائیلی، محمد^۲ / نوروزیان، مریم^۳ / مزروعی راد، الیاس^{۱*}

^۱-گروه مهندسی پزشکی، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران

^۲-گروه مهندسی پزشکی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

^۳-گروه روانپزشکی، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

مشخصات مقاله

شناسه‌ی دیجیتال: 10.22041/ijbme.2026.2088472.2029

پذیرش: ۱۴۰۵/۵/۸

بازنگری: ۱۴۰۵/۵/۲

ثبت در سامانه: ۱۴۰۵/۲/۲۱

واژه‌های کلیدی	چکیده
تولید اعداد تصادفی انسانی تحلیل آشوبی نمودارهای بازگشتی ابعاد فرکتالی سالمندی شناختی	تولید اعداد تصادفی انسانی چندین مؤلفه کارکردهای اجرایی شامل حافظه کاری، بازداری پاسخ و انعطاف‌پذیری شناختی را درگیر می‌سازد. توالی‌های عددی تولیدشده توسط انسان را می‌توان به‌مثابه سیگنال‌های زیستی-شناختی با ماهیت آشوب‌گونه در نظر گرفت. فرضیه کاهش پیچیدگی مطرح می‌سازد که سالمندی با کاهش پیچیدگی دینامیکی سیستم‌های شناختی همراه است. هدف پژوهش حاضر، کمی‌سازی این تغییرات دینامیکی در دو گروه سنی جوان و سالمند سالم با بهره‌گیری از تحلیل‌های آشوبی بود. در این مطالعه ۳۰ شرکت‌کننده سالم شامل ۱۵ فرد جوان و ۱۵ فرد سالمند انتخاب شدند. هر شرکت‌کننده به تولید متوالی ۲۰۰ عدد تصادفی (از ۱ تا ۹) پرداخت. سری‌های زمانی حاصل با روش بازسازی فضای فاز تحلیل شدند. شاخص‌هایی در حوزه نمودار بازگشتی و فرکتالی استخراج گردید. طبقه‌بندی گروه‌ها با ماشین بردار پشتیبان انجام شد. گروه سالمند در مقایسه با گروه جوان، مقادیر معناداری بالاتر در شاخص‌های قطعیت، میانگین طول خطوط قطری و لیمیناریتی نشان داد که حاکی از افزایش الگوهای تکراری و کاهش تنوع رفتاری است. بعد همبستگی و نمای لیاپانوف در گروه سالمند به‌طور معناداری کمتر بود که نشان‌دهنده کاهش پیچیدگی دینامیکی و حساسیت کمتر به شرایط اولیه است. نمای هرست در گروه سالمند بالاتر بود که بیانگر افزایش همبستگی بلندمدت و کاهش تصادفی‌بودن است. صحت طبقه‌بندی دو گروه برابر ۹۱.۳ درصد به دست آمد. یافته‌های این پژوهش شواهد کمی جدیدی در تأیید فرضیه کاهش پیچیدگی سیستم‌های شناختی در سالمندی ارائه می‌دهد. با توجه به سادگی اجرا و هزینه پایین، این رویکرد پتانسیل قابل توجهی برای توسعه ابزارهای غربالگری شناختی در سالمندان دارد.

*نویسنده‌ی مسئول

نشانی: گروه مهندسی پزشکی، موسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران

پست الکترونیک: elias_mazrooei@yahoo.com



۱- مقدمه

تولید اعداد تصادفی انسانی (Human Random Number Generation; HRNG) یکی از پارادایم‌های تجربی معتبر و پرکاربرد در حوزه علوم اعصاب شناختی و روان‌شناسی تجربی است که طی بیش از نیم قرن، به‌عنوان ابزاری ارزشمند برای سنجش کارکردهای اجرایی مورد استفاده قرار گرفته است [۲، ۱]. علی‌رغم سادگی ظاهری دستورالعمل این تکلیف (اعدادی را به‌صورت تصادفی بیان کنید)، اجرای موفقیت‌آمیز آن مستلزم هماهنگی هم‌زمان چندین فرآیند شناختی سطح بالا شامل حافظه کاری (برای نگهداری و پایش اعداد قبلی)، بازداری پاسخ (برای سرکوب الگوهای شمارشی خودکار)، انعطاف‌پذیری شناختی (برای تغییر مداوم استراتژی انتخاب) و نظارت عملکرد (برای ارزیابی لحظه‌ای میزان تصادفی بودن خروجی) است [۴، ۳]. این ویژگی منحصر به فرد، HRNG را به یک آزمون چندبعدی کارکردهای اجرایی تبدیل کرده است که حساسیت قابل توجهی به آسیب‌های لوب فرونتال و اختلالات شناختی نشان می‌دهد [۵].

از منظر نظریه اطلاعات و آمار کلاسیک، یک توالی کاملاً تصادفی باید فاقد هرگونه الگوی قابل پیش‌بینی، وابستگی سریالی یا ساختار تکراری باشد. با این حال، دهه‌ها پژوهش تجربی به‌طور یکپارچه نشان داده‌اند که انسان‌ها قادر به تولید توالی‌های واقعاً تصادفی نیستند [۶]. توالی‌های عددی تولیدشده توسط انسان حاوی سوگیری‌های نظام‌مند متعددی هستند: اجتناب از تکرار فوری (Repetition Avoidance)، ترجیح برای تناوب (Alternation Bias)، الگوهای شمارشی پنهان و همبستگی‌های زمانی بلندمدت [۷، ۸]. این «شکست» در تصادفی‌سازی، نه یک نقص ساده، بلکه پنجره‌ای ارزشمند به معماری کارکردی سیستم شناختی است و اطلاعات غنی درباره فرآیندهای زیربنایی تصمیم‌گیری و کنترل اجرایی فراهم می‌آورد.

رویکردهای سنتی تحلیل HRNG عمدتاً مبتنی بر شاخص‌های خطی و آماری کلاسیک بوده‌اند. معیارهایی نظیر شاخص تکرار (Repetition Index)، شاخص شمارش (Counting Index)، آنتروپی شانون (Shannon Entropy) و شاخص تصادفی بودن (Randomness Index) از جمله متداول‌ترین ابزارهای ارزیابی در این حوزه هستند [۹، ۱۰]. اگرچه این شاخص‌ها اطلاعات مفیدی درباره توزیع فراوانی و الگوهای محلی فراهم می‌کنند، اما محدودیت‌های ذاتی در آشکارسازی ساختارهای دینامیکی پیچیده، وابستگی‌های غیرخطی و تغییرات ظریف در پویایی

زمانی سیستم دارند [۱۱]. این محدودیت، ضرورت به‌کارگیری رویکردهای تحلیلی نوین را برجسته می‌سازد.

نظریه آشوب و دینامیک غیرخطی در دهه‌های اخیر به‌عنوان چارچوب مفهومی و روش‌شناختی قدرتمندی برای مطالعه سیستم‌های پیچیده زیستی و شناختی ظهور کرده‌اند [۱۲]. بر اساس این چارچوب، بسیاری از سیستم‌های زیستی از جمله مغز انسان، رفتاری قطعی ولی غیرقابل پیش‌بینی از خود نشان می‌دهند؛ به این معنا که خروجی آن‌ها توسط قواعد دینامیکی مشخصی تعیین می‌شود، اما به دلیل حساسیت شدید به شرایط اولیه (که با نمای لیاپانوف λ اندازه‌گیری می‌شود)، پیش‌بینی بلندمدت عملاً ناممکن است [۱۳]. از این منظر، توالی‌های HRNG را می‌توان نه به‌عنوان خروجی یک فرآیند تصادفی محض، بلکه به‌مثابه سیگنال‌های زیستی-شناختی با ماهیت آشوب‌گونه مفهوم‌سازی کرد که ویژگی‌های دینامیکی سیستم شناختی مولد را در خود منعکس می‌سازند [۱۴].

ابزارهای تحلیلی متعددی برای کمی‌سازی ویژگی‌های دینامیکی سیستم‌های آشوبی توسعه یافته‌اند. تحلیل کمی نمودارهای بازگشتی (Recurrence Quantification Analysis; RQA) یکی از روش‌های مؤثر و کاربردی در این زمینه است که از طریق بازسازی فضای فاز و ترسیم نمودار بازگشتی، امکان استخراج شاخص‌های کمی متنوعی را فراهم می‌آورد [۱۵، ۱۶]. این شاخص‌ها شامل نرخ بازگشت (Recurrence Rate; RR) که میزان کلی بازگشت مسیر به نواحی قبلی فضای فاز را نشان می‌دهد، قطعیت (Determinism; DET) که نسبت نقاط بازگشتی واقع بر خطوط قطری را اندازه می‌گیرد، آنتروپی (Entropy; ENTR) که پیچیدگی توزیع طول خطوط قطری را کمی می‌کند، لمیناریتی (Laminarity; LAM) که میزان حضور در حالت‌های پایدار را منعکس می‌سازد، و میانگین طول خطوط قطری (Average Diagonal Line Length; L) که مدت زمان پیش‌بینی‌پذیری محلی را نشان می‌دهد، هستند [۱۷].

در کنار RQA، شاخص‌های فرکتالی نیز اطلاعات ارزشمندی درباره پیچیدگی و خودتشابهی سیگنال‌های زیستی فراهم می‌آورند. بُعد همبستگی (D_2) به‌عنوان تخمینی از بُعد جاذب عجیب پیچیدگی هندسی مسیر سیستم در فضای فاز را کمی می‌کند؛ مقادیر بالاتر نشان‌دهنده فضای حالت غنی‌تر و رفتار پیچیده‌تر است [۱۸]. نمای هرست (H) میزان همبستگی بلندمدت در سری زمانی را اندازه‌گیری می‌کند؛ مقادیر نزدیک به ۰.۵ نشان‌دهنده رفتار نزدیک به تصادفی و مقادیر دورتر از ۰.۵ حاکی از وجود حافظه بلندمدت در سیستم است [۱۹].



نمای لیپانوف (۸) نیز حساسیت سیستم به شرایط اولیه و میزان آشوبناکی آن را کمی می‌کند [۲۰].

فرآیند سالمندی با تغییرات گسترده‌ای در ساختار و عملکرد سیستم عصبی مرکزی همراه است که پیامدهای شناختی متعددی به همراه دارد. کاهش حجم ماده خاکستری در قشر پره‌فرونتال، افت یکپارچگی ماده سفید، کاهش سطوح انتقال‌دهنده‌های عصبی (به‌ویژه دوپامین) و تغییرات در الگوهای اتصال کارکردی شبکه‌های مغزی از جمله تغییرات مستند هستند [۲۲، ۲۱]. در سطح شناختی، این تغییرات به‌صورت کاهش سرعت پردازش، افت حافظه کاری، کاهش انعطاف‌پذیری شناختی و اختلال در کارکردهای اجرایی تجلی می‌یابد [۲۴، ۲۳].

از منظر نظریه سیستم‌های دینامیکی، فرضیه کاهش پیچیدگی که نخستین بار توسط Lipsitz و Goldberger در سال ۱۹۹۲ مطرح شد، چارچوب نظری مهمی برای درک تغییرات وابسته به سن فراهم می‌آورد [۲۵]. بر اساس این فرضیه، سالمندی و بیماری با کاهش پیچیدگی دینامیکی سیستم‌های فیزیولوژیکی و شناختی همراه است. این کاهش پیچیدگی، که در سیستم‌های متعددی از جمله تغییرپذیری ضربان قلب، کنترل وضعیت بدن و نوسانات الکتروانسفالوگرافی مستند شده است [۲۷، ۲۶]، منجر به کاهش ظرفیت سازگاری با تقاضاهای محیطی متغیر و افت انعطاف‌پذیری کارکردی می‌شود. در سطح رفتاری-شناختی، این تغییرات به‌صورت افزایش قابلیت پیش‌بینی، کاهش تنوع و افزایش کلیشه‌ای شدن در خروجی‌های شناختی بروز می‌کند [۲۸].

مطالعات پیشین با استفاده از شاخص‌های سنتی نشان داده‌اند که عملکرد در تکلیف HRNG به‌طور معناداری تحت تأثیر سن قرار می‌گیرد؛ سالمندان توالی‌هایی با تکرار بیشتر، الگوهای شمارشی فراوان‌تر و تنوع ساختاری کمتر تولید می‌کنند [۳۰، ۲۹]. با این حال، کاربرد نظام‌مند و ترکیبی روش‌های تحلیل غیرخطی شامل RQA و شاخص‌های فرکتالی برای بررسی تفاوت‌های شناختی وابسته به سن در HRNG، به‌ویژه در جمعیت ایرانی، به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این خلأ پژوهشی از آن جهت اهمیت دارد که روش‌های غیرخطی می‌توانند تغییرات ظریف در دینامیک زیربنایی فرآیندهای شناختی را که با معیارهای خطی قابل آشکارسازی نیستند، شناسایی نمایند.

از سوی دیگر، با توجه به روند فزاینده سالمندی جمعیت و افزایش بار فردی، اجتماعی و اقتصادی اختلالات شناختی وابسته به سن، توسعه ابزارهای غربالگری شناختی زود هنگام،

ساده، کم‌هزینه و غیرتهاجمی به یکی از اولویت‌های اصلی پژوهش‌های علوم اعصاب شناختی تبدیل شده است [۳۱]. بسیاری از آزمون‌های نوروسایکولوژیک رایج، نیازمند زمان اجرا طولانی، آموزش تخصصی آزمون‌گر و همکاری فعال آزمودنی هستند و در مراحل اولیه افت شناختی، حساسیت محدودی دارند. در این میان، تکلیف HRNG به‌دلیل سادگی اجرا، کوتاه‌بودن زمان انجام، استقلال نسبی از سواد و فرهنگ، و قابلیت پیاده‌سازی دیجیتال، گزینه‌ای جذاب برای غربالگری شناختی محسوب می‌شود [۳۲].

با این حال، بهره‌برداری بالینی و پژوهشی مؤثر از HRNG مستلزم استفاده از روش‌های تحلیلی است که قادر به استخراج حداکثر اطلاعات نهفته در ساختار زمانی توالی‌های تولیدشده باشند. تحلیل‌های غیرخطی و آشوبی، با تمرکز بر ویژگی‌های دینامیکی سیگنال، این امکان را فراهم می‌آورند که HRNG نه صرفاً به‌عنوان یک تکلیف رفتاری، بلکه به‌مثابه بازتابی از سازمان‌دهی پویای سیستم شناختی مورد بررسی قرار گیرد. شواهد فزاینده‌ای نشان می‌دهند که شاخص‌های آشوبی، حتی در تکالیف ساده رفتاری، قادر به آشکارسازی تفاوت‌های ظریف شناختی هستند و قدرت تمایزبخشی بالاتری نسبت به معیارهای خطی کلاسیک دارند [۳۴، ۳۳]. علی‌رغم این ظرفیت بالقوه، تاکنون مطالعات اندکی به بررسی هم‌زمان و یکپارچه شاخص‌های RQA و ابعاد فرکتالی در تکلیف HRNG برای مقایسه افراد جوان و سالمند سالم پرداخته‌اند [35-36]. در مطالعات پیشین، تولید اعداد تصادفی انسانی عمدتاً از دو منظر بررسی شده است. جوکار و میکائیلی در سال ۲۰۱۲ دنباله‌های تولیدشده توسط افراد را به‌عنوان یک ویژگی رفتاری/زیستی بررسی کردند و نشان دادند که الگوهای تولید تصادفی انسان، با وجود ظاهر تصادفی، حاوی مؤلفه‌های فردمحور هستند که می‌توانند برای تمایز افراد و راستی‌آزمایی زیستی به کار روند. در این مطالعه، افراد اعداد را به‌صورت شفاهی یا از طریق ضربه‌زدن روی صفحه‌کلید تولید کردند و سپس با استخراج ویژگی‌های سیگنال و تحلیل حوزه زمان-فرکانس، تفاوت‌های بین‌فردی بررسی شد. تمرکز اصلی این مقاله بر قابلیت تفکیک افراد بود، نه بر مدل‌سازی ساختار پنهان توالی‌ها از دیدگاه الگوهای تکرارشونده و پیچیدگی زمانی [35].

از سوی دیگر، Schulz و همکاران (۲۰۱۲) رویکردی الگو-محور برای تحلیل دنباله‌های تولیدشده توسط انسان ارائه کردند. در این پژوهش، به جای اتکا به سنج‌های کلاسیک تصادفی بودن، نویسندگان تلاش کردند الگوهای تکرارشونده و قابل پیش‌بینی در دنباله‌ها را شناسایی کنند و با استفاده از معیار فاصله‌ی

ویرایشی، شباهت بین زیرتوالی‌ها را بسنجند. نتایج این مقاله نشان داد که دنباله‌های انسانی، برخلاف تصور رایج، کاملاً تصادفی نیستند و می‌توان از ساختارهای تکرارشونده برای پیش‌بینی نسبی رقم بعدی و نیز شناسایی الگوهای فردی استفاده کرد [36].

مطالعات پیشین بیشتر بر تشخیص فردی یا الگوهای تکراری دنباله‌ها تمرکز داشته‌اند و نقش شاخص‌هایی نظیر بُعد همبستگی (D_2)، نمای هرست (H) و نمای لیپانوف (λ) در تبیین تغییرات وابسته به سن در پویایی شناختی HRNG، به‌طور نظام‌مند بررسی نشده است. افزون بر این، شواهد کمی در خصوص توان این شاخص‌ها برای تفکیک گروه‌های سنی در سطح فردی و کاربرد آن‌ها در چارچوب‌های طبقه‌بندی ماشینی وجود دارد. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف بررسی و کمی‌سازی تفاوت‌های دینامیکی ساختار سری‌های زمانی تولید اعداد تصادفی انسانی بین دو گروه سنی جوان و سالمند سالم انجام شد. در این مطالعه، با بهره‌گیری از تحلیل کمی نمودارهای بازگشتی و شاخص‌های فرکتالی، تغییرات مرتبط با پیچیدگی، قطعیت، همبستگی بلندمدت و حساسیت به شرایط اولیه مورد بررسی قرار گرفت. افزون بر تحلیل‌های آماری گروهی، توان شاخص‌های معنادار برای تفکیک دو گروه سنی با استفاده از روش‌های یادگیری ماشین نیز ارزیابی شد. انتظار می‌رود یافته‌های این پژوهش، ضمن ارائه شواهد تجربی جدید در حمایت از فرضیه کاهش پیچیدگی در سالمندی شناختی، به توسعه چارچوب‌های نوین برای ارزیابی غیرخطی عملکرد شناختی کمک کرده و گامی در جهت طراحی ابزارهای دیجیتال غربالگری شناختی مبتنی بر رفتارهای ساده اما اطلاعات‌غنی بردارد. ساختار این پژوهش بدین صورت است: ابتدا در بخش روش کار، پروتکل ثبت داده‌های تصادفی و فرآیند استخراج ویژگی‌ها در حوزه‌ی نمودارهای بازگشتی (RQA) و شاخص‌های فرکتالی تشریح می‌شود. سپس، الگوریتم طبقه‌بند و پروتکل اعتبارسنجی برای تفکیک دو گروه جوان و سالمند معرفی می‌گردد. در ادامه، یافته‌های حاصل از پژوهش ارائه شده و در بخش پایانی، به تحلیل و بحث پیرامون این نتایج پرداخته می‌شود.

۲- روش کار

این مطالعه با هدف مقایسه ساختار پویایی سری‌های زمانی تولید اعداد تصادفی در دو گروه سنی طراحی شد. این بخش شامل پروتکل جمع‌آوری داده‌ها، توصیف شرکت‌کنندگان و روش‌های استخراج ویژگی‌های آشوبی است.

۲-۱- پروتکل ثبت

پروتکل ثبت بدین گونه بود که تمام سوژه‌ها بایستی از حداقل سواد، یعنی آشنایی با اعداد، برخوردار می‌بودند به همین منظور بایستی در ابتدای آزمایش توضیحی جهت نحوه برگزاری آزمایش‌ها و مفهوم تولید اعداد تصادفی به افراد داده می‌شد. در این قسمت از تئوری کلاه و توپ استفاده شد. به این صورت که از افراد خواسته می‌شد که یک کلاه در نظر بگیرند که ۹ توپ شماره گذاری شده در آن بود. برای تولید هر عدد تصادفی بایستی یک توپ از کلاه بیرون می‌آوردند عدد نوشته شده روی توپ را می‌خواندند و توپ را به داخل کلاه بازمی‌گرداندند. به خاطر این مثال نام این پروتکل، پروتکل کلاه گذاشته شده است. پس از بیان مفهوم تصادفی بودن با مثال‌های کلاه و تاس، از سوژه درخواست می‌شد اعدادی تصادفی در بازه ۱ تا ۹ به صورت شفاهی تولید نماید. تولید اعداد تا زمانی که سوژه احساس خستگی نکرده ادامه پیدا می‌کرد و در هنگام بروز خستگی، فرد پس از چند دقیقه استراحت مجدداً به فرایند تولید عدد تصادفی ادامه می‌داد. بدین ترتیب از هر سوژه ۲۰۰ عدد تصادفی ثبت گردید.

در این مطالعه، دامنه پاسخ به اعداد ۱ تا ۹ محدود شد؛ این انتخاب با پروتکل‌های متداول در مطالعات HRNG همسو است [۳۵،۳۶]. استفاده از مجموعه‌ای محدود از ارقام باعث می‌شود بار حافظه کاری و پیچیدگی تکلیف کنترل شود و اثر راهبردهای ثانویه مانند شمارش، تکرار الگوهای آشنا یا جست‌وجوی فضای پاسخ بزرگ کاهش یابد. این موضوع به‌ویژه در پژوهش حاضر اهمیت دارد، زیرا افزایش پیچیدگی تکلیف می‌تواند نویز رفتاری تولید کند و تفسیر شاخص‌های غیرخطی و آشوبی را مخدوش سازد.

۲-۲- شرکت‌کننده‌ها

جامعه مورد مطالعه در این پژوهش شامل ۳۰ شرکت‌کننده (۱۰ زن و ۲۰ مرد) بود که داده‌های آن‌ها طی یک بازه زمانی ۴ ماهه گردآوری شد. جزئیات مربوط به توزیع جنسیتی و ویژگی‌های سنی شرکت‌کنندگان در جدول (۱) ارائه شده است. تمامی شرکت‌کنندگان از نظر سلامت عمومی مورد تأیید قرار گرفتند و هیچ‌یک سابقه اختلالات شناختی تشخیص داده شده نداشتند. شرکت‌کنندگان گروه سالمند یک غربالگری مختصر شناختی (مانند MMSE) را گذراندند تا از سلامت شناختی پایه اطمینان حاصل شود. این مطالعه با رعایت اصول اخلاقی مندرج در بیانیه هلسینکی و پس از اخذ رضایت‌نامه کتبی آگاهانه از تمامی شرکت‌کنندگان انجام شد؛ همچنین به شرکت‌کنندگان



اطمینان داده شد که اطلاعات آن‌ها محرمانه باقی می‌ماند و در هر مرحله می‌توانند بدون هیچ پیامدی از ادامه همکاری انصراف دهند.

جدول (۱): مشخصات سوژه‌ها

میانگین سنی	تعداد سوژه	وضعیت
26.1 ± 1.82	۱۵ نفر (۱۱ مرد و ۴ زن)	نرمال جوان
70.2 ± 4.67	۱۵ نفر (۹ مرد و ۶ زن)	نرمال پیر

۳-۲- روش استخراج ویژگی‌ها

برای استخراج ویژگی‌های ساختاری آشوب‌گونه، دو دسته تحلیل اصلی شامل تحلیل کمی نمودارهای بازگشتی (RQA) و تحلیل ابعاد فرکتال بر روی سری‌های زمانی بازسازی شده اعمال شد.

ماهیت آشوبی رفتار تولید اعداد تصادفی: یکی از پیشرفت‌های مهم در درک رفتار RNG، شناسایی ماهیت آشوبی قطعی این فرآیند است. برخلاف فرآیندهای تصادفی محض که کاملاً غیرقابل پیش‌بینی هستند، سیستم‌های آشوبی دارای ساختار دینامیکی پنهان هستند که می‌توان آن را از طریق روش‌های غیرخطی استخراج کرد [۷].

سیستم آشوبی دارای سه ویژگی اصلی است:

(الف) حساسیت به شرایط اولیه: تغییرات کوچک در شرایط اولیه منجر به تفاوت‌های بزرگ در رفتار بلندمدت سیستم می‌شود. این ویژگی با نمای لیپانوف مثبت مشخص می‌شود.

(ب) ساختار فرکتالی: جاذب عجیب سیستم آشوبی دارای بُعد غیرصحیح است که نشان‌دهنده خودتشابهی در مقیاس‌های مختلف است.

(ج) قطعیت: علی‌رغم ظاهر تصادفی، رفتار سیستم از قوانین دینامیکی مشخصی پیروی می‌کند.

۱-۳-۲ بازسازی فضای فاز

برای ترسیم منحنی‌های بازگشتی لازم است تراژکتوری سیستم موجود باشد و این در حالی است که در بسیاری موارد تنها یک یا چند سری زمانی در اختیار می‌باشد [14].

به عبارت دیگر اغلب، یک اندازه‌گیری گسسته در زمان، از تنها یک مشاهده موجود است. این وضعیت به سری‌های زمانی گسسته $u_i = u(i\Delta t)$ منجر می‌شود که $i=1, \dots, N$ و Δt پریود نمونه‌برداری اندازه‌گیری است. در این وضعیت، فضای فاز باید مجدداً ساخته شود. یک روش متداول به منظور بازسازی فضای فاز روش تأخیر زمانی می‌باشد که در رابطه (۱) بیان شده است:

$$\vec{x}_i^{(1)} = (u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(m-1)\tau}) \quad (1)$$

که در آن m بعد بازسازی و τ تأخیر زمانی است. تعیین مناسب این دو پارامتر اهمیت زیادی دارد؛ زیرا انتخاب تأخیر بسیار

کوچک باعث می‌شود مؤلفه‌های بردار حالت اطلاعاتی تا حد زیادی تکراری داشته باشند و نقاط بازسازی شده در نزدیکی قطر فضای حالت متمرکز شوند. در مقابل، تأخیر بسیار بزرگ می‌تواند ارتباط دینامیکی میان مؤلفه‌ها را کاهش دهد و ساختار زمانی سامانه را مخدوش کند. همچنین، انتخاب بُعدی کمتر از مقدار لازم ممکن است به روی هم افتادگی مسیرها و ایجاد همسایگی‌های کاذب منجر شود، درحالی‌که استفاده از ابعاد بیش از حد، پراکندگی داده‌ها و حساسیت تحلیل به نویز را افزایش می‌دهد. برای بازسازی فضای حالت، تأخیر زمانی با استفاده از اطلاعات متقابل میانگین و بُعد بازسازی با روش نزدیک‌ترین همسایگان دروغین تعیین شد. انتخاب اطلاعات متقابل با توجه به ماهیت بالقوه غیرخطی دنباله‌های HRNG انجام گرفت؛ زیرا برخلاف خودهمبستگی، این معیار علاوه بر وابستگی‌های خطی، وابستگی‌های غیرخطی بین $x(t)$ و $x(t+\tau)$ را نیز اندازه‌گیری می‌کند. در بُعد بازسازی، در فضای کم‌بعد، برخی نقاط صرفاً به دلیل فرافکنی، به اشتباه همسایه ظاهر می‌شوند؛ بنابراین، کمترین بُعدی که در آن درصد همسایگان دروغین به مقدار ناچیز رسید یا با افزایش بُعد تغییر محسوسی نداشت، به عنوان بُعد مناسب انتخاب شد [14]. بر این اساس، $m=3$ و $\tau=1$ به دست آمد و این مقادیر در تحلیل‌های غیرخطی بعدی استفاده شدند.

تحلیل داده‌ها صرفاً بر اساس ویژگی‌های نمودارهای بازگشتی و شاخص‌های فرکتالی انجام شد.

ویژگی‌های نمودارهای بازگشتی (RQA):

نقاط بازگشتی ($Recurrence\ Points - R_{i,j}$) هسته اصلی تحلیل بازگشت‌پذیری غیرخطی را تشکیل می‌دهند و نشان‌دهنده‌ی زمان‌هایی هستند که یک سیستم دینامیکی مجدداً به حالت‌های گذشته خود در فضای فاز بازمی‌گردد یا به همسایگی بسیار نزدیک آن‌ها وارد می‌شود. در واقع، اگر فاصله بین دو حالت از سیستم در دو زمان متفاوت کمتر از یک حد آستانه (شعاع همسایگی) باشد، یک نقطه بازگشتی ثبت می‌شود. تجمع و نحوه توزیع این نقاط در نمودار بازگشت، ساختارهای هندسی مشخصی (مانند خطوط قطری و عمودی) ایجاد می‌کند که نشان‌دهنده میزان پیش‌بینی‌پذیری، ایستایی و منظم بودن سیستم است. [15-16]

شاخص‌های زیر برای هر دنباله استخراج شد:

- نرخ بازگشت (RR): درصد نقاط بازگشتی نسبت به کل عناصر ماتریس بازگشتی. این شاخص احتمال بازگشت سیستم به حالات قبلی را نشان می‌دهد و طبق رابطه (۲) بدست

ریاضی اختلاف مقدار سیگنال در دو لحظه زمانی با فاصله τ است.

$$E[|x(t + \tau) - x(t)|^2] \quad (8)$$

- نمای لیاپانوف (λ): بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف سیستم را در رابطه (۹) نشان می‌دهد و معیاری از حساسیت به شرایط اولیه است [۱۳]. مقادیر مثبت λ مؤید وجود دینامیک آشوبی قطعی در فرآیند تولید اعداد تصادفی می‌باشند.

$$\lambda = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum \ln |f'(x)| \quad (9)$$

۴-۲- تحلیل آماری و طبقه‌بندی

پس از استخراج شاخص‌های RQA و فرکتالی، تحلیل آماری داده‌ها با هدف مقایسه تفاوت‌های بین گروهی انجام شد. ابتدا نرمال بودن توزیع متغیرها با استفاده از آزمون شاپیرو-ویلک بررسی گردید. در مواردی که فرض نرمال بودن برقرار بود، از آزمون t مستقل برای مقایسه میانگین شاخص‌ها بین دو گروه جوان و سالمند استفاده شد. سطح معناداری آماری برابر با $p < 0.01$ در نظر گرفته شد.

به‌منظور ارزیابی توان تفکیک‌پذیری ویژگی‌های استخراج‌شده، یک مرحله طبقه‌بندی دودویی بین دو گروه جوان و سالمند انجام شد. برای این منظور، از ترکیب ویژگی‌های معنادار RQA و فرکتالی به‌عنوان بردار ویژگی استفاده گردید.

الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (Support Vector Machine; SVM) با هسته خطی به کار گرفته شد، چراکه این الگوریتم در فضاهای با ابعاد کم و حجم نمونه محدود عملکرد پایدار دارد [37]. برای جلوگیری از بیش‌برازش، از روش اعتبارسنجی Leave-One-Out (LOO) استفاده شد، به‌طوری که در هر تکرار، داده‌های یک شرکت‌کننده به‌عنوان داده آزمون و داده‌های باقی‌مانده برای آموزش مدل استفاده شدند. عملکرد طبقه‌بندی بر اساس شاخص دقت گزارش شد و به‌عنوان معیاری از قدرت تشخیصی ویژگی‌های دینامیکی استخراج‌شده مورد استفاده قرار گرفت.

کلیه تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شد

۳- نتایج

در این بخش، یافته‌های حاصل از تحلیل کمی نمودارهای بازگشتی و شاخص‌های فرکتالی برای سری‌های زمانی تولید اعداد تصادفی انسانی در دو گروه جوان و سالمند ارائه می‌شود. نتایج آزمون شاپیرو-ویلک جهت بررسی توزیع داده‌ها نشان داد که تمامی ویژگی‌های استخراج‌شده از جمله بعد همبستگی ($p=0.28$)، نمای لیاپانوف ($p=0.42$)، نمای هرست ($p=0.15$)،

می‌آید. این شاخص از میانگین مقادیر ماتریس بازگشت $R_{i,j}$ به دست می‌آید که در آن N نشان‌دهنده طول سری زمانی است.

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

- قطعیت (DET): نسبت نقاط بازگشتی واقع بر خطوط مورب به کل نقاط بازگشتی در رابطه (۳) به نمایش در آمده است. مقادیر بالای DET نشان‌دهنده وجود الگوهای تکراری قطعی در سیستم است. N_l تعداد خطوطی که طول آن‌ها دقیقاً برابر با 1 است.

$$DET = \frac{\sum N_l P(l)}{\sum R_{i,j}} \quad (3)$$

- آنترپپی (ENTR): آنترپپی شانون توزیع طول خطوط مورب که میزان پیچیدگی و تنوع الگوهای تکراری سیستم را مطابق رابطه (۴) نشان می‌دهد.

$$ENTR = - \sum p(l) \ln P(l) \quad (4)$$

$p(l)$ نشان می‌دهد که یک خط مورب با طول مشخص l چه نسبتی از کل خطوط مورب را تشکیل می‌دهد

- لمیناریتی (LAM): نسبت نقاط بازگشتی تشکیل‌دهنده خطوط عمودی به کل نقاط بازگشتی که نشان‌دهنده وجود حالات شبه‌پایدار در دینامیک سیستم است. در رابطه (۵) N_v همان تعداد خطوط با طول v است و $P(v)$ نسبت آن‌هاست.

$$LAM = \frac{N_v P(v)}{\sum R_{i,j}} \quad (5)$$

- طول میانگین خطوط (L): که میانگین زمان قابل پیش‌بینی بودن سیستم را منعکس می‌کند. در رابطه (۶) N_l تعداد خطوطی که طول آن‌ها برابر با 1 است. $p(l)$ احتمال (یا فراوانی) مشاهده خطی با طول l است.

$$L = \frac{\sum N_l p(l)}{\sum N P(l)} \quad (6)$$

۲-۳- ویژگی‌های فرکتالی:

برای ارزیابی پیچیدگی زمانی دنباله‌ها، شاخص‌های زیر محاسبه شدند:

- بُعد همبستگی (D_2): این شاخص بیانگر تعداد درجات آزادی مؤثر سیستم و میزان پیچیدگی جاذب بازسازی‌شده است. در رابطه (۷) $C(r)$ بیان می‌کند که چه تعداد از جفت‌نقاط در سیستم، فاصله‌ای کمتر از شعاع r با یکدیگر دارند.

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log r} \quad (7)$$

- نمای هرست (H): این نما رفتار حافظه بلندمدت سری زمانی را توصیف می‌کند. رابطه (۸) بیان‌کننده امید



می‌دهد. بررسی کیفی ساختار این نمودارها تفاوت‌های آشکاری در سازمان‌دهی دینامیکی رفتار شناختی دو گروه آشکار می‌سازد. در گروه جوان، الگوی بازگشت‌ها پراکنده‌تر بوده و خطوط قطری کوتاه‌تر و ناپیوسته‌تری مشاهده می‌شود که بیانگر تنوع بالاتر مسیرهای دینامیکی، پیچیدگی بیشتر فضای حالت و حساسیت بالاتر به شرایط اولیه است. در مقابل، نمودار بازگشتی گروه سالمند با حضور خطوط قطری بلندتر و ساختارهای عمودی واضح مشخص می‌شود که نشان‌دهنده افزایش قطعیت، لمیناریتی و ماندگاری سیستم در حالت‌های تکراری است. این تفاوت‌های توپولوژیک، شواهد بصری مستقلی از کاهش پیچیدگی دینامیکی و افزایش رفتارهای قابل‌پیش‌بینی در سالمندی فراهم می‌کنند و به‌طور کیفی نتایج کمی RQA گزارش‌شده در جدول (۲) را تقویت می‌نمایند.

شکل ۲ نگاشت مفهومی-کمی رابطه بین شاخص‌های پیچیدگی دینامیکی و میزان قطعیت/پیش‌بینی‌پذیری رفتار را در دو گروه سنی نشان می‌دهد. محور افقی بیانگر شاخص‌های پیچیدگی آشوبی (بعد همبستگی D_2 و نمای لیاپانوف λ) و محور عمودی نمایانگر شاخص‌های نظم و تکرارپذیری (DET و LAM) است. توزیع نقاط نشان می‌دهد که داده‌های گروه جوان عمدتاً در ناحیه‌ای با پیچیدگی بالاتر و قطعیت کمتر متمرکز شده‌اند، در حالی که گروه سالمند به‌طور سیستماتیک به سمت ناحیه‌ای با پیچیدگی کمتر و پیش‌بینی‌پذیری بالاتر جابجا شده است. این جابجایی فزاینده، تصویری یکپارچه از تغییرات هم‌زمان چندشاخصی فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که سالمندی شناختی نه صرفاً با تغییر یک پارامتر منفرد، بلکه با بازآرایی کلی تعادل بین آشوب و نظم در سیستم شناختی همراه است. این نگاشت، چارچوبی شهودی و قدرتمند برای تفسیر نتایج کمی و حمایت مفهومی از فرضیه کاهش پیچیدگی فراهم می‌آورد.

در بخش طبقه‌بندی، استفاده از الگوریتم ماشین بردار پشتیبان (SVM) مبتنی بر ویژگی‌هایی که تفاوت معنادار آماری نشان دادند، همراه با روش اعتبارسنجی (LOO)، منجر به دستیابی به دقت تفکیک ۹۱.۳٪ بین دو گروه شد. این نتیجه نشان می‌دهد که شاخص‌های استخراج‌شده نه تنها از نظر آماری معنادار هستند، بلکه از نظر توان تمایزبخشی و کاربرد تشخیصی نیز عملکرد بالایی دارند. چنین دقتی اهمیت استفاده از شاخص‌های غیرخطی و آشوبی را حتی در تکالیف ساده‌ای مانند تولید اعداد تصادفی برجسته می‌کند.

شاخص قطعیت ($p=0.31$) و میانگین طول خطوط قطری ($p=0.19$) دارای توزیع نرمال هستند. ($p>0.01$) از این رو، پیش‌فرض‌های لازم جهت استفاده از آزمون پارامتریک t مستقل برقرار بوده است. تمامی مقایسه‌های بین‌گروهی با استفاده از آزمون t مستقل انجام شد و سطح معناداری $p<0.01$ در نظر گرفته شد.

۳-۱ یافته‌های تحلیل کمی نمودارهای بازگشتی (RQA)
نتایج مقایسه شاخص‌های RQA بین دو گروه در جدول (۲) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمامی شاخص‌های RQA تفاوت معنادار آماری بین دو گروه نشان دادند.

جدول (۲): مقایسه شاخص‌های RQA بین گروه‌های جوان و سالمند

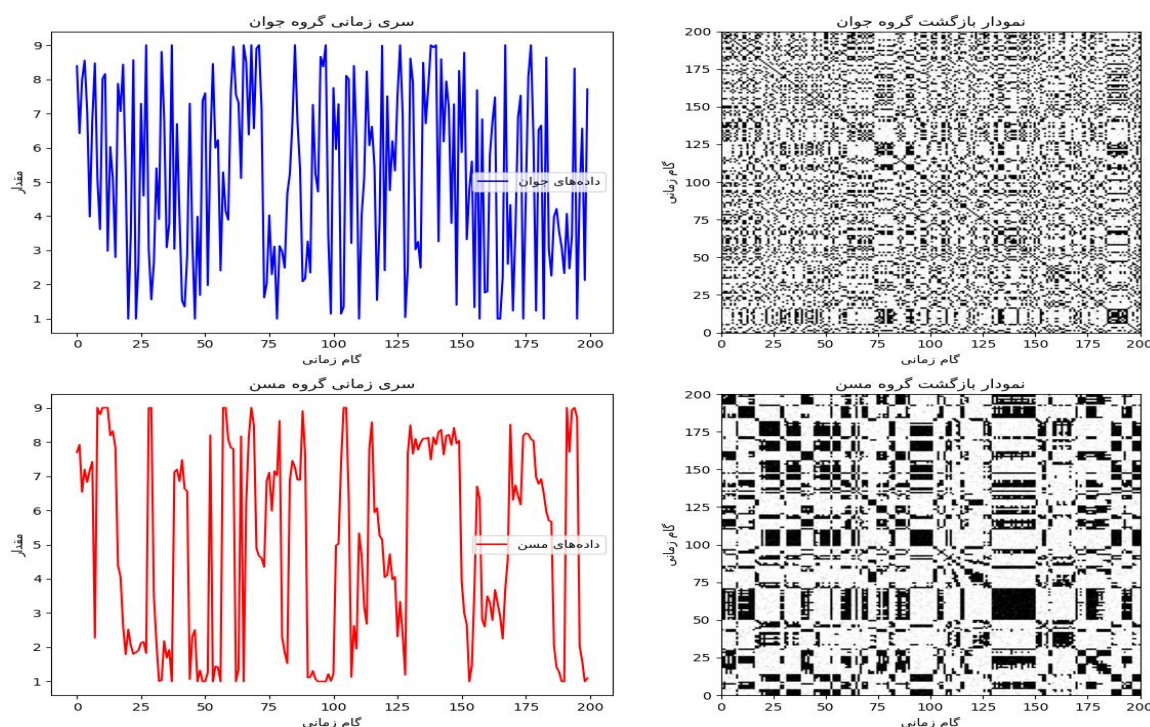
ویژگی	گروه جوان (Mean±SD)	گروه سالمند (Mean±SD)	p مقدار
RR	0.42±0.08	0.28±0.06	<0.001
DET	62.1±7.4	78.3±5.2	<0.001
ENTR	2.31±0.34	1.87±0.29	0.002
LAM	54.6±6.8	70.2±7.1	<0.001
L	18.4±3.2	25.7±4.1	<0.001

جدول (۳): مقایسه شاخص‌های فرکتالی بین گروه‌های جوان و سالمند

ویژگی	گروه جوان (Mean±SD)	گروه سالمند (Mean±SD)	p مقدار
D_2	3.4±0.5	2.1±0.3	<0.001
H	0.47±0.08	0.58±0.07	0.008
λ	0.41±0.09	0.29±0.07	0.01

نتایج در جدول (۳) نشان داد که بعد همبستگی در گروه جوان به‌طور معناداری بالاتر است، که حاکی از فضای حالت دینامیکی بازتر و پیچیده‌تر در افراد جوان است. نمای هرست در گروه جوان کمتر از ۰.۵ و به ۰.۵ نزدیک‌تر است، در حالی که در گروه سالمند از ۰.۵ دورتر شده است، که نشان‌دهنده کاهش وابستگی بلندمدت و نزدیک شدن به رفتار تصادفی خالص است، هرچند در هر دو گروه خاصیت خودهمبستگی مثبت وجود دارد. نمای لیاپانوف بیشینه نیز در گروه جوان بالاتر است، که بیانگر حساسیت بیشتر به شرایط اولیه در گروه جوان است.

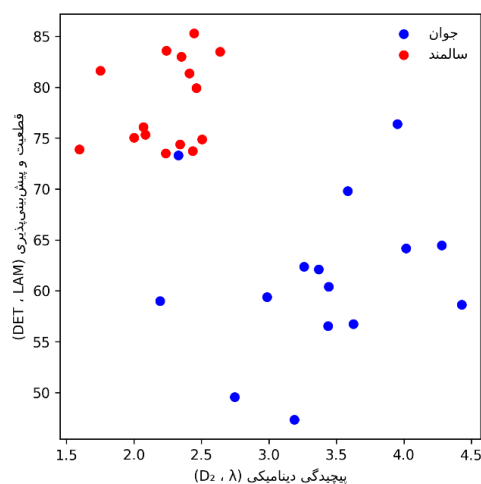
شکل ۱ نمودارهای بازگشتی نماینده‌ای از سری‌های زمانی تولید اعداد تصادفی انسانی در دو گروه جوان و سالمند را نشان



شکل ۱: مقایسه ویژگی‌های دینامیکی دنباله‌های تولید اعداد تصادفی انسانی (HRNG) در گروه‌های سنی. (شکل بالا) نمودار زمانی و نمودار بازگشتی مربوط به یک سوژه جوان؛ (شکل پایین) نمودار زمانی و نمودار بازگشتی مربوط به یک سوژه سالمند. نمودارهای بازگشتی با استفاده از بازسازی فضای حالت با پارامترهای تأخیر زمانی $\tau=1$ و بُعد محاسباتی $m=3$ رسم شده‌اند. تفاوت در تراکم نقاط و ساختارهای مورب (Diagonal structures) در نمودارهای بازگشتی، بیانگر تفاوت در پیچیدگی و ساختار دینامیک شناختی میان دو گروه است که نشان‌دهنده تغییرات در الگوی تولید اعداد تصادفی وابسته به سن می‌باشد

شناختی قرار می‌گیرد. این یافته‌ها با فرضیه کاهش پیچیدگی در فرآیندهای شناختی وابسته به سن هم‌راستا هستند [6]. افزایش معنادار در شاخص‌های DET و LAM در گروه سالمند، نشان‌دهنده کاهش تنوع رفتاری و افزایش تکرار الگوهای محدود در انتخاب اعداد است. این امر می‌تواند منعکس‌کننده محدود شدن دامنه‌ای باشد که فرد می‌تواند به‌طور مؤثر در فضای تصمیم‌گیری خود بهره‌برداری کند، احتمالاً به دلیل کاهش انعطاف‌پذیری شناختی و افزایش ثبات در عملکردهای اجرایی است. در مقابل، کاهش شاخص RR (نسبت بازگشت) و ENTR (آنتروپی) در سالمندان حاکی از این است که سیستم شناختی آن‌ها بیشتر به حالت‌های تکراری یا نقاط ثابت (Fixed Points) بازمی‌گردد و مدت زمان طولانی‌تری در این حالت‌ها باقی می‌ماند (افزایش L). این امر با کاهش توانایی مغز در تغییر سریع استراتژی‌های شناختی در مواجهه با وظیفه تصادفی‌سازی مرتبط است [۷].

یافته‌های این مطالعه نشان داد که سالمندی با کاهش پیچیدگی و افزایش الگوهای قابل‌پیش‌بینی در رفتار شناختی همراه است. افزایش شاخص‌های بازگشتی و کاهش ابعاد فرکتالی در سالمندان حاکی از حرکت سیستم شناختی به سمت پایداری و کاهش انعطاف‌پذیری است؛ نتایجی که با نظریه



شکل ۲: نگاشت فضای ویژگی پیچیدگی-پیش‌بینی‌پذیری برای تفکیک گروه‌های مورد مطالعه. محور افقی بیانگر پیچیدگی دینامیکی حاصل از ترکیب بُعد همبستگی و نمای لیاپانوف است. محور عمودی شاخص‌های تکرارپذیری و نظم را نمایش می‌دهد. دایره‌های آبی (گروه جوان) و قرمز (گروه سالمند) توزیع داده‌ها را در این فضای ویژگی نشان می‌دهند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش به‌طور منسجم نشان داد که ساختار پویایی سری‌های زمانی تولید اعداد تصادفی انسانی تحت تأثیر پیری

می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش بر اهمیت استفاده از روش‌های غیرخطی، تحلیل آشوبی و شاخص‌های فرکتالی در ارزیابی شناختی تأکید می‌کند و نشان می‌دهد که HRNG می‌تواند بستری مناسب برای آشکارسازی تغییرات ظریف اما بنیادین در پویایی شناختی وابسته به سن فراهم سازد.

مزیت اصلی روش پیشنهادی، غیرتهاجمی بودن، سادگی اجرا، هزینه پایین و قابلیت پیاده‌سازی آنلاین است؛ ویژگی‌هایی که آن را به گزینه‌ای مناسب برای غربالگری اولیه شناختی در جمعیت سالمندان بدل می‌کند.

تحلیل آشوبی تولید اعداد تصادفی با تمرکز بر نمودارهای بازگشتی و ابعاد فرکتال، ابزار حساسی برای آشکارسازی تفاوت‌های شناختی وابسته به سن فراهم می‌کند. این رویکرد می‌تواند مبنای توسعه سامانه‌های غربالگری دیجیتال و ارزیابی زودهنگام افت شناختی قرار گیرد.

۶- مراجع

- [1] Baddeley A. Working memory: theories, models, and controversies. *Annu Rev Psychol*. 2012;63:1-29.
- [2] Towse JN, Neil D. Analyzing human random generation behavior: a review of methods used and a computer program for describing performance. *Psychol Bull*. 1998;124(3):316-344.
- [3] Miyake A, Friedman NP, Emerson MJ, Witzki AH, Howerter A, Wager TD. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: a latent variable analysis. *Cogn Psychol*. 2000;41(1):49-100.
- [4] Rieger M, Gauggel S. Functions of random number generation: an analysis of executive control. *J Clin Exp Neuropsychol*. 2012;34(7):759-770.
- [5] Brugger P, Monsch AU, Salmon DP, Butters N. Random number generation in dementia of the Alzheimer type: a test of frontal executive functions. *Neuropsychologia*. 1996;34(2):97-103.
- [6] Wagenaar WA. Generation of random sequences by human subjects: a critical survey of literature. *Psychol Bull*. 1972;77(1):65-72.
- [7] Nickerson RS. The production and perception of randomness. *Psychol Rev*. 2002;109(2):330-357.
- [8] Rapoport A, Budescu DV. Generation of random series in two-person strictly competitive games. *J Exp Psychol Gen*. 1992;121(3):352-363.
- [9] Towse JN. On random generation and the central executive of working memory. *Br J Psychol*. 1998;89(1):77-101.
- [10] Peters M, Giesbrecht T, Jellic M, Merckelbach H. The random number generation task: psychometric properties and normative data of an executive function task in a mixed sample. *J Int Neuropsychol Soc*. 2007;13(4):626-634.
- [11] Delgado-Bonal A, Marshak A. Approximate entropy and sample entropy: A comprehensive tutorial. *Entropy*. 2019;21(6):541.
- [12] Strogatz SH. *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. 2nd ed. Boulder: Westview Press; 2015.
- [13] Sprott JC. *Chaos and Time-Series Analysis*. Oxford: Oxford University Press; 2003.

کاهش پیچیدگی سیستم‌های زیستی همخوانی دارد [۱۰-۱۲]. برتری شاخص‌های غیرخطی در تفکیک گروه‌های سنی در این پژوهش، ریشه در ماهیت عصب‌شناختی تکلیف تولید عدد تصادفی دارد. این تکلیف فراتر از یک فعالیت حرکتی ساده، نیازمند درگیری مداوم «حافظه کاری» و «مهار پاسخ‌های کلیشه‌ای» است که توسط قشر پیش‌پیشانی (Prefrontal Cortex) مدیریت می‌شود. بر اساس فرضیه کاهش پیچیدگی، سیستم‌های بیولوژیک سالم دارای پیچیدگی بالا و درجات آزادی بسیار هستند. نتایج ما نشان داد که در گروه سالمند، نمای لیاپانوف کاهش و تراکم بازگشت افزایش یافته است که نشان‌دهنده فروپاشی این پیچیدگی و متمایل شدن سیستم به سمت رفتارهای دوره‌ای و تکراری است.

از منظر بازداری شناختی (Inhibitory Control)، افراد با افزایش سن توانایی مهار الگوهای از پیش‌آموخته (مانند شمارش ۱-۲-۳ یا تاریخ‌ها) را از دست می‌دهند. روش‌های خطی مانند میانگین یا انحراف معیار، نمی‌توانند تفاوت بین یک دنباله واقعاً تصادفی و یک دنباله تکراری (مثل ۱-۲-۱-۲) را تشخیص دهند اگر میانگین آن‌ها برابر باشد. اما روش‌های غیرخطی با بازسازی فضای حالت، این «تکرارپذیری» و «ساختارمند بودن» پنهان را آشکار می‌کنند. بنابراین، استفاده از این روش‌ها نه یک انتخاب محاسباتی، بلکه ضرورتی برای مشاهده تغییرات ظریف در دینامیک شبکه‌های عصبی است که روش‌های خطی ساده توان لمس آن را ندارند.

همسو با پژوهش‌های پیشین نتایج نشان داد که شاخص‌های آشوبی حتی در تکالیف ساده‌ای مانند تولید اعداد تصادفی، قدرت تمایزبخشی بالایی دارند. این موضوع اهمیت استفاده از روش‌های غیرخطی در ارزیابی شناختی را برجسته می‌کند. نتایج نشان داد تولید اعداد تصادفی در سالمندان به‌سمت الگوهای پایدارتر، تکرارشونده‌تر و کم‌پیچیده‌تر متمایل است. این یافته‌ها با نظریه کاهش انعطاف‌پذیری شناختی و افت کارکردهای اجرایی در سالمندی همسو است. در مجموع، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که پیری شناختی با:

- کاهش پیچیدگی دینامیکی،
- افزایش نظم و تکرارپذیری الگوها،
- کاهش حساسیت به شرایط اولیه،
- و افزایش همبستگی‌های زمانی بلندمدت

در فرآیند تولید اعداد تصادفی انسانی همراه است. این نتایج نشان می‌دهد که حتی در تکالیف ساده و فاقد محتوای معنایی، تغییرات معناداری در سازماندهی دینامیکی رفتار شناختی رخ



- [35] Jokar E, Mikaili M. Assessment of human random number generation for biometric verification. *Journal of Medical Signals & Sensors*. 2012 Apr 1;2(2):82-7.
- [36] Schulz MA, Schmalbach B, Brugger P, Witt K. Analysing humanly generated random number sequences: a pattern-based approach. *PloS one*. 2012 Jul 23;7(7):e41531.
- [37] Esmaili Jami A, Khalilzadeh M A, Ghoshuni M, Khalilzadeh M M. Estimation of Attention Indices in IVA Tests Using Optical Flow in ERP Brain Maps. *Shefaye Khatam* 2022; 11 (1) :46-56
- [14] Schulz M, Schmalbach B, Brugger P, Witt K. Analysing humanly generated random number sequences: a pattern-based approach. *PLoS One*. 2012;7(7):e41531.
- [15] Eckmann JP, Kamphorst SO, Ruelle D. Recurrence plots of dynamical systems. *Europhys Lett*. 1987;4(9):973-977.
- [16] Marwan N, Romano MC, Thiel M, Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Phys Rep*. 2007;438(5-6):237-329.
- [17] Webber CL Jr, Zbilut JP. Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. In: Riley MA, Van Orden GC, editors. *Tutorials in Contemporary Nonlinear Methods for the Behavioral Sciences*. Arlington: National Science Foundation; 2005. p. 26-94.
- [18] Grassberger P, Procaccia I. Characterization of strange attractors. *Phys Rev Lett*. 1983;50(5):346-349.
- [19] Hurst HE. Long-term storage capacity of reservoirs. *Trans Am Soc Civ Eng*. 1951;116:770-808.
- [20] Wolf A, Swift JB, Swinney HL, Vastano JA. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Physica D*. 1985;16(3):285-317.
- [21] Raz N, Lindenberger U, Rodrigue KM, Kennedy KM, Head D, Williamson A, et al. Regional brain changes in aging healthy adults: general trends, individual differences and modifiers. *Cereb Cortex*. 2005;15(11):1676-1689.
- [22] Fjell AM, Walhovd KB. Structural brain changes in aging: courses, causes and cognitive consequences. *Rev Neurosci*. 2010;21(3):187-221.
- [23] Salthouse TA. The processing-speed theory of adult age differences in cognition. *Psychol Rev*. 1996;103(3):403-428.
- [24] Park DC, Lautenschlager G, Hedden T, Davidson NS, Smith AD, Smith PK. Models of visuospatial and verbal memory across the adult life span. *Psychol Aging*. 2002;17(2):299-320.
- [25] Lipsitz LA, Goldberger AL. Loss of 'complexity' and aging: potential applications of fractals and chaos theory to senescence. *JAMA*. 1992;267(13):1806-1809.
- [26] Goldberger AL, Amaral LAN, Hausdorff JM, Ivanov PC, Peng CK, Stanley HE. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2002;99(Suppl 1):2466-2472.
- [27] Hausdorff JM. Gait dynamics, fractals and falls: finding meaning in the stride-to-stride fluctuations of human walking. *Hum Mov Sci*. 2007;26(4):555-589.
- [28] Vaillancourt DE, Newell KM. Changing complexity in human behavior and physiology through aging and disease. *Neurobiol Aging*. 2002;23(1):1-11.
- [29] Peters M, Giesbrecht T, Jelacic M, Merckelbach H. The random number generation task: Psychometric properties and normative data of an executive function task in a mixed sample. *J Int Neuropsychol Soc*. 2007;13(4):626-634.
- [30] Joppich G, Däuper J, Dengler R, Johannes S, Rodriguez-Fornells A, Münte TF. Brain potentials index executive functions during random number generation. *Neurosci Res*. 2004;49(2):157-164.
- [31] Prince M, Bryce R, Albanese E, Wimo A, Ribeiro W, Ferri CP. The global prevalence of dementia: a systematic review and metaanalysis. *Alzheimers Dement*. 2013;9(1):63-75.
- [32] Wild K, Howieson D, Webbe F, Seelye A, Kaye J. Status of computerized cognitive testing in aging: a systematic review. *Alzheimers Dement*. 2008;4(6):428-437.
- [33] Kraemer KH, Donner RV, Heitzig J, Marwan N. Recurrence threshold selection for obtaining robust recurrence characteristics in different embedding dimensions. *Chaos*. 2018;28(8):085720.
- [34] Webber CL Jr, Marwan N, editors. *Recurrence Quantification Analysis: Theory and Best Practices*. Cham: Springer; 2015.