جداسازي سيگنال فيبريلاسيون بطني بر مبناي مشخصات آشوبگون سيگنال‌هاي قلبي

محمدرضا نوروزي[1]*، محمدجواد يزدان‌پناه[2]

[1] دانشکده مهندسي پزشکي، دانشگاه صنعتي اميرکبير

[2] گروه مهندسي برق و کامپيوتر، دانشکده فني، دانشگاه تهران

چکيده

در اين تحقيق، با استخراج خواص پديده‌هاي آشوبگون و بررسي سه دسته سيگنال قلبي شامل سيگنال‌هاي طبيعي، تاکيکاردي بطني و فيبريلاسيون بطني مشاهده شد که اين خواص به صورت مشخص در سيگنال فيبريلاسيون بطني وجود دارند. از يک شبکه عصبي پس‌انتشار خطا براي جداسازي سيگنال فيبريلاسيون بطني نسبت به دو نوع ديگر سيگنال قلبي استفاده گرديد. شبکه در دو حوزه زمان و فرکانس تحت آموزش قرار گرفته و نتايج نشان داد که در حالت عادي، استفاده از سيگنال‌هاي زماني در مقايسه با طيف فرکانسي از قابليت اعتماد بالايي برخوردار نيست. بر اساس يك ايده نو و با استفاده از تکنيک "داده‌هاي جايگزين" که در فرآيندهاي آشوبگون به کار مي‌رود، بهبود چشمگيري در کارآيي شبکه در حوزه زمان به دست آمد. همچنين شبيه‌سازي‌ها نشان داد که ديناميك آشوبگون توليدکننده سيگنال فيبريلاسيون بطني، يك ديناميك متغير با زمان است.

واژه‌هاي کليدي: آشوب؛ خاصيت آشوبگون؛ الکتروکارديوگرام؛ فيبريلاسيون بطني؛ شبکه عصبي

---

* **عهده‌دار مکاتبات**

نشانی: دانشگاه صنعتي اميرکبير، دانشکده مهندسي پزشکي

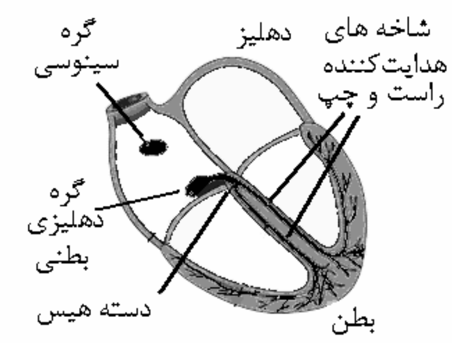
تلفن : ۰۲۱-۸۸۴۹۷۲۷۴، **دورنگار:** ۰۲۱-۶۶۴۹۵۶۵۵، **پيام‌نگار:** noruzi@cic.aut.ac.ir

۱- مقدمه

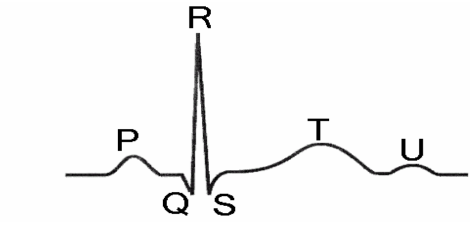
مطالعاتي كـه در سـال‌هـاي اخيـر بـرروي قلـب و سـيگنال الكتروكارديوگرام ([1]ECG) انجام گرفته نـشان مـي‌دهنـد كـه فعاليت آن حـاوي يـک بـي‌نظمـي پيچيـده و در عـين حـال قانونمنـد اسـت بـه طـوري كـه مـي‌تـوان آن را در دسـته فعاليت‌هاي آشوبگون[۲] قرار داد. اصولاً پديـده آشـوب در دو حالت به صورت بارز رخ مي‌دهد: در پديده تپش‌هاي عـادي بـه صـورت تغييـرات نـرخ ضـربان قلـب در دراز مـدت و همچنين در هنگام بروز فيبريلاسيون بطني كه يک نوع خاص از بي‌نظمي بحراني در سيستم ضربان قلب مي‌باشد [۱].

وجود يک توالي و زمان‌بندي مشخص در انقبـاض عـضلات قلب باعث گردش خون در بدن مي‌گـردد. ايـن زمـان‌بنـدي توسط يک منبع توليد ضربان بـه نـام گـره سينوسـي برقـرار مي‌شود. همان طور كه در شكل ۱ مشاهده مي‌شود ايـن گـره در حقيقت يک بافت كوچـک از دهليـز اسـت كـه بـه طـور خودكار سيگنال تحريك را توليد مي‌كند. ايـن سـيگنال ابتـدا دهليزها را تحريك كرده و سپس توسط يک سري كانال‌هاي عصبي بطن‌ها را تحريك مي‌نمايـد. لازم بـه ذكـر اسـت كـه فركانس ضربان گـره سينوسـي تحـت تـأثير مـواد شـيميايي موجود در خون و همچنين فرمـان‌هـاي عـصبي مغـز تغييـر مي‌كند [۲].

مطالعات نـشان داده‌انـد كـه خـواص آشـوبگون مربـوط بـه "تغييـرات ضـربان قلـب" ([2]HRV) در زمـان‌هـاي طـولاني، مي‌تواند با بعضي از مشكلات قلبي عروق مرتبط باشد. بـراي مثال، در عمل جراحي شريان قلـب در صـورتي كـه منحنـي تغييرات ضربان قلب از يك فـرم آشـوبگون تبعيـت ننمايـد، عملكرد سيستم قلبي عروقي دچار ناهنجاري بوده و احتمـال بروز مشكلاتي در آينده بـراي بيمـار وجـود خواهـد داشـت [۴،۳]. لازم به ذكر است كه در اين مورد از بيمـاري خاصـي نام برده نشده و صرفاً عنـوان كلـي ناهنجـاري اطـلاق شـده است. همچنين مشاهده شده است كه بعـد از سـكته مغـزي، ديناميك تغييرات ضربان قلب دچار تغيير مي‌گـردد كـه ايـن نشان‌دهنده وجود مشكلات در سيستم عصبي كنتـرل ضـربان قلب مي‌باشد [۵].



شكل ۱- اجزاي مولد و انتقال‌دهنده سيگنال ضرباني قلب [۲]



شكل ۲- سيگنال طبيعي قلب شامل كمپلكس QRS، موج T، U و P

در اثر فعاليت طبيعي ماهيچه‌هاي قلب، سيگنال الكتريكي توليد مي‌شود. در شكل ۲، يك دوره تناوب ازسيگنال الكتروكارديوگرام طبيعي نشان داده شده است. هر موج داراي يک قله تيز است كه به آن كمپلكس QRS گفته مي‌شود. فاصله زماني بين اين قله‌ها از يكديگر، بيانگر نرخ ضربان قلب است.

فيبريلاسـيون بطنـي و تاكيكـاردي بطنـي دو نـوع مهـم از آريتمي‌هاي مشاهده شده در ضربان قلب به شمار مـي‌رونـد. در تاكيكاردي، قلب با سرعت بالايي پمپاژ مي‌كند و با توجـه به تحريک سريع و متناوب ماهيچه‌هـاي قلـب، شـكل مـوج حاصل از فعاليت ماهيچه‌هاي قلب از حالـت عـادي[۸] خـارج گشته و تقريباً فقط پيک‌هاي متوالي قابل مشاهده هـستند. در اين حالت نرخ ضربان قلـب ممكـن اسـت بـه ۲ تـا ۳ برابـر حالت عادي برسد. در فيبريلاسـيون بطنـي سـاختار ضـرباني قلب به هم مي‌ريزد و گره سينوسي، ديگـر راهبـر و هـدايت كننده انقباض قلب نيست. در اين حالت چندين كانون توليـد ضربان در بافت قلب ايجاد مي‌شود كه بـه صـورت جداگانـه

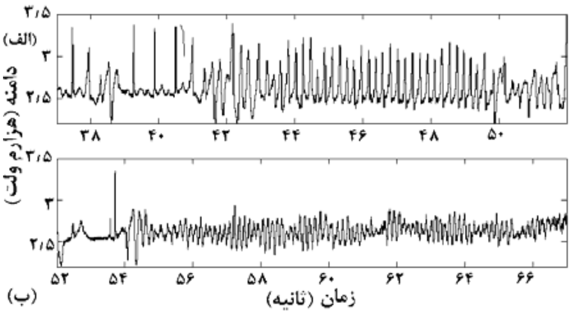
---

[1] Electrocardiogram
[2] Chaotic
[3] Heart Rate Variability
[4] Coronary Artery Bypass Graft
[5] Abnormality
[6] Period
[7] Arrhythmia
[8] QRS Complex

به توليد ضربان تحريكي براي عضلات قلب مي‌پردازند. نتيجه كار روشن است. ماهيچه‌هاي قلب در زمان‌هاي مختلف، فرمان‌هاي تحريک متفاوت دريافت مي‌كنند. اين پديده منجر به آن مي‌شود كه انقباض كامل و به موقع در دهليز و بطن اتفاق نيفتد. در اين شرايط پمپاژ قلب از كار افتاده، شكل سيگنال قلبي به هم ريخته و شبيه به نويز مي‌شود [۶،۲]. در شكل ۳، تغيير سيگنال طبيعي قلب به دو حالت تاكيكاردي و فيبريلاسيون بطني نشان داده شده است. در فيبريلاسيون بطني كنترل از دست گره سينوسي خارج شده و در نقاط مختلفي از بافت قلب، هسته‌هاي ضربان‌ساز به صورت غيرهمزمان به تحريك قلب مي‌پردازند. با توجه به تأثير متقابل هسته‌هاي ضربان‌ساز بر روي يكديگر، يك ديناميك پيچيده و آشوبگون در نحوه ضربان‌سازي و فعاليت قلبي ظاهر مي‌شود، به طوري كه پديده آشوب، يک فرآيند غالب در فيبريلاسيون بطني است.

در تاكيكاردي نيز فرآيند آشوب به صورت خفيف مشاهده مي‌شود. به‌علاوه به دليل وجود مؤلفه‌هاي فركانس بالا در اين سيگنال، طيف آن با طيف سيگنال فيبريلاسيون بطني همپوشاني پيدا مي‌كند [۶]. روش پيشنهادي در اين تحقيق امكان تشخيص سيگنال فيبريلاسيون بطني را فراهم مي‌سازد.
پديده‌هاي آشوبگون پديده‌هايي هستند كه ظاهراً رفتاري نويزگونه دارند در حالي كه در ذات خود از يک قاعده و قانون پيروي مي‌كنند. به طور خلاصه مي‌توان گفت كه رفتار سيستم‌هاي آشوبگون بين سيستم‌هاي معين[9] و سيستم‌هاي نويزي قرار دارد. سيستم‌هاي توليدكننده فرآيند آشوبگون حساسيت بالايي به شرايط اوليه دارند به طوري كه به ازاي تغيير بسيار كوچكي در شرايط اوليه، خروجي تغيير بسيار مي‌كند [۷].

سيستم‌هاي آشوبگون داراي پنج ويژگي مي‌باشند كه مي‌توانند به عنوان معيار تشخيصي استفاده شوند. پنج مشخصه فرآيندهاي آشوبگون عبارتند از: طيف فركانسي، شكل منحني‌هاي فضاي حالت، بعد ديناميک سازنده سيگنال، حساسيت به شرايط اوليه، كنترل‌پذيري.
لازم به ذكر است كه هر يک از اين ويژگي‌ها داراي دقت



شكل ۳- تغيير حالت سيگنال طبيعي قلب به
الف- تاكيكاردي؛ ب- فيبريلاسيون بطني [۶]

مربوط به خود بوده و اصولاً براي اظهار نظر دقيق، يک معيار كافي نيست. اما اينكه چند معيار كافي است بايد گفت كه هرچه تعداد معيارها بيشتر باشد ارزيابي بدست آمده نيز دقيق‌تر است. از طرفي هرچه طول سيگنال زماني مورد بحث نيز بزرگتر باشد دقت نتايج نيز بيشتر مي‌گردد.
براي آشنايي بيشتر با خصوصيات پديده‌هاي آشوبگون مي‌توان به بخش ضميمه مراجعه نمود.

۲- روش‌ها

بخشي از داده‌هاي مورد آزمايش مطابق با مرجع ۸ بوده و بخشي ديگر بر اساس داده‌هاي MIT-BIH وCU[10] انتخاب شده است. تعداد كل داده‌هاي مرجع ۸ برابر با ۸۱ مورد بوده كه ۳۱ داده مربوط به افراد سالم، ۳۰ داده مربوط به تاكيكاردي بطني و ۲۰ داده مربوط به فيبريلاسيون بطني مي‌باشند. كل داده‌هايي كه بر اساس بانك‌هاي اطلاعاتي مختلف در نهايت جمع‌آوري گرديد مربوط به ۱۴۰ نفر بوده كه در آن ۵۰ نفر سالم، ۵۰ نفر دچار تاكيكاردي بطني(VT) و ۴۰ نفر دچار فيبريلاسيون بطني(VF) بوده‌اند.
لازم به ذكر است كه داده‌هاي بانك اول با نرخ ۵۰۰ نمونه در ثانيه و بقيه با نرخ ۲۵۰ نمونه در ثانيه تهيه شده‌اند كه به منظور فراهم آوردن امكان آناليز يكسان، نرخ نمونه‌برداري داده‌هاي دسته دوم به ۵۰۰ تبديل شده است. با توجه به آنكه هدف از اين قسمت، طراحي يک سيستم شبكه عصبي براي آناليز و جداسازي بود از اين‌رو داده‌ها ابتدا نرماليزه شده و سپس قسمت‌هايي كه مشكلي در داده‌گيري داشتند حذف

---

[9] Deterministic

[10] Creighton University Database

گردید. از هر یک از داده‌ها، ۲۵۰۰ نمونه (معادل بـا ۵ ثانیـه) جدا گشته و داده‌هاي آزمون و آموزش بر اساس آن تـشکیل شد.

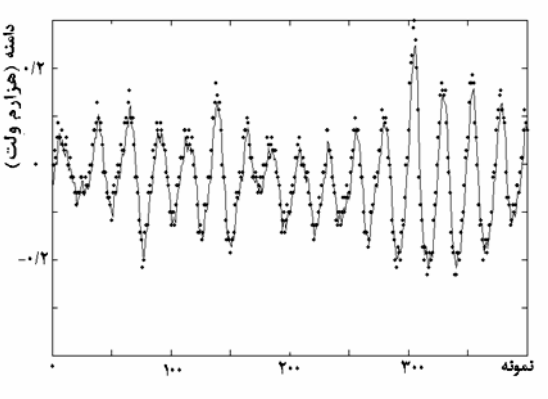
۳- نتايج شبيه‌سازي

به طور كلي شبيه‌سازي‌ها در دو راستا انجام گرفته‌اند. از يك سو نشان داده شده است كه سه ويژگي عمومي سيگنال‌هـاي آشـوبگون در سـيگنال فيبريلاسـيون بطنـي وجـود داشـته و مي‌توانند آنرا از سـاير سـيگنال‌هـاي قلبـي و همچنـين نـويز متمايز سازند. از سوي ديگر سعي شده است كه با استفاده از شبكه عصبي، سيگنال فيبريلاسيون بطنـي از سـيگنال طبيعـي قلب و تاكيكاردي بطني جدا گردد. بـراي ايـن منظـور در دو حوزه فركانس [۹] و زمان به صورت جداگانه سعي شـده تـا سيگنال فيبريلاسيون بطني نسبت به سـيگنال طبيعـي قلـب و تاكيكاردي بطني دسته‌بندي گردد. در همين راستا و بر اساس ايده‌اي نو از داده‌هاي جايگزين بـراي غنـي‌سـازي داده‌هـاي حوزه زمان استفاده شده است.

۳-۱- بررسي خواص آشوبگون در سيگنال‌هاي قلب

۳-۱-۱- بررسي امكان پيش‌بيني سيگنال فيبريلاسيون بطني

در اين مرحله، پيش‌بيني سيگنال فيبريلاسـيون بطنـي توسـط يك شبكه عصبي جلوسو مورد بررسـي قـرار گرفتـه اسـت. شبكه داراي ۴ گره در ورودي، سه نـورون در لايـه پنهـان و يك نورون در لايه خروجي است. در هر آمـوزش، ۴ نمونـه متوالي از داده مربوط به سيگنال آشوبگون بـه عنـوان ورودي به شبكه عصبي داده شده و ضرايب شـبكه در جهتـي تعلـيم داده مي‌شوند تا نمونه پنجم را پـيش‌بينـي نمايـد. در مرحلـه آزمون، قسمتي ديگر از سيگنال فيبريلاسيون بطني بـه عنـوان ورودي به شبكه داده شده است. سـيگنال آزمـون و سـيگنال پيش‌بيني شده در شكل ۴ مشاهده مي‌شوند. داده‌هاي آزمـون با نقطه‌چين و خروجي شبكه با خط صاف مشخص شده‌انـد. دقت شود كه در يك سيگنال آشوبگون هيچ دو تكه‌اي دقيقـاً شبيه به يكديگر نيستند و از اين جهت هـيچ همانـندي، بـين داده آموزش و آزمون وجود نداشته است.

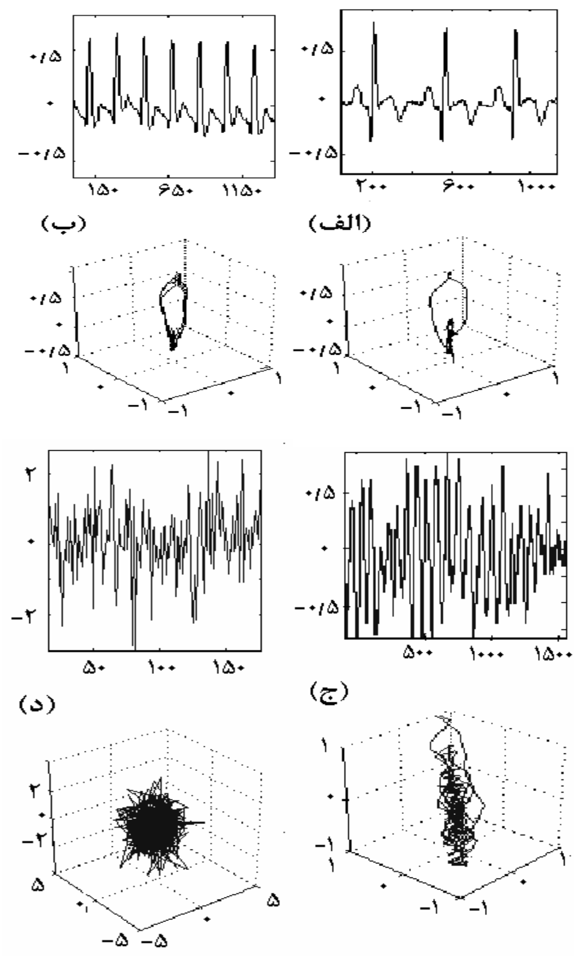


شكل ۴- پيش‌بيني يك سيگنال فيبريلاسيون بطني

در طول شبيه‌سازي‌ها، مشاهده شد كـه هـر چقـدر داده‌هـاي آموزش و آزمون از لحاظ زماني به يكديگر نزديكتـر باشـند، خطاي پيش‌بيني نيز كمتر مي‌شود. نتيجه مهمي كه بـه دسـت مي‌آيـد اين است كـه دينـاميـك سيستم توليـدكننده سـيگنال فيبريلاسيون بطني، يک ديناميـک آشـوبگون متغيـر بـا زمـان است. دقت شود كه اين نتيجه با بحث عمومي كـاهش دقـت پيش‌بينـي سـيگنال‌هـاي آشـوبگون تفـاوت بنيـادي دارد. در پيش‌بيني سيگنال‌هاي آشوبگون، بر اساس يك شـرايط اوليـه مشخص، سعي مي‌گردد كه سيگنال ورودي پيش‌بيني گردد. هر چقدر نمونه دورتري پيش‌بيني گردد، خطاي پيش‌بيني نيز زيادتر مي‌شود. براي مثال، خطاي پيش‌بيني نمونه ششم بـيش از خطاي پيش‌بيني نمونه چهارم اسـت. توجـه شـود كـه در اينجا، در همه حال نمونه پنجم سيگنال فيبريلاسيون بطنی بر اساس چهار نمونه قبل پيش‌بيني مي‌گردد. در اين شرايط اگـر ديناميك سيستم آشوبگون ثابت باشد، متوسط خطاي تخمين نمونه پنجم بر اساس چهار نمونه قبل نيز ثابت مي‌باشد. اما از آنجايي كه اين خطا در مورد فيبريلاسيون بطنـي تغييـر كـرده است، از اين‌رو مي‌توان ادعا نمود كه ديناميك نيز تغيير يافتـه است.

۳-۱-۲- رسم سيگنال‌هاي قلبي در فضاي حالت

درشكل ۵، منحني فضاي حالت بـراي چهـار گونـه سـيگنال مختلف رسم شده است. همان‌طـور كـه مـشاهده مـي‌شـود، منحنـي فـضاي حالـت مربـوط بـه سـيگنال طبيعـي قلـب و تاكيكاردي بطني تقريباً در يك يا دو صفحه قرار مي‌گيرند در



شکل ۵- دیاگرام فضاي حالت مربرط به ۴ نوع سیگنال مختلف الف- الکتروکاردیوگرام فردسالم؛ ب- تاکیکاردي بطني؛ ج- فیبریلاسیون بطني و د- نویزسفید
(دامنه سیگنال‌ها در مقیاس هزارم ولت رسم شده است.)

حالي كه منحني فضاي حالت مربوط به فيبريلاسيون بطني، يك ناحيه سه بعدي شلوغ را شامل مي‌گردد.
از طرف ديگر اين منحني با منحني مربوط به نويز سفيد تفاوت دارد. منحني مربوطه به نويز سفيد، يك حجم كروي را اختيار نموده است در حالي كه منحني مربوط به فيبريلاسيون بطني در ساختاري متمايز و مشخص ظاهر شده است.

۳-۱-۳- تخمين بعد همبستگي

بر اساس روش جمع همبستگي كه در ضميمه توضيح داده است، در یک فضاي ۱۰ بعدي با تاخير ۳ نمونه، بعد چهار نوع سيگنال، تخمين زده شده است. به طور متوسط، بعد همبستگي براي سيگنال قلبي مربوط به فرد سالم و تاكيكاردي بطني به ترتيب برابر با ۴ و ۴/۱ و براي سيگنال فيبريلاسيون بطني به مقدار ۶/۵ به دست مي‌آيد.
در رابطه با نويز سفيد با توجه به عدم وجود نقطه اشباع، تخميني از بعد به دست نيامده است. نكته قابل توجه در محاسبه بعد همبستگي، تأثير نويز بر نتايج است. در مواردي كه سيگنال مورد آزمايش آلوده به نويز مي‌باشد، مشاهده گشته كه بعد تخمين زده شده نسبت به مقدار واقعي افزايش مي‌يابد. از اين‌رو براي تخمين دقيق‌تر بعد ديناميكي لازم است یک پيش‌پردازش اوليه به منظور حذف نويز انجام گيرد.

۲-۳- استفاده از خواص آشوبگون براي جداسازي سيگنال فيبريلاسيون بطني

از يك شبكه عصبي براي جداسازي سيگنال فيبريلاسيون بطني از سيگنال طبيعي قلب و تاكيكاردي بطني استفاده شده است. شبكه مورد استفاده، یک شبكه جلوسو با یک لايه پنهان است كه داراي ۲۵۰۰ گره ورودي، ۴۰ نورون در لايه پنهان و یک گره خروجي جهت تصميم‌گيري در مورد وضعيت و كلاس تعلق مربوط به ورودي مي‌باشد. در هر آزمايش، ۶۰ درصد داده‌ها براي آموزش و ۴۰ درصد به منظور آزمون مورد استفاده قرار گرفته است. داده‌هاي آموزش و آزمون به صورت اتفاقي انتخاب شده و نتايج بر اساس ميانگين نتيجه، ۳۰ بار تكرار به دست آمده‌اند.

آزمايش‌ها با دو بانك اطلاعاتي انجام گرفته‌اند. در يك مرحله فقط از بانك اطلاعاتی مرجع ۸ شامل ۸۱ نفر استفاده شده و در مرحله دوم از كل بانك‌هاي اطلاعاتي شامل ۱۴۰ نفر استفاده شده است.
در آزمايش اول، شبكه عصبي در حوزه زمان تحت آموزش و آزمون قرار مي‌گيرد. در شرايطي كه سيگنال‌ها به صورت سري زماني به شبكه داده مي‌شوند، با وجود آموزش كامل شبكه، درصد تشخيص شبكه در هنگام آزمون، براي بانك‌هاي اطلاعاتي اول و دوم به ترتيب برابر با ۴۹% و ۵۸% به دست آمده است.

در آزمايش دوم با توجه به تفاوت منحني فركانسي سيگنال آشوبگون VF با انواع ديگر ECG، طيف فركانسي سيگنال‌ها به عنوان ورودي مورد استفاده قرار گرفته است كه درصد تشخيص صحيح براي بانك اطلاعاتي اول و دوم به ترتيب برابر با ۹۵ % و ۹۴/۱ % بدست آمده است.

در آزمايش سوم از روش داده‌هاي جايگزين استفاده شده و سيگنال آموزش در حوزه زمان غني‌سازي شده است. در اين شرايط هم سيگنال زماني اوليه و هم داده‌هاي جايگزين براي آموزش استفاده مي‌شوند. نتيجه حاصل نسبت به آزمايش اول بسيار بهبود پيدا كرده است، به طوري‌كه نرخ شناسايي براي بانك اطلاعاتي اول و دوم به ترتيب به ۸۹/۷% و ۸۸/۳% مي‌رسد.

۴- بحث

افزايش خطاي پيش‌بيني در اثر افزايش فاصله بين نمونه‌هاي آزمون و آموزش نشان مي‌دهد كه ديناميك حاكم بر سيگنال فيبريلاسيون بطني، با گذشت زمان در حال تغيير است. اين تغيير ديناميک مي‌تواند ناشي از تغيير ارتباط بين هسته‌هاي ضربان‌ساز و همچنين تغيير مشخصه فيزيولوژيك هسته‌هاي ضربان‌ساز با گذشت زمان باشد. با توجه به افت شديد خون‌رساني به بافت‌هاي قلب در هنگام فيبريلاسيون بطني، هر دو فرض بالا منطقي به نظر مي‌رسند.

در اين تحقيق، وجود سه خاصيت از خواص آشوبگون در سه دسته سيگنال قلبي شامل فيبريلاسيون بطني، تاكيكاردي و سيگنال طبيعي قلب تحت بررسي قرار گرفته و نشان داده شد كه اين خواص در سيگنال فيبريلاسيون بطني وجود دارند.

يکی از خواصی که بررسی نشد خاصيت "كنترل‌پذيري" بود. در رابطه با سيگنال فيبريلاسيون بطني، از ساختار ديناميک توليدکننده اين سيگنال اطلاعات دقيقي در دست نبوده و ضمناً پديده فيبريلاسيون بطني در زمان‌هاي نسبتاً کوتاه رخ می‌دهد که عموماً با مرگ موجود زنده مورد آزمايش خاتمه مي‌يابد. از اين رو امكان تكرار آزمايش با شرايط اوليه متفاوت وجود ندارد. همچنين از آنجايي كه بحث "كنترل‌پذيري" با اعمال سيگنال كنترلي خارجي معني‌دار مي‌شود، در نتيجه بررسي "كنترل‌پذيري" در سيگنال الكتروكارديوگرام امكان‌پذير نخواهد بود. از طرفي مشاهده شد كه ديناميک حاكم بر پديده فيبريلاسيون بطني با گذشت زمان تغيير مي‌كند. اين خاصيت باعث مي‌شود كه طيف سيگنال فيبريلاسيون بطني شكل ثابتي نداشته و امكان استخراج ويژگي قابل قبولي از مشخصه طيف، در مقابل ساير سيگنال‌هاي قلبي وجود نداشته باشد. از اين‌رو، سه ويژگي از پنج ويژگي عمومي سيگنال‌هاي آشوبگون در رابطه با سيگنال فيبريلاسيون بطني قابل بررسي مستقيم هستند.

بعد همبستگي محاسبه شده براي سيگنال‌هاي مختلف و همچنين رسم آنها در فضاي حالت، تفاوت چشمگيري را بين سيگنال فيبريلاسيون بطني با سيگنال‌هاي قلبي فرد سالم و تاكيكاردي بطني و همچنين نويز نشان مي‌دهد. به طور واضح افزايش بعد ديناميكي در سيگنال فيبريلاسيون بطني، به چشم مي‌خورد. غير صحيح بودن بعد ديناميک، نشان‌دهنده آن است كه ديناميک حاكم بر سيگنال بيشتر آشوبگون است تا اينكه اتفاقي[11] باشد [۱۰]. از اين رو آشوبگون بودن سيگنال فيبريلاسيون بطني بسيار محتمل است. مقايسه نتايج، وجود يک ديناميک پيچيده و غيرنويزي را در سيگنال فيبريلاسيون بطني نشان مي‌دهد. بعد ديناميكي به دست آمده براي سيگنال تاكيكاردي بطني نيز يک عدد دقيق صحيح نيست. بررسي‌ها نشان مي‌دهند كه يكي از دلايل اين پديده، نويزهاي باقيمانده در سيگنال‌ها هستند. با اين حال، وجود يک ديناميک آشوبگون ضعيف درون تاكيكاردي بطني نيز دور از ذهن نيست.

توسط يک شبكه عصبي پس‌انتشار خطا سعي شده تا سيگنال فيبريلاسيون بطني در دو حوزه زمان و فركانس نسبت به دو سيگنال ديگر طبقه بندي شود. در حالت عادي نمونه‌هاي سري زماني، عملكرد بسيار ضعيفي را در مقابل طيف فركانسي سيگنال‌ها از خود نشان داده است. اما با استفاده از داده‌هاي جايگزين، افزايش چشمگيري در نتايج مربوط به حوزه زمان حاصل شده است.

در صورت به كارگيري يك شبكه عصبي و در هنگام استفاده

---

[11] Stochastic

از سيگنال‌هاي نمونه‌برداري شده در حوزه زمان، اين شبكه بيش از آنكه بخواهد ويژگي استخراج نمايد، سعي دارد "خود" سيگنال را ياد بگيرد. در مورد فرآيندهاي آشوبگون، اين يادگيري تقريباً بي‌معني است زيرا يک موج آشوبگون هيچ‌گاه عيناً تكرار نمي‌شود از اين جهت كارآيي روش مؤلفه‌هاي فركانسي، جواب‌هاي بهتري نسبت به پردازش مستقيم سيگنال زماني داده است. با اعمال روش داده‌هاي جايگزين، اگر چه در عمل سيگنال زماني مورد استفاده قرار مي‌گيرد، اما در حقيقت شبكه بيشتر به حالتي نزديك مي‌شود كه مي‌خواهد محتواي فركانسي سيگنال‌هاي زماني را استخراج كند.

۵- نتيجه‌گيري

در اين تحقيق، سه نتيجه مهم به دست آمده است:

۱- ديناميك حاكم بر سيگنال فيبريلاسيون بطني، با گذشت زمان در حال تغيير است.

۲- مي‌توان از خواص آشوبگون جهت طبقه‌بندي سيگنال‌هاي فيبريلاسيون بطني استفاده نمود.

۳- با اينكه نتيجه به دست آمده از طبقه‌بندي‌كننده منطبق بر داده‌هاي جايگزين بهتر از روش مبتني بر فركانس نيست ولي دو دستاورد مهم از آموزش به‌وسيله داده‌هاي جايگزين حاصل مي‌گردد: از يک طرف وجود ديناميک آشوبگون در سيگنال فيبريلاسيون بطني تأييد مي‌شود و از طرف ديگر اين ديدگاه مهم و كلي در بحث پردازش سيگنال به دست مي‌آيد كه روش داده‌هاي جايگزين مي‌تواند در آموزش شبكه‌هاي عصبي براي يادگيري ويژگي‌هاي فركانسي يک سيگنال سري زماني مورد استفاده قرار گيرد. نتيجه اخير حوزه‌اي فراتر از سيگنال‌هاي قلبي را در بر گرفته و مي‌توانند در كاربردهاي مختلف مورد استفاده قرارگيرد.

به عنوان پيشنهاد، ابزار ديگري كه در اين مورد مناسب به نظر مي‌رسد، استفاده از بعد سيگنال ورودي جهت طبقه‌بندي سيگنال‌هاي قلبي است. نتايج شبيه‌سازي‌ها نشان مي‌دهند كه تغيير چشمگير بعد سيگنال مي‌تواند به عنوان مشخصه‌اي قابل توجه جهت جداسازي سيگنال فيبريلاسيون بطني از سيگنال طبيعي قلب و همچنين تاكيكاردي بطني در نظر گرفته شود.

سپاسگزاري

بدين وسيله از آقاي دكتر ميكائيل اسمال[۱۲] به خاطر ارسال داده‌هاي مربوط به ECG قدرداني مي‌گردد.

ضميمه الف- خواص سيستم‌هاي آشوبگون

مفهوم فركتال در بحث آشوب جايگاه خاصي دارد. براي مثال، بستر جذب[۱۲] يک پديده آشوبگون مي‌تواند يک شكل فركتالي باشد و همچنين براي توليد يک شكل فركتالي بايد از يک ديناميک آشوبگون استفاده نمود. در ساختارهاي فركتالي، هر ساختار بزرگ مي‌تواند به ساختارهايي كوچک تجزيه شود در حالي كه اين ساختارهاي كوچک كاملاً شبيه ساختار اوليه هستند [۱۰].

يک پديده آشوبگون بر اساس دو ويژگي مهم از يک پديده نويزي تفكيك مي‌گردد. اولاً دامنه پديده آشوبگون بين دو مقدار مشخص قرار دارد و مي‌توان براي آن مرز تعيين نمود. ثانياً در پديده‌هاي آشوبگون، در بازه‌هاي كوچک زماني امكان پيش‌بيني سيگنال وجود دارد در حالي كه در پديده‌هاي نويزي چنين خصوصيتي مشاهده نمي‌شود. پديده "دو شاخه شدن"[۱۴] در منحني‌هاي مربوط به فضاي حالت به ازاي بعضي مقادير پارامترها، يكي از مشخصات فرآيندهاي آشوبگون است. پديده آشوب در فرآيندهاي زمان گسسته و زمان پيوسته مشاهده مي‌شود. در فرآيندهاي زمان پيوسته، پيچيدگي سيستم يكي از لازمه‌هاي وجود پديده آشوب است به طوري كه حداقل سه متغير حالت در يک سيستم آشوبگون بايد وجود داشته باشد [۷].

سيستم‌هاي آشوبگون داراي پنج ويژگي مي‌باشند كه مي‌توانند به عنوان معيار تشخيصي استفاده شوند. پنج مشخصه فرآيندهاي آشوبگون عبارتند از: طيف فركانسي، شكل منحني‌هاي فضاي حالت، بعد ديناميک سازنده سيگنال، حساسيت به شرايط اوليه، كنترل‌پذيري.

---

[12] Michael Small

[13] Domain of Attraction

[14] Bifurcatio

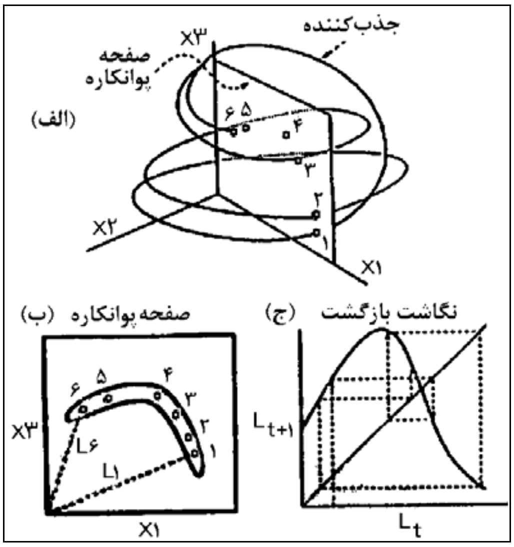
الف-۱- طیف فرکانسی

تحقیقات نشان داده که مؤلفه‌هاي فرکانسي یک سیگنال آشوبگون عموماً به طیف مربوط به نویز صورتي نزدیک است. منحني نویز صورتي به صورت تابع 1/f مي‌باشد [۱۱]. وجود این نوع طیف براي تغییرات نرخ ضربان قلب (HRV) در زمان‌هاي طولاني گزارش شده است [۱۰].

الف-۲- ساختار منحني‌هاي فضاي حالت

"بستر جذب" یک سیستم آشوبگون با منحني مربوط به سیکل حدي[15] متفاوت است. در سیستم‌هاي غیرآشوبگون که داراي سه متغیر حالت مي‌باشند، این منحني در یک صفحه قرار مي‌گیرد اما وقتي دینامیک، آشوبگون باشد این منحني بعد بزرگتري به خود گرفته و دیگر داخل یک صفحه باقي نمي‌ماند. از این رو یکي از روش‌هاي مناسب براي تعیین دینامیک آشوبگون در یک سیگنال زماني، بررسي منحني فضاي حالت آن است. اما اولین مشکلي که در این زمینه به چشم مي‌خورد آن است که یک سیگنال زماني، یک بعدي است و متغیر حالت اضافي براي رسم نمودار فضاي حالت وجود ندارد. براي حل این مشکل از مقادیر گذشته سیگنال زماني استفاده نموده و سه محور فضاي حالت به سه مقدار $n_t, n_{t-\tau}, n_{t-2\tau}$ اختصاص داده مي‌شود که τ تأخیر زماني بین دو نمونه متوالي است و معمولاً آن را بین ۱ یا ۲ انتخاب مي‌کنند. سپس با حرکت اندیس t بر روي نمونه‌هاي ورودي و استخراج و رسم این سه‌تایي‌هاي مرتب در فضاي سه بعدي، نمودار فضاي حالت تولید مي‌گردد. در یک روش دیگر، به وسیله رسم اشتقاق‌هاي مختلف قلبي نسبت به یکدیگر، فضاي‌حالت مربوط به سیگنال قلبي تشکیل مي‌شود [۱۲].

نمودار فضاي حالت، ساختارهاي مشابه را در سیگنال زماني آشکار مي‌کند. لازم به ذکر است که این روش به سه‌بعد محدود نبوده و مي‌توان فضاهایي با ابعاد بزرگتر نیز تولید نمود، ولي از آنجا که در سه‌بعد امکان نمایش فیزیکي وجود دارد، بیشتر از این حالت استفاده مي‌شود. تفسیر این منحني سه‌بعدي مشکل است، از این رو یک صفحه مطابق با شکل ۶، با آن تقاطع داده و نقاط تقاطع را بررسي مي‌کنند. به نتیجه حاصل، صفحه پوانکاره[16] مي‌گویند [۷]. در حالتي که سیگنال زماني، مربوط به یک فرآیند نویزي باشد برش پوانکاره به صورت یک توده ابر مانند و نامشخص در مي‌آید.



شکل ۶- صفحه پوانکاره

الف- نمودار فضاي حالت در سه بعد و وضعیت قرارگیري صفحه پوانکاره؛ ب- نگاشت پوانکاره به دست آمده؛ ج- نگاشت بازگشتي بر اساس برش پوانکاره [۷]

در مقابل اگر سیگنال زماني مربوط به یک فرآیند آشوبگون باشد، نقشه استخراج شده داراي ساختاري معین مي‌گردد.
روش دیگري که مي‌توان در مورد آشوبگون بودن پدیده نظر داد، استفاده از نگاشت بازگشت[17] است. مطابق شکل ۶، نقاط برخورد منحني با صفحه پوانکاره بر اساس زمان و ترتیب برخورد، شماره‌گذاري شده و سپس فاصله این نقاط تا مبدأ اندازه‌گیري مي‌شود.

هر فاصله نسبت به فاصله اندازه‌گیري شده مربوط به تقاطع ماقبل، در یک صفحه جدید رسم مي‌گردد. در صورتي که سیگنال مورد بررسي آشوبگون باشد، در محل تقاطع با نیمساز ربع اول- سوم، منحني داراي شیب منفي زیادي خواهد بود [۷].

الف-۳- بعد دینامیک

بستر جذبي که در اثر یک دینامیک آشوبگون ایجاد مي‌شود اولاً پیچیده است، ثانیاً محدود مي‌باشد. با توجه به آنکه این

---

[15] Limit Cycle

[16] Poincare

[17] Return Map

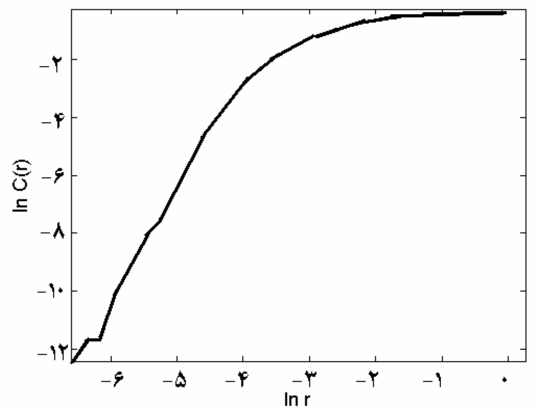
بستر جذب محدود است، تمام فضا توسط آن پوشانده نمي‌شود و از طرفي اين منحني در يک صفحه نيز قرار نمي‌گيرد. از اين جهت بعد ديناميک مربوطه صحيح نبوده و آن را بستر جذب غيرطبيعي[۱۸] مي‌نامند. بعد ديناميک بر اساس روش‌هاي مختلفي اندازه‌گيري مي‌شود که يکي از آنها روش بعد همبستگي[۱۹] است. بعد همبستگي در حقيقت نمادي از درجه آزادي سيستم است.

در حالت کلي فرض شود که از يک سري زماني با N نمونه $\{x_1, x_2, ..., x_N\}$ يک فضاي m بعدي ساخته شده است که هر نمونه در اين فضا بر اساس تأخير τ، به شکل $P_i = \{x_1, x_{i+\tau}, x_{i+2\tau} ..., x_{i+(m-1)\tau}\}$ تعريف مي‌گردد. سپس به مرکز هر نقطه P_i در اين فضا، يک کره به شعاع r، رسم کرده و تعداد نقاطي را که در داخل هر يک از اين کره‌ها قرار مي‌گيرند، شمارش مي‌گردد. جمع کل اين نقاط بر مقدار N^2 تقسيم شده و مقدار "جمع همبستگي"[۲۰] $(C(r))$ را توليد مي‌نمايد. درصورتي که فضاي نمونه‌برداري از حالت گسسته به فضاي پيوسته تبديل شود، اين جمع به انتگرال تبديل شده و از آن با عنوان "انتگرال همبستگي"[۲۱] ياد مي‌شود.

براي مقادير مختلف r، مقدار جمع همبستگي محاسبه مي‌گردد. مشاهده مي‌شود که براي تعداد کافي نمونه زماني و همچنين براي مقادير کوچک r، رابطه $C(r) = \alpha r^D$ برقرار مي‌گردد. مقدار α ثابت بوده و D بعد همبستگي خوانده مي‌شود. با گرفتن لگاريتم از دو طرف رابطه و اعمال تقريب خطي در نمودار حاصله، مقدار D محاسبه می‌شود. شکل ۷، نمونه‌اي از منحني جمع همبستگي را براي يک سيگنال غير نويز نشان مي‌دهد که بر حسب شعاع کره در مختصات لگاريتمي رسم شده است.

براي تخمين بعد همبستگي، بهترين خطي را که قبل از ناحيه اشباع بر منحني انطباق مي‌يابد به دست آورده و ضريب زاويه آن به عنوان بعد سيستم در نظر گرفته مي‌شود.

يکي از مشکلات اين روش آن است که در حالت کلي بعد کره مورد نظر مشخص نبوده و تغيير آن، بر روي نتايج اثر مي‌گذارد. در اين شرايط مقدار D براي يک مجموعه از فضا با بعدهاي مختلف محاسبه مي‌شود. در اين حالت انتظار مي‌رود جواب‌ها همگرا شوند که غالباً هم چنين مي‌شود [۱۳].



شکل ۷- منحني جمع همبستگي برحسب شعاع کره
براي يک سيگنال غير نويز

الف-۴- حساسيت به شرايط اوليه

يکي از شيوه‌هايي که مي‌توان آشوبگون بودن يک سيستم را آزمايش نمود، تغيير شرايط اوليه آن به مقدار خيلي کم و بررسي خروجي آن است. در صورتي که تغييرات خروجي شديد باشد سيستم مربوطه آشوبگون خواهد بود. ويژگي‌هايي که در اين زمينه براي آناليز يک سيگنال زماني مورد استفاده قرار مي‌گيرند "مؤلفه‌هاي لياپانوف" و "امکان پيش‌بيني شدن" مي‌باشند [۱۰،۱۳].

الف-۴- ۱- مؤلفه‌هاي لياپانوف

در اين روش نرخ همگرايي يا واگرايي دو نقطه در فضاي حالت، نسبت به يکديگر اندازه‌گيري مي‌شود بدين صورت که دونقطه را به فاصله d_0 از يکديگر به عنوان شرايط اوليه سيستم در نظر گرفته و با گذشت زمان روند همگرايي آن دو را نسبت به هم مي‌سنجند. اين سنجش توسط رابطه $d(t) = d_0 \, e^{\lambda t}$ مدل مي‌شود که λ را مؤلفه لياپانوف مي‌نامند. درصورتي که $\lambda > 0$ باشد سيستم نسبت به شرايط اوليه حساس است.

---

[18] Strange Attractor
[19] Correlation Dimension
[20] Correlation Sum
[21] Correlation Integral

الف-۴- ۲- قابليت پيش‌بيني شدن

یک سیستم آشوبگون در دل خود از یک قانون تبعیت مي‌کند. اين ويژگي امکان پيش‌بيني سيگنال را بر اساس مقادير اوليه متفاوت فراهم مي‌نمايد. براي اين منظور سيستم پيش‌بيني‌کننده مي‌بايست از ديناميک حاکم بر سيگنال آشوبگون اطلاع داشته باشد. خاطر نشان مي‌گردد که سيستم نويزي به هيچ عنوان قابل پيش‌بيني نيست و از اين جهت به سادگي از يک سيستم آشوبگون قابل تمايز است. در يك سيستم آشوبگون به خاطر حساسيت نسبت به شرايط اوليه، هر چقدر نقطه دورتري مورد پيش‌بيني قرار گيرد، دقت پيش‌بيني کمتر مي‌شود. در حقيقت وجود مؤلفه‌هاي لياپانوف مثبت با کاهش قابليت پيش‌بيني شدن معادل مي‌باشد.

الف-۴- کنترل‌پذيري

با توجه به وجود یک ساختار قانونمند در داخل یک پدیده آشوبگون، مي‌توان سيستم را کنترل نمود. هنگام استخراج نگاشت بازگشتي مربوط به یک سيستم آشوبگون، منحني فضاي حالت به صورت یک سري الگوهاي تکراري در مي‌آيد که حول نيمساز ربع اول- سوم نوسان مي‌کنند. مطابق با شکل ۶- ج، کنترل یک پديده آشوبگون به معني نگه داشتن سيستم حول نقطه تقاطع منحني بازگشتي با اين نيمساز است [۷].

در حقيقت کنترل‌پذيري با امکان پيش‌بيني سيگنال ارتباط مستقيم دارد. فرض‌کنيد که قرار است يك سيستم آشوبگون در يك حلقه بسته تحت کنترل قرارگيرد، در اين شرايط اگر کنترل‌کننده از ديناميك و ساختار توليدکننده سيگنال آشوبگون اطلاع داشته باشد، مي‌تواند با توليد يك سيگنال کنترلي مناسب، خروجي را تحت کنترل قرار دهد.

ضمیمه ب- داده‌های جایگزین

يکي از روش‌هايي که در مبحث آشوب استفاده مي‌شود، داده‌هاي جايگزين است. در اين روش از سيگنال زماني تبديل فوريه گرفته، فاز هر يك از نمونه‌هاي حاصل را به صورت تصادفي تغيير داده و سپس از سيگنال حاصله تبديل فوريه معکوس گرفته مي‌شود. نتيجه اين کار سيگنالي است که شکل طيف فرکانسي آن مشابه سيگنال اوليه است ولي از نظر ظاهر هيچ شباهتي به سيگنال اوليه ندارد [۸،۱۰]. وقتي که از داده اوليه‌اي، داده جايگزين تهيه مي‌گردد، اولاً تابع توزيع چگالي انرژي فرکانسي آن ثابت مي‌ماند. ثانياً همبستگي‌هاي خطي در داده جديد حفظ شده ولي همبستگي‌هاي غيرخطي از بين مي‌روند. بعد فرکتال داده اوليه و داده جديد محاسبه شده و در صورتي که بين اين دو بعد، تفاوت زياد نباشد نتيجه گرفته می‌شود که داده اوليه، ناشي از يك فرآيند تصادفي خطي است. در صورتي که تفاوت زياد باشد، مي‌توان گفت که داده اوليه، ناشي از يك فرآيند معين خطي يا غيرخطي است [۱۴].

مراجع

[1] Small M: Temporal evolution of nonlinear dynamics in ventricular arrhythmia; International Journal of Bifurcation and Chaos 2001; 11: 2531–2548.

[2] Lombardi F: Chaos theory, heart rate variability, and arrhythmic mortality; American Heart Association-Circulation 2000; 101: 8–10.

[3] Guyton A; Textbook of Medical Physiology: 8th Edition, Saunders; 1991.

[4] Timo L; Correlation properties and complexity of preoperative RR interval dynamics in coronary artery bypass surgery patients; Anaesthesiology 2000; 93: 69–80.

[5] Korpelainen J: Dynamic behavior of heart rate in ischemic stroke; American Heart Association-Stroke 1999; 30: 1008–1013.

[6] Small M: Uncovering nonlinear structure in human ECG recordings; Chaos Solitons & Fractals 2002; 13: 1755-1762.

[7] Haefner J; Modelling Biological Systems: Principles and Applications; Chapman and Hall; 1996.

[8] Small M; Nonlinear analysis of human ECG during sinus rhythm and arrhythmia; Computers in Cardiology 2000; 27: 147–150.

[9] Minami K; Real time discrimination of ventricular tachyarrhythmia with Fourier transform neural network; IEEE Trans on Biomedical Engineering 1999; 46: 179–185.

[10] Eberhart R; Chaos theory for the biomedical engineer; IEEE Eng in Med and Biology 1998; 8:41–45.

[11] Small M; Testing time series for nonlinearity; Statistic and Computing 2001; 11:257–268.

[12] Povinelli R; Are nonlinear ventricular arrhythmia characteristics lost as signal duration decreases?; Proc Computers in Cardiology 2002; 29: 221-224.

[13] Parker T; Chaos: a tutorial for engineers; Proc of IEEE 1987; 75(8): 982–1008.

[14] Small M; Surrogate test for pseudo periodic time series data; Physics Review Letters 2001; 87(18): 1–4.