

مقایسه ویژگیهای فراکتال رفلکس H عضله های سولئوس و گاستروکنمیوس پس از اعمال TENS دو قطبی و سه قطبی ستون فقرات کمری در انسان

امیرحسین کازرانی فراهانی^۱(MSc)، سیدمحمد فیروزآبادی^۲(PhD)*، گیتی ترکمان^۳(PhD)، علیرضا سرمدی^۴(MSc)

۱- کارشناس ارشد مهندسی پزشکی - بیو الکتریک دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات

۲- دانشیار گروه فیزیک پزشکی دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار گروه فیزیوتراپی دانشگاه تربیت مدرس

۴- دانشجوی دکترای فیزیوتراپی دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

مقدمه: از دیدگاه مدل سازی و کمی، دامنه رفلکس H حتی با ثابت نگه داشتن شدت تحریک به اعصاب آوران، دارای تغییر پذیری قابل توجهی است. تحلیل های آماری کلاسیک، ویژگی های استاتیک تغییر پذیری رفلکس تک سیناپسی را بررسی می کنند. از آنجایی که برخی سیگنالهای بیولژیکی نامنظم در زمان، تصادفی نبوده و دارای همبستگی زمانی دوررس هستند، بنابراین تحلیل ویژگی های دینامیکی توسط روش آنالیز فراکتال، می تواند بینشهای جدیدی برای مکانیزمهای اساسی تغییر پذیری رفلکس تک سیناپسی متعاقب تحریک های الکتریکی سطحی دو قطبی و سه قطبی نخاع فراهم کند.

مواد و روش ها: برای بررسی اثرات تحریک الکتریکی، با استخراج مؤلفه های فراکتال به روش CGSA، ویژگی های درصد فراکتال، نمای طیفی مؤلفه های فراکتال و نیز بعد فراکتال توالی های دامنه قله به قله رفلکس H، موج H+M، H-M، H/M، M و عضله های سولئوس و گاستروکنمیوس در حالت های دو قطبی و سه قطبی ارزیابی شدند.

آزمایش بر روی ۴ مرد سالم غیر ورزشکار بین ۲۰ تا ۴۰ سال، در دو گروه دو قطبی و سه قطبی، و در چهار مرحله انجام شد. در هر گروه، تعداد ۵۰۰ رفلکس متوالی H با فرکانس ۰/۵ هر تزد در شدت تحریک ثابت (دامنه قله به قله رفلکس H تقریباً دو برابر دامنه قله به قله موج M)، قبل از اعمال TENS به عنوان کنترل و بلافاصله بعد از اعمال ۱۵ دقیقه، TENS از عضله های سولئوس و گاستروکنمیوس ثبت گردید.

بحث و نتیجه گیری: میانگین درصدهای فراکتال، نشان دهنده فراکتال تصادفی بودن سری های زمانی مورد بحث، بالاتر از ۷۰ درصد به دست آمدند. همچنین این توالی ها، تقریباً طیف توان نوع $1/f^\beta$ بیان کننده زوال قانون توان را دنبال می کنند. میانگین مقدار نمای طیفی β برای همه توالی ها، بیشتر از ۰/۶ به دست آمد. بنابراین همبستگی زمانی قوی در این توالی ها، متمایز از نویز سفید با همبستگی زمانی صفر، مشاهده گردید.

اختلاف مقادیر درصد فراکتال و نمای طیفی β در هر گروه آزمایشی قبل و بعد از اعمال تحریک TENS، به عنوان معیارهایی برای مقایسه در نظر گرفته شدند. با انجام آزمونهای آماری، تنها مقدار نمای طیفی β برای توالی H+M و با احتمال ۹۲/۵ درصد برای توالی H/M عضله سولئوس، دارای تفاوت معنی دار از لحاظ آماری در دو حالت دو قطبی و سه قطبی به دست آمد. وجود تفاوت معنی دار در نمای طیفی توالی های H+M عضله سولئوس در حالت دو قطبی و سه قطبی، بیانگر رفتار مجموعه نوری آن به عنوان یک عضله کند انقباض، متعاقب تحریک های الکتریکی TENS در نخاع است.

کلمات کلیدی: آنالیز فراکتال، روش CGSA، رفلکس H، TENS دو قطبی، TENS سه قطبی.

۱- مقدمه

حسی و حرکتی در نخاع و مطالعه مکانیزم های نوروفیزیولوژیکی کنترل حرکت استفاده می شود. از آنجا که مکانیزم تأثیر تحریک الکتریکی سطحی ستون فقرات (TENS) در دو حالت دو قطبی و سه قطبی بر این سیگنال متفاوت است (۱)، بررسی ویژگی های فراکتال رفلکس H در انسان پس از اعمال TENS دو قطبی و سه قطبی، یک روش پردازشی مؤثر برای بینش دقیقتر در مکانیزمها یا تغییرات ایجاد شده، خواهد بود.

ابزار پردازشی آنالیز فراکتال با کمک روش CGSA، به عنوان یک روش مفید در آزمایش های رفلکس H، مورد استفاده قرار گرفته

امروزه اسپاستی سیتی میلیونها نفر را تحت تأثیر عوارض خود قرار داده است، که با عواملی چون زخم و عفونت، کوتاهی عضلات و اختلالات عضلانی-اسکلتی همراه است. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه درمان و یا کاهش اسپاستی سیتی صورت گرفته است. از جمله تحقیقات انجام شده، بررسی تأثیر تحریک الکتریکی سطحی TENS بوده است که هنوز تأثیر آن بر تحریک پذیری نورون های حرکتی مورد بحث است. از پارامترهای رفلکس H، برای ارزیابی تحریک پذیری نورونهای

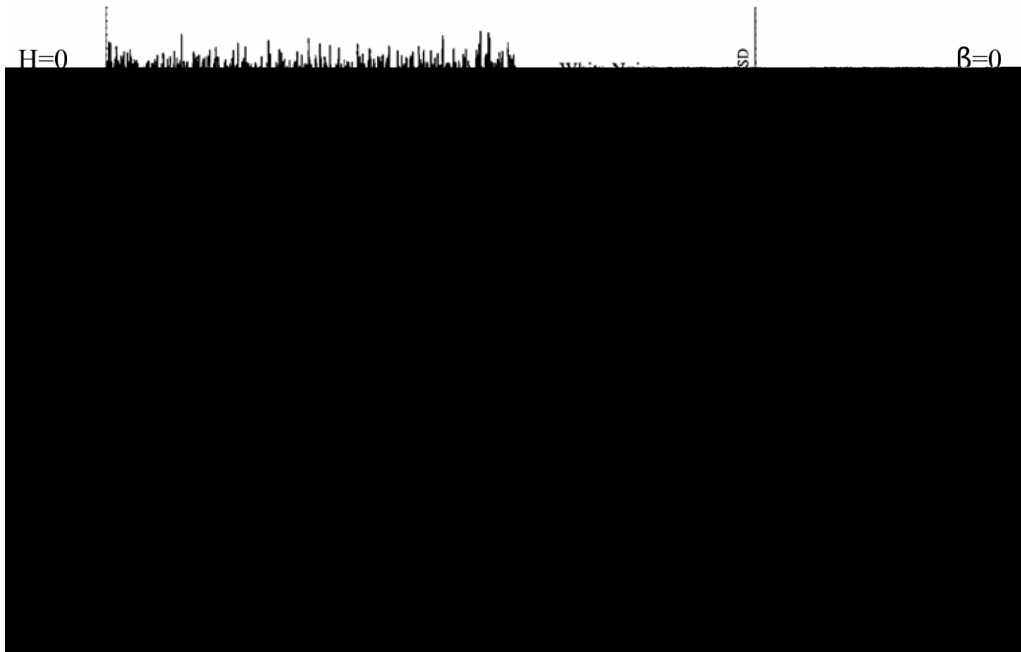
* نشانی مکاتبه: تهران - دانشگاه تربیت مدرس - دانشکده علوم پزشکی - گروه فیزیک پزشکی

انسان را مشخص می کند (۴).
تأثیر تحریک الکتریکی سطحی سه قطبی بر روی ستون فقرات
برای اولین بار توسط سعیدی و همکاران با استفاده از روشهای
$$x(ht + t_0) - x(t_0) = h^H \{ x(t + t_0) - x(t_0) \} \quad (1)$$

آماری و با ارزیابی تحریک پذیری نورون های محرکه نخاعی انجام
شد (۶). همچنین تأثیر TENS دو قطبی و سه قطبی در
آزمایشات انجام شده به وسیله گلجاریان مقایسه گردید (۱). او
نشان داد که TENS سه قطبی بر روی مجموعه نورونی نخاع تأثیر
می گذارد، و تا حدودی نحوه اثر و مکانیزم های اثر را برای این
تحریک پیشنهاد کرد. لیکن بخشی از توجیه های انجام شده و
نحوه اثر دقیق تحریکات سه قطبی، نیاز به بررسی بیشتری دارد.

(a)

Time Domain



شکل ۱ سری های زمانی فراکتال و چگالی طیف توان آنها در مقیاس لگاریتمی. (a) سری های زمانی فراکتال با مقادیر متفاوت H. اگرچه یک سری زمانی فراکتال خیلی نامنظم به نظر می رسد، ولی دارای یک نظم مشخص شده بوسیله پارامتر H است. (b) توان طیفی به عنوان یک تابع از فرکانس با $1/f^\beta$ مقیاس گذاری می شود (۲).

با توجه به اینکه کاربرد روش آنالیز فراکتال در مطالعات قبل، روی رفلکس H عضله سولئوس نتایج خوبی نشان داده است، در این مطالعه سعی شده است تا شباهت موجود در پژوهش های قبلی بر روی اثرات تحریک الکتریکی سطحی دو قطبی و سه قطبی ستون فقرات انسان با استفاده از روش پردازشی آنالیز فراکتال برطرف شود.

است (۲ و ۳). Nozaki و همکارانش نشان دادند که رفلکس H دارای همبستگی فراکتال بوده، که این همبستگی به سبب انتقال از میان فیبرهای عصبی و انتقال در اتصالات عصبی-عضلانی نیست، بلکه در اتصالات سیناپسی نورون حرکتی آلفا در طناب نخاعی ایجاد می شود (۲). همچنین توالی دامنه های موج M، ایجاد شده به وسیله تحریک مستقیم اعصاب حرکتی، مشابه با نوبز سفید و بدون همبستگی زمانی گزارش شدند (۲). در پژوهشی دیگر، آنها نشان دادند که همبستگی فراکتال قوی در مجموعه های رفلکس H افراد طبیعی آمیخته با ورودیه های مافوق نخاعی مشاهده می شود، که دارای تأثیر برابر روی قوس رفلکس H سولئوس هر دو پا است (۳).
از روشهای پردازشی دیگر چون آنالیز مؤلفه های اصلی (PCA)

(b)

Frequency Domain

نیز در آزمایش های رفلکس H استفاده شده است (۴ و ۵). Willemse و همکارانش الگوی همبستگی تعدادی از رفلکسهای H ثبت شده در عضله سولئوس را، با آنالیز مؤلفه های اصلی روی اشخاص سالم و بیماران اسپاستی سیتی مطالعه کردند. همچنین ما در تحقیقی نشان دادیم که آنالیز مؤلفه های اصلی، تا حدودی شباهت و تفاوت بین مؤلفه های اصلی قبل و بعد از تحریک الکتریکی سطحی دو قطبی و سه قطبی ستون فقرات

۲- مواد و روشها

۲-۱ زمینه نظری

یک سری زمانی فراکتال تصادفی دارای خاصیتی است که خود مشابه (Self-similarity) و یا خود وابسته (Self-affinity) آماری نامیده می شود (۷ و ۸ و ۹ و ۱۰). دینامیک های یک سری زمانی خود وابسته $(t) \times (t)$ زمان است که ارضاء کننده رابطه رسمی شده توسط Mandelbrot و Van Ness است. به صورت زیر بیان می شود (۱۱):

که نماد $h > 0$ و t_0 با تعیین نمای Hurst با نماد H توصیف می شود ($0 < H < 1$). نمای مقیاس گذاری هارست، ذات یا بی نظمی فراکتال تصادفی را نشان می دهد (۸، ۹، ۱۲). وقتی که H تنظیم می شود، بعد فراکتال سری زمانی $x(t)$ می تواند بوسیله رابطه $D = 2 - H$ محاسبه گردد (۱۳).

شکل (۱۱) چهار سری زمانی فراکتال تولید شده توسط کامپیوتر با مقادیر متفاوت H و را نشان می دهد. هر سری زمانی ارضاء کننده رابطه (۱)، به عنوان فراکتال تصادفی شناخته می شود. نویز سفید نیز در دسته فراکتال های تصادفی قرار می گیرد. یک مشخصه مهم سری های زمانی فراکتال، همبستگی زمانی دوررس (همبستگی فراکتال) است و توان طیفی به عنوان یک تابع از فرکانس به صورت $1/f^\beta$ (که β نمای طیفی است) شناخته می شود (۹ و ۱۰). به عبارت دیگر، مطابق شکل (۱۱b)، نمودار لگاریتم چگالی طیف توان در مقابل لگاریتم فرکانس دارای یک رابطه خطی با شیب منفی ($-\beta$) است. برای نویز سفید با β تقریباً برابر صفر، هیچ همبستگی زمانی مشاهده نمی گردد، اگرچه آن به عنوان فراکتال تصادفی طبقه بندی می شود. با بزرگتر شدن β ، یک همبستگی زمانی قویتر مشاهده می شود. از آنجا که مقدار β مرتبط است (برای $0 \leq \beta < 1$ مقدار $H = 0$ بوده و برای $\beta \geq 1$ مقدار $H = (\beta - 1)/2$ است). ذات یک سری زمانی فراکتال می تواند با محاسبه به جای H ارزیابی شود (۱۴ و ۱۵). بنابراین وقتی $0 \leq \beta \leq 1$ است، چون سری زمانی فراکتال دارای مقدار $H=0$ است، فقط β می تواند اطلاعاتی روی شکل وابسته زمانی فراهم کند. این وضعیت برای توالی های رفلکس H در مطالعات Schiff و Chang وجود داشت (۱۶).

برای جداسازی مؤلفه های فراکتال و هماهنگ ساده از یکدیگر در حوزه فرکانس، یک روش با نام آنالیز طیفی ناصاف یا به اختصار CGSA (Coarse Graining Spectral Analysis)، توسعه یافته توسط Yamamoto و Hughson (۱۷، ۱۵)، با یک اصلاح اندک از یک FFT مرسوم مبنی بر آنالیز طیفی معرفی شد. در این روش از خصوصیات خود وابسته سری های زمانی فراکتال (رابطه (۱)) و ارزیابی درجه آمیختگی در نسبت های فاز مؤلفه های طیفی

استفاده می شود. روش CGSA قادر به: (۱) استخراج مؤلفه های فراکتال در یک سری زمانی معین در حوزه فرکانس، (۲) ارزیابی سهم فراکتال تصادفی در سری زمانی معین (درصد فراکتال)، (۳) تخمین مقدار صحیح است. اگر مقدار درصد فراکتال به صد درصد نزدیک شود، تغییر پذیری سیگنال به بهترین وجه به وسیله فرآیندهای فراکتال تصادفی نسبت به یک مجموع نوسانات منظم ساده، توصیف می شود (۲، ۱۵).

اگر یک منحنی، خود مشابه (فراکتال) باشد، و بتواند به k_{max}, \dots, k_1 منحنی مشابه تقسیم شود، سپس طول L برای هر منحنی به صورت زیر مقیاس گذاری می شود:

$$L(k_1) \propto k_1^{-D_f}, \dots, L(k_{max}) \propto k_{max}^{-D_f} \quad (2)$$

که، D_f بعد فراکتال منحنی نامیده می شود، و با استفاده از روش کمترین-مربعات از رابطه فوق محاسبه می شود. مقدار D_f ، پیچیدگی منحنی را اندازه گیری می کند. برای یک منحنی ساده، مقدار D_f برابر ۱ است، و برای یک منحنی که تقریباً صفحه را پر می کند، D_f به ۲ نزدیک می شود (۱۸). سه تا از بهترین روش ها برای محاسبه بعد فراکتال یک سری زمانی (۱۸، ۱۹، ۲۰)، الگوریتم هیاجی، الگوریتم پتروسیان و الگوریتم کتز است، که در آنالیز سیگنال های بیولوژیکی و سیستم های مهندسی متنوع به کار می روند (۲۱).

۲-۲ روشهای انجام آزمایش

برای استخراج مؤلفه های فراکتال به یک سری زمانی خود وابسته با همبستگی زمانی دوررس نیاز است. با توجه به مطالعات قبلی (۲۲ و ۱ و ۲ و ۳)، نحوه انجام آزمایش و ثبت داده ها مشخص گردید. آزمایش در دو گروه دو قطبی و سه قطبی، و در چهار مرحله انجام شد. جریان تحریک برای برانگیختن رفلکس های H متوالی، پالس مربعی با پهنای ۲ میلی ثانیه و فرکانس ۰/۵ هرتز بود. در هر مرحله، تعداد ۵۰۰ رفلکس متوالی H با فاصله زمانی ۲ ثانیه (برای کاهش تأثیر پذیری رفلکسها بر یکدیگر (۲، ۳)) در مدت زمان حدود ۱۷ دقیقه، به کمک یک تقویت کننده با ضریب بهره ۴۰۰ تا ۱۰۰۰۰ و یک برد آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی دو کاناله در فرکانس نمونه برداری ۱ کیلو هرتز از دو عضله سولئوس و گاستروکمیوس، در یک شدت تحریک ثابت (با دامنه قله به قله رفلکس H تقریباً دو برابر دامنه قله به قله موج M عضله سولئوس)، ثبت گردید.

از آنجایی که فاصله های زمانی کم در تحریک (مثلاً ۱ ثانیه)، می تواند بر تحریک پذیری نورون حرکتی آلفا اثر کرده و تأثیر تحریک قبلی، ممکن است همبستگی فراکتال در توالی های موج H تولید کند، در اینجا فاصله زمانی تحریک ۲ ثانیه در نظر گرفته شده

بر شیار بین دو سر عضله گاستروکنمیوس قرار داشت (۱). الکترودهای ثبات روی عضله گاستروکنمیوس، با بررسی مورفولوژی عضله و نحوه عصب گیری آن توسط سردمدی (۲۲)، در ناحیه‌ای حدود محل اتصال ۱/۴ فوقانی و ۳/۴ تحتانی ساق (فاصله بین پشت زانو و قوزک داخلی) تقریباً ۴ تا ۶ سانتیمتر خارج خط وسط ساق و به صورت مورب، به عنوان محل مناسبی برای ثبت رفلکس H سر خارجی عضله گاستروکنمیوس، قرار گرفتند (۲۲). الکتروود آند و کاتد ثبت، دو سانتیمتر از هم فاصله داشتند. الکتروود زمین به صورت نواری در فاصله بین الکترودهای ثبات و تحریک، به دور ساق پا بسته شد.

متوسط شدت جریان تحریک اعمال شده به عصب تییبیل برای فراخوانی رفلکس ها، ۱۰/۴۶ میلی آمپر بدست آمد. متوسط آستانه حسی تحریک TENS در افراد مورد آزمایش برابر $0/35 \pm 9/55$ میلی آمپر، متوسط شدت جریان مورد استفاده در ابتدای تحریک (۱/۵ برابر آستانه حسی) $0/77 \pm 14/31$ میلی آمپر و متوسط حداکثر جریان مورد استفاده در انتهای تحریک TENS برابر $0/99 \pm 15/25$ میلی آمپر بود.

۲-۳ تحلیل داده‌ها

برای استخراج مؤلفه های فراکتال رفلکسهای H و موجهای M متوالی، ابتدا دامنه قله به قله آنها را بدست آوردیم. و با پشت سر هم قرار دادن این مقادیر، آنها را به صورت یک سری زمانی در نظر گرفتیم. سپس، آنالیز فراکتال را بر روی این سری زمانی انجام دادیم. تمامی مراحل فوق و انجام آنالیز فراکتال، شامل محاسبه درصد فراکتال، نمای طیفی و بعد فراکتال، توسط برنامه های نوشته شده در بسته نرم افزاری MATLAB انجام شدند.

دامنه قله به قله موجهای M و رفلکسهای H در هر یک از ۵۰۰ رفلکس ثبت شده، برای عضله های سولئوس و گاستروکنمیوس محاسبه شدند. برای پیدا کردن بیشترین و کمترین مقدار هر موج، باید بازه زمانی هر کدام، مد نظر قرار گیرد. در فاصله زمانی ۰ تا ۴ ms موج تحریک ظاهر می گردد، بنابراین بازه زمانی ۵ms تا ۳۲ ms برای موج M و بازه زمانی ۶۲ms تا ۱۵ ms برای رفلکس H در نظر گرفته شدند. از آنجایی که سرعت هدایت جریان در عصب ها نسبتاً ثابت است، مکان به وقوع پیوستن این قله ها در هر فرد نیز باید نسبتاً ثابت باشد، بنابراین برای اطمینان از صحت محاسبات، محل رخداد این قله ها نیز مورد بررسی قرار گرفتند.

با قرار دادن متوالی دامنه های قله به قله محاسبه شده، سری های زمانی موجهای M و رفلکسهای H بدست آمدند. از آنجایی که موج M پاسخ مستقیم عضله به تحریک بوده، و موج H نیز همین پاسخ است، که با تأخیر به علت عبور از یک دسته از نورون های حرکتی در طناب نخاعی و به طور غیر مستقیم ایجاد می

است. هر چند در مطالعات نوزاکی و همکارانش نشان داده شده است که فاصله های زمانی تحریک کم (۱ ثانیه) و بزرگتر (۳ ثانیه) بر همبستگی فراکتال توالی های موج H تأثیر نمی گذارد (۲).

تحریک الکتریکی سطحی روی ستون فقرات (TENS)، با پهنای پالس ۳۰۰ میکرو ثانیه، با شکل موج مربعی تک فازی و فرکانس ۱۰۰ هرتز، با زمان وصل جریان ۱۲۰ ثانیه، زمان قطع جریان ۳۰ ثانیه‌ای و کل زمان تحریک ۱۵ دقیقه، به صورت دو قطبی و سه قطبی، به ستون فقرات اعمال گردید. برای پیشگیری از پدیده عادت، در هر یک از افراد مورد آزمایش، شدت جریان تحریک با فاصله زمانی حدود پنج دقیقه افزایش یافته، تا فرد همان احساس اولیه را نسبت به تحریک اعمال شده گزارش کند و انقباض عضلانی هم به وجود نیاید (۱).

در هر گروه آزمایشی (دو قطبی و سه قطبی)، در مرحله نخست، اثر قرار گرفتن الکترودهای تحریک TENS بر روی ستون فقرات بررسی شدند. در این مرحله، رفلکس های متوالی، H به عنوان گروه کنترل در هر جلسه از ثبت، مد نظر قرار گرفتند. در مرحله دوم، با اعمال TENS دو قطبی و یا سه قطبی در شدت ۱/۵ برابر آستانه حسی به مدت ۱۵ دقیقه، توالی های رفلکس H بلافاصله بعد از اعمال TENS ثبت شدند. بنابراین از آنجایی که در هر جلسه، یک ثبت به عنوان کنترل انجام می پذیرد، با بررسی تفاضل پارامترهای کنترل و آزمایش مربوطه، اثرات محیطی و شرایط متفاوت قرار گرفتن الکتروود ها و نحوه انجام آزمایش در جلسات مختلف، به حداقل ممکن می رسد.

آزمایش تحریک الکتریکی سطحی ستون فقرات در دو حالت دو قطبی و سه قطبی برای ثبت رفلکسهای H متوالی، بر روی ۴ مرد سالم غیر ورزشکار بدون هیچ گونه عارضه عصبی-عضلانی و یا آسیب ستون فقرات و اندام تحتانی، بین سنین ۲۰ تا ۴۰ سال انجام شد. هر فرد یکبار به عنوان گروه آزمایش سه قطبی و یکبار در گروه آزمایش دو قطبی مورد آزمایش قرار گرفت. وضعیت قرار گرفتن فرد، بصورت دمر خوابیده بود. برای اعمال تحریک الکتریکی در روش سه قطبی از یک الکتروود کاتد و دو الکتروود آند استفاده شد. الکتروود کاتد، بالای زائده خاری مهره یازدهم پشتی، هم عرض سگمان نخاعی اول خاجی، قرار گرفت. از آندها یکی ۳ سانتیمتر بالاتر از کاتد و دیگری ۳ سانتیمتر پایین تر از کاتد قرار گرفت. از آنجایی که این الکتروود ها، دارای ابعاد بزرگی (۶ در ۴ سانتیمتر) بودند، کاملاً سطح مورد نظر را در بر می گرفتند. برای اعمال تحریک الکتریکی در روش دو قطبی، نحوه الکتروود گذاری همانند روش سه قطبی بود و فقط فیش آند پایینی از اتصال خارج می شد. الکترودهای تحریک در ناحیه پشت زانو، بین تاندون عضلات دوسر رانی و نیمه غشایی، قرار داده شدند. الکترودهای ثبات روی عضله سولئوس در امتداد تاندون آشیل و تقریباً منطبق

هستند، ممکن است به عنوان یک یافته جدید ملاحظه نشود. زیرا همانگونه که در تعاریف بیان شد، حتی نویز سفید به عنوان فراکتال تصادفی طبقه بندی می شود. ولی اگر تغییر پذیری دارای خصوصیات نویز سفید باشد، مشخصه های وابستگی زمانی در آن وجود نخواهد داشت. پس یک مشخصه مهم توالی های موج H در مقابل نویز سفید، آن است که آنها دارای یک همبستگی زمانی نسبتاً دوررس هستند (۲، ۳). برای بررسی این همبستگی زمانی، نیاز به محاسبه نمای طیفی f^β داشتیم.

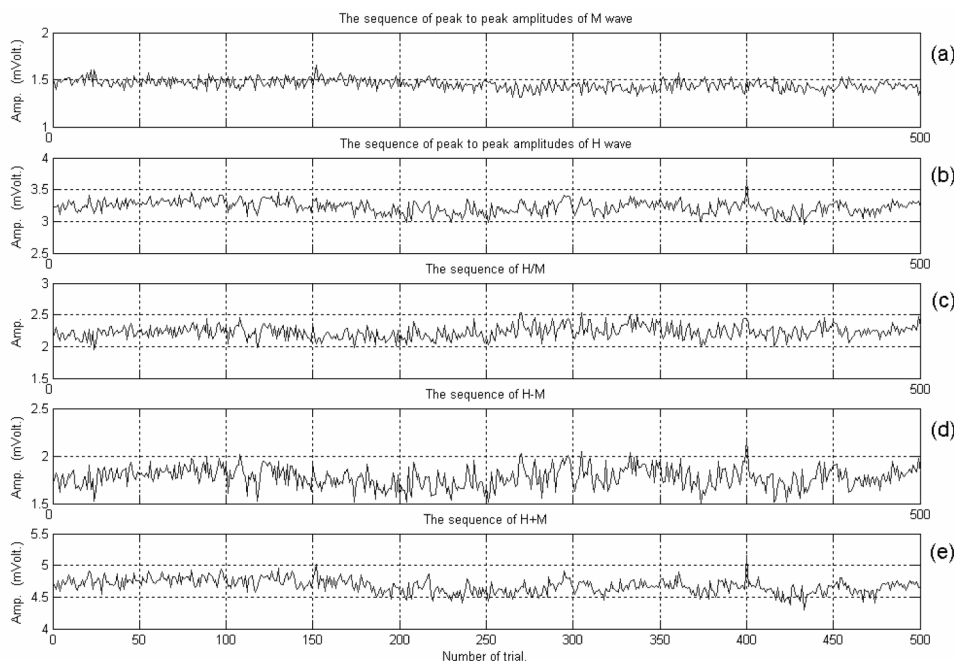
برای این منظور، طیف های توان مؤلفه های فراکتال را در مقیاس های لگاریتمی و خطی برای تمام توالی ها، در هر حالت بدست آوردیم (یک نمونه در شکل (۳) رسم شده است). نمودار لگاریتم چگالی طیف توان در مقابل لگاریتم فرکانس، در ردیف آخر (شکل (۳) e))، نشان می دهد که این توالی ها، تقریباً طیف توان نوع $1/f^\beta$ را دنبال می کنند. بنابراین توالی های مورد بحث ما، زوال قانون توان (Power-law decay) را بیان می کنند. مقدار β به عنوان شیب ($-\beta$) خط رگرسیون این نمودارها تعیین می شود. مقدار نمای طیفی (β) توالی های موجهای H، M، H/M، H+M و H-M در هر حالت، برای بررسی میزان همبستگی فراکتال، به عنوان شیب خط رگرسیون نمودار طیف توان مؤلفه های فراکتال در مقیاس لگاریتمی تعیین شدند. میانگین مقدار β برای توالی های مورد بحث، بیشتر از ۰/۶ بدست آمدند. پس این توالی ها، دارای همبستگی زمانی قوی هستند. همانطور که مشاهده شد، نمای طیفی بدست آمده در حالات و

شود. و همچنین با افزایش شدت تحریک، جریان آنتی درومیک عصب حرکتی با جریان رفلکسی برخورد کرده و سبب کاهش جریان به وجود آمده به سمت عضله می گردد. بنابراین موجهای H و M، حاصل فعالیت یک تعداد نورون حرکتی هستند، که با افزایش شدت تحریک، اثر تعدادی از این نورون های حرکتی حذف شده و در مقابل به دامنه موج M افزوده می شود. پس بررسی سری های زمانی حاصل از نسبت دامنه قله به قله رفلکس H به دامنه قله به قله موج (H/M) حاصل جمع دامنه قله به قله رفلکس H و دامنه قله به قله موج (H+M) و تفاضل دامنه قله به قله رفلکس H و دامنه قله به قله موج (H-M) می تواند حاوی اطلاعات مهمی باشد.

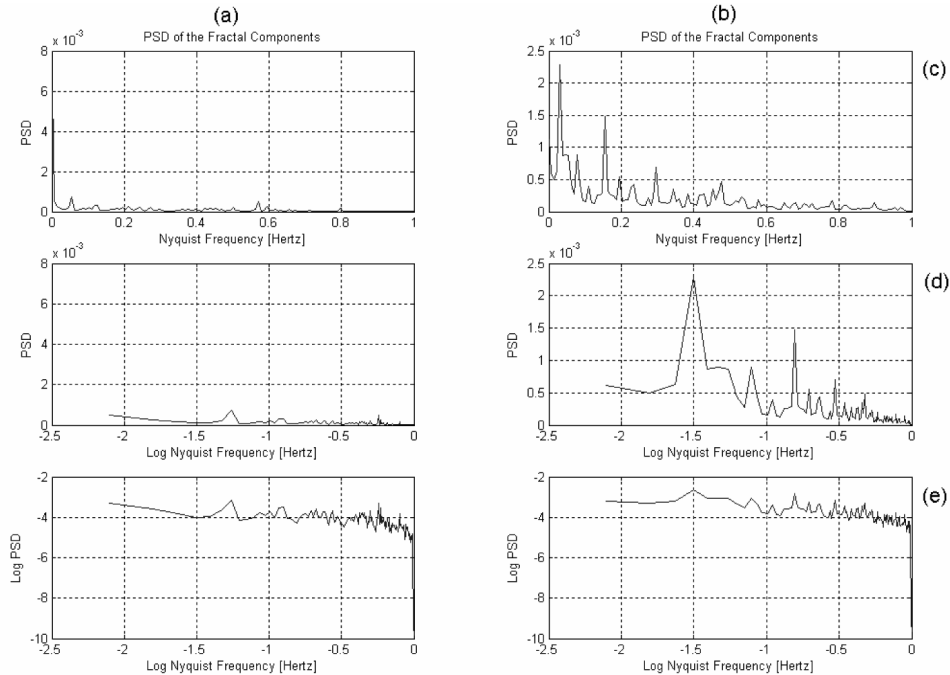
۳- نتایج

سریهای زمانی حاصل از ۵۰۰ رفلکس H متوالی عضله سولئوس در گروه آزمایشی سه قطبی، قبل از اعمال TENS، شامل توالی های موج M، رفلکس H، نسبت H به M، تفاضل H و M، و حاصل جمع H و M برای یکی از افراد آزمایش شده، به عنوان نمونه، در شکل ۲ آورده شده است.

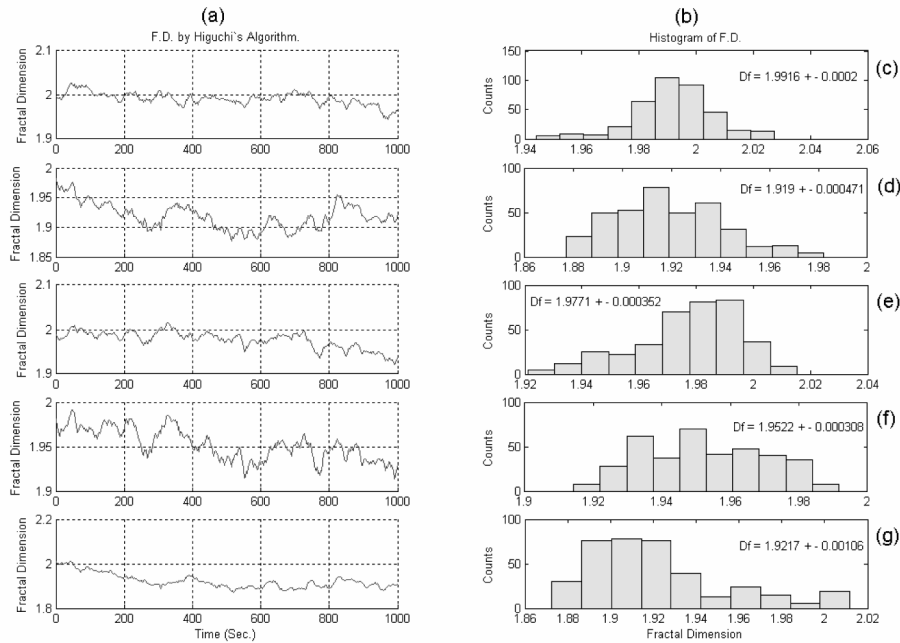
با استفاده از روش CGSA، مقدار درصد فراکتال و β در هر یک از توالی ها محاسبه شد. میانگین درصد های فراکتال تمام توالی ها در هر حالت، مقادیر بالاتر از ۷۰ درصد را نشان دادند. بنابراین فراکتال تصادفی بودن توالی های مورد بحث آشکار گردید. ولی این نتیجه که توالی های رفلکس H انسان فراکتال تصادفی



شکل ۲ سری های زمانی حاصل از ۵۰۰ رفلکس H متوالی عضله سولئوس، گروه آزمایش قبل از اعمال TENS سه قطبی. (a) توالی دامنه قله به قله موج M (b) توالی دامنه قله به قله رفلکس H (c) توالی نسبت H به M (d) توالی تفاضل H و M (e) توالی حاصل جمع H و M.



شکل ۳ طیف های توان مؤلفه های فراکتال توالی های رفلکس H ثبت شده از عضله سولئوس در مقیاس های خطی و لگاریتمی، گروه آزمایش قبل و بعد از اعمال TENS سه قطبی (a) گروه آزمایش قبل از اعمال TENS سه قطبی (b) گروه آزمایش بعد از اعمال TENS سه قطبی (c) طیف توان مؤلفه های فراکتال در مقیاس خطی (d) طیف توان مؤلفه های فراکتال بر حسب لگاریتم فرکانس (e) طیف توان مؤلفه های فراکتال در مقیاس لگاریتمی، که شیب خطی $(-\beta)$ ، نمای طیفی نشان دهنده همبستگی فراکتال است.



شکل ۴ محاسبه بُعد فراکتال سری های زمانی عضله سولئوس به روش هیاجی، گروه آزمایش قبل از اعمال TENS سه قطبی (a) بُعد فراکتال سری های زمانی توسط الگوریتم هیاجی با پنجره های ۱۲۵- نقطه ای (b) هیستوگرام های بُعد های فراکتال (c) بُعد فراکتال توالی های موج (d) بُعد فراکتال توالی های رفلکس H (e) H/M (f) M (g) H+M

Df برابر با ۲ بدست آمد. پس تفاوت در همبستگی زمانی توالی ها، نمی تواند به تنهایی توسط نمای هارست و بُعد فراکتال ارزیابی گردد. با این حال به بررسی مقادیر بُعد فراکتال در هر حالت

توالی های مختلف، دارای مقادیری کوچکتر از واحد بودند ($\beta < 1$). بنابراین برطبق تعاریف بیان شده در قبل، نمای هارست دارای مقدار صفر خواهد بود ($H=0$). بُعد فراکتال هم، از رابطه $H = 2 - \beta$

قطبی و سه قطبی کاهش یافته و به سمت نوبز سفید متمایل گردیده است، که میزان این کاهش در حالت دو قطبی بیشتر از حالت سه قطبی بود.

توالی های H+M هر عضله، نشان دهنده رفتار مجموعه نوروئی آن عضله است، و در برگیرنده فعالیت نوروئی های حرکتی ای است که به سمت عضله آمده و یا نیامده اند. از طرفی عضله سولئوس به عنوان یک عضله کند انقباض برای حفظ موقعیت و با خستگی کمتر و عضله گاستروکنمیوس به عنوان یک عضله تند انقباض برای اعمال قدرتی و با خستگی سریعتر مطرح می گردند. پس وجود تفاوت معنی دار در نمای طیفی β توالی های H+M عضله سولئوس در حالت دو قطبی و سه قطبی، بیانگر رفتار مجموعه نوروئی این عضله در نخاع، متعاقب تحریک های الکتریکی TENS است.

نوسانات فراکتال تصادفی با طیف توان نوع $1/f^\beta$ در ثبتهای مختلف در تحقیقات نوروفیزیولوژیکی بدست آمده اند (۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶)، که اگر علت و نقش آن مشخص بود، این مطالعات گسترده درباره این نوسانات انجام نمی شد. به نظر می رسد که تا حدی این گستردگی به سبب پیچیدگی دینامیک های سیستم عصبی و پاسخهای اندام انتهایی در این مطالعات باشد. نتایج بررسی ها بر روی رفلکس H انسان، ممکن است یک مدل ساده از رفلکس های تک سیناپسی انسان برای مطالعه همبستگی فراکتال در سیستم عصبی فراهم کند.

با توجه به اینکه این نوع تحریک های سطحی ستون فقرات در کلینیک و مطالعات فیزیوتراپیست ها جایگاه دارد، لذا به نظر می رسد فیزیوتراپیست ها و فیزیولوژیست ها از نتایج این تحقیقات بهره مند شوند.

منابع

1. Goljarian S, Firoozabadi SMP, Torkaman G. The Effects of Bi-polar and Tri-polar TENS on the H-Reflex and Mh-wave Recruitment Curves. The 2nd European Medical & Biological Engineering Conference EMBEC'02, Vienna, Austria, 2002; 1326-1342.
2. Nozaki D, Nakazawa K, Yamamoto Y. Fractal correlation in human H-reflex. *Exp Brain Res* 1995; 105: 402-410.
3. Nozaki D, Nakazawa K, Yamamoto Y. Supraspinal effects on the fractal correlation in human H-reflex. *Exp Brain Res* 1996; 112: 112-118.

پرداختیم.

از آنجایی که الگوریتم هیاجی، تخمین های دقیق تری را برای بعد های فراکتال فراهم می کند، از این روش برای تخمین بعد های فراکتال استفاده کردیم. به کمک الگوریتم هیاجی، و با انتخاب پنجره های ۱۲۵ نقطه ای لغزان، بعدهای فراکتال هر کدام از سری های زمانی در حالت های دو قطبی و سه قطبی برای عضله های سولئوس و گاستروکنمیوس محاسبه گردیدند. نمودار بعد های فراکتال به دست آمده در زمان (شکل (۴(a))) و نمودار هیستوگرام این بعد های فراکتال بر حسب تعداد بعد محاسبه شده (شکل (۴(b))), به عنوان نمونه، برای عضله سولئوس در گروه آزمایشی سه قطبی، قبل از اعمال TENS نشان داده شده است. میانگین مقدار بعد فراکتال برای توالی های مورد بحث، نزدیک به ۲ بدست آمدند.

اکنون این سؤال مطرح می شود که آیا تفاوتی معنی دار از لحاظ آماری بین ویژگی های فراکتال به دست آمده از TENS دو قطبی و سه قطبی وجود دارد؟ برای پاسخ دادن به این سؤال، از آزمون فرضیه با استفاده از نرم افزار آماری SPSS به وسیله آزمون زوج ها استفاده شد. اختلاف مقادیر درصد فراکتال، نمای طیفی و بعد فراکتال در هر گروه آزمایشی قبل و بعد از اعمال تحریک TENS به عنوان یک معیار برای مقایسه در نظر گرفته شدند.

از آنجایی که ۵ سری زمانی در هر مرحله موجود است، و سه ویژگی درصد فراکتال، نمای طیفی و بعد فراکتال برای آنها مطرح می شود، بنابراین ۱۵ زوج، برای انجام آزمون به دست آمد. با انجام آزمون فرضیه ها، تنها مقدار نمای طیفی β برای توالی H+M عضله سولئوس، دارای تفاوت معنی دار از لحاظ آماری ($P=0.043$) در دو حالت دو قطبی و سه قطبی به دست آمد. مقدار نمای طیفی β برای توالی H/M عضله سولئوس نیز با احتمال ۹۲/۵ درصد، دارای تفاوت معنی دار از لحاظ آماری ($P=0.075$) بین حالت های دو قطبی و سه قطبی بود. ولی هیچ اختلاف معنی داری بین ویژگی های بدست آمده از دو حالت دو قطبی و سه قطبی برای عضله گاستروکنمیوس حاصل نگردید.

۴- بحث و نتیجه گیری

با بررسی های بیشتر روی مقادیر عددی نمای طیفی به دست آمده برای توالی های H+M عضله سولئوس، مشاهده شد که میانگین نمای طیفی β ، مشخص کننده همبستگی زمانی فراکتال، بعد از اعمال TENS دو قطبی کاهش یافته و به سمت نوبز سفید متمایل گردیده است، در حالیکه مقدار میانگین نمای طیفی β ، بعد از اعمال TENS سه قطبی افزایش یافته و از نوبز سفید دور شده است. همچنین مقدار میانگین نمای طیفی β برای توالی های H/M عضله سولئوس بعد از اعمال TENS دو

۴. کارزانی فراهانی امیرحسین، فیروزآبادی سیدمحمد، ترکمان گیتی، گلجاریان. بررسی مؤلفه‌های اصلی سیگنال رفلکس H عضله سولئوس قبل و بعد از تحریک الکتریکی دو قطبی و سه قطبی ستون فقرات انسان. یازدهمین کنفرانس مهندسی پزشکی ایران (۴۰ ICBME). تهران، بهمن ۱۳۸۲، صفحه ۱۷۷.
5. Willemse RB, Koelman JHTM, Bour LJ, Ongerboer de Visser BW. Independence of soleus H-reflex tests in control and spastic subjects shown by principal components analysis. *Electroenceph Clin Neurophysiol* 1994; 93: 440-443.
6. Saeedi N, Firoozabadi SMP, Torkaman G, Kazemnejad A. The Effects of Tripolar Percutaneous Lumbar Stimulation on The Recruitment Curve. The 3rd International Conference on Bioelectromagnetism, Bled, Slovenia, 2000: 221-222.
7. Bassingthwaighte JB, Lievovitch LS, West BJ. Fractal physiology. Oxford University, New York, 1994.
8. Feder J. Fractals. Plenum Press, New York, 1988.
9. Mandelbrot BB. The fractal geometry of nature. Freeman, New York, 1983.
10. Voss RF. Random fractals: self-affinity in noise, music, mountains, and clouds. *Physica D*, 1989; 38: 362-371.
11. Mandelbrot BB, Van Ness JW. Fractional Brownian motions, fractional Gaussian noises and applications. *SIAM Rev* 1968; 10(4): 422-437.
12. Yamamoto Y, Hughson RL. On the fractal nature of heart rate variability in humans: effects of data length and β -adrenergic blockade. *Am J Physiol* 1994; 266: R40-R49.
13. Mandelbrot BB. Self-Affine Fractals and Fractal Dimension. *Physica Scripta*, 1985; 32: 257-260.
14. Schepers HE, van Beek JH, Bassingthwaighte JB. Four methods to estimate the fractal dimension from self-affine signals. *IEEE Eng Med Biol* 1992; 11: 57-71.
15. Yamamoto Y, Hughson RL. Extracting fractal components from time series. *Physica D*, 1993; 68: 250-264.
16. Schiff SJ, Chang T. Differentiation of linearly correlated noise from chaos in a biologic system using surrogate data. *Biol Cybern* 1992; 67: 387-393.
17. Yamamoto Y, Hughson RL. Coarse-graining spectral analysis: new method for studying heart rate variability. *J Appl Physiol* 1991; 71: 1143-1150.
18. Higuchi T. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory. *Physica D* 1988; 31: 277-283.
19. Katz M. Fractals and the analysis of waveforms. *Comput Biol Med* 1988; 18: 145-156.
20. Petrosian A. Kolmogorov Complexity of Finite Sequences and Recognition of Different Preictal EEG Patterns. *Proceedings of IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems* 1995: 212-217.
21. Esteller R, Vachtsevanos G, Echaz J, Litt B. A Comparison of Fractal Dimension Algorithms Using Synthetic and Experimental Data. *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'99)*, Orlando, FL, May 30- Jun. 2, 1999, Vol.III Adaptive Digital Signal Processing, 199-202.
۲۲. سرمدی علی، فیروزآبادی سیدمحمد، ترکمان گیتی، فتح‌الهی یعقوب. ارزیابی اطلاعاتی پاسخهای رفلکس H واحدهای حرکتی عضلات سولئوس و گاستروکنمیوس به زوج تحرکات متوالی. چهاردهمین کنگره بین‌المللی فیزیولوژی و فارماکولوژی، تهران، ۱۳۸۲، صفحه ۱۰۳.
23. Collins JJ, De Luca CJ. Open loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center-of-pressure trajectories. *Exp Brain Res* 1993; 95: 308-311.
24. Goldberger AL, Rigney DR, West BJ. Chaos and fractals in human physiology. *Sci Am* 1990; 34-41.
25. Inouye T, Ukai S, Shinosaki K, Iyama A, Matsumoto Y, Toi S. Changes in the fractal dimension of alpha envelope from wakefulness to drowsiness in the human electroencephalogram. *Neurosci Lett* 1994; 174: 105-108.
26. Teich MC. Fractal character of the auditory neural spike train. *IEEE Trans Biomed Eng* 1989; 36: 150-160.