

بررسی توانمندی تحلیل بُعد فراکتال در تشخیص ووشوکاران نخبه با توجه به تفاوت در پایداری وضعیت

رضا صابر^۱، دکتر مصطفی رستمی^۲، دکتر علی تنباکوساز^۳، علی رضانی^۱، افسانه دادارخواه^۴

۱- کارشناسی ارشد مهندسی پزشکی (بیومکانیک)، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی پزشکی، گروه بیومکانیک

۳- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی (واحد اهر)، دانشکده مهندسی مکانیک، گروه بیومکانیک

۴- کارشناس ارشد فیزیوتراپی، عضو هیأت علمی دانشگاه علوم پزشکی ارتش

چکیده

زمینه و هدف: بعد فراکتال (Fractal dimension: FD) به عنوان معیاری از پیچیدگی سیستم در تفکیک افراد با ویژگیهای مختلف از جمله مهارت، موفق ظاهر شده است. هدف از این پژوهش ارزیابی توانمندی روش تحلیل FD پایداری وضعیت در تشخیص ووشوکار نخبه برای اعزام به مسابقات مختلف بود.

روش بررسی: هشت ووشوکار نخبه و هشت ووشوکار حرفه‌ای از بخش تالو در این پژوهش شرکت کردند و یک حرکت تعادلی مشکل به نام «تعادل به عقب» را اجرا کردند. مسیرهای مرکز فشار (Center of pressure: COP) ثبت شد و الگوریتم هیگچی برای تعیین FD از سری زمانی‌های جابه‌جایی COP مورد استفاده قرار گرفت. میانگین FD دو گروه توسط آزمون t مستقل مقایسه شد.

یافته‌ها: میانگین FD به‌طور معناداری ($p < 0.05$) در هر دو جهت قدامی-خلفی (Anterio-posterior: AP) و داخلی-خارجی (Medio-lateral: ML) برای ووشوکاران نخبه بیش از ووشوکاران حرفه‌ای بود. سپس اجزای تحلیل شاخص عملکرد گیرنده (Receiver operating characteristic: ROC) نیز نشان داد که روش تحلیل FD در تفکیک ورزشکاران در جهت AP عملکرد بسیار خوب (سطح زیر منحنی (Area under curve: AUC) = 0.938) و در جهت ML عملکرد قابل قبولی (AUC = 0.668) دارد.

نتیجه‌گیری: سیستم کنترل وضعیت در ووشوکاران نخبه به دلیل مهارت بیشتر پیچیده‌تر عمل می‌کند. تحلیل FD سری زمانی COP می‌تواند به مریان در تشخیص ووشوکاران نخبه حتی از بین یک گروه از ووشوکاران حرفه‌ای کمک نماید.

کلیدواژه‌ها: ووشو، پایداری وضعیت، بعد فراکتال، شاخص عملکرد گیرنده (ROC)، مرکز فشار (COP)

(ارسال مقاله ۱۳۹۴/۵/۲۴، پذیرش مقاله ۱۳۹۴/۱۰/۱۳)

نویسنده مسئول: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی پزشکی

Email: reza.saber@aut.ac.ir

مقدمه

تقریباً در تمامی ورزش‌ها امری ضروری است. عدم تعادل در ورزش‌های مختلف و در موقعیت‌های مربوط به هر ورزش علاوه بر تأثیر منفی در عملکرد ورزشکار (مانند ژیمناستیک، ووشو و رقص باله) امکان ایجاد آسیب را نیز فراهم می‌سازد (عدم تعادل در حرکت سمت به سمت فوتبال، بدمینتون، بسکتبال و ... باعث آسیب زانو می‌شود) (۴). ورزش ووشو برآیندی از ورزش‌های رزمی ۵۰۰۰ ساله‌ی چینی و شامل دو بخش ساندا (مبارزه‌ی آزاد) و تالو (اجرای فرم‌ها) می‌شود که حرکات رزمی و نمایشی متنوعی را در بر می‌گیرد. پایداری وضعیت در هر دو بخش، به خصوص در انجام حرکات نمایشی در قسمت تالو به دلیل انجام حرکات تعادلی دشوار، بسیار حائز اهمیت است.

سیستم کنترل وضعیت (postural control) بدن انسان از سازوکارهای مختلفی برای جلوگیری از افتادن بهره می‌گیرد (۱). آموزش‌های ورزشی باعث افزایش استفاده از اطلاعات حسگرهای عمقی، بینایی و دهلیزی و در نتیجه بهبود کنترل وضعیت در شرایط مختلف می‌شود. در هر ورزشی نیاز به مهارت‌های وضعیت مخصوص است و ورزشکار ماهر حرکات تعادلی مربوط به ورزش خودش را راحت‌تر انجام می‌دهد. هرچه شرایط حفظ پایداری وضعیت دشوارتر باشد، تفاوت بین ورزشکار ماهر و مبتدی در حفظ پایداری آشکارتر است، زیرا توانایی کنترل وضعیت به سطح مهارت در ورزشکاران مرتبط است (۲).

پایداری وضعیت به کنترل وضعیت و حفظ تعادل در شرایط پویا گفته می‌شود (۳) که نه تنها در زندگی روزمره بلکه

بخش‌هایی از اورگان‌سیم‌های زنده. مهم‌ترین ویژگی‌های فراکتال‌ها خودمتشابهی و بعد غیر صحیح است (۱۴). از طرف دیگر در هندسه‌ی کلاسیک یا اقلیدوسی ابعاد هندسی (توپولوژیک) صحیح هستند، به‌عنوان مثال بعد نقطه صفر، بعد خط یک و بعد سطح مثل مربعی در صفحه دو است. هندسه‌ی فراکتالی با عمومیت بخشیدن به ابعاد بیان می‌کند که ابعاد لزوماً اعداد صحیح نیستند بلکه می‌توانند اعشاری یا کسری باشند. مفهوم فراکتال برای سیگنال‌های پیچیده نیز قابل اعمال است زیرا نوسانات سیستم در زمان می‌تواند دارای خصوصیات فراکتالی، مثل خودمتشابهی آماری باشد (۱۵). از طرف دیگر دوارته و زاتسیورسکی (۱۳) در سال ۲۰۰۰ نشان دادند که سری زمانی COP دارای خصوصیات فراکتالی است. برای تعیین بعد فراکتال سری زمانی COP روش‌های مختلفی از جمله الگوریتم هیگوجی (۱۶) در مطالعات موجود است.

در مطالعات مربوط به ارزیابی پایداری وضعیت و تعادل با استفاده از FD، ریگودی و همکاران (۱۱) در سال ۲۰۱۴ کنترل وضعیت بیماران سندروم داون را مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های تحقیق آنها نشان داد که بعد فراکتال محاسبه‌شده از داده‌های COP، با استفاده از روش شمارش جعبه‌ها، می‌تواند اطلاعاتی راجع به سیستم کنترلی ارائه دهد. مایکلبوست و همکاران (۱۶) نیز در سال ۱۹۹۵ در ارزیابی کنترل وضعیت، توانایی تحلیل FD را در تشخیص بیماری و تفکیک گروه‌های سنی نمونه‌ها را تأیید کردند. دوپل و همکاران (۱۷) در سال ۲۰۰۴ با استفاده از الگوریتم هیگوجی به ارزیابی کنترل وضعیت پرداختند و در حالت چشمان بسته نسبت به چشمان باز و همچنین افراد مسن نسبت به افراد جوان افزایش FD سری زمانی COP را مشاهده کردند. FD در مطالعات دیگر نیز، مانند مطالعه‌ی باسکزیک و همکاران (۵) در سال ۲۰۰۱، قدرت خود را در شناسایی افراد با ویژگی‌های متفاوت نشان داده است.

با توجه به توانمندی تحلیل FD در تفکیک افراد با شرایط و ویژگی‌های مختلف در پایدار وضعیت، در صورتیکه بخواهیم از این تحلیل به‌عنوان یک روش تشخیص ووشوکار نخبه (Elite) استفاده کنیم، می‌توان عملکرد و صحت آن را ارزیابی کرد. برای این کار از تحلیل شاخص عملکرد گیرنده (Receiver operating characteristics: ROC) استفاده کرد. در تحلیل ROC که در آزمون‌های تشخیص بیماری مورد استفاده قرار می‌گیرد، نرخ مثبت یا حساسیت نشانگر درصد

شایع‌ترین متغیر برای مطالعه پایداری وضعیت در وضع‌شناسی، مرکز فشار (Center of pressure: COP) به دلیل هزینه‌ی پایین آزمایش، صرفه‌جویی در وقت و امکان انجام آزمایش‌های مختلف با استفاده از صفحه نیرو است که از آن برای ثبت داده‌های COP استفاده می‌شود (۴). COP عبارتست از مکان برآیند تمام نیروهای وارد به سطح حمایت (سطح حمایت همان سطح تماس بدن با تکیه‌گاه است که در ایستادن عمودی بدون حرکت پاها سطح حمایت هستند). به‌دلیل اینکه طبیعت کنترل بدن، برآیند اعضا و سیستم‌های مختلف است و عوامل غیرخطی زیادی در این فرآیند وجود دارد، مرکز جرم بدن حتی حالت ایستادن بدون حرکت نوساناتی جزئی دارد (۵). جابه‌جایی COP نتیجه‌ی جابه‌جایی مرکز جرم است و نوسانات جزئی بدن را نمایان می‌سازد (۶).

به‌طور کلی تحلیل سری زمانی COP در وضع‌شناسی را می‌توان به دو دسته‌ی کلی و ساختاری تقسیم کرد (۷). محققین در تحلیل از نوع کلی که به تحلیل‌های سنتی نیز معروف هستند به سنجش مقادیر الگوهای نوسانی در حوزه‌ی زمان و یا فرکانس می‌پردازند (۳). این مقادیر در حوزه‌ی زمان شامل حداکثر جابجایی، سرعت، شتاب در دو جهت قدامی-خلفی (Anterio-posterior: AP) و داخلی-خارجی (Medio-lateral: ML) و سطح جابجایی COP است و در حوزه‌ی فرکانس، محاسباتی مانند تحلیل طیفی و یافتن پهنای باند سیگنال انجام می‌پذیرد (۸). در حالیکه تحلیل ساختاری به جزئیات سیگنال پرداخته و سعی در یافتن ارتباط جزئیات تغییرات COP با موتور کنترل دارد. در تحلیل از نوع ساختاری سعی بر آن است تا طبیعت و دینامیک سیگنال بررسی شود که دو دیدگاه متضاد در این نوع تحلیل وجود دارد. دیدگاه اول (۹) نوسانات وضعیت بدن را توسط یک فرآیند تصادفی مدل می‌کند و دیدگاه دوم (۱۰) این نوسانات را قطعی و ناشی از فرآیندی آشوبگونه مدلسازی می‌کند. با دیدگاه دوم در تحلیل ساختاری به جزئیات تغییرات، طبیعت و دینامیک سیستم پیچیده توجه می‌شود و از روش‌های دینامیک غیرخطی و آشوب مانند بعد فراکتال (fractal dimension: FD) بهره برده و پیچیدگی (Complexity) سیگنال را محاسبه می‌کنند (۱۱-۱۳، ۵).

فراکتال شیئی است که دارای هندسه‌ی پیچیده و در اصطلاح ناهموار با جزئیات فراوان باشد. در طبیعت فراکتال‌های زیادی وجود دارد از جمله ابرها در آسمان، جزایر، کوه‌ها و

نظر که بعد فراکتال از روی آن محاسبه شد، موقعیت COP بود. ووشوکاران به دو دسته نخبه (میانگین سن $19 \pm 1/83$ سال و میانگین تجربه $8 \pm 0/83$ سال) و حرفه‌ای (میانگین سن $18/25 \pm 0/05$ سال و میانگین تجربه $8 \pm 0/75$ سال) تقسیم شدند که در هر دو گروه ۸ ورزشکار وجود داشت. معیار انتخاب ورزشکاران گروه نخبه، داشتن حداقل یک عنوان قهرمانی (مدال طلا) در رقابت‌های ملی بود (۱۹). ورزشکاران روزی دو بار تمرین می‌کردند و آماده‌ی انجام حرکت تعادلی مورد نظر بودند. تمامی شرکت‌کنندگان در سلامت کامل و فاقد آسیب‌های عصبی-عضلانی و اسکلتی بودند.

برای تهیه‌ی داده‌های COP از صفحه نیروی کیستلر BA ۹۲۸۶ استفاده شد. فرکانس نمونه‌برداری ۲۰۰ Hz بود که از قانون نمونه‌برداری نایکیویست تبعیت می‌کرد. این صفحه نیرو دارای چهار سنسور فشاربرقی است و برای آنالیز گیت و تعادل به طور ایده‌آل طراحی شده است. ورزشکاران یک حرکت تعادلی به نام YSPH یا «تعادل به عقب» را روی صفحه نیرو، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، انجام دادند. در انجام این حرکت ورزشکار باید یک پای خود را بالا بیاورد به‌طوری‌که انگشتان پا روبه‌روی صورت قرار گیرند، تنه از کمر به اندازه‌ی ۴۵ درجه به عقب حرکت کند و دست‌های از شانه در طرفین بدن نگه داشته‌شود. ووشوکاران در حین این حرکت باید پایداری وضعیت خود را حفظ کنند. همه‌ی ورزشکاران این حرکت را کامل و بدون نقص انجام دادند.

تعداد افراد بیماری که بیمار تشخیص داده می‌شوند و نرخ منفی یا خصوصیت درصد تعداد افراد سالمی که سالم تشخیص داده می‌شود نشان می‌دهد. در منحنی ROC نرخ مثبت بر حسب نرخ منفی برای نقاط برش مختلف ترسیم می‌شود. مقدار سطح زیر این منحنی (Area under curve: AUC) بین ۰/۵ و ۱ تغییر می‌کند. هرچه این مقدار به بیشتر باشد، نشان از عملکرد و صحت بهتر آزمون است (۱۸).

تحلیل ROC در تشخیص شرایط مختلف غیر از بیماری نیز کاربرد دارد و کلیت آن تفاوتی ندارد. در این پژوهش نرخ مثبت برابر است با درصد تعداد تشخیص صحیح ووشوکار نخبه و نرخ منفی برابر است با درصد تعداد تشخیص صحیح ووشوکار غیر نخبه. هدف این پژوهش ارزیابی عملکرد تحلیل FD روی پایداری وضعیت، با استفاده از سری زمانی COP برای تفکیک ووشوکاران نخبه از حرفه‌ای (Skilled) است. پایداری وضعیت ووشوکاران که سطح مهارت آنها را نشان می‌دهد، در اجرای یک حرکت تعادلی مورد تحلیل قرار گرفت. برای تعیین بعد فراکتال از الگوریتم هیگویی و برای بررسی عملکرد تشخیص از تحلیل ROC استفاده شد.

روش بررسی

این پژوهش از نوع مطالعات بنیادی و تجربی است و در انجام آزمایش‌ها از ۱۶ ووشوکار دعوت شده به تیم ملی ایران کمک گرفته و آزمون‌ها با موافقت آنها و توضیح هدف آزمایشات و کلیت مطالعه اجرا شد. در این پژوهش، متغیر مورد



شکل ۱- انجام حرکت تعادلی روی صفحه نیرو

در نظر بگیرید که در فاصله‌ی زمانی داده‌ها با هم یکسان است:

$$X(1), X(2), X(3), \dots, X(N)$$

از سری زمانی موجود یک سری زمانی جدید بر اساس رابطه‌ی ۱ می‌سازیم:

$$X_k^m: X(m), X(m+k), X(m+2k), \dots, X\left(m + \left[\frac{N-m}{k}\right]k\right) \quad (m = 1, 2, \dots, k) \quad (1)$$

سری زمانی جدید بدست می‌آید. به‌عنوان مثال برای $k = 3$ و $N = 100$ سه سری زمانی جدید به شکل زیر هستند:

$$X_3^1: X(1), X(4), X(7), \dots, X(97), X(100),$$

$$X_3^2: X(2), X(5), X(8), \dots, X(98),$$

$$X_3^3: X(3), X(6), X(9), X(99).$$

طول منحنی سری زمانی‌های جدید از رابطه‌ی (۲) تعیین می‌شود:

$$L_m^k = \frac{\left\{ \left(\sum_{i=1}^{\left[\frac{N-m}{k}\right]} |X(m+ik) - X(m+(i-1).k)| \right) \frac{N-1}{\left[\frac{N-m}{k}\right].k} \right\}}{k} \quad (2)$$

برای مقایسه‌ی میانگین FD بین دو گروه از آزمون t

مستقل استفاده شد. سطح معناداری α برای تفاوت میانگین‌ها ۵٪ (۰/۰۵) در نظر گرفته شده‌است و واریانس با معیار ۹۵٪ محاسبه شد. آزمون کولموگروف-اسمیرنوف با سطح خطای ۵٪ نرمال بودن خصوصیات فیزیکی (قد و وزن)، سن و سال‌های تجربه (داده‌ها) را مورد بررسی قرار داد و میانگین این ویژگی‌ها بین دو گروه توسط آزمون t (با سطح معناداری ۵٪) مورد مقایسه قرار گرفتند. از آزمون لیون برای بررسی همگنی واریانس‌ها استفاده شد و نتایج هر آزمون t با توجه به همگنی یا غیرهمگن بودن واریانس‌ها انتخاب شد. در نهایت برای ارزیابی عملکرد تحلیل FD به‌عنوان روشی تشخیصی برای شناخت ووشوکاران نخبه، تحلیل ROC انجام پذیرفت. برای انجام این آزمون‌های آماری و تحلیل ROC از نرم‌افزار SPSS نسخه‌ی ۲۱ استفاده شد.

یافته‌ها

همانطور که در جدول ۱ نشان داده شده است، نرمال بودن داده‌ها شامل قد، وزن، سن و تجربه در ووشو توسط آزمون KS ($P < 0.05$) و عدم تفاوت میانگین آنها توسط آزمون

برای تعیین FD سری زمانی COP از الگوریتم هیگوجی استفاده و کد آن در نرم‌افزار متلب ۲۰۱۳ نوشته شد. الگوریتم هیگوجی (۱۶) روشی مؤثر برای تعیین مستقیم FD از روی سری زمانی است. یک سری زمانی محدود مانند $X(i)$ را

[] علامت جزء صحیح است و k و m هر دو اعداد طبیعی هستند و به‌ترتیب عبارتند از مدت اولیه (initial time) و مدت فاصله (interval time). برای هر بازه‌ی زمانی k تا

ترم $\frac{N-1}{\left[\frac{N-m}{k}\right].k}$ عامل نرمال کردن طول منحنی سری

زمانی‌هاست. میانگین طول منحنی‌های L_m^k بر مجموعه‌ای از بازه زمانی‌های k را محاسبه می‌کنیم و با $\langle L(k) \rangle$ نشان می‌دهیم. اگر $\langle L(k) \rangle$ با k رابطه‌ی توانی با توان D داشته باشد، یعنی $\langle L(k) \rangle \propto k^{-D}$ ، آنگاه D برابر است با FD سری زمانی. برای محاسبه‌ی D شیب خط برازش شده به نقاط $(\ln(L(k)), \ln(\frac{1}{k}))$ را تعیین می‌کنیم. اینکه مقدار k چند انتخاب شود نیز مهم است (۲۰). برای انتخاب k مقدارش را از $k = 1$ افزایش می‌دهیم و سپس میانگین طول منحنی را بدست می‌آوریم و از روی شیب خط برازش شده به میانگین طول و بازه زمانی که ذکر شد، بعد فراکتال را تعیین می‌کنیم. بعد از چند بار بعد محاسبه شده تغییر چندانی نمی‌کند، k مربوطه به این مرحله را k_{Max} می‌نامیم و محاسبات را خاتمه می‌دهیم. بعد فراکتال برحسب k_{Max} تعیین می‌شود.

FD سری زمانی COP در هر دو جهت، با فرض ناهمگنی واریانس‌ها (با توجه به آزمون لیون)، برای ورزشکاران نخبه به‌طور معناداری بیشتر از ورزشکاران حرفه‌ای بود ($P < 0.05$). برای میانگین FD در جهت AP و ML به ترتیب $P = 0.009$ و $P = 0.046$ بدست آمد. منحنی ROC برای مقادیر FD در شکل ۲ نمایش داده شده‌است. سطح زیر منحنی در جهت AP برابر 0.938 و در جهت ML برابر 0.668 محاسبه شد. این مقادیر، به‌خصوص در جهت AP، به عدد ۱ بسیار نزدیک است.

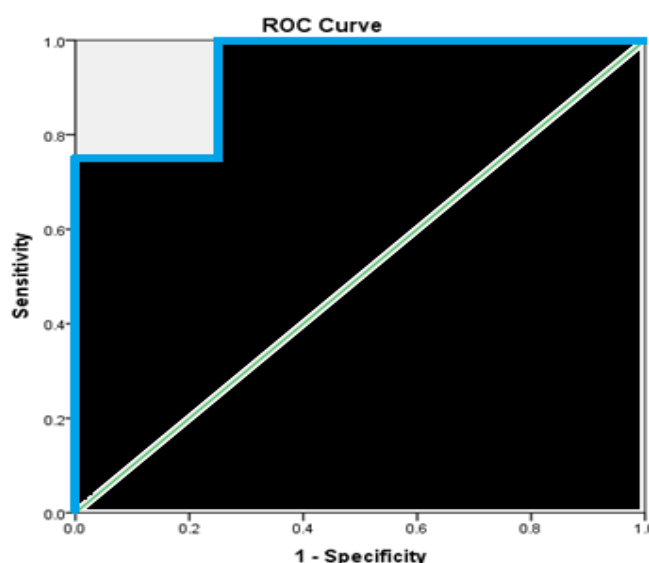
t مستقل استیودنت برای داده‌های وزن، سن و تجربه و آزمون t مستقل ولج برای داده‌های قد (به‌دلیل رد شدن فرضیه همگنی واریانس‌ها ($P < 0.05$))، مورد تأیید قرار گرفت ($P < 0.05$). مقادیر میانگین FD برای سری زمانی COP در دو جهت AP و ML برای هر دو گروه نخبه و حرفه‌ای در جدول ۲ نشان داده شده‌است. در هر دو جهت آزمون همگنی واریانس‌ها نقض شد ($P = 0.001$ در جهت ML و $P = 0.016$ در جهت AP) و در نتیجه برای هر دو جهت از آزمون t ولج استفاده شد. میانگین

جدول ۱- میانگین ویژگی‌های ورزشکاران به همراه مقدار P در آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف (KS)، لیون (Leven) و t. میانگین داده‌های دو گروه دارای تفاوت معنادار نیستند ($P < 0.05$).

ویژگی	نخبه	حرفه‌ای	(KS) P	(Leven) P	(t) P
قد (cm)	۱۶۹/۵۰ (۱/۰۰)	۱۶۷/۲۵ (۳/۷۹)	۰/۸۶۰	۰/۰۴۵	۰/۱۱۷
وزن (kg)	۶۵/۸۸ (۲/۴۲)	۶۳ (۳/۰۴)	۰/۹۸۶	۰/۴۱۳	۰/۱۶۸
سن (سال)	۱۹ (۱/۸۳)	۱۸/۲۵ (۰/۵۰)	۰/۲۶۶	۰/۱۷۷	۰/۰۸۴
تجربه (سال)	۸ (۰/۸۳)	۸ (۰/۷۵)	۰/۴۲۲	۰/۵۳۸	۰/۷۵۸

جدول ۲- میانگین FD سری زمانی COP؛ علامت «+» و «#» نشان‌دهنده تفاوت معنادار بین گروه حرفه‌ای و نخبه به ترتیب در جهت ML و AP است ($P < 0.05$).

پارامتر	جهت	نخبه	حرفه‌ای
بعد فراکتال	ML	۱/۲۷ (۰/۱۰۳۹) ⁺	۱/۱۸ (۰/۰۴۱۴) ⁺
	AP	۱/۲۴ (۰/۰۷۵۸) [#]	۱/۱۴ (۰/۰۳۴۱) [#]



شکل ۲- منحنی ROC برای بعد فراکتال در جهت AP. سطح تیره AUC را نشان می‌دهد. در خط نیمساز $AUC = 0.5$ است.

بی‌نظمی (Irregularity) و پیچیدگی بیشتری هستند. لاموٹ و همکاران (۲۱) نیز در سال ۲۰۰۹ با استفاده از آنتروپی نمونه به مقایسه‌ی سه گروه از دانشجویان با ویژگی‌های مختلف پرداختند. این سه گروه شامل دانشجویان عادی، دانشجویان تربیت بدنی و دانشجویان ژیمناست بود. متغیر مورد بررسی شتاب نوسانات جزئی بدن بود و نتایج آنها نشان داد که پیچیدگی سری زمانی شتاب، متعلق به دانشجویان ژیمناست بیش از دانشجویان تربیت بدنی و دانشجویان تربیت بدنی بیش از دانشجویان عادی بود. همچنین بزرگترین نمای لیاپانوف (Lyapunov exponent) که مقدار آن هر چه بیشتر باشد نشان از ناپایداری سیستم است (۲۵)، در بین این سه گروه برای دانشجویان عادی بیش از همه و دانشجویان تربیت بدنی بیشتر از ژیمناست‌ها بود. به عبارت دیگر پایداری در ژیمناست‌ها از دو گروه دیگر بیشتر و پایداری دانشجویان تربیت بدنی از عادی بیشتر بود، در نتیجه هرچه توانایی در حفظ تعادل و پایداری

وضعیت افزایش می‌یافت، پیچیدگی سیستم و پایداری آن افزایش می‌یافت. استینس و همکاران (۲۲) نیز در سال ۲۰۰۹ با استفاده از معیار آنتروپی نمونه، به مقایسه‌ی ویژگی‌های دینامیک و متغیر با زمان سیستم کنترلی دو گروه نوجوان رقص و عادی پرداخت. آنها نشان دادند که پیچیدگی در سیستم کنترلی نوجوانان رقص نسبت به گروه دیگر افزایش یافته است و این افزایش را به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر رقصان دانستند. این محققین با توجه به یافته‌های پژوهش اسکمیت و همکاران (۲۶) در سال ۲۰۰۴ نتیجه گرفتند که سیستم کنترل گروه رقص بیشتر از گروه نوجوانان عادی، خودکار عمل می‌کند و به توجه کمتری برای پایداری نیاز است. طبق پژوهش اسکمیت و همکاران، بی‌نظمی بیشتر نشان می‌داد که گروه رقص نسبت به گروه عادی دارای انعطاف رفتاری بیشتری بود و به آنها اجازه می‌داد تا به راحتی بین مدهای رفتاری تغییر وضعیت دهند.

این پژوهش نشان داد که مقدار میانگین FD به عنوان معیاری از پیچیدگی سیستم کنترل تعادل ورزشکاران، بین دو گروه نخبه و حرفه‌ای توانست در دو جهت AP و ML تفاوتی معنادار (بین دو جامعه آماری کوچک) داشته باشد، که نشانگر این است که تحلیل FD می‌تواند پایداری وضعیت بهتر و در نتیجه سطح مهارت بیشتر را به خوبی تشخیص دهد. تحلیل ROC نیز نشان داد که منحنی ناشی از مقادیر FD در

مقدار میانگین FD مربوط به سیستم کنترل تعادل در گروه نخبه بیش از گروه حرفه‌ای به دست آمد. افزایش در مقدار FD سری زمانی COP برای گروه نخبه، نشانگر پیچیدگی بیشتر در سیستم کنترل وضعیت آنها است که با نتایج مطالعات تنباکوساز و همکاران (۱۹)، لاموٹ و همکاران (۲۱) و استینس و همکاران (۲۲) مطابقت دارد. دیگر مطالعاتی که از FD برای تحلیل پایداری وضعیت استفاده کرده‌اند، هیچ‌کدام یک حرکت تعادلی را مورد توجه قرار نداده‌اند (۱۱، ۱۳، ۱۷). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که نوسانات جزئی بدن اطلاعات ارزشمندی درباره‌ی تغییرات کنترل وضعیت ناشی از بالا رفتن سن، بیماری، مهارت و عمل ارائه می‌دهد (۲۱). سری زمانی‌های COP دارای خاصیت آشوبگونه (۱۰) و فراکتالی (۱۳) هستند و سیستم کنترل وضعیت یک سیستم قطعی غیرخطی است (۲۳). مطالعات مختلفی با استفاده از ابزار دینامیک غیرخطی و تئوری آشوب به تحقیق در پایداری وضعیت و تعادل پرداخته‌اند. تمرکز این روش‌ها بر یافتن طبیعت حرکت است که باعث بهبود مهارت و کیفیت در عملکرد می‌شود (۲۴). در این پژوهش از تحلیل FD که یک روش غیرخطی است، به عنوان معیاری از پیچیدگی سیستم کنترل تعادل در اجرای یک حرکت تعادلی استفاده شد. افزایش FD در این پژوهش برای گروه نخبه، می‌تواند ناشی از انعطاف‌پذیری و سازگاری بیشتر این گروه با شرایط مختلف باشد. همچنین پیچیدگی بیشتر نشان می‌دهد سیستم کنترلی در ووشوکاران نخبه بیش از گروه دیگر بطور خودکار عمل می‌کند و ورزشکار نخبه در حین اجرای حرکت به توجه کمتری نیاز دارد. از طرفی پیچیدگی کمتر در گروه حرفه‌ای می‌تواند به دلیل ترس از استفاده از تمام درجات آزادی بدنشان باشد. در ایستادن بدون حرکت هرچه FD محاسبه شده توسط الگوریتم هیگوچی (که مقادیر بین ۱ و ۲ است) بیشتر باشد نشان از آزادی حرکت بیشتر و هرچه مقادیرش به ۱ نزدیک باشد نشان از کم شدن آزادی حرکت است (۱۷). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که FD بیشتر در گروه نخبه نشان می‌دهد این گروه از آزادی حرکت بیشتری در حین اجرای حرکت تعادلی مورد نظر بهره می‌برد. تنباکوساز و همکاران (۱۹) در سال ۲۰۱۴ به تحقیق درباره‌ی تفاوت ووشوکاران نخبه و حرفه‌ای با استفاده از چهار حرکت تعادلی مختلف پرداختند. آنها با استفاده از تحلیل آنتروپی نمونه (Sample entropy) از معیارهای دینامیک غیرخطی دریافتند که سری زمانی COP در افراد نخبه دارای

قدردانی

از تمامی ووشوکارانی که در این پژوهش شرکت کردند و همچنین فدراسیون محترم ووشو برای تسهیل ارتباط با ورزشکاران سپاسگزاریم. همچنین از حمایت دانشگاه صنعتی امیرکبیر و دانشکده مهندسی پزشکی، گروه بیومکانیک از این پژوهش قدردانی می‌کنیم. کد اخلاق (پایان‌نامه) نیز " M11933 می‌باشد.

جهت AP دارای سطح زیر منحنی ROC بسیار نزدیک به ۱ (۰/۹۳۸) است و می‌تواند به‌عنوان یک معیار تشخیص ووشوکار نخبه عملکرد بسیار خوبی ارائه کند. با توجه به توانمندی و عملکرد روش تحلیل FD در تشخیص ووشوکاران نخبه از بین یک گروه حرفه‌ای (به‌ویژه در جهت AP) پیشنهاد می‌شود تا از این ابزار دینامیک غیرخطی، برای انتخاب ورزشکار اعزامی به مسابقات و همچنین استعدادیابی استفاده شود و با مطالعات بیشتر و تعداد آزمودنی‌های بیشتر این گونه روش‌ها توسعه یابند.

REFERENCES

- Blázquez MT, Anguiano M, de Saavedra FA, Lallena AM, Carpena P. Characterizing the human postural control system using detrended fluctuation analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2010;233(6):1478-82.
- Paillard T, Margnes E, Portet M, Breucq A. Postural ability reflects the athletic skill level of surfers. *European Journal of Applied Physiology*. 2011;111(8):1619-23.
- Prieto TE, Myklebust JB, Myklebust BM. Characterization and modeling of postural steadiness in the elderly: a review. *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*. 1993;1(1):26-34.
- Zemková E. Assessment of balance in sport: science in sport. *Serbian Journal of Sports Sciences*. 2011;1(4)
- B³aszczyk JW, Klonowski Wo. Postural stability and fractal dynamics. *Acta Neurobiol Exp*. 2001;61:105-12.
- Huo F. Limits of stability and postural sway in young and older people [dissertation]. Kingston, Ontario, Canada: Queen's University; 1999.
- Re C, Spada G. A new look at posturographic analysis in the clinical context: sway-density versus other parameterization techniques. *Motor Control*. 2002;6:246-2.
- Rigoldi C, Galli M, Mainardi L, Crivellini M, Albertini G. Postural control in children, teenagers and adults with Down syndrome. *Research in Developmental Disabilities*. 2011;32(1):170-5.
- Collins JJ, De Luca CJ. Random walking during quiet standing. *Physical Review Letters*. 1994;73(5):764.
- Yamada N. Chaotic swaying of the upright posture. *Human Movement Science*. 1995;14(6):711-26.
- Rigoldi C, Galli M, Mainardi L, Albertini G. Evaluation of posture signal using entropy analysis and fractal dimension in adults with Down syndrome. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2014;17(5):474-9.
- Duarte M, Sternad D. Complexity of human postural control in young and older adults during prolonged standing. *Experimental Brain Research*. 2008;191(3):265-76.
- Duarte M, Zatsiorsky VM. On the fractal properties of natural human standing. *Neuroscience Letters*. 2000;283(3):173-6.
- Patrzalek E. Fractals: Useful Beauty General Introduction to Fractal Geometry. *General Introduction to Fractal Geometry*. 2006:1-7.
- Goldberger AL, Amaral LA, Hausdorff JM, Ivanov PC, Peng C-K, Stanley HE. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2002;99(suppl 1):2466-72.
- Higuchi T. Approach to an irregular time series on the basis of the fractal theory. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1988;31(2):277-83.
- Doyle TL, Dugan EL, Humphries B, Newton RU. Discriminating between elderly and young using a fractal dimension analysis of centre of pressure. *International Journal of Medical Sciences*. 2004;1(1):11.
- Zweig MH, Campbell G. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. *Clinical Chemistry*. 1993;39(4):561-77.
- Tanbakoosaz A, Rostami M. Evaluation of the Performance of Martial Art Wushu Sportsmen by Measuring the System Complexity. *Annual Research & Review in Biology*. 2014;4(13):2192.
- Accardo A, Affinito M, Carrozzini M, Bouquet F. Use of the fractal dimension for the analysis of electroencephalographic time series. *Biological Cybernetics*. 1997;77(5):339-50.
- Lamoth CJ, van Lummel RC, Beek PJ. Athletic skill level is reflected in body sway: a test case for accelerometry in combination with stochastic dynamics. *Gait & Posture*. 2009;29(4):546-51.

22. Stins J, Michielsen M, Roerdink M, Beek P. Sway regularity reflects attentional involvement in postural control: Effects of expertise, vision and cognition. *Gait & Posture*. 2009;30(1):106-9.
23. Ghomashchi H, Esteki A, Nasrabadi AM, Sprott JC, BahrPeyma F. Dynamic patterns of postural fluctuations during quiet standing: a recurrence quantification approach. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2011;21(04):1163-72.
24. Stergiou N, Decker LM. Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: is there a connection? *Human Movement Science*. 2011;30(5):869-88.
25. Bruijn S, Meijer O, Beek P, Van Dieën J. Assessing the stability of human locomotion: a review of current measures. *Journal of The Royal Society Interface*. 2013;10(83):20120999.
26. Schmit JM, Regis DI, Riley MA. Dynamic patterns of postural sway in ballet dancers and track athletes. *Experimental Brain Research*. 2005;163(3):370-8.

Research Article

Evaluation of fractal dimension analysis capability in distinguishing elite Wushu athletes with respect to difference in postural stability

Saber R^{1*}, Rostami M², Tanbakoosaz A³, Ramezani A¹, Dadarkhah A⁴

1- MSc of Biomedical Engineering (Biomechanics), Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

2- Associate Professor, Biomechanics Division, Biomedical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

3- Assistant Professor, Biomechanics Division, Mechanical Engineering Faculty, Islamic Azad University (Abhar), Iran

4- MSc of Physiotherapy, Faculty Member of AJA University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Abstract

Background and Aim: Fractal dimension (FD) as a measure of system complexity and a chaos and nonlinear dynamics tool has appeared successful in distinguishing subjects with different specifications such as proficiency level. The purpose of this research was to evaluate the capability of FD analysis of postural stability in distinguishing elite Wushu sportsman for dispatching to various competitions.

Materials and Methods: Eight elite and eight non-elite Wushu sportsmen from Talou section participated in this research and performed a difficult balance motion called “backward balance”. Center of pressure (COP) traces were recorded and Higuchi algorithm has been used to obtain fractal dimension of COP displacement time series. Average of FD of two groups were compared with an unpaired t-test.

Results: In both directions of antero-posterior (AP) and medio-lateral (ML), average values of FD in elite group were significantly more than non-elite group ($p < 0.05$). Subsequently, implementing a receiver operating characteristic (ROC) analysis indicated that FD analysis method performance is very good in AP direction (Area under the curve or $AUC = 0.938$) and good enough in ML direction ($AUC = 0.668$).

Conclusions: Postural control system acts more complex in elite group because of their more proficiency. FD analysis of COP time series could help coaches in choosing elite Wushu sportsman even among a group of skilled Wushu sportsmen.

Keywords: Wushu, Postural stability, Fractal dimension, Receiver operating characteristic (ROC), Center of pressure (COP)

***Corresponding Author:** Reza Saber, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic)

Email: reza.saber@aut.ac.ir