نشریه پژوهش در توانبخشی ورزشی
دوره ۱، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۲
۴۸-۳۹
WWW.RSR.BASU.AC.IR

اعتبارسنجی محاسبه کارایی مکانیکی به روش برایند انجام کار در مقایسه با روش رایج در یک نیم گام دویدن

منصور اسلامی[۱]، وحید جاهدی[۲*]، محسن نظری[۳]، امید گندمکار[۴]، عباس فرساد اصل[۵]، زینب تازیکه[۶]

۱. استادیار دانشکده تربیت بدنی و علوم ورزشی دانشگاه مازندران
۲، ۳، ۴، ۵ و ۶. دانشجوی کارشناسی ارشد بیومکانیک ورزشی دانشگاه مازندران

دریافت ۲۸ مهر ۱۳۹۲؛ پذیرش ۲۰ بهمن ۱۳۹۲

واژگان کلیدی

انرژی مکانیکی

کار مکانیکی

هزینه متابولیک

کارآیی مکانیکی

نیم‌گام دویدن

چکیده

زمینه و هدف روش رایج برای ارزیابی کارآیی استفاده از هزینه‌ی متابولیک و محاسبه‌ی تغییرات انرژی مکانیکی با توجه به مدل‌های ریاضیاتی می‌باشد. این روش معمولاً محدود به فعالیت‌های هوازی و زمانبر بوده و برای آزمودنی محدودیت حرکتی ایجاد می‌کند. هدف از انجام این پژوهش ارائه و اعتبارسنجی روش جدیدی برای محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی با رویکرد برآیند انجام کار می‌باشد. این روش قادر خواهد بود تا با استفاده از متغیرهای مکانیکی، محدودیت‌های موجود را رفع کند.

روش بررسی: ۱۶ ورزشکار مرد سالم فعال به‌صورت در دسترس انتخاب شد. متغیرهای مربوط به سینماتیک و سینتیک دویدن، و همچنین هزینه‌ی متابولیک آنها حین فعالیت، به ترتیب با استفاده از دوربین، صفحه‌ی نیروسنج و دستگاه K4b2 ثبت شد.

یافته‌ها: محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی با رویکرد جدید عبارت بود از: کار انجام شده روی COM بخش بر انرژی مکانیکی کل. کار انجام شده روی COM با توجه به رویکرد جرم- نقطه و انرژی مکانیکی کل با استفاده از تئوری دینامیک معکوس محاسبه شد. به‌منظور بررسی آماری، فرضیه‌ی تحقیق از آزمون همبستگی پیرسون در سطح معناداری $p\leq0.05$ استفاده شد.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج به دست آمده همبستگی معناداری بین کارآیی مکانیکی به روش هزینه‌ی متابولیک، و کارآیی مکانیکی به روش برآیند انجام کار مشـــاهده نشد ($r = ۰.۳۱$ ، $p = ۰.۲۶$). نتایج نشان داد رویکرد برآیند انجام کار نمی‌تواند جایگزین مناسبی برای روش رایج در ارزیابی کارایی مکانیکی باشد.

* اطلاعات نویسنده مسئول. تلفن: ۰۱۷۱-۲۲۴۲۲۹۲
✉ پست الکترونیکی: v.jahedi17@chmail.ir

مقدمه

کارآیی مکانیکی[1] یکی از متغیرهایی است که از طریق محاسبه‌ی کار[2] و انرژی[3] به دست می‌آید. در طول دویدن اگر فرد بتواند با صرف مقدار انرژی کمتری کار یکسانی را انجام دهد، از کارآیی مکانیکی بهتری برخوردار است. در نتیجه دوندگانی که از کارآیی مکانیکی بالاتری برخوردارند در طول مسابقات یا تمرینات، عملکرد بهتری از خود به نمایش می‌گذارند. با توجه به اهمیت میزان کارآیی در طول دویدن این نکته همواره در ذهن محققان بوده است که چگونه می‌توان این مقدار را محاسبه و یا دستکاری کرد. محققان در گذشته از شیوه‌های متفاوتی برای ارزیابی کارآیی انسان استفاده می‌کردند. به طورکلی، کارآیی با توجه به ارزیابی هزینه‌ی متابولیک[4] در طول حرکت مدنظر قرار می‌گیرد و مقدار انرژی را که فرد در طول حرکت صرف کرده را به نسبت کاری که انجام داده می‌سنجند. روش رایج برای ارزیابی کارآیی استفاده از هزینه‌ی متابولیک و محاسبه‌ی تغییرات انرژی مکانیکی با توجه به مدلهای ریاضیاتی می‌باشد (۱).

کارآیی به صورت کلی برابر است با مقدار هزینه(انرژی، زمان و...) صرف شده به نسبت نتیجه کسب شده (۲):

معادله‌ی (۱) $$\text{کارآیی} = \frac{\text{نتیجه کسب شده}}{\text{هزینه و انرژی صرف شده}}$$

Dickson (۱۹۲۹) از جمله اولین افرادی بود که کارآیی مکانیکی را در دوچرخه‌سواری مورد ارزیابی قرار داد(۳). در تحقیق وی کارآیی مکانیکی به صورت زیر تعریف شده بود:

معادله‌ی (۲) $$ME = \frac{R * 1}{V * 2190}$$

که در آن ME کارآیی مکانیکی، R بار وارده به چرخ (بر حسب کیلوگرم)، l محیط چرخ (متر)، V مقدار اکسیژن مصرفی بر حسب لیتر در آن بازه‌ی زمانی می‌باشد. نتایج حاصل از این تحقیق مقادیر ۱۱ تا ۲۱ درصدی را برای کارآیی مکانیکی گزارش می‌کرد. به دنبال وی چندین پژوهش در زمینه‌ی کارآیی مکانیکی در دوچرخه‌سواری انجام شد(۴-۶)؛ اما اولین تحقیق در رابطه با کارآیی مکانیکی حین راه رفتن و دویدن به پژوهشی در سال ۱۹۶۸ برمی‌گردد (۷). این تحقیق که در رابطه با بالا رفتن و پایین رفتن از سراشیبی انجام شده بود، کارآیی مکانیکی را به‌صورت کار مثبت مکانیکی تقسیم بر انرژی مصرفی بیان می‌کرد. در این تحقیق محاسبه‌ی کار مکانیکی کل بر اساس رویکرد مرکز ثقل بود. در این پژوهش مجموع تغییرات مثبت انرژی مکانیکی ($\sum\Delta E+$) به عنوان کار مثبت مکانیکی در نظر گرفته شده بود.

Cavagna و همکاران (۱۹۷۷) کارآیی را از طریق محاسبه‌ی کار کل بدن و تقسیم آن بر هزینه‌ی متابولیک به دست آوردند (۸). آنان مجموع کار مکانیکی داخلی و خارجی را به عنوان کار مکانیکی کل در نظر گرفتند. کار مکانیکی داخلی را با توجه به رویکرد قطعه‌ای محاسبه کردند و کار مکانیکی خارجی را با توجه به رویکرد جرم نقطه و با استفاده از صفحه‌ی نیروسنج اندازه‌گیری کردند. همچنین در محاسبات خود از انرژی مصرفی خالص[5](انرژی مصرفی پایه منهای انرژی مصرفی در حال حرکت) بهره جستند. Aura و همکاران (۱۹۸۶) طی تحقیقی سعی کردند تا کارآیی مکانیکی زنان و مردان را طی حرکت اسکات بررسی کنند (۹). آنها در این تحقیق با استفاده از صفحه‌ی نیروسنج، سطحی از منحنی نیرو- زمان را که پایین‌تر از وزن بدن می‌باشد نمایانگر کار داخلی می‌دانند و سطوح بالاتر از این مقدار را به عنوان کار خارجی در نظر گرفتند. سپس با تقسیم کار مکانیکی کل (کار داخلی+کار خارجی) بر انرژی مصرفی خالص کارآیی مکانیکی را محاسبه کردند. البته با توجه به همین رویکرد تحقیقات دیگری نیز در سال ۱۹۹۰ انجام شد (۱۰و۱۱).

Schepens و همکاران (۲۰۰۱) کارآیی مکانیکی کودکان را طی دویدن ارزیابی کردند (۱۲). آنان کار مکانیکی کل را برابر با مجموع کار مکانیکی داخلی و کار مکانیکی خارجی می‌دانستند. کار مکانیکی داخلی را با استفاده از رویکرد قطعه‌ای محاسبه کردند، و کار مکانیکی خارجی را با توجه به رویکرد مرکز ثقل و با استفاده از نیروهای عکس‌العمل زمین بدست آوردند. آنها همچنین از انرژی مصرفی خالص برای محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی استفاده کردند. با توجه به همین الگو تحقیقات دیگری نیز در سال‌های ۲۰۰۳و۲۰۰۵ توسط Detrembleur و همکاران انجام شد (۱۳و۱۴).

1. Mechanichal efficiency
2. Work
3. Energy
4. Metabolic cost
5. Net Energy Expenditure

طی تحقیقی در سال ۲۰۱۱ روشهای موجود در محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی طی راه رفتن کودکان با یکدیگر مقایسه شد(۱۵) که این مقایسه تنها در رابطه با معادلات مربوط به‌صورت کسر (کار مکانیکی کل در سه رویکرد) انجام گرفته بود. نتایج این تحقیق نشان می‌داد روش محاسبه‌ی کار مکانیکی کل با توجه به رویکرد دینامیک معکوس شیوه‌ای ترجیحی و قابل قبول‌تری برای محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی می‌باشد.

Bar-Haim و همکاران (۲۰۱۳) طی تحقیقی سعی کردند تا کارآیی مکانیکی را طی بالا رفتن از پله در افراد فلج مغزی بررسی کنند (۱۶). آنان در تحقیق خود کارآیی مکانیکی را این گونه توصیف کردند:

معادله‌ی (۳) $$\text{کارآیی مکانیکی} = \frac{\text{کار خارجی}}{\text{هزینه متابولیک خالص}}$$

که بر اساس آن کار خارجی برابر است با حاصلضرب وزن بدن در میزان جابجایی عمودی مرکز ثقل طی بالا رفتن از هر پله.

هزینه‌ی متابولیک غالباً به عنوان یک روش استاندارد به نظر می‌رسد. با این وجود این روش با محدودیت‌های زیادی همراه است؛ از جمله این‌که در فعالیت‌هایی بیشتر کاربرد دارد که به صورت هوازی می‌باشند و استفاده از آن در فعالیت‌ها و مهارت‌های کوتاه مدت با محدودیت‌های بسیاری همراه است. همچنین، علاوه بر صرف زمان زیاد، فرد در طول فعالیت مجبور به استفاده از وسایلی است که می‌تواند اجرای او را با محدودیت‌هایی همراه سازد و همچنین از آنجا که در رابطه با محاسبه‌ی کارآیی، هم متغیرهای فیزیولوژیکی و هم متغیرهای بیومکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، محقق را ملزم می‌کند تا از دو حیطه‌ی مجزا در تحقیق خود استفاده نماید. حال این سؤال به وجود می‌آید که آیا می‌توان روشی برای محاسبه‌ی کارآیی به دست آورد که زمانبر نباشد، در مهارت‌ها و فعالیت‌های کوتاه مدت مورد استفاده قرار گیرد و هم برای اجرای آزمودنی محدودیت ایجاد نکند؟

با توجه به بررسی تحقیقات گذشته و ارزیابی‌های صورت گرفته پی به روشی برده شد که نه تنها اشکالات ذکر شده در آن برطرف می‌شود بلکه فقط از طریق متغیرهای بیومکانیکی قادر به محاسبه‌ی کارآیی خواهیم بود. هدف از انجام این پژوهش اعتبارسنجی محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی با رویکرد برآیند انجام کار[1] در مقایسه با روش رایج می‌باشد.

روش شناسی

تعداد ۱۶ نفر آزمودنی با پای برتر راست از دانشجویان تربیت‌بدنی فعال به صورت در دسترس انتخاب شدند. آزمودنی‌های پژوهش حاضر دارای میانگین سنی ۳±۲۴ سال، و میانگین قدی ۵/۴۷±۱۷۷ سانتی متر و میانگین جرمی ۸/۴±۷۲/۶ کیلوگرم بودند. سلامت جسمانی کلیه آزمودنی‌ها قبل از اجرای پروتکل پژوهشی ارزیابی شد.

در ابتدا برای آشنایی آزمودنی‌ها با نحوه‌ی اجرای آزمون درباره‌ی نحوه‌ی اجرای آن با آنها صحبت شد. پس از نصب دستگاه ثبت هزینه‌ی متابولیک بر روی بدن آزمودنی، هر یک از آنها دقایقی را به گرم کردن و سازگاری با دستگاه گاز آنالایزور می‌پردازند. بعد از آن برای لحظاتی آزمودنی به حالت درازکش(طاق‌باز به پشت) قرار می‌گیرد تا هزینه‌ی متابولیک حالت استراحت آنها ثبت شود. پس از آن برای سازگاری با شرایط اجرا، پروتکل آزمون را چند مرتبه تکرار می‌کنند. نحوه‌ی اجرای آزمون بدین قرار است که هر فرد باید یک آزمون دو مرحله‌ای را اجرا کند:

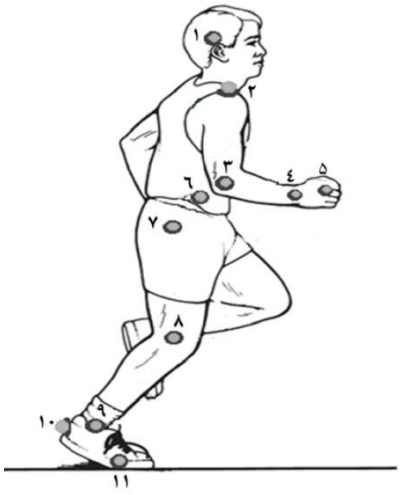
۱. ابتدا دویدن بر روی تردمیل به مدت ۷ دقیقه و با سرعت ۷.۵ km/h؛

۲. دویدن در یک مسیر ۱۵ متری و ثبت حرکت توسط دوربین و صفحه‌ی نیرویی که در وسط این مسیر قرار داشت؛ مرحله‌ی اول به منظور رسیدن آزمودنی به حالت پایدار و جمع‌آوری داده‌های مربوط به هزینه متابولیک است و مرحله‌ی دوم به منظور ثبت داده‌های سینماتیکی و سینتیکی و محاسبه‌ی انرژی مکانیکی کل می‌باشد. آزمودنی‌ها بعد از آنکه مرحله‌ی اول آزمون را اجرا کردند، سپس مرحله‌ی دوم را در سه کوشش متوالی و با سرعتی بین ۷ تا ۸ km/h انجام می‌دهند. از بین سه کوشش یک کوشش به‌صورت تصادفی جهت تحلیل داده‌ها انتخاب می‌شود. شایان ذکر است که الگوی دویدن مورد نظر پاشنه-پنجه بود و آزمون با پوشش کفش (New Balance، مدل ۶۵۸) انجام شده بود.

به‌منظور ثبت مؤلفه‌های مربوط به سینماتیک دویدن از دوربین ویدئویی (مدل JVC) با سرعت تصویربرداری ۲۰۰

1. Resultant Work

فریم در ثانیه استفاده شد. همچنین برای ثبت نیروی عکس‌العمل زمین از صفحه‌ی نیروسنج (kistler) با سرعت نمونه برداری ۱۰۰۰Hz استفاده شد (۴۰*۶۰). به منظور مشخص کردن مدل سینماتیکی و اندام‌های بدن، تعداد ۱۱ نشانگر غیرفعال بر اساس یک مدل ساده‌ی آناتومیکی بر روی استخوان گیجگاهی [۱]، زائده‌ی آخرومی [۲]، کندیل خارجی بازو [۳]، زائده‌ی نیزه‌ای مچ دست [۴]، انتهای استخوان سوم کف دستی [۵]، خار خاصره‌ای قدامی فوقانی [۶]، برجستگی‌های تروکانتر بزرگ ران [۷]، کندیل خارجی ران [۸]، قوزک خارجی [۹]، برجستگی پاشنه [۱۰] و انتهای استخوان پنج کف پایی [۱۱] نصب شد (شکل ۱). دوربین ویدیویی با صفحه‌ی نیروسنج همزمان سازی شده بود. برای کنترل سرعت دویدن نیز زمان‌سنج دستی با دقت ۰/۰۱ ثانیه مورد استفاده قرار گرفت. داده‌های مربوط به دوربین و صفحه نیرو به وسیله‌ی نرم‌افزار Simi Motion جمع‌آوری شده و توسط نرم‌افزار Matlab (نسخه‌ی ۲۰۱۰) تجزیه و تحلیل شد. به منظور فیلتر نمودن داده‌های خام از تکنیک فیلتر پایین‌گذر باترورث[1] با فرکانس برشی ۲۰Hz استفاده شد. انرژی مصرفی نیز به کمک نوارگردان (h/p/cosmos) و دستگاه گاز آنالایزر (K4b2,COSMED) اندازه‌گیری شد. این دستگاه به صورت مستقیم و لحظه به لحظه مقادیر مربوط به انرژی مصرفی را ارائه می‌دهد.



شکل ۱: مارکرسِت تصویربرداری

روش پیشنهادی در محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی

انرژی مکانیکی کل

برای محاسبه‌ی انرژی مکانیکی کل از رویکرد قطعه‌ای استفاده می‌شود، اما برای محاسبه‌ی انرژی مکانیکی هر اندام از رویکرد دینامیک معکوس بهره می‌برد. به عبارت دیگر، ابتدا انرژی مکانیکی هر قطعه از طریق دینامیک معکوس محاسبه شده و سپس مجموع انرژی مکانیکی تمامی اعضا به عنوان انرژی مکانیکی کل در نظر گرفته می‌شود. در تئوری دینامیک معکوس، نیرو و گشتاور نیروی وارد بر مفاصل به طور غیرمستقیم از متغیرهای سینماتیکی، شاخص‌های دقیق آنتروپومتریکی و نیروهای خارجی محاسبه می‌شوند. اندازه‌های آنتروپومتریکی شامل جرم(mi)، مرکز ثقل بدن(COM)، مرکز ثقل هر اندام(com_i) و گشتاور اینرسی(I_i) اندام‌ها بر اساس مدل دلووا تخمین زده شده بود (۱۷).

پس از محاسبه‌ی نیروها و گشتاورهای وارد بر هر اندام از طریق دینامیک معکوس (۱۸)، می‌توانیم با حاصلضرب سرعت‌های خطی و زاویه‌ای در نیرو و گشتاورهای مفصلی اندام اقدام به محاسبه‌ی انرژی مکانیکی نماییم؛ برای مثال ساق پا را در نظر بگیرید دو نیرو و یک گشتاور در قسمت دیستال و دو نیرو و یک گشتاور دیگر در قسمت پروگزیمال بر ساق پا اثر می‌کنند. به موازات نقطه اثر هر یک از نیروهای خطی، سرعت خطی نیز در همان راستا به وجود می‌آید. همچنین گشتاورهای موجود در سگمنت نیز سرعت زاویه‌ای را در آن سگمنت ایجاد می‌کنند. در نتیجه، می‌توان با حاصلضرب هر یک از این نیروها در سرعت، توان را در آن ناحیه از سگمنت محاسبه کرد (شکل ۲). سپس با جمع توان‌های به‌دست آمده، توان انتقالی به هر سگمنت محاسبه می‌شود (۱۹):

$$P_{flow} = Pj,p + Pm,p + Pj,d + Pm,d$$ معادله‌ی (۴)

از طرف دیگر بر طبق قانون بقای انرژی می‌دانیم که توان برابر است با انرژی در واحد زمان.

$$Power = \frac{Mechanical\ Energy}{time}$$ معادله‌ی (۵)

در نتیجه می‌توان با انتگرال‌گیری توان در بازه‌ی زمانی مورد نظر انرژی مکانیکی سگمنت را محاسبه کرد.

$$Segment\ energy\ flow = \int Pflow\ .\ dt$$ معادله‌ی (۶)

1. Low.pass second.order zero lag butterworth filter

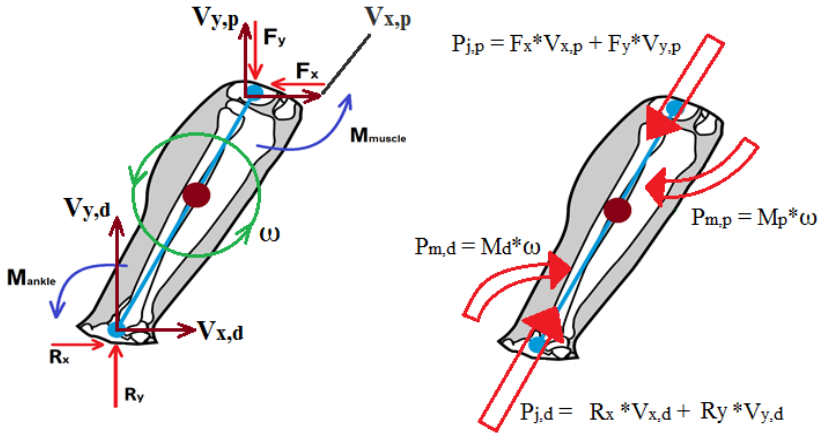
استفاده از دینامیک معکوس با محدودیت‌هایی همراه است. نادیده گرفته شدن اصطکاک مفصلی و دیگر ساختارهای مفصلی (رباط، مینیسک، و...) در دینامیک معکوس از جمله عواملی است که باعث می‌شود نتوانیم برآورد دقیقی از کار عضلانی داشته باشیم. همچنین باید عنوان کرد این شیوه در اندام‌های ضمیمه‌ای به‌ویژه اندام تحتانی کاربرد بهتری دارد، زیرا در اندام مرکزی با گسترش بیشتر اتصالات استخوانی و کوچک‌تر شدن مفاصل به سختی امکان دارد بتوان از این شیوه استفاده کرد، و با خطاهای بسیاری همراه است (۲۰). از همین جهت، برای به‌دست آوردن انرژی مکانیکی تنه و سر از رویکرد قطعه‌ای استفاده می‌شود. به این صورت که، تنها با در دست داشتن مقادیر سینماتیکی (سرعت، موقعیت مرکز جرم اندام وگشتاور اینرسی) و با استفاده از معادلات انرژی پتانسیل و جنبشی اقدام به محاسبه‌ی انرژی مکانیکی در اندام مربوطه می‌کنیم:

معادله‌ی (۷) $E = ½\, m_{seg}(Vx^2 + Vy^2) + ½\, I_{seg}\, \omega^2 + m_{seg}\, gh$

در نهایت می‌توان با جمع انرژی مکانیکی تمامی سگمنت‌ها انرژی مکانیکی کل را به‌دست آورد:

معادله‌ی (۸)

$$\text{Mechanical Energy}_{total} = \text{Energy}_{trunk} + \text{Energy}_{head} + \text{Energy}_{arm} + \text{Energy}_{forarm} + \text{Energy}_{hand} + \ldots\ldots \ldots\ldots \text{Energy}_{thigh} + \text{Energy}_{shank} + \text{Energy}_{foot}$$



شکل ۲: نحوه ورود و انتقال انرژی در ساق پا

کار انجام شده روی COM

در فضای دوبعدی و در سطح ساجیتال، در دو راستا به زمین نیرو وارد می‌شود؛ یکی در راستای عمودی و دیگری در راستای افقی. متأثر از هرکدام یک از این نیروها، بدن نیز در همان راستا مقداری جابه‌جا می‌شود. بدین معنی که، نیروی عمودی (Fy) بدن را کمی در راستای عمودی جابجا می‌کند و نیروی افقی نیز باعث جابجایی به جلو می‌شود (شکل۳). بر همین اساس و با استناد به معادله‌ی کار(W=F*D)، کار انجام شده در هر راستا برابر خواهد بود با:

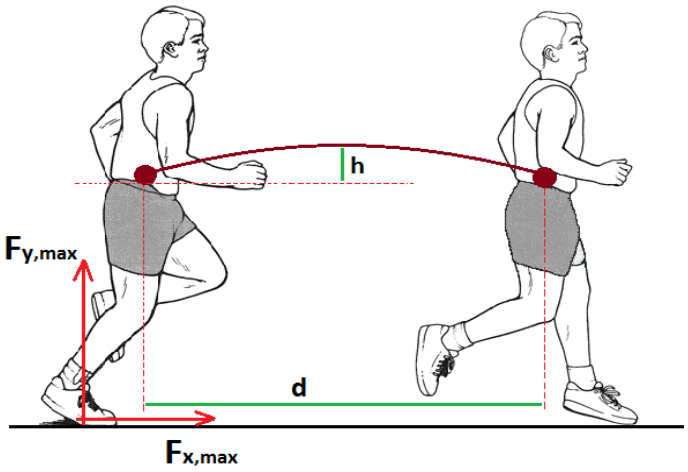
معادله‌ی (۹) کار در راستای عمودی = Fy,max * h

معادله‌ی (۱۰) کار در راستای افقی = Fx,max * d

در این روابط؛ Fy,max و Fx,max حداکثر نیروی عکس العمل زمین در راستای عمودی (y) و افقی (x)، d میزان جابجایی مرکز ثقل در راستای افقی و h میزان جابجایی مرکز ثقل در راستای عمودی می‌باشد. از آنجا که کار یک کمیت نرده‌ای است، در نتیجه می‌توان با جمع جبری این دو معادله کار انجام شده بر روی مرکز ثقل را نیز حساب کرد:

معادله‌ی (۱۱)

کار انجام شده روی COM = کار در راستای عمودی + کار در راستای افقی



شکل۳: اعمال نیرو و جابجایی مرکز ثقل(COM) حین نیم گام دویدن

کارآیی مکانیکی

همان‌طور که گفته شد، معادله مربوط به کارآیی دارای دو بخش است؛ یکی صورت کسر و دیگری مخرج کسر.

معادله‌ی (۱۲) $$\text{کارآیی} = \frac{\text{کار به‌دست آمده}}{\text{انرژی داده شده}}$$

هدف از راه رفتن یا دویدن جابجایی مرکز ثقل بدن از نقطه‌ای به نقطه دیگر می‌باشد؛ به عبارت دیگر، اندام‌های بدن انرژی مکانیکی تولید می‌کنند تا مرکز ثقل جابجا شود. پس کارآیی مکانیکی را می‌توان این گونه نیز بیان کرد:

معادله‌ی (۱۳)

$$\text{کارآیی مکانیکی دویدن} = \frac{\text{کار انجام شده بر روی COM}}{\text{انرژی مکانیکی کل تولید شده در اندام‌ها}}$$

در حالی که کارآیی مکانیکی به روش رایج برابر است با:

معادله‌ی (۱۴)

$$\text{کارآیی به روش رایج} = \frac{\text{انرژی مکانیکی کل تولید شده در اندام‌ها}}{\text{هزینه متابولیک حالت استراحت - هزینه متابولیک کل}}$$

حال ما سعی داریم تا مقایسه‌ای بین این دو روش انجام دهیم و اعتبار روش پیشنهاد شده را نیز بررسی کنیم. به منظور آزمون فرضیات از نرم‌افزار SPSS نسخه‌ی ۱۶ استفاده شد. پس از بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف - اسمیرنوف، از آزمون همبستگی پیرسون در سطح معناداری $p\leq0.05$ به منظور بررسی اعتبارسنجی محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی به روش برآیند انجام کار با روش رایج استفاده شد.

یافته‌ها

میانگین، انحراف استاندارد و دامنه‌ی تغییرات داده‌های مربوط به کار و انرژی به تفکیک در جدول۱ آمده است. روندی کاهشی در میزان مصرف انرژی در سه متغیر مربوط به انرژی و کار در بدن وجود دارد. این گونه به نظر می‌رسد که قسمتی از انرژی درونی بدن (هزینه‌ی متابولیک) به شکل‌های دیگر مصرف شده و تنها مقداری از آن به شکل بیرونی (انرژی مکانیکی کل) ظهور کرده است. همچنین متعاقب آن تنها درصدی از انرژی مکانیکی کل نیز منجر به کار بر روی مرکز ثقل شده است.

جدول ۱: شاخص‌های مرکزی و پراکندگی متغیرهای مربوط به کار و انرژی طی نیم گام دویدن

متغیرها	میانگین (انحراف استاندارد)	دامنه تغییرات	حداکثر	حداقل
انرژی مصرفی(kj)	۱.۶۱(۰.۲۱)	۰.۷۲	۱.۸۹	۱.۱۸
انرژی کل مکانیکی(kj)	۰.۷۳(۰.۱۱)	۰.۴۲	۰.۹۳	۰.۵۲
کار انجام شده بر COM(kj)	۰.۳۰(۰.۰۶)	۰.۲۲	۰.۴۲	۰.۲۰
کارآیی مکانیکی به روش رایج ٪	۴۶.۳۵(۸.۶۴)	۲۹.۵۴	۶۰.۳۶	۳۰.۸۳
کارآیی مکانیکی به روش جدید ٪	۴۱.۱۵(۵.۲)	۳۱.۳۱	۵۴.۲۲	۲۸.۳۵

پس از بررسی‌های آماری انجام شده، همبستگی بین کارآیی مکانیکی به روش رایج و کارآیی مکانیکی به روش جدید معنادار نبود ($r = ۰.۳۱$ و $p = ۰.۲۶$). علاوه بر آزمون فرض اصلی تحقیق، ارتباط بین سه متغیر مربوط به کار و انرژی مکانیکی (هزینه‌ی متابولیک، انرژی مکانیکی کل، کار انجام شده بر COM) نیز توسط آزمون همبستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفت. بین انرژی مکانیکی کل و کار انجام شده بر روی مرکز ثقل همبستگی معنادار مشاهده شد ($r = ۰.۷۵$ و $p = ۰.۰۰۱$) و بین دیگر متغیرهای کار و انرژی ارتباط معنی‌دار وجود نداشت.

بحث و بررسی

علاوه بر سختی‌های پژوهشی و مسائل تئوریکی گفته شده، کارآیی مکانیکی به روش رایج اشکالات فنی را نیز شامل می‌شود؛ برای مثال، یک شخص سالم در هر چرخه از راه رفتن، انرژی‌ای در حدود ۳۰۰j مصرف می‌کند و در مقابل ۱۰۰j از آن را به کار مکانیکی تبدیل می‌کند. در نتیجه، کارآیی مکانیکی آن برابر با ۳۳٪ خواهد بود. در عوض، فردی با اختلالات عصبی- عضلانی در هر چرخه از راه رفتن انرژی‌ای در حدود ۵۰۰j مصرف می‌کند که تنها ۲۰۰j از آن به کار مکانیکی تبدیل می‌شود. در نتیجه، کارآیی مکانیکی این فرد برابر با ۴۰٪ خواهد بود. بدیهی است که یک فرد سالم نسبت به یک فرد بیمار کارآمدی بهتری در راه رفتن دارد. اما نتایج حاصل از این محاسبات برخلاف واقع می‌باشد، و نشان‌دهنده‌ی آن است که فرد بیمار در تبدیل انرژی متابولیک به انرژی مکانیکی کارآتر است. فردی با اختلالات عصبی- عضلانی به دلیل آن که نمی‌تواند الگوی حرکتی روانی را تولید کند، بسیار ناکارآمدتر از افراد عادی می‌باشد (۲۱). این مثال بیانگر آن است که در محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی باید چگونگی و نحوه کنترل سیستم عصبی- عضلانی در اجرای حرکت را نیز مدنظر قرار داد؛ زیرا امکان دارد یک فرد بتواند درصد زیادی از هزینه‌ی متابولیک را به انرژی مکانیکی تبدیل کند، اما توانایی کنترل این انرژی مکانیکی را نداشته و با حرکات ناموزون و آشفته باعث هدرروی این مقدار انرژی مکانیکی شود.

در رابطه با ثبت داده‌های انرژی و کار دو نکته حائز اهمیت بود. اول آنکه آزمودنی ابتدا باید به یک سطح پایداری از انرژی مصرفی برسد، و سپس مقادیر هزینه متابولیک مد نظر قرار گیرد. چرا که در اوایل حرکت نیاز به انرژی به یکباره افزایش می‌یابد، و متعاقب آن، نوسانات اکسیژن مصرفی نیز به صورت لحظه‌ای تغییر می‌کند. از همین روی کمی زمان می‌برد تا بافتهای درونی بدن به یک شرایط یکنواخت برسند. شایان ذکر است که این شرایط در اغلب آزمودنی‌ها بین دقایق ۶ تا ۷ اتفاق می‌افتاد. نکته‌ی دوم آن است که، آزمودنی‌ها باید در محدوده همان سرعتی که بر روی تردمیل دویده‌اند، از جلوی دوربین‌های فیلمبرداری عبور کنند. زیرا، از آنجایی که مولفه سرعت یکی از عوامل موثر در کارآیی مکانیکی می‌باشد، می‌توانست شرایط یکسان در آزمون را برهم زند.

مارکر گذاری تنها بر روی نیمه‌ی سمت راست بدن آزمودنی‌ها انجام شده بود. این مورد ناشی از دو موضوع بود؛ یکی اینکه کلیه‌ی آزمودنی‌های شرکت کننده در آزمون با پای برتر راست بودند. و دوم آنکه به دلیل کمبود فضای آزمایشگاهی ناچار بودیم تنها یک سمت از بدن را مورد بررسی قرار دهیم. برای رفع این مشکل نیز تدبیری اندیشیده شد. از آنجا که دویدن یک حرکت متقارن می‌باشد می‌توان این گونه فرض کرد که حرکت دست و پای یک سمت مشابه طرف مقابل می‌باشد (۲۲). از همین روی برای ارزیابی حرکت کلیه اجزای بدن- به‌ویژه مرکز ثقل- در یک نیم‌گام دویدن، مجبور شدیم حرکت نیمه راست بدن را در یک گام دویدن بررسی کنیم، و سپس قسمتی از حرکت پای راست را به نیمه دیگر تعمیم دهیم. به طور خلاصه می‌توان گفت؛ از زمان برخورد پاشنه پای راست با زمین تا برخورد پاشنه پای دیگر (نیم‌گام)، امکان ثبت حرکت در نیمه راست بدن وجود دارد. اما همزمان با نیمه راست بدن، نیمه چپ بدن نیز دارای نوسان در پا و دست می‌باشد (شکل ۴).

شکل ۴: نیم گام دویدن (پای راست اتکا، پای چپ نوسان)

از آنجا که دویدن یک حرکت متقارن است، پس می‌توانیم با بررسی نوسان پا و دست راست در نیم‌گام بعدی، آن را معادل نوسان پا و دست چپ در نیم گام قبلی در نظر بگیریم؛ به عبارت دیگر با ثبت حرکات یک گام در یک سمت از بدن می‌توانیم این گونه تصور کنیم که یک نیم‌گام را بررسی کرده‌ایم (شکل ۵).

شکل ۵: نیم گام بعدی دویدن (پای راست نوسان، پای چپ اتکا)

در رابطه با نتایج تحقیق، گمان می‌رفت بین کارآیی مکانیکی به روش رایج و کارآیی مکانیکی به روش جدید همبستگی معناداری به‌وجود بیاید، اما نتایج نشان می‌دهد روش پیشنهادی برای محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی اعتبار لازم را کسب نکرده است. به طور کلی در کارآیی، ما با یک نسبت سروکار داریم، که نشان می‌دهد توانایی یک مجموعه در تبدیل انرژی به کار چقدر می‌باشد. در بدن انسان این توانایی در تبدیل انرژی به کار به دو صورت می‌تواند ظهور پیدا کند؛ اول آنکه بدن چقدر توانایی دارد تا انرژی متابولیک حاصل از مواد غذایی را به انرژی مکانیکی تبدیل کند. و در مرحله دوم، چقدر توانایی وجود دارد تا این مقدار انرژی مکانیکی به کار مورد نظر تبدیل شود. برای محاسبه‌ی میزان بازدهی بدن در مرحله‌ی اول شما باید انرژی مکانیکی تولید شده را بر هزینه‌ی متابولیک تقسیم نمایید.

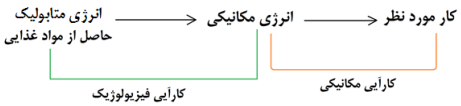
معادله‌ی (۱۵) $$\text{کارآیی} = \frac{\text{انرژی مکانیکی}}{\text{هزینه متابولیک}}$$

و برای محاسبه‌ی کارآیی در مرحله‌ی دوم کافیست تا نسبت کار تولید شده را به انرژی مکانیکی به‌دست آورید.

معادله‌ی (۱۶) $$\text{کارآیی} = \frac{\text{کار مورد نظر}}{\text{انرژی مکانیکی}}$$

به نظر محقق، شاید بهتر باشد تا بین این دو کارآیی تفکیک ایجاد شود؛ زیرا در مرحله‌ی اول شما از تقسیم یک مقدار مکانیکی بر یک مقدار شیمیایی نسبتی را به‌دست می‌آورید. اما در مرحله‌ی دوم، چه در صورت کسر و چه در مخرج کسر شما با یک کمیت مکانیکی سروکار دارید. ممکن است تفاوت بین این دو روش ناشی از اختلاف کمیتی آنها باشد. از همین روی شاید بهتر باشد که میزان بازدهی در مرحله‌ی اول را «کارآیی فیزیولوژیک» بنامیم و بازدهی در مرحله‌ی بعدی را «کارآیی مکانیکی».

معادله‌ی (۱۷)



همان‌طور که گفته شد، ارتباط بین سه متغیر مربوط به کار و انرژی مکانیکی (هزینه‌ی متابولیک، انرژی مکانیکی کل، کار انجام شده بر COM) نیز توسط آزمون همبستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفت و تنها بین انرژی مکانیکی کل و کار انجام شده بر روی مرکز ثقل همبستگی معنادار به وجود آمد. شاید یکی از نتایجی که در این تحقیق جالب توجه و تأمل‌برانگیز بود، همبستگی بالا و ارتباط معنادار بین

انرژی مکانیکی کل و کار انجام شده بر روی مرکز ثقل می-باشد. وجود ضریب تعیین V =۰.۵۶ نشان‌دهنده‌ی همپوشانی بسیار مناسب بین این دو متغیر است و نمایانگر آن است که با ۵۶٪ اطمینان می‌توان متغیر انرژی مکانیکی کل را از روی کار COM پیش‌بینی کرد و بالعکس. از آنجا که هر دوی این متغیر از یک جنس می‌باشند، پیش بینی می‌شد که بین انرژی مکانیکی و کار انجام شده بر روی com همبستگی معناداری دیده شود. معادله‌ی کارآیی نسبتی است که از یک صورت و یک مخرج تشکیل شده است. آنچه که به نظر می‌رسد باید عباراتی در این معادله نقش داشته باشند که به یکدیگر وابسته باشند؛ به عبارت دیگر، افزایش یا کاهش یکی باعث افزایش یا کاهش دیگری شود. در نتیجه، لازمه‌ی تعیین نسبت کارآیی در یک مجموعه، وجود ارتباط معنادار بین آنچه که داده شده و آنچه که به‌دست آمده می‌باشد. از همین جهت این نتیجه درخور توجه است.

نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌ی اصلی پژوهش، روش جدید برای محاسبه‌ی کارآیی مکانیکی اعتبار لازم را کسب نکرد. از همین رو نمی‌توان این روش را جایگزینی مناسب برای روش معمول در نظر گرفت. با این حال، وجود ارتباط معنادار بین انرژی مکانیکی کل و کار انجام شده بر روی مرکز ثقل می‌تواند روزنه‌ی امید به ادامه‌ی تحقیق در این زمینه را افزایش دهد. با توجه به اینکه تحقیق حاضر، رویکردی در رابطه با متغیرهای مربوط به کار و انرژی مکانیکی می‌باشد، لذا پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی نکات پیش رو رعایت گردد: الف) بررسی این رویکرد در گروه‌های مختلف سنی و گروه‌های مختلف ورزشی(روایی سازه)؛ ب) تجزیه و تحلیل داده‌ها به صورت سه بعدی(3D) و ج) در نظر گرفتن بازه‌های زمانی طولانی‌تر (مثلاً ۳۰ ثانیه تا ۱ دقیقه) برای محاسبه‌ی انرژی و کار.

References

[1] Sienko Susan Thomas,Cathleen E. Buckon ,Michael H. Schwartz ,Michael D. Sussman , Michael D. Aiona. Walking energy expenditure in able-bodied individuals:A comparison of common measures of energy efficiency; Gait & Posture. 2009. 29 592–596.

[2] Rezaeian A.[Organizational behaviour management]. Samt. 2006. Page 217

[3] Dickson S . The efficiency of bicycle-pedalling as affected by speed and load. J Physiol. 1929. 67:242-255.

[4] F. M. Henry, DeMoor J . Metabolic efficiency of exercise in relation to workload at constant speed. J Appl Physiol. 1956. 8:608-614.

[5] Christensen EH, Hrgberg P. The efficiency of anaerobical work. Arbeitsphysiologie. 1950. 14:249-250.

[6] E. W. Banister, R. C. Jackson. The effect of speed and load changes on oxygen intake for equivalent power output during bicycle ergometer. Int Z Angew Physiol. 1967. 24:284-290.

[7] Rodolfo Margaria . Positive and negative work performance and their efficiencies in human locomotion. Int Z Angew Physiol. 1968. 25:339-351.

[8] Cavagna GA, Kaneko M . Mechanical work and efficiency in level walking and running. J Physiol. 1977. 268:467-481.

[9] Aura O, Komi PV . The mechanical efficiency of locomotion in men and women with special emphasis on stretch shortening cycle exercises. Eur J Appl Physiol. 1986. 55:37-43.

[10] Oksanen P, Kyröläinen H, Komi PV, and Aura O. Estimation of errors in the mechanical efficiency. Eur J Appl Physiol .1990 .61:473-478.

[11] Kyröläinen H, Komi PV, Oksanen P, Häkkinen K, Cheng S, Kim, DH. Mechanical efficiency of locomotion in females during different kinds of muscle action. Eur J Appl Physiol. 1990. 61 : 446-452.

[12] Schepens B, Willems PA, Cavagna GA, Heglund NC. Mechanical power and efficiency in running children. J Physiol. 2001.442, 107–116.

[13] Detrembleur C, Dierick F, Stoquart G, Chantraine F, Lejeune T. Energy cost, mechanical work and efficiency of hemiparetic walking. Gait&Posture. 2003.18:47–55.

[14] Stoquart GG, Detrembleur C, Nielens H, Lejeune TM. Efficiency of work production by spastic muscles. Gait&Posture. 2005. 22: 331–337.

[15] Van de Walle P, Hallemans A, Schwartz M, Truijen S, Gosselink R, Desloovere K. Mechanical energy estimation during walking: Validity and sensitivity in typical gait and in children with cerebral palsy. Gait Posture. 2011. 35(2), 231-7.

[16] Bar-Haim S, Al-Jarrah MD, Nammourah I, Harries N. Mechanical efficiency and balance in adolescents and young adults with cerebral palsy. Gait&Posture. 2013. Sep;38(4):668-73.

[17] de Leva P. Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. Journal of Biomechanics. 1996. 29: 1223–1230.

[18] Robertson, G., Caldwell, G., Hamill, J., Kamen, G., Whittlesey, S. Research methods in Biomechanics:

Two-Dimensional Inverse Dynamics. Human Kinetics. 2004. Page 103-124.
[19] Winter, D. A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Canada, Alberta: John Wiley & Sons. 2009. Page 168-172.
[20] Robertson, G., Caldwell, G., Hamill, J., Kamen, G., Whittlesey, S. Research methods in Biomechanics. Human Kinetics. 2004. Page 116.
[21] Winter, D. A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Canada, Alberta: John Wiley & Sons. 2009. Page 151.
[22] Winter, D. A. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Canada, Alberta: John Wiley & Sons. 2009. Page 92-93.