

## مدل‌سازی بیومکانیکی منتخبی از روش‌های حمل بار، با هدف افزایش توان رزمی نیروهای نظامی

### چکیده

مصطفی حاج لطفعلیان<sup>۱\*</sup>،

علیرضا ردایی<sup>۲</sup>، حیدر صادقی<sup>۱</sup>

۱. گروه بیومکانیک ورزشی، دانشکده تربیت‌بدنی و علوم ورزشی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.  
۲. گروه شیمی و پلیمر، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

دریافت: ۱۳۹۴/۱۰/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۵/۸/۲۲

**هدف:** هدف این مطالعه، مدل‌سازی منتخبی از روش‌های حمل بار در دو حرکت پایه‌ای نشستن و برخاستن، به‌منظور معرفی مناسب‌ترین روش جهت کاهش توان مصرفی و گشتاور مفاصل در بین نظامیان بود.

**روش‌ها:** در این مطالعه ده آزمودنی جهت تعیین قیدهای آناتومیکی، ثبت کینماتیک حرکات نشستن و برخاستن و استخراج برخی از متغیرهای لازم جهت مدل‌سازی شرکت داشتند. در ادامه، موقعیت مرکز جرم چهار وسیله حمل بار شامل کوله‌پشتی، کوله دوگانه، جلیقه و کیف دوگانه تعیین و با اعمال باری به جرم ۴۰ کیلوگرم به آن، چهار مدل دویعدی و چهار سگمتی، از بدن و بار اعمال‌شده به آن، بر اساس معادلات دینامیک معکوس ساخته شد. پس از اعمال قیدها و تعریف توابع هزینه، از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی و محاسبه گشتاور مفصل ران و توان مصرفی کل استفاده شد.

**یافته‌ها:** براساس نتایج پژوهش از بین روش‌های بررسی‌شده، روش کوله‌پشتی، کمترین توان را صرف و روش کیف دوگانه نیز کمترین گشتاور را به مفصل ران اعمال کرد.

**نتیجه‌گیری:** برای افزایش توان سرباز حین حمل بار در حرکات تکراری و طولانی، لازم است جرم بار در نزدیک‌ترین فاصله نسبت به مرکز جرم بدن و با ارتفاع کمتری به بالاتنه وارد شود تا توان مصرفی و گشتاور حرکت کاهش یابد. نهایتاً می‌توان گفت از بین روش‌های بررسی‌شده، حمل بار با کوله‌پشتی با توجه به قابلیت‌هایی که دارد می‌تواند مناسب‌ترین انتخاب جهت حمل وسایل سنگین و حجیم باشد.

**کلید واژگان:** گشتاور، توان مصرفی، مدل‌سازی دینامیکی، حمل تجهیزات

\* نویسنده مسئول: تهران، مجموعه ورزشی شهید کشوری، دانشگاه خوارزمی، دانشکده تربیت‌بدنی.  
تلفن: ۰۹۱۳۲۵۶۱۳۸۳

Email:

Mostafa.H.Lotfalian@gmail.com

### مقدمه

است جرم وسایل شخصی، سلاح، غذا، مهمات و تکنولوژی‌های جدیدی که امروزه در اختیار نیروهای نظامی قرار می‌گیرد، از ۵۰ کیلوگرم تجاوز کند (۱). از آنجایی که لازم است در برخی از شرایط این بار توسط خود فرد جابجا شود، باید به شکلی حمل گردد که اتلاف انرژی و بروز خستگی به حداقل برسد. تاریخ نشان می‌دهد که در بسیاری از نبردها، سنگینی وسایل سرباز، منجر به کاهش عملکرد وی، بروز تلفات غیرضروری و در نهایت شکست در جنگ

پیشرفت‌های اخیر در زمینه ساخت تجهیزات نظامی، نقش فیزیکی انسان را در جنگ‌های نوین کمرنگ‌تر کرده است؛ باین وجود حضور نیروهای انسانی متخصص در منطقه، قابل انکار نیست و می‌تواند یکی از مهم‌ترین عوامل موفقیت کشورها در جنگ باشد. با توجه به لزوم حضور طولانی مدت نیروها در برخی از جنگ‌ها، ممکن

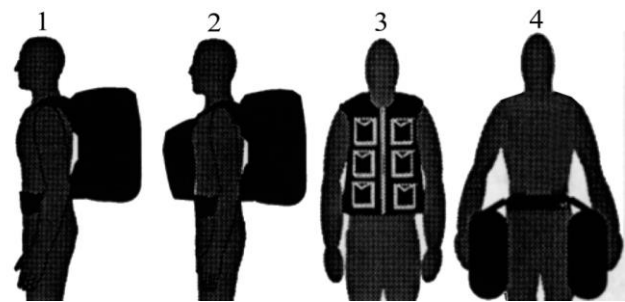
می‌تواند با ویژگی‌هایی مانند امکان تغییر و ثابت نگه‌داری متغیرها و اجرای مدل برای دفعات نامحدود، ما را در رسیدن به این هدف یاری کند. با توجه به مطالعات گسترده‌ای که در زمینه تأثیر روش‌های مختلف حمل بار حین پیاده‌روی، عبور از موانع، بالا رفتن از نردبان و دو سرعت، بر توان رزمی نیروهای نظامی صورت گرفته (۸، ۱۴)، لازم به نظر می‌رسد که تأثیر حرکات تکراری دیگری مثل نشستن و برخاستن نیز مورد بررسی قرار گیرد؛ بنابراین در این مطالعه سعی شد به‌منظور کاهش احتمال آسیب و افزایش توان رزمی نیروهای نظامی، به کمک مدل‌سازی دینامیکی، منتخبی از روش‌های حمل بار (شکل ۱) حین نشستن (انتقال از حالت ایستادن کامل تا حالت اسکات) و برخاستن (انتقال از حالت اسکات تا ایستادن کامل) بهینه‌سازی شود و مناسب‌ترین روشی که حداقل گشتاور را به مفصل ران وارد و توان مصرفی کمتری را نیز صرف نماید، انتخاب و گزارش گردد. رویکرد اصلی این مطالعه، بهینه‌یابی گشتاور و توان مصرفی، حین حمل بار توسط نیروهای نظامی می‌باشد.

### روش شناسی

در این مطالعه نیمه تجربی از تعداد ۱۰ نفر آزمودنی با مشخصات جسمانی و فردی (سن:  $20/16 \pm 2/4$  سال، جرم:  $73/8 \pm 5/6$  کیلوگرم و قد:  $176 \pm 7/5$  سانتی‌متر)، به‌صورت نمونه در دسترس، به منظور استخراج کینماتیک حرکت و ساخت مدل دینامیکی استفاده شد. بدین ترتیب، تعداد پنج نشانگر روی برجستگی بزرگ بازوی راست، برجستگی بزرگ ران، اپی‌کندیل خارجی زانو، قوزک خارجی و انگشت کوچک پای راست چسبانده و کاملاً ثابت شد و از حرکت نشستن و برخاستن آزمودنی‌ها، به‌وسیله دوربینی با سرعت تصویربرداری ۶۰ فریم بر ثانیه، به‌صورت دوبعدی و از نمای ساجیتال فیلم گرفته شد. سپس موقعیت مکانی نشانگرها در کلیه فریم‌ها، به کمک فرایند پردازش تصویر در نرم‌افزار متلب محاسبه شد و زاویه بین اندام‌ها در هریک از فریم‌ها، به کمک یک‌سری روابط هندسی به دست آمد. در ادامه و به‌منظور هموار کردن و کاهش نویز و خطای داده‌های مکانی، از فیلتر Moving Average استفاده شد.

سادگی و درعین حال نزدیکی به واقعیت، از ضروریات مدل‌سازی است؛ بنابراین با توجه به پیچیدگی معادلات، مدلی دوبعدی در نرم‌افزار متلب تعریف شد. این مدل ریاضیاتی، از چهار سگمنت

شده است (۲، ۳). امروزه برای حل این مشکل سیستم‌هایی به شکل اسکلت خارجی طراحی شده که می‌تواند برای حمل وسایل سنگین در مسیرهای طولانی به سرباز کمک کند (۴، ۵). معروف‌ترین این سیستم‌ها، Berkeley Lower Extremity Exoskeleton است که در سال ۲۰۰۵ در دانشگاه برکلی آمریکا ساخته شد (۶). قابل ذکر است که این سیستم‌ها هنوز در مرحله آزمایش قرار دارند و برای رسیدن به تولید انبوه، نیازمند بررسی‌های بیشتری هستند. علاوه بر جرم وسایل که می‌تواند بازدهی سرباز را تحت تأثیر قرار دهد (۷، ۸)، حجم و نحوه توزیع بار بر روی بدن وی نیز حائز اهمیت است (۷). روش‌های مختلفی برای حمل بار وجود دارد که تعدادی از این روش‌ها، در شکل یک قابل مشاهده است.



شکل ۱. چهار روش حمل بار در نیروهای نظامی شامل الف) کوله‌پشتی ب) کوله دوگانه (۶۲/۵ درصد وزن در عقب و ۳۷/۵ درصد در جلو)، ج) جلیقه د) کیف دوگانه (۹-۱۱)

به اثر چرخشی نیرو گشتاور گفته می‌شود که مانند توان مصرفی، به موقعیت و حرکت مرکز جرم بدن بستگی دارد. گشتاور و توان مصرفی دو عامل مهم برای تحلیل و مقایسه بیومکانیکی حرکات مختلف می‌باشند. نشستن و برخاستن، حرکاتی پرتکرار هستند که حین انجام آنها اگر علاوه بر وزن فرد، بار دیگری نیز به بدن وارد شود، می‌تواند به علت اعمال گشتاورهای نامتعارف و ناگهانی، آسیب‌زا باشد. حمل بارهای سنگین و بدشکل، علاوه بر تأثیری که در افزایش هزینه انرژی و خستگی دارند، می‌تواند باعث بروز آسیب‌هایی مثل کمردرد شوند که یکی از شایع‌ترین آسیب‌های ناشی از حمل بار در بین نیروهای نظامی است و بروز آن حین پیاده‌روی طولانی مدت به‌وفور گزارش شده است (۱۲، ۱۳). انتخاب روشی مناسب برای حمل بار که در آن حداقل انرژی صرف و ریسک آسیب نیز کاهش یابد، بسیار مفید است و مدل‌سازی به عنوان روشی کاربردی برای تبیین واقعیت‌های پیچیده به شکلی ساده و قابل فهم،

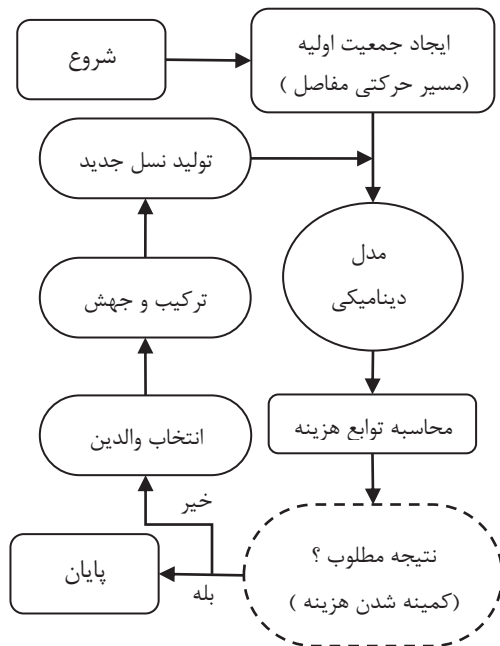
(رابطه ۲)، به‌عنوان توابع هزینه مسئله انتخاب شدند تا در جریان بهینه‌سازی به حداقل برسند.

$$C_1 = \int_{t_i}^{t_f} \sum_j |\tau_j \cdot \dot{q}_j| dt \quad \text{رابطه ۱}$$

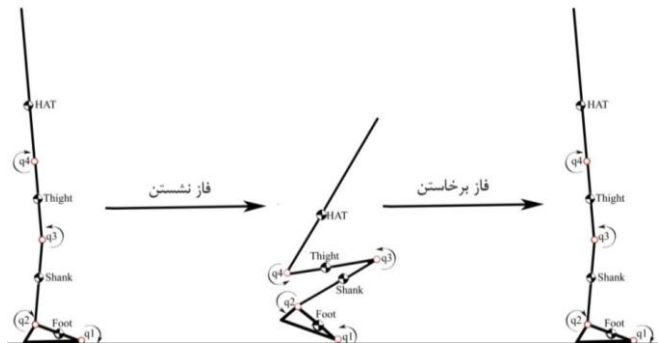
$$C_2 = \text{Max} \{|\tau_{knee}|\} \quad \text{رابطه ۲}$$

در روابط فوق،  $\tau$  بردار گشتاور مفاصل می‌باشد و  $q$  نیز سرعت زاویه را در هریک از مفاصل ( $j$ ) نشان می‌دهد. برای کاهش تعداد اجرای مسئله تا رسیدن به الگوی بهینه، از قیدهای مکانیکی استفاده می‌شود. چهار شرط معلوم بودن زوایای مفاصل در آغاز و پایان حرکت که مقدار آن با مقدار این زوایا در الگوی اجرا شده توسط آزمودنی تنظیم می‌شود، صفر بودن سرعت و شتاب زوایای مفاصل در لحظات ابتدایی و انتهایی حرکات نشست و برخاستن، انجام حرکت در زوایای مفصلی که منجر به برهم خوردن تعادل نشود و یکنواخت و هموار بودن حرکت، برای ایجاد یک حرکت صحیح در نظر گرفته شد. در ادامه از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مسئله استفاده شد (شکل ۳). در نهایت مقدار توان مصرفی کل و حداکثر گشتاور مفصل ران الگوی بهینه آزمودنی‌ها در چهار روش حمل بار، حین حرکات نشست و برخاستن استخراج شد و به‌عنوان عملکرد آزمودنی‌ها مورد مقایسه قرار گرفت. از آمار توصیفی برای محاسبه میانگین و انحراف استاندارد هریک از روش‌های حمل بار و مقایسه

پا، ساق، ران و بالاتنه با طول یکتا و چهار مفصل لگن، زانو، مچ و انگشت شست که مفاصلی لولایی با یک درجه آزادی و متحرک در صفحه ساجیتال بودند، تشکیل شد (شکل ۲). اطلاعات مربوط به خصوصیات آنترپومتریکی افراد شامل پارامترهای جرم، طول، ممان اینرسی و موقعیت مرکز جرم اندام نیز از معادلات رگرسیون خطی از قد و وزن آزمودنی‌ها تخمین زده شد و به مدل وارد گردید (۱۵). جرم بار اعمالی به مدل نیز ۴۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد که با توجه به نحوه توزیع و حجم بار (شکل ۱)، به مرکز ثقل بار وارد شد. توزیع بار در داخل کیسه‌های حمل بار یکسان در نظر گرفته شد و فاصله مرکز ثقل بار تا بدن، از روی جدیدترین مدل وسایلی که امروزه برای حمل بار توسط نظامیان وجود دارند، تخمین زده شد. در نهایت چهار مدل دینامیک معکوس از آزمودنی‌ها و بار اعمالی به آنها طراحی شد که تنها در محل اعمال بار بر روی بدن با یکدیگر تفاوت داشتند. در روش دینامیک معکوس به کمک داده‌های کینماتیکی، نیروها و گشتاورهای حرکت به دست می‌آید. بدین ترتیب جابجایی زاویه‌ای مفاصل آزمودنی‌ها به مدل دینامیکی وارد و گشتاور مفاصل به‌عنوان خروجی از مدل دریافت شد. در این مطالعه برای ساخت مدل دینامیکی بر اساس معادلات حرکت، از نرم‌افزار سیم‌مکانیک (Simmechanics) که یکی از ابزارهای نرم‌افزار متلب است، استفاده شد.



شکل ۳. فلوچارت الگوریتم ژنتیک



شکل ۲. مدل ساخت شده از آزمودنی در دو فاز نشست و برخاستن

هدف از این مطالعه، یافتن مناسب‌ترین روش حمل بار، از نظر توان مصرفی کل و گشتاور مفصل ران بود. با توجه به اینکه پس از اعمال بار خارجی به مدل‌ها، ممکن است روابط غیرخطی و کوپل‌های موجود بین مفاصل از بین برود، برای جلوگیری از این مسئله، می‌بایست حرکات برخاستن و نشست آزمودنی‌ها بهینه‌سازی شود. بدین ترتیب انتگرال توان مصرفی (رابطه ۱) و انتگرال گشتاور ران

از جدول یک، افراد با حمل بار به وسیله کوله‌پشتی، کمترین توان مصرفی را صرف جابجایی بار ۴۰ کیلوگرمی در نشست و برخاستن می‌کنند. قابل ذکر است که استفاده از جلیقه در نشست، ۱۷ درصد و کوله دوگانه در برخاستن، ۱۰ درصد توان مصرفی بیشتری را به نسبت روش حمل کوله‌پشتی به بدن اعمال می‌کند.

جدول ۲ مقدار  $p$  به دست آمده از مقایسه دو پارامتر حداکثر گشتاور ران و توان مصرفی حرکت را در دو فاز نشست و برخاستن در بین چهار روش منتخب حمل تجهیزات توسط نیروهای نظامی نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در پارامتر اول، حمل بار به وسیله کیف دوگانه با سایر روش‌ها به استثنای روش حمل با جلیقه در فاز برخاستن، تفاوت معنی‌داری دارد. از طرف دیگر در توان مصرفی، حمل بار با کوله‌پشتی دارای تفاوت معنی‌دار با اکثر روش‌های حمل تجهیزات است.

## بحث

هدف از این مطالعه، مدل سازی چهار روش مختلف حمل بار حین انجام حرکات تکراری نشست و برخاستن به منظور بهینه‌یابی گشتاور

آنها با یکدیگر استفاده شد. پس از بررسی وضعیت توزیع داده‌ها با استفاده از آزمون کلموگروف-اسمیرنوف، از آزمون  $t$  وابسته برای مقایسه آماری روش‌های حمل، به صورت دو به دو و در سطح معنی‌داری  $P \geq 0.05$  استفاده شد.

## نتایج

جدول ۱ گشتاور خالص ایجاد شده در مفصل ران را حین انجام دو حرکت نشست و برخاستن نشان می‌دهد. طبق نتایج حاصل از بهینه‌سازی، حمل بار با کیف دوگانه، گشتاور کمتری را به بدن فرد وارد می‌کند و پس از آن مقدار این پارامتر، در حمل با جلیقه، کوله‌پشتی و کوله دوگانه، به ترتیب ۱۶، ۲۷ و ۴۱ درصد حین حرکت نشست و ۲۵، ۳۱ و ۴۰ درصد حین حرکت برخاستن افزایش می‌یابد ( $p \leq 0.05$ ). همچنین قابل مشاهده است که میانگین حداکثر گشتاور ران حرکت برخاستن در هر چهار روش بررسی شده در این مطالعه بیشتر از حرکت نشست بود.

به هر مقدار که توان مصرفی حرکت کاهش یابد، می‌توان گفت توان فرد برای انجام آن حرکت افزایش یافته است؛ طبق یافته‌های حاصل

جدول ۱

حداکثر گشتاور ران و توان مصرفی کل ( $\bar{x} \pm SD$ ) در حرکات نشست و برخاستن

حرکت	پارامتر	کوله‌پشتی	کوله دوگانه	جلیقه	کیف دوگانه
نشستن	حداکثر گشتاور ران (N.M/Kg)	۲/۶۶±۰/۸	۳/۲۷±۰/۷	۲/۳۲±۰/۹	۱/۹۵±۰/۷
	توان مصرفی حرکت (Watt)	۴۹۹±۲۸	۵۳۴±۲۸	۶۰۰±۲۳	۶۵۴±۲۵
برخاستن	حداکثر گشتاور ران (N.M/Kg)	۲/۹±۰/۴۶	۳/۳۲±۰/۶	۲/۶۸±۰/۵۶	۲/۰۱±۰/۴
	توان مصرفی حرکت (Watt)	۶۹۸±۴۷	۷۷۵±۵۷	۷۷۶±۵۲	۷۲۶±۴۴

جدول ۲

مقایسه چهار روش منتخب حمل بار در آزمودنی‌ها

روش حمل ۱	Vs	حداکثر گشتاور ران		روش حمل ۲	Vs	توان مصرفی حرکت	
		نشستن	برخاستن			نشستن	برخاستن
کوله‌پشتی	Vs	۰/۴۱	۰/۱۸	کوله دوگانه	Vs	**۰/۰۰۹	*۰/۰۳
کوله‌پشتی	Vs	۰/۳۲	۰/۴۵	جلیقه	Vs	**۰/۰۰۰	*۰/۰۲۲
کوله‌پشتی	Vs	**۰/۰۰۵	**۰/۰۰۰	کیف دوگانه	Vs	**۰/۰۰۰	۰/۳۵
کوله دوگانه	Vs	*۰/۰۴	۰/۰۶۵	جلیقه	Vs	۰/۰۷۳	۰/۹۷
کوله دوگانه	Vs	**۰/۰۰۱	**۰/۰۰۰	کیف دوگانه	Vs	**۰/۰۰۰	۰/۱۵
جلیقه	Vs	۰/۲۴	*۰/۰۱۸	کیف دوگانه	Vs	۰/۰۹	۰/۱۲

\* اختلاف در سطح معناداری  $p \leq 0/05$ ، \*\* اختلاف در سطح معناداری  $p \leq 0/01$ .

مقداری است که به فرد آسیب بزند.

نکته دیگری که در انتخاب روش حمل بار می‌بایست مدنظر قرار بگیرد، حجم بار و سهولت در حمل آن است. به عبارتی اگر بار مورد نظر دارای حجم زیادی باشد، استفاده از جلیقه کاربردی نیست. همچنین با وجود مقدار کمتر گشتاور ران در روش کیف دوگانه، انتخاب این روش برای پیاده‌روی می‌تواند محدودیت زیادی برای حرکت پا در طول دامنه حرکتی ایجاد کند و منجر به خستگی فرد شود؛ البته این دو روش فشار را از روی مفصل شانه برمی‌دارند، استرس کمتری به عضلات پشت تنه مانند دوزنقه وارد می‌کند و به افزایش آزادی عمل دست‌ها و گردن کمک می‌کند (۲۱). استفاده از کوله دوگانه با توجه به محدودیت‌هایی که برای دید به وجود می‌آورد و فشار و استرسی که به ناحیه گردن وارد می‌کند (۲۲)، همچنین گشتاور و توان مصرفی زیادتری که این روش نسبت به سایر روش‌های حمل بار به بدن اعمال می‌کند، جز در برخی از موقعیت‌ها مثل حمل وسایل پزشکی که لازم است این تجهیزات در جلوی کاربر باشند، توصیه نمی‌شود. با توجه به نتایج مطالعات گذشته و مطالعه حاضر باید گفت که روش حمل بار با کوله‌پشتی، کمترین توان مصرفی را حین انجام حرکات نشستن و برخاستن تلف می‌کند و با وجود بیشتر بودن گشتاور مفصل ران در این روش نسبت به روش‌های جلیقه و کیف دوگانه، مقدار آن در محدوده ایمن قرار دارد و خطری فرد را حین حمل بار تهدید نمی‌کند؛ در ضمن حین استفاده از این روش، محدودیتی برای پیاده‌روی وجود ندارد و امکان حمل وسایل حجیم و بزرگ نیز میسر است.

### نتیجه‌گیری نهایی

برای افزایش توان سرباز حین حمل بار در حرکات تکراری و طولانی‌مدت، لازم است جرم بار در نزدیک‌ترین فاصله نسبت به مرکز ثقل بدن و با ارتفاع کمتری به بالاتنه وارد شود تا توان مصرفی و گشتاور حرکت کاهش یابد. با این اوصاف می‌توان گفت که از بین روش‌های بررسی شده در این مطالعه، روش حمل بار با کوله‌پشتی با توجه به قابلیت‌هایی که دارد، می‌تواند بهترین انتخاب جهت حمل وسایل سنگین و حجیم باشد.

و توان مصرفی بود تا با انتخاب ایمن‌ترین و کم‌هزینه‌ترین روش از نظر احتمال آسیب و مقدار انرژی مصرفی، توان نیروهای نظامی حین حمل تجهیزات افزایش یابد. دلیل اصلی استفاده از مدل در این مطالعه، امکان تغییر تک تک متغیرها و از آن مهم‌تر، اجرای مدل برای دفعات نامحدود بود، عاملی که اگر قرار بود توسط آزمودنی انجام شود با صرف وقت و هزینه بسیاری همراه می‌شد. حرکات نشستن و برخاستن بارها حین حمل طولانی‌مدت بار توسط سرباز انجام می‌شود و استفاده از الگوی حرکتی نادرست و یا اعمال باری بیش از توان فرد، می‌تواند باعث بروز آسیب شود. در این مطالعه عواملی مانند سادگی فرایند مدل‌سازی و عدم بررسی تأثیر روش حمل بار بر توان مصرفی در حرکات نشستن و برخاستن در مطالعات گذشته، باعث شد که این دو حرکت به‌عنوان حرکاتی که می‌توانند هدف مطالعه را به‌روشنی محقق کنند، انتخاب شوند.

محل اعمال بار بر روی بدن، تأثیر مستقیمی بر هزینه انرژی و مکانیک بدن دارد؛ در تعدادی از مطالعات اخیر، حمل بار با سر به‌عنوان کم‌هزینه‌ترین روش معرفی شد (۱۶) اما به علت کاربردی نبودن این روش در بین نظامیان و نیاز به انجام تمرینات خاص، این روش مورد بررسی قرار نگرفت. برخی پژوهشگران بیان کرده‌اند که هر قدر بار اعمالی به فاصله نزدیک‌تری به مرکز ثقل بدن وارد شود، حمل آن آسان‌تر خواهد بود و به تبع آن هزینه انرژی نیز کاهش خواهد یافت (۱۷). از بین روش‌های موجود، دو روش حمل بار با کوله‌پشتی و کوله دوگانه، کم‌هزینه‌ترین روش‌ها معرفی شدند (۱۱، ۱۸) که با نتایج مطالعه حاضر در مورد کوله‌پشتی مطابقت داشت؛ اما در مورد کوله دوگانه این شباهت وجود نداشت که دلیل آن را می‌توان به عدم تقسیم مساوی وزن بار بین دو کوله، در این مطالعه نسبت داد.

انتخاب روش حملی که گشتاور وارده بر مفصل ران و احتمال بروز آسیب را به‌ویژه در ناحیه نیم‌تنه کاهش دهد، دیگر اولویت این مطالعه بود؛ Galli و همکاران، در مطالعه‌ای برای اعمال قید گشتاور برای بهینه‌سازی، مقدار حداکثر گشتاور مفاصل ران، زانو و مچ را ۷ نیوتن متر بر کیلوگرم در نظر گرفتند (۱۹). قابل ذکر است که مقادیر اعلام شده توسط این محققان، برای یک انسان عادی قابل دستیابی و ایمن است (۲۰). همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقدار حداکثر گشتاور مفصل ران در هیچ‌کدام از چهار روش، از مقدار ایمن (۷ نیوتن متر بر کیلوگرم) تجاوز نکرد. به‌عبارت‌دیگر مقدار گشتاوری که حین حمل بار با روش‌های مختلف در ران تولید می‌شود، کمتر از

$$M_{21} = L_2 (m_4 \times L_3 + m_3 \times L_{c3}) \cos (\theta_1 - \theta_2)$$

$$M_{22} = I_3 + m_3 L_{c3}^2 + m_4 L_2^3$$

$$M_{23} = m_4 L_3 L_{c4} \cos (\theta_2 - \theta_3)$$

$$M_{31} = m_4 L_2 L_{c4} \cos (\theta_1 - \theta_3)$$

$$M_{32} = m_4 L_3 L_{c4} \cos (\theta_2 - \theta_3)$$

$$M_{33} = I_4 + m_4 L_{c4}^2$$

$$H_1 = m_4 L_2 L_3 \dot{\theta}_2^2 \sin (\theta_1 - \theta_2) + m_3 L_2 L_{c3} \dot{\theta}_2^2 \sin (\theta_1 - \theta_2) +$$

$$m_4 L_2 L_{c4} \dot{\theta}_3^2 \sin (\theta_1 - \theta_2)$$

$$H_2 = -m_4 L_2 L_3 \dot{\theta}_1^2 \sin (\theta_1 - \theta_2) - m_3 L_2 L_{c3} \dot{\theta}_1^2 \sin (\theta_1 - \theta_2) +$$

$$m_4 L_3 L_{c4} \dot{\theta}_2^2 \sin (\theta_2 - \theta_3)$$

$$H_3 = -m_4 L_2 L_{c4} \dot{\theta}_1^2 \sin (\theta_1 - \theta_3) - m_4 L_3 L_{c4} \dot{\theta}_2^2 \sin (\theta_2 - \theta_3)$$

$$G_1 = g (m_2 L_{c2} + L_2 m_3 + L_2 m_4) \cos (\theta_1)$$

$$G_2 = g (m_4 L_3 + m_3 L_{c3}) \cos (\theta_2)$$

$$G_3 = g m_4 L_{c4} \cos (\theta_3)$$

## پیوست

صورت کلی معادله حرکت مدل دینامیکی جهت محاسبه گشتاور به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$T = M(\theta) \ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$$

در این رابطه،  $T$  بردار گشتاورهای مفاصل،  $M$  ماتریس اینرسی،  $H$  بیانگر بردارهای مرکزگرا و کوریولیس و  $G$  نیز بردار گرانش است که در زیر بسط داده شدند.

$$M_{11} = I_2 + m_3 L_2^2 + m_4 L_2^2 + m_2 L_{c2}^2$$

$$M_{12} = L_2 (m_4 L_3 + m_3 L_{c3}) \cos (\theta_1 - \theta_2)$$

$$M_{13} = m_4 L_2 L_{c4} \cos (\theta_1 - \theta_3)$$

## References

- Obusek JP, Harman EA, Frykman PN, Palmer CJ, Bills RK. The Relationship of Backpack Center of Mass Location to the Metabolic Cost of Load Carriage 1170. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1997; 29(5):205-10.
- Dubik JM, Fullerton TD. Soldier overloading in Grenada. *Military Review*. 1987; 67:38-47.
- Marsh AR. A short but distance war - the Falklands Campaign. *Journal of the Royal Society of Medicine*. 1983; 76:972-82.
- Knapik J. Physiological, biomechanical and medical aspects of soldier load carriage. *NATO Research and Technology Organization*. 2000; 2201-05.
- Walsh CJ, Paluska D, Pasch K, Grand W, Valiente A, Herr H. Development of a lightweight, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation. *International Conference Robotics Automation*. 2006; 3023-29.
- Chu A, Kazerooni H, Zoss A. On the biomimetic design of the berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX). *International Conference Robotics Automation*. 2005; 4345-52.
- Holewun M, Lotens, WA. The influence of backpack design on physical performance. *Ergonomics*. 1992; 35(2):149-57.
- Harman EA, Frykman PN, Pandorf CE, Obusek JP, Smith TJ. A comparison of male and female soldier performance of physically demanding simulated combat tasks. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 1999; 31(5):S394.
- Balogun JA. Ergonomic comparison of three modes of load carriage. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 1986; 58(1):35-46.
- Bloswick DS, Gerber A, Sebesta D, Johnson S, Mecham W. Effect of mailbag design on musculoskeletal fatigue and metabolic load. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*. 1994; 36(2):210-18.
- Datta SR, Ramanathan NL. Ergonomic comparison of seven modes of carrying loads on the horizontal plane. *Ergonomics*. 1971; 14(2):269-78.
- Knapik J, Reynolds K, Staab J, Vogel JA, Jones B. Injuries associated with strenuous road marching. *Military Medicine*. 1992; 157(2):64-67.
- Reynolds KL, White JS, Knapik JJ, Witt CE, Amoroso PJ. Injuries and risk factors in a 100-mile (161-km) infantry road march. *Journal of Preventive Medicine & Public Health*. 1999; 28(2):167-73.
- Martin PE, Nelson RC. The effect of carried loads on the combative movement performance of men and women. *Military Medicine*. 1985; 150(7):357-62.
- Winter DA. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*: John Wiley & Sons Inc. 2009; 82-107.
- Heglund NC, Willems PA, Penta M, Cavagna GA. Energy-saving gait mechanics with head-supported loads. *Nature*. 1995; 52-54.
- Winsmann FR., Goldman RF. *Methods for evaluation of load-carriage systems*. *Perceptual and Motor Skills*. 1976; 43(3f):1211-18.
- Das SK, Saha H. Climbing efficiency with different modes of load carriage. *The Indian Journal of Medical Research*. 1966; 54(9):866-71.
- Galli M, Crivellini M, Sibella F, Montesano A, Bertocco P,

- Parisio C. Sit-to-stand movement analysis in obese subjects. *International Journal of Obesity and Related Metabolic Disorders*. 2000; 24:1488-92.
20. Yeadon MR, King MA, Wilson C. Modeling the maximum voluntary joint torque/angular velocity relationship in human movement. *Journal of Biomechanics*. 2006; 39. 476–482.
21. Holewijn M. Physiological strain due to load carrying. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 1990; 61(3-4):237-245.
22. Legg SJ, Mahanty A. Energy cost of backpacking in heavy boots. *Ergonomics*. 1986; 29(3):433-438.

## Biomechanical Modeling of Selected Methods of Load Carriage to Improve Military Capabilities of Troops

Mostafa Haj Lotfalian<sup>1\*</sup>,  
Alireza Redaei<sup>2</sup>,  
Heydar Sadeghi<sup>1</sup>

1. Department of Sport Biomechanics, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, University of Kharazmi, Tehran, Iran.

2. Department of Chemical and Polymer Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

### Abstract

Received: Jan. 05, 2016 Accepted: Nov. 12, 2016

**Objective:** The purpose of this study was to develop a model to compare some selected methods of load carriage during sitting and rising, and to introduce the best method of reducing power consumption and the risk of injury among military men.

**Methods:** Ten subjects were selected to perform the required task to determine anatomical constraints, kinematic data and to extract some parameters for modeling. Subsequently, the center of mass position of four equipment for load carriage, including, Backpack, Double pack, Trunk vest and Double satchel, were determined and four different two-dimensional models of body with four segments were developed based on inverse dynamics equations. After applying constraints and cost functions, genetic algorithm was used to find the optimal model.

**Results:** Based on the results, power consumption in Backpack method was the lowest and double satchel method inserted the least momentum on hip torque.

**Conclusion:** A more practical choice for military operations is to carry a load as close as possible to the center of mass of the body in a nutshell, between all methods, carrying load through the Backpack method, according to its capabilities, is the best choice for carrying heavy and bulky equipment.

**Keywords:** Torque, power consumption, Dynamic modeling, Transport Equipment

\* Corresponding author:  
Department of Sport Biomechanics, Faculty of Physical Education and Sport Sciences, University of Kharazmi, Tehran, Iran.  
Tel: 09132561383  
Email: Mostafa.H.Lotfalian@gmail.com



آقای دکتر حیدر صادقی فارغ‌التحصیل پسا (فوق) دکتری توانبخشی (گرایش بیومکانیک و توانبخشی) در سال ۱۳۸۰ از دانشکده پزشکی دانشگاه مونترال کانادا و استاد تمام دانشکده تربیت‌بدنی و علوم ورزشی دانشگاه خوارزمی می‌باشد. انتشار ۷۰ مقاله در مجلات معتبر خارجی، انتشار ۱۱۰ مقاله در مجلات معتبر داخلی، تألیف یا تصنیف ۹ کتاب، ترجمه ۱۶ کتاب تخصصی، ۲۰ طرح پژوهشی کاربردی، استاد راهنمای دکتری (اتمام یافته) (۹ راهنمایی، ۳ مشاوره) تجدید چاپ همراه با تجدیدنظر اساسی ۲ کتاب، بررسی و نقد و یا تصحیح ۴ کتاب، ۷ نوآوری علمی معتبر، ارائه ۲۴۴ مقاله در مجامع علمی ملی و بین‌المللی، استاد راهنمای کارشناسی ارشد (اتمام یافته) (۶۰ راهنمایی، ۱۱ مشاوره) از جمله فعالیت‌های آموزشی ایشان می‌باشد.



آقای مصطفی حاج لطفعلیان، در سال ۱۳۹۲ تحصیل در مقطع دکتری بیومکانیک ورزش را آغاز نمود و هم‌اکنون در حال گذراندن رساله دکتری خود می‌باشد. مدلسازی و بهینه‌سازی حرکات ورزشی، از جمله زمینه‌های تحقیقاتی موردعلاقه وی است. همچنین ایشان دارای ۷ مقاله علمی پژوهشی و ۲ مقاله ارائه‌شده در همایش‌های بین‌المللی خارج از کشور می‌باشد.



آقای دکتر علیرضا ردایی، مدرک دکتری مهندسی شیمی خود را در سال ۱۳۸۲ از دانشگاه علم و صنعت ایران دریافت و هم‌اکنون استادیار گروه شیمی و پلیمر دانشگاه یزد می‌باشد. مطالعات مربوط به علوم نظامی، مهندسی پلیمر و الکتروشیمی از جمله زمینه‌های تحقیقاتی موردعلاقه وی می‌باشد. راهنمایی و مشاوره چندین پایان‌نامه و ارائه چندین مقاله علمی در زمینه‌های فوق‌الذکر، از جمله فعالیت‌های آموزشی و پژوهشی ایشان می‌باشد.

