مکانیک / سال ۱۴۰۱ /دوره پاییز و زمستان /شماره ۱ /صفحه ۱۳۸-۱۴۴

نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

DOI: 10.22034/STME.2023.168733

بررسی تجربی تأثیر یک ربات پوشیدنی در تعادل انسان به هنگام ایستادن و راه‌رفتن

سید امیر حسینی سبزواری[1*] ، مریم زارع[2]

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

۲- دانش آموخته مقطع کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران

چکیده

در دهه‌ی اخیر، با توجه به افزایش چشمگیر طبقه‌ی سالمندان در هرم سنی بیشتر کشورهای جهان، ارتزهای پوشیدنی با اهداف توان‌بخشی مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. افتادن‌های ناگهانی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل منجر به فوت در سالمندان شناخته می‌شود. در این مقاله، تأثیر یک ارتز پوشیدنی بر تعادل انسان به هنگام ایستادن و راه‌رفتن مورد بررسی قرار گرفته است. تأثیر این ارتز ساده در کاهش متابولیسم بدن هنگام راه‌رفتن پیش‌تر مورد بررسی محققان قرار گرفته است. در این مقاله، به بررسی تجربی اثر این ارتز بر روی تعادل افراد پرداخته شده است. برای این منظور، ارتز مورد نظر طراحی و ساخته شد. سپس یک بانک داده به‌وسیله‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده ایجاد گردید. جهت گردآوری این بانک داده، نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده به وسیله‌ی ۱۰ دانشجوی داوطلب مورد استفاده قرار گرفت. در این آزمایش‌ها، تأثیر پارامترهای مایع گوش و بینایی بر روی تعادل افراد هنگام استفاده از این ارتز بررسی و آنالیز شد. یافته‌های حاصل‌شده از تأثیر پارامترهای مورد بررسی بر تعادل افراد حکایت می‌کند. مطابق نتایج آزمایش‌های صورت‌گرفته، استفاده از ارتز فوق موجب بهبود عملکرد افراد در تعادل دینامیکی می‌شود، درصورتی‌که نتایج این تحقیق در تعادل استاتیکی تأثیر مشخصی را نشان نمی‌دهد.

کلمات کلیدی

ارتز پوشیدنی، تعادل، راه‌رفتن، ایستادن، افتادن ناگهانی.

Experimental Analysis of an Orthosis Effect on Human Balance during standing and walking

seyed amir hoseini sabzevari[11] , maryam zare[2]

1-Assistant Professor, Faculty of Engineering & Technology, University of Gonabad, Gonabad, Iran

2- Bachelor’s degree in mechanical engineering, Faculty of Engineering & Technology, University of Gonabad, Gonabad, Iran

Abstract

In recent decades, due to the significant increase in the elderly in the age pyramid of most of the country, wearable orthoses have received more attention with regard to rehabilitation. Sudden falls are one of the most important factors leading to death in the elderly. In this article, the impact of an orthosis on human balance while standing and walking has been investigated. The effect of this simple orthosis in reducing body metabolism while walking has been studied. In this article, the experimental effect of this orthosis on people’s balance has been investigated. For this purpose, the desired orthosis was designed and manufactured. Then a data bank was created by the results of the experiments. To compile this data, the results of the experiments conducted by 10 volunteer students were used. In these tests, ear fluid and vision indicators were analyzed on the performance of people when using this orthosis. The findings of the studies are related to the study between people. According to the results of the tests, the use of the above orthosis improves the performance of people in the dynamic body, while the results of this research on static performance do not show any effect.

Keywords

Wearable orthoses, balance, walking, standing, sudden falls

* سیدامیر حسینی سبزواری، hoseini.sabzevari@gonabad.ac.ir

۱-مقدمه

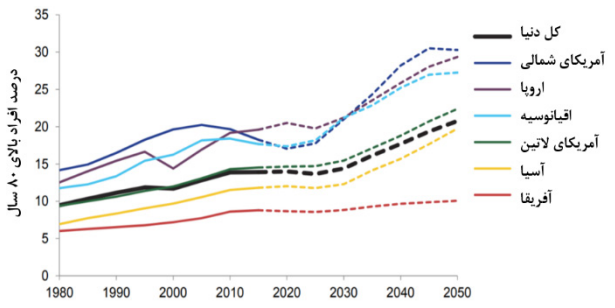
با توجه به بهبود وضعیت بهداشتی و پیشرفت‌های پزشکی در دهه‌های اخیر، طبقه‌ی سالمندان در هرم سنی بیشتر کشورهای جهان رو به افزایش می‌باشد. مطابق گزارش اتحادیه‌ی اروپا ۱۷/۵٪ جمعیت این اتحادیه در سال ۲۰۱۱ مربوط به افراد بالای ۶۵ سال بوده است و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۶۰ این نسبت‌به عدد ۲۹/۵٪ برسد [۱]. ۱۳/۳٪ از جمعیت کشور ایالات متحده‌ی آمریکا در سال ۲۰۱۱ را افراد بالای ۶۵ سال تشکیل داده بودند و مطابق پیش‌بینی‌ها این نسبت در سال ۲۰۴۰ به ۲۱٪ خواهد رسید [۲].

شکل ۱، نسبت افراد بالای ۸۰ سال به جمعیت کل جهان در مناطق جهان را نشان می‌دهد [۳]. پیش‌بینی سازمان بهداشت جهانی نشان می‌دهد که در سال ۲۰۵۰ حدود یکپنجم جمعیت جهان را افراد مسن بالای ۸۰ سال تشکیل خواهند داد. در سنین بالا، یکی از مهم‌ترین عوامل اصلی منجر به فوت در طبقه‌بندی جراحات غیرعمدی افتادن-های ناگهانی می‌باشد [۴].

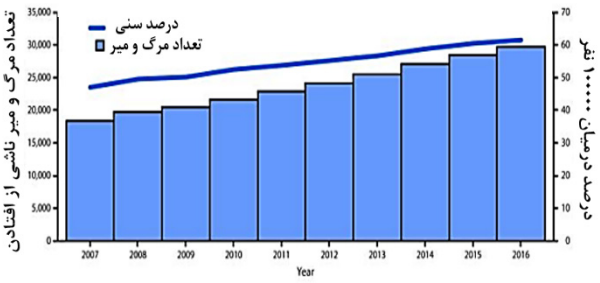
از رایج‌ترین عوامل افتادن‌های ناگهانی می‌توان به حوادث طبیعی، سرگیجه‌های ناگهانی، افت فشارخون، عوامل عصبی، عدم حفظ تعادل استاتیکی و دینامیکی، حملات صرع و آرتروز اشاره نمود[۵]. شکل ۲، میزان افتادن‌های منجر به فوت را در کشور ایالات متحده‌ی آمریکا نشان می‌دهد. مطابق این داده‌ها نرخ مرگ‌ومیر ناشی از افتادن‌های ناگهانی افراد مسن در طی سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۶ در حدود ۳۱٪ رشد داشته است.

در دهه‌های اخیر، توجه به ارتزهای توان‌بخشی جهت کمک به حفظ تعادل به‌ویژه سالمندان (عصبی و ارتوپدی) مورد توجه محققان قرار گرفته است. ارتزها و اگزواسکلتون‌ها به‌عنوان رایج‌ترین دسته از ارتزهای پوشیدنی توجهات بسیاری را به خود جلب کرده است [۷].

سوردیولیک و همکاران [۸] به طراحی یک ربات توان‌بخشی با هدف کمک به حفظ تعادل پرداختند. در پژوهش آن‌ها، یک ربات موازی با سیستم انتقال نیروی کابلی توسعه یافت. فتحی و نجفی [۹] اثر مدل‌سازی دینامیکی حرکت پا بر شناسایی پارامترهای مؤثر در توان‌بخشی آن را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها یک مدل ۳ درجه‌ی آزادی غیرخطی با درنظرگرفتن سفتی‌ها و میرایی‌های زاویه‌ای در مفاصل مختلف پا معرفی کردند و در [۱۰] به تحلیل پایداری و کنترل نمونه‌ی آزمایشگاهی آن پرداختند. میری‌پور و پادرگانی [۱۱] در پژوهش خود مدل ریاضی یک سیستم رباتیکی کابلی را ارائه و شبیه‌سازی کردند. مدل پیشنهادی آن‌ها با هدف توان‌بخشی بیماران دارای ناتوانی در راه‌رفتن توسعه یافته بود. داش خانه و همکاران [۱۲] به کنترل ربات‌های توان‌بخشی پا با هدف اصلاح الگوی راه‌رفتن بیماران پرداختند. آن‌ها توانستند موجب تأثیر و اصلاح مسیر حرکت و دوره‌ی زمانی راه‌رفتن بیماران شوند.



شکل ۱: درصد افراد با سن بالاتر از ۸۰ سال در نقاط مختلف جهان[۳].



شکل ۲: افتادن‌های منجر به فوت افراد مسن‌تر از ۶۵ سال در کشور ایالات متحده‌ی آمریکا[۶].

کالینز و همکاران [۱۳] در پژوهشی منحصربه‌فرد به بررسی اثر یک ربات ارتز ساده هنگام راه‌رفتن پرداختند. آن‌ها ثابت کردند این ارتز بدون استفاده از انرژی بیرونی باعث کاهش انرژی مصرف‌شده هنگام راهرفتن می‌شود. از دید مکانیکی، راهرفتن یک فرآیند تکراری پیچیده می‌باشد. این فرآیند شامل یک سیکل تکرارشونده بوده که با قراردادن پاشنه‌ی پای تکیه‌گاه روی زمین آغاز و با دومین برخورد همان پاشنه با زمین خاتمه می‌یابد. حسینی و امیری [۴] در یک تحقیق تجربی به بررسی اثر پارامترهای مؤثر در تعادل انسان به هنگام ایستادن و راهرفتن پرداختند.

در این پژوهش، با انجام آزمایش‌های متعدد، تأثیر یک ارتز پوشیدنی بر تعادل استاتیکی و دینامیکی انسان مورد بررسی قرار گرفته است. در قدم ابتدایی، ارتز مناسب طراحی و ساخته شد. در ادامه به نحوه‌ی اثرگذاری این ارتز بر تعادل افرادی که از آن استفاده می‌کنند مورد آزمایش قرارگرفته و نتایج آن گزارش شده است.

۲-مواد و روش‌ها

در ارتز پیشنهادی کالینز و همکاران [۱۳] یک فنر به‌صورت موازی با عضله‌ی دوقلوی پشت ساق پا استفاده شده است. سیستم مکانیکی استفاده‌شده در این ارتز این امکان را فنر می‌دهد تا با حرکت مفصل مچ پا هنگام راه‌رفتن، کشیده و آزاد گردد. این تغییرات در نیروی فنر به عملکرد عضله‌ی دوقلوی ساق پا و تاندون آشیل کمک می‌نماید. مطابق یافته-های گزارش‌شده در این پژوهش، استفاده از ارتز پیشنهادی باعث کاهش ۴/۶ تا ۹/۸ درصدی در متابولیک مصرفی هنگام راهرفتن در افراد سالم در شرایط نرمال می‌شود. این کاهش مصرف متابولیک به‌طور متوسط معادل کاهش جرم چهار کیلوگرم از وزن بالاتنه‌ی هر فرد هنگام راه‌رفتن می‌باشد [۱۳]. از آنجایی که کالینز و همکاران تنها به بررسی کاهش متابولیک مصرفی پرداخته‌اند، در این مقاله به بررسی تأثیر استفاده از این ارتز در تعادل انسان به هنگام راه‌رفتن می‌پردازیم. جهت این بررسی از پروتکل استفاده‌شده در مقاله‌ی پیشین نویسندگان [۴] استفاده شده است.

در قدم ابتدایی، یک ارتز مشابه معرفی شده در [۱۳] طراحی و ساخته شد. شکل ۳ ارتز ساخته‌شده را نشان می-دهد. ارتز ساخته‌شده دارای تنظیم اولیه بوده، با کمک سیستم کلاچ خود، کشش اولیه‌ی فنر را متناسب با هر فرد تغییر می‌دهد. جهت تنظیم کشش، از افراد خواسته شد به‌صورت نرمال بایستند، به نحوی که دو پا در کنار یکدیگر قرار بگیرد. سپس با استفاده از سیستم کلاچ، فنر در مرز شروع کشیدگی قرار می‌گیرد.

نحوه‌ی تأثیر این ارتز بر تعادل استاتیکی (سکون) و دینامیکی (راه‌رفتن) در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است ارتز پیشنهادی تنها بر روی یک پا نصب شده است، درصورتیکه ارتز استفادهشده در مقاله‌ی [۱۳] بر روی دو پا نصب شده است. پارامترهای مؤثر بر حفظ تعادل دینامیکی عبارت‌اند از: الف)بینایی، ب) مایع گوش و ج) عضلات[۴]. جهت انجام این پژوهش،

۱۰ دانشجوی آقای مجتمع آموزش عالی گناباد انتخاب شدند. افراد داوطلب سالم و بدون سابقه‌ی بیماری خاص یا معلولیت و با میانگین سنی ۲±۲۰ بودند. مطابق یافته‌های گزارش‌شده در [۴]، با توجه به وضعیت جسمانی آزمودنی‌ها، خستگی عضلات پا تأثیر مشخصی بر تغییر تعادل دینامیکی و استاتیکی افراد جوان ندارد؛ لذا در ادامه تنها به بررسی دو پارامتر بینایی و مایع گوش پرداخته شده است.

(ب) (الف)

شکل ۳: ارتز استفاده‌شده الف) در مقاله [۱۳] ، ب) ارتز استفاده‌شده در این پژوهش.

دانشجویان داوطلب پس از اطلاع از شرایط تحقیق و امضای فرم رضایت‌نامه با مراحل انجام آزمایش‌ها آشنا شدند و توضیحات مختصری در مورد ماهیت و چرایی آزمایش‌ها به آنان ارائه شد. شرایط دانشجویان داوطلب جهت مشارکت در این مطالعه شامل موارد زیر بود: عدم ابتلا به بیماری‌های عصبی-عضلانی، عدم ابتلا به اختلالات بینایی شدید اصلاح‌نشده، عدم سابقه‌ی آسیب در اندام تحتانی در سه ماه گذشته و عدم عضویت در تیم‌های ورزشی دانشگاه. همچنین شرایط رعایت‌شده توسط داوطلبین قبل از انجام آزمایش‌ها شامل موارد زیر بوده است: عدم انجام فعالیت ورزشی حداقل در ۲۴ ساعت گذشته، عدم مصرف هرگونه دارو و مکمل‌های غذایی حداقل در یک هفته‌ی گذشته و دارابودن شرایط روحی مساعد. قد و وزن داوطلبین در جدول ۱ گزارش شده است.

در ادامه به تشریح آزمایش‌های صورت‌گرفته می‌پردازیم.

۲-۱- آزمایش استاتیکی-بینایی

از داوطلبین خواسته شد تعادل خود را با چشمان بسته بر روی یک پا حفظ نمایند. عدم تعادل در این آزمایش، استفاده از پای دوم جهت حفظ تعادل و یا حرکت خارج از محدوده جهت حفظ تعادل تعیین شده است.

۲-۲- آزمایش دینامیکی-بینایی

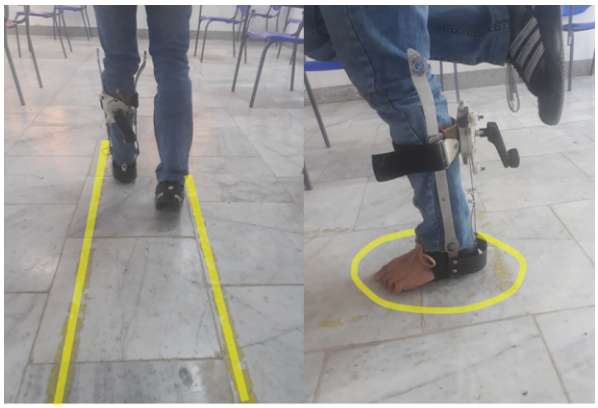
در این آزمایش از داوطلبین خواسته شد یک مسیر ۱۲ متری را با چشمان بسته طی نمایند. عدم تعادل در این آزمایش، خروج از مسیر مشخص‌شده حین راه‌رفتن تعیین شده است. لازم به ذکر است داوطلبین جهت آشنایی عصبی عضلانی با مسیر، قبل از شروع آزمایش مسیر را با چشمانی باز طی کرده بودند. درصورتی‌که انحراف داوطلبین از میسر حرکت با شیب زیاد، ضمن مداخله در آزمایش افراد به مسیر بازگردانده می‌شدند.

۲-۳- آزمایش استاتیکی-مایع گوش

در این آزمایش، داوطلبین ابتدا ۱۰ دور با سرعت متوسط به خود چرخیدند. سپس سعی نمودند تعادل خود را در محدوده‌ی مشخص روی یک پا حفظ نمایند. به‌محض برهم‌خوردن تعادل، از داوطلبین درخواست شد بدون وقفه به آزمایش ادامه دهند.

۴-۲- آزمایش دینامیکی-مایع گوش

در این مرحله، پس از آنکه داوطلبین ۱۰ دور با سرعت متوسط گردش به دور خود داشتند، یک مسیر ۱۲ متری را با چشمان باز طی نمودند.



(ب) (الف)

شکل ۴: آزمایش‌های انجام‌شده، الف) آزمایش استاتیکی-بینایی، ب) آزمایش دینامیکی-مایع گوش.

۳-نتایج و یافته‌ها

میانگین مشخصات داوطلبین در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به انتخاب داوطلبین از میان دانشجویان، سن شرکت‌کنندگان در یک بازه‌ی محدود توزیع شده است.

جدول ۱: میانگین آماری مشخصات فردی شرکت‌کنندگان

شاخص	میانگین ۱۰ داوطلب
سن (سال)	۳/۲۰
قد (متر)	۱/۷۵
وزن(کیلوگرم)	۶۸/۵۶
نمایه‌ی توده‌ی بدن (کیلوگرم بر مترمربع)	۲۲/۳۸

تمامی چهار آزمایش در دو حالت: استفاده از ارتز و بدون استفاده از آن انجام شده است و نتایج با یکدیگر مقایسه شده-اند.

در آزمایش استاتیکی- بینایی، از داوطلبین خواسته شده بود به مدت ۱۸۰ ثانیه تعادل خود را حفظ نمایند. متوسط مجموع زمانی که افراد موفق به حفظ تعادل خود نشدند، در جدول ۲ گزارش شده است. مطابق داده‌های گزارش‌شده در این جدول، استفاده از ارتز باعث کاهش تعادل استاتیکی-بینایی به میزان ۶/۴ ٪ شده است. لازم به ذکر است با توجه به وضعیت جسمانی و سنی داوطلبین، انتظار می‌رود این افزایش عدم تعادل در دیگر گروه‌های سنی به‌مراتب بیشتر باشد.

جدول ۲: نتایج آزمایش تعادل استاتیکی-بینایی.

آزمایش استاتیکی-بینایی	میانگین	
	بدون استفاده از ارتز	با استفاده از ارتز
عدم حفظ تعادل (ثانیه)	۲۲/۴	۳۳/۹
عدم حفظ تعادل (درصد)	۱۲/۴	۱۸/۸

در جدول ۳، نتایج حاصل از آزمایش تعادل دینامیکی-بینایی گزارش شده است. متوسط بازه‌ی زمانی که داوطلبین هنگام طی مسیر از آن منحرف شده بودند، به‌عنوان کمیت نشان‌دهنده‌ی عدم تعادل درنظر گرفته شده است. مطابق داده‌های این جدول، استفاده از ارتز باعث افزایش تعادل دینامیکی-بینایی شده است. در طی آزمایش مشخص شد که پوشیدن ارتز بر پای غالب یا غیرغالب می‌تواند در نتایج نهایی تأثیر داشته باشد، هرچند اعلام نظر در این مورد نیازمند آزمایش‌های بیشتر مطابق پروتکل‌های دقیق‌تری می‌باشد.

جدول ۳: نتایج آزمایش تعادل دینامیکی-بینایی.

آزمایش دینامیکی-بینایی	میانگین	
	بدون استفاده از ارتز	با استفاده از ارتز
عدم حفظ تعادل (درصد)	۲۵/۱۲	۲۰/۴۷
دفعات خروج از مسیر راست	۲/۵	۱/۹
دفعات خروج از مسیر چپ	۲	۱/۳

مقایسه‌ی داده‌های جدول‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد استفاده از ارتز موجب بهبود اثر پارامتر بینایی در تعادل دینامیکی می‌شود، درصورتیکه در تعادل استاتیکی اثر معکوس دارد.

نتایج آزمایش مربوط به تعادل استاتیکی-مایع گوش در جدول ۴ نشان داده شده است. میانگین زمانی که داوطلبین در مدت ۶۰ ثانیه آزمایش از تعادل برخوردار نبودند، در این جدول گزارش شده است. استفاده از ارتز اگرچه موجب افزایش زمان عدم تعادل شده است، اما مقادیر گزارش‌شده تغییر محسوسی را نشان نمی‌دهد.

جدول ۴: نتایج آزمایش تعادل استاتیکی-مایع گوش.

آزمایش استاتیکی-مایع گوش	میانگین	
	بدون استفاده از ارتز	با استفاده از ارتز
عدم حفظ تعادل(ثانیه)	۸/۸	۹/۱
عدم حفظ تعادل(درصد)	۱۴/۶	۱۵/۱

در جدول ۵، داده‌های مربوط به اثر پارامتر مایع گوش بر روی تعادل دینامیکی نشان داده شده است. مطابق این جدول، هنگامی‌که داوطلبین از ارتز استفاده نکرده‌اند، ۳۵/۶ درصد از مسیر را در خارج از محدوده‌ی مشخص‌شده طی کردند، درصورتی‌که این مقدار با استفاده از ارتز ۳۱/۸ درصد بوده است؛ لذا استفاده از ارتز موجب بهبود ۱۰ درصدی در افزایش تعادل دینامیکی-مایع گوش می‌شود. مطابق انتظار، داوطلبین غالباً از سمت پای غالب خود از مسیر خارج شده‌اند. مقایسه‌ی داده‌های جدول ۴ و ۵ نشان می‌دهد اگرچه استفاده از ارتز در تعادل استاتیکی-مایع گوش تأثیر چندانی ندارد، اما باعث بهبود تعادل در تعادل دینامیکی-مایع گوش می‌گردد.

جدول ۵: نتایج آزمایش تعادل دینامیکی-مایع گوش.

آزمایش دینامیکی-مایع گوش	میانگین	
	بدون استفاده از ارتز	با استفاده از ارتز
عدم حفظ تعادل (درصد)	۳۵/۶۰	۳۱/۸۰
دفعات خروج از مسیر راست	۴/۷	۴
دفعات خروج از مسیر چپ	۳/۶	۲/۵

۴-نتیجه‌گیری

نتایج گزارش شده در [۱۳] و نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از ارتز پوشیدنی بدون هیچ‌گونه منبع نیرویی خارجی علاوه‌بر کاهش متابولیسم بدن هنگام راه رفتن، به افزایش تعادل بدن هنگام راه رفتن (تعادل دینامیکی) کمک می‌کند. بهبود ایجاد شده در ارتز پیشنهادی که از یک فنر به‌موازات عضله دوقلوی ساق پا استفاده می‌کند، اهمیت نیاز به تقویت این عضله و تأثیر شگرف آن به‌ویژه در متابولیسم راه رفتن را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است نتایج این تحقیق وابسته به شرکت کنندگان داوطلب در بازه‌ی سنی و جنسی مشخصی می‌باشد؛ لذا جهت تعمیم یافته‌های این پژوهش به دیگر گروه‌های سنی نیاز به آزمایش‌های بیشتری می‌باشد.

۵-مراجع

[1] E. C. Eurostat, Population structure and ageing, European Commission: Luxembourg, 2014.

[2] United Nations, Population Division. World population prospects, Department of Economic and Social Affairs, 2015.

[3] United Nations, World Population Ageing, Department of Economic and Social Affairs, 2015.

[4] S. A. Hoseini Sabzevari, E. Amiri, Experimental analysis of effective parameters on human balance during standing and gaiting, Journal of Solid and Fluid Mechanics, Vol. 8, No. 1, pp. 51-57, 2018. (in Persianفارسی)

[5] D. A. Winter, Human balance and posture control during standing and walking, Gait Posture, Vol. 3, No. 4, pp. 193-214, 1995.

[6] E. Burns, R. Kakara, Deaths from falls among persons aged≥ 65 years, Morbidity and Mortality Weekly Report, Vol. 67, No. 18, pp. 509-517, 2016.

[7] H. Herr, Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions, Journal of neuroengineering and rehabilitation, Vol. 6, No. 1, pp. 21-28, 2009.

[8] D. Surdilovic, A new wire robotic system for gait rehabilitation, Proceeding of the ICORR, 2003.

[9] M. Fathi, F. Najafi, Dynamic modeling of the human lower limb interacting with a pneumatic Actuator and its parameters identification for rehabilitation, Modares Mechanical Engineering, Vol. 13, No. 13, pp. 200-213, 2014.

[10] M. Fathi, F. Najafi, Admittance control stability analysis of a lower limb rehabilitation servo-pneumatic system, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 6, pp. 257-268, 2015.

[11] B. Miripour Fard, T. Padargani, Controllable workspace generation for a cable-driven rehabilitation robot using neural network and based on patient's anthropometric parameters, Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 137-145, 2015.

[12] M. Mohammadi Moghadam, A. Dashkhaneh, M. R. Hadian, M. Mogharrabi, A. Mirzaei Saba, S. M. Davodi, Rehabilitation robots control in gait training exercises on a treadmill, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 8, pp. 157-164, 2014.

[13] S. H. Collins, M. B. Wiggin, G. S. Sawicki, Reducing the energy cost of human walking using an unpowered exoskeleton, Nature, Vol. 522, No. 7555, pp. 212-215, 2015.