



طراحی و بهینه‌سازی یک ربات کمکی پوشیدنی غیرفعال زانو بر اساس یک مکانیزم شش میله‌ای

صفورا طهماسبی¹، حسن ظهور^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی 1458889694، zohoor@sharif.edu

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 09 تیر 1395

پذیرش: 02 آبان 1395

ارائه در سایت: 28 آذر 1395

کلید واژگان:

ربات پوشیدنی

مکانیزم شش میله‌ای

تحلیل دینامیکی

بهینه‌سازی عددی

مفصل زانو

چکیده

در سال های اخیر بیماری های مرتبط با مفصل زانو مخصوصا در سالمندان گسترده شده است. از آنجا که در حین انجام فعالیت های روزانه مانند راه رفتن و هویدن وزن بدن بر روی زانو انتقال داده می شود، احتمال آسیب دیدن این عضو بیشتر می باشد. این موضوع برای افراد سالمند با توجه به ضعف عضلانی از اهمیت بیشتری برخوردار است به طوری که بیشتر افراد سالمند از بیمارهای مرتبط با زانو رنج می برند. یکی از راه های کمک به این افراد جهت بازیابی توانایی مفصل زانو خود، استفاده از وسایل کمکی در کنار زانو به عنوان یک وسیله پوشیدنی می باشد. به منظور افزایش توان مفصل زانو در افراد آسیب دیده، در این مقاله ربات پوشیدنی غیرفعال طراحی گردیده است. اساس این ربات استفاده از المان های انعطاف پذیر جهت افزایش توان در بخشی از حرکت در مفصل زانو می باشد. این ربات با بهره گیری از یک مکانیزم شش میله ای استفسون II توسعه داده شده است. استفاده از این مکانیزم در ربات سبب می گردد که هم حرکتی مشابه مفصل زانو یعنی دوران و انتقال همزمان ایجاد گردد و هم امکان افزودن المان های انعطاف پذیر را جهت افزایش قابلیت ربات پوشیدنی فراهم گردد. با انجام تحلیل های سینماتیکی و همچنین استخراج معادلات دینامیکی و اعتبارسنجی معادلات استخراج شده، عملکرد ربات پوشیدنی طراحی شده مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه توان زانو برای حالتی که ربات پوشیدنی بر روی پا نصب شده است با یک انسان در طول راه رفتن نشان می دهد که زانو برای طی حرکت باید انرژی کمتری را مصرف نماید.

Design and optimization of a passive assistive wearable robot for knee joint based on a six-bar mechanism

Safoora Tahmasebi¹, Hassan Zohoor^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1458889694, Tehran, Iran, zohoor@sharif.edu

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 29 June 2016

Accepted 23 October 2016

Available Online 18 December 2016

Keywords:

Wearable robot

six-bar mechanism

dynamic analysis

numerical optimization

knee joint

ABSTRACT

In recent years, knee diseases have spread, especially in elderly people. Since performing daily activities such as walking and running the knee supports the weight of the body, it is more likely to be injured. This issue is more important for elderly people who have weak muscles and almost all elderly people suffer from knee pain. One way to help these people to move normally is to use a wearable device to aid the knee. In this article, a passive wearable robot is designed to improve the strength of the elderly who suffer from the knee pain. The robot uses the compliance elements to increase the power of the knee joint in parts of a cycle. This robot is developed based on a Stephenson II six-bar mechanism. Using this mechanism has the advantage of producing a motion similar to a knee. In other words, this mechanism produces the linear and rotational motions simultaneously. Additionally, more compliance elements can be added to improve the performance of the wearable robot. The optimal dimensions of the robot will be through the kinematics analysis; also, the performance of the robot will be considered based on the derivation of the dynamics equations and the numerical validations of these equations. The performance of the robot mounted on the leg is compared with the human. Obtained results show that less power is required when a wearable robot is used. This proves the merits of the designed robot to be used for the elderly.

1- مقدمه

این مفصل تاثیر گذاشته و در حین راه رفتن فرد را دچار درد و مشکل می کند به طوری که زانو قادر به ایجاد حرکت طبیعی در حین راه رفتن نمی باشد. بدین منظور پژوهشگران برای کمک به این معضل به طراحی و

زانو بزرگترین و پیچیده ترین مفصل در بدن می باشد. این مفصل بیش از هر مفصل دیگری در معرض آسیب دیدن می باشد، هر آسیبی یا هر وضعی در

Please cite this article using:

S. Tahmasebi, H. Zohoor, Design and optimization of a passive assistive wearable robot for knee joint based on a six-bar mechanism, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 323-334, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

و دینامیک مکانیزم ارائه می‌شود. در ادامه به بررسی توان مصرفی مکانیزم در حین راه رفتن پرداخته می‌شود. در انتها نتایج به‌دست آمده مورد بحث قرار خواهند گرفت و نتیجه‌گیری ارائه خواهد شد.

2- آناتومی زانو و سیکل راه رفتن

قبل از این‌که در مورد طراحی و انتخاب مکانیزم صحبت شود شناخت زانو و نحوی حرکت زانو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

مجموعه زانو از دو مفصل مجزا تشکیل شده که در داخل یک کپسول مفصلی منفرد جای گرفته‌اند. خم و صاف شدن مجموعه زانو باعث کوتاه و طولی شدن اندام می‌شود. زانو علاوه بر فراهم ساختن حرکت، نقش مهمی در حمایت وزن بدن حین فعالیت‌های دینامیک و استاتیک ایفا می‌کند. زانو نه تنها یکی از بزرگترین مفاصل بدن به شمار می‌آید بلکه از پیچیده‌ترین آن‌ها است. حرکت در زانو دارای دو درجه آزادی بصورت فلکشن و اکستنشن در صفحه سهمی و چرخش به داخل و خارج در صفحه عرضی می‌باشد. همان‌طور که در "شکل 1" آمده در حین راه رفتن در زانو همزمان حرکات انتقال و دوران رخ می‌دهد [20].

زانو عملکرد بیومکانیکی مهمی در زمان راه رفتن دارد. در فاز گام برداری، زانو خم می‌شود تا طول اندام تحتانی کوتاه شود در غیر این صورت پا به سختی از زمین جدا می‌شود. در فاز ایستادن، زانو کمی خم باقی می‌ماند تا اجازه جذب ضربه، حفظ انرژی و انتقال نیرو را به اندام تحتانی بدهد. سیکل راه رفتن برای تشریح کردن و آنالیز رویدادها به دو بخش تماس پاشنه پا با زمین و جدا شدن پا، تقسیم می‌شود. این رویدادها با نام‌های فاز ایستادن و فاز گام برداری معرفی می‌شود. در فاز ایستادن همیشه قسمتی از پا با زمین در تماس است و 60% سیکل را تشکیل می‌دهد. و در فاز گام برداری پا هیچ تماسی با زمین ندارد و 40% سیکل را تشکیل می‌دهد [21].

3- انتخاب مکانیزم

از آن‌جایی که استفاده از مکانیزم متداول می‌باشد به انتخاب مکانیزم پرداخته می‌شود در پژوهش‌های پیشین انتخاب از مکانیزم‌ها در ربات‌ها مورد توجه قرار گرفته شده است. پس از بررسی آناتومی زانو و تحلیل‌های مختلف، بر اساس کارکرد زانو مکانیزمی انتخاب می‌شود. با توجه به این‌که هر چه بر تعداد میله‌ها افزوده می‌شود عملکرد و قابلیت حرکت مکانیزم افزایش می‌یابد، و با توجه به این‌که هدف نهایی مکانیزم فوق افزودن المان‌های انعطاف‌پذیر می‌باشد مکانیزم شش میله‌ای قابلیت بیشتری برای افزودن فنر مهیا می‌کند.

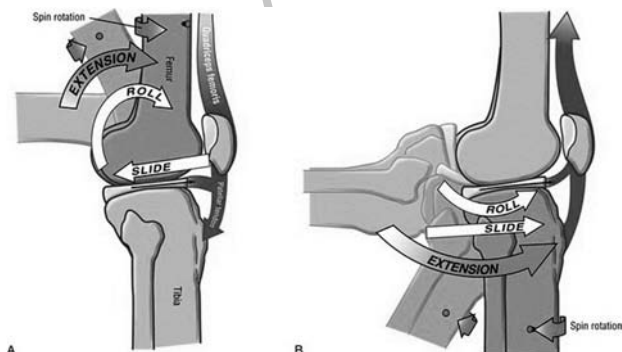


Fig. 1: A. A schematic representation of rolling and sliding of the femoral condyles on fixed tibia. B. Motion of the tibia condyles during extension

شکل 1: A. نمایش شماتیک غلتش و لغزش کوندیل‌های فمور روی تیبیا ثابت. B. حرکت کوندیل‌های تیبیا حین اکستنشن [21]

ساخت ابزارهای کمکی مختلفی پرداختند.

با توجه به پیشرفت‌های اخیر در زمینه فناوری‌های ربات پشتیبان، علاقه در حوزه پوشش‌های فعال و اسکلت خارجی به سرعت افزایش یافته است. با توجه به اهمیت این موضوع پژوهش‌های متفاوتی انجام شده که در [1] به‌صورت خلاصه آمده است. اسکلت‌های خارجی حکم پشتیبان و کمک کننده را دارند و همانند اسکلت بدن عمل می‌کنند. اسکلت خارجی اندام تحتانی به دستگاه‌های توانبخشی، کمکی و توانمندسازی تقسیم می‌شوند که گروهی فعال و گروهی غیرفعال می‌باشند [2,1]. هدف از ربات‌های کمکی تولید اسکلتی است که از لحاظ مکانیکی و کنترلی در حرکاتی مانند راه رفتن، بالا و پایین رفتن از پله‌ها، نشستن و ایستادن انعطاف‌پذیر باشد که افراد مسن و ضعیف به راحتی بتوانند استفاده کنند و هدف از ساخت و طراحی اسکلت خارجی توانبخشی تسهیل در بازسازی نقش قبلی بیمار و بازسازی عملکرد پس از آسیب‌های عصبی است. از انواع اسکلت‌های خارجی می‌توان به این موارد اشاره کرد: اسکلت خارجی که میومیر و کوپرتوویک از موسسه پوپین میهایلو در بلگراد، هال [3]، مینا [4]، ریپپ رکز در نیوزیلند [3]، ای‌لگز از دانشگاه برکلی [5]، پوشش‌های توسعه یافته در دانشگاه یان کره [6]، اسکلت خارجی اکسو پنتو [7] و روبونی [8] اشاره کرد.

یکی از حوزه‌های پژوهشی در این زمینه به‌کارگیری مکانیزم‌ها برای افزایش قابلیت‌های حرکتی پا می‌باشد. در این زمینه انواع مکانیزم‌های دو میله‌ای، سه میله‌ای و ... کار شده است. هر چه تعداد میله‌ها بیشتر باشد عملکرد مکانیزم بهتر خواهد بود. در بعضی موارد دامنه حرکتی و پایداری مکانیزم نیز بیشتر شده است. مکانیزم‌های شش میله‌ای نسبت به مکانیزم‌های پنج میله‌ای و چهار میله‌ای عملکرد بهتر و قابلیت بیشتری دارد. در ربات‌های پوشیدنی از انواع مکانیزم‌های چهار میله‌ای استفاده شده که می‌توان به لامبدا [9] که برای حالت‌های نشسته و خوابیده استفاده می‌شود را نام برد. برای راه رفتن و ایستادن می‌توان به لوکوهلپ [10]، کمک برای راه رفتن [11] اشاره کرد. هیچ‌کدام از این مکانیزم‌ها نسبت به دیگری برتری ندارند بلکه در حالت و نحوه استفاده با هم فرق می‌کنند. از مکانیزم‌های پنج میله‌ای می‌توان به مکانیزمی که در راه رفتن مورد استفاده قرار می‌گیرد اشاره کرد. این مکانیزم دارای دو حالت است که در یک حالت یک درجه آزادی و در حالت دیگر دو درجه آزادی دارد این مکانیزم حرکات غلتش و دوران موردنیاز زانو را تولید می‌کند [12]. از انواع مکانیزم‌های شش میله‌ای و ده میله‌ای که در راه رفتن استفاده شده می‌توان به مکانیزم‌های دانشگاه کالیفرنیا اشاره کرد [13,14].

اسکلت‌های خارجی که تا این زمان طراحی یا ساخته شده‌اند بصورت فعال، غیرفعال و یا ترکیبی از هر دو فعالیت می‌کنند، در اسکلت‌های فعال از انواع موتورها، در ساختار اسکلت‌های غیرفعال از المان‌های انعطاف‌پذیر و در ترکیب اسکلت‌های خارجی نیمه‌فعال از موتور و المان‌های انعطاف‌پذیر همزمان استفاده شده است. به عنوان مثال می‌توان به اسکلت خارجی دانشگاه یال [15]، اسکلت خارجی سوبار¹ [16]، الکس [17]، لویز [18]، لوکومت [19] اشاره کرد که در مفصل زانو به‌صورت فعال و در مفصل مچ پا به‌صورت غیرفعال هستند.

بعد از مقدمه و پژوهش‌هایی که در این بخش ارائه شد در بخش بعدی به بررسی آناتومی زانو و سیکل راه رفتن پرداخته می‌شود. در ادامه به طراحی مکانیزم و پس از آن با بهینه‌سازی، ابعادی مناسب بمنظور پوشیدنی بودن مکانیزم انتخاب می‌شود. پس از مشخص شدن ابعاد بهینه، تحلیل سینماتیک

¹ Sogan University's Biomedical Assistive Robot (SUBAR)

دورانی ربات پوشیدنی در لحظات متوالی در طول یک سیکل حرکت می‌باشد، با توجه به رابطه (1) چهار مجهول وجود دارد بنابراین برای به دست آوردن مقادیر مجهول‌ها نیاز به چهار معادله است که این معادله تعریف دو حلقه می‌باشد. حال با توضیحات ارائه شده و همچنین با توجه به "شکل 3" دو حلقه انتخاب شده است که حلقه شماره یک با نقطه چین و حلقه شماره دو با خط چین مشخص شده‌اند.

روابط حلقه‌های تعریف شده بصورت زیر می‌باشند:

$$\text{Loop1: } \vec{L}_1 + \vec{L}_2 - \vec{b}_2 - \vec{L}_3 - \vec{b}_1 = 0 \quad (2)$$

$$\text{Loop2: } \vec{L}_1 + \vec{L}_2 - \vec{b}_2 - \vec{b}_3 - \vec{L}_4 - \vec{L}_f2 = 0 \quad (3)$$

با بهره‌گیری از جبر مختلط هر کدام از بردارهای رابطه بصورت زیر

تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} \vec{L}_i &= L_i e^{i\theta_i} \quad i = 1, \dots, 4 \\ \vec{b}_2 &= b_2 e^{i\theta_{knee}}, \vec{b}_1 = b_1 e^{i(\theta_1 + \eta)} \\ \vec{b}_3 &= b_3 e^{i(\theta_{knee} - \gamma)}, \vec{L}_f2 = L_{f2} e^{i\theta_{hip}} \end{aligned} \quad (4)$$

با جای گذاری رابطه (4) در روابط (2) و (3) و مساوی قرار دادن ترم‌های

موهومی و محض چهار معادله با چهار مجهول به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} L_1 c_{\theta_1} + L_2 c_{\theta_2} - b_2 c_{\theta_{knee}} - L_3 c_{\theta_3} - b_1 c_{\theta_1 + \eta} &= 0 \\ L_1 s_{\theta_1} + L_2 s_{\theta_2} - b_2 s_{\theta_{knee}} - L_3 s_{\theta_3} - b_1 s_{\theta_1 + \eta} &= 0 \\ L_1 c_{\theta_1} + L_2 c_{\theta_2} - b_2 c_{\theta_{knee}} - b_3 c_{\theta_{knee} - \gamma} - \\ L_4 c_{\theta_4} - L_{f2} c_{\theta_{hip}} &= 0 \\ L_1 s_{\theta_1} + L_2 s_{\theta_2} - b_2 s_{\theta_{knee}} - b_3 s_{\theta_{knee} - \gamma} - \\ L_4 s_{\theta_4} - L_{f2} s_{\theta_{hip}} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

در معادلات بالا c_{θ} بیانگر $\cos(\theta)$ و s_{θ} بیانگر $\sin(\theta)$ می‌باشد. از آنجایی که معادلات بالا غیرخطی هستند، به دست آوردن جواب صریح بسیار پیچیده و زمان‌بر است. بنابراین از روش تقریبی برای حل معادلات استفاده می‌شود. بدین منظور عبارات سینوس و کسینوس در رابطه بالا با استفاده از بسط تیلور به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} c_{\theta_{k+1}} &= c_{\theta_k} - \Delta\theta_k s_{\theta_k} - \frac{\Delta\theta_k^2}{2} c_{\theta_k} + \dots \\ s_{\theta_{k+1}} &= s_{\theta_k} + \Delta\theta_k c_{\theta_k} - \frac{\Delta\theta_k^2}{2} s_{\theta_k} + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

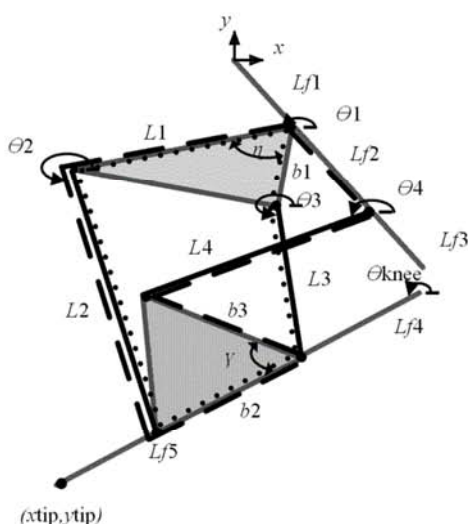


Fig. 3 Wearable robot with design parameters, inputs angles, known parameters. Loop1 is depicted in dot line and loop2 is shown in dash line.

شکل 3 ربات پوشیدنی شامل پارامترهای طراحی، ورودی‌های ربات، پارامترهای معلوم می‌باشد و حلقه اول به صورت نقطه چین و حلقه دوم به صورت خط چین مشخص شده است.

پس از بررسی‌های انجام شده بر روی زانو و آنچه در بخش قبل ارائه شد در حین راه رفتن در زانو همزمان با حرکت دوران، مقدار کمی انتقال رخ می‌دهد. بنابراین مکانیزمی باید انتخاب شود که همزمان دوران و انتقال را تولید کند. همان‌طور که در "شکل 2" آمده بر روی پا دو مکانیزم نصب شده و مکانیزمی مورد قبول است که همزمان حرکات دوران و انتقال را تولید می‌کند از آنجایی که حرکت انتقال ایجاد نمی‌شود به زانو آسیب می‌رساند بنابراین مکانیزم مناسبی برای زانو نمی‌باشد در حالی که مکانیزم "شکل 2.B" هر دو حرکت را ایجاد می‌کند. این مکانیزم، مکانیزم استنفسون II می‌باشد. بنابراین ربات پوشیدنی براساس مکانیزم شش میله‌ای انتخاب می‌شود.

4- تحلیل سینماتیکی ربات پوشیدنی

بعد از انتخاب ساختار مناسب برای ربات پوشیدنی، در این بخش به تحلیل سینماتیکی ربات پرداخته می‌شود. هدف اصلی استخراج روابط موردنیاز جهت به دست آوردن موقعیت‌های ربات پوشیدنی در طول یک سیکل حرکت و همچنین روابط موردنیاز جهت محاسبه سرعت و شتاب‌های مفاصل ربات می‌باشد.

4-1- محاسبه موقعیت‌های دورانی ربات

در این قسمت موقعیت‌های دورانی کلیه مفاصل ربات محاسبه خواهد شد. بدین منظور "شکل 3" را در نظر بگیرید. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، بردار موقعیت‌های دورانی مکانیزم شش میله‌ای به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4]^T \quad (1)$$

که در رابطه بالا θ_i موقعیت دورانی میله i -ام نسبت به افق می‌باشد. همچنین پارامترهای طراحی بصورت $L_1, L_2, L_3, L_4, \delta, \eta, \theta_{knee}$ و θ_{hip} به عنوان ورودی‌های ربات و $L_{f1}, L_{f2}, L_{f3}, L_{f4}, L_{f5}, b_1$ و b_2 به عنوان پارامترهای معلوم می‌باشند. در ادامه روابط موردنیاز برای محاسبه موقعیت‌های دورانی ربات در طول یک سیکل حرکت با استفاده از تحلیل سینماتیکی استخراج خواهد شد. برای تحلیل سینماتیکی ربات‌های موازی روش‌های متفاوتی وجود دارد که در این مقاله از روش حلقه استفاده شده است. در این روش ابتدا باید تعدادی حلقه متناسب با مجهول‌های موجود در مساله انتخاب شود. از آنجایی که هدف اصلی به دست آوردن موقعیت‌های

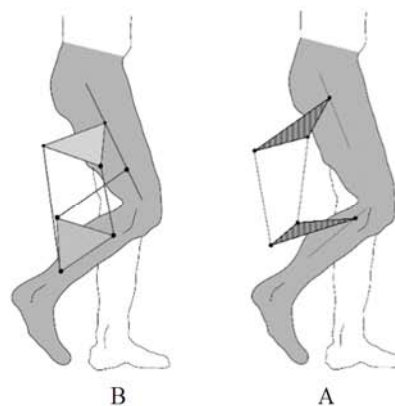


Fig. 2 two proposed structures based on Six-bar mechanism

شکل 2 دو ساختار پیشنهادی برای ربات براساس مکانیزم شش میله‌ای

5- تعیین ابعاد بهینه‌ی ربات پوشیدنی

همان‌طور که در روابط سینماتیکی استخراج شده، مشاهده گردید دانستن مقادیر پارامترهای طراحی ضروری می‌باشد. مقادیر این پارامترها می‌تواند عملکرد ربات را تحت تاثیر قرار دهد. ابعاد مکانیزم باید به گونه‌ای طراحی شود که ربات پوشیدنی حاصل منطبق بر حرکت پای انسان باشد. اما یافتن یک روش برای بدست آوردن ابعاد مکانیزم کار ساده‌ای نخواهد بود. در برخی از پژوهش‌ها از روش تحلیلی و صریح برای یافتن ابعاد مکانیزم استفاده می‌شود، [13]. اما این روش پیچیده و زمان‌بر می‌باشد و همچنین یکسری اهداف مانند کوچکتر کردن ابعاد قابل تحقق نخواهد بود. با توجه به این توضیحات، در این مقاله از روش بهینه‌سازی استفاده می‌شود. این مقاله در پی دستیابی به دو هدف اصلی در طراحی ربات پوشیدنی می‌باشد که از طریق بهینه‌سازی قابل دستیابی می‌باشد. در هدف اول برای جلوگیری از آسیب رسیدن ربات به پای انسان و همچنین فضای کاری مناسب ربات در محدوده حرکتی پای انسان، ابعاد ربات پوشیدنی به گونه‌ای محاسبه می‌شوند که حرکتی مشابه با حرکت طبیعی پای یک انسان ایجاد شود. هدف دوم به حداقل رساندن ابعاد ربات پوشیدنی می‌باشد. در روش بهینه‌سازی نیاز به داشتن یک تابع هزینه و همچنین تعریف قیود مناسب جهت دستیابی به اهداف موردنظر می‌باشد. همان‌طور که در بالا اشاره شده یکی از اهداف تطابق حرکتی ربات پوشیدنی با حرکت طبیعی پای می‌باشد. این هدف از طریق تعریف تابع هزینه محقق خواهد شد. بدین منظور تابع هزینه‌ای بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$J = \sum_{i=1}^n ((x_{tip,i} - x_{tipd,i})^2 + (y_{tip,i} - y_{tipd,i})^2) \quad (12)$$

در رابطه‌ی بالا $x_{tipd,i}$ و $y_{tipd,i}$ موقعیت مچ پا را در مرحله‌ی i -ام از یک سیکل حرکت در راه رفتن طبیعی پای انسان می‌باشد که مقدار آن از طریق اندازه‌گیری‌های تجربی معلوم است. همچنین $x_{tip,i}$ و $y_{tip,i}$ موقعیت مچ پا، هنگامی که ربات پوشیدنی بر روی پا قرار دارد، می‌باشد. که با توجه به "شکل 3" به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$x_{tip,i} = Lf_1 c_{\theta_{hip,i}} + L_1 c_{\theta_{1,i}} + L_2 c_{\theta_{2,i}} + Lf_5 c_{\theta_{knee,i}} \quad (13)$$

$$y_{tip,i} = Lf_1 s_{\theta_{hip,i}} + L_1 s_{\theta_{1,i}} + L_2 s_{\theta_{2,i}} + Lf_5 s_{\theta_{knee,i}} \quad (14)$$

از آن‌جا که اندازه‌گیری تجربی در تعداد نقاطی از یک سیکل حرکت پای انسان انجام می‌پذیرد، بنابراین تابع هزینه با مختصات این نقاط مورد محاسبه و ارزیابی قرار می‌گیرد. هر چه میزان تابع هزینه، J کمتر باشد، بیانگر این نکته است که حرکت ربات پوشیدنی تطابق بهتری با حرکت طبیعی پا دارد. پارامترهای بهینه‌سازی براساس ابعاد مکانیزم شش میله‌ای که ربات پوشیدنی را تشکیل می‌دهد، انتخاب شده است. برای ربات پوشیدنی ارائه شده در این مقاله، بردار پارامتر بهینه‌سازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_{opt} = [L_1, L_2, L_3, L_4, \gamma, \eta, \theta_{1,0}, \theta_{2,0}, \theta_{3,0}, \theta_{4,0}]^T \quad (15)$$

که چهار پارامتر از آن‌ها، طول میله‌های صلب از ربات پوشیدنی می‌باشند. γ و η ، همان‌طور که در "شکل 3" مشخص گردیده است، به ترتیب زوایای میله‌های پنجم و اول می‌باشند. همچنین چهار پارامتر انتهایی زوایای مفاصل ربات پوشیدنی در لحظه شروع حرکت می‌باشند. علت انتخاب زوایای فوق به عنوان پارامترهای بهینه‌سازی در ادامه تشریح خواهد شد. در فرآیند بهینه‌سازی به ازای هر مقدار از پارامترهای هندسی (شش پارامتر تعریف شده در بالا)، برای قرارگیری مچ پای در موقعیت اولیه، هنگامی که ربات پوشیدنی بر روی آن سوار است، یک مقدار معین و منحصر به فرد برای کلیه مفاصل ربات پوشیدنی یعنی θ_i ها وجود دارد. تا زمانی که این مقادیر

در رابطه بالا، θ_k و θ_{k+1} مقادیر زوایای مجهول در مرحله k -ام و $(k+1)$ -ام می‌باشد. از آنجایی که $\Delta\theta_k$ کوچک است می‌توان از ترم‌های مرتبه بالاتر صرف‌نظر کرد و رابطه‌ی زیر را بین θ_k و θ_{k+1} معرفی نمود.

$$\begin{aligned} c_{\theta_{k+1}} &\approx c_{\theta_k} - \Delta\theta_k s_{\theta_k} \\ s_{\theta_{k+1}} &\approx s_{\theta_k} + \Delta\theta_k c_{\theta_k} \end{aligned} \quad (7)$$

از آنجایی که معادلات حلقه‌های تعریف شده به گونه‌ای است که در هر لحظه از حرکت باید برقرار باشد بنابراین اگر زوایای هر یک از مفاصل مکانیزم به مقدار خیلی کوچک تغییر کنند در این حالت نیز، معادلات حلقه باید برقرار باشند.

$$\begin{aligned} L_1 c_{\theta_{1,k+1}} + L_2 c_{\theta_{2,k+1}} - b_2 c_{\theta_{knee,k+1}} - L_3 c_{\theta_{3,k+1}} - \\ b_1 c_{\theta_{1,k+1}+\eta} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_1 s_{\theta_{1,k+1}} + L_2 s_{\theta_{2,k+1}} - b_2 s_{\theta_{knee,k+1}} - L_3 s_{\theta_{3,k+1}} - \\ b_1 s_{\theta_{1,k+1}+\eta} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_1 c_{\theta_{1,k+1}} + L_2 c_{\theta_{2,k+1}} - b_2 c_{\theta_{knee,k+1}} - b_3 c_{\theta_{knee,k+1}-\gamma} - \\ L_4 c_{\theta_{4,k+1}} - Lf_2 c_{\theta_{hip,k+1}} = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_1 s_{\theta_{1,k+1}} + L_2 s_{\theta_{2,k+1}} - b_2 s_{\theta_{knee,k+1}} - b_3 s_{\theta_{knee,k+1}-\gamma} - \\ L_4 s_{\theta_{4,k+1}} - Lf_2 s_{\theta_{hip,k+1}} = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

با جایگذاری رابطه (7) در رابطه (8) یک معادله ماتریسی برای محاسبه $\Delta\theta_{i,k}$ بدست خواهد آمد. حال با معلوم بودن $\Delta\theta_{i,k}$ و استفاده از رابطه زیر می‌توان مقدار زاویه‌ی θ_i را در لحظه $(k+1)$ -ام را بدست آورد:

$$\theta_{i,k+1} = \theta_{i,k} + \Delta\theta_{i,k} \quad k = 0, \dots, n \quad (9)$$

همان‌طور که از رابطه بالا مشاهده می‌شود، با معلوم بودن $\theta_{i,0}$ ، که موقعیت اولیه مفصل i -ام در لحظه شروع حرکت می‌باشد، می‌توان $\theta_{i,k}$ را در لحظات متوالی محاسبه نمود. به‌علت فضای کم از شرح تفصیلی روابط خودداری شده است و معادلات ماتریسی برای بدست آوردن مقادیر مفصلی ربات پوشیدنی با تمامی جزئیات در مرجع ارائه گردیده است. بنابراین در این بخش، سینماتیک مستقیم ربات پوشیدنی جهت بدست آوردن مقادیر کلیه مفاصل ربات با معلوم بودن پارامترهای هندسی و همچنین مقادیر اولیه استخراج گردید.

4-2- محاسبه سرعت و شتاب دورانی مفاصل ربات

پس از تحلیل سینماتیکی و مشخص شدن موقعیت مفاصل در تمامی لحظات حرکت به محاسبه سرعت و شتاب دورانی مفاصل پرداخته می‌شود. اهمیت محاسبه‌ی سرعت‌ها و شتاب‌ها استفاده از آن‌ها در محاسبه‌ی معادلات دینامیکی ربات می‌باشد. برای محاسبه سرعت‌های دورانی مفاصل از معادلات (5) استفاده می‌شود. با مشتق‌گیری از این معادلات و مرتب‌سازی ترم‌های بدست آمده، می‌توان به یک معادله ماتریسی برای محاسبه‌ی بردار سرعت زاویه‌ی در لحظه k -ام به صورت زیر دست یافت:

$$A(\theta_k) \dot{\theta}_k = B(\theta_k) \quad (10)$$

که در رابطه‌ی بالا $A(\theta_k)$ یک ماتریس $R^{4 \times 4}$ و $B(\theta_k)$ یک بردار $R^{4 \times 1}$ می‌باشند که با استفاده از معادلات سرعت حاصل می‌شوند.

در ادامه برای محاسبه شتاب دورانی مفاصل ربات پوشیدنی غیرفعال محاسبه خواهد شد. با مشتق‌گیری از معادلات سرعت دورانی و مرتب‌سازی روابط حاصل شده، بردار شتاب دورانی را کلیه‌ی مفاصل ربات پوشیدنی را در لحظه k -ام به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$\ddot{\theta}(\theta_k) = A(\theta_k)^{-1} (\dot{B}(\theta_k) - \dot{A}(\theta_k) \dot{\theta}_k) \quad (11)$$

با معلوم بودن بردارهای موقعیت و سرعت در لحظه k -ام می‌توان شتاب را در لحظه فوق محاسبه نمود. به‌علت فضای کم از شرح تفصیلی روابط خودداری شده است و معادلات با تمامی جزئیات در [22] ارائه گردیده است.

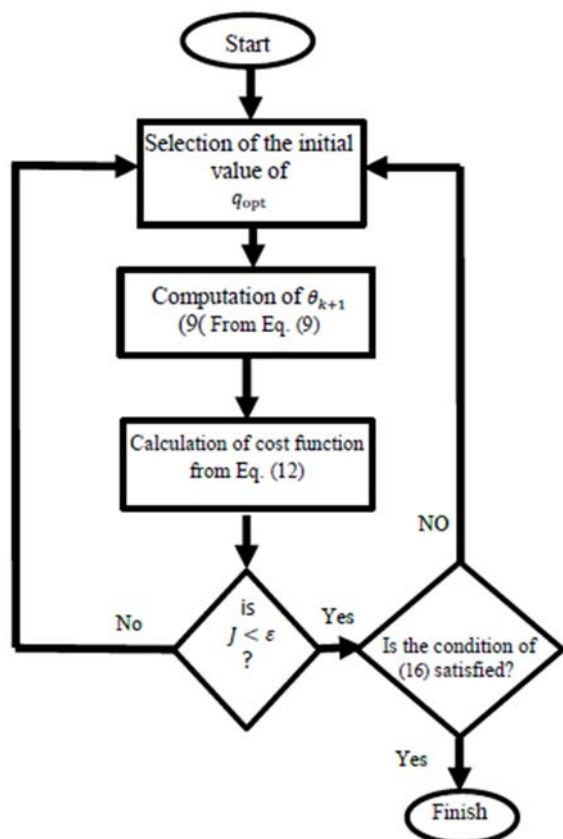


Fig. 4 the flowchart of optimization problem for determining appropriate dimension of the knee wearable robot

شکل 4 فلوجارت مساله بهینه‌سازی برای تعیین ابعاد مناسب ربات پوشیدنی

زمان حل خواهد شد.

6- استخراج معادلات دینامیکی ربات پوشیدنی

در بخش قبل روابط سینماتیکی ربات پوشیدنی استخراج گردید. حال در این بخش به بررسی معادلات دینامیکی ربات طراحی شده در این مقاله پرداخته می‌شود. این معادلات به‌منظور تحلیل عملکرد ربات پوشیدنی مورد استفاده قرار خواهد گرفت. برای استخراج معادلات دینامیکی ربات‌ها روش‌های متفاوتی وجود دارد که هر کدام از آن‌ها ویژگی‌های منحصر به فرد خود را دارند. در این مقاله به تحلیل دینامیکی ربات پوشیدنی به روش لاگرانژ پرداخته می‌شود، [24] و در ادامه برای اعتبارسنجی معادلات دینامیکی از روش نیوتن-اولیتر استفاده شده است، [25].

در ادامه ابتدا معادلات دینامیکی استخراج خواهد شد. سپس معادلات دینامیکی برای حالتی که المان‌های انعطاف‌پذیر بر روی ربات متصل شده است، استخراج خواهد گردید.

1-6- استخراج معادلات دینامیکی به روش لاگرانژ

در این مقاله از روش لاگرانژ برای استخراج معادلات دینامیکی ربات طراحی شده، استفاده گردیده است. گام اول در استخراج معادلات، شناسایی پارامترهای مستقل جهت توصیف حرکت ربات پوشیدنی می‌باشد. با توجه به ساختار انتخاب شده، بردار پارامترهای مستقل بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$q = [\theta_1 \ \theta_{hip} \ x_{hip} \ y_{hip} \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_{knee}]^T \quad (19)$$

در رابطه بالا x_{hip} و y_{hip} موقعیت خطی مفصل ران می‌باشند. حال با

اولیه معلوم نباشند، نمی‌توان مقادیر زوایای مکانیزم در لحظات بعد از یک سیکل حرکت را با استفاده از معادلات (9) محاسبه نمود. دانستن این مقادیر از آن جهت حائز اهمیت است که تابع هزینه تعریف شده وابسته به این مقادیر اولیه می‌باشند. به عبارت دقیق‌تر، $\theta_{i,0}$ ها به‌منظور حل معادلات سینماتیکی مستقیم و به‌دست آوردن θ_i ها در مراحل بعدی و در نتیجه محاسبه‌ی موقعیت قبل از مچ پا محاسبه می‌شوند. برای به دست آوردن مقادیر زوایای اولیه دو روش وجود دارد. در روش اول، معادلات حلقه‌ها به صورت صریح با استفاده از روش‌های موجود برای لحظه شروع حرکت حل می‌شوند و روابط مورد نیاز جهت محاسبه θ_i ها تابعی از ابعاد ربات پوشیدنی و همچنین مقادیر زوایای ران وساق در لحظه فوق محاسبه می‌شوند [23]. عیب این روش را می‌توان اینطور توضیح داد که معادلات صریح به‌دست آمده برای محاسبه این زوایا بسیار پیچیده بوده و این سبب پیچیدگی مساله بهینه‌سازی و همچنین افزایش زمان حل مساله می‌گردد. در این مقاله یک روش جدید برای حل این مشکل ارائه شده است که به‌عنوان روش دوم در ادامه تشریح خواهد شد. از آن‌جا که یک مساله بهینه‌سازی تعریف شده است، بنابراین امکان تعریف قیود مساوی و نامساوی وجود دارد. برای این منظور مقادیر $\theta_{i,0}$ ها به عنوان متغیرهای بهینه‌سازی تعریف می‌شوند که مقادیر آن‌ها با انجام بهینه‌سازی مشخص خواهند شد. اما از آن‌جا که این پارامترها باید معادلات حلقه‌های تعریف شده در لحظه شروع حرکت ارضاء نمایند، بنابراین باید قیودی برای محدود نمودن مقادیر آن‌ها تعریف نمود. این قیود به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} L_1 c_{\theta_{1,0}} + L_2 c_{\theta_{2,0}} - b_2 c_{\theta_{knee,0}} - L_3 c_{\theta_{3,0}} - b_1 c_{\theta_{1,0}+\eta} &= 0 \\ L_1 s_{\theta_{1,0}} + L_2 s_{\theta_{2,0}} - b_2 s_{\theta_{knee,0}} - L_3 s_{\theta_{3,0}} - b_1 s_{\theta_{1,0}+\eta} &= 0 \\ L_1 c_{\theta_{1,0}} + L_2 c_{\theta_{2,0}} - b_2 c_{\theta_{knee,0}} - b_3 c_{\theta_{knee,0}-\gamma} - \\ L_4 c_{\theta_{4,0}} - L f_2 c_{\theta_{hip,0}} &= 0 \\ L_1 s_{\theta_{1,0}} + L_2 s_{\theta_{2,0}} - b_2 s_{\theta_{knee,0}} - b_3 s_{\theta_{knee,0}-\gamma} - \\ L_4 s_{\theta_{4,0}} - L f_2 s_{\theta_{hip,0}} &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

به عبارت دقیق‌تر معادلات (16)، معادلات حلقه‌های (4) می‌باشند که برای لحظه شروع حرکت بازنویسی شده‌اند. همان‌طور که از معادلات بالا مشخص است، قیودی بر طول‌های ربات پوشیدنی و همچنین مقادیر زوایای مفاصل ربات پوشیدنی در لحظه شروع حرکت اعمال می‌شوند. این قیود سبب می‌شوند که مکانیزم در حین بهینه‌سازی زوایایی را به عنوان مقادیر اولیه خود انتخاب کند که منطبق بر ابعاد انتخاب شده باشد و این سبب سازگاری ابعاد بهینه و مقادیر اولیه مفاصل ربات پوشیدنی می‌باشد. از آن‌جایی که این ربات در کنار پا به‌عنوان یک وسیله پوشیدنی مورد استفاده قرار خواهد گرفت، محدودیت‌هایی بر روی ابعاد مکانیزم که سبب کوچک شدن ربات و همچنین وزن کم آن خواهد شد، بصورت زیر اعمال می‌شوند:

$$L_{i,\min} \leq L_i \leq L_{i,\max} \quad i = 1, \dots, 4 \\ 0 < \gamma, \eta < \pi \quad (17)$$

شرط دوم در معادله بالا با توجه به محدودیت‌های هندسی برای میله‌های اول و پنجم تعریف شده است. مساله بهینه‌سازی به صورت خلاصه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min_{q_{opt}} J(q_{opt}) \quad (18)$$

مشروط بر قیود (16) و (17)

مساله بهینه‌سازی بالا یک مساله بهینه‌سازی غیرخطی می‌باشد. فلوجارت مساله بهینه‌سازی در "شکل 4" نشان داده شده است.

ویژگی مساله بهینه‌سازی تعریف شده در این مقاله تعیین مقادیر اولیه‌ی مفاصل ربات پوشیدنی از طریق حل مساله فوق می‌باشد. که این سبب کاهش

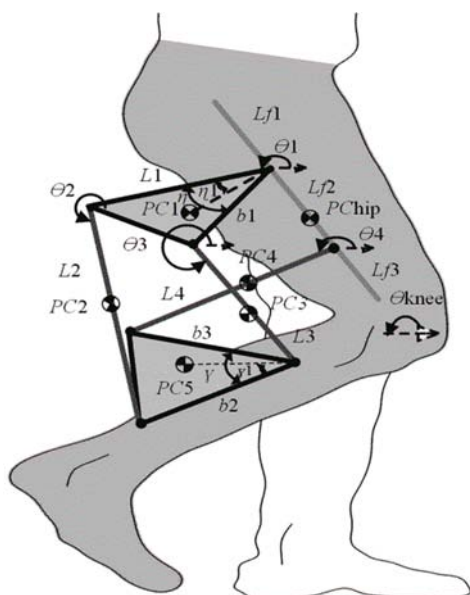


Fig. 5 the wearable robot and geometric and mass parameters

شکل 5 ربات پوشیدنی زانو و پارامترهای هندسی و جرم

$$C_{ijk} = \left(\frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_i} \right) \dot{q}_i \dot{q}_k \quad (27)$$

در انتها، اعضای بردار G از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$G_j = \sum_{i=1}^8 L_{i,j} \quad (28)$$

که در رابطه (28)، $L_{i,j}$ را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$L_{i,j} = -m_j g^T \frac{\partial P_C(\cdot, j)}{\partial q_i} \quad (29)$$

که در رابطه (29)، g بردار شتاب گرانش می‌باشد. همچنین ماتریس P_C از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$P_C = \begin{bmatrix} P_{x,C_1} & P_{x,C_{hip}} \\ P_{y,C_1} & \dots & P_{y,C_{hip}} \\ P_{z,C_1} & & P_{z,C_{hip}} \end{bmatrix}_{3 \times 6} \quad (30)$$

بنابراین با توضیحات داده شده می‌توان معادلات دینامیکی صریح را برای ربات پوشیدنی جهت آنالیز رفتار آن محاسبه نمود. استخراج این معادلات جهت اثبات صحت ادعای بهبود عملکرد حرکتی حایز اهمیت می‌باشد.

2-6- استخراج معادلات دینامیکی بدون قیود

همان‌طور که در قسمت قبل تشریح شد، به دلیل وجود حلقه‌ها در ربات پوشیدنی، نیروهای قیدی به معادلات دینامیکی ربات پوشیدنی اعمال می‌شود. یک مساله مهم در حل معادلات دینامیکی و به دست آوردن گشتاورهای اعمالی به ربات پوشیدنی، معلوم بودن مقدار این نیروها می‌باشد. اما همان‌گونه که از معادلات دینامیکی مشخص است، با فرض معلوم بودن ورودی مفاصل ربات یعنی سرعت‌ها و شتاب‌ها، مجموعه این معادله‌ها یک دستگاه معادله‌ها که شامل هشت معادله و هشت مجهول است، تشکیل می‌دهد که مجهول‌های از چهار نیروی قیدی و چهار گشتاور تشکیل شده است. در ادامه به حل معادلات دینامیکی جهت حذف قیود اعمالی پرداخته خواهد شد. از آن‌جا که بر چهار درجه آزادی ربات هیچ گشتاوری اعمال نمی‌شود، معادلات دینامیکی، به دو ترم براساس متغیرهای عملگری و غیر عملگری به صورت زیر تفکیک می‌شود:

توجه به تعریف این متغیرها، می‌توان معادلات دینامیکی را استخراج نمود. از آنجا که در این ربات به علت موازی بودن ربات پوشیدنی، دو حلقه وجود دارد، بنابراین قیود سینماتیکی بر معادلات دینامیکی ربات تحمیل می‌شوند. بنابراین معادلات دینامیکی به صورت مقید خواهد بود. در روش لاگرانژ، با محاسبه انرژی جنبشی و پتانسیل ربات پوشیدنی و استفاده از روابط موجود می‌توان معادلات دینامیکی را برای ربات استخراج نمود. معادله لاگرانژ برای ربات پوشیدنی طراحی شده در این مقاله، مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$M\ddot{q} + V + G = \tau + J_C^T \lambda \quad (20)$$

در رابطه بالا، $M \in \mathbb{R}^{8 \times 8}$ ماتریس جرمی ربات پوشیدنی می‌باشد. اعضای بردار $V \in \mathbb{R}^{8 \times 1}$ را نیروهای گریز از مرکز و کوریولیس تشکیل می‌دهند. بردار $G \in \mathbb{R}^{8 \times 1}$ در معادله بالا نیروهای گرانش می‌باشد. همچنین بردار $\tau \in \mathbb{R}^{8 \times 1}$ بردار نیروها و گشتاورهای خارجی وارد بر ربات پوشیدنی می‌باشد. در این ربات گشتاور و نیروی خارجی اعمالی تنها بر چهار متغیر از بردار q اعمال می‌شود و فرض شده بر متغیرهای مستقل دیگر هیچ گشتاور یا نیروی خارجی اعمال نمی‌شود و برابر صفر می‌باشد. با توجه به این توضیحات، بردار τ بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tau = [\tau_1 \quad \tau_{hip} \quad F_{x,hip} \quad F_{y,hip} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (21)$$

از آن‌جا که دو حلقه در ربات پوشیدنی تعریف شده است، برای حفظ این حلقه‌ها، نیروهایی لازم است که در معادله (21)، با λ نشان داده شده است. $J_C \in \mathbb{R}^{4 \times 8}$ ماتریس ژاکوبین قیود اعمال شده در مساله که همان معادلات (2) و (3) می‌باشد. برای محاسبه ماتریس ژاکوبین با مشتق‌گیری از این معادلات نسبت به بردار q می‌توان به معادله به فرم زیر دست یافت:

$$J_C \dot{q} = 0_{4 \times 1} \quad (22)$$

که در معادله بالا، J_C به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$J_C = \begin{bmatrix} -L_1 s_{\theta_1} + b_1 s_{\theta_1 + \eta} & L_1 c_{\theta_1} - b_1 c_{\theta_1 + \eta} & -L_1 s_{\theta_1} & L_1 c_{\theta_1} \\ 0 & 0 & L f_2 s_{\theta_{hip}} & -L f_2 c_{\theta_{hip}} \\ O_{2 \times 1} & O_{2 \times 1} & O_{2 \times 1} & O_{2 \times 1} \\ -L_2 s_{\theta_2} & L_2 c_{\theta_2} & -L_2 s_{\theta_2} & L_2 c_{\theta_2} \\ L_3 s_{\theta_3} & -L_3 c_{\theta_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_4 s_{\theta_4} & -L_4 c_{\theta_4} \\ b_2 s_{\theta_{knee}} & -b_2 c_{\theta_{knee}} & b_2 s_{\theta_{knee}} - b_3 s_{\theta_{knee} - \gamma} & b_2 c_{\theta_{knee}} - b_3 c_{\theta_{knee} - \gamma} \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

برای محاسبه هر یک ترم‌های معادله دینامیکی ابتدا انرژی جنبشی کل ربات پوشیدنی با استفاده از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 (m_i v_{c_i}^2 + I_i \dot{\theta}_i^2) + \frac{1}{2} m_{hip} \|v_{C_{hip}}\|^2 + \frac{1}{2} I_{hip} \dot{\theta}_{hip}^2 \quad (24)$$

همان‌طور که در "شکل 5" نشان داده شده است، مجموعه ربات پوشیدنی از پنج میله صلب و یک میله صلب برای ران تشکیل شده است. در این‌جا برای استخراج معادلات دینامیکی، ربات پوشیدنی و پای انسان با یکدیگر مورد تحلیل قرار گرفته است. حال می‌توان ماتریس جرمی را با بهره‌گیری از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$M = \frac{\partial}{\partial \dot{q}} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) \quad (25)$$

همچنین هر یک از اعضای بردار نیروهای گریز از مرکز و کوریولیس با استفاده از رابطه (26) محاسبه می‌شود:

$$V_i = \sum_{j=1}^8 \sum_{k=1}^8 C_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k \quad i = 1, \dots, 8 \quad (26)$$

که در رابطه (26)، C_{ijk} با توجه به معلوم بودن ماتریس جرمی M از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

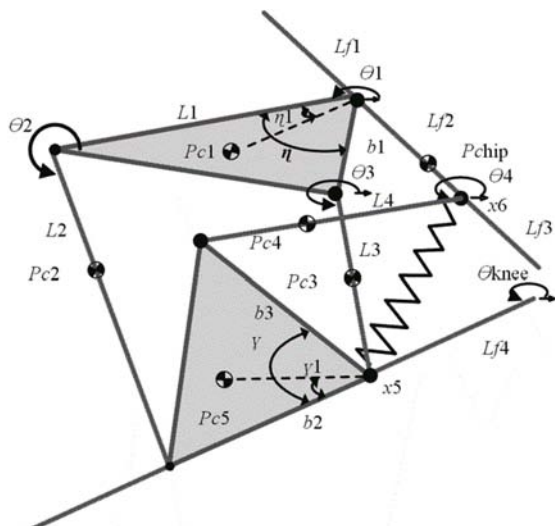


Fig. 6 The Wearable robot equipped with a spring

شکل 6 ربات پوشیدنی با یک فنر

حال با محاسبه ترم مربوط به فنر در معادله دینامیکی، می‌توان مقدار گشتاور اعمالی به ربات را با استفاده از روند مشابه برای ربات هنگامی که فنری به آن متصل نیست، محاسبه نمود.

در ادامه می‌توان با توجه به ساختار مکانیزم شش میله‌ای که ربات براساس آن طراحی شده است، با افزودن تعداد فنرهای بیشتری عملکرد ربات را جهت تقویت توان زانو بهبود داد. همان‌طور که در "شکل 7" نشان داده شده است، دو فنر به نقاطی بر روی زانو و ران ربات پوشیدنی اضافه نمود که یک فنر آن دقیقاً مشابه حالت قبل می‌باشد. روابط استخراج شده در این قسمت جهت محاسبه گشتاور اعمالی به زانو برای ربات در این حالت می‌تواند مورد بهره‌برداری قرار گیرد تا بتوان تاثیر افزودن تعداد فنرهای بیشتر و همچنین مزیت بکارگیری مکانیزم شش میله‌ای مورد بررسی قرار گیرد.

7- نتایج

در این بخش به تحلیل نتایج به دست آمده پرداخته خواهد شد. ابتدا با اطلاعات تجربی به دست آمده از حرکت انسان، ابعاد مناسب و بهینه برای ربات پوشیدنی محاسبه خواهد شد. در ادامه، عملکرد ربات پوشیدنی جهت

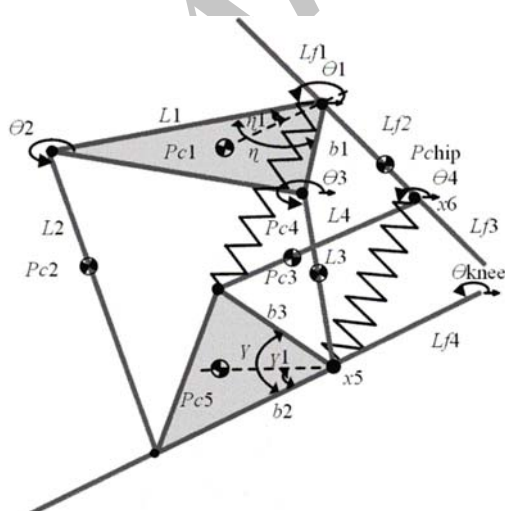


Fig. 7 the Wearable robot equipped with two springs

شکل 7 ربات پوشیدنی با دو فنر

$$\begin{bmatrix} M_{14 \times 8} \\ M_{24 \times 8} \end{bmatrix} \ddot{q} + \begin{bmatrix} V_{14 \times 1} \\ V_{24 \times 2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_{4 \times 1} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{C,14 \times 4}^T \\ J_{C,24 \times 4}^T \end{bmatrix} \lambda_{4 \times 1} \quad (31)$$

معادلات (31) را می‌توان به دو معادله مجزا به صورت زیر بازنویسی نمود:

$$M_1 \ddot{q} + V_1 + G_1 = \tau + J_{C,14 \times 4}^T \lambda \quad (a)$$

$$M_2 \ddot{q} + V_2 + G_2 = J_{C,24 \times 4}^T \lambda \quad (b) \quad (32)$$

همان‌طور که از معادله (b)-(32) مشاهده می‌شود، تنها نیروی قیدی در این معادله وجود دارد بنابراین می‌توان نیروی قیدی λ را از این معادله به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\lambda = (J_{C,24 \times 4}^T)^{-1} (M_2 \ddot{q} + V_2 + G_2) \quad (33)$$

حال با جای‌گذاری نیروی قیدی محاسبه شده از رابطه بالا، λ ، در رابطه

(a)-(32)، گشتاور اعمالی را می‌توان بصورت زیر محاسبه نمود:

$$\tau = (M_1 - J_{C,14 \times 4}^T (J_{C,24 \times 4}^T)^{-1} M_2) \ddot{q} + V_1 - J_{C,14 \times 4}^T (J_{C,24 \times 4}^T)^{-1} V_2 + G_1 - J_{C,14 \times 4}^T (J_{C,24 \times 4}^T)^{-1} G_2 \quad (34)$$

از آنجایی که هدف اصلی، محاسبه گشتاور اعمالی به مفصل اول جهت محاسبه توان مصرفی ربات پوشیدنی به منظور بررسی عملکرد ربات پوشیدنی طراحی شده می‌باشد، مقدار گشتاور اعمالی بر این مفصل را می‌توان بدست آورد.

3-6- استخراج معادلات دینامیکی ربات پوشیدنی با افزودن المان انعطاف‌پذیر

در ساختار اصلی ربات پوشیدنی طراحی شده، همانگونه که در "شکل 6" نشان داده شده است، المان انعطاف‌پذیری به منظور کاهش گشتاور اعمالی و توان مصرف شده توسط زانو در سیکل راه رفتن به ربات پوشیدنی اضافه می‌شود.

در افرادی که به دلایل مختلف از جمله آرتروز دارای مشکلات زانو می‌باشند و قادر به ایجاد گشتاور و توان لازم برای راه رفتن نیستند، باید راهکاری جهت کمک به حرکت آن‌ها در نظر گرفته شود. در این مقاله، برای تقویت گشتاور زانو در حین راه رفتن، المان انعطاف‌پذیری مانند فنر به ربات پوشیدنی اضافه می‌شود. ویژگی که این المان‌ها دارا می‌باشند، این است که در فاز گام‌برداری فنر فشرده می‌شود و انرژی را ذخیره می‌کند و در فاز ایستادن انرژی ذخیره شده به منظور تغییر فاز راه رفتن آزاد می‌شود.

براساس معادلات دینامیکی استخراج شده برای ربات پوشیدنی یعنی رابطه (20)، معادلات هنگامی که این المانهای انعطاف‌پذیر اضافه می‌شوند، به صورت زیر اصلاح خواهند شد:

$$M \ddot{q} + V + V_{spring} + G = \tau + A^T \lambda \quad (35)$$

همان‌طور که در رابطه بالا مشاهده می‌شود، یک ترم یعنی V_{spring} به معادلات اضافه شده است. این ترم اثر المان انعطاف‌پذیر در معادلات دینامیکی می‌باشد. که از طریق محاسبه انرژی پتانسیل فنر و با بهره‌گیری از رابطه زیر محاسبه خواهد شد:

$$V_{spring} = \frac{\partial P_{sp}}{\partial q} \quad (36)$$

همان‌طور که در "شکل 6" نشان داده شده است، فرض می‌شود که فنر بین نقطه 5 از ران و نقطه 6 از زانو متصل شده باشد. با توضیحات ارائه شده، انرژی پتانسیل فنر از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$P_{sp} = \frac{1}{2} k (\|P_5 - P_6\|_2 - (L_{f4} + L_{f3}))^2 \quad (37)$$

که در رابطه (37) داریم:

$$P_5 = (x_{hip} + y_{hip}i) + L_1 e^{i\theta_1} + L_2 e^{i\theta_2} + b_2 e^{i\theta_{knee}}$$

$$P_6 = (x_{hip} + y_{hip}i) + (L_{f1} + L_{f2}) e^{i\theta_{hip}} \quad (38)$$

اطمینان از دستیابی به اهداف مورد نظر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

1-7- انتخاب ساختار بهینه برای ربات پوشیدنی و نتایج سینماتیکی ربات پوشیدنی

در این بخش از مقاله، عملکرد سینماتیکی ربات پوشیدنی در یک سیکل حرکت تحلیل خواهد شد. برای انجام این موضوع، داشتن ابعاد و پارامترهای هندسی ربات ضروری می‌باشد. بنابراین ابتدا ابعاد مکانیزم با بهره‌گیری از الگوریتم ارائه داده شده در این مقاله تعیین خواهد شد.

برای مساله بهینه‌سازی، اطلاعات سینماتیکی از حرکت پای یک انسان سالم مخصوصاً اطلاعات مربوط به حرکت زانو در طی یک سیکل حرکت مورد نیاز می‌باشد. اطلاعات حرکتی پای انسان را می‌توان با بهره‌گیری از دو روش استخراج نمود. در روش اول یک مدل هندسی دقیق که منطبق بر حرکت پای انسان می‌باشد، استخراج می‌گردد. سپس، با تعریف مسیرهای مناسب برای لگن و مچ پا می‌توان اطلاعات حرکتی مربوط به زانو و لگن را به دست آورد. اما در روش دوم با بهره‌گیری از وسایل اندازه‌گیری مخصوص مانند استریو دینامیکی اشعه ایکس¹ می‌توان اطلاعات حرکتی را استخراج نمود که با تکنولوژی‌های نوین امروزی، نتایج حاصل شده با لحاظ نمودن تمام شرایط واقعی دارای دقت بیشتری می‌باشند. بدین منظور از اطلاعات حرکتی تجربی در مرجع [26] استفاده می‌شود. این اطلاعات تجربی براساس اندازه‌گیری‌های انجام شده برای یک انسان با مشخصات جرمی و هندسی مطابق جدول 1 می‌باشد. در این مقاله تمامی تحلیل‌ها و همچنین طراحی ابعاد بهینه مکانیزم بر اساس این اطلاعات انجام می‌پذیرد. همانطور که در قسمت بهینه‌سازی توضیح داده شد، باید مسیر قبل از مچ پای ربات مشخص باشد. با اطلاعات تجربی اندازه‌گیری شده، مسیر حرکت قبل از مچ پا در یک سیکل حرکت در صفحه عمودی حرکت در "شکل 8" نشان داده شده است. همچنین مقدار حرکت مفصل زانو و ران در طول دو سیکل از حرکت در "شکل 9" نشان داده شده است. مسیر حرکت مفصل زانو همانطور که در شکل دیده می‌شود، در ابتدای فاز گام برداری یعنی از زمین برداشتن شدن پنجه پا، مقداری زیاد می‌شود. سپس مفصل زانو کاهش می‌یابد تا به کمترین مقدار خود برسد. در این هنگام فاز گام برداری به پایان می‌رسد. و در فاز تماس پا با زمین نیز مقدار مفصل زانو افزایش می‌یابد.

حال با توجه به اطلاعات به دست آمده، ابعاد ربات پوشیدنی طراحی خواهد شد. همانطور که در بخش‌های قبل به طور مفصل تشریح گردید، از الگوریتم بهینه‌سازی ارائه شده در این مقاله برای تعیین ابعاد مناسب استفاده می‌شود. بدین منظور مقادیر اولیه متغیرهای بهینه‌سازی، مطابق جدول 2 انتخاب می‌شود. برای بهینه‌سازی از نرم‌افزار متلب و دستور `fmincon` استفاده می‌شود. ربات پوشیدنی به همراه پای فرد مورد آزمایش با ابعاد اولیه در قسمت (a) از "شکل 10" و این ربات با ابعاد بهینه در قسمت (b) از این شکل نشان داده شده است.

جدول 1 مشخصات جرمی و ابعادی پا

مشخصات	واحد	مقدار
وزن بدن	kg	56.7
طول ران	cm	31.4
طول ساق	cm	40

¹ Dynamic stereo X-ray (DSX)

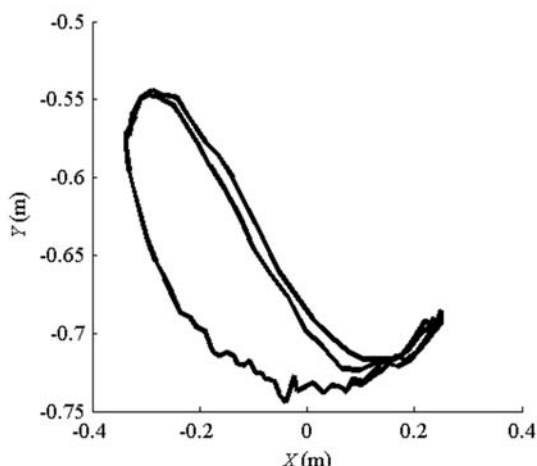


Fig. 8 The path of the ankle joint In sagittal plane

شکل 8 مسیر حرکت قبل مچ پا در صفحه عمودی حرکت

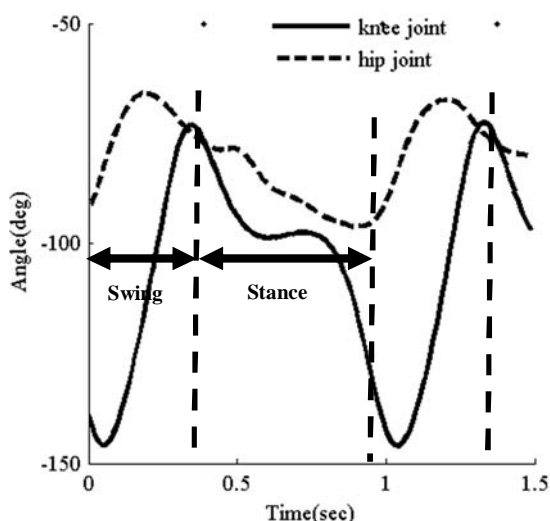


Fig. 9 The trajectory of the hip and knee joint during two cycles

شکل 9 مسیر حرکت مفصل ران و زانو در طول حرکت دو سیکل

جدول 2 مقادیر اولیه پارامترهای بهینه‌سازی برای ربات پوشیدنی

مشخصات	واحد	مقادیر
طول‌های اولیه ربات	mm	$L_{1,0}=40, L_{2,0}=62.2, L_{3,0}=49.68, L_{4,0}=59.09$
مقادیر اولیه مفاصل ربات	rad	$\theta_{1,0}=3.59, \theta_{2,0}=4.58, \theta_{3,0}=4.69, \theta_{4,0}=2.59$
اولیه ربات پوشیدنی زاویای	rad	$\eta_0=0.52, \gamma_0=0.88$
قیود ابعادی ربات پوشیدنی		$0.01(m) < L_i < 0.1(m) \quad i = 1, \dots, 4$ $2^\circ < \gamma, \eta < 180$

همچنین مقادیر بهینه ابعاد و زاویای ربات پوشیدنی در جدول 3 مشخص شده است. با در نظر گرفتن مقدار تعیین شده برای قیود، مقدار تابع هزینه برابر $J=0.23$ خواهد شد. مسیر زمانی حرکت برای پای طبیعی انسان و همچنین مچ پای هنگامی ربات بر روی پا نصب شده است، در "شکل 11" مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل مشخص است، خطا در این حالت در بیشتر نقاط بسیار کم می‌باشد. نکته‌ای که در اینجا باید مورد توجه قرار گیرد این است که به دلیل محدود کردن زاویای ران و زانو در هر حالت مطابق زاویای اندازه‌گیری شده، فضای کاری مچ پای ربات هنگامی که ربات بر روی

جدول 3 پارامترهای بهینه برای ربات پوشیدنی

مقدار	واحد	مشخصات
$L_1=35.7, L_2=38.1, L_3=45.1, L_4=45.6$	mm	ابعاد ربات پوشیدنی
$\theta_1=4.02, \theta_2=4.8, \theta_3=4.08, \theta_4=3.6$	rad	مقادیر مفاصل
$\eta=1.717, \gamma=0.691$	rad	زوایای میله های صلب ربات پوشیدنی

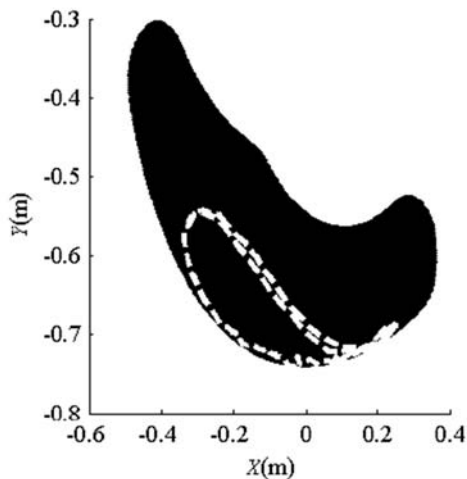


Fig. 12 the workspace and path of the ankle

شکل 12 فضای کاری مچ پای، هنگامی که ربات بر روی پا قرار گرفته است، و مسیر حرکت مچ پا (خط چین)

ربات، به تحلیل دینامیکی ربات پرداخت. معادلات دینامیکی به صورت صریح با استفاده از روابط ارائه شده در بخش‌های قبل برای ربات پوشیدنی با ابعاد بهینه محاسبه خواهد شد. برای اطمینان از صحت روند محاسبات انجام شده، معادلات دینامیکی باید اعتبارسنجی گردند. این اعتبارسنجی با بهره‌گیری از یک مدل نرم‌افزاری از ربات پوشیدنی با مشخصات و پارامترهای مشابه یا استفاده از یک روش دیگر استخراج معادلات انجام می‌پذیرد. در این مقاله برای اعتبارسنجی معادلات دینامیکی از یک روش دیگر استفاده می‌شود. بدین منظور معادلات دینامیکی به روش نیوتن- اوپلر استخراج خواهد

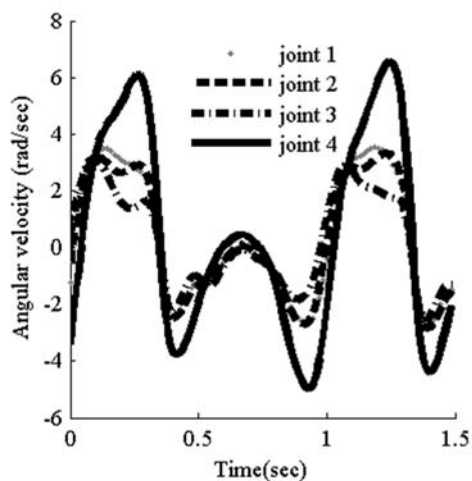


Fig. 13 Angular velocities of all joints of wearable robot during a cycle
شکل 13 سرعت‌های دورانی کلیه مفاصل ربات پوشیدنی در طول یک سیکل حرکت

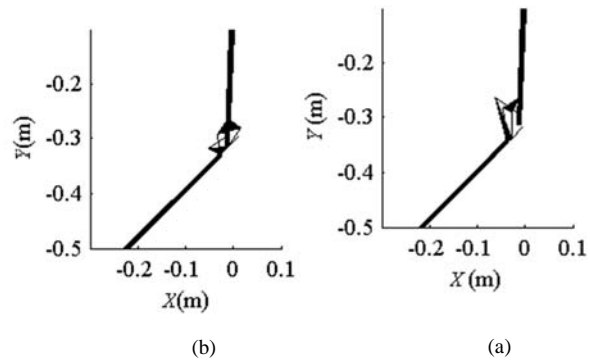


Fig. 10 The wearable robot mounted on the leg by considering initial parameters, (a) optimal parameters, (b)

شکل 10 ربات پوشیدنی با ابعاد غیر بهینه (با در نظر گرفتن پارامترهای اولیه)، (a)، با ابعاد بهینه، (b)

آن متصل است، محدود خواهد شد. در نتیجه در برخی نقاط از مسیر حرکت مچ پای ربات امکان رسیدن کامل به نقطه مورد نظر وجود ندارد. اما رسیدن به این نقطه با تغییر کوچک در زوایای ران و زانو امکان‌پذیر می‌باشد. برای صحت این موضوع، فضای کاری مچ پای ربات و مسیر مطلوب در نشان داده شده است. همان‌طور که در "شکل 12" مشاهده می‌شود، مسیر حرکت مچ پای ربات در فضای کاری ربات قرار دارد.

پس از آن‌که ابعاد بهینه ربات پوشیدنی با ساختار ارائه شده تعیین گردید، در ادامه به تحلیل سرعت‌ها و شتاب‌های ربات پوشیدنی پرداخته می‌شود. برای محاسبه سرعت زاویه‌ای هر یک از مفاصل ربات پوشیدنی فرض می‌شود که سرعت و شتاب خطی مچ پای ربات از مرجع [26] مشخص باشد. حال با معلوم بودن سرعت زاویه‌ای ران θ_{hip} و سرعت زاویه‌ای زانو θ_{knee} با حل معادلات (10) و (11) می‌توان سرعت‌های دورانی و شتاب‌های دورانی را محاسبه نمود. سرعت‌های دورانی کلیه مفاصل ربات پوشیدنی در "شکل 13" و شتاب دورانی در "شکل 14" مشخص شده‌اند.

2-7- اعتبارسنجی معادلات دینامیکی ربات پوشیدنی

حال می‌توان با معلوم بودن ابعاد ربات پوشیدنی و همچنین سینماتیک کامل

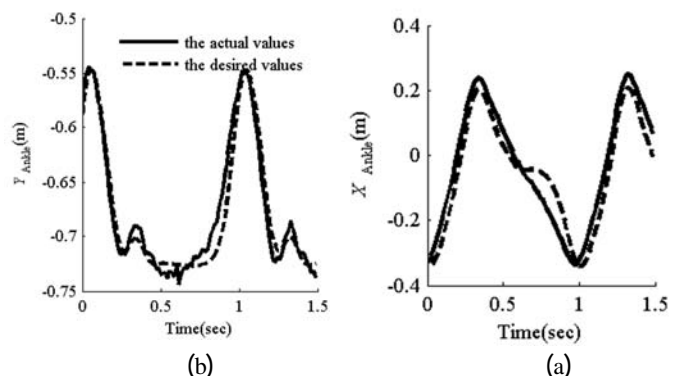


Fig. 11 Trajectories of the ankle of a human with wearable robot and when the robot is mounted on the leg. Terjectory along x-axis, (a), along y-axis, (b)

شکل 11 مسیر زمانی حرکت مچ پای انسان در حالت طبیعی و هنگامی که ربات پوشیدنی بر روی پای متصل است. مسیر زمانی حرکت در راستای X، (a)، مسیر زمانی حرکت در راستای Y، (b)

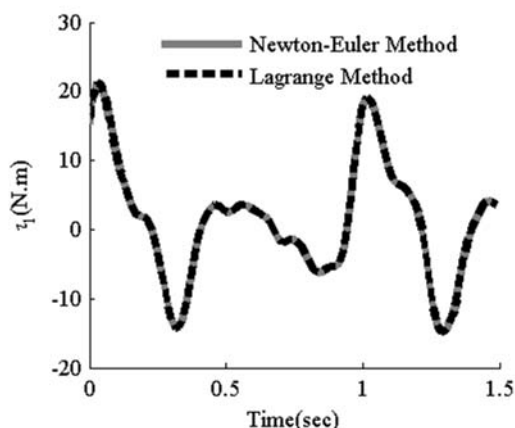


Fig. 16 The torque of the joint 1 of the wearable robot computed by using Lagrange and newton-Euler Methods

شکل 16 گشتاور محاسبه شده برای مفصل اول برای یک سیکل حرکت با استفاده از روش نیوتن-اویلر و لاگرانژ

سختی از یک مقدار بیشتر سبب می‌گردد که فرد برای خم کردن زانو به علت سختی بالا، انرژی زیادی را صرف نماید و حتی ممکن است توان کافی برای خم کردن را نداشته باشد زیرا فنر در هنگام خم شدن زانو انرژی را ذخیره کرده و در هنگام باز شدن انرژی را به ربات باز می‌گرداند. بعد از انجام شبیه‌سازی‌های مختلف فنری با سختی $K = 1000 \text{ N/m}$ انتخاب شده است که نتایج به‌دست آمده، نشان می‌دهد این مقدار سختی، دو هدف مورد نظر را تامین می‌نماید. گشتاور اعمالی به مفصل اول ربات پوشیدنی با افزودن یک فنر در "شکل 17 نشان داده شده است. همان‌طور که مورد انتظار است، گشتاور اعمالی به مفصل اول ربات برای حرکت زانو کاهش می‌یابد. این کاهش را می‌توان در فاز گام‌برداری نیز مشاهده کرد. این بدین معناست که ربات برای حرکت باز کردن مفصل زانو و بستن آن، گشتاور کمتری را اعمال نماید. این ادعای مطرح شده در این مقاله را اثبات می‌نماید. در نتیجه، یک فرد ناتوان که دارای ضعف عضلانی در مفصل زانو می‌باشد، می‌تواند با صرف گشتاور کمتری پای خود را حرکت دهد.

در ادامه عملکرد ربات پوشیدنی با دو فنر که در "شکل 7" نشان داده شده است، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. گشتاور ربات پوشیدنی با دو فنر در "شکل 18" نشان داده شده است. در این حالت مقدار گشتاور نیز نسبت به حالتی که فنر بر روی ربات پوشیدنی قرار ندارد، کاهش می‌یابد. اما کاهش گشتاور نسبت به حالتی تنها یک فنر وجود دارد، بسیار بیشتر می‌باشد. در نتیجه، افزودن المان‌های انعطاف‌پذیر سبب کاهش گشتاور اعمالی به ربات می‌شود و اثر افزودن دو فنر بسیار محسوس‌تر خواهد بود. یکی از راه‌های مقایسه عملکرد ربات پوشیدنی و اثبات کارایی ربات طراحی شده در این مقاله، مقایسه توان مصرفی در طول یک سیکل حرکتی می‌باشد که با افزودن فنر این انتظار وجود دارد که توان مصرفی کاهش یابد. این کاهش توان سبب می‌شود که از ربات فوق بتوان برای کمک به انسان‌های ناتوان در حرکت استفاده کرد زیرا که هدف اصلی طراحی ربات پوشیدنی محقق نمودن این موضوع می‌باشد. برای ربات فوق توان مصرفی از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \int |\tau \dot{q}| dt \quad \text{if } \tau \dot{q} > 0 \quad (39)$$

با محاسبه‌ی توان مصرفی برای ربات پوشیدنی زمانی که هیچ‌گونه المان انعطاف‌پذیری وجود ندارد و همچنین با افزودن یک و دو فنر می‌توان به یک معیار خوب جهت ارزیابی عملکرد ربات ارایه شده، دست پیدا نمود. توان‌های مصرفی هر یک از ربات‌های پوشیدنی در "شکل" مشخص شده است.

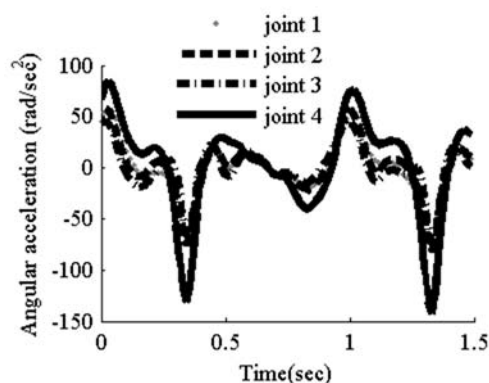


Fig. 14 Angular accelerations of all joints of wearable robot during a cycle

شکل 14 شتاب دورانی کلیه مفاصل ربات پوشیدنی در طول یک سیکل

شده، [22]. سپس سرعت‌ها و شتاب‌های به‌دست آمده در بخش قبل به دو مدل اعمال می‌شود. خطای گشتاور محاسبه شده از دو مدل محاسبه می‌شود. خطای گشتاور وارد بر مفصل اول یعنی τ_1 از ربات در "شکل 15" مشخص شده است. همان‌گونه که از شکل‌ها مشخص است، صحت معادلات دینامیکی کاملاً تایید می‌شود زیرا خطا بسیار بسیار کوچک می‌باشد. گشتاور از دو مدل، محاسبه شده و در "شکل 16" نشان داده شده است.

3-7- تحلیل عملکرد ربات پوشیدنی

در این قسمت به تحلیل عملکرد ربات پوشیدنی پرداخته می‌شود. همان‌طور که توضیح داده شد، هدف اصلی این ربات کاهش انرژی مصرفی ربات یا به عبارت دیگر گشتاور اعمالی به زانو در هنگام حرکت می‌باشد. در این قسمت این موضوع برای ربات‌های پوشیدنی طراحی شده مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بدین منظور ابتدا ربات پوشیدنی با ساختار اولیه، یعنی هنگامی تنها یک فنر به ربات متصل است، مطابق "شکل 6" مورد بررسی قرار می‌گیرد.

حال باید یک فنر با سختی مناسب برای رسیدن به اهداف مورد انتظار از ربات پوشیدنی انتخاب شود. همان‌طور که توضیح داده شد، هدف اصلی از ربات پوشیدنی کمک به افزایش قدرت حرکت زانو می‌باشد. با توجه به این موضوع، انتخاب میزان سختی فنر براساس لحاظ نمودن دو پارامتر مهم انجام می‌شود. این پارامترها عملکرد مطلوب فنر، برای کاهش توان مورد نیاز برای راه رفتن، و همچنین توانایی حرکت زانو با حضور فنر می‌باشد. برای کاهش توان مورد نیاز برای زانو، مطلوب است که سختی فنر افزایش یابد. اما افزایش

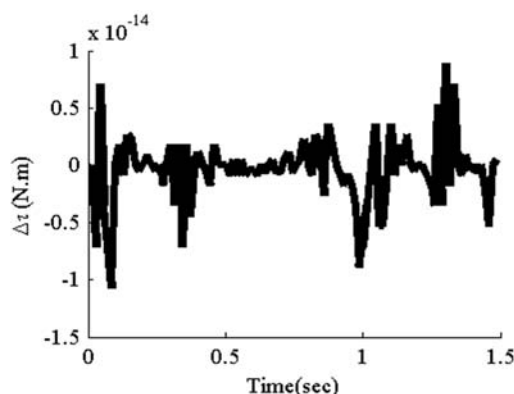


Fig. 15 The error of the torque of the joint 1 of the wearable robot computed by using Lagrange and newton-Euler Methods cycle

شکل 15 خطای گشتاور محاسبه شده از روش لاگرانژ و نیوتن-اویلر

این نوع ساختار، سهولت در فرایند ساخت می‌باشد. زیرا ربات تنها از طریق یک نقطه بر روی ران متصل می‌شود. در حالی‌که در ربات ارائه شده در این مقاله این اتصال از طریق دو نقطه صورت می‌پذیرد. ویژگی دیگر این ساختار، دستیابی به ابعادی از طریق بهینه‌سازی می‌باشد که به تابع هزینه کمتر خواهد رسید و در نتیجه ربات تطابق بهتری با حرکت طبیعی پا دارد. نمونه قبل از ساخت از ربات پوشیدنی در "شکل 21 نشان داده شده است. این مدل در نرم‌افزار Solidworks مدل‌سازی شده است.

8- نتیجه‌گیری

از آنجایی‌که زانو بزرگترین و مهمترین مفصل در بدن می‌باشد، زیرا در حین هر فعالیتی وزن بدن به زانو انتقال داده می‌شود، این مفصل بیش از هر مفصل دیگری در معرض آسیب قرار دارد. افراد به دلایلی مانند ضعف عضلانی، افزایش سن یا آسیب خارجی قادر به ایجاد حرکتی مناسبی در زانو در حین راه رفتن نمی‌باشند. با استفاده از ابزارهای کمکی همچون ربات پوشیدنی می‌توان این ضعف و ناتوانی را جبران نمود. در این مقاله به بررسی و تحلیل ربات پوشیدنی غیرفعال و کمکی پرداخته شده است. این ربات پوشیدنی براساس مکانیزم شش میله‌ای استفسون II جهت رسیدن به تطابق حرکتی با پای انسان، با ساختاری بهینه طراحی شده است. با بهره‌گیری از المان‌های انعطاف‌پذیر در نقاط متفاوت از ربات پوشیدنی می‌توان به ربات پوشیدنی غیرفعال با ابعاد خیلی کوچک دست یافت که در هنگام قرارگیری بر روی پا، برای حرکت زانو باید گشتاور را اعمال نمود و در نتیجه توان کمتری را مصرف نمود. این کاهش توان با افزودن المان‌های انعطاف‌پذیر بیشتر بسیار محسوس‌تر خواهد بود. به طوری‌که با افزودن دو فنر در دو سیکل از حرکت توان مصرفی در راه رفتن تا 10٪ کاهش می‌یابد که این موضوع از اهمیت

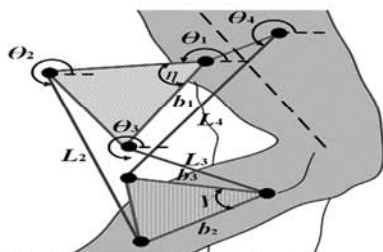


Fig. 20 the modified structure of the wearable robot

شکل 20 ساختار اصلاح شده ربات پوشیدنی

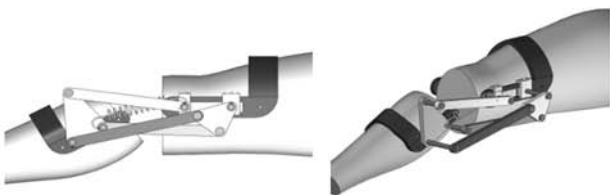


Fig. 21 the CAD model of the wearable robot in different views

شکل 21 مدل نرم‌افزاری ربات پوشیدنی در نماهای مختلف

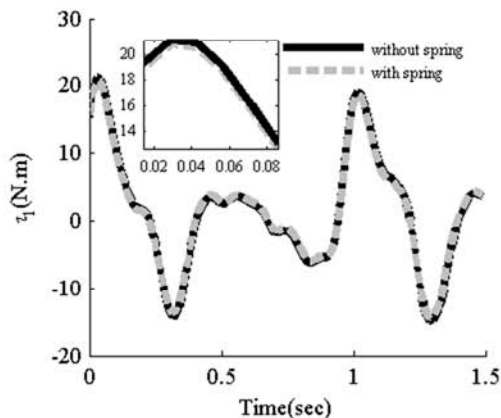


Fig. 17 The torques of the joint 1 of wearable robot and the wearable robot equipped with one spring

شکل 17 گشتاور محاسبه شده در ربات پوشیدنی با یک فنر و بدون فنر

همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، در ربات پوشیدنی با توجه به ساختار ربات ارائه شده، با افزودن فنر در نقاط مناسب می‌توان عملکرد بهتری از ربات طراحی شده دست پیدا نمود. همچنین با توجه به تعداد میله‌های صلب بیشتر، می‌توان تعداد فنرهای بیشتری را نصب نمود که این تعداد فنرها هر کدام سبب ارتقا عملکرد ربات می‌شود.

در ادامه برای بهبود عملکرد ربات پوشیدنی، بعد از بررسی‌های گوناگون مدل ساختاری "شکل 20" ارایه شده است. در این مدل تمامی میله‌ها همانند ربات پوشیدنی ارایه شده در این مقاله می‌باشند به جز مفصل 4 که به اندازه 90 درجه نسبت به مفصل ران دوران کرده است. یکی از ویژگی‌های

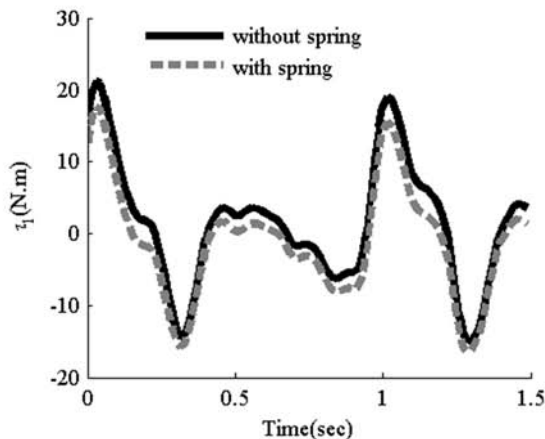


Fig. 18 The torques of the joint 1 of wearable robot and the wearable robot equipped with two springs

شکل 18 گشتاور محاسبه شده در مکانیزم با دو فنر و بدون فنر

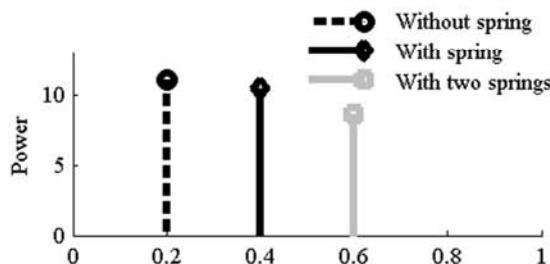


Fig 19 consumption powers for the robot

شکل 19 توان مصرفی ربات با فنر و بدون فنر

ویژه‌های برخوردار است.

9- مراجع

- device for gait rehabilitation with stance control, *Proceeding of International Conference on Intelligent Robotics and Applications*, Busan, South Korea, september 25-28, 2013.
- [13] M. M. Plecnik, J. M. McCarthy, Computational design of Stephenson II six-bar function generators for 11 accuracy points, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 8, No. 1, pp. 9-19, 2016.
- [14] B. Y. Tsuge, J. M. McCarthy, Synthesis of a 10-bar linkage to guide the gait cycle of the human leg, *Proceeding of ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Boston, Massachusetts, USA, August 2-5, 2015.
- [15] K. Shamaei, M. Cenciarini, A. A. Adams, K. N. Gregorczyk, J. M. Schiffman, A. M. Dollar, Design and evaluation of a quasi-passive knee exoskeleton for investigation of motor adaptation in lower extremity joints, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 61, No. 6, pp. 1809-1821, 2014.
- [16] N. R. Costa, D. G. Caldwell, Control of a biomimetic "soft-actuated" lower body 10dof exoskeleton, *Proceeding of 8th IFAC Symposium on Robot Control*, Bologna, Italy, September 06 - 08, 2006.
- [17] K. N. Winfree, P. Stegall, S. K. Agrawal, Design of a minimally constraining, passively supported gait training exoskeleton: ALEX II, *Proceeding of 2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, Zurich, Switzerland, 29 June -01 July, 2011.
- [18] J. F. Veneman, R. Kruidhof, E. E. Hekman, R. Ekkelenkamp, E. H. Van Asseldonk, H. Van Der Kooij, Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 379-386, 2007.
- [19] M. Wirz, C. Bastiaenen, R. de Bie, V. Dietz, Effectiveness of automated locomotor training in patients with acute incomplete spinal cord injury: a randomized controlled multicenter trial, *BMC Neurology*, Vol. 11, No. 1, pp. 60-65, 2011.
- [20] Z. Taha, A. P. A. Majeed, M. Y. W. P. Tze, A. G. A. Rahman, Preliminary investigation on the development of a lower extremity exoskeleton for gait rehabilitation: A Clinical Consideration, *Journal of Medical and Bioengineering* Vol. 4, No. 1, pp. 6-15, 2015.
- [21] P. K. Levanjie, C. C. Norkin, *Joint Structure and Function: A Comprehensive Analysis*, pp. 100-130, Philadelphia: FA Davis, 2011.
- [22] S. Tahmasebi, *Design of an exoskeleton robot to assist the persons with knee pains*, MS Thesis, Department of Mechanical Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, 2015. (in Persian فارسی)
- [23] J. M. McCarthy, G. S. Soh, *Geometric Design of Linkages*, pp.3-70, Berlin: Springer Science & Business Media, 2010.
- [24] J. Ginsberg, *Engineering Dynamics*, pp. 470, New York: Cambridge University Press, 2008.
- [25] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, pp. 100-120, New Jersey: Pearson/Prentice Hall, 2005.
- [26] D. A. Winter, *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*, pp. 296-310, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [1] S. Viteckova, P. Kutilek, M. Jirina, Wearable lower limb robotics: a review, *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, Vol. 33, No. 2, pp. 96-105, 2013.
- [2] E. Yadollahi, *Exoskeleton robot to assist in gait cycle*, MS Thesis, Departement of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, 1390. (in Persian فارسی)
- [3] Y. W. Hong, Y. King, W. Yeo, C. Ting, Y. Chuah, J. Lee, E.-T. Chok, Lower extremity exoskeleton: review and challenges surrounding the technology and its role in rehabilitation of lower limbs, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, Vol. 7, No. 7, pp. 520-524, 2013.
- [4] K. Kiguchi, Y. Imada, EMG-based control for lower-limb power-assist exoskeletons, *Proceeding of Robotic Intelligence in Informationally Structured Space*, Nashville, United States, 30 March-2 April, 2009.
- [5] H. Cao, Z. Ling, J. Zhu, Y. Wang, W. Wang, Design frame of a leg exoskeleton for load-carrying augmentation, *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Guilin Guilin, China, December 19-23, 2009.
- [6] C. Nabeshima, H. Kawamoto, Y. Sankai, Typical risks and protective measures of wearable walking assistant robots, *Proceeding of 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, Kyoto, Japan, December 20-22, 2011.
- [7] J. Zhu, Q. Wang, Y. Huang, L. Wang, Adding compliant joints and segmented foot to bio-inspired below-knee exoskeleton, *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, china, May 09-13, 2011.
- [8] J. Sadowski, Exoskeletons in a disabilities context: the need for social and ethical research, *Journal of Responsible Innovation*, Vol. 1, No. 2, pp. 214-219, 2014.
- [9] M. Bouri, B. Le Gall, R. Clavel, A new concept of parallel robot for rehabilitation and fitness: the lambda, *Proceeding of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Guilin Guilin, China, December 19-23, 2009.
- [10] S. Freivogel, J. Mehrholz, T. Husak-Sotomayor, D. Schmalohr, Gait training with the newly developed 'LokoHelp'-system is feasible for non-ambulatory patients after stroke, spinal cord and brain injury. a feasibility study, *Brain Injury*, Vol. 22, No. 7-8, pp. 625-632, 2008.
- [11] Y. Stauffer, Y. Allemand, M. Bouri, J. Fournier, R. Clavel, P. Metrailler, R. Brodard, F. Reynard, The walktrainer—a new generation of walking reeducation device combining orthoses and muscle stimulation, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 38-45, 2009.
- [12] S. Pyo, M. Oh, J. Yoon, Optimal kinematic design of a novel robotic knee