



## طراحی و بهینه‌سازی زنجیره انتقال قدرت مفصل مچ یک ربات انسان‌نما

مهیار اشکواری<sup>1</sup>، عقیل یوسفی‌کوما<sup>2\*</sup>، مسعود شریعت پناهی<sup>3</sup>، حسین کشاورز<sup>1</sup>

1- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 11155-4563، aykoma@ut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 مرداد 1395

پذیرش: 18 مهر 1395

ارائه در سایت: 24 آبان 1395

کلید واژگان:

ربات انسان‌نما

مکانیزم تحریک مفصل مچ

گشتاور مفاصل

الگوریتم ژنتیک

### چکیده

با توجه به ضرورت افزایش کارایی نسل‌های جدید ربات‌های انسان‌نما، در این مقاله، به منظور افزایش سرعت حرکت ربات انسان‌نما سورنا3، یک مکانیزم انتقال قدرت برای تحریک مفصل مچ پیشنهاد شده و انرژی مصرفی در مکانیزم پیشنهادی و پیشین مورد مطالعه قرار گرفته است. در مکانیزم پیشنهادی، موتورهای محرک مفصل مچ به لینک ساق پا منتقل شده‌اند و به منظور ایجاد حرکت دورانی مچ حول محور طولی، از ترکیب تسمه-پولی و هارمونیک درایو و برای دوران مچ حول محور عرضی، از مکانیزم رولراسکرو استفاده شده است. جهت صحت‌گذاری بر روند طراحی، نتایج شبیه‌سازی حرکت ربات با داده‌های تجربی مقایسه شده‌اند و در نتیجه این روند، مدل دینامیکی با تقریب خوبی با مدل واقعی ربات مطابقت پیدا کرده است. سپس، به منظور ایجاد طراحی مسیر پایدار ربات، از الگوریتم فرآینتاری ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر حرکت ربات بر اساس تابع هدفی که بیشینه انرژی مصرفی مفصل زانو را حداقل می‌کند، استفاده شده است. این فرایند بهینه‌سازی در حرکت مستقیم‌الخط ربات بر روی سطح صاف اعمال شده و در نتیجه این روند، پارامترهای طراحی مسیر بهینه برای مکانیزم پیشنهادی به نحوی بدست آمده‌اند که منجر به کاهش گشتاورهای مفاصل پائین‌تنه ربات نسبت به ربات سورنا3 شده‌اند. همچنین، مکانیزم پیشنهادی با کاهش جرم کف پا، استفاده از موتورهای سبک‌تر و نیز رسیدن به سرعت‌های بالاتر برای ربات را ممکن می‌سازد.

## Design and optimization of an ankle joint actuating mechanism of a humanoid robot

Mahyar Ashkvari, Aghil Yousefi-Koma\*, Masoud Shariat Panahi, Hossein Keshavarz

Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 11155-4563 Tehran, Iran, aykoma@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 20 August 2016  
Accepted 09 October 2016  
Available Online 14 November 2016

**Keywords:**  
Humanoid Robot SURENAIII  
Ankle Joint Actuation Mechanism  
Knee Joint Torque  
Genetic Algorithm

### ABSTRACT

Due to necessity of increasing performance in new generations of the humanoid robots, in this paper, a novel power transmission mechanism to actuate the ankle joint of a humanoid robot is presented in order to increase the motion speed of SURENAIII humanoid robot. Also, the energy consumption of the proposed and the previous mechanisms are studied. In the proposed mechanism, the actuators of the ankle joint are located in the shank link. Then, a combined timing belt-pulley and a harmonic drive module are exploited for power transmission for the pitch joint. Also, the roll joint drive has employed a roller screw. In order to validate the design procedure, the simulation results of the robot are compared with the experimental data. The results reveal that the dynamic model is fairly matched to the real behavior of the robot. Also, the revolutionary genetic algorithm is employed to optimize the effective path planning parameters with respect to the minimum knee joint energy consumption. This optimization procedure which is employed in robot walking on flat terrains consists of straight motion and ensures the robot's stability. As a result, the optimal path planning parameters for proposed mechanism are obtained in such a way that the actuating torques of lower-body of SURENAIII are decreased. Also, the proposed mechanism can be achieved using lighter motors and makes the robot faster by means of mass reduction of foot.

### 1- مقدمه

روند طراحی نقش مهمی را در مدل‌سازی، شبیه‌سازی و پیاده‌سازی ربات در پروژه‌های صنعتی و یا تحقیقاتی ایفا می‌کند. در این میان، طراحی مناسب پائین‌تنه ربات از اهمیت بیشتری برخوردار است زیرا پائین‌تنه ربات بر پایداری حرکت که مهم‌ترین و اساسی‌ترین قابلیت هر ربات دوپا محسوب می‌شود، تأثیر به‌سزایی دارد.

یکی از چالش‌های اساسی در روند طراحی استفاده از مکانیزم‌های انتقال قدرت به منظور تحریک یک مفصل خاص است. این ایده بر اساس ارتفاع

با پیشرفت روزافزون علم و فناوری، نیاز به استفاده از ربات‌ها در حوزه‌های مختلف شامل صنعت، حمل‌ونقل، اکتشافات به جزء جدایی‌ناپذیر زندگی بشر تبدیل شده است. حال در این میان، با توجه به شرایط حاکم بر زندگی انسان‌ها، ساخت ربات‌هایی که ساختاری شبیه به بدن انسان داشته باشند، می‌تواند یک موضوع جذاب و بسیار کاربردی باشد. فعالیت‌های پژوهشی و توسعه‌ای در حوزه ربات‌های انسان‌نما وسیع و گسترده هستند. با این حال،

Please cite this article using:

M. Ashkvari, A. Yousefi Koma, M. Shariat Panahi, H. Keshavarz, Design and optimization of an ankle joint actuating mechanism of a humanoid robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 417-428, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Ashkvari, A. Yousefi Koma, M. Shariat Panahi, H. Keshavarz, Design and optimization of an ankle joint actuating mechanism of a humanoid robot, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 417-428, 2016 (in Persian)

مکانیزم موازی لنگ و لغزنده، حرکت خطی که توسط مکانیزم رولراسکروی خورشیدی ایجاد می‌شود، به حرکت دورانی تبدیل می‌شود [2]. از جمله مزیت‌های این ربات سرعت بالای ربات به دلیل بالا بردن مرکز جرم ربات و اما عیب این ربات استفاده از موتورهای AC در مکانیزم‌های خود می‌باشد که نیاز به استفاده همیشگی از منبع خارجی برای راه‌اندازی ربات است. ربات تورو نیز که از سال 2010 تا 2014 در نسل‌های متفاوتی طراحی و ساخته شد، از یک لینک متصل‌کننده در مفصل مچ خود استفاده می‌کند که خروجی موتور را که در نزدیکی زانو قرار داده شده است، به مفصل مچ منتقل می‌کند. در این ربات یکی از موتورهای مفصل مچ در مچ قرار گرفته و فقط یک موتور از مفصل مچ به میانه لینک ساق منتقل شده که می‌تواند از معایب آن باشد [9,8]. طراحی ربات 33 درجه آزادی سفیر، می‌تواند محک مناسبی برای کارایی عملگرهای خطی باشد چراکه در تمام مفاصل این ربات از عملگرهای خطی استفاده شده است. در این ربات برای تمامی مفاصل از عملگر خطی استفاده شده است که باعث شده ربات نتواند به سرعت‌های بالایی برسد. گواه این مدعا ویدئوهای منتشرشده از عملکرد ربات است [10]. ربات اچ‌آرپی نیز از ربات‌های معروف حوزه ربات‌های انسان‌نما می‌باشد که در نسل‌های متنوعی تولید شده است. در آخرین نسل این ربات‌ها که اچ‌آرپی-4 نام دارد، مشاهده می‌شود که موتورهای مچ پا در لینک ساق پا قرار داده شده‌اند و خروجی آنها با استفاده از عملگر خطی بال‌اسکرو و چرخ‌دنده دورانی<sup>4</sup> به مچ منتقل شده است. این مکانیزم باعث می‌شود که تمرکز جرم و اینرسی در مفصل مچ نباشد و بتوان سرعت ربات را ارتقا داد. این ربات به لحاظ طراحی و عملکرد جز بهترین ربات‌های دنیا می‌باشد اما عیب این ربات را می‌توان در محل قرارگیری موتورها اشاره کرد که در محل مفصل قرار داده شده‌اند [11]. همچنین، چندین طراحی منحصر به فرد را می‌توان در [13,12] مشاهده نمود.

یکی دیگر از مواردی که در بهبود طراحی ربات‌های انسان‌نما صورت گرفته است، بررسی اثر افزودن مفصل پنجه به پای ربات می‌باشد [15,14]. در مورد اهمیت کف پای ربات انسان‌نما شاید اشاره به همین امر کافی باشد که تمامی نیروهای محرک ربات از طریق کف پا به آن وارد می‌شود. همین امر اهمیت بررسی راه‌های تقویت تماس پا با زمین و طراحی کف پای کارآمدتر برای ربات انسان‌نما را مشخص می‌کند. فعالیت‌های اخیر در این زمینه را می‌توان با هدف شباهت حرکت ربات به حرکت انسان [16] معرفی نمود. در کنار قابلیت‌هایی که یک ربات انسان‌نما باید به آنها دست یابد، مطمئناً اولین و مهم‌ترین وظیفه ربات، حفظ تعادل خود در حرکت است. از این رو، مسیرهای تعریف شده برای ربات باید همواره پایداری ربات را تضمین کند. با توجه به درجات آزادی و فازهای مختلف حرکتی ربات‌های دوپا و همچنین با توجه به وظیفه ربات، همواره مسیرهای متعددی برای تحقق وظیفه مورد نظر وجود دارد. از بین این مسیرها، آنهایی که قیود تعادل دینامیکی حرکت را ارضا می‌کنند، قابل قبول هستند. با توجه به این که این مسیرها یکتا نیستند، مسیرهایی مورد توجه هستند که وظیفه دیگری علاوه بر تعادل دینامیکی را ارضا کنند. در بین این موارد، کمینه کردن ورودی کنترلی و انرژی مصرفی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از روش‌ها برای فرموله کردن مسأله طراحی مسیر با قید تعادل دینامیکی، استفاده از تئوری‌های کنترل بیهیسه است. در این زمینه، رستمی و همکاران [17]. با استفاده از اصل ماکزیمم پونتریاگین<sup>5</sup> به طور کلی گشتاورهای فضای مفصلی را کمینه کردند. چوالریا و همکاران با استفاده از مسیرهای چندجمله‌ای درجه

مرکز جرم کلی ربات استوار بوده که توسط کاجیتا توسعه داده شده است [1]. از آنجایی که موتورها و سیستم‌های تحریک تقریباً جرم کلی ربات را تشکیل می‌دهند، بخش بزرگی از جرم یک ربات دوپا برخلاف بدن انسان در پاها مستقر هستند [2]. بنابراین، ایده استفاده از مکانیزم‌های انتقال قدرت در پائین‌تنه یک ربات انسان‌نما به طور رایج در تحریک مفاصل ران [3]، زانو [4] و مچ پا [5] صورت گرفته است. با توجه به اینکه توزیع جرم در لینک‌های مختلف پای ربات به طور مستقیم بر برخی خصوصیات کلی ربات مانند، مکان مرکز جرم و اینرسی کلی پاها، اثر دارد و همچنین کاهش جرم قسمت‌هایی مانند کف پا و مچ که بیشترین شتاب را تحمل می‌کنند باعث بهبود عملکرد دینامیکی سیستم کلی می‌شود، در این پژوهش سعی شده است که با طراحی یک مکانیزم مناسب موتورهای مفصل مچ به میانه لینک ساق منتقل شوند.

در فرایند طراحی یک ربات انسان‌نما، انتخاب محرک‌های مناسب به صورت قابل توجهی بر عملکرد ربات تأثیر می‌گذارد [6]. محرک‌ها رابطه مستقیمی با نوع شاسی دارند که این مسأله یکی از محدودیت‌ها در انتخاب محرک مناسب است. به طور کلی، این سیستم‌ها به چهار دسته نیوماتیک، هیدرولیک، الکتریکی و خطی تقسیم‌بندی می‌شوند. موتورهای DC به طور معمول در ربات‌های انسان‌نما مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا سیستم تأمین انرژی این موتورها، باتری‌های سبک بوده که به راحتی قابل شارژ و حمل و نقل هستند. این درحالی است که محرک‌های هیدرولیک نیازمند مخزن روغن، تعداد بسیار زیادی شیر هیدرولیک و ادوات جانبی است که قابل حمل و نقل هم نیستند. محرک‌های نیوماتیک نیز نیازمند کمپرسور هوای فشرده بوده که به راحتی قابل جاسازی در بدنه ربات نیستند. از منظری دیگر، دقت کنترلی موتورهای الکتریکی با توجه به انکودر<sup>1</sup>‌های دقیق، به نسبت بالاست. محرک‌های هیدرولیک نیز دقت کنترلی بالایی دارند اما با توجه به امکان نشت روغن و آتش‌سوزی گزینه مناسبی به نظر نمی‌رسند. محرک‌های نیوماتیک نیز به علت تراکم‌پذیری هوا دقت بالای کنترلی ندارند. همچنین، در دسترس بودن درایورهای مختلف الکتریکی یکی دیگر از مزایای موتورهای الکتریکی است. در صورتی که ادوات هیدرولیک قیمت‌های بسیار بالایی دارند و خیلی دردسترس نیستند.

یکی دیگر از عوامل در فرایند طراحی که در سرعت راه رفتن ربات نیز مؤثر است، سیستم انتقال قدرت می‌باشد. انتقال قدرت بسته به نوع شاسی و محرک‌ها می‌تواند دارای انواع و اشکال متفاوت باشد. انتقال قدرت نیز می‌بایست با دقت طراحی و ساخته شود، چراکه به وسیله انتقال قدرت، نیروی محرکه ربات قادر به حرکت دادن ربات می‌باشد. مکانیزم‌های رایج انتقال قدرت عبارتند از: تسمه-پولی، تسمه-فنر، جعبه‌دنده، کابل [7]، بال‌اسکرو<sup>2</sup> و رولراسکرو<sup>3</sup> و لینک‌های متصل‌کننده. کاربرد این مکانیزم‌ها را می‌توان در چند ربات انسان‌نما مشهور مورد مطالعه قرار داد. یکی از این ربات‌ها، ربات لولا است که در موسسه مکانیک کاربردی دانشگاه صنعتی مونیخ طراحی و ساخته شد. سیستم انتقال قدرت برای بیشتر مفاصل هارمونیک درایو است، به جز مفاصل زانو و مچ که در آنها از مکانیزم‌های متفاوتی استفاده شده است. در زانو، موتور یک مکانیزم رولراسکروی خورشیدی را به حرکت در می‌آورد که در واقع حرکت دورانی به حرکت خطی تبدیل می‌شود. سپس از یک مکانیزم چهار میله‌ای حرکت انتقالی به حرکت دورانی در زانو تبدیل می‌شود. در مچ نیز با استفاده از یک جفت

<sup>1</sup> Encoder<sup>2</sup> Ball Screw<sup>3</sup> Roller Screw<sup>4</sup> Bevel<sup>5</sup> Pontryagin Maximum Principle (PMP)

انتقال قدرت تسمه-پولی، هارمونیک درایو و رولراسکرو، حرکات دورانی مفصل مچ تأمین می‌شود. اما عامل دوم، بررسی اثر پارامترهای طراحی مسیر بر روی گشتاور مفاصل است که این پارامترها منحصر از تجربه عملی ساخت ربات سورنا3 به دست آمده‌اند. از این رو، با توجه به اهمیت گشتاور مفصل زانو، برای بررسی تأثیر این پارامترها، به بهینه‌سازی پارامترهای منحصر به فرد طراحی مسیر لگن ربات به کمک الگوریتم ژنتیک بر اساس تابع هدفی که ماکزیمم انرژی مصرفی زانو را مینیمم کند، پرداخته شده است. لازم به ذکر است که این پارامترهای طراحی مسیر که همان پارامترهای بهینه‌سازی محسوب می‌شوند، بر اساس تجربه عملی بدست آمده از ساخت ربات سورنا3 انتخاب شده‌اند و در هیچ نمونه خارجی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. به منظور بررسی کارایی مکانیزم پیشنهادی، این روند بهینه‌سازی بر روی مدل ربات انسان‌نما سورنا3 و مدل ربات با مکانیزم جدید اعمال شده است. نتایج حاکی از آن است که مقدار گشتاور مفاصل پائین‌تنه به ازای مکانیزم پیشنهادی دارای کاهش قابل توجهی نسبت به ربات سورنا3 است که این مسأله می‌تواند منجر به انتخاب موتورهای سبک‌تری برای پائین‌تنه ربات شود.

## 2- روند طراحی مکانیکی

### 2-1- بررسی مکانیزم‌های انتقال قدرت رایج

یکی از انواع رایج سیستم‌های انتقال قدرت در ربات‌های انسان‌نما، تسمه-پولی است. به طور کلی، تسمه دارای انواع مختلف تخت، گرد، V شکل و تسمه تایم می‌باشد. حال در این میان، تسمه تایم به علت ناچیز بودن مقدار لغزش و سر خوردن تسمه بر روی پولی به طور رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر مزایای این سیستم می‌توان به امکان تغییر سرعت و یا انتقال حرکت بین دو شفت عمود بر هم و توانایی انتقال قدرت بالا اشاره کرد. گاهی در قسمتی از تسمه سامانه انتقال قدرت، یک یا چند فنر بکار می‌رود که در این صورت به این نوع سامانه انتقال قدرت، سامانه تسمه-فنر گفته می‌شود. این مکانیزم در نسل جدیدی از ربات‌های ساخته‌شده با مکانیزم تسمه-پولی مشاهده شده است که دلیل استفاده از آن از بین بردن لقی و ارتعاشات ناخواسته می‌باشد.

نوع دیگری از مکانیزم‌های رایج انتقال قدرت در ربات‌های انسان‌نما، جعبه‌دنده است. به این علت که عموماً موتورهای انتخابی برای ربات‌ها از گشتاور بالایی برخوردار نیستند (سرعت بالایی دارند)، و در ربات انسان‌نما به گشتاور بالا احتیاج است، لذا استفاده از جعبه‌دنده‌ها عموماً ضروری می‌باشد. یکی از نکات مهم در استفاده از جعبه‌دنده‌ها، پدیده برگشت است. به این معنی که هنگام درگیری میان چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده مقداری فاصله وجود دارد و هنگامی که محرک‌ها در حالت ایستایی قرار می‌گیرند، چرخ‌دنده‌ها به عقب بازمی‌گردند که این اتفاق در کنترل دقیق ربات تأثیر می‌گذارد. برای رفع این مشکل، جعبه‌دنده‌های دیفرانسیلی و هارمونیک یکی از راهکارها می‌باشند. در این نوع جعبه‌دنده‌ها، چرخ‌دنده‌ها با هم در هر لحظه تماس داشته و در نتیجه، بازگشت بسیار جزئی و قابل صرف‌نظر است. از مزایای مهم هارمونیک درایو می‌توان به نسبت تبدیل بسیار بالا در فضا و وزن کم، ظرفیت گشتاور بالا، سختی بالا، بدون پس‌زنی، دقت چرخشی بالا، بازده بالا، عملکرد روان و هموار و ورودی و خروجی هم‌محور اشاره کرد. یکی دیگر از استفاده‌های مهم دیگر جعبه‌دنده‌ها، تبدیل حرکت دورانی به حرکت خطی می‌باشد که در محرک‌های خطی بسیار حائز اهمیت است.

کابل‌ها نیز یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین مکانیزم‌های انتقال قدرت

چهارم در فضای مفاصل، علاوه بر کمینه کردن ورودی کنترلی، انرژی مصرفی کل ربات را نیز کمینه کردند [18]. کبی و همکاران [19]، از بین مسیره‌های پایدار، حرکت با کمترین نوسانات در ورودی کنترلی را استخراج کردند. بسونت و همکاران [20]، مسأله بهینه‌سازی بر اساس مدل دینامیکی را با استفاده از PMP و مسیره‌های چندجمله‌ای و با استفاده از بهینه‌سازی پارامتری، فرموله کردند. صدیق و منصور [21]، از آنالیز صفحه فاز برای استخراج مسیر حرکت بهینه زمانی با استفاده از مدل دینامیکی و قیود مربوطه در فازهای تک‌تکیه‌گاهی و دو تکیه‌گاهی استفاده کردند. در این پژوهش‌ها، مسأله بهینه‌سازی به صورت جستجو در بین تمامی مسیره‌هایی که قیود تعادل دینامیکی را ارضا می‌کنند و از طرفی یک تابع هدف را کمینه یا بیشینه می‌کنند، بیان شده است.

برای برقراری قیود تعادل دینامیکی (امکان‌پذیری حرکت)، بسیاری از تحقیقات از نقاط مرجع بر روی سطح زمین<sup>1</sup> [22] استفاده می‌کنند. یکی از نقاط مرجع که برای فرموله کردن قیود تعادل دینامیکی به کار می‌رود، نقطه گشتاور صفر<sup>2</sup> است. این معیار که توسط ووکوبراتووویچ و استپانکو ارائه شد [23]، به صورت گسترده در فرایند طراحی مسیر برای ربات‌های پادار و بالاخص ربات‌های دوپا مورد استفاده قرار گرفته است. این معیار تنها برای حرکت بر روی سطوح صاف و در حالتی که اصطکاک به حد کافی است، برقرار می‌باشد. به منظور ایجاد الگوهای حرکت پایدار به کمک این معیار، معمولاً دو دیدگاه اتخاذ می‌شود. در دیدگاه اول، از مدل پاندول معکوس ساده برای ایجاد الگوهای حرکت بلادرنگ<sup>3</sup> استفاده می‌شود [24]. در حالی که، دیدگاه دوم خصوصیات لینک‌های ربات را مانند جرم، موقعیت مرکز جرم، ممان اینرسی اجزا و غیره برای ایجاد الگوهای حرکتی خارج‌خط<sup>4</sup> به کار می‌برد. بنابراین، روش دوم از مدل کامل ربات به همراه مقادیر دقیق پارامترها استفاده می‌کند و در نتیجه موقعیت نقطه گشتاور صفر به طور دقیق محاسبه خواهد شد که این مسأله منجر به برتری این روش در ایجاد الگوهای حرکتی بهینه خواهد شد. در این زمینه، هوانک و همکاران مسأله طراحی مسیر را به صورت جستجو در بین تمام مسیره‌های لگن و پیدا کردن الگویی که بیشترین حاشیه پایداری را ایجاد کند، بررسی کردند [25]. داوو و همکاران نیز مسیره‌های لگن و پا را برای ایجاد حرکت‌هایی با انرژی کافی به طور پارامتری مطالعه کردند [26].

از آنجایی که بزرگترین مشکل برای دستیابی ربات‌های انسان‌نما به سرعت 1 کیلومتر بر ساعت و بالاتر از آن، محدودیت جریان موتورها یا به عبارت دیگر گشتاور و سرعت زاویه‌ای مفاصل می‌باشد، لذا برای حل این مشکل می‌توان دو عامل مهم را مورد بررسی قرار داد. عامل اول، که رایج‌ترین راه حل محسوب می‌شود و در نمونه‌های خارجی نیز مورد استفاده قرار گرفته است، این است که با تغییر پارامترها و طراحی جدید سرعت حرکت افزایش پیدا کند. این پارامترها عبارتند از ویژگی‌های فیزیکی لینک‌ها از جمله جرم اعضا، طول آنها و پارامترهای مرتبط با مفاصل. با توجه به مرور صورت گرفته بر ربات‌های معروف و تلاش برای رفع معایب موجود در طراحی آنها، در این پژوهش یک مکانیزم انتقال قدرت به منظور تحریک مفصل مچ پا ارائه شده است. مکانیزم پیشنهادی در راستای بهبود مکانیزم تحریک مفصل مچ سورنا3 طراحی شده است به طوری که در آن موتورهای تحریک مفصل مچ برخلاف ربات سورنا3 به لینک ساق منتقل شده و با استفاده از مکانیزم‌های

<sup>1</sup> Ground Reference Points

<sup>2</sup> Zero Moment Point (ZMP)

<sup>3</sup> Real-Time

<sup>4</sup> Offline



Fig. 1 SURENAIII humanoid robot

شکل 1 ربات انسان‌نما سورنا 3

Fig. 2 Entire structure and ankle drive system of SURENAIII's left leg  
شکل 2 ساختار کلی و سیستم تحریک مچ پا چپ ربات سورنا 3

جرم ربات توانایی ربات برای حفظ تعادل سیستم را افزایش می‌دهد. از منظری دیگر، در صورتی که انتهای پا سبک‌تر باشد، در هنگام بلند کردن پا از روی زمین به گشتاور و نیروی کمتری نیاز است و همچنین در هنگام گذاشتن پا بر روی زمین شاهد ضربات ناخواسته کمتری خواهیم بود. با توجه به این که این ضربات یکی از عوامل محدود کننده سرعت ربات تشخیص داده شده‌اند، به نظر می‌رسد این ایده تا حد زیادی بتواند موجب بهبود رفتار دینامیکی سیستم شود [2].

حل ممکن برای حرکت عرضی مرکز جرم بخشی از منحنی هیپربولیک است که به صورت معادله (1) در [1] ارائه شده است:

$$\Delta y_{CoM} \propto \cosh\left(\sqrt{\frac{g}{z_{CoM}}} T_s\right) \quad (1)$$

بر اساس معادله (1)، در یک حرکت متناوب با دوره تناوب  $T_s$ ، هرچه میزان ارتفاع مرکز جرم از زمین ( $z_{CoM}$ ) بیشتر باشد، در هنگام حرکت تغییر مکان افقی مرکز جرم ( $\Delta y_{CoM}$ ) کمتر خواهد بود. در این معادله پارامتر  $g$  شتاب گرانش را معرفی می‌کند. بنابراین، افزایش ارتفاع مرکز جرم ربات یک راه اساسی برای افزایش پایداری ربات‌های انسان‌نما می‌باشد. از این رو، در این پژوهش تغییر جانمایی موتورهای مچ پای ربات بررسی شده است. باید توجه داشت که این تغییر در جانمایی موتورها معمولاً موجب می‌شود که برای انتقال نیرو، به سیستم‌های پیچیده‌تری نیاز باشد که این امر خود می‌تواند موجب افزایش ممان اینرسی سیستم انتقال قدرت شده و همچنین احتمال بروز لقی در سیستم را افزایش دهد. بدین خاطر، با توجه به خصوصیات ارائه شده در بخش 1-2، مکانیزم جدیدی پیشنهاد شده است. در این مکانیزم که

در ربات‌های انسان‌نما می‌باشند. این سامانه، به سامانه انتقال قدرت در انسان شباهت دارد. در انسان ماهیچه‌ها که به عنوان محرک عمل می‌کنند، در انتهای تار ماهیچه نازک شده و تغییر بافت می‌دهند و به تاندون تبدیل می‌شوند. این تاندون‌ها که به قسمت‌های خاصی از اسکلت متصل می‌شوند، انتقال قدرت را میسر می‌سازند. در برخی از ربات‌های انسان‌نمای پیشرفته که از موتورهای خطی و محرک‌های نیوماتیک استفاده می‌شود، انتقال قدرت به وسیله کابل صورت می‌پذیرد. کابل می‌بایست انعطاف‌پذیر و در عین حال بسیار محکم باشد. مزیت مهم استفاده از کابل‌ها، تشابه بیشتر ربات به انسان است که به وسیله آن ربات‌ها در آینده می‌توانند حرکات انسان را به راحتی شبیه‌سازی کنند.

در مفاصل زانو و مچ پا نیاز به تبدیل حرکت چرخشی موتور به حرکت انتقالی می‌باشد. در این مواقع و برای چنین کاربردهایی بال‌اسکرو و رولراسکرو بسیار مناسب می‌باشند. از ویژگی‌های آنها می‌توان به بازده بالا، عملکرد با صدای کم اشاره کرد. در بال‌اسکرو با استفاده از توپ به عنوان عضو غلتان برای انتقال توان استفاده می‌شود اما در رولراسکرو از عضوهای غلتکی برای انتقال توان استفاده می‌شود. از آنجا که در رولراسکرو نسبت به بال‌اسکرو تعداد نقاط تماسی بیشتر است، برای بارهای استاتیکی و دینامیکی بزرگ‌تر مناسب می‌باشند و کارایی بیشتری دارند. همچنین، از آنجایی که عمر کاری بال‌اسکرو نسبت به هارمونیک درایو و رولراسکرو بسیار کمتر است و عمر کاری در انتخاب مکانیزم مناسب نقش کلیدی دارد، پس نمی‌تواند گزینه خوبی باشد. اما رولراسکرو و هارمونیک درایو می‌توانند گزینه‌های خوبی باشند زیرا دارای ویژگی‌های مناسبی در مورد بار قابل تحمل، ظرفیت توانی و بازده دارند.

## 2-2- ساختار مکانیکی ربات انسان‌نما سورنا 3

ربات انسان‌نما سورنا 3، که در شکل 1 نشان داده شده است، دارای 12 درجه آزادی در پایین‌تنه و 19 درجه آزادی در بالاتنه خود می‌باشد. هر پای ربات دارای 6 درجه آزادی است که شامل 3 درجه آزادی برای لگن، 1 درجه برای زانو و 2 درجه برای مچ است. همچنین، هر کدام از دست‌های ربات دارای 7 درجه آزادی (3 درجه آزادی برای شانه، یک درجه آزادی برای آرنج و 3 درجه نیز برای مچ) و هر کف دست یک درجه آزادی (گریپر ساده)، کمر یک درجه و گردن نیز 3 درجه آزادی است.

ساختار پای 6 درجه آزادی این امکان را فراهم می‌آورد تا کف پای ربات حرکت سریعی نسبت به لگن ربات داشته باشد. سه درجه آزادی در ران ربات به گونه‌ای طراحی شده‌اند که محورهای مفاصل در یک نقطه یکدیگر را قطع می‌کنند که این مسأله به روند استخراج حل سینماتیک معکوس ربات به فرم بسته کمک می‌کند. همچنین، مفاصل طولی و عرضی ران ربات به کمک چهارشاخ به یکدیگر متصل شده‌اند تا دو درجه آزادی با هم تلافی داشته باشند. در مفصل مچ نیز از مکانیزمی مشابه ران برای تحقق تقاطع دو درجه آزادی این مفصل استفاده شده است. همچنین، مفاصل پائین‌تنه ربات به کمک موتورهای EC و ترکیبی از تسمه تایم-پولی و هارمونیک درایو به عنوان سیستم انتقال قدرت تحریک شده‌اند. در شکل 2 مدل پای چپ ربات به همراه مکانیزم تحریک مفصل مچ آن مشخص شده است.

## 2-3- ساختار مکانیکی مکانیزم پیشنهادی

انتظار می‌رود ایده بالا بردن بردن ارتفاع مرکز جرم پاهای ربات حداقل از دو جنبه بتواند بر روی دینامیک سیستم مؤثر باشد. از یک منظر، بالا بردن مرکز

لازم به ذکر است که انتخاب مواد مناسب در روند طراحی با توجه به امکان مونتاژ آن مسأله مهمی است. از این رو، به منظور سبک کردن ربات از آلومینیوم استفاده شده است.

### 3- مدل دینامیکی ربات

در این پژوهش، به منظور به دست آوردن گشتاورهای مفاصل ربات، مفاصل بالاتنه به صورت ثابت (فیکس) در نظر گرفته شده است. در واقع، کل بالاتنه ربات به صورت یک جسم صلب مجزا مدل شده است. بنابراین، معادلات دینامیکی برای رباتی با 12 درجه آزادی فعال استخراج شده است. با توجه به پیچیدگی‌های دینامیکی موجود در ربات‌های انسان‌نما، روند مدلسازی به دو قسمت مجزا تقسیم شده است. در واقع، پس از استخراج معادلات به فرم تحلیلی برای سمت بار و استخراج معادلات با استفاده از شناسایی برای سیستم تحریک، کافی است این دو دینامیک با هم ترکیب شوند تا گشتاور مورد نیاز برای موتور در طول حرکات مختلف استخراج شود.

#### 3-1- مدل‌سازی دینامیک سمت بار

منظور از سمت بار، تمام اجزا بعد از خروجی سیستم تحریک (خروجی هارمونیک درایو) است که با توجه به اینکه در این حالت، فقط اینرسی و وزن لینک‌های ربات دو عامل تعیین کننده هستند، لذا استخراج معادلات به فرم تحلیلی می‌تواند بسیار کارساز باشد. در واقع، در این حالت دینامیک موتورهای در نظر گرفته نمی‌شود. از طرفی، به علت درجات آزادی بالا، حجم بالای محاسبات و احتمال خطا در محاسبات، صحت‌گذاری معادلات ضروری است. در این حالت، معادلات کلی حرکت به صورت معادله (4) خواهد بود:

$$M_{18 \times 18}(q)\ddot{q}_{18 \times 1} + C_{18 \times 1}(q, \dot{q}) + G_{18 \times 1}(q) = Q_{18 \times 1} \quad (4)$$

در معادله (4)، بردار  $q$ ، بردار مختصات تعمیم‌یافته است که حرکت ربات دوبا را توصیف می‌کند. این بردار که در معادله (5) معرفی شده است، شامل موقعیت مکانی و دورانی پلویس ( $q_p$ ) و زوایای مفصلی مربوط به پای چپ ( $q_l$ ) و راست ربات ( $q_r$ ) می‌باشد:

$$q = [q_p \ q_r \ q_l]^T \quad (5)$$

همچنین، ترم‌های سمت چپ معادله (4) به ترتیب شامل اثرات اینرسی ( $M\ddot{q}$ )، اثرات گریز از مرکز و کوریولیس ( $C$ ) و اثرات گرانشی ( $G$ ) می‌باشند. ترم‌های سمت راست معادله (4) نیز بردار نیروهای تعمیم‌یافته است که در واقع نگاشت گشتاورهای تحریک مفاصل و نیروها و گشتاورهای تماسی را به فضای مختصات تعمیم‌یافته نشان می‌دهد (معادله (6)):

$$Q = B\tau + \sum_{i=1}^N J_i^T F_i \quad (6)$$

در معادله (6)،  $B$  یک ماتریس انتخابی است که اثرات گشتاورهای تحریک مفاصل را به فضای مختصات تعمیم‌یافته می‌نگارد. با توجه به این‌که پارامترهای زوایای نسبی مفاصل پا به عنوان مختصات تعمیم‌یافته در نظر گرفته شده‌اند، ماتریس  $B$  را می‌توان به صورت معادله (7) و بر حسب ماتریس‌های صفر و واحد بیان کرد:

$$B = [0_{12 \times 6} \quad I_{12 \times 12}]^T \quad (7)$$

همچنین،  $\tau$ ، بردار گشتاورهای تحریک مفاصل پا،  $J_i$  ماتریس ژاکوبین نقاط تماس و  $F$  نیز برداری شامل نیروها و گشتاورهای تماسی می‌باشد. از طرفی،  $N$  نیز تعداد نقاط تماس کف پای ربات را با سطح مشخص می‌کند. با توجه به اینکه مقدار کمیت  $N$ ، در فازهای مختلف حرکتی متغیر می‌باشد، لذا در

در شکل 3 نشان داده شده است، موتورهای تحریک مفصل مچ به میانه لینک ساق منتقل شده‌اند و به منظور ایجاد حرکت دورانی مچ حول محور طولی از ترکیب تسمه-پولی و هارمونیک درایو و برای دوران مچ حول محور عرضی از مکانیزم رولر اسکرو استفاده شده است. همچنین، بار خروجی موتورها به کمک لینک‌های رابط به مفاصل منتقل شده است. به عبارت دیگر در این مکانیزم، چرخش شافت موتور الکتریکی به وسیله تسمه و پولی به چرخش پیچ رولر اسکرو که در ساق پا تعبیه شده است منتقل می‌شود. به این ترتیب مهره حرکت خطی می‌کند و طول اتصال پیچ تغییر می‌کند. به این ترتیب نسبت تبدیل بین چرخش موتور الکتریکی و تغییر زاویه مفصل مچ پا شامل سه بخش است: نسبت تبدیل پولی، نسبت تبدیل گام پیچ و نسبت تبدیل هندسی اتصال پیچ و لنگ.

#### • نسبت تبدیل پولی

این نسبت که ناشی از اختلاف قطر دو پولی بوده و حرکت چرخشی شافت موتور الکتریکی را به چرخش پیچ بال اسکرو تبدیل می‌کند، به صورت معادله (2) بیان شده است:

$$N_{p,a} = \frac{\dot{q}_{m,a}}{\dot{q}_{s,a}} = \frac{R_{p_s}}{R_{p_m}} \quad (2)$$

در این رابطه  $\dot{q}_{s,a}$  و  $\dot{q}_{m,a}$  به ترتیب سرعت چرخش موتور الکتریکی و پیچ بال اسکرو مچ پا است. همچنین  $R_{p_s}$  و  $R_{p_m}$  به ترتیب طول قطر پولی متصل به شافت موتور و پیچ است.

#### • نسبت تبدیل گام پیچ

این نسبت ناشی از طول گام پیچ بال اسکرو است و حرکت چرخشی شافت موتور را به حرکت خطی پیچ تبدیل می‌کند. مقدار این نسبت به ازاء طول گام پیچ  $l_{s,a}$  به صورت معادله (3) می‌باشد:

$$N_{s,a} = \frac{\dot{q}_{s,a}}{v_{s,a}} = \frac{2\pi}{l_{s,a}} \quad (3)$$

در این رابطه  $\dot{q}_{s,a}$  سرعت چرخش پیچ و  $v_{s,a}$  سرعت خطی پیچ مچ پا است.

#### • نسبت تبدیل هندسی اتصال پیچ

این نسبت ناشی از نحوه و هندسه اتصال پیچ و لنگ به ساق و کف پا است و حرکت خطی پیچ را به چرخش مچ پا تبدیل می‌کند. مفصل مچ پا دارای دو درجه آزادی رول و پیچ است و در مکانیزم مچ پا حرکت هم‌زمان هر دو پیچ، چرخش مورد نظر را در مچ پا موجب می‌شود. از این رو چرخش مفصل مچ پا تابعی غیر خطی از حرکت خطی هر دو پیچ است و به طور مشخص نمی‌توان به فرم معمول نسبت تبدیل مشخصی را برای آن یافت. باید رابطه سینماتیکی بین حرکت خطی پیچ و چرخش مفصل مچ پا را پیدا نمود.

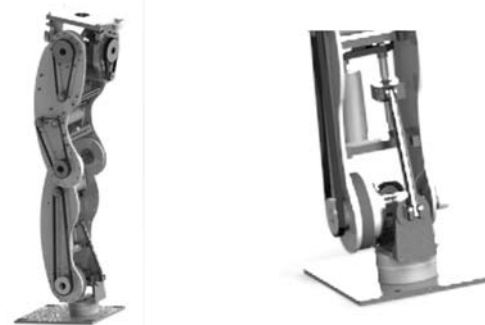


Fig. 3 Entire structure and ankle drive system of proposed left leg

شکل 3 ساختار کلی و سیستم تحریک مچ پا چپ پیشنهاد شده

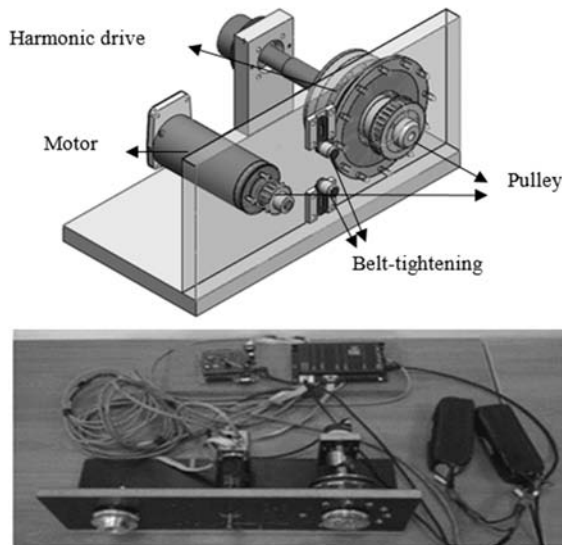


Fig. 4 Test bench for modeling drive system

شکل 4 بستر ساخته‌شده به منظور مدل‌سازی سیستم تحریک

جدول 1 پارامترهای شناسایی‌شده سیستم تحریک

Table 1 Identified parameters of drive system

پارامتر مجهول مدل پیشنهادی	مقدار پارامتر شناسایی شده
$J$	-10.1776
$b$	-64.8774
$d$	15.2394
$m$	-20.1202

#### 4- طراحی مسیر پایدار و معرفی پارامترهای تأثیرگذار بر آن

روند کلی طراحی مسیر مناسب برای ربات‌های انسان‌نما در شرایط محیطی مختلف به این صورت است که ابتدا، متناسب با سطحی که ربات بر روی آن حرکت می‌کند، مسیر مچ پا طراحی می‌شود. سپس، به منظور ارضا قیود محیطی وارد بر محل تماس کف پا و سطح زمین که پایداری حرکت را تضمین می‌کنند، طراحی مسیر برای لگن صورت می‌گیرد. در نهایت، با استفاده از سینماتیک معکوس برای هر یک از پاها، مسیرهای مطلوب از فضای کاری به فضای مفصلی نگاشته می‌شوند. این زوایای مفصلی به‌دست آمده در محاسبه گشتاور موتورها و در مسأله پایداری ربات نقش اساسی را ایفا می‌کنند. از آنجایی که بی‌شمار مسیر برای لگن وجود خواهد داشت که مسأله پایداری را تضمین کنند، لذا در تحقیق پیش‌رو به دنبال مسیری خواهیم بود که کمترین انرژی مصرفی مفصل زانو را در حین حرکت نیز فراهم آورد. لذا، مسأله یافتن مسیر پایدار به صورت فرایند بهینه‌سازی انرژی مصرفی مفصل زانو در عین ایجاد حرکت پایدار مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

شایان ذکر است که روال طراحی مسیر پیشنهادی و روابط مورد استفاده در هر قسمت در [28] به طور کامل‌تر بیان شده است.

در واقع، مسأله طراحی مسیر و پایداری را می‌توان این گونه به هم مرتبط کرد که با طراحی مسیر برای نقطه گشتاور صفر که در واقع نقطه‌ای است که در آن، برآیند نیروهای وارده از طرف زمین به پای ربات وارد می‌شود، به نحوی که مجموع ممان‌هایی که در صفحه افق به کف پای ربات وارد می‌شود صفر باشد [23]، مسیر نقطه گشتاور صفر مطلوب حاصل می‌شود و تا وقتی که این نقطه درون چندضلعی تکیه‌گاهی قرار داشته باشد، ربات می‌تواند حرکت پایدار داشته باشد.

هر حالت سمت راست معادله دینامیکی متفاوت خواهد بود. در واقع، برای استخراج معادلات حرکت، ابتدا ربات بدون هیچ گونه تعاملی با محیط در نظر گرفته شده و معادلات برای این حالت توسعه داده می‌شوند. سپس، در فازهای مختلف حرکتی، قیدهایی ناشی از تعامل با محیط به صورت نیروهای مجهول وارد معادلات می‌شوند. در این حالت، تماس بین پا و زمین صلب فرض می‌شود و در نتیجه قیود بین پا و زمین به صورت هولونومیک بیان شده و وارد معادلات می‌شوند. در نهایت، برای هر حالت و برای حرکتی مشخص، معادلات دینامیک معکوس حل می‌شود تا گشتاورهای مورد نیاز در سمت بار برای تحقق حرکت مورد نظر و نیروها و گشتاورهای تکیه‌گاهی بدست آیند. با توجه به معادلات حرکت در فاز تک تکیه‌گاهی که در معادله (8) آورده شده است، مشخص است که نیروها و گشتاورهای یکتایی، طبق معادله (9)، برای حرکت بدست می‌آیند:

$$M_{18 \times 18}(q)\ddot{q}_{18 \times 1} + C_{18 \times 1}(q, \dot{q}) + G_{18 \times 1}(q) = [B J^T]_{18 \times 18} \begin{bmatrix} T \\ f \end{bmatrix}_{18 \times 1} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} T \\ f \end{bmatrix}_{18 \times 1} = [B J^T]_{18 \times 18}^{-1} (M_{18 \times 18}(q)\ddot{q}_{18 \times 1} + C_{18 \times 1}(q, \dot{q}) + G_{18 \times 1}(q)) \quad (9)$$

اما در حالت دو تکیه‌گاهی که معادله آن در رابطه (10) بیان شده است، به علت اینکه پاها یک زنجیره بسته سینماتیکی را تشکیل می‌دهند، ربات دارای افزونگرمی عملگر است و در نتیجه، در این حالت مسأله دینامیک معکوس دارای بی‌نهایت جواب است. یکی از این جواب‌ها، جوابی است که با استفاده از شبه‌معکوس<sup>1</sup> استخراج می‌شود و نرم مربعی بهینه<sup>2</sup> پاسخ را به‌دست می‌دهد (معادله (11)):

$$\begin{bmatrix} T \\ f \end{bmatrix}_{24 \times 1} = [B J^T]_{24 \times 18}^{-1} (M_{18 \times 18}(q)\ddot{q}_{18 \times 1} + C_{18 \times 1}(q, \dot{q}) + G_{18 \times 1}(q)) \quad (10)$$

$$[B J^T]_{24 \times 18}^{-1} = \text{pseudoinverse}([B J^T]) \quad (11)$$

لازم به ذکر است که روند مدل‌سازی دینامیکی سمت بار ربات را می‌توان به طور کامل‌تر در [28,27] مورد بررسی قرار داد.

#### 2-3- مدل‌سازی سیستم تحریک

سیستم تحریک متشکل از موتور، تسمه-پولی و هارمونیک درایو است. برای این قسمت، مدل‌سازی هر قسمت به صورت مجزا و به صورت تحلیلی نمی‌تواند راه‌گشا باشد. علت این است که در هر قسمت اجزای زیادی وجود دارد که به علت وجود اصطکاک خشک و ویسکوز و عدم قطعیت‌های ناشی از مدل‌سازی، خطا زیاد خواهد بود. در نتیجه، برای مدل‌سازی سیستم تحریک، یک بستر تست مناسب مطابق شکل 4 شامل موتور، تسمه-پولی و هارمونیک درایو طراحی و ساخته شده و با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از اندازه‌گیری ورودی و خروجی‌ها و شناسایی مدل، معادلات دینامیکی حاکم بر سیستم تحریک استخراج می‌شود. در واقع، برای شناسایی سیستم درایو، مسیرهای زمانی متفاوت به مفاصل اعمال کرده و جریان موتورها، به‌عنوان نشانه‌گیری از گشتاور اعمالی اندازه‌گیری می‌شود. سپس جریان خروجی اندازه‌گیری شده با یک ضریب به گشتاور اعمالی تبدیل می‌شود.

مدل در نظر گرفته شده برای شناسایی پارامترها با در نظر گرفتن اثرات اینرسی، اصطکاک ویسکوز و خشک، به صورت معادله (12) می‌باشد:

$$\tau = J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} + d\dot{\theta}^3 + m \text{sign}(\dot{\theta}) \quad (12)$$

که پارامترهای مجهول آن به صورت جدول 1 شناسایی شده‌اند.

<sup>1</sup> Pseudo inverse

<sup>2</sup> The Minimum Quadratic Norm

خاص صورت گرفته است. این روند بهینه‌سازی بر اساس الگوریتم ژنتیک که می‌توان از آن به عنوان یکی از کارآمدترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی نام برد، می‌باشد.

همان‌طور که اشاره شد، در این پژوهش، از پارامترهای طراحی مسیر به عنوان متغیرهای طراحی در فرایند بهینه‌سازی استفاده شده است. این متغیرها به صورت عبارت (15) بیان شده‌اند:

$$\text{Design Variables} = \{Sc, R_{se}, R_d, R_m, R_{zp}\} \quad (15)$$

در حین فرایند سینماتیک معکوس بر اساس راه رفتن با زانوی خمیده، گشتاور مورد نیاز در مفصل زانو بیشتر از سایر مفاصل خواهد بود. این کمیت، هنگامی که ربات در حال بالا رفتن از پله باشد، بحرانی‌تر خواهد بود. لذا، با توجه به اهمیت مفصل زانو در ربات‌های انسان‌نما، بهینه‌سازی بر اساس این مفصل صورت گرفته است. تابع هدف مطلوب در فرایند بهینه‌سازی به صورت رابطه (16) معرفی شده است:

$$J = \frac{-1}{\max \{abs(\tau_{rk}) \times abs(\dot{q}_{rk}) + abs(\tau_{lk}) \times abs(\dot{q}_{lk})\}} \quad (16)$$

که در معادله (16)،  $\tau_{rk}$  و  $\tau_{lk}$ ، به ترتیب گشتاور مفصل زانو پای راست و چپ،  $\dot{q}_{rk}$  و  $\dot{q}_{lk}$  نیز مقدار سرعت این مفصل برای پای راست و چپ را نشان می‌دهند. این فرایند بهینه‌سازی باید در کنار کمینه کردن تابع هدف قیودی را نیز ارضا کند. یکی از این شرایط، پایداری ربات است. در واقع، مسیر نقطه گشتاور صفر مطابق رابطه (17) باید همواره داخل چندضلعی تکیه‌گاهی باقی بماند:

$$d_{ZMP}(t) = [x_{ZMP} \quad y_{ZMP}] \in SP \quad (17)$$

همچنین، به منظور جلوگیری از پدیده تکیگی در حل سینماتیک معکوس مفصل زانو، مقدار زاویه مفصل زانو باید همواره در محدوده مشخصی باشد. این مسأله به صورت عبارت (18) بیان شده است.

$$q_{knee} < \delta \quad (18)$$

که در معادله (18)، پارامتر  $\delta$  ثابتی مثبت و کوچک می‌باشد. در نهایت، برای این‌که مسیرهای حرکتی به‌دست آمده قابل پیاده‌سازی باشند، گشتاورهای تحریک مفاصل و سرعت‌های مفاصل برای هر پا باید مطابق با رابطه (19) با خصوصیات محرک‌ها سازگار باشند:

$$\tau_i < \tau_{max,i}, \quad \dot{q}_i \leq \dot{q}_{max,i} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (19)$$

که در این معادله،  $\tau_{max,i}$  بیشترین گشتاور تحریک مفصل  $i$  است و  $\dot{q}_{max,i}$  بیشترین سرعت مفصل  $i$  است را نشان می‌دهند.

در واقع، با استفاده از الگوریتم ژنتیک مقدار متغیرهای بهینه‌سازی به گونه‌ای محاسبه می‌شود که مقدار تابع هدف حداقل شود. نحوه کار الگوریتم ژنتیک به این صورت است که ابتدا جمعیت اولیه<sup>1</sup> تولید می‌شود و بر پایه آن مقدار تابع هدف برای هر یک از کروموزوم<sup>2</sup> محاسبه می‌گردد. سپس با استفاده از عملگرهای انتخاب<sup>3</sup>، پیوند<sup>4</sup> و جهش<sup>5</sup> جمعیت جدید تولید می‌شود. این روند تکرار می‌شود تا جایی که یا تعداد جمعیت تولید شده به حد مشخصی برسد و یا اینکه مقدار تابع هدف به اندازه کافی کوچک شود.

## 6- نتایج

به‌منظور صحت‌گذاری بر روند مدل‌سازی، نیروها و گشتاورهای وارد بر کف پای چپ ربات که از مدل دینامیکی به دست آمده‌اند، مطابق شکل 6 با مقادیر

نقطه گشتاور صفر را می‌توان بر حسب مؤلفه‌های تماسی نیرو و گشتاور به صورت معادله (13) و بر اساس تعاریف این نقطه بیان کرد [27]:

$$\begin{cases} x_{ZMP} = \frac{F_{zl}x_{lf} + F_{zr}x_{rf} - M_{yl} - M_{yr}}{F_{zl} + F_{zr}} \\ y_{ZMP} = \frac{F_{zl}y_{lf} + F_{zr}y_{rf} + M_{xl} + M_{xr}}{F_{zl} + F_{zr}} \end{cases} \quad (13)$$

که در این معادله،  $x_i$  و  $y_i$ ها موقعیت نقطه مرجع پا را نسبت به دستگاه مختصات اینرسی و  $F$ ،  $M$  نیرو و گشتاور وارد بر کف پای ربات را به طور کلی بیان می‌کنند. همچنین، در این معادله، اندیس  $l$  و  $r$  به ترتیب معرف پای چپ و راست ربات می‌باشد.

## 4-1- طراحی مسیر حرکت مج‌ها

این مسیرها علاوه بر ارضا قیود موقعیت (که شامل موقعیت پاها در ابتدا و انتهای گام، ارتفاع گام است)، باید از رسته شتاب پیوسته باشند تا در فضای مفاصل نیز مسیرهایی از همین رسته پیوسته را ایجاد نموده و در نتیجه موتورها دارای حرکتی نرم بوده و نیز نقطه گشتاور صفر فاقد پرش باشد.

## 4-2- طراحی مسیر حرکت لگن

مسیر حرکت لگن باید به‌گونه‌ای باشد که علاوه بر این که باعث ایجاد حرکتی پایدار می‌شود، از انفراد در زانو دور باشد. همچنین، مسیر حرکت لگن نیز باید از رسته شتاب پیوسته باشد تا در فضای مفاصل نیز مسیرهایی از همین رسته پیوسته را ایجاد نموده و در نتیجه موتورها دارای حرکتی نرم بوده و نیز نقطه گشتاور صفر فاقد پرش باشد.

## 4-3- معرفی پارامترهای منحصر به فرد طراحی مسیر ربات

همان‌طور که اشاره شد، کاهش ضربات وارد بر کف پای ربات هنگام گام‌برداری اثر مثبتی بر رفتار دینامیکی ربات خواهد داشت. از آنجایی که مسیر لگن ربات شدیداً بر نیروها و گشتاورهای تماسی تأثیرگذار است، لذا از تعدادی از پارامترهای کلیدی طراحی مسیر لگن به منظور معرفی متغیرهای طراحی در فرایند بهینه‌سازی استفاده شده است. ذکر این نکته ضروری به نظر می‌رسد که این پارامترهای جدید بر اساس تجربه عملی به کار گرفته شده در ساخت ربات سورنا3 انتخاب شده‌اند و در هیچ نمونه خارجی مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. پارامترهای کلیدی طراحی مسیر لگن در شکل 5 و مطابق جدول 2 معرفی شده‌اند.

به کمک این پارامترهای اساسی، پارامترهای طراحی مسیر در این پژوهش به صورت رابطه (14) تعریف شده‌اند:

$$\begin{cases} Sc = \frac{x_e + x_s}{D_s} \\ R_{se} = \frac{x_s}{x_s} \\ R_d = \frac{y_d}{y_m} \\ R_m = \frac{y_m}{0.5L_p} \end{cases} \quad (14)$$

همچنین، در جدول 3 مفاهیم فیزیکی این پارامترهای جدید ارائه شده است. پارامتر  $R_{zp}$  نیز به عنوان ضریبی که در محاسبه مینیمم ارتفاع لگن اعمال می‌شود، به عنوان یکی از متغیرهای طراحی لحاظ شده است.

## 5- روند بهینه‌سازی

با توجه به ضرورت کاهش گشتاورهای مفاصل به منظور افزایش سرعت و بررسی پارامترهای طراحی مسیر بر روی این گشتاورها، فرایند بهینه‌سازی به منظور دستیابی به مسیر پایدار در عین کاهش انرژی مصرفی یک مفصل

<sup>1</sup> Initial Population

<sup>2</sup> Chromosomes

<sup>3</sup> Selection

<sup>4</sup> Crossover

<sup>5</sup> Mutation

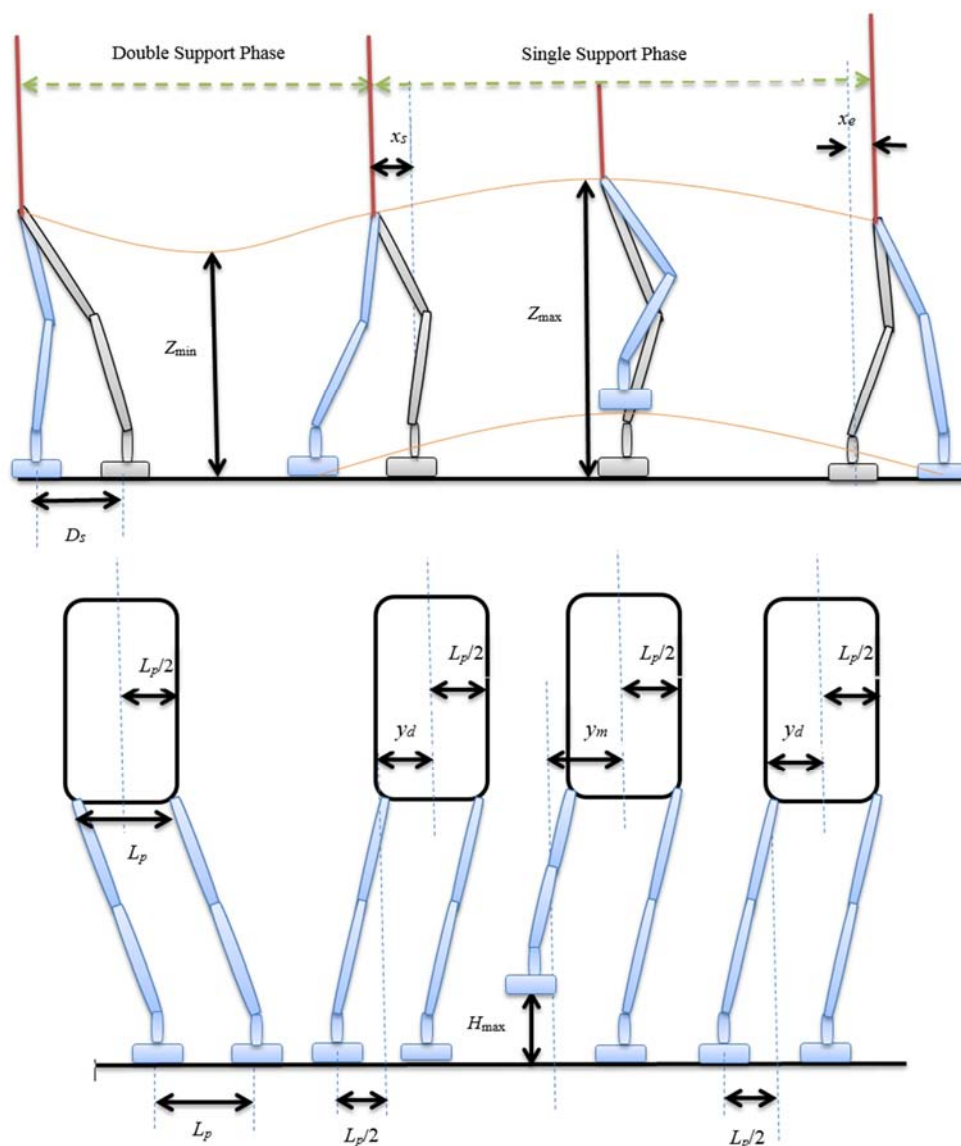


Fig. 5 Basic walking parameters specified in lateral and sagittal schematic view

شکل 5 پارامترهای اساسی راه رفتن در نمای جانبی و روبرویی شماتیک حرکت

تجربی در سرعت 0.7 کیلومتر بر ساعت مقایسه شده‌اند. شایان ذکر است که مقادیر تجربی به کمک سنسورهای نیرو-گشتاور 6 جهته که در کف پا ربات تعبیه شده‌اند، به دست می‌آیند. نتایج حاکی از آن است که مدل دینامیکی با وجود فرضیات ساده‌کننده‌ای که در روند مدل‌سازی سمت بار اعمال شده است، به خوبی توانسته است رفتار واقعی ربات را تخمین بزند. لذا، در ادامه این پژوهش می‌توان از مدل دینامیکی ربات با دقت خوبی استفاده کرد.

جدول 3 پارامترهای منحصربه‌فرد طراحی مسیر و مفهوم فیزیکی آنها

Table 3 Exclusive path planning parameters and their definitions

پارامترهای بی‌بعد طراحی مسیر	
$S_c$	میزان مشارکت فاز تک تکیه‌گاهی در یک گام از حرکت
$R_{se}$	نسبت فاصله مفصل ران از مچ پای تکیه‌گاه در شروع و پایان فاز تک تکیه‌گاهی
$R_d$	نسبت موقعیت لگن در راستای به ترتیب در انتهای فاز دو تکیه‌گاهی و حداکثر مقدار آن در فاز تک تکیه‌گاهی
$R_m$	نسبت حداکثر انحراف ربات در راستای

جدول 2 پارامترهای اساسی طراحی مسیر لگن

Table 2 Basic parameters of pelvis path planning

پارامترهای اساسی	مفهوم فیزیکی
$D_s$	طول گام
$x_s$	فاصله لگن از مچ پای تکیه‌گاه در ابتدای فاز تک تکیه‌گاهی در جهت
$x_e$	فاصله لگن از مچ پای تکیه‌گاه در انتهای فاز تک تکیه‌گاهی در جهت
$y_d$	فاصله لگن از دستگاه اینرسی (میان دو پا) در ابتدا و انتهای فاز تک تکیه‌گاهی در جهت
$y_m$	فاصله لگن از دستگاه اینرسی (میان دو پا) در میانه فاز تک تکیه‌گاهی در جهت
$L_p$	فاصله عرضی لگن
$Z_{min}$	فاصله لگن از دستگاه اینرسی (میان دو پا) در میانه فاز دو تکیه‌گاهی در جهت
$Z_{max}$	فاصله لگن از دستگاه اینرسی (میان دو پا) در میانه فاز تک تکیه‌گاهی در جهت
$H_{max}$	بیشترین ارتفاع مچ از زمین



بر گشتاور سایر مفاصل نیز تأثیر بگذارد. لذا این مسأله می‌تواند در طراحی مکانیزم جدید تحریک مچ لحاظ شود.

با توجه به روند کلی به‌دست آمده از شکل 7، مکانیزم جدیدی برای تحریک مفصل مچ پیشنهاد شده است. در جدول‌های 4 و 5 خصوصیات جرمی پائین‌تنه و پارامترهای هندسی مدل پیشنهادی و مدل سورنا3 بیان شده‌اند. نتایج حاکی از سبک شدن پا نسبت به ربات سورنا3 دارد که این مسأله بر رفتار دینامیکی ربات تأثیر مستقیم است.

به منظور انجام فرایند بهینه‌سازی در یک سرعت مشخص، برخی از پارامترهای حرکتی ربات باید در نظر گرفته شود که مهم‌ترین آنها مطابق جدول 6 معرفی شده‌اند. در واقع، مسأله افزایش سرعت به صورت ثابت فرض کردن سرعت ربات و طول گام در یک مقدار مشخص و بدست آوردن سایر پارامترها از روی این سرعت می‌باشد که فرایند بهینه‌سازی بر اساس آن صورت می‌گیرد. شایان ذکر است که این شبیه‌سازی در سرعت 1.2 کیلومتر بر ساعت که 0.5 کیلومتر بر ساعت بیشتر از سرعت فعلی ربات است، انجام شده است. سپس، پارامترهای اساسی مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک طبق جدول 7 مشخص می‌شوند. در نهایت، مقادیر پارامترهای بهینه به همراه مقدار تابع هدف تعریف شده برای مدل سورنا3 و مکانیزم پیشنهادی به دست

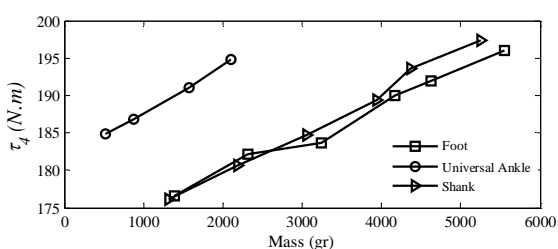


Fig. 7 Effect of lower-body mass change on knee joint torque

شکل 7 اثرات تغییر جرم برخی اجزا پائین‌تنه ربات بر گشتاور مفصل زانو

#### جدول 4 خصوصیات جرمی

Table 4 Mass properties

اجزای پائین‌تنه	جرم سورنا3 (گرم)	جرم مدل جدید (گرم)
کف پا	4624.07	2292.85
چهارشاخ مچ	1749.55	1093.08
ساق	4372.21	3772.04
ران	7047.59	7047.59
چهارشاخ ران	2127.24	2127.24
مفصل ران	3515.24	3515.24
پلوپس	10390	10390
بالاتنه	29182.62	29182.62
جرم کلی	86444.32	79268.7

#### جدول 5 خصوصیات فیزیکی

Table 5 Physical properties

پارامترهای هندسی	سورنا 3 (میلی‌متر)	مدل جدید (میلی‌متر)
ارتفاع مفصل مچ از زمین	129	118
عرض کف پا	190	190
طول کف پا	270	270
طول ساق	360	360
طول ران	360	360
فاصله بین مفاصل ران	230	230

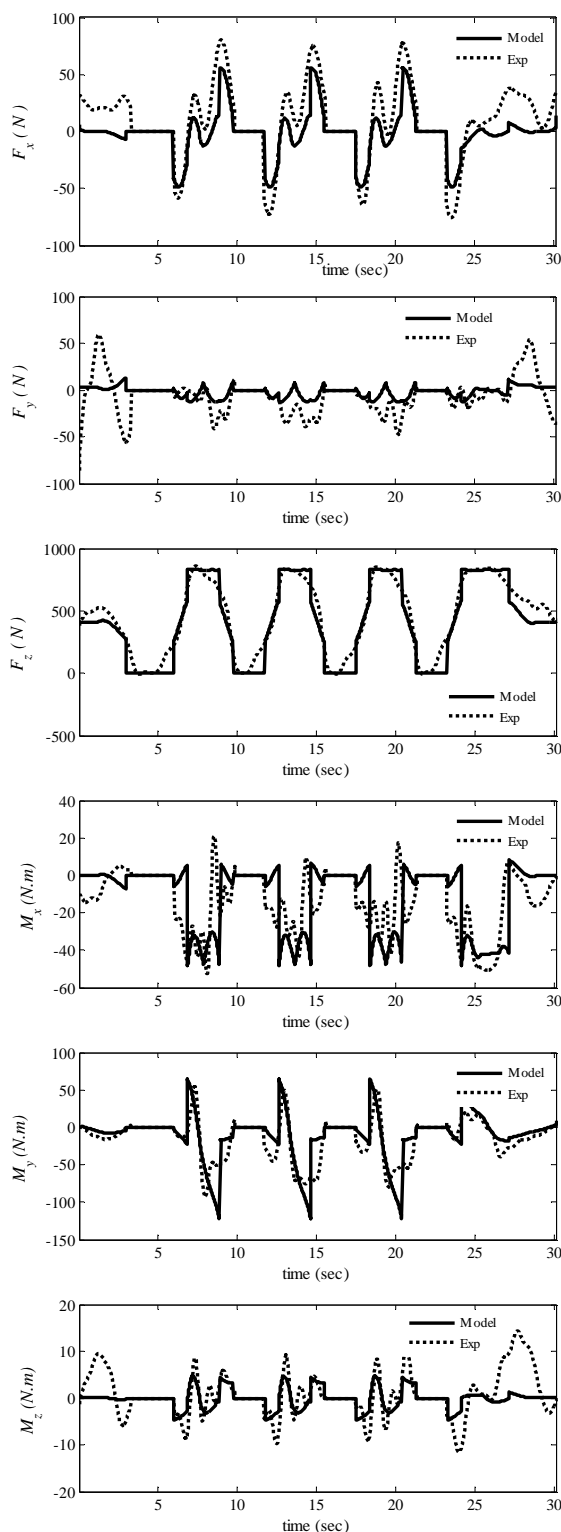


Fig. 6 Ground-interaction components of left leg

شکل 6 مؤلفه‌های تماسی نیرو و گشتاور وارد بر کف پای چپ ربات

کاهش جرم پائین‌تنه ربات بر گشتاورهای مفاصل تأثیر مستقیم دارد. این مسأله با در نظر گرفتن تأثیر جرم کف پا، چهارشاخ مفصل مچ و لینک ساق بر روی گشتاور مفصل زانو در شکل 7 بررسی شده است. همان‌طور که مشخص است با توجه به روند قسمت‌های مختلف نمودار، کاهش جرم منجر به کاهش گشتاور مفصل زانو ربات خواهد شد. انتظار می‌رود این کاهش جرم

جدول 6 پارامترهای اساسی شبیه‌سازی

Table 6 Simulation basic parameters

پارامترهای گام‌برداری ربات	
طول گام	50 (سانتی‌متر)
زمان گام‌برداری	1.5 (ثانیه)
بیشترین ارتفاع مچ در حین گام‌برداری	16.9 (سانتی‌متر)
سرعت حرکت ربات	1.2 (کیلومتر بر ساعت)

جدول 7 پارامترهای مورد استفاده در الگوریتم ژنتیک

Table 7 Parameters used in genetic algorithm

پارامترهای اساسی الگوریتم ژنتیک	
جمعیت اولیه	100
طول کروموزوم	6
ضریب تقاطع	0.8
جمعیت اولیه	0.92 0.8211 0.5556 0.6088 0.4177

جدول 8 پارامترهای بهینه ربات و مدل پیشنهادی

Table 8 Optimized parameters of the robot and the proposed model

کمیت بهینه	سورنا 3	مکانیزم پیشنهادی
$S_c$	0.5216	0.5705
$R_{se}$	0.5585	0.8224
$R_d$	0.6240	0.4394
$R_m$	0.9451	0.9145
$R_{zp}$	0.9278	0.9254
$J$	-0.0184	-0.0182

جدول 9 پارامترهای معرف محورهای عرضی شکل 8

Table 9 Parameters indicate the y-axis of fig 8

پارامترهای تعریف شده در شکل 8	
$\tau_1$	گشتاور مفصل ران در جهت X
$\tau_2$	گشتاور مفصل ران در جهت Y
$\tau_3$	گشتاور مفصل ران در جهت Z
$\tau_4$	گشتاور مفصل زانو در جهت Y
$\tau_5$	گشتاور مفصل مچ در جهت X
$\tau_6$	گشتاور مفصل مچ در جهت Y

کاهش در ماکزیمم و میانگین گشتاور در جدول 10 برای هر مفصل بیان شده است.

در نهایت، انرژی مصرفی پائین‌تنه ربات در سرعت 1.2 کیلومتر بر ساعت با در نظر گرفتن مکانیزم فعلی تحریک مچ پا و مکانیزم پیشنهادی مطابق شکل 9 با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این انرژی مصرفی به کمک رابطه (20) بیان شده است که به صورت حاصل ضرب سرعت ( $\dot{q}_i$ ) در گشتاور تحریک ( $\tau_i$ ) برای هر یک از مفاصل پائین‌تنه می‌باشد.

$$E = \sum_{i=1}^{12} \dot{q}_i \tau_i \quad (20)$$

همان‌طور که از شکل 9 مشخص است، انرژی مصرفی برای مکانیزم پیشنهادی نسبت به مکانیزم سورنا 3 به طور میانگین به میزان 16.32 درصد کاهش پیدا کرده است که این مسئله می‌تواند منجر به استفاده از موتورهای سبک‌تر برای پائین‌تنه ربات شود.

می‌آیند (جدول 8). همچنین، به منظور بررسی کارایی مدل پیشنهادی نسبت به مدل سورنا 3، در شکل 8 مقایسه‌ای بین گشتاورهای مفاصل پائین‌تنه در دو حالت صورت گرفته است.

پارامترهای موجود در شکل 8 به صورت جدول 9 نام‌گذاری شده‌اند. همچنین، در این شکل مشخص است که مقدار این گشتاورها در مکانیزم پیشنهادی کمتر از مقدار واقعی گشتاورهای ربات سورنا 3 می‌باشد که میزان

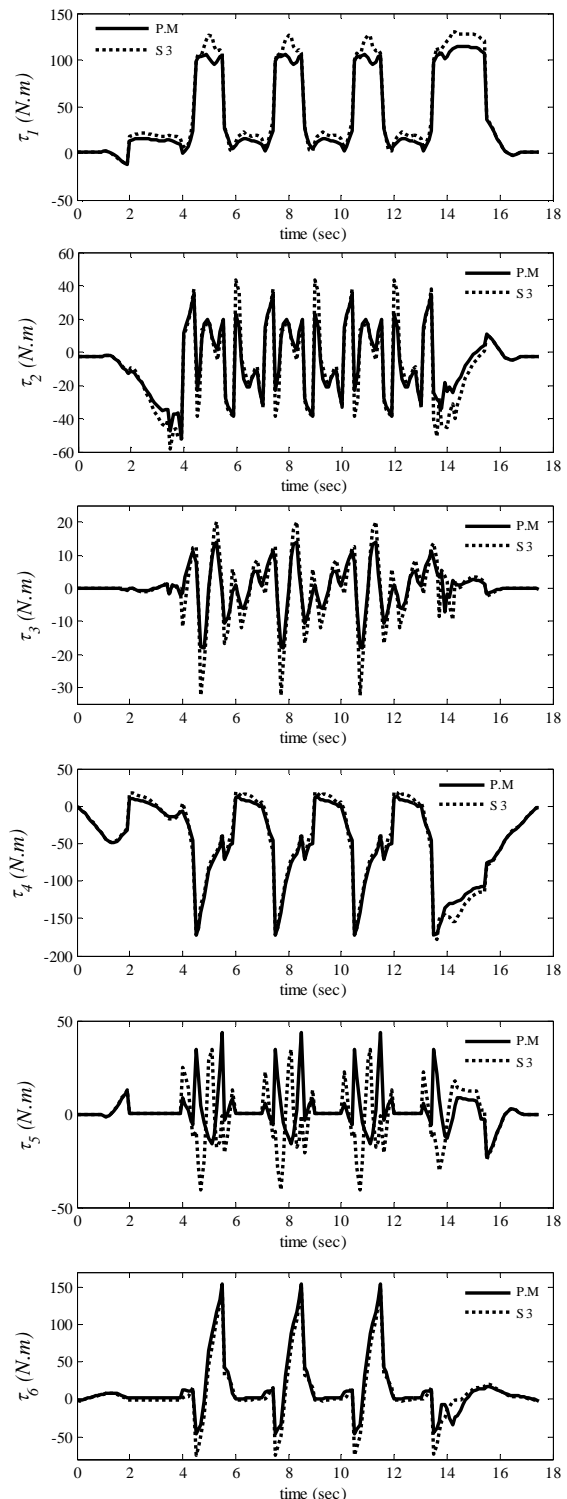


Fig. 8 Lower-body joints' torques comparison

شکل 8 مقایسه گشتاور مفاصل پائین‌تنه مدل ربات با مدل پیشنهادی

- [6] T. Buschmann, S. Lohmeier, H. Ulbrich, Humanoid robot Iola: Design and walking control, *Journal of physiology-Paris*, vol. 103, pp. 141-148, 2009.
- [7] J. Urata, Y. Nakanishi, K. Okada, M. Inaba, Design of high torque and high speed leg module for high power humanoid, *Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2010 *IEEE/RSJ International Conference on*, Taipei, Taiwan, pp. 4497-4502, 2010.
- [8] J. Engelsberger, A. Werner, C. Ott, B. Henze, M. A. Roa, G. Garofalo, et al., Overview of the torque-controlled humanoid robot TORO, *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Madrid, Spain, 2014.
- [9] C. Ott, C. Baumgärtner, J. Mayr, M. Fuchs, R. Burger, D. Lee, et al., Development of a biped robot with torque controlled joints, *10th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Nashville, TN, USA, pp. 167-173, 2010.
- [10] D. Lahr, V. Orekhov, B. Lee, D. Hong, Early developments of a parallelly actuated humanoid, *SAFFiR, ASME 2013 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*, Portland, USA, pp. V06BT07A054-V06BT07A054, 2013.
- [11] K. Kaneko, F. Kanehiro, M. Morisawa, K. Akachi, G. Miyamori, A. Hayashi, et al., Humanoid robot hrp-4-humanoid robotics platform with lightweight and slim body, *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, California, USA, pp. 4400-4407, 2011.
- [12] J. Pratt, T. Koolen, T. De Boer, J. Reubla, S. Cotton, J. Carff, et al., Capturability-based analysis and control of legged locomotion, part 2: Application to m2v2, a lower body humanoid, *The International Journal of Robotics Research*, p. 0278364912452762, 2012.
- [13] M. Lapeyre, S. N'Guyen, A. Le Falher, P.-Y. Oudeyer, Rapid morphological exploration with the Poppy humanoid platform, in *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Madrid, Spain, pp. 959-966, 2014.
- [14] M. Sadedel, K. A. Yousefi, F. Iranmanesh, Heel-Off And Toe-Off Motions Optimization For A2d Humanoid Robot Equipped With Active Toe Joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 87-97, 2016. (in Persian)
- [15] M. Sadedel, A. Yousefikoma, F. Iranmanesh, Analytical Dynamic Modelling of Heel-off and Toe-off Motions for a 2D Humanoid Robot, *Journal of Computational Applied Mechanics*, Vol. 46, pp. 243-256, 2015.
- [16] K. Narioka, T. Homma, K. Hosoda, Humanlike ankle-foot complex for a biped robot, *12th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2012)*, Osaka, Japan, pp. 15-20, 2012.
- [17] M. Rostami, G. Bessonnet, Sagittal gait of a biped robot during the single support phase. Part 2: optimal motion, *Robotica*, Vol. 19, pp. 241-253, 2001.
- [18] C. Chevallereau and Y. Aoustin, Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot, *Robotica*, Vol. 19, pp. 557-569, 2001.
- [19] G. Capi, Y. Nasu, L. Barolli, K. Mitobe, K. Takeda, Application of genetic algorithms for biped robot gait synthesis optimization during walking and going up-stairs, *Advanced robotics*, Vol. 15, pp. 675-694, 2001.
- [20] G. Bessonnet, P. Seguin, P. Sardain, A parametric optimization approach to walking pattern synthesis, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, pp. 523-536, 2005.
- [21] M. J. Sadigh, S. Mansouri, Application of phase-plane method in generating minimum time solution for stable walking of biped robot with specified pattern of Motion, *Robotica*, Vol. 31, pp. 837-851, 2013.
- [22] M. B. Popovic, A. Goswami, and H. Herr, Ground reference points in legged locomotion: Definitions, biological trajectories and control implications, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, pp. 1013-1032, 2005.
- [23] M. Vukobratović, J. Stepanenko, On the stability of anthropomorphic systems, *Mathematical biosciences*, Vol. 15, pp. 1-37, 1972.
- [24] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, H. Hirukawa, Biped walking pattern generation by a simple three-dimensional inverted pendulum model, *Advanced Robotics*, Vol. 17, pp. 131-147, 2003.
- [25] Q. Huang, K. Yokoi, S. Kajita, K. Kaneko, H. Arai, N. Koyachi, et al., Planning walking patterns for a biped robot, *IEEE Transactions*

جدول 10 میزان کاهش گشتاور به ازای مدل پیشنهادی

Table 10 torque reduction amount of proposed model

مفاصل پائین‌تنه	میزان کاهش گشتاور نسبی (نیوتن‌متر)	درصد کاهش میانگین گشتاور
$\tau_1$	15.82	12.63
$\tau_2$	5.91	21.21
$\tau_3$	14.36	37.65
$\tau_4$	5.34	2.89
$\tau_5$	3.45	58.25
$\tau_6$	5.16	31.17

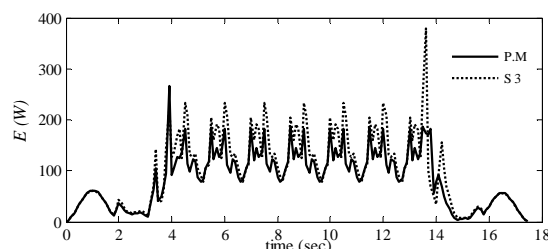


Fig. 9 Energy consumption comparison between proposed model and surena3's model

شکل 9 مقایسه انرژی مصرفی بین مدل پیشنهادی و مدل سورنا 3

## 7- نتیجه‌گیری

در این مقاله، به ارائه یک مکانیزم انتقال قدرت به منظور تحریک مفصل مچ پا ربات پرداخته شده است. در مکانیزم پیشنهادی که به مکانیزم تسمه-پولی و هارمونیک درایو و رولراسکرو مجهز شده است، موتورهای مفصل مچ به لینک ساق ربات منتقل شده‌اند. همچنین، فرایند بهینه‌سازی بر اساس کمترین انرژی مصرفی مفصل زانو صورت گرفته است. با شبیه‌سازی مکانیزم پیشنهادی بر مدل دینامیکی ربات انسان‌نما سورنا 3 مشاهده شده است که گشتاورهای تحریک مفاصل پائین‌تنه نسبت به مدل دینامیکی اولیه ربات در سرعت 1.2 کیلومتر بر ساعت کاهش داشته‌اند. از آنجایی که این گشتاورها به عنوان عوامل محدودکننده سرعت در نظر گرفته شده‌اند، می‌توان بیان کرد که به کمک مکانیزم پیشنهادی ربات قابلیت دستیابی به سرعت‌های بالاتر از سرعت فعلی خود را خواهد داشت. همچنین، این کاهش گشتاور می‌تواند منجر به استفاده از موتورهای سبک‌تر شود و در حالت کلی رفتار دینامیکی ربات بهبود پیدا می‌کند.

## 8- مراجع

- [1] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi, H. Hirukawa, A realtime pattern generator for biped walking, *Robotics and Automation*, 2002. Proceedings. *ICRA'02. IEEE International Conference on*, Washington, D.C. USA. pp. 31-37, 2002.
- [2] S. Lohmeier, Design and realization of a humanoid robot for fast and autonomous bipedal locomotion, *PhD Thesis*, Technische Universität München, 2010.
- [3] M. Gienger, K. Löffler, F. Pfeiffer, Towards the design of a biped jogging robot, *Robotics and Automation*, 2001. Proceedings 2001 *ICRA. IEEE International Conference on*, Seoul, Korea, pp. 4140-4145, 2001.
- [4] B. Espiau, P. Sardain, The anthropomorphic biped robot BIP2000, *Robotics and Automation*, 2000. Proceedings. *ICRA'00. IEEE International Conference on*, San Francisco, California, USA, pp. 3996-4001, 2000.
- [5] S. Lohmeier, T. Buschmann, H. Ulbrich, F. Pfeiffer, Design concept of humanoid robot Iola, Proc. *CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics, and Control (RoManSy)*, 2008.

- interaction, in *Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2014 Second RSI/ISM International Conference on*, Tehran, Iran , pp. 233-238, 2014.
- [28] M. Khadiv, S. A. A. Moosavian, A. Yousefi-Koma, M. Sadedel, S. Mansouri, Optimal gait planning for humanoids with 3D structure walking on slippery surfaces, *Robotica*, pp. 1-19, 2015.
- on robotics and automation, Vol. 17, pp. 280-289, 2001.
- [26] V.-H. Dau, C.-M. Chew, A.-N. Poo, Achieving energy-efficient bipedal walking trajectory through GA-based optimization of key parameters, *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 6, pp. 609-629, 2009.
- [27] M. Khadiv, S. A. A. Moosavian, M. Sadedel, Dynamics modeling of fully-actuated humanoids with general robot-environment