



مدل سازی دینامیکی و طراحی سیستم کنترل برای ربات اسکلت خارجی پایین تنه

محمد مهدی عطایی^۱، حسن سالاریه^{۲*}، آریا الستی^۳

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، salarieh@sharif.ir

چکیده- ربات اسکلت خارجی ماشینی است دارای اعضای مشابه بدن انسان و قابل پوشیدن که به کمک عملگرهای خود قدرت شخص را بسیار افزایش می دهد. پژوهش پیش رو به مدل سازی دینامیکی و طراحی سیستم کنترل برای نوع پایین تنه این ربات پرداخته است. در مقالات موجود حداکثر بخشی از ربات با یک درجه آزادی مدل سازی و کنترل شده است که به خواننده دید مناسبی از کنترل هم زمان تمام اجزای ربات را نمی دهد. در این راستا، ابتدا ساختار مناسب مشابه پروژه بلیکس دانشگاه برکلی برای ربات انتخاب و معادلات دینامیک مربوطه به صورت صفحه ای و به روش نیوتن-اولر استخراج گردید. طی آزمایشی، داده های سینماتیک راه رفتن به کمک سامانه اکسنس اندازه گیری و دینامیک معکوس در نرم افزار سیم مکانیکس در کنار مدل پیاده شده در نرم افزار متلب شبیه سازی گردید که تطابق بالای نتایج مؤید صحت مدل بود. روش کنترل امیدانس بررسی و نکاتی اصلاحی در آن لحاظ شد که عملکرد آن را کمی بهبود بخشید. سپس ربات با استفاده از این الگوریتم کنترل گردید. بدین ترتیب سیستم پایدار شده، حرکت ربات با بهترین کیفیت از بدن تبعیت نمود. نتایج شبیه سازی نشان داد، حین حمل باری به بزرگی ۵۰ کیلوگرم، گشتاورهایی کمتر از نیم نیوتن متر، در محل های تماس با ربات، به اعضای بدن کاربر وارد می شود.

کلیدواژه ها: ربات اسکلت خارجی، معادلات دینامیک نیوتن-اولر، سیکل گیت، کنترل امیدانس

Dynamic modeling and control system design for a lower extremity exoskeleton

M. M. Ataei¹, H. Salarieh^{2*}, A. Alasty³

1- MSc., Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran

2- Assoc. Prof., Mech. Eng., Sharif Univ. of Tech., Tehran, Iran

3- Prof. of Mech. Eng., Sharif Univ. of Technology, Tehran, Iran

* P. O. B 11155-9567 Tehran, salarieh@sharif.ir

Abstract- Exoskeleton is a machine composed of a wearable anthropomorphic structure which noticeably magnifies user's might via its actuators. In this research, dynamic modeling and control system design for a lower limb type of this robot were done. In the literature at most a 1 DOF part of the robot is modeled and controlled which doesn't give a good insight on how all of the robot parts are controlled simultaneously. First, a suitable structure was chosen similar to that of UC Berkeley's BLEEX project. Then dynamic equations were derived in sagittal plane using the Newton-Euler method. By an experiment using Xsens system, gate kinematics data were measured and the inverse dynamics was simulated both in Sim Mechanics and on the model in MATLAB that proved accuracy of the derived model. Impedance control was investigated and some corrective remarks were included in that algorithm. Using this method the robot was controlled. It stabilized the system and the robot followed user's movement exactly. While a load of 50 kilograms was carried, mostly moments of less than 1 (Nm) were applied at each interface among man and robot.

Keywords: Exoskeleton Robot, Newton-Euler Dynamic Equations, Gate Cycle, Impedance Control

۱- مقدمه

یک آرزوی دیرینه انسان دستیابی به ماشینی بوده است که به صورت پوششی حول بدن قرار گیرد و در هماهنگی کامل با حرکات آن، قدرت جسمانی شخص را به واسطه منبع انرژی و عملگرهای خود چندین برابر نماید. این آرزو بارها در رمان های تخیلی و فیلم های سینمایی تجسم یافته است. با این وجود تلاش های علمی صورت گرفته در این راستا، در سال های اخیر به موفقیت رسیده، منجر به ساخت ربات اسکلت خارجی شده است [۱]. شکل ۱ دو ربات اسکلت خارجی را نشان می دهد که اولین نمونه های موفق و معرفی شده در سال ۲۰۰۵ می باشند. این ربات می تواند پوشش دهنده کل بدن و یا بالاتنه یا پایین تنه به تنهایی باشد. در این پژوهش، نوع پایین تنه مد نظر قرار گرفته است، زیرا چنین رباتی کارایی های فراوانی دارد و بخش اصلی انتقال بار به زمین محسوب می شود. طراحی و افزودن بخش بالاتنه شامل بازو و دست ها به راحتی امکان پذیر است. کارخانجات و کارگاه ها، خدماتی از قبیل امداد و نجات، حمل و نقل، بیمارستان ها و غیره، همچنین صنایع نظامی می توانند بهره فراوانی از این ماشین ببرند. توان بخشی برای معلولین و افراد دچار نواقص فیزیکی و حرکتی و نیز استفاده افراد عادی در زندگی روزمره از جمله کاربردهای دیگر ربات مورد نظر است. می توان گفت نخستین تحقیقات علمی در این زمینه از حدود دهه ۱۹۶۰ آغاز گردید و پژوهشگرانی از آمریکا و یوگوسلاوی سابق به این موضوع پرداختند؛ در مورد اول با رویکرد نظامی و مورد دوم توان بخشی به معلولان [۱].



شکل ۱ ربات های اسکلت خارجی بلیکس (راست) و هال (چپ) [۲]

یک نمونه از کارهای ابتدایی، پروژه هاردیمن [۳] بود که در اواخر دهه ۱۹۶۰ توسط جنرال الکتریک با همکاری محققان دانشگاه کرنل اجرا گردید. ربات هیدرولیک مذکور با ۶۸۰ کیلوگرم وزن و ۳۰ درجه آزادی پاها و دستان فرد را تقویت می نمود. اما پروژه های موفق از حدود سال ۲۰۰۰ آغاز گردید و ربات هایی در دانشگاه برکلی (پروژه بلیکس)، دانشگاه ام آی تی و یک شرکت نظامی (پروژه اگزوس) ساخته شد. به غیر از این موارد، در ژاپن ربات هال در دانشگاه سوکوبا و یک ربات در شرکت پاناسونیک و موارد معدود دیگر تاکنون ساخته شده اند.

طراحی ساختار (مکانیزم) و عملگرها برای ربات بلیکس در مقاله [۴] توسط دکتر کازرونی و همکارانش شرح داده شده است. روش کنترلی ربات مذکور در مقاله [۵] بسیار کلی و مختصر بیان شده است. طبق آن، دستگاه باید حساسیت بالایی نسبت به نیروی اعمال شده ناشی از حرکات فرد داشته باشد و این حساسیت بالا با برقرار کردن یک مسیر پس خوراند مثبت از خروجی حرکت ربات و اعمال ضریب دینامیک معکوس ربات، در مدار حلقه بسته کنترلی، حاصل شده است. نکته مثبت روش کنترلی این پژوهشگران عدم نیاز به نصب حسگر روی بدن و معایب آن عدم تشخیص حرکات ارادی فرد از حرکات غیرارادی و تحمیل شده از خارج، همچنین افزایش حساسیت سیستم نسبت به خطاهای مدل سازی است.

دکتر سانکای در دانشگاه سوکوبای ژاپن به همراه تیمش روی اسکلت خارجی که کاربرد افزایش توان و توان بخشی دارد کار کرده است [۶]. مقاله [۷] به روش کنترل این ربات اشاره می نماید که مرکب از دو سیستم مبتنی بر کنترل امپدانس و خواندن سیگنال های ای ام جی^۱ با حسگرهای مخصوص از سطح پوست کاربر است. استفاده از این حسگرها پوشیدن ربات را دشوار می سازد.

در پژوهش حاضر دینامیک یک ربات اسکلت خارجی پایین تنه برای تمامی اجزا و درجات آزادی آن در صفحه ساژیتال مدل سازی می گردد و روش کنترل آن تبیین می شود. اکثر پژوهش ها به مدل های ساده شده و برای بخشی از ربات با یک درجه آزادی بسنده کرده اند. چنین مدلی بستر لازم برای کنترل ربات را فراهم نمی سازد. پیرامون کنترل این ربات، مقالات معدود موجود که بررسی می شوند، به خواننده دید

1. EMG

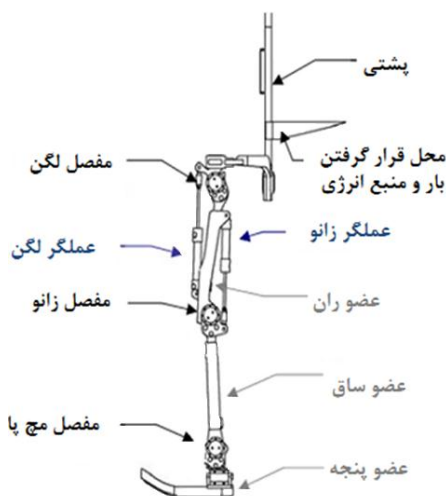
توان بخشی و به دور از بارهای زیاد، می توان دو عملگر دیگر روی دو میچ پا را نیز با ادوات غیرفعال یا نیمه فعال جایگزین نمود (ربات های هال و دانشگاه ام آی تی [۸،۶]).

پس از لحاظ کردن کلیه موارد اشاره شده در این بخش، ساختاری انتخاب گردید که اجزا و پیکربندی شماتیک آن در شکل ۲ به صورت نمای از کنار نشان داده شده است.

با توجه به ویژگی های جرمی و هندسی اجزای بدن طبق جدول ۱، در جدول ۲، لیست اجزای تشکیل دهنده ربات به همراه خصوصیات جرمی و هندسی انتخاب شده برای آن ها ذکر گردیده است.

۳- مدل سازی دینامیک ربات

برخلاف دینامیک ربات اسکلت خارجی، پیرامون بررسی دینامیک راه رفتن انسان تحقیقات زیادی انجام شده است و مشابهت ساختار این ربات با بدن، اقتباس از تحقیقات مذکور را ممکن می سازد. آنیشکو [۹] مدل صفحه ای لینک-سگمندی از بدن ایجاد کرده و به روش لاگرانژ در دو حالت تک و دواتکا راه رفتن را مدل کرده است، ولی معادلات ارائه شده مخصوص مدل مفروض می باشد و جامعیت ندارد. کوپمن [۱۰] دینامیک معکوس با معادلات نیوتن-اولر برای مدل لینک-سگمندی صفحه ای را حل نموده که قابلیت تعمیم پذیری به مدل های دیگر را داراست. به همین دلیل و با توجه به آنکه عمده ترین حرکات و نیروها در صفحه ساژیتال شکل می گیرد [۱۱]، مدل سازی دینامیکی با الگو گرفتن از مقاله کوپمن صورت گرفت.



شکل ۲ طرح شماتیک ساختار ربات [۴]

مناسبی از چگونگی کنترل همزمان همه اجزای ربات را نمی دهند. در پروژه های ساخت ربات نیز که عمدتاً نظامی یا در اوایل مراحل تجاری سازی بوده اند، در صورت انتشار، اطلاعاتی کلی منتشر شده است.

گذشته از موارد فوق، الگوریتم کنترل امپدانس بررسی می شود و بر مبنای طبیعت عملکرد آن، برای مثال در ربات اسکلت خارجی، اصلاحاتی در بیان این روش کنترلی ایجاد می شود که موجب بهبود نسبی در عملکرد آن می گردد.

۲- انتخاب ساختار

اولین قدم قبل از مدل سازی و کنترل ربات، تعیین ساختار آن است که خود موضوعی مهم و مستلزم تحقیقات جامع می باشد. به دلیل تعامل گسترده دستگاه با بدن کاربر و تماس قسمت های مختلف آن، طراحی دقیق بدنه حائز اهمیت فراوان است. برخی موضوعات مهم عبارتند از: خواص فیزیکی اجزای ربات مانند جرم، ممان های اینرسی و محل مراکز جرم که باید با بدن انسان مشابهت داشته باشد؛ همچنین تعیین نوع و طراحی محل نصب عملگرها که برای آن باید دامنه حرکات فرد در هر عضو بدن و میزان نیروی مورد نیاز مد نظر قرار گیرد.

بدین منظور ساختار مناسب، با الگوبرداری از تحقیقات خوبی که طی پروژه بلیکس در زمینه ساختار ربات صورت گرفته است [۴]، انتخاب شد. درجات آزادی از نوع دورانی و در مفصل لگن ۳، در زانو ۱ و میچ پا ۳ عدد بوده که از این بین سه درجه آزادی در صفحه ساژیتال به علاوه دوران جانبی لگن به عملگر خطی دو طرفه هیدرولیک مجهز شده اند.

در این پژوهش عملگر حرکت جانبی لگن حذف گردید که به جای آن استفاده از ادوات غیرفعال پیشنهاد می شود. پروژه های هال، اگزوس و ربات دانشگاه ام آی تی نیز برای این درجه آزادی عملگر به کار نبرده اند [۸،۶،۲]. شایان ذکر است گشتاور مورد نیاز در این درجه آزادی از دوران های داخل صفحه ساژیتال کمتر است. همچنین، بدیهی است حذف دو جک هیدرولیک مذکور تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی، وزن و هزینه تمام شده خواهد داشت.

اضافه بر این، تحلیل دینامیک ربات در فضای مجازی و نمونه ربات های دیگر پژوهشگران نشان داد در حضور بارهای بزرگ لازم است میچ پا به عملگر مجهز شود ولی در کاربردهای

۳-۱- استخراج معادلات دینامیک

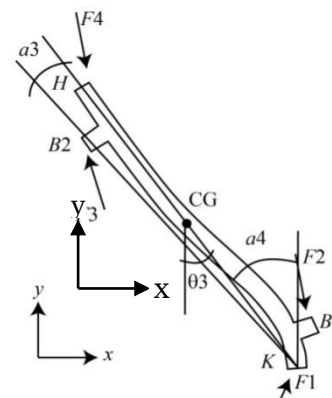
به منظور طراحی ساختار و بررسی همه پارامترهای دینامیکی آن نوشتن معادلات به روش نیوتن-اولر ترجیح دارد. مزیت دیگر نسبت به روش لاگرانژ، در مواردی مانند ربات مورد نظر با حجم زیاد معادلات، آن است که شناسایی و تصحیح خطا در مدل سازی آسان تر است. هر عضو ساختار مورد نظر به صورت یک لینک با خواص جرمی مشابه بدن و مفاصلی به صورت لولا در صفحه مدل گردید. ساختار ۷ عضو اصلی و ۴ عملگر خطی دارد که از دینامیک آن ها صرف نظر نشده است. هر عملگر با دو لینک، که از طریق یک مفصل منشوری در امتداد یکدیگر حرکت می کنند، مدل شده است. برای ۱۵ لینک موجود، ۴۵ معادله نیوتن-اولر نوشته شد. با در نظر گرفتن یک بار ۵۰ کیلوگرمی در پشتی ربات، مدل مشابه شخصی ۷۴ کیلوگرمی و با قد ۱۷۵ سانتی متر است.

فرم کلی و برداری این معادلات به صورت زیر می باشد:

$$\sum_{j=1}^{N_{ij}} F_{ij} = m_i \times (\ddot{a}_i - g) \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{ij}} (M_{ij} + r_{ij} \times F_{ij}) = J_i \times \frac{dW_i}{dt} \quad (2)$$

در روابط فوق اندیس i نشان دهنده لینک مورد نظر و j مفصل قرار گرفته روی آن می باشد. سمت چپ معادله (۱) بردار برآیند نیروهای اعمال شده از مفاصل موجود روی لینک و سمت راست آن شامل بردار شتاب مرکز جرم و اثر شتاب جاذبه است. معادله (۲) نیز به همین ترتیب برای گشتاور اعمال شده به لینک و مشتق سرعت زاویه ای آن می باشد. به طور نمونه، نحوه مدل کردن لینک ران پا ارائه می شود (شکل ۳).



شکل ۳ دیگرام آزاد لینک ران

همچنین، برای اجزای دیگر به طور مشابه می توان دیگرام آزاد را رسم و معادلات دینامیکی را نوشت. از محاسبات سینماتیکی نیز روابط شتاب اجزا به دست می آید. پس از نوشتن همه معادلات حجم آن بیش از ۲۰ صفحه می باشد که امکان درجشان در این مقاله وجود ندارد.

$$m_3 a_{3,x} = F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x}$$

$$m_3 a_{3,y} = F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + F_{4y} - m_3 g \quad (3)$$

$$j_3 \cdot \ddot{\theta}_3 = F_{1x} l_{KC} \cos(\theta_3) + F_{1y} l_{KC} \sin(\theta_3) + F_{2x} (l_{KC} \cos(\theta_3) - l_{KB1} \cos(\theta_3 - \alpha_4)) + F_{2y} (l_{KC} \sin(\theta_3) - l_{KB1} \sin(\theta_3 - \alpha_4)) - F_{4x} l_{HC} \cos(\theta_3) - F_{4y} l_{HC} \sin(\theta_3) - F_{3x} (l_{KB2} \cos(\theta_3 + \alpha_3) - l_{KC} \cos(\theta_3)) - F_{3y} (l_{KB2} \sin(\theta_3 + \alpha_3) - l_{KC} \sin(\theta_3)) \quad (4)$$

که در آن C نقطه مرکز جرم لینک و l بیان کننده فاصله بین دو نقطه ای است که در اندیس آن نمایش داده شده است. مثلاً l_{KC} فاصله دو نقطه K و C است.

۳-۲- پارامترهای فیزیکی پایین تنه

همان طور که قبلاً اشاره شد، مناسب است پارامترهای هندسی و فیزیکی اجزای ربات، از جمله طول، جرم، مکان مرکز جرم و ممان های اینرسی، مشابه بدن تعیین شود. دumas و همکارانش [۱۲] از اطلاعات منتشر شده توسط پژوهشگران دیگر برای مردم سفیدپوست استفاده کرده اند و طی محاسباتی مبنای اندازه گیری طول اعضا، محل مراکز جرم و جهت گیری محورهای ممان اینرسی اصلی را اصلاح و به صورت استاندارد ارائه نموده اند. میانگین قد و وزن جامعه آماری آن ها با افراد جامعه ایران هماهنگی دارد.

تخمین خواص جرمی اعضای فردی با جرم و قد مشخص با قراردادن این دو مقدار در فرمول های خطی داده شده در [۱۲] برای درونیابی میسر است. میانگین قد و جرم مردان ۱۷۷ سانتی متر و ۸۰ کیلوگرم بوده است. جدول ۱ خواص جرمی اعضای پایین تنه برای قد ۱۷۵ سانتی متر و جرم ۷۴ کیلوگرم را نشان می دهد که برای اعضای ربات اتخاذ گردید.

شایان ذکر است نحوه تعریف محورهای مختصاتی که اعداد جدول ۱ در آن ها تعریف شده است برای هر عضو به طور کلی در شکل ۴ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۱ ویژگی های هندسی و فیزیکی اعضای پایین تنه

نام عضو	جرم (kg)	طول (mm)	محل مرکز جرم (mm)	ماتریس ممان اینرسی (gm ²)
ران	۹/۱	۴۳۲	$\begin{bmatrix} -۱۸ \\ -۱۸۵ \\ ۱۴ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X & Y & Z \\ ۱۴۴/۷ & ۸/۴ & -۰/۶۶ \\ ۸/۴ & ۳۸/۷ & -۸/۴ \\ -۰/۶۶ & -۸/۴ & ۱۵۵ \end{bmatrix}$
ساق	۳/۵۵	۴۳۳	$\begin{bmatrix} -۲۱ \\ -۱۷۸ \\ ۳ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X & Y & Z \\ ۵۲/۹ & -۱/۱ & -۰/۲۸ \\ -۱/۱ & ۶/۷ & -۱/۷ \\ -۰/۲۸ & -۱/۷ & ۵۲/۹ \end{bmatrix}$
پنجه	۰/۸۸۸	۲۶۵	$\begin{bmatrix} ۴۵ \\ -۳۶ \\ ۶ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} X & Y & Z \\ ۰/۸۷ & ۰/۵ & -۰/۱۹ \\ ۰/۵ & ۴/۱ & ۰ \\ -۰/۱۹ & ۰ & ۳/۹ \end{bmatrix}$

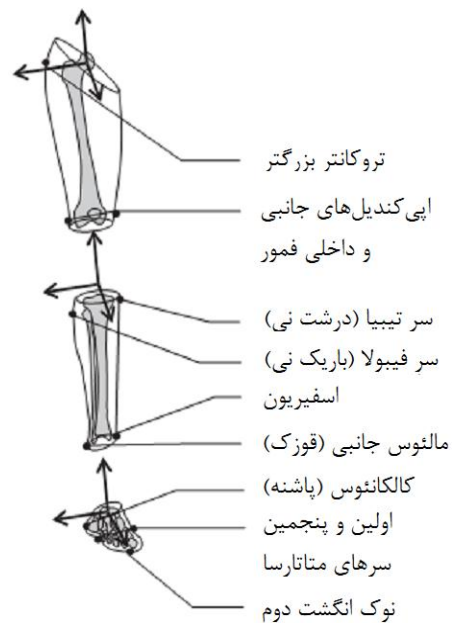
نکته دیگر حضور عملگرهای خطی در ساختار ربات است که می تواند مشابهت خواص جرمی بدن و ربات را کاهش دهد. با این حال، دو عملگر زانو و لگن بسیار نزدیک به ران و تقریباً موازی آن حرکت می کنند. در انتخاب خواص جرمی اجزای ربات به گونه ای عمل شده است که مجموعه اعضا و عملگرها در کنار هم خواصی مشابه عضو متناظر در بدن داشته باشد. جدول ۲ به طور کامل اجزای مدل و ویژگی های آن ها را بیان می نماید. با توجه به نسبت توان به حجم بسیار بالا در جک های هیدرولیک، محاسبه نیرو و دامنه حرکت مورد نیاز نشان می دهد جک با قطر داخلی ۳ سانتی متر و جرم حدودی ۱/۵ کیلوگرم قابل استفاده خواهد بود.

۴- حل دینامیک معکوس و صحنه گذاری مدل

پس از به دست آمدن معادلات و مقداردهی پارامترهای هندسی و جرمی طبق توضیحات بخش قبل، این امکان وجود دارد که در ازای سینماتیک مطلوب، معادلات برای محاسبه نیرو و گشتاورهای مورد نیاز حل شود. به این محاسبه، حل دینامیک معکوس گفته می شود. فرم اولیه معادلات نوشته شده با استفاده از روابط (۱) و (۲) به صورت زیر است.

$$A(q) \cdot F = B(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (۵)$$

بنابراین، ضرب معکوس ماتریس A در طرف دوم، بردار F که همان نیروها و گشتاورهای مجهول است، را به دست می دهد. در این فرم اولیه نیروهای تکیه گاهی و عملگرها وجود دارند. برای رسیدن به فرم استاندارد، که امکان حل دینامیک مستقیم و معکوس را فراهم می سازد، می توان به راحتی نیروهای تکیه گاهی را از معادلات حذف و معادلات حاصل را برای بردارهای $\dot{q}$ و $\ddot{q}$ حل نمود. حاصل به صورت رابطه (۶) خواهد بود.



شکل ۴ تعریف دستگاه های مختصات هر عضو [۱۲]

در این پژوهش، با کمی تقریب نسبت به تعریف بالا، محورهای Y و X دقیقاً در صفحه ساژیتال و محور Z سه عضو رو به بالا و به همراه سه مفصل و مراکز جرم ساق و ران پا در یک راستا فرض می شود. مرکز جرم پنجه نیز در صفحه ساژیتال فرض شده است. کوچک بودن مؤلفه های X و Z برای مراکز جرم ساق و ران و مؤلفه Z مرکز جرم پنجه، نشان دهنده قابل قبول بودن این فرضیات و حل دینامیک به صورت صفحه ای می باشد.

جدول ۲ اجزای ربات و خصوصیات آن ها

نام عضو	ران	ساق	پنجه	پشتی	سیلندر پستون
تعداد	۲	۲	۲	۱	۴
جرم (kg)	۶	۳	۰/۹	۵۰	۰/۵
طول (mm)	۴۵۰	۴۴۰	۲۶۰	۵۰۰	۲۴۰
محل مرکز جرم (mm)	$\begin{bmatrix} ۰ \\ -۱۹۰ \\ ۰ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ۰ \\ -۱۸۰ \\ ۰ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ۳۰ \\ -۳۰ \\ ۰ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -۲۰۰ \\ ۲۵۰ \\ ۰ \end{bmatrix}$	وسط عضو
ممان اینرسی حول Z (kgm ²)	۰/۱	۰/۰۴۴	۰/۰۰۴	۰/۵	۰/۰۰۵

حین حرکت شخص می باشد. در این پژوهش، آزمایش فوق در آزمایشگاه گیت دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف انجام شد و داده های مربوطه برای صحنه گذاری مدل استخراج گردید. شایان ذکر است برای صحنه گذاری داده هایی دلخواه نیز می توان به کار برد، ولی بهتر است مقادیری هماهنگ و متناسب برای اعضای مختلف داشت تا حرکتی معنادار و امکان پذیر صورت گیرد. سامانه مورد استفاده با نام اکسنس^۲ دارای پنج واحد اندازه گیری است که به کمک تجهیزات نصب روی بدن می توان برای مثال سینماتیک تنه، ران و ساق دو پا را طی یک آزمایش اندازه گیری و ثبت نمود (شکل ۵). واحدهای مذکور هر کدام دارای مجموعه ای از حسگرها شامل حسگر اینرسی مینیاتوری، حسگر مغناطیسی سه بعدی و پردازشگری هستند که زوایای رول، پیچ و یاو را در لحظه محاسبه می نماید و به همراه شتاب حرکت در سه بعد، سرعت تغییر زاویه و شدت میدان مغناطیسی زمین، خروجی می دهد.

این واحدها با کابل های مربوطه به یکدیگر و این زنجیره به بخش اکسباسکس^۳ متصل می گردد. این بخش از طریق بلوتوث یا کابل اطلاعات را به رایانه منتقل می کند.

واحدهای اندازه گیری مطابق شکل ۶ بر روی اعضای مورد نظر نصب گردید و حین دو قدم حرکت به جلو داده برداری انجام شد. با توجه به محدوده کوچک تغییرات زاویه در مچ پا، زاویه مطلق پنجه تقریباً برابر با زاویه ساق خواهد بود. با این حال، جداگانه تغییرات زاویه پنجه پا اندازه گیری گردید. پس از پالایش داده ها، زوایای تنه و اعضای پا طبق نمودارهای شکل ۷ به دست آمد. این داده ها از زمان برخورد یک پا با زمین تا طی یک سیکل کامل و رسیدن همان پا به موقعیت اولیه برای برخورد با زمین را پوشش می دهند.



شکل ۵ نحوه اتصال واحدهای اندازه گیری به ارسال کننده سیار

$$M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) = \tau \quad (۶)$$

دینامیک ربات اسکلت خارجی با توجه به پیچیدگی زیاد آن کاملاً ناپایدار است و برای حل دینامیک مستقیم حتماً باید سیستم را به کنترلر مجهز نمود. با این حال، در صورتی که سینماتیک مطلوب شامل $q, \dot{q}, \ddot{q}$ در دست باشد، معادله (۶) برای τ بدون هیچ مشکلی قابل حل است. حال اگر ربات در یک نرم افزار تجاری و معتبر مانند سیممکانیکس مدل سازی شود و همین محاسبات در نرم افزار نیز صورت پذیرد، با مقایسه نتایج، معادلات به دست آمده صحت سنجی می شود. بنابراین، برای اجرای شبیه سازی و صحت سنجی، به یک مجموعه داده های سینماتیک مطلوب نیاز است. سینماتیک راه رفتن انتخابی مناسب می باشد.

۴-۱- سیکل راه رفتن

راه رفتن شامل مراحل است که به صورت تناوبی انجام می شود. یک سیکل راه رفتن^۱ در ساده ترین تقسیم بندی با توجه به وضعیت یک پا شامل دو فاز ایستا و متحرک است. فاز ایستا خود شامل سه بخش دواتکایی اولیه، تکاتکایی (فاز متحرک پای مخالف) و ایستایی دواتکایی نهایی می باشد [۱۳].

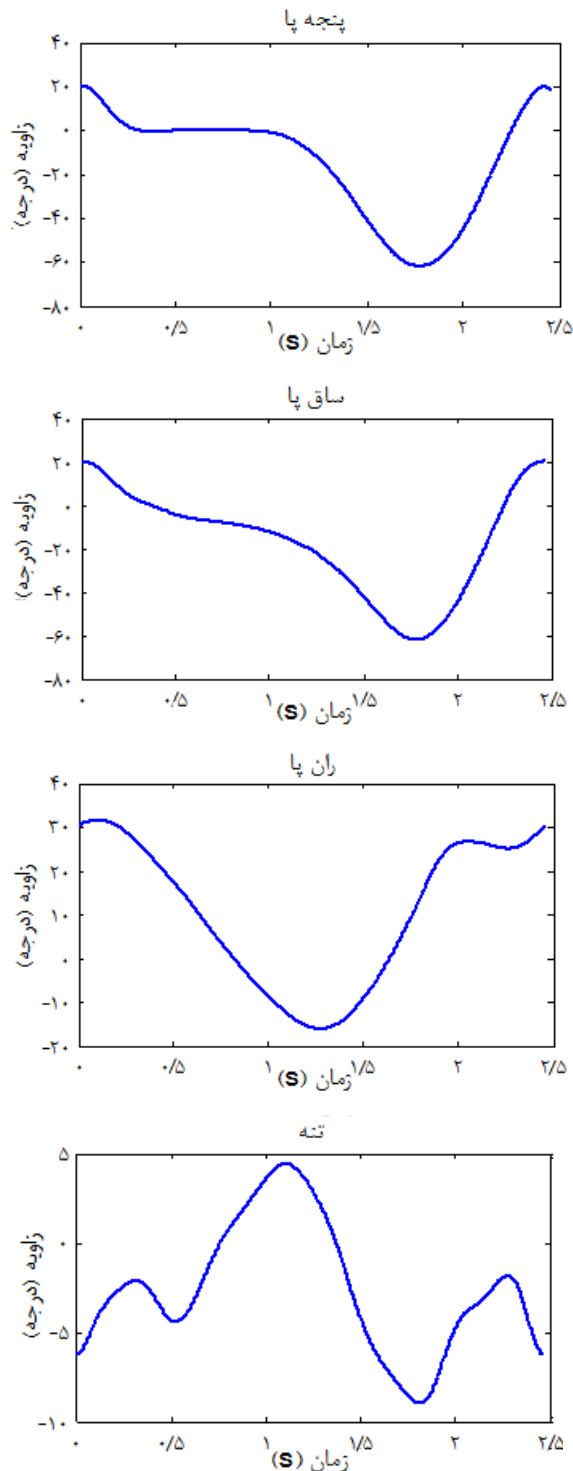
حال اگر از دید حل معادلات دینامیک به راه رفتن توجه نماییم، متوجه می شویم در وضعیت دواتکا تعداد مجهولات از معادلات بیشتر بوده و حل ناممکن می گردد. برای رفع این مشکل، محققان روش های گوناگونی مانند معرفی برخی معادلات قیدی و یا بهینه سازی توابع هدف مورد نظر را پیشنهاد داده اند که همگی خطاهایی دارند. به هر ترتیب، برای صحت سنجی مدل دینامیک ربات، کافی است در محدوده تک-اتکا که مجموعاً ۸۰ درصد از سیکل را به خود اختصاص می دهد، شبیه سازی انجام شود. قابل توجه است در عمل و حین کارکرد ربات، به دلیل آنکه در قسمت پنجه آن حسگرهای نیروسنج تعبیه می گردد، نیروهای تکیه گاهی کف پا اندازه گیری می شود و مدل دینامیک موجود در وضعیت دواتکا نیز کاراست. درحقیقت تنها تفاوت مرحله تک-اتکا، صفر بودن مقدار نیروهای تکیه گاهی در یکی از پاهاست.

یک روش اندازه گیری داده های سینماتیک راه رفتن، نصب حسگرهای شتاب و زاویه سنج روی اعضای بدن و ثبت داده ها

2. Xsens
3. Xbus

1. Gait Cycle (GC)

زیادی به فرد تحمیل می کند و استفاده از عملگر در چنین کاربردی لازم است.



شکل ۷ نمودارهای داده های سیکل گیت، از ابتدا تا انتها به ترتیب مربوط به پنجه، ساق و ران پا و تنه



شکل ۶ آزمایش داده برداری از سیکل گیت توسط نویسنده

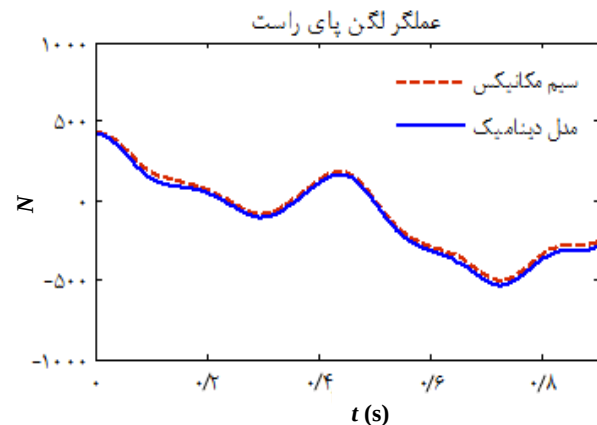
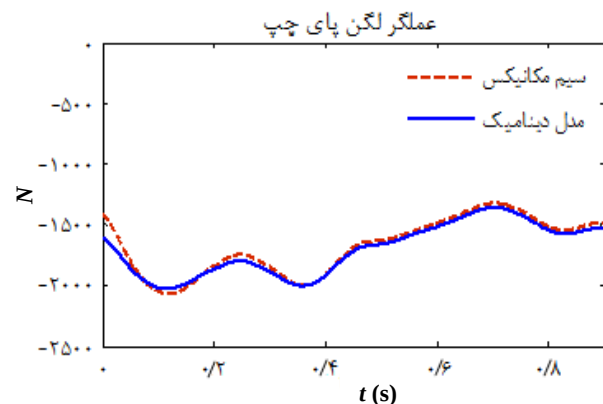
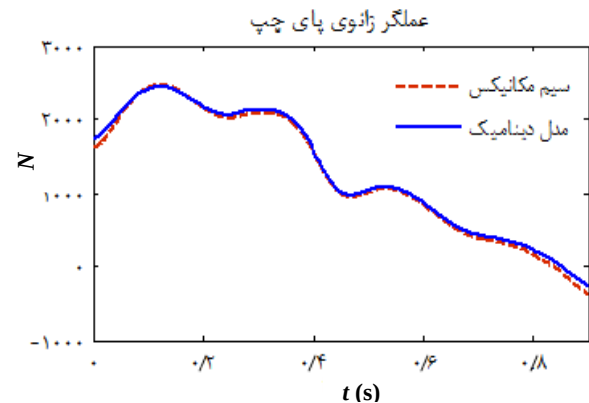
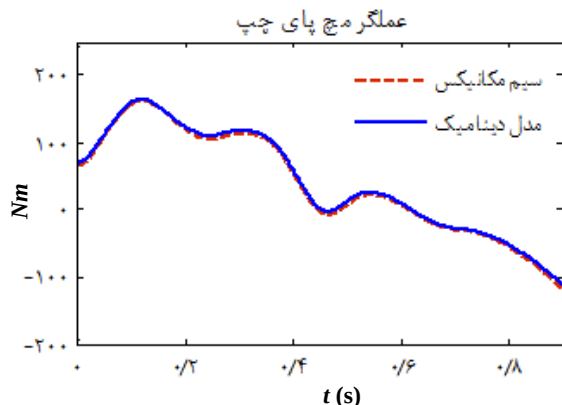
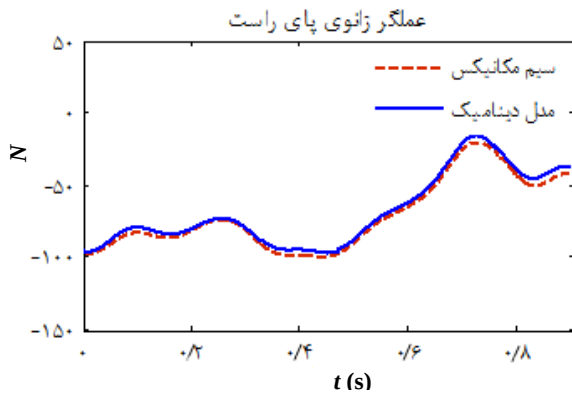
۴-۳- بحث روی نتایج

در شبیه سازی فوق، پای چپ تکیه گاه و پای راست در فاز متحرک می باشد. مشاهده می شود نتایج شبیه سازی انطباق بالایی با خروجی نرم افزار سیم مکانیکس از نظر رویه تغییرات و همچنین مقدار متغیرها دارد که معتبر بودن مدل ریاضی به دست آمده را ثابت می کند. با این وجود، اختلافاتی مشاهده می شود که تفاوت دقت حل عددی عامل آن است. گفتنی است محاسبه گر تعیین شده برای نرم افزار، دو روش رانج-کوتا از مراتب ۴ و ۵ را با گام زمانی متغیر به صورتی بهینه انتخاب و استفاده می کند.

چنانکه در معرفی ساختار منتخب بیان شد، قراردادن عملگر برای مچ پا وابسته به کاربرد ربات و میزان بار است. در کاربرد توان بخشی و بار کم عموماً در این قسمت فقط از ادوات غیرفعال یا نیمه فعال استفاده می شود. به این ترتیب منبع تأمین کننده گشتاور مورد نیاز، پای کاربر خواهد بود که از طریق اتصال کفش وی به کف پای ربات قابل انتقال است (شکل ۱). در این شبیه سازی کاربرد حمل بار سنگین (۵۰ کیلوگرم) بررسی شده است و همان گونه که نتایج نشان می دهد، مقدار بیشینه گشتاور مچ مورد نیاز حدود ۱۵۰ نیوتن متر می باشد. هرچند حین راه رفتن عادی تا ۱۲۰ نیوتن متر نیز گشتاور در مچ پا ایجاد می شود، ولی مقدار اضافه مذکور سختی

۴-۲- شبیه سازی و صحنه گذاری مدل دینامیک

در این مرحله، سینماتیک مطلوب طبق زوایا، سرعت و شتاب های زاویه ای به دست آمده در بخش قبل برای ناحیه تک اتکا تعیین گردید و مدل ریاضی به صورت دینامیک معکوس حل شد. مدل ربات در نرم افزار سیم مکانیکس^۱ نیز ایجاد گردید. حالت دینامیک معکوس انتخاب و سینماتیک مطلوب اعمال شد. نمودارهای شکل ۸ نتایج مدل سازی دینامیک را با نتایج نرم افزار مقایسه می نماید.



شکل ۸ نتایج شبیه سازی دینامیک معکوس و صحنه گذاری، از ابتدا تا انتها به ترتیب مربوط به عملگرهای زانو و لگن پای چپ، لگن و زانوی پای راست و گشتاور مچ پای چپ

۵- حل دینامیک مستقیم با کنترل امپدانس

۵-۱- مقدمه

کنترل امپدانس تعامل فرد با ربات در محل تماس را به صورت جابه جاکردن یک سیستم جرم و فنر و میراگر توسط شخص با ضرایب امپدانس دلخواه، تبدیل می نماید که برای این کار نیاز به مدل دینامیک و اندازه گیری نیروی رد و بدل شده در محل تماس دارد. در ربات اسکلت خارجی پنجه پای ربات به کف کفش کاربر اتصال دارد (شکل ۹).



شکل ۹ چگونگی اتصال پنجه پای کاربر و ربات

1. SimMechanics

$$\tau = M \cdot (\ddot{q}_d - M_d^{-1} \cdot (C_d \cdot \dot{e} + K_d \cdot e + f)) - F \cdot f + G + C \cdot \dot{q} \quad (9)$$

استفاده از قانون کنترلی (۹)، تضمین می‌کند دینامیک ربات و نیروی f از رابطه (۸) تبعیت نمایند. می‌توان این الگوریتم را اندکی ارتقا بخشید. نیاز به در دست داشتن f و سینماتیک مطلوب $\ddot{q}_d$ برای محاسبه قانون کنترلی به‌طور همزمان، بیشتر مناسب کاربردهایی است که حرکت مطلوب از پیش معلوم باشد، اما ربات اسکلت خارجی این گونه نیست. مهم‌تر آنکه غایت این روش برقراردن رابطه (۸) می‌باشد که با حضور نیروی f در سمت راست معادله، رسیدن q و مشتقات اول و دومش متناظرأ به q_d و مشتقات اول و دوم آن تضمین نمی‌شود و فقط دقیقاً در انتهای مسیر مطلوب، زمانی که نیروی f صفر می‌شود، این برابری ایجاد می‌گردد. برای اعمال قانون کنترلی (۹)، لازم است که q_d و f معلوم باشد. برای این منظور، q توسط سنسورهای ربات اندازه‌گیری می‌گردد و سپس با حل معادله (۸) q_d به‌دست آمده و از روی آن قانون کنترلی به‌دست می‌آید.

در ادامه، با اندکی تغییر در معادلات کنترل امیدانس، روندی جدید و قابل پیاده‌سازی در شبیه‌سازی و همچنین در عمل، برای اجرای کنترل امیدانس معرفی می‌گردد و در شبیه‌سازی نشان داده می‌شود که کیفیت کنترل امیدانس تا حدودی اصلاح می‌یابد. رویه مورد نظر بین دینامیک خطا و رابطه امیدانس مطلوب تمایز قایل شده، دینامیک خطا را مشابه معادله (۸)، ولی با طرف راست برابر با صفر، به‌دست می‌دهد درحالی که نیروی تماسی وجود دارد و در رابطه امیدانس مطلوب لحاظ می‌شود. به‌علاوه قانون کنترلی هم‌زمان شامل f و $\ddot{q}_d$ نیست. بدین جهت سیگنال q_0 را همان سیگنال قرائت‌شده توسط سنسور می‌گیریم و رابطه امیدانس مطلوب (۸) را با دو رابطه زیر جایگزین می‌کنیم.

$$M_d \cdot \ddot{\delta} + C_d \cdot \dot{\delta} + K_d \cdot \delta = f, \quad \delta = q_d - q_0 \quad (10)$$

$$M_d \cdot \ddot{e}_0 + C_d \cdot \dot{e}_0 + K_d \cdot e_0 = f, \quad e_0 = q - q_0 \quad (11)$$

اکنون قانون کنترلی را به‌گونه‌ای می‌نویسیم که جملات G ، $C \cdot \dot{q}$ و $F \cdot f$ از دینامیک اصلی (۷) حذف گردد. پس داریم:

$$\tau = M \cdot (\ddot{q}_0 - M_d^{-1} \cdot (C_d \cdot \dot{e}_0 + K_d \cdot e_0 - f)) - F \cdot f + G + C \cdot \dot{q} \quad (12)$$

همچنین ساق، ران و تنه ربات با باند به اعضای متناظر بدن کاربر بسته می‌شود (شکل ۱). در این محل‌های تماس سنسورهای نیروسنج تعبیه می‌گردد و زمانی که کاربر اراده حرکتی کند، قبل از شکل‌گیری حرکت، در محل‌های تماس به ربات نیرو اعمال می‌شود.

مقالات [۱۴] تا [۱۶] کنترل امیدانس را روی ربات اسکلت خارجی اعمال کرده‌اند. آلینگر و همکارانش در [۱۴] برای یک سیستم یک درجه آزادی روی زانو، با استفاده از امیدانس معکوس (مدل ادمیتانس)، ابتدا مسیر حرکت مورد نظر کاربر را محاسبه نموده، سپس کنترل موقعیت را به‌کمک کنترلر PID انجام داده‌اند. تغییرات زوایای اجزا در این ربات، که رفتاری کاملاً غیرخطی دارد، زیاد است و کنترلر مذکور برای همه این حالت‌ها نمی‌تواند کیفیت عملکرد بالایی داشته باشد. مقاله [۱۵] نیز روش فوق را برای ربات اسکلت خارجی بالاتنه به‌کار برده است. کالدول و همکارانش در [۱۶] به استفاده از کنترل امیدانس برای ربات اسکلت خارجی تمام‌تنه اشاره کرده‌اند که کارایی آن برای توانبخشی بوده؛ سیستم کنترلی با فرض کندی حرکت و صفربودن سرعت و شتاب‌ها به‌دست آمده است.

۵-۲- الگوریتم کنترل امیدانس

کتاب [۱۷] که مرجعی برای مباحث دینامیک و کنترل ربات‌ها می‌باشد، روش پیاده‌سازی کنترل امیدانس را به‌صورت زیر معرفی کرده است. مدل دینامیک ربات با لحاظ نیروی واردشده توسط شخص در محل تماس، که با f نشان داده می‌شود، طبق رابطه (۷) فرض می‌شود.

$$M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) = \tau + F(q) \cdot f \quad (7)$$

$F(q)$ ماتریس ضرایب f در رابطه استاندارد دینامیک فوق را نشان می‌دهد. به‌علاوه رابطه f با حرکت مطلوب (رابطه امیدانس مطلوب) به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

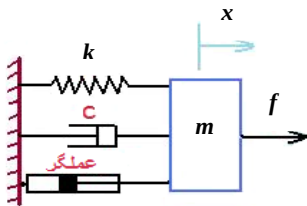
$$M_d \cdot \ddot{e} + C_d \cdot \dot{e} + K_d \cdot e = -f, \quad e = q - q_d \quad (8)$$

در معادله بالا ضرایب اینرسی، میرایی لزجی و سختی فنر، همچنین، متغییر حالت q با اندیس d مقادیر مطلوب برای این پارامترها را نشان می‌دهد. e بیانگر خطای موقعیت ربات نسبت به موقعیت هدف است. از رابطه (۸)، $\ddot{q}$ محاسبه و قانون کنترلی به‌گونه‌ای نوشته می‌شود تا جملات G ، $C \cdot \dot{q}$ و $F \cdot f$ حذف گردد. با جایگذاری $\ddot{q}$ رابطه τ مطابق زیر به‌دست می‌آید.

در لحظات پیاپی، یک حرکت مداوم را شکل می دهد. این اختلاف موقعیت، خطا نیست بلکه پس از زمان کوچکی که سیستم کنترل فرمان کاربر را اجرا نماید، عملاً ربات به موقعیتی می رسد که نسبت به هدف کاربر ممکن است کمی اختلاف داشته باشد. این اختلاف، خطای سیستم کنترل است. در مجموع اگر سیستم کنترل عملکرد ضعیفی داشته باشد، کاربر باید نیروی بیشتری صرف کند تا به هدف خود برسد.

۵-۳- نتایج شبیه سازی و صحنه گذاری روش کنترلی

ابتدا یک سیستم جرم و فنر و میراگر به همراه عملگری خطی مانند شکل ۱۰ در نظر گرفته شده است و دو روش کنترل امیدانس پیش گفته روی آن اجرا و نتایج مقایسه می گردد. پس از آن، کنترل ربات اسکلت خارجی مورد نظر با روش کنترل امیدانس ارائه شده شبیه سازی می گردد.

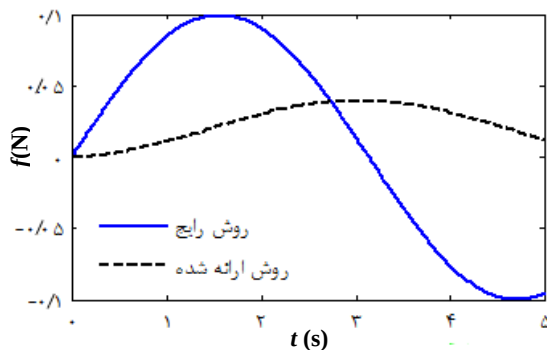


شکل ۱۰ شماتیک سیستم جرم و فنر و میراگر با عملگر خطی

فرض می شود کاربر نیروی تماسی به صورت $f = 0.1 \cdot \sin(t)$ اعمال نماید. با روش رایج، حرکت مطلوب شناسایی و از آن تبعیت می شود. سپس تبعیت از همین حرکت مطلوب با روش ارائه شده انجام می گیرد. نتایج نشان می دهد با روش ارائه شده نیروی تماسی کمتری را کاربر متحمل می شود تا آن حرکت مورد نظر صورت پذیرد. پارامترهای شبیه سازی عبارتند از:

$$m = 2, c = 15, k = 100, \quad (14)$$

$$m_d = 1, c_d = 10, k_d = 100$$



شکل ۱۱ مقایسه نیروی تماسی در دو روش

با قراردادن قانون کنترلی از رابطه (۱۲) در معادله دینامیک (۷)، معادله امیدانسی (۱۱) به دست می آید. با استفاده از رابطه (۱۰) دینامیک خطا بین موقعیت مطلوب و واقعی به فرم زیر به دست می آید:

$$M_d \cdot \ddot{e} + C_d \cdot \dot{e} + K_d \cdot e = 0, \quad e = q - q_d \quad (13)$$

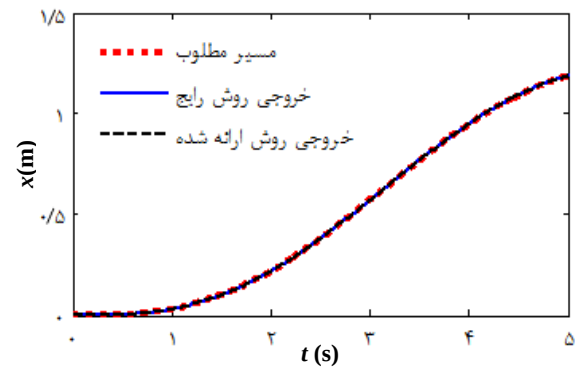
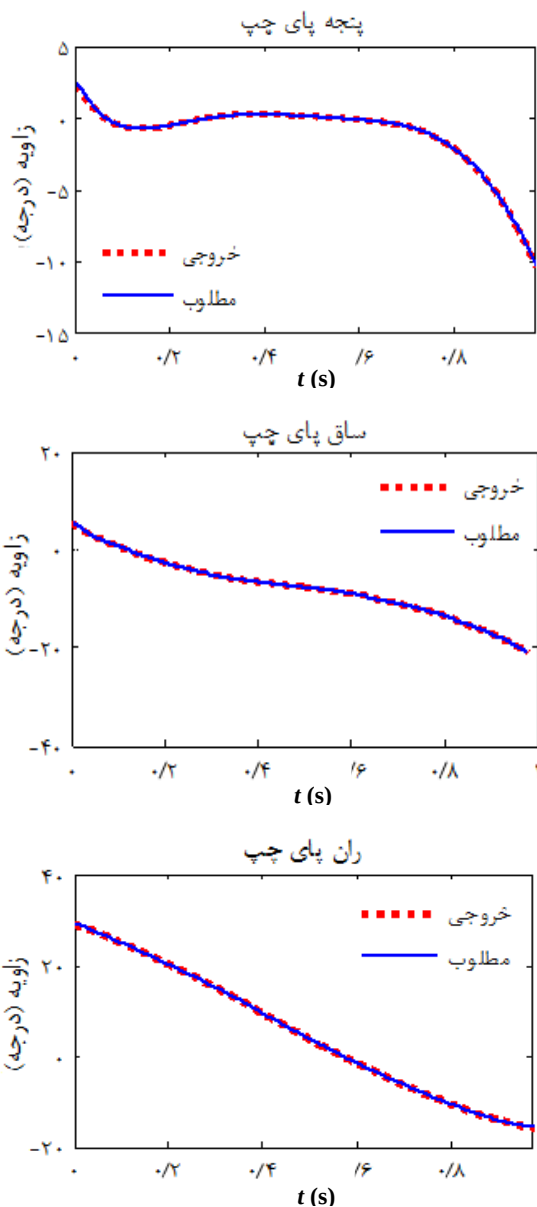
بنابراین یک متغیر جدید به دینامیک مدار بسته ربات افزوده شد و متناظراً معادله (۱۱) به دو معادله دینامیک ربات و امیدانس مطلوب اضافه گردید. تفاوت قانون کنترلی حاصل (۱۲) نسبت به روش رایج (۹) استفاده از سیگنال q_0 به جای سیگنال اندازه گیری سنسور و استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) برای تعریف موقعیت مطلوب است که نتیجه آن، صفرشدن طرف راست دینامیک خطاست.

گرچه ترکیب روابط (۱۰) تا (۱۲) برای تعریف مسیر مطلوب و در نتیجه تعریف کنترل امیدانس از لحاظ ریاضی کامل است، اما تفسیر کار انجام شده نیز تا حدی میسر است، طوری که به کارگیری دو دینامیک (۱۰) و (۱۱) برای تعریف مسیر مطلوب q_d توجیه فیزیکی نیز داشته باشد. از رابطه (۱۰) می توان این گونه برداشت نمود که q_0 موقعیت ربات در هر لحظه است که توسط سنسورها به دست می آید. q به نوعی موقعیت بعدی ربات بعد از اعمال نیروست و توسط رابطه دینامیک ربات (۷) مثلاً در τ لحظه بعد، به دست می آید، که τ زمانی بسیار کوچک است. در اینجا باید بین دو موضوع تمایز قایل شد؛ یکی میزان تغییرات مطلوب کاربر نسبت به وضعیت موجود (δ) در هر لحظه که کاربر متناسب با آن نیرو (f) وارد می کند و موضوع دیگر خطای سیستم کنترلی در انطباق دادن موقعیت ربات با موقعیت مطلوب (e) است. مورد اول مطلوب بوده و باید وجود داشته باشد، ولی مورد دوم خطای کنترلر می باشد که لازم است به صفر میل داده شود. در صورتی که این موارد تفکیک نشود و رابطه دینامیک خطا با طرف راست برابر با صفر به دست نیاید، تضمینی برای میل کردن خطا و مشتقات اول و دوم آن به صفر وجود نخواهد داشت که اثر خود را در افزایش نیروی وارد بر کاربر در محل تماس بروز می دهد.

منشأ ایجاد تفکیک مورد اشاره، در نظر گرفتن این نکته است: کاربر در هر لحظه که نیرویی به ربات اعمال می نماید، هدفش آن است که پس از زمان بسیار کوچکی (τ) ربات به موقعیت جدیدی که مطلوب وی است برسد. انجام این فرایند

کنترلی با نیروی عملگرها حاصل از حل دینامیک معکوس مطابقت داشته باشد که نتایج همین موضوع را نشان می دهد. برای عملگرهای هیدرولیک خطی با قطر داخلی ۳ سانتی متر و فشار هیدرولیک ۶ مگاپاسکال، حد اشباع تا ۴۰۰۰ نیوتن نیز قابل اعمال است، ولی بیشینه نیروی عملگرها در شبیه سازی موجود ۲۵۰۰ نیوتن بوده است.

طبق نمودارهای شکل ۱۵، گشتاورهایی ناچیز و کمتر از نیم نیوتن متر در محل های تماس به اعضای بدن کاربر وارد می شود. این مقادیر تنها فشار وارد شده به شخص است، در حالی که وی باری به بزرگی ۵۰ کیلوگرم را حمل می نماید.



شکل ۱۲ مقایسه کیفیت تبعیت از مطلوب در دو روش

در توضیح نتایج شبیه سازی باید گفت تا زمانی که f مثبت است، به معنای تمایل کاربر به افزایش سرعت و شتاب و جلوتر رفتن جرم می باشد. با برعکس شدن جهت نیرو، به تدریج از سرعت و شتاب جرم کاسته می شود تا زمانی که جابه جایی به تغییر جهت نزدیک می شود و زمان شبیه سازی به پایان می رسد. مشاهده می شود با وجود تبعیت از یک حرکت مطلوب، روش جدید ارائه شده نیروی تماسی کمتری لازم دارد.

اکنون کنترل ربات مورد نظر شبیه سازی می شود. پارامترهای

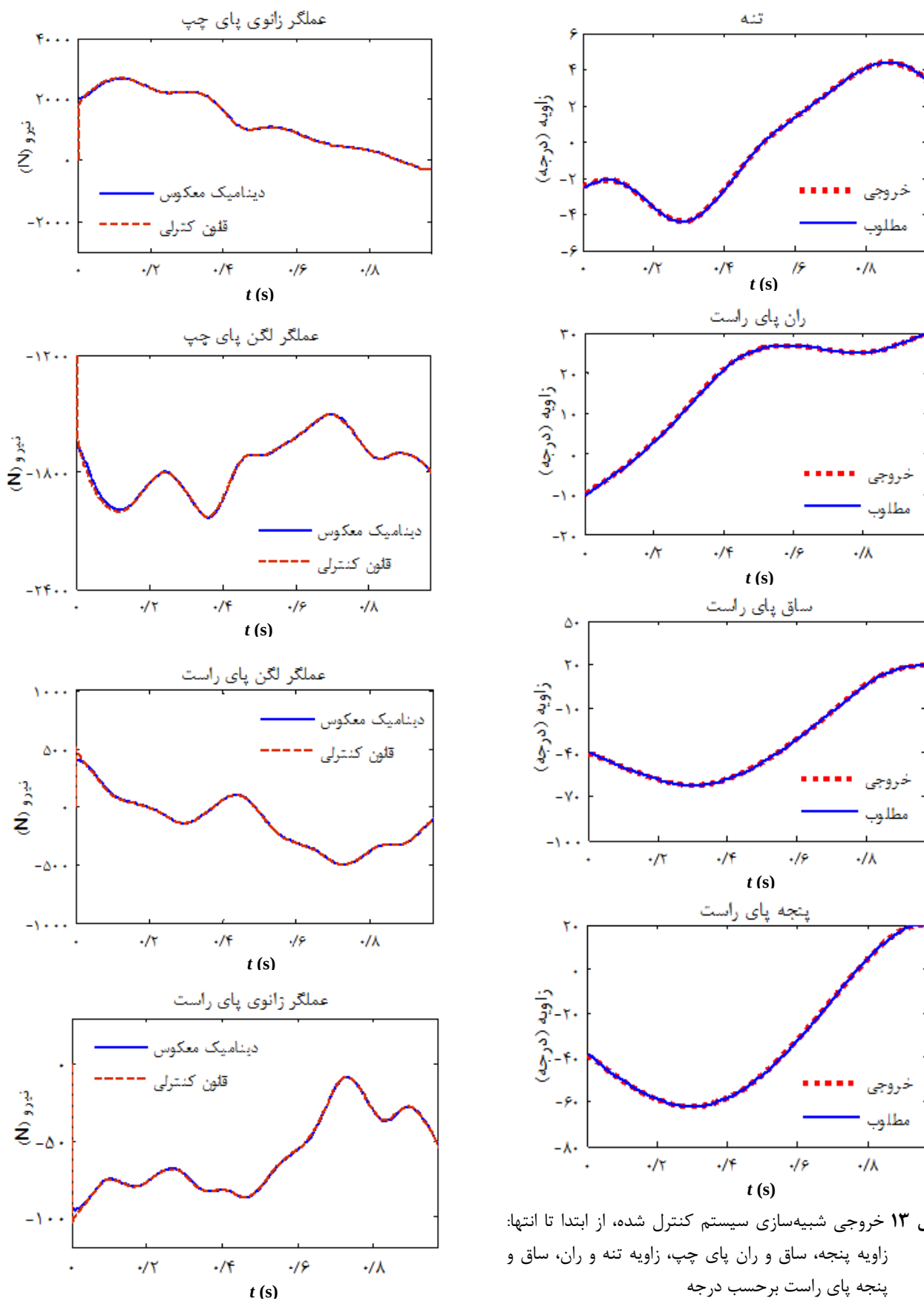
امپدانس مطلوب عبارت اند از:

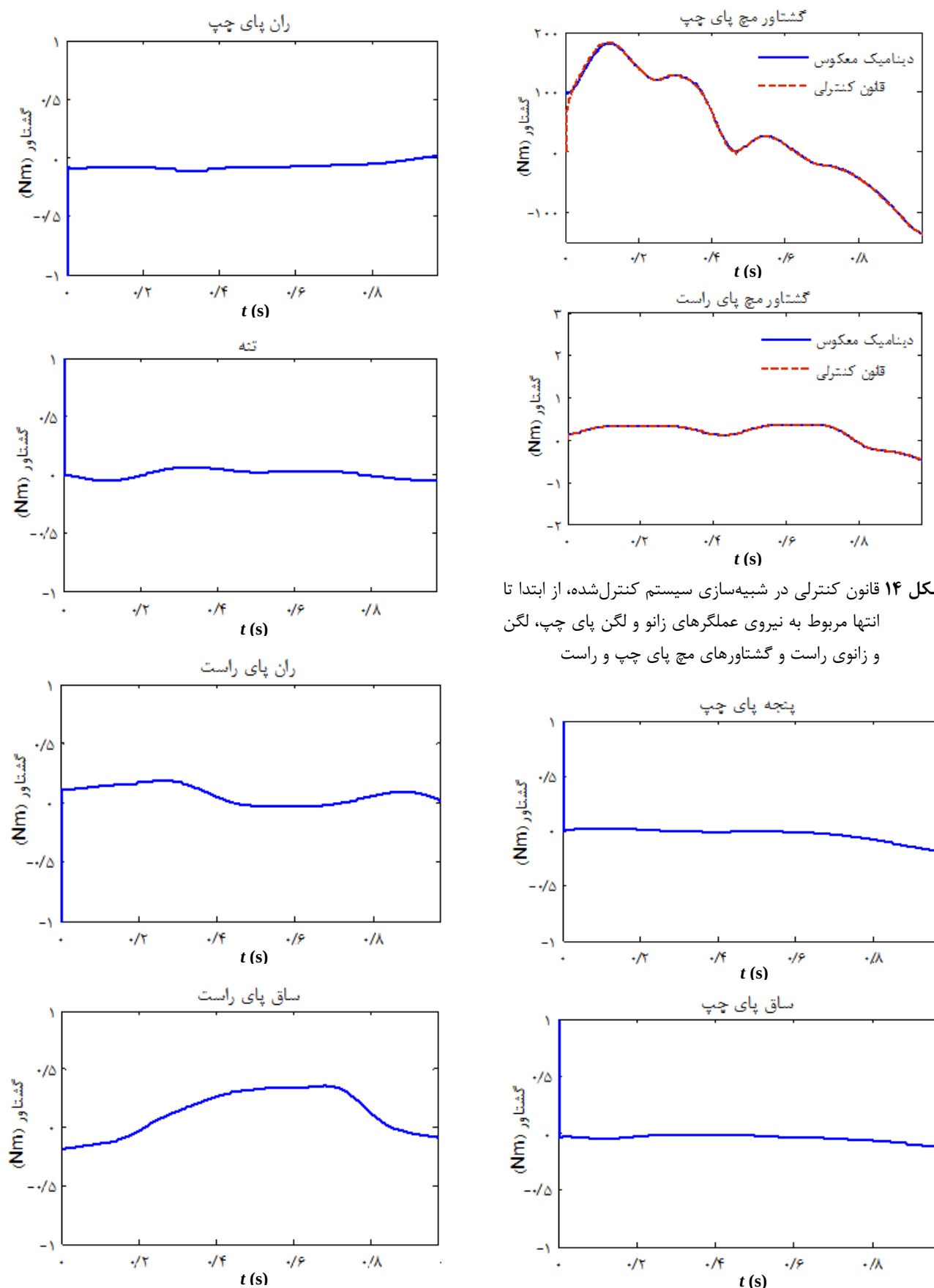
$$M_d = 0.1 \times I_7, C_d = 10 \times I_7, K_d = 100 \times I_7 \quad (15)$$

گفتنی است معیار انتخاب ضرایب مطلوب کیفیت تبعیت خوب در عین نیروی محل تماس کم می باشد [۱۸] و به دلیل عدم وجود مقالاتی که ضرایب امپدانس مناسب برای این کاربرد را بیان کرده باشد، با آزمون و خطا ضرایب فوق انتخاب شد.

نتایج شبیه سازی شامل سینماتیک تولید شده و انطباق آن با سینماتیک مطلوب (شکل ۱۳)، نیرو و گشتاورهای به دست آمده از قانون کنترلی (شکل ۱۴) و نیروی مدل شده در تماس فرد با ربات (شکل ۱۵) می باشد. شایان ذکر است مورد آخر درواقع گشتاورهایی است که بدن از طریق محل تماس به تک تک اعضای ربات وارد می کند. اگر حسگرها در محل تماس از نوع نیروسنج باشد، به راحتی گشتاور ناشی از این نیروی هر مفصل با ضرب بازوی گشتاوری قابل محاسبه است.

چنانکه نتایج شبیه سازی نشان می دهد، طی زمان حرکت هماهنگی کامل بین بدن و ربات برقرار شده است که کارایی بسیار خوب این الگوریتم کنترل را نشان می دهد (شکل ۱۳). قوانین کنترلی به دست آمده از کنترلر در شکل ۱۴ آمده است. به دلیل تبعیت دقیق از حرکت مطلوب انتظار می رود قوانین

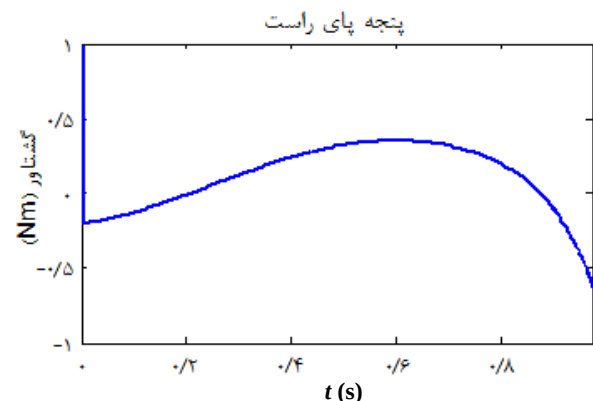




شکل ۱۴ قانون کنترلی در شبیه‌سازی سیستم کنترل‌شده، از ابتدا تا انتها مربوط به نیروی عملگرهای زانو و لگن پای چپ، لگن و زانوی راست و گشتاورهای مچ پای چپ و راست

۷- مراجع

- [1] Herr H., "Exoskeletons and Orthoses: Classification, Design Challenges and Future Directions", *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, Vol. 6, No. 21, 2009, pp. 1-9.
- [2] Bogue R., "Exoskeletons and Robotic Prosthetics: a Review of Recent Developments", *Industrial Robot*, Vol. 36, 2009, pp. 421-427.
- [3] Dick J., "Human Bipedal Locomotion Device", *U.S. Patent*, US5016869, 1991.
- [4] Kazerooni H., Zoss A., "Architecture and Hydraulics of a Lower Extremity Exoskeleton", *Proc of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Orlando, Florida USA, 2005.
- [5] Kazerooni H., et al., "On the Control of the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)", *Proc of the International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005.
- [6] Sankai Y., "Leading Edge of Cybernetics: Robot Suit HAL", *SICE-ICASE International Joint Conference*, Bexco, Busan, Korea, 2006.
- [7] Sankai Y., Hayashi T., "Control Method of Robot Suit HAL working as Operator's Muscle using Biological and Dynamical Information", *International Conference on Intelligent Robots and Systems - IROS*, 2005, pp. 431-438.
- [8] Walsh C. J., "An Autonomous, Underactuated Exoskeleton for Loadcarrying Augmentation", *Proc of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, Beijing, China.
- [9] Onyshko S., Winter D. A., "A Mathematical Model for the Dynamics of Human Locomotion", *Journal of Biomechanics*, 1980, Vol. 13, pp. 361-368.
- [10] Koopman B., Grootenboer H. J., "An Inverse Dynamics Model for the Analysis Reconstruction and Prediction of Bipedal Walking", *J. Biomechanics*, 1995, Vol. 13, pp. 361-368.
- [11] Kazerooni H., "Exoskeletons for Human Performance Augmentation", *Springer Handbook of Robotics*, Edited by O. K. Bruno Siciliano, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [12] Dumas R., et al., "Adjustments to Mc Conville et al. and Young et al. Body Segment Inertial Parameters", *Journal of Biomechanics*, 2007, Vol. 40, pp. 543-553.
- [13] Drewes L. K., "Altered Ankle Kinematics and Shank-Rear-Foot Coupling in Those with Chronic Ankle Instability", *Sport Rehabilitation*, Vol. 18, No. 3, 2009, pp. 375-388.
- [14] Aguirre-Ollinger G., et al., "Active-Impedance Control of a Lower-Limb Assistive Exoskeleton",



شکل ۱۵ گشتاور وارد شده به اعضای بدن حین شبیه سازی سیستم کنترل شده، از ابتدا تا انتها مربوط به پنجه، ساق و ران پای چپ، تنه و ران، ساق و پنجه پای راست

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش، مدل سازی دینامیکی به همراه طراحی الگوریتم کنترل، که بخش های پایه ای تکنولوژی ربات های اسکلت خارجی را تشکیل می دهد، انجام شد. در مقالات، مدل سازی و شبیه سازی کنترل این ربات حداکثر برای بخشی با یک درجه آزادی ارائه شده است. به علاوه، روش کنترل امپدانس تحلیل شده و در بیان آن، خصوصاً برای کاربردی مانند ربات اسکلت خارجی، نکاتی اصلاحی لحاظ گردید. ساختاری مناسب با الگوبرداری از تحقیقات جامع در این زمینه انتخاب شد و مدل دینامیکی آن به صورت نیوتنی و در صفحه ساژیتال به دست آمد. سپس به منظور حل دینامیک معکوس و تأیید اعتبار مدل با داده هایی هماهنگ و امکان پذیر، طی آزمایشی داده های سینماتیکی راه رفتن استخراج شد و از آن به عنوان سینماتیک مطلوب در شبیه سازی ها استفاده گردید. ربات در نرم افزار تجاری سیم مکانیکس پیاده سازی و به طور مشابه حل دینامیک معکوس در آن انجام گرفت. تطابق بالای نتایج صحت مدل را اثبات نمود. حل دینامیک به صورت مستقیم با توجه به سیستم پیچیده این ربات نیاز به کنترلر دارد. بیان معرفی شده برای کنترل امپدانس، در کنترل ربات هدف مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد این روش، علاوه بر پایدار ساختن دینامیک، کیفیت تبعیت از مطلوب بالایی دارد و هماهنگی کامل بین ربات و بدن ایجاد می نماید. به علاوه گشتاور وارد شده به اعضای بدن کاربر حین حمل باری به بزرگی ۵۰ کیلوگرم، کوچک و کمتر از نیم نیوتن متر است.

- Rehabilitation - Design, Control and Testing”, *International Journal of Humanoid Robotics*, Vol. 4, No. 3, 2007, pp. 1-24.
- [17] Spong M., *Robot Modelling and Control*, United States of America, John Wiley, 2003.
- [18] Hogan, N., “Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part1, Part2, Part3”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1985, Vol. 107, pp. 1-24.
- Proceedings of the 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, Noordwijk, Netherlands, 2007.
- [15] Yu W., et al., “PID Admittance Control for an Upper Limb Exoskeleton”, *American Control Conference*, 2011, O'Farrell Street, San Francisco, CA, USA, pp. 1124 - 1129.
- [16] Caldwell D. G., Tsagarakis. N. G., “Soft Exoskeletons for Upper and Lower Body