

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

محمد مهدی عطایی^۱, حسن سالاریه^{۲*}, آریا السنتی^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، ۱۱۱۵۵-۹۵۶۷، 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 می‌دهد. پژوهش پیش‌رو به مدل سازی دینامیکی و طراحی سیستم کنترل برای نوع پایین‌تنه این ربات پرداخته است. در مقالات موجود حداقل بخشی از ربات با یک درجه آزادی مدل سازی و کنترل شده است که به خواننده دید مناسبی از کنترل هم‌زمان تمام اجزای ربات را نمی‌دهد. در این راستا، ابتدا ساختار مناسب مشابه پروژه بلیکس دانشگاه برکلی برای ربات انتخاب و معادلات دینامیک مربوطه به صورت صفحه‌ای و به روش نیوتن-اولر استخراج گردید. طی آزمایشی، داده‌های سینماتیک را در فن به کمک سامانه اکسنس اندازه‌گیری و دینامیک معکوس در نرم‌افزار سیم‌مکانیکس در کنار مدل پیاده‌شده در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی گردید که تطابق بالای نتایج مؤید صحت مدل بود. روش کنترل امپدانس بررسی و نکاتی اصلاحی در آن لحاظ شد که عملکرد آن را کمی بهبود بخشد. سپس ربات با استفاده از این الگوریتم کنترل گردید. بدین ترتیب سیستم پایدار شده، حرکت ربات با بهترین کیفیت از بدن تبعیت نمود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد، حین حمل باری به بزرگی ۵۰ کیلوگرم، گشتاورهایی کمتر از نیم نیوتن‌متر، در محلهای تماس با ربات، به اعضای بدن کاربر وارد می‌شود.

کلیدواژگان: ربات اسکلت خارجی، معادلات دینامیک نیوتن-اولر، سیکل گیت، کنترل امپدانس

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 نمونه از کارهای ابتدایی، پروژه هاردیمن [۳] بود که در اوخر 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 می‌نمود. اما پروژه‌های موفق از حدود سال ۲۰۰۰ آغاز گردید و ربات‌هایی در دانشگاه برکلی (پروژه بليکس)، دانشگاه ام آی تی و یک شرکت نظامی (پروژه اگزوس) ساخته شد. به‌غیر از این موارد، در ژاپن ربات هال در دانشگاه سوکوبا و یک ربات در شرکت پاناسونیک و موارد معدهود دیگر تاکنون ساخته شده‌اند.

طراحی ساختار (مکانیزم) و عملگرها برای ربات بليکس 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 پس‌خوراند مثبت از خروجی حرکت ربات و اعمال ضربی دینامیک معکوس ربات، در مدار حلقه بسته کنترلی، حاصل شده است. نکته مثبت روش کنترلی این عدم تشخیص حرکات ارادی فرد از حرکات غیرارادی و تحمل شده از خارج، همچنین افزایش حساسیت سیستم نسبت به خطاهای مدل‌سازی 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 می‌نماید که مرکب از دو سیستم مبتنی بر کنترل امپدانس و خواندن سیگنال‌های ای ام جی^۱ با حسگرهای مخصوص از سطح پوست کاربر است. استفاده از این حسگرهای پوشیدن ربات را دشوار می‌سازد.

در پژوهش حاضر دینامیک یک ربات اسکلت خارجی پایین‌تنه برای تمامی اجزا و درجات آزادی آن در صفحه سازیتال مدل‌سازی می‌گردد و روش کنترل آن تبیین می‌شود. اکثر پژوهش‌ها به مدل‌های ساده‌شده و برای بخشی از ربات با یک درجه آزادی بستنده کرده‌اند. چنین مدلی بستر لازم برای کنترل ربات را فراهم نمی‌سازد. پیرامون کنترل این ربات، مقالات معدهود موجود که بررسی می‌شوند، به خواننده دید

یک آرزوی دیرینه انسان دست‌یابی به ماشینی بوده است که به‌صورت پوششی حول بدن قرار گیرد و در هماهنگی کامل با حرکات آن، قدرت جسمانی شخص را به‌واسطه منبع انرژی و عملگرها خود چندین برابر نماید. این آرزو بارها در رمان‌های تخیلی و فیلم‌های سینمایی تجسم یافته است. با این وجود تلاش‌های علمی صورت‌گرفته در این راستا، در سال‌های اخیر به موفقیت رسیده، منجر به ساخت ربات اسکلت خارجی شده است [۱]. شکل ۱ دو ربات اسکلت خارجی را نشان می‌دهد که اولین نمونه‌های موفق و معرفی‌شده در سال ۲۰۰۵ می‌باشند. این ربات می‌تواند پوشش‌دهنده کل بدن و یا بالاتنه یا پایین‌تنه به‌نهایی باشد. در این پژوهش، نوع پایین‌تنه مد نظر قرار گرفته است، زیرا چنین رباتی کارآیی‌های فراوانی دارد و بخش اصلی انتقال بار به زمین محسوب می‌شود. طراحی و افروزن بخش بالاتنه شامل بازو و دست‌ها به‌راحتی امکان‌پذیر است. کارخانجات و کارگاه‌ها، خدماتی از قبیل امداد و نجات، حمل و نقل، بیمارستان‌ها و غیره، همچنین صنایع نظامی می‌توانند 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. می‌توان گفت نخستین تحقیقات علمی در این زمینه از حدود دهه ۱۹۶۰ آغاز گردید و پژوهشگرانی از آمریکا و بیوگوسلاوی سابق به این موضوع پرداختند؛ در مورد اول با رویکرد نظامی و مورد دوم توان بخشی به معلومان [۱].



شکل ۱ ربات‌های اسکلت خارجی بليکس (راست) و هال (چپ) [۲]

1. EMG

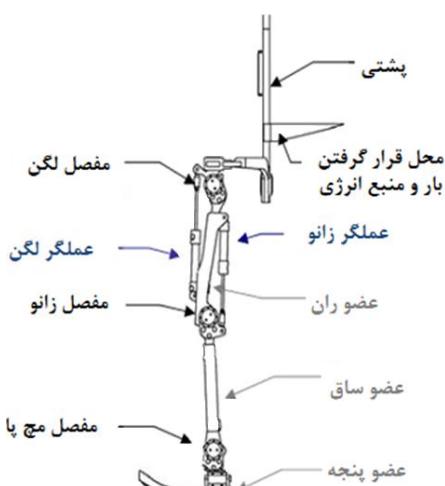
توان‌بخشی و به دور از بارهای زیاد، می‌توان دو عملگر دیگر روی دو مج پا را نیز با ادوات غیرفعال یا نیمه‌فعال جایگزین نمود (ربات‌های هال و دانشگاه ام آی تی [۸,۶]).

پس از لحاظ‌کردن 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. شکل ۲ به صورت نمای از کنار نشان داده شده است.

با توجه به ویژگی‌های جرمی و هندسی اجزای بدن طبق جدول ۱، در جدول ۲، لیست اجزای تشکیل‌دهنده ربات به همراه خصوصیات جرمی و هندسی انتخاب شده برای آن‌ها ذکر گردیده است.

۳- مدل‌سازی دینامیک ربات

برخلاف دینامیک ربات اسکلت خارجی، پیرامون بررسی دینامیک را هر فتن انسان تحقیقات زیادی انجام شده است و مشابهت ساختار این ربات با بدن، اقتباس از تحقیقات مذکور را ممکن می‌سازد. آنیشکو [۹] مدل صفحه‌ای لینک-سگمنتی از بدن ایجاد کرده و به روش لاگرانژ در دو حالت تک و دو اوتک را هر فتن را مدل کرده است، ولی معادلات ارائه شده مخصوص مدل مفروض می‌باشد و جامعیت ندارد. کوپمن [۱۰] دینامیک معکوس با معادلات نیوتون-اولر برای مدل لینک-سگمنتی صفحه‌ای را حل نموده که قابلیت تعمیم‌پذیری به مدل‌های دیگر را دارد. به همین دلیل و با توجه به آنکه عمده‌ترین حرکات و نیروها در صفحه سازیتال شکل می‌گیرد [۱۱]، مدل‌سازی دینامیکی با الگوگرفتن از مقاله کوپمن صورت گرفت.



شکل ۲ طرح شماتیک ساختار ربات [۴]

مناسبی از چگونگی کنترل همزمان همه اجزای ربات را نمی‌دهند. در پروژه‌های ساخت ربات نیز که عمداً نظامی یا در اوایل مراحل تجاری‌سازی بوده‌اند، در صورت انتشار، اطلاعاتی کلی منتشر شده است.

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

۲- انتخاب ساختار

اولین قدم قبل از مدل‌سازی و کنترل ربات، تعیین ساختار آن است که خود موضوعی مهم و مستلزم تحقیقات جامع می‌باشد. به دلیل تعامل گسترده دستگاه با بدن کاربر و تماس قسمت‌های مختلف آن، طراحی دقیق بدنه حائز اهمیت فراوان است. برخی موضوعات مهم عبارت‌اند از: خواص فیزیکی اجزای ربات مانند جرم، ممان‌های 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 مج پا ۳ عدد بوده که از این بین سه درجه آزادی در صفحه سازیتال به علاوه دوران جانبی لگن به عملگر خطی دو طرفه هیدرولیک مجهز شده‌اند.

در این پژوهش عملگر حرکت جانبی لگن حذف گردید که به جای آن استفاده از ادوات غیرفعال پیشنهاد می‌شود. پروژه‌های هال، ایگروس و ربات دانشگاه ام آی تی نیز برای این درجه آزادی عملگر به کار نبرده‌اند [۸,۶,۲]. شایان ذکر است گشتاور مورد نیاز در این درجه آزادی از دوران‌های داخل صفحه سازیتال 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 ربات‌های دیگر پژوهشگران نشان داد در حضور بارهای بزرگ لازم است مج پا به عملگر مجهز شود ولی در کاربردهای

همچنین، برای اجزای دیگر به‌طور مشابه می‌توان دیاگرام آزاد را رسم و معادلات دینامیکی را نوشت. از محاسبات سینماتیکی نیز روابط شتاب اجزا به‌دست می‌آید. پس از نوشتن همه معادلات حجم آن بیش از ۲۰ صفحه می‌باشد که امکان درجشان در این مقاله وجود ندارد.

$$\begin{aligned} m_3 a_{3,x} &= F_{1x} + F_{2x} + F_{3x} + F_{4x} \\ m_3 a_{3,y} &= F_{1y} + F_{2y} + F_{3y} + F_{4y} - m_3 g \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\begin{aligned} j_3 \cdot \ddot{\theta}_3 &= F_{1x} l_{KC} \cos(\theta_3) + F_{1y} l_{KC} \sin(\theta_3) \\ &+ F_{2x} (l_{KC} \cos(\theta_3) - l_{KB1} \cos(\theta_3 - \alpha_4)) \\ &+ F_{2y} (l_{KC} \sin(\theta_3) - l_{KB1} \sin(\theta_3 - \alpha_4)) \\ &- F_{4x} l_{HC} \cos(\theta_3) - F_{4y} l_{HC} \sin(\theta_3) \\ &- F_{3x} (l_{KB2} \cos(\theta_3 + \alpha_3) - l_{KC} \cos(\theta_3)) \\ &- F_{3y} (l_{KB2} \sin(\theta_3 + \alpha_3) - l_{KC} \sin(\theta_3)) \end{aligned} \quad (۴)$$

که در آن C نقطه مرکز جرم لینک و l بیان‌کننده فاصله بین دو نقطه‌ای است که در اندیس آن نمایش داده شده است. مثلاً فاصله دو نقطه K و C است.

۲-۳- پارامترهای فیزیکی پایین‌تنه

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مناسب است پارامترهای هندسی و فیزیکی اجزای ربات، از جمله طول، جرم، مکان مرکز جرم و ممان‌های اینرسی، مشابه بدن تعیین شود. دوماس و همکارانش [۱۲] از اطلاعات منتشرشده توسط پژوهشگران دیگر برای مردم سفیدپوست استفاده کرده‌اند و طی محاسباتی مبنای اندازه‌گیری طول اعضاء، محل مراکز جرم و جهت‌گیری محورهای ممان اینرسی اصلی را اصلاح و به‌صورت استاندارد ارائه نموده‌اند. میانگین قد و وزن جامعه آماری آن‌ها با افراد جامعه ایران هماهنگی دارد.

تخمین خواص جرمی اعضای فردی با جرم و قد مشخص با قراردادن این دو مقدار در فرمول‌های خطی داده شده در [۱۲] برای درون‌یابی میسر است. میانگین قد و جرم مردان ۱۷۷ سانتی‌متر و ۸۰ کیلوگرم بوده است. جدول ۱ خواص جرمی اعضای پایین‌تنه برای قد ۱۷۵ سانتی‌متر و جرم ۷۴ کیلوگرم را نشان می‌دهد که برای اعضای ربات اتخاذ گردید. شایان ذکر است نحوه تعریف محورهای مختصاتی که اعداد جدول ۱ در آن‌ها تعریف شده است برای هر عضو به‌طور کلی در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد.

۳- استخراج معادلات دینامیک

به‌منظور طراحی ساختار و بررسی همه پارامترهای دینامیکی آن نوشتن معادلات به‌روش نیوتون-اولر ترجیح دارد. مزیت دیگر نسبت به روش لاغرانژ، در مواردی مانند ربات مورد نظر با حجم زیاد معادلات، آن است که شناسایی و تصحیح خطا در مدل‌سازی آسان‌تر است. هر عضو ساختار مورد نظر به‌صورت یک لینک با خواص جرمی مشابه بدن و مفاصلی به‌صورت لولا در صفحه مدل گردید. ساختار ۷ عضو اصلی و ۴ عملگر خطی دارد که از دینامیک آن‌ها صرف‌نظر نشده است. هر عملگر با دو لینک، که از طریق یک مفصل منشوری در امتداد یک‌دیگر حرکت می‌کنند، مدل شده است. برای ۱۵ لینک موجود، ۴۵ معادله نیوتون-اولر نوشته شد. با درنظر گرفتن یک بار ۵۰ کیلوگرمی در پشتی ربات، مدل مشابه شخصی ۷۴ کیلوگرمی و با قد ۱۷۵ سانتی‌متر است.

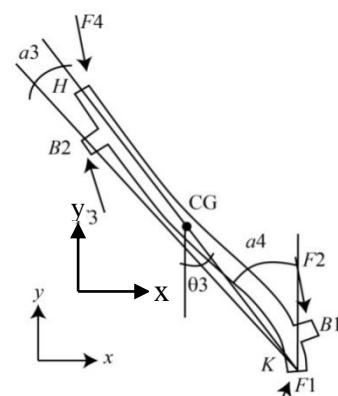
فرم کلی و برداری این معادلات به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\sum_{j=1}^{N_{ij}} F_{ij} = m_i \times (\ddot{a}_i - g) \quad (۱)$$

$$\sum_{j=1}^{N_{ij}} (M_{ij} + r_{ij} \times F_{ij}) = J_i \times \frac{dW_i}{dt} \quad (۲)$$

در روابط فوق اندیس i نشان‌دهنده لینک مورد نظر و j مفصل قرار گرفته روی آن می‌باشد. 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 زاویه‌ای آن می‌باشد.

به‌طور نمونه، نحوه مدل‌کردن لینک ران پا ارائه می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳ دیاگرام آزاد لینک ران

نکته دیگر حضور عملگرهای خطی در ساختار ربات است که می‌تواند مشابه 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 می‌کنند. در انتخاب خواص جرمی اجزای ربات به گونه‌ای عمل شده است که مجموعه اعضوها و عملگرهای در کنار هم خواصی مشابه عضو متناظر در بدن داشته باشد. جدول ۲ به‌طور کامل اجزای مدل و ویژگی‌های آن‌ها را بیان می‌نماید. با توجه به نسبت توان به حجم بسیار بالا در جک‌های هیدرولیک، محاسبه نیرو و دامنه حرکت مورد نیاز نشان می‌دهد جک با قطر داخلی ۳ سانتی‌متر و جرم حدودی ۱/۵ کیلوگرم قابل استفاده خواهد بود.

۴- حل دینامیک معکوس و صحه‌گذاری مدل

پس از بدست‌آمدن 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 می‌شود. فرم اولیه معادلات نوشته شده با استفاده از روابط (۱) و (۲) به صورت زیر است.

$$A(q) \cdot F = B(q, \dot{q}, \ddot{q}) \quad (5)$$

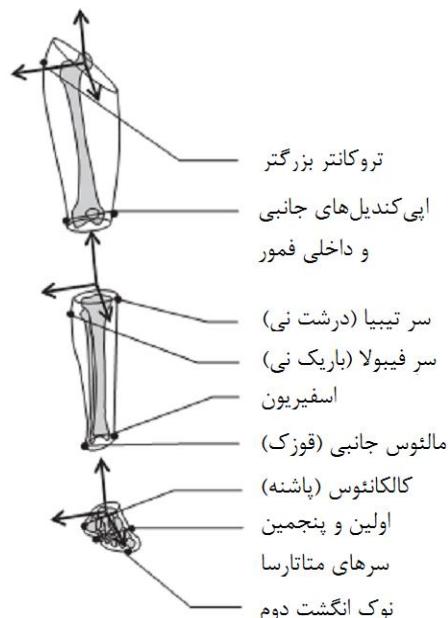
بنابراین، ضرب معکوس ماتریس A در طرف دوم، بردار F که همان نیروها و گشتاورهای مجھول است، را بدست می‌دهد. در این فرم اولیه نیروهای تکیه‌گاهی و عملگرهای وجود دارند. برای رسیدن به فرم استاندارد، که امکان حل دینامیک مستقیم و معکوس را فراهم می‌سازد، می‌توان به راحتی نیروهای تکیه‌گاهی را از معادلات حذف و معادلات حاصل را برای بردارهای \ddot{q} و \dot{q} حل نمود. حاصل به صورت رابطه (۶) خواهد بود.

جدول ۲ اجزای ربات و خصوصیات آن‌ها

نام اعضا	ران	سان	پنجه	پشتی	سینلدر پستون
تعداد	۴	۴	۱	۲	۲
جرم (kg)	۰/۵	۱	۵۰	۰/۹	۳
طول (mm)	۲۶۰	۲۴۰	۵۰۰	۲۶۰	۴۴۰
محل مرکز جرم (mm)					
عضو ایمنی	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۰	۰/۲۰
اعضو ایمنی	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
اعضو ایمنی	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸
اعضو ایمنی	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۹
ممان ایمنی	۱۰۰۳	۱۰۰۵	۰/۱۵	۰/۱۰۰۴	۰/۱۰۰۴
حول z (kgm ²)					

جدول ۱ ویژگی‌های هندسی و فیزیکی اعضای پایین‌تنه

نام اعضا	جرم (kg)	طول (mm)	محل مرکز جرم (mm)	ماتریس ممان ایمنی (gm ²)
ران	۹/۱	۴۳۲	-۱۸	$\begin{bmatrix} X & Y & Z \\ ۱۴۶/۷ & ۸/۴ & -۰/۶۶ \\ ۸/۴ & ۳۸/۷ & -۸/۴ \\ -۰/۶۶ & -۸/۴ & ۱۵۵ \end{bmatrix}$
سان	۳/۵۵	۴۳۳	-۲۱	$\begin{bmatrix} X & Y & Z \\ ۵۲/۹ & -۱/۱ & -۰/۲۸ \\ -۱/۱ & ۶/۷ & -۱/۷ \\ -۰/۲۸ & -۱/۷ & ۵۲/۹ \end{bmatrix}$
پنجه	۰/۸۸۸	۲۶۵	۴۵	$\begin{bmatrix} X & Y & Z \\ ۰/۸۷ & ۰/۵ & -۰/۱۹ \\ ۰/۵ & ۴/۱ & . \\ -۰/۱۹ & . & ۳/۹ \end{bmatrix}$



شکل ۴ تعریف دستگاه‌های مختصات هر عضو [۱۲]

در این پژوهش، با کمی تقریب نسبت به تعریف بالا، محورهای u و x دقیقاً در صفحه سازیتال و محور z سه عضو را به بالا و به همراه سه مفصل و مراکز جرم سان و ران پا در یک راستا فرض می‌شود. مرکز جرم پنجه نیز در صفحه سازیتال فرض شده است. کوچک‌بودن مؤلفه‌های x و z برای مراکز جرم سان و ران و مؤلفه z مرکز جرم پنجه، نشان‌دهنده قابل قبول بودن این فرضیات و حل دینامیک به صورت صفحه‌ای می‌باشد.

حین حرکت شخص می‌باشد. در این پژوهش، آزمایش فوق در آزمایشگاه گیت دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف انجام شد و داده‌های مربوطه برای صحه‌گذاری مدل استخراج گردید. شایان ذکر است برای صحه‌گذاری داده‌هایی دلخواه نیز می‌توان به کار برد، ولی بهتر است مقادیری هماهنگ و مناسب برای اعضای مختلف داشت تا حرکتی معنادار و امکان‌پذیر صورت گیرد. سامانه مورد استفاده با نام ایکسنس^۲ دارای پنج واحد اندازه‌گیری است که به کمک تجهیزات نصب روی بدن می‌توان برای مثال سینماتیک تن، ران و ساق دو پا را طی یک آزمایش اندازه‌گیری و ثبت نمود (شکل ۵). واحدهای مذکور هر کدام دارای مجموعه‌ای از حسگرها شامل حسگر اینرسی مینیاتوری، حسگر مغناطیسی سه‌بعدی و پردازشگری هستند که زوایای رول، پیچ و یاو را در لحظه محاسبه می‌نماید و به همراه شتاب حرکت در سه بعد، سرعت تغییر زاویه و شدت میدان مغناطیسی زمین، خروجی می‌دهد.

این واحدها با کابل‌های مربوطه به یکدیگر و این زنجیره به بخش ایکسپاکس^۳ متصل می‌گردند. این بخش از طریق بلوتوث یا کابل اطلاعات را به رایانه منتقل می‌کند.

واحدهای اندازه‌گیری مطابق شکل ۶ بر روی اعضای مورد نظر نصب گردید و حین دو قدم حرکت به جلو داده‌برداری انجام شد. با توجه به محدوده کوچک تغییرات زاویه در میان پا، زاویه مطلق پنجه تقریباً برابر با زاویه ساق خواهد بود. با این حال، جداگانه تغییرات زاویه پنجه پا اندازه‌گیری گردید. پس از پالایش داده‌ها، زوایای تن و اعضای پا طبق نمودارهای شکل ۷ بدست آمد. این داده‌ها 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 می‌دهند.



شکل ۵ نحوه اتصال واحدهای اندازه‌گیری به ارسال کننده سیار

2. Xsens
3. Xbus

$$M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) = \tau \quad (6)$$

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 \ddot{q}, \dot{q}, q در دست باشد، معادله (۶) برای τ بدون هیچ مشکلی قابل حل است. حال اگر ربات در یک نرمافزار تجاری و معتبر مانند سیم‌مکانیکس مدل‌سازی شود و همین محاسبات در نرمافزار نیز صورت پذیرد، با مقایسه نتایج، معادلات به دست آمده صحت‌سنجدی می‌شود. بنابراین، برای اجرای شبیه‌سازی و صحت‌سنجدی، به یک مجموعه داده‌های سینماتیک مطلوب نیاز است. سینماتیک راه‌رفتن انتخابی مناسب می‌باشد.

۴-۱-۴- سیکل راه‌رفتن

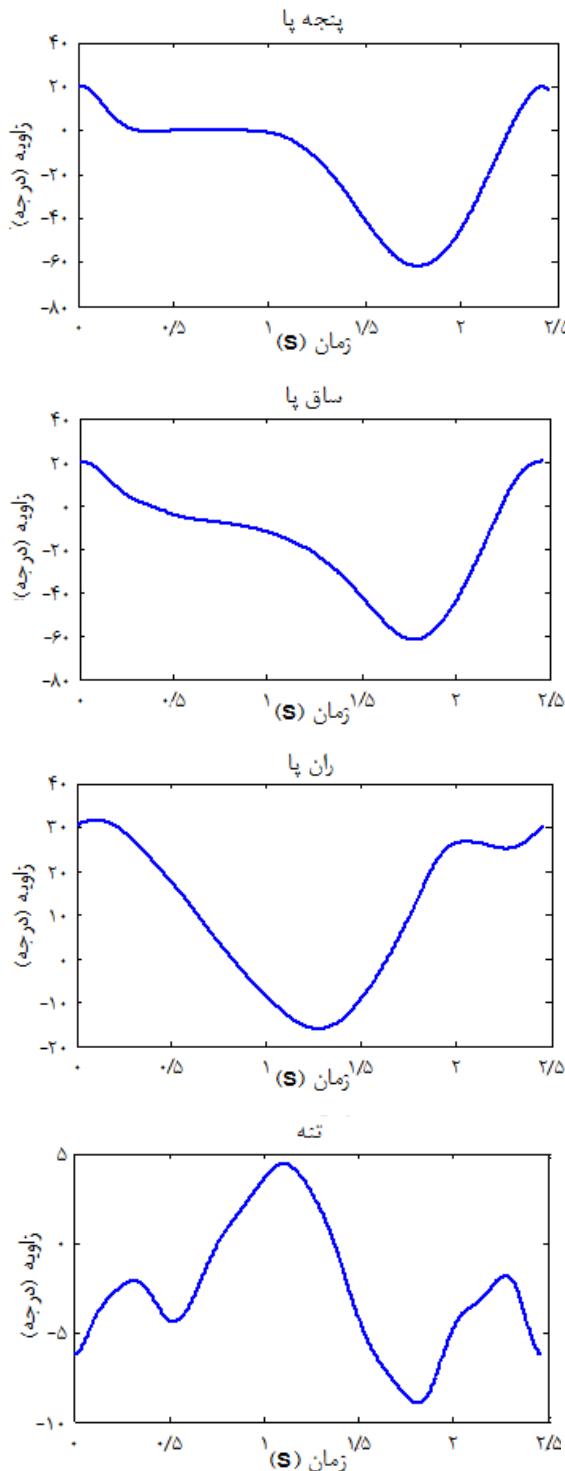
راه‌رفتن شامل مراحلی است که به صورت تناوبی انجام می‌شود. یک سیکل راه‌رفتن^۱ در ساده‌ترین تقسیم‌بندی با توجه به وضعیت یک پا شامل دو فاز ایستا و متحرک است. فاز ایستا خود شامل سه بخش دوانکایی اولیه، تکانکایی (فاز متحرک پای مخالف) و ایستایی دوانکایی نهایی می‌باشد [۱۳].

حال اگر از دید حل معادلات دینامیک به راه‌رفتن توجه نماییم، متوجه می‌شویم در وضعیت دواتکا تعداد مجهولات از معادلات بیشتر بوده و حل ناممکن می‌گردد. برای رفع این مشکل، محققان روش‌های گوناگونی مانند معرفی برخی معادلات قیدی و یا بهینه‌سازی توابع هدف مورد نظر را پیشنهاد داده‌اند که همگی خطاهایی دارند. به هر ترتیب، برای صحت‌سنجدی مدل دینامیک ربات، کافی است در محدوده تک-اتکا که مجموعاً ۸۰ درصد از سیکل را به خود اختصاص می‌دهد، شبیه‌سازی انجام شود. قابل توجه است در عمل و حین کارکرد ربات، به دلیل آنکه در قسمت پنجه آن حسگرهای نیروسنجه تعییه می‌گردد، نیروهای تکیه‌گاهی کف پا اندازه‌گیری می‌شود و مدل دینامیک موجود در وضعیت دواتکا نیز کاراست. در حقیقت تنها تفاوت مرحله تک-اتکا، صفر بودن مقدار نیروهای تکیه‌گاهی در یکی از پاهاست.

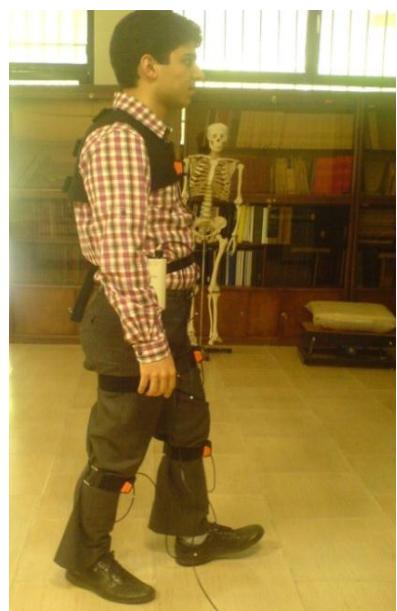
یک روش اندازه‌گیری داده‌های سینماتیک راه‌رفتن، نصب حسگرهای شتاب و زاویه‌سنجه روی اعضای بدن و ثبت داده‌ها

1. Gait Cycle (GC)

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



شکل ۷ نمودارهای داده‌های سیکل گیت، از ابتدا تا انتها به ترتیب مربوط به پنجه، ساق و ران پا و تنہ

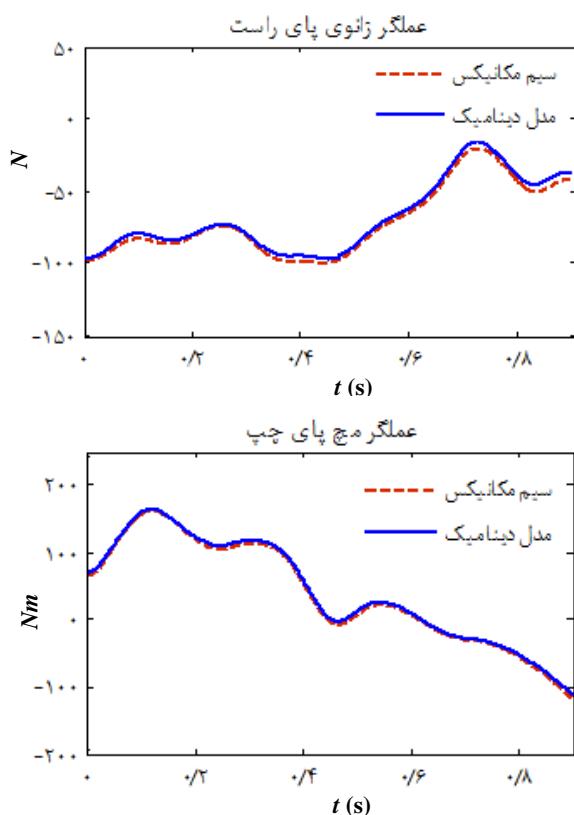


شکل ۶ آزمایش داده برداری از سیکل گیت توسط نویسنده

۳-۴- بحث روی نتایج

در شبیه‌سازی فوق، پای چپ تکیه‌گاه و پای راست در فاز متحرک می‌باشد. مشاهده می‌شود نتایج شبیه‌سازی انطباق بالایی با خروجی نرم‌افزار سیم‌مکانیکس از نظر رویه تغییرات و همچنین مقدار متغیرها دارد که معتبربودن مدل ریاضی به دست آمده را ثابت می‌کند. با این وجود، اختلافاتی مشاهده می‌شود که تفاوت دقیق حل عددی عامل آن است. گفتنی است محاسبه‌گر تعیین شده برای نرم‌افزار، دو روش رانچ-کوتا از مرتب ۴ و ۵ را با گام زمانی متغیر به صورتی بهینه انتخاب و استفاده می‌کند.

چنانکه در معرفی ساختار منتخب بیان شد، قراردادن عملگر برای مج پا وابسته به کاربرد ربات و میزان بار است. در کاربرد توانبخشی و بار کم عموماً در این قسمت فقط از ادوات غیرفعال یا نیمه‌فعال استفاده می‌شود. به این ترتیب منبع تأمین‌کننده گشتاور مورد نیاز، پای کاربر خواهد بود که از طریق اتصال کفش وی به کف پای ربات قبل انتقال است (شکل ۱). در این شبیه‌سازی کاربرد حمل بار سنگین (۵۰ کیلوگرم) بررسی شده است و همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، مقدار بیشینه گشتاور مج مورد نیاز حدود ۱۵۰ نیوتن متر می‌باشد. هرچند حین راه‌رفتن عادی تا ۱۲۰ نیوتن متر نیز گشتاور در مج پا ایجاد می‌شود، ولی مقدار اضافه مذکور سختی



شکل ۸ نتایج شبیه‌سازی دینامیک معکوس و صحه‌گذاری، از ابتداء انتهایاً 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

۱-۵- مقدمه

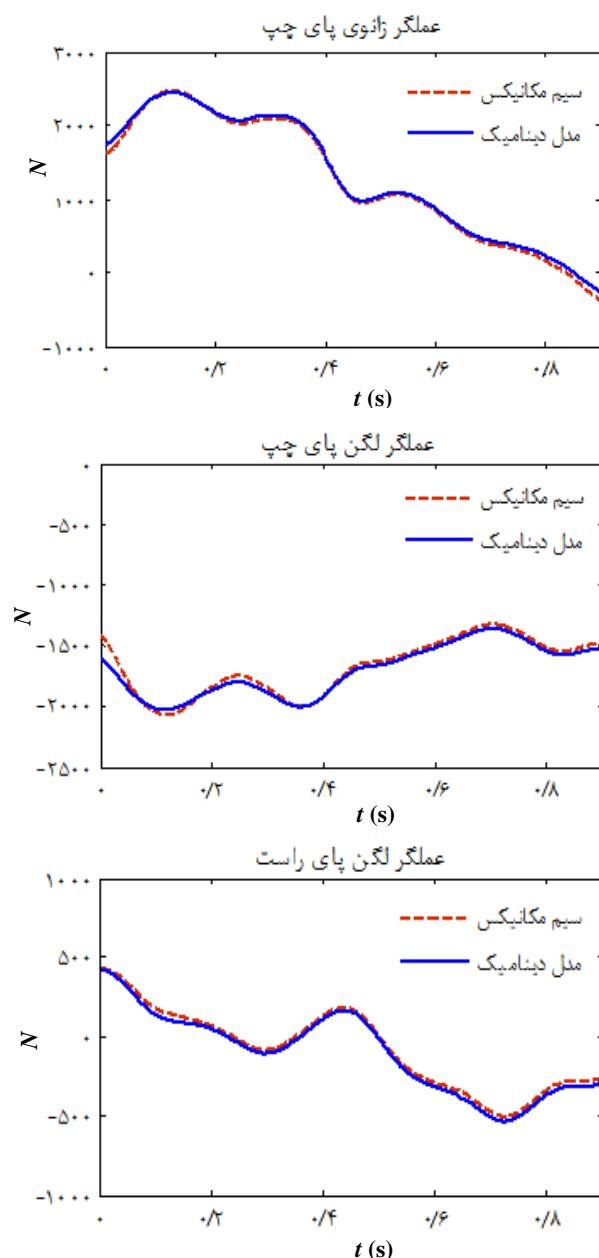
کنترل امپدانس تعامل فرد با ربات در محل تماس را به صورت جابه‌جاکردن یک سیستم جرم و فر و میراگر توسط شخص با ضرایب امپدانس دلخواه، تبدیل می‌نماید که برای این کار نیاز به مدل دینامیک و اندازه‌گیری نیروی رد و بدل شده در محل تماس دارد. در ربات اسکلت خارجی پنجه پای ربات به کف کفش کاربر اتصال دارد (شکل ۹).



شکل ۹ چگونگی اتصال پنجه پای کاربر و ربات

۴-۲- شبیه‌سازی و صحه‌گذاری مدل دینامیک

در این مرحله، سینماتیک مطلوب طبق زوایا، سرعت و شتاب‌های زاویه‌ای به دست آمده در بخش قبل برای ناحیه تکاتک تعیین گردید و مدل ریاضی به صورت دینامیک معکوس حل شد. مدل ربات در نرم‌افزار سیم‌مکانیکس^۱ نیز ایجاد گردید. حالت دینامیک معکوس انتخاب و سینماتیک مطلوب اعمال شد. نمودارهای شکل ۸ نتایج مدل‌سازی دینامیک را با نتایج نرم‌افزار مقایسه می‌نماید.



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 دردست داشتن f و سینماتیک مطلوب \ddot{q}_d برای محاسبه قانون کنترلی به‌طور همزمان، بیشتر مناسب کاربردهای است که حرکت مطلوب از پیش معلوم باشد، اما ربات اسکلت خارجی این‌گونه نیست. مهم‌تر آنکه غایت این روش برقرارشدن رابطه (۸) می‌باشد که با حضور نیروی f در سمت راست معادله، رسیدن q و مشتقات اول و دومش متناظرًا 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 امپدانس، روندی جدید و قابل پیاده‌سازی در شبیه‌سازی و همچنین در عمل، برای اجرای کنترل امپدانس معرفی می‌گردد و در شبیه‌سازی نشان داده می‌شود که کیفیت کنترل امپدانس تا حدودی اصلاح می‌یابد. رویه مورد نظر بین دینامیک خطأ و رابطه امپدانس مطلوب تمایز قابل شده، دینامیک خطأ را مشابه معادله (۸)، ولی با طرف راست برابر با صفر، به‌دست می‌دهد درحالی که نیروی تماسی وجود دارد و در رابطه امپدانس مطلوب لحاظ می‌شود. به علاوه قانون کنترلی همزمان شامل f و \ddot{q}_d نیست. بدین جهت سیگنال q_0 را همان سیگنال قرائتشده توسط سنسور می‌گیریم و رابطه امپدانس مطلوب 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 $C \cdot \dot{q}$ و $G \cdot f$ 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 تنہ ربات با باند به اعضای متناظر بدن کاربر بسته می‌شود (شکل ۱). در این محل‌های تماس سنسورهای نیروسنجه تعییبی 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 امپدانس را روی ربات اسکلت خارجی اعمال کرده‌اند. اینگر و همکارانش در [۱۴] برای یک سیستم یک درجه آزادی روی زانو، با استفاده از امپدانس معکوس (مدل ادمیتانس)، ابتدا مسیر حرکت مورد نظر کاربر را محاسبه نموده، سپس کنترل موقعیت را به‌کمک کنترل 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 به کار برده است. کالدول و همکارانش در [۱۶] به استفاده از کنترل امپدانس برای ربات اسکلت خارجی تمام‌تنه اشاره کرده‌اند که کارآیی آن برای توابع خشی بوده؛ سیستم کنترلی با فرض کنندی حرکت و صفر بودن سرعت و شتاب‌ها به‌دست آمده است.

۲-۵- الگوریتم کنترل امپدانس

کتاب [۱۷] که مرجعی برای مباحث دینامیک و کنترل ربات‌ها می‌باشد، روش پیاده‌سازی کنترل امپدانس 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.

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

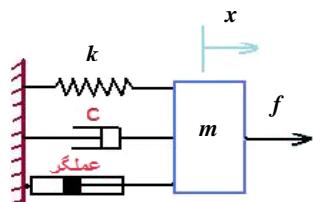
$F(q)$ ماتریس ضرایب در رابطه استاندارد دینامیک فوق را نشان می‌دهد. به علاوه رابطه f با حرکت مطلوب (رابطه امپدانس مطلوب) به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$M_d \cdot \ddot{e} + C_d \cdot \dot{e} + K_d \cdot e = -f, \quad e = q - q_0 \quad (8)$$

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

در لحظات پیاپی، یک حرکت مداوم را شکل می‌دهد. این اختلاف موقعیت، خطای نیست بلکه پس از زمان کوچکی که سیستم کنترل فرمان کاربر را اجرا نماید، عملاً ربات به موقعیتی می‌رسد 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.

۵-۳-۵- نتایج شبیه‌سازی و صحه‌گذاری روش کنترلی
ابتدا یک سیستم جرم و فنر و میراگر به همراه عملگر خطی مانند شکل ۱۰ در نظر گرفته شده است و دو روش کنترل امپدانس پیش‌گفته روی آن اجرا و نتایج مقایسه می‌گردد. پس از آن، کنترل ربات اسکلت خارجی مورد نظر با روش کنترل امپدانس ارائه شده شبیه‌سازی می‌گردد.

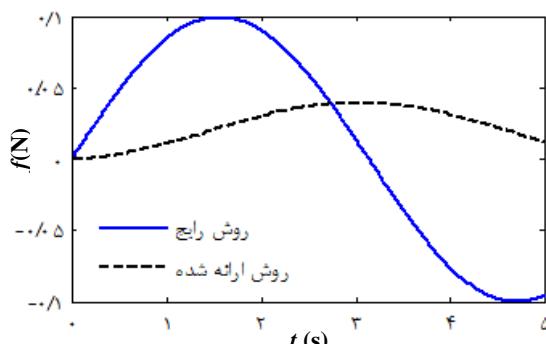


شکل ۱۰ شماتیک سیستم جرم و فنر و میراگر با عملگر خطی

فرض می‌شود کاربر نیروی تتماسی به صورت $f = 0.1 \cdot \sin(t)$ اعمال نماید. با روش رایج، حرکت مطلوب شناسایی و از آن تبعیت می‌شود. سپس تبعیت از همین حرکت مطلوب با روش ارائه شده انجام می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد با روش ارائه شده نیروی تتماسی کمتری را کاربر متحمل می‌شود تا آن حرکت مورد نظر صورت پذیرد. پارامترهای شبیه‌سازی عبارت‌اند از:

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

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



شکل ۱۱ مقایسه نیروی تتماسی در دو روش

با قراردادن قانون کنترلی از رابطه (۱۲) در معادله دینامیک (۷)، معادله امپدانسی (۱۱) بدست می‌آید. با استفاده از رابطه (۱۰) دینامیک خطای بین موقعیت مطلوب و واقعی به‌فرم زیر به‌دست می‌آید:

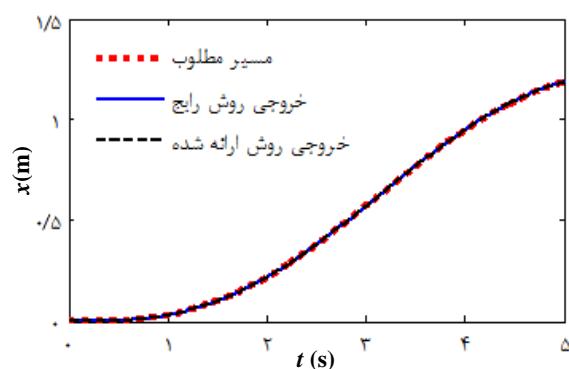
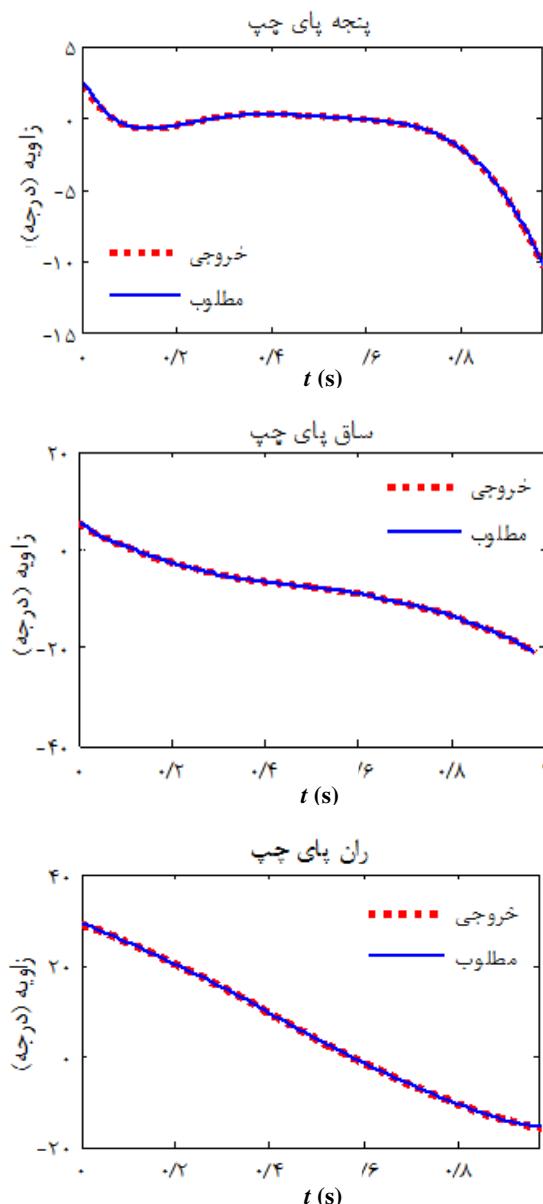
$$M_d \cdot \ddot{e} + C_d \cdot \dot{e} + K_d \cdot e = 0, \quad e = q - q_d \quad (13)$$

بنابراین یک متغیر جدید به دینامیک مدار بسته ربات افزوده شد و متناظرًا معادله (۱۱) به دو معادله دینامیک ربات و امپدانس مطلوب اضافه گردید. تفاوت قانون کنترلی حاصل (۱۲) نسبت به روش رایج (۹) استفاده از سیگنال q_0 به جای سیگنال اندازه‌گیری 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 درنتیجه تعریف کنترل امپدانس از لحاظ ریاضی کامل است، اما تفسیر کار انجام‌شده 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) می‌توان این گونه برداشت نمود که موقعیت ربات در هر لحظه است که توسط سنسورها به‌دست می‌آید. q به‌نوعی موقعیت بعدی ربات بعد از اعمال نیروست و توسط رابطه دینامیک ربات (۷) مثلاً در τ لحظه بعد، به‌دست می‌آید، که τ زمانی بسیار کوچک است. در اینجا باید بین دو موضع تمایز قابل شد؛ یکی میزان تغییرات مطلوب کاربر نسبت به وضعیت موجود (δ) در هر لحظه که کاربر مناسب با آن نیرو (f) وارد می‌کند و موضع دیگر خطای سیستم کنترلی در اطباق دادن موقعیت ربات با موقعیت مطلوب (e) است. مورد اول مطلوب بوده و باید وجود داشته باشد، ولی مورد دوم خطای کنترلر می‌باشد که لازم است به صفر میل داده شود. در صورتی که این موارد تفکیک نشود و رابطه دینامیک خطای با طرف راست برابر با صفر به‌دست نیاید، تضمینی برای میل کردن خطای 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 می‌دهد. منشأ ایجاد تفکیک مورد اشاره، در نظر گرفتن این نکته است: کاربر در هر لحظه که نیرویی به ربات اعمال می‌نماید، 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 می‌دهد. برای عملگرهای هیدرولیک خطی با قطر داخلی ۳ سانتی‌متر و فشار هیدرولیک ۶ مگاپاسکال، حد اشباع تا ۴۰۰۰ نیوتون نیز قابل اعمال است، ولی بیشینه نیروی عملگرها در شبیه‌سازی موجود ۲۵۰۰ نیوتون بوده است.

طبق نمودارهای شکل ۱۵، گشتاورهایی ناچیز و کمتر از نیم نیوتون‌متر در محل‌های تماس به اعضای بدن کاربر وارد می‌شود. این مقادیر تنها فشار وارد شده به شخص است، در حالی که وی باری به بزرگی ۵۰ کیلوگرم را حمل می‌نماید.



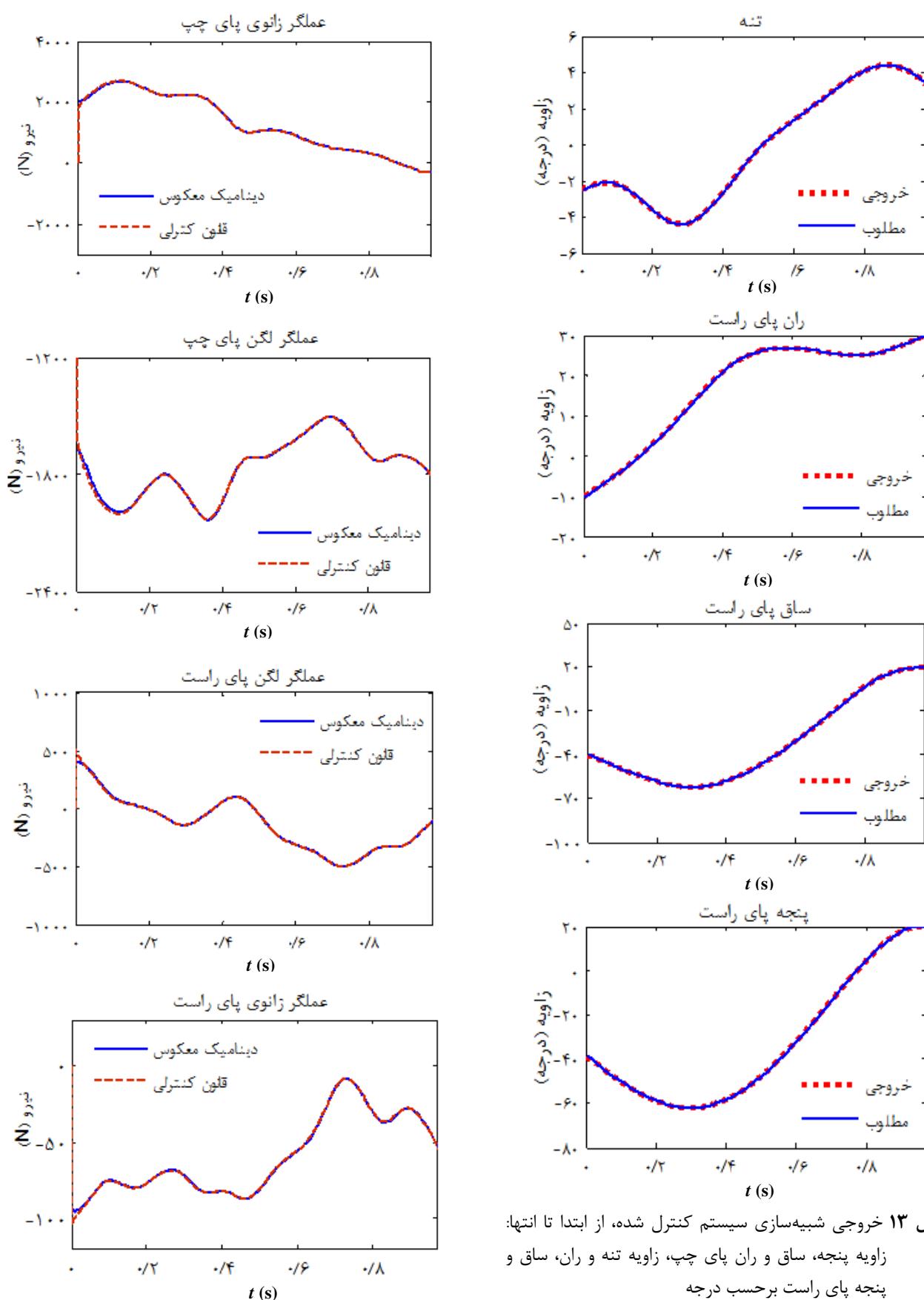
شکل ۱۲ مقایسه کیفیت تبعیت از مطلوب در دو روش

در توضیح نتایج شبیه‌سازی باید گفت تا زمانی که f مثبت است، به معنای تمايل کاربر به افزایش سرعت و شتاب و جلوترفتن جرم می‌باشد. با برعکس‌شدن جهت نیرو، به تدریج از سرعت و شتاب جرم کاسته می‌شود تا زمانی که جابه‌جایی به تغییر جهت نزدیک می‌شود و زمان شبیه‌سازی به پایان می‌رسد. مشاهده می‌شود با وجود تبعیت از یک حرکت مطلوب، روش جدید ارائه شده نیروی تماسی کمتری لازم دارد. اکنون کنترل ربات مورد نظر شبیه‌سازی می‌شود. پارامترهای امپدانس مطلوب عبارت‌اند از:

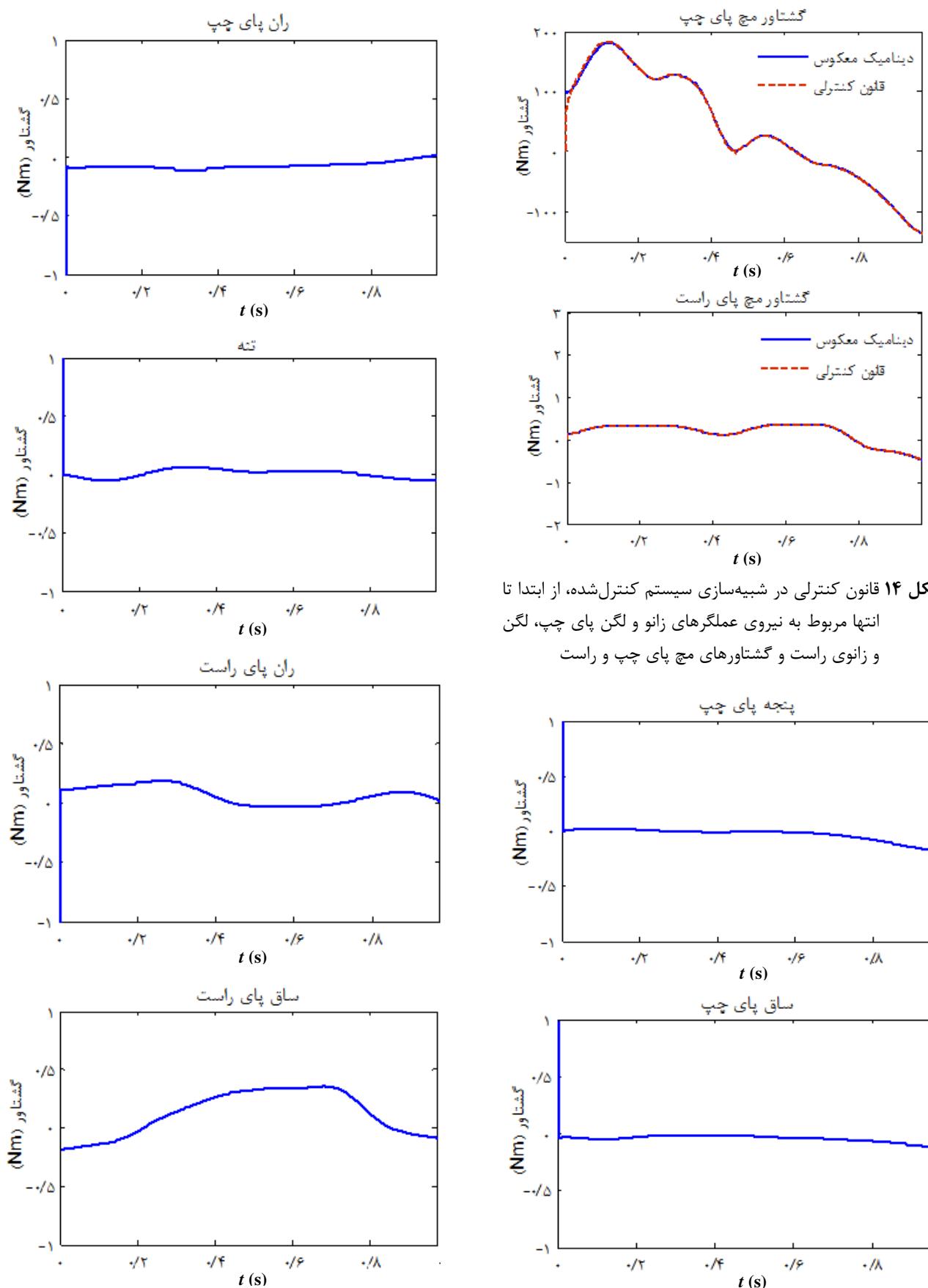
$$M_d = 0.1 \times I_7, C_d = 10 \times I_7, K_d = 100 \times I_7 \quad (15)$$

گفتنی است معیار انتخاب ضرایب مطلوب کیفیت تبعیت خوب در عین نیروی محل تماس کم می‌باشد [۱۸] و به دلیل عدم وجود مقالاتی که ضرایب امپدانس مناسب برای این کاربرد را بیان کرده باشد، با آزمون و خطای ضرایب فوق انتخاب شد. نتایج شبیه‌سازی شامل سینماتیک تولیدشده و انطباق آن با سینماتیک مطلوب (شکل ۱۳)، نیرو و گشتاورهای به دست آمده از قانون کنترلی (شکل ۱۴) و نیروی مدل‌شده در تماس درواقع گشتاورهایی است که بدن از طریق محل تماس به تک‌تک اعضای ربات وارد می‌کند. اگر حسگرها در محل تماس از نوع نیروسنجه باشد، به راحتی گشتاور ناشی از این نیرو روی هر مفصل با ضرب بازوی گشتاوری قابل محاسبه است.

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



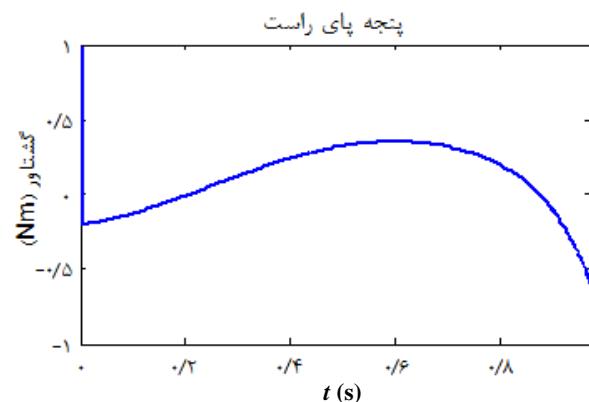
شکل ۱۳ خروجی شبیه‌سازی سیستم کنترل شده، از ابتدا تا انتهای زاویه پنجه، ساق و ران پای چپ، زاویه تنہ و ران، ساق و پنجه پای راست بر حسب درجه



شکل ۱۴ قانون کنترلی در شبیه‌سازی سیستم کنترل شده، 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 Cybernics: 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., Grootenhuis 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 واردشده به اعضای بدن حین شبیه‌سازی سیستم کنترل شده، از ابتدا تا انتهای مربوط به پنجه، ساق و ران پای چپ، تنہ و ران، ساق و پنجه پای راست

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌سازی دینامیکی به همراه طراحی الگوریتم کنترل، که بخش‌های پایه‌ای تکنولوژی ربات‌های اسکلت خارجی را تشکیل می‌دهد، انجام شد. در مقالات، مدل‌سازی و شبیه‌سازی کنترل این ربات حداقل برای بخشی با یک درجه آزادی ارائه شده است. به علاوه، روش کنترل امیدانس 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 نیوتونی و در صفحه سازیتال به دست آمد. سپس به منظور حل دینامیک معکوس و تأیید اعتبار مدل با داده‌های هماهنگ و امکان‌پذیر، طی آزمایشی داده‌های سینماتیکی راه‌رفتن استخراج شد و از آن به عنوان سینماتیک مطلوب در شبیه‌سازی‌ها استفاده گردید. ربات در نرم‌افزار تجاری سیم‌مکانیکس پیاده‌سازی 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 کنترل دارد. بیان معرفی شده برای کنترل امیدانس، 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 می‌نماید. به علاوه گشتاور واردشده به اعضای بدن کاربر حین حمل باری به بزرگی ۵۰ کیلوگرم، کوچک و کمتر از نیم نیوتون‌متر 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