



## طراحی بهینه، ساخت و آزمایش یک راهروند دوپای غیرفعال: اثر پارامترهای ساختاری بر بازده، پایداری و عبور از پستی و بلندی

سیدمحمد هادی سادati<sup>۱</sup>، مهیار نراقی<sup>۲\*</sup>، عبدالرضا اوحدی همدانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳، ۱۵۸۷۵

naraghi@aut.ac.ir

**چکیده-** راهروندهای غیرفعال ربات‌هایی هستند که بر روی شیب‌های کوچک می‌توانند حرکت سیکلی پایداری شبیه راهروفت را، بدون کنترل خارجی، داشته باشند. این مفهوم در دهه ۹۰ میلادی توسط مک‌گیر معرفی شد. در سال‌های اخیر تحقیقات مختلفی در این زمینه صورت گرفته است. با توجه به تازگی موضوع، تاثیر پارامترهای ساختاری بر حرکت راهروند و بهینه‌سازی آن‌ها و شبیه‌سازی نرمافزاری، با هدف تعریف روند طراحی و ساخت مدل و انجام آزمایش‌های عملی، می‌تواند بیشتر مورد توجه قرار گیرد. در کار حاضر، با گسترش ساده‌ترین مدل راهروند، مدلی نزدیک‌تر به مدل قابل ساخت درنظر گرفته شده است. سپس، با تغییر پارامترهای ساختاری، میزان اثر بر بازده، پایداری و توانایی عبور از پستی و بلندی راهروند و محدوده بهینه آن‌ها بررسی شده است. نشان داده می‌شود شعاع کف و مکان مرکز جرم پاها بیشترین تاثیر را بر پارامترهای حرکتی مدل دارد. پس از مقایسه نتایج با بررسی‌های مشابه پیشین و شبیه‌سازی در نرمافزار آدامز، روند ساخت مدلی بهینه به روش الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است. در انتهای، با تعریف پنج مرحله آزمایش، نشان داده شد که در کنار بهینه‌یابی پارامترهای ساختاری بررسی دقیق‌تر برخوردها برای دست‌یابی به حرکت بهینه بسیار مهم است.

**کلیدواژگان:** قدمزنی غیرفعال، پایداری، بهینه‌سازی، ساخت و طراحی دوپا، آزمایش عملی دوپا

## Optimum design, manufacturing and experiment of a passive walking biped: effects of structural parameters on efficiency, stability and robustness on uneven trains

S. M. H. Sadati<sup>1</sup>, M. Naraghi<sup>2\*</sup>, A. R. Ohadi Hamedani<sup>3</sup>

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

2- Assis. Prof., Mech. Eng., Amirkabir. Univ. of Tech., Tehran, Iran

3- Assoc. Prof., Mech. Eng., Amirkabir. Univ. of Tech., Tehran, Iran

\* P. O. B. 15875-4413 Tehran, naraghi@aut.ac.ir

**Abstract:** Passive walkers are robots, which perform a walking like, stable limit cycle on small slopes without any external control. This concept was published on 90's by McGeer and there are lots of related researches going on in the past few years. Keeping in mind the novelty of the concept, investigating the effects of structural parameters on walking performance and finding their optimums, simulating the biped and establishing a trend to its optimal design and build, and finally doing experimental researches, would be of a great concern. In this research, a deployed model of biped that can be built has been considered, and then its walking performance sensitivity such as efficiency, stability and robustness on uneven trains due to variation of structural parameters and their optimum limits have been investigated. It was shown that the foot arc radius and center of mass height have the most important effect on walking performance. After comparing the results with previous researches and doing simulations in MSC. ADAMS software, an optimum design trend has been suggested. At the end based on experimental results, it was shown beside optimization of structural parameters, considering the impact condition as well would be very important to achieve optimal walking.

**Keywords:** Passive Walking, Stability, Optimization, Design and Build of Biped, Experiment of Biped

پای انسان می‌تواند به صورت قانع کننده‌ای به عنوان یک آونگ دوتایی غیرفعال مدل شود. آن‌ها این نوع حرکت را "راهرفتن پرتابی"<sup>۴</sup> نامیدند. به دنبال این مطلب مک‌گیر در ۱۹۹۰ میلادی نشان داد که راهرفتن می‌تواند یک فرایند کاملاً خودجوش باشد. وی بیان می‌کند: "مجموعه‌ای از ماشین‌های دوپا موجود است که راهرفتن برای آن‌ها یک مود دینامیکی طبیعی است. حرکت آغازشده بر روی یک شبکه برای یک ماشین متعلق به این مجموعه، در حالی منتهی به یک حرکت پایدار قابل مقایسه با راهرفتن طبیعی می‌شود که هیچ انرژی ورودی و کنترلی برای آن لازم نیست". این حرکت پایدار دوپا نتیجه برابری انرژی تلفشده به هنگام برخورد پا با زمین و سایر اتفاق‌های احتمالی در حین حرکت، با انرژی ورودی ناشی از جاذبه است. او هم به صورت تئوری و هم تجربی با ساخت مدل‌هایی از دوپا این مسئله را ثابت کرد. پس از او این روند با ارائه مدل‌های مختلفی مانند مدل‌های سه‌بعدی<sup>[۳]</sup>، مدل‌های دارای بالاتنه<sup>[۴]</sup> و مدل‌های دارای زانو<sup>[۵]</sup> توسط سایر محققان ادامه یافت. کامل‌ترین راهرونده‌های دوپای غیرفعال، نمونه سه‌بعدی با زانو و دست است که در دانشگاه کرنل<sup>۶</sup> به سرپرستی اندی روینا در سال ۲۰۰۱ ساخته شده است (شکل ۲) [۵]. در سال‌های اخیر تحقیقات بر روی راهرونده‌های دوپای غیرفعال و نیمه‌فعال در دانشگاه‌های بسیاری در دنیا انجام گرفته و ادامه دارد [۶-۱۱].

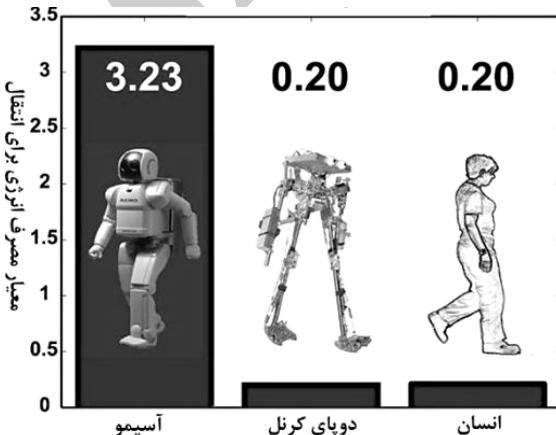


شکل ۲ راه رونده غیرفعال سه‌بعدی دانشگاه کرنل [۵]

4. Ballistic walking  
5. Cornell University

## ۱- مقدمه

در میان ربات‌های متحرک، ربات‌های دوپا به دلیل انعطاف‌پذیری و سرعت مناسب همواره مورد توجه بوده‌اند، اما مصرف بالای انرژی مهم‌ترین دلیل عدم استفاده کاربردی از آن‌هاست. با ارائه اولین مدل راهرونده غیرفعال<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۰ توسط مک‌گیر<sup>۲</sup> دریچه جدیدی برای بررسی فرایند قدمزنی در انسان و همچنین طراحی ربات‌های پربازده گشوده شد<sup>[۱]</sup>. در روش راهرفتن غیرفعال مکانیزم‌های دوپا، بدون هیچ‌گونه کنترل و تنها با انرژی ورودی ناچیز، توانایی قدمزنی بر روی سطوح شبیدار را دارند. در شکل ۱ مقایسه‌ای از معیار مصرف انرژی، برای معروف‌ترین ربات‌های دوپایی فعال و غیرفعال ساخته شده، با انسان آورده شده است.



شکل ۱ مقایسه مصرف مخصوص انرژی انسان، ربات شرکت هوندا و مدل دوپایی نیمه‌فعال دانشگاه کرنل [۲]

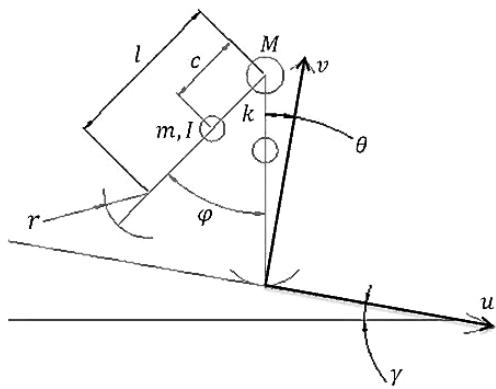
راهرفتن یک فرایند کاملاً پیچیده به نظر می‌آید که سیستم‌های ماهیچه‌ای-عصبی وظیفه کنترل آن را بر عهده دارند. اما آیا این سیستم کنترلی کاملاً فعال است یا اینکه در شرایطی می‌تواند غیرفعال عمل کند؟ بنا بر تعریف، یک سیستم مکانیکی حرکت غیرفعال دارد، اگر در خلال حرکت برآیند انرژی ورودی گرانشی و اتفاق انرژی‌ها در آن صفر باشد و انرژی و کنترل خارجی بر آن اعمال نشود. این موضوع اولین بار زمانی مطرح شد که مک‌موهن و موکان<sup>۳</sup> کشف کردند حرکت نوسانی

1. Passive walking
2. McGeer
3. McMahon & Mochon

راهروند را بهشدت نسبت به پیش‌بینی‌ها تغییر دهد. این تحقیق برخی از مسائل طراحی بهینه مدل‌های راهروند ساده را، که در بررسی‌های پیشین یا به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته و یا نتایج مربوط به آن در مقالات منتشرشده ارائه نشده است، دربر می‌گیرد.

## ۲- مدل‌سازی

مدل گسترش‌یافته مورد استفاده برگرفته از ساده‌ترین مدل دوپای گارسیا می‌باشد با این تفاوت که پاها دارای جرم گستردۀ هستند؛ موقعیت مرکز جرم می‌تواند در امتداد پا تغییر کند و شکل کف پا نیز به صورت دایره‌ای و دارای شعاع مشخص است؛ در میان دوپا یک فنر پیچشی نیز افزوده شده است (شکل ۱). پارامترهای مدل عبارت‌اند از:  $m$  جرم پا،  $M$  جرم مرکز در مرکز ران،  $I$  لختی دورانی پا حول مرکز جرم،  $l$  طول پا،  $c$  فاصله مرکز جرم پا از مرکز ران،  $\gamma$  شیب سطح،  $\theta$  زاویه بین پای ثابت و خط عمود بر سطح،  $\varphi$  زاویه بین دوپا و  $k$  سختی فنر مفصل ران.



شکل ۳ نمای مدل دوپایی مورد بررسی

مدل‌سازی شامل سه مرحله است: حرکت از لحظه بلند شدن پا تا لحظه برخورد، تعیین لحظه (شرط) برخورد، قوانین انتقال متغیرهای فضای فاز در لحظه برخورد. فرضیات حاکم بر مسئله به این شرح است: حرکت در دو بعد بررسی می‌شود؛ سطح حرکت صلب است؛ برخورد پاها به زمین به صورت کاملاً پلاستیک می‌باشد به این صورت که پس از برخورد پا به زمین می‌چسبد؛ برخورد پاها با زمین کاملاً لحظه‌ای بوده و هیچ‌گاه دو پا با هم بر روی زمین قرار

به طور خلاصه مزایای طرح حرکت غیرفعال به این شرح است: ۱) صرفه‌جویی در مصرف انرژی: در حالی که ربات انسان‌نما شرکت هوندا-موتور<sup>۱</sup>، برای ۴۰ دقیقه راهروفتن، ۶ کیلوگرم باتری با خود حمل می‌کند [۱۲]، گارسیا<sup>۲</sup> و همکارانش نشان دادند که مصرف انرژی برای حرکت غیرفعال یک دوپا در حالت حدی به صفر میل می‌کند. ۲) مسیرهای طبیعی حرکت به صورت غیرفعال شباهت زیاد به راهروفتن انسان دارد. موارد یادشده ضرورت توجه به دینامیک دوپا قبل از ورود به مرحله کنترل را نشان می‌دهد.

در این تحقیق، با گسترش ساده‌ترین مدل راهروند، مدلی نزدیک‌تر به واقعیت درنظر گرفته شده است. روابط حرکت از روش ترکیبی (TMT) [۱۳]، که مبتنی بر روش کار مجازی است، استخراج شده و پس از ساده‌سازی، پارامترهای ساختاری با مینا قراردادن ساده‌ترین مدل راهروند تغییر داده شده و اثر آن‌ها بر پایداری حرکت مدل در شیوه‌های متنوع، مصرف مخصوص انرژی، توانایی عبور از پستی و بلندی در سطح حرکت، مقدار نوسان پاها و سرعت حرکت بررسی شده است. نتایج حاصل در مقایسه با بررسی‌های مشابه پیشین مقایسه و در جدولی به طور خلاصه ارائه شده است. سپس، با تعریف تابع برازش مناسب براساس معیار بازده حرکت، به کمک الگوریتم ژنتیک پارامترهای ساختاری مدل در چند مرحله بهینه‌یابی شده و یک مدل بهینه در انتهای ارائه شده است. نتایج حاصل از بهینه‌یابی مبنای ساخت مدل عملی راهروند قرار گرفته است. پیش از ساخت مدل، با هدف نزدیک‌تر شدن برآوردهای تئوری به واقعیت، شبیه‌سازی در نرم‌افزار آدامز<sup>۳</sup> و مقایسه نتایج آن با نتایج مورد انتظار از حل عددی انجام شده است. سپس پارامترهای ساختاری مدل ساخته شده در پنج مرحله شامل حرکت مدل اولیه بر سطح مبنای سطح با شیب کمتر، تغییر پارامترهای ساختاری وزن بالاتنه، وزن پاها و توانایی عبور از پستی یا بلندی آزمایش شده و پس از مقایسه نتایج پیرامون هم‌خوانی و تعارض آن‌ها بحث شده است. آزمایش‌ها نشان داد، در مقایسه با پارامترهای ساختاری، اثر شرایط برخورد بر پایداری مدل بسیار زیادتر است و می‌تواند عملکرد حرکتی

1. Honda Motors Co
2. Garcia
3. MSC ADAMS

این دو مختصه و سرعت و شتاب آنها در طول گام برابر صفر است. این فرض تا زمانی که نیروی وارد بر پای تکیه‌گاه از طرف سطح مقداری مثبت داشته باشد، صحیح می‌باشد و پس از آن پای تکیه‌گاه از زمین جدا خواهد شد. (هنگام تعویض گام) در طول حل مدل ریاضی باید برقراری این شرط بررسی شود. برای این منظور معادلات به دو بخش تقسیم شده است. ابتدا با صرفنظر از مختصه‌های انتقالی، معادلات مربوط به مختصه‌های دورانی استخراج و حل شده است. سپس با توجه به مشخص بودن مقدار مختصه‌های انتقالی و مشتق اول و دوم آنها که برابر صفر است و مقدارهای به دست آمده از حل قسمت اول، نیروهای قیدی در راستای مختصه‌های  $u$  و  $v$ ، به دست آمده و شرط مثبت بودن نیروی عمودی درنظر گرفته می‌شود.

با مشتق‌گیری از رابطه (۳) خواهیم داشت:

$$\dot{x} = T_{q,q}\dot{q} \quad (4)$$

با گرفتن تغییرات رابطه (۴) روابط زیر به دست خواهد آمد:

$$\delta\dot{x} = T_{q,q}\delta\dot{q} \quad (5)$$

$$\ddot{x} = T_{q,q}\ddot{q} + T_{q,qq}\dot{q}\dot{q} \quad (6)$$

ماتریس انتقال سرعت‌ها با صرفنظر از مختصه‌های انتقالی

به صورت زیر خواهد بود:

$$T_{q,q} = \frac{\sigma T}{\sigma q}$$

$$= \begin{bmatrix} -r - (l - c)\cos\theta & 0 \\ -(l - c)\sin\theta & 0 \\ 1 & 0 \\ -r - l\cos\theta & 0 \\ -l\sin\theta & 0 \\ 1 & -1 \\ -r - l\cos\theta + c\cos(\varphi - \theta) & -c\cos(\varphi - \theta) \\ l\sin\theta - c\sin(\varphi - \theta) & c\sin(\varphi - \theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

ماتریس شتاب جابه‌جایی سیستم:

$$D = T_{q,qq}\dot{q}\dot{q} = \frac{\sigma(T_{q,q}\dot{q})}{\sigma q} \dot{q} =$$

$$= \begin{bmatrix} [(l - c)\sin\theta]\dot{\theta}^2 & 0 \\ [- (l - c)\cos\theta]\dot{\varphi}^2 & 0 \\ [l\sin\theta]\dot{\theta}^2 & 0 \\ [-l\cos\theta]\dot{\varphi}^2 & 0 \\ [l\sin\theta + c\sin(\varphi - \theta)]\dot{\theta}^2 + [c\sin(\varphi - \theta)]\dot{\varphi}^2 & 0 \\ + [-2c\sin(\varphi - \theta)]\dot{\theta}^2\dot{\varphi}^2 \\ [-l\cos\theta + c\cos(\varphi - \theta)]\dot{\theta}^2 + [c\cos(\varphi - \theta)]\dot{\varphi}^2 & 0 \\ + [-2c\cos(\varphi - \theta)]\dot{\theta}^2\dot{\varphi}^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

نمی‌گیرند؛ اثر ضربه هنگام بلندشدن پا از روی زمین درنظر گرفته نمی‌شود؛ اصطکاک کافی میان پا و زمین برای جلوگیری از لغزش وجود دارد، از این رو، پس از برخورد، سطح منحنی پای تکیه‌گاه غلتش ناب بر روی زمین انجام می‌دهد؛ به هنگام نزدیکشدن پای ثابت به وضعیت عمود بر سطح، عبور پای نوسان‌کننده از درون زمین در حل تحلیلی مورد پذیرش است، اما در عمل، با طراحی حفره‌دار سطح و یا پیچیده‌تر کردن مدل و افزودن مفصل زانو، این مشکل برطرف می‌شود؛ از کلیه اتفاق‌ها در مفاصل صرف‌نظر شده است[۱].

استخراج روابط به روش ترکیبی، که بر گرفته از بخشی از فعالیت‌های لاگرانژ بر روی مختصات عمومی، کار مجازی و اثر نیروهای اینرسی است، انجام شده است. روابط به دست آمده به این روش معادل روابط حاصل از روش لاگرانژ خواهد بود، اما این روش، به دلیل اجرای مرحله به مرحله، در استخراج روابط و همچنین در حل عددی خطای کمتری خواهد داشت. از ویژگی‌های آن سادگی،وضوح مراحل و بهینه‌بودن برای حل عددی است. از آنجا که با یک حرکت چرخه‌ای روبه‌رو هستیم، می‌توان معادلات به دست آمده برای هر قدم را برای کل حرکت درنظر گرفت.

با استفاده از قانون نیوتون، برای کار مجازی سیستم رابطه تعادل زیر را می‌توان نوشت:

$$\delta\dot{x}^T[f - M\ddot{x}] = 0 \quad (1)$$

که در آن  $f$  و  $M$  ماتریس نیروی عمومی و جرم سیستم هستند.  $\delta\dot{x}^T$  ماتریس سرعت‌های مجازی است که تمام قیدهای میان مراکز جرم سیستم را در خود دارد. مختصه‌های عمومی سیستم به صورت زیر تعریف می‌شود (شکل ۳)

$$q = [u \ v \ \theta \ \varphi]^T \quad (2)$$

بردار انتقال مختصه‌های مرکز جرم‌ها:

$$x_i = \begin{bmatrix} x_{st} \\ y_{st} \\ \emptyset_{st} \\ x_h \\ y_h \\ \emptyset_{sw} \\ x_{sw} \\ y_{sw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - r\theta - (l - c)\sin\theta \\ v + r + (l - c)\cos\theta \\ \theta \\ u - r\theta - l\sin\theta \\ v + r + l\cos\theta \\ \theta - \varphi \\ u - r\theta - l\sin\theta - c\sin(\varphi - \theta) \\ v + r + l\cos\theta - c\cos(\varphi - \theta) \end{bmatrix} = T_q \quad (3)$$

مختصه‌های  $u$  و  $v$  موقعیت نقطه تماس پای تکیه‌گاه هنگام عمودبودن آن بر سطح است. با توجه به فرض‌های مدل‌سازی در طول هر گام این موقعیت ثابت است؛ در نتیجه مقدار عددی

تعیین لحظه (شرط) برخورد: زمان تماس پای نوسان‌گر با زمین، به عنوان زمان برخورد و تعویض پای تکیه‌گاه است. برای مدل ساده متقاضی در این لحظه شرط زیر برقرار است:

$$\varphi = 2\theta \quad (18)$$

**قوانين برخورد (انتقال):** در هنگام ضربه، پای تکیه‌گاه در یک لحظه از زمین جدا شده و در همان لحظه پای نوسان‌گر به زمین برخورد می‌کند و به آن می‌چسبد (برخورد کاملاً پلاستیک). می‌توان رابطه نیوتون را به صورت زیر نوشت:

$$\bar{M}\ddot{q} + T_{(sw)q,q}^T \lambda = \bar{f} \quad (19)$$

$T_{(sw)q,q}$  ماتریس انتقال سرعت محل برخورد پای نوسان‌گر و  $\lambda$  نیروی برخورد و معادل ضریب لاغرانژ است.

با انتگرال‌گیری از رابطه فوق بر روی زمان برخورد داریم:

$$\lim_{t \rightarrow t^-} \int_{t^-}^{t^+} (\bar{M}\ddot{q} + T_{(sw)q,q}^T \lambda) dt = 0 \quad (20)$$

چون  $\bar{f}$  تنها شامل نیروهای غیرضربه‌ای است که مقدار آن‌ها در طول زمان برخورد ثابت می‌ماند، حد انتگرال آن‌ها صفر خواهد بود. در این مدت زمان هیچ‌گونه جایه‌جایی وجود نخواهد داشت و کار تمام نیروهای گرانشی و پتانسیل (نیروی وزن و فنر) صفر خواهد بود. برای تکانه ضریب داریم:

$$\rho = \lim_{t \rightarrow t^-} \int_{t^-}^{t^+} (\lambda) dt \quad (21)$$

رابطه (20) به صورت زیر به دست خواهد آمد که وابستگی میان اندازه سرعت‌ها بعد و قبل از ضربه را بیان می‌کند.

$$\bar{M}\ddot{q}^+ + T_{(sw)q,q}^T \rho = \bar{M}\ddot{q}^- \quad (22)$$

از رابطه برخورد نیوتون برای سرعت نسبی در نقطه برخورد داریم:

$$T_{(sw)q,q} \dot{q}^+ = -e T_{(sw)q,q} \dot{q}^- \quad (23)$$

که در آن  $e$  ضریب بازگشت خواهد بود.

در انتهای رابطه برخورد را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{bmatrix} \bar{M} & T_{(sw)q,q}^T \\ T_{(sw)q,q} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}^+ \\ \rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{M}\ddot{q}^- \\ -e T_{(sw)q,q} \dot{q}^- \end{bmatrix} \quad (24)$$

از رابطه (24) سرعت‌های بعد و قبل از برخورد و تکانه نیروهای زمان برخورد به دست خواهد آمد. در این بررسی روابط ضربه تنها برای مختصه‌های دورانی مدل بررسی شده است و می‌توان از محاسبه تکانه نیروهای برخورد صرف‌نظر کرد. با صفر قراردادن ضریب بازگشت و فرض صفر بودن سرعت نوک پای تکیه‌گاه قبل از برخورد و سرعت نوک پای نوسان‌گر پس از برخورد، معادله‌های بالا به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$T^{+T} M T^+ (q_o^+) = T^{+T} M T^- (q_o^-) \quad (25)$$

ماتریس جرم سیستم و ماتریس نیروهای گرانشی:

$$f = M \times [sin\gamma, -cos\gamma, 0, sin\gamma, -cos\gamma, 0, sin\gamma, -cos\gamma]^T g \quad (9)$$

$$M = diag[m \ m \ I \ M \ M \ I \ m \ m] \quad (10)$$

که در آن  $g$  بیان‌گر شتاب گرانشی زمین است.

برای نیروی اعمالی توسط فنر (ماتریس  $Q_s$ ) داریم:

$$Q = Q_s = [0 \ -\varphi]^T k \quad (11)$$

رابطه کار مجازی برای نیروهای خارجی به صورت  $\delta\dot{q}^T Q$  خواهد بود. با جاگذاری روابط فوق در رابطه (1) رابطه کاهش یافته حرکت به صورت زیر به دست خواهد آمد:

$$[T_{q,q}^T M T_{q,q}] \ddot{q} = T_{q,q}^T [f - M T_{q,q} \dot{q} q] + Q \quad (12)$$

به این صورت شتاب مختصه‌های عمومی به دست می‌آید که قابل جاگذاری در روند حل عددی است. به طور خلاصه داریم:

$$\bar{M} = T^T M T \quad (13)$$

$$T = T_{q,q} \quad (14)$$

$$\bar{f} = T^T [\Sigma f - MD] + Q \quad (15)$$

$$\bar{M}\ddot{q} = \bar{f} \quad (16)$$

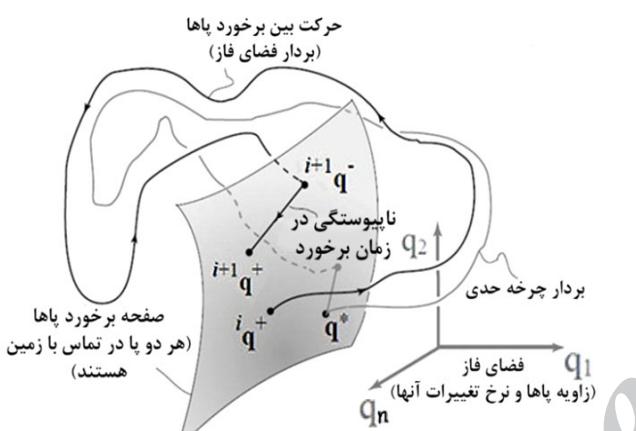
برای به دست آوردن نیروهای وارد بر پای تکیه‌گاه، در برآورد ماتریس‌های انتقال سرعت‌ها و ماتریس شتاب جایه‌جایی، مختصه‌های  $u$  و  $v$  نیز در نظر گرفته می‌شود. ماتریس نیروهای خارجی به صورت زیر خواهد بود:

$$Q = Q_s = [F_x \ F_y]^T \quad (17)$$

در این حالت ماتریس  $q$  برای مختصه‌های  $u$  و  $v$  برابر صفر است. از مجموعه روابط (13) تا (16) مقدار  $F_x$  و  $F_y$  به دست خواهد آمد. به دلیل طولانی بودن روابط نهایی مدل، از آوردن آن‌ها صرف‌نظر شده است [14].

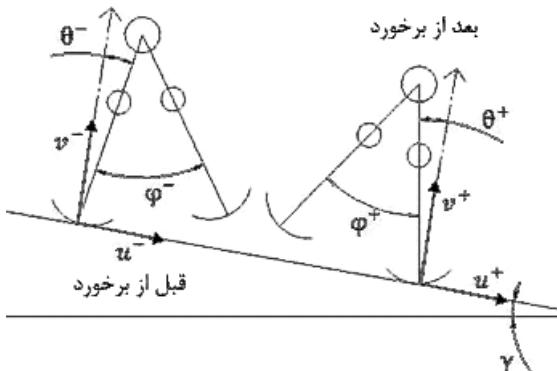
بی‌بعدسازی: در تمام عبارت‌های روابط نهایی، دیمانسیون جرم، جایه‌جایی با توان ۲ و زمان با توان ۲ در مخرج ترم‌ها ظاهر می‌شود. برای ساده‌تر کردن روابط، می‌توان دسته‌ای از پارامترهای بی‌بعد را تعریف کرد تا از بررسی دوباره ورودی‌ها با نتایج یکسان جلوگیری شود. بر این اساس مبنای بی‌بعدسازی، برای ورودی‌های از جنس طول، اختلاف طول پا و شعاع کف پا ( $-l$ ، برای ورودی‌های از جنس جرم، جرم پا ( $m$ ) و برای پارامتر زمان، جذر طول پا تقسیم بر شتاب جاذبه ( $\sqrt{(l-r)/g}$ ) در نظر گرفته شده است.

خلاصه‌ای از تحلیل معادلات حرکت:تابع گام (معادله حرکت) مشخصات سیستم درست پس از یک برخورد را به عنوان ورودی می‌گیرد، در طول بردار فضای فاز به صورت پیش رو انتگرال‌گیری کرده، برخورد پا با زمین را تشخیص می‌دهد و ناپیوستگی در سیستم حرکت به این دلیل را اعمال کرده و مشخصات سیستم درست بعد از برخورد بعدی را به عنوان خروجی گزارش می‌کند. هرگاه خروجی تابع برابر ورودی آن باشد، آن نقطه یک نقطه ثابت و چرخه متناظر با آن چرخه حدی راهروند است (شکل ۵).



شکل ۵ نمای تابع گام و نقاط ثابت و پایداری در فضای فاز [۱۵]

$T^+$  ماتریس انتقال سرعت نسبت به مبدأ دستگاه جدید پس از برخورد و  $T^-$  ماتریس انتقال سرعت‌ها نسبت به مبدأ دستگاه قبل از برخورد است (شکل ۴).



شکل ۴ نمایی از مدل و نام‌گذاری زاویه‌ها قبل و بعد از برخورد

مطابق رابطه (۷) و ماتریس  $T^+$  به شکل زیر می‌باشد:

$$x_i^+ = \begin{bmatrix} x_{st} \\ y_{st} \\ \theta_{st} \\ x_h \\ y_h \\ \theta_{sw} \\ x_{sw} \\ y_{sw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r(\varphi - \theta) - ls \sin(\varphi - \theta) + cs \sin\theta \\ r + lc \cos(\varphi - \theta) - cc \cos\theta \\ \theta \\ -r(\varphi - \theta) + ls \sin(\varphi - \theta) \\ r + lc \cos(\varphi - \theta) \\ \varphi - \theta \\ -r(\varphi - \theta) - (l - c) \sin(\varphi - \theta) \\ r + (l - c) \cos(\varphi - \theta) \end{bmatrix} = T_q^+ \quad (26)$$

$$T_{q,q}^+ = \frac{\sigma T^+}{\sigma q} = \begin{bmatrix} -r - lc \cos(\varphi - \theta) + cc \cos\theta & r + lc \cos(\varphi - \theta) \\ ls \sin(\varphi - \theta) + cs \sin\theta & -ls \sin(\varphi - \theta) \\ 1 & 0 \\ -r - lc \cos(\varphi - \theta) & r + lc \cos(\varphi - \theta) \\ -ls \sin(\varphi - \theta) & -ls \sin(\varphi - \theta) \\ 1 & -1 \\ -r - (l - c) \cos(\varphi - \theta) & r + (l - c) \cos(\varphi - \theta) \\ (l - c) \sin(\varphi - \theta) & -(l - c) \sin(\varphi - \theta) \end{bmatrix} \quad (27)$$

پس از برخورد، موقعیت مبدأ دستگاه تغییر می‌کند و پای نوسان‌گر گام قبل، پای تکیه‌گاه جدید خواهد بود و پای تکیه‌گاه در گام قبل این‌بار پای نوسان‌کننده است. رابطه زاویه‌های دستگاه قبل از برخورد با زاویه‌های جدید در دستگاه بعد از برخورد به صورت زیر است. مختصه‌های جدید با زیرنویس  $n$  و مختصه‌های اولیه با زیرنویس  $0$  نشان داده شده است.

$$\begin{cases} \theta_n^+ = -\theta_o^- = \theta_o^- - \varphi_o \\ -\theta_n^+ = \theta_o^+ - \varphi_o^+ \\ \varphi_n^+ = -2\theta_o^- = -\varphi_o \\ -\varphi_n^+ = -\varphi_o^+ \end{cases} \quad (28)$$

### ۳- بررسی پایداری

برای راهروندهای دوپای پایداری محلی<sup>۱</sup> وجود ندارد، اما می‌توان پایداری چرخه‌ای<sup>۲</sup> را نشان داد [۱۶]. برای این منظور از روش خطی‌سازی و اعمال اغتشاش کوچک در یک نقطه از چرخه استفاده می‌شود. اگر نقاط ثابت سیستم با  $q^*$  و تابع گام با  $p(q)$  نشان داده شود، می‌توان با استفاده از بسط تیلور و صرف‌نظر کردن از جملات مرتبه بالا، رابطه چرخه را در حضور اغتشاش کوچک  $\Delta q^*$  به صورت زیر به دست آورد.

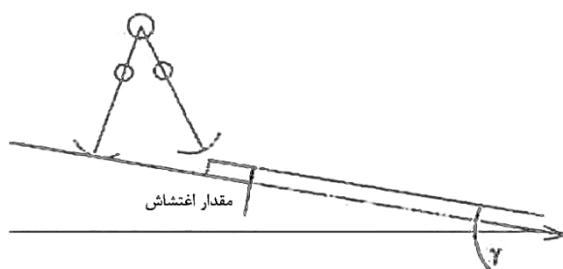
$$q_n^* + \Delta q_{i+1}^* = p(q_n^* + \Delta q_i^*) \approx p(q_n^*) + J \Delta q_i^* \quad (29)$$

$$J_n = \partial p_n / \partial q_n^* \quad (30)$$

از آنجا که تابع گام، یک چرخه کامل را بیان می‌کند، می‌توان رابطه بالا را به صورت زیر ساده کرد:

$$\Delta q_{i+1}^* \approx J_n \Delta q_i^* \quad (31)$$

1. Local Stability
2. Cyclic Stability



شکل ۶ اغتشاش ایجاد شده در مسیر حرکت مدل

#### ۴- حل عددی

روابط حرکت در نرم‌افزار متلب<sup>۳</sup> شبیه‌سازی شده است. برای یافتن نقاط ثابت از روش نیوتون ابتدا یک حدس اولیه برای نقطه ثابت زده شده و با حرکت در جهت بردار گرادیان تابع گام، به سمت آن نزدیک می‌شویم. برای حل معادلات از روش رانگ-کوتای مرتبه چهار و برای محاسبه عددی مشتق جزئی در نقطه ثابت، از روش اختلاف میانی که دقت مرتبه دوم دارد استفاده شده است.

**مدل سازی:** می‌توان برای مدل با پارامترهای جدول ۱، چرخه حدی پایدار مرتبه اول، در شیب ۰/۰۱ رادیان به دست آورد. برای مقایسه انرژی مصرفی در مدل‌های مختلف، باید مشخصات حرکتی آن‌ها را در شرایطی که همه دارای سرعت بی‌بعد برابر باشند، با یکدیگر مقایسه کرد. سرعت بی‌بعد برای یک راهروندۀ به شکل رابطه (۳۳) تعریف می‌شود.

$$(33) \quad v_{\text{بعد}} = \sqrt{l/g} / (\text{راهروندۀ})$$

جدول ۱ پارامترهای ورودی و شرایط اولیه برای سیکل حدی پایدار

شرایط اولیه		مشخصات سیستم		
		مقدار	نماد	پارامتر
$\theta$	۰/۲			جرم بالاتنه
$\dot{\theta}$	-۰/۳		M	جرم پاها
$\varphi$	۰/۴	شرایط اولیه	۰/۵	لختی دورانی پا
		ورودی	m	(حول مرکز جرم پا)
$\dot{\varphi}$	-۰/۳	۰/۰۲	I	طول پا
$\theta^*$	۰/۱۸۹۴۳۸۲	۱/۲	l	فاصله مرکز جرم پا از محل اتصال ران
$\dot{\theta}^*$	-۰/۲۳۹۰۱۰۹	۰/۵	c	ثابت
$\varphi^*$	۰/۳۷۸۸۷۶۵	۰/۲	r	شعاع انحنای کف پا
$\dot{\varphi}^*$	-۰/۰۵۱۳۹۷۰	۰	k	ثابت سختی فنر ران
		۰/۰۱		زاویه شیب
				γ

3. Matlab

$J_n$  یک ماتریس ۲ در ۲ است و به صورت عددی محاسبه می‌شود. بیان پایداری به این صورت خواهد بود: اگر مقادیر ویژه ماتریس  $J_n$  در صفحه موهومی درون دایره‌ای به شعاع واحد قرار گیرند، خطای شرایط اولیه مرحله به مرحله کوچک شده و به صفر میل می‌کند؛ در نتیجه سیستم مجذوبی پایدار است. مقادیر ویژه کوچک‌تر همگرایی سریع‌تر را دریپی دارند، اما میزان پایداری را از روی مقدار آن‌ها نمی‌توان قضاؤ کرد و معیاری جهت مقایسه پایداری ارائه نمی‌کند و مقادیر بزرگ‌تر یا کوچک‌تر نشان‌دهنده پایداری بیشتر یا کمتر نیست.

تخمین پایداری بر اساس معیار چرخه قدمزنی حدی<sup>۱</sup> (توانایی عبور از اختلاف سطح در مسیر حرکت): چرخه قدمزنی حدی بیانی از پایداری است که ویسے در سال ۲۰۰۷ [۱۷] و پس از بررسی حوزه جذب مدل ساده دوپا آن را ارائه کرد. بر اساس آن، پایداری چرخه‌ای برای دوپا ترتیبی از قدمهای پشت سر هم می‌باشد که در کنار هم پایدار هستند، اما به صورت موضوعی و در هر لحظه پایدار نخواهند بود. در این مدل میزان پایداری متناسب با سطح حوزه جذب سیستم تخمین زده می‌شود. محاسبه حوزه جذب با روش‌های جامعی مانند روش نقشه‌برداری خانه‌به‌خانه<sup>۲</sup> [۱۸] بسیار زمان‌گیر است، از این‌رو، برای به دست آوردن تقریبی از آن، می‌توان روش قراردادن مدل در معرض مقادیر محتمل‌تر اغتشاش را در نظر گرفت [۱۹]. مدلی پایدارتر خواهد بود که در برابر مقادیر بیشتر این اغتشاش پایداری خود را باز باید.

در این تحقیق، اغتشاش وارد از نوع اختلاف در سطح حرکت انتخاب شده است. پس از رسیدن مدل به چرخه حدی، در ابتدای یک گام، سطح به مقادیر مشخص و بی‌بعد d در راستای عمود بر آن، بالا یا پایین برده شده است (شکل ۶). مقادارهای مشتبه d نشان‌دهنده بلندی و مقادارهای منفی وجود پستی در مسیر گام‌های مدل می‌باشد. برای بررسی رفتار مدل در مواجهه با اغتشاش رابطه (۳۲) به جای رابطه (۱۸)، به عنوان شرط برخود، در نظر گرفته می‌شود.

$$r + (l - r)\cos\theta - (l - r)\cos(\varphi - \theta) - r = d \quad (32)$$

در این تحقیق چرخه حدی مرتبه اول و رفتار سیستم تا قبل از پدیده دوشاخگی بررسی شده است.

1. Limit Cycle Walking
2. Cell Mapping

## ۵- تحلیل اثر تغییر پارامترها

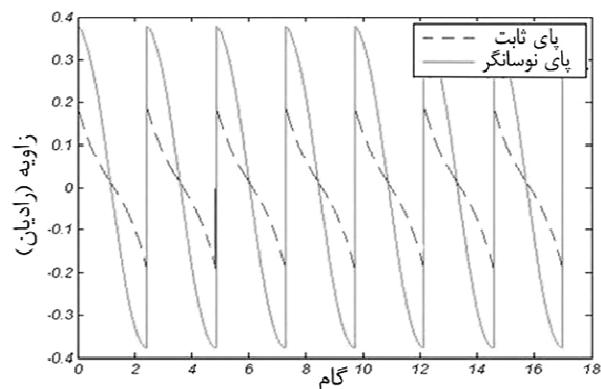
در هر مرحله، یک پارامتر از ساده‌ترین مدل راهروندۀ (مدل گارسیا) تغییر داده شده و اثر آن بر مشخصه‌های حرکت، مصرف انرژی، سرعت و پایداری مدل بررسی شده است. پنج معیار مورد استفاده برای این بررسی عبارت‌اند از: مقدار متغیرهای فضای فاز و سرعت بدون بعد که نشان‌دهنده بازده حرکتی راهروندۀ است، محدوده پایداری در شیب ثابت، توانایی بازیابی حرکت پایدار در عبور از پستی یا بلندی و حفظ پایداری در شیب‌های بیشتر که نشان‌دهنده مشخصه‌های پایداری مدل هستند. برای نمونه اثر تغییر مکان مرکز جرم پا در شکل‌های ۱۰ تا ۱۵ آورده شده است.

مقدار نوسان پا به عنوان معیار نشان‌دهنده تشابه حرکت مدل با حرکت انسان درنظر گرفته شده است (شکل ۱۰). بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین در شیب ثابت و در ازای تغییر شیب، نشان‌دهنده پایداری مدل در ازای تغییر پارامتر است (شکل ۱۱ و ۱۲). مدلی که در محدوده شیب‌های بیشتری حرکت پایدار داشته باشد، پایدارتر است (شکل ۱۴). شکل ۱۳ تغییر سرعت بی‌بعد در ازای تغییر پارامتر را نشان می‌دهد. مدل با سرعت بیشتر در شیب یکسان، بازده حرکتی بالاتری دارد. در شکل ۱۵ حداقل اختلاف سطح مثبت و منفی، که مدل توانایی عبور از آن را دارد، در ازای تغییر پارامتر مورد بررسی نشان داده شده است.

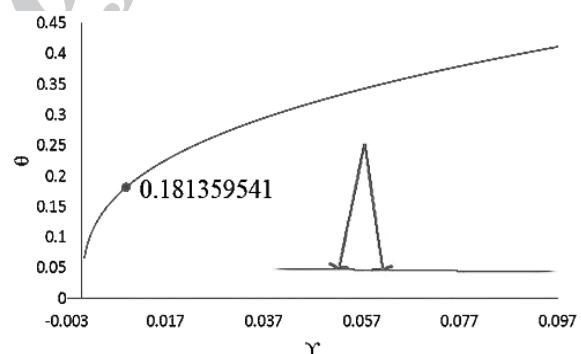
در شکل‌ها نقاط توپر چرخه حرکتی پایدار، نقاط توخالی چرخه ناپایدار و فضای خالی عدم وجود چرخه در ازای آن مقداری را نشان می‌دهد. خصوصیت‌های رفتاری مدل در ازای تغییر پارامترهای ساختاری آن لزومنا به صورت پیوسته تغییر نمی‌کند (بخش ناپیوسته در شکل ۱۲ و ۱۳). این مطلب، با توجه به طبیعت غیرخطی مدل و وجود تغییرات ناگهانی در دینامیک آن به ویژه به دلیل برخورد پاها با زمین، قابل پیش‌بینی است. با این وجود، برای نمایش روند تغییر پارامترها و پیش‌بینی کیفی آن‌ها، متوسط مقادیر به دست آمده روی نمودارها با خطوط پیوسته رسم شده است.

دیده می‌شود تمام راهروندۀ‌های غیرفعال اگر المان‌های ظرفیتی یا مقاومتی برای ذخیره یا تلفکردن انرژی نداشته باشند، دوره حرکتی یکسانی در حدود  $5/0$  ثانیه خواهد داشت، اما این مقدار برای مدل با فنر تغییر می‌کند [۲۰].

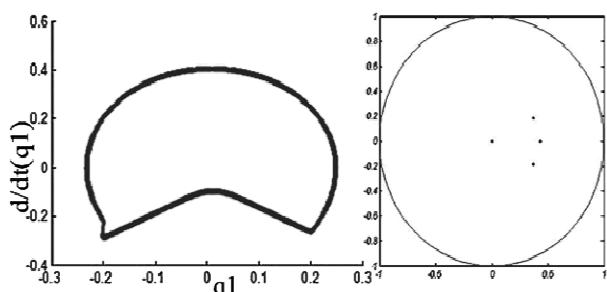
بدین ترتیب میزان شیب و میزان سرعت بیانی از میزان انرژی مصرف شده توسط سیستم خواهد بود. برای این مدل در شیب  $1/0$  رادیان این مقدار برابر  $17/0$  است (شکل ۸). با افزایش شیب و محاسبه مقادیر ویژه، آخرین زاویه برای پایداری چرخه مرتبه اول و آغاز دوشاخگی مشخص می‌شود. شکل ۷ تا ۹ نمودارهای حرکت مدل را نشان می‌دهد.



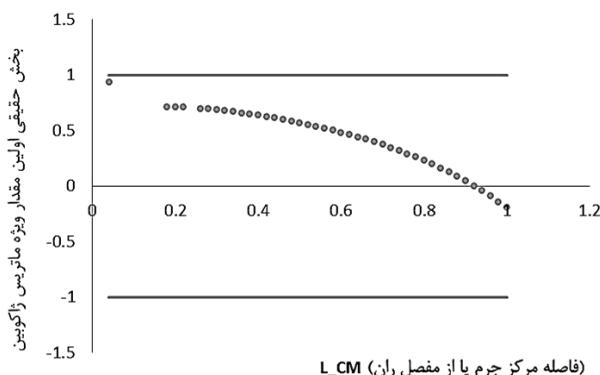
شکل ۷ چرخه حدی پایدار برای شیب  $1/0$  رادیان



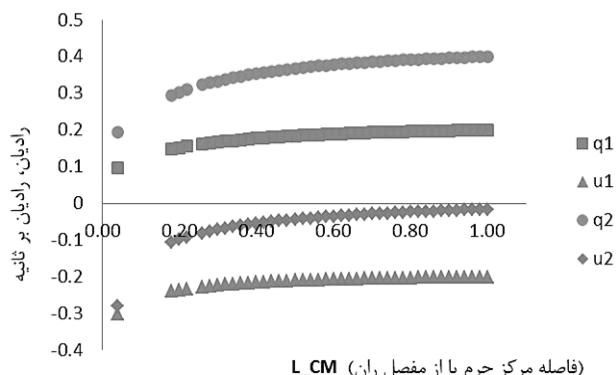
شکل ۸ نمایش مدل در حال گامبرداشتن و نمودار تغییرات زاویه  $\theta$  نقطه ثابت مدل در ازای تغییر شیب



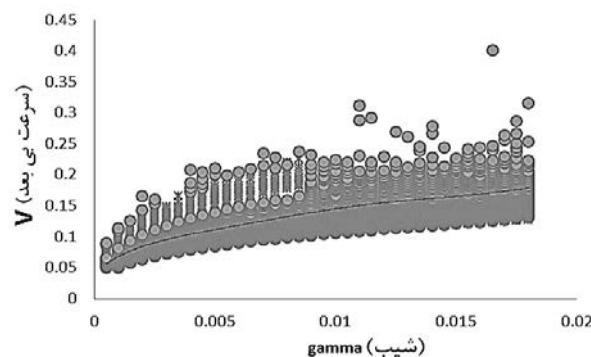
شکل ۹ فضای فاز چرخه حدی مرتبه اول و مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین حول نقطه ثابت سیستم در شیب  $1/0$  رادیان



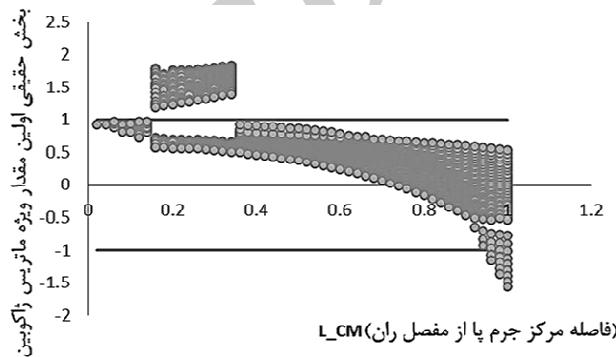
شکل ۱۱ مقدار حقيقى مقادير ويژه ماترييس ژاكوبين تابع در نقاط ثابت درازاي تغيير مكان مرکز جرم پا در شيب ۰/۰۰۹ رادييان



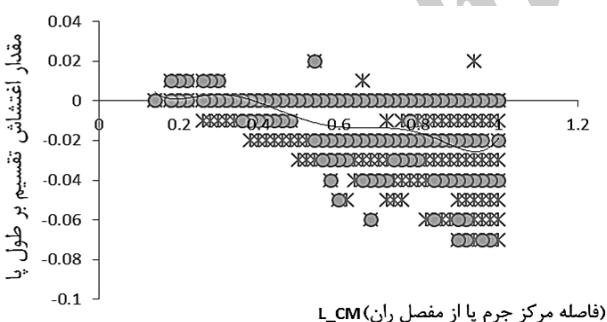
شکل ۱۰ تغيير نقاط ثابت نسبت به تغيير فاصله مرکز جرم پا از مفصل ران در شيب ۰/۰۰۹ رادييان



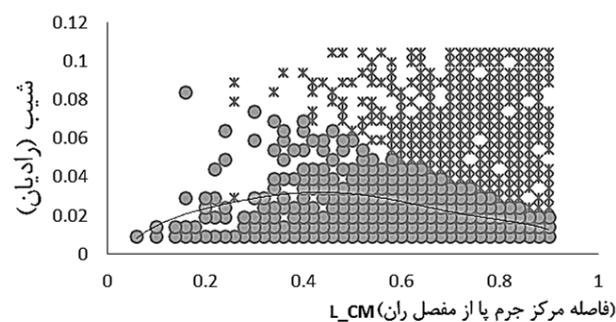
شکل ۱۳ تغيير سرعت بي بعد نسبت به تغيير فاصله مرکز جرم پا از مفصل ران همزمان با تغيير شيب



شکل ۱۲ مقادير ويژه ماترييس ژاكوبين نسبت به تغيير فاصله مرکز جرم پا از مفصل ران همزمان با تغيير شيب



شکل ۱۵ اغتشاش قابل تحمل در ازاي تغيير طول پا: بازگشت به سيكل پайдار (نقاط توپر) و چرخه ناپайдار (نقاط ضربدر)

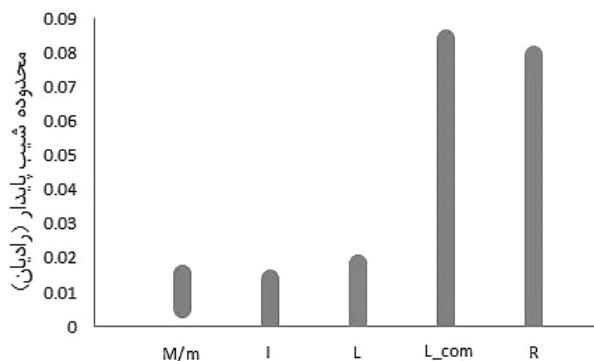


شکل ۱۴ شيبهای دارای چرخه حدی نسبت به تغيير فاصله مرکز جرم پا از مفصل ران

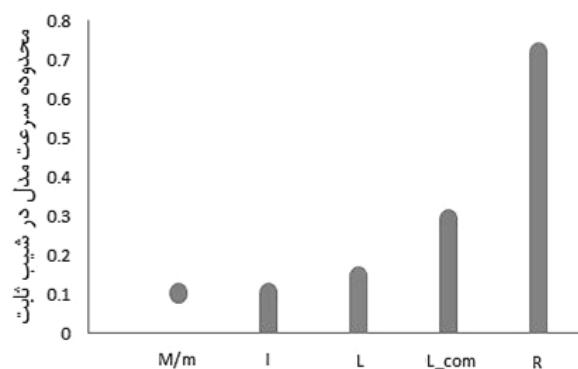
تورسون [۲۱] از دانشگاه ناگویا ژاپن در سال ۲۰۰۸ که بر پایه افروden اغتشاش از نوع ممان و انرژی، میزان پایداری مدل را در ازای تغيير پارامترهای آن بررسی کرده است. نتایج با يكديگر همخوانی داشته و يكديگر را تكميل می کنند. مقایسه ارائه شده در جدول ۲ نشان می دهد، برای برآورد مقدار بهينه پارامترهای

برای مقایسه نتایج با تحقیق های مشابه، از میان تحقیق های انجام شده در این زمینه دو مورد انتخاب شده است؛ تحقیق میشل کلمان [۱۵] در دانشگاه کرنل در سال ۱۹۹۸ که بر اساس حل عددی روابط به ارزیابی اثر پارامترهای مختلف بر پایداری بر اساس معیار شيب و سرعت پرداخته و تحقیق ایوار

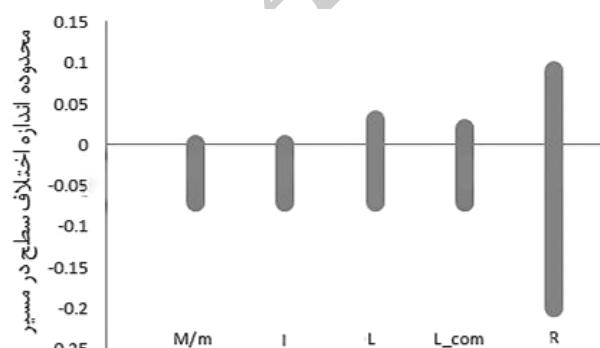
مقدار آن‌ها در طراحی و ساخت مدل راهروندۀ بسیار مهم است. تغییر پارامترهای دیگر مانند لختی پا هرچند تاثیر مثبتی در افزایش پایداری و سرعت حرکت دارند، اما با تغییر آن‌ها خصوصیات حرکتی مدل تغییر چندانی نمی‌کند.



شکل ۱۶ محدوده شیب سطح که مدل بر آن‌ها حرکت پایدار دارد بر حسب تغییر پارامترها



شکل ۱۷ محدوده سرعت بدون بعد مدل در شیب ثابت ۰/۰۰۹ رادیان بر حسب تغییر پارامترها



شکل ۱۸ محدوده اندازه اختلاف سطح که مدل توانایی عبور از آن‌ها را دارد بر حسب تغییر پارامترها

ابعادی مانند طول پا و یا اندازه شعاع پا، معیار میزان نوسان پا و توانایی عبور از پستی و بلندی (تحقیق حاضر) و برای پارامترهایی که نقش ذخیره و آزادکننده انرژی را دارند، مانند فنر، معیار اعمال اغتشاش از نوع انرژی یا ممان خارجی (تحقیق تورسن) تعیین کننده است.

جدول ۲ مقایسه نتایج تحقیق‌های مختلف بر روی اثر تغییر پارامترهای ساختاری راهروندۀ غیرفعال بر خصوصیات حرکتی آن

پارامتر	مدل سازی کلمان (۳)	تحقيق پیش رو	مدل سازی تورسون (۲)
نسبت جرم	با افزایش آن سرعت و پایداری افزایش یافته و برای نسبت جرم‌های زیاد می‌کند و پایداری زیاد افزایش سرعت محسوس نبوده	با افزایش آن سرعت و پایداری افزایش یافته و برای نسبت جرم‌های زیاد می‌کند و پایداری زیاد افزایش سرعت محسوس نبوده	با افزایش آن سرعت و پایداری افزایش یافته و برای نسبت جرم‌های زیاد می‌کند و پایداری زیاد افزایش سرعت محسوس نبوده
مفصل ران	را ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌دهد.	را ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌دهد.	را ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌دهد.
به جرم پا			با افزایش آن سرعت و پایداری افزایش یافته و برای نسبت جرم‌های زیاد می‌کند و پایداری زیاد افزایش سرعت محسوس نبوده
فاصله مرکز جرم پا از مفصل ران	با ابردن آن ابتدا سیستم را ناپایدار سپس در نزدیکی مفصل ران دوباره پایدار می‌شود.	با افزایش آن سرعت را افزایش، پایداری را ابتدا افزایش و سپس از ۳۵٪ کاهش در نزدیکی مفصل ران نزدیک مفصل پایدار می‌شود.	با افزایش آن سرعت را افزایش، پایداری را ابتدا افزایش و سپس از ۳۵٪ کاهش در نزدیکی مفصل ران نزدیک مفصل پایدار می‌شود.
شعاع متقارن کف پا		با افزایش آن سرعت را افزایش و سرعت را افزایش و نوسان پا را افزایش می‌دهد.	با افزایش آن سرعت را افزایش و سرعت را افزایش و نوسان پا را افزایش می‌دهد.
سختی فنر			با افزایش آن سرعت و پایداری را افزایش می‌دهد

در جدول ۳ تاثیر تغییر هر کدام از پارامترها بر مشخصه‌های حرکتی و پایداری راهروندۀ به طور خلاصه ارائه شده است. در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ اثر تغییر هر یک از پارامترها بر سرعت، پایداری و توانایی عبور از پستی و بلندی مدل نشان داده شده است. شعاع کف و سرعت کف پا از آن مکان مرکز جرم پا بیشترین اثر را دارند و با کوچک‌ترین تغییری، باعث تغییر زیاد در خصوصیات حرکتی مدل خواهند شد. از این رو توجه به

## جدول ۳ اثر تغییر پارامترهای مدل بر مشخصه‌های حرکتی و پایداری آن

پارامترهای حرکتی	مصرف مخصوص ارزی و بازده	سرعت بی بعد در شیب مبنای پارامترهای مورد بررسی در مدل ↓	
محدوده	پایداری حرکت	زاویه نوسان پا (طول گام)	سرعت بی بعد در شیب یکسان
پیشنهادی (مقدار متوسط برای انسان)	پایداری در عبور از اختشاش به صورت اختلاف سطح در مسیر	پایداری در ازای شیب‌های متنوع	محدوده پایداری در ازای شیب ۰/۰۹ رادیان
۳۰۰ تا ۲۰۰ (۱۰)	در ۵۰ تا ۱۵۰ بیشترین توانایی بهویژه در برابر کاهش سطح. در محدوده ۸۰ تا ۱۰۰ توانایی عبور از تغییر سطوح مثبت را دارد.	تا محدوده ۲۰۰ تا ۳۰۰ با افزایش آن در شیب‌های بیشتر پایدارتر خواهد بود. از سبب ۱۰۰ به بالا در شیب‌های کم ناپایدار شود.	در ازای نسبت جرم سیار بالا ممکن است ناپایدار شود. تا نسبت ۳۰۰ با شیب زیاد افزایش می‌دهد، اما پس از آن افزایش محسوس نیست.
۰/۰۶۵ تا ۰/۰۲۵ (۰/۰۳۴)	در ۰/۰۵ تا ۰/۰۵ تعادل بیشترین است، اما در برابر اختلاف سطح منفی بی‌اثر است.	کاهش پایداری با افزایش لختی	با افزایش لختی، تنها در محدوده ۰ تا ۰/۶۵ پایدار می‌باشد.
۱/۱۶ تا ۱/۱ (۰/۰۸۸)	در ۰/۰ تا ۱/۰ قابلیت عبور از تغییر سطح مثبت را دارد، در ازای ۱/۳ تا ۱/۴ بیشترین توان در عبور از اختلاف سطح منفی را دارد.	در ۱/۱ تا ۱/۶ بیشترین پایداری در ازای شیب‌های بالا را دارد.	افزایش آن میزان افزایش طول پای نوسان و طول گام سرعت را افزایش را کاهش می‌دهد.
۰/۰۴۵ تا ۰/۰۳۵ (۰/۰۳۳)	در ۰/۰۹ تا ۰/۹۸ بیشترین توانایی عبور از اختلاف سطح منفی را دارد که با بالارفت مرکز جرم کم می‌شود. در ۰/۰۴۵ تا ۰/۴۵ قابلیت عبور از اختلاف سطح مثبت را می‌باشد.	در فاصله ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ و بهویژه در اندازه ۰/۳۵ در شیب‌های تندتری پایدار می‌شود.	بالارفت مرکز جرم تزدیکشدن آن به نوسان پا و طول مفصل ران سرعت را گام را کم می‌کند. افزایش می‌دهد.
۰/۰۶۵ تا ۰/۰۸ (۰/۰۲)	در ۰/۷۶ تا ۰/۶۷ با دارابودن توانایی سیار خوب بهویژه در عبور از اختلاف سطح‌های مثبت، بیشترین پایداری را دارد.	در ۰/۶ تا ۰/۸ بیشترین پایداری را بهویژه در ۰/۶۶ تا ۰/۶۷ دارد.	با افزایش آن، سرعت با افزایش نوسان و طول گام شعاع پا افزایش می‌باشد. افزایش می‌باشد.
بالاتر از ۰/۸ (متغیر)	بی‌اثر بر توانایی عبور از اختلاف سطح در مسیر	افزایش پایداری با افزایش سختی بهویژه بیش از ۰/۸ که مدل در شیب‌های سیار گوچک نیز پایدار می‌شود.	کاهش نوسان افزایش سرعت با بالاتر و طول گام افزایش سختی سختی فنر مفصل ران با افزایش سختی

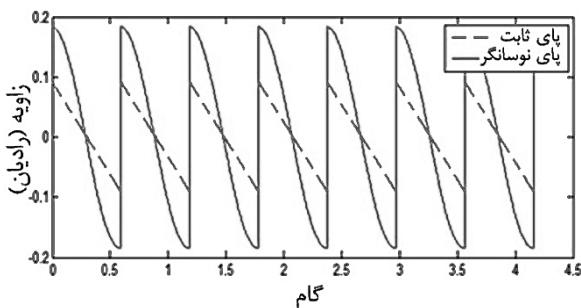
افزایش را دارد و سختی فنر بر آن بی‌اثر است. مدل در مجموع توانایی کمی در عبور از افزایش ارتفاع در سطح دارد، اما این توانایی برای محدوده معنی‌داری از لختی پا، نسبت جرم‌ها و با بالارفت مرکز جرم پا افزایش می‌باشد. تغییر شعاع کف و پس از آن مکان مرکز جرم و طول پا به ترتیب بیشترین اثر را بر توانایی مدل در عبور از پستی و بلندی بهویژه اختلاف سطح مثبت (بلندی) دارند.

## ۶- بهینه‌سازی

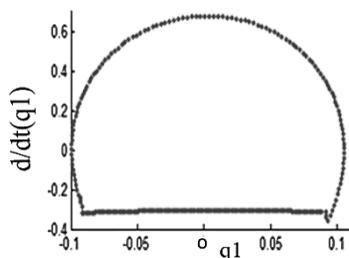
بهینه‌سازی به روش ژنتیک و توسط نرم‌افزار متلب انجام شده است.تابع برازش بر اساس دو معیار سرعت بی‌بعد (نشان‌دهنده بازده مصرف انرژی) و اندازه زاویه نوسان پا (نشان‌دهنده شباهت حرکت مدل به راه‌رفتن انسان) تعریف شده است. معیار زاویه نوسان از انتخاب شعاع‌های بزرگ و نامناسب برای کف پا جلوگیری خواهد کرد.

$$\theta^*/\gamma = \text{تابع برازش} \quad (34)$$

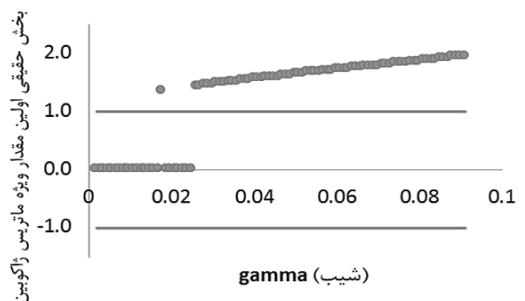
با توجه به جدول ۳ به طور خلاصه می‌توان گفت که زاویه نوسان پاها، به عنوان مبنای مقایسه شکل حرکت با حرکت انسان، با افزایش نسبت جرم، کاهش سختی فنر، افزایش شعاع کف پا، پایین‌آمدن مرکز جرم پا و کاهش طول پا افزایش یافته و به لختی پا وابسته نیست. سرعت بدون بعد، به عنوان معیار برآورده راندمان حرکت، با افزایش نسبت جرم تا ۳۰۰، افزایش طول پا، سختی فنر، شعاع کف پا و بالارفت مرکز جرم افزایش می‌باشد. افزایش سختی فنر، به دلیل افزایش دوره حرکت، با وجود کاهش نوسان پاها، سرعت را افزایش می‌دهد، اما تغییر سایر پارامترها بر دوره حرکت بی‌اثر است. تغییر شعاع کف پا و مکان مرکز جرم به ترتیب بیشترین اثر را بر سرعت حرکت مدل دارد. حداقل شیب با چرخه حرکتی پایدار، به عنوان معیاری از پایداری، برای بازده‌های معنی‌داری از مقدار پارامترها حاصل می‌شود، اما بیشترشدن سختی فنر و شعاع پا بیشترین اثر را بر آن دارد. تغییر مکان مرکز جرم و شعاع پا به ترتیب باعث بیشترین تغییر در پایداری حرکت را هرونده از این نظر خواهد شد. توانایی عبور از پستی و بلندی با افزایش شعاع پا بیشترین



شکل ۱۹ چرخه حدی پایدار مدل بهینه در شیب ۰/۰۰۹ رادیان



شکل ۲۰ فضای فاز برای مدل بهینه در شیب ۰/۰۰۹ رادیان



شکل ۲۱ بخش حقیقی مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین بر حسب تغییر زاویه شیب. چرخه مرتبه اول حرکت برای مدل بهینه که در زاویه شیب ۰/۰۲۵ رادیان ناپایدار می‌شود

## ۷- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی راهروندۀ مطابق جدول ۱ در نرمافزار آدامز، با اعمال ضرایب بی بعدسازی، مقادیر ورودی حل عددی از حالت بی بعد خارج شده‌اند. به عنوان مثال، سرعت‌های زاویه‌ای پس از ضرب در ثابت  $(l-r)/\sqrt{g(l-r)} = 3.1315$  به عنوان ورودی در شبیه‌سازی به کار گرفته شده‌اند. با تغییر ورودی‌های سرعت زاویه‌ای و شیب، مدل با سرعت بدون بعد برابر ۰/۱۶۸، که تقریباً برابر مدل ثئوری است، به حرکت گامبرداشتۀ پایدار رسیده و بیش از ۱۵ قدم به حرکت خود ادامه می‌دهد. محیط

مقدار تابع فوق، برای مدل بهینه، کمینه خواهد بود. در مجموع ۲۱۰۰ ترکیب مختلف از ۶ متغیر ورودی ارزش‌گذاری شده و مقادیر حاصل برای مدل‌های بهینه در جدول ۴ آمده است. با مشاهده مقادیر پیشنهادشده برای مدل‌های بهینه می‌توان برآورده کلی از حالت بهینه، زمانی که مجموعه‌ای از پارامترها با هم تغییر می‌کنند، در اختیار قرار داد. مشاهده نسبت جرم مفصل ران به جرم پا زیاد، سختی فنر مفصل ران در آن‌ها زیاد و اینرسی دورانی پا کم شده است.

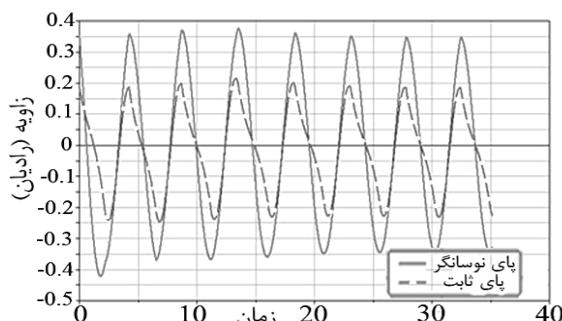
جدول ۴ ترکیب‌های بهینه بدست آمده برای پارامترهای مدل

$\theta^*/v$ بی بعد	عدد برازش	متغیرهای مورد بررسی					مدل بهینه ↓	مبنای ←
		M/m	I	L	c	r		
۱/۹۵	۱۰۰۰	.	۱	۱	۱	۰	۰	۱
۰/۳۸	۶۳۴	۰/۰۱	۱/۴۷	۰/۵۳	۰/۱۶	۳/۱۶	۱	۹
۰/۳۲	۶۶	۰/۰۱	۱/۴۷	۰/۴۴	۰/۸۰	۳/۱۶	۲*	۱۰
۰/۴۰	۲۲	۰/۰۳	۱/۰۶	۰/۴۰	۰/۸۱	۲/۴۹	۳	۱۱
۰/۳۳	۲۲۴	۰/۰۳	۱/۰۶	۰/۴۰	۰/۸۱	۳/۹۹	۴*	۱۲
۰/۳۰	۵۱	.	۱/۴۲	۰/۳۵	۰/۲۵	۲/۱۹	۵	۱۳
۰/۲۴	۵۱	.	۱/۴۲	۰/۳۵	۰/۲۳	۳/۱۹	۶*	۱۴
۰/۲۵	۱۴۶	.	۱/۴۲	۰/۳۵	۰/۸۲	۳/۱۹	۷**	۱۵
مدل‌هایی که برای آن‌ها چرخه حدی پایدار پیدا نشد								

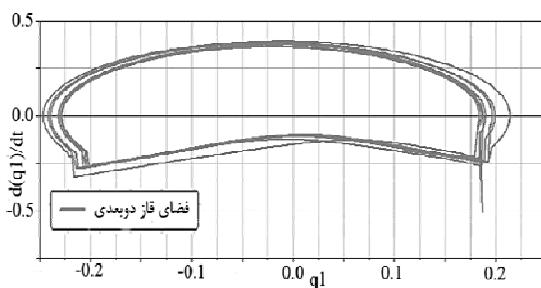
\* ردیف‌های مشخص شده با ستاره، با فرض نقطه بهینه ردیف بالا به عنوان یک حدس اولیه، برآورد شده‌اند.

\*\* بهترین نتیجه از ۶ مرتبه اجرای روش، به عنوان حدس اولیه مرتبه ۷ قرار گرفته است.

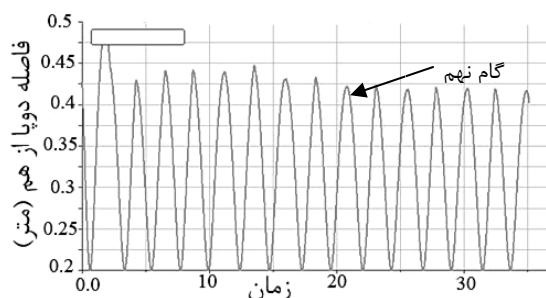
خصوصیت‌های حرکتی مدل بهینه حاصل در شکل‌های ۱۹ تا ۲۱ آورده شده است. دوره گامبرداشتۀ مدل بهینه کم است (شکل ۱۹). سرعت نوسان پای تکیه‌گاه در طول گام تقریباً ثابت است و برخوردها تغییر آنی کمتری بر سرعت‌های زاویه‌ای دارند. همچنانی، مقادیر ویژه ماتریس ژاکوبین به مقدار صفر بسیار نزدیک بوده و راهروندۀ در مواجهه با اغتشاش، سریع‌تر حرکت پایدار خود را باز می‌یابد (شکل ۲۰). مدل تا شیب ۰/۰۲۵ رادیان چرخه پایدار خود را حفظ می‌کند و با وجود اینکه معیار پایداری مبنای بهینه‌سازی نبوده است، مدل حاصل بسیار پایدارتر شده است (شکل ۲۱).



شکل ۲۳ نمودار شبیه‌سازی فضای فاز بر حسب زاویه و سرعت زاویه‌ای پای تکیه‌گاه در شیب ۱۱۵° رادیان



شکل ۲۴ نمودار شبیه‌سازی چرخه حدی فضای فاز بر حسب زاویه و سرعت زاویه‌ای پای تکیه‌گاه در شیب ۱۱۵° رادیان

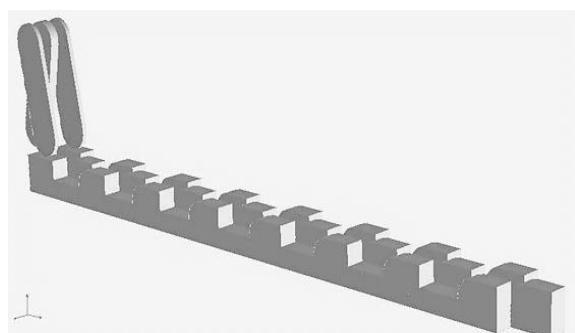


شکل ۲۵ تغییر فاصله دوپا از هم (نقطه حداکثر نشان‌دهنده طول گام هستند)

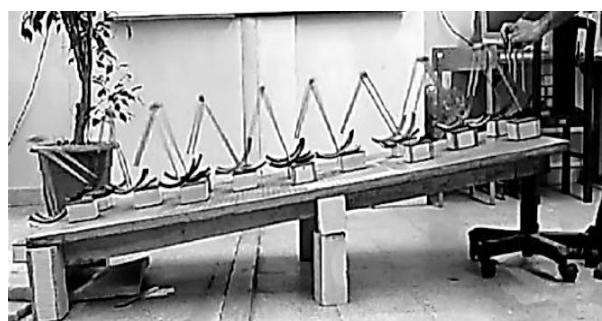
مدل‌سازی و نمودارهای نوسان پاها و فضای فاز در شکل‌های ۲۲ تا ۲۴ آورده شده است. طول گام مدل در چرخه حدی (گام نهم به بعد) تقریباً ۴۲ سانتی‌متر خواهد بود. این مقدار برای حل عددی مدل تئوری برابر ۴۵ سانتی‌متر می‌باشد. با توجه به برابری تقریبی دوره گام، مدل شبیه‌سازی شده بازده حرکتی کمتری دارد. مطابق جدول ۵، مدل شبیه‌سازی شده برای ۰.۱۵٪ بیشتر انرژی رسانیدن به سرعت بی بعد برابر با مدل تئوری، این مدل اینرژی مصرف می‌کند. این مسئله از آنجا که انرژی تلف شده در حرکت غیرفعال مربوط به برخورد پاها با زمین است و در تحلیل برخوردها فرض ایدئال بودن لحاظ شده است، قابل پیش‌بینی است. تغییر شرایط برخورد از حالت ایدئال و وجود لغزش یا برخورد چندمرحله‌ای، بیش از هرچیز بر انرژی تلف شده مدل تاثیر داشته و آن را افزایش می‌دهد که برای جبران آن نیاز به افزایش شیب خواهد بود.

جدول ۵ مقایسه پارامترهای مورد انتظار بر اساس مدل تحلیلی و مقادیر به کار رفته در شبیه‌سازی موفق در نرم‌افزار آدامز

درصد تغییر	مشخصات سیستم			
	پارامتر	شدید یا به دست	مقدار مورد انتظار	نماد محیط
۱۵	$\gamma$	۰/۰۱	۰/۰۱۱۵	شیب سطح
۸/۵۸	$\theta$	-۰/۷۴۸۴	-۰/۸۱۲۶	سرعت زاویه‌ای اولیه پای تکیه‌گاه ( $0/2390 \times 3/1315$ )
۸/۵۸	$\varphi$	-۰/۱۶۰۹	-۰/۱۷۴۷	سرعت زاویه‌ای اولیه میان دوپا ( $0/0514 \times 3/1315$ )
		$\frac{\text{مدل}}{\sqrt{l/g}}$	۰/۱۷	سرعت بی بعد (تقریباً معادل)



شکل ۲۶ محیط مدل‌سازی، شکل حفره حفره سطح شیبدار



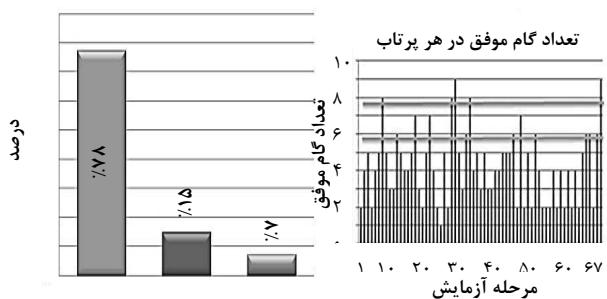
شکل ۲۶ مدل در حال قدمزنی بر روی شیب مبنا



شکل ۲۷ مدل با دو وزنه ۲۰۰ گرمی اضافه شده در بالاتنه در حال قدمزنی بر روی شیب مبنا



شکل ۲۸ مدل با وزنهای ۲۰۰ گرمی اضافه شده در انتهای پایین پاها در حال قدمزنی بر روی شیب مبنا



شکل ۲۹ تعداد گام در هر مرحله پرتاپ و نمودار بررسی آماری حوزه جذب برای مدل اولیه بر روی شیب مبنا

- پارامترهای طراحی: سایر پارامترها که مقدار آنها بر اساس بهینه‌سازی به روش ژنتیک به دست آمده است (جدول ۶). پس از انتخاب مقادیر مناسب برای طول و جرم پا، که مبنای بی‌بعدسازی هستند، مقادیر جدول ۷ برای ساخت مدل به کار گرفته شده‌اند.

جدول ۶ پارامترهای بهینه بدست آمده از روش ژنتیک

مقدار عدد برازش		پارامترهای مورد بررسی		پارامترهای پیش‌فرض شده		$\theta^*/v$ بی‌بعد
$I$	$L$	$k$	$M/m$	$c$	$r$	
•	1	•	1	•	0.35	0.8498

جدول ۷ مقدار پارامترهای نهایی استفاده شده در ساخت مدل

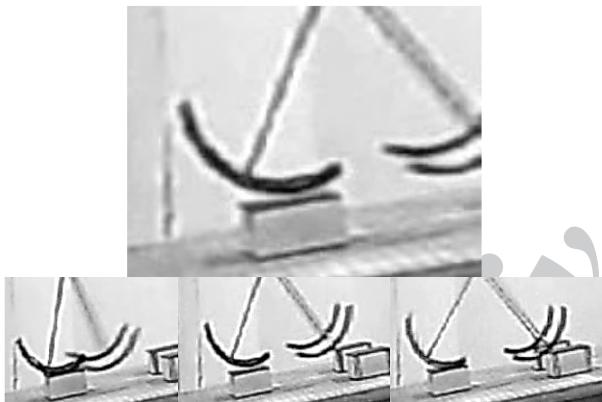
مشخصات مدل				
پارامتر	نام	نماد	مقدار	واحد
جرم بالا تنه	جرم	$M$	برابر با	Kg
جرم پا	جرم	$m$	مقدار دلخواه	Kg
ممان اینرسی حول مرکز جرم پا	ممان	$I$	•	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
طول پا	طول	$L$	•	m
فاصله مرکز جرم پا از مفصل ران	فاصله	$c$	•	m
شعاع انحنای کف پا	شعاع	$r$	•	m

ساخت و آزمایش مدل: با توجه به امکاناتی که مدل ساخته شده در اختیار می‌گذارد، ۵ مرحله آزمایش تعریف شده است.

۱- حرکت مدل در شیب مبنا (۰/۱۴۵ رادیان)، ۲- حرکت مدل در شیب متفاوت (۰/۱۲ رادیان)، ۳- آزمایش مدل با وزنهای اضافه شده در بالاتنه در شیب مبنا، ۴- آزمایش مدل با وزنهای اضافه شده در انتهای پایین پاها در شیب مبنا، ۵- آزمایش مدل با وزنهای اضافه شده در انتهای پایین پاها در عبور از اختلاف سطح مثبت و منفی در شیب مبنا. برای بدست آوردن نتایج آزمایش‌های عملی راههای مختلفی مانند فیلمبرداری و صدابرداری وجود دارد [۲۳]. در این تحقیق نتایج از تحلیل فیلم‌های آزمایش به دست آمده است. در هر آزمایش، با آزمون و خطأ، چرخه حرکتی تکرار پذیر یافته شده است.

شکل‌های ۲۶ تا ۲۸ چند مرحله از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. در شکل ۲۹ تعداد گام‌های طی شده در هر پرتاپ و درصد پرتاپ‌های موفق برای آزمایش مدل اولیه در شیب مبنا آورده شده است. در جدول ۸ نتایج آزمایش‌ها آورده شده است.

بررسی فیلم‌های آزمایش نشان می‌دهد که برخوردها با لغزش و بازگشت قابل توجه همراه هستند. در شکل ۳۰ این پدیده با افزایش سرعت برخورد افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش شبیب یا بالابردن مرکز جرم پا یا افزایش جرم بالاتنه و به طور کل هر تغییر که سرعت پا در زمان برخورد را افزایش دهد، شدت یافته و شرایط برخورد بیشتر از شرایط ایدئال فاصله می‌گیرد. علت افزایش تعداد پرتتاب‌های سالم و افزایش غیرمنتظره حوزه جذب محاسبه شده، کم شدن سرعت حین برخوردهاست. از این مشاهده اهمیت نیاز به برآورد نیروهای زمان برخورد و انتخاب مواد مناسب برای جذب ضربه در کف پای مدل و مسیر حرکت مشخص می‌شود. با استفاده از موادی با قابلیت جذب ضربه بیشتر، می‌توان به برخوردهای ایدئال و پیش‌بینی‌های تئوری نزدیک‌تر شد.



**شکل ۳۰** بازگشت پا در لحظه برخورد گام سوم، لحظه برخورد (راست)، بلندشدن پا در اثر برخورد (وسط و بالا)، برخورد دوباره یا شروع غلتش (چپ)

در مورد برآورده حوزه جذب مدل از طریق بررسی آماری نتایج آزمایش‌های عملی، نقش آزمایشگر ماهر در هنگام پرتاب مدل غیرقابل انکار است. از این رو اشاره دقیق به نتایج آزمایش‌های عملی و برآورده حوزه جذب از این طریق در تحقیق‌های مشابه پیشین ارائه نشده است. تنها در صورت تکرار آزمایش‌ها توسط یک فرد بر روی مدل‌های مختلف، تفاوت درصد پرتاب‌ها می‌تواند معیار مقایسه پایداری و حوزه جذب این مدل‌ها با یکدیگر باشد، اما تفاوت درصد پرتاب‌های موفق در آزمایش‌های انجام‌شده توسط افراد متفاوت و در شرایط آزمایشگاهی مختلف نمی‌تواند معیار دقیقی از پهتر بودن

#### جدول ۸ نتایج آزمایش‌های عملی بر روی مدل

پارامترهای فضایی فاز		بازده حرکتی		پایداری	
θ	φ	طول	سرعت ثابت	تعداد	خارج از حوزه جذب
نایپایدار	پایدار	حوزه جذب پرتاب متوسط زمانی متوسط	زمانی (m/s)	قدمزنی (قدمزنی ها)	حوزه جذب خارج از حوزه جذب
(G)	(S)	(G)	(m/s)	(G)	(G)
بیش از ۸ گام	۷-۶ گام	۵-۴ گام	۱-۰ گام	۰/۱۷	۰/۷۸ (٪/٪)
مدل اولیه بر شیب ۱۴۵° رادیان		۰/۵		۰/۲۵	
۰/۵	۰/۱۵	۰/۷۸ (٪/٪)	۰/۷	۰/۱۷	۰/۷۸ (٪/٪)
مدل اولیه بر شیب ۱۲° رادیان		۰/۵		۰/۲۵	
۰/۵	۰/۱۵	۰/۷۸ (٪/٪)	۰/۷	۰/۱۷	۰/۷۸ (٪/٪)
مدل با وزنه ۲۰۰ گرمی اضافه شده در بالاترین بر شیب اولیه ۱۴۵° رادیان		۰/۵		۰/۲۵	
۰/۵	۰/۱۸	۰/۷۸ (٪/٪)	۰/۷	۰/۱۷	۰/۷۸ (٪/٪)
مدل با وزنه ۲۰۰ گرمی در انتهای پایین پاها بر شیب ۱۴۵° رادیان		۰/۵		۰/۲۵	
۰/۵	۰/۲۰	۰/۷۸ (٪/٪)	۰/۷	۰/۱۷	۰/۷۸ (٪/٪)
مدل با وزنه های ۲۰۰ گرمی در انتهای پایین پاها بر شیب ۱۴۵° رادیان		۰/۵		۰/۲۵	
۰/۵	۰/۲۵	۰/۷۸ (٪/٪)	۰/۷	۰/۱۷	۰/۷۸ (٪/٪)

نتیجه آزمایش‌ها تا حد زیادی با نتایج تئوری هم‌خوانی دارد. در بررسی‌ها، مشخصات حرکتی مدل بر شیب  $0/145$  رادیان مبنای مقایسه قرار گرفته است. در این حالت سطح حوزه جذب تنها برابر  $7$  درصد سطح فضای فاز می‌باشد. در مرحله بعد با آزمایش مدل بر روی شیب  $0/12$  رادیان، طبق انتظار، با کاهش شیب، طول گام و سرعت متوسط کاهش و زاویه‌های نقاط ثابت افزایش می‌یابد. ثابت زمانی قدمبرداشت‌نیز بر روی شیب مینا بیشتر و برابر  $18$  درصد است. این مطلب غیرطبیعی است. برای مدل با وزنهای افزوده شده در مفصل ران، طبق انتظار با افزودن وزن بالاترین نسبت به حالت اولیه، طول گام و سرعت متوسط و زوایای نقاط ثابت افزایش می‌یابد. ثابت زمانی قدمبرداشت‌نیز تمام آزمایش‌ها ثابت و حدوداً برابر  $0/5$  ثانیه است. وسعت حوزه جذب نیز از آزمایش بر روی شیب مینا بیشتر و برابر  $20$  درصد است. با افزودن وزنه به انتهای پای مدل، طبق انتظار نسبت به حالت اولیه، طول گام و سرعت متوسط کاهش و زوایای نقاط ثابت افزایش می‌یابد. ثابت زمانی قدمبرداشت‌نیز ثابت می‌ماند، اما سطح حوزه جذب از آزمایش بر روی شیب مینا بیشتر بوده و برابر  $37$  درصد است. همانند آنچه در آزمایش برای گام برداشت‌نیز مدل بر روی شیب  $0/12$  رادیان دیده شد، این مطلب غیرطبیعی است. در ادامه به بررسی علت این موضوع پرداخته شده است.

مدل‌سازی انجام شده، مصرف مخصوص انرژی را ۱۵ درصد افزایش می‌دهد. پس از ساخت مدل، در ۵ مرحله آزمایش و برای هر مرحله به روش آماری، حوزه جذب و پایداری مدل تخمین زده شده است. نتایج آزمایش‌ها به طور کیفی قبل مقایسه با نتایج تئوری بوده و انطباق خوبی را نشان می‌دهند.

برای اثرهای غیرقابل انتظار افزایش پایداری در اثر کاهش شبیه و یا افزودن وزن به پایین پاها و پایین‌وردن محل مرکز جرم پا، با توجه به شباهت برخی نتایجی که تغییر این دو پارامتر بر خصوصیات حرکتی مدل داشته‌اند و بررسی فیلم آزمایش‌ها، نشان داده شد که علت اصلی این موضوع شرایط غیر ایدئال برخوردها می‌باشد.

## ۱۰- مراجع

- [1] Garcia M., Chatterjee A., et al., "The Simplest Walking Model Stability, Complexity, and Scaling", *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 120, No. 2, 1998, pp. 281-288.
- [2] <http://www-personal.umich.edu/~shc/Robot/>
- [3] Kuo, A. D., "Stabilization of Lateral Motion in Passive Dynamic Walking", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 18, No. 9, 1999, pp. 917-930.
- [4] Wisse M., Schwab A. L., "Passive Dynamic Walking Model with Upper Body", *Robotica*, Cambridge University Press, Vol. 22, 2004, pp. 681-688.
- [5] Collins S., Wisse M., Ruina A., "A Three-Dimensional Passive Dynamic Walking Robot with Two Legs and Knees", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 20, 2001, pp. 607-622.
- [6] Collins S., Ruina A., "A Bipedal Walking Robot with Efficient and Human-Like Gait", *International Conference on Robotics and Automation - ICRA*, Barcelona, Spain, 2005, pp. 1983-1988.
- [7] Farshimi F., Naraghi M., "A Passive-Biped Model with Multiple Routes to Chaos", *Journal of Acta Mechanica Sinica*, Vol. 27, No. 2, 2011, pp. 277-284.
- [8] Tehrani Safa A. Ghaffari Saadat M. Naraghi, M., "Passive Dynamic of the Simplest Walking Model, Replacing Ramps with Stairs", *Mechanism and Machine Theory*, Elsevier Publication, Vol. 42, 2007, pp. 1314-1325.
- [9] Camp J., *Powered "Passive" Dynamic Walking*, Masters of Engineering Project, USA, Cornell University, The Sibley School of Mechanical and Aerospace Engineering, 1997, pp. 1-8.

مشخصه‌های حرکتی مدل‌های مختلف نسبت به یکدیگر بهشمار آید. در این بررسی، مطابق جدول ۸، در بهترین شرایط بیش از یک سوم پرتاب‌ها (۳۷ درصد) موفق بوده است. این میزان در تحقیق‌های مشابه برابر یک سوم [۴] و نصف [۲۳] مجموع پرتاب‌ها گزارش شده است.

## ۹- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، با هدف تعریف روندی که منجر به طراحی و ساخت مدلی بهینه گردد، مراحل مدل‌سازی، حل عددی، بررسی اثر تغییر پارامترهای ساختاری بر خصوصیات حرکتی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری یکی پس از دیگری به انجام رسیده است. مدل درنظر گرفته شده پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی یک نمونه قابل ساخت را در خود دارد از جمله لختی پاها و مرکز جرم با مکان متغیر در طول پا، فتر میان دو پا و شکل منحنی برای کف پا. با هدف سادگی و کاهش خطای محاسباتی، مدل‌سازی به روش ترکیبی انجام شده است. برای رسیدن به معیار مناسبی از تاثیر پارامترها بر پایداری، توانایی بازیابی حرکت پایدار در عبور از پستی و بلندی در سطح مسیر راهروندۀ به عنوان مبنای برای تخمین پایداری معرفی شده است. پارامترهای مدل از ۵ دیدگاه برای برآورد بازده، پایداری و شکل حرکت بررسی شده و در کنار نتایج تحقیق‌های مشابه، مجموعه قابل توجهی برای بررسی تاثیر پارامترهای ساختاری در دست‌یابی به مدل رامروندۀ بهینه ارائه شده است (جدول ۲ و ۳). نشان داده شده، با توجه به حساسیت مشخصه‌های حرکت راهروندۀ به تغییر پارامترها، انتخاب مناسب شعاع کف و پس از آن مکان مرکز جرم پاها و توجه به اجرای دقیق آن‌ها در زمان ساخت مدل واقعی، نسبت به سایر پارامترها اهمیت بیشتری دارد. در ادامه بهینه‌سازی یکجای پارامترهای مدل به روش ژنتیک و با هدف دست‌یابی به بیشترین بازده همراه با کمترین نوسان پاها انجام شده است. از این روش پس از ساده‌سازی پارامترهای مدل برای بهینه‌یابی پارامترهای مهم در طراحی مدل واقعی استفاده شده و مدلی کوچک بر این اساس طراحی و ساخته شده است. پیش از اقدام به ساخت، با هدف نزدیک‌تر شدن به شرایط واقعی، شبیه‌سازی مدل در نرم‌افزار آدامز صورت گرفته است. نشان داده شد که شرایط برخورد اثر زیادی بر بازده حرکت دارد و برای

- [18] Ning L., et al., "The Effects of Parameter Variation on the Basins of Attraction of Passive Walking Models", *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Harbin, China, 2007, pp. 1908-1913.
- [19] Hobbelen D., Wisse M., "The Gait Sensitivity Norm", *Dynamic Walking Conference*, Scientific Program and Abstracts, Ann Arbor, USA, 2006, p. 15.
- [20] Noorden L., Styns F., et al., "The Speed of Walking while Synchronising to Music, or How to Model the 2Hz Resonance in Human Locomotion and Musical Tempo", *Dynamic Walking Conference*, Scientific Program and Abstracts, Ann Arbor, USA, 2006, p. 65.
- [21] Thorson I., *On the Gait Robustness of Passive Dynamic Robots, and a Novel Variable Stiffness Series Elastic Actuator*, PhD Thesis Presentation, Japan, Nagoya University, 2008, pp. 1-45.
- [22] Kruz M. J., Judkins T., "A Passive Dynamic Walking Robot That Has a Deterministic Nonlinear Gait", *Journal of Biomechanics*, Elsevier, Vol. 41, No. 6, 2008, pp. 1310-1316.
- [23] Ning L., Junfeng L., et al., "Passive Walker That Can Walk Down Steps: Simulations and Experiments", *Acta Mech. Sin*, Vol. 24, 2008, pp. 569-573.
- [10] Wisse M., *Essentials of Dynamic Walking, Analysis and Design of Two-Legged Robots*, Netherlands, Delft University, ISBN90-77595-82-1, 2004, pp. 33-50.
- [11] Tedrake R., Zhang W., et al., "Actuating a Simple 3D Passive Dynamic Walker", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, New Orleans, USA, 2004, pp. 1-6.
- [12] <http://en.wikipedia.org/wiki/ASIMO>
- [13] Schwab L., *Multibody Dynamics B*, University Course Lecture, Netherlands, Delft University of Technology, 1998, pp. 24-27.
- [14] Wisse M., Van Der Linde R. Q., *Delft Pneumatic Bipeds*, Berlin Heidelberg, Springer, 2007, pp. 15-19.
- [15] Coleman, M., *A Stability Study of a 3-Dimensionam Passive Dynamic Model of Human Gait*, PhD Thesis, USA, Cornell University, 1998,
- [16] Dingwell J. B., Kang H. G., "Direct Comparisons of Local and Orbital Dynamic Stability in Human Walking", *Dynamic Walking Conference*, Scientific Program and Abstracts, Ann Arbor, USA, 2006, pp. 51.
- [17] Hobbelen D., Wisse M., "Limit Cycle Walking", *Humanoid Robots: Human-like Machines*, Edited by: Matthias Hackel, Chapter 14, Vienna, Austria, Itech, 2007, pp. 642-660.