

داشته است. همچنین، اندازه منحنی کف پا نیز قدری افزایش داشته است. لازم به ذکر است در شکل‌های ۶ و ۷ برای جلوگیری از شلوغ شدن تصویر، تنها بخشی از نتایج بهینه‌سازی آورده شده و مسیر و منحنی بهینه با نقطه-خط مشخص شده‌اند.

با توجه به توضیحاتی که در بخش سه آورده شده است، در هر مرحله از بهینه‌سازی مسیر، مقدار قید رابطه (۷) چک شده و با روش تندترین کاهش و در ده حلقه، به سمت صفر میل داده شده است. نمودار تغییرات این قید در حلقه آخر بهینه‌سازی در شکل ۸ آورده شده است، با انجام سه مرحله بهینه‌سازی در چهل حلقه، مطابق با شکل ۹، مقدار تابع هزینه از مقدار $0/065$ به مقدار $0/027$ کاهش یافته است، با توجه به این نمودار، مقدار مصرف انرژی تا حلقه ۲۹ بهینه‌سازی کاهش یافته و پس از آن، در مقدار کمینه خود ثابت شده است. همچنین، مقدار انرژی مصرفی به تنهایی برابر با $0/0205$ محاسبه شد.

به منظور نشان دادن استقلال نتایج حاصل از حدس اولیه، این بهینه‌سازی در پنج مرحله دیگر تکرار شد که مقدار انرژی مصرفی میانگین و انحراف از معیار به ترتیب برابر با $0/0202$ و $0/00236$ بدست آمد.

۵- نتیجه گیری

در این مطالعه، برای طراحی منحنی کف پای بهینه از میان دسته‌ای از منحنی‌های محدب، مدل معروف جرم متمرکز با نقطه تماس ثابت به مدلی با نقطه تماس متحرک بر روی یک منحنی به نام منحنی کف پا توسعه یافته است. همچنین با توجه به متأثر بودن سیکل راه‌رفتن بهینه از هندسه مدل، بهینه‌سازی همزمان برای یافتن ترکیب بهینه منحنی محدب کف پا و سیکل راه رفتن انجام شده است. معادلات سینماتیک و سینتیک با تکیه بر اصول پایه هندسه و مکانیک کلاسیک استخراج شده و علاوه بر قیود پایه سینماتیک، ارضای قیود لازم برای حرکت تکراری، پیوسته، و متقارن مورد توجه قرار گرفته است. بهینه‌سازی برای کمترین انرژی مصرفی با مدل کار مثبت و با بکارگیری دو تکنیک ازدحام ذرات و تندترین کاهش به طور همزمان انجام شده است. نتایج بدست آمده نشان داده است که در فرآیند بهینه‌سازی توأمان، مقدار تابع هزینه به حدود نصف (تا حدود ۵۶٪ درصد) مقدار اولیه کاهش می‌یابد.

مهمترین ضعف پژوهش حاضر تحلیل حرکت راه رفتن روی یک مدل دو بعدی محدود به صفحه سجیتال است، در حالی که در واقعیت حرکات خارج از صفحه نقش قابل توجهی در بهبود مشخصه‌های سیکل راه رفتن

متر است. به همین دلیل، محدوده‌ای با تلورانس تقریبی $0/15$ متر برای یافتن مقدار بهینه این پارامتر در نظر گرفته شده است. از آنجایی که احتمال می‌رود با حدس اولیه برای ضرایب مسیر و بهینه کردن آن ضرایب، نقاط مینیمم محلی مشکل‌ساز شوند، در گام اول بهینه‌سازی، از روش ازدحام ذرات، به علت جستجو در کل فضا استفاده شده است. تعداد جمعیت اولیه ساخته شده برابر با سی عدد ذره بوده که بصورت رندوم در فضای مورد نظر پخش شده‌اند. این مرحله از بهینه‌سازی در سی سیکل انجام شده و در نهایت مقدار نهایی دو پارامتر A و H به عنوان مقادیر بهینه در گام اول بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند. در ادامه، با استفاده از روش تندترین کاهش، برای برآورده کردن قید رابطه (۷)، ضریب B نیز محاسبه می‌شود. تا به اینجا، برای منحنی ورودی، مسیری بهینه از نظر میزان مصرف انرژی با برآورده کردن قیود حاکم بر مسیر بدست آمده است. در مرحله بعد، برای این مسیر بهینه، منحنی کف پای بهینه با کمک گرفتن از روش تندترین کاهش محاسبه می‌شود. در نهایت، برای بهینه‌سازی مجدد مسیر، به علت صرفه‌جویی در زمان، از روش تندترین کاهش استفاده شده و ضرایب A و H بهینه محاسبه می‌شوند. برای برآورده کردن قید رابطه (۷) نیز از روش تندترین کاهش کمک گرفته می‌شود تا مقدار مناسبی برای ضریب B محاسبه شود. با تکرار سه مرحله آخر، مسیر و منحنی بهینه، که به ازای آن‌ها مقدار مصرف انرژی راه رونده دوپا، با برآورده کردن قیود مدنظر، به حداقل مقدار خود می‌رسد، بدست می‌آید.

۴- نتایج و بحث

همانطور که گفته شد، برای به حداقل رساندن مقدار مصرف انرژی با برآورده کردن قیود مدنظر در طول یک قدم، ضرایب مسیر حرکت مرکز جرم و منحنی کف پا با استفاده از دو روش ازدحام ذرات و تندترین کاهش در کنار هم، محاسبه شد. نتیجه مسیر بهینه در جدول ۴ و شکل ۶ آورده شده است؛ همچنین، نتیجه مربوط به منحنی کف پای بهینه در جدول ۵ و شکل ۷ آورده شده است:

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، مسیر آبی رنگ، مسیر بهینه‌ای است که با استفاده از روش ازدحام ذرات برای منحنی کف پای ورودی بدست آمده است. سپس با انجام بهینه‌سازی بر روی منحنی و مجدداً مسیر و تکرار آن، ضرایب منحنی و مسیر در هر مرحله به‌روزرسانی می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود، به ازای هر مرحله از بهینه‌سازی، برای کاهش مقدار مصرف انرژی، ارتفاع و موقعیت انتهای مسیر حرکت مرکز جرم افزایش

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	دامنه مسیر
B	دوره تناوب مسیر
C	جابجایی فاز مسیر
F	مقدار نیروی عکس‌العمل زمین، N
\bar{F}	مقدار نیروی عکس‌العمل زمین بر واحد وزن
g	شتاب گرانش زمین، m/s^2
G_1	قید اول حاکم بر مسیر، m
G_2	قید دوم حاکم بر مسیر
G_3	قید سوم حاکم بر مسیر، m/s
H	ارتفاع مسیر، m
m	جرم کل بدن، kg
Q	ضریب منحنی کف پا
q	معادله منحنی کف پا، m
r	طول پا، m
s	بردار متصل کننده محل تماس منحنی کف پا با زمین به مرکز جرم، m
V	سرعت مرکز جرم، m/s
W^+	مقدار انرژی مصرفی، J/N
X	بردار متغیرهای بهینه‌سازی
x_A	موقعیت افقی مچ پا، m
x_C	موقعیت افقی نقطه تماس منحنی کف پا با زمین، m
x_{C0}	موقعیت افقی نقطه تماس منحنی کف پا با زمین در لحظه اول، m
x_H	موقعیت افقی مرکز جرم، m
y_A	موقعیت عمودی مچ پا، m
y_H	موقعیت عمودی مرکز جرم، m

دارند. توسعه مدل استفاده شده به یک مدل جرم متمرکز سه بعدی ارزش نتایج را بهبود خواهد داد. به علاوه این پژوهش آمیخته به حدی از خطای ذاتی استفاده از مدل جرم متمرکز به جای جرم گسترده نیز است. با این حال، جایگزین کردن مدل جرم گسترده به جای جرم متمرکز افزایش شدید هزینه محاسباتی را به همراه خواهد داشت که اغلب در تقابل با بهبود اندک در دقت تحلیل کنار گذاشته می‌شود. یک ضعف دیگر، محدود کردن منحنی کف پا و نیز حرکت مرکز جرم به دسته‌ای از توابع با تعداد محدودی متغیر شناور است. توسعه دامنه جستجو به بهینه‌سازی روی مجموعه گسترده‌تر توابع، هزینه محاسباتی را به تناسب پیچیده‌تر شدن توابع، افزایش خواهد داد. این موضوع مستقل از روند طی شده در این پژوهش است و در پژوهش‌های آتی تقابل هزینه-فایده، حد پیچیدگی فرم توابع را تعیین خواهد کرد و نیازی به تغییر روند وجود ندارد. در مجموع فرآیند و نتایج ارائه شده در این پژوهش به عنوان ورودی بر بهینه‌سازی همزمان هندسه اندام و سیکل حرکت روی یک مدل ساده شده، مقدمه پژوهش‌های آتی در زمینه اثر هندسه اندام بر مشخصه‌های حرکتی و بطور خاص طراحی ابزارهای کمکی مانند ارتزها و ربات‌های پوشیدنی خواهد بود.

علائم یونانی

β_C	زاویه q با خط مرجع منحنی کف پا، rad
γ	زاویه بردار s با راستای قائم، rad
θ	زاویه پا با راستای قائم، rad

- [9] F. Asano, Z.-W. Luo, The effect of semicircular feet on energy dissipation by heel-strike in dynamic biped locomotion, in: *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, IEEE, 2007, pp. 3976-3981.
- [10] P.G. Adamczyk, S.H. Collins, A.D. Kuo, The advantages of a rolling foot in human walking, *J Exp Biol*, 209(Pt 20) (2006) 3953-3963.
- [11] M. Kwan, M. Hubbard, Optimal foot shape for a passive dynamic biped, *J Theor Biol*, 248(2) (2007) 331-339.
- [12] J. Li, Y. Tian, X. Huang, H. Chen, Foot shape for passive dynamic kneed biped robot, in: *Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2010 IEEE International Conference on*, IEEE, 2010, pp. 1281-1286.
- [13] M.H. F. Ghafouri, M. Jalili, Mechanical and energetic consequences of convex-curved sole in human walking with different patterns, *ICROM International Conference* (2017).
- [14] S. Fallah, N. Keshavarzi, M.H. Honarvar, Joint torques in biped gait following changes in leg length, in: *2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*, IEEE, 2016, pp. 554-559.
- [15] M.H. N. Shojaei, Kinematics, Kinetics, and Numerical Simulation of Walking with a 1-DoF Dynamic Boot with Passive Controller and Arbitrary Contact Surface, *Biomedical Engineering Conference* (2016).
- [16] J.M. Donelan, R. Kram, A.D. Kuo, Mechanical work for step-to-step transitions is a major determinant of the metabolic cost of human walking, *Journal of Experimental Biology*, 205(23) (2002) 3717-3727.
- [17] J.M. Donelan, R. Kram, A.D. Kuo, Simultaneous positive and negative external mechanical work in human walking, *Journal of biomechanics*, 35(1) (2002) 117-124.
- [18] P. Channon, S. Hopkins, D. Pham, Simulation and
- [1] J.R. C. Pongmala, C. Price, R. Baker, Is Foot Contact a Collision?, *Proceedings of Gait & Clinical Movement Analysis Society 2015 Annual Conference*, (2015).
- [2] M. Srinivasan, A. Ruina, Computer optimization of a minimal biped model discovers walking and running, *Nature*, 439(7072) (2006) 72.
- [3] M. Wisse, D.G. Hobbelen, R.J. Rotteveel, S.O. Anderson, G.J. Zeglin, Ankle springs instead of arc-shaped feet for passive dynamic walkers, in: *Humanoid Robots, 2006 6th IEEE-RAS International Conference on*, IEEE, 2006, pp. 110-116.
- [4] L. Humphrey, H. Hemami, A computational human model for exploring the role of the feet in balance, *Journal of biomechanics*, 43(16) (2010) 3199-3206.
- [5] S. Aoi, Y. Sato, K. Tsuchiya, Arc feet effects on stability based on a simple oscillator-driven walking model, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 20(5) (2008) 709.
- [6] K. Hyodo, T. Oshimura, S. Mikami, S.j. Suzuki, Stabilizing passive dynamic walk under wide range of environments by constraint mechanism fitted to sole of foot, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 21(3) (2009) 403.
- [7] S. Sadati, M. Borgheinejad, H. Fooladi, M. Naraghi, A. Ohadi, Optimum Design, Manufacturing and Experiment of a Passive Walking Biped: Effects of Structural Parameters on Efficiency, Stability and Robustness on Uneven Trains, in: *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, 2013, pp. 107-111.
- [8] P. Mahmoodi, R.S. Ransing, M.I. Friswell, Modelling the effect of 'heel to toe' roll-over contact on the walking dynamics of passive biped robots, *Applied Mathematical Modelling*, 37(12-13) (2013) 7352-7373.

- (2013) 105-115.
- [25] A.D. Kuo, J.M. Donelan, A. Ruina, Energetic consequences of walking like an inverted pendulum: step-to-step transitions, *Exercise and sport sciences reviews*, 33(2) (2005) 88-97.
- [26] T. McGeer, Passive walking with knees, in: *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 1990, pp. 1640-1645.
- [27] P.G. Adamczyk, A.D. Kuo, Mechanical and energetic consequences of rolling foot shape in human walking, *J Exp Biol*, 216(Pt 14) (2013) 2722-2731.
- [28] O. Darici, H. Temeltas, A.D. Kuo, Optimal regulation of bipedal walking speed despite an unexpected bump in the road, *PLoS One*, 13(9) (2018) e0204205.
- [29] P.G. Adamczyk, A.D. Kuo, Redirection of center-of-mass velocity during the step-to-step transition of human walking, *J Exp Biol*, 212(Pt 16) (2009) 2668-2678.
- [30] B.R. Whittington, D.G. Thelen, A simple mass-spring model with roller feet can induce the ground reactions observed in human walking, *J Biomech Eng*, 131(1) (2009) 011013.
- [31] W. Zijlstra, A.L. Hof, Displacement of the pelvis during human walking: experimental data and model predictions, *Gait & posture*, 6(3) (1997) 249-262.
- optimization of gait for a bipedal robot, *Mathematical and Computer Modelling*, 14 (1990) 463-467.
- [19] P. Channon, S. Hopkins, D. Pham, A variational approach to the optimization of gait for a bipedal robot, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 210(2) (1996) 177-186.
- [20] L. Roussel, C. Canudas-de-Wit, A. Goswami, Generation of energy optimal complete gait cycles for biped robots, in: *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, IEEE, 1998, pp. 2036-2041.
- [21] C. Chevallereau, Y. Aoustin, Optimal reference trajectories for walking and running of a biped robot, *Robotica*, 19(05) (2001).
- [22] G. Capi, S.-i. Kaneko, K. Mitobe, L. Barolli, Y. Nasu, Optimal trajectory generation for a prismatic joint biped robot using genetic algorithms, *Robotics and autonomous systems*, 38(2) (2002) 119-128.
- [23] S.H. Collins, *Dynamic Walking Principles Applied to Human Gait*, (2008).
- [24] N.T. Phuong, T.D. Huy, N.C. Cuong, H.D. Loc, A simple walking control method for biped robot with stable gait, *Journal of Computer Science and Cybernetics*, 29(2)