

Original Article

Designing and Modeling Shoes for Patients with Drop Foot Using Statistical and Ergonomic Analysis

Samaneh Taheri¹ , Karim Atashgar² , Mohammadreza Zamani^{2*} 

¹ Industrial Department, Industrial and Management Research Center, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

² Mechanic Department, Mechanic and Material Research Center, Malek Ashtar University, Tehran, Iran

Article History:

Received: April 19, 2026

Revised: August 13, 2026

Accepted: June 16, 2026

ePublished: September 22, 2026

*Corresponding author:

Mohammadreza Zamani,
Mechanic Department, Mechanic
and Material Research Center,
Malek Ashtar University, Tehran,
Iran

Email: a_mrzamani@mut.ac.ir

Abstract

Objectives: Foot drop is caused by neurological disorders and traumatic injuries and can impair gait pattern and increase energy expenditure during walking. The use of appropriate rehabilitation devices plays an important role in improving patients' motor performance. This study aimed to provide the design basis for a rehabilitation shoe intended to improve selected biomechanical parameters, including toe angle, muscle torque, and step length in patients with foot drop. The findings of this study are considered preliminary design evidence, and further studies with larger sample sizes are required before moving toward product development and manufacturing.

Methods: This study was a case-based biomechanical simulation investigation. The evaluated variables included toe angle, tibialis anterior muscle torque, and step length. These variables were extracted using musculoskeletal modeling in OpenSim software and finite element analysis in ABAQUS. The obtained data were compared across four simulation conditions: the designed shoe, the reference ankle-foot orthosis, the patient condition, and the healthy control. Data analysis was performed descriptively by evaluating and comparing biomechanical trend changes.

Results: The use of the designed shoe improved toe angle during the swing phase by approximately 80% compared with the patient condition. In addition, tibialis anterior muscle torque increased by approximately 85%, and step length also improved relative to the patient's condition. These findings indicate a relative improvement in gait-related biomechanical parameters in the proposed model.

Conclusion: The proposed design improved three key biomechanical parameters, including step length, tibialis anterior muscle torque, and toe angle. Furthermore, the case-based simulation and descriptive statistical findings suggested that the proposed model has the potential to effectively control the coordinated movement of the ankle and forefoot in individuals with foot drop.

Keywords: Ankle-foot orthosis, Biomechanics, Foot drop, Gait analysis, Rehabilitation

Extended Abstract

Background and Objective

Foot drop is a prevalent neuromuscular impairment resulting from various etiologies, including peripheral nerve injuries, stroke, neurological disorders, and spinal cord injuries, all of which significantly disrupt normal gait kinematics. This condition is primarily characterized by weakness in the tibialis anterior muscle, leading to a diminished capacity for ankle dorsiflexion during the swing phase. As a result, to mitigate toe drag, patients employ compensatory strategies, including steppage gait (exaggerated hip and knee flexion) or inward foot rotation. Prolonged reliance on these adaptations can result in chronic muscle fatigue, secondary musculoskeletal disorders, and an increased susceptibility to falls. Various therapeutic approaches exist for managing this condition, including physiotherapy, functional electrical stimulation, and ankle-foot orthoses (AFOs). Despite significant advancements, many conventional orthoses have rigid structures that restrict the natural range of motion of the ankle joint. Furthermore, common devices are often limited in terms of user comfort, compatibility with standard footwear, and customization potential. Accordingly, this study aimed to design and model an ergonomic rehabilitative shoe for patients with foot drop. In addition to establishing the design framework for such footwear, this research evaluates the impact of the proposed model on biomechanical parameters, including toe clearance angle, tibialis anterior torque, and step length.

Materials and Methods

This research employed a proof-of-concept approach utilizing biomechanical simulation and ergonomic analysis. The initial data used in this study were obtained from a 26-year-old female patient with foot drop secondary to Guillain-Barré syndrome. Anthropometric information, including lower-limb length and height, ankle and forefoot dimensions, and selected kinematic parameters, was used for modeling. First, a musculoskeletal model of the lower extremity was developed in OpenSim to extract movement patterns, joint angles, ground reaction forces, and muscle function throughout the gait cycle. Dynamic gait models were then used to simulate tibialis anterior behavior and ankle joint excursions. The simulated outcomes comprised dynamic changes in the toe clearance angle, foot-ground clearance, gait kinematics, and joint/muscle torque profiles. Subsequently, the proposed rehabilitative shoe was designed incorporating biomechanical and ergonomic principles. An internal elastic mechanism was integrated into the design to assist ankle dorsiflexion, thereby preventing foot drop while preserving the relative flexibility of the ankle joint. The shoe was engineered to allow for adjustable assistive force tailored to the severity of the patient's

impairment. Furthermore, key factors, such as optimal plantar pressure distribution, muscle fatigue reduction, user comfort, and compatibility with activities of daily living, were integrated into the design process. Following the conceptual design stage, a 3D model of the shoe was developed in ABAQUS software. The shoe components were modeled using material properties analogous to human soft tissues and the polymers commonly utilized in shoe outsoles. To evaluate the model's performance, four conditions were compared: the designed rehabilitative shoe, a conventional AFO, the unassisted pathological state of the foot drop patient, and a healthy control. The primary outcome measures included the ankle/toe dorsiflexion angle, tibialis anterior torque, and step length. Due to the limited sample size, data were analyzed descriptively.

Results

Simulation results indicated that the proposed rehabilitative shoe significantly enhanced the biomechanical performance of the patient's gait. The toe angle during the swing phase exhibited an approximate 80% improvement relative to the unassisted pathological state, closely approximating the normative values observed in the healthy individual. This finding indicated that the internal elastic mechanism was able to substantially control foot drop and maintain adequate toe clearance during walking. In addition, the results related to the tibialis anterior muscle torque showed that using the proposed shoe increased muscle performance by approximately 85% compared to the patient's condition. This finding indicates a reduced demand for compensatory muscle activity and improved neuromuscular coordination during gait. Analysis of step length also demonstrated that utilizing the designed shoe increased step length compared to the unassisted pathological condition, bringing the gait pattern closer to normative values. Compared to conventional orthoses, the proposed model provided greater flexibility during the gait cycle and imposed fewer motion constraints on the ankle joint. Furthermore, the finite element analysis (FEA) results revealed a more uniform plantar pressure distribution and a significant reduction in stress concentrations across sensitive areas of the foot. Additionally, the ergonomic design of the shoe enhanced user comfort and daily usability while fully maintaining its mechanical performance.

Discussion

5- The findings of this study demonstrated that the proposed rehabilitative shoe design, based on ergonomic and biomechanical principles, can significantly improve the gait parameters of patients with foot drop. Unlike many conventional orthoses that feature rigid structures and restrict the natural range of motion of the ankle joint in these patients, the

proposed model preserved relative joint flexibility while providing functional support through its internal elastic mechanism. Improvements in the toe clearance angle, step length, and tibialis anterior muscle performance underscore the positive impact of the proposed design framework on patient gait patterns. The proposed shoe design has the potential to reduce the risk of falls, lower the metabolic cost of walking, and enhance patients' functional independence. Furthermore, alongside its therapeutic efficacy, the proposed design integrates key ergonomic criteria, including comfort, optimal weight, and ease of use. Prioritizing these patient-centered features is crucial for improving patient compliance and promoting the sustained, long-term use of the rehabilitative device. A major methodological strength of the present study lies in the synergistic integration of musculoskeletal

modeling and FEA, which enabled a highly detailed and comprehensive evaluation of the biomechanical interactions within the foot-shoe system. Nevertheless, certain limitations must be acknowledged, primarily the single-subject design and the simulation-based nature of the study. Future studies should include clinical investigations and experimental testing in larger patient populations to provide a more comprehensive evaluation of the proposed model's performance.

Conclusion

Overall, the findings of this study suggest that the designed rehabilitative shoe can be proposed as an innovative and practical solution for improving motor function in patients with foot drop.

Please cite this article as follows: Taheri S, Atashgar K, Zamani M. Designing and Modeling Shoes for Patients with Drop Foot Using Statistical and Ergonomic Analysis. *Iran J Ergon.* 2026;14(2):111-120. DOI:10.53208/IJE.14.2.111

طراحی و مدل سازی کفش برای بیماران مبتلا به عارضه افتادگی پنجه پا، با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و ارگونومی

سمانه طاهری^۱ ID، کریم آتشگر^۲ ID، محمدرضا زمانی^۲ ID*

^۱ گروه مهندسی صنایع، دانشکده مدیریت و صنایع، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

^۲ گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

چکیده

اهداف: افتادگی پا ناشی از اختلالات سیستم عصبی و ... است که می تواند الگوی راه رفتن را مختل کند. استفاده از تجهیزات توان بخشی مناسب در بهبود عملکرد حرکتی این بیماران نقش مهمی دارد. هدف این پژوهش ارائه مبانی طراحی یک کفش توان بخشی برای بهبود برخی شاخص های بیومکانیکی، شامل زاویه پنجه، گشتاور عضلانی و طول گام در بیماران مبتلا به افتادگی پا بود. یافته های این پژوهش با هدف دستیابی به مبانی طراحی است و در مرحله بعد، با افزایش تعداد نمونه ها، باید وارد مرحله طراحی برای تولید شود.

روش کار: این پژوهش یک مطالعه موردی مبتنی بر شبیه سازی بیومکانیکی بود. متغیرهای مورد ارزیابی شامل زاویه پنجه پا، گشتاور عضله تیبیالیس قدامی و طول گام بودند. این متغیرها با استفاده از مدل سازی اسکلتی عضلانی در نرم افزار OpenSim و تحلیل اجزای محدود در محیط ABAQUS استخراج شدند. داده ها در چهار وضعیت شبیه سازی (کفش طراحی شده، ارتوز مرجع، بیمار و فرد سالم) مقایسه شدند. تحلیل داده ها به صورت توصیفی و براساس بررسی و مقایسه روند تغییرات شاخص های بیومکانیکی انجام شد.

یافته ها: نتایج نشان داد استفاده از کفش طراحی شده موجب بهبود حدود ۸۰ درصدی زاویه پنجه پا در فاز نوسان شد. همچنین، گشتاور عضله تیبیالیس قدامی حدود ۸۵ درصد افزایش یافت و طول گام نسبت به وضعیت بیمار بهبود نشان داد. این تغییرات بیانگر بهبود نسبی شاخص های بیومکانیکی مرتبط با راه رفتن است.

نتیجه گیری: این پژوهش سه شاخص کلیدی بیومکانیکی، شامل طول گام، گشتاور عضله تیبیالیس قدامی و زاویه پنجه پا را بهبود داد. همچنین، نتایج شبیه سازی موردی و نتایج آماری توصیفی نشان داد مدل پیشنهادی حرکت سیستماتیک و به هم تنیده مچ و پنجه پای بیماران افتادگی پنجه پا را به خوبی تحت کنترل درآورد.

کلید واژه ها: افتادگی پنجه پا، ارتوز مچ پا، بیومکانیک، تحلیل راه رفتن، توان بخشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰

تاریخ داوری مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۵/۲۲

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۵/۰۶/۳۱

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

* نویسنده مسئول: محمدرضا زمانی، گروه مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

ایمیل: a_mrzamani@mut.ac.ir

استناد: طاهری، سمانه؛ آتشگر، کریم؛ زمانی، محمدرضا. طراحی و مدل سازی کفش برای بیماران مبتلا به عارضه افتادگی پنجه پا، با استفاده از تجزیه و تحلیل آماری و

ارگونومی. مجله ارگونومی، تابستان ۱۴۰۵ (۲): ۱۲۰-۱۱۱

مقدمه

قدامی در امتداد پا منجر می شود. سالانه، پانزده میلیون نفر در سراسر جهان از سکتة مغزی رنج می برند که یکی از عارضه های شناختی آن، افتادگی پاست [۲]. همچنین، مطالعات نشان می دهند که افتادگی پنجه پا یکی از عوارض شایع در بیماران مبتلا به اختلالات عصبی عضلانی است. برای مثال، در بیماران مبتلا به سکتة مغزی، شیوع این عارضه بین ۲۰ تا ۳۰ درصد گزارش شده است. همچنین،

راه رفتن یکی از مهم ترین فعالیت های روزانه انسان است. هر فرد سالمی پیاده روی منحصر به فردی دارد. پیاده روی مجموعه فعالیت هماهنگی است که شامل فعالیت های مغز، نخاع، عضلات، اعصاب محیطی، استخوان ها و مفاصل (لگن، زانو و مچ پا) می شود [۱]. افتادگی پنجه پا مشکلی شایع در بین بیماران مبتلا به بیماری های نورون حرکتی تحتانی است که معمولاً به ضعف عضلات تیبیالیس

توان بخشی باید علاوه بر عملکرد مکانیکی، با اصول ارگونومی و بیومکانیک انسان نیز هماهنگ باشد.

همچنین پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد طراحی ارتوزهای مچ پا (AFO) به سمت سیستم‌های شخصی سازی شده، دینامیک و مبتنی بر حسگر حرکت کرده است. همچنین، مشخص شده است که تنظیم دامنه دورسی فلکشن و سختی فنر در این ارتوزها می‌تواند کینماتیک اندام تحتانی و عملکرد راه رفتن را در بیماران مبتلا به اختلالات عصب عضلانی بهبود دهد [۱۰]. علاوه بر این، پژوهش‌های حوزه کفش‌های درمانی نشان داده‌اند که طراحی مناسب کفش و تجهیزات کمکی می‌تواند توزیع فشار کف پا و کینماتیک اندام تحتانی را بهبود دهد و در پیشگیری از اختلالات راه رفتن نقش مهمی ایفا کند [۱۱].

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در طراحی ارتوزهای مچ پا و تجهیزات توان بخشی، مطالعات نشان می‌دهند بسیاری از این وسایل همچنان با محدودیت‌هایی همراه هستند. ارتوزهای سنتی معمولاً ساختار صلب دارند که می‌تواند دامنه حرکتی طبیعی مفصل مچ پا را محدود کند و به الگوی غیرطبیعی راه رفتن منجر شود. از سوی دیگر، اگرچه برخی طراحی‌های جدید عملکرد بیومکانیکی را بهبود داده‌اند، در زمینه راحتی، سازگاری با کفش‌های روزمره و پذیرش توسط کاربران با چالش‌هایی مواجه هستند. همچنین، در بسیاری از موارد، امکان تطبیق طراحی با تفاوت‌های فردی بیماران به صورت محدود در نظر گرفته شده است. بر این اساس، خلأیی پژوهشی در توسعه راهکارهایی مشاهده می‌شود که بتوانند به صورت هم‌زمان، بهبود بیومکانیکی، انعطاف پذیری عملکردی و ملاحظات ارگونومیک را در قالب سیستم پوشیدنی یکپارچه فراهم کنند. پژوهش حاضر با هدف پاسخ به این خلأ، به طراحی و مدل سازی نوعی کفش توان بخشی با رویکردی ترکیبی از بیومکانیک و عوامل انسانی پرداخته است. درحالی که بسیاری از مطالعات بر ارتوزهای مجزا تمرکز داشته‌اند، طراحی یکپارچه کفش توان بخشی با مکانیزم کمکی هنوز کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

هدف اصلی این تحقیق ارائه طراحی محصول نوآورانه‌ای است که شامل موارد ذیل باشد: ۱. استفاده از مکانیزم کشسان داخلی برای کمک به دورسی فلکشن در فاز نوسان راه رفتن؛ ۲. حفظ انعطاف پذیری کنترل شده مفصل مچ پا در مقایسه با ارتوزهای صلب؛ ۳. امکان تنظیم نسبی میزان نیروی کمکی متناسب با شدت عارضه؛ ۴. ادغام سیستم کمکی در ساختار کفش به منظور افزایش راحتی و پذیرش کاربر. این ترکیب از ویژگی‌ها، طراحی پیشنهادی را از رویکردهای متداول متمایز می‌کند و بهبودی قابل توجه در زندگی بیماران مبتلا به افتادگی پنجه پا می‌دهد و به آن‌ها کمک کند تا از زمین خوردن جلوگیری کنند. این طراحی به طور هم‌زمان با ارائه عملکرد و کارایی مؤثر، ظاهری جذاب و جلب کننده دارد تا بیماران را به استفاده از آن ترغیب و روحیه و اعتماد به نفس آن‌ها را تقویت کند.

در بیماران مبتلا به مولتیپل اسکلروزیس و آسیب‌های نخاعی، اختلال در دورسی فلکشن (dorsiflexion) مچ پا یکی از مشکلات رایج در الگوی راه رفتن محسوب می‌شود. این میزان شیوع قابل توجه، اهمیت توسعه راهکارهای مؤثر توان بخشی را دوچندان می‌کند.

دلایل دیگر ابتلا به این عارضه شامل طیف وسیعی از نوروپاتی‌ها، سندرم‌های محبوس شدن عصب پروئثال و بیماری‌های نورون حرکتی است. سندرم گیلن باره نیز به عنوان یکی از این علل می‌تواند به ضعف عضلات دورسی فلکسور و بروز افتادگی پنجه منجر شود. با این حال، تمرکز این پژوهش بر تحلیل بیومکانیکی این عارضه، مستقل از علت زمینه‌ای آن است. این عارضه به دلیل ضعف عضلانی، هماهنگی راه رفتن را مختل می‌کند و به افتادگی پا منجر می‌شود [۳]. افتادگی پنجه پا معمولاً به عنوان ضعف دورسی فلکشن مچ پا توصیف می‌شود و غالباً با ضعف کشیدگی انگشتان پا و انحراف پا همراه است. تحقیقات نشان می‌دهد که ضایعات سیستم عصبی مرکزی نیز باعث افتادگی پنجه پا می‌شود [۴]. در صورت اختلال موقت یا دائمی در ناحیه سیستم حرکتی، بدن انسان توانایی استفاده از سازوکارهای جبرانی را دارد [۵]، اما می‌تواند زندگی روزمره بیماران را تحت تأثیر قرار دهد و به مشکلات جدی، از جمله آسیب‌های جسمی، منجر شود.

بیماران مبتلا به افتادگی پا برای جلوگیری از گیرکردن پنجه پا روی زمین، دچار هایپر فلکشن جبرانی در مفاصل ران و زانو و همچنین چرخش داخلی پا هنگام راه رفتن می‌شوند. این عدم تعادل عضلانی می‌تواند موجب کشیدگی تاندون‌های بالابرنده کف پا و کوتاه شدن تاندون آشیل شود [۶]. در بلندمدت نیز این الگوی راه رفتن ممکن است به خمیدگی و انحرافات ستون فقرات منجر شود. بنابراین، پیشگیری از این آسیب‌ها یکی از اهداف اصلی در فرایند درمان این بیماران است.

درمان‌ها شامل دارو، جراحی، ارائه ارتوز، فیزیوتراپی و استفاده از تجهیزات توان بخشی است [۷]. مطالعات انجام شده نشان داد که ربات ارتوز (Robotic Ankle Foot Orthoses) تحریک الکتریکی عملکردی (FES) بهبود قابل توجهی در چرخه راه رفتن بیماران داشته‌اند [۸]. با این حال، تجهیزات پزشکی موجود ممکن است با محدودیت‌هایی مواجه شوند که به کفایت نداشتن و تأمین نشدن نیازهای بیماران منجر شوند. برخی از محدودیت‌های مرتبط با تجهیزات پزشکی عبارت‌اند از: وسایل جانبی اضافی، افزایش اندازه پا و مشکلات انتخاب کفش مناسب [۹].

مطالعات نشان می‌دهد که ارتوزهای مچ پا به سمت طراحی‌های سبک، تطبیق پذیر و هوشمند حرکت کرده‌اند. ارتوزهای فعال مبتنی بر فنر یا محرک‌های کمکی می‌توانند در فاز نوسان چرخه راه رفتن، دورسی فلکشن مچ پا را بهبود و خطر گیرکردن پنجه پا را کاهش دهند. همچنین، استفاده از حسگرهای فشار کف پا و واحدهای اندازه گیری اینرسی برای پایش الگوی راه رفتن و شخصی سازی توان بخشی مورد توجه قرار گرفته است. در نتیجه، طراحی تجهیزات

روش کار

نوع پژوهش

این مطالعه از نوع تحلیلی - شبیه سازی با رویکرد مهندسی عوامل انسانی و بیومکانیک بود. هدف آن بررسی کارایی نوعی کفش توان بخشی طراحی شده برای بیماران مبتلا به افتادگی پنجه پا از طریق مدل سازی سه بعدی و تحلیل های آماری بود.

نمونه و جمع آوری داده ها

این پژوهش نوعی مطالعه شبیه سازی اثبات مفهوم (proof-of-concept simulation study) است که به صورت موردی و با استفاده از داده های محدود انجام شده و هدف آن بررسی اولیه عملکرد طراحی در محیط شبیه سازی بوده است. به منظور مدل سازی دقیق، اطلاعات آناتومیک دو خانم ۲۶ و ۲۳ ساله، که به ترتیب به مدت ۱۵ و ۱۳ سال با عارضه افتادگی پنجه پا ناشی از سندرم گیلن باره زندگی می کردند، گردآوری شد. داده های مورد استفاده شامل طول و جرم ران و ساق، ابعاد مچ و پنجه پا، جرم تنه فوقانی، ارتفاع اندام تحتانی و مقادیر استاندارد شتاب گرانش می شد. این داده ها به عنوان ورودی مدل بیومکانیکی در نرم افزارهای شبیه سازی استفاده شد.

طراحی و شبیه سازی بیومکانیکی

۱. ساخت مدل پایه: مدل حرکتی اندام تحتانی در نرم افزار Open Sim ایجاد شد تا متغیرهای سینماتیکی (زاویه مفاصل) و سینتیکی (گشتاور عضلات، نیروهای عکس العمل زمین) استخراج شوند.

۲. تحلیل دینامیکی: در این مطالعه با استفاده از روابط دینامیکی براساس مدل های استاندارد بیومکانیکی، راه رفتن و اصول دینامیک، که برای اجسام صلب استخراج شده اند [۱۲، ۱۳]، معادلات دینامیکی حرکت و داده های واقعی فرد بیمار، چرخه راه رفتن بازسازی شد. در این مرحله، عملکرد عضلات تیپالیس قدامی و حرکات مفصل مچ و پنجه به صورت دقیق شبیه سازی شد.

۳. طراحی ارگونومیک کفش توان بخشی: در طراحی کفش توان بخشی، اصول ارگونومی و مهندسی عوامل انسانی به عنوان چهارچوب اصلی مدنظر قرار گرفت. هدف طراحی، جبران ضعف عضله تیپالیس قدامی در فاز نوسان چرخه راه رفتن و جلوگیری از افتادگی پنجه بود، در حالی که حرکت طبیعی مفاصل اندام تحتانی حفظ شود. معیارهای ارگونومیک مورد توجه در طراحی شامل موارد ذیل بود:

- سازگاری آنترپومتریک: ابعاد کفی و ساختار کفش براساس اندازه های آناتومیک اندام تحتانی فرد مورد مطالعه تنظیم شد تا تطابق کامل با پا برقرار شود. علاوه بر این، طراحی کفش به گونه ای انجام شد که قابلیت تطبیق با تفاوت های فردی بیماران را داشته باشد. در این مطالعه، پارامترهایی مانند محیط مچ پا، طول پنجه، دامنه حرکتی مچ و شدت افتادگی پنجه به عنوان متغیرهای مؤثر در طراحی در نظر گرفته شدند. مکانیزم کشسان داخلی

به صورت قابل تنظیم تعریف شد تا بسته به شدت ضعف عضله تیپالیس قدامی، میزان نیروی کمکی تغییر یابد. این ویژگی امکان شخصی سازی نسبی طراحی را برای بیماران با شدت های متفاوت عارضه فراهم می کند.

- بهبود زاویه: دورسی فلکشن طراحی مکانیزم کشسان داخلی به گونه ای انجام شد که در فاز نوسان، پنجه پا به سمت ساق هدایت و فاصله مناسب پنجه از سطح زمین ایجاد شود.
- کاهش خستگی عضلانی: با کاهش نیاز به فعالیت بیشینه عضله تیپالیس، تلاش شد مصرف انرژی عضلانی کاهش یابد و از خستگی زودرس جلوگیری شود.
- حفظ الگوی طبیعی راه رفتن: برخلاف ارتوزهای سخت AFO، که حرکت مچ پا را محدود می کنند، در این طراحی انعطاف پذیری کنترل شده در مفصل مچ حفظ شد.
- توزیع مناسب فشار کف پا: ساختار کفی به گونه ای مدل سازی شد که نیروهای وارده در طول چرخه گام به صورت یکنواخت توزیع شوند و از تمرکز تنش در نواحی قدامی پا جلوگیری شود.
- بر این اساس، مدل سه بعدی کفش با در نظر گرفتن رفتار مکانیکی مواد و شرایط بارگذاری دینامیکی چرخه راه رفتن در محیط ABAQUS ایجاد شد.

۴. طراحی کفش توان بخشی: مدل سه بعدی کفش در نرم افزار ABAQUS ساخته شد. در مدل اجزای محدود، مواد بخش های مختلف کفش و پا براساس خواص مکانیکی گزارش شده در مطالعات پیشین تعریف شدند. برای بافت نرم پا، رفتار الاستیک همسان گرد با مدول یانگ تقریبی ۰/۱۵ تا ۰/۳۰ MPa و ضریب پواسون ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. برای ساختار کفی کفش، ماده پلیمری با مدول الاستیسیته ۱۲-۵ MPa تعریف شد. شرایط مرزی شامل ثابت شدن ناحیه پاشنه در تماس با سطح زمین و اعمال نیروهای دینامیکی چرخه راه رفتن بود. تماس بین کف پا و کفی کفش به صورت contact frictional با ضریب اصطکاک ۰/۵ مدل سازی شد. بارگذاری ها براساس داده های نیروهای واکنش زمین و الگوی راه رفتن استخراج شده از OpenSim اعمال شدند. برای اطمینان از پایداری مدل، تحلیل حساسیت درباره تغییر خواص مواد و شرایط تماس انجام شد تا اثر تغییر پارامترها در خروجی های سینماتیکی بررسی شود.

در این مدل، بافت های نرم و استخوانی پا به صورت همسان گرد و براساس مقادیر الاستیسیته و ضریب پواسون استخراج شده از مطالعات پیشین تعریف شد. سپس بارگذاری دینامیکی مطابق شرایط راه رفتن به مدل اعمال شد. در کنار ملاحظات بیومکانیکی، عوامل ارگونومیک و کاربرمحور نیز در طراحی کفش مورد توجه قرار گرفتند. از جمله این موارد می توان به کاهش وزن کلی کفش، استفاده از ساختارهایی برای بهبود تهویه، طراحی مناسب برای سهولت پوشیدن و درآوردن و در نظر گرفتن شکل ظاهری قابل قبول برای کاربران اشاره کرد. همچنین، تلاش شده است اجزای داخلی به گونه ای طراحی شوند که

(AFO)، ۳. گروه بیماران مبتلا به افتادگی پنجه (DF)، ۴. گروه افراد سالم (C).

تحلیل آماری

داده‌های خروجی Open Sim به نرم‌افزار SPSS منتقل شد. با توجه به ماهیت مطالعه حاضر و محدود بودن نمونه‌ها، تحلیل داده‌ها به صورت توصیفی انجام شد. شاخص‌های بیومکانیکی استخراج شده از شبیه‌سازی شامل طول گام، زاویه پنجه و گشتاور عضله تیبالیس قدامی در چهار وضعیت مقایسه شدند. مقایسه‌ها براساس روند تغییرات، میانگین نسبی و تحلیل نموداری انجام گرفت و از آزمون‌های استنباطی استفاده نشد. با وجود این، طراحی حاضر مبتنی بر داده‌های یک بیمار بوده است و هنوز قابلیت تعمیم کامل به همه بیماران را ندارد. بررسی گسترده‌تر روی گروه‌های متنوع با ویژگی‌های آنترپومتریک متفاوت، می‌تواند به توسعه نسخه‌های شخصی‌سازی شده‌تر کمک کند.

یافته‌ها

خروجی فاز اول شبیه‌سازی

با وارد کردن تمامی کدها در نرم‌افزار OpenSim، خروجی شبیه‌سازی به صورت نمودار و شکل به دست آمد. سپس این خروجی‌ها با استفاده از تحلیل نموداری در نرم‌افزار پایتون بررسی و به صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شد. هدف از این تحلیل، شناسایی ضعف‌های بیماران در مقایسه با افراد سالم و کمک به طراحی وسیله‌ای برای رفع نیازهای حرکتی آن‌ها بود.

شبیه‌سازی رگرسیون عضلات پا و حرکات راه رفتن

برای طراحی مدل کفش توان بخشی از تحلیل رگرسیون بین عضلات پا و الگوی راه رفتن و همچنین بررسی همبستگی بین زوایای زانو و ران استفاده شد. این تحلیل‌ها با کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی OpenSim انجام گرفت و نتایج آن در طراحی مدل لحاظ شد.

حداقل فشار موضعی به پا وارد و راحتی نسبی در استفاده طولانی مدت فراهم شود. طراحی کفش پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمای کلی کفش

۵. اعتبارسنجی مدل: به منظور ارزیابی دقت مدل شبیه‌سازی، نتایج تحلیل اجزای محدود با داده‌های بیومکانیکی حاصل از شبیه‌سازی اسکلتی - عضلانی در OpenSim مقایسه شد. متغیر مورد بررسی زاویه مفصل مچ پا در صفحه سائیتال و تغییرات آن در طول چرخه راه رفتن بود. نتایج نشان داد که روند تغییرات زاویه مچ پا در دو مدل هم‌خوانی قابل قبولی دارد و مدل عددی قادر است رفتار بیومکانیکی سیستم کفش - پا را با دقت مناسبی بازنمایی کند. بنابراین، این مدل می‌تواند در تحلیل و طراحی کفش توان بخشی استفاده شود. همچنین، اعتبارسنجی در این مطالعه در سطح عددی انجام شده است و در مطالعات آینده می‌توان آن را با داده‌های آزمایشگاهی راه رفتن تکمیل کرد.

۶. متغیرهای پژوهش: سه متغیر وابسته به عنوان شاخص‌های اصلی عملکرد انتخاب شدند: زاویه پنجه پا (dorsiflexion angle) در فاز نوسان گام، گشتاور عضله تیبالیس قدامی (anterior tibialis torque)، طول گام (stride length).

گروه‌های مقایسه‌ای

مدل و داده‌های شبیه‌سازی در چهار وضعیت آزمایش شدند: ۱. کفش توان بخشی طراحی شده (AAFO)، ۲. ارتوز مچ - پنجه رایج

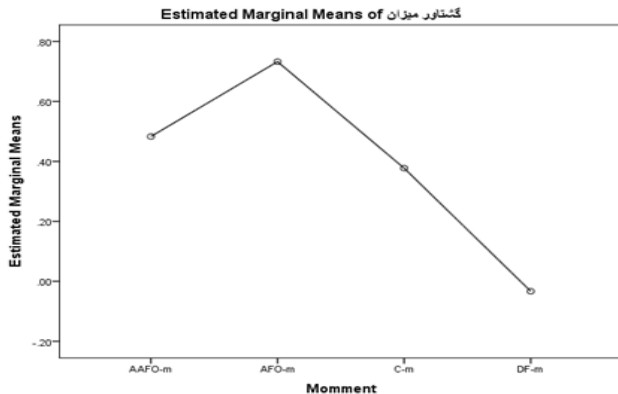
جدول ۱. ویژگی‌های آنترپومتریک عمومی شرکت کنندگان برحسب جنس

نوع شبیه‌سازی	نمودار مورد توجه در شبیه‌سازی	خروجی فرد سالم	خروجی فرد بیمار
شبیه‌سازی حرکت راه رفتن	نمودار حرکت راه رفتن	حرکت فرد سالم در ثانیه ۱۱. نمودار حرکت پنجه به سمت ساق در بازه مثبت است.	فرد بیمار در ثانیه ۱۱ با افتادگی شدید. نمودار حرکت پنجه به سمت ساق را در بازه منفی نشان می‌دهد.
شبیه‌سازی زاویه پا در هنگام راه رفتن	نمودار زاویه پا	فرد سالم زاویه تند در جهت ساق پا و پنجه پا دارد.	در فرد بیمار روند زوایا با یکدیگر هم‌جهت هستند که نشان‌دهنده دور شدن پنجه از ساق و افتادگی پا است.
شبیه‌سازی ارتفاع پا تا سطح زمین در هنگام راه رفتن	نمودار ارتفاع پا تا سطح زمین	فرد سالم ارتفاع پاشنه تا سطح زمین ۰/۱ متر و ارتفاع پنجه در بالاترین مقدار خود ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ و ارتفاع پنجه نیز در ۰/۲۵ متر یعنی ۰/۴ است که گویای مرحله پلانتر فلکشن است.	بیمار مبتلا به افتادگی پا با ارتفاع پاشنه در بازه ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ و ارتفاع پنجه نیز در ۰/۲۵ متر قرار دارد.

شبیه‌سازی حرکت
راه‌رفتن

نمودار حرکت راه‌رفتن

حرکت فرد سالم در ثانیه ۱۱، نمودار حرکت
پنجه به سمت ساق در بازه مثبت است.
حرکت پنجه به سمت ساق را در بازه منفی
نشان می‌دهد.



نمودار ۲. میزان گشتاوری در گروه‌های مورد بررسی

در جدول ۲، نتایج تحلیل توصیفی آماری بیان شده است که براساس نمودارهای ۱ و ۲ و نتایج آماری گروه مورد آزمایش، نتایجی نزدیک به گروه افراد سالم داشتند.

جدول ۱. جدول توصیفی آماری

طول گام	گشتاور عضله	زاویه پنجه	وضعیت
کوتاه	کم	پایین	DF
متوسط	متوسط	متوسط	AFO
نزدیک به سالم	نزدیک به سالم	نزدیک به نرمال	AAFO
طبیعی	طبیعی	طبیعی	C

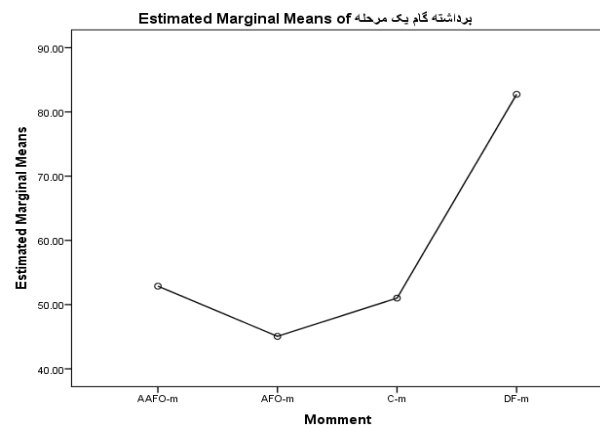
بحث

زمین‌خوردن بیماران در جمعیت افراد مسن بسیار بیشتر رخ می‌دهد. در یک مطالعه اپیدمی با حجم نمونه زیاد، نشان داده شده است که ۱۵/۹ درصد افراد مسن در زمان مشخص سه‌ماهه دچار زمین‌خوردگی می‌شوند. زمین‌خوردن می‌تواند به درد، آسیب یا شکستگی منجر شود که می‌تواند با افزایش کمک‌گرفتن از دیگران، ترس از افتادن و کاهش فعالیت روزمره همراه شود. همچنین هزینه‌های ناشی از درمان آسیب زمین‌خوردن، شکستگی، از دست‌دادن درآمد و افزایش نیازهای مراقبت بسیار زیاد است [۱۴]. زمین‌خوردن بیماران مبتلا به عارضه افتادگی پنجه پا به دلیل هم‌بستگی بین زوایای زانو و ران است.

نتایج شبیه‌سازی نشان داد کفش توان‌بخشی طراحی شده قابلیت بهبود شاخص‌های بیومکانیکی، از جمله زاویه پنجه پا در فاز نوسان

مقایسه توصیفی شاخص‌های بیومکانیکی نشان داد که در شرایط استفاده از کفش طراحی شده، زاویه پنجه در مقایسه با گروه بیمار به وضعیت نزدیک‌تری به افراد سالم رسید. همچنین، روند تغییرات گشتاور عضله تیبیالیس قدامی نشان داد که عملکرد کفش پیشنهادی موجب کاهش نیاز به فعالیت جبرانی عضلات در فاز نوسان راه‌رفتن می‌شود. طول گام نیز در مدل کفش طراحی شده در مقایسه با گروه بیمار افزایش نسبی داشت و به الگوی افراد سالم نزدیک‌تر شد. با توجه به محدود بودن تعداد نمونه‌ها، این نتایج صرفاً به‌عنوان شواهد اولیه و proof-of-concept در نظر گرفته می‌شوند.

نتایج حاصل از نمودار ۱ نشان داد طول گام در گروه آزمایشی به مقادیر نزدیک به گروه افراد سالم رسیده است و در مقایسه با گروه AFO، با الگوی طبیعی راه‌رفتن اختلاف کمتری دارد. ساختار صلب ارتوز AFO با کاهش انعطاف‌پذیری در فاز گام‌برداری، موجب محدودیت نسبی در طول گام شد. در مقابل، بیماران مبتلا به افتادگی پنجه پا به دلیل الگوی حرکتی غیرطبیعی، کاهش قابل توجهی در طول گام داشتند که می‌تواند با افزایش مصرف انرژی و فشار بیشتر بر سیستم اسکلتی - عضلانی همراه باشد. بنابراین، نتایج نشان داد عملکرد گروه آزمایشی در مقایسه با گروه AFO به الگوی راه‌رفتن افراد سالم نزدیک‌تر است.



نمودار ۱. نمودار یک مرحله طول گام برداشته در گروه‌های مورد بررسی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نمودار ۲، گروه مورد آزمایش در یک مرحله گام برداشته شده میزان گشتاوری نزدیک به نتیجه گروه افراد سالم داشته است و با اختلاف کمی، گروه AFO در مقایسه با گروه افراد سالم، میزان گشتاوری بیشتری را تجربه می‌کند که به دلیل منعطف نبودن AFO، چنین نتایجی انتظار می‌رود.

در سال‌های اخیر، استفاده از مدل‌سازی اسکلتی - عضلانی و تحلیل اجزای محدود به‌عنوان ابزارهای معتبر ارزیابی عملکرد وسایل ارتوزی افزایش یافته است و این روش‌ها امکان پیش‌بینی آثار بیومکانیکی و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی را فراهم می‌کنند [۱۵]. همچنین، مطالعات نشان داده‌اند ترکیب شبیه‌سازی اسکلتی - عضلانی با تحلیل بیومکانیکی می‌تواند در تعیین ویژگی‌های بهینه ارتوز، مانند سختی فنر و زمان‌بندی مکانیزم کمکی، و کاهش هزینه متابولیک راه‌رفتن مؤثر باشد [۱۶]. با این حال، محدود بودن تعداد نمونه‌ها از محدودیت‌های اصلی این پژوهش است و نتایج باید به‌عنوان شواهد اولیه تفسیر شوند. بررسی عملکرد طراحی در جمعیت‌های بزرگ‌تر و شرایط واقعی راه‌رفتن برای اعتبارسنجی بیشتر ضروری است.

بنابراین، نوآوری اصلی این پژوهش نه‌تنها در بهبود عملکرد بیومکانیکی، بلکه در ترکیب هم‌زمان سادگی مکانیکی، قابلیت استفاده روزمره و ملاحظات ارگونومیکی در قالب یک سیستم یکپارچه است. همچنین، یکی از نقاط قوت طراحی حاضر، تلاش برای ترکیب ارگونومی، بیومکانیک و مدل‌سازی عددی در قالب نوعی سیستم پوشیدنی توان‌بخشی است. علاوه بر عملکرد بیومکانیکی، پذیرش نوعی وسیله توان‌بخشی تا حد زیادی به تجربه کاربر وابسته است. عواملی مانند راحتی، وزن، تهویه مناسب و سهولت استفاده می‌توانند در استفاده مستمر بیماران نقش مهمی ایفا کنند. در این زمینه، طراحی یکپارچه کفش پیشنهادی در مقایسه با ارتوزهای جداگانه، می‌تواند از نظر راحتی و سازگاری با فعالیت‌های روزمره مزیت داشته باشد. با این حال، ارزیابی دقیق این مؤلفه‌ها نیازمند مطالعات کاربرمحور و آزمون‌های تجربی در شرایط واقعی است که در پژوهش‌های آتی باید مورد توجه قرار گیرد. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که طراحی‌های مبتنی بر انعطاف‌پذیری کنترل‌شده می‌توانند جایگزین مناسبی برای رویکردهای صلب در ارتوزهای سنتی باشند.

نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه، نتایج مطالعه حاضر نشان داد کفش توان‌بخشی پیشنهادی می‌تواند به‌عنوان راهکار اولیه برای بهبود برخی شاخص‌های بیومکانیکی مرتبط با افتادگی پنجه مطرح شود. با توجه به ماهیت شبیه‌سازی و محدود بودن تعداد نمونه‌ها، یافته‌ها باید به‌عنوان شواهد مقدماتی در نظر گرفته شوند. بررسی بالینی و آزمایشگاهی در نمونه‌های بزرگ‌تر برای تأیید عملکرد طراحی ضروری است.

مرتبط با افتادگی پنجه و افزایش طول گام را دارد که ناشی از عملکرد مکانیزم کشسان در کمک به دورسی‌فلکشن در هنگام راه‌رفتن است. علاوه بر این، بهبود طول گام می‌تواند به کاهش مصرف انرژی و افزایش پایداری در راه‌رفتن کمک کند. لذا، این یافته‌ها به‌عنوان شواهد اولیه قابل تفسیر هستند و برای نتیجه‌گیری قطعی به ارزیابی در جمعیت بزرگ‌تر نیاز است.

همچنین، گروه بیماران به‌دلیل ضعف در عضله تیبیالیس و ناتوانی در حرکت صحیح پنجه پا، با اختلاف بسیار زیادی در مقایسه با گروه‌های دیگر، میزان کمتری از گشتاوری را تجربه می‌کنند. بنابراین، در این مرحله نیز گشتاوری وسیله طراحی‌شده با گروه افراد سالم تقریباً نزدیک است. در نتیجه، گشتاور عضله تیبیالیس قدامی به سطح نزدیک به افراد سالم رسید و زاویه پنجه پا به وضعیت طبیعی نزدیک‌تر شد.

یافته‌ها بیانگر آن بود که کفش طراحی‌شده در مقایسه با ارتوز رایج مچ پا (AFO) نیز برتری دارد. درحالی‌که ارتوزهای مرسوم، به‌دلیل ساختار محدودکننده، انعطاف‌پذیری لازم را برای حرکت طبیعی ندارند، کفش پیشنهادی توانست با طراحی ارگونومیک، زاویه پنجه و طول گام را به مقادیر افراد سالم نزدیک کند. گزارش‌های پیشین شامل محدودیت‌های ارتوزهای کلاسیک از جمله ساختار نسبتاً صلب و در نتیجه، محدود شدن دامنه حرکتی طبیعی مفصل مچ پا، تطابق نامناسب با تفاوت‌های فردی بیماران و ارائه نیروی کمکی غیرقابل تنظیم است. علاوه بر این، مشکلاتی نظیر کاهش راحتی، افزایش حجم اندام، دشواری در استفاده هم‌زمان با کفش‌های روزمره و کاهش پذیرش توسط کاربران نیز گزارش شده است. همچنین، بسیاری از این ارتوزها قادر به تطبیق عملکرد خود با فازهای مختلف چرخه راه‌رفتن نیستند و عملکردی یکنواخت ارائه می‌دهند. بنابراین، طراحی این کفش توان‌بخشی برخی از محدودیت‌های تعریف‌شده از ارتوزهای کلاسیک را برطرف می‌کند.

در مقایسه با رویکردهای موجود، طراحی پیشنهادی این پژوهش تلاش کرده است با استفاده از مکانیزم کشسان و بدون نیاز به سیستم‌های پیچیده یا موتوردار، به بهبود دورسی‌فلکشن کمک کند. همچنین، ادغام این مکانیزم در ساختار کفش می‌تواند در مقایسه با ارتوزهای جداگانه، از نظر راحتی، پذیرش کاربر و استفاده روزمره مزیت داشته باشد. نتایج نشان داد کمینه‌شدن زاویه پنجه در گروه AAFO هم‌زمان با بیشینه‌شدن نیروی عضلانی رخ می‌دهد که این موضوع با کاهش بازوی گشتاور نیرو و کاهش نیاز به فعالیت بیشینه عضلات همراه بود و می‌تواند نشان‌دهنده کاهش مصرف انرژی و افزایش کارایی حرکتی بیماران باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان بدین وسیله از تمامی افرادی که در جمع‌آوری داده‌ها و اجرای این پژوهش همکاری داشتند، قدردانی می‌کنند.

تضاد منافع

نویسندگان اظهار می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، شخصی یا سازمانی در ارتباط با موضوع این مقاله وجود ندارد.

مشارکت‌های نویسندگان

سمانه طاهری، محمدرضا زمانی و کریم آتشگر: مفهوم‌سازی؛ مدیریت داده‌ها؛ تحقیق؛ روش‌شناسی؛ نرم‌افزار؛ تحلیل؛ اعتبارسنجی؛

ملاحظات اخلاقی

در این پژوهش از داده‌های دو بیمار واقعی استفاده شد که پیش از شروع مطالعه، رضایت آگاهانه کتبی از آن‌ها گرفته شد. اطلاعات فردی بیمار محرمانه باقی ماند و داده‌ها صرفاً در جهت اهداف پژوهشی و علمی استفاده شد.

حمایت مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی از سازمان‌ها و مؤسسات پژوهشی، دولتی یا خصوصی دریافت نکرده است.

REFERENCES

- Kubasad PR, Todeti SR, Kamat YD. A review on designs of various Ankle Foot Orthosis (AFO) used to treat drop foot disease. in Mechanism and Machine Science. Singapore: Springer; 2021:789-807. [Link]
- Westhout FD, Paré LS, Linskey ME. Central causes of foot drop: rare and underappreciated differential diagnoses. J Spinal Cord Med. 2007;30(1):62-6. [DOI: [10.1080/10790268.2007.11753915](https://doi.org/10.1080/10790268.2007.11753915)] [PMID]
- Alnajjar F, Zaier R, Khalid S, Gochoo M. Trends and technologies in rehabilitation of foot drop: a systematic review. Expert Rev Med Devices. 2021;18(1):31-46. [DOI: [10.1080/17434440.2021.1857729](https://doi.org/10.1080/17434440.2021.1857729)] [PMID]
- Bilić H, Hančević M, Sitaš B, Bilić E. A rare case of parasagittal meningioma causing isolated foot drop: case report and review of the literature. Acta Neurol Belg. 2021;121(2):555-559. [DOI: [10.1007/s13760-019-01255-8](https://doi.org/10.1007/s13760-019-01255-8)] [PMID]
- Wisnomirska I, Błażkiewicz M, Kaczmarczyk K, Brzuszkiewicz-Kuźmicka G, Wit A. Effect of drop foot on spatiotemporal, kinematic, and kinetic parameters during gait. Appl Bionics Biomech. 2017;2017:3595461. [DOI: [10.1155/2017/3595461](https://doi.org/10.1155/2017/3595461)] [PMID]
- Carolus A, Becker M, Cuny J, Smektala R, Schmieder K, Brenke Ch. The interdisciplinary management of foot drop. Dtsch Arztebl Int. 2019;116(20):347-354. [DOI: [10.3238/arztebl.2019.0347](https://doi.org/10.3238/arztebl.2019.0347)] [PMID]
- Graham J. Foot drop: explaining the causes, characteristics and treatment. BJNN. 2010;6(4):168-172. [DOI: [10.12968/bjnn.2010.6.4.4779](https://doi.org/10.12968/bjnn.2010.6.4.4779)]
- Alnajjar F, Zaier R, Khalid S, Gochoo M. Trends and technologies in rehabilitation of foot drop: a systematic review. Expert Rev Med Devices. 2021;18(1):31-46. [DOI: [10.1080/17434440.2021.1857729](https://doi.org/10.1080/17434440.2021.1857729)] [PMID]
- Bulley C, Shiels J, Wilkie K, Salisbury L. User experiences, preferences and choices relating to functional electrical stimulation and ankle foot orthoses for foot-drop after stroke. Physiotherapy. 2011;97(3):226-33. [DOI: [10.1016/j.physio.2010.11.001](https://doi.org/10.1016/j.physio.2010.11.001)] [PMID]
- He Y, Koh MWP, Wong CLY, Gao F, Kobayashi T. Effects of articulated ankle-foot orthosis dorsiflexion range of motion on lower-limb joint kinematics during gait in individuals post-stroke. J Biomech. 2025;187:112755. [DOI: [10.1016/j.jbiomech.2025.112755](https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2025.112755)] [PMID]
- Wang Q, Liu H, Gao F. A biomechanical comparison of therapeutic footwear and athletic and low-cost generic shoes: effects on plantar pressure, lower extremity kinematics, and kinetics. Biomechanics. 2025;5(2):29. [DOI: [10.3390/biomechanics5020029](https://doi.org/10.3390/biomechanics5020029)]
- Winter DA. Biomechanics and Motor Control of Human Movement. 4th ed. Hoboken, New Jersey: Wiley; 2009. [Link]
- Delp SL, et al. OpenSim: open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. IEEE Trans Biomed Eng. 2007;54(11):1940-1950. [Link]
- Millard M, Uchida T, Seth A, Delp SL. Flexing computational muscle: modeling and simulation of musculotendon dynamics. J Biomech Eng. 2013;135(2):0210051-02100511. [DOI: [10.1115/1.4023390](https://doi.org/10.1115/1.4023390)] [PMID]
- Sabour S. Prediction of falls in subjects suffering from parkinson disease, Multiple Sclerosis, and stroke: methodologic issues. Arch Phys Med. 2018;99(8):1688. [Link]
- Young TP, Rho JY. Multiaxial model for elastic deformation of bone. J Biomech Eng. 1993;115(3):386-91. [Link]