Exoskeleton Robots and the Future of Rehabilitation; A Comprehensive Review on Lower-Limb Exoskeletons

Reza Hajiyan[1], Mohammad Hossein Khalesi[1*], Ali Soltani Sharif Abadi[2]

[1]Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
[2]Faculty of Electronics and Information Technology, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland

ABSTRACT

In the contemporary era, rapid advancements in robotic and electronic technologies have led to the extensive development of exoskeletons as advanced wearable devices. Integrating sensors, actuators, and artificial intelligence algorithms, these devices have significantly improved the quality of life for individuals with mobility impairments, enhanced physical capabilities for healthy users, and facilitated various industrial and military activities. This paper provides a comprehensive review of the historical evolution and progress of lower-limb exoskeletons, tracing their development from initial concepts in the 19th century to today's sophisticated models. The paper further examines the development trends, classifications, and applications of these systems within rehabilitation, medical, industrial, and military contexts. A functional analysis of the technology, focusing on objectives such as reducing inertial load forces, transferring weight to the ground, and enhancing human joint strength, reveals notable successes alongside ongoing challenges, including high production costs, technical complexity, and limitations in mimicking natural body movements. Additionally, emerging opportunities in fields such as sports, artificial intelligence, and user-centered designs are discussed. Findings from this systematic review can aid in optimizing design, reducing device weight, and enhancing efficiency. Ultimately, the paper presents a future-oriented perspective on exoskeleton development, emphasizing their crucial role in everyday life and medical practices.

KEYWORDS

Exoskeleton Robots, Rehabilitation, Lower-Limb Exoskeleton, Inertial Force, Robotic systems.

[*] Corresponding Author: Email: mhkhalesi@semnan.ac.ir

ACCEPTED MANUSCRIPT

1. Introduction

Exoskeletons are intelligent, wearable machines designed to support daily activities, augment physical strength, and restore lost motor functions. These devices come in various forms such as robotic suits, smart garments, or exoskeletal limbs and are increasingly applied in domains ranging from medical rehabilitation and industrial labor to military operations and personal assistance. Their broad capabilities enable them to enhance balance, precision, speed, and force output, thereby improving the quality of life for diverse user groups [1, 2]. The early development of wearable robotics dates back to the early 20th century, but progress accelerated significantly with strong financial support from agencies such as DARPA, resulting in iconic systems like the Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX) and its successors [2-5].

While some exoskeletons are developed to enhance strength in healthy individuals, others are specifically designed for the rehabilitation of people with physical impairments, especially those recovering from spinal cord injuries or strokes. Devices such as the Lokomat, Gait Trainer, and Active Leg Exoskeleton (ALEX) use hydraulic, pneumatic, or electric actuators to replicate natural gait and assist with movement re-learning [6-8]. Advances in biomechanics and biologically inspired actuation such as pneumatic muscles have led to smoother and more adaptive movements [9]. Additionally, adaptive control strategies and machine learning techniques now allow these systems to tailor their behavior in real time, offering more effective and personalized therapeutic outcomes [10]. Clinical studies have shown that integrating robotic systems with conventional physiotherapy can significantly accelerate recovery and improve patient independence.

Exoskeletons are generally categorized by the body region they support such as upper limb, lower limb, full-body, or joint-specific configurations and by their operational mode: active or passive [11, 12]. Passive exoskeletons use mechanical elements like springs and dampers to store and release energy without requiring external power. These systems are simple, cost-effective, and durable, though they are often less suitable for rehabilitation where active assistance is essential [12]. In contrast, active exoskeletons employ electric or hydraulic actuators to provide adjustable support based on user needs and external loads, offering superior adaptability and performance but with increased complexity and weight. Recent research has prioritized reducing system weight, improving energy efficiency, and integrating intelligent features. Reviews by Yao et al. [13], Coser et al. [14], and Belal et al. [15] emphasize the role of artificial intelligence particularly deep learning and reinforcement learning in motion prediction, gait-phase detection, and user intention recognition [16-18]. These innovations enhance control accuracy and improve the personalization and responsiveness of human–robot interaction.

This paper examines the history, developments, and applications of lower-limb exoskeleton robots. It begins with a comprehensive historical overview of wearable robotics, covering early developments up to 1972, the growth period from 1973 to 2000, advancements between 2000 and 2010, and the current progress since 2010. It then introduces the primary classifications of wearable robots based on their applications and functions. The final section discusses future perspectives, challenges, opportunities, emerging applications, and concludes with an overall summary of the presented topics.

2. Future Perspective

Advancements in design, materials, and control systems have brought lower-limb exoskeletons closer to widespread clinical, industrial, and everyday use. FDA-approved devices are already used in rehabilitation to restore walking in individuals with severe mobility impairments, while research prototypes continue to expand understanding of user-exoskeleton interaction. Benefits extend beyond mobility, including reduced spasticity and improved circulation. However, large-scale randomized controlled trials (RCTs) have yet to deliver conclusive evidence, and clinical guidelines remain cautious about recommending exoskeletons for stroke, SCI, and TBI patients [2, 19].

Despite this, the potential for exoskeletons to enhance mobility in healthy users is largely untapped. User acceptance remains a key challenge, influenced by factors like comfort, weight, and ease of use. Addressing these issues, alongside improvements in technology, human-machine interaction, and affordability, may support broader adoption beyond medical contexts. Persistent challenges such as high cost, limited clinical endorsement, and complex user adaptation continue to hinder widespread use. Future designs must integrate intelligent control, personalized adaptation, and efficient mechanics to meet both clinical and daily-life demands.

3. Conclusions

Lower-limb exoskeletons represent one of the most advanced wearable technologies, offering substantial benefits for users with mobility impairments, enhancing

ACCEPTED MANUSCRIPT

physical performance in healthy individuals, and supporting industrial and military applications. This paper reviewed the historical evolution of exoskeletons—from early 20th-century prototypes to modern systems integrating artificial intelligence, advanced sensors, and lightweight materials.

A key contribution of this study was the classification of exoskeletons based on functional objectives such as load redistribution, joint augmentation, and hybrid capabilities. While significant progress has been made, widespread adoption remains limited due to high costs, mechanical complexity, limited replication of natural movement, and insufficient clinical validation. The lack of robust randomized controlled trials (RCTs) further constrains their integration into mainstream rehabilitation practices. Looking ahead, advances in adaptive control, lightweight materials, and user-centered design could significantly improve exoskeleton performance and accessibility. Developing affordable, high-performance systems that align closely with human biomechanics may unlock broader applications across healthcare, industry, defense, and everyday life. Continued research especially in intelligent control systems and human-robot interaction—will be essential to realize the full potential of this transformative technology.

4. References

[1] Z. Li, H. Xie, W. Li, Z. Yao, Proceeding of human exoskeleton technology and discussions on future research, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 27 (2014) 437-447.

[2] C. Siviy, L.M. Baker, B.T. Quinlivan, F. Porciuncula, K. Swaminathan, L.N. Awad, C.J. Walsh, Opportunities and challenges in the development of exoskeletons for locomotor assistance, Nature biomedical engineering, 7(4) (2023) 456-472.

[3] A.B. Zoss, H. Kazerooni, A. Chu, Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), IEEE/ASME Transactions on mechatronics, 11(2) (2006) 128-138.

[4] A.B. Zoss, H. Kazerooni, A. Chu, Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), IEEE/ASME Transactions on mechatronics, 11(2) (2006) 128-138.

[5] E. Guizzo, H. Goldstein, The rise of the body bots [robotic exoskeletons], IEEE spectrum, 42(10) (2005) 50-56.

[6] G. Colombo, M. Joerg, R. Schreier, V. Dietz, Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis, Journal of rehabilitation research and development, 37(6) (2000) 693-700.

[7] J.F. Veneman, R. Kruidhof, E.E. Hekman, R. Ekkelenkamp, E.H. Van Asseldonk, H. Van Der Kooij, Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation, IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering, 15(3) (2007) 379-386.

[8] S.K. Banala, S.H. Kim, S.K. Agrawal, J.P. Scholz, Robot assisted gait training with active leg exoskeleton (ALEX), IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering, 17(1) (2008) 2-8.

[9] D.P. Ferris, J.M. Czerniecki, B. Hannaford, An ankle-foot orthosis powered by artificial pneumatic muscles, Journal of applied biomechanics, 21(2) (2005) 189-197.

[10] S. Jezernik, G. Colombo, M. Morari, Automatic gait-pattern adaptation algorithms for rehabilitation with a 4-DOF robotic orthosis, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 20(3) (2004) 574-582.

[11] A.S.S. Abadi, P.H. Dehkordi, R. Hajiyan, R. Kowalik, W. Wróblewski, Design and real-time evaluation of a novel observer-based predefined-time controller for the industrial processes, ISA transactions, 156 (2025) 551-564.

[12] J.A. de la Tejera, R. Bustamante-Bello, R.A. Ramirez-Mendoza, J. Izquierdo-Reyes, Systematic review of exoskeletons towards a general categorization model proposal, Applied Sciences, 11(1) (2020) 76.

[13] Y. Yao, D. Shao, M. Tarabini, S.A. Moezi, K. Li, P. Saccomandi, Advancements in sensor technologies and control strategies for lower-limb rehabilitation exoskeletons: A comprehensive review, Micromachines, 15(4) (2024) 489.

[14] O. Coser, C. Tamantini, P. Soda, L. Zollo, AI-based methodologies for exoskeleton-assisted rehabilitation of the lower limb: a review, Frontiers in Robotics and AI, 11 (2024) 1341580.

[15] M. Belal, N. Alsheikh, A. Aljarah, I. Hussain, Deep learning approaches for enhanced lower-limb exoskeleton control: A review, IEEE Access, (2024).

[16] D.D. Molinaro, K.L. Scherpereel, E.B. Schonhaut, G. Evangelopoulos, M.K. Shepherd, A.J. Young, Task-agnostic exoskeleton control via biological joint moment estimation, Nature, 635(8038) (2024) 337-344.

[17] A. Soltani Sharif Abadi, P. Alinaghi Hosseinabadi, A. Hameed, A. Ordys, B. Pierscionek, Fixed-time observer-based controller for the human–robot collaboration with interaction force estimation, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 35(10) (2025) 4062-4095.

[18] S. Arunkumar, N. Jayakumar, A comprehensive review on lower limb exoskeleton: from origin to future expectations, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), (2024).

[19] T.G. Hornby, D.S. Reisman, I.G. Ward, P.L. Scheets, A. Miller, D. Haddad, E.J. Fox, N.E. Fritz, K. Hawkins, C.E. Henderson, Clinical practice guideline to improve locomotor function following chronic stroke, incomplete spinal cord injury, and brain injury, Journal of Neurologic Physical Therapy, 44(1) (2020) 49-100.

ACCEPTED MANUSCRIPT

رباتهای پوشیدنی و آینده توانبخشی; نگاهی جامع به اگزواسکلتونهای پایین‌تنه

رضا حاجیان[1]، محمدحسین خالصی[2*]، علی سلطانی شریف آبادی[3]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، r.hajiyan@semnan.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، mhkhalesi@semnan.ac.ir

۳- دانشکده الکترونیک و فناوری اطلاعات، دانشگاه صنعتی ورشو، ورشو، لهستان، ali.abadi@pw.edu.pl

چکیده

در عصرحاضر، پیشرفت‌های سریع در فناوری‌های رباتیک و الکترونیکی منجر به توسعه گسترده اگزوسکلتون‌ها به عنوان فناوری‌های پیشرفته پوشیدنی شده است. این دستگاه‌ها با ادغام حسگرها، عملگرها و الگوریتم‌های هوش مصنوعی، توانسته‌اند نقش قابل‌توجهی در بهبود کیفیت زندگی افراد دارای ناتوانی‌های حرکتی، افزایش توانایی‌های فیزیکی کاربران سالم و تسهیل فعالیت‌های صنعتی و نظامی ایفا کنند. این مقاله با مروری جامع بر تاریخچه و تحولات اگزوسکلتون‌های پایین‌تنه از ایده‌های اولیه در قرن نوزدهم تا نمونه‌های پیشرفته امروزی، به بررسی روند پیشرفت، دسته‌بندی‌ها و کاربردهای این سیستم‌ها در حوزه‌های توانبخشی، پزشکی، صنعتی و نظامی می‌پردازد. تحلیل عملکردی این فناوری بر اساس اهدافی چون کاهش نیروی اینرسی بار، انتقال وزن به زمین و تقویت مفاصل انسانی نشان می‌دهد که علیرغم موفقیت‌های چشمگیر، چالش‌هایی مانند هزینه‌های تولید بالا، پیچیدگی‌های فنی و محدودیت در تطبیق با حرکات طبیعی بدن همچنان پابرجاست. همچنین، فرصت‌های نوظهور در حوزه‌های ورزشی، هوش مصنوعی و طراحی‌های کاربرمحور مورد بحث قرار گرفته‌اند. یافته‌های این پژوهش که مبتنی بر مرور سیستماتیک مطالعات است، می‌تواند به بهینه‌سازی طراحی، کاهش وزن و افزایش کارایی این دستگاه‌ها کمک کند. در نهایت، مقاله چشم‌اندازی از مسیر توسعه آینده اگزواسکلتون‌ها ارائه می‌دهد و بر نقش کلیدی آن‌ها در زندگی روزمره و پزشکی تأکید می‌کند.

کلمات کلیدی

رباتهای پوشیدنی، توان‌بخشی، اگزواسکلتون پایین‌تنه، نیروی اینرسی، سیستم‌های رباتیک

ACCEPTED MANUSCRIPT

۱- مقدمه

ربات‌های پوشیدنی به عنوان دستگاه‌های هوشمندی که می‌توانند در انجام فعالیت‌های روزمره کمک کنند، قدرت فیزیکی کاربران را افزایش دهند و حتی توانایی‌های از دست‌رفته را بازیابی کنند، به سرعت در حال تغییر زندگی انسان‌ها هستند. این دستگاه‌ها، که به صورت ماشین‌های هوشمند و قابل‌پوشیدن طراحی شده‌اند، بر روی بدن انسان قرار گرفته و توانایی‌های جدیدی به کاربران خود می‌بخشند. کاربردهای این فناوری بسیار متنوع است و از کمک به افراد دارای معلولیت در راه‌رفتن تا افزایش قدرت و کارایی کارگران در محیط‌های صنعتی را شامل می‌شود [۱, ۲]. با وجود تمامی این پتانسیل‌ها، ارائه یک تعریف دقیق و جامع از ربات‌های پوشیدنی چالشی قابل توجه به شمار می‌آید. این دستگاه‌ها طیف گسترده‌ای از طراحی‌ها و کاربردها را شامل می‌شوند و برای اهداف گوناگونی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ربات‌های پوشیدنی می‌توانند توانایی‌های فیزیکی و شناختی انسان را تقویت، تکمیل و یا حتی جایگزین کنند.

همچنین این سیستم‌ها می‌توانند به صورت اسکلت‌های بیرونی، دستکش‌های رباتیک و لباس‌های هوشمند باشند و کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های پزشکی (توان‌بخشی، کمک به افراد دارای معلولیت)، نظامی (افزایش قدرت و استقامت سربازان)، صنعتی (کمک به کارگران در انجام وظایف سنگین) و حتی در ورزش و سرگرمی داشته باشند. ربات‌های پوشیدنی با تقویت قدرت، بهبود تعادل، افزایش سرعت، دقت و همچنین توان‌بخشی افراد دارای معلولیت، کیفیت زندگی را بهبود می‌بخشند [۳, ۴]. تحقیقات لی[1] و همکاران [۴] و همچنین تحقیقات ذکر شده در [۵]، نشان می‌دهد که پیشرفت‌های اخیر در زمینه کامپیوتر به توسعه اسکلت‌های خارجی با قابلیت تطبیق بیشتر با حرکات بدن انسان کمک کرده است. آن‌ها بیش از یک قرن است که ذهن بشر را به خود مشغول کرده است. و پس از آن، اختراعات و نمونه های اولیه متعددی از آن ها ثبت شده است [۶]. اولین نمونه‌های اولیه این فناوری در اوایل قرن بیستم ساخته شدند. با پیشرفت تکنولوژی و حمایت‌های مالی گسترده، به ویژه از سوی آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفته دفاعی آمریکا[2] [7]، توسعه اگزواسکلتون‌های پیشرفته مانند اگزواسکلتون اندام تحتانی برکلی[3][۸]، بلکس[4][۹]، گاردیان سارکوس[5] [۱۰] و اگزواسکلتون نیمه فعال میت[6] [۱۱, ۱۲] امکان‌پذیر شد. این دستگاه‌ها با کاهش بار وارده بر فرد و ارائه گشتاورهای مفصلی کمکی در حین راه رفتن، به افزایش ظرفیت حمل بار، بهبود کارایی و استقامت و کاهش سختی راه رفتن کمک می‌کنند [۱۲] و می‌توانند برای پرسنل نظامی، امدادگران و افراد عادی مفید باشند. در کنار توسعه اگزواسکلتون‌ها برای تقویت عملکرد و حمل بار، دستگاه‌هایی همچون لوکومات[7] [۱۳]، گیت ترینر[8] [۱۴]، اگزواسکلتون با قدرت اندام تحتانی[9][۱۵]، اگزواسکلتون پای فعال[10][۱۶, ۱۷] و مچ پا راتگرز[11][۱۸]، به منظور مکانیکی کردن فرایند فیزیوتراپی فیزیوتراپی افراد مبتلا به آسیب نخاعی[12] یا سکته مغزی که در حال یادگیری مجدد راه رفتن هستند، طراحی شده‌اند. این دستگاه‌ها با استفاده از عملگرهای مختلفی مانند هیدرولیک، پنوماتیک و الکتریکی، حرکات طبیعی راه رفتن را تقلید کرده و به بیماران کمک می‌کنند تا عملکرد حرکتی خود را بهبود بخشند.

درک عمیق‌تر از بیومکانیک و فیزیولوژی زیربنایی، منجر به بهبود قابل توجهی در طراحی اگزواسکلتون‌ها شده است. استراتژی‌های الهام گرفته از زیست‌شناسی، به ویژه در حوزه عملگرها و کنترل، نقش مهمی در این پیشرفت داشته‌اند [۱۹-۲۲]. به عنوان مثال، استفاده از عملگرهای پنوماتیک که عملکردی مشابه عضلات دارند، به ایجاد حرکات نرم‌تر و طبیعی‌تر در اگزواسکلتون‌ها کمک کرده است. همچنین، روش‌های کنترل تطبیقی و یادگیری ماشین به اگزواسکلتون‌ها اجازه می‌دهند تا با

[1] Li
[2] Defense Advanced Research Projects Agency (Darpa)
[3] Berkeley
[4] Bleex
[5] Sarcos Guardian Xo
[6] Mit Quasi-Passive Exoskeleto
[7] Lokomat
[8] Gait Trainer
[9] Lower Extremity Powered Exoskeleton (Lopes)
[10] Active Leg Exoskeleton (Alex)
[11] Rutgers Ankle
[12] Spinal-Cord Injury (Sci)

ACCEPTED MANUSCRIPT

هر بیمار به صورت جداگانه سازگار شده و درمان مؤثرتری را ارائه دهند [۲۳-۲۷]. مطالعات بالینی متعدد نشان داده‌اند که استفاده از اگزواسکلتون‌ها در کنار فیزیوتراپی سنتی، می‌تواند به بهبود قابل توجهی در عملکرد راه رفتن بیماران مبتلا به آسیب نخاعی و سکته مغزی منجر شود. این دستگاه‌ها به بیماران کمک می‌کنند تا اعتماد به نفس خود را بازیافته و استقلال بیشتری در زندگی روزمره خود داشته باشند.

ربات‌های پوشیدنی بر اساس بخش‌های بدن تحت پوشش به انواع اندام بالا، اندام پایین، کل بدن و مفاصل خاص تقسیم می‌شوند. مطالعات اخیر بر روی کاهش وزن و حجم این سیستم‌ها، افزایش توانایی حمل بار، بهبود انعطاف‌پذیری و عملکرد در محیط‌های سخت و ناهموار، کمک به راه رفتن و تقویت توانایی‌های انسان متمرکز است تقسیم‌بندی ربات‌های پوشیدنی به فعال و غیرفعال عمدتاً بر اساس نحوه ارائه کمک یا تقویت به کاربر انجام می‌شود [۲۸]. ربات‌های پوشیدنی غیرفعال از فنرها، دمپرها، یا دیگر عناصر مکانیکی برای ذخیره و بازتوزیع انرژی استفاده می‌کنند. این ربات‌ها به منبع قدرت خارجی نیاز ندارند و از ویژگی‌هایی مانند سادگی، قابلیت اطمینان، هزینه پایین، و دوام کاری بالا برخوردار هستند. با استفاده از عناصر مکانیکی، این ربات‌ها قادرند دینامیک طبیعی حرکت انسان را در بسیاری از موارد تقلید کنند. با این حال، در کاربردهایی نظیر توان‌بخشی که کاربران ممکن است قدرت کافی برای انجام فعالیت‌های مورد نظر را نداشته باشند، این ربات‌ها محدودیت دارند [۲۹, ۳۰]. ربات‌های پوشیدنی فعال با استفاده از محرک‌های الکتریکی یا هیدرولیکی، توانایی بیشتری برای کمک به حرکت انسان دارند. این محرک‌ها می‌توانند بسته به وضعیت کاربر و بار خارجی، گشتاور مناسب را تولید کنند. با تنظیم استراتژی‌های کنترلی، این ربات‌ها در تطبیق با شرایط کاری مختلف انعطاف‌پذیری بیشتری دارند و از نظر دقت و تکرارپذیری از سیستم‌های غیرفعال و حتی انسان‌ها پیشرفته‌تر هستند [۲۸]. با این وجود، نیاز به منبع قدرت خارجی، پیچیدگی بیشتر، و هزینه بالاتر از محدودیت‌های آن‌ها است.

اگزواسکلتون‌ها هم در افراد سالم برای افزایش توانایی‌های حرکتی و هم در افراد دارای معلولیت برای بازگرداندن حرکت به کار می‌روند. این دستگاه‌ها با استفاده از منابع انرژی مختلف طراحی می‌شوند. در دستگاه‌های فعال، کاربر مجبور به حمل باتری برای تأمین انرژی محرک‌ها است که بر وزن کل سیستم می‌افزاید. در سیستم‌های تحقیقاتی، منبع انرژی و محرک‌ها معمولاً بر روی یک ساختار مستقل خارج از بدن قرار می‌گیرند و کاربر به تردمیل متصل می‌شود. از سوی دیگر، در طراحی‌های غیرفعال، انرژی مورد نیاز از طریق حرکت بدن تأمین شده و نیازی به منبع انرژی خارجی نیست.

در سال‌های اخیر، ربات‌های اگزواسکلتون پایین‌تنه شاهد پیشرفت‌های چشمگیری بوده‌اند. مقاله مروری یاو و همکاران [۳۱]، به‌طور جامع این تحولات را بررسی کرده و چارچوبی برای توسعه‌های آینده ارائه داده است. استفاده از هوش مصنوعی در توان‌بخشی با کمک اگزواسکلتون برای اندام تحتانی نیز توجه زیادی را به خود جلب کرده است. مقاله مروری کوزر و همکاران [۳۲]، با بررسی ۳۷ مطالعه، نقش الگوریتم‌های مختلف هوش مصنوعی مانند یادگیری تقویتی و شبکه‌های عصبی را در بهبود عملکرد اگزواسکلتون‌ها تحلیل کرده است. همچنین، مقاله مروری بلال و همکاران [۳۳]، با بررسی ۱۰۳ مطالعه در حوزه کاربردهای یادگیری عمیق، به موضوعاتی مانند تشخیص فاز گام، پیش‌بینی حرکت، شناسایی نیت کاربر و کنترل تطبیقی پرداخته است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که ادغام یادگیری عمیق می‌تواند به شخصی‌سازی درمان، افزایش دقت در تشخیص نیت حرکتی و بهبود تعامل انسان-ربات منجر شود. علاوه بر این، توسعه‌های متعددی در سال‌های اخیر انجام شده است که هر کدام بخشی از مسائل مرتبط با ربات‌های اگزواسکلتون را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این زمینه، مقالات [۳۴-۳۷]، قابل ذکر هستند.

این مقاله به بررسی تاریخچه، تحولات و کاربردهای ربات‌های اگزواسکلتون پایین‌تنه می‌پردازد. در ابتدا، مروری جامع بر تاریخچه و توسعه این فناوری ارائه شده است که شامل بررسی ربات‌های پوشیدنی از آغاز تا سال ۱۹۷۲، دوره توسعه از ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۰، پیشرفت‌های دهه ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ و وضعیت کنونی این فناوری از سال ۲۰۱۰ تاکنون است. سپس، در بخش دیگری، دسته‌بندی‌های اصلی ربات‌های پوشیدنی بر اساس کاربرد و عملکرد آنها معرفی شده‌اند. در بخش پایانی، به چشم‌انداز آینده این فناوری، چالش‌ها، فرصت‌ها و کاربردهای نوظهور پرداخته شده و در نهایت، نتیجه‌گیری کلی از مباحث ارائه می‌شود.

۲- مروری بر تاریخچه و تحولات اگزواسکلتون‌ها

ایده تقویت توانایی‌های فیزیکی انسان با استفاده از دستگاه‌های خارجی، ریشه در تخیلات بشر از دوران باستان دارد. از افسانه‌های یونان باستان، همچون داستان‌های دِدالوس و ایکاروس، گرفته تا آثار علمی‌تخیلی قرن بیستم، همواره ایجاد اسکلت

ACCEPTED MANUSCRIPT

بیرونی برای افزایش قدرت و توانایی انسان، ایده‌ای جذاب و الهام‌بخش بوده است. با این حال، عملی ساختن این ایده به پیشرفت‌های گسترده‌ای در علوم و فناوری‌های گوناگون از جمله مهندسی مکانیک، الکترونیک، علم مواد و علوم اعصاب نیاز داشته است. اگزواسکلتون یا اسکلت بیرونی به دستگاهی اطلاق می‌شود که روی بدن انسان پوشیده شده و با تقویت عضلات و مفاصل، قابلیت‌های حرکتی و فیزیکی فرد را بهبود می‌بخشد. این فناوری در ابتدا برای افزایش توان سربازان و کارگران در محیط‌های صنعتی طراحی شد. با این وجود، به‌تدریج کاربردهای آن به حوزه‌های توانبخشی و پزشکی نیز گسترش یافت. امروز، اگزواسکلتون‌ها در زمینه‌های گوناگونی از جمله کمک به راه‌رفتن افراد دارای اختلالات حرکتی، توانبخشی پس از آسیب، و افزایش بهره‌وری در کارهای سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرند. ربات‌های پوشیدنی اندام تحتانی، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین انواع اگزواسکلتون‌ها، به‌طور خاص برای تعامل با بدن انسان به شیوه‌ای پوشیدنی طراحی شده‌اند. این ربات‌ها، که دسته‌ای بزرگ از ربات‌های توانبخشی را شامل می‌شوند، قادرند حرکات مفاصل مختلف بدن را در فرآیند آموزش حرکتی یا بازیابی توانایی کنترل کنند [۳۸]. بررسی تاریخی و توسعه اگزواسکلتون‌ها را می‌توان از دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز کرد. در این دوره، مطالعات اولیه به طراحی سامانه‌هایی متمرکز بود که بتوانند نیروی بیشتری برای کاربران نظامی یا صنعتی فراهم کنند.

ربات‌های پوشیدنی، به‌ویژه اگزواسکلتون‌های اندام تحتانی، نقشی کلیدی در تقویت توانایی‌های فیزیکی انسان و توانبخشی افراد دارای ناتوانی حرکتی ایفا کرده‌اند. این فناوری از مفاهیم اولیه در قرن نوزدهم آغاز شد و با پیشرفت‌های قابل توجه در قرن بیستم توسعه یافت. در این مقاله، تحولات تاریخی این فناوری از اواخر قرن نوزدهم تا سال ۱۹۷۲ بررسی می‌شود.

۱-۲- تاریخچه و توسعه ربات‌های پوشیدنی تا سال ۱۹۷۲

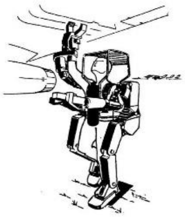
ایده استفاده از دستگاه‌های خارجی برای افزایش توانایی‌های فیزیکی انسان، از اواخر قرن نوزدهم مطرح شد. در سال ۱۸۸۹، نیکولای یاگن روسی[۱] دستگاهی را طراحی کرد که با استفاده از فنرها و کیسه‌های گاز فشرده، توانایی انسان را در راه‌رفتن، پریدن و دویدن افزایش می‌داد. این دستگاه یکی از اولین نمونه‌های اسکلت بیرونی مجهز به قدرت بود که در سال‌های ۱۸۸۹ تا ۱۸۹۰ به ثبت رسید [۳۹, ۴۰]. در سال ۱۹۱۷، ال سی کلی[۲] آمریکایی [۳۳]، دستگاهی به نام پدوموتور[۳] را توسعه داد که از یک موتور بخار کوچک و کابل‌های فولادی برای تقویت حرکت پاها استفاده می‌کرد. هرچند این اختراعات پیشگام بودند، اما محدودیت‌های فناوری آن زمان، از جمله وزن بالا و منابع انرژی ناکافی، مانع از استفاده عملی گسترده آن‌ها شد. در اواسط قرن بیستم و پس از پایان جنگ‌های جهانی، تحقیقات در زمینه ربات‌های پوشیدنی شدت گرفت. در سال ۱۹۶۱، آزمایشگاه‌های ایروتونیک کرنل[۴] پروژه‌ای به نام تقویت‌کننده عصبی مبتنی بر فعالیت عضلانی[۵] [۴۱]، را آغاز کردند. این دستگاه که از سروموتورهای الکترومکانیکی بهره می‌برد، به‌عنوان اولین اگزواسکلتون مجهز به تقویت نیرو شناخته می‌شود. با این حال، محدودیت‌های فناوری در تأمین انرژی و کنترل، مانع از استفاده عملی از این دستگاه شد.در سال ۱۹۶۵، شرکت جنرال‌الکتریک[۶] و ارتش ایالات متحده پروژه مشترکی به نام هاردیمن[۷] [۴۲, ۴۳] را آغاز کردند. شکل (۱ الف)، نمایی از ربات هاردیمن را نشان می‌دهد. این ربات پوشیدنی که برای کاربردهای نظامی طراحی شده بود، می‌توانست نیروی کاربر را تا ۲۵ برابر افزایش دهد و اجسام سنگین را به‌راحتی بلند کند. هاردیمن از سیستم‌های هیدرولیکی و سنسورهای بازخورد پیشرفته بهره می‌برد، اما وزن ۶۸۰ کیلوگرمی و سرعت حرکت پایین (۲,۵ فوت بر ثانیه ویا حدود ۰,۷۶ متر بر ثانیه) آن را برای استفاده عملی نامناسب کرد.

---

[1] Nicholas Yagn of Russia
[2] L. C. Kelley
[3] Pedomotor
[4] Cornell Aeronautical
[5] Muscle Activity-based Neuro-Amplifier (MANAmplifier)
[6] General Electric (GE)
[7] Hardiman

ACCEPTED MANUSCRIPT

ب



الف

شکل ۱: بررسی ربات‌های پوشیدنی تا سال ۱۹۷۲. الف: جنرال الکتریک – ربات هاردیمن [۴۴]. ب: ربات پاورد لِگ [۴۵]

Figure 1. Overview of exoskeletons developed up to 1972. (a) General Electric – Hardiman robot. (b) Powered leg robot.

در دهه ۱۹۶۰، تحقیقات اروپایی نیز نقش مهمی در توسعه ربات‌های پوشیدنی ایفا کرد. در سال ۱۹۶۹، ووکبراتوویچ[1] و همکاران [۴۵]، از موسسه میهایلو پوپین[2] در دانشگاه بلگراد[3] ، پاورد لِگ[4] را توسعه دادند (شکل الف۲). این دستگاه به‌عنوان یک سیستم توانبخشی برای افراد دچار ناتوانی شدید حرکتی توسعه یافت و می‌توانست به بازیابی عملکرد حرکتی کمک کند. با این حال، حرکت تک‌محوری و طراحی غیرانعطاف‌پذیر آن باعث شد که قابلیت استفاده عملی محدود باشد.

در سال ۱۹۷۲، تیم تحقیقاتی ووکبراتوویچ و همکاران [۴۵, ۴۶]، با استفاده از محرک‌های پنوماتیکی و برنامه‌ریزی سینماتیکی، یک سیستم پیشرفته‌تر برای راه‌رفتن آنتروپومورفیک[5] طراحی کرد. این سیستم که در کلینیک ارتوپدی بلگراد آزمایش شد، گامی بزرگ در توانبخشی افراد فلج و معلولین بود. هرچند هنوز محدودیت‌هایی در طراحی و عملکرد وجود داشت، این دستاوردها پایه‌گذار توسعه نسل‌های آینده اگزواسکلتون‌ها شد.

جدول۱: بررسی تحولات مهم اگزواسکلتون‌های پایین تنه تا سال ۱۹۷۲

Table 1. Review of key developments in lower-limb exoskeletons up to 1972

سال	رویداد	نام دستگاه	شرکت تجاری	نوع حرکت	نوع کاربرد	توضیحات	منبع	عکس ربات
۱۹۶۰ الی ۱۹۷۰	جنرال‌الکتریک[6]	ربات هاردیمن[7]	جنرال‌الکتریک	ثابت / متحرک	نظامی	این ربات که یکی از پیشگامان اولیه در حوزه ربات‌های اگزواسکلوتون به شمار می‌رود، وزنی در حدود ۶۸۰ کیلوگرم داشته و با نیروی الکتریکی و هیدرولیکی کار می‌کرد	[۴۷]	شکل ۱ الف
۱۹۷۰	میومیر ووکوبراتوویچ[8]	ووکبراتوویچ[9]	موسسه میهایلو پوپین[10]	متحرک	کمک به افراد ناتوان و پاراپلژیک-[11]	این اگزواسکلتون با هدف کمک به افراد در بازیابی توانایی‌های حرکتی طراحی شده است.	[۴۵]	شکل ۱ ب

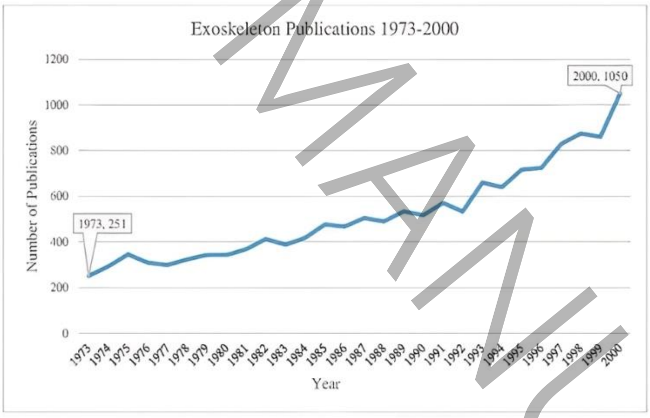
۲-۲- تاریخچه توسعه ربات‌های اگزواسکلتون ۲۰۰۰-۱۹۷۳

[1] Vukobratovic
[2] Mihajlo Pupin
[3] Belgrade
[4] Powered Leg
[5] Anthropomorphic
[6] General Electric (GE)
[7] Hardiman
[8] Miomir Vukobratovic
[9] Vukobratovic
[10] Mihajlo Pupin
[11] Paraplegics

ACCEPTED MANUSCRIPT

دهه‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۰۰ را می‌توان دوره‌ای کلیدی در توسعه ربات‌های پوشیدنی دانست که طی آن فناوری‌های نوظهور به مرحله بلوغ نزدیک شدند [۹]. در این بازه، استفاده از ربات‌های پوشیدنی از مفاهیم اولیه به سمت طراحی‌های کاربردی‌تر و متنوع‌تر حرکت کرد. در دهه ۱۹۷۰، فناوری بازوهای رباتیکی که از دهه ۱۹۵۰ شروع شده بود، نقش مهمی در توسعه ربات‌های پوشیدنی ایفا کرد. این بازوها که ابتدا در صنایع استفاده می‌شدند، به تدریج در طراحی ربات‌های پوشیدنی نیز مورد استفاده قرار گرفتند. در سال ۱۹۷۸، اگزواسکلتون کامل[1] با استفاده از کنترل نقطه صفر گشتاور[2] و محرک‌های موتوری معرفی شد. این طرح، نقطه عطفی در توسعه ربات‌های پوشیدنی بود و نشان‌دهنده انتقال از مرحله مفهومی به توسعه فنی محسوب می‌شد [۴۱]. در سال ۱۹۷۹، مفهوم استفاده از طراحی‌های انسان‌نما و بازوهای رباتیکی در ساخت ربات‌های پوشیدنی تثبیت شد [۴۸]. این طرح‌ها، بنیان‌گذار بسیاری از پیشرفت‌های بعدی در این حوزه بودند. دهه ۱۹۸۰ با ظهور فناوری‌های نوین در زمینه حسگرها و محرک‌ها همراه بود. در این دهه، پیتمن[3] از ایالات متحده [۴۹]، دستگاه‌هایی را معرفی کرد که قابلیت‌های حرکتی انسان را بهبود می‌بخشیدند. هرچند این دستگاه‌ها هنوز در مراحل اولیه توسعه بودند، اما کاربرد آن‌ها در توانبخشی و افزایش توانایی‌های بدنی آشکار شد.

در دهه ۱۹۹۰، دانشگاه تسین‌هوا[4] در چین یک ماشین مخصوص راه رفتن برای افراد ناتوان حرکتی طراحی کرد [41, 50]. این دستگاه نمونه‌ای از استفاده از فناوری اگزواسکلتون برای توانبخشی افراد معلول بود. همچنین، نسل اول اگزواسکلتون هال[5] از ژاپن [۵۱, ۵۲]، به‌عنوان نمونه‌ای از اگزواسکلتون‌ها در مرحله توسعه فنی به شمار می‌رفتند. این دستگاه‌ها به راحتی می‌توانستند به کمک افرادی که با مشکلات حرکتی مواجه بودند، بیایند و عملکرد حرکتی آن‌ها را افزایش دهند. در این دهه، مطالعات متمرکز بر کنترل سیگنال‌های بیولوژیکی، از جمله سیگنال‌های الکتریکی عضلات، به رشد سریعی دست یافت. این فناوری، راه را برای اگزواسکلتون‌هایی با دقت بالاتر و قابلیت‌های بیشتر هموار کرد [۱۰, ۴۱]. شکل ۲، تمرکز مقالات مربوط به ربات‌های پوشیدنی از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۰۰ را نشان داده شده است.



شکل ۲: پیشرفت ربات‌های پوشیدنی بین سال‌های ۲۰۰۰-۱۹۷۳ [۹]

Figure 2. Advancements in exoskeletons between 1973 and 2000

۲-۳- تاریخچه ربات‌های پوشیدنی (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰)

با آغاز قرن بیست و یکم، پیشرفت‌های قابل‌توجهی در زمینه ربات‌های پوشیدنی یا اگزواسکلتون‌ها صورت گرفت. در این دوره، فناوری‌های نوین و سرمایه‌گذاری‌های عمده در این حوزه، نقش کلیدی در توسعه اگزواسکلتون‌های کاربردی داشتند. در سال ۲۰۰۰، دانشگاه کالیفرنیا، برکلی[6] [۱۲, ۵۳-۵۵]، با سرمایه‌گذاری ۵۰ میلیون دلاری از آژانس پروژه‌های تحقیقاتی پیشرفته

[1] Complete Exoskeleton
[2] Zero Moment Point (ZMP)
[3] Pitman
[4] Tsinghua
[5] HAL
[6] Berkeley

ACCEPTED MANUSCRIPT

دفاعی[1] ، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه آغاز کرد. نتیجه این تحقیقات در سال ۲۰۰۴ به تولید اگزواسکلتون برکلی یا بلکس[2] منجر شد. این اسکلت بیرونی، با تمرکز بر کاهش فشار ناشی از حمل بار، طراحی شد و ساختاری را فراهم می‌کرد که از کمر و پاها حمایت کند. بلکس به نیروهای نظامی این امکان را داد تا تا ۹۰ کیلوگرم بار را بدون ایجاد فشار اضافی بر بدن حمل کنند. یکی از ویژگی‌های برجسته این اگزواسکلتون، قابلیت جدا کردن آن هنگام تخلیه باتری و تبدیل آن به یک کوله‌پشتی استاندارد بود، که حمل و نقل آن را بسیار آسان می‌کرد. شکل (۳ الف) [۵۵, ۵۶].

در سال ۲۰۰۵، هال نسخه ۵[3] توسط شرکت ژاپنی Cyberdyne معرفی شد. این اگزواسکلتون به عنوان یکی از پیشگامان فناوری ربات‌های پوشیدنی شناخته می‌شود و هدف اصلی آن کمک به افراد دارای محدودیت‌های حرکتی و همچنین افزایش قدرت فیزیکی کاربران بود [57, 58]. در سال ۲۰۰۸، نیوزیلند اگزواسکلتون REX را معرفی کرد [۵۹]. این اسکلت بیرونی برای افرادی که قادر به راه رفتن نیستند، طراحی شد و امکان حرکت مستقل را برای آن‌ها فراهم می‌کرد. در سال ۲۰۰۹، اسکلت بیرونی HULC[4] که توسط شرکت سارکوس رباتیک[5] [۶۰] و با حمایت لاکهید مارتین[6] توسعه یافت، به تجهیزات نظامی ایالات متحده اضافه شد. این دستگاه به نیروهای نظامی کمک می‌کرد تا برای مدت طولانی بارهای سنگین را حمل کنند و در عین حال حرکات طبیعی بدن را حفظ کنند. طراحی HULC به گونه‌ای بود که می‌توانست در کمتر از یک دقیقه پوشیده یا از بدن جدا شود. در سال ۲۰۱۰، ری واک[7] توسط شرکت اسرائیلی ری‌واک رباتیک[8] معرفی شد [۶۱]. این اسکلت بیرونی به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های پوشیدنی برای افراد مبتلا به فلج پایین‌تنه طراحی شده است و به کاربران امکان می‌دهد تا بایستند، راه بروند، و حتی از پله‌ها بالا و پایین بروند.

الف

ب

ج

د

ه

ی

ط

[1] Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)
[2] BLEEX
[3] Hal-5
[4] Human Universal Load Carrier
[5] Sarcos Robotics
[6] Lockheed Martin
[7] Rewalk
[8] ReWalk Robotics

ACCEPTED MANUSCRIPT

شکل ۳: بررسی مهم‌ترین فناوری ربات‌های پوشیدنی (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰). الف: اگزواسکلتون برکلی یا بلکس [۹]. ب: اگزواسکلتون لوکومات [۳۸]. ج: نسخه اولیه اگزواسکلتون هال [۶۲]. د: سیستم کمکی گام (SAS) [۶۳]. ه: اگزواسکلتون هال ۵ [50, 51]. ی: ربات LOPES [۱۵]. ط: اگزواسکلتون ASME [۶۴]

Figure 3. Overview of major exoskeleton technologies from 2000 to 2010. (a) Berkeley Exoskeleton (BLEEX). (b) Lokomat. (c) Early version of the HAL exoskeleton. (d) Step Assist System (SAS). (e) HAL-5. (f) LOPES. (g) ASME.

جدول ۲: بررسی تحولات مهم اگزواسکلتون‌های پایین تنه در دهه‌های۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰

Table 2. Review of key developments in lower-limb exoskeletons during the 2000s to 2010

سال	رویداد	نام دستگاه	شرکت تجاری	نوع کاربرد	توضیحات	منابع	عکس ربات
۲۰۰۰	توسعه اولیه اگزواسکلتون برکلی یا بلکس	اگزواسلکتون بلکس[1]	آزمایشگاه رباتیک و مهندسی انسانی برکلی[2]	توانبخشی، نظامی، فعالیت‌های سخت	بلکس دارای دو پای رباتیک است که به بدن کاربر متصل می‌شوند. این دستگاه به کاربر اجازه می‌دهد تا بارهای سنگین را بر روی یک کوله پشتی مخصوص حمل کند. همچنین با استفاده از حسگرها و محرک‌ها، حرکات کاربر را تشخیص داده و کمک می کند تا بار را به راحتی حمل کنند.	[۱۲, ۵۳-۵۵]	شکل (۳الف)
۲۰۰۰	معرفی اولین نسخه تجاری	لوکومات[3]	Hocoma AG	توانبخشی و فیزیوتراپی	لوکومات برای تمرین راه رفتن در افراد دارای مشکلات حرکتی مانند آسیب نخاعی، سکته مغزی و MS طراحی شده است.	[۱۳, ۲۳, ۲۴, ۳۸, ۶۵, ۶۶]	شکل (۳ب)
۲۰۰۰	توسعه اولیه اگزواسلکتون هال	اگزواسکلتون هال ۱ [4]	Cyberdyne Inc	توانبخشی، کمک به فعالیت‌های فیزیکی	اگزواسلکتون هال یک اگزواسکلتون رباتیک است که توسط سیگنال‌های عصبی کاربر کنترل می‌شود و برای کمک به افرادی که دارای مشکلات حرکتی هستند، طراحی شده است.	[۶۲]	شکل (۳ج)
۲۰۰۷	سیستم گام‌برداری عضلانی با استفاده از تکنیک تصویربرداری با پت‌اسکن (PET)	سیستم کمک به گام‌برداری[5]	شرکت تحقیق و توسعه هوندا[6]	توانبخشی و بهبود فعالیت‌های ورزشی افراد مبتلا به محدودیت‌های حرکتی	این ربات از تکنیک تصویربرداری با تشعشعات پوزیترون برای بررسی فعالیت‌های عضلانی در حین استفاده از سیستم کمکی دویدن استفاده می‌کند، و بر روی حرکات نرمال و بهبود عملکرد حرکتی تمرکز دارد.	[۶۳]	شکل (۳د)
۲۰۰۸	معرفی اولین نسخه تجاری	اگزواسکلتون هال۵[7]	Cyberdyne Inc.	توانبخشی، پزشکی، و حمایت از	هال عنوان اولین دستگاه رباتیک اگزواسکلتون تاییدیه بالینی برای استفاده در ژاپن و اروپا به دست آورد. این دستگاه در مراکز توانبخشی و	[57, 58]	شکل (۳ ه)

[1] Berkeley Lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)
[2] Berkeley Robotics and Human Engineering Laboratory
[3] Lokomat
[4] Hybrid Assistive Limb (HAL1)
[5] Stride Assistance System (SAS)
[6] Honda Research and Development Company
[7] HAL5

ACCEPTED MANUSCRIPT

	اگزواسکلتون هال			حرکت برای افراد دارای معلولیت و غیرفعال	بیمارستان‌ها برای کمک به بازیابی حرکتی بیماران پس از سکته مغزی یا آسیب نخاعی استفاده می‌شود.		
۲۰۰۹	کنفرانس بین‌المللی مهندسی طراحی	اگزواسلکتون الاستیک برای کمک به دویدن[1]	انجمن مهندسان مکانیک آمریکا[2]	افزایش کارایی در دویدن	اگزواسکلتون الاستیک طراحی شده است تا با ذخیره و آزادسازی انرژی در حرکت دویدن به انسان کمک کند. این دستگاه می‌تواند بار تحرک را کاهش داده و به بهبود کارایی دویدن کمک نماید.	[۶۴]	شکل (۳ط)
۲۰۱۰	نمایشگاه‌ها و کنفرانس‌های علمی در زمینه رباتیک و توانبخشی	سیستم ارزیابی عملکرد حرکت[3]	توسعه‌یافته توسط گروه تحقیقات دانشگاه تِکنولوژی دلفت[4]	توانبخشی و ارزیابی عملکرد حرکتی	ربات LOPES برای کمک به بازآموزی و توانبخشی بیماران مبتلا به سکته مغزی و دیگر اختلالات حرکتی مرتبط با پاها طراحی شده است.	[۱۵]	شکل (۳ ی)

۲-۴- وضعیت فعلی ربات‌های پوشیدنی (سال ۲۰۱۰ تاکنون)

اگزواسکلتون‌ها پس از سال ۲۰۱۰ تحولات چشمگیری را در حوزه‌های مختلف تجربه کردند. این فناوری نه‌تنها در توان‌بخشی پزشکی، بلکه در صنایع نظامی، ساخت‌وساز، و کاربردهای روزمره گسترش یافت. جدول ۳، تاریخچه توسعه اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه به صورت مرحله‌ای و بر اساس رویدادهای مهم به تفکیک بازه‌های زمانی مشخص شده است. این جدول به خوبی روند پیشرفت این فناوری را از مراحل ابتدایی تا به حال منعکس می‌کند.

روسیه در سال ۲۰۱۶ اسکلت بیرونی اگزواتلت[5] [۶۷]، را به بازار عرضه کرد. این اگزواسکلتون برای توان‌بخشی بیماران طراحی شده و در کمک به افرادی که دچار سکته مغزی یا آسیب نخاعی شده‌اند، نقش دارد. شرکت ای-روباتیکس[6] اسکلت بیرونی ای-واک[7] را معرفی کرد که کاربردهای گسترده‌ای در توان‌بخشی و صنایع مختلف دارد. دانشگاه فناوری هاربین[8] HIT-LEX را توسعه داد که به منظور کمک به افراد دارای ناتوانی حرکتی و نیز کاربردهای صنعتی طراحی شده است [68]. در سال ۲۰۱۸ شرکت فرانسوی واندرکرفت[9] اگزواسکلتون آتالانت[10] [۶۹]، را معرفی کرد که تمرکز آن بر توان‌بخشی و کمک به افراد دچار محدودیت حرکتی بود. این دستگاه به‌طور خاص برای شبیه‌سازی حرکات طبیعی بدن طراحی شده است. شرکت فناوری رباتیک هانگژو[11] از چین [۵]، اسکلت بیرونی UGO را ارائه کرد که قابلیت‌هایی نظیر کمک به بلند کردن بارهای سنگین و کاربرد در صنایع را فراهم می‌آورد. شرکت هوش فوریه[12] اسکلت بیرونی اکسوموتوس[13] را در سال ۲۰۱۹ معرفی کرد که علاوه بر کاربردهای پزشکی در توان‌بخشی، در صنایع مختلف نظیر ساخت‌وساز و لجستیک نیز به کار می‌رود. این ربات قابلیت کاهش بار کاری انسان‌ها و تعامل طبیعی با اشیاء را دارد. موسسه ویس هاروارد[14] اسکلت بیرونی نرم به نام سافت

[1] Elastic exoskeleton to assist running
[2] American Society of Mechanical Engineers (ASME)
[3] LOPES (LOcomotion Performance Evaluator System)
[4] Delft University of Technology
[5] Exoatlet
[6] Ai-robotics
[7] AiWalk
[8] Harbin Institute of Technology
[9] Wandercraft
[10] Atalante
[11] Hangzhou Roboct Technology
[12] Fourier Intelligence
[13] ExoMotus
[14] Harvard's Wyss

ACCEPTED MANUSCRIPT

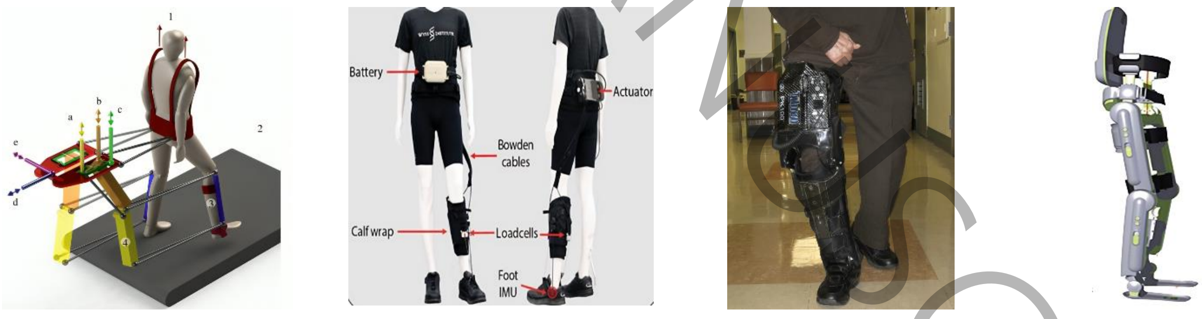
اکسوویت[1] را توسعه داد. این فناوری که به عنوان لباس پوشیدنی نرم شناخته می‌شود [۷۰]، از مواد سبک و انعطاف‌پذیر ساخته شده و برای کاهش محدودیت‌های ناشی از وزن و اندازه اگزواسکلتون‌های سنتی طراحی شده است. این ربات پوشیدنی شامل ترکیبی از سنسورهای فشار هایپرالاستیک[2] و سنسورهای واقع در اطراف باسن، ساق پا و مچ پا است. که توسط گیره‌ها محکم شده‌اند. در شکل (۴ ح) ربات پوشیدنی نرم نشان داده شده است. در این ربات، برای انتقال گشتاور به مفاصل، آن را از مواد انعطاف‌پذیر و نرم استفاده کرده‌اند [۷۰]. شرکت رباتیک سارکوس[3] [۷۱]، ربات رایتون اکسوس۲ [4]، را توسعه داد. این اسکلت بیرونی به سربازان اجازه می‌دهد بارهای سنگین را بلند کنند و حرکت طبیعی بدن را حفظ کنند. در شکل (۴ ر)، ربات رایتون اکسوس نشان داده شده است. توسعه این ربات به دلیل عملکرد ظرفیت کم باتری، محدود شده است [۷۱].

جدول۳: تاریخچه توسعه اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه

بازه زمانی	رویداد مهم	جزئیات
اواخر دهه ۱۹۶۰	شروع تحقیقات اولیه	اولین تلاش‌ها برای ساخت اگزواسکلتون‌های پایین تنه با هدف کمک به افراد دارای معلولیت در مؤسسه میهایلو پوپین صربستان آغاز شد.
دهه ۱۹۷۰	توسعه بیشتر	ادامه تحقیقات و توسعه در زمینه اگزواسکلتون‌های پایین تنه در کشورهای مختلف، از جمله ایالات متحده، با هدف کاربردهای نظامی و پزشکی انجام شد.
دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰	پیشرفت‌های قابل توجه	بهبود در طراحی و ساخت اگزواسکلتون‌ها، استفاده از مواد سبک‌تر و قوی‌تر، و پیشرفت در سیستم‌های کنترل.
دهه ۲۰۰۰	توسعه تجاری	برخی شرکت‌ها شروع به تولید تجاری اگزواسکلتون‌های پایین تنه برای مصارف پزشکی و صنعتی کردند.
دهه ۲۰۱۰ تاکنون	انقلاب در فناوری	پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه هوش مصنوعی، حسگرها، و باتری‌ها منجر به تولید اگزواسکلتون‌های هوشمند و کارآمدتر شده است. این اگزواسکلتون‌ها قادر به یادگیری از حرکات کاربر و تطبیق خود با نیازهای فردی هستند. همچنین، استفاده از این فناوری در زمینه‌های مختلفی مانند توانبخشی، ورزش و صنعت گسترش یافته است.

Table 3. Development history of lower-limb exoskeletons

از سال ۲۰۱۰ تاکنون، توسعه اگزواسکلتون‌ها به سمت کاهش وزن، افزایش بهره‌وری انرژی، و گسترش کاربردها در حوزه‌های مختلف پیش رفته است. این ربات‌ها نه‌تنها به افراد ناتوان کمک می‌کنند تا زندگی مستقلی داشته باشند، بلکه به‌عنوان ابزاری کارآمد در صنایع و کاربردهای نظامی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. پیشرفت‌های جدید مانند اسکلت‌های بیرونی نرم نشان‌دهنده تمرکز بر طراحی‌های کاربرمحور و کاهش محدودیت‌های سنتی است.



الف   ب   ج   د

[1] Soft Exosuit
[2] Hyperelastic
[3] Sarcos
[4] Raython XOS2

ACCEPTED MANUSCRIPT

ACCEPTED MANUSCRIPT

ه	ر	ح

شکل۴: وضعیت فعلی ربات‌های پوشیدنی. الف: اگزواسکلتون ReWalk. ب: اگزواسکلتون Bionic Leg [۷۲]. ج: اگزواسکلتون نرم[1] [۷۳, ۷۴]. د: ربات LOPES[2] II [۷۵]. ه: نسخه پیشرفته ری واک [۷۶, ۷۷]. ر: ربات پوشیدنی رایتون اکسوس۲ [۷۱]. ح: سافت اکسوویت [۷۰]

Figure 4. Current state of exoskeletons. (a) ReWalk Exoskeleton. (b) Bionic Leg Exoskeleton. (c) Soft Exoskeleton. (d) LOPES II Robot. (e) Advanced version of ReWalk. (f) Raytheon XOS 2. (g) Soft ExoSuit.

جدول۴: بررسی تحولات مهم اگزواسکلتون‌های پایین تنه در دهه‌های ۲۰۱۰ تا کنون

Table 4. Review of key developments in lower-limb exoskeletons from the 2010s to the present

سال	رویداد	نام دستگاه	شرکت تجاری	نوع کاربرد	توضیحات	منابع	عکس ربات
۲۰۱۱	عرضه تجاری	ری واک[3]	شرکت آرگو مدیکال تکنولوژیز (ری‌واک رباتیکس)[4]	توانبخشی افراد با آسیب نخاعی	ری واک یک اگزواسکلتون رباتیک قابل حمل است که با استفاده از سنسورها و موتورها به کاربران کمک می‌کند تا به طور مستقل حرکت کنند.	[۷۸] [۷۶]	شکل (۴ الف)
۲۰۱۴	تاثیر آموزش راه رفتن با کمک یک اورتز زانوی رباتیک	Bionic Leg	AlterG	توانبخشی و کمک حرکتی برای افرادی که مشکلات حرکتی دارند	این ربات دارای حسگرهای حس‌کننده موقعیت و سرعت و موتورهای الکتریکی است که به حرکت مفاصل پا کمک می‌کند. این ربات با ایجاد نیروی مکانیکی به کاربر کمک می‌کند تا در انجام حرکات مختلف مانند راه رفتن و بالا رفتن از پله‌ها تعادل خود را حفظ کرده و توانبخشی مؤثرتری داشته باشد.	[۷۲]	شکل (۴ ب)
۲۰۱۷	دستگاه رباتیک Exosuit	اگزواسکلتون نرم[5]	توسط تیمی از مؤسسه Wyss در دانشگاه هاروارد طراحی و ساخته شده است	توانبخشی، کمک به راه رفتن بیماران دچار سکته مغزی	اگزواسکلتون نرم و سبک طراحی شده به بیماران دچار ضایعه پای کمیایی پس از سکته مغزی کمک می کند. ویژگی‌های طراحی آن شامل این ابزار به منظور بهبود حرکات طبیعی مچ پا طراحی شده و به تسهیل حرکت بیماران کمک می‌کند.	[۷۶, ۷۸]	شکل (۴ ج)
۲۰۱۸	معرفی نسخه بهبودیافته	LOPES II	دانشگاه تونته[6]	توانبخشی بیماران با مشکلات حرکتی	به عنوان یک LOPES II ربات توانبخشی برای کمک به بازآموزی راه رفتن در بیماران مبتلا به سکته یا آسیب‌های نخاعی طراحی شده است. این دستگاه از کنترل‌های تطبیقی استفاده می‌کند تا	[۷۶]	شکل (۴ د)

[1] Soft Robotic Exosuit
[2] Lower Extremity Powered ExoSkeleton
[3] ReWalk
[4] Argo Medical Technologies (ReWalk Robotics)
[5] Soft Robotic Exosuit
[6] University of Twente[7] ReWalk

	LOPES				به بیمار کمک کند الگوهای طبیعی راه رفتن را بازیابی کند.		
۲۰۲۰	تجاری و پیشرفته شده نسخه قبل	ری واک[1]	ری‌واک رباتیک	ایمنی و امکان سنجی	پیشرفته شده نسخه قبل	[۷۶]	شکل (۴ د)

۳- دسته‌بندی ربات‌های پوشیدنی

ربات‌های پوشیدنی یا اگزواسکلتون‌ها دستگاه‌های مکانیکی پیشرفته‌ای هستند که به منظور تقویت توانایی‌های فیزیکی یا کمک به افرادی با محدودیت‌های حرکتی طراحی شده‌اند. یکی از مهم‌ترین زیرمجموعه‌های این فناوری، اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه است که برای حمایت و تقویت عضلات پا و لگن مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه از نظر طراحی، به‌ویژه در تعداد درجات آزادی و نوع پیکربندی محرک‌ها، تنوع بالایی دارند. مدل‌های ساده‌تر ممکن است تنها یک درجه آزادی داشته باشند، در حالی که مدل‌های پیچیده‌تر می‌توانند دارای بیش از ده درجه آزادی باشند و به طور کامل با ساختار اندام‌های تحتانی هماهنگ شوند. این ربات‌ها همچنین بر اساس نوع عملگر (غیرفعال، نیمه‌فعال، موتوردار، هیدرولیکی، پنوماتیکی) یا منبع انرژی (اتصال مستقیم به برق، باتری‌محور، غیرفعال) طبقه‌بندی می‌شوند. بر اساس پژوهش‌های انجام‌شده، اگزواسکلتون‌ها به طور کلی به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

۱. اگزواسکلتون‌های تقویت‌کننده عملکرد: این نوع اگزواسکلتون‌ها برای افزایش قدرت، چابکی و تحمل کاربران طراحی شده‌اند و کاربردهای عمده آن‌ها در صنایع سنگین و نظامی است. این دستگاه‌ها با بهره‌گیری از محرک‌های قدرتمند، کاربران را قادر می‌سازند وظایف سنگین را به‌طور مؤثرتر و برای مدت طولانی‌تر انجام دهند.

۲. اگزواسکلتون‌های توان‌بخشی: این اگزواسکلتون‌ها به افرادی که به دلیل آسیب‌های نخاعی، سکته مغزی یا بیماری‌های عصبی دچار مشکلات حرکتی شده‌اند، کمک می‌کنند. این دستگاه‌ها با ارائه پشتیبانی و هدایت حرکات، فرایند بازتوانی حرکتی را تسریع می‌کنند. حسگرهای پیشرفته‌ای که برای تشخیص قصد حرکت کاربر طراحی شده‌اند، از ویژگی‌های بارز این دسته هستند.

۳. اگزواسکلتون‌های جایگزین عملکرد: برای افرادی که توانایی حرکت اندام‌های خود را به‌طور کامل از دست داده‌اند، این اگزواسکلتون‌ها به‌عنوان یک اندام مصنوعی عمل می‌کنند و امکان انجام فعالیت‌های روزمره را برای آن‌ها فراهم می‌سازند.

پوپوویچ[2] [۷۹]، ربات‌های پوشیدنی را به چهار دسته کلی تقسیم کرده است: پایین‌تنه، بالاتنه، دست/پاها و کل بدن. تمرکز این مقاله بر اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه است که در مفاصل ران، زانو و مچ پا به کار می‌روند. این ربات‌ها بر اساس حوزه کاربرد خود نیز به چهار گروه اصلی تقسیم می‌شوند:

۱. مصرف‌کننده: طراحی‌شده برای فعالیت‌های روزمره یا کمک به ورزشکاران، مانند مدل اگزواسکلتون Ski-Mojo[۸۰].

۲. صنعتی: به منظور افزایش توانایی‌ها و کاهش خستگی یا صدمات در کارهای تکراری.

۳. نظامی: طراحی شده برای بهبود توان رزمی و کاهش خستگی هنگام حمل بارهای سنگین در مسافت‌های طولانی (مانند HULC [۶۰]).

۴. پزشکی: بهبود توانایی حرکتی افراد مبتلا به اختلالات حرکتی از طریق توانبخشی و کمک به فعالیت‌های روزانه [۷۵].

در حوزه پزشکی، طراحی اگزواسکلتون‌ها به دلیل تنوع در اختلالات حرکتی بیماران، پیچیدگی بیشتری دارد. این تنوع، ارائه پشتیبانی و ثبات مناسب را دشوار می‌سازد [۸۱]. بر اساس بررسی سیوی[3] و همکاران [5] و همچنین تحقیقات مرتبط توسط

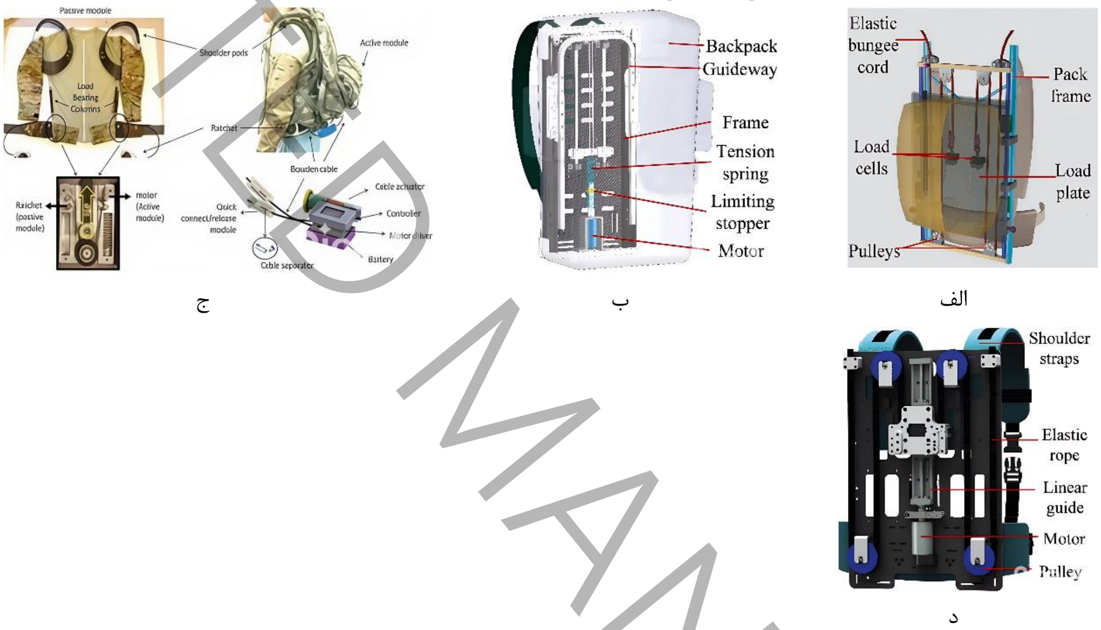
[1] ReWalk
[2] Popovic
[3] Siviy

ACCEPTED MANUSCRIPT

لی[1] و همکاران [۸۲]، و سایر منابع علمی، این دستگاه‌ها به طور کلی بر اساس استراتژی کمکی آن‌ها به چهار دسته اصلی طبقه‌بندی می‌شوند:

۳-۱- کاهش نیروی اینرسی بار

یکی از استراتژی‌های کلیدی در طراحی اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه، کاهش نیروی اینرسی بار است [۸۳-۹۰]، اتصال محکم بار به تنه کاربر باعث می‌شود که بار تقریباً هم‌زمان با حرکت بدن جابه‌جا شود. این اتصال، اگرچه به‌طور کلی عاملی مثبت برای حفظ پایداری در نظر گرفته می‌شود، اما باعث می‌شود که مسیر حرکت بار و تنه در هنگام راه‌رفتن به شکل یک موج سینوسی نوسان کند [۹۱]. این حرکت نوسانی باعث ایجاد نیروی اینرسی می‌شود که همراه با نیروی استاتیک ناشی از وزن بار، فشار مضاعفی بر بدن وارد می‌کند. برای کاهش نیروی اینرسی، چندین دستگاه طراحی شده‌اند که هدف آن‌ها ایجاد حرکت نسبی بین بار و تنه است. این راهکار باعث می‌شود نیروی تعامل بین بار و بدن در حین راه‌رفتن کاهش یابد. مطالعات انجام‌شده در این زمینه، بر اساس جهت هدف نیروی اینرسی به سه دسته تقسیم می‌شوند: کاهش نیروی عمودی [۸۲-۸۵]، کاهش نیروی جلو-عقب [۸۶]، وکاهش نیروی داخلی-خارجی [۸۷].



شکل ۵: دستگاه هایی برای کاهش نیروی اینرسی بار. الف: یک کوله پشتی الاستیک [۸۹] ب: کوله پشتی با سفتی قابل تنظیم توسط موتور [۹۲]. ج: سیستم کنترل فعال مبتنی بر شتاب‌سنج [۸۸]. د: یک کوله پشتی با شتاب بار کنترل شده توسط موتورها [۸۳]

Figure 5. Devices for reducing inertial load forces. (a) An elastic backpack. (b) A backpack with motor-adjustable stiffness. (c) An active control system based on an accelerometer. (d) A backpack with motor-controlled load acceleration.

نمونه‌هایی از دستگاه‌های کاهش نیروی اینرسی توسط روم[2] و همکاران [۸۹]، یک کوله‌پشتی الاستیک طراحی کردند که در آن بار به‌وسیله‌ی یک بند لاستیکی بسیار انعطاف‌پذیر، در قاب کوله‌پشتی معلق شده است شکل (۵ الف). در این سیستم، فرکانس طبیعی سیستم جرم-فنر (متشکل از بند لاستیکی و بار) بسیار کمتر از فرکانس گام کاربر است. این طراحی موجب کاهش قابل‌توجه دامنه نوسان عمودی بار شده و در نتیجه نیروی اوج وارد بر شانه‌ها کاهش می‌یابد. مطالعات دیگر [۸۵, ۹۰]، نشان داده‌اند که اتصال الاستیک بین بار و تنه، با استفاده از فنرهای مکانیکی شبیه‌سازی شده و نتایج اولیه نشان داده‌اند که نیروی تعامل به‌طور مشابه کاهش یافته است. برای توصیف خاصیت فنری این سیستم‌ها، مقادیر بهینه‌ای برای سفتی و میرایی پیشنهاد شده‌اند که قابلیت تنظیم تعامل دینامیکی میان بار و الگوی حرکتی انسان را فراهم می‌کنند. در پژوهش‌های پیشرفته‌تر،

[1] Li
[2] Rome

ACCEPTED MANUSCRIPT

از کنترل فعال برای تنظیم سفتی و میرایی به‌منظور انطباق با سرعت‌های مختلف پیاده‌روی استفاده شده است. به‌عنوان مثال، با استفاده از موتورها، طول مؤثر فنرها به‌صورت فعال تنظیم می‌شود تا نیروی تعامل کاهش یابد [۸۴, ۹۲] شکل (۵ ب). این روش مکملی برای فنرهای غیرفعال به‌شمار می‌رود و می‌تواند فشار بار وارده بر بدن را به‌طور مؤثری کاهش دهد. پارک[1] و همکاران [۸۸] با استفاده از یک سیستم کنترل فعال مبتنی بر شتاب‌سنج، توانستند نوسانات عمودی بار را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند. این کاهش نوسانات منجر به کاهش مصرف انرژی و کاهش فعالیت عضلات پا شد شکل (۵ ج). همچنین، هه[2] و همکاران [۸۳] نیز با رویکرد مشابه، کاهش معناداری در شتاب بار و هزینه متابولیکی گزارش کردند. علاوه بر کنترل نوسانات عمودی، تأثیر حرکت نسبی بار در جهات جلو-عقب و داخلی-خارجی نیز مورد بررسی قرار گرفته است شکل (۳-د). لی[3] و همکاران [۸۶]، کاهش نیروی واکنش زمین را با استفاده از فنرهای جلو-عقب گزارش کردند. مارتین[4] و همکاران [۸۷]، افزایش هزینه متابولیکی و کاهش عرض گام را در نتیجه حرکت جانبی بار مشاهده کردند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که کنترل حرکت نسبی بار، اگرچه مزایای بسیاری مانند کاهش نیروی تعامل و مصرف انرژی دارد، اما می‌تواند تأثیرات پیچیده‌ای بر عملکرد و فیزیولوژی انسان داشته باشد. طراحی و بهینه‌سازی این سیستم‌ها نیازمند درک دقیق از تعامل میان حرکت بار و بدن است تا حداکثر کارایی و راحتی برای کاربران فراهم شود [۹۳].

۳-۲- انتقال وزن بار به زمین

یکی از اهداف کلیدی در طراحی اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه، کاهش فشار وارده بر بدن انسان هنگام حمل بارهای سنگین است. استراتژی انتقال بار به زمین به عنوان یکی از موثرترین روش‌ها برای دستیابی به این هدف، شامل کاهش نیروهای واکنش زمین و گشتاورهای مفصلی بوده و در نهایت منجر به کاهش فعالیت عضلانی و مصرف انرژی متابولیک می‌شود [۹۴-۱۰۳]. در این بخش، انواع مکانیزم‌های انتقال بار به زمین بررسی شده است.

۱. انتقال مستقیم بار به زمین: این روش شامل استفاده از دستگاه‌هایی است که بار را بدون اتصال مستقیم به بدن به زمین منتقل می‌کنند. این دستگاه‌ها اغلب به کوله‌پشتی متصل می‌شوند و با بهره‌گیری از مکانیزم‌هایی شبیه به پا یا چرخ، وزن را به زمین انتقال می‌دهند [۵, ۹۸, ۹۹, ۱۰۴]. دستگاه چرخ‌دار شرکت Tal و Hadas در اسرائیل که از یک میله قابل تنظیم متصل به چرخ غیرفعال بهره می‌برد شکل (۶ الف). اگرچه منجر به کاهش فشار روی شانه‌ها شد، اما نتوانست به‌طور معنی‌داری هزینه متابولیکی را کاهش دهد [۹۸, ۱۰۵]. این میله به گونه‌ای طراحی شده که به صورت دستی تنظیم می‌شود تا با ارتفاع افراد مختلف سازگار باشد، اما در حین راه رفتن ثابت باقی می‌ماند. عملکرد این دستگاه کاهش فشار وارده بر شانه‌ها و نیروی عمودی عکس‌العمل زمین[5] است که منجر به کاهش درد شانه و فشار ناشی از بندهای کوله‌پشتی گزارش شده است [۱۰۵]. با این وجود، آزمایش‌ها نشان دادند که مصرف اکسیژن و ضربان قلب هنگام استفاده از این دستگاه تفاوت معناداری با کوله‌پشتی‌های نظامی سنتی ندارد [98]. همچنین، چالش‌هایی در حفظ تعادل به هنگام حرکت گزارش شد. سیستم‌های مشابه با کنترل فعال طول میله [۹۹] که این طراحی با کنترل دقیق طول میله، توانست نیروی عمودی وارد بر بدن را ۳۲,۲۹٪ و هزینه متابولیکی را ۱۸,۹۲٪ کاهش دهد. شیانگ[6] و همکارانش [۱۰۶]، یک اندام رباتیک به نام Powered Super Tail پیشنهاد کردند که دستگاهی با استفاده از گروه‌های سه‌چرخ و کنترل فعال، توانست ۲۰,۸۵٪ از هزینه متابولیک را کاهش دهد.

۲. انتقال بار از طریق کفش: در این روش، بار مستقیماً به زمین منتقل شده و در این حالت، بار به عنوان مسیری برای انتقال مستقیم به زمین عمل می کند و هیچ گونه اتصالی به اندام های تحتانی (ران و ساق پا) [۹۴, ۹۷, ۱۰۱, ۱۰۲] ندارد. در این سناریو، پاهای ربات مراحل حرکتی را دنبال کرده و عمدتا از بار در طول فاز ایستادن در هنگام راه رفتن پشتیبانی می کنند.

[1] Park
[2] He
[3] Li
[4] Martin
[5] Ground Geaction Forc (GRF)
[6] Xiang

ACCEPTED MANUSCRIPT

دایک[1] و همکاران [۹۴]، اسکلت خارجی اکسوبادی[2] با مفاصل زانوی مجهز به پیستون‌های هیدرولیکی، فشار وارده بر بدن را ۳۰٪ کاهش داد. با این حال، مصرف اکسیژن و ضربان قلب در حین استفاده از این سیستم افزایش اندکی داشت. اسکلت غیرفعال طراحی‌شده توسط ژو[3] و همکاران [۱۰۳]، با استفاده از کلاچ‌هایی که با الگوی گام انسانی تطبیق پیدا می‌کردند، به‌طور متوسط ۲۴٫۶٪ از بار وارده را کاهش داد.

۳. اگزواسکلتون‌های آنتروپومورفیک: این سیستم‌ها با طراحی مفاصل مشابه اندام تحتانی انسان، بار را به‌صورت غیرفعال یا شبه‌غیرفعال به زمین منتقل می‌کنند [۹۵, ۱۰۰]. اگزواسکلتون اندام تحتانی برکلی (بلکس) شکل (۶ ب) نخستین اسکلت خارجی عملیاتی با چهار درجه آزادی هیدرولیکی که با استفاده از حسگرهای نیرو در کفش، حرکات کاربر را شبیه‌سازی می‌کرد [۹۷]. این سیستم توانایی حرکت با سرعت ۱٫۳ متر بر ثانیه را داشت، اما تأثیرات بیومکانیکی و فیزیولوژیکی آن به‌طور کامل گزارش نشده است. لو[4] و همکاران، سیستمی موسوم به اگزواسکلتون آنتروپومتریک [5]را معرفی کردند که این سیستم با استفاده از موتورهای محرک و کنترل مبتنی بر نقطه لحظه صفر[6] پایداری دینامیکی را در حین حرکت حفظ می‌کرد [۱۰۱]. وانگ[7] و همکاران [۱۰۲]، یک اسکلت خارجی اندام تحتانی شکل (۶ ج) با ساختار موازی پیشنهاد دادند که شامل دو سیلندر برقی تلسکوپی برای هر پا بود. این دستگاه از یک روش کنترل نیرو بهره می‌برد تا بتواند حرکات انسانی از جمله تاب‌دادن پا، چمباتمه‌زدن و راه‌رفتن را دنبال کند. این اسکلت فشار وارده بر کف پا را کاهش داد، اما در انتقال فازهای گام، نیروی ضربه‌ای زیادی ایجاد کرد. والش[8] و همکاران [۵۴]، این اسکلت خارجی با فنرهای مفصلی و دمپرهای متغیر شکل (۶ د) ، ۸۰٪ از بار را به زمین منتقل کرد، در حالی که تنها ۱۰٪ افزایش در هزینه انرژی مشاهده شد. اگرچه سیستم‌های انتقال بار به زمین در اگزواسکلتون‌ها دستاوردهای قابل‌توجهی داشته‌اند، چالش‌های متعددی همچنان وجود دارد. این چالش‌ها شامل افزایش هزینه‌های متابولیک در برخی طراحی‌ها، نیاز به بهبود سیستم‌های کنترلی برای هماهنگی با حرکات کاربر و مشکلات تعادل در حین حرکت هستند.

شکل۶: دستگاه هایی برای انتقال وزن بار به زمین. الف: دستگاه مبتنی بر چرخ [۱۰۵]. ب: BLEEX [۹۷]. ج: اگزواسکلتون اندام تحتانی با ساختار موازی [۱۰۲]. د: اگزواسلکتون با فنرهای مفصلی و دمپرهای متغیر [۵۴]

Figure 6. Devices for transferring load weight to the ground. (a) Wheel-based device. (b) BLEEX. (c) Lower-limb exoskeleton with a parallel structure. (d) Exoskeleton with joint springs and variable dampers.

۳-۳- کمک به مفاصل انسانی

یکی از راهبردهای کلیدی در طراحی اگزواسکلتون‌ها، کمک مستقیم به مفاصل اندام تحتانی انسان است [۱۰۷-۱۱۶]. این دستگاه‌ها با ارائه گشتاور و نیروی کمکی به مفاصل، نیاز به توان تولیدشده توسط عضلات را کاهش می‌دهند. این قابلیت، فشار

[1] Dijk
[2] Exobuddy
[3] Zhou
[4] Low
[5] Anthropometric Exoskeleton System (NTU-LEE)
[6] Zero-Moment-Point (ZMP)
[7] Wang
[8] Walsh

ACCEPTED MANUSCRIPT

وارده بر عضلات را کم کرده و از خستگی زودرس جلوگیری می‌کند، بدون آنکه وزن بار به زمین منتقل شود یا ساختار کوله‌پشتی تغییری کند [۵]. بسته به نوع مفصل هدف، این دستگاه‌ها به چهار دسته کمک به مفاصل مچ پا [۱۱۱, ۱۱۶]، مفاصل زانو [۱۱۳, ۱۱۵]، مفاصل لگن [۱۰۸, ۱۱۰, ۱۱۴]، یا چندین مفصل [۱۰۷, ۱۰۹, ۱۱۲] تقسیم می‌شوند.

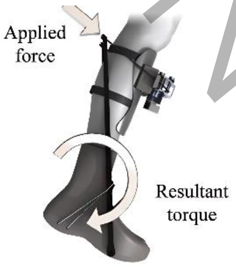
۱. کمک به مفصل مچ پا: مونی[1]و همکاران [۱۱۷]، یک اگزواسکلتون مستقل و باتری محور برای مچ پا طراحی کردند که گشتاور لازم برای تقویت حرکت مچ پا در هنگام راه رفتن با بار را فراهم می‌کند شکل (۷ ب). آزمایش‌ها نشان دادند که این دستگاه با بار ۲۳ کیلوگرمی، هزینه متابولیک راه رفتن را تا ۸ درصد کاهش می‌دهد. این اولین اگزواسکلتون پایین‌تنه مستقل بود که چنین کاهشی را ثبت کرد. گاله[2] و همکاران [۱۱۱]، سیستمی مبتنی بر عضلات پنوماتیک را معرفی کردند که در راه رفتن با بار و در شیب، توانایی حمل وزن کاربران را تا ۷,۰۷ کیلوگرم افزایش داد. شی[3] و همکاران [۱۱۶]، اگزواسکلتونی طراحی کردند که نیرو را از موتورهای کوله‌پشتی به مچ پا انتقال می‌دهد. این دستگاه کاهش هزینه متابولیک را نشان داد، اما با افزایش وزن بار، بازده مکانیکی کاهش یافت.

۲. کمک به مفصل زانو: اگزواسکلتون روبونی[4] توسط پرت[5] و همکارانش [۱۱۵]، طراحی شد که از عملگرهای الاستیک سری بهره می‌برد شکل (۷ ج). این دستگاه هنگام بالا رفتن از پله‌ها و حمل بار ۶۰ کیلوگرمی، مقاومت زانو را کاهش داده و تعداد خم‌شدن‌های قابل‌اجرا را افزایش داد. یک اگزواسکلتون تجاری زانو به نام Knee Stress Release Device توسط مک‌لین[6] و همکارانش [۱۱۳]، اگزواسکلتونی برای زانو ارزیابی کردند که تنها در شرایط شیب ۱۵ درجه و بدون بار توانست هزینه متابولیک را کاهش دهد؛ اما در سطوح صاف، این هزینه افزایش یافت.

۳. کمک به مفصل لگن: دینگ[7]و همکارانش [۱۱۰] با طراحی یک اگزوسوت برای باز شدن مفصل لگن، کاهش هزینه متابولیک تا ۸,۵ درصد را نشان دادند شکل (۷ د). نسخه‌ای مستقل از این دستگاه با منبع تغذیه داخلی پس از تمرینات مکرر، این کاهش را به ۱۰,۵ درصد رساند. چن[8] و همکارانش [۱۰۸]، اگزوسوتی نرم توسعه دادند که به حرکات باز و بسته شدن لگن کمک کرده و هزینه متابولیک را تا ۸,۵۳ درصد کاهش داد.

۴. کمک به چندین مفصل: یک اگزوسوت چندمفصلی که به باز شدن لگن، خم‌شدن زانو و مچ پا کمک می‌کند، با استفاده از محرک‌های خارجی و سیستم‌های هوشمند طراحی شده است [۱۰۹]. این دستگاه توانست هزینه متابولیک کاربران را هنگام حمل بار ۲۳,۸ کیلوگرمی تا ۱۴,۶ درصد کاهش دهد. اگزواسکلتون پایین‌تنه با کابل‌های مکانیکی، انتقال نیرو از طریق کابل‌های مکانیکی برای مفاصل لگن، زانو و مچ پا معرفی شده است [۱۰۷, ۱۱۸] شکل (۷ ه). این دستگاه با تنظیم هوشمند نیروهای کمکی، هزینه متابولیک راه رفتن را تا ۴۸ درصد کاهش داده است.

الف

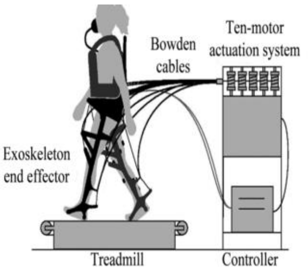


ب

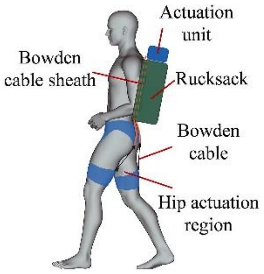
ج

[1] Mooney
[2] Galle
[3] Xie
[4] RoboKnee
[5] Pratt
[6] MacLean
[7] Ding
[8] Chen

ACCEPTED MANUSCRIPT



ه



د

شکل۷: دستگاه هایی برای کمک به مفاصل انسان. الف: شماتیک اگزواسکلتون هدف گیری مفصل در کابران سالم و بیمار[۵]. ب: اگزواسکلتون مچ پا مستقل [۱۱۷]. ج: اگزواسکلتون RoboKnee [۱۱۵]. د: یک لباس بیرونی متصل به اکستنشن لگن [۱۱۰] ه: یک لباس بیرونی متصل به اکستنشن لگن [۱۰۷, ۱۱۸].

Figure 7. Devices for assisting human joints. (a) Schematic of a joint-targeting exoskeleton for healthy and impaired users. (b) Standalone ankle exoskeleton. (c) RoboKnee Exoskeleton. (d) An outer suit connected to hip extension. (e) An outer suit connected to hip extension.

۳-۴- انتقال بار و کمک به مفاصل انسانی

یکی از استراتژی‌های کلیدی در طراحی اسکلت‌های خارجی پایین‌تنه، ادغام دو قابلیت اصلی انتقال بار و کمک به مفاصل انسان است [۱۱۹-۱۲۸]. این رویکرد به دلیل مزایای دوگانه آن در کاهش فشار وارده به بدن و بهبود حرکت، به‌طور گسترده در پژوهش‌ها و طراحی‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. انتقال بار، که نیازمند ساختارهای مکانیکی سخت و مستحکم برای توزیع وزن بار به کف کفش‌ها است، معمولاً با استراتژی‌های فعال یا غیرفعال حمایت مفاصل ترکیب می‌شود. این دستگاه‌ها معمولاً از ساختاری مشابه اجزای بدن انسان شامل تنه، ران، ساق پا و پا برخوردارند. با این حال، تفاوت‌هایی در درجه آزادی، تنظیمات محرک، استراتژی‌های حسگری و کنترل میان آنها وجود دارد. از نظر پیکربندی محرک‌ها، این سیستم‌ها به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند: محرک زانو [۱۲۰, ۱۲۴, ۱۲۹, ۱۳۰]، محرک ران-زانو [۱۲۱-۱۲۳, ۱۲۸, ۱۳۱, ۱۳۲]، محرک ران-زانو-مچ پا [۱۱۹] و پیکربندی‌های دیگری مانند محرک‌های اختصاصی برای مفاصل ران یا مچ پا نیز وجود دارند، اما کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

بسیاری از طراحی‌ها تمرکز خود را بر مفصل زانو قرار داده‌اند، زیرا این مفصل نقش کلیدی در پایداری و تحمل وزن دارد. یکی از نمونه‌های برجسته این دسته، سیستم HULC[1] شکل (۸ الف) است. این اسکلت خارجی از یک سیلندر هیدرولیکی بهره می‌برد که نیروی کمکی را به مفصل زانو اعمال می‌کند. در نسخه اولیه این دستگاه، آزمایش‌ها با حمل بار ۴۰ کیلوگرمی نشان دادند که مصرف اکسیژن کاربران تا ۴۰٪ افزایش یافته است که عمدتاً ناشی از وزن بالای دستگاه (۱۵ کیلوگرم) بود [۱۲۹]. بهبود عملکرد اگزواسکلتون با استفاده از استراتژی‌های کنترلی پیشرفته مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات زیر نمونه‌هایی از پیشرفت‌های مهم در این زمینه هستند:

کائو[2] و همکاران [۱۲۰]، یک کنترلر بازخورد متناسب-مشتق[3] معرفی کردند که انتقال مؤثر بار به زمین را تسهیل کرد. لانگ[4] و همکاران [۱۳۰]، یک استراتژی کنترل ترکیبی مبتنی بر موقعیت و تعقیب حالت ارائه دادند که عملکرد بهینه‌ای در آزمایش‌های حرکتی نشان داد. لی[5] و همکاران[۱۲۴]، از یک کنترل مبتنی بر مرکز فشار و موقعیت استفاده کردند که فعالیت عضلانی را افزایش داد و کیفیت حرکت کاربران را بهبود بخشید. برخی از طراحی‌ها با کاهش پیچیدگی سیستم محرک، اسکلت‌های خارجی کم‌عملگر را ارائه داده‌اند. به‌جای استفاده از سیلندرهای هیدرولیکی، این سیستم‌ها با موتورهای الکتریکی سبک‌تر عمل می‌کنند. برای مثال، سیستمی طراحی شد که با استفاده از حسگرهای محیطی و نیرو، قصد حرکت کاربر را

---

[1] The Human Universal Load Carrier (HULC)
[2] Cao
[3] Proportional-Derivative (PD)
[4] Long
[5] Li

ACCEPTED MANUSCRIPT

شناسایی می‌کرد و نیروی کمکی متناسبی به مفصل زانو اعمال می‌کرد. آزمایش‌ها نشان دادند که این طراحی باعث کاهش فعالیت عضلات در هنگام راه‌رفتن و بالا رفتن از پله‌ها می‌شود [۱۲۷]. اسکلت‌های خارجی که مفاصل ران، زانو و مچ پا را به‌صورت هم‌زمان فعال می‌کنند، اگرچه پیچیدگی بیشتری دارند، اما مزایای بالقوه بیشتری نیز ارائه می‌دهند. سیستم‌هایی نظیر اگزواسکلتنون هانیانگ[1] با ۷ درجه آزادی برای هر پا طراحی شده‌اند شکل (۸ ب) که شامل سه درجه آزادی در مفصل ران، یک درجه در زانو و سه درجه در مچ پا است [۱۳۱]. در این دستگاه، مفاصل فلکشن، اکستنشن ران و زانو توسط موتورها فعال می‌شوند و از کنترلر PID برای کاهش نیروهای تداخلی استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های حرکتی با بار ۲۳ کیلوگرمی نشان داد که این سیستم به کاهش فعالیت عضلات کمک می‌کند.

پیشرفت‌های اخیر به سمت طراحی سیستم‌های نوآورانه‌ای حرکت کرده است که انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری بیشتری ارائه می‌دهند. به عنوان مثال HIT-LEX با ۶ درجه آزادی طراحی شده است و توانسته در آزمایش‌های اولیه بار ۳۰ کیلوگرمی را به طور مؤثری کاهش دهد [۱۲۸]. اگزواسکلتون HUMA یک اسکلت خارجی سبک‌وزن (۱۰ کیلوگرم) برای حمل بارهای متوسط است که در نسخه‌های بعدی به کاربردهای پزشکی نیز گسترش یافته است [۱۲۳]. BioComEx با استفاده از محرک‌های زیست‌الهام و ساختار حلقه‌بسته مدولار شکل (۸ ج)، عملکرد بهینه‌ای در آزمایش‌های حرکتی نشان داده است [۱۱۹].

ج ب الف

شکل ۸: دستگاه هایی برای انتقال وزن بار و کمک به مفاصل انسان به طور همزمان. الف: سیستم HULC [۱۲۹]. ب: اگزواسکلتنون هانیانگ [۱۳۱]. ج: BioComEx [۱۱۹]

Figure 8. Devices for simultaneous load weight transfer and joint assistance. (a) HULC System. (b) Hanyang Exoskeleton. (c) BioComEx.

۴- چشم‌انداز آینده اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه: چالش‌ها، فرصت‌ها و کاربردهای نوظهور

تحولات فناورانه در طراحی، مواد و سیستم‌های کنترلی، اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه را به آستانه ورود به عرصه‌های بالینی، صنعتی و حتی روزمره رسانده‌اند. امروزه دستگاه‌های تجاری برای توان‌بخشی بالینی در دسترس هستند و اگزواسکلتون‌های تأییدشده توسط سازمان غذا و داروی ایالات متحده[2] می‌توانند توانایی راه‌رفتن را به افرادی بازگردانند که در حالت عادی قادر به راه‌رفتن نیستند. علاوه بر این، دستگاه‌های تحقیقاتی درک بهتری از مکانیزم‌هایی که کاربران می‌توانند از فناوری اگزواسکلتون بهره‌مند شوند، ارائه داده‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که اگزواسکلتون‌ها نه‌تنها به بهبود تحرک کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند اثرات ثانویه مانند کاهش اسپاسم عضلانی و بهبود گردش خون را نیز به همراه داشته باشند. با این حال، پذیرش بالینی و تجاری اگزواسکلتون‌ها همچنان محدود باقی مانده است. مطالعات تصادفی کنترل‌شده[3] در مقیاس بزرگ نتایج قطعی نشان نداده‌اند، به طوری که برخی از راهنماهای بالینی استفاده از اگزواسکلتون‌ها را در برنامه‌های آموزش راه‌رفتن برای بیماران با سکته مغزی مزمن، آسیب نخاعی[4] و آسیب مغزی تروماتیک[5] توصیه نمی‌کنند [۵، ۱۳۳]. از سوی دیگر، چشم‌انداز استفاده از اگزواسکلتون‌ها

[1] Hanyang Exoskeleton Assistive Robot (HEXAR)-CR50
[2] Food and Drug Administration (FDA)
[3] Randomized Controlled Trials (RCT)
[4] Spinal Cord Injury (SCI)
[5] Traumatic Brain Injury (TBI)

ACCEPTED MANUSCRIPT

برای گسترش توانایی راه‌رفتن کاربران سالم هنوز محقق نشده است، و عواملی که باعث می‌شود کاربران این دستگاه‌ها را انتخاب کنند، همچنان یک موضوع مهم و قابل بررسی باقی مانده است. تحقیقات نشان می‌دهد که عواملی مانند راحتی پوشیدن، وزن دستگاه، و سهولت استفاده نقش کلیدی در پذیرش کاربران ایفا می‌کنند. این چالش‌ها، همراه با فرصت‌های جدید در فناوری و طراحی، نشان می‌دهد که اگزواسکلتون‌ها نه تنها در حوزه توان‌بخشی، بلکه در کاربردهای روزمره و تفریحی نیز پتانسیل رشد دارند. توسعه فناوری‌های سبک‌تر و کارآمدتر، بهبود قابلیت تعامل انسان و دستگاه، و کاهش هزینه‌ها، می‌تواند به پذیرش گسترده‌تر این فناوری در آینده منجر شود. با وجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی همچون عدم قطعیت در نتایج مطالعات کلینیکی، هزینه‌های بالا، محدودیت در پذیرش اجتماعی و بالینی، و تعامل پیچیده انسان-ماشین، مانعی جدی در مسیر فراگیر شدن این فناوری هستند. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، نیاز به طراحی سیستم‌هایی است که نه‌تنها عملکرد مکانیکی مناسبی داشته باشند، بلکه به‌صورت هوشمند با کاربر تعامل برقرار کرده و با ویژگی‌های فردی و محیطی سازگار شوند.

۴-۱- فرصت‌های نوظهور

استفاده در کاربردهای صنعتی: اگزواسکلتون‌ها می‌توانند به کاهش خستگی و افزایش بهره‌وری در محیط‌های کاری کمک کنند. در محیط‌های صنعتی که نیاز به انجام کارهای فیزیکی سنگین است، این دستگاه‌ها می‌توانند به عنوان ابزارهایی برای کاهش خستگی عضلانی، افزایش سطح بهره‌وری و بهبود ایمنی شغلی مورد استفاده قرار گیرند. مشاغلی همچون مونتاژ، بسته‌بندی، جابجایی بار، جوشکاری و کار در خطوط تولید از جمله زمینه‌هایی هستند که بیشترین فشار را به اندام تحتانی وارد می‌کنند و به همین دلیل بیشترین پتانسیل بهره‌برداری از این فناوری را دارند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از اگزواسکلتون‌های پشتیبان زانو، ران و کمر در محیط‌های کاری می‌تواند تا ۳۰ الی ۴۰ درصد فشار وارده بر مفاصل را کاهش داده و خستگی عضلات را به‌طور مؤثری کاهش دهد. به‌علاوه، این فناوری می‌تواند به افزایش بهره‌وری کارکنان، کاهش غیبت‌های ناشی از آسیب، و بهبود سلامت بلندمدت نیروی کار بینجامد. هدف اصلی در این حوزه، کاهش آسیب‌های کاری و افزایش دوام و کارایی نیروی انسانی است. مطالعات انجام شده در صنایع خودروسازی نشان می‌دهد که استفاده از اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه در خطوط مونتاژ می‌تواند زمان توقف کار ناشی از خستگی را تا ۲۵ درصد کاهش دهد. تحلیل هزینه استفاده از اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه در محیط‌های صنعتی نشان می‌دهد که علیرغم هزینه اولیه بالا، بازگشت سرمایه در بازه زمانی ۲ تا ۳ سال قابل دستیابی است. کاهش هزینه‌های درمانی ناشی از آسیب‌های شغلی، افزایش بهره‌وری و کاهش مرخصی‌های استعلاجی از عوامل اصلی توجیه‌کننده این سرمایه‌گذاری هستند. پیش‌بینی می‌شود با کاهش هزینه‌های تولید و افزایش رقابت در بازار، استفاده از این فناوری در صنایع متوسط و کوچک نیز گسترش یابد.

کاربردهای تفریحی و ورزشی: این فرصت شامل توسعه اگزواسکلتون‌هایی است که توانایی حرکت کاربران را در فعالیت‌های ورزشی یا تفریحی تقویت می‌کنند. پیشرفت‌های اخیر در مواد سبک‌وزن و محرک‌ها[1] با بازدهی بالا، امکان طراحی دستگاه‌هایی با قابلیت تطبیق پویا با حرکات کاربر را فراهم کرده‌است. این دستگاه‌ها می‌توانند در بهبود عملکرد ورزشکاران، حمایت از فعالیت‌های تفریحی سنگین، و همچنین پیشگیری از آسیب‌ها در فعالیت‌های بدنی پرخطر، مؤثر باشند.

در برخی مطالعات، نمونه‌های اولیه از اگزواسکلتون‌های طراحی‌شده برای دویدن، کوه‌پیمایی، اسکی و تمرینات قدرتی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که نتایج امیدوارکننده‌ای در کاهش خستگی عضلانی و بهبود پایداری در حرکات پیچیده نشان داده‌اند. همچنین این دستگاه‌ها می‌توانند در بازتوانی ورزشکارانی که از آسیب‌های مزمن عضلانی یا مفصلی رنج می‌برند، به‌عنوان ابزار تمرینی با کنترل‌شده و امن مورد استفاده قرار گیرند.

هوش مصنوعی و یادگیری ماشین: بخشی از توسعه اگزواسکلتون‌ها به ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین وابسته است. این فناوری‌ها نقش کلیدی در بهینه‌سازی تعامل میان انسان و ربات ایفا می‌کنند. استفاده از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی[2] و شبکه‌های عصبی عمیق[3]، و سیستم‌های تطبیقی می‌تواند امکان تنظیم خودکار پارامترهای حرکتی و سازگاری با نیازهای فردی کاربران را فراهم آورد. همچنین، ترکیب هوش مصنوعی با رابط‌های مغز-کامپیوتر افق‌های جدیدی

[1] Actuators
[2] Reinforcement Learning (RL)
[3] Deep Neural Networks (DNNs)

ACCEPTED MANUSCRIPT

را برای کاربران با ناتوانی‌های شدید حرکتی می‌گشاید. این ترکیب می‌تواند امکان کنترل مستقیم ربات توسط امواج مغزی را فراهم سازد، که به معنی بازگشت سطحی از کنترل حرکتی حتی برای کاربران مبتلا به فلج کامل است.

در آینده، انتظار می‌رود با توسعه الگوریتم‌های شخصی‌سازی‌شده، اگزواسکلتون‌ها نه‌تنها به‌صورت تطبیقی با وضعیت حرکتی بلکه با شرایط فیزیولوژیکی و روانی کاربر نیز هماهنگ شوند، این روند به‌وضوح نشان می‌دهد که هوش مصنوعی یکی از ستون‌های کلیدی در آینده اگزواسکلتون‌های توان‌بخش و کمکی خواهد بود.

۴-۲- چالش‌های پیش رو

پذیرش بالینی و اجتماعی: یکی از چالش‌های کلیدی، افزایش اعتماد عمومی و متخصصان به این فناوری است. این مسئله نیازمند آموزش مناسب کاربران و متخصصان مرتبط با فناوری اگزواسکلتون‌هاست. از منظر بالینی، بسیاری از متخصصان توان‌بخشی و پزشکان هنوز آشنایی کامل با نحوه عملکرد، مزایا، محدودیت‌ها و شرایط استفاده از اگزواسکلتون‌ها ندارند. این عدم آشنایی می‌تواند به تردید در تجویز این فناوری به بیماران منجر شود. برای رفع این مشکل، برگزاری دوره‌های آموزشی تخصصی، تدوین دستورالعمل‌های بالینی و انجام مطالعات اثربخشی بیشتر ضروری است. در سطح اجتماعی نیز، پذیرش کاربران و خانواده‌های آن‌ها اهمیت زیادی دارد. برخی کاربران به دلیل ظاهر صنعتی یا پیچیدگی کنترل اگزواسکلتون‌ها ممکن است احساس نارضایتی، شرم یا ترس از استفاده در محیط عمومی داشته باشند. این مسئله، به‌ویژه در جوامعی با آگاهی کمتر نسبت به فناوری‌های پوشیدنی، می‌تواند مانع مهمی در مسیر گسترش کاربردها باشد. برای اینکه این دستگاه‌ها به صورت گسترده در مراکز درمانی یا صنعتی مورد استفاده قرار گیرند، باید آگاهی عمومی و تخصصی بیشتری در مورد کاربردها و مزایای آنها ایجاد شود.

کاهش هزینه‌های تولید: قیمت بالای اگزواسکلتون‌ها یکی از موانع مهم در دسترس‌پذیری آنها برای کاربران عادی است. کاهش هزینه تولید و قیمت نهایی می‌تواند به گسترش استفاده از این فناوری کمک کند. یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش این هزینه‌ها، افزایش تولید انبوه و ایجاد اقتصاد مقیاس است. در حال حاضر، بسیاری از تولیدکنندگان این تجهیزات را در مقیاس محدود و به‌صورت سفارشی تولید می‌کنند که منجر به افزایش قیمت نهایی می‌شود. با گسترش بازار و افزایش تقاضا، تولید انبوه می‌تواند هزینه‌ها را به‌شدت کاهش دهد. از سوی دیگر، تحقیقات بر روی مواد سبک‌تر، ارزان‌تر و بادوام‌تر مانند پلیمرهای تقویت‌شده، آلیاژهای خاص و قطعات چاپ سه‌بعدی، می‌تواند جایگزین استفاده از فلزات گران‌قیمت و قطعات پیچیده شود و قیمت تمام‌شده را کاهش دهد. همچنین، ساده‌سازی طراحی مکانیکی و الکترونیکی بدون کاهش عملکرد، می‌تواند به کاهش هزینه‌های ساخت و نگهداری منجر شود. در نهایت، کاهش هزینه‌های تولید نه‌تنها باعث افزایش دسترسی کاربران فردی می‌شود، بلکه زمینه را برای کاربرد گسترده‌تر در حوزه‌های نظامی، صنعتی، ورزشی و خدماتی نیز فراهم می‌سازد.

تحقیقات کلینیکی گسترده‌تر: یکی از چالش‌های مهم در مسیر توسعه و پذیرش اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه، کمبود مطالعات کلینیکی جامع، بلندمدت و با طراحی علمی دقیق است. هرچند پژوهش‌های متعددی در زمینه اثربخشی این فناوری‌ها انجام شده‌اند، اما بسیاری از آن‌ها با محدودیت‌هایی از جمله حجم نمونه پایین، مدت زمان کوتاه مطالعه، یا نبود گروه کنترل معتبر مواجه بوده‌اند. هنوز نیاز به مطالعات کلینیکی جامع و بلندمدت در مورد تأثیرات این دستگاه‌ها وجود دارد. مطالعات کنونی، از جمله مطالعات کنترل تصادفی، محدودیت‌هایی دارند و نتایج قطعی درباره اثربخشی و ایمنی کامل این فناوری ارائه نداده‌اند. توسعه تحقیقات می‌تواند کاربردپذیری و پذیرش این دستگاه‌ها را افزایش دهد.

۵- نتیجه‌گیری

اگزواسکلتون‌های پایین‌تنه به عنوان یکی از پیشرفته‌ترین فناوری‌های پوشیدنی، توانسته‌اند نقش بسزایی در بهبود کیفیت زندگی افراد دارای ناتوانی حرکتی، افزایش توانایی‌های فیزیکی کاربران سالم و تسهیل کارهای صنعتی و نظامی ایفا کنند. این مقاله با بررسی جامع تاریخچه و تحولات این فناوری، پیشرفت‌های کلیدی را از نخستین نمونه‌های آزمایشی در اوایل قرن بیستم تا دستگاه‌های پیشرفته کنونی که از هوش مصنوعی، حسگرهای پیشرفته و مواد سبک استفاده می‌کنند، مورد بحث قرار داد. یکی از نقاط برجسته در این پژوهش، تحلیل دسته‌بندی عملکردی اگزواسکلتون‌ها بود. این فناوری بر اساس اهدافی چون کاهش

ACCEPTED MANUSCRIPT

نیروی اینرسی بار، انتقال وزن به زمین، تقویت مفاصل انسانی و ترکیب این قابلیت‌ها طبقه‌بندی شده و نشان داده که چگونه می‌توان از آن برای بهبود کارایی و کاهش فشار بر کاربران در کاربردهای متنوع استفاده کرد. با وجود موفقیت‌های چشمگیر، چالش‌هایی همچنان پابرجاست. هزینه‌های تولید بالا، پیچیدگی‌های فنی، محدودیت در تطبیق دستگاه با حرکات طبیعی بدن و پذیرش بالینی پایین از جمله عواملی هستند که مانع از گسترش جهانی این فناوری شده‌اند. همچنین، عدم وجود داده‌های کلان و مطالعات تصادفی کنترل‌شده در زمینه تأثیرات بالینی این دستگاه‌ها، از جمله موانعی است که بر سر راه استفاده گسترده‌تر آن در برنامه‌های رسمی توانبخشی قرار دارد. چشم‌انداز آینده اگزواسکلتون‌ها نشان‌دهنده فرصت‌های نوظهور و تحول‌آفرین در این حوزه است. انتظار می‌رود با بهره‌گیری از پیشرفت‌های اخیر در حوزه مواد سبک و منعطف، الگوریتم‌های کنترل تطبیقی و طراحی کاربرمحور، این فناوری به سطح جدیدی از بهره‌وری و کاربردپذیری برسد. در آینده، توسعه دستگاه‌هایی با هزینه پایین‌تر و کارایی بالاتر، همراه با افزایش سازگاری با حرکات طبیعی انسان، می‌تواند زمینه‌ساز پذیرش گسترده‌تر این فناوری در حوزه‌های پزشکی، صنعتی، نظامی و حتی فعالیت‌های روزمره باشد. سرانجام، برای دستیابی به این اهداف، تحقیقات بیشتری مورد نیاز است. بهینه‌سازی طراحی، کاهش وزن و حجم دستگاه‌ها، و ارتقای تعامل انسان و دستگاه از جمله زمینه‌هایی هستند که باید در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرند. از سوی دیگر، پیشرفت در سیستم‌های کنترلی هوشمند و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند تحول بزرگی در توانایی‌های این فناوری ایجاد کند.

۶- منابع

[۱]W. Liu, B. Yin, B. Yan, A survey on the exoskeleton rehabilitation robot for the lower limbs, in: 2016 2nd international conference on control, automation and robotics (ICCAR), IEEE, 2016, pp. 90-94.

[۲]G. Carpino, D. Accoto, N.L. Tagliamonte, G. Ghilardi, E. Guglielmelli, Lower limbs wearable robots for physiological gait restoration: state of the art and motivations, MEDIC. METODOLOGIA DIDATTICA E INNOVAZIONE CLINICA, 21(2) (2013) 72-80.

[۳]L. Zhiqiang, X. Hanxing, L. Weilin, Y. Zheng, Proceeding of Human Exoskeleton Technology and Discussions on Future, MECHANICAL ENGINEERING, 27(3) (2014).

[٤]Z. Li, H. Xie, W. Li, Z. Yao, Proceeding of human exoskeleton technology and discussions on future research, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2.٤٤٧-٤٣٧ (٢٠١٤) ٧

[٥]C. Siviy, L.M. Baker, B.T. Quinlivan, F. Porciuncula, K. Swaminathan, L.N. Awad, C.J. Walsh, Opportunities and challenges in the development of exoskeletons for locomotor assistance, Nature Biomedical Engineering, 7(4) (2023) 456-472.

[٦]F. Pietro, Device for the automatic control of the articulation of the knee applicable to a prothesis of the thigh, in, Google Patents, 1942.

[٧]J. Jansen, Phase I report: DARPA exoskeleton program, Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States), 2004.

[٨]H. Kazerooni, R. Steger, The Berkeley Lower Extremity Exoskeleton, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 128(1) (2005) 14-25.

[٩]A.B. Zoss, H. Kazerooni, A. Chu, Biomechanical design of the Berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), IEEE/ASME Transactions on mechatronics, 11(2) (2006) 128-138.

[١٠]E. Guizzo, H. Goldstein, The rise of the body bots [robotic exoskeletons], IEEE spectrum, 42(10) (2005) 50-56.

[١١]C.J. Walsh, K. Pasch, H. Herr, An autonomous, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation, in: 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE, 2006, pp. 1410-1415.

[١٢]C.J. Walsh, D. Paluska, K. Pasch, W. Grand, A. Valiente, H. Herr, Development of a lightweight, underactuated exoskeleton for load-carrying augmentation, in: Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006., IEEE, 2006, pp. 3485-3491.

[١٣]G. Colombo, M. Joerg, R. Schreier, V. Dietz, Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis, Journal of rehabilitation research and development, 37(6) (2000) 693-700.

[١٤]S. Hesse, D. Uhlenbrock, A mechanized gait trainer for restoration of gait, Journal of rehabilitation research and development, 37(6) (2000) 701-708.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[١٥]J.F. Veneman, R. Kruidhof, E.E. Hekman, R. Ekkelenkamp, E.H. Van Asseldonk, H. Van Der Kooij, Design and evaluation of the LOPES exoskeleton robot for interactive gait rehabilitation, IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering, 15(3) (2007) 379-386.
[١٦]S.K. Banala, S.K. Agrawal, J.P. Scholz, Active Leg Exoskeleton (ALEX) for gait rehabilitation of motor-impaired patients, in: 2007 IEEE 10th international conference on rehabilitation robotics, IEEE, ٢٠٠٧, pp. 401-407.
[١٧]S.K. Banala, S.H. Kim, S.K. Agrawal, J.P. Scholz, Robot assisted gait training with active leg exoskeleton (ALEX), IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering, 17(1) (2008) 2-8.
[١٨]M. Girone, G. Burdea, M. Bouzit, V. Popescu, J. Deutsch, Orthopedic rehabilitation using the “Rutgers ankle” interface, in: Medicine Meets Virtual Reality 2000, Ios Press, 2000, pp. 89-95.
[١٩]D.P. Ferris, K.E. Gordon, G.S. Sawicki, A. Peethambaran, An improved powered ankle–foot orthosis using proportional myoelectric control, Gait & posture, 23(4) (2006) 425-428.
[٢٠]P. Beyl, M. Van Damme, R. Van Ham, B. Vanderborght, D. Lefeber, Design and control of a lower limb exoskeleton for robot-assisted gait training, Applied Bionics and Biomechanics, 6(2) (2009) 229-243.
[٢١]K.W. Hollander, R. Ilg, T.G. Sugar, D. Herring, An Efficient Robotic Tendon for Gait Assistance, Journal of Biomechanical Engineering, 128(5) (2006) 788-791.
[٢٢]D.P. Ferris, J.M. Czerniecki, B. Hannaford, An Ankle-Foot Orthosis Powered by Artificial Pneumatic Muscles, Journal of Applied Biomechanics, 21(2) (2005) 189-197.
[٢٣]S. Jezernik, K. Jezernik, M. Morari, Impedance control based gait-pattern adaptation for a robotic rehabilitation device, IFAC Proceedings Volumes, 35(2) (2002) 389-393.
[٢٤]S. Jezernik, G. Colombo, M. Morari, Automatic gait-pattern adaptation algorithms for rehabilitation with a 4-DOF robotic orthosis, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 20(3) (2004) 574-582.
[٢٥]R. Ekkelenkamp, P. Veltink, S. Stramigioli, H. van der Kooij, Evaluation of a virtual model control for the selective support of gait functions using an exoskeleton, in: 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics, IEEE, 2007, pp. 693-699.
[٢٦]J.L. Emken, S.J. Harkema, J.A. Beres-Jones, C.K. Ferreira, D.J. Reinkensmeyer, Feasibility of manual teach-and-replay and continuous impedance shaping for robotic locomotor training following spinal cord injury, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 55(1) (2007) 322-334.
[٢٧]A.S.S. Abadi, P.H. Dehkordi, R. Hajiyan, R. Kowalik, W. Wróblewski, Design and real-time evaluation of a novel observer-based predefined-time controller for the industrial processes, ISA transactions, 156 (2025) 551-564.
[٢٨]J.A. de la Tejera, R. Bustamante-Bello, R.A. Ramirez-Mendoza, J. Izquierdo-Reyes, Systematic review of exoskeletons towards a general categorization model proposal, Applied Sciences, 11(1) (2020) 76.
[٢٩]P. Maurice, J. Čamernik, D. Gorjan, B. Schirrmeister, J. Bornmann, L. Tagliapietra, C. Latella, D. Pucci, L. Fritzsche, S. Ivaldi, J. Babič, Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 28(1) (2020) 152-١٦٤.
[٣٠]R.P. Matthew, E.J. Mica, W. Meinhold, J.A. Loeza, M. Tomizuka, R. Bajcsy, Introduction and initial exploration of an active/passive exoskeleton framework for portable assistance, in: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2015, pp. 5351-5356.
[٣١]Y. Yao, D. Shao, M. Tarabini, S.A. Moezi, K. Li, P. Saccomandi, Advancements in sensor technologies and control strategies for lower-limb rehabilitation exoskeletons: A comprehensive review, Micromachines, 15(4) (2024) 489.
[٣٢]O. Coser, C. Tamantini, P. Soda, L. Zollo, AI-based methodologies for exoskeleton-assisted rehabilitation of the lower limb: a review, Frontiers in Robotics and AI, 11 (2024) 1341580.
[٣٣]M. Belal, N. Alsheikh, A. Aljarah, I. Hussain, Deep learning approaches for enhanced lower-limb exoskeleton control: A review, IEEE Access, (2024).

ACCEPTED MANUSCRIPT

[٣٤]D.D. Molinaro, K.L. Scherpereel, E.B. Schonhaut, G. Evangelopoulos, M.K. Shepherd, A.J. Young, Task-agnostic exoskeleton control via biological joint moment estimation, Nature, 635(8038) (2024) 337-344.
[٣٥]A. Soltani Sharif Abadi, P. Alinaghi Hosseinabadi, A. Hameed, A. Ordys, B. Pierscionek, Fixed-time observer-based controller for the human–robot collaboration with interaction force estimation, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 35(10) (2025) 4062-4095.
[٣٦]S. Arunkumar, N. Jayakumar, A comprehensive review on lower limb exoskeleton: from origin to future expectations, International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), (2024).
[٣٧]W. Chen, J. Li, S. Zhu, X. Zhang, Y. Men, H. Wu, Gait recognition for lower limb exoskeletons based on interactive information fusion, Applied Bionics and Biomechanics, 2022(1) (2022) 9933018.
[٣٨]G. Chen, C.K. Chan, Z. Guo, H. Yu, A review of lower extremity assistive robotic exoskeletons in rehabilitation therapy, Critical Reviews™ in Biomedical Engineering, 41(4-5) (2013).
[٣٩]N. Yagn, Apparatus for facilitating walking, running, and jumping, in, US Patents 1889.
[٤٠]N. Yagn, Apparatus for facilitating walking, running, and jumping, in, US Patents 1890.
[٤١]S. Qiu, Z. Pei, C. Wang, Z. Tang, Systematic Review on Wearable Lower Extremity Robotic Exoskeletons for Assisted Locomotion, Journal of Bionic Engineering, ٢٠(٢) (٢٠٢٣) ٤٣٦-٤٦٩.
[٤٢]J. Vertut, P. Coiffet, Teleoperation and robotics: Applications and technology, 1 ed., Springer, Dordrecht, 2013.
[٤٣]R.S. Mosher, Handyman to Hardiman, SAE Transactions, 76 (1968) 588-597.
[٤٤]R.S. Mosher, Force-reflecting electrohydraulic servomanipulator, Electro-Technology, Dec., (1960) 138-141.
[٤٥]M. Vukobratovic, D. Hristic, Z. Stojiljkovic, Development of active anthropomorphic exoskeletons, Medical and biological engineering, 12 (1974) 66-80.
[٤٦]M. Vukobratovic, D ،Surdilovic, Y. Ekalo, D. Katic, Dynamics And Robust Control Of Robot-environment Interaction, World Scientific Publishing Company, 2009.
[٤٧]R.S. Mosher, Handyman to hardiman, Sae Transactions, (1968) 588-597.
[٤٨]K. Corker, J.H. Lyman, M. Saleem Sheredos, A PRELIMINARY EVALUATION OF REMOTE MEDICAL MANIPULATORSa, Bulletin of prosthetics research, (32) (1979) 107.
[٤٩]J.A. Moore, Pitman a powered exoskeleton suit for the infantryman, Los Alamos National Laboratory, 16 (1986).
[٥٠]X. Guan, L. Ji, R. Wang, Development of exoskeletons and applications on rehabilitation, in: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2016, pp. 02004.
[٥١]Y. Sankai, K. Fujiwara, K. Watanabe, H. Moriyama, HOJO-brain for motion control of robots and biological systems, Artificial Life and Robotics, 2 (1998) 162-169.
[٥٢]Y. SANKAI, Study on hybrid power assist HAL-1 for walking aid using EMG, in: Proceedings of the JME on Ibaraki Symposium,(2000-3), 2000.
[٥٣]H. Kazerooni, J.-L. Racine, L. Huang, R. Steger, On the control of the berkeley lower extremity exoskeleton (BLEEX), in: Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and automation, IEEE, 2005, pp. 4353-4360.
[٥٤]C.J. Walsh, K. Endo, H. Herr, A quasi-passive leg exoskeleton for load-carrying augmentation, International Journal of Humanoid Robotics, 4(03) (2007) 487-506.
[٥٥]R. Bogue, Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments, Industrial Robot: an international journal, 36(5) (2009) 421-427.
[٥٦]R. Bogue, Robotic exoskeletons: a review of recent progress, Industrial Robot: An International Journal, 42(1) (2015) 5-10.
[٥٧]Z. Lim, The rise of robots and the implications for military organizations, Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2013.
[٥٨]Y. Sankai, HAL: Hybrid assistive limb based on cybernics, in: Robotics research: The 13th international symposium ISRR, Springer, 2011, pp. 25-34.
[٥٩]J.L. Contreras-Vidal, R.G. Grossman, NeuroRex: A clinical neural interface roadmap for EEG-based brain machine interfaces to a lower body robotic exoskeleton, in: 2013 35th Annual International

ACCEPTED MANUSCRIPT

Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), IEEE, 2013, pp. 1579-1582.
[٦٠]D. Charrett, FIDIC Contracts in Europe: A Practical Guide to Application, Informa Law from Routledge, London, 2022.
[٦١]E. Prassler, A. Baroncelli, Team ReWalk Ranked First in the Cybathlon 2016 Exoskeleton Final [Industrial Activities], IEEE Robotics & Automation Magazine, 24(4) (2017) 8-10.
[٦٢]K. Suzuki, G. Mito, H. Kawamoto, Y. Hasegawa, Y. Sankai, Intention-based walking support for paraplegia patients with Robot Suit HAL, Advanced Robotics, 21(12) (2007) 1441-1469.
[٦٣]H. Shimada, Y. Kimura, T. Suzuki, T. Hirata, M. Sugiura, Y. Endo, K. Yasuhara, K. Shimada, K. Kikuchi, M. Hashimoto, M. Ishikawa, K. Oda, K. Ishii, K. Ishiwata, The Use of Positron Emission Tomography and $[^{18}{\rm F}]$Fluorodeoxyglucose for Functional Imaging of Muscular Activity During Exercise With a Stride Assistance System, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 15(3) (2007) 442-448.
[٦٤]M.S. Cherry, S. Kota, D.P. Ferris, An elastic exoskeleton for assisting human running, in: International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2009, pp. 727-738.
[٦٥]S. Jezernik, M. Morari, Controlling the human-robot interaction for robotic rehabilitation of locomotion, in: 7th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings (Cat. No. 02TH8623), IEEE, 2002, pp. 133-135.
[٦٦]R. Riener, L. Lunenburger, S. Jezernik, M. Anderschitz, G. Colombo, V. Dietz, Patient-cooperative strategies for robot-aided treadmill training: first experimental results, IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering, 13(3) (2005) 380-394.
[٦٧]S. Kotov, V.Y. Lijdvoy, A. Sekirin, K. Petrushanskaya, E. Pismennaya, The efficacy of the exoskeleton ExoAtlet to restore walking in patients with multiple sclerosis, Zhurnal nevrologii i psikhiatrii imeni SS Korsakova, 117(10. Vyp. 2) (2017) 41-47.
[٦٨]J.M. Donelan, Q. Li, V. Naing, J.A. Hoffer, D. Weber, A.D. Kuo, Biomechanical energy harvesting: generating electricity during walking with minimal user effort, Science, 319(5864) (2008) 807-810.
[٦٩]T. Gurriet, S. Finet, G. Boeris, A. Duburcq, A. Hereid, O. Harib, M. Masselin, J. Grizzle, A.D. Ames, Towards restoring locomotion for paraplegics: Realizing dynamically stable walking on exoskeletons, in: 2018 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), IEEE, 2018, pp. 2804-2811.
[٧٠]A.T. Asbeck, R.J. Dyer, A.F. Larusson, C.J. Walsh, Biologically-inspired soft exosuit, in: 2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), IEEE, 2013, pp. 1-8.
[٧١]P. Yuan, T. Wang, F. Ma, M. Gong, Key technologies and prospects of individual combat exoskeleton, in: Knowledge Engineering and Management: Proceedings of the Seventh International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, Beijing, China, Dec 2012 (ISKE ٢٠١٢), Springer, 2014, pp. 305-316.
[٧٢]J. Stein, L. Bishop, D.J. Stein, C.K. Wong, Gait training with a robotic leg brace after stroke: a randomized controlled pilot study, American journal of physical medicine & rehabilitation, 93(11) (2014) 987-994.
[٧٣]J. Bae, C. Siviy, M. Rouleau, N. Menard, K. O'Donnell, I. Geliana, M. Athanassiu, D. Ryan, C. Bibeau, L. Sloot, A lightweight and efficient portable soft exosuit for paretic ankle assistance in walking after stroke, in: 2018 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), IEEE, 2018, pp. 2820-2827.
[٧٤]L.N. Awad, J. Bae, K. O'Donnell, S.M.M. De Rossi, K. Hendron, L.H. Sloot, P. Kudzia, S. Allen, K.G. Holt, T.D. Ellis, C.J. Walsh, A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke, Science Translational Medicine, 9(400) (2017) eaai9084.
[٧٥]R.S. Calabrò, A. Cacciola, F. Bertè, A. Manuli, A. Leo, A. Bramanti, A. Naro, D. Milardi, P. Bramanti, Robotic gait rehabilitation and substitution devices in neurological disorders: where are we now?, Neurological Sciences, 37 (2016) 503-514.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[٧٦]E. Hong, P.H. Gorman, G.F. Forrest, P.K. Asselin, S. Knezevic, W. Scott, S.B. Wojciehowski, S. Kornfeld, A.M. Spungen, Mobility Skills With Exoskeletal-Assisted Walking in Persons With SCI: Results From a Three Center Randomized Clinical Trial, Frontiers in Robotics and AI, Volume 7 - 2020 (2020).
[٧٧]L.N. Awad, A. Esquenazi, G.E. Francisco, K.J. Nolan, A. Jayaraman, The ReWalk ReStore™ soft robotic exosuit: a multi-site clinical trial of the safety, reliability, and feasibility of exosuit-augmented post-stroke gait rehabilitation, Journal of neuroengineering and rehabilitation, 17 (2020) 1-11.
[٧٨]A. Esquenazi, M. Talaty, A. Packel, M. Saulino, The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury, American journal of physical medicine & rehabilitation, 91(11) (2012) 911-921.
[٧٩]M.B. Popović, Biomechanics and robotics, CRC Press, 2013.
[٨٠]S. Rafique, S.M. Rana, N. Bjorsell, M. Isaksson, Evaluating the advantages of passive exoskeletons and recommendations for design improvements, Journal of Rehabilitation and Assistive Technologies Engineering, 11 (2024) 20556683241239875.
[٨١]A. Plaza, M. Hernandez, G. Puyuelo, E. Garces, E. Garcia, Lower-limb medical and rehabilitation exoskeletons: A review of the current designs, IEEE Reviews in Biomedical Engineering, 16 (2021) 278-291.
[٨٢]T. Li, Q. Li, A systematic review on load carriage assistive devices: Mechanism design and performance evaluation, Mechanism and Machine Theory, 180 (2023) 105142.
[٨٣]L. He, C. Xiong, Q. Zhang, W. Chen, C. Fu, K.-M. Lee, A backpack minimizing the vertical acceleration of the load improves the economy of human walking, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 28(9) (2020) 1994-2004.
[٨٤]Y. Leng, X. Lin, L. Yang, Y. Xu, C. Fu, Design of an elastically suspended backpack with tunable stiffness, in: 2020 5th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), IEEE, 2020, pp. 359-363.
[٨٥]Y. Leng, X. Lin, R. Deng, J. Chang, L. Yang, K. Zhang, C. Fu, Design and Implement an Elastically Suspended Back Frame for Reducing the Burden of Carrier, in: 2021 6th IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), IEEE, 2021, pp. 236-240.
[٨٦]T. Li, Q. Li, T. Liu, J. Yi, G. Gong, Development of a novel elastic load-carrying device: Design, modeling and analysis, in: 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), IEEE, 2016, pp. 1454-1460.
[٨٧]J.-P. Martin, Q. Li, Altering compliance of a load carriage device in the medial-lateral direction reduces peak forces while walking, Scientific Reports, 8(1) (2018) 13775.
[٨٨]J.-H. Park, P. Stegall, H. Zhang, S. Agrawal, Walking with aBackpack using load distribution and dynamic load compensation reduces metabolic cost and adaptations to loads, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 25(9) (2016) 1419-1430.
[٨٩]L.C. Rome, L. Flynn, T.D. Yoo, Rubber bands reduce the cost of carrying loads, Nature, 444(7122) (2006) 1023-1024.
[٩٠]C. Pérez-Cualtán, O. Campo, Design of a load carriage system oriented to reduce acceleration forces when carrying a backpack, Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (2019).
[٩١]S.A. Gard, S.C. Miff, A.D. Kuo, Comparison of kinematic and kinetic methods for computing the vertical motion of the body center of mass during walking, Human movement science, 22(6) (2004) 597-6.١٠
[٩٢]Z. Yang, L. Huang, Z. Zeng, R. Wang, R. Hu, L. Xie, Evaluation of the load reduction performance via a suspended backpack with adjustable stiffness, Journal of Biomechanical Engineering, 144(5) (2022) 051001.
[٩٣]J.-P. Martin, Q. Li, Design, model, and performance evaluation of a biomechanical energy harvesting backpack, Mechanical Systems and Signal Processing, 134 (2019) 106318.
[٩٤]W. Van Dijk, T. Van de Wijdeven, M. Holscher, R. Barents, R. Könemann, F. Krause, C.L. Koerhuis, Exobuddy-A non-anthropomorphic quasi-passive exoskeleton for load carrying assistance, in: 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob), IEEE, 2018, pp. 336-341.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[٩٥]K.M. Gruevski, I.J. Cameron, C. McGuinness, A. Sy, K.L. Best, L. Bouyer, G. Diamond-Ouellette, R.B. Graham, T. Karakolis, A pilot investigation of the influence of a passive military exoskeleton on the performance of lab-simulated operational tasks, IISE transactions on occupational ergonomics and human factors, 8(4) (2020) 195-203.
[٩٦]M. Hao, J. Zhang, K. Chen, H. Asada, C. Fu, Supernumerary robotic limbs to assist human walking with load carriage, Journal of Mechanisms and Robotics, 12(6) (2020) 061014.
[٩٧]H. Kazerooni, A. Chu, R. Steger, That which does not stabilize, will only make us stronger, The International Journal of Robotics Research, 26(1) (2007) 75-89.
[٩٨]I. Ketko, R. Yanovich, M. Plotnik, A. Gefen, Y. Heled, Physiological Evaluation of a Wheeled Assistive Device for Load Carriage, The Journal of Strength & Conditioning Research, 29 (2015) S139-S143.
[٩٩]Y. Leng, X. Lin, G. Huang, M. Hao, J. Wu, Y. Xiang, K. Zhang, C. Fu, Wheel-legged robotic limb to assist human with load carriage: An application for environmental disinfection during COVID-19, IEEE Robotics and Automation Letters, 6(2) (2021) 3695-3702.
[١٠٠]J. Liu, B. Li, Q. Ning, M. Zhou, Y. Li, M. Liu, K. Xu, Mechanical design of a passive lower-limb exoskeleton for load-carrying assistance, in: Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2022, pp. 012035.
[١٠١]K. Low, X. Liu, H. Yu, Design and implementation of NTU wearable exoskeleton as an enhancement and assistive device, Applied Bionics and Biomechanics, 3(3) (2006) 209-225.
[١٠٢]T. Wang, Y. Zhu, T. Zheng, D. Sui, S ،Zhao, J. Zhao, PALExo: A parallel actuated lower limb exoskeleton for high-load carrying, IEEE Access, 8 (2020) 67250-67262.
[١٠٣]Z. Zhou, W. Chen, H. Fu, X. Fang, C. Xiong, Design and experimental evaluation of a non-anthropomorphic passive load-carrying exoskeleton, in: 2021 6th IEEE International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM), IEEE, 2021, pp. 251-256.
[١٠٤]M. Hao, J. Zhang, K. Chen, H. Asada, C. Fu, Supernumerary Robotic Limbs to Assist Human Walking With Load Carriage, Journal of Mechanisms and Robotics, 12(6) (2020).
[١٠٥]I. Ketko, M. Plotnik, R. Yanovich, A. Gefen, Y. Heled, Wheeled assistive device for load carriage–the effects on human gait and biomechanics, Ergonomics, 60(10) (2017) 1415-1424.
[١٠٦]Y. Xiang, X. Yan, H. Su, N. Chen, S. Guo, J. Wu, Y. Leng, C. Fu, Powered super tail: A terrain-adaptive wheel-legged robotic limb to assist human's load carriage, in: 2021 27th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP), IEEE, 2021 ,pp. 676-681.
[١٠٧]G.M. Bryan, P.W. Franks, S. Song, A.S. Voloshina, R. Reyes, M.P. O'Donovan, K.N. Gregorczyk, S.H. Collins, Optimized hip–knee–ankle exoskeleton assistance at a range of walking speeds, Journal of neuroengineering and rehabilitation, 1.١٢-١ (٢٠٢١) ٨
[١٠٨]Q. Chen, S. Guo, L. Sun, Q. Liu, S. Jin, Inertial measurement unit-based optimization control of a soft exosuit for hip extension and flexion assistance, Journal of Mechanisms and Robotics, 13(2) (2021) 021016.
[١٠٩]Y. Ding, I. Galiana, A.T. Asbeck, S.M.M. De Rossi, J. Bae, T.R.T. Santos, V.L. De Araujo, S. Lee, K.G. Holt, C. Walsh, Biomechanical and physiological evaluation of multi-joint assistance with soft exosuits, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 25(2) (2016) 119-130.
[١١٠]Y. Ding, F.A. Panizzolo, C. Siviy, P. Malcolm, I. Galiana, K.G. Holt, C.J. Walsh, Effect of timing of hip extension assistance during loaded walking with a soft exosuit, Journal of neuroengineering and rehabilitation, 13 (2.١٠-١ (٠١٦
[١١١]S. Galle, P. Malcolm, W. Derave, D. De Clercq, Enhancing performance during inclined loaded walking with a powered ankle–foot exoskeleton, European Journal of Applied Physiology, 114 (2014) 2341-2351.
[١١٢]S. Lee, J. Kim, L. Baker, A. Long, N. Karavas, N. Menard, I. Galiana, C.J. Walsh, Autonomous multi-joint soft exosuit with augmentation-power-based control parameter tuning reduces energy cost of loaded walking, Journal of neuroengineering and rehabilitation, 15 (2018) 1-9.
[١١٣]M.K. MacLean, D.P. Ferris, Energetics of walking with a robotic knee exoskeleton, Journal of applied biomechanics, 35(5) (2019) 320-326.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[١١٤]F.A. Panizzolo, G.M. Freisinger, N. Karavas, A.M. Eckert-Erdheim, C. Siviy, A. Long, R.A. Zifchock, M.E. LaFiandra, C.J. Walsh, Metabolic cost adaptations during training with a soft exosuit assisting the hip joint, Scientific reports, 9(1) (2019) 9779.
[١١٥]J.E. Pratt, B.T. Krupp, C.J. Morse, S.H. Collins, The RoboKnee: an exoskeleton for enhancing strength and endurance during walking, in: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004, IEEE, 2004, pp. 2430-2435.
[١١٦]L. Xie, Z. Wang, G. Huang, B. Liu, Z. Zhou, Mechanical Efficiency Investigation of an Ankle-Assisted Robot for Human Walking With a Backpack-Load, Journal of Biomechanical Engineering, 143(11) (2021).
[١١٧]L.M. Mooney, E.J. Rouse, H.M. Herr, Autonomous exoskeleton reduces metabolic cost of human walking during load carriage, Journal of neuroengineering and rehabilitation, 11 (2014) 1-11.
[١١٨]P.W. Franks, G.M. Bryan, R. Reyes, M.P. O'Donovan, K.N. Gregorczyk, S.H. Collins, The effects of incline level on optimized lower-limb exoskeleton assistance: A case series, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 30 (2022) 2494-2505.
[١١٩]O. Baser, H. Kizilhan, E. Kilic, Biomimetic compliant lower limb exoskeleton (BioComEx) and its experimental evaluation, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 41 (2019).١٥-١
[١٢٠]H. Cao, J. Zhu, C. Xia, H. Zhou, X. Chen, Y. Wang, Design and control of a hydraulic-actuated leg exoskeleton for load-carrying augmentation, in: Intelligent Robotics and Applications: Third International Conference, ICIRA 2010, Shanghai, China, November 10-12, 2010. Proceedings, Part I 3, Springer, 2010, pp. 590-599.
[١٢١]D. Cha, K.I. Kim, A lower limb exoskeleton based on recognition of lower limb walking intention, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 43(1) (2.١١١-١٠٢ (٠١٨
[١٢٢]Y. Hua, J. Fan, G. Liu, X. Zhang, M. Lai, M. Li, T. Zheng, G. Zhang, J. Zhao, Y. Zhu, A novel weight-bearing lower limb exoskeleton based on motion intention prediction and locomotion state identification, IEEE Access, 7 (2019) 37620-3.٧٦٣٨
[١٢٣]D.J. Hyun, H. Park, T. Ha, S. Park, K. Jung, Biomechanical design of an agile, electricity-powered lower-limb exoskeleton for weight-bearing assistance, Robotics and Autonomous Systems, 95 (2017) 181-195.
[١٢٤]H. Li, W. Cheng, F. Liu, M. Zhang, K. Wang, The effects on muscle activity and discomfort of varying load carriage with and without an augmentation exoskeleton, Applied Sciences, 8(12) (2018) 2638.
[١٢٥]Y. Long, Z.-j. Du, C.-f. Chen, W.-d. Wang, L. He, X.-w. Mao, G.-q. Xu, G.-y. Zhao, W. Dong, Hybrid Control Scheme of a Hydraulically Actuated Lower Extremity Exoskeleton for Load-Carrying, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 91(3) (2018) 493-500.
[١٢٦]H.T. Tran, H. Cheng, H. Rui, X. Lin, M.K. Duong, Q. Chen, Evaluation of a Fuzzy-Based Impedance Control Strategy on a Powered Lower Exoskeleton, International Journal of Social Robotics, 8(1) (2016) 103-123.
[١٢٧]S. Yu, H. Lee, W. Kim, C. Han, Development of an underactuated exoskeleton for effective walking and load-carrying assist, Advanced Robotics, 30(8) (2016) 535-551.
[١٢٨]C. Zhang, X. Zang, Z. Leng, H. Yu, J. Zhao, Y. Zhu, Human–machine force interaction design and control for the HIT load-carrying exoskeleton, Advances in Mechanical Engineering, 8(4) (2016) 168781401664506.٨
[١٢٩]K.N. Gregorczyk, L. Hasselquist, J.M. Schiffman, C.K. Bensel, J.P. Obusek, D.J. Gutekunst, Effects of a lower-body exoskeleton device on metabolic cost and gait biomechanics during load carriage, Ergonomics, 53(10) (2010) 1263-1275.
[١٣٠]Y. Long ,Z.-j. Du, C.-f. Chen, W.-d. Wang, L. He, X.-w. Mao, G.-q. Xu, G.-y. Zhao, W. Dong, Hybrid control scheme of a hydraulically actuated lower extremity exoskeleton for load-carrying, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 91 (2018) 493-500.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[١٣١]D. Lim ,W. Kim, H. Lee, H. Kim, K. Shin, T. Park, J. Lee, C. Han, Development of a lower extremity exoskeleton robot with a quasi-anthropomorphic design approach for load carriage, in: 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2015, pp. 5345-5350.
[١٣٢]H.T. Tran, H. Cheng, H. Rui, X. Lin, M.K. Duong, Q. Chen, Evaluation of a fuzzy-based impedance control strategy on a powered lower exoskeleton, International Journal of Social Robotics, 8 (2016) 103-123.
[١٣٣]T.G. Hornby, D.S. Reisman, I.G. Ward, P.L. Scheets, A. Miller, D. Haddad, E.J. Fox, N.E. Fritz, K. Hawkins, C.E. Henderson, Clinical practice guideline to improve locomotor function following chronic stroke, incomplete spinal cord injury, and brain injury, Journal of Neurologic Physical Therapy, 44(1) (2020) 49-100.

ACCEPTED MANUSCRIPT

Exoskeleton Robots and the Future of Rehabilitation; A Comprehensive Review on Lower Limb Exoskeletons

Reza Hajiyan[a], Mohammad Hossein Khalesi[a1], Ali Soltani Sharif Abadi[b]

[a] Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
[b] Faculty of Electronics and Information Technology, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland

ABSTRACT

In the contemporary era, rapid advancements in robotic and electronic technologies have led to the extensive development of exoskeletons as advanced wearable devices. Integrating sensors, actuators, and artificial intelligence algorithms, these devices have significantly improved the quality of life for individuals with mobility impairments, enhanced physical capabilities for healthy users, and facilitated various industrial and military activities. This paper provides a comprehensive review of the historical evolution and progress of lower-limb exoskeletons, tracing their development from initial concepts in the 19th century to today's sophisticated models. The paper further examines the development trends, classifications, and applications of these systems within rehabilitation, medical, industrial, and military contexts. A functional analysis of the technology, focusing on objectives such as reducing inertial load forces, transferring weight to the ground, and enhancing human joint strength, reveals notable successes alongside ongoing challenges, including high production costs, technical complexity, and limitations in mimicking natural body movements. Additionally, emerging opportunities in fields such as sports, artificial intelligence, and user-centered designs are discussed. Findings from this systematic review can aid in optimizing design, reducing device weight, and enhancing efficiency. Ultimately, the paper presents a future-oriented perspective on exoskeleton development, emphasizing their crucial role in everyday life and medical practices.

KEYWORDS

Exoskeleton Robots, Rehabilitation, Lower-Limb Exoskeleton, Inertial Force, Robotic systems.

ACCEPTED MANUSCRIPT

[1] Corresponding Author: Email: mhkhalesi@semnan.ac.ir