



## REVIEW PAPER

## An Introductory Study on the Capacity of Exoskeletons in Reducing Musculoskeletal Disorders and Increasing Workforce Productivity in the Construction Industry

Ehsan Bagheri <sup>(1)\*</sup> , Behnod Barmayehvar <sup>(2)</sup> , Mohammad Hosein Mahmoudi Sari <sup>(3)</sup> 

1. PhD Student, Architectural Technology Department (Project and Construction Management), Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0009-0009-5176-0724>)

2. Associate Professor, Architectural Technology Department (Project and Construction Management), Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0000-0001-8805-0915>)

3. Associate Professor, Architectural Technology Department (Project and Construction Management), Faculty of Architecture and Urban Planning, Iran University of Art, Tehran, Iran. (<https://orcid.org/0000-0002-5141-6300>)

Publisher: Iran University of Art

| ARTICLE INFO                                                                                                                                                                                                                                                              | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Received:</b> 21/07/2025<br/> <b>Revised:</b> 19/08/2025<br/> <b>Accepted:</b> 25/08/2025<br/> <b>PP. 47-64</b></p> <p><b>Keywords:</b><br/> <i>Exoskeleton, Construction industry, Work-related musculoskeletal disorders, Ergonomics, Labor productivity.</i></p> | <p><b>Introduction:</b><br/> Construction is one of the most physically demanding sectors. Much of its work involves manual material handling, lifting and carrying, repeated trunk flexion and rotation, overhead activity, prolonged kneeling, and the use of hand-held tools. The frequency and intensity of these exposures, together with awkward postures, tool vibration, contact stress, and changing site conditions, increase the risk of work-related musculoskeletal disorders. Pain and injury in the lower back, shoulder, knee, wrist, and ankle are not merely individual health concerns; they may also lead to fatigue, reduced physical capacity, absence from work, poorer task quality, and ultimately lower workforce productivity. Wearable exoskeletons have therefore attracted attention as ergonomic assistive technologies that may reduce part of the mechanical load imposed on the body and support safer task performance.</p> <p><b>The Purpose of the Research:</b><br/> This study examines the capacity of industrial exoskeletons to reduce musculoskeletal risk factors and support workforce productivity in the construction industry. It links construction-job risk patterns and vulnerable body regions to the required form of assistance and clarifies practical considerations for implementation.</p> <p><b>Methodology:</b><br/> This article used a narrative-review approach. Persian- and English-language sources addressing construction ergonomics, work-related musculoskeletal disorders, workforce productivity, exoskeleton design and classification, and the evaluation of these devices in manual tasks were reviewed. Retrieved material was organized around risk factors and vulnerable body regions, device types and mechanisms, effects on muscle activity, fatigue, discomfort, and performance, and deployment challenges. Device-task suitability was then assessed.</p> <p><b>Findings and Discussion:</b><br/> The review indicates that occupations such as masonry, carpentry, electrical work, painting, concrete work, roofing, insulation, and plumbing differ in their tasks but are commonly exposed to combinations of lifting, bent postures, repetition, and overhead activity. In these settings, lower-back exoskeletons may be useful during repeated bending and lifting; shoulder and arm-support devices may assist overhead work and tool holding; and knee-support systems may be useful during prolonged kneeling or squatting. Active exoskeletons use a power source and actuators; passive devices store and return user-generated energy through springs or similar mechanisms; and semi-active devices adjust assistance. The reviewed evidence suggests that appropriately matched devices can reduce muscle activity and perceived fatigue or discomfort in some tasks and can improve tolerance of demanding postures. A positive device effect, however, does not mean that a device is appropriate for every occupation or worker. Device weight and bulk, restricted range of motion, interference with ladders or confined spaces, load transfer to other joints, durability, cost, and worker acceptance may limit anticipated benefits.</p> |



Use your device to scan and read the article online

| ARTICLE INFO | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | <p><b>Conclusion:</b><br/>Exoskeletons are not a stand-alone solution for eliminating musculoskeletal disorders in construction and should not replace better work design, mechanization where feasible, training, rest scheduling, or conventional safety controls. They may nevertheless add value as a complementary intervention for specific tasks and occupational groups. The answer to the study question is that their ability to reduce risk and support productivity depends on a close match between the device, task, work environment, and user. This review is limited by its narrative design and by the heterogeneity of settings and outcome measures in the examined studies. Long-term field evaluations and meaningful worker involvement in device selection and assessment are therefore needed before results are generalized.</p> <p><b>Funding:</b> This research received no financial or non-financial support from any institution, organization, or external sponsor.</p> <p><b>Authors' Contribution:</b> Ehsan Bagheri contributed to the study conceptualization, literature search, data organization, analysis, and preparation of the manuscript. Behnod Barmayehvar and Mohammad Hosein Mahmoudi Sari contributed to the scientific supervision, critical review, and revision of the manuscript. All authors contributed to the interpretation of the findings, approved the final version, and agreed to be accountable for all aspects of the work.</p> <p><b>Conflict of Interest:</b> The authors declare that they have no conflict of interest in relation to the research, authorship, or publication of this article.</p> <p><b>AI Usage Declaration:</b> The authors declare that no artificial intelligence tools were used in the manuscript. All scientific content, analyses, results, and ultimate responsibility for the manuscript rest with the authors.</p> <p><b>Acknowledgments:</b> The authors gratefully acknowledge all individuals who provided scientific advice and constructive consultation during the preparation of this article.</p> |

#### Highlight

- Task-specific exoskeleton selection can reduce physical demands in construction work involving repetitive bending, manual material handling, and prolonged overhead activity;
- Exoskeleton benefits depend on compatibility with the task, body region, work environment, tools, and personal protective equipment;
- Pilot testing with workers and simultaneous monitoring of discomfort, safety, quality, task time, and user acceptance are essential before wider implementation.



This paper is an open access and licensed under the [Creative Commons CC BY-NC 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) license

©2024, AGM. All rights reserved.

**Cite This Article:** Bagheri, E., Barmayehvar, B., & Mahmoudi Sari, M. H. (2025). An introductory study on the capacity of exoskeletons in reducing musculoskeletal disorders and increasing workforce productivity in the construction industry. *Art of Green Management*, 3(2), 47-64. [10.30480/agm.2026.6509.1068](https://doi.org/10.30480/agm.2026.6509.1068)



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6509.1068>



[http://agm.journal.art.ac.ir/article\\_1533.html](http://agm.journal.art.ac.ir/article_1533.html)



\*. Corresponding Author (Email: [e.bagheri@student.art.ac.ir](mailto:e.bagheri@student.art.ac.ir)) / (Phone: +989126766179 )



## درآمدی بر ظرفیت اسکلت‌های بیرونی در کاهش اختلالات اسکلتی-عضلانی و افزایش بهره‌وری نیروی کار صنعت ساختمان

احسان باقری<sup>(۱)\*</sup>، بهنود برمیه‌ور<sup>(۲)</sup>، محمد حسین محمودی ساری<sup>(۳)</sup>

۱- دانشجو دکترا، گروه فناوری معماری (مدیریت پروژه و ساخت)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران. <https://orcid.org/0009-0009-5176-0724>

۲- دانشیار، گروه فناوری معماری (مدیریت پروژه و ساخت)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران. <https://orcid.org/0000-0001-8805-0915>

۳- دانشیار، گروه فناوری معماری (مدیریت پروژه و ساخت)، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر ایران، تهران، ایران. <https://orcid.org/0000-0002-5141-6300>

ناشر: دانشگاه هنر ایران

| اطلاعات مقاله                                                                                                         | چکیده                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۳۰<br>بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۲۸<br>پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۰۳<br>صص. ۴۷-۶۴                                           | <b>مقدمه:</b> صنعت ساختمان به اتکای گسترده بر جابه‌جایی دستی مصالح، کارهای تکراری، وضعیت‌های بدنی نامناسب و فعالیت‌های بدنی سنگین، با خطر بالای اختلالات اسکلتی-عضلانی مرتبط با کار روبه‌رو است. این اختلالات می‌توانند با افزایش خستگی، درد، غیبت از کار و افت توان انجام وظیفه، بهره‌وری نیروی کار را نیز تحت تأثیر قرار دهند. اسکلت‌های بیرونی پوشیدنی به‌عنوان یک مداخله ارگونومیک نوظهور، برای کاهش بار مکانیکی بر عضلات و مفاصل و پشتیبانی از وضعیت‌های دشوار کاری مطرح شده‌اند. |
| <b>واژگان کلیدی:</b><br>اسکلت بیرونی، صنعت ساختمان، اختلالات اسکلتی-عضلانی ناشی از کار، ارگونومی، بهره‌وری نیروی کار. | <b>هدف پژوهش:</b> صنعت ساختمان با فعالیت‌های بدنی سنگین، حمل دستی بار، وضعیت‌های نامناسب و کارهای تکراری همراه است و از این‌رو نیروی کار آن در معرض اختلالات اسکلتی-عضلانی ناشی از کار قرار دارد. هدف این مقاله، تبیین ظرفیت اسکلت‌های بیرونی صنعتی برای کاهش این اختلالات و بررسی پیامدهای احتمالی آن برای بهره‌وری نیروی کار <sup>۲</sup> ساختمانی است.                                                                                                                              |
|                                  | <b>روش‌شناسی:</b> پژوهش حاضر مروری و از نوع کیفی است. منابع انگلیسی مرتبط با اسکلت‌های بیرونی صنعتی، ارگونومی <sup>۳</sup> ساخت‌وساز، اختلالات اسکلتی-عضلانی و بهره‌وری نیروی کار بررسی و بر اساس ارتباط مستقیم با مشاغل ساختمانی، نوع حمایت بدنی و شاخص‌های ارزیابی انتخاب شدند.                                                                                                                                                                                                      |
|                                                                                                                       | <b>یافته‌ها و بحث:</b> شواهد مرور شده نشان می‌دهد که اسکلت‌های بیرونی پشتیبان کمر، شانه، بازو و زانو در وظایف خم‌شدن، حمل بار، کار بالای سر و زانو زدن طولانی می‌توانند فعالیت عضلانی و بار مکانیکی را کاهش دهند؛ با این حال، انتقال بار به نواحی دیگر بدن، محدودیت حرکت، دشواری استفاده در فضاهای محدود و پذیرش کاربر از چالش‌های مهم‌اند.                                                                                                                                            |
|                                                                                                                       | <b>نتیجه‌گیری:</b> اسکلت بیرونی <sup>۴</sup> جایگزین کنترل‌های مهندسی و سازمانی نیست، اما در صورت انتخاب مبتنی بر تحلیل وظیفه، اجرای آزمایشی و پایش شاخص‌های ایمنی و عملکرد، می‌تواند مکمل برنامه ارگونومی کارگاه و پشتیبان بهره‌وری پایدار نیروی کار باشد.                                                                                                                                                                                                                            |
|                                                                                                                       | <b>نکات برجسته:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                                                                                                       | - انتخاب وظیفه‌محور اسکلت بیرونی می‌تواند فشار فیزیکی فعالیت‌های ساختمانی مانند خم‌شدن تکراری، حمل دستی مصالح و کار طولانی بالای سر را کاهش دهد.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|                                                                                                                       | - اثربخشی اسکلت بیرونی به تناسب آن با وظیفه، ناحیه بدن، محیط کار، ابزار و تجهیزات حفاظت فردی وابسته است.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|                                                                                                                       | - اجرای آزمایشی یا مشارکت کارگران و سنجش هم‌زمان ناراحتی، ایمنی، کیفیت، زمان انجام کار و پذیرش کاربر ضروری است.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

ارجاع به این مقاله: باقری، احسان؛ برمایه‌ور، بهنود و محمودی ساری، محمد حسین. (۱۴۰۵). درآمدی بر ظرفیت اسکلت‌های بیرونی در کاهش اختلالات اسکلتی-عضلانی و افزایش بهره‌وری نیروی کار صنعت ساختمان. هنر مدیریت سبز، ۳(۳)، ۴۷-۶۴.  
10.30480/agm.2026.6509.1068



<http://doi.org/10.30480/agm.2026.6509.1068>



[http://agm.journal.art.ac.ir/article\\_1533.html](http://agm.journal.art.ac.ir/article_1533.html)



این مقاله به صورت دسترسی باز و با مجوز  
قابل استفاده است.  
Creative Commons CC BY-NC 4.0

©2024, UST. All rights reserved.

\*. نویسنده مسئول (رایانامه: [e.bagheri@student.art.ac.ir](mailto:e.bagheri@student.art.ac.ir)) / (تلفن: +۹۸۹۱۲۶۷۶۶۱۷۹)





## ۱- مقدمه

صنعت ساختمان به اتکای گسترده بر کار دستی، حمل و جابه‌جایی مصالح، کار در وضعیت‌های نامناسب و فعالیت‌های تکراری شناخته می‌شود. این شرایط، احتمال مواجهه کارگران با عوامل خطر ارگونومیک و اختلالات اسکلتی-عضلانی ناشی از کار را افزایش می‌دهد و می‌تواند با خستگی، غیبت از کار و افت عملکرد وظیفه همراه باشد (Wang et al., 2015; Valero et al., 2016). از سوی دیگر، کیفیت و ایمنی پروژه نیز با سلامت و توان جسمی نیروی کار پیوند دارد (Wanberg et al., 2013). اسکلت بیرونی یک سامانه پوشیدنی است که از طریق انتقال یا بازتوزیع بخشی از بار، حمایت از اندام یا کمک به حفظ وضعیت بدن، توان فیزیکی کاربر را در یک وظیفه مشخص پشتیبانی می‌کند. توسعه این فناوری در محیط‌های صنعتی، از جمله ساخت‌وساز، توجه پژوهشگران را به امکان کاهش بار کاری فیزیکی و خستگی جلب کرده است (De Looze et al., 2016; Kim et al., 2019). با وجود این، شواهد موجود به معنای سودمندی یکسان همه دستگاه‌ها برای همه وظایف نیست؛ تناسب نوع اسکلت بیرونی با وظیفه، ویژگی‌های کاربر و محیط کار تعیین‌کننده است.

پرسش اصلی پژوهش این است که اسکلت‌های بیرونی صنعتی، با توجه به الگوهای خطر در مشاغل ساختمانی، چگونه و تحت چه ملاحظاتی می‌توانند به کاهش اختلالات اسکلتی-عضلانی و پشتیبانی از بهره‌وری نیروی کار کمک کنند؟ نوآوری مقاله در پیوند دادن ناحیه بدن در معرض خطر، نوع وظیفه ساختمانی و گونه مناسب حمایت اسکلت بیرونی در یک چارچوب کاربردی است. مقاله پس از مقدمه، در بخش دوم مبانی نظری را طرح می‌کند؛ بخش سوم روش مرور را توضیح می‌دهد؛ بخش چهارم شواهد و نگاهت کاربردها را ارائه می‌کند؛ و بخش پنجم به نتیجه‌گیری، پاسخ به پرسش پژوهش و محدودیت‌ها می‌پردازد.

## ۲- مبانی نظری

مبانی نظری این پژوهش بر پیوند میان ارگونومی، اختلالات اسکلتی-عضلانی ناشی از کار، بهره‌وری نیروی کار و فناوری اسکلت‌های بیرونی استوار است. در صنعت ساختمان، عواملی مانند اعمال نیروی زیاد، حمل دستی مصالح، تکرار حرکات، وضعیت‌های نامناسب بدن، مدت طولانی مواجهه و فرصت محدود برای بازیابی، به‌صورت هم‌زمان بر بدن کارگران اثر می‌گذارند و خطر بروز آسیب‌ها و ناراحتی‌های اسکلتی-عضلانی را افزایش می‌دهند (Abdul-Tharim et al., 2011; Wang et al., 2015). از این رو، بررسی ظرفیت اسکلت‌های بیرونی بدون توجه به عوامل خطر شغلی، سازوکار ایجاد اختلالات اسکلتی-عضلانی و ارتباط آن‌ها با عملکرد کاری، نمی‌تواند تصویری کامل از کاربرد این فناوری ارائه دهد. بر همین اساس، در این بخش ابتدا اختلالات اسکلتی-عضلانی و عوامل ایجادکننده فشارهای ارگونومیک در مشاغل ساختمانی بررسی می‌شود؛ سپس مفهوم بهره‌وری نیروی کار و ارتباط آن با فشار فیزیکی توضیح داده می‌شود و در ادامه، تعریف، طبقه‌بندی و مبانی عملکرد اسکلت‌های بیرونی صنعتی تشریح خواهد شد (Valero et al., 2016; De Looze et al., 2016).

### اختلالات اسکلتی-عضلانی ناشی از کار در صنعت ساختمان

اختلالات اسکلتی-عضلانی ناشی از کار به مجموعه‌ای از آسیب‌ها، دردها و ناراحتی‌هایی گفته می‌شود که عضلات، تاندون‌ها، رباط‌ها، مفاصل، استخوان‌ها و ساختارهای عصبی - عضلانی را درگیر می‌کنند. این اختلالات معمولاً از یک عامل منفرد ناشی نمی‌شوند، بلکه حاصل تعامل میان شدت نیرو، تکرار حرکت، وضعیت نامناسب بدن، مدت مواجهه، ارتعاش، شرایط محیطی و ویژگی‌های فردی کارگر هستند. در صنعت ساختمان، این عوامل اغلب به صورت هم‌زمان رخ می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که کارگر ممکن است در جریان یک وظیفه واحد، بار را به شکل دستی جابه‌جا کند، بارها خم و راست شود، تنه خود را بچرخاند و در محیطی محدود یا ناهموار به کار ادامه دهد (Abdul-Tharim et al., 2011; Wang et al., 2015).

صنعت ساختمان از نظر مواجهه با خطرهای ارگونومیک، محیطی پیچیده و متغیر است. برخلاف بسیاری از محیط‌های تولیدی ثابت، محل کار ساختمانی در طول زمان تغییر می‌کند و نوع فعالیت، ارتفاع کار، ابزار، مصالح و مسیرهای دسترسی در مراحل مختلف پروژه یکسان نیست. کارگران ساختمانی ممکن است در یک روز کاری، فعالیت‌هایی مانند حمل مصالح، بلندکردن بار از سطح زمین، کار با ابزارهای دستی، نصب قطعات، سوراخ‌کاری، رنگ‌آمیزی، کار روی نردبان یا داربست و زانودن طولانی را انجام دهند. هرکدام از این فعالیت‌ها الگوی متفاوتی از نیرو و فشار را بر بدن تحمیل می‌کند (Valero et al., 2016; Wang et al., 2015).

در میان نواحی مختلف بدن، کمر، شانه، گردن، زانو، مچ دست و اندام‌های فوقانی بیشتر در معرض فشارهای شغلی قرار دارند. برای نمونه، حمل دستی مصالح و بلندکردن بار از ارتفاع پایین، فشار بیشتری بر کمر و اندام‌های تحتانی ایجاد می‌کند؛ درحالی‌که نصب تأسیسات، رنگ‌آمیزی و کار با ابزار در ارتفاع، بیشتر شانه، گردن و بازوها را درگیر می‌سازد. از این رو، نمی‌توان تنها بر اساس عنوان شغلی درباره خطر تصمیم گرفت. تحلیل باید بر مبنای وظیفه واقعی، وزن و شکل بار، ارتفاع محل کار، تعداد تکرار، مدت مواجهه و وضعیت بدن انجام شود (Wang et al., 2015; Valero et al., 2016).

پیامدهای اختلالات اسکلتی-عضلانی فقط به سلامت فرد محدود نمی‌شود. درد و خستگی می‌تواند توان کارگر را کاهش دهد و باعث شود فرد برای ادامه فعالیت از وضعیت‌های جبرانی استفاده کند. این وضعیت‌ها ممکن است در کوتاه‌مدت امکان ادامه کار را فراهم کنند، اما در طول زمان فشار را به بخش‌های دیگر بدن منتقل می‌کنند. افزون بر این، ناراحتی جسمی می‌تواند تمرکز، دقت و کنترل حرکتی را کاهش دهد و احتمال خطا یا حادثه را افزایش دهد. بنابراین، سلامت جسمی نیروی کار با ایمنی، کیفیت و استمرار عملیات ساختمانی ارتباط دارد (Wanberg et al., 2013; Umberto et al., 2013).

### عوامل مؤثر بر ایجاد فشارهای ارگونومیک

- **نیروی و بار مکانیکی:** اعمال نیروی زیاد یکی از مهم‌ترین عوامل خطر در کارهای ساختمانی است. بلندکردن، حمل کردن، کشیدن، هل دادن و نگه‌داشتن مصالح یا ابزار، نیازمند تولید نیروی عضلانی است. مقدار این نیرو به وزن بار، شکل و ابعاد آن، فاصله بار از بدن، ارتفاع شروع و پایان حرکت و امکان گرفتن مناسب بستگی دارد. هرچه بار از بدن دورتر باشد یا کارگر مجبور باشد آن را در وضعیت چرخیده یا خمیده جابه‌جا کند، فشار مکانیکی وارد بر بدن افزایش می‌یابد. این وضعیت در حمل قطعات ساختمانی، کیسه‌های مصالح، ابزارهای سنگین و عناصر حجیم بیشتر مشاهده می‌شود (Abdul-Tharim et al., 2011; Wang et al., 2015).
- **تکرار و حرکات یکنواخت:** تکرار حرکت حتی در شرایطی که شدت نیرو متوسط باشد، می‌تواند موجب خستگی و تجمع فشار شود. خم شدن و راست شدن مکرر، گرفتن ابزار، چرخاندن مچ، میخ کوبی، سوراخ کاری و نصب قطعات، نمونه‌هایی از فعالیت‌های تکراری در ساخت‌وساز هستند. در چنین شرایطی، عضلات فرصت کافی برای بازیابی ندارند و کارگر ممکن است به تدریج سرعت یا دقت خود را از دست بدهد. خطر واقعی تنها به تعداد حرکات مربوط نیست، بلکه سرعت اجرای حرکت، مدت شیفت، زمان استراحت و امکان تغییر وظیفه نیز اهمیت دارد (Wang et al., 2015; Valero et al., 2016).
- **وضعیت نامناسب بدن:** وضعیت نامناسب زمانی رخ می‌دهد که مفاصل و اندام‌ها برای مدت قابل توجهی در زاویه‌ای دور از وضعیت طبیعی و راحت قرار گیرند. خم شدن طولانی تنه، چرخش کمر هنگام بلندکردن بار، بالا نگه‌داشتن بازوها، زانوزدن، نشستن نیمه‌خمیده و کار در فضاهای محدود، از وضعیت‌های رایج در پروژه‌های ساختمانی هستند. اهمیت وضعیت بدن از آن جهت است که یک نیروی ثابت در وضعیت مناسب، لزوماً همان پیامد را در وضعیت خمیده یا چرخیده ایجاد نمی‌کند. در وضعیت نامناسب، ظرفیت بدن برای تحمل نیرو کاهش می‌یابد و بار بیشتری بر برخی مفاصل و عضلات وارد می‌شود (Abdul-Tharim et al., 2011; Wang et al., 2015).
- **مدت مواجهه و فرصت بازیابی:** مدت زمانی که کارگر در معرض یک عامل خطر قرار دارد، در تعیین پیامد آن نقش مهمی دارد. یک وضعیت خمیده کوتاه‌مدت با همان وضعیت در بخش بزرگی از شیفت کاری یکسان نیست. تداوم مواجهه می‌تواند خستگی عضلانی ایجاد و کنترل حرکت را کاهش دهد. در این وضعیت، احتمال استفاده از الگوهای حرکتی جبرانی بیشتر می‌شود. برنامه‌ریزی استراحت، چرخش وظایف و کاهش زمان مواجهه از اقداماتی هستند که می‌توانند فشار تجمعی را کاهش دهند؛ اما در بسیاری از فعالیت‌های ساختمانی، به دلیل زمان‌بندی فشرده و تغییرپذیری کارگاه، اجرای آن‌ها دشوار است (Abdul-Tharim et al., 2011; Wang et al., 2015).

### مفهوم بهره‌وری نیروی کار و ارتباط آن با فشار فیزیکی

بهره‌وری نیروی کار در این پژوهش به توان تبدیل زمان، انرژی و تلاش انسانی به خروجی وظیفه با حفظ کیفیت و ایمنی گفته می‌شود. در صنعت ساختمان، بهره‌وری را نمی‌توان صرفاً با سرعت انجام کار یا مقدار خروجی سنجید؛ زیرا افزایش سرعت اگر با کاهش کیفیت، افزایش دوباره کاری، خطا یا حادثه همراه شود، به معنای بهبود واقعی عملکرد نیست. بنابراین، زمان انجام وظیفه، مقدار و کیفیت خروجی، تعداد خطاها، میزان توقف، دوباره کاری، غیبت و ایمنی باید در کنار یکدیگر بررسی شوند (Karthik & Rao, 2019; Umberto et al., 2013).



فشار فیزیکی می‌تواند از چند مسیر بر بهره‌وری اثر بگذارد. خستگی موجب کاهش توان ادامه کار و افزایش زمان‌های توقف می‌شود. درد و ناراحتی تمرکز کارگر را کاهش می‌دهد و فرد برای محافظت از بدن، سرعت یا دامنه حرکت خود را تغییر می‌دهد. کاهش کنترل حرکتی نیز می‌تواند احتمال خطا، افت کیفیت یا دوباره‌کاری را افزایش دهد. از سوی دیگر، فشار فیزیکی شدید ممکن است به غیبت یا ترک شغل منجر شود و هزینه‌های جایگزینی و آموزش نیروی انسانی را افزایش دهد (Karthik & Rao, 2019; Umberto et al., 2013). با وجود این، رابطه میان کاهش فشار فیزیکی و افزایش بهره‌وری مستقیم و قطعی نیست. ممکن است یک مداخله فعالیت عضلانی را کاهش دهد، اما پوشیدن و تنظیم آن زمان‌بر باشد یا آزادی حرکت کارگر را محدود کند. همچنین، ممکن است دستگاه در یک وظیفه ثابت مفید باشد، اما در فعالیتی که به جابه‌جایی سریع یا تغییر مکرر وضعیت نیاز دارد، باعث کندی کار شود. بنابراین، هر مداخله ارگونومیک باید علاوه بر شاخص‌های عضلانی و ادراکی، پیامدهای عملیاتی مانند زمان، کیفیت، خطا و ایمنی را نیز ارزیابی کند (De Looze et al., 2016; De Bock et al., 2022).

### تعریف و طبقه‌بندی اسکلت‌های بیرونی صنعتی

اسکلت بیرونی صنعتی سامانه‌ای پوشیدنی است که در بیرون بدن قرار می‌گیرد و با استفاده از سازوکارهای مکانیکی یا محرک، از حرکت، حفظ وضعیت یا تحمل بار در یک یا چند ناحیه بدن پشتیبانی می‌کند. هدف این سامانه‌ها معمولاً افزایش ظرفیت انسان برای بلندکردن بارهای سنگین‌تر نیست، بلکه کاهش بخشی از بار وارد بر عضلات و مفاصل، حمایت از وضعیت بدن و کاهش خستگی در یک وظیفه مشخص است (De Looze et al., 2016).

اسکلت‌های بیرونی صنعتی را می‌توان بر اساس منبع تأمین نیرو به سه گروه فعال، غیرفعال و نیمه‌فعال تقسیم کرد. مدل‌های غیرفعال از اجزایی مانند فنر، تسمه، مفصل یا سازوکارهای مکانیکی برای ذخیره و بازگرداندن انرژی استفاده می‌کنند و معمولاً به موتور یا باتری نیاز ندارند. سادگی نسبی، وزن کمتر و نیاز پایین‌تر به نگهداری از مزیت‌های بالقوه این مدل‌هاست؛ با این حال، میزان حمایت آن‌ها به وضعیت و جهت حرکت وابسته است. مدل‌های فعال از محرک و منبع انرژی استفاده می‌کنند و امکان ایجاد نیروی کمکی بیشتری دارند، اما وزن، پیچیدگی، هزینه، نیاز به شارژ و مسائل ایمنی آن‌ها بیشتر است. مدل‌های نیمه‌فعال نیز از ترکیبی از اجزای مکانیکی و سامانه‌های قابل کنترل استفاده می‌کنند (De Looze et al., 2016; De Bock et al., 2022). از نظر ناحیه هدف، انواع مهم اسکلت‌های بیرونی صنعتی شامل پشتیبان کمر، پشتیبان شانه و بازو، پشتیبان زانو، پشتیبان اندام تحتانی، اسکلت تمام‌بدن و بازوی نگهدارنده ابزار است. پشتیبان کمر عمدتاً برای فعالیت‌هایی بررسی می‌شود که با خم‌شدن، بلندکردن بار از سطح پایین یا نگاه‌داشتن تنه در وضعیت خمیده همراه‌اند. پشتیبان شانه و بازو برای فعالیت‌های بالای سر و نگاه‌داشتن ابزار در ارتفاع طراحی می‌شود. پشتیبان زانو در وظایفی که کارگر مدت زیادی زانو می‌زند یا در وضعیت نیمه‌نشسته کار می‌کند، کاربرد بالقوه دارد. بازوی نگهدارنده ابزار نیز می‌تواند بخشی از وزن ابزار را تحمل کند و فشار وارد بر شانه و بازو را کاهش دهد (Kim et al., 2019; Zhu et al., 2021).

### سازوکار اثر اسکلت‌های بیرونی

منطق اصلی اسکلت بیرونی، ایجاد یک مسیر انتقال نیرو خارج از بدن یا بازتوزیع نیرو میان بخش‌های مختلف بدن است. برای مثال، پشتیبان کمر می‌تواند بخشی از گشتاور لازم برای حفظ وضعیت تنه را با استفاده از یک سازوکار مکانیکی تأمین کند. در این صورت، فعالیت برخی عضلات تنه و فشار ادراک شده ممکن است کاهش یابد. به همین ترتیب، پشتیبان شانه می‌تواند بخشی از وزن بازو یا ابزار را تحمل کند و نیاز به فعالیت مداوم عضلات شانه را کاهش دهد (Bosch et al., 2016; De Looze et al., 2016).

با این حال، کاهش بار در یک ناحیه به معنای حذف بار از کل بدن نیست. نیرو ممکن است از طریق تسمه‌ها، نقاط تماس و ساختار دستگاه به لگن، ران، شانه یا سایر بخش‌ها منتقل شود. بنابراین، ارزیابی باید به جای تمرکز بر یک عضله یا مفصل، الگوی کلی حرکت و بارگذاری بدن را بررسی کند. فعالیت عضلات، ناراحتی موضعی، دامنه حرکت، تعادل، کنترل حرکتی و تغییر وضعیت بدن، همگی برای شناسایی پیامدهای جبرانی اهمیت دارند (Bosch et al., 2016; Kim et al., 2019).

اثر بخشی اسکلت بیرونی وابستگی زیادی به نوع وظیفه دارد. دستگاهی که در یک فعالیت ثابت و تکراری عملکرد مناسبی دارد، ممکن است در فعالیتی همراه با چرخش سریع تنه، تغییر ارتفاع، بالا رفتن از نردبان یا عبور از فضای محدود مناسب نباشد. همچنین، دستگاه باید با ابزار، لباس کار، کلاه ایمنی، کمربند ایمنی و سایر تجهیزات حفاظت فردی سازگار باشد. اگر دستگاه

دسترسی کارگر به ابزار یا مسیر حرکت را محدود کند، کاهش فشار عضلانی ممکن است با کاهش ایمنی یا کندشدن کار همراه شود (Kim et al., 2019; Zhu et al., 2021).

### تناسب میان وظیفه، ناحیه بدن و نوع دستگاه

اصل تناسب وظیفه و دستگاه، مبنای انتخاب اسکلت بیرونی است. منظور از این تناسب آن است که نوع حمایت، جهت اعمال نیرو، دامنه حرکت و نقاط تماس دستگاه با نیازهای واقعی کار هماهنگ باشد. عنوان شغلی به تنهایی معیار مناسبی برای انتخاب نیست؛ زیرا کارگران یک عنوان شغلی ممکن است در طول روز وظایف متفاوتی انجام دهند. برای مثال، یک کارگر می تواند بخشی از زمان را به حمل مصالح، بخشی را به کار بالای سر و بخشی را به کار روی نردبان اختصاص دهد. در چنین شرایطی، دستگاهی که برای یک بخش مناسب است، الزاماً برای بخش دیگر مناسب نیست. برای انتخاب دستگاه باید ناحیه اصلی خطر، وزن و شکل بار، ارتفاع محل کار، تعداد تکرار، مدت مواجهه، نیاز به چرخش تنه، سرعت تغییر وضعیت، فضای کار و سازگاری با ابزار بررسی شود. افزون بر این، وزن خود دستگاه، راحتی پوشیدن، امکان تنظیم برای کاربران مختلف و قابلیت استفاده در طول یک شیفت کامل باید مورد توجه قرار گیرد. انتخاب بدون تحلیل وظیفه ممکن است به استفاده از دستگاهی منجر شود که در شرایط آزمایشگاهی مفید بوده، اما در کارگاه واقعی مانع حرکت یا کاهش دهنده پذیرش کاربر باشد (De Bock et al., 2022; Zhu et al., 2021).

### محدودیت ها و پیامدهای ناخواسته

اسکلت های بیرونی در کنار ظرفیت های بالقوه، محدودیت هایی نیز دارند. وزن دستگاه، گرما، تعریق، فشار موضعی، دشواری تنظیم، محدودیت دید یا حرکت و ناسازگاری با لباس کار می تواند موجب ناراحتی و کاهش پذیرش شود. محیط ساختمانی نیز معمولاً با گردوغبار، رطوبت، ضربه، ناهمواری سطح، تغییرات دما و جابه جایی مداوم همراه است؛ بنابراین دستگاه باید در برابر این شرایط مقاوم و برای نگهداری و نظافت آن برنامه مشخصی وجود داشته باشد (De Bock et al., 2022; Kim et al., 2019).

انتقال بار به نواحی دیگر بدن یکی از مهم ترین محدودیت ها است. اگر پشتیبان کمر به درستی تنظیم نشود، ممکن است فشار را از عضلات تنه به لگن یا ران منتقل کند. اگر پشتیبان شانه آزادی حرکت را کاهش دهد، کاربر ممکن است برای رسیدن به ابزار از وضعیت جبرانی استفاده کند. همچنین، تغییر مرکز جرم بدن یا محدود شدن حرکت مفصل می تواند در کار روی نردبان، داربست یا سطوح ناپایدار خطر ساز باشد (Bosch et al., 2016; Kim et al., 2019). خطر دیگر، برداشت نادرست از توانایی دستگاه است. اسکلت بیرونی نباید به عنوان مجوزی برای افزایش وزن بار، افزایش سرعت غیرایمن یا حذف استراحت استفاده شود. هدف آن کاهش بخشی از مواجهه است، نه افزایش نامحدود ظرفیت جسمی کاربر. به همین دلیل، آموزش، نظارت و دستورالعمل استفاده باید هم زمان با استقرار دستگاه تدوین شود (De Looze et al., 2016; Zhu et al., 2021).

### جایگاه اسکلت بیرونی در سلسله مراتب کنترل خطر

در کنترل خطرهای ارگونومیک، اسکلت بیرونی نباید جایگزین کنترل های مهندسی و سازمانی شود. نخست باید امکان حذف فعالیت پرخطر، کاهش وزن بار، استفاده از تجهیزات مکانیکی، تغییر ارتفاع سطح کار، اصلاح ابزار و بازطراحی توالی عملیات بررسی شود. سپس اقداماتی مانند برنامه ریزی استراحت، چرخش وظیفه، آموزش و کاهش مدت مواجهه مورد توجه قرار گیرد. اسکلت بیرونی در این چارچوب یک کنترل مکمل است که برای کاهش بخشی از خطر باقی مانده به کار می رود (Abdul-Tharim et al., 2011; Kim et al., 2019). این رویکرد از آن جهت اهمیت دارد که مسئولیت ایمنی را به طور کامل بر عهده کارگر قرار نمی دهد. اگر محیط کار، ابزار یا روش انجام فعالیت نامناسب باشد، پوشیدن اسکلت بیرونی به تنهایی مشکل را حل نمی کند. در مقابل، هنگامی که خطر پس از اجرای کنترل های مهندسی و سازمانی همچنان باقی بماند، دستگاه می تواند به عنوان بخشی از یک برنامه جامع ارگونومیک به کار رود. چنین برنامه ای باید شامل تحلیل وظیفه، انتخاب دستگاه، آموزش، اجرای آزمایشی، نظارت و ارزیابی پس از استقرار باشد.

### شاخص های ارزیابی اثربخشی

برای ارزیابی اثربخشی اسکلت بیرونی، استفاده از یک شاخص منفرد کافی نیست. شاخص های فیزیولوژیک مانند فعالیت عضلانی و مصرف انرژی می توانند نشان دهند که تقاضای فیزیکی تغییر کرده است. شاخص های ادراکی مانند ناراحتی، خستگی، راحتی و فشار ذهنی، تجربه واقعی کاربر را مشخص می کنند. شاخص های حرکتی مانند دامنه حرکت، تعادل، سرعت تغییر وضعیت و الگوهای جبرانی نیز برای ارزیابی ایمنی اهمیت دارند (Bosch et al., 2016; De Bock et al., 2022).



در کنار این شاخص‌ها، پیامدهای عملیاتی باید بررسی شوند. زمان انجام وظیفه، تعداد خطاها، کیفیت اجرا، میزان دوباره‌کاری، تعداد توقف‌ها و پذیرش کاربر نشان می‌دهند که آیا اثر ارگونومیک دستگاه به نتیجه عملیاتی تبدیل شده است یا خیر. کاهش فعالیت عضلانی بدون بهبود کیفیت و ایمنی، به‌تنهایی نمی‌تواند اثربخشی کامل دستگاه را ثابت کند. از سوی دیگر، ارزیابی کوتاه‌مدت برای پیش‌بینی استفاده بلندمدت کافی نیست؛ زیرا مشکلاتی مانند گرما، فرسودگی، فشار موضعی و کاهش پذیرش ممکن است پس از چند روز یا چند هفته آشکار شوند (De Bock et al., 2022; Kim et al., 2019).

براساس مباحث مطرح‌شده، اسکلت بیرونی یک فناوری وابسته به زمینه است و اثر آن به رابطه میان خطر، وظیفه، ناحیه بدن، نوع دستگاه، ویژگی کاربر و شرایط محیطی بستگی دارد. این سامانه در صورت انتخاب و تنظیم مناسب می‌تواند بخشی از فشار فیزیکی و خستگی را کاهش دهد، اما اثربخشی آن خودکار و یکسان نیست. پشتیبان کمر برای همه فعالیت‌های ساختمانی مناسب نیست، همان‌طور که پشتیبان شانه و بازو برای همه کارهای بالای سر بدون محدودیت عمل نمی‌کند (De Looze et al., 2016; Zhu et al., 2021).

در نتیجه، استفاده از اسکلت بیرونی باید به‌صورت یک مداخله ارگونومیک چندمرحله‌ای انجام شود. این مداخله از شناسایی خطر و تحلیل وظیفه آغاز می‌شود، با انتخاب و تنظیم دستگاه ادامه می‌یابد، در یک اجرای آزمایشی با مشارکت کارگران آزمون می‌شود و با پایش هم‌زمان شاخص‌های جسمی، ایمنی، کیفیت، زمان و بهره‌وری تکمیل می‌گردد. از این منظر، اسکلت بیرونی مکمل کنترل‌های مهندسی، سازمانی و آموزشی است، نه جایگزین آن‌ها. این چارچوب نظری مبنای تحلیل ارتباط میان مشاغل ساختمانی، نواحی آسیب‌پذیر بدن و انواع مناسب اسکلت‌های بیرونی در بخش یافته‌های پژوهش قرار می‌گیرد.

### ۳- روش پژوهش

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر رویکرد، کیفی است و با استفاده از روش تحلیل اسنادی و مرور هدفمند ادبیات انجام شده است. هدف پژوهش، شناسایی و تبیین ارتباط میان خطرهای ارگونومیک در فعالیت‌های ساختمانی، نواحی بدن در معرض آسیب، انواع اسکلت‌های بیرونی صنعتی و پیامدهای احتمالی آن‌ها بر فشار فیزیکی و بهره‌وری نیروی کار است. از این‌رو، پژوهش حاضر یک مطالعه تجربی یا مداخله‌ای نیست و داده‌های آن از طریق مشاهده مستقیم کارگاه یا اجرای آزمایش انسانی گردآوری نشده است؛ بلکه تحلیل بر پایه اسناد و منابع علمی منتشرشده انجام شده است.

### روش جمع‌آوری داده

برای گردآوری منابع، جست‌وجوی کتابخانه‌ای در منابع علمی انگلیسی با استفاده از ترکیب‌هایی از کلیدواژه‌های مرتبط با موضوع پژوهش انجام شد. مهم‌ترین کلیدواژه‌ها شامل «اسکلت بیرونی صنعتی»، «اسکلت بیرونی در ساخت‌وساز»، «اختلالات اسکلتی-عضلانی ناشی از کار»، «خطرهای ارگونومیک در صنعت ساختمان»، «حمل دستی مصالح»، «کار بالای سر»، «خستگی عضلانی»، «بهره‌وری نیروی کار» و معادل‌های انگلیسی آن‌ها بود. علاوه بر جست‌وجوی مستقیم کلیدواژه‌ها، فهرست منابع مقالات مرتبط نیز برای شناسایی مطالعات تکمیلی بررسی شد. این روش امکان شناسایی منابعی را فراهم کرد که اگرچه در عنوان خود واژه ساخت‌وساز را نداشتند، اما یافته‌های آن‌ها درباره اسکلت‌های بیرونی صنعتی و فشار فیزیکی برای تحلیل فعالیت‌های ساختمانی قابل استفاده بود.

منابعی برای تحلیل انتخاب شدند که دست‌کم یکی از شرایط زیر را داشته باشند: نخست، به بررسی خطرهای اسکلتی-عضلانی، وضعیت‌های نامناسب بدن، حمل دستی مصالح یا فشار فیزیکی در صنعت ساختمان پرداخته باشند؛ دوم، درباره طراحی، طبقه‌بندی، سازوکار یا پیامدهای استفاده از اسکلت‌های بیرونی صنعتی اطلاعات ارائه کرده باشند؛ سوم، اثر اسکلت بیرونی را بر فعالیت عضلانی، ناراحتی، خستگی، دامنه حرکت، تحمل وضعیت یا عملکرد وظیفه بررسی کرده باشند؛ و چهارم، یافته‌هایی داشته باشند که بتوان از آن‌ها برای تحلیل تناسب میان نوع وظیفه ساختمانی و نوع حمایت اسکلت بیرونی استفاده کرد. منابعی که صرفاً به کاربردهای پزشکی و توان‌بخشی اسکلت‌های بیرونی پرداخته بودند و ارتباط روشنی با کار صنعتی نداشتند، منابع تبلیغاتی فاقد روش و داده قابل ارزیابی، و مطالبی که فقط به معرفی تجاری یک محصول محدود می‌شدند، مبنای استدلال اصلی پژوهش قرار نگرفتند. با این حال، در مواردی که یک منبع مروری یا نظری برای تعریف مفاهیم، طبقه‌بندی فناوری یا توضیح پیشینه اسکلت‌های بیرونی اهمیت داشت، از آن برای چارچوب‌سازی نظری استفاده شد.

پس از بررسی منابع، اطلاعات مرتبط در چهار محور اصلی استخراج و سازمان‌دهی شد. محور نخست، خطرهای شغلی و نواحی

بدن درگیر بود و عواملی مانند خم‌شدن، بلندکردن بار، کار تکراری، وضعیت ثابت، فعالیت بالای سر، زانو زدن و استفاده از ابزارهای دستی را در بر گرفت. محور دوم، ویژگی‌ها و انواع اسکلت‌های بیرونی بود که شامل پشتیبان‌های کمر، شانه و بازو، زانو، اندام تحتانی، تمام‌بدن و بازوهای نگهدارنده ابزار می‌شد. محور سوم، پیامدهای گزارش شده بود؛ از جمله تغییر فعالیت عضلات، کاهش یا افزایش ناراحتی، خستگی، دامنه حرکت، تعادل، زمان انجام وظیفه، کیفیت کار و پذیرش کاربرد. محور چهارم، ملاحظات اجرایی و محدودیت‌ها بود که سازگاری دستگاه با ابزار، تجهیزات حفاظت فردی، فضای کار، نردبان و داربست، وزن دستگاه، سهولت تنظیم، انتقال بار به سایر نواحی بدن و ایمنی استفاده را شامل می‌شد.

برای تحلیل کاربردهای ساختمانی، ابتدا الگوی خطر غالب در هر وظیفه شناسایی شد. سپس ناحیه اصلی بدن در معرض فشار با نوع حمایت مورد نیاز مقایسه شد. در مرحله بعد، پیامدهای مثبت و محدودیت‌های احتمالی دستگاه بررسی شد. بر این اساس، ارتباط میان وظیفه، خطر، ناحیه بدن و نوع اسکلت بیرونی در قالب جدول‌های تحلیلی و نگاشت پیشنهادی ارائه شد. این نگاشت به معنای توصیه قطعی برای خرید یا استفاده از یک دستگاه خاص نیست؛ بلکه چارچوبی برای شناسایی گزینه‌های قابل بررسی و طراحی اجرای آزمایشی در محیط واقعی کار است.

### روش تحلیل و تلفیق یافته‌ها

با توجه به تفاوت میان منابع از نظر نوع دستگاه، گروه کاربران، نوع وظیفه، شرایط آزمایش، مدت مواجهه و شاخص‌های ارزیابی، یافته‌ها به صورت تحلیل مقایسه‌ای و تلفیق کیفی بررسی شدند. در این فرایند، نتایج منابع بر اساس جهت و نوع پیامد با یک دیگر مقایسه شدند؛ برای مثال، کاهش فعالیت عضلانی یا ناراحتی به عنوان پیامدهای نزدیک ارگونومیک، و زمان انجام وظیفه، کیفیت، ایمنی و بهره‌وری به عنوان پیامدهای عملیاتی در نظر گرفته شدند.

در تفسیر یافته‌ها، میان «کاهش فشار فیزیکی» و «افزایش بهره‌وری» تمایز گذاشته شد. کاهش فعالیت عضلانی یا خستگی، به تنهایی اثبات‌کننده افزایش بهره‌وری نیست؛ زیرا دستگاه ممکن است هم‌زمان دامنه حرکت را محدود کند، زمان پوشیدن و تنظیم داشته باشد یا با ابزار و فضای کار ناسازگار باشد. بنابراین، نتیجه‌گیری نهایی بر پایه تناسب میان وظیفه و دستگاه، مجموعه پیامدهای گزارش شده و محدودیت‌های اجرایی انجام شد، نه بر اساس یک شاخص منفرد. به دلیل ناهمگونی قابل توجه منابع و نبود داده‌های هم‌قابل مقایسه درباره یک مداخله، یک وظیفه و یک پیامد مشخص، فراتحلیل آماری انجام نشد. بنابراین، نتایج این پژوهش برآورد کمی یک اثر واحد نیست، بلکه یک تلفیق کیفی و کاربردی از شواهد موجود است. در نتیجه، توصیه‌های ارائه شده باید به عنوان مبنایی برای تحلیل اولیه و اجرای آزمایشی در کارگاه تفسیر شوند، نه جایگزین ارزیابی میدانی یا تصمیم‌گیری ایمنی.

### اعتبار و محدودیت روش پژوهش

برای افزایش انسجام تحلیل، مفاهیم، انواع دستگاه‌ها، خطرهای شغلی و پیامدهای ارگونومیک بر اساس محورهای از پیش تعیین شده دسته‌بندی و تلاش شد هر نتیجه به منابع مرتبط با همان موضوع متکی باشد. با این حال، این پژوهش محدودیت‌هایی دارد. نخست، بخش مهمی از شواهد مربوط به محیط‌های صنعتی عمومی یا آزمایشگاهی است و ممکن است شرایط آن‌ها با تنوع و پیچیدگی کارگاه ساختمانی یکسان نباشد. دوم، تفاوت در طراحی دستگاه‌ها، وظایف و شاخص‌های ارزیابی، مقایسه مستقیم نتایج را دشوار می‌کند. سوم، این پژوهش با اجرای آزمایش میدانی، اندازه‌گیری فعالیت عضلانی یا سنجش مستقیم بهره‌وری در یک پروژه ساختمانی همراه نبوده است. از این رو، یافته‌ها ظرفیت بالقوه و ملاحظات انتخاب اسکلت بیرونی را نشان می‌دهند، اما اثربخشی قطعی یک دستگاه در یک وظیفه مشخص باید در مطالعه میدانی جداگانه بررسی شود.

### ۴- تحلیل داده‌ها و یافته‌ها

یافته‌ها و بحث این پژوهش بر اساس تطبیق میان الگوهای خطر ارگونومیک در مشاغل ساختمانی و قابلیت‌های حمایتی انواع اسکلت‌های بیرونی تنظیم شده است. در این بخش، نتایج مطالعات بررسی شده از دو منظر تحلیل می‌شوند. نخست، میزان مواجهه مشاغل ساختمانی با عواملی مانند حمل بار، خم‌شدن، زانو زدن، کار بالای سر و حرکات تکراری؛ و دوم، توانایی اسکلت‌های بیرونی کمر، شانه، اندام فوقانی، زانو و سامانه‌های چندناحیه‌ای در کاهش فعالیت عضلانی، خستگی، ناراحتی و فشار مکانیکی. هدف از این تحلیل، صرفاً معرفی دستگاه‌ها نیست، بلکه تعیین تناسب احتمالی میان نوع وظیفه، ناحیه آسیب‌پذیر بدن و نوع حمایت مورد نیاز است. با این حال، کاهش فعالیت عضلانی یا بار مکانیکی به تنهایی به معنای افزایش قطعی بهره‌وری نیست؛ زیرا عواملی مانند وزن دستگاه، محدودیت حرکت، انتقال بار به سایر نواحی بدن، دشواری استفاده در محیط‌های محدود و پذیرش

کارگران نیز باید هم‌زمان در نظر گرفته شوند (De Looze et al., 2016; De Bock et al., 2022; Kim et al., 2019). بر این اساس، ابتدا الگوی خطر و نواحی آسیب‌پذیر در مشاغل ساختمانی ارائه می‌شود، سپس نتایج ارزیابی انواع اسکلت‌های بیرونی بررسی و در پایان، کاربرد بالقوه آن‌ها در مشاغل مختلف و محدودیت‌های اجرایی‌شان بحث می‌شود.

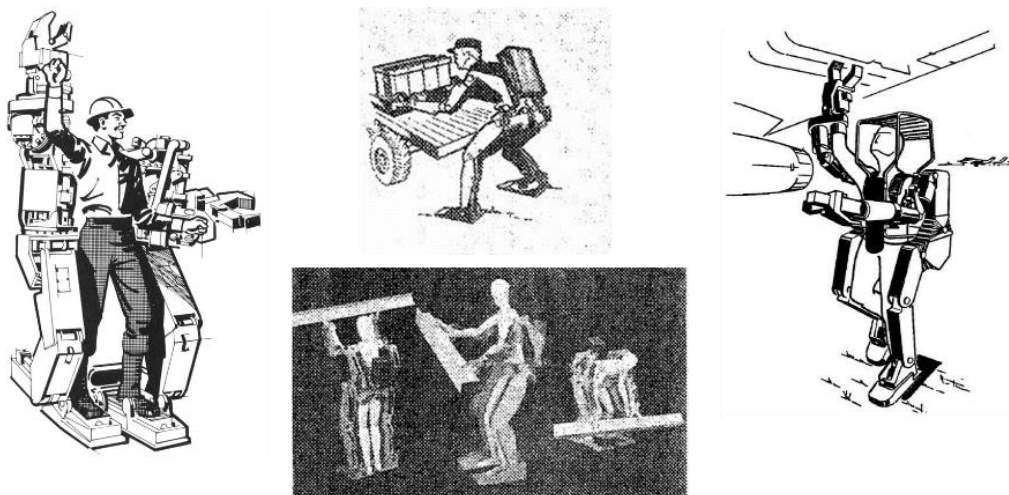
#### ۴-۱- مفهوم، پیشینه و گونه‌های اسکلت بیرونی

اسکلت بیرونی صنعتی سامانه‌ای پوشیدنی است که در بیرون بدن قرار می‌گیرد و با مکانیزم مکانیکی یا محرک، از حرکت یا تحمل بار در یک یا چند ناحیه حمایت می‌کند. تصویر ۱ نمونه‌ای از اسکلت بیرونی پشتیبان کمر را نشان می‌دهد. در کاربرد صنعتی، هدف معمولاً افزایش ظرفیت بلندکردن بار نیست؛ بلکه کاهش بار موضعی، خستگی و مواجهه با وضعیت‌های پرخطر است (De Looze et al., 2016).



تصویر ۱- نمونه‌ای از اسکلت بیرونی پشتیبان کمر (Zhu et al., 2021)

پیشینه سامانه‌های پوشیدنی کمکی به طرح‌های نظامی و توان‌بخشی بازمی‌گردد. تصویر ۲ نمونه‌ای از طرح‌های اولیه تمام‌بدن را نشان می‌دهد. محدودیت وزن، پیچیدگی و دشواری هماهنگی حرکت در نمونه‌های اولیه، مسیر توسعه را به سوی سامانه‌های سبک‌تر و موضعی‌تر هدایت کرد (De Looze et al., 2016; Young & Ferris, 2016).



تصویر ۲- طرح‌های اولیه اسکلت بیرونی تمام‌بدن - بازتنظیم نگارندگان بر پایه (De Looze et al., 2016)

امروزه، دستگاه‌های صنعتی عمدتاً به‌صورت پشتیبان کمر، شانه و بازو، زانو یا بازوی نگهدارنده ابزار طراحی می‌شوند. تصویرهای ۳ تا ۶ نمونه‌هایی از این کارکردها را نشان می‌دهند. این طبقه‌بندی برای انتخاب دستگاه اهمیت دارد، زیرا هدف کمک در کار بالای سر با هدف کمک در خم‌شدن یا زانودزدن یکسان نیست.





تصویر ۳- بازوی نگهدارنده ابزار (Zhu et al., 2021)



تصویر ۴- اسکلت بیرونی برای کار بالای سر (Zhu et al., 2021)



تصویر ۵- اسکلت بیرونی پشتیبان بازو (Zhu et al., 2021)



تصویر ۶- پشتیبان خم شدن و ایستادن (Zhu et al., 2021)

#### ۴-۲- خطرات اختلالات اسکلتی-عضلانی در مشاغل ساختمانی

در مشاغل ساختمانی، الگوی خطر با ماهیت وظیفه تغییر می‌کند. جدول ۱ نشان می‌دهد که در بسیاری از مشاغل، کمر، شانه، گردن، مچ و زانو نواحی اصلی در معرض آسیب‌اند. بنابراین انتخاب اسکلت بیرونی باید پس از تحلیل دقیق وظیفه انجام شود، نه صرفاً بر مبنای عنوان شغلی (Wang et al., 2015; Valero et al., 2016).

جدول ۱- خطرهای اسکلتی-عضلانی در نمونه‌ای از مشاغل ساختمانی (Wang et al., 2015).

| شغل      | نمونه وظیفه                                       | عوامل خطر غالب                                  | نواحی در معرض خطر            |
|----------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------|
| نجار     | کار بالای سر، کار روی زمین و جابه‌جایی دستی مصالح | نیروی زیاد، وضعیت نامناسب، فشار تماسی و دما     | کمر، گردن، شانه، دست و زانو  |
| بنا      | کار روی زمین و جابه‌جایی دستی مصالح               | نیروی زیاد، وضعیت نامناسب، ایستایی و فشار تماسی | کمر، گردن، شانه، پا و زانو   |
| برق‌کار  | کار بالای سر، کار با دست و جابه‌جایی مصالح        | نیروی زیاد، وضعیت نامناسب و فشار تماسی          | کمر، گردن، شانه، دست و مچ    |
| عایق‌کار | کار بالای سر، کار روی زمین و جابه‌جایی مواد       | نیروی زیاد، وضعیت نامناسب و وضعیت ایستا         | کمر، گردن، شانه، بازو و زانو |
| نقاش     | کار بالای سر، کار روی زمین و حرکات تکراری         | وضعیت نامناسب، تکرار و فشار تماسی               | گردن، شانه، بازو، مچ و کمر   |
| سقف‌ساز  | کار در ارتفاع، زانو زدن و حمل مصالح               | تعادل، زانو زدن، تکرار و وضعیت نامناسب          | کمر، شانه، زانو و مچ         |

#### ۴-۳- اسکلت‌های بیرونی پشتیبان کمر

در وظایفی که خم‌شدن تکراری یا نگه‌داشتن وضعیت خمیده غالب است، اسکلت بیرونی پشتیبان کمر می‌تواند فعالیت عضلات تنه و زمان تحمل وضعیت را بهبود دهد. با این حال، ناراحتی موضعی و تغییر الگوی بارگذاری باید هم‌زمان سنجیده شود. نمونه‌ای از دستگاه‌ها در جدول ۲ آمده است (Bosch et al., 2016; De Looze et al., 2016).

جدول ۲- نمونه‌هایی از اسکلت بیرونی پشتیبان کمر و پیامدهای گزارش شده (Bosch et al., 2016; De Looze et al., 2016).

| نوع       | گروه دستگاه              | پیامد گزارش شده                                               | ملاحظه اجرایی                              |
|-----------|--------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| غیرفعال   | پشتیبان کمر فنی          | کاهش بخشی از فعالیت عضلات تنه در کار خمیده یا بلندکردن تکراری | راحتی و دامنه حرکت باید ارزیابی شود        |
| غیرفعال   | پشتیبان بازگشت از خم‌شدن | کمک به بازگشت از وضعیت خمیده و محدودکردن خم‌شدن شدید          | ممکن است در وظایف پویا مزاحمت ایجاد کند    |
| نیمه‌فعال | پشتیبان قابل تنظیم کمر   | امکان تنظیم حمایت متناسب با وظیفه                             | نیازمند آموزش و تنظیم صحیح کاربر           |
| فعال      | پشتیبان محرک‌دار کمر     | ظرفیت کمک بیشتر در برخی وظایف حمل بار                         | وزن، انرژی و ایمنی سامانه چالش‌برانگیز است |

نتایج جدول ۲ نباید به صورت توصیه عمومی برای تمام کارهای ساخت‌وساز تفسیر شود. اثر دستگاه به شدت خم‌شدن، تناوب حرکت، بار حمل شده و فضای کار وابسته است. در یک کارگاه واقعی، آزمایش کوتاه‌مدت با مشارکت کارگران و ثبت شاخص‌هایی مانند ناراحتی، زمان انجام وظیفه و خطا، مقدمه‌ای ضروری برای استفاده گسترده است. همچنین، کاهش فعالیت عضلانی به تنهایی به معنای افزایش بهره‌وری نیست. اگر پوشیدن، تنظیم یا حرکت با دستگاه زمان‌بر باشد یا کاربر را از دسترسی ایمن به ابزار و مسیرهای حرکت بازدارد، منفعت ارگونومیک ممکن است به سود عملیاتی تبدیل نشود. بنابراین، تفسیر نتایج باید هم‌زمان بر ایمنی، کیفیت، سرعت و پذیرش کاربر تکیه کند.

در نتیجه، پشتیبان کمر زمانی مناسب‌تر است که کار غالب شامل خم‌شدن یا حمل بار در ارتفاع پایین باشد، نه زمانی که وظیفه به تغییر سریع وضعیت، بالا رفتن از نردبان یا کار در فضای بسیار محدود وابسته است. این تمایز، مبنای انتقال از انتخاب فناوری به طراحی مداخله در کارگاه است. به‌ویژه برای بناها، کارگران بتن و افرادی که به‌طور مکرر مصالح را از سطح زمین برمی‌دارند، پشتیبان کمر می‌تواند گزینه‌ای برای ارزیابی اولیه باشد. با این حال، دستگاه باید با پوشش حفاظت فردی، کمر بند ایمنی، مسیرهای عبور و نیاز به چرخش تنه سازگار باشد.



#### ۴-۴- اسکلت‌های بیرونی پشتیبان شانه و بازو

جدول ۳، که بر حمایت شانه و بازو تمرکز دارد، این منطق انتخاب مبتنی بر وظیفه را برای فعالیت‌های بالای سر و کار با ابزار نشان می‌دهد. برای برق‌کاران، نصب‌کنندگان تأسیسات، نقاشان و گروه‌هایی که به مدت طولانی دست‌ها را بالاتر از شانه نگه می‌دارند، حمایت شانه و بازو می‌تواند گزینه قابل بررسی باشد. با این حال، محدودیت در دامنه حرکت و تغییر توازن کاربر، به‌ویژه هنگام کار روی نردبان یا داربست، باید پیش از استقرار دستگاه ارزیابی شود (Kim et al., 2019; Zhu et al., 2021).

**جدول ۳- نمونه‌هایی از اسکلت بیرونی پشتیبان شانه و بازو و پیامدهای گزارش شده (Kim et al., 2019; Zhu et al., 2021).**

| نوع           | گروه دستگاه             | پیامد گزارش شده                            | ملاحظه اجرایی                                  |
|---------------|-------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|
| غیرفعال       | پشتیبان بازوی بالای سر  | کاهش تقاضای عضلات شانه در دستکاری بالای سر | ممکن است دامنه حرکت شانه را محدود کند          |
| غیرفعال       | جلیقه پشتیبان شانه      | کاهش بار ادراک شده بر شانه و بازو          | امکان انتقال تقاضا به کمر وجود دارد            |
| نیمه فعال     | پشتیبان بازو برای ابزار | کمک به نگهداری ابزار در وضعیت‌های تکراری   | تنظیم نامناسب می‌تواند بر کیفیت کار اثر بگذارد |
| بازوی نصب شده | نگهدارنده ابزار         | انتقال بخشی از وزن ابزار به سازه یا زمین   | نیازمند فضای کاری و مسیر حرکت مناسب است        |

#### ۴-۵- نگاشت خطرهای گزینه‌های مداخله

جدول ۴ سطح نسبی برخی خطرهای مواجهه را در مشاغل منتخب نشان می‌دهد. این جدول ابزار تشخیصی است و نباید جایگزین ارزیابی میدانی هر پروژه شود، زیرا ابزار، توالی عملیات و شرایط محیطی می‌تواند شدت خطر را تغییر دهد (Wang et al., 2015; Valero et al., 2016).

**جدول ۴- سطح نسبی خطرهای مواجهه و نواحی آسیب‌پذیر در مشاغل منتخب (Wang et al., 2015).**

| شغل       | ارتعاش کل بدن | وضعیت نامناسب | زانوزدن | حرکت تکراری | نواحی آسیب‌پذیر |
|-----------|---------------|---------------|---------|-------------|-----------------|
| بنا       | متوسط         | زیاد          | متوسط   | شدید        | کمر، بازو، زانو |
| کارگر بتن | زیاد          | زیاد          | متوسط   | زیاد        | کمر، شانه، زانو |
| نجار      | کم            | زیاد          | متوسط   | زیاد        | کمر، شانه، دست  |
| برق‌کار   | کم            | زیاد          | کم      | زیاد        | گردن، شانه، مچ  |
| عایق‌کار  | کم            | زیاد          | متوسط   | زیاد        | شانه، کمر، زانو |
| سقف‌ساز   | متوسط         | زیاد          | زیاد    | زیاد        | کمر، زانو، شانه |

بر پایه الگوی جدول ۴ و شواهد مربوط به دستگاه‌ها، جدول ۵ یک نگاشت پیشنهادی ارائه می‌کند. این نگاشت پیشنهاد قطعی خرید نیست؛ بلکه فرضیه‌ای برای آزمون در اجرای آزمایشی است. در هر مورد، انتخاب نهایی باید پس از مشاهده کار، گفت‌وگو با کاربر و بررسی سازگاری با مقررات ایمنی انجام شود.

**جدول ۵- نگاشت پیشنهادی اسکلت بیرونی برای مشاغل ساختمانی (Wang et al., 2015; Kim et al., 2019; Zhu et al., 2021).**

| شغل       | حمایت پیشنهادی | مزیت هدف                               | چالش اصلی                             |
|-----------|----------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
| بنا       | کمر / شانه     | حمایت از خم شدن تکراری و قراردعی مصالح | بار جبرانی، انعطاف‌پذیری و فضای محدود |
| نجار      | شانه / زانو    | حمایت در کار بالای سر و کار نزدیک زمین | وزن دستگاه و تغییر حرکت خمشی          |
| کارگر بتن | کمر / شانه     | کمک در خم شدن، کار با ابزار و حمل      | محدودیت حرکت و سازگاری با ابزار       |
| برق‌کار   | شانه / بازو    | حمایت از دستکاری بالای سر              | ایمنی روی نردبان و داربست             |
| نقاش      | شانه / مچ      | کاهش تقاضای کار تکراری و بالای سر      | حرکت ظریف، تعادل و دسترسی             |
| سقف‌ساز   | زانو / کمر     | حمایت از زانوزدن و وضعیت خمیده         | تحرك، تعادل و شرایط محیطی             |

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ظرفیت اسکلت‌های بیرونی در صنعت ساختمان به نوع وظیفه، الگوی خطر ارگونومیک، ناحیه‌ی درگیر بدن، ویژگی‌های کاربر و شرایط محیط کار وابسته است. از این رو، نمی‌توان یک نوع اسکلت بیرونی را برای همه‌ی مشاغل ساختمانی مناسب دانست. تحلیل حاضر بر این اساس انجام شده است که ابتدا نوع فشار غالب در هر وظیفه شناسایی شود، سپس ناحیه‌ی اصلی در معرض خطر تعیین گردد و در نهایت، نوع حمایت اسکلت بیرونی با نیاز واقعی کار تطبیق داده شود. این رویکرد با دیدگاهی که انتخاب اسکلت بیرونی را وابسته به وظیفه و زمینه‌ی کار می‌داند، هم‌خوان است (De Looze et al., 2016; De Bock et al., 2022).

### تناسب اسکلت بیرونی با نوع وظیفه

پشتیبان‌های کمر برای وظایفی قابل بررسی‌اند که در آن‌ها خم‌شدن مکرر، نگاه‌داشتن تنه در وضعیت خمیده یا بلندکردن بار از ارتفاع پایین بخش مهمی از فعالیت را تشکیل می‌دهد. در چنین شرایطی، این دستگاه‌ها می‌توانند با حمایت از تنه، بخشی از فعالیت عضلات کمر و فشار ادراک‌شده را کاهش دهند. با این حال، استفاده از پشتیبان کمر در فعالیت‌هایی که به چرخش مکرر تنه، تغییر سریع وضعیت، حرکت در فضای محدود یا بالا رفتن از نردبان و داربست نیاز دارند، باید با احتیاط انجام شود. در این شرایط، دستگاه ممکن است آزادی حرکت را کاهش دهد یا بر تعادل کاربر اثر بگذارد؛ بنابراین، ارزیابی آن باید در شرایط واقعی وظیفه انجام شود (Bosch et al., 2016; De Looze et al., 2016; Zhu et al., 2021).

پشتیبان‌های شانه و بازو برای وظایفی مانند نصب تأسیسات، رنگ‌آمیزی، برخی فعالیت‌های برق‌کاری و کار با ابزار در ارتفاع، گزینه‌ای قابل بررسی هستند. این سامانه‌ها با تحمل بخشی از وزن بازو یا ابزار می‌توانند فشار وارد بر عضلات شانه و اندام فوقانی را کاهش دهند. با این حال، سودمندی آن‌ها به حفظ دامنه‌ی حرکت، دید مناسب، تعادل و دسترسی ایمن به ابزار وابسته است. در کار روی نردبان یا داربست، هرگونه تغییر در مرکز جرم بدن یا محدودیت در واکنش سریع دست‌ها می‌تواند پیامد ایمنی داشته باشد (Kim et al., 2019; De Bock et al., 2022). پشتیبان‌های زانو و اندام تحتانی نیز برای وظایفی که با زانوزدن، نیمه‌نشستن، چمباتمه‌زدن یا حفظ طولانی‌مدت وضعیت پایین بدن همراه هستند، می‌توانند گزینه‌ای برای ارزیابی باشند. با این حال، نوع دستگاه، سطح کار، مدت مواجهه و نحوه‌ی تغییر وضعیت در فعالیت‌های مختلف یکسان نیست. از این رو، نمی‌توان اثر یک دستگاه را به همه‌ی فعالیت‌های زانوزدن تعمیم داد و لازم است راحتی، فشار موضعی، سهولت تغییر وضعیت و سازگاری با کفش و تجهیزات حفاظت فردی بررسی شود (De Bock et al., 2022; Zhu et al., 2021).

### تفاوت میان کاهش فشار فیزیکی و افزایش بهره‌وری

یکی از نکات اصلی این بررسی، ضرورت تفکیک میان پیامدهای نزدیک ارگونومیک و پیامدهای نهایی عملکردی است. کاهش فعالیت عضلانی، کاهش ناراحتی یا کاهش احساس خستگی، شاخص‌هایی مهم برای ارزیابی فشار فیزیکی هستند؛ اما به‌تنهایی ثابت نمی‌کنند که بهره‌وری نیروی کار افزایش یافته است. بهره‌وری مفهومی چندبعدی است و علاوه بر زمان انجام کار، کیفیت اجرا، میزان خطا، دوباره‌کاری، توقف، ایمنی و استمرار عملکرد را نیز دربرمی‌گیرد (Karthik & Rao, 2019; Umberto et al., 2013). ممکن است یک اسکلت بیرونی فعالیت عضلات هدف را کاهش دهد، اما هم‌زمان زمان پوشیدن و تنظیم آن زیاد باشد یا کاربر برای استفاده از آن به آموزش طولانی نیاز داشته باشد. همچنین، اگر دستگاه دامنه حرکت را محدود کند یا دسترسی به ابزار را دشوار سازد، زمان انجام وظیفه ممکن است افزایش یابد. بنابراین، کاهش فشار فیزیکی تنها زمانی می‌تواند به بهبود عملکرد کاری منجر شود که با حفظ کیفیت، ایمنی و سهولت انجام وظیفه همراه باشد. بر این اساس، ارزیابی اسکلت بیرونی باید مجموعه‌ای از شاخص‌های جسمی، ادراکی و عملیاتی را دربرگیرد و به یک اندازه‌گیری فیزیولوژیک یا گزارش ذهنی کاربر محدود نشود (De Looze et al., 2016; De Bock et al., 2022).

### انتقال بار و ضرورت ارزیابی کل بدن

اسکلت بیرونی با کاهش بار در یک ناحیه، نیرو را از بین نمی‌برد؛ بلکه ممکن است مسیر انتقال آن را تغییر دهد. برای نمونه، کاهش فشار وارد بر عضلات کمر ممکن است با افزایش فشار در لگن، ران یا سایر نقاط تماس همراه شود. به همین ترتیب، حمایت از بازو ممکن است بار عضلات شانه را کاهش دهد، اما وزن دستگاه یا محدودیت حرکتی را به تنه و اندام‌های دیگر منتقل کند. بنابراین، ارزیابی اسکلت بیرونی نباید تنها بر عضله یا مفصل هدف متمرکز باشد، بلکه باید ناراحتی سایر نواحی بدن، دامنه‌ی حرکت، تعادل، کنترل حرکتی و سهولت انجام وظیفه را نیز دربرگیرد (Bosch et al., 2016; Kim et al., 2019).



موضوع در محیط ساختمانی اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا کارگر در طول فعالیت، وضعیت خود را تغییر می‌دهد، راه می‌رود، خم می‌شود، زانو می‌زند، از ابزارهای مختلف استفاده می‌کند و گاهی در مسیرهای باریک یا روی سطوح ناپایدار حرکت می‌کند. دستگاهی که در یک وضعیت ثابت عملکرد مناسبی دارد، ممکن است هنگام چرخش، بالا رفتن، خزیدن یا عبور از فضای محدود مشکلاتی ایجاد کند. به همین دلیل، اجرای آزمایشی باید در یک وظیفه‌ی مشخص و با بررسی هم‌زمان پیامدهای مثبت و منفی انجام شود.

### انتخاب وظیفه‌محور و نقش کاربر

عنوان شغلی به‌تنهایی معیار مناسبی برای انتخاب اسکلت بیرونی نیست. عنوان‌هایی مانند بنا، برق‌کار، نقاش یا کارگر بتن، مجموعه‌ای از وظایف متفاوت را در بر می‌گیرند و هر وظیفه می‌تواند از نظر ارتفاع کار، وزن بار، ابزار، سرعت فعالیت و مدت مواجهه، فشار متفاوتی بر بدن وارد کند. بنابراین، انتخاب دستگاه باید بر اساس مشاهده‌ی مستقیم کار و تحلیل ویژگی‌های واقعی وظیفه انجام شود (Wang et al., 2015; Valero et al., 2016). در این فرایند، ابتدا باید مشخص شود که خطر موردنظر با حذف فعالیت، مکانیزه‌کردن، اصلاح ابزار، کاهش وزن بار، تغییر ارتفاع سطح کار یا بازطراحی توالی عملیات قابل کنترل است یا خیر. تنها پس از بررسی این راهکارها باید اسکلت بیرونی به‌عنوان یک کنترل مکمل مورد توجه قرار گیرد. پس از انتخاب اولیه، مشارکت کارگران در آزمون و تنظیم دستگاه اهمیت زیادی دارد؛ زیرا تجربه‌ی کاربر درباره‌ی وزن، گرما، فشار موضعی، سهولت پوشیدن، آزادی حرکت و سازگاری با ابزار می‌تواند مشکلاتی را آشکار کند که در ارزیابی فنی دستگاه مشخص نیست (Kim et al., 2019; De Bock et al., 2022).

### اسکلت بیرونی به‌عنوان مداخله‌ی مکمل

اسکلت بیرونی نباید جایگزین کنترل‌های مهندسی، سازمانی و آموزشی شود. استفاده از تجهیزات مکانیکی برای حمل بار، اصلاح ارتفاع سطح کار، کاهش وزن واحدهای قابل حمل، بهبود ابزار، بازطراحی محل ذخیره‌ی مصالح، چرخش وظیفه، زمان‌بندی استراحت و آموزش ارگونومی، همچنان از راهکارهای اصلی کنترل خطر به‌شمار می‌روند. اسکلت بیرونی باید برای کاهش خطر باقی‌مانده و در کنار این اقدامات به کار گرفته شود (Abdul-Tharim et al., 2011; Kim et al., 2019). همچنین، استفاده از اسکلت بیرونی نباید این تصور را ایجاد کند که می‌توان وزن بار، سرعت کار یا مدت مواجهه را بدون محدودیت افزایش داد. هدف این فناوری، حمایت از کاربر در یک فعالیت مشخص و کاهش بخشی از فشار فیزیکی است، نه افزایش نامحدود ظرفیت جسمی. بنابراین، دستورالعمل استفاده باید حدود کاربرد دستگاه، شرایط ممنوع، روش تنظیم، مدت استفاده و نحوه‌ی گزارش ناراحتی یا نقص فنی را مشخص کند (De Looze et al., 2016; Zhu et al., 2021).

### ملاحظات اجرایی و ایمنی

استقرار اسکلت بیرونی در پروژه‌های ساختمانی باید به‌صورت مرحله‌ای انجام شود. اجرای آزمایشی در یک وظیفه‌ی محدود و با گروه کوچکی از کاربران، امکان مقایسه‌ی وضعیت پیش و پس از استفاده را فراهم می‌کند. در این مرحله، بهتر است شاخص‌هایی مانند ناراحتی، خستگی، فعالیت عضلانی در صورت امکان، زمان انجام وظیفه، خطا، کیفیت، توقف، ایمنی و رضایت کاربر ثبت شوند. همچنین، باید مشخص شود که اثر مشاهده‌شده در طول زمان پایدار می‌ماند یا پس از کاهش تازگی فناوری و افزایش خستگی کاربر کاهش می‌یابد (Bosch et al., 2016; De Bock et al., 2022). در نهایت، شواهد موجود از این نتیجه حمایت می‌کنند که اسکلت بیرونی یک فناوری وابسته به زمینه است. اثر آن به رابطه‌ی میان خطر، وظیفه، ناحیه‌ی بدن، نوع دستگاه، ویژگی‌های کاربر و شرایط محیطی بستگی دارد. از این رو، انتخاب و استقرار آن باید بر پایه‌ی تحلیل وظیفه، مشارکت کاربر، اجرای آزمایشی و پایش هم‌زمان شاخص‌های سلامت، ایمنی، کیفیت و بهره‌وری انجام شود.

### ۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی ظرفیت اسکلت‌های بیرونی صنعتی برای کاهش اختلالات اسکلتی-عضلانی و پشتیبانی از بهره‌وری نیروی کار در صنعت ساختمان انجام شد. پاسخ به پرسش اصلی پژوهش نشان می‌دهد که اسکلت‌های بیرونی می‌توانند در برخی وظایف ساختمانی، بخشی از فشار فیزیکی، فعالیت عضلانی، خستگی و ناراحتی کاربر را کاهش دهند؛ با این حال، این اثر به نوع وظیفه، الگوی خطر، ناحیه‌ی درگیر بدن، ویژگی‌های دستگاه، شرایط محیط کار و نحوه‌ی استفاده وابسته است. بنابراین، اسکلت بیرونی را نمی‌توان راهکاری عمومی و یکسان برای همه‌ی مشاغل ساختمانی دانست.



پشتیبان‌های کمر برای وظایفی که در آن‌ها خم‌شدن مکرر، نگاه‌داشتن تنه در وضعیت خمیده یا حمل بار از ارتفاع پایین غالب است، گزینه‌ای قابل بررسی‌اند. پشتیبان‌های شانه و بازو برای برخی فعالیت‌های بالای سر و کار با ابزار در ارتفاع ظرفیت کاربردی دارند و پشتیبان‌های زانو و اندام تحتانی نیز در وظایف همراه با زانو زدن یا حفظ وضعیت پایین بدن قابل ارزیابی‌اند. بالین‌حال، انتخاب هر دستگاه باید پس از تحلیل واقعی وظیفه و بررسی سازگاری آن با حرکت، ابزار، تجهیزات حفاظت فردی، نردبان، داربست و فضای کار انجام شود.

یافته‌های این مقاله همچنین نشان می‌دهد که کاهش فعالیت عضلانی یا فشار فیزیکی به‌تنهایی اثبات‌کننده‌ی افزایش بهره‌وری نیست. برای ارزیابی اثربخشی واقعی، باید زمان انجام وظیفه، کیفیت، خطا، دوباره‌کاری، ایمنی، توقف، پذیرش کاربر و پیامدهای اقتصادی نیز بررسی شوند. از این رو، اسکلت بیرونی باید به‌عنوان یک مداخله‌ی ارگونومیک مکمل، در کنار کنترل‌های مهندسی، اصلاح ابزار و فرایند کار، آموزش، استراحت و مدیریت مناسب زمان به کار گرفته شود.

این پژوهش محدودیت‌هایی دارد. نخست، مطالعات بررسی‌شده از نظر نوع دستگاه، گروه کاربران، نوع وظیفه، مدت استفاده و شاخص‌های ارزیابی ناهمگون بودند و به همین دلیل، امکان محاسبه‌ی یک اندازه‌ی اثر واحد یا انجام فراتحلیل وجود نداشت. دوم، بخشی از شواهد از محیط‌های صنعتی عمومی یا شرایط آزمایشگاهی به‌دست آمده و ممکن است با پیچیدگی، تغییرپذیری و ناهمواری کارگاه‌های ساختمانی یکسان نباشد. سوم، این مقاله مطالعه‌ی میدانی پیش و پس از استقرار یک دستگاه مشخص نیست؛ بنابراین، نمی‌توان بر اساس آن کاهش قطعی اختلالات اسکلتی-عضلانی یا افزایش کمی بهره‌وری را برای یک شغل خاص اعلام کرد. بر این اساس، پژوهش‌های آینده باید به سمت مطالعات میدانی طولانی‌مدت در وظایف واقعی ساختمانی حرکت کنند و پیامدهای جسمی، عملکردی، ایمنی و اقتصادی اسکلت‌های بیرونی را به‌صورت هم‌زمان بسنجند. اجرای آزمایشی با مشارکت کارگران، استفاده از معیارهای استاندارد برای انتخاب و تنظیم دستگاه و مقایسه‌ی هزینه‌های خرید، آموزش و نگهداری با منافع احتمالی، می‌تواند مبنای دقیق‌تری برای تصمیم‌گیری مدیران پروژه و متخصصان ایمنی فراهم کند.

## پی‌نوشت

- 1- Work-related musculoskeletal disorders
- 2- Labor productivity
- 3- Ergonomics
- 4- Exoskeleton

**حامیان مالی:** این پژوهش بدون دریافت حمایت مالی یا معنوی از سازمان، مرکز یا نهاد بیرونی انجام شده است.

**مشارکت نویسندگان:** همه نویسندگان در تدوین و تأیید مقاله مشارکت داشته‌اند، اما به‌صورت مشخص، احسان باقری مسئولیت ایده‌پردازی، گردآوری منابع، تحلیل و نگارش پیش‌نویس؛ و بهنود برمیه‌ور و محمد حسین محمودی ساری، مسئولیت نظارت علمی، بررسی انتقادی و تأیید نسخه نهایی را عهده‌دار بوده‌اند.

**اعلام عدم تعارض منافع:** نویسندگان اعلام می‌دارند که در انجام این پژوهش هیچ‌گونه تعارض منافی برای ایشان وجود نداشته است.

**بیانیه شفافیت کاربست هوش مصنوعی:** نویسندگان اعلام می‌کنند که از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است. تمامی محتوای علمی، تحلیل‌ها، نتایج و مسئولیت نهایی مقاله بر عهده نویسندگان است.

**قدردانی:** نویسندگان از همه افرادی که با ارائه مشاوره علمی در تدوین این مقاله همکاری کردند، سپاس‌گزاری می‌کنند.

## منابع

- Abdul-Tharim, A. H., Jaffar, N., Lop, N. S., & Mohd-Kamar, I. F. (2011). Ergonomic risk controls in construction industry: A literature review. *Procedia Engineering*, 20, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.151>
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., & de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54, 212–217. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.004>

- De Bock, S., Ghillebert, J., Govaerts, R., Tassignon, B., Rodriguez-Guerrero, C., Crea, S., & De Pauw, K. (2022). Benchmarking occupational exoskeletons: An evidence mapping systematic review. *Applied Ergonomics*, 98, 103582. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103582>
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59(5), 671–681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
- Karthik, D., & Rao, C. B. K. (2019). Influence of human parameters on labor productivity in the construction industry. *Human Factors*, 61(7), 1086–1098. <https://doi.org/10.1177/0018720819853514>
- Kim, S., Moore, A., Srinivasan, D., Akanmu, A., Barr, A., Harris-Adamson, C., & Nussbaum, M. A. (2019). Potential of exoskeleton technologies to enhance safety, health, and performance in construction: Industry perspectives and future research directions. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3–4), 185–191. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1572031>
- Umberto, C. G., Giovanni, C. M., Susan, M. B., & Suzanne, S. (2013). An exploratory study of the relationship between construction workforce physical strain and task level productivity. *Construction Management and Economics*, 32(6), 548–564. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.831463>
- Valero, E., Sivanathan, A., Bosché, F., & Abdel-Wahab, M. (2016). Musculoskeletal disorders in construction: A review and a novel system for activity tracking with body area network. *Applied Ergonomics*, 54, 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.11.020>
- Wanberg, J., Harper, C., Hallowell, M. R., & Rajendran, S. (2013). Relationship between construction safety and quality performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(10), 04013003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000732](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000732)
- Wang, D., Dai, F., & Ning, X. (2015). Risk assessment of work-related musculoskeletal disorders in construction: State-of-the-art review. *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(6), 04015008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000979](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000979)
- Young, A. J., & Ferris, D. P. (2017). State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 25(2), 171–182. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2016.2521160>
- Zhu, Z., Dutta, A., & Dai, F. (2021). Exoskeletons for manual material handling: A review and implication for construction applications. *Automation in Construction*, 122, 103493. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103493>