UMSHA Press

Iranian Journal of Ergonomics

Iran J Ergon, 2022; 10(2): 140-50.

https://journal.iehfs.ir/

Original Article

Industrial Exoskeletons, Challenges and Suggestions in Ergonomic Studies

Abdollah Vahedi[1,*], **Iman Dianat**[1]

[1] Department of Occupational Health and Ergonomics, School of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

Article History:
Received: 14/08/2022
Revised: 07/09/2022
Accepted: 28/09/2022
ePublished: 28/09/2022

***Corresponding author:** Abdollah Vahedi, Department of Occupational Health and Ergonomics, School of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran.
Email: a.vahedi62@gmail.com

Abstract

Objectives: The challenges that have been raised today, such as changes in population structure, diverse workforce, mass production, and automation of production, indicate the need to review production systems. Classical ergonomic solutions are no longer suitable for carrying heavy loads and repetitive activities. By supporting workers to reduce physical and mental stress, human-centered assistant applications (HCAAs) should solve this problem. The technical problems of the exoskeleton have been investigated in many scientific studies, but its effect on the human user has not been paid much attention to. So, this study reviews the studies that have examined industrial exoskeletons from the ergonomic point of view

Methods: Papers concerning exoskeleton in ergonomic studies are reviewed using Scopus and PubMed databases. The selected papers were published in the reviewed journals from 2014 to 2021. Books, conference papers, and reports are not included in this study. In the present study, only official scientific journals in English are reviewed, and the references obtained from the search are screened by the title and abstract. The full text of the papers is checked if the abstract does not contain enough information. Those papers that met the inclusion criteria are listed in this review.

Results: Studies on ergonomic industrial exoskeletons account for a small share of studies on industrial exoskeletons. From 2012 to the time of conducting this study, 96 studies were found on industrial exoskeletons, of which 10.41% design or evaluate industrial exoskeletons from an ergonomic point of view. This is very small compared to the studies on exoskeleton conducted since 2012 and only about 0.4% of the studies.

Conclusion: The reviewed studies emphasize the facilitation of the successful use of exoskeletons in occupational structures by considering at least three dimensions (physical requirements, task performance, and usability), all of which can contribute to determining the potential efficiency of exoskeletons in the work environment. Due to the potential of this technology, more studies should be conducted in the future to cover some of the identified challenges and compare the exoskeleton design methods under more diverse and more realistic situations.

Keywords: Ergonomics; Industrial exoskeleton; External skeleton; Assistant systems

Copyright © 2022 Iranian Journal of Ergonomics. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (*http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/*) which permits copy and redistribute the material just in noncommercial usages, provided the original work is properly cite

Extended Abstract

Background and Objective

Exoskeletons can be defined as a wearable oexterior mechanical structure that enhances a person's ability. Exoskeleton is divided into two categories: "Active" and "Passive". The active exoskeleton consists of one or more mechanical actors (actuators) that increase human power and help the movement of human joints. These actocitor can be electric motors, hydraulic actocitor, pneumatic muscles or other types. A fully passive system does not use any type of activity and instead uses materials, springs or dampers capable of storing energy collected by human movement and using it to support body posture or movement if needed. For example, a passive exoskeleton may store energy when a person bends down and uses this stored energy to support, maintain the position or time of lifting the object and lifting. Since many scientific studies have dealt with the technical problems of exoskeletons, but the effect on human users has not been paid much attention. In this study, we investigate studies that have looked at industrial exoskeletons from an ergonomic point of view, and instead of addressing technical issues, we look at human factors and the impact this tool can have on the user. The aim of this study was to show little attention to human factors in the design and use of this auxiliary tool and also to suggest researchers to investigate the effect of exoskeletons on health, safety, comfort and performance of personnel in industrial units which is one of the main goals of ergonomics science.

Materials and Methods

Probing of articles related to the use of Scopus and PubMed databases has been conducted, selected articles have been published in the journals, 2014 to 2021. Books, conference papers and reports were not probed in this study. This study is limited to official scientific publications in English, the references obtained from this search have been picked based on title and abstract. If the abstract did not have enough information, the entire text of the article was probed. Articles that met the selection criteria were included in this study.

Inclusion criteria:

- Keywords in the title or abstract of the article.
- In the title or abstract or keywords of the article, the presence of the word Ergonomics.
- In the title or abstract or keywords of the article there is one of the words Exoskeleton, Wearable Device, Assistive Device and Wearable Robot.
- An additional criterion is the application for exoskeleton in the paper.
- All different types of exoskeleton, namely active and passive, anthropomorphic or non-anthropomorphic, exoskeleton for upper body, lower body or whole body were considered.
- Only studies using ergonomics in the design or evaluation of exoskeletons were selected.

Exclusion criteria: According to the purpose of this study, which is to probe the exoskeletons used in the industry, articles that dealt with applications outside of industrial environments (e.g. rehabilitation, medicine, remote operations, military and virtual reality) were excluded.

Results

The initial search resulted in the identification of 81 articles. After deleting duplicate materials and screening the titles, abstracts and full text of the studies were reviewed, 10 articles that met the criteria for deletion and inclusion were recorded in this study. Studies on ergonomic industrial exoskeletons have a small share of industrial exoskeleton studies. Since 2012, the number of studies in the field of industrial exoskeletons is 96, of which 10.41 % (10 articles) are related to studies designed or evaluated by ergonomic-vision industrial exoskeletons. Almost half of the exoskeletons studied in this study support overhead and arm lifting, indicating the importance of overhead work and the great impact this type of work has on the health of the workforce. Shoulder musculoskeletal disorders are a particular concern for health at work as it requires a long recovery period. Only one of the exoskeletons examined is active and the rest is passive, this can indicate that passive exoskeletons are more acceptable in the industry because they are lightweight, cheaper and simpler and are accepted more by industry and workers.

Discussion

In this review article, we reviewed the studies that probed industrial exoskeletons from an ergonomic point of view. Most of these studies probe the design of different exoskeletons in only one or more simulation tasks. It is unclear whether the current results, for example for other working heights, the directions of force, types/ masses of the instrument, or the duration of the task, can be generalized. In particular, the results model can be changed with more physical needs if you use a task. In most of these studies, participants were young and healthy and were not employed from the population. Therefore, we should be cautious in extending the results to elderly, injured or obese workers, and the participants were novices to do things. Studies focused on the short-term effects of exoskeleton, more research is needed to probe the long-term effects of using such interventions. For example, long-term use of exoskeletons can cause muscle weakness in the body.

Conclusion

Studies, in order to facilitate the successful use of exoskeletons in occupational structures, emphasize on at least three dimensions (physical requirements, performance in duty and usability) all of which can be effective in determining the potential efficacy of exoskeletons in the workplace. Different designs were tested in the studies and resulted in different outputs in these dimensions, and of course no specific designs were distinguished superior to others in all available dimensions. However, due to the evident potential of this technology, more research will be needed in the future to cover some of the challenges identified and compare exoskeleton design methods under more diverse and realistic scenarios.

Please cite this article as follows: Vahedi A, Dianat I. Industrial Exoskeletons, Challenges and Suggestions in Ergonomic Studies. *Iran J Ergon*. 2022; 10(2): 140-50.

مجله ارگونومی

دوره ۱۰، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، صفحات: ۱۵۰-۱۴۰

https://journal.iehfs.ir

UMSHA Press

مقاله پژوهشی

اگزواسکلت‌های صنعتی، چالش‌ها و پیشنهادها در مطالعات ارگونومی

عبداله واحدی[۱*]، ایمان دیانت[۱]

[۱] گروه بهداشت‌حرفه‌ای و ارگونومی، دانشکده‌ی بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۵/۲۳

تاریخ داوری مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۶

تاریخ انتشار مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۰۶

تمامی حقوق نشر برای دانشگاه علوم پزشکی همدان محفوظ است.

* **نویسنده مسئول:** عبداله واحدی؛ گروه بهداشت‌حرفه‌ای و ارگونومی، دانشکده‌ی بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران.

ایمیل: a.vahedi62@gmail.com

چکیده

اهداف: چالش‌های امروزه، مانند تغییر در ساختار جمعیت، نیروی کار متنوع، تولید انبوه و خودکار شدن تولید، نشان‌دهنده‌ی لزوم بازنگری در سیستم‌های تولید است. راه‌حل‌های ارگونومیک کلاسیک برای حمل بارهای سنگین و فعالیت‌های تکراری، کافی نیستند. اپلیکیشن‌های دستیار انسان‌محور باید با حمایت از کارگران برای کاهش تنش‌های فیزیکی و روانی، این معضل را برطرف کنند. بررسی‌های علمی زیادی به مشکلات فنی اگزواسکلت پرداخته‌اند ولی به اثر آن بر روی کاربر انسانی چندان توجه نشده است. به همین دلیل در این مقاله به بررسی مطالعاتی می‌پردازیم که از دید ارگونومی به اگزواسکلت‌های صنعتی نگاه کرده‌اند.

روش کار: بررسی مقالات مرتبط با اگزواسکلت در مطالعات ارگونومی با استفاده از پایگاه‌های داده Scopus و PubMed انجام شده است، مقالات انتخاب شده در مجلات مورد بررسی، ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ چاپ شده است. کتاب‌ها، مقالات کنفرانس و گزارش‌ها در این مطالعه بررسی نشد. این بررسی به نشریات علمی رسمی به زبان انگلیسی محدود بوده، مراجع به دست آمده از این جستجو بر اساس عنوان و چکیده غربال شده است. اگر چکیده دارای اطلاعات کافی نبود، کل متن مقاله بررسی شد. مقالاتی که از معیارهای انتخاب برخوردار بودند، در این بررسی آورده شده‌اند.

یافته‌ها: مطالعات انجام شده در زمینه‌ی اگزواسکلت‌های صنعتی ارگونومیک، سهم ناچیزی از مطالعات اگزواسکلت‌های صنعتی را شامل می‌شود. از سال ۲۰۱۲ تا زمان نگارش این مقاله، تعداد مطالعات در زمینه اگزواسکلت‌های صنعتی ۹۶ مورد می‌باشد که ۱۰/۴۱ درصد از آن مربوط به مطالعاتی است که اگزواسکلت‌های صنعتی با دید ارگونومیک طراحی یا ارزیابی شده‌اند. همچنین این مقدار در مقایسه با تعداد مطالعاتی که از سال ۲۰۱۲ در زمینه‌ی اگزواسکلت انجام شده است بسیار ناچیز و تنها درحدود ۰/۴ درصد از مطالعات را شامل می‌شود.

نتیجه‌گیری: مطالعات بررسی شده، به منظور تسهیل استفاده‌ی موفقیت‌آمیز اگزواسکلت‌ها در ساختارهای شغلی، با در نظر گرفتن حداقل سه بعد تأکید می‌کنند (الزامات جسمانی، عملکرد در وظیفه و قابلیت استفاده) که تمامی آن‌ها می‌توانند در تعیین کارآیی بالقوه‌ی اسکلت‌های خارجی در محیط کاری تأثیرگذار باشند. با توجه به توان بالقوه‌ی مشهود در این فناوری، تحقیقات بیشتری در آینده مورد نیاز خواهند بود تا برخی از چالش‌های مورد شناسایی را پوشش داده و روش‌های طراحی اگزواسکلت را تحت حالات متنوع‌تر و واقع‌بینانه‌تری مورد مقایسه قرار دهند.

کلید واژه‌ها: ارگونومی؛ اگزواسکلت صنعتی؛ اسکلت خارجی؛ سیستم‌های دستیار

استناد: واحدی عبداله، دیانت ایمان. اگزواسکلت‌های صنعتی، چالش‌ها و پیشنهادها در مطالعات ارگونومی. مجله ارگونومی، تابستان ۱۴۰۱؛۱۰(۲): ۱۵۰-۱۴۰.

مقدمه

اگزواسکلت (اسکلت‌خارجی) (Exoskeleton) را می‌توان یک ساختار مکانیکی بیرونی پوشیدنی (Wearable) تعریف کرد که توانایی یک فرد را افزایش می‌دهد. اگزواسکلت به دو دسته‌ی «اکتیو» و «پسیو» تقسیم می‌شود. اگزواسکلت فعال شامل یک یا

چند عملگر مکانیکی (اکچویتور) (Actuators) است که قدرت انسان را افزایش داده و به حرکت مفصل‌های انسان کمک می‌کند. این اکچویتورها می‌توانند موتور الکتریکی، اکچویتور هیدرولیکی، ماهیچه‌ی پنوماتیکی (Pneumatic muscles) یا از انواع دیگری باشد. یک سیستم کاملاً پسیو از هیچ نوع اکچویتوری استفاده نمی‌کند و به جای آن از مواد، فنرها یا دمپرها (Damper) با قابلیت ذخیره‌سازی انرژی جمع‌آوری شده توسط حرکت انسانی و به‌کارگیری آن برای پشتیبانی حالت بدن یا حرکت در صورت نیاز، استفاده می‌کند. برای مثال، یک اگزواسکلت پسیو ممکن است هنگامی که فردی خم می‌شود، انرژی ذخیره کند و از این انرژی ذخیره شده، جهت پشتیبانی، حفظ موقعیت یا زمان بلند کردن شیء و برخواستن استفاده کند [۲،۱].

اسکلت‌های‌خارجی را بر اساس پشتیبانی از قسمت‌های مختلف بدن می‌توان طبقه‌بندی نمود: تأمین قدرت یا پشتیبانی از اندام‌های پایینی (اگزواسکلت پایین‌تنه)، اندام‌های بالایی (اگزواسکلت بالا تنه) و اندام‌های بالایی و پایینی (اگزواسکلت تمام تنه). علاوه بر این، چندین نمونه اگزواسکلت تک‌مفصلی نیز ساخته شده است.

در نهایت، اگزواسکلت را می‌توان با توجه به سطح تناسب یا شباهت به آنتروپومتری (Anthropometry) انسان دسته‌بندی نمود. اگزواسکلت انسان‌نما (آنتروپومورفیک) (Anthropomorphi) دارای مفاصلی با محورهای چرخشی است که با حرکت چرخشی مفاصل انسان هم‌راستاست. این امر برای انواع غیرانسان‌نما (غیر-آنتروپومورفیک "Non- anthropomorphic") صادق نیست. یک اگزواسکلت کاملاً آنتروپومورفیک از توانایی حرکت ربات، مشابه حرکات پوشنده‌ی آن برخوردار بوده و به تبع آن آزادی حرکت بیشتری دارد. این سیستم‌ها با چالش‌های طراحی، جهت اطمینان از تناسب برای کاربران با جثه‌های متفاوت و حفظ حرکات طبیعی سازگار توسط کاربر مواجه است. انواع غیر-آنتروپومورفیک معمولاً ساده‌تر بوده و می‌توان با ساختار بهینه برای انجام وظایف خاص طراحی شوند و از قابلیت مصرف کارآمدتر انرژی در مقابل سیستم‌های آنتروپومورفیک برخوردار باشند [۳]. در مطالعه‌ی de la Tejera و همکاران، مدل طبقه‌بندی عمومی برای اسکلت‌های بیرونی ارائه شده است [۴].

حوزه‌ی کاربردی اصلی اگزواسکلت، اهداف پزشکی/ توان‌بخشی است که از دستگاه‌ها برای پشتیبانی و حمایت فیزیکی از افراد ضعیف، آسیب‌دیده یا کم‌توان (Disabled) جهت انجام حرکات گسترده در فعالیت‌های زندگی روزمره مانند راه رفتن، استفاده از پله، نشستن و برخواستن، دراز کردن دست و گرفتن چیزی استفاده می‌شود. تعداد اندکی از اگزواسکلت‌ها برای کاربردهای نظامی طراحی شده تا سربازان بتوانند بارهای سنگین را بلند یا جابه‌جا کنند [۳].

چالش‌های امروزه، مانند تغییر در ساختار جمعیت، نیروی کار متنوع، تولید انبوه و خودکار شدن تولید، نشان‌دهنده‌ی لزوم بازنگری در سیستم‌های تولید است. راه‌حل‌های ارگونومیک کلاسیک برای حمل بارهای سنگین و فعالیت‌های تکراری، کافی نیستند. اپلیکیشن‌های دستیار انسان‌محور (Human Centered Assistance Applications) HCAA باید با حمایت از کارگران برای کاهش تنش‌های فیزیکی و روانی، این معضل را برطرف کنند. با توجه به اینکه فرایندها در محیط کار آینده پیچیده‌تر می‌شوند، انعطاف‌پذیری بیشتر می‌تواند فاکتور کلیدی برای موفقیت باشد. با به کارگیری سیستم‌های دستیار (Assistance systems)، کاهش قابل توجهی در تنش‌های فیزیکی و روانی اتفاق خواهد افتاد. کاهش راندمان کار به دلیل عملکرد ضعیف نیروی کار با سن بالا، اکنون قابل مدیریت کردن است [۵].

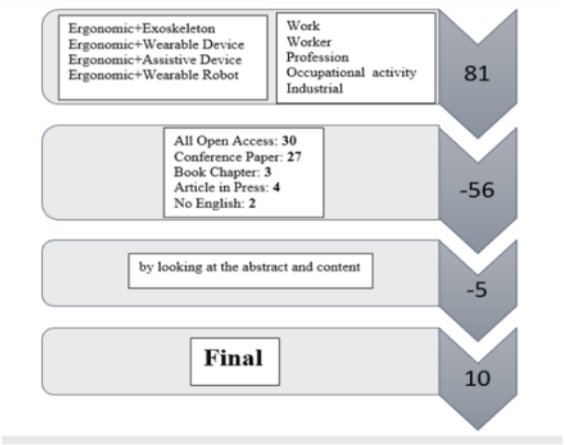
از آن‌جا که بررسی‌های علمی زیادی به مشکلات فنی اگزواسکلت‌ها پرداخته ولی به اثر آن بر روی کاربر انسانی چندان توجه نشده است (۶). در این مطالعه به بررسی مطالعاتی می‌پردازیم که از دید ارگونومی به اگزواسکلت‌های صنعتی نگاه کرده‌اند و به جای پرداختن به مسائل فنی، به فاکتورهای انسانی و تأثیری که این ابزار کمکی می‌تواند بر کاربر داشته باشد، می‌پردازیم.

هدف از انجام این مطالعه، نمایان کردن کم توجهی به فاکتورهای انسانی در طراحی و استفاده از این ابزار کمکی است و همچنین پیشنهاد به محققین برای بررسی تأثیر اگزواسکلت‌ها بر سلامت، ایمنی، راحتی و عملکرد پرسنل در واحدهای صنعتی که از اهداف اصلی علم ارگونومی است.

روش کار

شکل ۱ روند بررسی مقالات را نشان می‌دهد، بررسی مقالات مرتبط با استفاده از پایگاه‌های داده‌ی Scopus و PubMed انجام شده است، مقالات انتخاب شده در مجلات مورد بررسی در سال ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ چاپ شده است. کتاب‌ها، مقالات کنفرانس‌ها و گزارش‌ها در این مطالعه بررسی نشد. این بررسی به نشریات علمی رسمی به زبان انگلیسی محدود بوده، مراجع به دست آمده از این جستجو بر اساس عنوان و چکیده غربال شده است. اگر چکیده دارای اطلاعات کافی نبود، کل متن مقاله بررسی شد. مقالاتی که از معیارهای انتخاب برخوردار بودند، در این بررسی آورده شده‌اند.

فقط اگزواسکلت‌هایی که برای اهداف ارگونومی در محیط کار استفاده شده بودند در نظر گرفته شد. ابتدا یک جستجو با کلمات کلیدی شامل Industrial Exoskeleton و Ergonomic انجام شد که نتایج مفیدی نداشت، سپس کلمات، Wearable device، Assistive Device و Robot Wearable نیز اضافه گردید و یک معیار دیگر برای کاربرد اگزواسکلت شامل Work، Worker، Profession، Occupational Activity نیز در نظر گرفته شد. در شکل ۱ ترکیب کلمات کلیدی استفاده شده نشان داده شد. برای اطمینان از عدم وجود ورود تکراری و محدود کردن دامنه‌ی جستجو به اسکلت‌های خارجی صنعتی که در محیط کار و به منظور اهداف ارگونومی استفاده شده‌اند، فیلترهای مرتبط در Scopus استفاده شد که در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱: روند بررسی مقالات

معیارهای ورود مقاله به مطالعه:

- کلید واژه‌های مورد نظر در عنوان یا چکیده‌ی مقاله وجود داشته باشد.
- در عنوان یا چکیده یا کلیدواژه‌های مقاله، کلمه Ergonomic وجود داشته باشد.
- در عنوان یا چکیده یا کلیدواژه‌های مقاله یکی از کلمات Exoskeleton، Wearable Device، Assistive Device و Wearable Robot وجود داشته باشد.
- یک معیار اضافی، ارائه‌ی کاربرد برای اگزواسکلت در مقاله بوده است.
- تمام انواع مختلف اگزواسکلت، یعنی اکتیو و پسیو، آنتروپومورفیک یا غیرآنتروپومورفیک، اگزواسکلت برای بالاتنه، پایین‌تنه یا کل بدن، در نظر گرفته شد.
- فقط مطالعاتی که از ارگونومی در طراحی یا ارزیابی اگزواسکلت‌ها استفاده شده، انتخاب گردید.

معیارهای خروج مقاله از مطالعه: با توجه به هدف مطالعه که بررسی اگزواسکلت‌های مورد استفاده در صنعت می‌باشد، مقالاتی که به کاربردهای خارج از محیط‌های صنعتی پرداخته بودند (مثلاً توان‌بخشی، پزشکی، عملیات از راه دور (Teleoperation)، نظامی و واقعیت مجازی (Virtual reality)، حذف شدند.

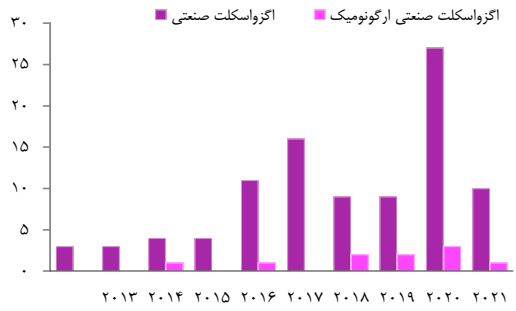
یافته‌ها

جستجوی اولیه منجر به شناسایی ۸۱ مقاله شد. پس از حذف مطالب تکراری و غربالگری عناوین، خلاصه مقالات و متن کامل مطالعات بررسی شد، ۱۰ مقاله که دارای معیارهای حذف و ورود بودند، در این مطالعه ثبت شدند (شکل ۱).

نتایج به دست آمده در سه جدول خلاصه شد. جدول ۱، به صورت کلی مقالات را بررسی می‌کند که شامل عنوان مقاله، نویسندگان مقاله، سال چاپ، نام مجله، تعداد ارجاعات به مقاله و کلمات کلیدی می‌باشد. در جدول ۲ نوع اگزواسکلت که در مطالعه از آن استفاده شده را بررسی کردیم در این جدول نام اگزواسکلت‌ها، نوع کاری که با اگزواسکلت انجام می‌شود برای مثال: Lifting، Overhead work، Bending or Reaching، Stooping قسمتی از بدن که حمایت می‌شود، فعال یا غیرفعال بودن اگزواسکلت، و هدف از استفاده‌ی آن در صنعت بررسی شده است. در جدول ۳ به فاکتورهای مورد بررسی در مطالعه اشاره کردیم که شامل Evaluation Factors، Evaluation Methods، Evaluation Type (Objective and subjective)، Number of subjects، Genders of the subjects، محل انجام مطالعه (Field or Lab) و نتایج مطالعه می‌باشد.

برای بررسی و درک پیشرفت در این زمینه و جایگاه فعلی آن، توزیع سهم مطالعات طی سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در شکل ۳ این مقادیر نشان‌دهنده‌ی توجه روزافزون به کاربرد و توسعه‌ی سیستم‌های کمک به کارگران است. تعداد مشارکت‌ها در سال ۲۰۲۱ نسبتاً کم است، زیرا جستجوها برای این مقاله در ژوئن ۲۰۲۱ انجام شد.

همانطور که در شکل ۲ دیده می‌شود مطالعات انجام شده در زمینه‌ی اگزواسکلت‌های صنعتی ارگونومیک سهم ناچیزی از مطالعات اگزواسکلت‌های صنعتی را شامل می‌شود. از سال ۲۰۱۲ تعداد مطالعات در زمینه‌ی اگزواسکلت‌های صنعتی ۹۶ مورد می‌باشد که ۱۰/۴۱ درصد (۱۰ مقاله) از آن مربوط به مطالعاتی است که اگزواسکلت‌های صنعتی با دید ارگونومیک طراحی یا ارزیابی شده‌اند. همچنین این مقدار در مقایسه با تعداد مطالعاتی که از سال ۲۰۱۲ در زمینه‌ی اگزواسکلت انجام شده است (۲۳۸۷ مقاله) بسیار ناچیز و تنها در حدود ۰/۴ درصد از مطالعات را شامل می‌شود. همانطور که در مقدمه اشاره شد و با توجه به درصد مطالعات مرتبط با موضوع، کم توجهی به بهینه بودن سطح مشترک انسان با اگزواسکلت و تأثیر این موضوع بر سلامت و عملکرد، آشکار است.



شکل ۲: تعداد انتشار در هر سال

۵۰ درصد مطالعات در ایالات متحده‌ی آمریکا و در چین، فرانسه، آلمان، هلند، عربستان سعودی، کره جنوبی و اسپانیا، هر کدام یک مطالعه انجام شده است. این مورد می‌تواند این ایده را مطرح کند که محققین در سایر کشورها می‌توانند به این موضوع به عنوان یک موضوع جدید برای تحقیق نگاه کنند.

جدول ۱: مطالعات بررسی شده

شماره منبع	نویسندگان	نوان مقاله	تاریخ انتشار	عنوان مجله	تعداد ارجاع	کلمات کلیدی
۱۱	Yan و همکاران	Development and testing of a wearable passive lower-limb support exoskeleton to support industrial workers	۲۰۲۱	Biocybernetics and Biomedical Engineering	۰	Arthritis; Comfort; Endurance time; Muscular activity; Plantar pressure; Support exoskeleton
۱۲	Madinei و همکاران	Biomechanical assessment of two back-support exoskeletons in symmetric and asymmetric repetitive lifting with moderate postural demands	۲۰۲۰	Applied Ergonomics	۵	Electromyography; Energy expenditure; Lifting; Low-back pain; Usability
۱۳	Iranzo و همکاران	Ergonomics assessment of passive upper-limb exoskeletons in an automotive assembly plant	۲۰۲۰	Applied Ergonomics	۲	Automotive; EMG; Exoskeleton; Industry conditions; Motion-tracking; Upper-limb
۱۴	Cha و هکاران	Supporting Surgical Teams: Identifying Needs and Barriers for Exoskeleton Implementation in the Operating Room	۲۰۲۰	Human Factors	۳	Workplace ergonomics; Interventions; Qualitative methods; Surgical care and procedural technologies; Usability testing and evaluation
۱۵	Hyun و همکاران	A light-weight passive upper arm assistive exoskeleton based on multi-linkage spring-energy dissipation mechanism for overhead tasks	۲۰۲۰	Robotics and Autonomous Systems	۴	H-VEX; Multi-linkage spring-energy storage mechanism; Poly-centric exoskeletal joint; Upper-limb assistive exoskeleton
۱۶	Luger و همکاران	Influence of a passive lower-limb exoskeleton during simulated industrial work tasks on physical load, upper body posture, postural control and discomfort	۲۰۱۹	Applied Ergonomics	۱۲	Industrial ergonomics; Manual materials handling; Static postural stability
۹	Kim و همکاران	Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I – “Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance	۲۰۱۸	Applied Ergonomics	۹۷	Exoskeleton; Intervention; Overhead work
۱۰	Kim و همکاران	Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II – “Unexpected” effects on shoulder motion, balance, and spine loading	۲۰۱۸	Applied Ergonomics	۷۶	Overhead work; Exoskeleton; Intervention
۸	Bosch و همکاران	The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work	۲۰۱۶	Applied Ergonomics	۱۲۴	Discomfort; Electromyography; Endurance; Exoskeleton; Industry; Trunk bending
۱۷	Sylla و همکاران	Ergonomic contribution of ABLE exoskeleton in automotive industry	۲۰۱۴	International Journal of Industrial Ergonomics	۶۴	Automotive industry; Cobot; Ergonomics; Intelligent assist device (IAD); Upper limb exoskeleton

جدول ۲: خصوصیات اگزواسکلت‌های بررسی شده

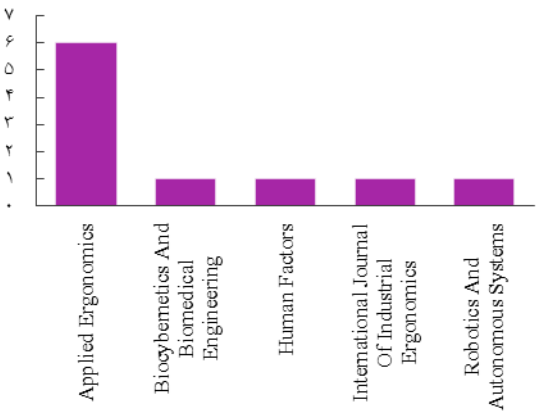
شماره منبع	نام اگزواسکلت	نوع کار و وظیفه	ناحیه‌ی بدن حمایت شده	نوع اگزواسکلت	هدف از طراحی اگزواسکلت
۱۱	prototype of the weight support exoskeleton	وظایف چمباتمه زده	پشتیبانی وزن	غیر فعال	برای ارائه‌ی پشتیبانی گرانشی برای کارگران صنعت، به منظور کاهش شیوع اختلالات اسکلتی- عضلانی، آسیب‌های مفصلی و آرتریت ناشی از انجام مکرر یا مداوم چمباتمه زدن، طراحی شده.
۱۲	BackX™ AC	خم شدن و بلند کردن	پشتیبانی از کمر	غیر فعال	برای کاهش نیروی وارد بر ستون فقرات در حالی که به جلو خم می شود، طراحی شده.
	Laevo™ V2.5	بلند کردن	پشتیبانی از کمر	غیر فعال	برای کاهش نیروی وارد بر ستون فقرات در حالی که به جلو خم می‌شود، طراحی شده.
۱۳	EXO	برداشتن و حمل کردن کار بالای سر	پشتیبانی از شانه و بازو	غیر فعال	به عنوان یک راه‌حل مکانیکی ساده که تنش‌های عبوری از شانه‌ها و پشت کاربر را کاهش می‌دهد، طراحی شده.
۱۴	EXO	برداشتن و حمل کردن کار بالای سر	پشتیبانی از شانه و بازو	غیر فعال	به عنوان یک راه‌حل مکانیکی ساده که تنش‌های عبوری از شانه‌ها و پشت کاربر را کاهش می‌دهد، طراحی شده.
۱۵	H-VEX	برداشتن و حمل کردن کار بالای سر	پشتیبانی از کمر	غیر فعال	به منظور کاهش خستگی در بازوی کاربر و برای بهبود بهره وری شخصی و جلوگیری از اختلالات اسکلتی- عضلانی، برای کارهای بالای سر، توسعه یافته و به تدریج اصلاح و تکامل یافته.
۱۶	Chairless Chair	کار نشسته	پشتیبانی از پا	غیر فعال	برای کاهش خستگی ناشی از ایستادن طولانی‌مدت طراحی شده.
۹	EksoVest	بالا بردن بازو	پشتیبانی از بازو	غیر فعال	برای پشتیبانی در کار بالای سر طراحی شده.
۱۰	EksoVest	بالا بردن بازو	پشتیبانی از بازو	غیر فعال	برای پشتیبانی در کار بالای سر طراحی شده.
۸	Laevo™ V2.5	بلند کردن	پشتیبانی از کمر	غیر فعال	برای محافظت از ستون فقرات در هنگام خم شدن هنگام کار یا بلند کردن اجسام طراحی شده.
۱۷	ABLE	کار بالای سر	پشتیبانی از بازو	فعال	برای به حداقل رساندن زحمت کارگران و حفظ راندمان بالا طراحی شده.

جدول ۳: نام و شکل اگزواسکلت‌های بررسی شده

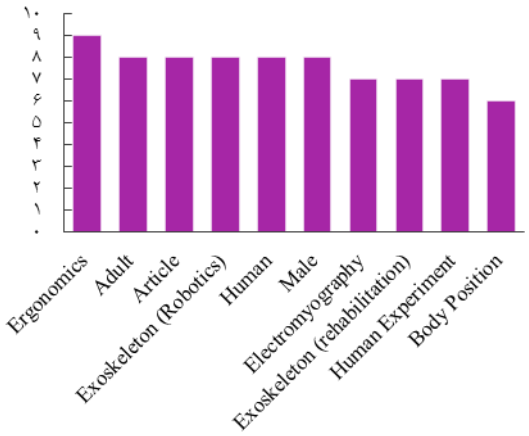
شماره منبع	نام اگزواسکلت	عکس	شماره منبع	نام اگزواسکلت	عکس
۱۱	prototype of the weight support exoskeleton		۱۵	H-VEX	
۱۲	BackX™ AC		۱۶	Chairless Chair	
۱۲ ۸	Laevo™ V2.5		۹ ۱۰	EksoVest	
۱۳ ۱۴	EXO		۱۷	ABLE	

در شکل ۳، تعداد مقالاتی که در هر مجله چاپ شده مشاهده می‌شود. مسأله‌ی قابل توجه این است که ۸۰ درصد مقالات در مجلات تخصصی ارگونومی چاپ شده و تنها ۲ مجله‌ی دیگر به این موضوع توجه داشته‌اند، که این مسأله عدم توجه به موضوع ارگونومی در طراحی و ارزیابی اگزواسکلت‌ها را نشان می‌دهد.

مشارکت ۱۰ نویسنده در مطالعات مورد بررسی وجود دارد. که به صورت میانگین هر نویسنده در ۱/۹ مطالعه حضور داشته است. بیشترین مشارکت مربوط به Nussbaum, MA می‌باشد. این نکته قابل توجه است که نام نویسندگان اصلی مقاله در این تحلیل بررسی گردیده و دلیل پایین بودن تعداد نویسندگان به همین دلیل است. در شکل ۴، پرتکرارترین کلمات کلیدی استفاده شده در مقالات دیده می‌شود.

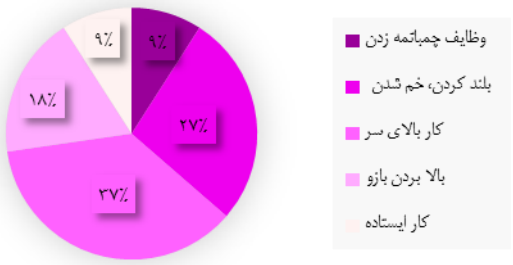


شکل ۳: تعداد مقالات چاپ شده در مجلات



شکل ۴: واژگان کلیدی مطالعات

همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، تقریباً نیمی از اگزواسکلت‌های بررسی شده در این مطالعه، کارهای بالای سر و بالا بردن بازو را حمایت می‌کنند این موضوع نشان‌دهنده‌ی اهمیت کارهای بالای سر و تأثیر فراوانی که این نوع کار بر سلامت نیروی کار دارد می‌باشد. اختلالات اسکلتی- عضلانی شانه یک نگرانی ویژه برای سلامتی در محل کار است زیرا به دوره‌ی بهبودی طولانی احتیاج دارد. به عنوان مثال، آسیب‌های شانه در ایالات متحده به طور میانگین منجر به ۲۳ روز مرخصی کاری می‌شود در حالی که کمر یا همه‌ی انواع آسیب‌ها به ترتیب به طور میانگین منجر به ۷ روز یا ۹ روز مرخصی کاری می‌شوند (۷).



شکل ۵: انواع کارهایی که اگزواسکلت‌ها حمایت می‌کنند

بحث

در این مقاله‌ی مروری، به بررسی مطالعاتی که اگزواسکلت‌های صنعتی را از دید ارگونومی مورد بررسی قرار داده بودند، پرداختیم. بیشتر این مطالعات طرح اگزواسکلت‌های مختلف را، طی تنها یک یا چند وظیفه شبیه‌سازی، مورد بررسی/ مقایسه قرار می‌دادند. مشخص نیست که آیا نتایج فعلی، مثلاً برای سایر ارتفاعات کاری، جهت‌های اعمال نیرو، انواع/ جرم‌های ابزار، یا مدت زمان انجام وظیفه، قابل تعمیم هستند یا خیر. به ویژه، الگوی نتایج می‌تواند در صورت استفاده از یک وظیفه با نیازهای جسمانی بیشتر تغییر نماید. در بیشتر این مطالعات، شرکت‌کنندگان جوان و سالم بوده و از جمعیت شاغل نبودند. بنابراین باید در تعمیم نتایج به کارگران مسن، مصدوم و یا چاق احتیاط کرد، همچنین شرکت‌کنندگان برای انجام کارها، تازه‌کار بودند. کارهایی مانند متەزنی و سیم‌کشی که مورد بررسی قرار گرفته، از کارهایی است که هر شخص ممکن است به ندرت یا گاه به گاه در زندگی خود نیاز به انجام آن داشته باشد، هرچند که استفاده از افراد تازه‌کار یک محدودیت مهم نیست، اما ممکن است اثرات یک اگزواسکلت برای کارگران با تجربه متفاوت باشد. اکثر کارها در یک محیط آزمایشگاهی کنترل شده انجام شدند. تداخل فیزیکی با محیط اطراف (به عنوان مثال تماس با یک چارچوب دستگاه) یا محیط‌های کاری نامطلوب (به عنوان مثال، حضور چند کارگر، فضای کاری محدود) ممکن است اثرات اگزواسکلت را تحت تأثیر قرار دهد. سرانجام، مطالعات بررسی شده بر تأثیرات کوتاه‌مدت اگزواسکلت متمرکز بود، برای بررسی تأثیرات طولانی‌مدت استفاده از چنین مداخلاتی به تحقیقات بیشتری نیاز است. به عنوان مثال، استفاده‌ی طولانی‌مدت از اگزواسکلت می‌تواند باعث ضعف عضلات بدن شود. استفاده از اگزواسکلت می‌تواند تهدیدات دیگری برای ایمنی و سلامتی کارگران ایجاد کند. نتایج مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از اگزواسکلت می‌تواند یک مداخله‌ی مؤثر برای کارها باشد، اما همانطور که در بالا بحث شد، تحقیقات بیشتری برای ارزیابی پیامدهای طولانی‌مدت چنین مداخله‌ای با جمعیت متنوع (به عنوان مثال، مزایا، عوارض جانبی، تغییر در استراتژی‌های کاری) و برای درک بهتر مسائل بهداشتی و ایمنی در محلی که ممکن است از چنین فناوری استفاده شود نیاز است.

با وجود علاقه و توجه وافر به اگزواسکلت با کاربردهای صنعتی، تا اجرای مقیاس گسترده‌ی اگزواسکلت در صنعت، فاصله‌ی زیادی است. حتی دستگاه‌های پسیو ساده به طور گسترده در عمل استفاده نمی‌شوند. با پیشرفت‌های بیومکانیک، حذف ناراحتی فیزیکی رابط کاربری دستگاه، چالش بعدی در طراحی اگزواسکلت خواهد بود، چرا که ممکن است کوچک‌ترین ناراحتی، مانع پذیرش کاربر شود. مسأله و نگرانی دیگر در مورد دستگاه‌های پسیو، پتانسیل افزایش فعالیت‌های ماهیچه‌های پا است. این مورد به بررسی بیشتر در توسعه و تحولات بعدی محصولات آماده‌ی استفاده، نیازمند است.

هرچند از مزایای نوع اکتیو، این است که از پتانسیل بیشتری در کاهش بار فیزیکی برخوردارند و برخلاف نوع پسیو می‌توانند بار بسیاری از مفاصل بدن را حذف کنند ولی با افزایش تعداد مفاصل (هر کدام نیازمند اکچویتور و منبع تغذیه است)، وزن اسکلت خارجی نیز افزایش می‌یابد. برای مثال، اگزواسکلتون فعال برای بالاتنه با اکچویتورهای سبک وزن، نزدیک ۹ کیلوگرم وزن دارد، که این یکی از معایب مهم نوع اکتیو است. یک اگزواسکلتون آنتروپومورفیک از توانایی حرکت، مشابه حرکات پوشنده‌ی خود برخوردار بوده و به‌تبع آن آزادی حرکت بیشتری دارد. انواع غیر- آنتروپومورفیک معمولاً ساده‌تر بوده و می‌توان با ساختار بهینه برای انجام وظایف خاص طراحی شوند و از قابلیت مصرف کارآمدتر انرژی در مقابل سیستم‌های آنتروپومورفیک برخوردار باشند. درباره‌ی

مزیت انواع اگزواسکلتون از نظر حمایت قسمت‌های مختلف بدن باید به این نکته اشاره کرد که هر چه اگزواسکلتون، برای اندام مورد نظر اختصاصی‌تر باشد، می‌تواند از کارآیی بیشتریی برخوردار باشد، زیرا افزودن قسمت‌های مختلف به یک اگزواسکلتون، باعث افزایش وزن و ایجاد محدودیت می‌شود.

هرچند، سازمان بین‌المللی استاندارد ASTM برای فناوری اگزواسکلتون دو استاندارد ارائه کرده است ولی یکی دیگر از مشکلات مهم، فقدان استانداردهای کافی برای فن‌آوری اگزواسکلت است، یکی از چالش‌های تولیدکنندگان اگزواسکلتون، نبود اصطلاحات واحد برای این صنعت است. ممکن است دو تولیدکننده از دو اصطلاح متفاوت استفاده کنند در صورتی که مفهوم هر دو یکسان باشد یا حتی ممکن است از یک اصطلاح استفاده شود با دو مفهوم کاملاً متفاوت.

همچنین عدم وجود روش‌های آزمون و ارزیابی یکسان، چالش بعدی است، چنین مشکلی باعث آشفتگی در ارائه‌ی اگزواسکلتون به بازار خواهد شد. اگر روش‌های کنترلی یکسان وجود نداشته باشد ارزیابی محصولات و سازگاری آن با کاربردهای صنعتی با مشکل روبرو می‌شود. همچنین نمی‌توان عملکرد محصولات را با یکدیگر مقایسه کرد، بنابراین کاتالوگ‌های راهنمای محصولات بر اساس اصول واحد نوشته نخواهند شد، بنابراین، تعریف استانداردها به پیشرفت و توسعه‌ی دانش اگزواسکلتون کمک می‌کند.

کمیته‌ی اگزواسکلتون‌های سازمان استاندارد ASTM با نام کمیته‌ی F48 در سال ۲۰۱۷، با هدف توافق بر اگزواسکلتون تشکیل شده است. استانداردها بر تعریف واژه‌ها، آزمایش‌ها و استانداردهای امنیت اگزواسکلتون، کیفیت و عملکرد اگزواسکلتون‌ها تمرکز خواهند داشت. فعالیت‌های این کمیته، انواع اگزواسکلتون صنعتی و پزشکی و توانبخشی و نظامی را پوشش می‌دهد. وجود چنین کمیته‌هایی به یکپارچه‌سازی استانداردها و جلوگیری از استانداردهای متناقض کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری

مطالعات بررسی شده، به منظور تسهیل استفاده‌ی موفقیت‌آمیز اگزواسکلت‌ها در ساختارهای شغلی، با در نظر گرفتن حداقل سه بعد تأکید می‌کنند (الزامات جسمانی، عملکرد در وظیفه و قابلیت استفاده) که تمامی آن‌ها می‌توانند در تعیین کارآیی بالقوه‌ی اسکلت‌های خارجی در محیط کاری تأثیرگذار باشند. طراحی‌های مختلف در مطالعات مورد آزمون قرار گرفتند و به خروجی‌های متفاوتی در این ابعاد منجر شدند، و البته هیچ طراحی به خصوصی در تمامی ابعاد موجود برتر از سایرین تشخیص داده نشد. با این وجود، با توجه به توان بالقوه‌ی مشهود در این فناوری، تحقیقات بیشتری در آینده مورد نیاز خواهند بود تا برخی از چالش‌های مورد شناسایی را پوشش دهند و روش‌های طراحی اگزواسکلت را تحت حالات متنوع‌تر و واقع‌بینانه‌تری مورد مقایسه قرار دهند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از داوران محترم برای ارائه نظرات دقیق و سازنده همچنین از سردبیر، مدیر مسؤول، اعضا هیأت تحریریه و سایر همکاران مجله کمال تشکر را دارند.

تضاد منافع

در نگارش این مقاله تضاد منافع وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم نویسندگان در نگارش این مقاله برابر است.

ملاحظات اخلاقی

ندارد.

حمایت مالی

ندارد.

REFERENCES

1. Kazerooni H. Berkeley robotics & human engineering laboratory. [Online]. [cited 2012]; Avilable from: URL: https://bleex.me.berkeley.edu
2. Alabdulkarim S, Kim S, Nussbaum MA. Effects of exoskeleton design and precision requirements on physical demands and quality in a simulated overhead drilling task. Appl Ergon. 2019;80:136-45. [DOI: 10.1016/j.apergo.2019.05.014] [PMID]
3. De Looze MP, Bosch T, Krause F, Stadler KS, O'Sullivan LW. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. Ergonomics. 2016;59(5):671-81. [DOI: 10.1080/00140139.2015.1081988] [PMID]
4. de la Tejera JA, Bustamante-Bello R, Ramirez-Mendoza RA, Izquierdo-Reyes J. Systematic review of exoskeletons towards a general categorization model proposal. Appl Sci 2021;11(1):76. [DOI: 10.3390/app11010076]
5. Schmidtler J, Knott VC, Hölzel C, Bengler K. Human centered assistance applications for the working environment of the future. Occupational Ergonomics. 2015;12(3):83-95. [DOI: 10.3233/OER-150226]
6. Viteckova S, Kutilek P, Jirina M. Wearable lower limb robotics: A review. Biocybern Biomed Eng. 2013;33(2):96-105. [DOI: 10.1016/j.bbe.2013.03.005]
7. Bureau of Labor Statistics. Nonfatal occupational injuries and illnesses, requiring days away from work bg, Washington, DC. [Online]. Avilable from: URL: https://www.bls.gov/news.release/archives/osh2_11102016.pdf
8. Bosch T, van Eck J, Knitel K, de Looze M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. Appl Ergon. 2016;54:212-7. [DOI: 10.1016/j.apergo.2015.12.003] [PMID]
9. Kim S, Nussbaum MA, Mokhlespour Esfahani MI, Alemi MM, Alabdulkarim S, Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I- "Expected" effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. Appl Ergon. 2018;70:315-22. [DOI: 10.1016/j.apergo.2018.02.025] [PMID]
10. Kim S, Nussbaum MA, Esfahani MIM, Alemi MM, Jia B, Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II-"Unexpected" effects on shoulder motion, balance, and spine loading. Appl Ergon. 2018;70:323-30. [DOI: 10.1016/j.apergo.2018.02.024] [PMID]

11. Yan Z, Han B, Du Z, Huang T, Bai O, Peng A. Development and testing of a wearable passive lower-limb support exoskeleton to support industrial workers. Biocybern Biomed Eng. 2021;41(1):221-38. [DOI: 10.1016/j.bbe.2020.12.010]
12. Madinei S, Alemi MM, Kim S, Srinivasan D, Nussbaum MA. Biomechanical assessment of two back-support exoskeletons in symmetric and asymmetric repetitive lifting with moderate postural demands. Appl Ergon. 2020;88:103156. [DOI: 10.1016/j.apergo.2020.103156] [PMID]
13. Iranzo S, Piedrabuena A, Iordanov D, Martinez-Iranzo U, Belda-Lois JM. Ergonomics assessment of passive upper-limb exoskeletons in an automotive assembly plant. Appl Ergon. 2020;87:103120. [DOI: 10.1016/j.apergo.2020.103120] [PMID]
14. Cha JS, Monfared S, Stefanidis D, Nussbaum MA, Yu D. Supporting surgical teams: Identifying needs and barriers for exoskeleton implementation in the operating room. Hum Factors. 2020;62(3):377-90. [DOI: 10.1177/0018720819879271] [PMID]
15. Hyun DJ, Bae K, Kim K, Nam S, Lee DH. A light-weight passive upper arm assistive exoskeleton based on multi-linkage spring-energy dissipation mechanism for overhead tasks. Rob Auton Syst. 2019;122:103309. [DOI: 10.1016/j.robot.2019.103309]
16. Luger T, Seibt R, Cobb TJ, Rieger MA, Steinhilber B. Influence of a passive lower-limb exoskeleton during simulated industrial work tasks on physical load, upper body posture, postural control and discomfort. Appl Ergon. 2019;80:152-60. [DOI: 10.1016/j.apergo.2019.05.018] [PMID]
17. Sylla N, Bonnet V, Colledani F, Fraisse P. Ergonomic contribution of ABLE exoskeleton in automotive industry. Int J Ind Ergon. 2014;44(4):475-81. [DOI: 10.1016/j.ergon.2014.03.008]