



a cura di

Lucia Botti in
Riccardo Melloni in
Adriano Paolo Bacchetta in
Maniva Oliva 

L'esoscheletro per il lavoro: opportunità, limiti e questioni aperte

Gli esoscheletri sono dispositivi che, sfruttando l'interazione meccanica con il corpo umano di un dispositivo indossabile in grado di fornire un adeguato supporto posturale, consentono di assistere e migliorare le attività di movimentazione manuale dei carichi ed evitare/limitare l'insorgere di malattie e disturbi muscolo-scheletrici. Negli ultimi anni, dopo che gli esoscheletri sono stati ampiamente studiati e applicati nella riabilitazione motoria, si è visto un interesse diffuso e sempre maggiore nella comunità scientifica e nel settore industriale per capire ed esplorare l'efficacia di tali dispositivi quali ausili di supporto per gli arti superiori e inferiori durante lo svolgimento di diverse attività manuali. Peraltro, se da una parte gli effetti ai fini della prevenzione da malattie e disturbi muscolo-scheletrici sembrano evidenti, dall'altra alcuni studi stanno valutando con attenzione l'impatto complessivo degli esoscheletri sulla salute e la sicurezza dei lavoratori tenuto anche conto che, ad oggi, vi sono prove limitate sugli effetti a lungo termine di questi dispositivi. Per questo, ed anche per diversi altri motivi, si ritiene siano necessari ulteriori ricerche e studi per comprendere i reali benefici e le potenziali opportunità derivanti dall'introduzione degli esoscheletri nei luoghi di lavoro, nonché i potenziali limiti e rischi che possono derivare per i lavoratori.

Che cos'è un esoscheletro?

Definito come un dispositivo indossabile che può aumentare, abilitare, assistere o migliorare il movimento, la postura o l'attività fisica, l'esoscheletro sfrutta l'interazione meccanica con il corpo umano fornendo un supporto durante lo svolgimento di svariate attività, in funzione della tipologia di dispositivo indossato (Lowe et al., 2019). Secondo l'Agenzia Europea per la sicurezza e salute sul lavoro, gli esoscheletri occupazionali sono tecnologie di assistenza personale che influiscono meccanicamente sul corpo e possono ridurre il carico del lavoro fisico, quale il sollevamento di carichi pesanti, diminuendo il rischio di disturbi muscolo-scheletrici (Monica et al., 2020). Ma come ogni nuova tecnologia, creano una necessità di regolamenti ed anche di norme che tengano in conto la redistribuzione dello stress a differenti parti dell'organismo e, in generale, del comfort per l'utilizzatore. Proprio per questo motivo, la progettazione di questi dispositivi non può prescindere dall'utilizzo di un approccio ergonomico che integri, allo specifico contesto di previsto utilizzo dell'esoscheletro, i principi dell'ergonomia. L'ergonomia è infatti quella scienza che si occupa dell'interazione tra gli elementi di un sistema (umani, ma anche d'altro tipo) e la funzione per cui vengono progettati, nonché la teoria, i principi, i dati e i metodi che vengono applicati nella progettazione, allo scopo di migliorare la soddisfazione dell'utente e l'insieme delle prestazioni del sistema (IEA). Nel sistema in cui è inserito un esoscheletro diventa necessario allora studiare l'adattamento del lavoro all'uomo che indossa l'esoscheletro, ponendo attenzione al rapporto tra le esigenze dell'individuo, l'ambiente e le macchine o le attrezzature di lavoro, allo scopo di rendere ottimali le performance dell'intero sistema (Clerici, 2017).



Il primo tentativo di progettazione di un esoscheletro risale al XIX secolo, quando l'inventore russo Nichola Yagn ideò un dispositivo che, grazie a una tecnologia ad aria compressa, dava supporto agli arti inferiori di chi lo indossava. Successivamente, all'inizio del XX secolo, Leslie C. Kelley brevettò un sistema indossabile con motori a vapore, rivelatosi poi piuttosto pesante e poco funzionale. È negli anni '60 dello scorso secolo che gli esoscheletri iniziarono a diffondersi maggiormente, anche e soprattutto grazie agli investimenti del settore dell'aeronautica militare, il quale ha studiato a lungo i *Man Amplifiers*, ovvero dispositivi indossabili metallici e dotati di motori elettrici a supporto dei piloti e degli astronauti gravati dal peso delle ingombranti e affaticanti tute spaziali. Gli utilizzi nel settore militare, in ambito medico e per la riabilitazione motoria sono stati predominanti fino a pochi anni fa, ma l'impiego degli esoscheletri si sta diffondendo oggi anche in ambito occupazionale. Rispetto ai primi modelli dello scorso secolo, gli esoscheletri attualmente disponibili in commercio sono sicuramente più resistenti e leggeri, quindi più comodi da indossare e più agevoli durante lo svolgimento di diversi compiti. Si parla infatti di esoscheletri quando si fa riferimento a dispositivi costituiti da elementi rigidi, come componenti metallici e azionamenti meccanici, distinguendoli dalle Exosuit, ovvero dispositivi costituiti da parti morbide, come componenti tessili e supporti flessibili. Un'ulteriore distinzione viene fatta tra esoscheletri definiti attivi in quanto dotati di servosistemi e motori che si attivano nel momento del bisogno, e esoscheletri passivi, che svolgono la loro azione di supporto grazie a componenti meccanici, come molle, guide / pesi e quindi, non disponendo di servosistemi e motori, sono solitamente più leggeri. In entrambi i casi, i carichi movimentati e il peso dell'exoscheletro stesso si ridistribuiscono sul corpo in punti diversi e con modalità che non sono necessariamente le medesime alle quali il corpo umano è abituato durante lo svolgimento delle attività senza esoscheletro.

Opportunità e limiti

Il crescente numero di articoli e pubblicazioni sul tema degli esoscheletri, testimonia l'interesse diffuso della comunità scientifica rispetto a questi dispositivi che offrono potenziali vantaggi e effetti benefici in svariate applicazioni (del Ferraro et al., 2020; Garosi et al., 2022; Latella et al., 2022; Linnenberg and Weidner, 2022; Marinov, 2016; de Vries and de Looze, 2019; Weston et al., 2022). La linea arancio in Figura 1 mostra il trend delle pubblicazioni presenti su ScienceDirect, il database bibliografico di pubblicazioni scientifiche e mediche dell'editore olandese Elsevier, aventi come oggetto il tema degli esoscheletri tra gli anni 2011 e 2022. La linea grigia mostra invece il tentativo di selezionare tra queste le pubblicazioni sul tema degli esoscheletri per l'ambito industriale. Entrambe le linee mostrano andamenti crescenti, con pendenze accentuate negli ultimi anni.

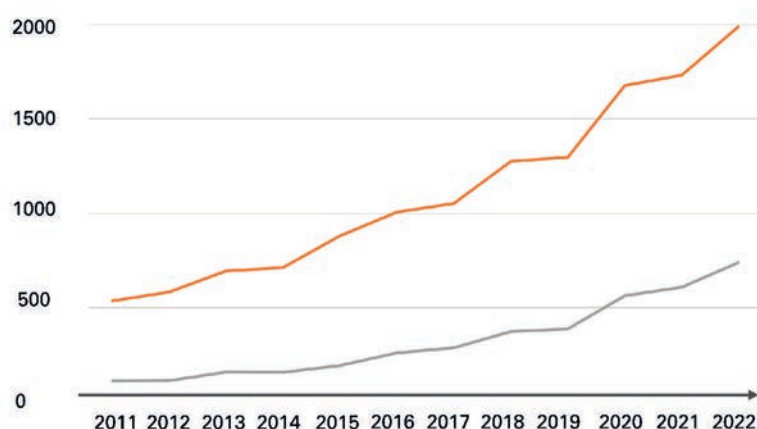
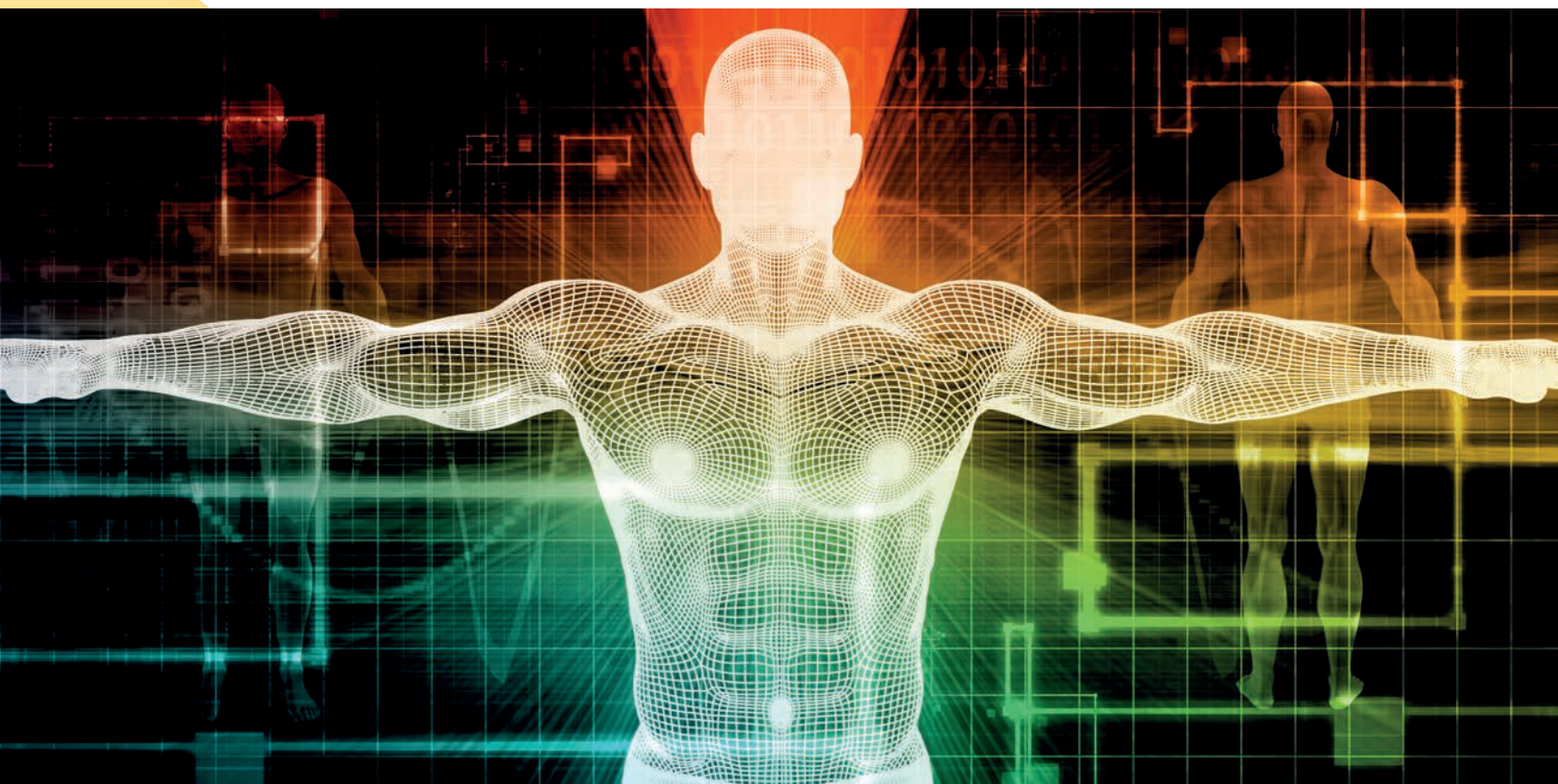


Figura 1. Numero di documenti pubblicati su ScienceDirect dal 2011 al 2022 contenenti la parola chiave *exoskeleton* oppure la combinazione dei termini *exoskeleton* e *industrial*.

Se da un lato i risultati delle prove sperimentali suggeriscono numerosi effetti benefici per la schiena durante il sollevamento dei carichi (alcuni studi, ad esempio, evidenziano una riduzione apparente del peso sollevato con l'esoscheletro attivo pari a circa 37,5% (Moresco, 2022)) o per l'arto superiore durante le attività che richiedono il mantenimento delle posture statiche con le braccia e le mani al di sopra del livello delle spalle per un lungo periodo di tempo, alcuni studi stanno mettendo in discussione l'impatto complessivo degli esoscheletri sulla salute e la sicurezza delle persone che li utilizzano in modo continuativo nei luoghi di lavoro (Baldassarre et al., 2022). Pare infatti che l'uso di esoscheletri professionali che forniscono supporto per le braccia o la schiena possa aumentare le richieste fisiche in altre regioni del corpo. Alcuni utenti sperimentano un'eccessiva pressione dell'interfaccia nei punti di contatto tra l'esoscheletro e il corpo, che può portare a una percezione generale di disagio durante l'uso (Kozinc, Baltrusch, et al., 2021; Madinei et al., 2020a, 2020b). Altri studi hanno evidenziato alcuni problemi di sicurezza, come la difficoltà di mantenere l'equilibrio e la ridotta capacità di reagire a una perturbazione posturale, come ad esempio quando si recupera la posizione da situazioni di squilibrio, come scivolate, cadute o inciampi (Kozinc, Babič, et al., 2021; Park et al., 2021). Inoltre, vi sono prove limitate sugli effetti a lungo termine di questi dispositivi sulla salute e sicurezza dei lavoratori (Peters, M.; Wischniewski, 2019), vale a dire che il decondizionamento dei muscoli dopo un periodo di utilizzo prolungato può comportare ulteriori potenziali rischi. Sono infatti necessarie ulteriori ricerche per comprendere i benefici e le potenziali opportunità derivanti dall'introduzione di esoscheletri nei luoghi di lavoro, nonché i potenziali limiti e rischi che possono derivare per i lavoratori. Inoltre, ad oggi non esiste una guida pratica che fornisca indicazioni e suggerimenti per gli operatori del settore industriale che descrivano come questi dispositivi dovrebbero essere introdotti nei luoghi di lavoro e come potrebbero essere gestiti nell'ambito di un sistema di gestione della salute e sicurezza sul lavoro. Inoltre, ad oggi, per quanto attiene ai metodi disponibili per la valutazione del rischio dovuto alle attività di movimentazione manuale dei carichi (NIOSH, OCRA, ecc..) non sono disponibili indicazioni di come l'eventuale adozione degli esoscheletri vada a impattare sui modelli di calcolo al fine di valutare il rischio e il limite di peso raccomandato. Oggi, un gran numero di produttori è presente sul mercato, con diverse soluzioni per varie applicazioni. Il sito web Exoskeleton Report (exoskeletonreport.com) raccoglie le notizie e le risorse per i professionisti nel campo tecnologico emergente di esoscheletri, Exosuit e robotica indossabile, con l'obiettivo di "separare la fantascienza dalla realtà" (Exoskeleton Report LLC, 2020). Alla fine del 2022, il catalogo presente sul sito raccoglie più di cento dispositivi, principalmente per uso medico (50%) e per il lavoro e l'industria (40%), ovvero esoscheletri occupazionali. I restanti dispositivi sono esoscheletri sportivi, dispositivi militari ed esoscheletri per scopi didattici. Gli esoscheletri professionali forniscono supporto per la schiena (50%) e per le braccia (37%), ma anche supporto per le gambe (8%), per una presa più forte (4%) e supporto per la presa degli attrezzi (6%). La maggior parte di questi dispositivi è di tipo passivo (71%). Il database consente inoltre di filtrare gli esoscheletri per applicazione, proponendo otto categorie, ovvero aumento, supporto per la schiena, sedia senza sedia, uso personale, pick & carry, riabilitazione e portautensili. Interessante infine notare la categoria proposta con il nome "prevenzione infortuni", che raccoglie l'83% degli esoscheletri occupazionali presenti nel catalogo.



Questioni aperte

Le questioni aperte sono ancora numerose. È fondamentale capire le modalità e gli strumenti per ottimizzare questi dispositivi fin dalla loro progettazione. A questo scopo, la metodologia dello human-centered design, ovvero la progettazione centrata sull'essere umano e la valutazione dei rischi biomeccanici sono essenziali per garantire che gli esoscheletri siano accettati e che il loro utilizzo prevenga la comparsa dei disturbi muscoloscheletrici (Monica et al., 2020). Una volta definiti tipo e caratteristiche dell'esoscheletro adeguato al compito e alla persona che dovrà indossarlo, scelta da adottare una volta valutate le caratteristiche e riscontrata l'oggettiva difficoltà di modifica della postazione di lavoro secondo i principi fondamentali dell'ergonomia, è necessario valutare l'adeguatezza per il compito e per l'utente, definire inoltre i requisiti per la formazione e l'addestramento, valutare i benefici e limiti per la salute e la sicurezza, e analizzare l'utilità per lavoratori infortunati o che debbano rientrare sul luogo di lavoro a seguito di un infortunio. Sono altresì necessarie delle linee guida e delle indicazioni operative a supporto di chi deve effettuare la scelta del dispositivo più adeguato alle proprie necessità e definire le modalità di implementazione sul posto di lavoro. Da non trascurare anche i fattori economici legati all'adozione di tali dispositivi, considerato che per la loro efficacia necessitano uno specifico adattamento alle caratteristiche antropometriche del singolo utilizzatore e, quindi, in generale non è pensabile l'utilizzo promiscuo da parte di vari lavoratori che si avvicendano nei turni.

Ad oggi possiamo elencare una serie di raccomandazioni e suggerimenti per tutti coloro che stiano valutando la possibilità di inserire un esoscheletro all'interno del proprio ambiente di lavoro.

- 1- Eseguire un'adeguata analisi ergonomica della postazione di lavoro, al fine di identificare possibili adeguamenti di tipo strutturale e/o ottimizzazioni organizzative
- 2- Comparare l'investimento economico dell'adozione di un numero "n" di esoscheletri rispetto all'adeguamento (se possibile) della postazione di lavoro o di una modifica organizzativa
- 3- Valutare con attenzione la corrispondenza tra le caratteristiche del lavoratore, le richieste del compito e le caratteristiche tecniche dell'esoscheletro scelto
- 4- Analizzare i potenziali effetti indesiderati dovuti all'utilizzo dell'esoscheletro durante lo svolgimento dell'attività lavorativa
- 5- Implementare il dispositivo scelto in modo graduale, valutando e analizzando gli effetti inizialmente su un campione limitato di utenti e compiti, così da portare in evidenza eventuali criticità prima dell'implementazione su larga scala
- 6- Coinvolgere, ove possibile, il produttore dell'esoscheletro che potrà suggerire le modalità efficaci di implementazione, anche sulla base delle sue esperienze pregresse con altri utilizzatori
- 7- Chiarire i benefici ottenibili e monitorarne il raggiungimento

Conclusioni

Il tema proposto in questo contributo è tra i più dibattuti e discussi sia nell'ambito della ricerca scientifica, sia sui tavoli degli enti internazionali che si occupano di salute e sicurezza nei luoghi di lavoro. L'Agenzia Europea EU-OSHA ha inserito infatti gli esoscheletri tra le aree d'intervento della recente campagna europea dal titolo "Ambienti di lavoro sani e sicuri 2020-2022. Alleggeriamo il carico!" (EU-OSHA, 2020). La velocità con cui i nuovi contributi della ricerca e le più recenti esperienze provenienti dal settore industriale propongono nuovi dispositivi per diverse applicazioni possibili, richiede un grande sforzo di raccolta e di interpretazione del numero sempre maggiore di evidenze e di risultati, talvolta anche parzialmente contrastanti o che pongono nuovi interrogativi e introducono nuovi spunti di riflessione. Auspichiamo che, nei prossimi anni, lo stato di caos attuale rispetto alle opportunità e ai limiti derivanti dall'uso degli esoscheletri negli ambienti di lavoro, possa lasciare spazio a criteri chiari e condivisi di scelta e gestione degli esoscheletri quali strumenti di supporto per lo svolgimento dell'attività lavorativa e la prevenzione dai disturbi muscoloscheletrici. A seconda dei risultati che saranno resi disponibili dalla comunità scientifica nei prossimi anni, anche in considerazione dei dati disponibili in merito alle applicazioni in corso, gli esoscheletri potranno diventare un diffuso ausilio per i lavori manuali o rimanere un prodotto di nicchia per applicazioni molto specifiche. Tuttavia, l'attuale interesse del marketing per questi dispositivi potrebbe diventare una barriera per gli sviluppi futuri, in quanto esiste il rischio concreto che l'approccio orientato alle prestazioni o ai risultati economici superi o porti in secondo piano gli obiettivi di sicurezza sul lavoro (Peters, M.; Wischniewski, 2019). Facendo riferimento alla gerarchia dei controlli del rischio, alcuni studi considerano gli esoscheletri quali dispositivi tecnici o engineering controls, da utilizzare qualora l'eliminazione o la sostituzione del rischio valutato non siano realizzabili. Altri li classificano come un' "ultima spiaggia" della prevenzione, ovvero come dispositivi di protezione individuale, o personal protective equipment, che proteggono da un pericolo presente agendo come una barriera. Posto che chi scrive riserve numerose perplessità rispetto a questa seconda posizione, a causa della varietà di funzionalità, design e applicazione di questi dispositivi, non è ad oggi possibile dare una definizione uniforme e standardizzata di esoscheletro occupazionale. È necessario piuttosto garantire un approccio secondo lo human-centered design per la progettazione e implementazione nei luoghi di lavoro, e valutare i potenziali rischi biomeccanici dovuti all'utilizzo durante l'attività lavorativa.

Allo scopo di contribuire al dibattito e alle attività di ricerca in corso, gli autori di questo contributo hanno organizzato un laboratorio di analisi degli esoscheletri allo scopo di valutare l'impatto dell'utilizzo di tali dispositivi con la normale attività lavorativa e gli aspetti psicologici indotti sul lavoratore. Le attività del laboratorio prevedono lo sviluppo e l'applicazione delle metodologie di valutazione ergonomica con particolare attenzione alla sicurezza e all'usabilità degli esoscheletri in funzione delle loro caratteristiche costruttive, del distretto corporeo cui sono previsti in ausilio (arti inferiori, arti superiori, corpo intero) e dell'attività lavorativa da svolgere. I risultati delle indagini sperimentali, condotte sia tramite simulazione in laboratorio sia sul campo, ci consentiranno di proporre delle indicazioni pratiche per la selezione e l'utilizzo sicuro ed efficace degli esoscheletri a supporto dello svolgimento delle attività lavorative.



Autori

Lucia Botti, Ricercatrice. Centro di Ricerca Interdipartimentale sulla Sicurezza e Prevenzione dei Rischi (CRIS), Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" (DIEF), Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Riccardo Melloni, Professore Ordinario. Centro di Ricerca Interdipartimentale sulla Sicurezza e Prevenzione dei Rischi (CRIS), Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" (DIEF), Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Adriano Paolo Bacchetta, Ingegnere. Presidente di EURSAFE - European Interdisciplinary Applied Research Center for Safety

Maniva Oliva, Dottoranda di Ricerca. Centro di Ricerca Interdipartimentale sulla Sicurezza e Prevenzione dei Rischi (CRIS), Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" (DIEF), Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Bibliografia

Baldassarre, A., Lulli, L.G., Cavallo, F., Fiorini, L., Mariniello, A., Mucci, N. and Arcangeli, G. (2022),

"Industrial exoskeletons from bench to field: Human-machine interface and user experience in occupational settings and tasks", *Frontiers in Public Health*, Vol. 10, doi: 10.3389/fpubh.2022.1039680.

Clerici, P. (2017), "Conoscere il rischio: L'approccio ergonomico", *INAIL Ergonomia/Fattore Umano*, pp. 1–7.

EU-OSHA. (2020), "Ambienti di lavoro sani e sicuri. Alleggeriamo il carico! 2020-2022", available at: <https://healthy-workplaces.eu> (accessed 9 January 2023).

Exoskeleton Report LLC. (2020), "Exoskeleton Report", Webpage, available at: ExoskeletonReport.com (accessed 23 December 2022).

del Ferraro, S., Falcone, T., Ranavolo, A. and Molinaro, V. (2020), "The effects of upper-body exoskeletons on human metabolic cost and thermal response during work tasks—a systematic review", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 17 No. 20, pp. 1–25, doi: 10.3390/ijerph17207374.

Garosi, E., Mazloumi, A., Jafari, A.H., Keihani, A., Shamsipour, M., Kordi, R. and Kazemi, Z. (2022), "Design and ergonomic assessment of a passive head/neck supporting exoskeleton for overhead work use", *Applied Ergonomics*, Vol. 101, doi: 10.1016/j.apergo.2022.103699.

Kozinc, Ž., Babič, J. and Šarabon, N. (2021), "Comparison of subjective responses of low back pain patients and asymptomatic controls to use of spinal exoskeleton during simple load lifting tasks: A pilot study", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 18 No. 1, pp. 1–9, doi: 10.3390/ijerph18010161.

- Kozinc, Ž., Baltrusch, S., Houdijk, H. and Šarabon, N. (2021), "Short-Term Effects of a Passive Spinal Exoskeleton on Functional Performance, Discomfort and User Satisfaction in Patients with Low Back Pain", *Journal of Occupational Rehabilitation*, Vol. 31 No. 1, doi: 10.1007/s10926-020-09899-7.
- Latella, C., Tirupachuri, Y., Tagliapietra, L., Rapetti, L., Schirrmeister, B., Bornmann, J., Gorjan, D., et al. (2022), "Analysis of Human Whole-Body Joint Torques During Overhead Work With a Passive Exoskeleton", *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol. 52 No. 5, doi: 10.1109/THMS.2021.3128892.
- Linnenberg, C. and Weidner, R. (2022), "Industrial exoskeletons for overhead work: Circumferential pressures on the upper arm caused by the physical human-machine-interface", *Applied Ergonomics*, Vol. 101, doi: 10.1016/j.apergo.2022.103706.
- Lowe, B.D., Billotte, W.G. and Peterson, D.R. (2019), "ASTM F48 Formation and Standards for Industrial Exoskeletons and Exosuits", *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, Vol. 7, doi: 10.1080/24725838.2019.1579769.
- Madinei, S., Alemi, M.M., Kim, S., Srinivasan, D. and Nussbaum, M.A. (2020a), "Biomechanical Evaluation of Passive Back-Support Exoskeletons in a Precision Manual Assembly Task: 'Expected' Effects on Trunk Muscle Activity, Perceived Exertion, and Task Performance", *Human Factors*, Vol. 62 No. 3, doi: 10.1177/0018720819890966.
- Madinei, S., Alemi, M.M., Kim, S., Srinivasan, D. and Nussbaum, M.A. (2020b), "Biomechanical assessment of two back-support exoskeletons in symmetric and asymmetric repetitive lifting with moderate postural demands", *Applied Ergonomics*, Elsevier Ltd, Vol. 88 No. June, p. 103156, doi: 10.1016/j.apergo.2020.103156.
- Marinov, B. (2016), "22 Exoskeletons For Work and Industry Into 6 Categories", *The Verge*.
- Monica, L., Anastasi, S. and Draicchio, F. (2020), "Occupational exoskeletons: wearable robotic devices and preventing work-related musculoskeletal disorders in the workplace of the future", pp. 1–12.
- Moresco, D. (2022), "Diffondere la cultura della sicurezza con qualità è il nostro più grande valore", *Salute e Sicurezza Nei Luoghi Di Lavoro*, No. ANNO I—Pubblicazione del 21/06/2022, pp. 1–13.
- Park, J.H., Kim, S., Nussbaum, M.A. and Srinivasan, D. (2021), "Effects of two passive back-support exoskeletons on postural balance during quiet stance and functional limits of stability", *Journal of Electromyography and Kinesiology*, Vol. 57, doi: 10.1016/j.jelekin.2021.102516.
- Peters, M.; Wischniewski, S.; (2019), "The impact of using exoskeletons on occupational safety and health - Safety and health at work - EU-OSHA", *EU-OSHA*, pp. 1–10.
- de Vries, A.W. and de Looze, M.P. (2019), "The Effect of Arm Support Exoskeletons in Realistic Work Activities: A Review Study", *J Ergonomics*, Vol. 9 No. 4, doi: 10.35248/2165-7556.19.9.255.
- Weston, E.B., Alizadeh, M., Hani, H., Knapik, G.G., Souchereau, R.A. and Marras, W.S. (2022), "A physiological and biomechanical investigation of three passive upper-extremity exoskeletons during simulated overhead work", *Ergonomics*, Vol. 65 No. 1, doi: 10.1080/00140139.2021.1963490.