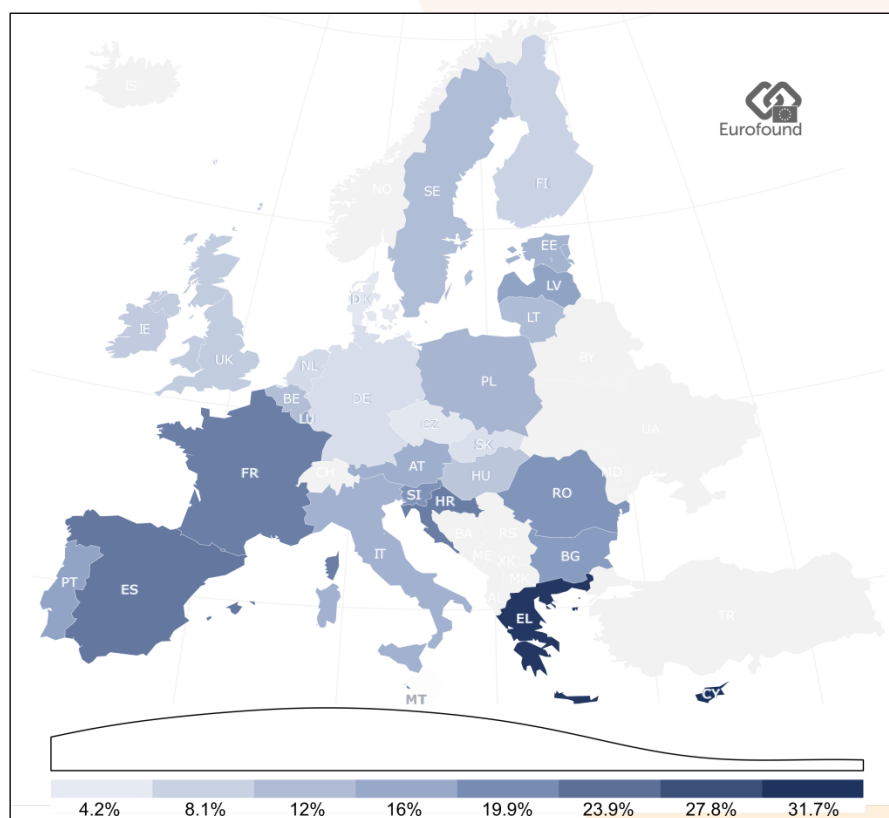


WPŁYW WYKORZYSTYWANIA EGZOSZKIELETÓW NA BEZPIECZEŃSTWO I HIGIENĘ PRACY

Wprowadzenie

W ostatnich lat w wielu miejscach pracy wprowadzono nowe, zakładane na ciało urządzenia pomocnicze – tzw. egzoszkielety. Oczekuje się, że w przyszłości będą one powszechniej używane, ponieważ dowiedziono, że stosowanie prototypów egzoszkieletów przynosi korzyści w takich sektorach jak np. opieka medyczna. W szczególności wydaje się, że egzoszkielety mogą oznaczać nowe podejście w zakresie przeciwdziałania zaburzeniom układu mięśniowo-szkieletowego związanym z pracą (ang. work-related musculoskeletal disorders, WRMSD), które są jednym z najpoważniejszych problemów zdrowotnych występujących w europejskich miejscach pracy.¹ Na rysunku 1 przedstawiono odsetek pracowników wykonujących pracę w pozycjach sprawiających ból i wywołujących zmęczenie, spowodowanych m.in. nieodpowiednim rozplanowaniem stanowiska pracy. Egzoszkielety mają szansę pomóc w rozwiązaniu tych problemów.

Rysunek 1 Odsetek wszystkich pracowników w Europie wykonujących pracę w pozycjach wywołujących zmęczenie lub sprawiających ból (opracowano w oparciu o dane Eurofound, 2019)



¹ Ponad 40% pracowników w Europie odczuwa ból w części lędźwiowej kręgosłupa lub bóle ramion. Ponadto 63% pracowników wykonuje powtarzające się czynności lub wykonuje swoją pracę często (46%) w potencjalnie szkodliwych pozycjach ciała (Eurofound, 2012). Roczne koszty ponoszone w związku z problemami zdrowotnymi wywołanymi warunkami pracy oscylują w granicach 2% produktu krajowego brutto Unii Europejskiej (UE) (Bevan, 2015). Wiele z tych problemów spowodowanych jest ręcznym przemieszczaniem ciężarów (ang. manual material handling MMH), w tym: dźwiganiem, opuszczaniem, trzymaniem i przenoszeniem (Zurada, 2012; Collins i O'Sullivan, 2015). Praca wymagająca skręcania i wyginania tułowia, a także praca z rękami uniesionymi ponad głowę również zwiększa ryzyko wystąpienia zaburzeń mięśniowo-szkieletowych. Zaburzenia układu mięśniowo-szkieletowego związane z pracą nie są zatem wyłącznie problemem zdrowotnym, lecz mają również istotne znaczenie gospodarcze.

Egzoszkielety to urządzenia noszone na ciele, które mogą stanowić wsparcie układu mięśniowo-szkieletowego dzięki zastosowaniu różnych zasad mechanicznych. W przypadku zaburzeń układu mięśniowo-szkieletowego związanych z pracą mogą one redukować obciążenie mięśni w częściach ciała narażonych na urazy, takich jak odcinek lędźwiowy pleców lub ramiona. Chociaż potencjalne korzyści wynikające ze stosowania egzoszkieletów zapobiegających powstawaniu zaburzeń układu mięśniowo-szkieletowego mogą być znaczące, należy również wziąć pod uwagę fakt, że stosowanie tych urządzeń rodzi pytania o kwestie bezpieczeństwa i higieny pracy (BHP). W związku z tym Institut National de la Recherche et de la Sécurité (INRS, francuski Państwowy Instytut Badań Naukowych i Bezpieczeństwa ds. Ochrony Przed Wypadkami i Chorobami Zawodowymi) opublikował przegląd nowych czynników ryzyka związanych ze stosowaniem egzoszkieletów (INRS, 2019). Z jednej strony egzoszkielety mogą być postrzegane jako szansa na zredukowanie obciążenia mięśni dzięki fizycznemu wsparciu pracowników, w tym także pracowników niepełnosprawnych fizycznie. Z drugiej strony mogą się pojawić nowe potencjalne zagrożenia dla zdrowia, wynikające z rozłożenia obciążenia na inne partie ciała. Wpływa to również na koordynację ruchową, stabilność stawów i zmianę kinematyki (INRS, 2018). Ponadto kwestia ergonomicznej organizacji miejsca pracy, ukierunkowanej na człowieka, może zostać zaniedbana. Istnieje jednak wiele miejsc pracy, których działalność nie jest związana z jedną konkretną lokalizacją, m.in. w przypadku dostawców mebli lub służb ratunkowych, gdzie nie ma możliwości ergonomicznego zaprojektowania miejsca pracy ze względu na zmieniające się warunki otoczenia (Schick, 2018). Ponadto nadmierne obciążanie układu mięśniowego, częste podnoszenie ciężarów, przyjmowanie nieprawidłowej postawy ciała lub noszenie ciężkich środków ochrony indywidualnej (ŚOI) może w tych zawodach zwiększyć ryzyko nadmiernego wysiłku fizycznego. W tym kontekście egzoszkielety mogą oferować szereg możliwości poprawy warunków pracy.



Kwestią, na którą trzeba zwrócić szczególną uwagę, jest zachowanie ostrożności podczas korzystania z urządzeń technologicznych mających tak bliski kontakt z ciałem człowieka. Podczas projektowania miejsc pracy, zanim pracownicy zostaną wyposażeni w egzoszkielety, należy uwzględnić odpowiednie środki techniczne i organizacyjne. Ogólnie rzecz biorąc, egzoszkielety powinny być używane w celu poprawy ergonomii miejsc pracy jedynie w ostateczności. Na obecnym etapie w dziedzinie ergonomii i bezpieczeństwa pracy istnieje niewiele doniesień naukowych na temat egzoszkieletów. Jednym z wyzwań jest ocena długoterminowego wpływu egzoszkieletów na biomechanikę i fizjologię człowieka, co w praktyce jest trudne do osiągnięcia (Liedtke i Glitsch, 2018), ponieważ należy przeanalizować rodzaj egzoszkieletu, wykonywane zadania i okresy stosowania egzoszkieletów. Ponadto dopiero niedawno rozpoczęto badanie skutków zdrowotnych związanych z aspektami fizjologicznymi lub biomechanicznymi, ponieważ interakcja człowieka z egzoszkieletami jest złożona, a jej zbadanie wymaga czasu. Należy jednak wypracować nowe podejście, aby wykazać skuteczność egzoszkieletów, lepiej oszacować zalety i wady tej technologii. Niniejszy artykuł stanowi przegląd bieżącej dyskusji na temat stosowania i oceny egzoszkieletów w aspekcie BHP.

Egzoszkieleaty

Definicja

Egzoszkieleat można określić jako indywidualny system wsparcia, który oddziałuje na organizm w sposób mechaniczny (Liedtke i Glitsch, 2018). Ściślej rzecz ujmując, egzoszkieleaty to przenośne technologie przypominające roboty, które wpływają na siły wewnętrzne i zewnętrzne oddziałujące na ciało. Krótko mówiąc, egzoszkieleaty to urządzenia noszone na ciele, które zwiększają lub wzmacniają siłę użytkownika. Z powodu dużej liczby zastosowań oraz różnorodnych funkcji nadal nie opracowano jednej uniwersalnej definicji egzoszkieleatów. W literaturze zgodnie uważa się, że egzoszkieleaty można określić jako zewnętrzne mechaniczne struktury noszone na ciele (Herr, 2009; De Looze *et al.*, 2016). Można je sklasyfikować jako systemy aktywne lub pasywne.

W egzoszkieleatach aktywnych wykorzystuje się aktuatory (mechaniczne urządzenia napędowe) w celu wspomaganie układu ruchu człowieka. Do tych urządzeń mechanicznych można zaliczyć silniki elektryczne, mogą być one również napędzane hydraulicznie lub pneumatycznie (Gopura i Kiguchi, 2009). Dzięki takiemu wsparciu zapewniają dodatkową siłę, a zatem zwiększają wydajność pracownika. Natomiast w egzoszkieleatach pasywnych wykorzystuje się siłę sprężystości sprężyn, amortyzatorów lub innych materiałów w celu wspomaganie układu ruchu człowieka. Energia zgromadzona w egzoszkieleacie pasywnym generowana jest wyłącznie podczas poruszania się użytkownika (De Looze *et al.*, 2016). Ponadto dochodzi do rozłożenia sił w celu ochrony określonych partii ciała. Zmiany w zakresie wydajności użytkownika nie wynikają z dodatkowej siły fizycznej, lecz ze zdolności do pozostawania przez dłuższy czas w pozycjach normalnie wywołujących zmęczenie, na przykład w warunkach pracy wymagających utrzymywania rąk ponad głową.

Egzoszkieleaty hybrydowe, które mogą być wyposażone w systemy aktywne lub pasywne, jak na razie stanowią wyjątek. Aby zainicjować ruch wykorzystują one aktywność fal mózgowych (sygnały EEG) lub aktywność mięśni. Niemniej jednak ich stosowanie w przemyśle jest obecnie mało prawdopodobne, dlatego w niniejszym dokumencie nie będą one dalej omawiane.

Rodzaje egzoszkieleatów

Egzoszkieleaty można podzielić na trzy grupy: odciążające kończyny dolne, odciążające kończyny górne i chroniące całe ciało. W literaturze porusza się tematykę egzoszkieleatów jednostawowych (Gams *et al.*, 2013); nie będzie ona jednak dalej omawiana w niniejszym artykule z uwagi na wysoce indywidualne aspekty tych urządzeń i możliwości ich zastosowania w ściśle określonych przypadkach. Egzoszkieleaty odciążające kończyny górne zazwyczaj są wyposażone w solidne struktury mechaniczne mające na celu rozłożenie siły mięśniowej w kończynach górnych i w obrębie tułowia (np. ramionach, przedramionach, barkach lub odcinku lędźwiowym kręgosłupa). W tym przypadku zmiana rozkładu sił oznacza, że inne partie ciała, takie jak biodra lub nogi mogą przyjąć dodatkowe obciążenie. Egzoszkieleaty odciążające kończyny dolne mogą przenosić obciążenie na podłoże, a zatem odciążać układ mięśniowo-szkieletowy. Należy jednak zauważyć, że zasady te w dużej mierze zależą od projektu i funkcji egzoszkieleatu. Systemy wspomagające, które jednocześnie odciążają kończyny górne i dolne, można określić jako egzoszkieleaty chroniące całe ciało.

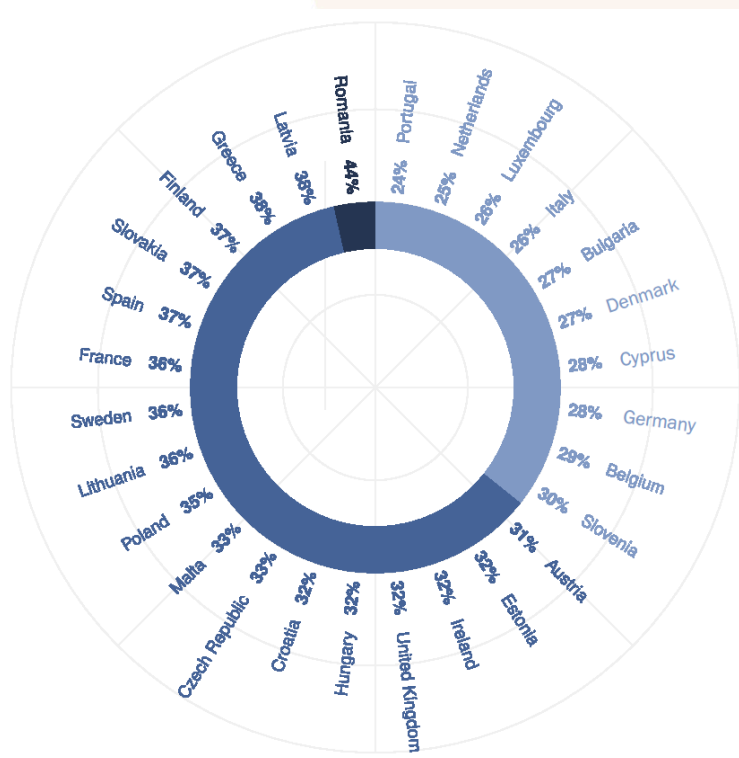
Zakres stosowania w miejscu pracy

Pomysł wspomaganie układu ruchu człowieka za pomocą urządzeń technicznych nie jest niczym nowym. Przenośne urządzenia wspomagające, takie jak egzoszkieleaty, od dłuższego czasu są wykorzystywane w opiece medycznej, jak na przykład ortozy używane w rehabilitacji pacjentów, pomagające odzyskać sprawność fizyczną (Viteckova *et al.*, 2013). Ortezy różnią się jednak od egzoszkieleatów, ponieważ wspomagają osoby borykające się z urazami i chorobami układu mięśniowo-szkielekowego. Egzoszkieleaty zostały również opracowane do celów wojskowych (De Looze *et al.*, 2016). Wykorzystywanie egzoszkieleatów w celu zachowania lub ochrony zdrowia fizycznego pracowników jest jednak nowością. Chociaż kwestia poprawy ergonomicznych warunków pracy za ich pomocą jest obecnie przedmiotem kontrowersji, urządzenia te nadal stwarzają możliwości zapewnienia bezpieczeństwa i zdrowia pracowników (Schick, 2018). Ponadto, w przyszłości wskutek zmian demograficznych wymogi związane z ergonomią miejsc pracy będą odgrywały ważną rolę w zapewnianiu zdrowia fizycznego starszych pracowników. Z tej perspektywy konieczne jest opracowanie

nowych ergonomicznych narzędzi, ponieważ dostępne obecnie opcje są ograniczone (Hensel *et al.*, 2018; Schick, 2018).

Istnieje wiele zakresów stosowania egzoszkieletów mających na celu ograniczenie występowania zaburzeń układu mięśniowo-szkieletowego związanych z pracą. W całej Europie ponad 30% zadań wykonywanych w ramach pracy wiąże się z ręcznym przemieszczaniem materiałów (MMH) (Eurofound, 2012), co stanowi poważne zagrożenie dla zdrowia. Praca, która wiąże się z wykonywaniem powtarzalnych czynności, przenoszeniem dużych ciężarów, wykonywaniem zadań z uniesionymi nad głowę rękami lub przyjmowaniem niebezpiecznych pozycji stwarza szereg możliwości wykorzystania egzoszkieletów. Na rysunku 2 wskazano, że przemieszczanie i przenoszenie dużych ciężarów stanowi znaczną część pracy w każdym europejskim państwie - w szczególności np. w Rumunii prawie połowa pracowników (44%) czasami dźwiga duże ciężary. W tym kontekście przedmiotem zainteresowania są miejsca pracy w przemyśle, dostawcy mebli, służby ratunkowe i szpitale. Należy mieć na uwadze, że w stacjonarnych miejscach pracy projektowanie z zachowaniem zasad ergonomii jest często możliwe. Dopóki środki techniczne lub organizacyjne stwarzają możliwość poprawy ergonomii miejsca pracy, nie należy preferować stosowania egzoszkieletów (Schick, 2018). Wydaje się jednak, że skupianie się na egzoszkieletach, które zwiększają wydajność pracowników może być bardziej interesujące niż skupianie się na projektowaniu miejsc pracy zorientowanych na człowieka (Baltrusch *et al.*, 2018).

Rysunek 2 Odsetek europejskich pracowników w każdym wieku którzy przez jedną czwartą czasu pracy przenoszą lub przemieszczają duże ciężary (Eurofound, 2019).



Z uwagi na kwestie techniczne egzoszkielety aktywne mają niewielkie znaczenie praktyczne. W kilku publikacjach zwrócono uwagę na kwestie dotyczące wagi, struktury mechanicznej, zasilania akumulatorami oraz konstrukcji mechanizmu napędowego (Yang *et al.*, 2008; Herr, 2009; De Looze *et al.*, 2016). Natomiast niektóre egzoszkielety pasywne są już dostępne na rynku. Te systemy zapewniają jednak ograniczone wsparcie, ponieważ początkowo tylko niektóre partie ciała mogą zostać odciążone, a pomoc podczas podnoszenia dużych ciężarów nadal jest ograniczona.

Przeznaczenie egzoszkieletów w dużej mierze zależy od zakresu ich stosowania. Oprócz tego, że mogą być stosowane jako środki techniczne, egzoszkielety mogą być również używane jako środki ochrony indywidualnej lub produkty medyczne. W zależności od przeznaczenia, należy uzyskać różnego rodzaju certyfikacje. Certyfikacje te są ściśle związane z kwestiami BHP.

Certyfikacje egzoszkieleatów

Z uwagi na szeroki zakres ich stosowania w rehabilitacji, przemyśle, wojskowości oraz różne rodzaje ich konstrukcji, wciąż nie opracowano jednolitej regulacji ani certyfikacji egzoszkieleatów. Aby wypełnić tę lukę, należy wziąć pod uwagę przede wszystkim ich projekt funkcjonalny i przeznaczenie. Pod tym względem egzoszkieleaty można zaklasyfikować jako urządzenia techniczne wspomagające pracownika w wykonywaniu powierzonych mu zadań. Ponadto można je określić jako ŚOI. W tym przypadku egzoszkieleat chroni pracownika przed obciążeniem fizycznym, które może przyczynić się do powstania chorób związanych z pracą, takich jak np. obrażenia wynikające z nadużywania danej partii mięśni. Obecnie nie osiągnięto żadnego porozumienia co do tego, czy egzoszkieleaty mogą chronić pracowników przed zaburzeniami układu mięśniowo-szkieletowego, co jeszcze bardziej utrudnia ich klasyfikację.

Praktyczne zastosowanie egzoszkieleatów jest ściśle związane z konkretną certyfikacją. Jak już wspomniano, egzoszkieleat można określić jako pomoc techniczną na podstawie przepisów dyrektywy Unii Europejskiej w sprawie maszyn (2006/42/WE). Systemy aktywne można dalej określić na podstawie przepisów międzynarodowych dotyczących robotów i urządzeń dla robotyki (norma ISO 10218-1:2011) oraz wymagań bezpieczeństwa dla robotów do opieki osobistej (norma ISO 13482:2014).

Jeżeli egzoszkieleat jest certyfikowany jako ŚOI na podstawie dyrektywy Rady 89/686/EWG, może być wykorzystywany do celów profilaktycznych w celu zapobiegania obrażeniom związanym z pracą lub wynikającym z nadużywania danej partii mięśni. Należy wspomnieć, że dyrektywa 89/686/EWG jest stopniowo przekształcana w nowe rozporządzenie (UE) 2016/425 w sprawie środków ochrony indywidualnej.

Ponadto egzoszkieleat można uznać za wyrób medyczny zgodnie z odpowiednią dyrektywą (93/42/EWG). Produkty medyczne muszą spełniać najwyższe normy bezpieczeństwa i skuteczności. Wyzwanie stanowi ocena kliniczna skuteczności medycznej, która pozostaje trudna do udowodnienia. Wszystkie te wymagania są jednak niezbędne w celu wykorzystania egzoszkieleatów do celów rehabilitacji lub celów medycznych (Schick, 2018).

Ocena ryzyka w miejscu pracy z uwzględnieniem egzoszkieleatów

Pracodawcy mają ogólny obowiązek zapewnienia bezpiecznego i zdrowego środowiska pracy oraz ograniczenia potencjalnych zagrożeń podczas pracy. Ocena ryzyka w miejscu pracy, która uwzględnia wszystkie możliwe zagrożenia zawodowe, jest obowiązkowa i musi być przeprowadzana przez wszystkich pracodawców w Europie. Zgodnie z wytycznymi europejskimi, których celem było odniesienie się do obowiązków związanych z oceną ryzyka, określonymi w dyrektywie ramowej (89/391/EWG), opisano konkretne działania. Działania te obejmują zapobieganie zagrożeniom zawodowym, zapewnianie informacji i szkoleń pracownikom i organizacjom oraz sposoby służące wprowadzaniu w życie niezbędnych środków. Na podstawie tych przepisów należy przeanalizować możliwe zagrożenia związane z egzoszkieleatami w określonych miejscach pracy.

Istnieje mnóstwo potencjalnych zagrożeń związanych z egzoszkieleatami w środowisku pracy i mają one związek z ich projektem i funkcjami. Systemy aktywne mogą posiadać wady mechaniczne i techniczne. W takim przypadku nieprawidłowe funkcjonowanie może prowadzić do urazów, ponieważ mechanizm napędowy egzoszkieleatów aktywnych może wywierać dodatkowy nacisk na ciało pracownika. Obecnie istnieją trudności z zaklasyfikowaniem sił urządzeń noszonych na ciele i ich związku z powstałymi urazami. W ramach ogólnego odniesienia można rozważyć biomechaniczne wartości progowe robotów współpracujących (norma ISO/TS 15066:2016) (Schick, 2018). Przypuszcza się, że egzoszkieleaty mogą zwiększać ryzyko urazów podczas poślizgnięć, potknięć lub upadków. Jednak wpływ noszenia egzoszkieleatów odciażających kończyny górne podczas chodzenia po równej powierzchni ocenia się obecnie jako niski (Kim *et al.*, 2018). Niemniej w zależności od konstrukcji i wagi egzoszkieleatu swoboda poruszania się pracowników może być ograniczona. Utrudnia to przywrócenie równowagi poprzez kompensację ruchów w przypadku upadku. Konsekwencje mogłyby być dużo poważniejsze niż gdyby pracownik nie nosił egzoszkieleatu. Ponadto należy wziąć pod uwagę możliwe kolizje między egzoszkieleatem a sprzętem roboczym, robotami lub maszynami budowlanymi. W tym kontekście przeprowadzono symulacje komputerowe w celu zbadania praktycznego zastosowania egzoszkieleatów w wirtualnych warunkach fabrycznych (Constantinscu *et al.*, 2016). Podsumowując – wspomniano o pewnych ograniczeniach dotyczących zmiany organizacji miejsc pracy przy użyciu zintegrowanych egzoszkieleatów. W sytuacji nadzwyczajnej należy szybko ewakuować ludzi, aby zapewnić

bezpieczeństwo i zdrowie wszystkich pracowników. Szybkie zdjęcie egzoszkieleatu ma zatem kluczowe znaczenie. Projektanci powinni również brać pod uwagę sytuacje, w których pracownicy mogą być pozostawieni sami sobie.

Podsumowując – w scenariuszach można oszacować zagrożenia dla bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w związku z noszeniem egzoszkieleatów, jednak nie można ich jeszcze dokładnie określić. Jednym z powodów takiego stanu rzeczy są ograniczone dowody naukowe (Schick, 2018) i brak doświadczenia praktycznego. W szczególności nie znamy jeszcze długoterminowych skutków noszenia egzoszkieleatów dla układu mięśniowo-szkieletowego. W związku z tym nadal istnieje potrzeba przeprowadzenia kompleksowych badań uwzględniających aspekty osobowe, fizjologiczne, medyczne i biomechaniczne egzoszkieleatów.

Ocena egzoszkieleatów

Zalety i wady egzoszkieleatów są obecnie przedmiotem dyskusji w literaturze przedmiotu. Zasadniczo stanowią one obiecującą sposobność dla grup badawczych do poprawy ergonomii warunków pracy oraz zmniejszenia liczby zaburzeń mięśniowo-szkieletowych związanych z pracą, często związanych z ręcznym przemieszczaniem materiałów (Hensel *et al.*, 2018). Jednak fizyczne wymagania dotyczące układu mięśniowo-szkieletowego nie są jedynymi aspektami, które należy rozważyć. Egzoszkieleaty mogą także wpływać na środowisko społeczne lub inne parametry fizjologiczne, takie jak ciśnienie krwi, zużycie tlenu oraz częstość akcji serca.

Aspekty fizjologiczne

Natężenie przez pracownika zewnętrznej struktury, takiej jak egzoszkieleat, może mieć negatywne skutki fizjologiczne. W literaturze wykazano już, że dodatkowa waga egzoszkieleatu potencjalnie obciąża układ sercowo-naczyniowy (Theurel *et al.*, 2018), chociaż nadal niewiele wiadomo na temat skutków jego noszenia. Poprzednie badanie ujawniło wpływ wagi na zapotrzebowanie energetyczne podczas poruszania się: wykazano większe zużycie tlenu odpowiadające wadze noszonego sprzętu. Mimo to wydatek energetyczny zależy w dużym stopniu od płci, tempa poruszania się i masy ciała (Holewijn *et al.*, 1992). Natomiast Whitfield *et al.* (2014) byli w stanie udowodnić, że pomoc w ergonomicznym podnoszeniu ciężarów nie zwiększa zużycia tlenu podczas powtarzających się zadań, chociaż wprowadzono dodatkową masę urządzenia podnoszącego. Ponadto wyniki te są zgodne z ustaleniami różnych grup badawczych, które wykazały brak zmian w częstości akcji serca u osób noszących indywidualne urządzenia podnoszące (Godwin *et al.*, 2009; Lotz *et al.*, 2009). W ramach podsumowania zastosowań przemysłowych Whitfield *et al.* (2014) zasugerowali, że indywidualne urządzenia podnoszące nie powinny być używane w celu zwiększenia zakresu zadań. Te rozbieżne wnioski mogą wynikać z różnorodności egzoszkieleatów, które zostały poddane wcześniejszym badaniom. Poza mechaniczną strukturą i funkcją egzoszkieleatu zadania, np. dynamiczne lub statyczne warunki, również mają wpływ na metabolizm, co jeszcze bardziej utrudnia sformułowanie ogólnych wniosków. W szczególnych warunkach egzoszkieleaty mogą jednak redukować zmęczenie mięśni, a zatem mają ogromny potencjał pod względem poprawy zdrowia pracowników, ponieważ zakłada się, że zmęczenie mięśni zwiększa ryzyko urazów (Godwin *et al.*, 2009; Lotz *et al.*, 2009). Stałe wsparcie może również mieć długoterminowe skutki dla układu mięśniowo-szkieletowego. Przypuszcza się, że dojdzie do zmniejszenia masy mięśniowej, a w konsekwencji zmniejszenia siły mięśniowej, lecz skutki te są silnie związane ze stopniem wsparcia mięśni, jakie oferuje egzoszkieleat.

Ponadto mogą pojawić się punkty uciskowe w miejscach, w których egzoszkieleat ma kontakt z ciałem, co z czasem może powodować dyskomfort. Przypuszcza się, że zewnętrzny nacisk na naczynia krwionośne, spowodowany trokami lub paskami, przyczyni się do zmniejszenia przepływu krwi w danej części ciała. Oprócz tego częstość akcji serca i ciśnienie krwi mogą ulec zmianie w wyniku stosowania egzoszkieleatu podczas wykonywania powtarzających się zadań z rękami uniesionymi ponad głowę. Ponadto może dojść do podrażnienia skóry spowodowanego kontaktem z egzoszkieleatem lub do reakcji alergicznych. Czynniki te mają jednak charakter spekulacyjny i można je rozważyć jedynie z zachowaniem ostrożności.

Akceptacja przez użytkowników i skutki psychospołeczne

Należy mieć na uwadze fakt, że chociaż fizyczne skutki noszenia egzoszkieletów mogą oddziaływać na pracowników, akceptacja przez użytkowników może również odgrywać istotną rolę w środowisku pracy. Zaakceptowanie egzoszkieletów jest konieczne do ich długotrwałego wykorzystywania. Obecnie przeprowadzono szereg badań obejmujących subiektywne oceny egzoszkieletów w celu odniesienia się do kwestii akceptacji technologii (Gilotta *et al.*, 2018; Hensel *et al.*, 2018). Chociaż wytrzymałe egzoszkielety są oceniane pozytywnie przez wielu użytkowników, Hensel *et al.* (2018) wykazali, że ich akceptacja może maleć z biegiem czasu i jest ściśle związana z uczuciem dyskomfortu i użytecznością. Uczucie dyskomfortu jest jednym z najtrudniejszych aspektów i może uniemożliwiać szerokie zastosowanie egzoszkieletów w miejscach pracy w przemyśle (Bosch *et al.*, 2016). Należy również wspomnieć, że te oceny są ściśle związane z określonymi zadaniami i egzoszkieletami, a zatem nie mogą mieć charakteru ogólnego. Wyniki wskazują jednak, że programiści powinni uwzględniać funkcjonalność i wagę, a także ergonomiczny projekt egzoszkieletów. Ponadto pracownicy mogą czuć się gorsi podczas noszenia egzoszkieletu w celu wykonywania codziennych zadań, gdyż fizyczny aspekt wydajności jest również związany z urządzeniem. Gilotta *et al.* (2018) wspomnieli o aspektach społecznych jako czynniku, który może ograniczyć akceptację. Noszenie egzoszkieletów może również prowadzić do stygmatyzacji w miejscu pracy, ponieważ może sprawiać wrażenie, że pracownicy są zależni od zapewnianego przez nie wsparcia.

Aspekty biomechaniczne

Obecnie istnieje wiele badań, które wykazują, że egzoszkielety mogą zmniejszać fizyczne obciążenie konkretnych części ciała, takich jak stawy barkowe lub lędźwiowy odcinek kręgosłupa (Abdoli-E *et al.*, 2006; Graham *et al.*, 2009; Bosch *et al.*, 2016; De Looze *et al.*, 2016; Theurel *et al.*, 2018; Weston *et al.*, 2018). Jednocześnie może się jednak okazać, że rozłożenie obciążenia fizycznego prowadzi do zwiększenia obciążenia w innych częściach ciała, jeżeli nacisk nie zostanie przeniesiony na podłoże (Theurel *et al.*, 2018; Weston *et al.*, 2018). W tym kontekście Weston *et al.* (2018) odkryli, że egzoszkielet odciążający kończyny górne zwiększa obciążenie odcinka lędźwiowego kręgosłupa. Theurel *et al.* (2018) wykazali, że egzoszkielet odciążający kończyny górne może zmniejszać aktywność mięśni w stawach barkowych. Wspomniano jednak o skutkach fizycznych, takich jak zwiększenie aktywności mięśni w innych częściach ciała lub różne wzorce ruchowe. Ponadto dodatkowa waga egzoszkieletu nie tylko obciąża układ sercowo-naczyniowy, lecz również zmienia ośrodek masy ciała, co wpływa na aktywność mięśni użytkownika. Należy wspomnieć, że nie można uogólniać skutków noszenia egzoszkieletu dla organizmu człowieka. Kwestie poruszane w ramach badań biomechanicznych często są związane z bardzo specyficznymi ruchami i aktywnością mięśni i nie uwzględniają wszystkich możliwych przypadków wykorzystywania egzoszkieletów oraz ich rodzajów. Mogą one jednak dotyczyć braku funkcjonalności ze względu na mechaniczne skutki konkretnych egzoszkieletów i ich konsekwencje dla obciążenia ciała.

Wyzwania w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy

Wdrażanie nowych technologii w miejscu pracy zawsze wymaga krytycznej oceny pod kątem BHP dla wszystkich zainteresowanych stron. Ogólnie rzecz biorąc, projektowanie zorientowane na człowieka, zgodnie z dyrektywą ramową (89/391/EWG), stanowi warunek podstawowy. Ścisłej rzecz ujmując oznacza to, że standardowe miejsca pracy nie wymagają podjęcia dodatkowych działań. Jednak z uwagi na obecną sytuację zawodową w Europie oraz związek nowych technologii z zaburzeniami układu mięśniowo-szkieletowego, warunki ergonomiczne nie są wcale oczywiste. Aby zapewnić odpowiednie środowisko pracy, należy rozważyć wprowadzenie środków technicznych, organizacyjnych i indywidualnych zgodnie z dyrektywą ramową (89/391/EWG). Jeśli chodzi o ich wpływ na BHP, obowiązkowe jest ich hierarchiczne stosowanie - w przypadku wykorzystania wszystkich środków technicznych, na przykład korzystania z urządzeń podnoszących lub zmiany organizacji miejsca pracy, należy wziąć pod uwagę aspekty organizacyjne, takie jak modyfikacje procesów pracy. Ponadto można rozważyć wprowadzenie środków indywidualnych służących ochronie pracowników.

Jak omówiono wcześniej, egzoszkielety można opisać jako urządzenia techniczne lub wyroby medyczne i można je również określić jako sprzęt ochronny. Ich klasyfikacja w dużym stopniu zależy od ich zastosowania, projektu i przeznaczenia. W związku z tym egzoszkielety można obecnie ocenić jedynie, przyjmując indywidualne podejście do każdego przypadku. W praktyce można założyć, że

egzoszkielety są wykorzystywane jako urządzenia techniczne ułatwiające procesy pracy. Jeżeli są one jednak stosowane w celu poprawy projektowania miejsca pracy, w którym konieczne jest wdrożenie środków ergonomicznych w celu ochrony pracowników przed urazami wynikającymi z nadużywania danej partii mięśni, należy je uznać za ŚOI.

W przyszłości ocenę egzoszkieletów należy zintegrować z tradycyjnym podejściem ergonomicznym (projektowanie zorientowane na człowieka), ponieważ mają one wpływ na warunki pracy i aspekty organizacyjne.

Pracownicy

Wymagania użytkownika dla pracowników zależą od szczegółowej klasyfikacji danego egzoszkieletu. Jeżeli egzoszkielety zostały certyfikowane jako urządzenia techniczne, są one przypisane do miejsc pracy i nie mogą być używane w każdej możliwej sytuacji zawodowej, chyba że zostały uznane za właściwe dla tego zastosowania. Urządzenia techniczne nie są jednak środkami indywidualnymi, a ich stosowanie jest dobrowolne. Jeżeli egzoszkielety są certyfikowane jako ŚOI, istnieje prawny obowiązek ich stosowania. W tym przypadku pracownik musi być wyposażony w egzoszkielet, jeżeli jest narażony na zwiększone obciążenie pracą.

Pracodawcy

Podczas wdrażania egzoszkieletów i wykorzystania ich działania pracodawcy muszą uwzględniać różne aspekty. W porównaniu z pomocniczymi urządzeniami technicznymi wymogi higieniczne w odniesieniu do ŚOI są bardziej kompleksowe. W związku z tym stosowanie egzoszkieletu staje się obowiązkowe. Aby spełnić te wymagania co najmniej każdy pracownik wykonujący swoje obowiązki w miejscu pracy wymagającym noszenia egzoszkieletu w postaci ŚOI musi być wyposażony w oddzielny egzoszkielet, co może powodować problemy z ich przechowywaniem. Ponadto należy wziąć pod uwagę adaptacje sprzętu do chorób przewlekłych, zaburzenia układu mięśniowo-szkieletowego, reakcje ze strony układu sercowo-naczyniowego oraz kwestie wydajności. Aby spełnić normy higieny muszą być również dostępne wystarczające środki czyszczące lub maszyny czyszczące. Egzoszkielety określone jako pomocnicze urządzenia techniczne są opcjonalne i nie muszą być udostępniane każdemu pracownikowi w miejscu pracy. Jednak w przypadku ich stosowania należy je traktować jako pomoc (wsparcie), a nie metodę zwiększenia wydajności czy efektywności pracowników.

Decydenci

W przyszłości decydenci powinni rozważyć uregulowanie kwestii egzoszkieletów odnośnie ich zastosowania i aspektów technicznych, aby ułatwić certyfikację nowych technologii. Umożliwia to producentom bardziej klarowną klasyfikację swoich produktów, a pracodawcom daje możliwość stosowania egzoszkieletów zgodnie z ich przeznaczeniem. Należy jednak wspomnieć, że za przeznaczenie produktu oraz związaną z tym certyfikację zawsze odpowiada producent.

Podsumowanie

Tematyka egzoszkieletów cieszy się obecnie dużym zainteresowaniem. Jednak pomimo ich niezaprzeczalnie obiecującego potencjału, kwestia stosowania egzoszkieletów w wielu różnych dziedzinach powinna być poddana dalszym rozważaniom. Nie wiadomo jeszcze, czy w przyszłości egzoszkielety będą stosowane na większą skalę w celu ochrony pracowników przed urazami wynikającymi z nadmiernego obciążenia pracą czy przyczynią się do wprowadzenia oszczędności w zakresie procesów pracy. W zależności od rozwoju technicznego egzoszkielety mogą stać się standardowym narzędziem służącym do prowadzenia ręcznych procesów pracy lub pozostać produktem niszowym, stosowanym w ściśle określonych przypadkach. Obecne komercyjne zainteresowanie egzoszkieletami może również stanowić problem dla przyszłego rozwoju, jako że podejście zorientowane na wydajność lub podejście ekonomiczne mogą być traktowane priorytetowo, co przyczyni się do zaniedbania kwestii bezpieczeństwa w miejscu pracy. Egzoszkielety mogą być jednak stosowane jako urządzenia techniczne, wyroby medyczne lub środki ochrony indywidualnej, w

zależności od ich przeznaczenia w miejscu pracy. Ze względu na ich zróżnicowanie pod względem funkcjonalności, projektu i zastosowania nie istnieje jednak jedna uniwersalna definicja egzoszkieletów, co utrudnia ich wdrożenie w praktyce w odniesieniu do ich certyfikacji. Chociaż przeprowadzono wiele badań dotyczących egzoszkieletów, które uwzględniają różne aspekty użyteczności i funkcjonalności, nadal niewiele wiadomo na temat skutków ich noszenia dla zdrowia pracowników. W szczególności nie są znane długoterminowe skutki noszenia egzoszkieletów w odniesieniu do parametrów fizjologicznych, psychospołecznych i biomechanicznych. Aby uzyskać bardziej wiarygodne wyniki przyszłe badania powinny dotyczyć ukierunkowanych na praktykę długoterminowych skutków noszenia egzoszkieletów w miejscu pracy. Należy wspomnieć, że nie można zalecić stosowania egzoszkieletów w celu poprawy projektowania ergonomicznego w stacjonarnych miejscach pracy, lecz istnieje również ogromna liczba niestacjonarnych, czy też ruchomych miejsc pracy, w których nie ma możliwości wprowadzenia rozwiązań ergonomicznych. W tym kontekście egzoszkielety mogą stanowić obiecujące podejście pozwalające na zmniejszenie w przyszłości liczby przypadków zaburzeń układu mięśniowo-szkieletowego związanych z pracą.

Autorzy: Peters, M. i Wischniewski, S. (2019). Federalny Instytut Bezpieczeństwa i Higieny Pracy, Friedrich-Henkel-Weg 1–25, 44149 Dortmund, Niemcy.

Zarządzanie projektem: Annick Starren, Emmanuelle Brun, Europejska Agencja Bezpieczeństwa i Zdrowia w Pracy (EU-OSHA), 2109

Dziękujemy dr. Larsowi Adolphowi, dr Ute Latzy i grupie krajowych punktów centralnych EU-OSHA za ich krytyczne przeglądy i przydatne sugestie. Pragniemy również podziękować Eurofound za wykorzystanie ilustracji w niniejszym dokumencie.

Artykuł przygotowano na zlecenie EU-OSHA. Za jego treść, w tym za wszelkie wyrażone w nim opinie lub wnioski odpowiadają wyłącznie autorzy i niekoniecznie odzwierciedlają one poglądy EU-OSHA.

Odniesienia

- 89/391/EWG. Dyrektywa Rady z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy. Rada Wspólnot Europejskich.
- 89/686/EWG. Dyrektywa Rady z dnia 21 grudnia 1989 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do wyposażenia ochrony osobistej. Rada Wspólnot Europejskich.
- 93/42/EWG. Dyrektywa Rady 93/42/EWG z dnia 14 czerwca 1993 r. dotycząca wyrobów medycznych. Rada Wspólnot Europejskich.
- 2006/42/WE. Dyrektywa 2006/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 17 maja 2006 r. w sprawie maszyn, zmieniająca dyrektywę 95/16/WE (przekształcenie). Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej.
- 2016/425. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/425 z dnia 9 marca 2016 r. w sprawie środków ochrony indywidualnej oraz uchylenia dyrektywy Rady 89/686/EWG. Parlament Europejski i Rada Unii Europejskiej.
- Abdoli-E, M., Agnew, M. J. and Stevenson, J. M. (2006). An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clinical Biomechanics*, 21 (5), 456–465.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., van Bennekom, C. A. M. i Houdijk, H. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied Ergonomics*, 72, s. 94–106.
- Bevan, S. (2015). Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe. *Best Practice & Research in Clinical Rheumatology*, 29 (3), 356–373.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K. i de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54, s. 212–217.
- Collins, J. D. i O'Sullivan, L. W. (2015). Musculoskeletal disorder prevalence and psychosocial risk exposures by age and gender in a cohort of office based employees in two academic institutions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 46, s. 85–97.
- Constantinescu, C., Muresan, P.-C. i Simon, G.-M. (2016). JackEx: the new digital manufacturing resource for optimization of exoskeleton-based factory environments. *Procedia CIRP*, s. 50, s. 508–511.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S. i O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59 (5), s. 671–681.
- INRS. (2018). Exosquelettes au travail: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs – état des connaissances. Paris: Institut National de Recherche et de Sécurité. Pobrano ze strony internetowej INRS: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206311>
- INRS. (2019). Acquisition et integration d'un exosquelette en entreprise: Guide pour les préventeurs. Paris: Institut National de Recherche et de Sécurité. Pobrano ze strony internetowej INRS: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206315>
- Eurofound. (2012). *Piąte europejskie badanie warunków pracy*. Luksemburg: Urząd Publikacji Unii Europejskiej.
- Eurofound. (2019). *Europejskie badanie warunków pracy z 2015 r.* Bruksela: Eurofound. Pobrano ze strony internetowej Eurofoundu: <https://www.eurofound.europa.eu/pl/data/european-working-conditions-survey>.
- Gams, A., Petrič, T., Debevec, T. i Babič, J. (2013). Effects of robotic knee exoskeleton on human energy expenditure. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60 (6), s. 1636–1644.
- Gilotta, S., Spada, S., Ghibaudo, L., Isoardi, M. i Mosso, C. (2018). *Acceptability beyond Usability: A Manufacturing Case Study*. Dokument przedstawiony podczas Kongresu Międzynarodowego Stowarzyszenia Ergonomicznego (ang. International Ergonomics Association).

- Godwin, A. A., Stevenson, J. M., Agnew, M. J., Twiddy, A. L., Abdoli-Eramaki, M. i Lotz, C. A. (2009). Testing the efficacy of an ergonomic lifting aid at diminishing muscular fatigue in women over a prolonged period of lifting. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39 (1), s. 121–126.
- Gopura, R. A. R. C. i Kiguchi, K. (2009). *Mechanical Designs of Active Upper-limb Exoskeleton Robots: State-of-the-art and Design Difficulties*. Dokument przedstawiony podczas ICORR 2009: 11. Międzynarodowa Konferencja IEEE poświęcona robotyce rehabilitacyjnej.
- Graham, R. B., Agnew, M. J. i Stevenson, J. M. (2009). Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: assessment of EMG response and user acceptability. *Applied Ergonomics*, 40 (5), s. 936–942.
- Hensel, R., Keil, M., Mücke, B. i Weiler, S. (2018). Chancen und Risiken für den Betrieblichen Einsatz von Exoskeletten in der betrieblichen Praxis. *ASU Zeitschrift für medizinische Prävention*, 53, s. 654–661.
- Herr, H. (2009). Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 6 (21).
- Holewijn, M., Hens, R. i Wammes, L. (1992). Physiological strain due to load carrying in heavy footwear. *European Journal of Applied Physiology Occupational Physiology*, 65 (2), 129–134.
- ISO 10218-1:2011. Roboty i urządzenia dla robotyki – Wymagania bezpieczeństwa dla robotów przemysłowych – Część 1: Roboty. Genewa: Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna.
- ISO 13482:2014. Roboty i urządzenia dla robotyki – Wymagania bezpieczeństwa dla robotów do opieki osobistej. Genewa: Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna.
- ISO/TS 15066:2016. Roboty i urządzenia dla robotyki – Roboty współpracujące. Genewa: Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna.
- Kim, S., Nussbaum, M. A., Mokhlespour Esfahani, M. I., Alemi, M. M., Jia, B. i Rashedi, E. (2018). 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. *Applied Ergonomics*, 70, s. 323–330.
- Liedtke, M. and Glitsch, U. (2018). Exoskelette – Verordnung für persönliche Schutzausrüstung. *sicher ist sicher*, 3, s. 110–113.
- Lotz, C. A., Agnew, M. J., Godwin, A. A. i Stevenson, J. M. (2009). The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task. *Journal of Electromyography Kinesiology*, 19 (2), s. 331–340.
- Schick, R. (2018). Einsatz von Exoskeletten in der Arbeitswelt. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 68 (5), s. 266–269.
- Theurel, J., Desbrosses, K., Roux, T. & Savescu, A. (2018). Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*, 67, s. 211–217.
- Viteckova, S., Kutilek, P. and Jirina, M. (2013). Wearable lower limb robotics: a review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 33 (2), s. 96–105.
- Weston, E. B., Alizadeh, M., Knapik, G. G., Wang, X. and Marras, W. S. (2018). Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Applied Ergonomics*, 68, s. 101–108.
- Whitfield, B. H., Costigan, P. A., Stevenson, J. M. i Smallman, C. L. (2014). Effect of an on-body ergonomic aid on oxygen consumption during a repetitive lifting task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44 (1), s. 39–44.
- Yang, C., Zhang, J., Chen, Y., Dong, Y. i Zhang, Y. (2008). A review of exoskeleton-type systems and their key technologies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 (8), s. 1599–1612.
- Zurada, J. (2012). Classifying the risk of work related low back disorders due to manual material handling tasks. *Expert Systems with Applications*, 39 (12), s. 11125–11134.