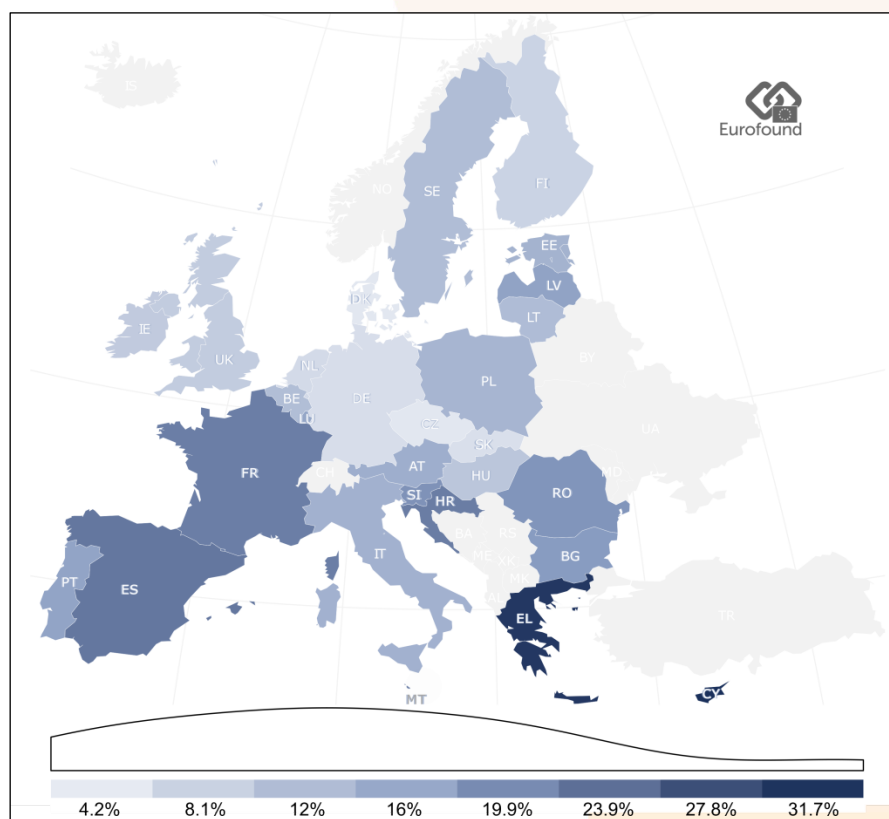


DOPAD POUŽÍVÁNÍ EXOSKELETŮ NA BEZPEČNOST A OCHRANU ZDRAVÍ PŘI PRÁCI

Úvod

V posledních letech začaly být na pracovištích zaváděny nové nositelné kompenzační pomůcky, tzv. exoskelety. Očekává se, že jejich používání bude v budoucnosti běžnější praxí, jelikož prototypy exoskeletů se ukázaly být přínosné například v oblasti zdravotní péče. Exoskelety se jeví zejména jako nový přístup k řešení problematiky muskuloskeletálních poruch souvisejících s prací. Muskuloskeletální poruchy související s prací představují pro pracoviště v Evropě jeden z nejnáročnějších problémů.¹ Obrázek 1 znázorňuje procentní podíly pracovníků, kteří se při pracovní činnosti dostávají do únavných a bolestivých pozic, jež mohou souviset s nevhodným uspořádáním pracoviště, neboť pracovní podmínky jsou v celé Evropě stále závažným problémem. K řešení tohoto problému byly vyvinuty exoskelety.

Obrázek 1 Procentní podíly všech zaměstnanců v Evropě, kteří se při pracovní činnosti ocitají v únavných nebo bolestivých pozicích (upraveno podle nadace Eurofound, 2019)



Exoskelety jsou nositelné pomůcky, které mohou podpořit muskuloskeletální systém za použití různých principů mechaniky. Pokud jde o muskuloskeletální poruchy související s prací, mohou exoskelety snižovat svalovou zátěž v často postižených oblastech těla, jako je například bederní část zad nebo

¹ Více než 40 % pracovníků v Evropě trpí bolestí v bederní části zad nebo si stěžuje na potíže s rameny. Kromě toho 63 % pracovníků provádí opakované úkony nebo často pracuje v potenciálně nebezpečných pozicích (46 %) (Eurofound, 2012). Roční náklady vyplývající z těchto zdravotních problémů způsobených pracovními podmínkami činí zhruba 2 % hrubého domácího produktu Evropské unie (EU) (Bevan, 2015). Mnohé z těchto problémů jsou způsobeny úkoly při ruční manipulaci s materiálem, mezi něž patří zvedání, spouštění, držení nebo přenášení břemen (Zurada, 2012; Collins a O'Sullivan, 2015). Otáčení, ohýbání a práce nad hlavou také zvyšují riziko rozvoje poruch souvisejících s prací. Muskuloskeletální poruchy související s prací proto nejsou jen problémem spojeným se zdravím, ale problémem, který má zásadní ekonomický význam.

ramena. Potenciální přínos exoskeletů k prevenci muskuloskeletálních poruch souvisejících s prací by mohl být značný, je však také nutné vzít v úvahu skutečnost, že tyto kompenzační pomůcky vyvolávají nové otázky v souvislosti s bezpečností a ochranou zdraví při práci (BOZP). V této souvislosti Francouzský národní výzkumný a bezpečnostní institut pro prevenci pracovních úrazů a nemocí z povolání (INRS) zveřejnil přehled nových rizikových faktorů na pracovišti při používání exoskeletů (INRS, 2019). Na jedné straně mohou být exoskelety považovány za příležitost k omezení svalové zátěže při práci tím, že pracovníkům fyzicky pomáhají a potenciálně předcházejí vzniku muskuloskeletálních poruch souvisejících s prací nebo poskytují podporu pracovníkům s tělesným postižením. Na druhé straně se však mohou projevit nová potenciální zdravotní rizika v důsledku přerozdělování zátěže do jiných oblastí těla. Ovlivňují také motorickou kontrolu, stabilitu kloubů a změnu kinematiky (INRS, 2018). Kromě toho může být zanedbáváno ergonomické uspořádání pracovišť vycházející ze zásad uspořádání zaměřeného na člověka. Existuje však mnoho pracovišť, která nejsou vázána na konkrétní místo, například pracoviště, která působí v oboru přepravy nábytku nebo záchranných služeb, a na nichž opatření k ergonomickému uspořádání nelze zavést vzhledem k měnícím se environmentálním požadavkům (Schick, 2018). Kromě toho mohou nadměrná svalová zátěž, časté zvedání, vadné držení těla nebo těžké osobní ochranné prostředky (OOP) v těchto profesích zvýšit riziko fyzického vyčerpání. V této souvislosti mohou exoskelety nabídnout řadu možností ke zlepšení pracovních podmínek.



Inc/MONOPOLY919, ©Shutterstock

Nejdůležitější je pamatovat na to, že při používání technologie tak úzce spjaté s lidským tělem je zapotřebí opatrnosti. Předtím, než jsou zaměstnanci vybaveni exoskelety, by se měla při navrhování pracovišť zvážit technická a organizační opatření. Obecně by použití exoskeletů ke zlepšení ergonomického rozvržení pracovišť mělo být vždy až tou nejkrajnější možností. V současné době je o exoskeletech v rámci vědeckého studia ergonomie a pracovních podmínek k dispozici málo vědeckých důkazů. Jednou z výzev je hodnocení dlouhodobých účinků exoskeletů na lidskou biomechaniku a fyziologii, což je v praxi obtížně proveditelné (Liedtke a Glitsch, 2018), protože je nutné posoudit druh exoskeletu, pracovní úkoly a doby použití. Kromě toho prošetřování účinků na zdraví v souvislosti s fyziologickými nebo biomechanickými aspekty je v samých začátcích, neboť interakce člověka s exoskelety je složitá a její zkoumání časově náročné. Je však zapotřebí vyvinout nové přístupy k prokázání účinnosti exoskeletů, aby bylo možné lépe určit výhody a nevýhody této technologie. Tento článek poskytuje přehled současné diskuse týkající se používání a hodnocení exoskeletů z hlediska BOZP.

Exoskelety

Definice

Exoskelet lze definovat jako osobní asistenční systém, který mechanicky působí na tělo (Liedtke a Glitsch, 2018). V užším slova smyslu jsou exoskelety přenositelné robotické technologie, které modifikují vnitřní nebo vnější síly působící na tělo. Stručně řečeno, exoskelety jsou nositelné pomůcky, které zvyšují nebo podporují sílu uživatele. Vzhledem k velkému počtu nejrůznějších použití a k různým

funkcím doposud neexistuje jejich společná definice. V odborné literatuře panuje obecná shoda, že exoskelety lze definovat jako vnější mechanické konstrukce umístěné na těle (Herr, 2009; De Looze a kol., 2016). Je možné je klasifikovat jako aktivní nebo pasivní systémy.

Aktivní exoskelety používají poháněcí mechanismy (mechanické části pohonu) pro podporu lidských pohybů. Tyto mechanické části tvoří elektromotory, ale jejich pohon může být také na hydraulické nebo pneumatické bázi (Gopura a Kiguchi, 2009). Díky této podpoře poskytují přídavnou sílu, čímž zvyšují výkonnost pracovníka. Naproti tomu pasivní exoskelety k podpoře lidských pohybů využívají vratnou sílu pružin, tlumiče či jiné materiály. Energie uložená v pasivním exoskeletu je generována výhradně pohybem uživatele (De Looze a kol., 2016). Kromě toho je působení sil přerozdělováno tak, aby byly chráněny určité oblasti těla. Změna výkonnosti uživatele pramení nejenom z přídavné fyzické síly, ale také ze schopnosti vydržet v namáhavých pozicích delší dobu, například v podmínkách práce nad hlavou.

Výjimku zatím představují hybridní exoskelety, které mohou mít funkci aktivních i pasivních systémů. K aktivaci pohybů využívají elektrické impulsy v mozku (signály EEG) nebo aktivaci svalů. Aktuálně však není pravděpodobné, že by mohly být využívány v průmyslovém měřítku, a proto se jimi v tomto příspěvku dále nebudeme zabývat.

Druhy exoskeletů

Exoskelety lze klasifikovat do tří skupin: exoskelety pro dolní část těla, exoskelety pro horní část těla a celotělní exoskelety. O exoskeletech s jedním translačním kloubem referuje odborná literatura (Gams a kol., 2013), ale vzhledem k tomu, že jsou vysoce individualizované a mají omezené využití, nebudeme se jim v tomto článku věnovat. Exoskelety pro horní část těla obvykle využívají pevné mechanické konstrukce k přerozdělování tělesné zátěže vyvíjené na horní končetiny či na trup (např. na horní část paží, dolní část paží, ramena či bederní část zad). V tomto případě se přerozdělením zátěže rozumí skutečnost, že se nadměrná zátěž přenesla na jiné oblasti těla, jako jsou kyčle nebo nohy. Exoskelety pro dolní část těla dokážou přenášet kinetické síly na zem a snížit tak zátěž muskuloskeletálního systému. Je však důležité upozornit na to, že tyto principy silně závisí na konstrukci a funkci exoskeletu. Asistenční systémy, které podporují horní část těla a spodní část těla současně, lze definovat jako celotělové exoskelety.

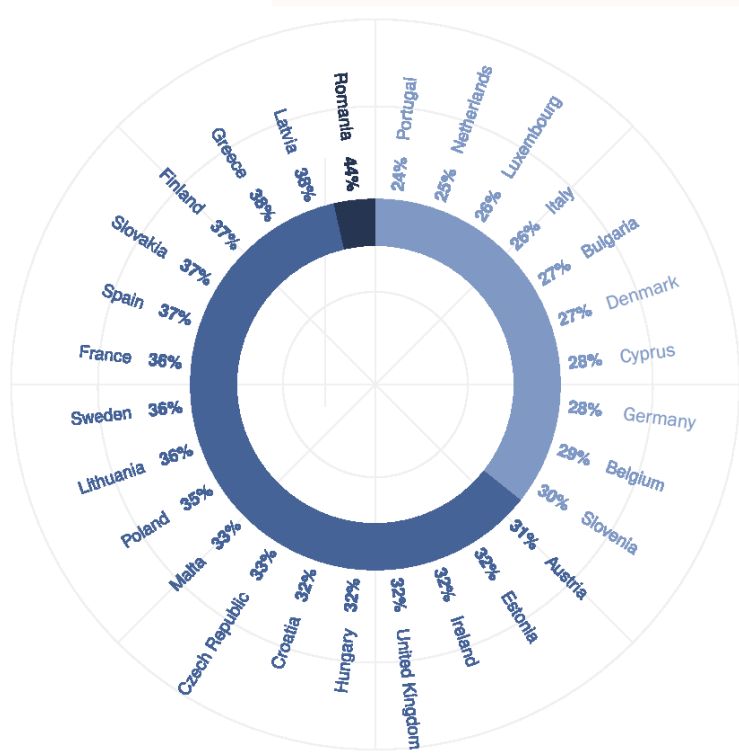
Oblasti použití na pracovištích

Myšlenka podporovat lidské pohyby technickými pomůckami není nová. Přenosné asistenční pomůcky obdobné exoskeletu se v oblasti zdravotní péče používají již dlouhou dobu, například ortézy pro rehabilitační účely jako podpora pro pacienty po zranění k obnově jejich fyzického zdraví (Vítečková a kol., 2013). Funkce ortéz je ale jiná než v případě exoskeletů, neboť slouží jako podpora pro osoby s onemocněním muskuloskeletálního systému. Byly vyvinuty také exoskelety pro vojenské účely (De Looze a kol., 2016). Využívání exoskeletů k zachování fyzického zdraví pracovníků nebo jeho ochraně je však novinkou. O otázce zlepšování ergonomie pracovních podmínek pomocí asistenčních pomůcek, jako jsou exoskelety, se v současné době sice vedou spory, exoskelety však nabízejí nové možnosti pro bezpečnost a ochranu zdraví zaměstnanců (Schick, 2018). Požadavky na ergonomii pracovišť budou navíc hrát v budoucnosti významnou úlohu při zajišťování fyzického zdraví stárnoucí pracovní síly v souvislosti s demografickými změnami. Z tohoto hlediska je nezbytné vyvinout nové ergonomické nástroje, neboť možnosti jsou v současné době omezené (Hensel a kol., 2018; Schick, 2018).

Existují četné možnosti využití exoskeletů ke snížení počtu případů muskuloskeletálních poruch souvisejících s prací. V celé Evropě je více než 30 % pracovních úkolů spojeno s ruční manipulací s materiálem (Eurofound, 2012), jež představuje významné zdravotní riziko. Pracovní činnost, která zahrnuje opakované úkoly, manipulaci s těžkými břemeny, práci nad hlavou nebo nebezpečné pozice těla, nabízí různé příležitosti pro využití exoskeletů. Obrázek 2 ukazuje, že přemísťování a nošení těžkých břemen je významnou součástí pracovní činnosti ve všech evropských zemích. Zejména v Rumunsku téměř polovina zaměstnanců (44 %) občas manipuluje s těžkými břemeny. V této souvislosti je třeba se zaměřit na průmyslová pracoviště, služby v oblasti přepravy nábytku, záchranné služby a nemocnice. Je zároveň důležité si uvědomit, že u stacionárních pracovišť je často možné využít ergonomického uspořádání. Pokud technická nebo organizační opatření nabízejí možnosti zlepšení ergonomického uspořádání, nemělo by se upřednostňovat použití exoskeletů (Schick, 2018).

Nicméně se zdá, že zaměření na exoskelety, které zvyšují výkonnost pracovníků, by mohlo být prospěšnější než důraz na uspořádání pracoviště zaměřené na člověka (Baltrusch a kol., 2018).

Obrázek 2 Procentní podíl zaměstnanců všech věkových skupin v Evropě, kteří tráví čtvrtinu času nošením nebo přemísťováním těžkých břemen (Eurofound, 2019)



Vzhledem k technickým problémům mají aktivní exoskelety jen malý praktický význam. Několik zpráv upozorňuje na problémy týkající se hmotnosti, mechanické konstrukce, funkce baterií a konstrukce mechaniky pohonu aktivních exoskeletů (Yang a kol., 2008; Herr, 2009; De Looze a kol., 2016). Oproti tomu některé pasivní exoskelety jsou již komerčně dostupné. Podpora prostřednictvím těchto pasivních systémů je však omezená, protože zpočátku lze ulevit zátěži pouze v některých oblastech těla. Pomoc při úkolech obnášejících zvedání těžkých břemen je stále omezená.

Zamýšlené použití exoskeletů silně závisí na jejich oblasti použití. Kromě jejich uplatnění jakožto technického nástroje by exoskelety mohly být používány také jako osobní ochranné prostředky nebo zdravotnické vybavení. V závislosti na zamýšleném použití je třeba získat různé certifikace. Tyto certifikace významně souvisejí s otázkami BOZP.

Certifikace exoskeletů

Vzhledem k široké škále jejich použití v oblasti rehabilitace, průmyslu a pro vojenské účely a k různým druhům konstrukce doposud neexistuje jednotná regulace nebo certifikace exoskeletů. K odstranění této mezery je třeba nejprve posoudit problematiku jejich funkční konstrukce a zamýšleného použití. V tomto ohledu lze exoskelety klasifikovat jako technické prostředky, které poskytují podporu pracovníkům při plnění jejich pracovních úkolů. Dále je lze definovat jako osobní ochranné prostředky. V tomto případě exoskelet chrání pracovníky před fyzickou zátěží, která může vést k nemocem z povolání, jako jsou poškození z přetížení. V současné době nepanuje shoda v otázce, zda exoskelety mohou chránit proti muskuloskeletálním poruchám, což ztěžuje jejich klasifikaci.

Praktické používání exoskeletů souvisí do značné míry s konkrétním druhem certifikace. Jak již bylo uvedeno, exoskelet lze definovat jako technický prostředek na základě právních předpisů Evropské unie podle směrnice o strojních zařízeních (2006/42/ES). Aktivní systémy lze dále definovat podle

mezinárodní standardizace robotů a robotických zařízení (ISO 10218-1:2011) a bezpečnostních požadavků pro roboty určené k osobní péči (ISO 13482:2014).

Je-li exoskelet certifikován jako osobní ochranný prostředek, lze jej na základě evropské směrnice 89/686/EHS používat pro preventivní účely, aby se předešlo úrazům souvisejícím s prací nebo poškození z přetížení. Je třeba poznamenat, že směrnice 89/686/EHS je postupně převáděna do nového nařízení (EU) 2016/425 o osobních ochranných prostředcích.

V neposlední řadě lze exoskelet považovat za zdravotnický prostředek podle příslušné evropské směrnice (93/42/EHS). Zdravotnické vybavení musí splňovat náročné normy týkající se bezpečnosti a funkční způsobilosti. Výzvou je klinické hodnocení zdravotní účinnosti, která se zatím obtížně prokazuje. Splnění všech těchto požadavků je však nezbytným předpokladem k používání exoskeletů pro účely rehabilitace nebo pro zdravotnické účely nebo k jejich používání v rámci začleňování pracovníků do pracovního procesu (Schick, 2018).

Posouzení rizik na pracovišti v souvislosti s exoskelety

Zaměstnavatelé mají obecnou povinnost zajistit bezpečné a zdravé pracovní prostředí a omezit možná rizika během práce. Posouzení rizik na pracovišti, která zohledňují všechna možná pracovní rizika, jsou povinná a musí je provádět všichni zaměstnavatelé v Evropě. Podle evropských pokynů, jejichž účelem je řešení povinností spojených s posuzováním rizik v souladu s rámcovou směrnicí (89/391/EHS), jsou definována zvláštní opatření. Mezi taková opatření patří prevence pracovních rizik, poskytování informací a školení pracovníkům a organizacím a přidělení prostředků k provádění nezbytných opatření. Na základě těchto právních předpisů je nutno zvážit možná rizika spojená s exoskelety na konkrétních pracovištích.

Potenciální rizika exoskeletů v pracovních prostředích jsou četná a souvisejí s jejich konstrukcí a funkcí. Aktivní systémy mohou mít mechanické a technické závady. V takovém případě může porucha vést ke zranění, protože mechanismus pohonu aktivních exoskeletů může vyvíjet na tělo pracovníka přídatné síly. V současné době je obtížné klasifikovat síly, jimiž prostředky umístěné na těle na tělo samotné působí, a jejich souvislost s úrazy. Jako obecné kritérium lze vzít v úvahu prahové biomechanické hodnoty u kolaborativních robotů (ISO/TS 15066:2016) (Schick, 2018). Je třeba počítat s tím, že exoskelety mohou zvýšit riziko poranění při uklouznutí, zakopnutí nebo při pádu. Jejich vliv v tomto směru, např. v situaci, kdy jsou používány exoskelety pro horní část těla při chůzi po rovině, je však v současnosti hodnocen jako nízký (Kim a kol., 2018). V závislosti na konstrukci a hmotnosti exoskeletu však může být omezena přirozená volnost pohybu pracovníků. Kvůli tomu je obtížné obnovit rovnováhu prostřednictvím vyrovnávacích pohybů v případě pádu. Důsledky mohou být závažnější než v případě, že pracovník exoskelet nemá. Dále je třeba zvážit možné kolize mezi exoskeletem a pracovním zařízením, roboty či stavebními stroji. V této souvislosti byly provedeny počítačové simulace za účelem přezkoumání praktického použití exoskeletů v prostředí virtuálních továren (Constantinescu a kol., 2016). Závěrem lze konstatovat, že pokud jde o změnu uspořádání pracovišť se začleněnými exoskelety, bylo poukázáno na několik omezení. V případě naléhavé situace musí být budovy rychle evakuovány, aby se zajistila bezpečnost a ochrana zdraví všech zaměstnanců. Je proto nezbytné rychlé sejmутí exoskeletu. Ti, kdo exoskelety navrhují, by také měli vzít v úvahu situace, kdy mohou být pracovníci sami.

Stručně řečeno, bezpečnostní a zdravotní rizika spojená s exoskelety lze odhadnout v rámci určitých scénářů, nelze je však vymežit přesně. Jedním z důvodů jsou omezené vědecké důkazy (Schick, 2018) a nedostatek praktických zkušeností. Zejména dlouhodobé účinky exoskeletů na muskuloskeletální systém nejsou známy. V důsledku toho stále existuje potřeba provedení komplexních studií, které by zhodnotily osobní, fyziologické, zdravotní a biomechanické aspekty exoskeletů.

Hodnocení exoskeletů

O výhodách a nevýhodách exoskeletů se v současné době vedou v odborné literatuře spory. Obecně představují slibnou příležitost pro výzkumné skupiny ke zlepšení ergonomických pracovních podmínek a snížení počtu muskuloskeletálních poruch souvisejících s prací, které jsou často spojeny s ruční manipulací s materiálem (Hensel a kol., 2018). Fyzické nároky týkající se muskuloskeletálního systému však nejsou jedinými aspekty, které je třeba vzít v úvahu. Exoskelety mohou ovlivnit také sociální

prostředí nebo mohou mít dopad na jiné fyziologické parametry, jako je krevní tlak, spotřeba kyslíku a srdeční frekvence.

Fyziologické aspekty

Umístění vnější konstrukce, jako je exoskelet, na tělo pracovníka, může mít negativní fyziologické účinky. V odborné literatuře se již poukázalo na to, že přídavná hmotnost exoskeletu může zvyšovat kardiovaskulární nároky (Theurel a kol., 2018), přestože tyto účinky nejsou doposud dostatečně známy. Předchozí šetření odhalilo dopady hmotnosti na energetické nároky během pohybu: byla prokázána vyšší spotřeba kyslíku v závislosti na hmotnosti přenášeného břemene. Energetický výdej však závisí do značné míry na tom, zda se jedná o muže či ženu, na rychlosti chůze a tělesné hmotnosti (Holewijn a kol., 1992). Naopak Whitfield a kol. (2014) prokázali, že ergonomický prostředek ke zvedání nezvyšuje při opakovaných úkolech spotřebu kyslíku, ačkoli byla zahrnuta přídavná hmotnost prostředku pro zvedání. Tyto výsledky jsou navíc v souladu se zjištěními různých výzkumných skupin, které neukázaly žádné změny srdeční frekvence u jedinců, kteří měli na těle osobní prostředek ke zvedání (Godwin a kol., 2009; Lotz a kol., 2009). Jako závěr pro průmyslové použití Whitfield a kol. (2014) uvedli, že osobní prostředky pro zvedání by se neměly používat k rozšiřování rozsahu pracovních úkolů. Tyto odlišné závěry by mohly vyplývat z rozmanitosti exoskeletů, které byly již dříve zkoumány. Kromě mechanické konstrukce a funkce exoskeletu mají na metabolické nároky dopad také pracovní úkoly, např. s ohledem na dynamické nebo statické podmínky, a vzhledem k tomu je ještě obtížnější dospět k obecným závěrům. Za určitých podmínek však mohou exoskelety snižovat únavu svalů, a proto nabízejí značný potenciál, pokud jde o zdraví pracovníků, protože se předpokládá, že svalová únava zvyšuje riziko úrazu (Godwin a kol., 2009; Lotz a kol., 2009). Trvalá podpora může mít rovněž negativní dlouhodobé účinky na svalovou a kosterní soustavu. Může dojít k úbytku svalové hmoty, a následně k úbytku tělesné síly, nicméně tyto účinky silně souvisejí s rozsahem svalové podpory prostřednictvím exoskeletu.

Kromě toho může dojít k otlaku v oblastech, kde je exoskelet připevněn na tělo. To může časem vést k pocitům nepohodlí. Navíc může dojít k tomu, že vnější tlak na cévy způsobený pásky nebo pásy sníží průtok krve v dané části těla. Dále se mohou při použití exoskeletu u opakujících se úkolů v podmínkách práce nad hlavou projevit změny srdeční frekvence a krevního tlaku. V důsledku tření může dojít také k podráždění kůže nebo alergickým reakcím. Tyto faktory jsou nicméně spekulativní a je třeba je v každém případě brát v úvahu jen s určitou rezervou.

Přijetí uživateli a psychosociální účinky

Je třeba mít na zřeteli, že ačkoli na pracovníka mohou mít vliv fyzické účinky exoskeletů, v pracovním prostředí může hrát zásadní roli také přijetí uživatelem. Přijatelnost exoskeletu pro pracovníka je nezbytná, pokud se má exoskelet používat delší dobu. Dosud byly provedeny určité výzkumy zohledňující subjektivní hodnocení exoskeletů s cílem prozkoumat otázku přijetí této technologie (Gilotta a kol., 2018; Hensel a kol., 2018). Přestože mnoho uživatelů hodnotí exoskelety z pevných materiálů kladně, Hensel a kol. (2018) prokázali, že ochota k jejich přijetí může postupem času ochabovat, přičemž významně souvisí s aspekty nepohodlí a použitelnosti. Nepohodlí je jedním z nejproblematictějších aspektů a může zabránit širšímu využívání exoskeletů na pracovištích (Bosch a kol., 2016). Opět je třeba připomenout, že tato hodnocení do značné míry souvisejí s konkrétními úkoly a exoskelety, a nelze je tedy zobecňovat. Nicméně zjištění naznačují, že vývojáři by měli brát v úvahu funkci a hmotnost, jakož i ergonomickou konstrukci exoskeletů. Kromě toho mohou mít pracovníci při používání exoskeletu v rámci plnění svých každodenních úkolů pocit méněcennosti, protože fyzický aspekt jejich pracovní výkonnosti je mimo jiné vázaný na tuto pomůcku. Gilotta a kol. (2018) uvádějí sociální aspekty jako faktor, který by mohl přijatelnost exoskeletů snížit. Nošení exoskeletů může vést také k sociální stigmatizaci na pracovišti, protože může vznikat dojem, že pracovníci používající exoskelety jsou na jejich podpoře závislí.

Biomechanické aspekty

V současné době existují četné studie, ze kterých vyplývá, že exoskelety mohou snižovat fyzickou zátěž v lokálních oblastech těla, jako jsou ramenní klouby nebo dolní část páteře (Abdoli-E a kol., 2006; Graham a kol., 2009; Bosch a kol., 2016; De Looze a kol., 2016; Theurel a kol., 2018; Weston a kol.,

2018). Zároveň však může hrát určitou roli skutečnost, že přerozdělování fyzické zátěže vede k vyšší míře zátěže v jiných oblastech těla, pokud nejsou síly přeneseny na zem (Theurel a kol., 2018; Weston a kol., 2018). Weston a kol.(2018) v této souvislosti zjistili, že exoskelet pro horní část těla zvyšuje zátěž na bederní páteř. Theurel a kol. (2018) prokázali, že exoskelet pro horní část těla dokáže snížit svalovou aktivitu v ramenních kloubech. Bylo však zároveň poukázáno na fyzické důsledky, včetně vyšší úrovně svalové aktivity v jiných oblastech těla nebo odlišných pohybových vzorců. Kromě toho přídatná hmotnost exoskeletu ovlivňuje nejen kardiovaskulární nároky, ale také přesouvá centrum tělesné hmotnosti, což ovlivňuje svalovou aktivitu pracovníka, který má exoskelet na sobě. Je důležité podotknout, že účinky exoskeletů na lidské tělo nelze zobecňovat. Otázky biomechanického výzkumu často souvisejí se zcela konkrétními pohyby a svalovými aktivitami a neberou v potaz všechny možné případy používání exoskeletů a jejich druhy. Mohou však řešit funkční nedostatky v souvislosti s mechanickými účinky konkrétních exoskeletů a jejich dopady na tělesnou zátěž a tělesné vypětí.

Výzvy z hlediska bezpečnosti a ochrany zdraví při práci

Součástí zavádění nových technologií na pracovišti je vždy kritické posouzení BOZP pro zúčastněné strany. Obecně je základním předpokladem uspořádání zaměřené na člověka podle rámcové směrnice (89/391/EHS). V konkrétnější rovině to znamená, že na standardních pracovištích nejsou zapotřebí další opatření. Avšak vzhledem k současné pracovní situaci v Evropě a souvislosti nových technologií s muskuloskeletálními onemocněními nejsou ergonomické podmínky něčím samozřejmým. Pro zajištění dobrého pracovního prostředí je třeba zvážit technická, organizační a individuální opatření v souladu s rámcovou směrnicí (89/391/EHS). Z hlediska jejich dopadu na BOZP je hierarchické uplatňování povinné. Jakmile byla všechna technická opatření vyčerpána, například používání prostředků ke zvedání nebo změna uspořádání pracoviště, je nutno se zabývat organizačními aspekty, jako je reorganizace pracovních postupů. V neposlední řadě je třeba zvážit osobní opatření k ochraně pracovníků.

Jak již bylo uvedeno výše, exoskelety lze charakterizovat jako technické nebo zdravotnické prostředky a lze je rovněž definovat jako ochranné prostředky. Jejich klasifikace silně závisí na jejich použití, konstrukci a zamýšleném použití. Proto lze exoskelety v současné době posuzovat pouze formou individuálního přístupu. V praxi je možné si představit, že exoskelety budou používány jako technické prostředky pro usnadnění pracovních postupů. Pokud se však používají ke zlepšení uspořádání pracoviště, na kterém jsou nutná ergonomická opatření k ochraně pracovníků před poškozením z přetížení, je třeba je považovat za osobní ochranné prostředky.

V budoucnosti by hodnocení exoskeletů mělo být včleněno do tradičního ergonomického přístupu (uspořádání zaměřené na člověka), protože užívání exoskeletů má dopad na pracovní situace a organizační aspekty.

Pracovníci

Uživatelské požadavky z pohledu pracovníků závisejí na konkrétní klasifikaci příslušného exoskeletu. Jsou-li exoskelety certifikovány jako technické prostředky, jsou vázány na konkrétní pracoviště a nelze je používat v každé potenciální pracovní situaci, pokud nebyly pro toto použití zamýšleny. Technické prostředky však nepředstavují osobní opatření a jejich používání je dobrovolné. Pokud je exoskelet certifikován jako osobní ochranný prostředek, je jeho používání povinné ze zákona. V tomto případě musí být zaměstnanec vybaven exoskeletem, dokud je vystaven zvýšené pracovní zátěži.

Zaměstnavatelé

Během realizace a průběhu provozní činnosti musí zaměstnavatelé vzít v úvahu různé aspekty. Ve srovnání s technickými prostředky jsou hygienické požadavky na osobní ochranné prostředky komplexnější. V tomto ohledu je použití exoskeletu povinné. Aby bylo možné tyto požadavky splnit, musí být minimálně každý pracovník zapojený na pracovišti do provozní činnosti, která vyžaduje exoskelet ve formě osobního ochranného prostředku, vybaven exoskeletem, což může vyvolat problémy se skladováním. Dále je třeba vzít v úvahu přizpůsobení organismu dlouhodobě působícím změnám fyzickým nárokům, muskuloskeletální poruchy, kardiovaskulární reakce a aspekty výkonnosti. Navíc musí být k dispozici dostatek čistících prostředků nebo čistících strojů, aby byly

splněny hygienické normy. Používání exoskeletů, které jsou definovány jako technické prostředky, je dobrovolné a nemusí jimi být vybaven každý zaměstnanec na pracovišti. Jsou-li však použity, měly by být považovány za prostředek (podporu), a nikoli využívány jako způsob, jak zvýšit výkonnost nebo efektivitu pracovníků.

Tvůrci politik

V budoucnu by tvůrci politik měli uvažovat o regulaci exoskeletů, pokud jde o technické aspekty a jejich využití, což usnadní certifikaci nových technologií. Výrobci to umožní jednoznačněji klasifikovat své výrobky a zaměstnavatelům používat exoskelety pro určený účel. Je však nutné konstatovat, že zamýšlené použití výrobku a odpovídající certifikace jsou vždy odpovědností výrobce.

Shrnutí

Tématu exoskeletů je v současné době věnována značná pozornost. Ovšem přesto, že mají evidentně slibný potenciál, jejich využívání je v celé řadě oborů zatím otevřenou otázkou. Teprve se ukáže, zda budou exoskelety v budoucnosti široce využívány k ochraně pracovníků před zraněními z přetížení nebo k racionalizaci pracovních postupů. V závislosti na technickém vývoji se mohou exoskelety stát standardním nástrojem pro ruční pracovní postupy, nebo zůstat okrajovým prostředkem pro velice specifické použití. Současný komerční zájem o exoskelety však může představovat problém pro jejich budoucí rozvoj, jelikož se může stát, že budou upřednostňovány přístupy zaměřené na výkonnost nebo ekonomické přístupy, což povede k opomíjení aspektů bezpečnosti při práci. Exoskelety lze nicméně používat jako technické prostředky, zdravotnické prostředky či osobní ochranné prostředky, a to v závislosti na jejich zamýšleném použití na pracovišti. Vzhledem k různorodosti funkcí, konstrukce a použití však neexistuje jejich jednotná definice, což komplikuje jejich zavádění do praxe v návaznosti na jejich certifikaci. Ačkoli byly na téma exoskeletů zpracovány četné studie, které zkoumají různé aspekty jejich použitelnosti a funkcí, nejsou v současné době v dostatečné míře objasněny účinky na zdraví zaměstnanců. Zejména dlouhodobé účinky exoskeletů na fyziologické, psychosociální a biomechanické parametry nejsou známy. Mají-li být v budoucnosti získány spolehlivější výsledky, budoucí studie by se měly zabývat dlouhodobými účinky exoskeletů na pracovišti se zaměřením na praxi. Je třeba konstatovat, že nelze doporučit využití exoskeletů ke zlepšení ergonomického uspořádání na stacionárních pracovištích, existuje však i velký počet nestacionárních nebo mobilních pracovišť, na kterých ergonomická opatření nejsou možná. V této souvislosti mohou exoskelety v budoucnosti nabídnout slibný přístup ke snižování muskuloskeletálních poruch souvisejících s prací.

Autoři: Peters, M. a Wischniewski, S. (2019). Spolkový ústav pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, Německo.

Řízení projektu: Annick Starren, Emmanuelle Brun – Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci (EU-OSHA), 2109.

Děkujeme dr. Larsi Adolphovi, profesorce dr. Ute Latza a skupině kontaktních míst Evropské agentury pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci za jejich kritická hodnocení a užitečné podněty. Dále bychom chtěli poděkovat nadaci EUROFOUND za možnost použití ilustrací uvedených v tomto příspěvku.

Tento článek zadala Evropská agentura pro bezpečnost a ochranu zdraví při práci (EU-OSHA). Jeho obsah, včetně všech vyjádřených názorů a/nebo závěrů, představuje výhradně stanovisko autorů a nemusí nutně odrážet stanoviska agentury EU-OSHA.

Odkazy

- 89/391/EHS. Směrnice Rady ze dne 12. června 1989 o zavádění opatření pro zlepšení bezpečnosti a ochrany zdraví zaměstnanců při práci. Rada Evropských společenství.
- 89/686/EHS. Směrnice Rady ze dne 21. prosince 1989 o sblížení právních předpisů členských států týkajících se osobních ochranných prostředků. Rada Evropských společenství.
- 93/42/EHS. Směrnice Rady 93/42/EHS ze dne 14. června 1993 o zdravotnických prostředcích. Rada Evropských společenství.
- 2006/42/ES. Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2006/42/ES ze dne 17. května 2006 o strojních zařízeních a o změně směrnice 95/16/ES (přepřacované znění). Evropský parlament a Rada Evropské unie.
- 2016/425. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2016/425 ze dne 9. března 2016 o osobních ochranných prostředcích a o zrušení směrnice Rady 89/686/EHS. Evropský parlament a Rada Evropské unie.
- Abdoli-E, M., Agnew, M. J. a Stevenson, J. M. (2006). An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks (Osobní prostředek k podpoře zvedání umístěný na těle (PLAD) snižuje amplitudu při elektromyografickém (EMG) vyšetření vzpřimovačů páteře během úkolů zvedání). *Clinical Biomechanics*, 21 (5), 456–465.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., van Bennekom, C. A. M. a Houdijk, H. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals (Účinek pasivního exoskeletu pro trup na funkční výkonnost u zdravých osob). *Applied Ergonomics*, 72, 94–106.
- Bevan, S. (2015). Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe (Ekonomický dopad muskuloskeletálních poruch na práci v Evropě). *Best Practice & Research in Clinical Rheumatology*, 29 (3), 356–373.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K. a de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work (Účinky pasivního exoskeletu na svalovou aktivitu, nepohodlí a výdrž při práci v předklonu). *Applied Ergonomics*, 54, 212–217.
- Collins, J. D. a 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 (Prevalence muskuloskeletálních poruch a expozice psychosociálními rizikům v členění podle věku a pohlaví v kohortě kancelářských zaměstnanců ve dvou akademických institucích). *International Journal of Industrial Ergonomics*, 46, 85–97.
- Constantinescu, C., Muresan, P.-C. a Simon, G.-M. (2016). JackEx: the new digital manufacturing resource for optimization of exoskeleton-based factory environments (JackEx: nový digitální nástroj pro výrobní subjekty k optimalizaci prostředí závodů využívajících exoskelety). *Procedia CIRP*, 50, 508–511.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S. a O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load (Exoskelety pro průmyslové použití a jejich potenciální účinky na zátěž při fyzické práci). *Ergonomics*, 59 (5), 671–681.
- INRS. (2018). Exosquelettes au travail: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs – état des connaissances. Paříž: Institut National de Recherche et de Sécurité. (INRS). Převzato z INRS: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206311>
- INRS. (2019). Acquisition et integration d'un exosquelette en entreprise: Guide pour les préventeurs. Paříž: Institut National de Recherche et de Sécurité. (INRS). Převzato z INRS: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206315>
- Eurofound. (2012). *Pátý průzkum pracovních podmínek v Evropě*. Lucemburk: Úřad pro publikace Evropské unie.
- Eurofound. (2019). *Průzkum pracovních podmínek v Evropě, 2015*. Brusel: Eurofound. Zdroj: nadace Eurofound: <https://www.eurofound.europa.eu/data/european-working-conditions-survey>.

- GAMS, A., Petrič, T., Debevec, T. a Babič, J. (2013). Effects of robotic knee exoskeleton on human energy expenditure (Účinky robotického exoskeletu pro podporu kolena na výdej lidské energie). *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60 (6), 1636–1644.
- Gilotta, S., Spada, S., Ghibaudo, L., Isoardi, M. a Mosso, C. (2018). *Acceptability beyond Usability: A Manufacturing Case Study (Přijatelnost nad rámeček použitelnosti: Případová studie týkající se výrobních aspektů)*. Příspěvek přednesený na kongresu Mezinárodní ergonomické asociace.
- Godwin, A. A., Stevenson, J. M., Agnew, M. J., Twiddy, A. L., Abdoli-Eramaki, M. a Lotz, C. A. (2009). Testing the efficacy of an ergonomic lifting aid at diminishing muscular fatigue in women over a prolonged period of lifting (Testování účinnosti ergonomických prostředků ke zvedání při snižování svalové únavy u žen během delší doby zvedání). *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39 (1), 121–126.
- Gopura, R. A. R. C. a Kiguchi, K. (2009). *Mechanical Designs of Active Upper-limb Exoskeleton Robots: State-of-the-art and Design Difficulties. (Mechanické konstrukce aktivních robotických exoskeletů pro horní končetiny: Současný stav vývoje a problémy s konstrukcí)*. Příspěvek přednesený na konferenci ICORR 2009: 11. mezinárodní konferenci Institutu pro elektrotechnické a elektronické inženýrství o rehabilitační robotice.
- Graham, R. B., Agnew, M. J. a 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 (Účinnost prostředků ke zvedání umístěných na těle při snižování fyzických nároků na bederní část zad během úkolu v rámci montážní práce na automobilu: posouzení elektromyografické (EMG) reakce a přijatelnosti pro uživatele). *Applied Ergonomics*, 40 (5), 936–942.
- Hensel, R., Keil, M., Mücke, B. a Weiler, S. (2018). Chancen und Risiken für den Betrieblichen Einsatz von Exoskeletten in der betrieblichen Praxis. *ASU Zeitschrift für medizinische Prävention*, 53, 654–661.
- Herr, H. (2009). Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions (Exoskelety a ortézy: klasifikace, konstrukční výzvy a budoucí směřování). *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 6 (21).
- Holewijn, M., Hens, R. a Wammes, L. (1992). Physiological strain due to load carrying in heavy footwear (Fyziologická zátěž v důsledku přenášení břemene v těžké obuvi). *European Journal of Applied Physiology Occupational Physiology*, 65 (2), 129–134.
- ISO 10218–1:2011. Roboty a robotická zařízení – bezpečnostní požadavky pro průmyslové roboty – část 1: roboty. Ženeva: Mezinárodní organizace pro normalizaci.
- ISO 13482:2014. Roboty a robotická zařízení – bezpečnostní požadavky pro roboty určené k osobní péči. Ženeva: Mezinárodní organizace pro normalizaci.
- ISO/TS 15066:2016. Roboty a robotická zařízení – kolaborativní roboty. Ženeva: Mezinárodní organizace pro normalizaci.
- Kim, S., Nussbaum, M. A., Mokhlespour Esfahani, M. I., Alemi, M. M., Jia, B. a 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 (Posouzení účinku pasivní exoskeletální vesty pro horní končetiny při úkolech vyžadujících zvednutí paže: část II - „neočekávané“ účinky na pohyb ramen, rovnováhu a zatížení páteře). *Applied Ergonomics*, 70, 323–330.
- Liedtke, M. a Glitsch, U. (2018). Exoskelette – Verordnung für persönliche Schutzausrüstung. *sicher ist sicher*, 3, 110–113.
- Lotz, C. A., Agnew, M. J., Godwin, A. A. a Stevenson, J. M. (2009). The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task (Účinek osobního kompenzačního prostředku ke zvedání umístěného na těle (PLAD) na únavu při opakovaném úkolu zvedání). *Journal of Electromyography Kinesiology*, 19 (2), 331–340.
- Schick, R. (2018). Einsatz von Exoskeletten in der Arbeitswelt. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 68 (5), 266–269.
- Theurel, J., Desbrosses, K., Roux, T. & Savescu, A. (2018). Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks (Fyziologické důsledky používání

- exoskeletu pro horní končetiny při úkolech ruční manipulace). *Applied Ergonomics*, 67, 211–217.
- Vítečková, S., Kutílek, P. a Jiřina, M. (2013). Wearable lower limb robotics: a review. (Nositelná robotika pro dolní končetiny: přehled). *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 33 (2), 96–105.
- Weston, E. B., Alizadeh, M., Knapik, G. G., Wang, X. a Marras, W. S. (2018). Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine (Biomechanické hodnocení využití exoskeletu při zatěžování bederní páteře). *Applied Ergonomics*, 68, 101–108.
- Whitfield, B. H., Costigan, P. A., Stevenson, J. M. a Smallman, C. L. (2014). Effect of an on-body ergonomic aid on oxygen consumption during a repetitive lifting task (Účinek ergonomického prostředku umístěného na těle na spotřebu kyslíku při opakovaném úkolu zvedání). *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44 (1), 39–44.
- Yang, C., Zhang, J., Chen, Y., Dong, Y. a Zhang, Y. (2008). A review of exoskeleton-type systems and their key technologies (Přehled systémů exoskeletálního typu a jejich klíčových technologií). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 (8), 1599–1612.
- Zurada, J. (2012). Classifying the risk of work related low back disorders due to manual material handling tasks (Klasifikace rizik potíží souvisejících s prací v bederní části zad v důsledku ruční manipulace s materiálem). *Expert Systems with Applications (Expertní systémy a jejich použití)*, 39 (12), 11125–11134.