

**STRUCTURAL AND STANDARDIZATION
EXAMINATION OF EXOSKELETONS EQU-
IPPED WITH SOFT ACTUATORS****SOFT-AKTUÁTORRAL ELLÁTOTT EXOS-
KELETONOK SZERKEZETI ÉS SZABVÁ-
NYOSÍTÁSI VIZSGÁLATA**MÉSZÁROS ATTILA¹ – KÓCZI Dávid² - SÁROSI József³**Abstract**

The wearable robots are going through a huge transformation from the initial rigid machines to the lightweight robot clothing, which we can hardly distinguish from our everyday clothes. In less than a decade, soft robot clothing has achieved outstanding results in coordinating and assisting human motor movements. This article provides an overview of the evolution and technological development of exoskeletons, as well as current development directions, and presents standards and international initiatives related to exoskeletons that are designed to promote the widespread and safe dissemination of the technology.

Keywords

Exoskeleton, Exomuscles, Exosuits, AMST, FEA, Standard

Absztrakt

A hordható robotok hatalmas átalakuláson mennek keresztül a kezdeti merev gépektől egészen a könnyű robotruházatig, amit aligha tudunk megkülönböztetni a mindennapi ruháinktól. Kevesebb, mint egy évtized alatt a puha robotruhák kiemelkedő eredményeket értek el az emberi motoros mozgások koordinálásában és segítésében. Ez a cikk áttekintést nyújt az exoskeletonok kialakulásának és technológiai fejlődésének menetéről és a jelenlegi fejlesztési irányokról, illetve bemutatásra kerülnek az exoskeletonokhoz kapcsolódó szabványok és nemzetközi kezdeményezések, melyek a technológia széleskörű és biztonságos elterjedését hivatottak szolgálni.

Kulcsszavak

Exoskeleton, Exomuscles, Exosuits, AMST, FEA, Szabvány

¹ m-attila@mk.u-szeged.hu | ORCID: 0000-0002-3084-0321 | Assistant lecturer, University of Szeged Faculty of Engineering, Department of Mechatronics and Automation | Tanársegéd, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Mechatronikai és Automatizálási Intézet

² koczi@mk.u-szeged.hu | ORCID: 0000-0002-5090-3270 | Assistant lecturer, University of Szeged Faculty of Engineering, Department of Mechatronics and Automation | Tanársegéd, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Mechatronikai és Automatizálási Intézet

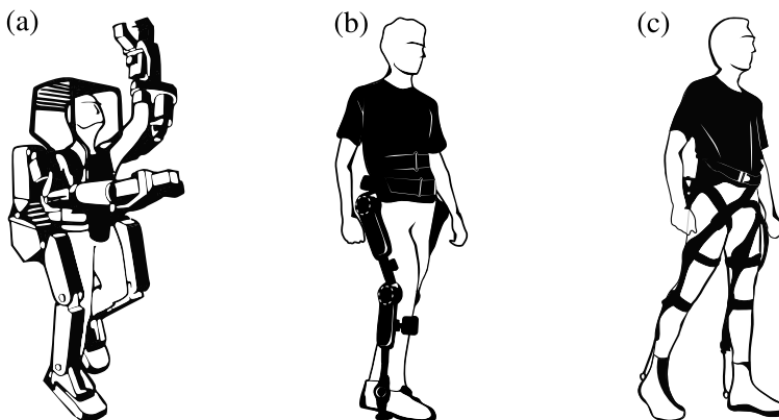
³ sarosi@mk.u-szeged.hu | ORCID: 0000-0002-6303-5011 | Full professor, University of Szeged Faculty of Engineering, Department of Mechatronics and Automation | Egyetemi tanár, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Mechatronikai és Automatizálási Intézet

BEVEZETÉS

Régóta ismeretes, hogy a munka és a munkakörnyezet összefügg a munkavállalók rossz egészségi állapotával. A váz- és izomrendszeri betegségek (MSD-k), amelyek az izmokat és az ízületeket érintik, a munkahelyi betegszabadságok és korengedményes nyugdíjba vonulások fő oka, ugyanis a dolgozók nem képesek a szokásos napi munkafeladatok ellátására [1]. A rendellenességek száma évről évre növekszik, és világszerte minden munkavállalót érintenek. Következésképpen ezek a folyamatok az érintett személyeknek, munkaadóiknak és a gazdaságnak jelentős anyagi terhet jelentenek [2]. A rendellenességek kialakulásához kapcsolódó kockázati tényezők közé tartozik a kézi tehermozgatás, különösen a nehezebb rakományok esetén, illetve a kézi mozgatás időtartama, az ismétlődő mozgások és az extrém vagy kényelmetlen testhelyzetek, mint pl. hajlítás, nyújtás vagy csavarás [3].

Az automatizálására kifejlesztett gépek ihlették annak az ötletét, hogy olyan gépeket alkossanak, melyek képesek levenni bizonyos mértékben az emberi testet érő erőhatások egy részét. A viselhető robotok első koncepciói osztoztak egy nem meglepő közös tulajdonságon: az eszköz váz szerkezete, tükrözte a pilóta csontvázát, merev anyagból készültek, illetve mechanikus csuklópontokkal voltak ellátva a mozgás biztosítása érdekében. A General Electric 1967-ben megvalósította ezt a koncepciót Ralph Mosher vezetésével és megépítette a Hardimant [4]. A Hardimant (1. ábra a) kialakításában sajnos korlátozta korának technológiája, a robotot soha nem tesztelték emberi pilótával. Ennek ellenére a projektnek megvolt az érdeme, ugyanis felkeltette az érdeklődést a robotok iránt, amelyek fokozhatják vagy segíthetik az emberi teljesítményt az emberi résztvevő anatómiájához illeszkedő szerkezet segítségével. Ez volt az exoskeletonok születése.

Közel ötven évvel később az exoskeletonok rohamosan fejlődtek az új technológiai, elektronikai, vezérlési, gyártási és energiatároló megoldásoknak köszönhetően [5]. Az exoskeletonok sikeresen növelték az emberi erőt a mozgás során [6], csökkentették a járás terhelését [7], képesek voltak helyreállítani a paraplégias betegek mozgási képességeit [8] (a hozzá használt exoskeleton az 1.b) ábrán látható) segítette a stroke betegek rehabilitációját [9], képes volt az emberi mozgásokból energiát nyerni [10], és segítettek az emberi motoros mozgások alapelveinek tanulmányozásában [11].



1. Ábra: Különböző exoskeleton kialakítások. a) Hardimant, az első exoskeleton koncepció, b) alsó végtag exoskeleton (Cybernyde), c) Harvard exosuit [17]

A hordható technológia fejlődéséről szóló közelmúltbeli betekintésben J. L. Pons elegánsan rámutatott, hogy a hordható robotok esetén a kevésbé korlátozó és inkább biometrikus architektúrák felé való elmozdulás lenne célszerű, előnyben részesítve azokat az anyagokat, amelyek jobban megfelelnek az emberi test anatómiai összetettségéhez [12]. Pons elképzelését az elmúlt évtizedben kifejlesztett viselhető robotok jellemzői igazolják. Kihhasználva a lágy anyagok előnyös tulajdonságait, illetve a megfelelő szabályozási és a nemlineáris modellezési technikákat [13], egyre több tudományos és ipari kutatócsoport textilekből és elasztomerekből tervez hordozható robotokat. Ez lehetővé teszi az eszközök könnyebb hordozhatóságát és a mozgás elősegítését az emberi biomechanika korlátozása nélkül. Ezekre az új eszközökre különböző kifejezésekkel hivatkoztak, mint: „exomuscles” [14], „soft exoskeletons” [15] és „exosuits” [16] (1. ábra c).

FELSŐ VÉGTAGRA ILLESZTHETŐ EXOSKELETONOK TÍPUSAI

Az első soft-jellegű exoskeletonok a 2000-es évek elején készültek az úgynevezett McKibben féle mesterséges műizmok (PAM) segítségével. 2004 elején Kobayashi et al. Elkészítették az úgynevezett „muscle suit”-ot [18] (2. ábra), amely McKibben féle félmrev PAM-ok, hálózatából állt. A nyomás szabályozásával Kobayashi bizonyította, hogy a koncepciójával megvalósítható a váll ellenőrzött mozgatása. Ez a típusú exoskeleton a McKibben féle mesterséges műizmok miatt jelentősen korlátozza az emberi mozgást, szinte csak az előre tervezett mozdulatsorok hatjthatóak végre.



2. Ábra: McKibben féle PAM-ok hálózatából álló exoskeleton [18]

2014-ben Koo és munkatársai egy softrobotruhát mutattak be, melyet úgy terveztek, hogy segítse az étel szájba juttatásának mozdulatsorait [19]. Az eszköz (3. ábra), kifejezetten olyan embereket céloz meg akik poliomyositis okozta izomgyengeségben szenvednek. Az eszköz egy elektromos motorral hajtott ín egység és egy felfújó kamra ötvözet. A készülék később passzív mechanizmussal lett kiegészítve, amely párhuzamosan működik a motorral, a rendszer energiafogyasztásának csökkentése érdekében. Későbbi kutatások kimutatták, hogy egészséges résztvevők esetén a passzív komponens önmagában elegendő az izomfáradtság kialakulásának késleltetéséhez [20].



3. Ábra: Étel szájba juttatásának mozgatsorait segítő hibrid exoskeleton [19]

Az újabb kutatások a pneumatikus kontraktilis hálózat ötletével foglalkoznak, melyek az emberi izmokkal párhuzamosan működő elemeket valósítanak meg. [21]. Ezeket miniatűr McKibben aktuátorok hálózatával érik el, melyek párhuzamos elrendezése nagyobb erők elérése szolgál, sorba kapcsolva pedig hosszabb löketet tudnak megvalósítani (4. ábra). Ezzel a megoldással, már jóval nagyobb szabadságfokot lehet biztosítani a mozgatni kívánt végtagnak, így bonyolultabb mozgatsorok is korlátozottan kivitelezhetővé válnak.



4. Ábra: Miniatűr McKibben aktuátorok hálózatával megvalósított exoskeleton [21]

Park és munkatársai egy másik megközelítést alkalmaztak [22]. A szerzők egy puha robotruhát írnak le amely a könyök ízület hajlítását teszi lehetővé memóriaötvözet alapú izom segítségével. Az izom nikkeltitán (NiTi) huzalból készült tekercsrugókból áll, amelyek párhuzamosan vannak elrendezve a maximális 120 N erő létrehozásához és mindössze 24 g tömeggel rendelkeznek.

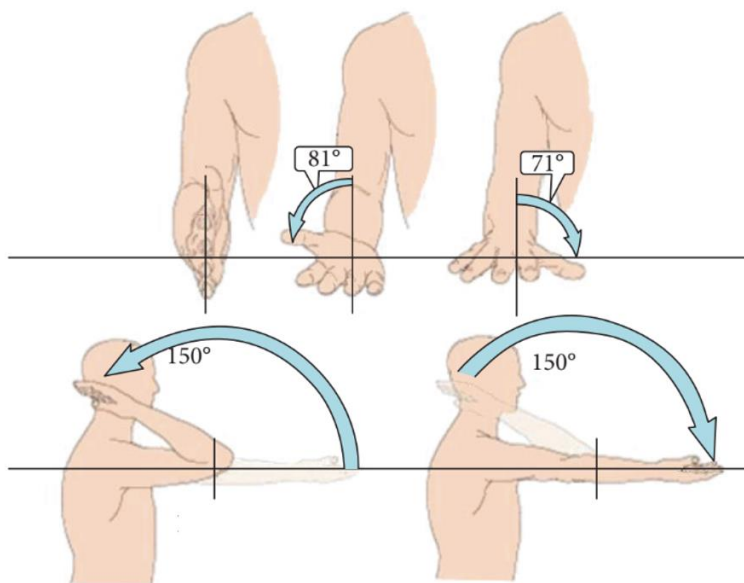
A hajlítónyomatékot pneumatikus működtetésű kamrák hálózatával is létrehozhatjuk. Ezeket az eszközöket nevezzük Fluid Elastomer Actuator-nak (FEA). Thalmann és társai lágy hengeres működtetőket használnak, amelyek egy tömbben vannak elrendezve [23]. A rugalmas felső rész és a rugalmatlan alaprak köszönhetően létrejön egy kiszámítható mértékű hajlítás és egy lineáris nyomaték-nyomás karakterisztika. Felfújott állapotban az egyes működtetők kölcsönhatásba lépnek egymással, így hajlító mozgást hozva létre a könyökízület körül (5. ábra).



5. Ábra: FEA alapú könyök mozgására alkalmas exoskeleton [23]

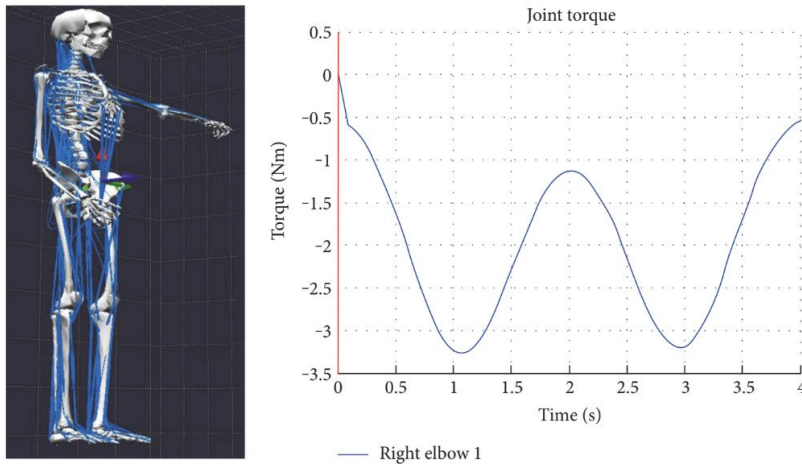
FELSŐ VÉGTAGRA ILLESZTHETŐ EXOSKELETON TERVEZÉSI IRÁNYELVEI

Copaci et al. mérései alapján a könyök rehabilitációs eszközöket úgy kell megtervezni, hogy illeszkedjenek a kéz elmozdulásnak tartományába (6. ábra), ami a könyököt tekintve 0° és 150° közé tehető nyújtott végtag esetén, a tenyér befelé fordítás esetén 71° -ot képes csavarodni, kifelé mozgás esetén pedig 81° -ot [24].



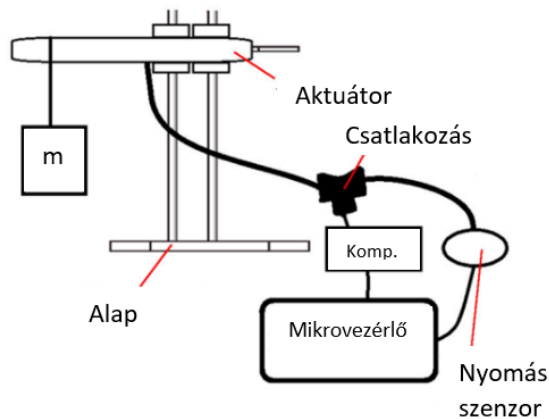
6. Ábra: Kar mozgási tartománya [24]

Ezen mozgástartományokat figyelembe véve szimulációs paraméterként súly 80kg, magasság 1,8m, könyök 0° és 150° közötti elmozdulást végezve 0,25 Hz frekvenciával, a könyök mozgástartományának nyomaték szükséglete idő függvényében 0 és 3,5 Nm közé tehető annak biztosítása érdekében, hogy a motoros funkciók teljes hiányában a könyök megfelelően mozgatható legyen [24] (7. ábra).



7. Ábra: Könyök mozgás nyomaték szükséglete [24]

A felsővégtagra illeszthető rehabilitációs eszközök közül a könyök rehabilitációra használt exoskeletonok, melyet Kohn at al. is bemutat értekezésében, alapvetően áll egy aktuátorból egy nyomás érzékelőből, egy mikrovezérlőből és egy kompresszorból. Az aktuátor rögzítési pontokat úgy kell kialakítani, hogy a felső bicepsztól az alkar közepéig terjedjen a két pneumatikus aktuátor rögzítése [25] (8. ábra).



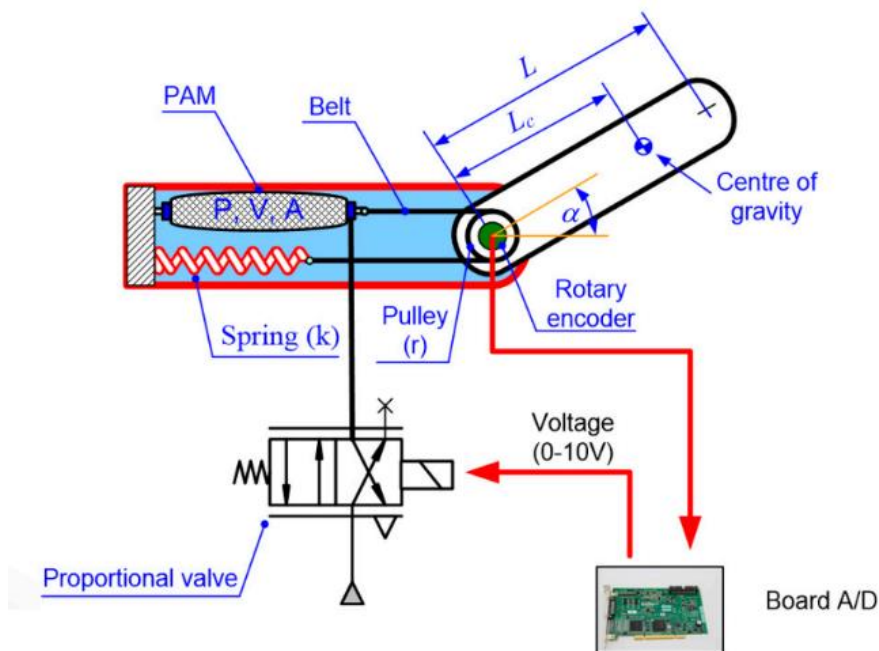
8. Ábra: FEA alapú könyök mozgására alkalmas exoskeleton elvi mérési elrendezése [25]

Működtetését tekintve elmondható, hogy az aktuátor kamráiban a nyomásszabályozás mikrokontroller segítségével PID szabályozással valósul meg, az alábbi egyszerű összefüggés alapján:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

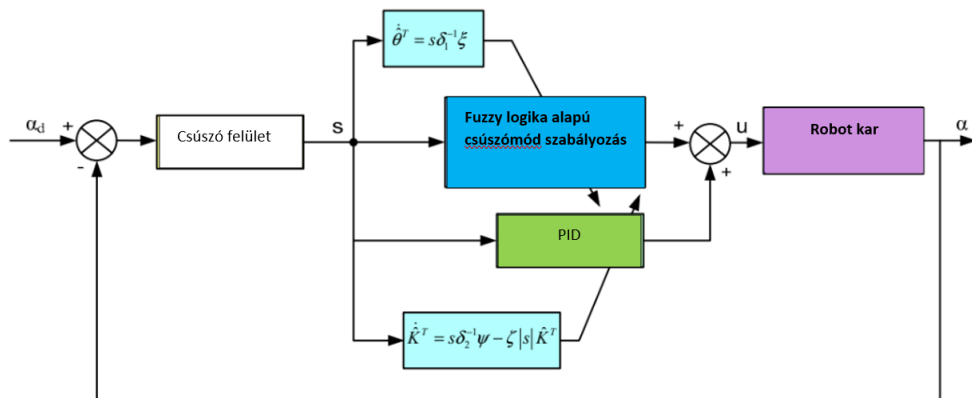
A függvény bemenete $u(t)$ a beállított nyomásérték a visszacsatolás pedig a nyomá szenzor által biztosított jel valamint opcionálisan EMG szenzor is lehet, $e(t)$ a hiba értéke, K_p , K_i , K_d pedig az arányos, integráló és deriváló tagok erősítése, t pedig az idő [25].

Nguyen at al. által bemutatott könyökrehabilitációs eszközben, a PAM szabályozás megoldására a csúszómód szabályozás egy változatát alkalmazza, ami szintén alkalmas lehet a precíz működtetésre [26] (9. ábra).



9. Ábra: PAM alapú könyök mozgására alkalmas exoskeleton elvi elrendezése [26]

Szabályozási köre alapvetően úgy épül fel, hogy a Fuzzy szabályozást és a PID szabályozás kombinációját alkalmazza előbbit bemenetként szolgáltatva a csúszómód szabályozásnak majd a PID szabályozást kompenzátorként alkalmazza a csúszómód szabályozás kimenetén [26] (10. ábra).



10. Ábra: Rehabilitációs eszköz szabályozási blokkdiagramja [25]

FELSŐ VÉGTAGRA ILLESZTHETŐ EXOSKELETONOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A végtagok elmozdítását külső egységek segítségével különböző módszerekkel valósíthatjuk meg. Az exoskeleton kialakítások 3 főbb trendet követnek:

- A legelterjedtebb változat a szilárd komponensekből és motorokból álló elektro-mechanikus variánsok.
- Ezt követi a PAM (Pneumatic Artificial Muscle) aktuátorokkal szerelt megoldások.
- Végül a FEA (Fluidic Elastomer Actuator) egységekkel ellátott eszközök

Az exoskeleton variánsok közötti fő különbséget az azokat működtető aktuátorok kialakítása adja. Ez alapján különbözteti meg az eszközöket, ugyanis mindegyik más-más megoldást használ az ízületek rotációs mozgásának előidézésére. Azonban mindegyik megoldásban közös pont az, hogy az aktuátorokat a mozgatni kívánt testrészhez kell rögzíteni oly módon, hogy az a mozgást ne korlátozza vagy befolyásolja. A különböző kialakításoknak természetesen megvannak a maga előnyei és hátrányai, melyeket a felhasználás módjánál figyelembe kell venni. A következő táblázat (1. táblázat) ezeket az exoskeleton megoldásokat hasonítja össze különböző elvek és szempontrendszer alapján.

	<i>Elektro-mechanikus</i>	<i>PAM</i>	<i>FEA</i>
<i>Az eszköz mozgási tartománya a végtagra vonatkoztatva.</i>	A végtagok teljes tartományban mozgathatók, azonban a szilárd részegységek miatt bizonyos mellékmozdulatok, rotációk korlátozva vannak működés közben.	A végtagok mozgása korlátozott mértékű, mellékmozdulatok, rotációk kevésbé korlátozottak.	A végtagok teljes tartományban mozgathatóak, a mellékmozgások és rotációk kevésbé korlátozottak.
<i>Erőkifejtés a mozgástartományban.</i>	Állandó.	Állandó.	Változó.

	<i>Elektro-mechanikus</i>	<i>PAM</i>	<i>FEA</i>
<i>Kialakításból, illetve túlvezérlésből adódó sérülésveszély.</i>	A szilárd részegységek miatt, illetve az elektromos motorok maximális nyomatéka miatt a sérülésveszély közepes.	A magas működési nyomás miatt magas.	A nagy rugalmasságú részegységek miatt és a kis működtető nyomás miatt alacsony.
<i>Exoskeletonként való viselhetőség.</i>	A szilárd részegységek és a mozgó motorok speciális elhelyezése miatt nehézkes.	A nagy helyigényű kialakítás miatt, illetve az átalakító részegységek miatt nehézkes.	Aktuátorok méretei és testhez való alkalmazkodási képességei miatt kevésbé megterhelő.
<i>Adaptálhatóság, variálhatóság.</i>	A rotációs pontokon elhelyezett motoroknak köszönhetően a rögzítési pontok nagy szabadsággal állíthatóak.	Kialakításuk miatt korlátozottan állíthatóak.	Kialakításuk miatt korlátozottan állíthatóak.
<i>Energiaellátás hordható eszközök esetén.</i>	Az akkumulátorteknológia adta lehetőségek miatt hosszabb távon is működtethető az eszköz kis helyigényű energiaforrás segítségével.	A működéshez szükséges nagyobb nyomás miatt a működtetés hordható eszközök esetén erősen korlátozott.	A működéshez szükséges kis nyomások miatt, kis helyigényű energiaforrás segítségével mérsékeltén korlátozott.
<i>Eszköz bekerülési költsége.</i>	A mozgó motorok és az azokat vezérlő egységek miatt magas bekerülési költség.	Az egyszerű aktuátor kialakítás, és a mozgásátalakító részegységek miatt közepes a bekerülési költség.	Az egyszerű aktuátor kialakítás, illetve az előállításához szükséges anyagok miatt alacsony bekerülési költség.
<i>Az eszközök tömeg/teljesítmény aránya.</i>	A motorok által kifejtett nyomatéka nagy, míg a szilárd mozgó mechanizmusok tömege magas.	Az aktuátorok nagy erők kifejtésére képesek, az átalakító mechanizmusok tömege nagy.	Az aktuátorok közepes erőki-fejtésre képesek, a rögzítő részegységek tömege alacsony.

1. Táblázat: Különböző kialakítású exoskeletonok összehasonlítása

A fenti ábra jól szemlélteti, hogy a FEA típusú aktuátorok sok esetben előnyösebb tulajdonságokkal bírnak, mint az elektro-mechanikus vagy a PAM kialakítású társaik. Ezen típusú aktuátoroknak nagy előnye, hogy a rugalmas anyaghasználat miatt a viselőnek igen

nagy mozgásszabadságot biztosít akár működtetett, akár alap állapotban. Az aktuátorok testhez idomuló kialakítása miatt, illetve a különböző mechanikai átalakítók nélkül a hordozó számára kevésbé megterhelő ezeknek az aktuátoroknak a viselése akár hosszabb távon is. Szemléletes az a tulajdonságuk is, hogy az esetleges meghibásodásból vagy túlvezérlésből adódó sérülések előfordulása ennél a típusnál alacsony. Ugyanis a rugalmas aktuátorok képesek a hirtelen fellépő, váratlan erőhatásokat saját deformációjukra fordítani, így kímélve a mozgatni kívánt izületet. A felhasznált anyagok tekintetében is jelentős előnnyel bírnak a FEA soft-exoskeletonok. Előállításukhoz nincs szükség drága nyersanyagokra, illetve bonyolult megmunkálási folyamatokra, melyek által a költségek jelentősen csökkennek. Ezek a tulajdonságok mind azt vetítik elő, hogy az exoskeletonok körében egyre jobban elterjedő soft megoldások lehetnek a technológia jövőjének kulcsa. Ezen a területen a kutatások jelenleg is a softaktuátorok erősebbé, ellenállóbbá és kompaktabbá tételére fókuszálnak annak érdekében, hogy a jelenlegi szilárd mechanikai megoldásokat felváltsák.

EXOSKELETONOKRA VONATKOZÓ ISO SZABVÁNYOK

A Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (ISO) 13482:2014 foglalkozik a személyes gondoskodást nyújtó robotok biztonsági követelményeivel, amelyek közül néhányat exoskeletonnak tekintenek. Az ISO 13482 szabványok az exoskeletonok egy részhalmozára alkalmazhatók, de az exoskeleton fogalom nagy része kívül esik ennek hatókörén. Azonban az ISO 13482 nem alkalmazható robotokra, mint orvosi eszközökre, sem katonai erő alkalmazására szolgáló robotokra, ami egy hatalmas hiányosság. További emberi tevékenységgel együtt működő robotok követelményeit az ISO 10218, valamint az ISO/TS15066 rögzíti ipari vonatkozásban [26,27,28,29,30] (2. táblázat).

Szabvány	Alkalmazása
ISO 13482:2014 Robotok és robotszerkezetek. Személysegítő robotok biztonsági követelményei (ISO 13482:2014)	Specifikus elvárások és útmutatók a biztonságos tervezéséhez, biztonsági mérésekhez, és információk a személysegítő robotokhoz. Ez az egyetlen szabvány, amely tartalmaz exoskeletonokra vonatkozó részeket.
ISO 10218-1:2011 Robotok és robotszerkezetek. Ipari robotok biztonsági követelményei. 1. rész: Robotok	Specifikus elvárások és útmutatók a biztonságos tervezéshez, biztonsági mérésekhez, és információk az ipari robotokhoz.
ISO 10218-2:2011 Robotok és robotszerkezetek. Ipari robotok biztonsági követelményei. 2. rész: Robotrendszerek és összehangolásuk	Specifikus elvárások és útmutatók a biztonságos tervezéshez, biztonsági mérésekhez, és információk a ipari robotok és robotrendszerek integrátori számára.
ISO/TS15066 Robotok és robot szerkezetek. Kollaboratív robotok	Specifikus elvárások és útmutatók a biztonságos tervezéshez, biztonsági mérésekhez, és információk a kollaboratív robotokhoz.

2. Táblázat: Exoskeletonokra és egyéb robotrendszerre vonatkozó ISO szabványok [26]

Az ISO 13482:2014 azonban kiterjed a munkahelyen használható, hordható fizikai asszisztens robotokra. Ezek a technológiák lehetővé tehetik a munkaképesség növelését és csökkenthetik a biomechanikai terhelést és a dolgozók fáradtságát, illetve csökkenti túlerőltetés kockázatát. Az ISO 13482 elismeri, hogy bár a fizikai asszisztens robotok bizonyos emberi képességeket növelhetnek, használatuk potenciális új veszélyeket rejt magában. E veszélyek egy része a roboteszköz rögzítéséből és a felhasználóval való közvetlen érintkezéséből fakad. Az ISO szabvány hangsúlyozza a kockázatértékelés és a veszély azonosítás elemzésének szükségességét e technológiák biztonságos tervezése és üzemeltetése érdekében. Az ISO Technikai Bizottság (TC) 299 munkacsoportjai két vizsgálati módszert fejlesztenek ki [27]:

- egy bőrterhelési vizsgálati módszert exoskeletonokra, amely egy szimulációs eszköz segítségével vizsgálja a felhasználó bőrének lehetséges maximális terhelését,
- egy vizsgálati módszert a látható törésekre, deformációkra, az alkatrészek szétválására és a robot funkcionális károsodására, beleértve azokat is, amelyeket egy személy visel

Az ISO 13482:2014 a Személysegítő robotok esetén a vizsgálati módszert alkalmazva a következő releváns kockázati kategóriákat kell mérlegelni (3. táblázat), exoskeleton tervezése esetén is:

Kockázati kategória	Leírás
Akkumulátor töltés	Túltöltés, mélymerülés, szigetelési problémák, rövidzárlat
Energiatárolás és energiaellátás	Szigetelési probléma, Laza mechanikus kapcsolat, Csatlakozási problémák: Pneumatika, Hidraulika, Szélsőséges hőmérséklet, Túlterhelés
Robot/Eszköz indítása	Nem várt működés, Nem várt újra indulás
Robot/Eszköz kialakítása	Éles szélek, Furatok és terek a mozgó részek között, Geometriai kialakítás
Zaj	Akusztikus zaj, Ultrahang,
Megbízhatóság	Pl.: Ütközés következtében nem várt működés
Vibráció	Káros rezgések, érintkezési problémák
Káros anyagok vagy folyadék	Káros anyagokkal/folyadékokkal való érintkezés
Káros környezeti kondíciók	Por, Pára, Robbanásveszély, Tűz, Víz, Jég...
Extrém hőmérséklet	Felforrósodó felület, Hideg felület, Kijelző rossz láthatósága
Nem ionizált és ionizált sugárzás	Káros optikai sugárzás, Káros lézer sugárzás

Kockázati kategória	Leírás
EMC	Sugárzott és vezetett zavartűrés és zajki-bocsátás
Feszültség, pozíció és használat	Használat közben feszítő pozíció, fizikai diszkomfort, test méretre nem illesz-kedő, kezelőszervek nem láthatók nem használhatóak
Robot/Eszköz mozgása	Mechanikai instabilitás, Mozgás közbeni instabilitás, Terhelés közbeni instabili-tás, Elválik a testtől ütközés hatására...
Robot/Eszköz Ütközése	Ütközés hatására biztonsági megállás, Ütközés mozgó tárgyakkal, állatokkal, robotokkal
Veszélyes ember-robot fizikai kontak-tus	Rosszul érzékelt biztonsági megállítást, Túlzott biztonsági megállítást reakció
Alul méretezés / tartósság	Váratlan tönkremenetel
Váratlan automata működés	Program hiba
Pozicionálási, navigációs kockázatok	Gyenge visszacsatolás, felhasználó kor-látozott irányíthatósága.

3. Táblázat: Az ISO 13482:2014 által figyelembe vehető kockázatok [27]

ASTM F48 BIZOTTSÁG

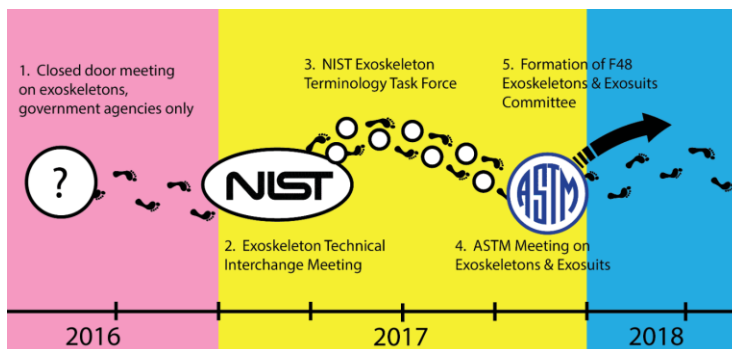
A termékszabványok és tanúsítványok hiánya az exoskeleton technológiák ipari gyakorlatban való alkalmazásának hatalmas akadálya. Bár az exoskeletonokat nem tekintik hagyományosan vett védőeszközöknek, azonban hasonlóan viselhetők, és az ipari/munkahelyi alkalmazásuk iránti érdeklődés nagy részét a sérülések megelőzése generálja. Az ASTM International Techni-cal Committee on Exoskeletons and Exosuits (ASTM F48) úgy véli, hogy az exoskeletonokra vonatkozó szabványok és tanúsítványok nagyban hozzájárulna a gyártásuk, telepítésük és felhasználásuk megkönnyítéséhez, illetve azok munkahelyi alkalmazásához.

2016 augusztusában a NIST (National Institute of Standards and Technology) előzetes találkozót rendezett, hogy megvitassák a jelenlegi helyzetet az exoskeletonok és a viselhető robotika területén belüli szabványokra vonatkozóan, valamint, hogy beazonosítsák azokat a hiányosságokat, amelyek a biztonság, a teljesítmény, az ergonómia és a kiberbiztonság tekintetében. Ezt követően 2017 januárjában nyílt nyilvános technikai találkozót tartottak, amely széles körben magában foglalta a katonai, egészségügyi és ipari területek érdekelt feleit. A találkozón a következő témák kerültek napirendre:

- Hiányosságok azonosítása az exoskeletonokra vonatkozó szabványok tekintetében, beleértve a terminológiát, a vizsgálati módszereket és a teljesítménymutatókat a ipari, katonai és egészségügyi ágazatokban
- elősegíteni az összes érdekelt fél bevonását ezekben a fejlesztésekbe és szabványalkotási procedúrákba

- elősegíteni a technológiai fejlődést a kulcsfontosságú érdekelt felek közötti kapcsolatépítés révén

A folyamat időrendbeli lefolyását a 11. ábra mutatja.



11. ábra: Az ASTM F48 létrejöttének folyamata [31]

2017 szeptemberében mintegy 40 terület képviselői beleértve a katonai, szövetségi ügynökségeket, exoskeleton gyártókat, alkatrészgyártókat, tudományos körök tagjait, illetve a felhasználói csoportokat, az ASTM összehívott egy új exoskeleton szabvány megszerzésére irányuló bizottságot, ami a ASTM F48 nevet kapta. Az F48 ma már széles körben foglalkozik az aktív, passzív exoskeletonokkal, és általános felhasználási eseteiket a következők szerint osztályozza [32]:

- Orvosi: Az amputált, sérült és/vagy fizikailag fogyatékkal élő, exoskeletonot viselő betegeknek fokozott mobilitást és stabilitást biztosít az eszköz. Ez felgyorsíthatja a munkába való visszatérést és a felépülést, ami a betegek, az egészségügyi szolgáltatók és a biztosítótársaságok javát szolgálja.
- Ipari: A logisztikában, raktárban és gyári környezetben dolgozó alkalmazottak használhatják az exoskeletonokat fej feletti, teherhordási, szerszámhasználati, mobilitási és guggolásos tevékenységekhez, lehetővé téve számukra, hogy hosszabb ideig nagyobb teljesítményt érjenek el, és kevésbé terheljék a testüket, ezáltal csökkentse a sérülésveszélyt is.
- Katonai: A katonák számára az exoskeletonok lehetővé teszik, hogy kevésbé fáradtan vonuljanak messzebbre, könnyebben és biztonságosabban mozogassák a logisztikai terheket és több készletet vagy fegyvert vihessenek magukkal, amelyek egyébként túl nehéznek vagy megterhelőnek bizonyulnának.
- Közbiztonság: Az elsősegélynyújtók számára előnyösek lehetnek az exoskeletonok, amelyek lehetővé teszik számukra, hogy nagyobb tárgyakat mozgassanak, amikor áldozatokat keresnek az összeomlott építmények között, és több felszerelést szállíthatnak, például extra légpalackokat a tűzoltóknak és nehéz bombaruhákat a robbanóanyagártalmatlanító technikusok számára.
- Fogyasztói/rekreációs: A fogyasztók számára előnyösek lehetnek az exoskeletonok személyes használatra, szabadidős sportokhoz (pl. síelés), otthoni és udvari munkához és más fizikailag megterhelő feladatokhoz.

Valamennyi albizottság olyan nemzetközi szabványokat dolgoz ki és tart fenn, amelyek többek között a biztonságra, minőségre és hatékonyságra vonatkozó szabványokat foglalnak magukban. Ezen túlmenően az egyes albizottságok célja, hogy szabványokat dolgozzanak ki az exoskeleton technológiák alkalmazására az ipari, orvosi, katonai, fogyasztói és katasztrófaelhárítási szektorban. Ezen túlmenően minden albizottság arra törekszik, hogy megértse és hivatkozzon más meglévő és fejlődő szabványokra, és együttműködik más ASTM International bizottságokkal, valamint más, kölcsönösen érdekelt szervezetekkel.

ÖSSZEFOGLALÁS

Egyszerűségük és hordozhatóságuk révén a soft-exoskeletonok egy lépéssel közelebb hozták mindennapi életünkhöz a hordozható robotokat. A soft-aktuátorokat tartalmazó exoskeletonok előnye a többi megoldáshoz képest a rendkívüli rugalmasságukban rejlik. Ezeknél a megoldásoknál a végtagok elmozdulása korán sincs annyira lekorlátozva mint a többi variánsnál. Az egyszerű működési mechanizmus és a testhez alkalmazkodni képes kialakítás kényelmesebbé és funkcionálisabbá teszi az exoskeletonokat. A jelenlegi kutatások egyik fő kérdése, hogy a soft-aktuátorok hogyan válhatnak erősebbé, ellenállóbbá és könnyebben gyárthatóvá. Az egyik meghatározó trend a kompozit anyagok felhasználása, illetve a szálerősítéses anyagok alkalmazása az aktuátor testen belül. Ezek a kutatások már most kecsegtető eredményekkel szolgálnak, ami azt mutatja, hogy a softaktuátorok a jövőben képesek lesznek olyan tulajdonságokra szert tenni, amelyek segítségével megvalósulhatnak olyan exoskeletonok melyek kényelmesen hordhatók, nem korlátozzák a végtagok mozgását és emellett megfelelő nagyságú erőt képesek kifejteni ahhoz, hogy fizikai munkát segítő vagy rehabilitációs jellegű mozgás kivitelezésében tudjanak segíteni a viselőjének. Azonban mielőtt ezt megtennénk, létre kell hozni azt a szabályrendszert, amely keretet ad a fejlesztéseknek. Ezen az új technológiai piacon az elsődleges kihívás a biztonság és a bizalom megteremtése. Mind az ISO 13482 mind az ASTM F48 konszenzusos szabványok kialakításán dolgozik, hogy a kutatók, fejlesztők és az exoskeletonok vásárlói bízhatnak abban, hogy a berendezések biztonságára és teljesítményére vonatkozó állításokat hitelesítették. A szabványos vizsgálati módszerek kialakítása lehetővé teszi a tanúsítási folyamatokat, így a felhasználók jobban bíznak az általuk megvásárolt és telepített exoskeletonokban.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] B.R. da Costa and E.R. Vieira, Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: a systematic review of recent longitudinal studies, *American Journal of Industrial Medicine*. (2010). 53(3): pp. 285-323.
- [2] Indecon, Economic Impact of the Safety Health and Welfare at Work Legislation, Department of Enterprise, Trade, and Employment: Dublin, (2006).
- [3] M. Stattin and B. Järholm, Occupation, work environment, and disability pension: A prospective study of construction workers. *Scandinavian Journal of Public Health*, (2005), 33(2): pp. 84-90.
- [4] R. S. Mosher, "Handyman to Hardiman," *SAE Transactions*, vol. 76, no. 1, pp. 588–597, 1967.

- [5] E. Guizzo and H. Goldstein, "The rise of the body bots," *IEEE Spectrum*, vol. 42, no. 10, pp. 42–48, 2005.
- [6] H. Kazerooni, "Exoskeletons for human power augmentation," 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS, pp. 3120–3125, 2005.
- [7] L. M. Mooney, E. J. Rouse, and H. Herr, "Autonomous exoskeleton reduces metabolic cost of human walking during load carriage," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 11, no. 1, p. 80, 2014.
- [8] H. Kawamoto and Y. Sankai, "Power assist system HAL-3 for gait disorder person," in *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2398. Springer, Berlin, Heidelberg, 2002, pp. 196–203.
- [9] V. Klamroth-Marganska, J. Blanco, K. Campen, A. Curt, V. Dietz, T. Ettl, M. Felder, B. Fellinghauer, M. Guidali, A. Kollmar, A. Luft, T. Nef, C. Schuster-Amft, W. Stahel, and R. Riener, "Threedimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: A multicentre, parallel-group randomised trial," *The Lancet Neurology*, vol. 13, no. 2, pp. 159–166, 2014.
- [10] J. M. Donelan, Q. Li, V. Naing, J. A. Hoffer, D. J. Weber, and A. D. Kuo, "Biomechanical energy harvesting: Generating electricity during walking with minimal user effort," *Science*, 2008.
- [11] T. Lam, "Contribution of Feedback and Feedforward Strategies to Locomotor Adaptations," *Journal of Neurophysiology*, vol. 95, no. 2, pp. 766–773, 2005.
- [12] J. L. Pons, "Witnessing a wearables transition," *Science*, vol. 365, no. 6454, pp. 636–637, 2019.
- [13] V. Sanchez, C. J. Walsh, and R. J. Wood, "Textile Technology for Soft Robotic and Autonomous Garments," *Advanced Functional Materials*, vol. 31, no. 6, 2021.
- [14] C. Simpson, B. Heurta, S. Sketch, M. Lansberg, E. Hawkes, and A. Okamura, "Upper extremity exomuscle for shoulder abduction support," *bioRxiv*, pp. 1–11, 2020.
- [15] H. K. Yap, J. H. Lim, F. Nasrallah, J. C. H. Goh, and R. C. H. Yeow, "A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness," in *Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2015-June, no. June, 2015, pp. 4967–4972.
- [16] A. T. Asbeck, S. M. De Rossi, I. Galiana, Y. Ding, and C. J. Walsh, "Stronger, smarter, softer: Next-generation wearable robots," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 21, no. 4, pp. 22–33, 2014.
- [17] K. Kusek, "The \$3 million suit," 2014. [Online]. Available: <https://news.harvard.edu/gazette/story/2014/09/the-3-million-suit/>
- [18] H. Kobayashi and K. Hiramatsu, "Development of muscle suit for upper limb," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, vol. 3, no. April. IEEE, 2004, pp. 2480–2485 Vol.3
- [19] I. Koo, C. Yun, M. V. Costa, J. V. Scognamiglio, T. A. Yangali, D. Park, and K.-J. Cho, "Development of a meal assistive exoskeleton made of soft materials for polymyositis patients," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014*, pp. 542–547
- [20] D. Park, I. Koo, and K.-J. Cho, "Evaluation of an improved soft meal assistive exoskeleton with an adjustable weight-bearing system for people with disability," in *Rehabilitation Robotics (ICORR), 2015*, 2015.

- [21] D. Chiaradia, M. Xiloyannis, C. W. W. Antuvan, A. Frisoli, and L. Masia, “Design and embedded control of a soft elbow exosuit,” in 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft). Livorno, Italy: IEEE, apr 2018, pp. 565–571.
- [22] S. J. Park and C. H. Park, “Suit-type Wearable Robot Powered by Shape-memory-alloy-based Fabric Muscle,” *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, 2019.
- [23] C. M. Thalman, Q. P. Lam, P. H. Nguyen, S. Sridar, and P. Polygerinos, “A Novel Soft Elbow Exosuit to Supplement Bicep Lifting Capacity,” in IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2018, pp. 6965–6971.
- [24] D. Copaci, E. Cano, L. Moreno, and D. Blanco, New Design of a Soft Robotics Wearable Elbow Exoskeleton Based on Shape Memory Alloy Wire Actuators; *Hindawi Applied Bionics and Biomechanics* 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/1605101>
- [25] Koh TH, Cheng N, Yap HK and Yeow C-H (2017) Design of a Soft Robotic Elbow Sleeve with Passive and Intent-Controlled Actuation. *Front. Neurosci.* 11:597. doi:10.3389/fnins.2017.00597
- [26] T. Nguyen, C. Trinh, T. Danh Le „An Adaptive Fast Terminal Sliding Mode Controller of Exercise-Assisted Robotic Arm for Elbow Joint Rehabilitation Featuring Pneumatic Artificial Muscle Actuator” *Actuators*. 2022; doi:10.3390/act9040118
- [27] ISO 13482:2014 Robotok és robotszerkezetek. Személysegítő robotok biztonsági követelményei (ISO 13482:2014)
- [28] ISO 10218-1:2011 - Robotok és robotszerkezetek. Ipari robotok biztonsági követelményei. 1. rész: Robotok (ISO 10218-1:2011)
- [29] ISO 10218-2:2011 - Robotok és robotszerkezetek. Ipari robotok biztonsági követelményei. 2. rész: Robotrendszerek és összehangolásuk (ISO 10218-2:2011)
- [30] ISO/TS 15066 Robotok és robot szerkezetek. Kollaboratív robotok
- [31] Bostelman R and Hong T (2018). Test methods for exoskeletons—lessons learned from industrial and response robotics In *Wearable Exoskeleton Systems: Design, Control and Applications*. S. Bai, G.SVirk, and T Sugar (Eds.) Institution of Engineering Technology, 335–361.
- [32] Lowe, Brian & Billotte, William & Peterson, Donald. (2019). ASTM F48 Formation and Standards for Industrial Exoskeletons and Exosuits. *IIESE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*. 7. 1-8. 10.1080/24725838.2019.1579769.