



SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
UNIVERSITAS SCIENTIARUM SZEGEDIENSIS
MÉRNÖKI KAR

***SOFT AKTUÁTORRAL ELLÁTOTT, VÉGTAGRA
ILLESZTHETŐ EXOSKELETON TERVEZÉSE ÉS
KIVITELEZÉSE***

TDK DOLGOZAT

Mátó Réka

*IV. évfolyamos mechatronikai mérnök
hallgató*

Témavezető:

Dr. Sárosi József
egyetemi docens

Konzulens:

Mészáros Attila
tanszéki mérnök

SZEGED

2021.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	2
2. EXOSKELETONOK	4
2.1. Működési elv	5
2.2. Kialakítási forma	8
2.3. Felhasználási terület	9
3. SOFT AKTUÁTOROK	12
3.1. Felhasználási lehetőség.....	13
3.2. Alkalmazási kör.....	14
3.3. Soft robotikai elemek előnyei, hátrányai	16
4. SOFT AKTUÁTOR TERVEZÉSE.....	17
4.1. Működést befolyásoló tényezők	17
4.2. A puha robotikai elemmel szemben támasztott követelmények	19
4.3. Anyagválasztás	20
4.3.1. Anyagválasztás szempontjai	20
4.3.2. Anyagválasztás folyamata	20
4.3.3. Választott anyagok.....	21
4.4. Geometriai kialakítás, méretezés	22
4.4.1. Befoglaló méretek meghatározása	23
4.4.2. Kamrasor külső és belső kialakítása	25
5. BEFOGADÓ EGYSÉG TERVEZÉSE.....	29
5.1. Befogadó egységgel szemben támasztott követelmények.....	30
5.2. Geometriai kialakítás, méretezés	30
5.3. Anyagválasztás	34
6. ESZKÖZ ELKÉSZÍTÉSE.....	35
6.1. Soft aktuátor elkészítése	35
6.1.1. Formába öntés folyamata.....	36
6.1.2. Kétféle megoldási lehetőség	39
6.2. Befogadó egység elkészítése	40
7. MÉRÉSEK ÉS EREDMÉNYEK.....	40
7.1. Megfelelőséget ellenőrző vizsgálatok	41
7.2. Elhajlás mérése	42
7.2.1. Vízszintes állás, gravitációval szemben.....	44
7.2.2. Vízszintes állás, gravitációval azonos irányban.....	45
7.2.3. Függőleges állás.....	46
7.3. Kifejtett erő mérése	47
7.3.1. Vízszintes állású mérés egy síkban, 5 mm magasságból.....	48
7.3.2. Vízszintes állású mérés 20 mm magasságból	50
7.3.3. Vízszintes állású mérés 30 mm magasságból	51
7.3.4. Függőleges állású mérés 90°-os hajlásszögben	52
7.3.5. Vízszintes állású mérés 180°-os hajlásszögben	53
8. ÖSSZEGZÉS, TAPASZTALATOK.....	55
8.1. Anyagválasztás	55
8.2. Eszköz értékelése.....	55
8.3. Tapasztalatok	56
8.4. Fejlesztési lehetőségek	57
IRODALOMJEGYZÉK.....	58

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi évtizedekben egyre nagyobb hangsúlyt kapnak a robotok, és azok sokrétű alkalmazási lehetőségei. Technológiai fejlődésüknek köszönhetően olyan lehetőségek tárultak fel, amelyek számos területen megkönnyítik vagy kiegészítik az emberi tevékenységeket. A folyamatosan változó koncepcióknak köszönhető az is, hogy a robotok manapság már az emberek közvetlen közelében, sőt az emberi testrészekkel közvetlen kapcsolatban is használhatók. Az egyes testrészeken, vagy akár teljes testen viselhető robotok iránti igény dinamikusan növekszik a számos használati lehetőségének (pl. rehabilitáció, teherbírás-növelés) köszönhetően. Az exoskeletonok, azaz a mesterséges külső vázak egyik csoportjába olyan merev részekből összeállított mechanikai szerkezetek tartoznak, amelyeket testrészre rögzítve kiegészítik vagy elősegítik az emberi mozgásokat, valamint megnövelik annak természetes lehetőségeit. Az exoskeletonok a széleskörű felhasználási lehetőségeken túl számos olyan hiányossággal rendelkeztek, amelyek megkívánták az emberközeli robotok további fejlesztését. A még újszerűnek számító soft robotokat (puha robotok) ezen hiányosságok megoldására fejlesztették ki, ezek képzik az exoskeletonok másik fő kategóriáját. A két kategória – a merev és a puha robotok – szerkezetei kiegészítik egymást az alkalmazások során. Ezek együttes használatát legfőképp orvosi, azon belül is rehabilitációs célokra alkalmazzák.

TDK dolgozatom témája is egy, a merev és a puha robotokat együttesen használó exoskeleton, melynek elsődleges célja a sérült vagy mozgásképtelen emberi ujjizület mozgatása. Ennek megvalósításához pneumatikus soft aktuátorokat használok, melyeket egy ujjra rögzíthető merev vázra erősítek. A soft robotikai elemek lehetővé teszik a pontos és finom megfogást, melyet egy merev exoskeletonnal nem lehetne elvégezni, míg a merev részek a stabil rögzítésért felelősek. A témaválasztásnál kiemelt szerepet kapott egy olyan eszköz fizikai megvalósítása, melynek van létjogosultsága a világ bizonyos területén. Ennek a korszerű technológiának a megismerése számtalan fejlesztési és alkalmazási lehetőséghez jelenti az első lépést.

A TDK dolgozat témájának kiválasztásakor többek között az exoskeletonok részletes megismerését, az eddig elért eredmények tanulmányozását tűztem ki célomnak. A kutatások és a tájékozódás során különösen nagy hangsúlyt fektettem ezen robotok gyökeres megismerésére, a működési elvüktől egészen a különböző kialakítási lehetőségekig, külön kitérve a merev és a puha exoskeletonok közti különbségekre, ideértve az előnyöket és hátrányokat is. Fontosnak tartom megismerni ezen robotok alkalmazási lehetőségeit, hiszen a sokrétű használata számos

új terület irányában hoz soha nem látott eredményeket. Kiemelt célom ennek a rehabilitációs célra felhasználható eszköznek a fizikai megvalósítása. Ehhez szükséges mind a merev befogadó egység, mind a soft robot megtervezése az ezekkel szemben támasztott követelmények figyelembevételével. Az elkészült részek együttes használatához egy olyan meghajtó egység megtalálása a célom, amely a funkciójának megfelelően, az elvárt mértékben és sebességgel képes az emberi ujjízület mozgatására. Végző célkitűzésem az elkészült eszközről méréseket alapján következtetéseket levonni arra vonatkozóan, hogy annak kialakítása és működése mennyire elégíti ki a tervek szerinti elvárásokat.

Az Irodalmi áttekintés című fejezetben feltárom az exoskeletonok működési elvét és lehetséges kialakítási formáit. Bemutatom a soft robotikai elemek felhasználási területeit és alkalmazásait, valamint előnyeiket és hátrányaikat.

A Soft aktuátor tervezése című fejezetben mutatom be a soft robotikai elemek tervezésének folyamatát, irányeleit, valamint egy konkrét eszköz méreteit is megadom.

A Befogó egység tervezése fejezetben hasonlóan járok el, a tervezés végére egy kész befogadó tervét adom meg.

Az Eszköz elkészítése során a technológia és az anyagválasztás után bemutatom az előző fejezetekben megtervezett egységek megvalósítását, elkészítését.

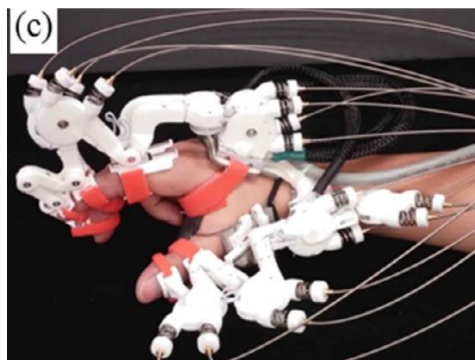
A Mérések és eredmények című fejezetben részletezem az elkészült eszközön végzett méréseket, továbbá azok eredményét. A mérési eredményekről különféle szempontok alapján következtetéseket vonok le.

Az Összegzés, tapasztalatok című fejezetben értékelem az általam végzett munkát, és javaslatot teszek az eszköz további fejlesztési lehetőségeire.

2. EXOSKELETONOK

Az exoskeletonok, mint emberi testen viselhető mechanikus szerkezetek az ember fizikai teherbírásának növelésére hivatottak. Ezek a hordható roboteszközök már 1967-ben megjelentek. Az első ilyen merev váz célja az volt, hogy az emberi fizikai erőt kiegészítve nehéz terhek emelésére alkalmassá tegye a viselőjét. Az eszköz megfelelő működésének az ember és a váz közötti intuitív kölcsönhatás hiánya szabta a legfőbb határt, ami lekorlátozta a közöttük lévő folytonos fizikai kommunikációt (Chiaradia et al, 2019.). A fejlődésük során kiemelt figyelmet fordítottak a viselő és a robot közötti szoros kölcsönhatásra, melyet aktívan, a vezérlési stratégiával, vagy passzívan, a robot mechanikai szerkezetének e célú tervezésével valósítottak meg. Erre azért is van nagy szükség, mert a testen viselt robotok esetén alapvető követelmény, hogy kialakításának és működésének köszönhetően megakadályozza a végtagok természetellenes mozgását. A külső merev vázak két nagy kategóriáját a merev és a puha exoskeletonok képezik, melyek célja megegyezik, de anyagukban, kialakításukban, tulajdonságaikban nagyban különböznek egymástól. Ezen két típust külön bekezdésekbe szedve mutatom be.

A merev exoskeletonok a nevükből adódóan nagy szilárdságú, merev anyagokból, általában alumíniumból vagy szénszálas kompozitokból készülnek, melynek egy kézfejre illeszthető változata az 1. ábrán látható. Alkalmazási területük nagyon tág a változatos kialakítási lehetőségnek köszönhetően. A merev mechanikai szerkezet miatt nagy súlyok emelésére, mozgására is alkalmasak, nagy teljesítményre képesek. Hátrányuk azonban ebből kifolyólag a nehéz súlyuk, mely a viselést gyakran megnehezíti. Nagy pontosságú illesztés is elengedhetetlen a merev elemek miatt.



1. ábra: Merev exoskeleton ujjak mozgására (Forrás: Jo I. et al, 2019)

A puha exoskeletonok ötlete újszerűnek számít a tudományok közt, így a fejlesztési munkák és a benne rejlő lehetőségek megtalálása folyamatosan zajlik. A soft robotok, vagy puha robotok legszembevetőbb eltérése a merev vázakhoz képest a rugalmasságuk. Ez a tulajdonságuk az anyagból adódik, mely leggyakrabban elasztomer, azaz elasztikus polimer. Ezek az anyagok

kellően tartósak, sérülés nélkül elviselik az őket érő terheléseket, de ennek ellenére is képesek hajlékonyak maradni. Nagy előnyük, hogy előállításuk olcsó és könnyű, bárhol használhatók és kis tömegük miatt nagyságrendekkel kényelmesebb és egyszerűbb a viselése. Hátrányuk a merev társaikhoz képest, hogy kevésbé masszívak és kisebb teljesítményt képesek produkálni.

2.1. Működési elv

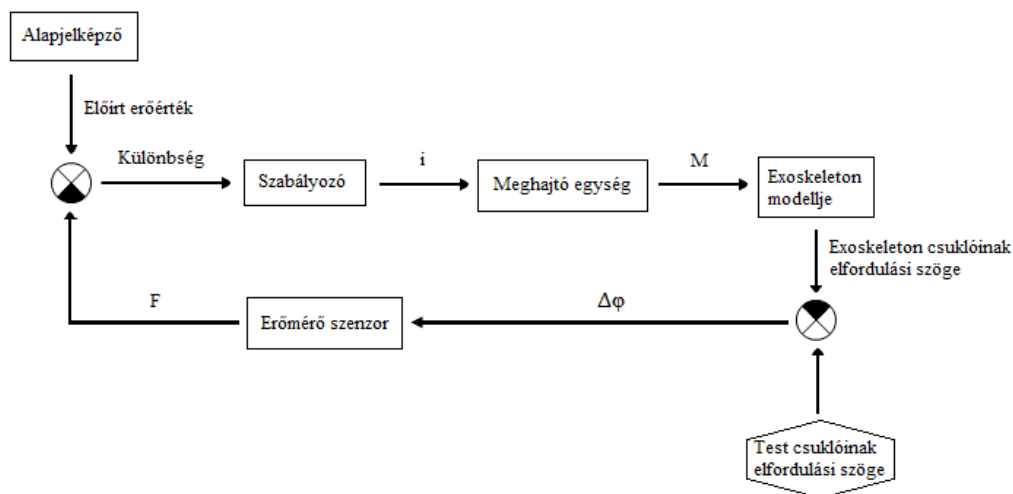
Az exoskeletonok megvalósítása során az emberi testre rögzített merev vázat kell olyan jellegű mozgásra kényszeríteni, mely megfelel az eredeti céloknak és alapvetően annak, hogy csökkentsék az emberi testet érő hatásokat. Az eszközök mechanikai szerkezete tulajdonképpen különböző számú szegmensekből áll, melyek az egyes testrészeket képviselik. Ezeket a szegmenseket csuklók kötik össze egymással, melyek az egymáshoz képesti elmozdulást biztosítják. A pontos működéshez szoros és folyamatos kölcsönhatásra van szükség a robot és az őt viselő szervezet között. A külső vázak többféle szempont szerint kategorizálhatók, egyik ezek közül a passzív és az aktív exoskeletonok megkülönböztetése.

A passzív exoskeletonok képesek a mozgási energia eltárolására, így szükség esetén ezzel végzik a mozgást vagy tartják meg az adott pozícióban a kívánt testrészt. Legnagyobb különbség az aktív társaikhoz képest, hogy nem rendelkeznek sem hajtóművel, sem bármilyen vezérlő elektronikával, hanem a szerkezeti kialakításuknak köszönhetően valósítják meg a váz mozgását. Ehhez egyszerű tokos huzalt (köznapi nevén bowdent) használnak, melyek a húzóerő átvitelén kívül lehetővé teszik a nyomóerő továbbítását is, mert a külső burkolatuk meggátolja az elcsúszásukat. A hajlékony huzaloknak köszönhetően nem akadályozzák a viselő személy mozgását használat közben. Az aktív exoskeletonokkal szemben számos előnyük van, melyek igazolják ezen egyszerűbb szerkezetek létjogosultságát. Az elektronikai részek kimaradásával kevesebb a hibalehetőség, kevésbé érzékeny a külső hatásokra, valamint a nehéz akkumulátor kimaradása és a könnyű kábelek használata töredéke tömegűre csökkenti a szerkezetet. A passzív vázakhoz nincs szükség külső erőforrásra, ami a kisebb tömeggel együtt növeli a szerkezet mobilitását és használati idejét. Ezen tulajdonságoknak köszönhetően a katonai alkalmazása a legelterjedtebb, hiszen kiválóan alkalmazható a nagy tömegű menetfelszerelések hosszútávú cipelésének segítésére.

Az e felosztás szerinti kategória másik részét képezik az aktív exoskeletonok. Mivel ezeknek összetettebb a működése, így a továbbiakban ezt tárom fel részletesebben. Az emberi szervezet és a külső váz közötti nélkülözhetetlen kommunikáció szenzorok segítségével jön létre, melynek jelei és mért értékei egy szabályozó egységbe érkeznek. A fentebb említettek szerint, a passzív exoskeletonokkal ellentétben itt valamilyen meghajtó, vagy más néven beavatkozó

szerv végzi az egyes részek mozgását. A szabályozó a beérkező mért adatok, és a működésből visszacsatolt adatok alapján szabályozza a beavatkozó szervet. A szabályozott egység működése közben folyamatos visszacsatolást biztosít szabályozó egység számára, enélkül nem lehetne precízen elvégezni az ember és a váz együttes mozgásának összehangolását.

A szenzorok jelei, illetve azoknak módosított, feldolgozott változatai adják azokat az alapjeleket, amelyek alapján a folyamat elindul. Az exoskeletonok esetében nagy népszerűségnek örvend az elektromiográfia, rövidítés szerint EMG szenzor használata, mely az izomrostok elektromos tevékenységét képes érzékelni. Alapja, hogy az izmok már kismértékű összehúzódás esetén is elektromos aktivitást mutatnak, míg teljes nyugalomban ez nem figyelhető meg. Ezt a jelenséget kihasználva képes érzékelni az EMG az izomműködést, mellyel egyenesen arányos az általa kibocsátott jel. A jel mV vagy annak töredéke nagyságrendű, így azokat erősíteni kell, majd a jelfeldolgozás után szolgálhatnak egy szervó szabályozó egység alapjeleként (Horváth et al, 2018). Az exoskeletonok esetén az EMG szenzorok bőrre tapasztható formában vannak jelen, mivel a bőrön keresztül is képesek az izomrostok aktivitását mérni.



2. ábra: Exoskeleton szabályozásának blokkdiagramja

Az exoskeletonok szabályozási megoldásai közül elterjedt az erőszabályozás módszere, melyet Horváth et al (2018) részletez. Ennek a típusú szabályozásnak a blokkdiagramja a 2. ábrán látható. A szabályozó alapjele egy előre definiált kölcsönhatási erő, amely referenciaként szolgál a visszacsatolt, mért erőértékeknek. A viselő és az exoskeleton közötti erő mérhető, ha a kölcsönhatás helye pontosan meghatározható. Ezen méréseket a váz különböző területein elhelyezett erőmérő cellák segítségével lehet végezni. Ezek a jelek alapján az erőszabályozás folyamatában a PI szabályzó használata elterjedt, de egyes kísérletek és tanulmányok rámutattak, hogy sokkal szorosabb kölcsönhatás érthető el azzal, ha a P és az I tag együttműködését

fuzzy szabályzással adják meg. Ameddig a mért érték el nem éri az előírt erőt, addig az exoskeleton kívánt tagjára a szabályozott jelnek megfelelő nyomatékot fejt ki a rendszer. A kifejtett nyomatékból kiszámítható a csuklók elfordulási szöge, mely a test csuklóinak elfordulási szögéből kivonva az erőmérés bemeneti jeleként szolgál.

A szegmensek szabályozása során az erőmérésből származó visszacsatolásnál a hagyományos negatív visszacsatolás jelenik meg, melynek célja a külső hatásokra való érzékenység csökkentése. Erre azért van szükség, mert számos olyan mozdulat létezik, melyet alig befolyásolnak a külső hatások, emiatt sokszor nehéz jól értelmezni a viselő mozgási szándékát. Ez a visszacsatolási módszer a kézre, karra vagy a felsőtestre szerelhető exoskeletonok körében elterjedt. Az alsó végtagok szabályozásánál egy ezzel ellentétes, pozitív visszacsatolási módszer a relevánsabb, melyre a lábmozgatás szándékának nehéz érzékelése miatt van szükség (Horváth et al, 2018). A kölcsönhatások pontos helye és az erők iránya nem, vagy csak sok szenzorral definiálható pontosan, a talpra ható erők támadáspontja minden pillanatban változó, továbbá a teherviselés miatt megjelennek a nem szándékos mozgások is. Ezek megoldására szolgál a pozitív visszacsatolás módszere, melynek lényege az emberi hatásokra történő érzékenység növelése, azaz, hogy minimális erőfeszítés hatására is mozgó legyen az alsó végtag vázszerkezete.

Az alapjel és a visszacsatolás alapján, a szabályozó által meghatározott szabályozott jel a meghajtó egység bemeneti jeleként funkcionál.

A meghajtó berendezéssel szemben támasztott általános követelmények:

- biztonságos működés az ember és a működtető rendszer vagy a szerkezet kölcsönhatása során,
- kis tömeg a lehető legkönnyebb viselhetőség miatt,
- nagy erő kifejtésének képessége,
- kompaktság, vagyis nagy teljesítmény/tömeg arány,
- a megfelelő erő/merevség gyors létrehozása.

A meghajtó típusa és működési elve is többféle lehet, ezek az alkalmazástól és a használati környezettől függően választhatók ki. Ezek közül az elektromos motorok és a pneumatikus működtetők jellemzőit mutatom be részletesebben.

Elektromos motorok: Elterjedt az elektromos motor használata mint beavatkozó szerv. Előnye, hogy könnyű a telepítése, továbbá egyszerűen irányítható és kapcsolható össze az eszköz mechanikai szerkezetével. Felhasználóbarát a csendes üzeme is. Hátrányként említhető a viszonylag nagy tömeg, ami a testen viselés miatt problémát jelenthet. Ennek használhatóbbá

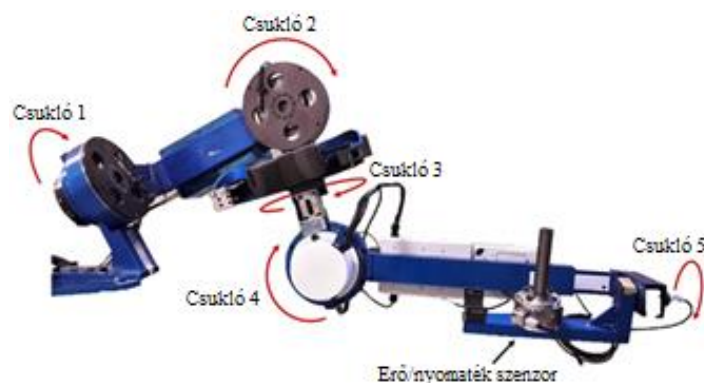
tételére a gravitációs kompenzációs módszerek használata jelenthet megoldást. Kompaktsága viszonylag kicsi, hőelvezetést igényel, továbbá az alacsony statikus erő képességei miatt szükség lehet fogaskerék-hajtásra, ami további hibalehetőségeket vonz magával.

Pneumatikus működtető egységek: A pneumatikus rendszerek legfeljebb 1,5 MPa nyomású sűrített levegőt használnak a jelek és az energia tárolására, majd továbbítására. Kialakításuk szerint lehetnek léghólyagok, hengerek, fordító- és forgatómotorok, valamint fonott izmok. A pneumatikus beavatkozóknak számos olyan előnye van, melynek köszönhetően különösképp elterjedt és célravezető a használatuk az exoskeletonok esetén. A legfontosabb tényező, hogy alkalmazása biztonságos, mivel nincs áramütésveszély és nem jelentkezik tűz-, robbanás- vagy mérgezésveszély sem. Az ember közvetlen környezetében történő alkalmazása miatt meghatározó szempont, hogy a szabadba távozó levegő tiszta, semmilyen egészség- vagy környezetkárosító hatással nem rendelkezik. Az exoskeletonok mobilitását elősegíti, hogy a rendszert meghajtó sűrített levegő bárhol előállítható, és könnyen hozható létre vele a mozgás. Könnyű kialakításának köszönhetően nagy a teljesítmény/tömeg aránya. Az általa kifejtett erő fokozatmentes szabályozhatóságának köszönhetően precízen valósítja meg a testrészekkel történő kölcsönhatást. Hátránya lehet, hogy a levegő összenyomhatósága miatt helyzeti merevsége alacsonyabb, mint a többi meghajtóé, emiatt előfordulnak statikus súrlódási problémák. Elterjedtek a pneumatikus alapú mesterséges izmok is, melyek ezen elven működve kedvezőbbé teszik a pneumatikus vezérlés használatát.

2.2. Kialakítási forma

Egy exoskeletonok számos lehetséges kialakítási módja van, hiszen a működési elv bemutatása során feltüntetett részegységek kombinálhatóak. Az exoskeletonot az adott elvégzendő feladatra szükséges optimalizálni, ennek függvényében változnak a felhasznált anyagok és az alkalmazott megoldások is (Perl, 2019).

A külső merev vázak mechanikai szerkezetét a már említett szegmensek és a csuklók alkotják, melyek a 3. ábán láthatók. A szegmensek felelnek meg az emberi test csontjainak vagy azon merev szakaszainak, melyek az ízületeket összekötik. A csuklók jelentik az ízületeket, amelyek képesek transzlációs és rotációs mozgásra, ezzel megvalósítják a szegmensek mozgását. A szegmensek kinematikai és dinamikai paraméterei, például a hossz és a tömeg mindig az elvárt funkcióhoz és a testrészhez képest változnak. A transzlációs vagy rotációs csuklók elmozdulási vagy elfordulási tartományait az alapján határozzuk meg, hogy pontosan melyik testrészt kívánjuk mozgatni vele.



3. ábra: Merev exoskeleton szegmensei és csuklói (Forrás: Jo I. et al, 2019)

Mindkét egység esetében elengedhetetlen a paraméterek helyes kiválasztása, mivel a biztonság kritikus fontosságú. A nem megfelelő szegmensnek köszönhetően a csuklók elhelyezkedése nem esik egybe az emberi ízülettal, így az nem megfelelő helyen viszi véghez a forgást, míg a csuklók esetén a hibás szögtartomány rendellenes mozgást okoz. Erre jó példa az ujjakra – kivéve hüvelykujjra – kialakított exoskeleton, ahol a szegmensek hossza a megfelelő ujjpercek hosszával arányos, a legnagyobb csuklótartomány a nyújtott ujjakhoz viszonyítva a 0-120°.

A kialakításhoz tartozik az elemek rögzíthetősége és rögzítési módja a kívánt testrészhez. Ezt általában flexibilis, textíliákból készült oldható pántok segítségével teszik meg, melynek célja a nagy teherbírás, miközben a kényelmes viseletre törekszik.

Általánosságban megfogalmazható kritériumokat, elvárásokat, melyeket a használati területtől függetlenül figyelembe kell venni a kialakítási módok során, Perl (2019) foglalta össze. Ide tartozik a kopásállóság, a teherbírás, a szerkezet saját súlya, a kényelmes viselhetőség és az energiatakarékosság. Ezeken túl a legalapvetőbb követelmény az emberi test rendellenes mozgásának, mozgatásának elkerülése, ez semmilyen esetben nem fordulhat elő.

2.3. Felhasználási terület

Az exoskeletonokat előszeretettel alkalmazzák számos, egymástól eltérő felhasználási helyeken. Ez a változatos kialakítási lehetőségeknek és az igények szerint módosítható meghajtó rendszernek köszönhető. Az emberi szervezet terhelésének csökkentésére, valamint az egyes testrészek teljes mozgatására nagy szükség van különböző területeken. Elterjedésüket segíti az irányukba mutatott nagymértékű igények további, dinamikus gyarapodása.

Felhasználásuk során gyakran alkalmazzák a merev vagy a soft robotikai elemeket önmagukban, vagy a soft robotikai elemek és a merev exoskeletonok kombinációját (hibrid) is. Ezek együttes használata sok lehetőséget tartogat magában, teret adva akár új és hatékonyabb felhasználási lehetőségeknek. A felhasználási lehetőségeket területekre lebontva fejtem ki részletesebben.

Egészségügyi felhasználás: Elsődleges kialakításai az orvosi és ápolói feladatok könnyítésére hivatottak. Az első fejlesztése a betegek megemelésében, valamint a szállításában segítette az embert azzal, hogy a terhelő súlyt az exoskeleton tartotta meg. Ez a súlyemelési lehetőség a külső vázak azon tulajdonsága, melyet nem csak az egészségügyben használnak ki, mivel az ember súlyemelő határa igen korlátozott.

Az egészségügyi dolgozókon kívül a beteg számára is felhasználható az eszköz rehabilitációs célokra. Számos betegség, annak szövődménye, illetve maradandó károsodás is okozhat olyan mozgásszervi problémákat, melyekre megoldást jelent az exoskeletonok viselése, ilyenek például az izomsorvadás, az ödéma kialakulásának veszélye műtét vagy trauma után, vagy az ízületek nyúlékonyságának elvesztése (Jo I. et al, 2019). A nem megfelelő rehabilitációs kezelés további bénuláshoz vezethet, de sok esetben nincs lehetőség vagy nem megoldható a rendszeres, szervezett rehabilitációs tevékenység. Az érintett testrésze vagy testrészekre rögzített váz megfelelő beállítások és optimalizálás esetén képes a végtagokat súlytalanná tenni, vagy a sérült testrész kiegészítő mozgását elvégezni. Ez lehet folyamatos, ismétlődő és intenzív mozgás, mely a rehabilitációnak felel meg, de lehet mindennapi mozgás is, mely az egyes testrész mozgásának helyettesítőjeként jelenik meg. Ez utóbbi abban az esetben áll elő, amikor a rehabilitációs időszak után is súlyos maradandó mozgásképtelenség marad hátra. A rehabilitációs eszköznek számos fajtája van a használati igényektől függően. A mérete és összetettsége az egyes kis testrészekről, például ujjaktól egészen a fél vagy teljes testen működő eszközökre terjed, ilyen például a teljes felsőtestet átölelő szerkezet.

Katonai felhasználás: Az exoskeletonok első nagy fejlődési hulláma ezen a felhasználási területen történt, ám az iparban és az egészségügyben kifizetődőbb alkalmazás, valamint a sok kedvezőtlen tulajdonság miatt végül ezeknek a fejlesztése háttérbe szorult. Több nemzet is foglalkozott és foglalkozik a mai napig is ezeknek a fejlesztésével, de az Amerikai Egyesült Államok és Japán jár az élen ezek esetén (Yeem S., 2019). A katonaságnál a használatnak alapvetően két célja van: egyik az izomerő növelése, ezáltal a sok hordandó teher átruházása az exoskeletonra, másik cél ennek a következménye, azaz a fáradtságcsökkentés és az állóképesség növelése. A 4. ábrán is egy ilyen célú alkalmazás látható. Ezekre azért van nagy szükség, mert az alapvető felszerelések, a fegyver és az ellátáshoz szükséges kellékek már önmagukban nagy tömeget képviselnek, ezek hosszútávú hurcolása megterhelő feladat. Ehhez társulnak hozzá az egyéb különleges, nagyobb harceszközök, fegyverek.



4. ábra: Exoskeletont viselő katona nehezen járható terepen (Forrás: Horváth P. et al, 2018)

Az exoskeletonnal növelhető a tömeg, amit egy ember hordozni képes, valamint többszörösére növelhető az a táv, amit biztonságosan, sérülések nélkül menetelni képes, valamint az erő és a kitartás növekedésével a túlélés esély is emelkedik. Ezek a vázak szilárd, merev anyagból készülnek a stabilitás és a hosszú élettartam érdekében, de ebből kifolyólag nagy tömegűek és kicsi a manőverezhetőségük (Yeem S., 2019). A katonai alkalmazás során a hajtómű típusa jelent még problémát. Ezeknek ugyanis mozgathatónak kell lenni és bárhol rendelkezésre kell állnia. A hajtóművek szintén nehezítik az exoskeletont, illetve néhány típusának a zajkibocsátása is magas, ami hátrányt jelent ennél az alkalmazási területnél. Részben ezen okok miatt terelődött a figyelem más jellegű felhasználásra.

Ipari felhasználás: Az exoskeletonok használata az ipari területeken talán a legkifizetődőbb, és ennek köszönhetően egyre elterjedtebb. Tulajdonságai láncszerűen vonzzák azokat az előnyöket, amelyek miatt gyárakban, feldolgozóiparban, építkezéseken és egyéb fizikai munkák során egyaránt népszerűek. Működési elvüknek köszönhetően ötvözik az emberi döntés- és ítélőképességet, valamint az intelligenciát a robotok erejével, pontosságával és kifáradhatatlanságával (Perl, 2019). A gyárakban a gyártósoroknál alkalmazzák, mivel segíti a biztonságos munkavégzést. A dolgozó tehermentesítésére az összeszerelendő alkatrészek súlyát az exoskeleton veszi fel, ezzel csökkennek a fáradtságból adódó problémák, mint a balesetveszély, túlterhelés, termeléseszkökenység. Használatának előnye még, hogy a robotok pontossága miatt a hibák száma is számottevően redukálódik. A súlyemelés lehetőségét a raktárakban anyagmozgatási feladatokra is felhasználják, ugyanis a targoncákat és rakodógépeket leváltva egy olcsóbb, sokoldalúbb megoldást kínálnak a veszélyek csökkenésével (M. Brown et al, 2003). Kedvező adottságai az építőiparban is kihasználásra kerülnek. Az építőanyagok mozgatásához és kezeléséhez használt kézi erő hatékonyan helyettesíthető az exoskeletonok által, melyekkel a gyáraknál felsorolt előnyök jelentkeznek.

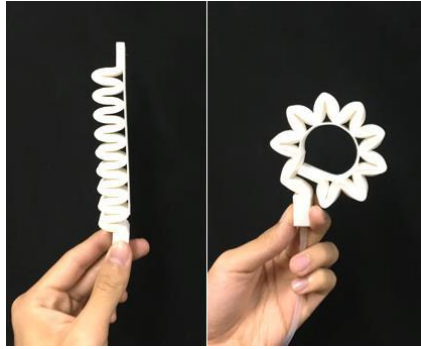
További előnye a mobilitás, és a tereptől, helyszíntől való függetlenség, hiszen az építőipari területeken gyakran nem felel meg a talaj egyéb gépeknek.

Az előzőekben felsorolt alkalmazási lehetőségeken túl M. Brown et al (2003) számos területen tesz javaslatot az exoskeletonok fejlesztése és tesztüzemei. A tűzoltó alakulatok sok nehéz felszerelést kénytelenek magukkal vinni a mentési akciók során az esetleges nagy magasságokba vagy nehezen megközelíthető területekre. Számukra nagy segítség lenne egy exoskeleton, amely képes a hővédő ruházat és az egyéb eszközök terhelésétől megkímélni az emberi szervezetet a többletterhelést jelentő, szélsőséges levegő-, hőköörülmények között. A katasztrófavédelmi alakulatok a tűzoltóságokhoz hasonlóan a mentések során vennék használ az exoskeletonok súlyemelési lehetőségeinek.

3. SOFT AKTUÁTOROK

Soft robotikai elemek alatt minden olyan rugalmas anyagból készült, kamrákkal és bordákkal rendelkező szerkezetet értünk, amelyek a pneumatikán vagy ritkább esetben hidraulikán alapulva képesek különböző irányú és nagyságú mozgásra, és ezáltal mozgatásra. Ezen újfajta robotikai elem fejlesztésére és alkalmazására nagy igény mutatkozik, melynek köszönhetően dinamikusán fejlődik az iparág. Az általuk biztosított újdonságok, például a lényegesen kifinomultabb megfogási képesség nagy előnyt jelent az eddigiekben alkalmazott merev mechanikájú és megfogójú robotokkal szemben. A rugalmas anyagként elasztomert használnak, mellyel a kellő strapabíróság és flexibilitás is együttesen biztosítható. Az aktuátorokat általában 3D nyomtatással vagy öntéssel készítik el. A működési elvüket és a kialakítási lehetőségeiket tekintve sokfélék lehetnek. A működtetési módszert mindig az adott feladatra kell kiválasztani. Az exoskeletonok során a pneumatikus működtetés a jellemző, mivel a feladatom során én is ezt alkalmazom, így ennek a részletezését tettem meg az Exoskeletonok fejezetben, így erre most nem térnék ki.

A soft aktuátorok esetében a pneumatikus munkavégzés okozza a mozgásukat a kamrákba bevezetett levegő általi túlnyomás (5. ábra). Amikor a sűrített kamrákba levegőt engedünk egy kompresszor segítségével, akkor a zárt üregben a nyomás megnő, melynek hatására deformálódik az elasztikus anyag. A bordákba jutó nyomás nagyságától függ, hogy a kamrák milyen mértékben nőnek meg, és az aktuátor mekkora hajlási szögben hajlik el. Növekvő nyomás hatására a kamrák térfogatnövekedése is nő, így jobban egymáshoz feszülnek és nagyobb mértékben hajlanak.



5. ábra: Soft robotikai elem alaphelyzetben (bal) és bevezetett nyomás során (jobb)

(Forrás: Ang et al, 2017)

3.1. Felhasználási lehetőség

Ez az új irány számos felfedezetlen lehetőséget rejt, amelyek még manapság csak fejlesztés vagy tesztelés alatt állnak, vagy akár csak ötlet szinten vannak jelen. Felhasználási lehetőségük azonban sokrétű, köszönhető ez a kivételes tulajdonságaiknak az egyéb robotikai elemekhez képest. Ezekből a tulajdonságokból kiindulva lehet sorra venni a felhasználás területeit. A soft, vagy puha robotikai elemek tömege töredéke a merev, sokszor valamilyen fémből készült robotokénak, így olyan helyeken jobb megoldást biztosít, ahol szükséges figyelembe venni a robot tömegét. Ez egy gyártósori rakodásnál vagy raktározásnál ugyan nem jelent fontos tényezőt, de a korábban már részletezett exoskeletonok esetén kulcsfontosságú lehet, hogy mekkora tömeget kell viselni az emberi testnek hosszabb időn keresztül. A puha robotok gondolata és alappillére a biológia, hiszen ezek törekednek az élőlények mozgásának minél pontosabb lemásolására. Mivel ez a leginkább hasonlító eszköz a biológiai rendszerekhez, így megfelelő lehet olyan esetben, ahol kifejezetten nagy szükség van a biológiai hasonlóságra. A soft aktuátorokat lehet valamire rögzítve önmagukban használni, de gyakran alkalmazzák merev szegmensű és csuklójú robotok megfogójaként is. A megfogás mint funkció a legjellemzőbb használati lehetőség, melyet több területen is alkalmaznak. A rugalmas anyaguk miatt képesek olyan deformációkra, mellyel igazodnak a megfogni kívánt tárgy alakjához, így sokkal pontosabb és biztosabb fogást biztosítanak, mint a merev társaik. Az aktuátorokat többféleképpen lehet elhelyezni és számuk is változtatható, ezzel biztosítva a legkülönlegesebb alakú és merevségű tárgyak megfogását is. A működési elvüknek, azon belül is a releváns szenzoroknak és a visszacsatolásnak köszönhetően pontosan beállítható az az erő, amelyet a megfogás során kifejt, így azokat a tárgyakat vagy akár élőlényeket is képes sérülés okozása nélkül megfogni és felemelni, melyek érzékenyek az efféle hatásokra. A könnyen igazodó aktuátorok miatt használható olyan megfogások esetén, melyeknél kulcsfontosságú a megfogás pontos helye a tárgyon. A soft robotok egyszerű, pneumatikus működtetésének köszönhetően

robbanás- és tűzveszélylehetősége nem merül fel, így az ilyen kockázattal járó területeken is alkalmazható. Az általa kibocsátott levegő tiszta, nem tartalmaz szennyezőanyagot vagy bármilyen egyéb adalékot, így az ember közvetlen környezetében, például exoskeleton formájában is használható, akár egészséges, akár beteg, sérült embereknél. A természetes, minket körülvevő levegőműködtetésnek köszönhető, hogy alkalmas laboratóriumban történő használatra, vizsgálatokra is.

3.2. Alkalmazási kör

A soft robotikai elemek alkalmazása a jelenlegi ismeretek meglétében is nagy jelentőséggel bír. Fő jellegzetességük, hogy a soft robotokat a természet inspirálta, hiszen a merev robotokkal szemben az emberi testrészek és az állatok is nagyobb részben rugalmasak. Az állatvilághoz hasonló kialakítású robotokat több helyen is alkalmazzák már. Kifejlesztésre került olyan polip és hal alakú soft robot, mely teljes mértékben puha elemeket tartalmaz. Képesek a víz alatti élővilág megfigyelésére úgy, hogy közben azt nem zavarják meg. A használatukkal közelebbről és pontosabban megismerhetők azok a fajok és a komplex élővilág, amiről keveset tudtunk. A hal formájú robot képes a halrajokba becsatlakozni, és hozzájuk hasonlóan a másodperc töredéke alatt haladási irányt változtatni a menekülési manőverek során (Das, 2020).

Hasonlóan fejlesztettek ki tengeri csillag alakú soft robotokat, melyek öt lábbal rendelkeznek, és ennek köszönhetően képesek egyenetlen talajon sétálni. A szárazföldi tesztek során a robot könnyed áthaladást mutatott nála nagyobb akadályokon is, sziklás terep esetén pedig gördülő mozgást végzett. A csillag formájú robottal szintén a tengeri flóra és fauna megfigyelése valósítható meg (El-Atab, 2020). A természetre hasonlító robotok más egyéb kialakításai is elterjedtek már a használatban. Olyan eszközöket kerültek kialakításra, melyek segítséget nyújtanak katasztrófhelyzetek esetén, legyen szó földrengésről, vagy akár bármilyen leomló épületről, hegyoldalról. A gilisztákhoz hasonlító robotokkal könnyebben valósítható meg a törmelékek alá szorult vagy üregekben benn ragadt emberek kimentése, ezzel növelhető a túlélők száma a mentőalakulatok tehermentesítésével egyidejűleg. Ezen alkalmazási területek folyamatos tesztelés alatt állnak, valamint az új lehetőségek kidolgozása is zajlik.

Két nagy alkalmazási köre már manapság is aktívan használja a soft robotikai elemeket, ezek az élelmiszeripar és az orvostudomány.

Az élelmiszeriparban az élelmiszerek kezelésére és rakodására egyaránt alkalmazzák a puha robotokat. Többféle megfogó kialakításának köszönhetően számos formájú és keménységű terméket képesek megfogni, és pontosan a gyártósornak vagy a futószalagnak a megfelelő pozíciójába helyezni. A kisebb méretű megfogók segítenek a kisebb méretű élelmiszerek

áthelyezésében, de készültek már kifejezetten lapos tárgyakat, például kekszeket megemelő megfogók is. Az anyaguknak köszönhetően tisztításuk és fertőtlenítésük könnyedén megoldható, ami kulcsfontosságú tényező az élelmiszeriparban. Ebből adódóan a legkülönbözőbb termékek rakodására is használják, egészen a kis kekszekről a nyers húsig. A legújabb fejlesztések még egy szinttel feljebb emelték a soft robotok alkalmazási lehetőségeit. Az aktuátorok elviselik a magas nyomást, így a tejtermékek és a fehérjék biztonságos kezelésére is alkalmasak, hiszen ezeknek feltétele a magasnyomású tisztítás.

A másik nagy felhasználási terület az orvostudomány, azon belül is a rehabilitáció. Az orvosi alkalmazások során is felmerül annak a lehetősége, hogy ezen puha robotok kis méretű verziói a diagnosztizálásnál és a műtéteknél segítsék az orvosok munkáját, de ez a technológia kidolgozás alatt áll még. A rehabilitációkhoz azonban már elterjedten alkalmazzák a soft robotikai elemmel ellátott eszközöket legfőképp kézfej és ujjak esetén, de a többi testrészre is folyamatos a kidolgozása és a tesztelése. Az állandó vagy gyakran hosszú viselés miatt kulcsfontosságú, hogy a váz könnyű legyen, így a mindennapi használat során nem terheli túl a szervezetet. Ezen cél megvalósítására a rehabilitációs és állandó viseletre szánt mozgássegítő eszközök körében egyre nő a soft aktuátorral rendelkező egységek száma. Az ujjak esetén megvalósítható a mozgásukkal megegyező mozgás, és az általuk kifejtett erővel megegyező nagyságú erő létrehozása. Ezen elemek továbbá kedvezőbbek az ujjak mozgatásánál, és az azzal történő megfogás esetén is, mivel a rugalmas, könnyen alakot változtató robotikai elemek az érintkező felületek megváltoztatásával elősegítik a kívánt tárgyak megfogását, ami a 6. ábrán látható. Nagy előnyt jelent a kis tömege és a könnyű illesztése az állandó viselethez. A rehabilitáció, valamint a sérült testrész szinten tartása kulcsfontosságú a stroke-betegek és izomsorvadással küzdők esetén. Ezeket exoskeletonok formájában használják, melyet bővebben az Exoskeletonok fejezetben részleteztem.

Az itt felsorolt kiemelkedő tulajdonságai miatt választottam ezt a megoldást én is a megvalósításhoz.



6. ábra: Kesztyűre rögzített soft aktuátor kisméretű tárgy megfogása közben

(Forrás: Li et al, 2019)

3.3. Soft robotikai elemek előnyei, hátrányai

A soft robotikai elemek elterjedésében és a ma is tartó dinamikus fejlődésében nagy szerepet játszik a számos előnye, amellyel rendelkeznek. Néhány hátrányát a tudomány próbálja kiküszöbölni, valamint olyan alternatívát találni, mellyel a soft aktuátor előnyösen használható.

A soft robotikai elemek előnyeit és hátrányait az alábbiakban tudnám összefoglalni:

Előnyei:

- olcsón és gyorsan előállítható,
- könnyen beépíthető egyéb robotrendszerekbe,
- rugalmas, így pontosabban alkalmazható megfogásra,
- olyan különleges tárgyak esetén is alkalmazható, melyeknek a megfogása problémát jelent enélkül,
- működtetése egyszerű,
- többféle kialakítás módja lehetséges, emiatt optimalizálható az egyes felhasználási esetekre,
- kis tömegű, kis méretű elemek,
- nem tartalmaz kopásra hajlamos alkatrészeket,
- nem érzékeny a környező hatásokra, mint például a hőmérséklet, páratartalom,
- gyors válaszidő,
- pontos vezérlésének köszönhetően finom mozgásokra képes,
- könnyen tisztítható,
- használata biztonságos az ember közelében is,
- puha anyagának köszönhetően csökken a sérülésveszély,
- nem bocsát ki káros anyagot.

Hátrányai:

- kisebb teljesítmény érhető el, mint a merev robotoknál,
- kis határfok,
- nemlineáris mozgása miatt nehezebb a pontos irányítása.

A soft aktuátorok széleskörű alkalmazási lehetőségeit kihasználva feltörekvően van a különböző területeken történő felhasználása. A TDK dolgozatomban témájának kifejezetten olyan innovatív eszköz tervezését és megalkotását szerettem volna megvalósítani, melynek van helye a világ keresletében. Az általam tervezett puha robotikai elem az új rehabilitációs mozgatót végzi, melyre nagy igény mutatkozik a veleszületett, valamint a betegségek és balesetek következtében kialakult bénulások miatt.

4. SOFT AKTUÁTOR TERVEZÉSE

A TDK dolgozatom elkészítése során a célom egy olyan pneumatikus működésű, puha robotikai elem és egy hozzátartozó befogadó egység megtervezése és megvalósítása, amely a korábban felsorolt előnyöket kihasználva alkalmas az emberi ujjra való rögzítésre, és ezáltal annak mozgására. Az aktuátor tervezésekor egy olyan eszköz megalkotását tűztem ki célomnak, amely méreteiben illeszkedik az emberi ujjakhoz, ezáltal könnyedén viselhető, így rehabilitációs célokra alkalmas. Ezen túl az elemnek képesnek kell lenni az emberi ujjhoz hasonló mozgás elvégzésére, valamint a hasonló működésre. Célom az eszköznek olyan jellegű kialakítása, amely illeszkedik az ujj mozgásához, azaz irányban és hajlásszögben is megegyezően működik azzal, valamint olyan mértékű erő kifejtésére képes, amely helyettesíteni, illetve segíteni tudja a sérült, mozgásképtelen vagy nehezen mozgó ujjak megfogási funkcióit. Az aktuátorhoz szükséges rögzítő eszköz tervezésekor egy olyan egység megalkotása a célom, mely a kézfejhez történő csatlakozást teljes egészében biztosítja, mégis egyszerűen eltávolítható arról.

A megvalósítás során azt tűztem ki célnak, hogy a választott anyaggal és módszerrel egy a követelményeknek megfelelő, és az előzetes elvárásokhoz képest helyes működésű egységet alkossak. Ehhez az anyagválasztás és a megvalósítási folyamat pontos meghatározása elengedhetetlen. Az aktuátor anyagának kiválasztása saját tapasztalatok és szakirodalmi ajánlások alapján történik, míg a folyamathoz az öntési technológiát választottam. Ezeknek az aktuátoroknak a kialakításuk és a kritériumok miatt korlátozottak a lehetőségeik a fizikai megvalósítás szempontjából, így a két leggyakoribb módszer, a 3D nyomtatás és a formába öntés közül én az utóbbit választottam. A befogó egység ezzel ellentétben 3D nyomtatással készül, hiszen kellőképp merevnek kell lennie.

A megvalósított eszközzel további célom olyan mérések elvégzése, melyek a korábbi céloknak való megfelelésre adnak választ, azaz az eszköz méreteit, elhajlását és az általa kifejtett erőt vizsgálom.

4.1. Működést befolyásoló tényezők

Az aktuátor tervezésének első lépése a működtetés típusának a kiválasztása. A működési elve alapján, ami a kamrákba vezetett túlnyomás hatására történő alakváltoztatás, a működtetésre legelterjedtebb módszer a pneumatikus, valamint a használt, de kevésbé elterjedt a hidraulikus működtetés. A munkám során én a pneumatikus működtetést választom. A megnövelt nyomású levegő számos pozitív tulajdonsággal rendelkezik a folyadékokhoz képest, ami miatt a puha robotoknál előnyben részesítik ezt:

- Viskozitása alacsony, ez az eszköz gyors alakváltozását eredményezi
- Összenyomható
- Tömege kicsi
- Egyszerűen szabályozható és mérhető
- Könnyen tárolható
- Könnyen beszerezhető, előállítható
- Gyors működésre képes
- Egyszerűen megoldható a túlnyomás megszüntetése
- Környezetbarát, használat után a légkörbe engedhető bármilyen külön megoldás igénye nélkül.

A levegővel történő működtetés hátránya, hogy kisebb erő kifejtésre képes általa az eszköz, mint a folyadékkal történő működtetés esetén. A soft aktuátorok esetén ez kevésbé bír jelentőséggel, hiszen a kisebb erő kifejtés is elegendő, figyelembe véve az egyéb kiemelkedő előnyöket.

Az aktuátor tervezésének elsődleges célja, hogy az eszköz az elvárt hajlásszögben meghajoljon, és képes legyen eközben erőt kifejteni. A soft aktuátornak ezen paramétereit több olyan jellemző is befolyásolja, amelyet figyelembe kell venni a tervezés során. Ezek a tulajdonságok az anyagminőség, a méretek, és a kialakítási forma. A kialakítási forma az ujjhoz való csatlakoztatás esetében meghatározott, hiszen elvárás és egyben követelmény is, hogy az aktuátor a kiválasztott testrésszel együtt, azzal megegyező irányba mozogjon.

A geometriai kialakítás és a méretek egy szabadabban változtatható tulajdonság. Mivel végtelen kombinációja létezik ezeknek, így szakirodalmi ajánlásokat és tapasztalatokat használok az összefüggések megismeréséhez. Ezek a tapasztalatok a kamrák számával, magasságával és a falvastagságával kapcsolatosak. Ezek alapján megállapítható, hogy a maximális hajlítás elérése esetén:

1. A kamrák számának növelésével csökken a szükséges nyomás.
2. A kamrák magasságának egy határértékig történő növelésével csökken a szükséges nyomás és nő az erő kifejtés.
3. A kamrák falvastagsága egyenes arányos a szükséges nyomással.

Az anyagminőség szintén nagy mértékben befolyásolja az aktuátor bemenetre adott választát, de az a beavatkozók kialakítása és nemlineáris viselkedése miatt a különböző anyagok esetén történő viselkedés nehezen modellezhető. A szakirodalmak (Mosadegh et al, 2018, Polygerinos et al, 2013) a morfológián kívül az anyagminőséggel kapcsolatos, általános összefüggéseket is megállapítottak. Azonos méretek és morfológia esetén:

1. A nagy nyúlású, kis keménységű anyagok deformációjához kisebb nyomás szükséges, mint a merevebb anyagok azonos mértékű deformációjához.
2. A merevebb anyagok nagyobb erőt képesek kifejteni azonos nyomáson.

4.2. A puha robotikai elemmel szemben támasztott követelmények

A soft aktuátor működéséből adódóan megfogalmazható néhány olyan elvárás, melynek eleget kell tennie minden puha robotikai elemnek.

Általános követelmények:

- Elegendő rugalmasság a sorozatos alakváltoztatáshoz
- Nem szenved maradandó deformálódást működés közben
- Alapállapotban az eredeti formáját nyeri vissza
- Teljes légzárással rendelkezik a kamrasor
- Illeszkedik a kívánt befogadó egységhez
- A pneumatikus cső megbízhatóan rögzíthető
- Hosszú élettartamú

A soft aktuátor működéséből és funkciójából kifolyólag számos olyan követelménynek kell eleget tennie, melyek nélkül nem lenne alkalmazható erre a célra az eszköz. Mivel funkcióját tekintve ez egy újra rögzíthető rehabilitációs eszköz, így az emberi test közvetlen környezetében megvalósuló működés miatt több követelménynek kell megfelelnie a balesetek elkerülése és a biztonságos használat érdekében.

Ujjhoz való rögzítésből adódó követelmények:

- Képes az ujj mozgásával megegyező mozgásra
- Használata az ember közelében is biztonságos
- 3 szabadságfokkal rendelkezik a három ujjízületnek megfelelően
- Hossza és szélessége az ujj megfelelő méreteinél jelentősen nem nagyobb
- Magassága nem akadályozza a további mozgást, maximum 25 mm
- Hajlásszöge 270° , amely megegyezik az ujjak görbületével
- Kialakítása miatt oldhatóan rögzíthető egy befogadó egységhez
- Rövid időn belül változtatja meg az alakját a nyomás hatására
- Alacsony nyomáson ($p < 100 \text{ kPa}$) is képes elérni a kívánt hajlásszöget és erőt kifejteni

Ezeknek a követelményeknek kell eleget tenni annak az aktuátornak, mely az ujj mozgatására van tervezve.

4.3. Anyagválasztás

Az anyag, amelyből az aktuátor készül, meghatározó tényező a működés szempontjából. A témát vizsgáló tanulmányokban (Mosadegh et al, 2018, Polygerinos et al, 2013) tett megállapítások szerint az anyag merevségétől függ, hogy mekkora nyomás szükséges ugyanahhoz a válaszreakció eléréséhez azonos kialakítás esetén. A keményebb, kevésbé rugalmas anyagok kisebb térfogatnövekedést érnek el ugyanazon a nyomáson, mint a rugalmasabbak.

4.3.1. Anyagválasztás szempontjai

Az anyagválasztás során figyelembe kell venni a használati funkciót, a használat során előforduló körülményeket, valamint azt, hogy az anyag alkalmas legyen a gyártási folyamatra. Ezek alapján a következő fontos szempontokat emelném ki:

- Kellően rugalmas megszilárdult állapotban
- Ellenáll az emberi környezetben előforduló hőmérsékletnek ($-20\text{ }^{\circ}\text{C} - 45\text{ }^{\circ}\text{C}$)
- Ellenáll a magas páratartalomnak, esetleg nedves környezetnek
- Nem törik, nem szakad, megfelelő a keménysége
- A megadott terhelésnél nem nagyobb terhelés esetén nem szenved maradandó alakváltozást
- Kötés előtti viszkozitása kicsi, az anyag önthető állagú
- Edényideje legalább 15 perc
- Szilárdulás közben zsugorodása elhanyagolhatóan kicsi

Ezeknek a szempontoknak kell megfelelni a kiválasztott anyagnak.

4.3.2. Anyagválasztás folyamata

A soft aktuátor nemlináris válasza és a különleges kialakítása miatt nehezen megjósolható, hogy különböző anyagok esetén hogyan viselkedik az eszköz. A megfelelő anyag kiválasztásához három, a kutatások során használt anyagokkal hasonló tulajdonságú anyagot választottam, melyekkel elvégeztem az öntést.

Kiindulásként a szakirodalomban használt anyagokat és az azokhoz tartozó tapasztalatokat használok fel. Mosadegh és társai (2014) két anyaggal végeztek öntést, egy puhább és egy keményebb anyaggal. Az Ecoflex 00-30 egy 00-30 keménységű, 900 % megnyúlásra képes anyag. A vizsgálatok során bebizonyosodott, hogy ez az anyag gyárthatóság és megnyúlás szempontjából megfelel, de túl puha, kevés saját tartással rendelkezik, és minimális terhelés hatására is nagy az alakváltozása. Ezen következtetések miatt ennek az anyagtípusnak egy keményebb, 00-50-es változatát használok egyik anyagként az öntéshez.

Az általuk használt keményebb anyag az Elastosil M4601 szilikon, amely egy 28 A keménységű, 700 % megnyúlásra képes anyag. A tapasztalatok alapján ez a keménység megfelelő, mert a nyomás változtatásával folyamatosan változik a hajlásszög is, nem éri el kis nyomásértékeknél a maximumát. A működés során a kamrák nyúlnak meg a legnagyobb mértékben, de még azok se érik el a 300 %-ot. Emiatt egy hasonló keménységű, de kisebb nyúlásra képes anyagot választottam. Ez a kategória költséghatékonyabb, hiszen ennek a tulajdonságai is elegendőek a felhasználáshoz, mégis könnyebben beszerezhető és kedvezőbb árú. A választott anyag ezek alapján a Mold Max 30. A tesztelések azt mutatják, hogy a nagyobb keménységű anyag ugyanarra a nyomásváltozásra kisebb deformációt, elhajlást produkál, mint a puhább. Ez azért jó tulajdonság, mert így irányíthatóbb az aktuátor mozgása. Emiatt egy keményebb, többi jellemzőjében hasonló anyagot is választok az öntéshez, ami a Mold Max anyagnak a 40 keménységű változata.

4.3.3. Választott anyagok

A választott anyagok az Ecoflex 00-50, a Mold Max 30 és a Mold Max 40, melyek közül az utóbbi a 7. ábrán látható. Ezeknek az anyagoknak a felsorolt szempontokhoz tartozó adatait az 1. táblázat tartalmazza. Mind a három anyag kétkomponensű önthető szilikongumi, melyek szobahőmérsékleten képesek a kötésre. A komponensek maga a folyékony halmazállapotú szilikon, melyhez megfelelő arányban kell keverni a másik komponenst, az aktivátort, más néven katalizátort. Ezek reakciójának hatására válik gumiszerű anyaggá a folyékony szilikon. A különbség az anyagok között, hogy az Ecoflex egy poliaddíciós, míg a Mold Max szilikonok polikondenzációs szilikonok. A poliaddíciós szilikonok nagyobb szakítószilárdággal rendelkeznek, valamint a zsugorodásuk is kisebb, de magas ára miatt sokszor a polikondenzációs anyagra esik a választás. Én a folyamat során mindkét típust kiprobálom.



7. ábra: Mold Max 40 szilikon két komponense

1. táblázat: Használt szilikonok legfontosabb paramétereit (Forrás: <https://www.smooth-on.com/> (Letöltés dátuma: 2021.11.18.)

	Ecoflex 00-50	Mold Max 30	Mold Max 40
Sűrűség [g/cm ³]	1,07	1,18	1,14
Shore keménység	00-50	30 A	40 A
Szakítószilárdság [kPa]	2171,85	3978,27	3792,12
Megnyúlás [%]	980	300	250
Keverékvizkozitás [Pa·s]	8	25	45
Zsugorodás [mm/mm]	<0,001	0,002	0,004
Edényidő [s]	1080	2700	2700
Üzemi hőmérséklet [K]	-220 – 505	-220 – 477	-220 – 477

A táblázat adataiból látszik, hogy a kis sűrűségnek köszönhetően mindegyik megfelelő lehet az eszközhöz, és nem jelent nagy terhet a viselőnek, továbbá a hőmérséklettartományok is megfelelnek erre az alkalmazásra. Zsugorodási értékük elegendően kicsi ahhoz, hogy kis méretű eszközök esetén se okozzon számottevő méretváltozást. Gyárthatósági szempontból az Ecoflex 00-50 edényideje kicsivel haladja túl a minimális időt, viszont az alacsony viszkozitásából adódóan gyorsan lehet végezni az öntést.

Mindhárom anyagból elkészítettem az aktuátorokat, majd a készítés és az utólagos vizsgálatok tapasztalatai alapján választom a legmegfelelőbbet.

4.4. Geometriai kialakítás, méretezés

A korábban említett kritériumoknak való megfelelésben kulcsfontosságú a megfelelő kialakítás és méretezés. A befoglaló méreteket az ujjak méretei behatárolják, de az azon belüli méretezést és kialakítást számtalan verzióval meg lehet valósítani.

A kialakítás módját megszabja a mozgástartomány, mert az ujjak három szabadságfokkal rendelkeznek. Fontos kiemelni, hogy ezen kijelentés és a dolgozati tervezések a hüvelykujjra nem vonatkoznak, annak vizsgálatát és rehabilitációs mozgásának megoldását nem tartalmazzák. Az ujjak egyetlen irányba képesek hajlító mozgást végezni, ezáltal meghatározott az, hogy a tervezett aktuátornak csak az egyik oldalán, egyik felén lehet kamrasort elhelyezni. Több kamrasor vagy több orientációval rendelkező kamrasor esetén a robotikai elem képes lenne más irányú mozgásra, ami az ujjat rendellenes mozgásra kényszerítené. Ezek a mozgások sérülést okozhatnak, ami nem megengedett egy ilyen eszköz esetén.

Az aktuátor tervezése Autodesk Inventor 2020 3D-s szilárdtest modellező CAD szoftverben történik, mely elsősorban gépészeti tervezésre alkalmas. A tervezőprogram kiváló

ennek a megvalósítására, hiszen a 3D tervek mellett műszaki rajzok is készíthetők az elkészült eszközről, valamint a 3D nyomtatáshoz szükséges formátumban is elmenthető a tervezet.

4.4.1. Befoglaló méretek meghatározása

A befoglaló méreteket néhány milliméteres tartományon belüli szűkítik a lehetséges hossz- és szélességméreteket. A méretek meghatározásához a saját ujjaimat és kézfejemet használok referenciaként, ami körülbelül egy S vagy 7-es méretű kesztyűnek felel meg. A méretek kiválasztása úgy történik, hogy ennél kicsivel nagyobb ujjra és kézfejre is használhatóak legyenek, azaz néhány milliméterrel nagyobbra határoztam meg a végleges méreteket.

Az ujjak szélességének méretei azért szükséges pontosan meghatározni és egy maximális értéken belül tartani, mert ellenkező esetben az ujjak összeütköznek, és akadályozzák egymást a mozgásban. Ezen túl fontos az is, hogy a befogadó egységgel fel lehessen rögzíteni őket az ujjakra. A befogadó egységen el kell férnie az összes ujjnak úgy, hogy a kézfejre rögzített eszköz se legyen lényegesen szélesebb a kézfejnél, különben a viselés kényelmetlenné válik és szintén akadályozza a kézfejet a mozgásban. A maximális méretet az ujj szélessége vagy a kézfej szélessége szerint elhelyezhető szélesség közül a kisebb határozza meg.

Mérések alapján:

- Ujjak legszélesebb pontja: 19 mm
- Kézfej legszélesebb pontja: 80 mm

Kézfejre elférő négy ujj maximális szélessége:

$$b_{\max} = \frac{80 \text{ mm}}{4} = 20 \text{ mm} \quad (1)$$

$$19 \text{ mm} < 20 \text{ mm} \quad (2)$$

Ezen reláció alapján a maximális szélességet az ujjak szélessége adja, amely 19 mm.

Az ujjak hosszában kicsivel szélesebb az a tartomány, amelyen belül a méretek mozoghatnak. Ezeket a soft robotikai elemek nem lóghatnak túl az ujj végén, különben a megfogás nem megfelelően, nem a kívánt ujjal történik, hanem az eszközzel. Azonban az eszköz rövidebb sem lehet az ujjaknál, hiszen akkor az utolsó ujjpercet nem mozgatja, ami miatt nem érnék el a kívánt hatást, vagyis a teljes ujj mozgatását. Az aktuátorok rögzítése többféleképp megoldható, ennek köszönhető az, hogy a hosszméreteket rugalmasabban lehet változtatni. Az eszközök alapvetően a kézfej közepe körül vannak rögzítve, nem csak az ujjak hosszáig tartanak. Ennek az oka az aktuátorok elhajlása, mely képes 270° szögelhajlásra. Ha már a kézfejen is rögzítve van az eszköz, akkor az ujjak a kézfejhez képest is képesek elhajlásra, nem csak egymáshoz képest végez mozgást a három ujjperc. Mivel a kézfejen való rögzítés helye változtatható, így az aktuátorok hossza ehhez igazítva módosítható.

Mérések alapján:

- Leghosszabb ujj hossza: 84 mm
- Legrövidebb ujj hossza: 62 mm
- Legnagyobb kézfejközép és ujjtő távolság: 52 mm
- Legkisebb kézfejközép és ujjtő távolság: 35 mm
- Teljes kézfej hossza: 82 mm

Szükséges minimális hossz:

$$l_{\min} = 62 \text{ mm} + 35 \text{ mm} = 97 \text{ mm} \quad (3)$$

Minimális méret alkalmazása a leghosszabb ujj esetén:

$$97 \text{ mm} - 84 \text{ mm} = 13 \text{ mm} \quad (4)$$

Ez a méret a legnagyobb ujj esetén is alkalmazható, mert az ujj hosszánál nagyobb, így marad 13 mm rányúlás a kézfejre a rögzítéshez.

Alkalmazható maximális hossz:

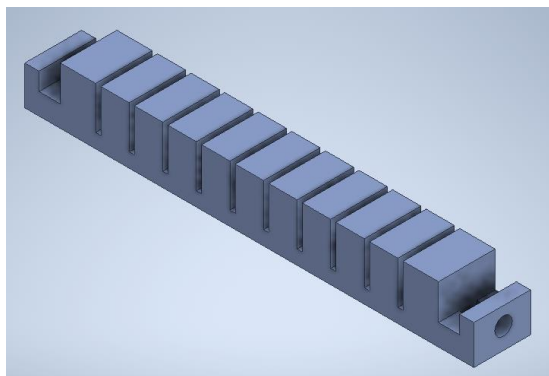
$$l_{\max} = 84 \text{ mm} + 52 \text{ mm} = 136 \text{ mm} \quad (5)$$

Maximális méret alkalmazása a legrövidebb ujj esetén:

$$136 \text{ mm} - 62 \text{ mm} = 74 \text{ mm} \quad (6)$$

A méret a legkisebb ujj esetén is alkalmazható, mert a fennmaradó hossz rögzíthető a kézfejre.

A méretek ellenőrzéséhez a leghosszabb és a legrövidebb ujjak végpontjai közti távolságot mértem le, amely 40 mm, így a minimális és a maximális hossz közötti 39 mm eltérés helytálló.



8. ábra: Aktuátor 3D terve Autodesk Inventorban

A befoglaló magasság egy maximális határértéken belül gyakorlatilag korlátlanul változhat. Ennek az az oka, hogy a működésben nem akadályozza önmagát a különböző magasságméretek miatt. A határértéket, amelyen belül kell maradni a magasság megadásánál, szakirodalmak, valamint egészségügyi alkalmazások tapasztalatai javasolják. Polygerinos és társai (2013) ezt az értéket 25 mm-re határozták. Azért van szükség a határérték megszabására, hogy az eszköz viselése ne legyen kényelmetlen, ne legyen teher a viselőjének. Működési szempontból előnyös a határértéket megközelítő magasságot választani, mert a kamrák magassága befolyásolja a

működést. Minél magasabbak a kamrák, annál nagyobb felületű falakon érintkeznek egymással, így növelhető a hajlásszög és az erőkifejtés azonos nyomásértékek esetén.

A határérték meghatározásához az ujjak magasságát és a 25 mm határértéket vettem alapul. Az ujj magasságát csak kis mértékben haladhatja meg az eszköz, így egy 1,2 szorzószámot használtam a magassághoz.

- Mérés alapján az ujj magassága: 19 mm

Magasságméret határértéke:

$$h_{\max} = 19 \text{ mm} \cdot 1,2 = 22,8 \text{ mm} \quad (7)$$

Mivel a magasságérték nem szigorúan korlátozott, így a kerekítés után 23 mm értéket kapok.

A szakirodalmi elfogadott értékkel összehasonlítva:

$$23 \text{ mm} < 25 \text{ mm}. \quad (8)$$

Ez alapján nem lépi túl a már alkalmasnak bizonyuló szakirodalmi 25 mm magasságot.

Az elkészült 3D terv a 8. ábrán látható. Összefoglalva a kamrasor befoglaló mérettartományai az ujjak és a kézfej méretei alapján:

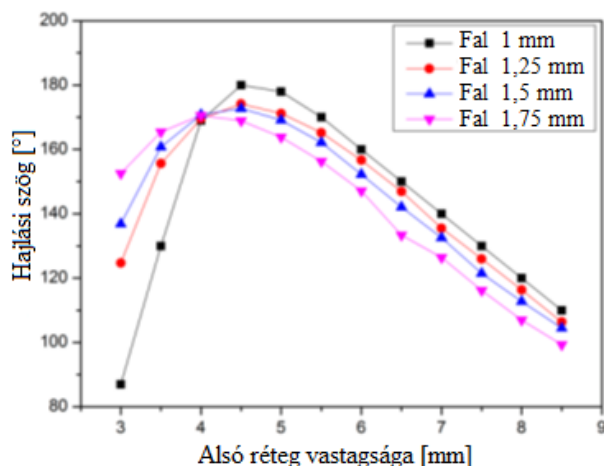
- Hosszméret: 97-136 mm
- Szélességméret: maximum 19 mm
- Magasságméret: maximum 23 mm

4.4.2. Kamrasor külső és belső kialakítása

A kamrasor kialakításától függ az aktuátor viselkedése, ezért különösen nagy hangsúlyt kell fektetni ezen részre. A kamrák alakja és méretei is nagyban befolyásolják az aktuátor viselkedését. Ezen kialakításoknak számtalan kombinációja létezik, melyek mind egy minimális eltérést eredményeznek a terhelésre adott válaszra. Ezen kialakításoknak és méreteknak az optimalizálása egy önálló, nagy témakör, melynek részletezésével ezen munka során nem foglalkozom. A tervezést olyan kutatási eredményekre alapozom, melyek a pneumatikus soft aktuátorok témakörének külön ezen részével foglalkoznak.

A kamrasor kialakításánál Mosadegh és társainak (2014), valamint Polygerinos és társainak (2013) tanulmányait és kísérleti eredményeit veszem alapul az általános összefüggésekben, míg a kamrasor kialakításánál Hu és társainak (2018) erre vonatkozó eredményeit használom. Ezen eredmények korábban említett összefüggéseket tartalmazznak, valamint olyan gyakorlati tapasztalatokat, mely alapján tervezhető egy, az elvárásoknak megfelelően működő aktuátor. A tanulmányban megvizsgálták azokat a paramétereket, amelyek a legnagyobb hatással vannak a hajlásszögre: az alsó réteg vastagságát, a falvastagságot, a kamrák közötti távolságot és a kamrák keresztmetszetének formáját, melynek eredményeit a 9. ábra mutatja.

A tervezést falvastagságok és az alsó rétegvastagság kiválasztásával kezdem, majd a kamrák magasságának és hosszának meghatározásával folytatom.



9. ábra: A fal- és az alsó réteg vastagságának hatása a hajlósszögre (Forrás: Hu et al, 2018)

A diagramról leolvasható, hogy az 1 mm-es falvastagsággal érhető el a legnagyobb hajlítási szög, körülbelül 4,5 mm vastag alj esetén. Mivel ez a falvastagság elegendő, és egyben a leghatékonyabb, így ezt választom a saját aktuátoromhoz. Az alsó réteg vastagságát 4,5-5 mm közötti értékre teszem. Ez függ a pontos öntéstől is, ezért minimális eltérések adódhatnak.

Ezután lehet következtetni arra, hogy a kamrák között mekkora távolság kell ahhoz, hogy képesek legyenek kitágulni, de elegendően elérjék egymás falát. A kutatási anyagban 1 mm – 1,75 mm közötti távolságértékeket vizsgáltak, mert ennél kisebb esetén a kamrák már nyugalmi helyzetben is szinte összeérnek, míg 2 mm-es vagy nagyobb rések esetén a kölcsönhatás minimális lesz, és nem történik meg a hajlás. Megállapítható, hogy a rések és a hajlási szög fordítottan arányosak egymással. Ez alapján én egy köztes értéket, 1,5 mm távolságot választok, mert így kontrollálható az elhajlás nagysága, mégis elegendő.

Az 1 mm falvastagság az érintkező felületek méreteire vonatkozott. A kamra különböző oldalhoz tartozó falai más méretűek, hogy a kamra a számunkra használható felületén, oldalán feszüljön ki jobban. Az 1 mm falvastagság könnyen tágul, mégis kellőképp strapabíró és előállítható öntéssel. Mivel az oldalsó és a felső kamrafalaknak nem szükséges növekedni, így ott anyagvastagság-növeléssel csökkentem ezt. Ezek a falak 2 mm vastagságúak lesznek. A 2 mm vastag falak már nehezebben tágulnak, így a kamrák magasságának és szélességének deformációja nem mérvadó az 1 mm vastag falak tágulásához képest, valamint az ott fellépő terhelés is kisebb lesz.

A kamrák teljes méretének meghatározásához az aktuátor maximális befoglaló méreteiből indulok ki. A kamrák belső és külső keresztmetszete is téglalap, mert egyszerűen kivitelezhető és hatékony működésű.

Az aktuátor maximum szélessége 19 mm lehet. A gyártás során a légmentes illesztéshez szükség lehet arra, hogy az alj szélesebb legyen, így 3 mm biztonsági szélességet rászámolok.

A kamra szélessége:

$$b_{\text{kamra}} = 19 \text{ mm} - 3 \text{ mm} = 16 \text{ mm} \quad (9)$$

A kamra belső üregének szélessége az oldalfalakkal csökken:

$$b_{\text{üreg}} = 16 \text{ mm} - 2 \cdot 2 \text{ mm} = 12 \text{ mm} \quad (10)$$

Az aktuátor magassága 23 mm nagyságig megengedett. Az alsó réteg vastagsága 5 mm, amit le kell vonni a teljes magasságból.

$$h_{\text{kamra.max}} = 23 \text{ mm} - 5 \text{ mm} = 18 \text{ mm} \quad (11)$$

A kamra magasságát ennél kisebb értékre határozom meg, hogy esetleges gyártási hibák esetén se lépje túl a megengedett határértéket. Az egyszerűség kedvéért a szélességgel egyenlővé teszem a magasságot is, így:

$$h_{\text{kamra}} = b_{\text{kamra}} = 16 \text{ mm} \quad (12)$$

A kamra belső üregének magassága a felső oldal vastagságával csökken:

$$h_{\text{üreg}} = 16 \text{ mm} - 1 \cdot 1 \text{ mm} = 15 \text{ mm} \quad (13)$$

A kamrák hosszának meghatározásához nincs kikötés. Ahhoz, hogy a kamrák oldalai egymással megfelelően arányosak legyenek, a kamrák hosszát 8 mm-re definiáltam.

A kamra belső üregének a hossza az érintkező falvastagságokkal csökken:

$$l_{\text{üreg}} = 8 \text{ mm} - 2 \cdot 1 \text{ mm} = 6 \text{ mm} \quad (14)$$

Az utolsó kamrák külső falainak vastagsága több, mint 1 mm, mert ennek már nem kell növekedni, ráadásul ad egy merevséget az eszköznek, mely a rögzítésnél előnyös. Ezeket további 2 mm-rel növelem, így a szélső falvastagság 3 mm lesz.

Ahhoz, hogy a kamrákba a levegő eljusson, szükséges egy olyan csatorna, amely minden kamrához csatlakozik. Ennek az egyik vége zárt, az utolsó kamrában végződik, míg a másik vége biztosít egy külső csatlakoztatási lehetőséget a működtető sűrített levegő számára. A kamrasor alján található csatornának fontos, hogy biztosítsa a levegő útját és ne záródjon el. A gyártás során előfordulhatnak olyan hibák, melyekkel már a tervezéskor számolni kell, így a csatorna szélességét a lehetőlegnagyobbra vettem.

$$b_{\text{csatorna}} = b_{\text{kamra}} = 16 \text{ mm} \quad (15)$$

Magassága kevésbé meghatározott, de figyelembe kell venni, hogy a kamrák akkor működnek a legjobban, ha kevés felületen vannak összeköttetésben egymással. A kamrák magassága 16 mm, melynek körülbelül a 3/4 részének egymástól függetlennek célszerű lenni, így:

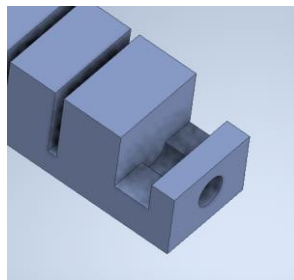
$$16 \text{ mm} \cdot \frac{3}{4} = 12 \text{ mm} \quad (16)$$

12 mm-t szabadon kell hagyni felülről a kamráknak, hogy ne érintkezzenek. A maradék 4 mm áll rendelkezésre a csatornának és a kamrák összeköttetésének. Mivel a falvastagságnak elegendő 1,5 mm, így ezt hagyom kisebbre, és a csatorna magasságának biztosítok helyet.

$$h_{\text{csatorna}} = 4 \text{ mm} - 1,5 \text{ mm} = 2,5 \text{ mm} \quad (17)$$

Ez a méret elegendő ahhoz, hogy a levegő megfelelő mennyiségben és nagy sebességgel eljusson a kamrákhoz.

A levegőbevezetéshez szükség van egy nyílásra, amely az első kamrát vagy a csatornát köti össze forrással. A levegő bejuttatására egy 4 mm nagyságú csövet választom, mert ezzel biztosítható a szükséges levegőmennyiség és nyomás. További előnye még, hogy elterjedt, ezáltal könnyen beszerezhető, valamint a rendelkezésemre álló eszközökkel kompatibilis, így nincs szükség átalakításra. A bemenő furatot utólag, az összeállításkor helyezem el az első kamrán. A csőnek egy mélyedés adja meg a pontos helyét, amely a pozicionáláson kívül a biztos rögzítést is elősegíti.



10. ábra: Cső helyének kialakított mélyedés és befejező elem

Az eszköz végeire szükséges olyan szakaszt tervezni, amellyel rögzíthető lesz az eszköz. Ehhez én az anyag vékony meghosszabbítását választom, amelyet egy kamrákkal egy magasságú befejező elem zár. A kis vastagságú rész átfogható tépőzárral vagy egyéb szorítást végző rögzítéssel, mely ezzel a megoldással minden irányba rögzíti az eszközt. A magas befejező elem biztosítja az ujjak irányába történő elcsúszás elkerülését. Ezeknek a mérete tetszőlegesen adható meg, így minimálisra alakítottam ki ezeket. Mindkét végén 10 mm hosszú a rögzítő rész, ebből 6 mm, ami a tépőzár vagy más szalag helyét biztosítja, a maradék 4 mm a teljes magasságú zárás. Ennek kialakítását a 10. ábra mutatja.

Végző lépés a kamrák számának meghatározása, azaz, hogy hány ilyen kamra fér el abban a hossztartományban, amelyet a befoglaló méreteknél megadtam. A kamrák számánál figyelembe kell venni a két zárószakaszt, ezáltal nem lehet a teljes hosszon kamrákat alkalmazni, továbbá a két utolsó kamra megvastagított falát.

Mivel az aktuátor működéséhez annál kisebb nyomás szükséges, minél több a kamrák száma, így a maximális lehetséges kamraszámot választom. Ehhez a megengedhető legnagyobb hosszértékből indulok ki.

A kamrák számát n -nel jelölöm.

$$l_{\max} = n \cdot l_{\text{kamra}} + (n - 1) \cdot l_{\text{rés}} + 2 \cdot l_{\text{utolsó.kamra}} + 2 \cdot l_{\text{záróelem}} \quad (18)$$

$$136 \text{ mm} = n \cdot 8 \text{ mm} + (n - 1) \cdot 1,5 \text{ mm} + 2 \cdot 2 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm} \quad (19)$$

$$136 \text{ mm} = n \cdot 9,5 \text{ mm} + 22,5 \text{ mm} \quad (20)$$

$$113,5 \text{ mm} = n \cdot 9,5 \text{ mm} \quad (21)$$

$$n = 11,94 \quad (22)$$

Maximum 11,94 kamra fér el ezen a hosszon, azaz 11 teljes kamra. A kamrák száma $n = 11$.

A kialakult méretek:

- Kamra külső magassága: 16 mm
- Kamra külső szélessége: 16 mm
- Kamra hossza: 8 mm
- Kamra oldalsó falvastagsága: 2 mm
- Kamra felső falvastagsága: 2 mm
- Kamra egymáshoz feszülő falainak vastagsága: 1 mm
- Kamrák közötti rés hossza: 1,5 mm

Ezek alapján az aktuátor befoglaló méretei:

- Hossza: 129 mm
- Szélessége: 18 ± 1 mm, függ az öntéstől
- Magassága: $20,5 \pm 0,5$ mm, függ az öntéstől

$$l = 11 \cdot 8 \text{ mm} + (11 - 1) \cdot 1,5 \text{ mm} + 2 \cdot 2 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm} = 127 \text{ mm} \quad (23)$$

5. BEFOGADÓ EGYSÉG TERVEZÉSE

A rehabilitációs eszköz nem csak az aktuátorból áll, hiszen az önmagában egy egyszerű elhajlásra képes. Mivel az ujj mozgatása a cél, így szükséges megoldani az ujjakhoz való rögzítést, hogy az a saját mozgása közben a kívánt ujjat is magával együtt mozdítsa, és azzal azonos mértékben deformálja. Az eszközt a két végén kell rögzíteni, amelyek a kéz esetén az ujjvégnek és a kézfejnek felelnek meg. Az ujjak végéhez történő rögzítés esetén nem lehetséges merev csatlakozást alkalmazni, mert az eszköz az elhajlása közben egy kis mértékű hosszváltozást is elszenved. A hajlítást gátolná egy merev eszköz, mely az ujj teljes hosszában végigkíséri az eszközt a rögzítési pontok között. Ha a két csatlakoztatási pont közötti összeköttetés képes elhajlásra például csuklópontok segítségével, akkor sem biztosított a hosszváltozás miatti távolság változtatása. Ezek miatt a megvalósítás során egymástól független rögzítési pontokat használok az aktuátor rögzítésére. Az ujjak végén egy egyszerű tépőzárral történő fixálást alkalmazok. Ez elegendő mozgásteret biztosít az eszköznek, mégis stabilan a

helyén tartja azt, valamint kényelmi szempontból is előnyös, hiszen állítható a szorítás mértéke, és gyakorlatilag minden méretű ujra rögzíthető.

A kézfejen való rögzítés több tervezést igényel, mert úgy kell rögzíteni egymás mellett az eszközöket, hogy azok ne akadályozzák egymást, valamint ne mozduljanak el terhelés hatására. Ehhez egy befogadó egységet készítek, mely képes ezeknek megfelelően fixálni az eszközt az ujjakon.

5.1. Befogadó egységgel szemben támasztott követelmények

A befogadó egységre hasonlóan szigorú szabályok vonatkoznak, mint az aktuátorra a betöltött funkció és az emberi környezet miatt.

Általánosan megfogalmazható követelmények:

- Illeszkedik a kézfejre
- Nem akadályozza a kézmozgást
- Egy tartományon belül állítható méretű, testre szabható
- Stabílan rögzíthető a kézhez, nem mozdul el
- Tömege nem nagy, nem terheli túl a kézfejet
- Könnyen és gyorsan eltávolítható a kézfejről
- Ellenáll az őt érő erőhatásnak
- Rögzíthetőek hozzá a soft robotikai elemek

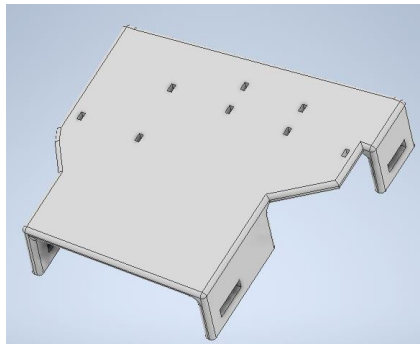
A követelményeknek való megfelelés érdekében egy két részből összeálló befogót készítek az eszközhöz. Egyik része egy merev vázú tartó, melyhez stabilan rögzíthetőek a soft aktuátorok. Ez adja a vázát az egységnek, mely képes ellenállni az erőhatásoknak a terhelés közben. Mivel ez a váz csak a kézfej egy részével érintkezik, és nem fogja körül a teljes kezet, így nem akadályozza a természetes mozgást. A másik része egy tépőzár szalag, amellyel a váz a kézhez rögzíthető. Ennek köszönhetően az eszköz egyszerűen és gyorsan eltávolítható a kézről, ami az emberközeli biztonságos használat szempontjából kritikus. Az állítható méretű tépőzárral testre szabható, több méretű kézfejre is rögzíthető, valamint kényelmesebb viseletet biztosít.

5.2. Geometriai kialakítás, méretezés

A tervezés során egy alap elképzelésből indulok ki, azaz milyen alakzattal lehetne megfelelni az elvárásoknak. Ahhoz, hogy ne akadályozza a kézfejet a mozgásban, a lehető legjobban illeszkednie kell a kézfejhez, rásimulni arra, és méreteiben sem lehet lényegesen nagyobb. A kézfej formája leegyszerűsítve egy kis magasságú téglatest, valamint a csuklótól az alkar felé irányuló szakasz is hasonlóan értelmezhető, de kisebb alapterülettel rendelkezik. A két azonosmagasságú téglatest egymáshoz csatlakozik, melynek felületére egy palást illeszthető.

Ezt a palástot kiindulási alapként használom. Ez a palást egy egyszerű lapos elemnek felel meg, melynek a kézfej két oldalsó felére vannak támasztó oldalai. A lapos felület a kézfejen található, felfekszik a felső felületre, erre vannak rögzítve az aktuátorok. Az erre merőleges, kézfej oldalaihoz igazodó falak célja, hogy az eszközt oldalirányú mozgás ellen biztosítsák, valamint pozicionálják az eszközt hosszirányba is. Ez a hüvelykujjnak hagyott résekkel lett megoldva, így az eszköz nem tud jelentősen elmozdulni az ujjak irányába. Az oldalsó támaszfalak célja továbbá, hogy helyet adnak a tépőzárnak, a rajtuk lévő réseken átbújtatva a tenyéren és a csuklón átvezetve rögzítik az eszközt a kézhez. Az így kialakult tervet a 11. ábra mutatja.

A lapos felületű kialakítás nem illeszkedik pontosan a kis görbülettel rendelkező kézfejre. Ennek ellenére nem használok hajlított befogadót, mert ez esetben az aktuátorok felületei felfeksznek a befogadó felületére, ezáltal csavarodott állapotba kerülnek az emberi ujjak állásához képest. Ez megnehezíti az ujjak végén történő rögzítést, valamint helytelen irányba hajlítja az ujjat, ezek miatt ez nem jó megoldás. A sík felületre a kézfej felőli oldalon utólag lehet szivacsos anyagot ragasztani, így a sík felület igazítható a kézfejhez, ráadásul viselése is kényelmesebb.



11. ábra: Befogadó egység 3D terve Autodesk Inventorban

A pontos méretek kialakításánál a legfőbb szempont, hogy a befogadó egység a lehető legkisebb legyen, hiszen így akadályozza a legkevésbé a mozgást, és rendelkezik a legkisebb tömeggel. Ehhez a kézfej méreteit mérem le, majd ezeket az értékeket használom fel a méretezéshez.

A szélesség minimális méretét az aktuátorok szélessége határozza meg, hiszen el kell férni egymás mellett a négy eszköznek. Az eszközök a lapos felülethez kábelkötegelővel vannak rögzítve. Ennek az az oka, hogy egyszerűen beszerezhető, alkalmazása nem igényel különleges tervezést és kialakítást, szükség esetén oldható, mégis megbízhatóan biztosítja a kapcsolatot. Mivel alapvetően az ujjak leszerelhetősége a befogóról nem szempont, így nem szükséges olyan könnyen oldható kötést alkalmazni, mint a tépőzár. A szélesség méreteit a minimálisan szükségesre határozom meg.

Kialakítás és a mérések alapján:

- Egy ujj szélessége: 19 mm
- Kézfej legszélesebb pontja: 80 mm

Ujjaknak szükséges szélesség:

$$b_{\text{ujjak}} = 19 \text{ mm} \cdot 4 = 76 \text{ mm} \quad (24)$$

Mivel az öntéssel adódhatnak minimális hibák, minden ujjnak 1 mm-re több helyet biztosítok:

$$b_{\text{ujjak2}} = 20 \text{ mm} \cdot 4 = 80 \text{ mm} \quad (25)$$

A szélesség méreteinél helyet kell hagyni az ujjak között a kábelkötegelőnek. Ezeknek a helyigénye akkor a legkisebb, ha az egymás melletti ujjakhoz egy sávban vannak elhelyezve a kötegelők. Ezt úgy lehet megvalósítani, hogy az aktuátorokat egymáshoz képest hosszirányban eltoljuk, így a rögzítések helyei egy vonalba esnek, és nem foglalnak el kétszeres helyet.

- Kábelkötegelő szélessége: 1 mm
- Rögzítő sávok száma: 3 ujjak között, 2 a két szélső helyen

$$m = 3 + 2 = 5 \quad (16)$$

A befogadó egység és a kábelkötegelő esetleges gyártási hibáit is figyelembe veszem, így annak érdekében, hogy a kötegelő biztosan befűzhető legyen a hézagba, 1,5 mm szélességű furatot hagyok.

Kábelkötegelő helyének szükséges szélesség:

$$b_{\text{kötegelő}} = 1,5 \text{ mm} \cdot 5 = 7,5 \text{ mm} \quad (27)$$

Teljes minimális szélesség:

$$b_{\text{min}} = b_{\text{ujjak2}} + b_{\text{kötegelő}} = 80 \text{ mm} + 7,5 \text{ mm} = 87,5 \text{ mm} \quad (28)$$

A kábelkötegelők két szélső helye mellett kell maradni anyagvastagságnak, hogy egy-egy furat legyen a széleken, valamint, hogy legyen lehetőség lekerekítést végezni a kézzel való érintkezés miatt. Ehhez a legalább a furattal megegyező anyagszélesség szükséges. A kábelkötegelőnek szánt hézag 1,5 mm, így azon túl is legalább 1,5 mm anyagszélesség marad.

$$b = b_{\text{min}} + 2 \cdot 1,5 \text{ mm} = 87,5 \text{ mm} + 3 \text{ mm} = 90,5 \text{ mm} \quad (29)$$

A kezelhetőség érdekében egész számra növelve adom meg a szélességet, így az egyik szélén az anyagszélesség 2 mm lesz.

$$b_1 = b_{\text{min}} + 1,5 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = 87,5 \text{ mm} + 1,5 \text{ mm} + 2 \text{ mm} = 91 \text{ mm} \quad (30)$$

A kézfej legszélesebb pontjának méretével összehasonlítva:

$$91 \text{ mm} - 80 \text{ mm} = 11 \text{ mm} \quad (31)$$

11 mm-rel szélesebb a befogadó egység a kézfejnél, de megfelelő, mert ennyit még képes rögzíteni a tépőzár, de mégis alkalmas más méretű kézfejre is.

A csukló szélessége jelentősen kisebb a kézfej szélességénél, így ott kisebb szélességet kell alkalmazni a pontosabb illesztés érdekében. Az érték meghatározása a csukló szélessége alapján történik:

- Csukló mért szélessége: 53 mm

A csuklónál nincs egyéb eszköz, amelynek a méretét figyelembe kellene venni, így úgy növelem meg a méretet, hogy nagyobb méretű csuklóra is megfelelő lehessen.

A felfelé kerekített méret a csuklónál: 60 mm.

Egyetlen szempont az volt, hogy a csuklótól való eltérése ne legyen nagyobb, mint amennyivel a kézfejnél található rész szélesebb a kézfejnél, azaz 11 mm-rel.

$$60 \text{ mm} - 53 \text{ mm} = 7 \text{ mm} \quad (32)$$

7 mm-rel nagyobb a csuklónál az eszköz, így nem haladta meg a 11 mm-t.

A hossz méret meghatározásánál olyan értéket kell megadni, amellyel több ponton, megbízhatóan rögzíthető a kézre az eszköz. A befogadó egység ujjakhoz való távolságát az aktuátorok rögzítési pontjai határozzák meg, ugyanis elegendő ezen pontoknál kezdődnie az egységnek, az ujjak felé történő méretnövelés nem indokolt.

A leghosszabb ujjon lévő eszköz rögzítése van legközelebb az ujjakhoz, így annak a helye határozza meg a kezdővonalat.

- Leghosszabb ujj hossza: 84 mm
- Teljes kézfej hossza: 82 mm
- Aktuátor hossza: 129 mm

A leghosszabb aktuátor kézfejre fekvő része:

$$129 \text{ mm} - 84 \text{ mm} = 45 \text{ mm} \quad (23)$$

Az eszköz végétől a rögzítési pont 8 mm távolságban van, így:

$$45 \text{ mm} - 8 \text{ mm} = 37 \text{ mm} \quad (34)$$

37 mm távolságban van a rögzítési pont az ujjtőtől.

Mivel a befogadó egységet a kézfejre is rögzíteni kell a csukló mellett, így azt a hüvelykujjnak az ujjak felőli oldalán teszem meg a tenyéren keresztül. Ehhez az kell, hogy a befogadó a hüvelykujj elé érjen.

Mérés alapján a hüvelykujj távolsága az ujjtőtől: 36 mm

A rögzítés helyének 15 mm hosszúságot biztosítok, mert egy tépőzár szalagjának ez elegendően széles. Így az eszköz kezdőpontja az ujjtőtől:

$$l_{\text{kezdővonal}} = 36 \text{ mm} - 15 \text{ mm} = 21 \text{ mm} \quad (35)$$

A kéztőtől való 21 mm kezdővonal megfelelő a 37 mm távolságban lévő ujjrögzítésnek is.

Az aktuátorok rögzítési helyei egymástól eltolva vannak, mert gazdasági okokból minden aktuátor egyforma, így az ujjak hosszának különbségét az eltolt rögzítési helyekkel lehet kompenzálni. A hosszméretnél alapvető az, hogy az összes eltolt aktuátor elférjen a lapos felületen. Ezek a rögzítési pontok elférnek a kézfej területén, de a biztos rögzítés miatt a befogadó egységet egészen a csuklóig hosszabbítom meg.

A befogadó egység a kiindulástól a teljes kézfejen végignyúlik, majd a csuklón folytatódik:

$$l_{\text{kézfej}} = l_{\text{kézfej}} - l_{\text{kezdőpont}} = 82 \text{ mm} - 21 \text{ mm} = 61 \text{ mm} \quad (36)$$

A csuklóra való rögzítésnél nincs nagy kikötés, tetszőlegesen változtatható. Figyelni kell, hogy legalább egy tépőzár szélessége elférjen rajta, és ne akadályozza a kezet a mozgásban. Erre én $l_{\text{csukló}} = 34 \text{ mm}$ hosszúságot hagytam a csuklón.

$$l_{\text{befogadó}} = l_{\text{kézfej}} + l_{\text{csukló}} = 61 \text{ mm} + 34 \text{ mm} = 95 \text{ mm} \quad (37)$$

A magasság méret kevésbé meghatározható a befogadó esetében. Mivel a fő része egy síkfelület, így ott a magasság csak az anyagvastagsággal egyenlő. Az oldalsó támasztó elemek magassága mérésekből és közelítésekből adható meg, de kevésbé behatárolt, mint a többi méret. Egyetlen kritérium, hogy a kézfej magasságánál, vagyis vastagságánál ne legyen nagyobb méretű egyik oldalsó fal sem.

Mérések alapján:

- Kézfej legkisebb magassága: 29 mm
- Csukló magassága: 39 mm

A csuklónál történő stabil rögzítéshez az oldalfalaknak a csukló magasságának legalább a feléig kell leérni, így:

$$h_1 = \frac{39 \text{ mm}}{2} = 19,5 \text{ mm} \quad (38)$$

$$19,5 \text{ mm} < h_{\text{befogadó}} < 29 \text{ mm} \quad (39)$$

A magasságot a két érték közé, $h = 24 \text{ mm}$ -re határoztam meg.

A végső befoglaló méretek:

Anyagvastagság: 4 mm

- Hossza: 95 mm
- Szélessége: $91 \text{ mm} + 2 \cdot 4 \text{ mm} = 99 \text{ mm}$
- Magassága: 24 mm

5.3. Anyagválasztás

A befogadó egység anyagának kiválasztásakor olyan anyagot kell választani, amely elegendően ellenálló az őt érő erőhatásnak, valamint gyárthatósági szempontból is kivitelezhető. Ennek elkészítésére 3D nyomtatással került sor, ami PLA anyaggal történt. Azért választottam a 3D

nyomtatás technológiáját, mert egyedi alkatrészek is rövid időn belül, egyéb szükséges eszköz nélkül előállíthatók. A nyomtatásnak nagy előnye a 0,03 mm-es pontosság, valamint az, hogy a nyomtató és a szükséges anyag is a rendelkezésemre áll.

A PLA rideg, hőre lágyuló műanyag, amely elegendően szilárd ahhoz, hogy az aktuátorokat rögzíteni lehessen hozzá. Mivel a 3D nyomtatással lehetőség van a test nem teljes kitöltésére, így egy kis tömegű eszközt kapunk, így megfelel annak a kritériumnak, mely szerint tömege által nem lehet megterhelő a viselője számára. A PLA sűrűsége kicsi, körülbelül $1,25 \text{ g/cm}^3$, ami szintén hozzájárul a kis tömeghez. Húzószilárdsága 60-65 MPa, amit az aktuátor által kifejtett terhelés meg sem közelít. Ezek alapján alkalmasnak tartom az eszköz elkészítésére.

6. ESZKÖZ ELKÉSZÍTÉSE

A megtervezett soft aktuátor és a hozzá tartozó befogadó egység megtervezése után a kivitelezésre, elkészítésre kerül a sor. A korábban említetteknek megfelelően a befogadó egység 3D nyomtatással készül, míg a soft aktuátoroknak a formába öntési technológiát alkalmazom. Az öntési módszer előnyei, hogy többször felhasználható a forma, amely alapként szolgál, valamint ennek segítségével méretek állandóak, nincs eltérés ezek között. Az önthető szilikon anyagok kellően rugalmasak ilyen alkalmazás esetén. Ezzel szemben a 3D nyomtatott aktuátorok kisebb térfogatváltozásra képesek és ridegebbek. A 3D nyomtatással szemben az öntés költségei is kedvezőbbek egészen addig, amíg nem szükséges formai változtatás. Abban az esetben ugyanis egy teljesen új öntőforma létrehozása szükséges.

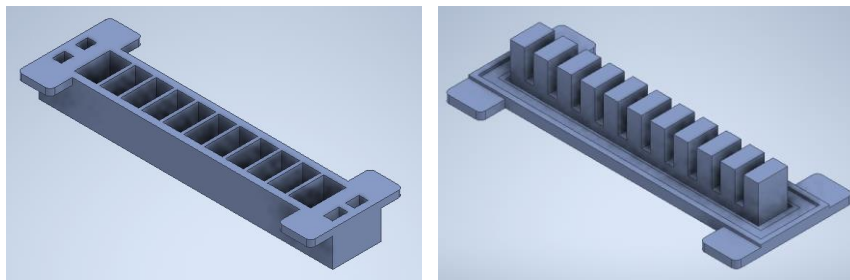
6.1. Soft aktuátor elkészítése

A soft aktuátor formába öntéssel készül el, melyhez első lépés az öntőforma elkészítése. Az aktuátor üreges kialakítása nehezen megoldható. A kamrák öntésére több verzió alkalmazható:

1. A kamrasor és az aktuátor aljának öntése két külön részletben történik, majd a megszilárdulásuk után egy újabb réteg szilikonnal ragaszthatók össze. Ennek előnye, hogy pontosan, hiba nélkül kialakítható a kamrasor, hátránya, hogy a két rész egyesítése nem feltétlen sikerül tökéletesen, ami légzárási hibákat okozhat.
2. A kamrasor egy olyan anyagból előállítható, amely hő vagy víz hatására oldódik. Ebben az esetben az öntés egy lépésben történik, és a kialakított kamrasort behelyezik a folyékony állapotú szilikonba. A megszilárdulás után a kamrasor anyaga hőközléssel vagy vízzel kioldható a szilikongumiból, így a kamrasor üregei kiürülnek. Előnye, hogy nincsenek hézagok és helytelen záródás, hátránya, hogy a

kamrasor anyagának és a kioldás folyamatának tökéletesnek kell lenni, különben maradnak elzáró anyagok a kamrákban.

Az öntési opciók közül az elsőt, a két lépésben történő öntést alkalmazom. Ehhez olyan öntőformákra van szükség, amelyek külön önthetővé teszik az alj részt és külön a kamrasort. A kamrasor formája két részből áll össze, az egyik a belső üregességet biztosítja, a másik a kamrák egymástól való elkülönítését. Az Autodesk Inventor 2020 szoftvere tartalmaz olyan parancsot, amely egy testet kijelölve képes annak inverzét, negatívját megalkotni. Ennek a segítségével készítettem el az öntőformák terveit, mert így az eredeti formából lehet kiindulni, és biztosan nem lesz mérethiba vagy helytelen kialakítás. Az öntőformákat 3D nyomtatással készítettem el, hiszen ez a technológia rendelkezésemre állt, valamint az 5.3. pontban tárgyalt tulajdonságainak köszönhetően alkalmas egy öntőforma kellően pontos elkészítésére. A PLA anyagú forma elegendően szilárd arra, hogy öntőformára alkalmas legyen. Az alsó forma tulajdonképpen egy téglatest, míg a kamrasor két öntőformája a 12. és 13. ábrán látható.



12. ábra: Kamrasor öntőformájának 3D terve



13. ábra: Kamrasor 3D nyomtatott öntőformája

6.1.1. Formába öntés folyamata

Az öntőformák elkészítése után az öntést végzem el a 4.3.3. bekezdésben felsorolt anyagokkal. Az öntés első lépéseként a formákat formaleválasztó spray-vel fújtam le, így a megszilárdult szilikongumi könnyebben elvált a formától. Az anyagok kimérését mérleggel végeztem a leírásban megadott arányok szerint. Először a folyékony szilikont mértem ki, hiszen ez határozta meg a kevert anyagmennyiséget. Ezután jött hozzá az edzőanyag, melyet kisebb

arányban kellett hozzáadni az anyaghoz. A keverést 2-3 percig kell végezni, hogy a teljes homogenitást elérjük. Az anyagok keverésénél figyelni kell arra, hogy a keverőedény faláról és aljáról rövid időnként lehúzzuk az anyagot, és azt is homogenizáljuk. A keverést fa anyagú nyelvlapoccal végeztem, amelyet az orvoslás területén használnak leggyakrabban.

A szilikon anyagok leírásaiban szerepel egy javaslat a bekevert anyag vákuumozására a formába öntés előtt vagy után. Ennek az a célja, hogy a keverés közben kialakult látható és mikroméretű légbuborékokat eltávolítsa az anyagból, így ne legyen lyukacsos az öntött eszköz. A vákuumozáshoz vákuumkamrát szokás használni, mely egy légmentesen záró tartály, amiben a vákuumozni kívánt anyagot lehet elhelyezni. A tartályban lévő levegő kiszívásával, és ezáltal a nyomás csökkentésével vákuumot lehet képezni a kamrában. Az első öntésnél nem állt rendelkezésemre vákuumkamra, így egy kevésbé hatékony, manuális megoldással igyekeztem eltávolítani a légbuborékokat. A folyékony szilikont vékony sugárban öntve a légbuborékok jelentős része kipukkad, ezzel eltávolítható az anyagból. Az első ilyen öntésnél háromszor öntöttem át vékony sugárban az anyagokat mielőtt a formába töltöttem. Ez a megoldás ugyan javított a légbuborékok arányán, mégsem távolította el őket elegendő mértékben, és az elkészült eszköz lyukacsos lett. Ezzel bebizonyosodott, hogy a vákuumkamra használata szükséges a megfelelő minőségű soft aktuátor előállításánál.

A második öntéstől kezdve rendelkezésemre állt egy épített vákuumkamra. Ez a berendezés ugyan még tesztelés alatt áll, mégis tökéletesen kielégítette az elvárt igényeket. A nyomás folyamatos csökkentésével a folyékony anyag felszínére kerültek fel a légbuborékok, melyek ott megsemmisültek, és a folyamat végére szinte tökéletes buborékmentes anyagot kaptam.

A két aktuátor közötti különbség a 14. ábrán látható.



14. ábra: Vákuumozott és vákuumozás nélküli szilikonok összehasonlítása

A lehető legjobb légtelenítési eljárás után az öntés volt a következő lépés. A kamrasor két formája úgy lett kialakítva, hogy illeszkedjenek egymásba, így az öntés közben a szilikon nem folyt ki belőle az illesztésnél. A szilikonok viszkozitásából adódóan a mérőedényből közvetlen

a formába öntés csak az Ecoflex 00-50 esetén volt alkalmazható, mely könnyen befolyt a keskeny résekbe is. A Mold Max 30 és 40 esetén orvosi fecskendőt használtam, hogy a kamra sort feltöltssem. Ezzel irányíthatóbbá vált az öntési folyamat, az anyagmennyiség és a kívánt folyási irány szabályozhatóbb. Miután a kamrák megteltek az anyaggal, néhányszor megütöttem őket, ezzel segítve a terülést, valamint az esetleges öntés közbeni zárványok felszínre kerülését. Miután a kamrák elkészültek, szorítócsipesszel fogtam össze a forma két részét, ezzel biztosítva, hogy a kötés során se kezdjen el kiszivárogni a folyékony szilikon a réseken. Az alj öntése ennél egyszerűbb feladat, hiszen a fecskendő segítségével egyenletesen el lehet oszlatni az anyagot a formában, továbbá a terülésének köszönhetően képes vízszintes felszínre terülni a formában.

A kötési idő az Ecoflex 00-50 esetén 3 óra, míg a Mold Max szilikonoknak 24 óra szükséges ehhez. A kötés után eltávolítottam a szorítócsipeszt, majd kivettem a szilikongumikat a formából. A következő lépés egy saját megoldás, melyet a szakirodalmak másképp készítenek. A levegő bejuttatásához szükséges csőnek helyet kell hagyni az aktuátoron. Az utólagos, teljes aktuátoron történő fűrés bizonytalan megoldás, mivel nem tudjuk megtámasztani az anyagot, így esetleg tovább csúszhat a szűrőeszköz, megsértve ezzel a kamrafalakat vagy az aljat. Továbbá kívülről csak körülbelül lehet meghatározni, hogy a csatornasor hol helyezkedik el, és hova kell készíteni a furatot. Ezen hibák kiküszöbölésére a lyukat a két kiöntött fél egyesítése előtt készítem el. Eleinte oszlopos fűrógépet használtam, de ennek az anyagnak a pontos furatolására nem alkalmas. A megfelelő eszköz egy bőrlukasztó, melynek méretét úgy állítom be, hogy a légbevezető 4 mm-es cső szoruljon benne, így a lyuk 3 mm átmérőjű lett. A bőrlukasztó egyszerűen pozícionálható, pontos furatot készít, így megfelel az készítésére.

Miután a furat elkészült, a kamrasor és az alj egyesítését kell megtenni. Ezt a megegyező anyagú szilikonnal készítettem. Az alj részt visszahelyezem a formába, majd egy újabb kikevert adag szilikonból helyezek rá vékonyréteget. A túl sok anyag használata elzárhatja a csatornát, és működésképtelenné teszi az eszközt. Miután megfelelő vastagságú a szilikonréteg, belehelyezem a kamrasort úgy, hogy az üregeket nem zárom el a még folyékony anyaggal, azaz nem fejték ki rá nagy erőt. Ennél a lépésnél a szélek megfelelő beépülésére, záródására kell figyelni, különben a kamrák nem lesznek zártak. A szélek megerősítése kívülről is lehetséges. A kamrasorra egy kis eszközt helyezek, ami minimálisan nyomja az eszközt az aljhoz, így biztosan nem válik el az aljtól a kamrasor szilárdulás közben. A kötési idő letelése után az aktuátor eltávolítható a formából, melynek eredményét a 15. ábra mutatja. A csővezeték behelyezése után tesztelhető, hogy légmentesen zár-e az eszköz. A kisebb hibákat utólagos javítással meg lehet oldani, kis mennyiségű szilikon kenésével a hiba helyére.



15. ábra: A háromféle szilikonból elkészült aktuátorok: Mold Max 30, Mold Max 40, Ecoflex 00-50 (balról jobbra)

6.1.2. Kétféle megoldási lehetőség

Az aktuátorok elkészítése során kétféle megoldás kipróbálása történt meg. Szakirodalmi ajánlások szerint az alj részre még a kötés előtt célszerű egy keskeny papírréteget elhelyezni, amely egy nyúlásra nem képes réteggént van jelen. Erre azért van szükség, mert a kamrákat összekötő légcsatorna maga is egy kamraként működik, és a nyomás növekedésének hatására deformálódik. Ekkor a csatorna az aktuátor alsó felén térfogatnövekedést szenved el, és kidudorodik. Ez egyrészt szükségtelen, így a felesleges alakváltozással csökkenti az eszköz hatásfokát, másrészt a csatorna maga is megnyúlik, így hosszirányú váltoásokat is előidézik a robotikai elemen. Az elhajlást továbbá segíti, ha az alj nem képes nyúlni, csak hajlani, így biztosan a legnagyobb hajlásszög érhető el az eszköz esetén. A szakirodalmi ajánlások alapján elkészítettem ilyen eszközt is. Az alj részbe még a megszilárdulás megkezdődése előtt egy papírlapot helyeztem a szilikon felületre, ami a kötés során az anyaggal egyesült.

Az aktuátor tesztelése során gyorsan kiderült, hogy ez a megoldás nem állja meg a helyét, ugyanis néhány, körülbelül 10-15 terhelés után a papírréteg elvált a szilikongumitól. Ez azt jelentette, hogy az alj papírral együtt levált az aktuátor alsó feléről, vagy ugyan nem vált le teljesen, de az eszköz belsejében különváltak, ezáltal egy különálló csatorna keletkezett. Ez azért nem előnyös, mert az alsó réteg így ugyanúgy kidudorodik működés közben, és rosszabb esetben leszellőzni se képes a túlnyomás megszüntetése után. Az az aktuátor, amelyikről az alj levált a papírral együtt, még működőképes maradt, hiszen az két öntés összeragasztásakor keletkezett réteg még megmaradt. Ezen az eszközön végeztem szemrevételezést, és összehasonlítottam a korábbi papírral történő működését a papírmenteshez képest. A megnyúlás és a hajlásszög között jelentős eltérés nem tapasztalható.

Ekkor elkészítettem egy olyan aktuátort, melyben nem alkalmaztam papírréteget. Az eszköz megfelelően működött, és elegendő alsó vastagsággal nem szenved térfogatváltozást a csatornasor, mert a kamrák 1-2 mm-es falvastagságához képest a 4-5 mm vastag alj nehezebben deformálódik. Az összeillesztés és a megfelelő, tartós működés érdekében a papírréteg használatát nem alkalmazom.

Az Ecoflex 00-50 szilikon a megszilárdulás után is olyan lágy maradt, hogy erre az alkalmazásra nem alkalmas, mert már nagyon kicsi nyomáson is nagy térfogatváltozást szenved el. Ebből kifolyólag a továbbiakban csak a másik két anyaggal foglalkozok.

6.2. Befogadó egység elkészítése

A befogadó egység elkészítése kevesebb időt igényel. A megalkotott 3D tervezetet az Autodesk Inventor segítségével olyan fájlformátumba kell elmenteni, amelyet képes a 3D nyomtató lekezelni. A nyomtatás beállításait egy szeletelőprogramban tehetjük meg, ahol beállítható többek között a kitöltés aránya is. Miután a programmal elvégeztük a szükséges beállításokat, a nyomtató kezdheti a nyomtatást. A fájlt egy USB csatlakozáson keresztül juttatjuk el hozzá. A nyomtatásnál az elején figyelni kell arra, hogy az első réteg megfelelően letapadjon a felületre, így nem lesz görbült az alkatrész. Ezután a nyomtató végzi az elkészítést, aminek az eredménye a 16. ábrán látható.



16. ábra: Az elkészült befogadó egység

7. MÉRÉSEK ÉS EREDMÉNYEK

A mérések és azok eredményeinek feldolgozása, kiértékelése szükséges részét képezi a tervezési és fejlesztési folyamatoknak. Az elkészült aktuátorok működéséről akkor lehet pontos képet kapni, ha méréseket végzünk rajtuk. Erre azért van szükség, hogy igazoljuk, vagy épp megcáfoljuk a korábbi követelményeknek való megfelelést. A mérések típusát és folyamatát ahhoz kell igazítani, hogy milyen információkra van szükség az eszközt illetően, és hogyan

lehet ezen értékeket hitelesen mérni. A követelmények az eszköz tömegével, kialakításával, szükséges nyomásértékével, megengedhető nyomásértékével, deformációjával, hajlásszögével és erő kifejtésével kapcsolatosak.

A vizsgálatoknál a szükséges és alkalmazott nyomásértékeket bar mértékegységben adom meg, mert ez elterjedtebb a pneumatika terén, valamint a nyomásmérő berendezések is bar értékben jelzik a nyomást. ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$)

7.1. Megfelelőséget ellenőrző vizsgálatok

A kialakítás szemrevételezéssel vizsgálható, melynek során ellenőrizni kell, hogy az aktuátor illeszkedik-e az ujjakhoz, méretei nem lépik-e át a kívánt határértékeket és rögzíthető-e a befogadó egységhez. A befogadó egység esetén a kézfejhez való illeszkedés és rögzíthetőség az ellenőrizendő szempont, valamint az, hogy méretei nem haladják-e meg zavaró mértékben a kéz méreteit. A befogadó egység esetén meg kell vizsgálni azt is, hogy az aktuátorok rögzítése megoldható-e a kialakítás miatt. Kialakítás szempontjából mindkét eszközrész megfelel az előzetes elvárásoknak.

A deformáció vizsgálata az aktuátor esetén releváns, és szintén szemrevételezéssel végezhető. A túlnyomás bevezetése közben kell megfigyelni a kamrák és az alsó réteg térfogatváltozásait. A tanulmányozás során a kamrák megfelelően, nem túlzott mértékben növekedtek. A kamrák oldalsó és felső falai a nagyobb vastagságnak köszönhetően kisebb alakváltozást szenvednek. Az aktuátor alsó felülete nem deformálódik jelentősen annak ellenére sem, hogy a papírréteg nincs beleépítve.

Az aktuátor és a befogadó egység tömegének mérése egyszerűen, egy konyhai mérleg segítségével mérhető. A mérleg tizedes pontossággal, grammal kifejezve adja meg az eszköz tömegét. Mivel az öntés során minimálisan változhat az aktuátorok tömege, így három eszközön végeztem el a mérést, majd átlagot számítottam. A tömegek között 4 g a maximális különbség. A kétféle anyagnak köszönhetően a tömegük is eltérő, így mindkét fajtát külön megmértem.

A mért értékek a következők:

- Befogadó egység tömege: 31 g
- Mold Max 30 aktuátorok tömegének átlaga: 28 g
- Mold Max 40 aktuátorok tömegének átlaga: 28,67 g

Az eredményekből kiszámítható az össztömeg négy ujj és egy befogadó egység használatakor. A Mold Max 30 szilikonnal 143 g, míg Mold Max 40 anyaggal 145,68 g az össztömege az eszköznek. Ez egy közelítő érték, mivel a rögzítésre szolgáló tépőzárak és kábelkötegelők,

valamint a bevezetett csövek tömege nincs figyelembe véve. Mivel ezek tömege elhanyagolhatóan kicsi a többi részhez képest, így nem jelentenek komoly terhelést a kéznek. Az össztömeg alapján kijelenthető, hogy nem lépi túl az 500 g határértéket.

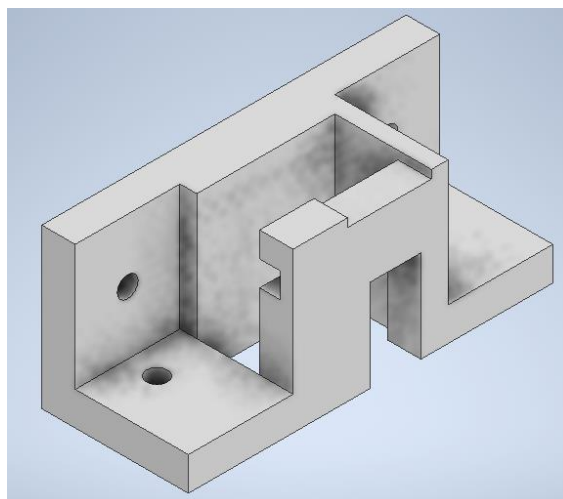
A megengedhető nyomás meghatározása azt a nyomásértéket adjuk meg, mellyel az aktuátort terhelve biztonságosan üzemeltethető lesz és hosszú élettartam várható. Ennek meghatározásához arra van szükség, hogy az eszközökben addig emeljük a bevezetett nyomás értékét, amíg az eszköz maradandó károsodást nem szenved. A maradandó károsodás ezen aktuátorok esetén lehet hasadás, lyukadás, anyagelválás, szivárgás. A két anyag esetén külön-külön végeztem a vizsgálatot. A Mold Max 30 anyagú eszköz 0,65 bar körüli nyomásértékek között hasadt el, míg a Mold Max 40 szilikonból készült eszköz 0,95-1,0 bar között nyílt szét. Ebből egy körülbelül 1,1 biztonsági tényezővel számolva a Mold Max 30 megengedhető nyomása 0,55 bar, míg a Mold Max 40 megengedhető nyomása 0,85 bar. A további méréseket ezen értékeknél nem nagyobb nyomás bevezetésével végeztem.

7.2. Elhajlás mérése

Az elhajlás mérésének legfontosabb célja, hogy megismerjük, hogy milyen mértékű elhajlásra képes az aktuátor a különböző nagyságú terhelő nyomás esetén. Erre azért van szükség, mert az aktuátornak hasonló elhajlási eredményeket kell produkálni, mint az emberi ujjnak a természetes mozgása. Az emberi ujj három ujjzúlete egymáshoz képest körülbelül 90°-os elhajlásra képes, összesen 270° a teljesen behajlított állapot. Az eszköznek a kritériumai között is ez a 270° szerepel.

Az aktuátor elhajlását befolyásolja, hogy milyen orientációban áll, ugyanis rugalmasságából adódóan megtámasztás nélkül elhajlik az eszköz, a gravitáció elhajlítja a kevés tartással rendelkező eszközt. Éppen emiatt figyelembe kell venni azt a tényt, hogy az alapállás befolyásolja a hajlásszöget, ugyanis másképp hajlik az eszköz, amikor a gravitáció segíti a mozgásban, mint amikor ellene kell dolgozni. Emiatt a befolyásoló tényező miatt három állásban végeztem el mindkét eszköz esetén az elhajlás mértékét.

A hajlásszög méréséhez arra van szükség, hogy az eszköz levegőnyílással rendelkező vége rögzítve legyen, különben nincs referenciapont, amelyhez képest mérni lehet az elhajlást. Az eszköz rögzítéséhez egy tartóelemet terveztem, mely szintén 3D nyomtatással készült. Az eszköz a 17. ábrán látható, melynek lényege, hogy az aktuátor végén található tömör záróelem egy sínbe siklik bele, így alakzárással biztosítja az eszköz pozicionálását. A tartó egység úgy lett kialakítva, hogy több állásban stabil és rögzíthető legyen, így elegendő egyetlen tartó a különböző pozíciójú mérésekhez.



17. ábra: Méréshez szolgáló rögzítő tartó

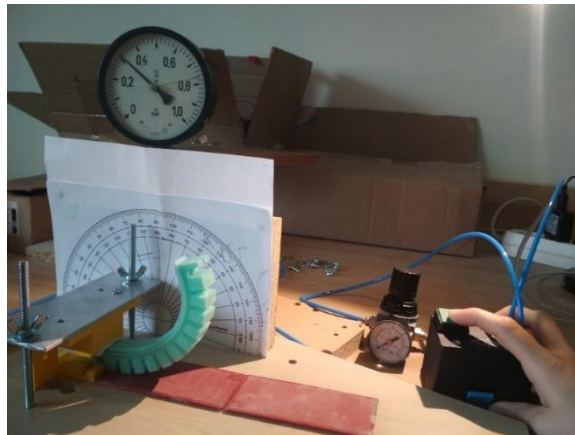
Mivel a hajlásszög mérése során az eszköz helyzete változik, így figyelembe kell venni azt, hogy az eszköznek legyen elegendő helye elhajlani. A tartó egység sajnos minden pozícióban akadályt jelent az eszköznek, ugyanis az aktuátor önmaga végéhez hajlik vissza. A magassági pozíció növelésével viszont kiküszöbölhető az, hogy az eszköz az asztallapnak ütközzön és hamis eredményt szolgáltatson. Ehhez egy speciális mérőállomás lett kialakítva. Ezen az eszközön az alap síkon egy fix pontban rögzíthető a mérőtartó, de a magassága változtatható. A mérőtartó egy lemezhez van rögzítve, a lemez csavarokkal van pozicionálva, míg magassága hézagolással állítható. Ezzel nem csak az eszköz lett rögzítve a tartóhoz, hanem a tartó is egy alap bázishoz.

A szögek mérésére nyomtatott szögmérőt használtam, melynek középpontja az aktuátor befogott végénél lévő utolsó kamra külső pontjához van igazítva. Az elhajlások mérése nehéz feladat, mivel az aktuátor elhajlása közben a hajlítás középpontja folyamatosan változik. A hajlásszög mérésénél az aktuátor elhajlott végének irányát rögzítettem, majd az általam használt szögmérő középpontjába tolva az irányvektort megállapítható az aktuátor végének elhajlása.

A szögmérés során nem a megengedett határnyomásig növeltem a terhelést, ugyanis az aktuátor vagy elérte a teljes hajlását már kisebb nyomásértéknél is, vagy akadályba ütközött és nem valós értékeket adott. A nyomásértékek a pozíciótól és az aktuátor anyagától függenek. A következőkben a különböző állásokban mért eredményeket és észrevételeket mutatom be. nyomásszabályzó, analóg mérő,

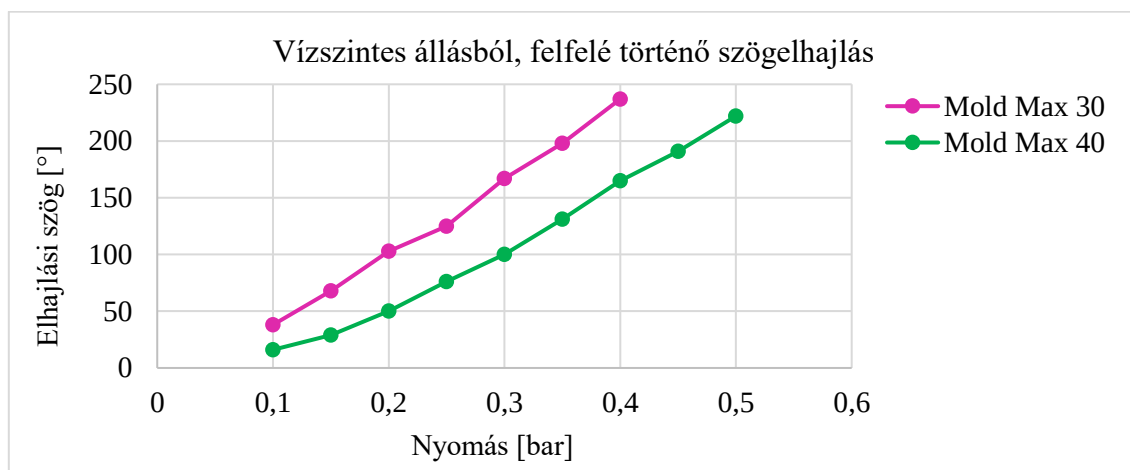
7.2.1. Vízszintes állás, gravitációval szemben

A mérési elrendezést a 18. ábra mutatja.



18. ábra: Hajlásszög mérése vízszintes állásban, gravitációval szemben a Mold Max 40-nel

A mérés során 0,10 bar kezdőértékkel kezdtem el terhelni az aktuátorokat, majd a nyomás értéket 0,05 barral növeltem minden mérés között. Az Mold Max 30 anyagú eszköz 0,45 bar értéknél már elérte a tartóeszközt, az a mérés már hamis eredményt mutatott volna, így az utolsó mért érték 0,40 bar nyomáson mutatja meg a hajlásszöget. A Mold Max 40 anyag esetén a 0,55 bar esetén történt meg ugyanez, így annak a mérése 0,50 bar maximális nyomáson történt meg. A mérési eredményeket az 19. ábra és a melléklet 1. táblázata tartalmazza.



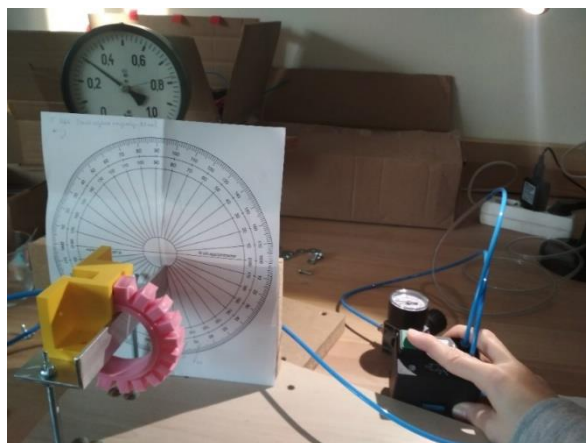
19. ábra: Vízszintes állásból, felfelé történő szögelhajlás

Tapasztalatok:

Az előzetes elvárásoknak megfelelően a 30 A keménységű anyag rugalmasabb, kisebb nyomásértékre van szüksége ugyanahhoz a szögű elhajláshoz. Az eszközök ebben az állásban is képesek megközelíteni a maximális 270°-os elhajlást. Tekintve, hogy a nyomásértékek egyik aktuátor esetén sem érték el a megengedhetőt, így valószínűleg elérnék a 270° elhajlást akadály nélkül. A 90°-os határponton túl a gravitáció már az eszköz segítségével van, és a mérendő véget tovább hajlítja.

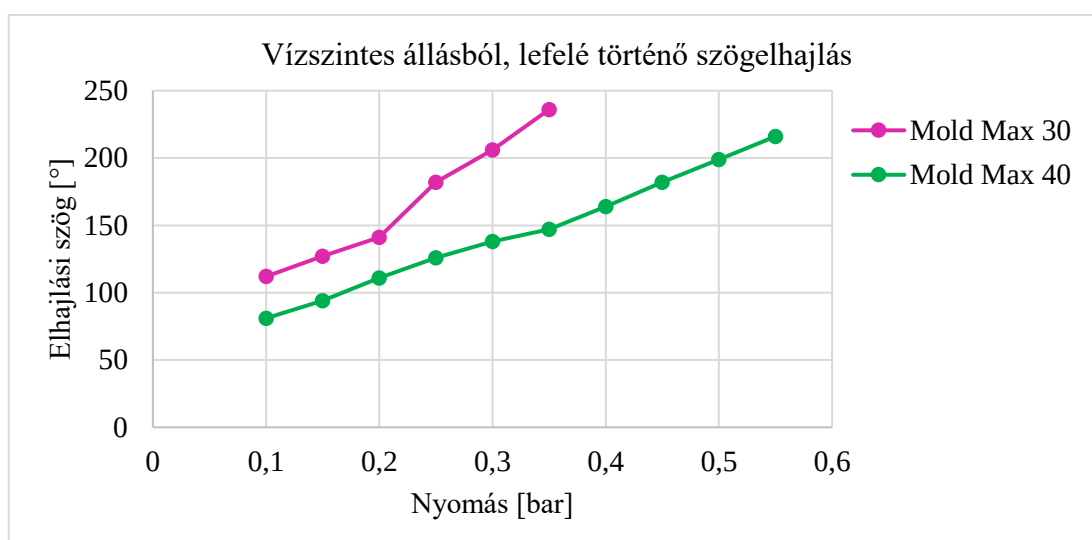
7.2.2. Vízszintes állás, gravitációval azonos irányban

A mérési elrendezést a 20. ábra mutatja.



20. ábra: Hajlásszög mérése vízszintes állásban, gravitációval azonos irányban a Mold Max 30 anyagon

A mérés során 0,1 bar kezdőértékkel kezdtem el terhelni az aktuátorokat, majd a nyomás értéket 0,05 barral növeltem minden mérés között. Az Mold Max 30 anyagú eszköz 0,40 bar értéknél már elérte a tartóeszközt, az a mérés már hamis eredményt mutatott volna, így az utolsó mért érték 0,35 bar nyomáson mutatja meg a hajlásszöget. A Mold Max 40 anyag esetén a 0,60 bar esetén történt meg ugyanez, így annak a mérése 0,55 bar maximális nyomáson történt meg. A mérési eredményeket a 21. ábra és a melléklet 2. táblázata tartalmazza.



21. ábra: Vízszintes állásból, lefelé történő szögelhajlás

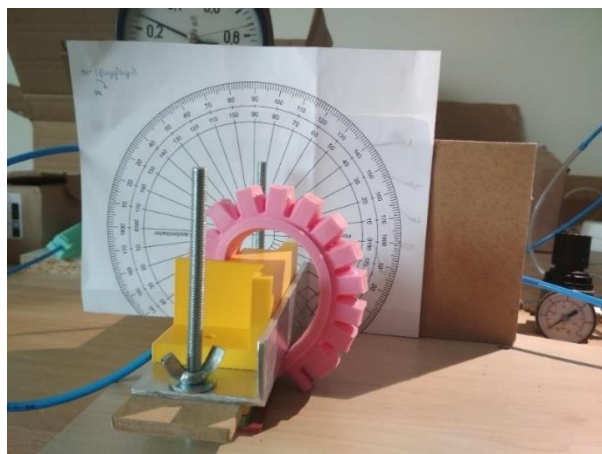
Tapasztalatok:

Az előzetes elvárásoknak és tapasztalatoknak megfelelően itt is a 30 A keménységű anyagnak van szüksége kisebb nyomásértékre ugyanahhoz a szögű elhajláshoz. Az eszközök ebben az állásban is képesek megközelíteni a maximális 270°-os elhajlást. Tekintve, hogy a

nyomásértékek egyik aktuátor esetén sem érték el a megengedhetőt, így valószínűleg elérnék a 270° elhajlást akadály nélkül. Megfigyelhető, hogy a $0-90^\circ$ hajlásszög-tartományban az eszközök elhajlását segíti a gravitáció, és egészen kis nyomás esetén is nagy elhajlást produkálnak. A 90° hajlásszög utáni értékeknél egyre kisebb elhajlást mutatnak azonos nyomásnövekedés hatására.

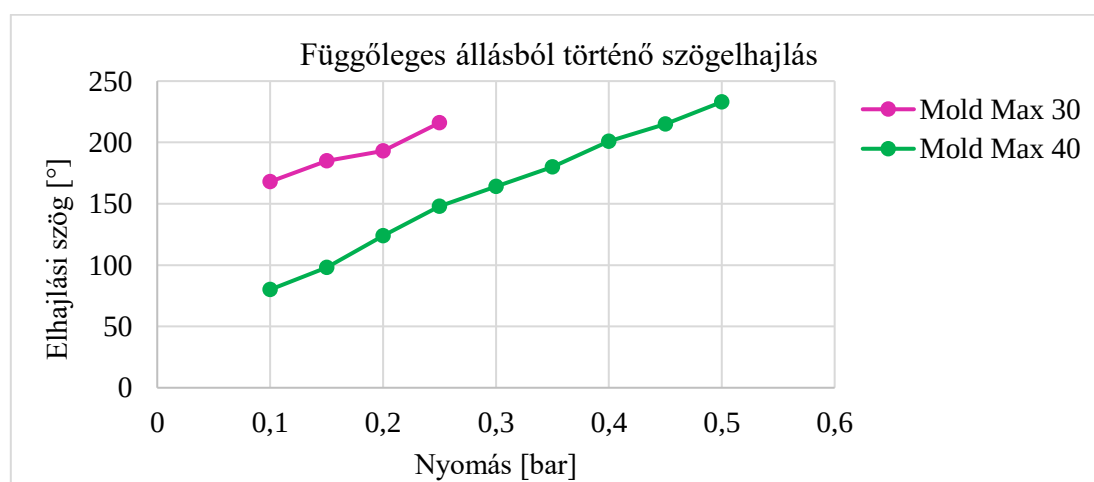
7.2.3. Függőleges állás

A mérési elrendezést a 22. ábra mutatja.



22. ábra: Hajlásszög mérése függőleges helyzetből indulva a Mold Max 30 anyagon

A mérés során 0,10 bar kezdőértékkel kezdtem el terhelni az aktuátorokat, majd a nyomás értéket 0,05 barral növeltem minden mérés között. Az Mold Max 30 anyagú eszköz 0,30 bar értéknél már elérte a tartóeszközt, az a mérés már hamis eredményt mutatott volna, így az utolsó mért érték 0,25 bar nyomáson mutatja meg a hajlásszöget. A Mold Max 40 anyag esetén a 0,55 bar esetén történt meg ugyanez, így annak a mérése 0,5 bar maximális nyomáson történt meg. A mérési eredményeket a 23. ábra és a melléklet 3. táblázata tartalmazza.



23. ábra: Függőleges állásból történő szöghajlás

Tapasztalatok:

Ebben az állásban is a 30 A keménységű anyagnak van szüksége kisebb nyomásértékre ugyanahhoz a szögű elhajláshoz. Az eszközök ebben az állásban is képesek megközelíteni a maximális 270°-os elhajlást. Tekintve, hogy a nyomásértékek egyik aktuátor esetén sem érték el a megengedhetőt, így valószínűleg elérnék a 270° elhajlást akadály nélkül. Nagy különbség a két anyag között, hogy a 30 A keménységű anyag annyira nem képes megtartani a saját súlyát, hogy már a legkisebb nyomásnál is kibillen a függőleges egyensúlyából, és lefelé hajlik a gravitáció hatására. Ettől kezdve ugyan nőnek a szögek a nyomásnövelés hatására, de mindegyik értékre hat a gravitáció, így jóval nagyobb értékek alakultak ki, mint más állásokban hasonló nyomáson. A 40 A keménységű anyag ezzel szemben képes megtartani a saját súlyát, bár hat rá a gravitáció, mégis egy fokozatos elhajlás tapasztalható.

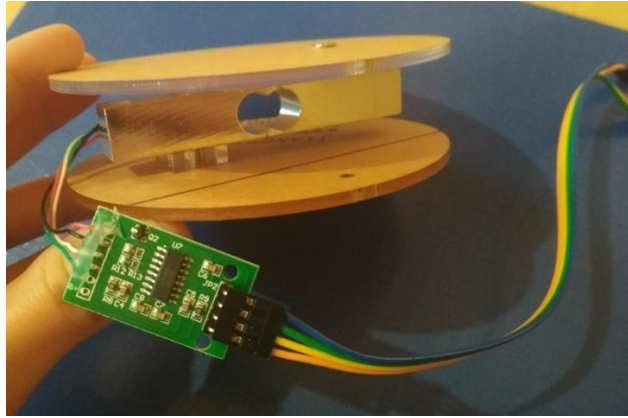
7.3. Kifejtett erő mérése

Az kifejtett erő mérésének azért van jelentősége, mert ezzel állapítható meg, hogy a tervezett aktuátor képes-e a tehetetlen ujjak hajlítására és ezzel együtt tárgyak megfogására. A szükséges minimális erő meghatározása nehezen lehetséges, mert sérült kéz esetén csak rásegítésként funkcionál, míg a lebénult kéz esetén teljes egészében kell megmozgatni az ujjakat. A két alkalmazás más-más erő kifejtést igényel.

A kifejtett erő is függ attól, hogy milyen mértékig van behajlítva az ujj, azaz mennyi energiát fektet az elhajlásba és az erő kifejtésbe. Emiatt az erő mérés is több pozícióban történik.

Az erő mérését egy erőmérő cella segítségével végzem el, melynek irányítását egy Arduino Nano panel végzi. Az erőmérő cella elve, hogy a ráragasztott nyúlásmérő bélyegek az erő hatására a cellával együtt megnyúlnak, így megváltozik az ellenállásuk. A Wheatstone-hídba kötött nyúlásmérő bélyegek feszültségváltozásainak feldolgozásához egy kifejezetten mérőcellákhoz kialakított, HX711 alapú 24-bites ADC mérőátalakítót használok. Az Arduino Nano egyszerűen kezelhető, a feladatra alkalmas eszköz. Az Arduino IDE szoftverkörnyezetben először egy ismert referenciasúllyal bekalibráltam a mérőcellát, amely így Newtonban mutatja a mért erőt. Ehhez rendelkezésemre állt egy példaprogram, így két paraméter folyamatos változtatásával az eszköz pontos érték mutatósra képes.

Az erő méréshez kiválóan alkalmazható ez a módszer, hiszen gyors mintavételezési sebességre képes, digitálisan menthető és feldolgozható a mért adatok, nem igényel egyedi tudást, könnyen és olcsón beszerezhető minden eleme. Ezért választottam ezt a kifejezetten erő mérésre alkalmazandó mérőcellát. A mérőcella és az erő méréshez használandó mérőátalakító a 24. ábrán látható.



24. ábra: Erőmérő cella és a HX711 alapú ADC mérőátalakító

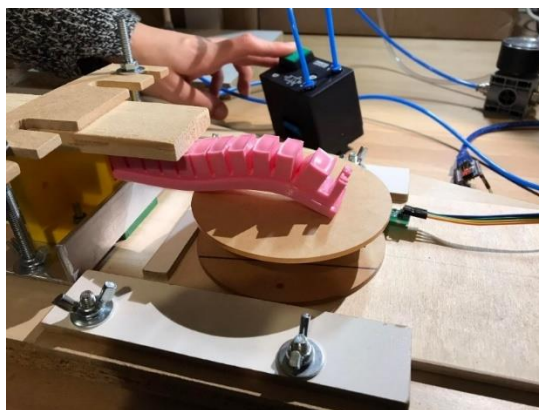
Ehhez a méréshez is szükség van olyan alappozícióba, amelyből nem mozdul ki az eszköz mérés közben. A hajlásszög mérésénél használt tartó és mérőállomás úgy lett kialakítva, hogy ehhez is használhatóak legyenek. A tartó megegyezik a korábbi kialakítással, az állomáson viszont vannak olyan részek, melyek ugyan a másik mérésnél is rajta voltak, kihasználva nem lettek. A tartó befogásának magassága továbbra is ugyanúgy állítható, mint korábban. A tartóval előtt azonban van egy kijelölt rész, ahová az erőmérő cella helyezhető. A cella helye úgy lett kialakítva, hogy hézagolással a magassága, eltolással az aktuátorhoz képesti távolsága is változtatható. Oldalirányú mozgásra nem képes, így mindig a cella középső sávját terheli a robotikai elem. A rögzítésnek köszönhetően azonban az egyszer beállított pozícióban stabilan áll, az erőmérés közben nem tud elmozdulni egyik irányba sem a támasztékoknak köszönhetően. A kialakításnál egy kis mélyedés is került a tartóra, hogy a mérőcella alján található csavar ne billentse ki vízszintes állásából a cellát, hanem a mélyedésbe kerüljön.

Az erőmérés során az Arduino IDE által kijelzett eredményeket listáztam, majd értékeltem, melyek a következő pontokban találhatók.

Mivel az erőmérő cella felületének vízszintesnek kell lenni, így ugyan magasságban változtatható, de néhány méréshez az aktuátor állásán kell változtatni.

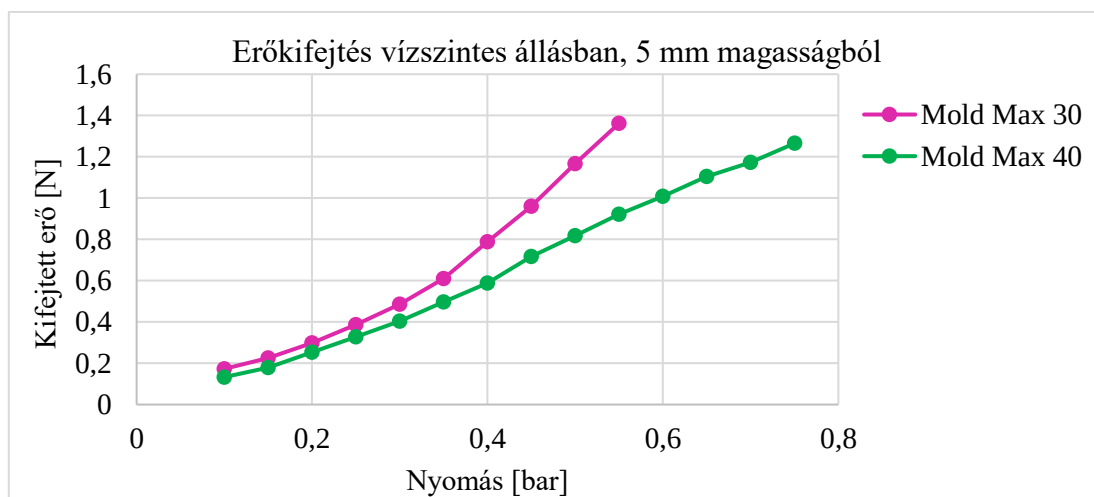
7.3.1. Vízszintes állású mérés egy síkban, 5 mm magasságból

Az aktuátor vízszintesen helyezkedik el, teljes terjedelmében egy magasságban az erőmérő cellával, azaz 5 mm magasan. A mérési elrendezést a 25. ábra mutatja. Az aktuátor felső felületét egy léccel támasztottam meg, ugyanis ennél az állásnál az erő kifejtés helyett elhajlott egy alapvetően rendellenes irányba.



25. ábra: Erőmérés vízszintes állásban a Mold Max 30 anyagú aktuátorral

A mérés során 0,1 bar kezdőértékkel kezdtem el terhelni az aktuátorokat, majd a nyomás értéket 0,05 barral növeltem minden mérés között. Az erőmérések esetén a két anyag maximális megengedhető nyomásáig növeltem a terhelést, azaz a Mold Max 30 anyagú eszköz esetén 0,55 barig, míg a Mold Max 40 anyag esetén 0,8 bar nyomásig. Az erőmérő már a nyomás növelése előtt is 0 N-tól eltérő értéket mért. Ennek az az oka, hogy az aktuátor alapállásban is érintkezik vele, aminek van hatása a cellára. Ezt az értéket minden mérés előtt rögzítettem. A 30 A keménység esetén 0,141 N a saját súly, míg a 40 A esetén 0,124 N. Azért lehet kisebb az egyébként nagyobb fajsúlyú 40-es anyag súlya, mert merevebb anyaga miatt tartja önmagát, nem terül el a cellán. A mérési eredményeket a 26. ábra és a melléklet 4. táblázata tartalmazza.



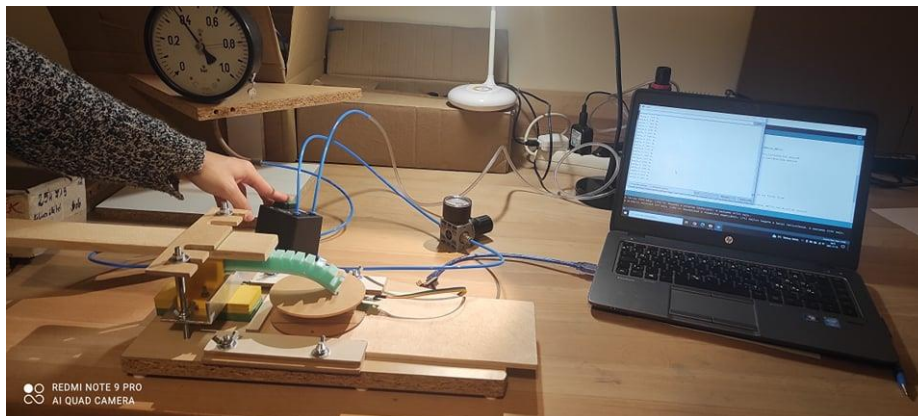
26. ábra: Erőkifejtés vízszintes állásban, 5 mm magasságból

Tapasztalatok:

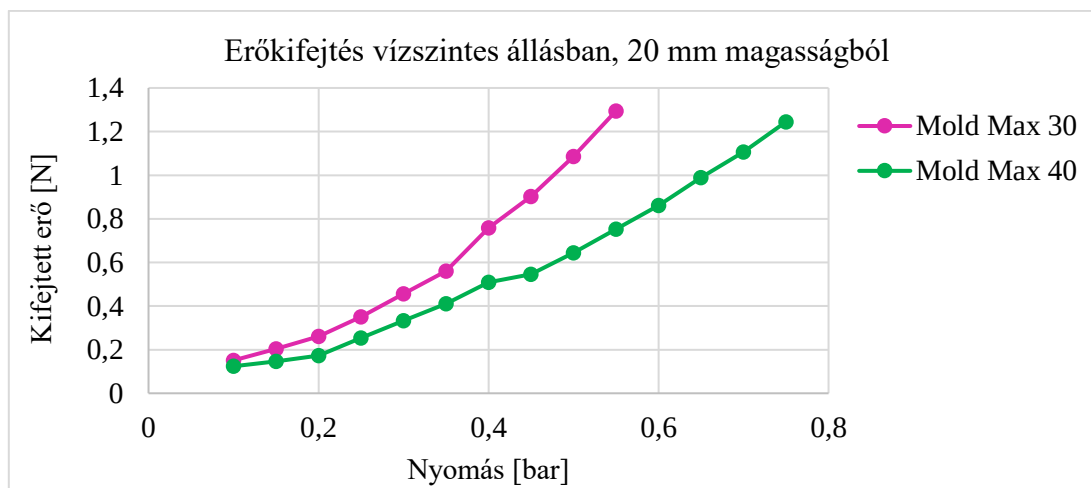
A 30 A keménységű anyag ugyanazokon a nyomásokon nagyobb erőt képes kifejteni, mint a 40-es. Ennek az az oka, hogy a 40-es a hajlásszög mérések alapján kisebb elhajlással rendelkezik, így kevésbé hat az erőmérő cellára. A 30-as anyagú már 0,5 barnál, míg a 40-es keménységű csak 0,6 barnál éri el az 1 N kifejtett erőt. A megengedett maximális nyomáson azonban körülbelül azonos nagyságú erőkifejtésre képes mindkét aktuátor.

7.3.2. Vízszintes állású mérés 20 mm magasságból

Az aktuátor vízszintesen helyezkedik el, befogása nem változott, de az előző pozíciójához, és egyben a cellához képest is 15 mm-rel növelt magassága. A mérési elrendezést a 27. ábra mutatja. Az aktuátor felső felületét továbbra is megtámasztja a lécz a nagyobb erő kifejtés érdekében.



27. ábra: Erőmérés vízszintes állásban 20 mm magasságból a Mold Max 40-es aktuátorral
A mérés során ugyanazokat a nyomásértékeket használtam, mint az előzőnél. A saját súlyából származó értéket mérés előtt rögzítettem. A 30 A keménység esetén 0,093 N a saját súly, míg a 40 A esetén 0,083 N. Az előzőhöz képest ezek lényegesen kisebb értékek, mert az aktuátor nem fekszik rá a cellára, kevésbé érintkezik vele. A mérési eredményeket a 28. ábra és a melléklet 4. táblázata tartalmazza.



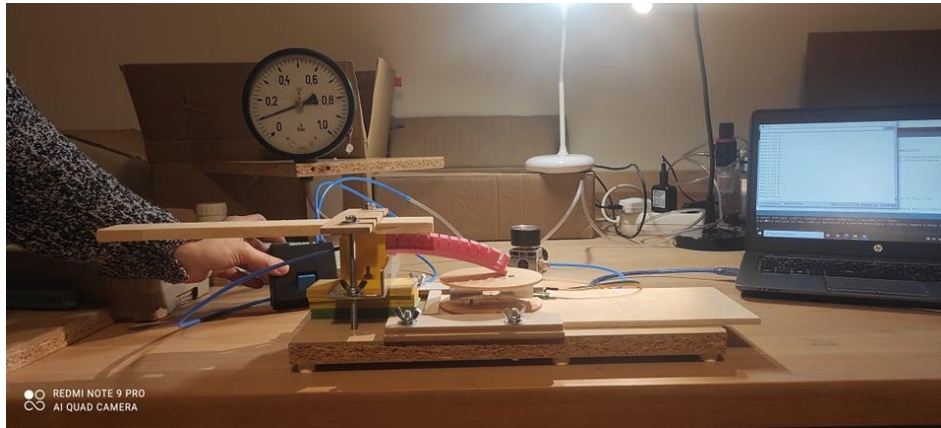
28. ábra: Erőkifejtés vízszintes állásban, 20 mm magasságból

Tapasztalatok:

Az értékek hasonlóan növekvő tendenciát mutatnak mindkét aktuátor esetén, mint ahogy az az előző mérésnél is történt. Minden mérésnél látható, hogy az értékek kisebbek, mint az előzőek. Ennek az az oka, hogy a magasság miatt már nagyobb elhajlásra képes, így nem csak az erő kifejtésre fordítja az energiát.

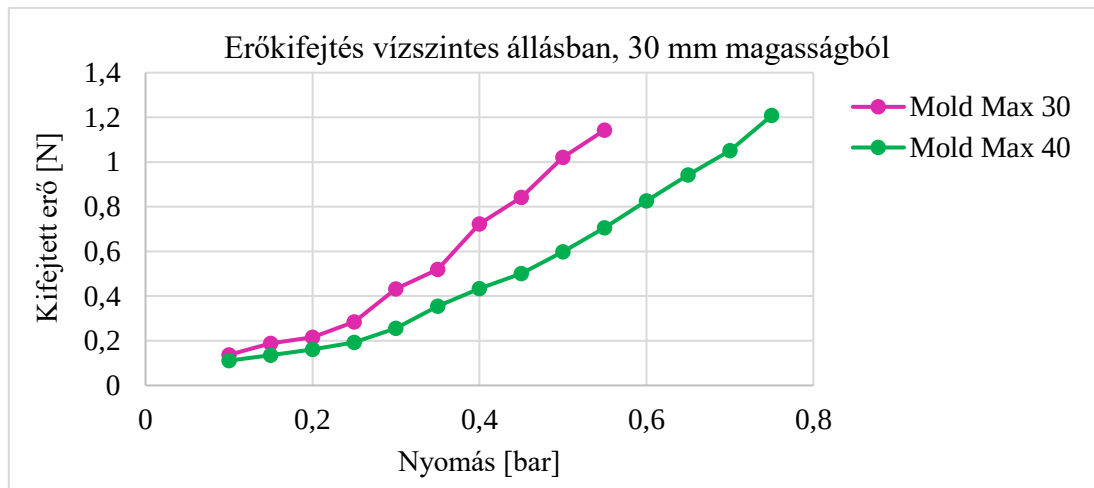
7.3.3. Vízszintes állású mérés 30 mm magasságból

Az aktuátor vízszintesen helyezkedik el, befogása nem változott, de az előző pozíciójához képest 10 mm-rel, míg a cellához képest 25 mm-rel helyezkedik el magasabban. A mérési elrendezést a 29. ábra mutatja. Az aktuátor felső felületét továbbra is megtámasztja a lécs a nagyobb erő kifejtés érdekében.



29. ábra: Erőmérés vízszintes állásban 30 mm magasságból a Mold Max 30-as aktuátorral

A mérés során ugyanazokat a nyomásértékeket használtam, mint az előzőeknél. A saját súlyából származó értéket mérés előtt rögzítettem. A 30 A keménység esetén 0,091 N a saját súly, míg a 40 A esetén 0,074 N. Az előzőhöz képest a 30-as súlya nem változik jelentősen, míg a 40-es súlya a merevebb tartásából adódóan igen. A mérési eredményeket a 30. ábra és a melléklet 4. táblázata tartalmazza.



30. ábra: Erőkifejtés vízszintes állásban, 30 mm magasságból

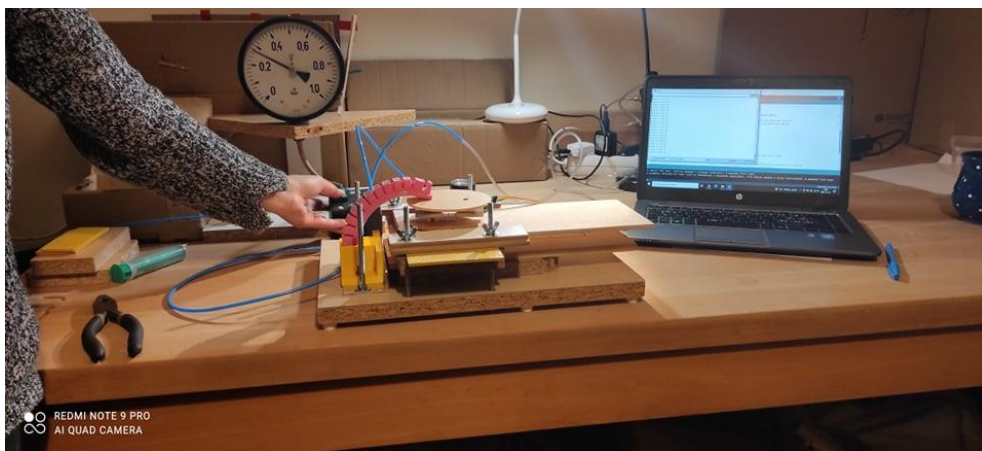
Tapasztalatok:

Az előző, 20 mm magasságú méréshez képest minimálisan csökkentek az erők mindkét aktuátor esetén. A hajlásszög ilyen kis mértékű változása tehát nem eredményez nagy erőcsökkenést. A 40-es keménységű a maximális nyomás körül továbbra is képes megközelíteni a vízszintes

helyzetben, cellával egy síkban kifejtett maximális erőt. A végső maximálisan kifejtett erőben a 40-es itt már meghaladja a 30-as keménységű anyagot.

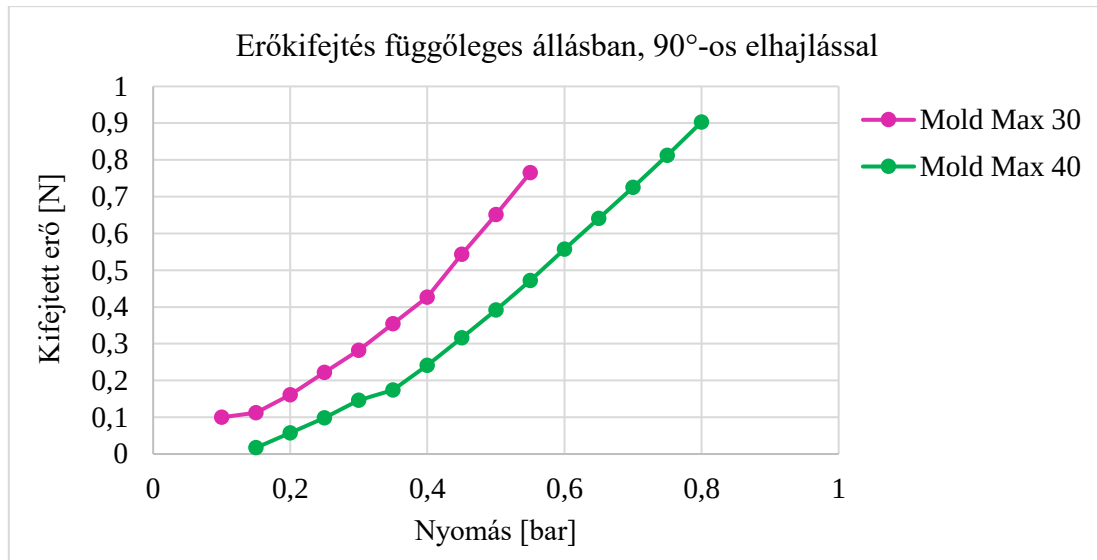
7.3.4. Függőleges állású mérés 90°-os hajlásszögben

Az erőmérést olyan szögben is elvégzem, amely megszokott egy ujj hajlítása során. Ez a 90°-os elhajlás, melynek elrendezését a 31. ábra mutatja. Ezt úgy lehet kivitelezni a mérés során, hogy a tartót úgy rögzítem, hogy az aktuátor függőleges irányban álljon, és a lehető legkisebb magassággal rendelkezzen. A mérőcella magasságát addig emelem, amíg a 90° fokban elhajlott aktuátor éppen el nem éri azt. Így az elem éppen 90°-os szögben fejt ki az erőt, amit mérni kívánunk.



31. ábra: Erőmérés függőleges állásban 90° elhajlással a Mold Max 30 anyagú aktuátorral

A mérés során a kezdőértéket az határozta meg, hogy a korábban mért szögelhajlásnál mekkora minimális nyomás szükséges a 90° elhajlás eléréséhez. Ezen érték ezelőtt ugyanis nem éri el az aktuátor a cellát, így nem fejt ki rá erőt. A kezdőérték 30 A keménység esetén már 0,1 bar volt, hiszen elhajlik az eszköz, míg 40-es keménység esetén ez az érték 0,15 bar volt. Ezután az értéket 0,05 barral növeltem minden mérés között. Az erőmérések esetén a két anyag maximális megengedhető nyomásáig növeltem a terhelést, aza a Mold Max 30 anyagú eszköz esetén 0,55 barig, míg a Mold Max 40 anyag esetén 0,8 bar nyomásig. A mérési eredményeket a 32. ábra és a melléklet 5. táblázata tartalmazza.



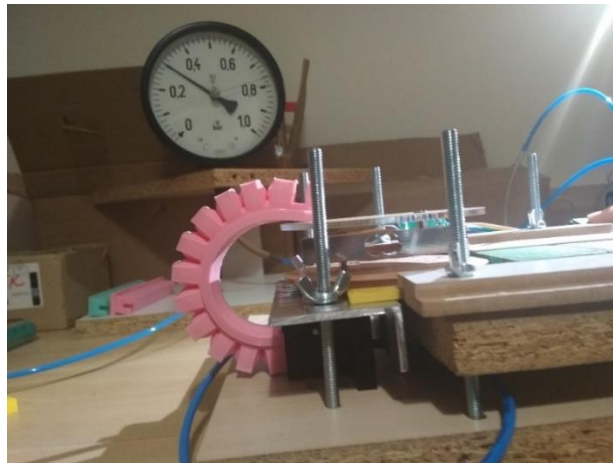
32. ábra: Erőkifejtés függőleges állásban, 90°-os elhajlással

Tapasztalatok:

A 30 A keménységű anyag ugyanazokon a nyomásokon nagyobb erőt képes kifejteni, mint a 40-es. Ennek az az oka, hogy a 40-es a hajlásszög mérések alapján kisebb elhajlással rendelkezik, így kevésbé hat az erőmérő cellára. A behajlott állapotú 30-as anyagú eszköz már csak az erőkifejtés növelésére tudja fordítani a többletnyomást.

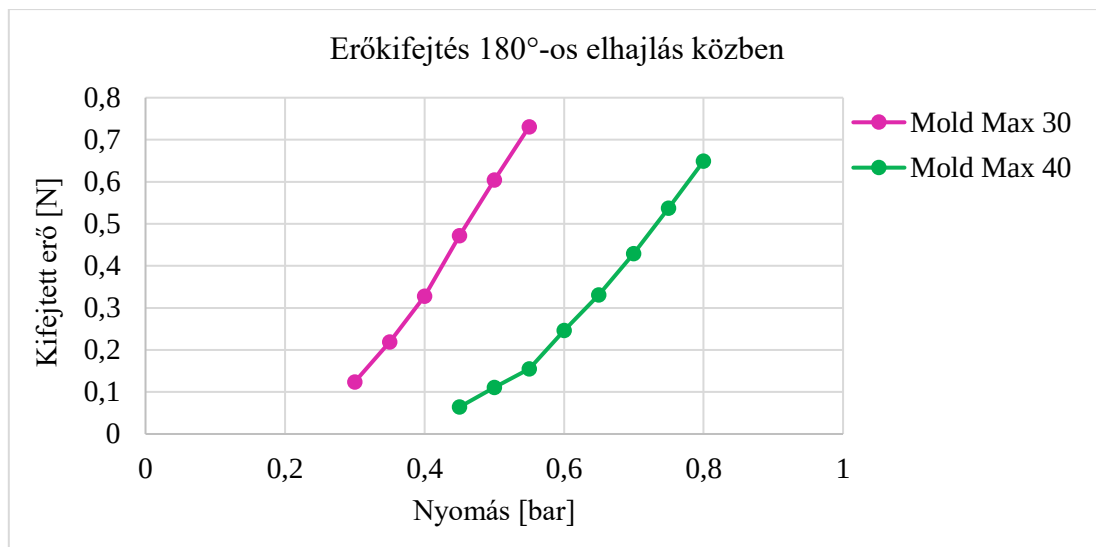
7.3.5. Vízszintes állású mérés 180°-os hajlásszögben

Az erőmérést egy másik olyan szögben is elvégzem, amely megszokott egy ujj hajlítása során. Ez a 180°-os elhajlás, melynek elrendezését a 33. ábra mutatja. Ezt úgy lehet kivitelezni a mérés során, hogy a tartót úgy rögzítem, hogy az aktuátor vízszintesen, de az eddig megszokottakhoz képest fejfel lefelé álljon, és kis magassággal rendelkezzen. A mérőcellát a lehető legközelebb toljuk a tartó eszközhöz, hogy a 180° fokban elhajlott aktuátor éppen elérje azt. Azért van szükség erre a lentről felhajlásra, mert az erőmérő cellának ebben a helyzetben kell maradni. Fordított állású csak akkor lehetne, ha ahhoz az álláshoz újrakalibrálom a mérőcellát.



33. ábra: Erőmérés vízszintes állásban 180° elhajlással a Mold Max 30 anyagú aktuátorral

A mérés során a kezdőértéket az határozta meg, hogy a korábban mért szögelhajlásnál mekkora minimális nyomás szükséges a gravitáció elleni 180° elhajlás eléréséhez. Ezen érték ezelőtt ugyanis nem éri el az aktuátor a cellát, így nem fejt ki rá erőt. A kezdőérték 30 A keménység esetén már 0,30 bar volt, míg 40-es keménység esetén ez az érték 0,45 bar volt. Ezután az értéket 0,05 barral növeltem minden mérés között. Az erőmérések esetén a két anyag maximális megengedhető nyomásáig növeltem a terhelést, aza a Mold Max 30 anyagú eszköz esetén 0,55 barig, míg a Mold Max 40 anyag esetén 0,8 bar nyomásig. A mérési eredményeket a 34. ábra és a melléklet 5. táblázata tartalmazza.



34. ábra: Erőkifejtés 180° -os elhajlás közben

Tapasztalatok:

A mért értékek növekedése hasonló a 90° -os erőméréséhez képest. A 30 A keménységű anyag ugyanazokon a nyomásokon nagyságrendekkel nagyobb erőt képes kifejteni, mint a 40-es. A maximálisan kifejtett erőt a két aktuátor közül 30-as keménységű éri el.

8. ÖSSZEGZÉS, TAPASZTALATOK

8.1. Anyagválasztás

A Mold Max 30 és a Mold Max 40 is megfelelt az alapvető elvárásoknak. Gyártási szempontból nincs jelentős különbség köztük, mindkettő alkalmas ilyen kis résekbe történő öntésre. A 40-es keménységű magasabb viszkozitása miatt nehezebben önthető, de nem okoz problémát az sem. A tulajdonságaik hasonlóak: kis tömegűek, nem zsugorodnak, rugalmasságuk elegendően nagy, mégis rendelkeznek némi merevséggel. A mérési eredményekben megmutatkozik, hogy a kívánt hajlást mindkét anyagú aktuátor képes elérni, a maximálisan kifejtett erő hasonló, ám a 40-es anyag több pozícióban is képes a hasonló nagyságú erőt tartani.

A választásom a Mold Max 40 szilikon anyagra esett három tulajdonság miatt:

1. Több pozícióban képes közel állandó nagyságú erőt kifejteni.
2. Nagyobb nyomásértékeket visel el
3. Az elhajlás folyamatos, kis léptekben növekszik, így könnyebben szabályozható és kisebb hajlási szögek is előállíthatóak vele.

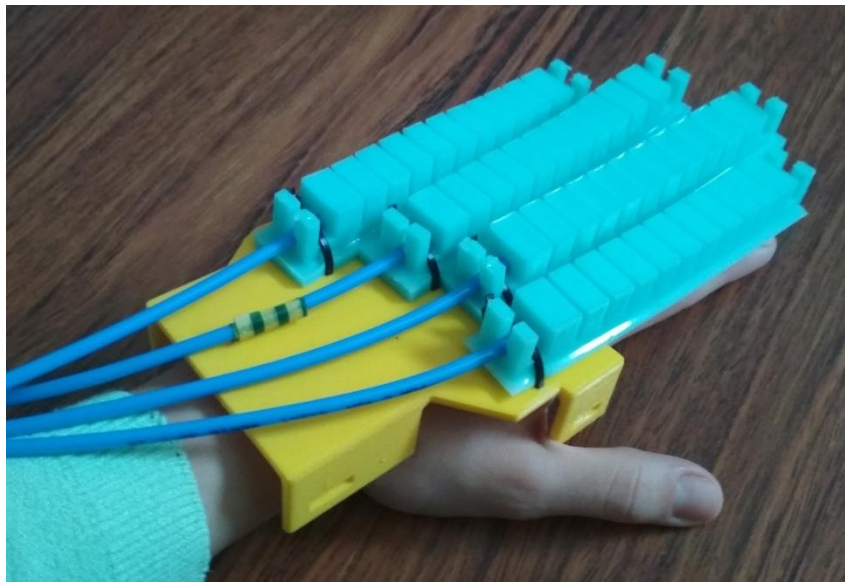
8.2. Eszköz értékelése

A TDK dolgozatom célkitűzése egy olyan pneumatikus soft aktuátorokkal ellátott exoskeleton megtervezése és megvalósítása volt, mely a kézre rögzítve alkalmas az ujjak rehabilitációs célú mozgatása. Mind a tervezés, mind az elkészítés sikeresnek mondható, mert egy működőképes eszköz készült el a tervek alapján. Az előírt kritériumoknak való megfelelés a következők szerint teljesült:

- Használata biztonságos, mert a kamrasor kialakításának köszönhetően nem képes rendellenes mozgásra kényszeríteni az ujjat
- Egyszerűen eltávolítható a kézről a tépőzárral való rögzítésnek köszönhetően
- Viselése minimálisan akadályozza a kéz természetes mozgását, de elegendően nagy teret enged neki
- Használata nem tehet, mert tömege kb. 140 g és a szivaccsal kiegészített tépőzáras rögzítésnek köszönhetően kényelmes
- Minimálisan alkalmazkodik a kézfej méretéhez a rögzítés módja miatt
- Ellenálló a -20 °C – 50 °C hőmérséklettartományban
- Nincs rá hatással a párás környezet
- Az aktuátor anyaga többszöri használat után sem szenved maradandó sérülést vagy alakváltozást

- 0,6 bar nyomás hatására is képes elérni a maximálisan kívánt hajlítást
- Képes a 270° hajlásszög elérésére

Az eszköz megfelel az előzetes elvárásoknak, működése során funkcióját ellátja. A méretbeli határokat ugyan megtartja az eszköz, de a viselés során tapasztalható, hogy ezek a méretek éppen határértékek, az eszköz, legfőképp a befogadó eszköz lehetne egy kisebb méretű. A kész eszköz a 35. ábrán látható.



35. ábra: Az elkészült rehabilitációs eszköz egy kézen

8.3. Tapasztalatok

A tapasztalataim a teljes munkafolyamatra kitérnek, így néhány gondolatként említem meg őket:

- Tervezés során a legfontosabb, hogy a kamrasor megfelelően legyen kialakítva. A méretezésnél különösen figyelni kell arra, hogy a falvastagság ne legyen túlzottan kicsi, mert akkor az öntőforma azon részeibe nem folyik bele a szilikon anyag.
- A vákuumkamra használata mindenképp szükséges ahhoz, hogy minőségi eszközt lehessen gyártani, különben zárványos lesz az öntvény, ami befolyásolhatja a működést.
- A papírréteg alkalmazása nem megfelelő, mert nem egyesül kellő mértékben a szilikonnal, és terhelés hatására elválnak egymástól.
- A bemenő csőnek kialakított mélyedés segít a csövet a jó helyen, megfelelő irányban tartani.
- A túlságosan puha anyagok nem alkalmasak erre a felhasználásra, mert kis nyomásértékeken is túlzott elhajlást végeznek.

- A közepes keménységű anyagok viselkedése között minimális eltérés van, a felhasználásra mindkettő alkalmas a maga előnyeivel.

Összességében elmondható, hogy az öntési folyamattól és az anyagválasztástól függ a legtöbb tényező, ezek befolyásolják jelentősen a jó aktuátor készítését és működését.

8.4. Fejlesztési lehetőségek

Ezen eszköz esetén a fejlesztési lehetőségek nagy számban állnak rendelkezésre. A mechanikai kialakítás tovább alakíthat, hogy az eszköz kisebb legyen, és viselése hosszútávon is kényelmessé váljon. Mivel a befogadó egység anyaga 3D nyomtatással készülő rideg műanyag, így egy másik anyag választása előnyös lehetne. Olyan anyagra lenne szükség, amely rugalmasabb, jobban igazítható a kéz formájához, esetlegesen le is követi azt. Ez lehet például valamilyen megerősített textília.

Anyag- és költséghatékonyság szempontjából is hatékony lehetne egy olyan csatlakoztatási forma kialakítása, amellyel az ujjak változtatható helyeken képesek csatlakozni a befogadó egységhez. Ez azért szükséges, mert így nem kell minden ember minden ujjának méretéhez külön öntőformát készíteni, hanem néhány általános méretű eszköz elegendő lenne. Hosszabb ujj esetén az ujjakhoz közel, rövidebb ujj esetén az ujjaktól távol lehetne rögzíteni. Ez természetesen csak bizonyos határok között megengedhető, hogy elkerülhető legyen a kézfejen történő nagymértékű hajlás.

Egy újabb, talán legfontosabb fejlesztési lehetőség a vezérelhető működés. Jelen pillanatban az eszközt manuálisan kell működtetni, a bevezetett nyomás nagyságát manuálisan állítjuk be, miközben semmilyen visszajelzést nem kapunk az eszköz helyzetéről. Az mindennapos használathoz szükséges, hogy az eszköz önállóan is képes legyen működni. Ehhez szükség van olyan szenzorra, amely a mozgatási szándékot detektálja, és ennek jelére elindul a folyamat. Ezek a szenzorok általában az izomműködést érzékelik, ilyen például az EMG szenzor. A szabályzás akkor valósul meg, ha a működés közben van visszacsatolás. Releváns visszacsatolt érték lehet például a kifejtett erő vagy az aktuális hajlásszög, pozíció. Erről rá- vagy beleépített flex szenzorral, azaz hajlításérzékelővel és erőmérő egységekkel kapunk információt. A visszacsatolt jelek alapján képes a mikrovezérlő a bevezetett nyomás értékét változtatni.

A rehabilitációs eszközökre folyamatosan van igény a társadalom részéről, fejlesztésükkel cél a lehető legjobb megoldás megalkotása. Ez az eszköz egy költséghatékony, rehabilitációs és segédeszközökhöz képest olcsón előállítható eszköz, mely állíthatóságából fakadóan személyre szabható. Ezen tulajdonságai miatt a jelenlétének és a fejlesztésének van létjogosultsága a piacon.

IRODALOMJEGYZÉK

- Al-Fahaam, H.; Davis, S.; Nefti-Meziani, S. (2016): Power assistive and rehabilitation wearable robot based on pneumatic soft actuators, *21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)* (DOI 10.1109/MMAR.2016.7575181) (Letöltés dátuma: 2021.05.19.)
- Ang, B. W.K.; Yeow, C. H. (2017): Print-it-Yourself (PIY) Glove: A Fully 3D Printed Soft Robotic Hand Rehabilitative and Assistive Exoskeleton for Stroke Patients, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (DOI 10.1109/IROS.2017.8202295) (Letöltés dátuma: 2021.05.19.)
- Ang, B. W.K.; Yeow, C. H. (2019): 3D Printed Soft Pneumatic Actuators with Intent Sensing for Hand Rehabilitative Exoskeletons, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (DOI 10.1109/ICRA.2019.8793785) (Letöltés dátuma: 2021.05.19.)
- Brown, M.; Tsagarakis, N.; Caldwell, D.G. (2003): Exoskeletons for human force augmentation, *Industrial Robot*, Vol. 30 No. 6, 592-602. (DOI 10.1108/01439910310506864) (Letöltés dátuma: 2021.06.13.)
- Chiaradia, D.; Xiloyannis, M.; Solazzi, M.; Masia, L.; Frisoli, A. (2019): Rigid Versus Soft Exoskeletons: Interaction Strategies for Upper Limb Assistive Technology, *Wearable Robotics – Systems and Applications*, 2020, 67-90. (DOI 10.1016/B978-0-12-814659-0.00004-7) (Letöltés dátuma: 2021.05.19.)
- Demir, K.G.; Zhang, Z.; Yang, J.; Gu, G.X. (2020): Computational and Experimental Design Exploration of 3D-Printed Soft Pneumatic Actuators, *Advanced Intelligent Systems*, (DOI 10.1002/aisy.202000013) (Letöltés dátuma: 2021.03.01.)
- Elgeneidy, K.; Lohse, N.; Jackson, M. (2017): Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors – A data-driven approach, *Mechatronics*, 234-247. Vol.50, p:234-247 (DOI 10.1016/j.mechatronics.2017.10.005) (Letöltés dátuma: 2021.03.01.)
- Horváth P., Ballagi Á., Nagy A., Kuti R. (2018): Az exoskeletonok katonai alkalmazási lehetőségei, *Műszaki Katonai Közlöny* 28. évfolyam (2018) 2. szám. (Letöltés dátuma: 2021.06.17.)
- Hu, W.; Mutlu, R.; Li, W.; Alici, G. (2018): A Structural Optimisation Method for a Soft Pneumatic Actuator, *MDPI Robotics*, (DOI: 10.3390/robotics7020024) (Letöltés dátuma: 2021. 05.19.)

- Jo, I.; Park, Y.; Lee, J.; Bae, J. (2019): A portable and spring-guided hand exoskeleton for exercising flexion/extension of the fingers, *Mechanism and Machine Theory*, 135, 176–191. (DOI 10.1016/j.mechmachtheory.2019.02.004) (Letöltés dátuma: 2021.05.19.)
- Li, M.; Zhuo, Y.; He, B.; Liang, Z.; Xu, G.; Xie, J.; Zhang S. (2019): A 3D-printed soft hand exoskeleton with finger abduction assistance, *16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)* (DOI 10.1109/URAI.2019.8768611) (Letöltés dátuma: 2021.05.19.)
- Mosadegh, B.; Keplinger, C.; Wennstedt, S.; Shepherd, R. F.; Gupta, U.; Whitesides, G.M.; Walsh, C.J.; Polygerinos, P.; Shim, J.; Bertoldi, K. (2014): Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly, *Advanced Functional Materials* (DOI 10.1002/adfm.201303288) (Letöltés dátuma: 2021.09.17.)
- Perl Zs. (2019): Az exoskeleton civil alkalmazási lehetőségei, *Műszaki Katonai Közlöny* 29. évfolyam (2019) 1. szám 33–41. (DOI: 10.32562/mkk.2019.1.3.) (Letöltés dátuma: 2021.06.13.)
- Polygerinos, P.; Wang, S. L. Z.; Nicolini, L.F.; Mosadegh, B.; Whitesides, G. M.; Walsh, C. J. (2013): Towards a Soft Pneumatic Glove for Hand Rehabilitation, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (Letöltés dátuma: 2021.09.17.)
- Wege, A.; Hommel, G. (2005): Development and control of a hand exoskeleton for rehabilitation of hand injuries, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (DOI 10.1109/IROS.2005.1545506) (Letöltés dátuma: 2021.05.19.)
- Yeem, S., Heo, J.; Kim, H.; Kwon, Y. (2019): Technical Analysis of Exoskeleton Robot, *World Journal of Engineering and Technology*, 7, 68-79. (DOI 10.4236/wjet.2019.71004.) (Letöltés dátuma: 2021.06.13.)
- <https://constructible.trimble.com/construction-industry/exoskeletons-for-construction-workers-are-marching-on-site> (Letöltés dátuma: 2021.06.15.)