

KONSTRUKCIJA PNEUMATSKOG EGZOSKELETA

Mališa, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:648439>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-25**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

KONSTRUKCIJA PNEUMATSKOG EGZOSKELETA

Rijeka, rujan 2022.

Matej Mališa

0069075683

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

KONSTRUKCIJA PNEUMATSKOG EGZOSKELETA

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Goran Gregov

Rijeka, rujan 2022.

Matej Mališa

0069075683

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKE ISPITE

Rijeka, 10. ožujka 2021.

Zavod: **Zavod za konstruiranje u strojarstvu**
Predmet: **Modeliranje hidrauličkih i pneumatskih sustava**
Grana: **2.11.01 opće strojarstvo (konstrukcije)**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

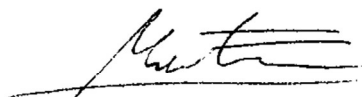
Pristupnik: **Matej Mališa (0069075683)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**
Modul: **Konstruiranje i mehatronika**

Zadatak: **Konstrukcija egzoskeleta s pneumatskim pogonom / Design of a pneumatically powered exoskeleton**

Opis zadatka:

Potrebno je konstruirati egzoskelet s pneumatskim pogonom namijenjenog za povećanje snage pri skoku korisnika egzoskeleta. Treba predložiti nekoliko konstrukcijskih rješenja te za odabrano rješenje provesti kompletan proračun i izraditi tehničku dokumentaciju.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.



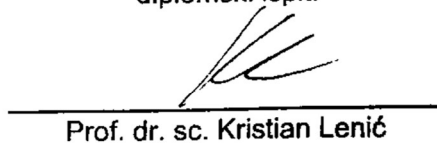
Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2021.

Mentor:



Doc. dr. sc. Goran Gregov

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Kristian Lenić

IZJAVA

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno služeći se stečenim znanjem i literaturom.
Rad sam izradio prema zadatku pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Gorana Gregova.

Rijeka, rujan 2022.



Matej Mališa

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Gorana Gregova na velikoj pomoći pri izradi diplomskog rada. Na svim brzim odgovorima te strpljenju i brojnim konstruktivnim kritikama koje su uvelike povećale kvalitetu ovoga rada, bez njega izrada ovoga rada ne bi bila moguća.

Zahvaljujem se roditeljima Alojzu i Sanji na podršci kroz cijelo akademsko putovanje, te na strpljenju i razumijevanju kroz sve godine studiranja.

Zahvaljujem se djevojci Mihaeli na velikoj emocionalnoj podršci pri pisanju ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se braći i sestrama na svojoj pomoći tijekom studiranja.

Rijeka, rujan 2022.

SADRŽAJ

1. Uvod.....	3
2. Egzoskeleti s pneumatskim pogonom.....	4
2.1. Egzoskelet lakta – Soft pneumatic elbow exoskeleton	4
2.2. Hibridno pokretan egzoskelet donjih ekstremiteta	6
2.3. Egzoskelet za ruku – ExoHand	11
2.4. Egzoskelet gležnja – Ankle Exoskeleton.....	12
2.5. Egzoskelet za trčanje – Semi-Active exoskeleton for running	14
3. Konstrukcija pneumatskog egzoskeleta nogu.....	17
3.1. Prva varijanta pneumatskog egzoskeleta za ostvarenje pojačanog skoka.....	17
3.2. Druga varijanta pneumatskog egzoskeleta za ostvarenje pojačanog skoka.....	19
3.3. Detaljni opis odabrane varijante	21
4. Proračun pneumatskog egzoskeleta nogu	25
4.1. Proračun brzina, vremena, ubrzanja i sila koje se ostvaruju pri skoku bez uporabe egzoskeleta	25
4.2. Proračun brzina, vremena, ubrzanja i sila koje se ostvaruju pri skoku uporabom egzoskeleta	30
4.3. Proračun hoda i srednje brzine cilindra, te ovisnosti radnog tlaka i visine skoka	37
4.4. Proračun pneumatskog spremnika	39
5. Simulacija pneumatskog egzoskeleta	46
5.1. Simulacijski model pneumatskog sustava egzoskeleta.....	46
5.2. Objašnjavanje i definiranje parametara komponenti	49
5.3. Rezultati simulacijskog modela egzoskeleta	52
6. Izrada fizičkog modela.....	56
6.1. Pneumatski cilindri	56
6.2. Tlačni spremnik	57

6.3.	Pneumatske cijevi	59
6.4.	Regulator tlaka i manometar	63
6.5.	Razvodni ventil	67
6.6.	Spajanje komponenti i izrada fizičkog modela.....	70
6.7.	Testiranje fizičkog modela.....	77
7.	Zaključak.....	79
8.	Popis slika i tablica	81
8.1.	Popis slika	81
8.2.	Popis tablica	84
9.	Literatura.....	85
10.	Popis oznaka	87
11.	Sažetak i ključne riječi na hrvatskom i engleskom jeziku	89
12.	Privitak.....	90

1. UVOD

Egzoskelet (grč *έξω*, *éxō* "vanjski" i *σκελετός*, *skeletos* "skeleton", "kostur") je vanjski kostur koji daje podršku i zaštitu tijelu životinje za razliku od ljudi koji imaju unutarnji kostur (endoskelet). To bi bila generalna definicija egzoskeleta, dok bi se u strojarskoj struci pojam egzoskeleta više odnosio na umjetni vanjski kostur koji se montira na čovjeka te mu omogućava određene kinematičke prednosti. Varijanti egzoskeleta ima mnogo, a mogu se kategorizirati prema načinu pokretanja i prema njihovoj ulozi. Za pokretanje može se koristiti pneumatika, hidraulika, servo motori, opruge, itd., a kada se govori o primjeni misli se na koje radnje čovjeka će utjecati (npr. asistencija pri dizanju predmeta, hodanju, trčanju, skakanju, itd.). U ovome radu analiziran je pneumatski egzoskelet za pojačanje snage skoka. Što bi značilo da se za pogon egzoskeleta koristio komprimirani zrak sa pripadajućim pneumatskim komponentama, a egzoskelet je izrađen na način da utječe isključivo na pokrete čovjeka pri skakanju dok na sve ostale pokrete nema nikakvog utjecaja.

Diplomski rad sastoji se od pet poglavlja. U prvom poglavlju istražilo se i opisalo nekoliko različitih pneumatskih egzoskeletnih sustava čija je funkcija pripomoć korisniku pri obavljanju različitih radnji. Pokušalo se detaljno objasniti pneumatski pogon unutar tih sustava ili podsustava.

U drugome poglavlju predložile su se i analizirale varijante konstrukcijskog rješenja za izradu egzoskeleta kojim se ostvaruje pojačani skok korisnika. Predložilo se je nekoliko varijanti koje su detaljno opisane, te se u konačnici izabrala optimalna varijanta koja se nastavila razvijati. Za odabranu varijantu izradio se i 3D model čija je tehnička dokumentacija priložena na kraju ovog diplomskog rada.

Nakon odabira optimalne varijante, u trećem poglavlju izvršen je proračun osnovnih radnih parametara konstrukcijskog rješenja. Proračunale su se razne vrijednosti poput sila, ubrzanja, vremena, itd., a isto tako su proračunati i potrebne pneumatske komponente.

Kada su odabrane sve komponente bilo je moguće izvršiti simulaciju koja će se provesti u programu SimulationX. U program se unose sve vrijednosti proračunate u poglavlju proračun te 3D virtualni model. Pokretanjem simulacije, dobiveni su rezultati sila, tlakova, ubrzanja, itd. te vizualni prikaz kretanja sustava.

Uspješnim provođenjem simulacije prešlo se na zadnje poglavlje u kojemu je izrađen stvarni fizički model. Postupak izrade opisan je u ovome poglavlju. U konačnici su provedeni eksperimenti na fizičkome modelu kako bi se ispitala njegova funkcionalnost.

2. EGZOSKELETI S PNEUMATSKIM POGONOM

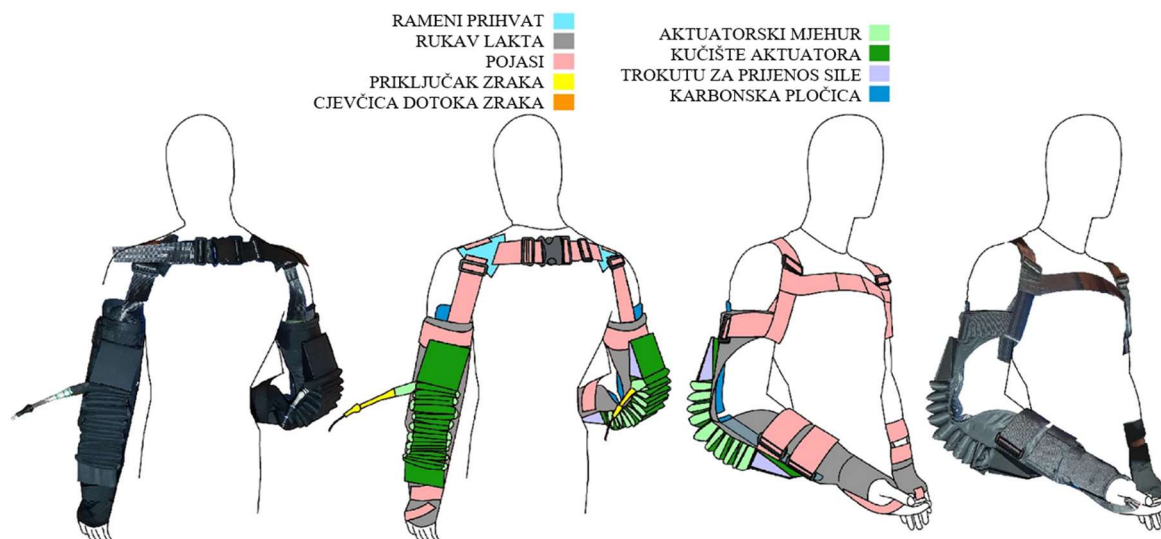
U ovom poglavlju analizirati će se primjeri pneumatskih sustava egzoskeleta koji dijele neke slične karakteristike sa sustavom koji će se kasnije obrađivati u ovome radu.. Prikazani sustavi različite su izrade i namjene, ali na taj način će se pokušati dobiti jedna općenita slika o simbiozi živih organizama i pneumatike.

2.1. Egzoskelet lakta – Soft pneumatic elbow exoskeleton

Ljudska karakteristika držanja i nošenja tereta ograničena je zbog maksimalne mišićne sile i umora mišića. Umor se javlja zbog niza staničnih mehanizama, kao što je ograničena opskrba energijom, ograničeni prijenos akcijskog potencijala mišića ili ograničeno ponovno uzimanje i otpuštanje iona kalcija. Kod većih opterećenja dolazi do ranijeg zamora mišića, pa će se tako smanjiti moguće trajanje držanja ili nošenja tereta. Tijekom nošenja tereta, trajanje držanja se dodatno smanjuje (25%). Razvijaju se rješenja za smanjenje opterećenja ili izbjegavanje zamora mišića zbog prekomjernih opterećenja u vidu egzoskeleta koji predstavljaju nova tehnička pomagala koja ciljaju na smanjenje umora mišića. [1]

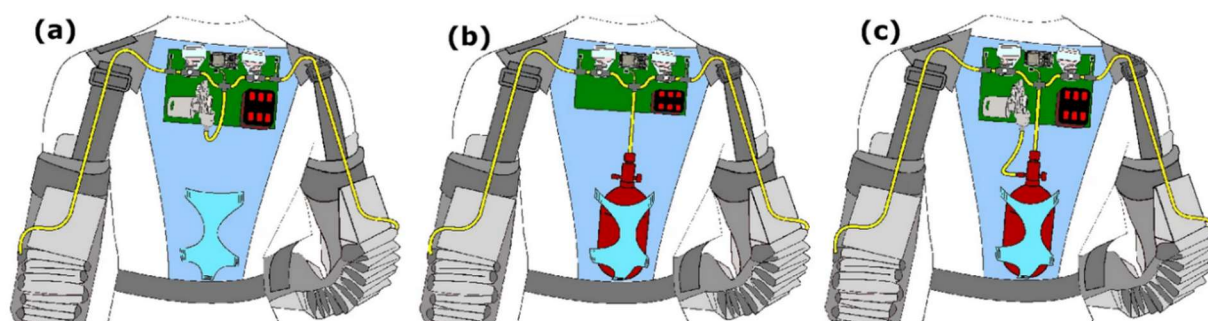
Postoje aktivni i pasivni egzoskeleti. Aktivni egzoskeleti sastoje se od cijelog sustava sa vlastitom pohranjenom energijom za stvaranje sile koja se prenosi na čovjeka, te općenito su teži od svojih pasivnih parnjaka koji teže 1,8–6,5 kg. Pasivni sustavi energiju dobivaju od čovjeka, te je u nekom trenutku vraćaju. I za pasivne i za aktivne uređaje, ukupni ljudski napor za pomicanje ili nošenje egzoskeleta povećava se s težinom uređaja, bez obzira na lokalno smanjenje napora. Osmišljeno je egzo odijelo za asistenciju gornjih udova. Na primjer, egzo odijelo za pomoć laktu (2 kg za pomoć jednom laktu) smanjilo je aktivnost bicepsa brachii (65%) i biološki moment lakta (60%) pri držanju 2,3 kg s maksimalnim pomoćnim momentom od 6 Nm. Nadalje, kasnije dolazi do početaka umora mišića prilikom držanja utega od 1 kg. [1]

Na Slici 2.1. je prikazani Carry, lagani aktivni egzoskelet gornjih ekstremiteta koji pomaže pri savijanju lakta tijekom držanja i nošenja tereta. Carry kombinira dva koncepta koji najviše obećavaju, meko sučelje čovjek-stroj i meko pneumatsko aktiviranje.



Slika 2.1. Carry - Egzoskelet lakta - Soft pneumatic elbow exoskeleton [1]

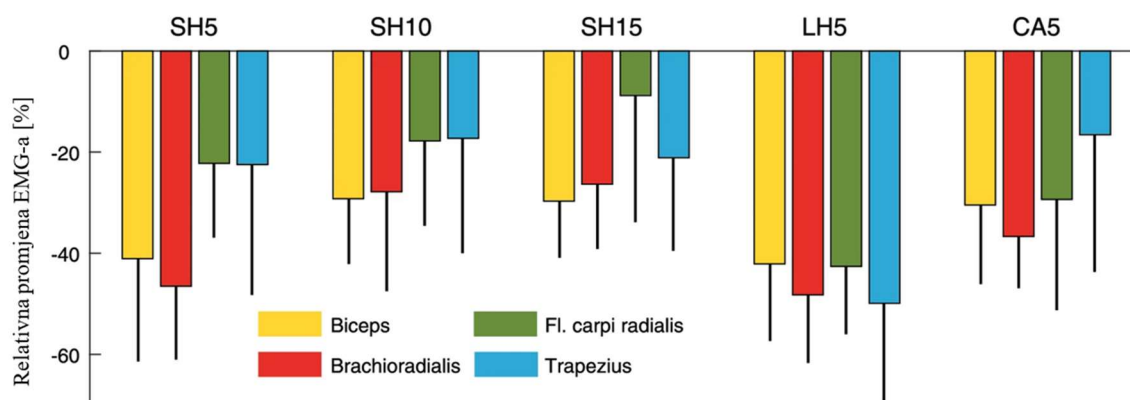
Radi istraživanja dinamike rada i autonomne upotrebljivosti pretpostavljaju se tri različite autonomne Carry varijante (Slika 2.2.). Varijantu A pokreće kompresor, varijantu B tlačni spremnik, a varijantu C kombinacija kompresora i spremnika. Što se tiče dinamike rada, minimalna moguća vremena ciklusa određena su za svaku varijantu na temelju vremena punjenja i otpuštanja zraka aktuatora te vremena otvaranja i zatvaranja pneumatskog ventila. Što se tiče autonomne upotrebljivosti, ukupna količina mogućih ciklusa upotrebe određena je za svaku varijantu s razumnom veličinom baterije te volumenom i tlakom spremnika. Također su procijenjene mase za svaku od varijanti.



Slika 2.2. Tri varijante Carry - Egzoskelet lakta [1]

Rezultati mjerenja pokazali su da se uz pomoć egzoskeleta Carryja ostvarilo relativno smanjenje EMG-a (Elektromiografija - dijagnostički postupak za procjenu zdravlja mišića i živčanih stanica koje ih kontroliraju) za sva stanja (Slika 2.3.). Uzimajući u obzir sve scenarije, srednji EMG smanjen je za $35 \pm 6\%$ za biceps, $37 \pm 10\%$ za brachioradialis ($p=0,0276$), $24\% \pm 13\%$ za flexor carpi radialis i $25 \pm 14\%$ za trapezius. Najveća smanjenja (50%) pronađena su za trapezius u scenariju dugog držanja (LH5). S povećanim opterećenjima tijekom scenarija držanja, relativna smanjenja EMG-a djelomično su se smanjila. Nasuprot tome, čini se da dulja vremena stajanja povećavaju smanjenje EMG-a za flexor carpi radialis i trapezius mišić. Uspoređujući relativna smanjenja EMG-a u scenarijima dugog držanja i nošenja, otkrilo se da nošenje koristi manje od pomoći pri nošenju. [1]

Slika 2.3. prikazuje relativnu promjenu EMG-a uključujući standardnu devijaciju od nepotpomognutih do potpomognutih stanja za scenarije kratkog držanja (SH5 5 kg, SH10 s 10 kg, SH15 s 15 kg), scenarij dugog držanja (LH5, 5 kg) i opterećenja scenarij nošenja (CA5, 5 kg).

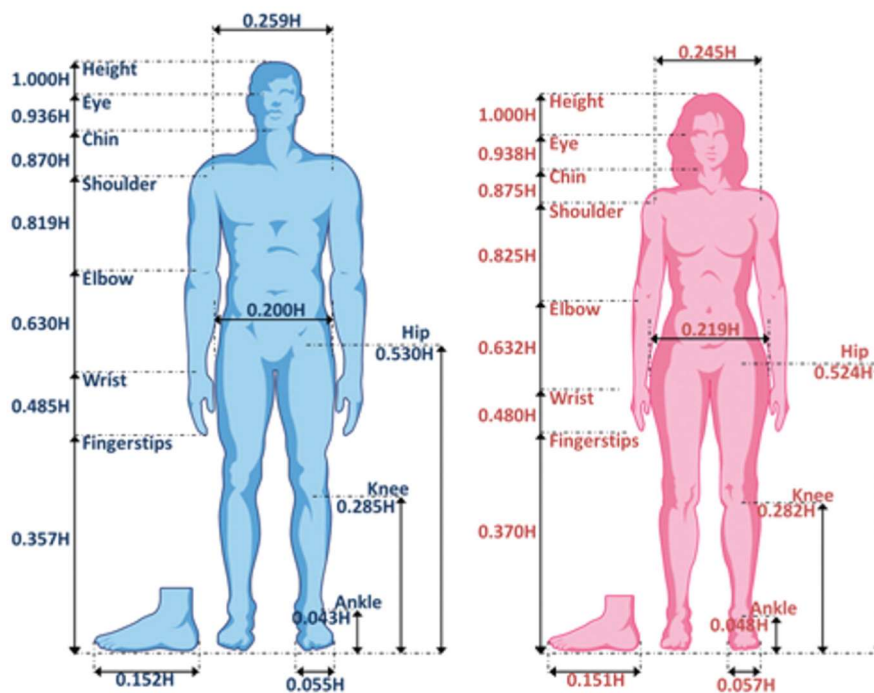


Slika 2.3. Grafički prikaz smanjenja potrebne sile za odvijanje rada [1]

2.2. Hibridno pokretan egzoskelet donjih ekstremiteta

U slučaju ovoga egzoskeleta primjenjuju se dvije vrste pokretača za pokretanje donjih ekstremiteta korisnika. To su istosmjerni motori s harmonijskim pogonom te pneumatski umjetni mišići. Ova kombinacija koristi prednosti i harmonijskog pogona i prednosti pneumatskog mišića. Omogućuje se i visoka točnost kontrole položaja i visok omjer snage i težine. Nedostaci dvaju aktuatora prevladavaju se hibridnim pogonom, na primjer, niska točnost upravljanja i otežano modeliranje pneumatskog mišića, kompaktnost i strukturna fleksibilnost istosmjernih motora.

Antropometrijski faktori ljudskog tijela temelj su dizajna egzoskeleta. U provedenom istraživanju su prvo prikupljeni podaci različitih pojedinaca, a zatim se proučava antropometrija donjih ekstremiteta populacije [2]. Ovo istraživanje omogućilo je uvid u standardne omjere ljudskog tijela, kako je prikazano i na Slici 2.4. Zglobovi egzoskeleta dizajnirani su na temelju te slike. Dimenzije korisnika ovisne su o njegovoj visini.



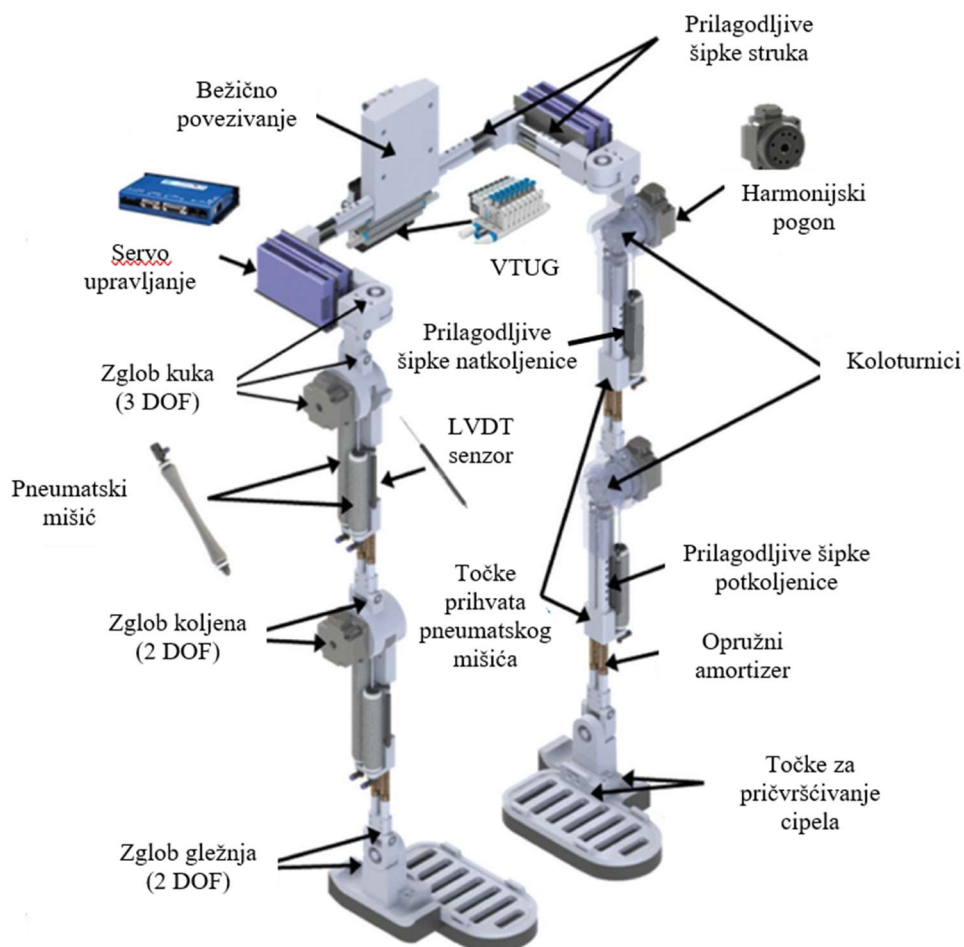
Slika 2.4. Standardni omjeri dimenzija muškog i ženskog tijela [2]

Raspon pokreta ljudskih zglobova još je jedan važan antropometrijski čimbenik. Analizirajući mnoge pojedince, otkriveno je da maksimalni rasponi zglobova nisu toliko važni za dizajn egzoskeleta. Međutim, kutovi udobnosti zglobova odlučuju hoće li egzoskelet uzrokovati bol ili čak opasnost za korisnika. Kutovi udobnosti dani su u Tablici 2.1. Kutovi udobnosti ovise o dobi, tjelesnom stanju, anatomskim i funkcionalnim razlikama i tako dalje. Ovi kutovi udobnosti koriste se za dizajn raspona zglobova egzoskeleta.

Tablica 2.1. Kutovi udobnosti kretanja zglobova donjih ekstremiteta [2]

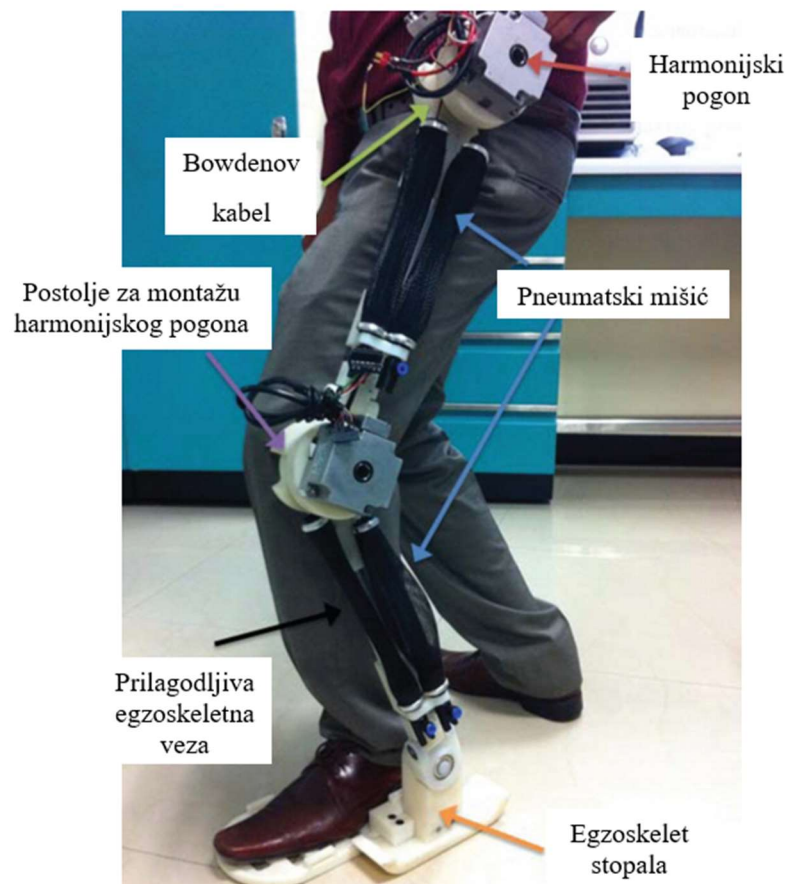
Zglob	Kretanje	Kut [°]
Kuk	Hiperekstenzija	0 - 45
	Savijanje	0 - 130
Koljeno	Savijanje	0 - 135
Gležanj	Dorzalna fleksija	0 - 20
	Plantarna fleksija	0 - 40

Temeljno načelo dizajna zgloba je poravnanje rotacijske osi egzoskeleta s anatomskim rotacijskim osima. Kuk i koljeno egzoskeleta su aktivni zglobovi fleksije/ekstenzije. Kako bi se povećala snaga donjih ekstremiteta, hibridni pneumatsko-električni sustav s harmonijskim pogonskim aktuatorom primjenjuje se izravno na zglobove. Svaka karika koristi dva pneumatska mišića. Spregnuti prijenos ova dva pneumatska mišića ostvaruje se pomoću Bowdenovih kabela.



Slika 2.5. Elementi egzoskeleta donjih udova [2]

Egzoskelet donjih ekstremiteta prikazan je na Slici 2.5. Ovdje je zglob fleksije/ekstenzije gležnja pasivan. Zglob kuka ima 3 stupnja slobode kretanja: abdukciju/adukciju, unutarnju/vanjsku rotaciju i fleksiju/ekstenziju. Pasivne su abdukcija/adukcija i unutarnja/vanjska rotacija, dok je aktivan zglob fleksije/ekstenzije. Koljeno ima 2 stupnja slobode kretanja: fleksiju i abdukciju/adukciju. Ovdje je fleksija aktivna, a abdukcija/adukcija pasivna. Aktivacija pneumatskog mišića primjenjuje se na dvije veze: vezu između zgloba kuka i zgloba koljena i vezu između zgloba koljena i zgloba gležnja. Dva aktivna zgloba na nozi prikazana su na Slici 2.6.



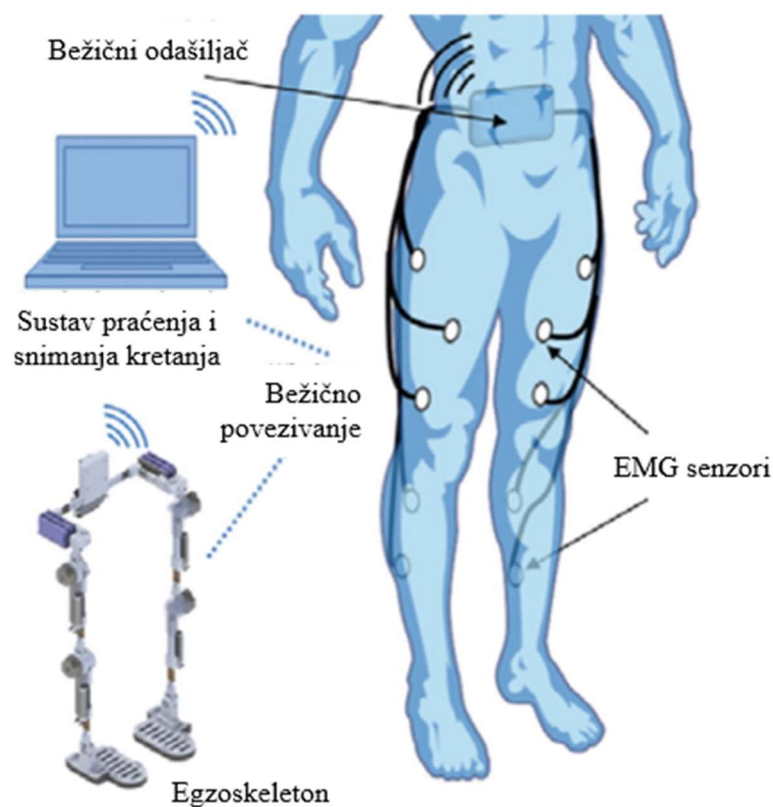
Slika 2.6. Prikaz stvarnog izgleda egzoskeleta donjih ekstremiteta [2]

Za zglobove egzoskeleta koristi se hibridni pneumatsko-električni sustav. Koristi prednosti oba aktuatora. Harmonički pogonski aktuator ima veliki zakretni moment, visoku točnost položaja i relativno male dimenzije. Ova su svojstva idealna za rehabilitaciju hoda jer u ciklusu hoda donji ekstremitet ponavlja slične radnje. Posebno je pogodan za rehabilitaciju i oporavak slabih i ozlijeđenih osoba. Pneumatski mišići su lagani i imaju visok omjer snage/težine u usporedbi s

drugim aktuatorima. Unutarnja elastičnost osigurava popustljivo aktiviranje, a posebno je to pogodno za ljude koji imaju nenamjerne mišićne kontrakcije zbog neurološkog poremećaja.

Veze egzoskeleta izrađene su od aluminijskih šipki i cijevi kao i podesive šipke. Kako bi se smanjio učinak sudara u ekstremitetima korisnika, podesivi elementi za gornji i donji dio noge uključuju opružne amortizere (vidi Sliku 2.6.). Egzoskelet može funkcionirati kao vježbač hodanja ili kao traka za trčanje. Duljina egzoskeleta može se lako prilagoditi kako bi odgovarala raznovrsnoj populaciji s obzirom na njihove antropometrijske čimbenike.

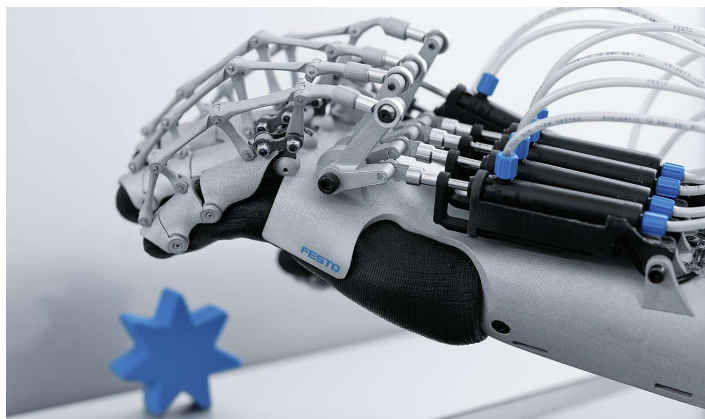
Upravljanje sustavom vrši se preko sučelja čovjek-stroj koji koristi EMG senzore (Sliku 2.7.). Senzori su postavljeni na nekoliko mišića donjeg ekstremiteta čovjeka i bežično šalju EMG signale računalu. Ovi senzori hvataju pokrete donjih udova i stvaraju bazu obrazaca hoda. Analizom uzoraka, upravljačke naredbe šalju se aktuatorima za pomicanje robota egzoskeleta.



Slika 2.7. EMG senzori na donjim ekstremitetima [2]

2.3. Egzoskelet za ruku – ExoHand

ExoHand predstavlja vrstu egzoskeleta za samu ruku koji je razvila tvrtka Festo. Navlači se poput rukavice i podupire ljudsku ruku izvana i tako poboljšava njezinu snagu i izdržljivost. Njena se primjena može zamisliti za montažne radove ili daljinske manipulacije, na polju uslužne robotike ili medicinske terapije, postoji mnogo zamislivih područja primjene za ExoHand.



Slika 2.8. Prikaz egzoskeleta ExoHand [3]

ExoHand može služiti na način da jako pojačava snagu svakog pojedinog prsta, ali egzoskelet također može oponašati pokrete ruke i prenositi ih u stvarnom vremenu u robotsku ruku baš kako je prikazano na Slici 2.9. Pomoću povratne informacije silom osoba osjeća što robot zahvaća. Što znači da se ljudski osjet dodira može koristiti i na velikim udaljenostima, a može se primijeniti i na sučelju između stvarnog i virtualnog svijeta.



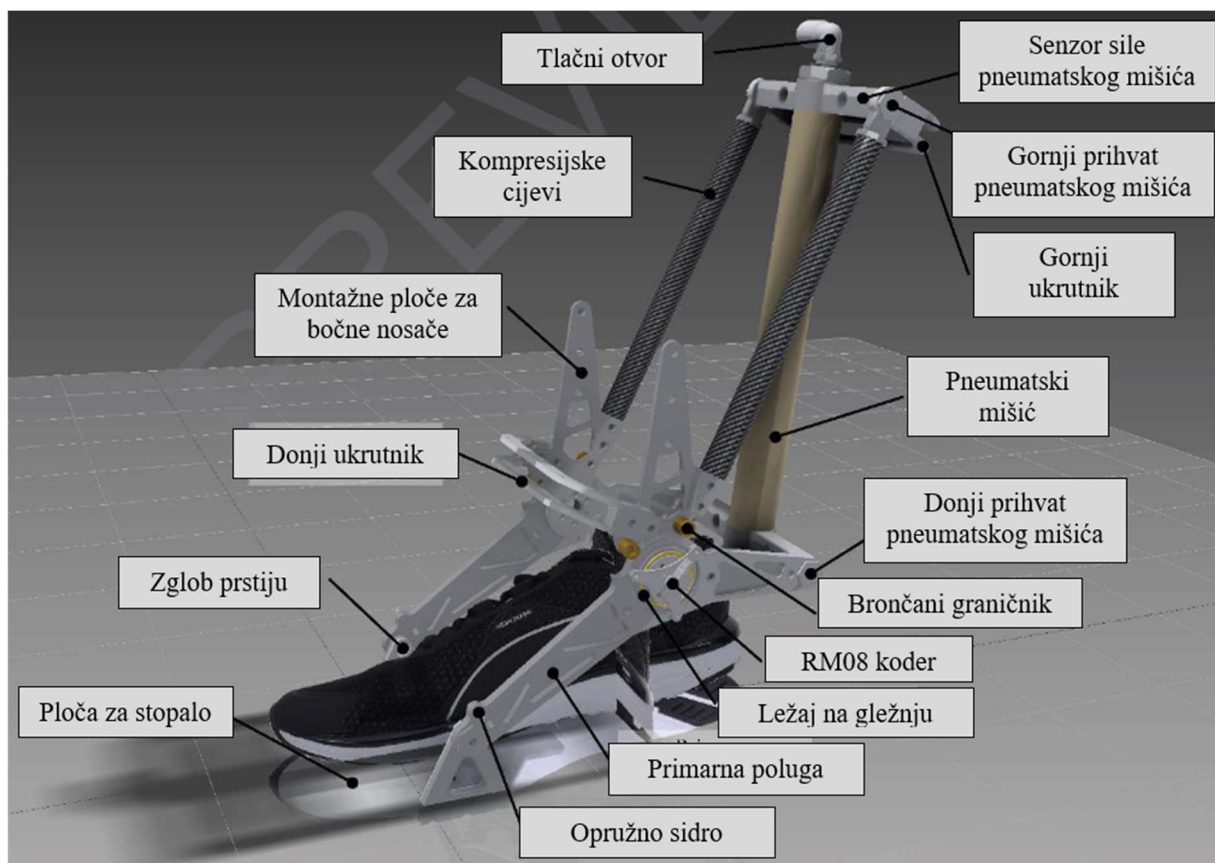
Slika 2.9. Robotska ruka kopira pokrete ExoHand-a [3]

Oblik ExoHand-a prilagođen je korisnikovoj ruci i izrađen je od poliamida pomoću selektivnog laserskog sinteriranja (SLS). Pokreće ga osam pneumatskih aktuatora. Sile, kutovi i udaljenosti bilježe se pomoću senzora. Upravljački sustav koji je u skladu s CoDESys bilježi i obrađuje vrijednosti položaja i sila te omogućuje precizno poravnavanje robotske ruke kojom se upravlja.

S ExoHand-om Festo nastavlja napore uložene u istraživačko područje interakcija između čovjeka i stroja. Cilj je poboljšati snagu i izdržljivost ljudske ruke, proširiti ljudski opseg djelovanja i osigurati neovisnost čak i u starosti osobe kada ona izgubi snagu.

2.4. Egzoskelet gležnja – Ankle Exoskeleton

U istraživanju (Lit) konstruiran je egzoskelet namijenjen za dinamičko hodanje. Konstrukcija je razvijena kako bi se ostvarilo poboljšanje u trčanju i skakanju korisnika. Nakon promišljanja o raznim izvedbama, odlučilo se za jednostavnu kinematičku strukturu kraka poluge prikazanu na Slici 2.10. Ovo je najčešća varijanta postojećih egzoskeleta gležnja. Ovakva struktura zahtijeva vlačni aktuator, gdje je najprikladniji pneumatski umjetni mišić. Ova konfiguracija osigurava robusnost, kao i strukturnu krutost. U prikazanoj konstrukciji, pneumatski mišić djeluje vlačnom silom. To stvara okretni moment oko gležnja, koji reagira na podlogu kroz pasivni nožni zglob te ostvaruje silu koja pomaže korisniku pri dinamičkom kretanju.



Slika 2.10. Egzoskelet gležnja [4]

Za ovaj egzoskelet, zadaci trčanja i skakanja odabrani su kao ciljevi konstruiranja. Dok trčanje može uključivati udarne sile veće od 3g, ljudi u pravilu djeluju bliže 2g ekvivalentnim silama kada trče i skaču. Ovaj egzoskelet, iako bi se mogao koristiti za apsorpiranje udaraca, usmjeren je na stvaranje netto pozitivnog rada za povećanje atletskih sposobnosti. Iz tog razloga želja je postići ubrzanja do 2g. Masa korisnika zajedno sa egzoskeletom radi praktičnosti i jednostavnosti testiranja je uzeta 75 kg, to je rezultiralo da je tražena sila za ostvarenje ubrzanja od 2g 1470 N.

Umjesto razvoja kompliciranog modela za procjenu protoka koji je potreban za postizanje dinamičkih gibanja, odlučeno je da se odabere predimenzionirani ventil. To bi rezultiralo ne samo odgovarajućim brzinama aktiviranja pneumatskog mišića, već bi omogućilo i bržu kontrolu zbog veće veličine otvora ventila.

Raspon pokreta uvelike ovisi o radnji koja se izvodi kao i o tjelesnoj građi nositelja. Tipični opseg pokreta pri savijanju gležnja kod ljudi može se kretati od 59 do 79 stupnjeva, ovisno o spolu i fleksibilnosti. Tipično hodanje koristi samo raspon kretanja od 25 do 40 stupnjeva, trčanje između 45 do 60 stupnjeva i skakanje do 70 stupnjeva [4]. Za ovo istraživanje odlučeno je da se dizajniraju

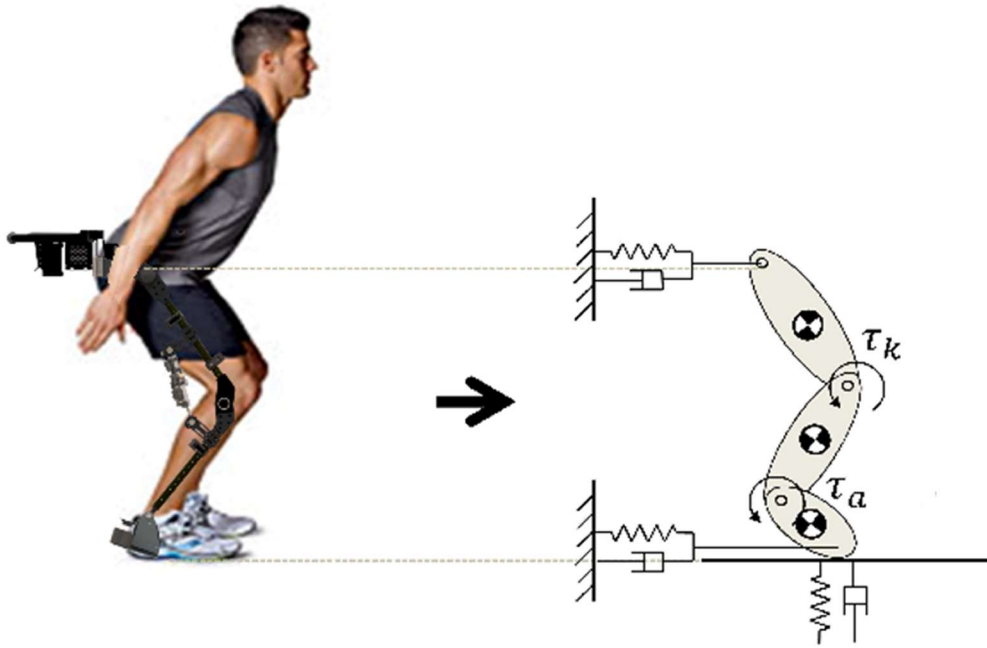
mehanički tvrdi graničnici na rasponu pokreta od 60 stupnjeva. Duljina pneumatskog mišića bila bi maksimizirana kako bi se omogućio što veći raspon kretanja. Uzimajući u obzir značajan pad sile povezan s pneumatskim mišićima tijekom njihovog rada, čak bi i rad s tvrdim zaustavljanjem bio bolji, jer bi više sile bilo dostupno tijekom cijelog rada pneumatskog mišića.

2.5. Egzoskelet za trčanje – Semi-Active exoskeleton for running

Pri trčanju, ljudske noge često se predstavljaju modelom obrnutog klatna s oprugom. Stoga bi imalo smisla koristiti egzoskelet koji pomaže čovjeku u trčanju, a ima mehanizme nalik opruzi.

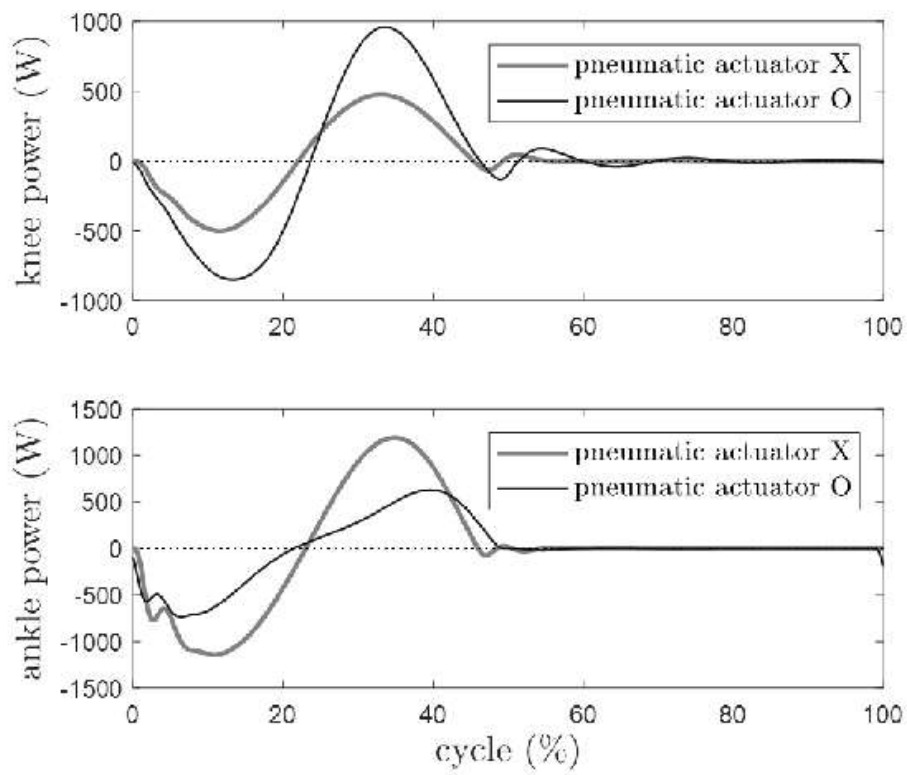
Poluaktivni pneumatski aktuatori mogu postići opružno ponašanje tijekom ciklusa zatvaranjem elektroničkog solenoidnog ventila i isto tako se ponašati gotovo bez sile otpora tijekom kretanja pri otvorenom ventilu.

U ovom primjeru egzoskeleta nastojali su se optimizirati položaji ugradnje i početni pneumatski tlak pneumatskih aktuatora. U procesu optimizacije, simulacije su provedene na skakutanju s jednom nogom za učinkovitost pneumatskih aktuatora umjesto na kompliciranijem kretanju u trku. Za optimizaciju pneumatskih pokretača, položaj ugradnje i početni tlak postavljeni su kao projektne varijable. A prosječna stopa potrošnje energije izračunata iz ljudske zajedničke snage tijekom skakutanja odabrana je kao funkcija troška.



Slika 2.11. Poluautomatski egzoskelet za trčanje [5]

Za izradu egzoskeleta za trčanje postoje neka ograničenja, a ona uključuju raspon ugradnje pneumatskih aktuatora, maksimalnu duljinu cilindra, minimalnu duljinu cilindra i najveći dopušteni tlak. Ispitivanjem došlo se do rezultata da se stopa potrošnje energije smanjuje za 13,0%, 4,5% i 31,8% [5] u ovisnosti dali se koriste aktuatori samo za koljeno, samo za gležanj ili se koriste aktuatori i za gležanj i za koljeno. Na slici u nastavku je prikazana usporedba korištenja egzoskeleta sa slučajem kada se ne koriste pneumatski aktuatori.



Slika 2.12. Snaga ljudskih zglobova sa i bez pneumatskog aktuatora [5]

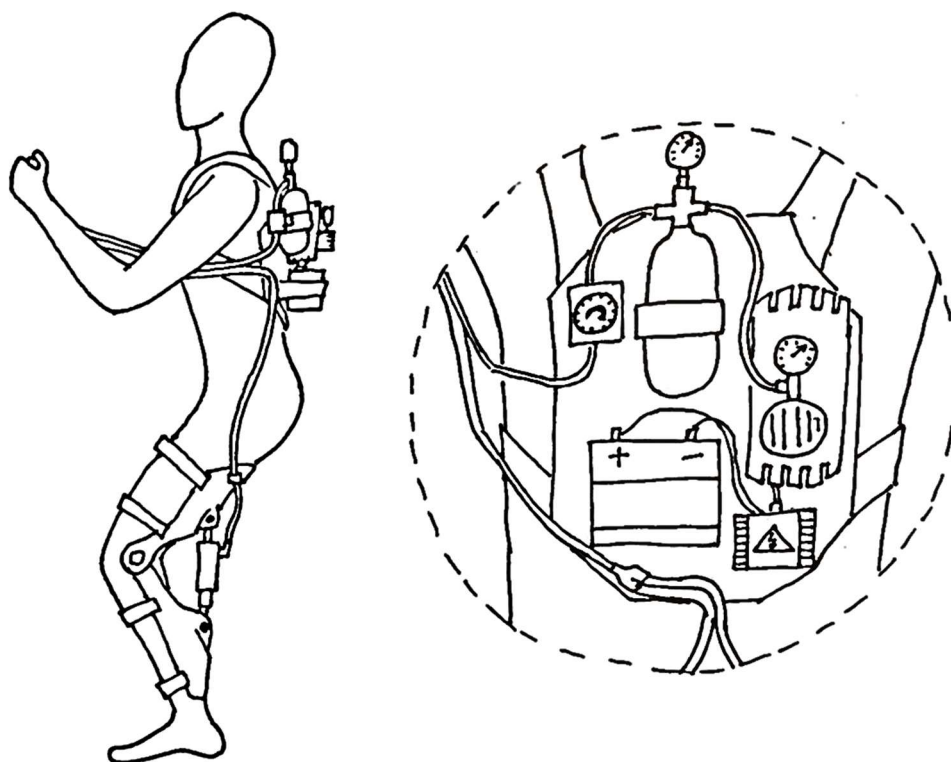
3. KONSTRUKCIJA PNEUMATSKOG EGZOSKELETA NOGU

U ovome će se poglavlju razmatrati poneke varijante konstrukcijskih rješenja pneumatskog egzoskeleta za ostvarenje pojačanog skoka. Od predloženih rješenja u konačnici izabrati će se jedna varijanta koja će se pokazati kao najbolja za izradu pravog prototipa egzoskeleta nogu kojim se ostvaruje pojačani skok. Svaka od tri varijante biti će bazično objašnjena uz prikaz i skice, dok će izabrana varijanta biti još detaljno objašnjena na kraju ovoga poglavlja.

Potrebno je predložiti izvedbu egzoskeleta kojim bi se pojačala snaga nogu na način da se može ostvariti veći skok. Sustav služi da se prilikom skoka pomoću pneumatskog cilindra poveća snaga mišića nogu kako bi se mogao ostvariti viši skok. Sustav je neaktivan u slobodnom hodu i aktivira se samo pri skoku. Korisnik sam određuje kada će sustav biti aktivan. Svaki od predloženih sustav ima određene prednosti i nedostatke, ali u konačnici je potrebno razmotriti koji bi sustav najbolje odgovarao za izradu prototipa na kojem bi se vršila određena ispitivanja.

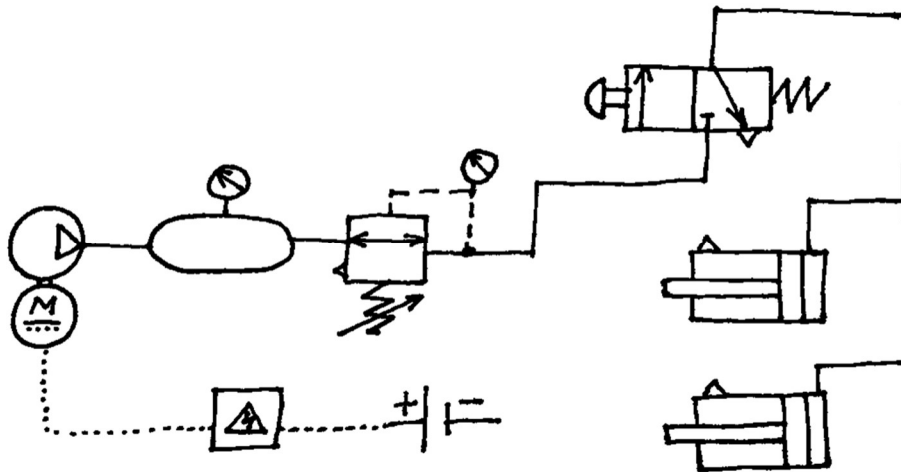
3.1. Prva varijanta pneumatskog egzoskeleta za ostvarenje pojačanog skoka

Skica prve varijante sa detaljem leđa korisnika vidljiva je na Slici 3.1. Osnovna aktivna komponenta za ostvarivanje rada skoka je pneumatski cilindar. Sustav se sastoji od dva jednaka pneumatska cilindra gdje je svaki postavljen na jednu nogu korisnika egzoskeleta. Zajedničkim izvlačenjem pneumatskih cilindara ostvaruje se skok korisnika. Komprimirani zrak potreban za pokretanje cilindara osigurava kompresor zraka smješten na leđima korisnika egzoskeleta. Osim kompresora zraka, sustav posjeduje i jedan maleni spremnik zraka koji osigurava određenu zalihu komprimiranog zraka. Važna komponenta sustava je i regulator tlaka pomoću kojega se točno određuje tlak koji se propušta u pneumatske cilindre, a time i direktno određuje sila koju će ostvariti cilindri, odnosno veličina rada koja će se ostvariti. Za upravljanje sustavom je zadužen mehanički razvodni ventil koji se nalazi u dlanu korisnika. Kompresor zraka zahtjeva električnu energiju za njegov rad stoga je na leđa korisnika smještena baterija i sustav za upravljanje baterijom. Baterija osigurava 12 V za pokretanje kompresora zraka, a sustav upravljanja baterije služi za reguliranje punjenja baterije i za propuštanje el. struje prema kompresoru na način da ne dođe do oštećenja ni baterije ni kompresora zraka.



Slika 3.1. Skica prve varijante konstrukcijskog rješenja

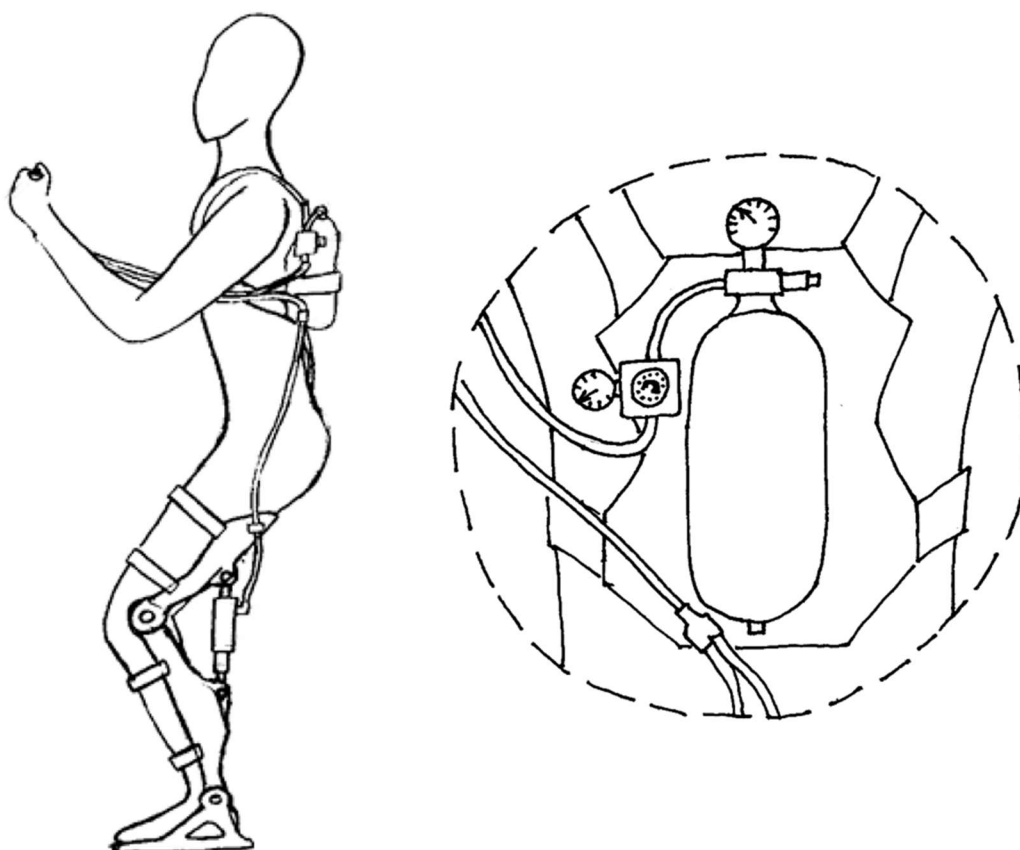
Prikaz pneumatske sheme vidljiv je na Slici 3.2. Prikazan je način povezivanja pojedinih komponenti. Pretvorba električne energije u kinetičku energiju klipa cilindra se ostvaruje na način da baterija predaje električnu energiju u sustav upravljanja baterijom koji tu el. struju korigira na način da propušta isključivo vrijednost od 12 V u kompresor zraka. Kompresor električnu energiju pretvara u potencijalnu energiju komprimiranog zraka koja se pohranjuje unutar spremnika. Tlak zraka unutar spremnika se očitava na manometru priključenom na spremnik. Regulator tlaka korigira tlak i propušta konstantnu vrijednost zadanog tlaka. Razvodnim ventilom se određuje trenutak kada će komprimirani zrak biti pušten u cilindre, a pneumatski cilindri će potom tu potencijalnu energiju komprimiranog zraka pretvoriti u kinetičku energiju klipa.



Slika 3.2. Funkcionalna shema prve varijante konstrukcijskog rješenja

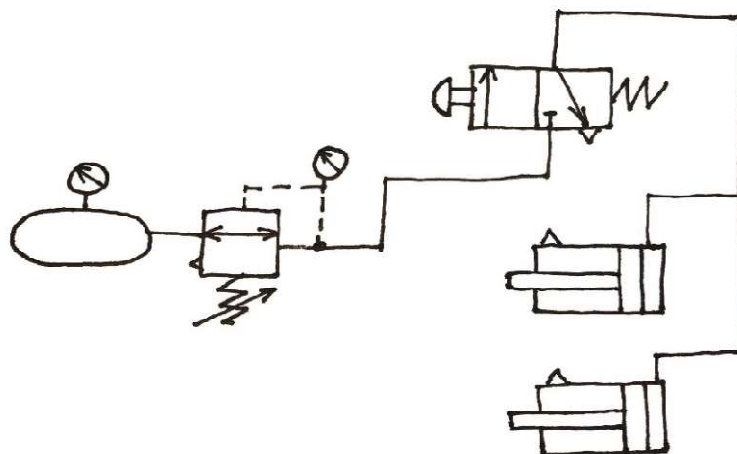
3.2. Druga varijanta pneumatskog egzoskeleta za ostvarenje pojačanog skoka

U konstrukciju druge varijante krenulo se sa ciljem smanjenja mase cjelokupnog sustava. Moglo bi se reći da je druga varijanta pojednostavljena verzija prve varijante. Skica druge varijante prikazana je na Slici 3.3. Za obavljanje rada koriste se pneumatski cilindri kao i u prvoj varijanti. Upravljanje sustavom se odvija preko razvodnog ventila. Najveća promjena je u sustavu za osiguravanje komprimiranog zraka. Radi se samo o jednom većem tlačnom spremniku koji se napuni unaprijed, te korisnik potom može izvršiti konačan broj skokova. Broj mogućih ostvarivih skokova zavisi o tlaku zraka u spremniku i o radnom tlaku pneumatskih cilindara. Ova varijanta je lakša i jednostavnija zato jer ne zahtjeva kompresor zraka, bateriju i sustav upravljanja baterijom, ali baš zato što nema te komponente broj skokova je jako ograničen. Tlačni spremnik u ovoj varijanti se nastoji napuniti sa što većim tlakom, što zahtjeva i kvalitetniji regulator tlaka.



Slika 3.3. Skica druge varijante konstrukcijskog rješenja

Pneumatska shema druge varijante konstrukcijskog rješenja dana je na Slici 3.4. Tlačni spremnik osigurava komprimirani zrak, regulator tlaka će propuštati konstantnu vrijednost tlaka u sustav, a upravljanje se vrši preko razvodnog ventila. Propuštanjem zraka u pneumatske cilindre će se ostvariti rad skoka. Naravno da treba razumjeti da je ovdje prikazana samo osnovna struktura funkcionalne sheme i da nedostaju još komponente poput ventila i sl. No, shema je točno takva da bi se razumio osnovni princip funkcioniranja sustava.



Slika 3.4. Funkcionalna shema druge varijante konstrukcijskog rješenja

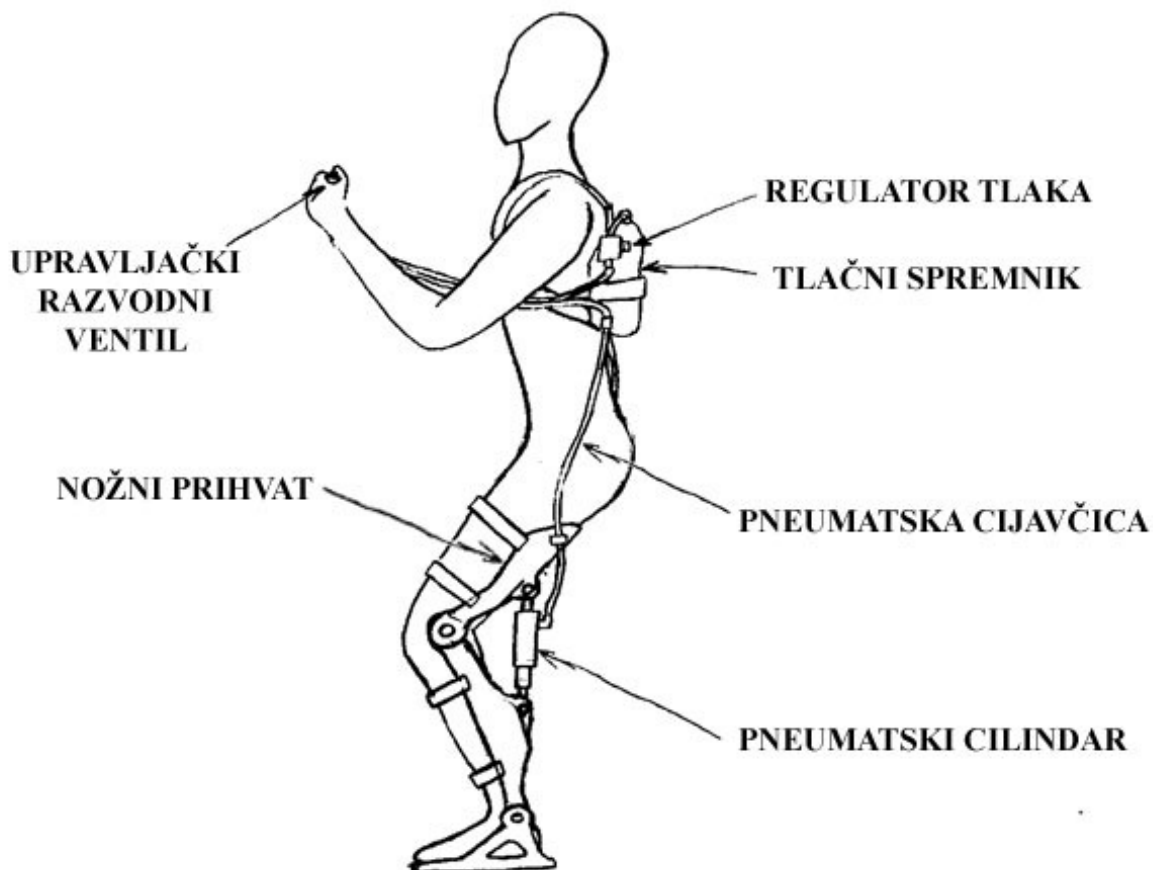
3.3. Detaljni opis odabrane varijante

Odabrana varijanta je druga varijanta, odnosno varijanta koja se sastoji smo od tlačnog spremnika koji osigurava konačnu količinu komprimiranog zraka. Ta varijanta izabrana je iz razloga što najbolje odgovara zahtjevima ovoga projekta, varijanta je jednostavna i lagana. Prva varijanta zahtijeva mnoge komponente koje višestruko kompliciraju sustav, a uvelike mu i povećavaju masu. Odabrana varijanta ima jednu negativnu stranu, a ta je da ima ograničen broj skokova koji se može ostvariti. No, u ovome slučaju ne predstavlja veliku prepreku zato jer se u ovom radu radi istraživanje gdje je i nekoliko skokova dovoljno za dobiti željene podatke. U slučaju komercijalne primjene egzoskeleta koristio bi se spremnik zraka sposoban za rad s visokim tlakovima, što bi rezultiralo većim brojem akcija egzoskeleta.

Ovakav sustav ne pruža nikakve dodatne mogućnosti kretnje odnosno neko specijalno manevriranje korisnika, već samo pojačava snagu pojedinih kretnji. U ovome slučaju radi se o pojačavanju snage nogu, ali samo u slučaju skoka. Dakle ovaj sustav egzoskeleta, koji je povezan na noge korisnika, izrađen je na način da nije aktivan pri normalnim kretnjama poput hodanja, trčanja i sl., sustav je aktivan samo u slučaju kada korisnik vrši radnju skoka. Postoje prihvat koji se pojasevima povezuju na donje ekstremitete korisnika. Ti prihvat dimenzijski i zglobovno odgovaraju donjim ekstremitetima korisnika, što bi omogućilo da se korisnik i egzoskelet kreću zajedno i bez dodatnih otpora pri kretanju. Dodatna snaga koju pruža egzoskelet dobiva se jedino prilikom skoka kada korisnik pritisne tipku na razvodnom ventilu s kojim aktivira sustav. Egzoskelet svoju snagu dobiva pomoću pneumatskih cilindara koji su zglobovno povezani na prihvat, zato se i cijeli sustav naziva pneumatski egzoskelet. Pneumatski cilindri su pri

normalnom hodu u neutralnom položaju u kojem se mogu produljivati i skraćivati bez otpora, na kada korisnik vrši radnju skoka pritiskom na tipku razvodnog ventila propušta zrak iz spremnika u pneumatske cilindre. Cilindri potom djeluju silom na prihvate, te prihvati dalje na korisnika i na taj način pomažu korisniku da ostvari veći skok. Sustav je prikazan na Slici 3.5. gdje su i naznačene glavne komponente sustava.

Glavna komponenta sustava je pneumatski cilindar, to je komponenta koja će predavati snagu nogama korisnika. Kako korisnik ima dvije noge tako su potrebna i dva pneumatska cilindra. Da bi cilindri mogli prenositi snagu na noge korisnika moraju biti fiksno povezani sa korisnikom. Za vezu između cilindra i noga korisnika zadužen je nožni prihvati. Prihvati je izrađen od dva osnovna dijela koja su zglibno povezana na poziciji koljena kako bi mogao pratiti kretnje korisnika.

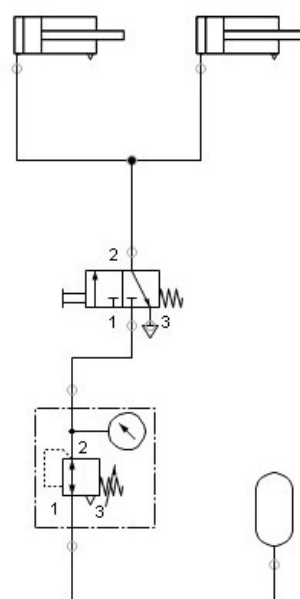


Slika 3.5. Izabrana varijanta egzoskeleta

Pneumatski cilindar komprimirani zrak dobiva iz spremnika komprimiranog zraka koji korisnik egzoskeleta nosi na leđima poput ruksaka. Da bi se dobile određene karakteristike zraka on pri izlasku iz spremnika prolazi kroz regulator tlaka kojim se namješta željeni radni tlak, a potom dolazi do mehaničkog razvodnog ventila kojim se vrši upravljanje. Kada korisnik egzoskeleta želi ostvariti skok, pritiskom na tipku razvodnog ventila propustit će komprimirani zrak iz spremnika u pneumatske cilindre. Cilindri će tu energiju komprimiranog zraka pretvoriti u silu kojom će djelovati na korisnika egzoskeleta i na taj mu način pomoći da ostvari veći skok.

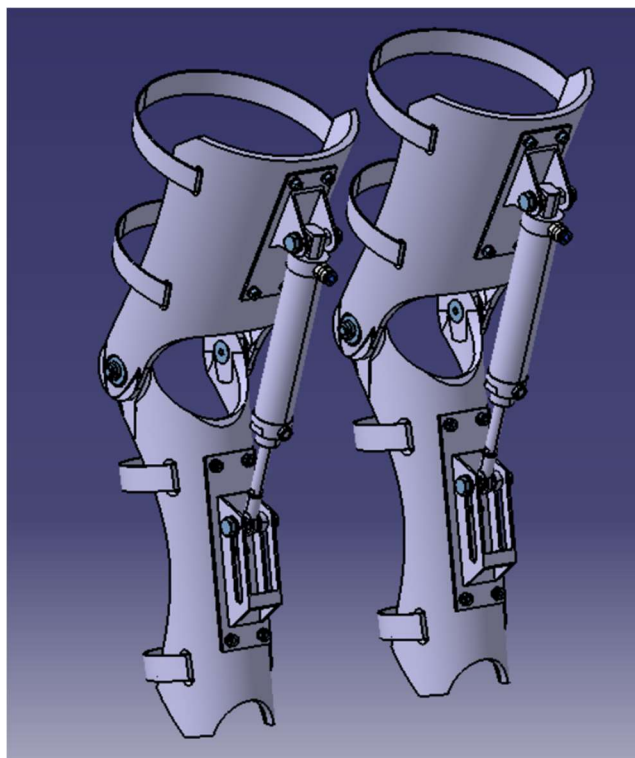
Postupak skoka je slijedeći, korisnik egzoskeleta se postavi u čučnuti položaj u kojemu su pneumatski cilindri potpuno uvučeni. U trenutku kada korisnik želi započeti skok, aktivira te mišiće te pritišće tipku na mehaničkom razvodnom ventilu i na taj način propušta da komprimirani zrak iz spremnika prođe kroz razvodni ventil. Taj komprimirani zrak, koji je propušten kroz razvodni ventil, potom ulazi u pneumatske cilindre gdje njegova tlačna energija pretvara u aksijalnu silu koja se prenosi sa pneumatskih cilindara na nožne prihvate. Nožni prihvat potom prenose tu silu na korisnika te korisnik egzoskeleta pomoću te dodatne sile je u mogućnosti ostvariti veći skok.

Pneumatska shema sustava prikazana je na Slici 3.6. Prikazani su dva dvoradna pneumatska cilindra, potom 3/2 razvodni ventil koji ima mehaničko aktiviranje i povratni hod pomoću opruge. Isto tako tu se nalazi spremnik stlačenog zraka, te sustav za reguliranje tlaka zraka u sklopu kojeg se nalazi i manometar.

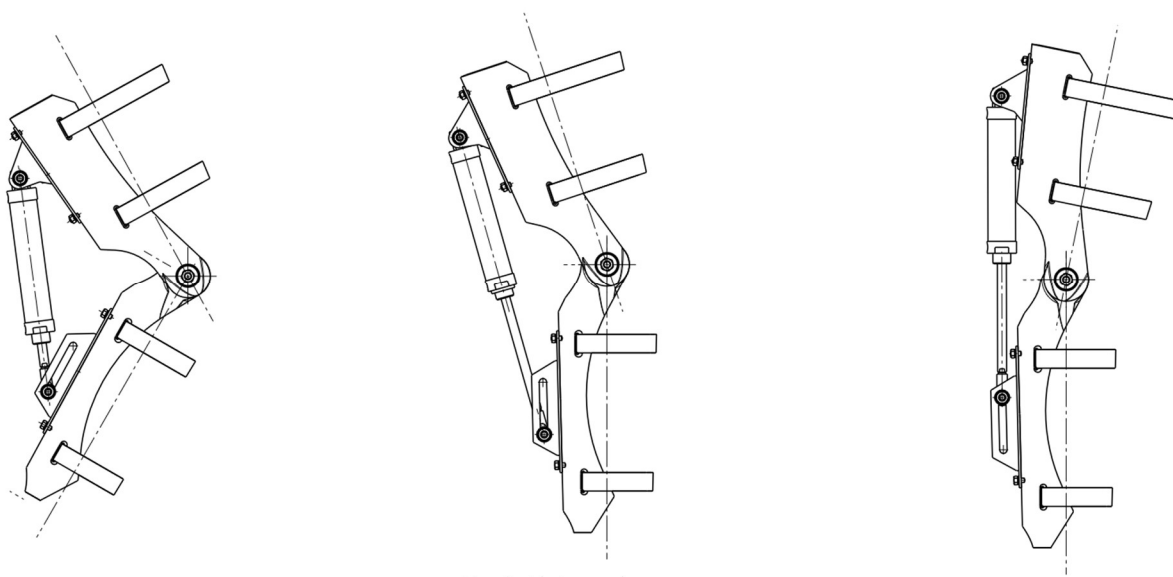


Slika 3.6. Pneumatska shema sustava

Za potrebe ovoga rada izrađen je 3D model egzoskeleta. Na temelju 3D modela će se izraditi tehnička dokumentacija egzoskeleta. Jedan detalj izgleda 3D modela vidljiv je na Slici 3.7. Nakon toga je na Slici 3.8. prikazan postupak skoka, odnosno vidljivo je kako se postepeno pneumatski cilindar izvlači i povećava kut među nožnim prihvatima. Na taj se način ostvaruje skok.



Slika 3.7. 3D model izrađen u programu Catia



Slika 3.8. Prikaz pomicanja sustava prilikom skoka

4. PRORAČUN PNEUMATSKOG EGZOSKELETA NOGU

U ovome će se poglavlju provesti proračun glavnih radnih parametara s ciljem odabira pneumatskih komponenti. Prvo će proračun ići u smjeru izračuna sile koju korisnik daje prilikom samostalnog skoka, bez pomoći egzoskeleta. Cilj je ovoga proračuna izračunati vrijednosti pojedinih varijabli da u konačnici korisnik egzoskeleta može ostvariti skok od 1m, odnosno da korisnik pomoću egzoskeleta ima 100% pojačanje snage skoka.

Prvo će proračun ići u smjeru izračuna sile koju korisnik daje prilikom samostalnog skoka, bez pomoći egzoskeleta. Potom će se na temelju te sile moći izračunati kakvu silu treba ostvariti svaki pneumatski cilindar. Nakon što se zna sila pneumatskog cilindra, moguće je izračunati i njegov promjer klipa te ga potom izabrati iz kataloga standardnih pneumatskih cilindara. Poznajući silu koju isporučuje cilindar, te masu korisnika moguće je izračunati ubrzanje korisnika prilikom skoka. Iz ubrzanja i vremena skoka dobiva se brzina u trenutku odvajanja od podloge, te se izračunava visina skoka koja se ostvari uporabom egzoskeleta.

Da bi se proračun mogao izvršiti neke je vrijednosti bilo potrebno unaprijed definirati te izmjeriti. Usvojeno je da je prosječna visina skoka korisnika bez pomoći egzoskeleta 0,5m. Isto tako za sam proračun će biti potrebna masa korisnika koja je također usvojena te iznosi 75kg. Jedna stvar koja je bila ključna za izračun sila u sustavu je vrijeme ubrzanja, odnosno vrijeme od početka skoka do trenutka kada se on ne odrazi od podloge. To je vrijeme više puta mjereno i proizašla je srednja vrijednost vremena od 0,2s. Također je definirana vrijednost maksimalnog tlaka pneumatskog sustava do 10 bar-a na temelju tlakova uobičajene komercijalne pneumatike.

4.1. Proračun brzina, vremena, ubrzanja i sila koje se ostvaruju pri skoku bez uporabe egzoskeleta

Brzina u trenutku odraza od podloge

Proračun započinje na način da se izjednače dvije vrijednosti energije, potencijalne i kinetičke. Ta se jednakost može postaviti jer je poznato će se sva kinetička energija koja se ostvarila u startu skoka pretvoriti u potencijalnu energiju zbog savladavanja visine. Visina koju korisnik ostvaruje prilikom skoka je izmjerena i ona iznosi $h_k = 0,5\text{m}$, stoga je iz zadane jednakosti moguće izračunati brzinu kojom se korisnik odrazi od podloge.

$$E_k = E_p \quad (4.1)$$

$$\frac{m \cdot v_k^2}{2} = m \cdot g \cdot h_k \quad (4.2)$$

$$v_k = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_k} \quad (4.3)$$

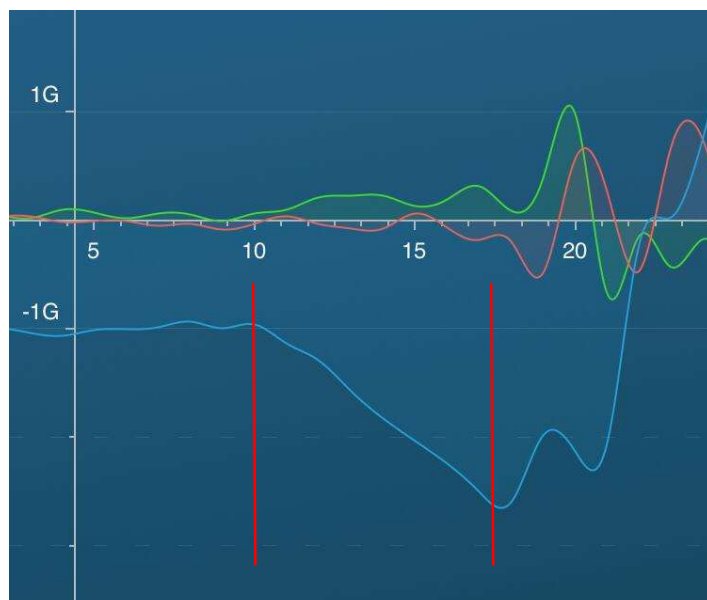
$$v_k = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,5} \quad (4.4)$$

$$v_k = 3,13 \frac{m}{s} \quad (4.5)$$

Vrijeme do odraza od podloge

Za dobivanje vremena trajanja skoka proveden je eksperiment. Za provedbu eksperimenta preuzeta je aplikacija „Accelerometer“ za mobilni uređaj. Aplikacija radi na način da u grafu prikazuje vrijednosti ubrzanja po pojedinim osima. Crvena linija predstavlja x-os, zelena linija predstavlja y-os, a plava linija z-os. Za potrebe rada će biti bitna samo plava linija jer ona predstavlja vertikalni pomak koji se prati. Na grafu vertikalna os predstavlja vrijednost ubrzanja, a horizontalna os broj mjerenja. Aplikacija je namještena da ima frekvenciju mjerenja 30 Hz, pa se može izračunati vrijeme skoka iz broja mjerenja u kojim je vidljivi rast grafa akceleracije za vertikalni smjer.

U nastavku slijede rezultati četiri eksperimenta (Slika 4.1., Slika 4.2., Slika 4.3. i Slika 4.4.) na kojima je pomoću dvije vertikalne crvene linije naznačen početak skoka i kraj akceleracije skoka. Nakon prikaza grafa eksperimenta, izračunato je vrijeme ubrzanja skoka dijeleći broj mjerenja koji su očitani iz grafa sa frekvencijom mjerenja.

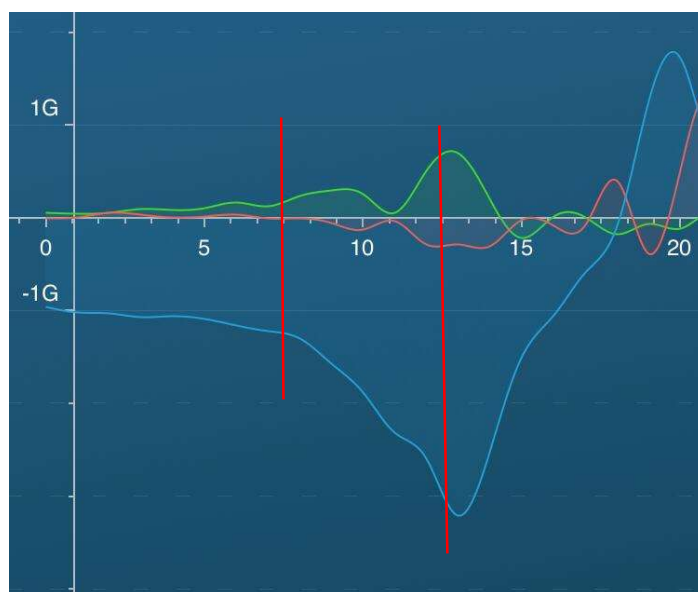


Slika 4.1. Mjerenje akceleracije skoka 1. test

$$t_1 = \frac{n}{f} \quad (4.6)$$

$$t_1 = \frac{8}{30} \quad (4.7)$$

$$t_1 = 0,27 \text{ s} \quad (4.8)$$

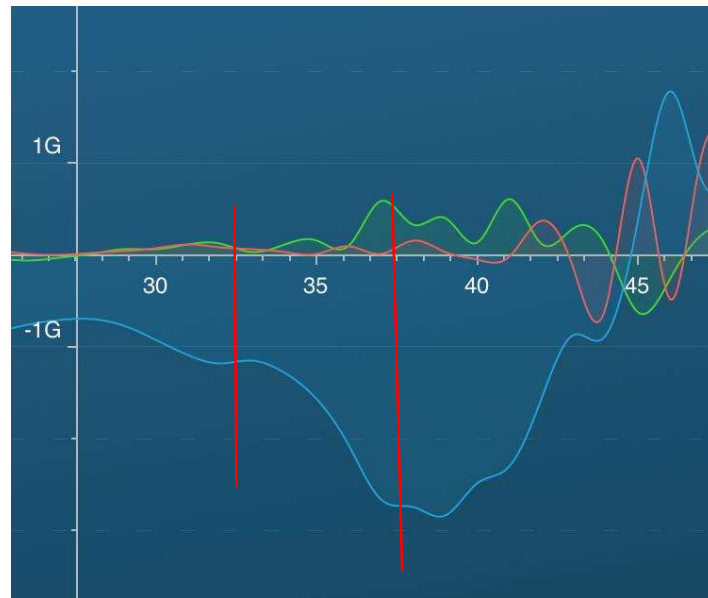


Slika 4.2. Mjerenje akceleracije skoka 2. test

$$t_2 = \frac{n}{f} \quad (4.9)$$

$$t_2 = \frac{6}{30} \quad (4.10)$$

$$t_2 = 0,2 \text{ s} \quad (4.11)$$

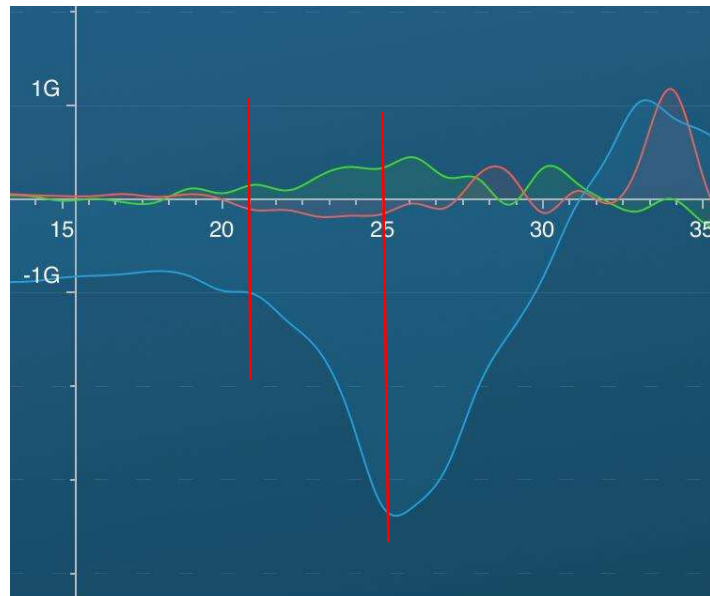


Slika 4.3. Mjerenje akceleracije skoka 3. test

$$t_3 = \frac{n}{f} \quad (4.12)$$

$$t_3 = \frac{6}{30} \quad (4.13)$$

$$t_3 = 0,2 \text{ s} \quad (4.14)$$



Slika 4.4. Mjerenje akceleracije skoka 3. test

$$t_4 = \frac{n}{f} \quad (4.15)$$

$$t_4 = \frac{5}{30} \quad (4.16)$$

$$t_4 = 0,17 \text{ s} \quad (4.17)$$

Prosječno vrijeme skoka izračunava se iz aritmetičke sredine vremena iz 4 testa i ono je izračunato u nastavku.

$$t_k = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4} \quad (4.18)$$

$$t_k = \frac{0,27 + 0,2 + 0,2 + 0,17}{4} \quad (4.19)$$

$$t_k = 0,2 \text{ s} \quad (4.20)$$

Ubrzanje pri skoku

Ubrzanje pri skoku može se dobiti znajući brzinu kojom se korisnik odrazio od podloge te vremenom koje je bilo potrebno da se ta brzina postigne. Brzina je izračunata u izrazu (4.5), a vrijeme iz aritmetičke sredine testova prema izrazu (4.18). Ubrzanje pri skoku bez uporabe egzoskeleta će potom iznositi:

$$a_k = \frac{v_k}{t_k} \quad (4.21)$$

$$a_k = \frac{3,13}{0,2} \quad (4.22)$$

$$a_k = 15,66 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (4.23)$$

Sila koju daje korisnik kako bi ostvario skok

Sila se izračunava iz ubrzanja skoka i mase korisnika egzoskeleta zajedno sa opremom. Masa korisnika i opreme je usvojena i ona iznosi $m = 75$ kg. Ubrzanje korisnika je izračunato u prethodnom izrazu. Sila koju daje korisnik će dakle iznositi:

$$F_k = m \cdot a_k \quad (4.24)$$

$$F_k = 75 \cdot 15,66 \quad (4.25)$$

$$F_k = 1174,53 \text{ N} \quad (4.26)$$

4.2. Proračun brzina, vremena, ubrzanja i sila koje se ostvaruju pri skoku uporabom egzoskeleta

U ovome potpoglavlju potrebno je izračunati stvarne veličine koje se ostvaruju pri skoku kada se koristi pneumatski egzoskelet.

Teoretska sila potrebna za 100% povećanje skoka

Budući da se želi ostvariti dva puta viša visina skoka, može se pretpostaviti da sila za ostvarenje te visine skoka mora biti dva puta veća od one za ostvarenje upola manjeg skoka. Iz razloga što su visina skoka i sila za ostvarenje skoka linearno povezane i jedine varijable koje je moguće mijenjati. Sve ostale varijable su konstantne. Ukoliko se na kraju ovoga proračuna pokaže da takva sila nije dovoljna za ostvarenje te visine skoka, potrebno je tu silu povećati te provesti proračun još jednom. Pretpostavljena vrijednost sile će potom iznositi:

$$F' = 2 \cdot F_k \quad (4.27)$$

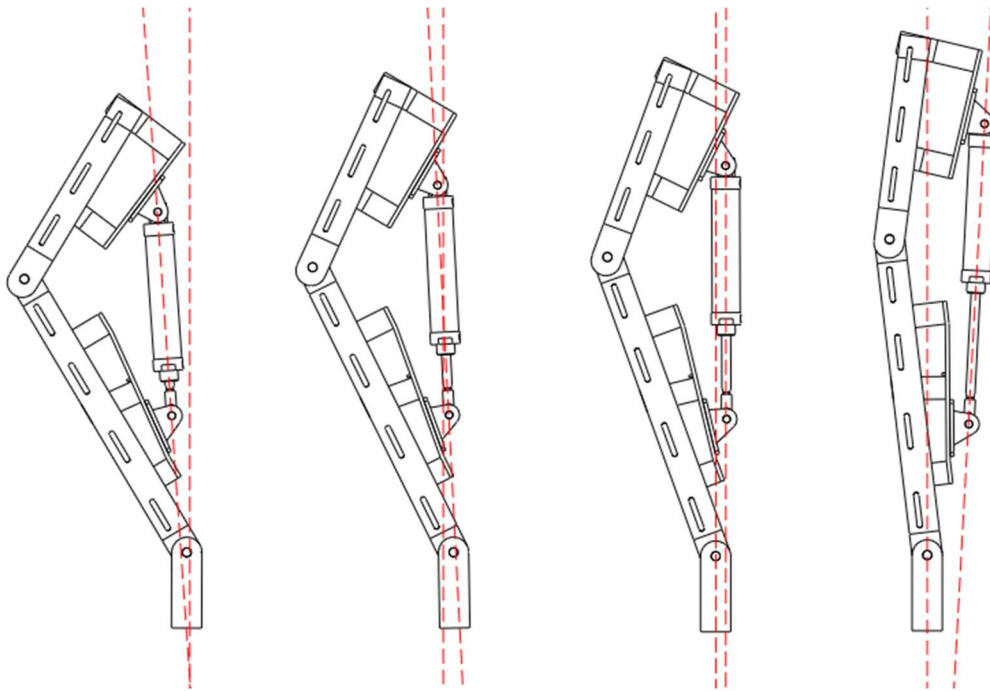
$$F' = 2 \cdot 1174,53 \quad (4.28)$$

$$F' = 2349,06 \text{ N} \quad (4.29)$$

Teoretska sila koju svaki pojedini cilindar mora isporučiti

Veličina sile iz prethodnog izraza ostvaruje se zajedničkim djelovanjem tri komponente. Te tri komponente su korisnik egzoskeleta koji će pružati silu izračunatu u izrazu (4.26) i dva jednaka pneumatska cilindra koji će omogućiti preostali dio tražene sile.

Važna stavka je da je sustav izrađen na način da se pravac pružanja cilindra i pravac kretanja centra mase približno poklapaju. Prikaz tih pravaca vidljiv je na Slici 4.5. u nastavku. Vidljivo je kako je na početku te na kraju kretanja sustav malo više odmaknut, ali u cijelom središnjem dijelu u kojem se odvija najveći dio rada, pravci sustava su gotovo poravnati. Na taj način sva sila cilindra je iskorištena za ostvarivanje skoka bez nepotrebnih naprežanja. Iz toga se razloga može proračun pojednostaviti tako što se uzme da sila cilindra direktno djeluje na centar mase bez nikakve poluge.



Slika 4.5. Odnos pravca kretanja centra mase i pravca djelovanja sile cilindra

Sila koju oba cilindar zajedno sa korisnikom moraju ostvariti izračunata je prethodno u izrazu (4.29). Toj sili treba oduzeti silu korisnika te ju treba podijeliti sa 2 iz razloga što se sustav sastoji od dva pneumatska cilindar. Po jedan na svakoj nozi korisnika. Sila koju mora ostvariti cilindar će potom iznositi:

$$F_c' = \frac{F' - F_k}{2} \quad (4.30)$$

$$F_c' = \frac{2349,06 - 1174,53}{2} \quad (4.31)$$

$$F_c' = 587,27 \text{ N} \quad (4.32)$$

Teoretski promjer pneumatskog cilindra

Promjer klipa unutar pneumatskog cilindra se može izračunati preko ovisnosti sile, površine i tlaka. Prethodno je odabran max. tlak sustava od 10 bar-a ali će se proračun provesti s malo manjim radnim tlakom koji iznosi $p = 8$ bar-a. Teoretski promjer potom će iznositi:

$$F'_c = p \cdot A' \quad (4.33)$$

$$F'_c = p \cdot \frac{d'^2}{4} \pi \quad (4.34)$$

$$d'^2 \cdot \pi = \frac{4 \cdot F'_c}{p} \quad (4.35)$$

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot F'_c}{\pi \cdot p}} \quad (4.36)$$

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot 587,27}{\pi \cdot 8 \cdot 10^5}} \quad (4.37)$$

$$d' = 0,03057 \text{ m} \quad (4.38)$$

$$d' = 30,57 \text{ mm} \quad (4.39)$$

Stvarni promjer cilindra

Normalno je da cilindar ne može biti bilo kakve dimenzije, nego već se od odabire iz kataloga standardnih pneumatskih cilindara. Odabrana vrijednost promjera pneumatskog cilindra je slijedeća:

$$d \geq d' \quad (4.40)$$

$$d = 0,032 \text{ m} \quad (4.41)$$

$$d = 32 \text{ mm} \quad (4.42)$$

Stvarna sila pneumatskog cilindra

Stvarna sila koju ostvaruje pneumatski cilindar će se ponešto povećati iz razloga što se odabrao veći promjer pneumatskog cilindra. Stvarna sila će sada iznositi:

$$F_c = p \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \quad (4.43)$$

$$F_c = 8 \cdot 10^5 \cdot \frac{0,032^2 \cdot \pi}{4} \quad (4.44)$$

$$F_c = 643,39 \text{ N} \quad (4.45)$$

Stvarna sila koja se ostvaruje pri skoku

Stvarna zajednička sila oba cilindra i korisnika egzoskeleta koja se ostvaruje pri skoku biti će nešto veća od teoretske iz razloga što je stvarna sila pneumatskih cilindara nešto veća od teoretske. Stvarna ukupna sila će stoga iznositi:

$$F = F_k + 2 \cdot F_c \quad (4.46)$$

$$F = 1174,53 + 2 \cdot 643,39 \quad (4.47)$$

$$F = 2461,33 \text{ N} \quad (4.48)$$

Ubrzanje pri skoku

Ubrzanje pri skoku je moguće izračunati zato jer se poznaje vrijednost sile koja djeluje na korisnika kao i vrijednost mase korisnika s opremom. Ubrzanje se izračunava kao omjer sile i mase, te će iznositi:

$$a = \frac{F}{m} \quad (4.49)$$

$$a = \frac{2461,33}{75} \quad (4.50)$$

$$a = 32,82 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (4.51)$$

Dobivena vrijednost ubrzanja je dvostruko veća od vrijednosti ubrzanja kada se ne koristi egzoskelet. Zato i je moguće ostvariti viši skok.

Vrijeme do trenutka odavanja od podloge

Vrijednost vremena će se dobiti preko izraza u kojemu se izjednači put kretanja korisnika u slučaju skoka sa egzoskeletom i skoka bez egzoskeleta, zato jer se zna da je put do odvajanja od podloge jednak. Potom se umjesto puta uvrsti izraz za izračun puta pri ubrzanom gibanju koji je prikazan u nastavku. Brzina v_0 predstavlja početnu vertikalnu brzinu korisnika u nultom trenutku. Korisnik u nultom trenutku stoji nepomično što bi značilo da je početna brzina jednaka nuli te da se taj dio izraza može zanemariti.

$$x = \frac{a}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t \quad (4.52)$$

$$x = \frac{a}{2} \cdot t^2 + 0 \cdot t \quad (4.53)$$

$$x = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad (4.54)$$

Sada se mogu izjednačiti vrijednosti puta i uvesti prethodno navedeni izraz. Potom se uvrštavaju vrijednosti ubrzanja korisnika pri skoku bez uporabe egzoskeleta i sa uporabom egzoskeleta, te vremena skoka bez uporabe egzoskeleta.

$$x_k = x \quad (4.55)$$

$$\frac{a_k}{2} \cdot t_k^2 = \frac{a}{2} \cdot t^2 \quad / \cdot 2 \quad (4.56)$$

$$t = \sqrt{\frac{a_k}{a} \cdot t_k^2} \quad (4.57)$$

$$t = \sqrt{\frac{15,66}{32,82} \cdot 0,2^2} \quad (4.58)$$

$$t = 0,138 \text{ s} \quad (4.59)$$

Vrijeme ubrzanje se skratilo u odnosu na skok bez egzoskeleta iz razloga što veća sila djeluje na jednaku masu, pa je potrebno kraće vrijeme za vršenje jednakog rada.

Brzina u trenutku odvajanja od podloge

Brzina koja se ostvari u trenutku odvajanja od podloge je jedina vrijednost potrebna za određivanje visine skoka koja će se ostvariti. Brzina će ovisiti o ubrzanju koje je djelovalo na korisnika, te o vremenu koje je to ubrzanje djelovalo. Brzina će biti jednaka umnošku te dvije vrijednosti.

$$v = a \cdot t \quad (4.60)$$

$$v = 32,82 \cdot 0,138 \quad (4.61)$$

$$v = 4,53 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.62)$$

Visina skoka uporabom egzoskeleta

Za izračun visine skoka potrebno je poznavati samo brzinu u trenutku odvajanja od podloge koja je izračunata u prethodnom izrazu. Visina skoka će stoga iznositi:

$$h = \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (4.63)$$

$$h = \frac{4,53^2}{2 \cdot 9,81} \quad (4.64)$$

$$h = 1,05 \text{ m} \quad (4.65)$$

Početni traženi uvjet je bio da se ostvari 100% povećanje skoka.

$$h \geq h_k + 100\% \cdot h_k \quad (4.66)$$

$$h \geq 2 \cdot h_k \quad (4.67)$$

$$h \geq 2 \cdot 0,5 \quad (4.68)$$

$$h \geq 1 \text{ m} \quad (4.69)$$

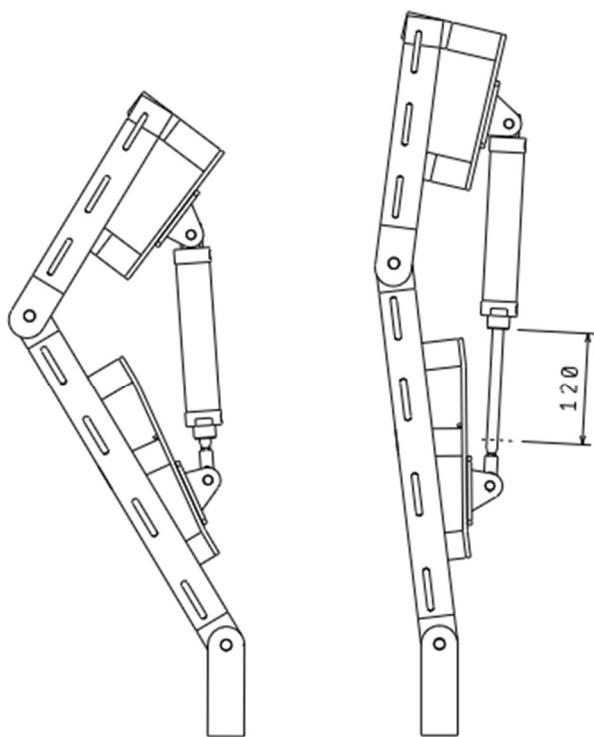
$$1,05 \text{ m} \geq 1 \text{ m} \quad (4.70)$$

Ostvarena visina skoka pomoću egzoskeleta iznosi 1,05m što bi značilo da je zadovoljen uvjet s kojim se je krenulo u proračun i koji je tražio da se ostvari povećanje skoka od 100%. Izračunata vrijednost je pokazala da je povećanje skoka 110% što bi značilo da nije potrebno ponavljati postupak proračuna.

4.3. Proračun hoda i srednje brzine cilindra, te ovisnosti radnog tlaka i visine skoka

Teoretski hod pneumatskog cilindra

Kao što je vidljivo na Slici 4.6. niže dolje treba osigurati da hod pneumatskog cilindra bude barem 120mm. Odabrani cilindar ima klipa od 125mm. Za daljnji tok ovoga proračuna biti će potrebna ova vrijednost za izračun srednje brzine izvlačenja pneumatskog cilindra.



Slika 4.6. Minimalni hod pneumatskog cilindra

Srednja brzina izvlačenja pneumatskog cilindra

Srednja brzina se izračunava kao omjer hoda pneumatskog cilindra i vremena u kojem se cilindar ispruži. To nije stvarna ni konstantna brzina iz razloga što egzoskelet ima složenu kinematiku gdje brzina izvlačenja cilindra nije konstantna, ali se svejedno može izračunata srednja vrijednost brzine koja se neće uvelike razlikovati od stvarne brzine. Srednja brzina se izračunava kako bi se ona mogla usporediti sa vrijednosti maksimalne brzine cilindra iz kataloga. Srednja brzina cilindra će stoga iznositi:

$$v_c = \frac{s}{t} \quad (4.71)$$

$$v_c = \frac{0,125}{0,138} \quad (4.72)$$

$$v_c = 0,91 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.73)$$

Vrijednosti sila, ubrzanja, vremena, brzina te visina skoka u zavisnosti o radnome tlaku

Sila koju ostvaruje jedan cilindar izračunava se pomoću karakterističnih dimenzija cilindra te pomoću radnog tlaka. Karakteristične dimenzije cilindra su konstantne i nemoguće ih je mijenjati. S druge strane, na radni tlak se može utjecati. U daljnjem proračunu će se izračunati vrijednosti sustava u zavisnosti o promjeni radnog tlaka. Za pneumatske komponente je poznato da mogu raditi na tlakovima između 1 i 10 bar-a, stoga će se pokušati izračunati vrijednosti za to područje radnog tlaka. Razlog ovog proračuna je taj što će se pri eksperimentalnom ispitivanju fizičkog modela vršiti ispitivanja pri raznim radnim tlakovima, te će se moći usporediti teoretske i praktične vrijednosti. Sila koju ostvaruje cilindar dobiva se umnoškom radnog tlaka i površine na koju djeluje taj tlak.

U nastavku je dana Tablica 4.1. u kojoj su izračunate vrijednosti za radni tlak od 1 do 10 bar-a i to za svako povećanje od 1 bar-a. Moguće je vidjeti kako se vrijednosti sile, ubrzanja, vremena, brzine i visine skoka mijenjaju u zavisnosti o radnome tlaku.

Tablica 4.1. Vrijednosti sustava u ovisnosti o radnome tlaku

p - radni tlak [bar]	F _c - sila cilindra [N]	F - sila ukupna [N]	a - ubrzanje [m/s ²]	t - vrijeme [s]	v - brzina [m/s]	h - visina skoka [m]
1,0	80,42	1335,38	17,81	0,19	3,34	0,57
2,0	160,85	1496,23	19,95	0,18	3,54	0,64
3,0	241,27	1657,08	22,09	0,17	3,72	0,71
4,0	321,70	1817,93	24,24	0,16	3,90	0,77
5,0	402,12	1978,78	26,38	0,15	4,07	0,84
6,0	482,55	2139,63	28,53	0,15	4,23	0,91
7,0	562,97	2300,48	30,67	0,14	4,38	0,98
8,0	643,40	2461,33	32,82	0,14	4,53	1,05
9,0	723,82	2622,18	34,96	0,13	4,68	1,12
10,0	804,25	2783,03	37,11	0,13	4,82	1,18

4.4. Proračun pneumatskog spremnika

Promjena tlaka u tlačnom spremniku se događa prilikom rada sustava kada stlačeni zrak prelazi iz spremnika u cilindre. Prilikom svake aktivacije pneumatskih cilindara, tlak će se unutar spremnika smanjiti. Što bi značilo da uporabom tlačnog spremnika postoji konačan broj aktivacija cilindara prije nego šta tlak unutar spremnika ne padne ispod razine na kojoj se ne može odvijati rad cilindara. Broj aktivacija cilindra, odnosno skokova, ovisit će o tlaku zraka unutar spremnika i o radnom tlaku s kojim se namjerava pokretati pneumatske cilindre. Izračun pada tlaka unutar spremnika vršit će se pomoću izraza (4.83):

$$p_{s0} \cdot V_s^\kappa = p_{s1} \cdot V_s^\kappa + p_c \cdot V_c^\kappa = konst \quad (4.83)$$

Prethodni izraz opisuje da umnožak početnog tlaka spremnika p_{s0} i volumena spremnika V_s koji na potenciju ima koeficijent ekspanzije κ , je jednak umnošku tlaka spremnika p_{s0} nakon obavljenog skoka i volumena spremnika V_s koji na potenciju ima koeficijent ekspanzije κ , zbrojeno sa umnoškom tlaka unutar cilindara p_c i volumena cilindara V_c koji na potenciju ima koeficijent ekspanzije κ . Volumen tlačnog spremnika i volumen cilindara su zadani i nepromjenjivi iz razloga što su fizički ograničeni. Usvaja se volumen tlačnog spremnika od 1l iz razloga što je to idealni volumen za transport bez da opterećuje korisnika egzoskeleta. Različitom veličinom tlaka unutar spremnika se može korigirati broj skokova što će biti vidljivo u nastavku ovoga rada. Volumen cilindara je isto nepromijenjen zbog promjera klipa i hoda cilindra.

Iz izraza (4.83) moguće je izvući vrijednost tlaka unutar tlačnog spremnika nakon obavljenog rada cilindra, odnosno skoka. Taj bi izraz tada izgledao ovako:

$$p_{s1} = \frac{p_{s0} \cdot V_s^\kappa - p_c \cdot V_c^\kappa}{V_s^\kappa} \quad (4.84)$$

Radni fluid koji će obavljati rad je stlačeni zrak, a radna temperatura je sobna temperatura (20 °C) stoga je poznata vrijednost koeficijenta ekspanzije κ i on iznosi 1,4. [16]

Za potrebu izračuna prethodnog izraza, potrebno je izračunati volumen komprimiranog zraka koji stane unutar pneumatskih cilindra i to preko izraza (4.85). Volumen se izračuna na način da površina klipa, koja se dobije iz njegovog promjera d , pomnoži sa hodom cilindra s . U konačnici se još cijeli izraz pomnoži sa 2 iz razloga što se sustav sastoji od dva cilindra. Promjer klipa cilindra je poznat i iznosi 32mm kao i hod koji iznosi 125mm.

$$V_c = \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot s \cdot 2 \quad (4.85)$$

$$V_c = \frac{0,032^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,125 \cdot 2 \quad (4.86)$$

$$V_c = 0,000201 \text{ m}^3 \quad (4.87)$$

Poznajući volumen cilindra V_c i volumen tlačnog spremnika V_s , potrebno je samo postaviti tlak unutar tlačnog spremnika p_{s0} i radni tlak na kojem će raditi cilindri p_c , te se preko prilagođene plinske jednadžbe odnosno izraza (4.88) dobiva tlak u spremniku nakon obavljenog skoka p_{s1} . Odnosno tlak unutar spremnika nakon obavljenog skoka p_{s1} će se smanjiti zbog volumena zraka koji je prešao iz spremnika u pneumatske cilindre. Za točnu vrijednost konačnog tlaka unutar spremnika, potrebno je poznavati volumen cilindra i spremnika, te radni tlak cilindra kao i početni tlak spremnika. Uvrštavanjem svih tih vrijednosti u izraz (4.88), može se dobiti tlak unutar spremnika nakon obavljenog skoka. Iterativnim uvrštavanjem vrijednosti u izraz dobivaju se vrijednosti tlaka unutar spremnika nakon dva, tri, četiri, itd. skoka. Tlakovi mogu varirati i mogu se postavljati proizvoljno ovisno o situaciji i jačini skoka koji se želi ostvariti. No, postoje i neka ograničenja koja treba poštivati. Tlačni spremnik je testiran na tlaku od 25 bar-a, stoga se ta

vrijednost ne smije premašiti. Isto tako sva radna pneumatika uključujući cilindre, ventile i ostalo je izrađena na način da može izdržati maksimalne tlakove od 10 bar-a.

Budući da su volumeni cilindara kao i spremnika konstantni i nepromjenjivi, jedino na što se može utjecati su tlakovi. U nastavku će se izraditi proračun broja ostvarivih skokova za slučaj kada je radni tlak 8 bar-a i tlak u spremniku 10 bar-a. Dobivena vrijednost p_{s1} će označavati tlak unutar spremnika nakon ostvarenog jednog skoka.

Potrebno je napomenuti da se ovaj proračun broja skokova provodi u dva dijela. Prvi dio je za slučaj kada pneumatski cilindri rade sa konstantnim radnim tlakom, dok će tlak unutar spremnika postepeno padati pri svakom skoku i on se izračunava preko izraza (4.88). Pneumatski cilindri će raditi sa konstantnim tlakom sve dok se ne ostvari dovoljno skokova da vrijednosti tlaka unutar spremnika ne padne ispod vrijednosti radnog tlaka na kojem rade cilindri. U tom trenutku će se tlakovi unutar sustava početi drukčije ponašati, te ih treba računati prema drukčijem izrazu. Tu započinje drugi dio proračuna. U drugome djelu proračuna vrijednost tlaka je pala ispod vrijednosti koju ograničava regulator tlaka te on više nema nikakvog učinka. Tlak će unutar spremnika i unutar cilindara biti jednak i postepeno opadati pri svakome skoku te se tlak unutar spremnika nakon skoka izračunava preko izraza (4.97). Pri takvim skokovima svaki je skok sve slabiji zato jer će pri svakom skoku cilindri raditi sa sve manjim tlakom.

$$p_{s1} = \frac{p_{s0} \cdot V_s^\kappa - p_c \cdot V_c^\kappa}{V_s^\kappa} \quad (4.88)$$

$$p_{s1} = \frac{10 \cdot 0,001^{1,4} - 8 \cdot 0,000201^{1,4}}{0,001^{1,4}} \quad (4.89)$$

$$p_{s1} = 9,15 \text{ bar} \quad (4.90)$$

Slijedi drugi skok sa istim uvjetima, jedino sada u tlačnom spremniku je tlak od 9,15 bar-a. Ponovno se vrijednosti uvrštavaju u izraz i na taj način će se dobiti tlak unutar tlačnog spremnika nakon drugog skoka p_{s2} .

$$p_{s2} = \frac{p_{s1} \cdot V_s^\kappa - p_c \cdot V_c^\kappa}{V_s^\kappa} \quad (4.91)$$

$$p_{s2} = \frac{9,15 \cdot 0,001^{1,4} - 8 \cdot 0,000201^{1,4}}{0,001^{1,4}} \quad (4.92)$$

$$p_{s2} = 8,30 \text{ bar} \quad (4.93)$$

Dobivena vrijednost tlaka je veća od radnog tlaka što bi značilo da je i ovaj skok odrađen sa punom snagom od 8 bar-a unutar cilindra. Slijedi treći skok i izračun tlaka u spremniku koji se izračunava na jednaki način kao i za drugi skok.

$$p_{s3} = \frac{p_{s2} \cdot V_s^\kappa - p_c \cdot V_c^\kappa}{V_s^\kappa} \quad (4.94)$$

$$p_{s3} = \frac{8,30 \cdot 0,001^{1,4} - 8 \cdot 0,000201^{1,4}}{0,001^{1,4}} \quad (4.95)$$

$$p_{s3} = 7,45 \text{ bar} \quad (4.96)$$

Nakon trećeg skoka vidljivo je da je tlak unutar spremnika pao ispod vrijednosti radnog tlaka. Znači da sam treći skok nije odrađen sa punom snagom od 8 bar-a, a i svi skokovi dalje (četvrti, peti, itd.) će biti odrađeni sa sve manjom snagom. To bi značilo da je u konkretnom slučaju gdje je radni tlak postavljen na 8 bar-a i početni tlak u spremniku 10 bar-a, moguće ostvariti dva skoka pri punoj snazi.

Pad tlaka unutar tlačnog spremnika, nakon što on padne ispod radnog tlaka, se izračunava po drugačijem izrazu. Sada će tlak unutar tlačnog spremnika t_s i tlak unutar cilindra t_c biti jednaki i može se nazvati zajednički tlak t_z . Zajednički tlak nakon ostvarenog skoka se računa preko izraza (4.97). Uzevši zadnji tlak u spremniku koji je iznosio 7,45 bar-a i uvrštavajući ga u izraz dobiva se stanje tlaka unutar spremnika nakon četvrtog skoka.

$$p_{z1} = \frac{p_{z0} \cdot V_s^\kappa}{(V_s + V_c)^\kappa} \quad (4.97)$$

$$p_{z1} = \frac{7,45 \cdot 0,001^{1,4}}{(0,001 + 0,000201)^{1,4}} \quad (4.98)$$

$$p_{z1} = 5,76 \text{ bar} \quad (4.99)$$

Koristeći isti izraz može se dobiti tlak zraka unutar tlačnog spremnika nakon petog, šestog,... skoka.

$$p_{z2} = \frac{p_{z1} \cdot V_s^\kappa}{(V_s + V_c)^\kappa} \quad (4.100)$$

$$p_{z2} = \frac{5,76 \cdot 0,001^{1,4}}{(0,001 + 0,000201)^{1,4}} \quad (4.101)$$

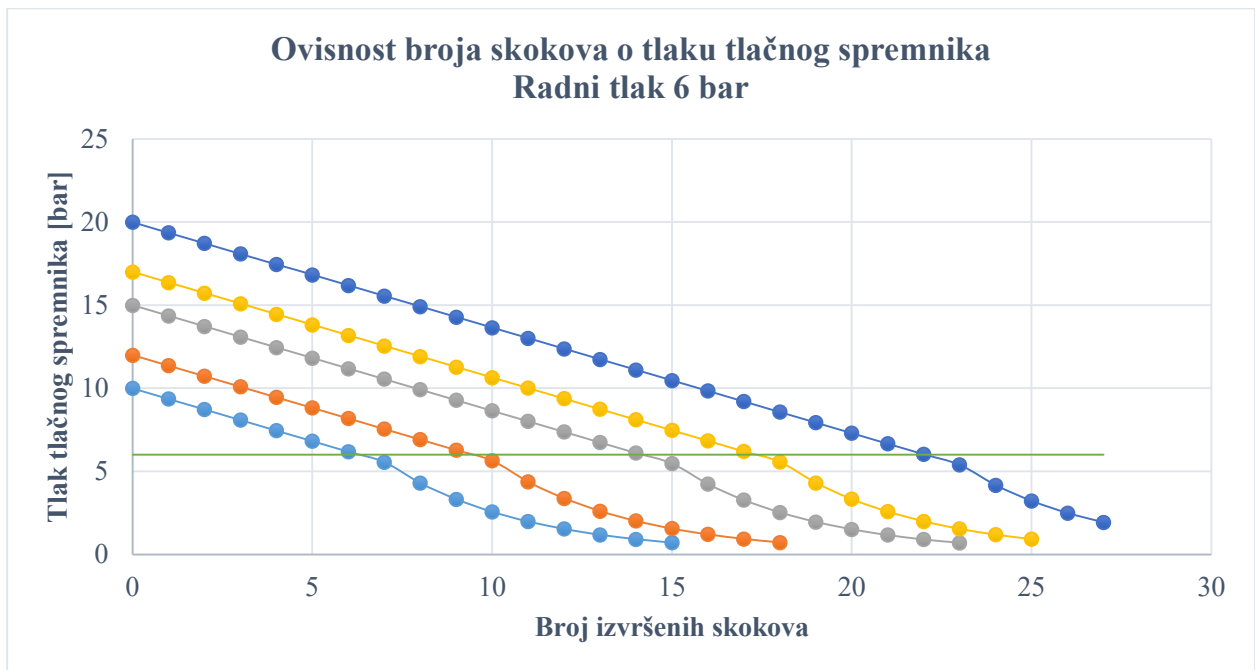
$$p_{z2} = 4,46 \text{ bar} \quad (4.102)$$

$$p_{z3} = \frac{p_{z2} \cdot V_s^\kappa}{(V_s + V_c)^\kappa} \quad (4.103)$$

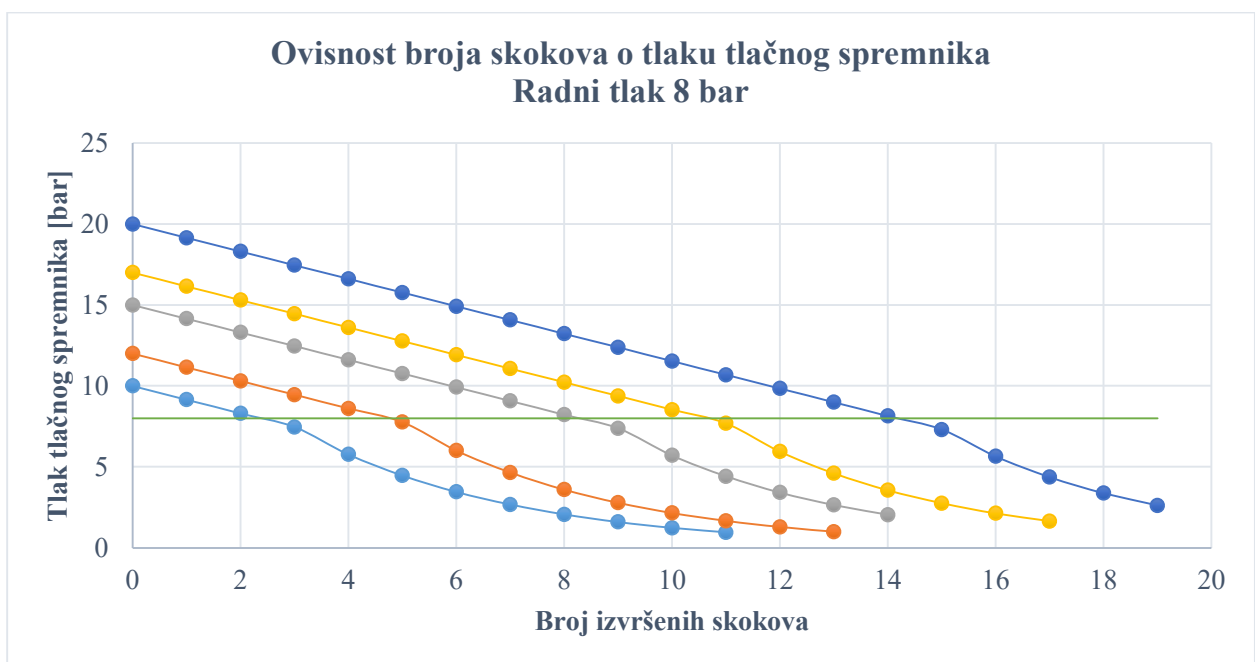
$$p_{z3} = \frac{4,46 \cdot 0,001^{1,4}}{(0,001 + 0,000201)^{1,4}} \quad (4.104)$$

$$p_{z3} = 3,45 \text{ bar} \quad (4.105)$$

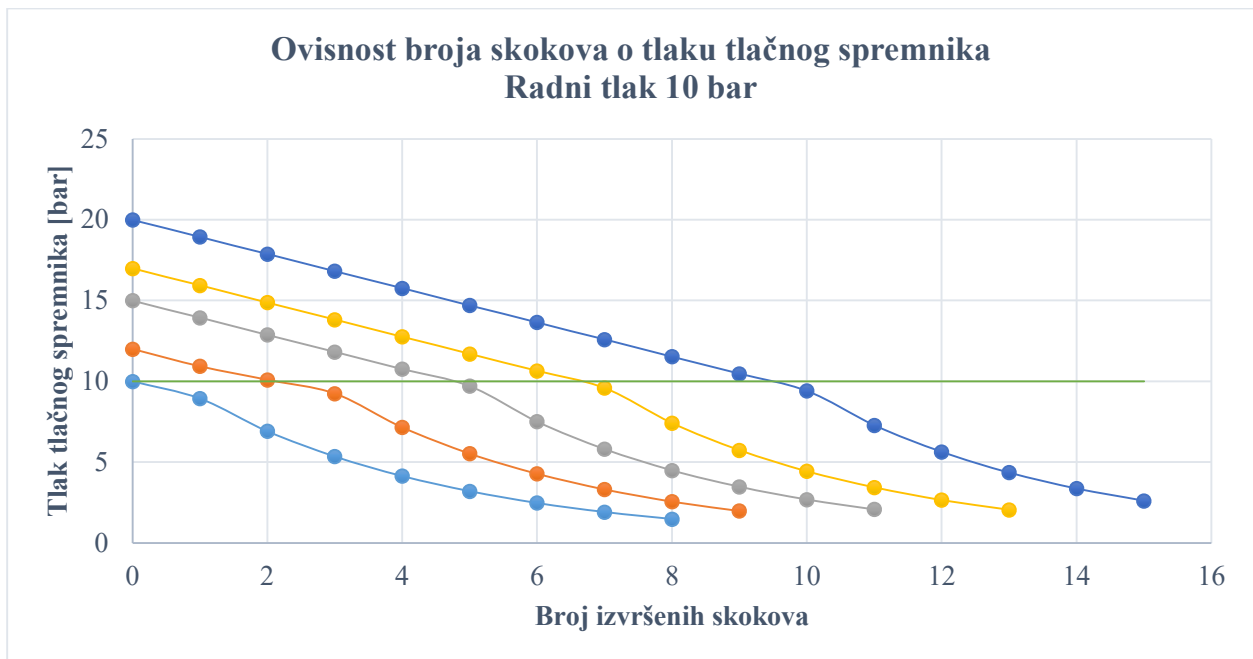
Ovakav postupak se može provoditi u nedogled zato jer će se vrijednost tlaka sve više približavati nuli, ali nikada neće biti nula. Koristeći sve prethodne izraze i izmjenjujući radne tlakove i tlakove unutar cilindra, dobivaju se raznovrsni rezultati o broju ostvarivih skokova. Dobiveni rezultati su prikazani grafički na Slici 4.9., Slici 4.10. i Slici 4.11.



Slika 4.7. Ovisnost broja skokova o tlaku tlačnog spremnika za radni tlak od 6 bar-a



Slika 4.8. Ovisnost broja skokova o tlaku tlačnog spremnika za radni tlak od 8 bar-a



Slika 4.9. Ovisnost broja skokova o tlaku tlačnog spremnika za radni tlak od 10 bar-a

U Tablici 4.2. izvučene su vrijednosti iz grafova koje prikazuju koliko se može skokova ostvariti pri punoj snazi za svaki pojedini slučaj. Tablica prikazuje rezultate za vrijednosti radnog tlaka od 6, 8 i 10 bar-a i za početne tlakove unutar spremnika od 10, 12, 15, 17 i 20 bar-a. Vidljivo je da je moguće ostvariti nekih dvadesetak skokova što je sasvim dovoljno za ovaj prototip egzoskeleta koji se razvija i kojemu je cilj ispitivanje simultanog djelovanja čovjeka i egzoskeleta. U slučaju komercijalne primjene tlak u spremniku bi se višestruko povećao kako bi se moglo ostvariti više skokova.

Tablica 4.2. Broj ostvarivih skokova pri punoj snazi

Broj skokova pri punoj snazi					
Radni tlak	Tlak spremnika 10bar	Tlak spremnika 12bar	Tlak spremnika 15bar	Tlak spremnika 17bar	Tlak spremnika 20bar
6 bar	6	9	14	17	22
8 bar	2	4	8	10	14
10 bar	0	2	4	6	9

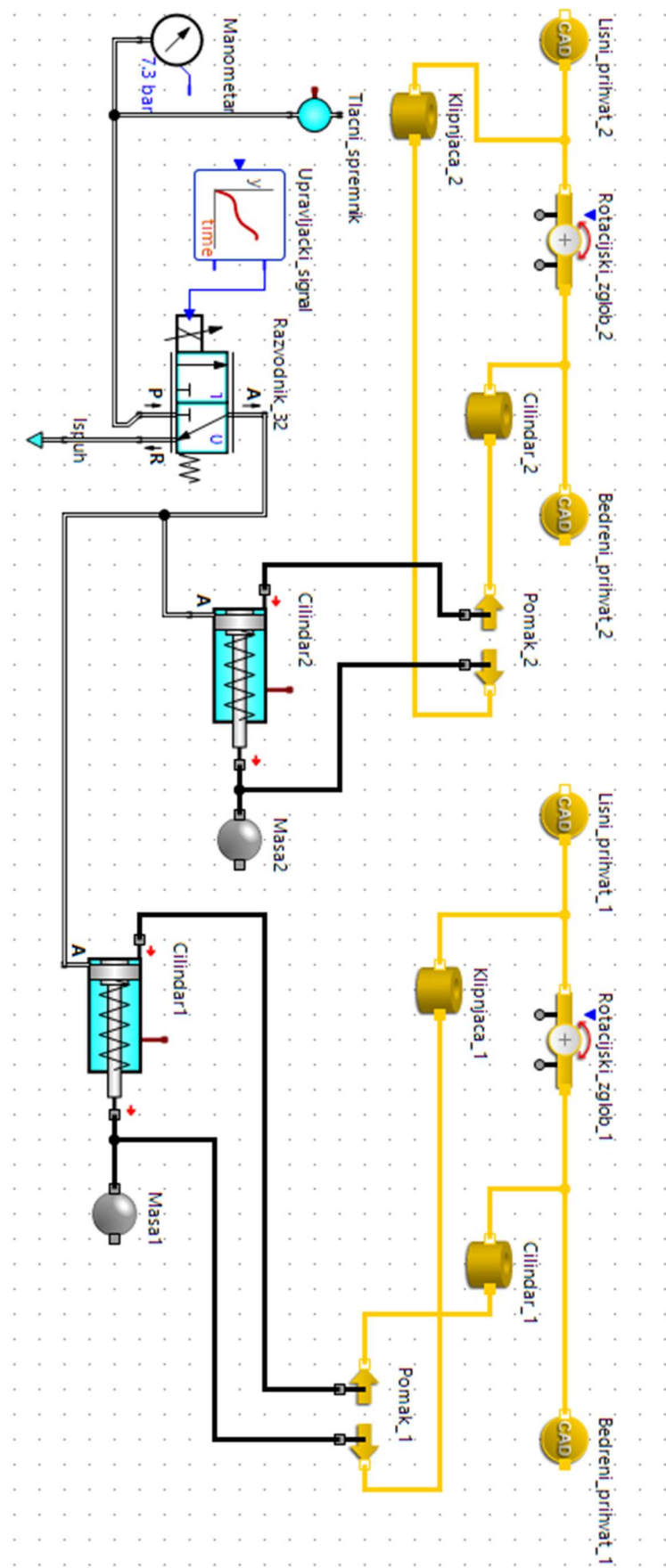
5. SIMULACIJA PNEUMATSKOG EGZOSKELETA

Simulacijski model pneumatskog egzoskeleta izrađen je u programu „SimulationX“ na način da se prvo izradila 2D upravljačka shema, a nakon čega se ona povezala sa 3D modelom koji je učitao u program. Potom su uvrštene sve karakteristike pneumatskih komponenti i provedena je simulacija. Dobiveni rezultati su podom dokumentirani u ovome poglavlju.

5.1. Simulacijski model pneumatskog sustava egzoskeleta

Prije početka izrade simulacijskog modela bilo je potrebno proučiti knjižicu odnosno modul „Pneumatics“ u programu SimulationX gdje su sve komponente koje je moguće koristiti u simuliranju pneumatskih sustava. Kako bi ponašanje simulacijskog modela bilo što sličnije stvarnom konstrukcijskom rješenju potrebno je odabrati komponente koje se koriste i na stvarnom konstrukcijskom rješenju kako bi rezultati simulacije bili što relevantniji za usporedbu.

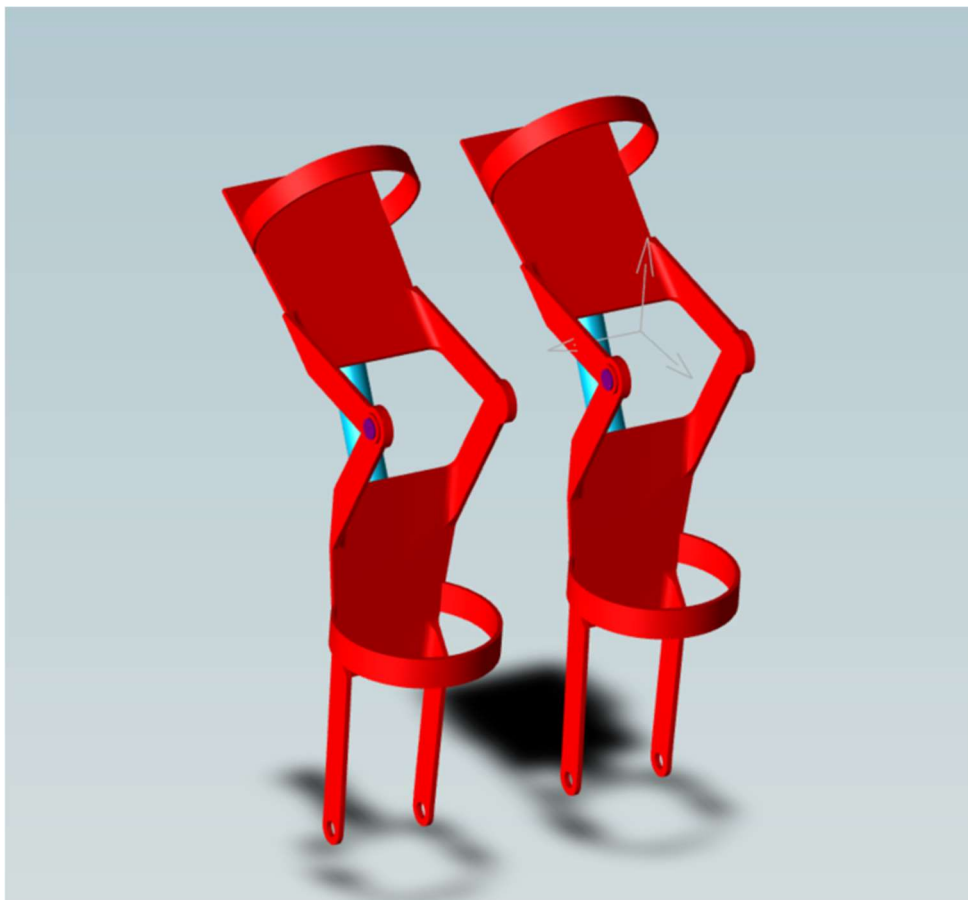
Nakon izbora pneumatskih komponenti i izrade inicijalne sheme na papiru, moguće je krenuti sa izradom simulacijskog modela egzoskeleta. Izrađeni simulacijski model prikazana ja na Slici 5.1.



Slika 5.1 Upravljačka shema sustava

Izrada simulacijskog sustava započinje od Tlačnog spremnika koji osigurava dovoljnu količinu komprimiranog zraka kako i željeni tlak komprimiranog zraka. Na njega se spaja manometar kojim je moguće pratiti tlak zraka u spremniku budući da u toku procesa tlak komprimiranog zraka opada. Tlačni spremnik se spaja na Razvodni ventil koji je tipa 3/2. On je namješten da je u svom prirodnom položaju zatvoren, odnosno da povezuje cilindre sa ispuhom koji su tada neopterećeni budući da je jednaki atmosferski tlak s obje strane. Prilikom aktiviranja razvodnog ventila on će propustiti stlačeni zrak u Cilindar 1 i 2. Upravljanje razvodnikom se vrši preko krivulje Upravljačkog signala.

Osim pneumatskih komponenti u program je učitani i 3D model koji je prethodno bilo potrebno spremati u STL formatu. Učitava se zasebno bedreni prihvat i zasebno lisni prihvat. Oni se povezuju sa spojem koji dopušta rotaciju komponenti oko jedne osi. Lisni prihvat je namješten da je nepomičan. Na lisni kao i na bedreni prihvat se postavljaju cilindri na mjesto gdje se spaja cilindar odnosno klipnjača. Potom se postavlja cilindar i klipnjača koji se kreću između tih cilindara. Cijeli sustav je još jednom kopiran za egzoskelet druge noge. Izgled sustava u programu SimulationX prikazan je na Slici 5.2.



Slika 5.2 Model u programu SimulationX

5.2. Objašnjavanje i definiranje parametara komponenti

Tlačni spremnik

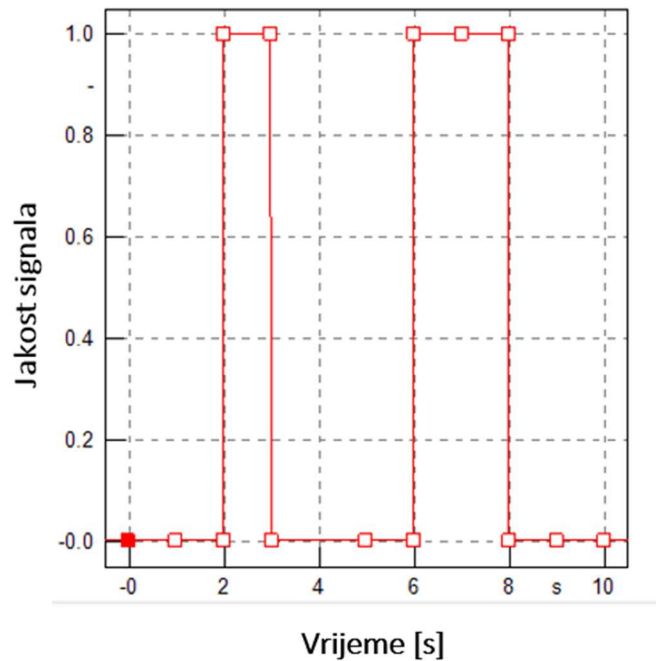
Komponenta koja sadrži određenu količinu komprimiranog zraka na određenom tlaku i temperaturi. Za konkretan slučaj se temperatura postavlja na normalnu temperaturu okoline, a tlak i volumen su izabrani i izračunati u gornjem proračunu, te se oni postavljaju na vrijednosti od 1 dm³ i 10,2 bar-a.

Razvodni ventil 3/2

Razvodni ventil služi za upravljanje izvlačenjem i uvlačenjem klipa odnosno klipnjače. Oznaka 3/2 označava da razvodnik ima 3 priključka i 2 stanja (1,0). Na P priključak se spaja tlačna cijev iz spremnika, A priključak označava izlazni priključak prema cilindrima, dok je R priključak povratni priključak kojim se propušta stlačeni zrak do ispuha.

Upravljački Signal

Ovom komponentom simulira se pritiskanje i držanje tipke korisnika neko određeno vrijeme, kako bi se aktivirao razvodni ventil odnosno izvršio određeni pomak klipa unutar cilindra. Definiranje upravljačkog signala vrši se upisivanjem željenog stanja proporcionalnog ventila (1,0) koji ovisi o vremenskom koraku. Na Slici 5.3. prikazani je upravljački signal cilindra.



Slika 5.3. Upravljački signal cilindra

Cilindar 1 i 2

Cilindar 1 i Cilindar 2 su identični zato će tu zajedno biti i opisani. Pneumatski cilindar je najvažnija komponenta ovog sustava jer omogućuje pretvorbu energije stlačenog zraka u linearno gibanje klipnjače koja pritom prenosi silu koja je potrebna za svladavanje nametnutog opterećenja. Za definiranje ove komponente na početku je potrebno definirati geometriju cilindra što uključuje upisivanje usvojenih vrijednosti radnog hoda cilindra, promjera klipa, mrtvih volumena te početni položaj klipa. Kako bi se mogla vršiti usporedba između proračuna i simulacije potrebno je uključiti mehaničke rezultate koji obuhvaćaju hod klipa, brzinu klipa te silu.

Za hod cilindra namješteno je 120 mm, dok je promjer klipa postavljen na vrijednost od 32 mm. Mrtvi volumen je namješten na vrijednost od 5 cm³. Također je bilo potrebno odabrati podatke koje se želi prikazati na kraju simulacije. Odabrane su vrijednosti pomaka, brzine i sile koju ostvaruje pneumatski cilindar.

Masa 1 i 2

Masa 1 i Masa 2 su identične zbog simetričnosti sustava te zato će tu zajedno biti i opisane. Radi se o komponenta kojima se definira masa pokretnih dijelova (klip, klipnjača, brtveni prsteni, teret). Kako bi se simulirale inercijske sile prilikom pokretanja sustava. Podaci o masi komponenti

definirani su u katalogu proizvođača odabranog cilindra, a teret je zadan u proračunu. Osim toga moguće je još definirati početne vrijednosti položaja i brzine istih. Vrijednosti mase su postavljene na 21,25 kg, a inicijalna brzina i pomak su jednaki nuli.

Lisni prihvati

Lisni prihvat 1 i 2 su donji dio egzoskeleta koji se postavlja ispod koljena i na koji se povezuje klipnjača. Učitavaju se kao stl datoteke pomoću naredbe CAD – Import. Za komponente je potrebno namjestiti točnu poziciju i parametre na način da je pozicionira model u koordinate $\{0,0,0\}$, te da se rotacija modela također postavi na vrijednosti $\{0,0,0\}$. Uvećanje modela postavljeno je na vrijednosti $\{100,100,100\}$, a specifična gustoća modela na vrijednost 7850 kg/m^3 .

Bedreni prihvati

Bedreni prihvati 1 i 2 su gornje komponente egzoskeleta koje se nalaze iznad koljena. Na njih se povezuje cilindar. Učitavaju se slično kao i lisni prihvat, te je za njih potrebno namjestiti slične parametre, te poziciju na način da se poklapa os rotacije sa osi rotacije Lisnih prihvata. Pozicija modela namještena je na vrijednosti $\{0,0,0\}$, dok je rotacija modela namještena na vrijednosti $\{60,0,0\}$. Uvećanje modela je kao i u slučaju lisnog prihvata postavljeno na vrijednosti $\{100,100,100\}$, dok je specifična gustoća modela postavljena na vrijednost od 7850 kg/m^3 .

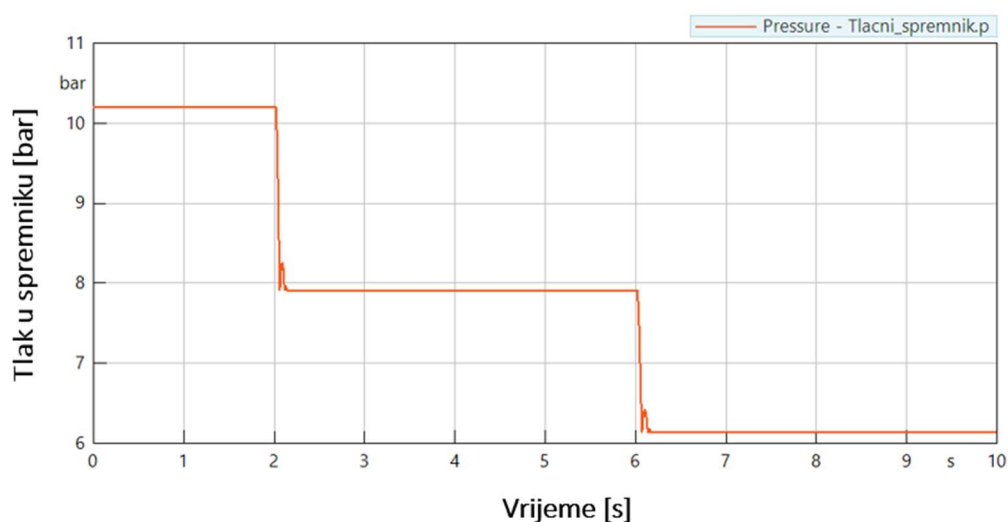
5.3. Rezultati simulacijskog modela egzoskeleta

U nastavku će se prikazati rezultati pojedinih komponenti pneumatskog sustava.

Pad tlaka u tlačnom spremniku

U Tlačnom spremniku doći će do pada tlaka zbog izlaska djela zraka iz njega. Vidi se da je početni tlak 10.2 bara, te on nakon jednog procesa smanjuje na 7,92 bar, a nakon 2 procesa na 6.21 bara.

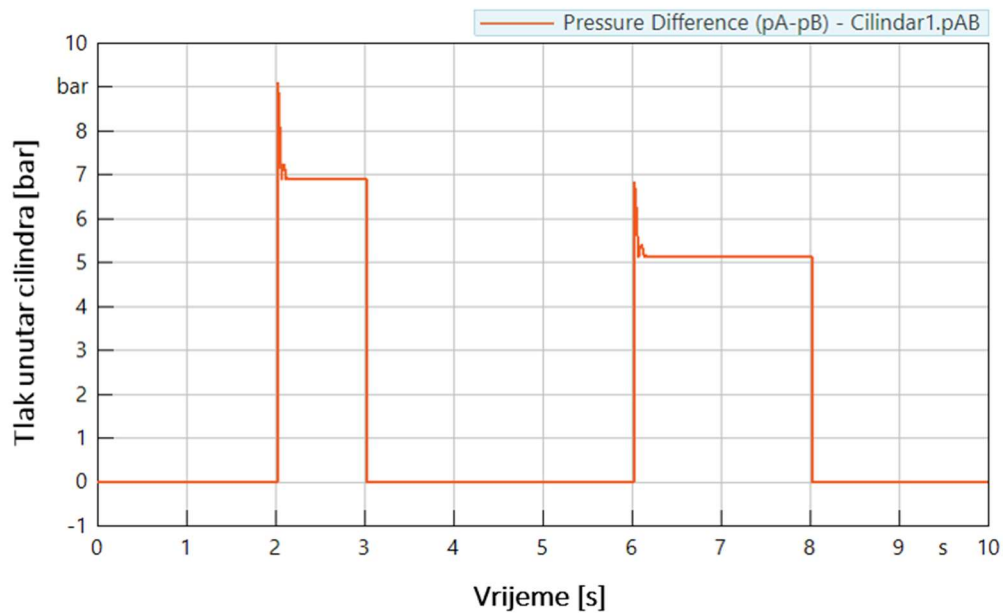
Prikaz grafa pada tlaka nalazi se na Slici 5.4.



Slika 5.4. Pad tlaka u tlačnom spremniku

Tlak unutar cilindra

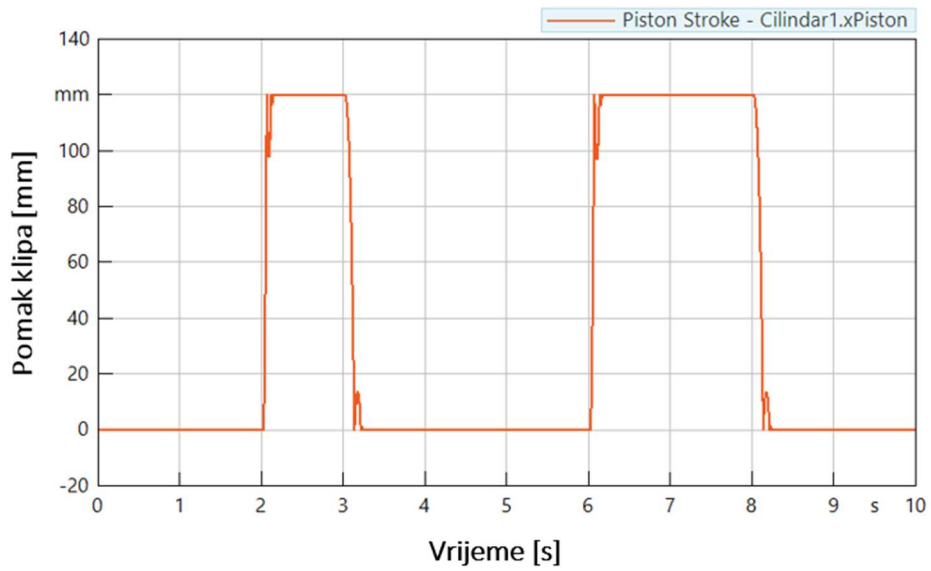
Tlak unutar cilindra jednak je atmosferskom kada je razvodni ventil zatvoren. Kada se razvodni ventil otvori tlak se popne na 9,1 bar-a, a kada klip unutar cilindra dođe u krajnji položaj tlak zraka će još porasti malo iznad. Porast tlaka se događa zbog inercije stlačenog zraka u pokretu. Prikaz tlaka zraka unutar cilindra vidljiv je na Slici 5.5.



Slika 5.5. Tlak zraka unutar cilindra

Pomak klipa cilindra

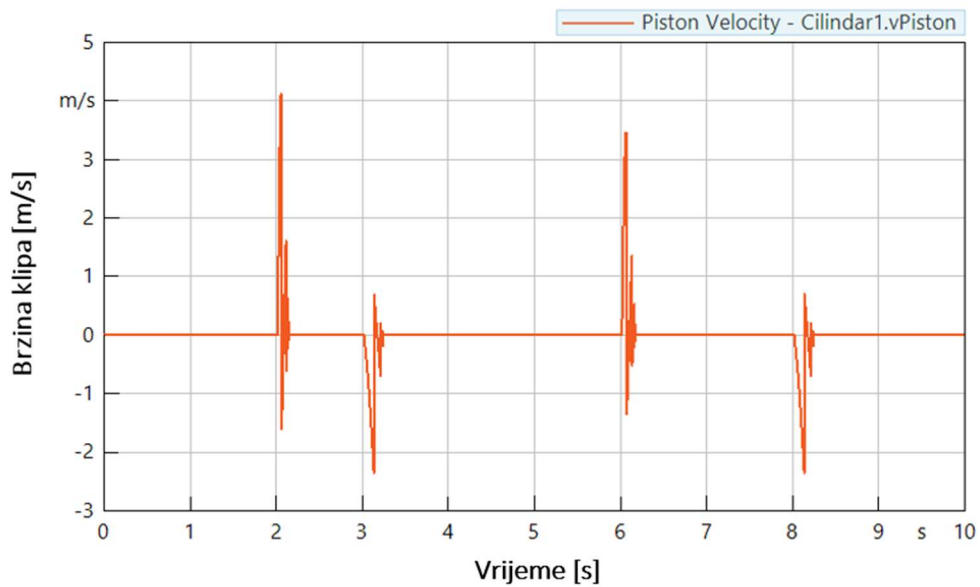
Pomak klipa cilindra prikazuju se u milimetrima u ovisnosti o vremenu. Jasno je vidljivo da će prilikom dolaska povećanog tlaka u komoru cilindra, u trenutku 1 sekunda, doći do promjene položaja cilindra u krajnji položaj. Za vrijeme dok god je tlak u komori cilindra veći od vanjskog, cilindar će ostati u krajnjem položaju, te će tek nakon što se razvodnik prebaci u zatvoreni položaj klip početi vraćati u početni položaj. Zrak se tijekom vraćanja u početni položaj istiskuje u okolinu. Grafički prikaz pomaka cilindra vidljiv je na Slici 5.6.



Slika 5.6. Pomak klipa cilindra

Brzina klipa

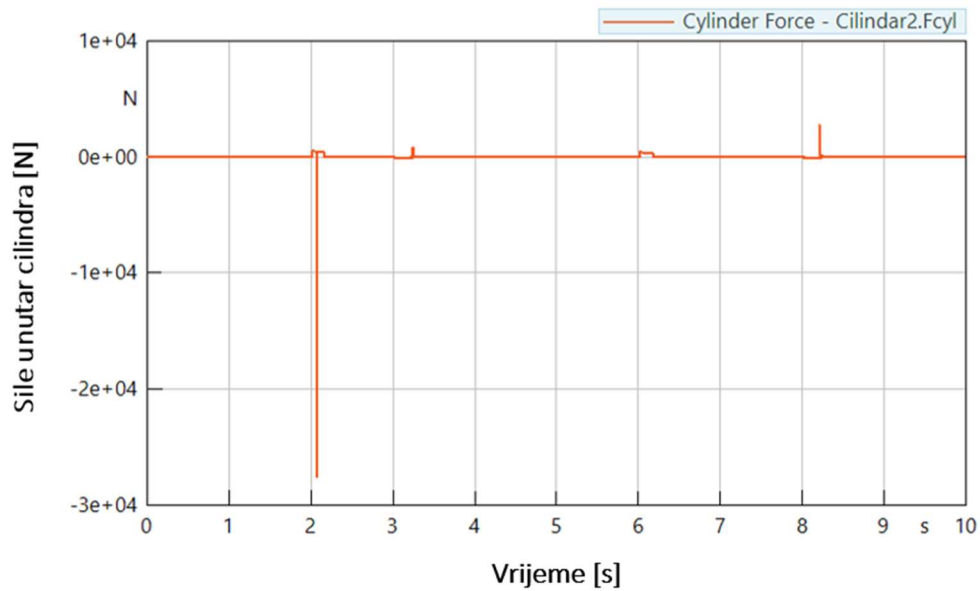
Brzina klipa izražena je u m/s, te ona je vidljiva u trenutku kada se klip giba s jedne strane cilindra na drugu. Prikaz brzina klipa vidljiv je na Slici 5.7.



Slika 5.7. Brzina klipa unutar cilindra

Sile u cilindru

Sile u cilindru javljaju se prilikom izvlačenja i uvlačenja cilindra. One su ovisne o tlaku zraka koji pritišće cilindar te o geometriji cilindra. Prikaz sila vidljiv je na Slici 5.8.



Slika 5.8. Sile unutar cilindra

Dobivene vrijednosti sila i ubrzanje za ponešto razlikuju od proračunatih vrijednosti iz razloga što je iznimno komplicirano definirati geometrija i kretanje korisnika. Čovjekova nepredvidljivost uvelike utječe na konačne rezultate. Ostale vrijednosti poput tlakova odgovaraju onim izračunatim.

6. IZRADA FIZIČKOG MODELA

U ovome poglavlju su opisane odabrane komponente egzoskeleta te izrada potrebnih komponenti.

6.1. Pneumatski cilindri

Odabrani su dvoradni pneumatski cilindri MAL 32x125-CA proizvođača CNZG. Broj 32 označava promjer cilindra u milimetrima, a 125 radni hod također u milimetrima. Odabrani cilindar prikazan je na Slici 6.1.

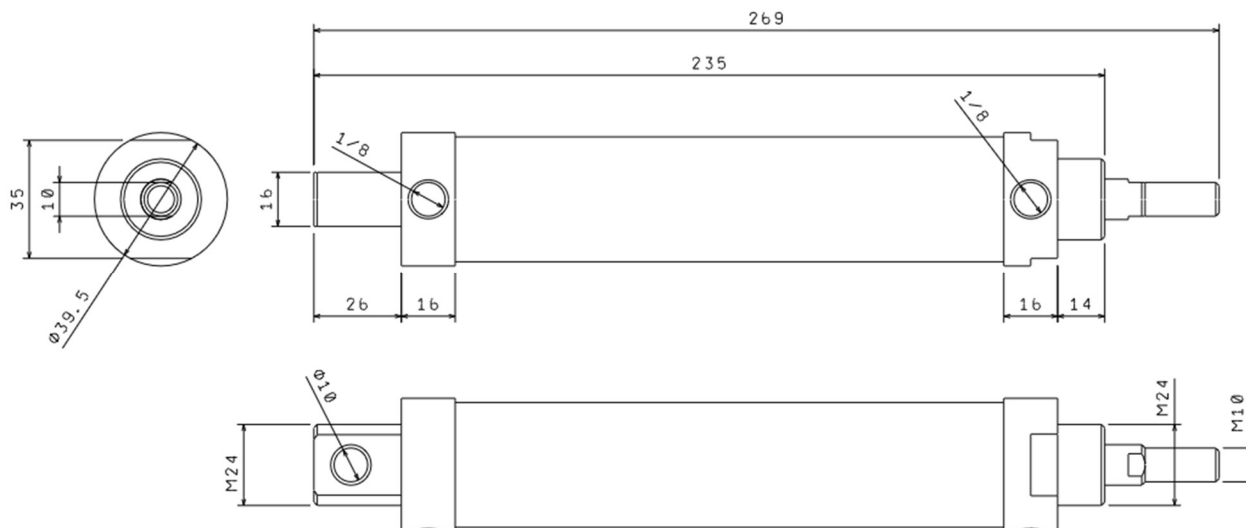


Slika 6.1. Pneumatski cilindar MAL 32

Tehničke karakteristike pneumatskog cilindra „MAL 32“ date su u nastavku:

- Promjer cilindra: 32 mm
- Radni hod: 125 mm
- Radni tlak: 2 – 10 bar
- Maksimalni radni tlak: 10 bar
- Ostvarive brzine: 50 do 800 m/s
- Radna temperatura: -5 do 70 °C

- Pneumatski priključci: PT 1/8
- Masa: 0,478 kg



Slika 6.2. Tehnički nacrt pneumatskog cilindra

6.2. Tlačni spremnik

Druga bitna komponenta je tlačni spremnik. Njegova veličina odnosno volumen određuje količinu pohranjene energije koja se može koristiti za obavljanje rada. Odabirom većeg spremnika dobiva se veća količina pohranjene energiji ali istovremeno se povećava masa ukupnog sustava kao i njegova funkcionalnost. Iz tih razloga izabran je tlačni spremnik čiji je volumen 1l. Izgled tlačnog spremnika vidljiv je na Slici 6.3. Tlačni spremnik je izrađen od protupožarnog aparata koji prolaze stroge testove kontrole. Na taj se način osigurava visoka razina sigurnosti tlačnog spremnika.

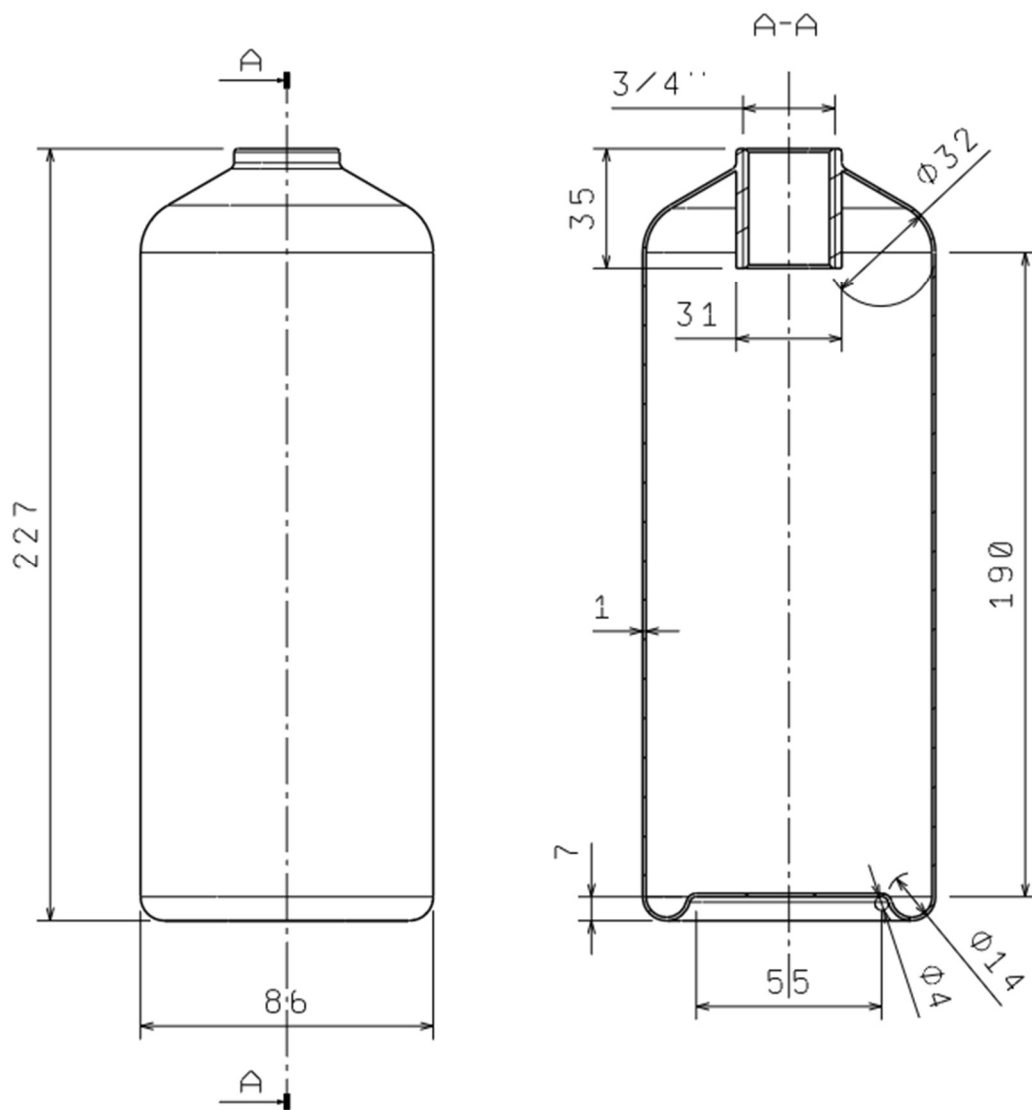


Slika 6.3. Tlačni spremnik

Tehničke specifikacije odabranog spremnika su slijedeće:

- Volumen: 1,07 l
- Testirani tlak: 25 bar
- Standardni radni tlak: 17 bar
- Radna temperatura: -30 do 60 °C
- Priključak: 3/4"
- Masa: 0,627 kg

Tehnički nacrt spremnika prikazan je na Slici 6.4:



Slika 6.4. Tehnički nacrt tlačnog spremnika

6.3. Pneumatske cijevi

Prilikom odabira pneumatskih cijevi najbitnije su dvije karakteristike, a to su radni tlak i promjer cijevi. Sve pneumatske komponente nakon regulatora tlaka rade sa tlakovima do maksimalno 10 bar-a, stoga je potrebno da pneumatska cijev može izdržati taj tlak. Radna temperatura sustava je sobna temperatura, stoga ne zahtjeva nikakve specijalne pneumatske cijevi.

Promjer cijevi zavisi o potrebnom protoku komprimiranog zraka, a njega se može izračunati iz vremena potpunog hoda klipa unutar cilindra i volumena cilindra.

Volumni protok komprimiranog zraka:

Za izračun volumnog protoka unutar sustava potrebno je poznavanje volumena cilindra i vremena izvlačenja cilindra pri skoku. Volumen cilindra se izračunava iz promjera cilindra i hoda cilindra i to preko slijedećeg izraza:

$$V_c = \frac{d^2 \pi}{4} \cdot h \quad (6.1)$$

$$V_c = \frac{0,032^2 \cdot \pi}{4} \cdot 0,125 \quad (6.2)$$

$$V_c = 0,0001005 \text{ m}^3 \quad (6.3)$$

Vrijeme izvlačenja cilindra izračunato je prethodno u ovome radu u poglavlju 4. i njegova vrijednost iznosi:

$$t = 0,138 \text{ s} \quad (6.4)$$

Poznavajući volumen cilindra i vrijeme njegovog izvlačenja, moguće je izračunati volumni protok za jedan cilindar i to kao omjer volumena i vremena. Volumni protok sustava bila bi samo dvostruko veća vrijednost od one za volumni protok za jedan cilindar.

$$\dot{V}_1 = \frac{V_c}{t} \quad (6.5)$$

$$\dot{V}_1 = \frac{0,0001005}{0,138} \quad (6.6)$$

$$\dot{V}_1 = 0,000728 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (6.7)$$

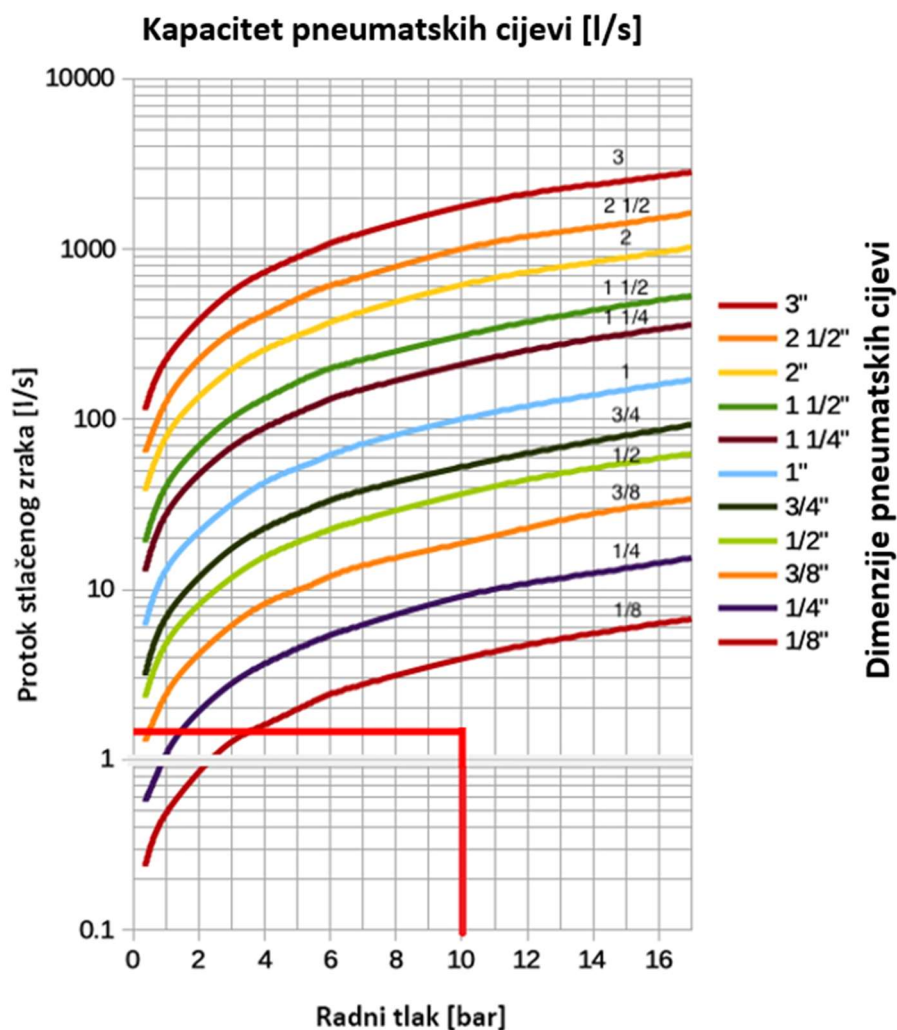
$$\dot{V} = \dot{V}_1 \cdot 2 \quad (6.8)$$

$$\dot{V} = 0,000728 \cdot 2 \quad (6.9)$$

$$\dot{V} = 0,00146 \frac{m^3}{s} \quad (6.10)$$

$$\dot{V} = 1,46 \frac{dm^3}{s} \quad (6.11)$$

Na Slici 6.5. grafički je prikazana ovisnost dimenzije pneumatske cijevi i radnog tlaka. Na slici su vidljive vrijednosti za radni tlak između 0 i 16 bar-a. Pneumatski sustav koji se obrađuje u ovome radu radi na tlaku do 10 bar-a. Na ordinati grafa vrijednosti su različitih protoka čije su veličine prikazane u za protok u litrama u sekundi. Prethodno je izračunato da će pneumatski sustav zahtijevati protok od okvirno 1,5 l/s. Iščitavanjem iz grafa može se zaključiti da čak i cijev 1/8 će biti dovoljna za pneumatski sustav. Međutim izabrat će se cijev većih dimenzija kako bi se ostvarili što manji gubitci tlaka tijekom protoka zraka.



Slika 6.5. Kapacitet pneumatskih cijevi [l/s] [13]

Odabrana pneumatska cijev je naziva „AirTAC POLYURETHANE TUBE 8x5,5mm JS05-H-V03“. Izgled pneumatske cijevi vidljiv je na Slici 6.6.

Tehničke specifikacije pneumatske cijevi:

- Vanjska dimenzija: 8 mm
- Unutarnja dimenzija: 5,5 mm
- Debljina stijenke: 1,25 mm
- Materijal: poliuretan
- Radni tlak na 23°C: 8 bar
- Maksimalni tlak na 23°C: 20 bar
- Radijus savijanja: 20 mm
- Masa: 0,0325 kg/m
- Radna temperatura: od -20°C do 70°C



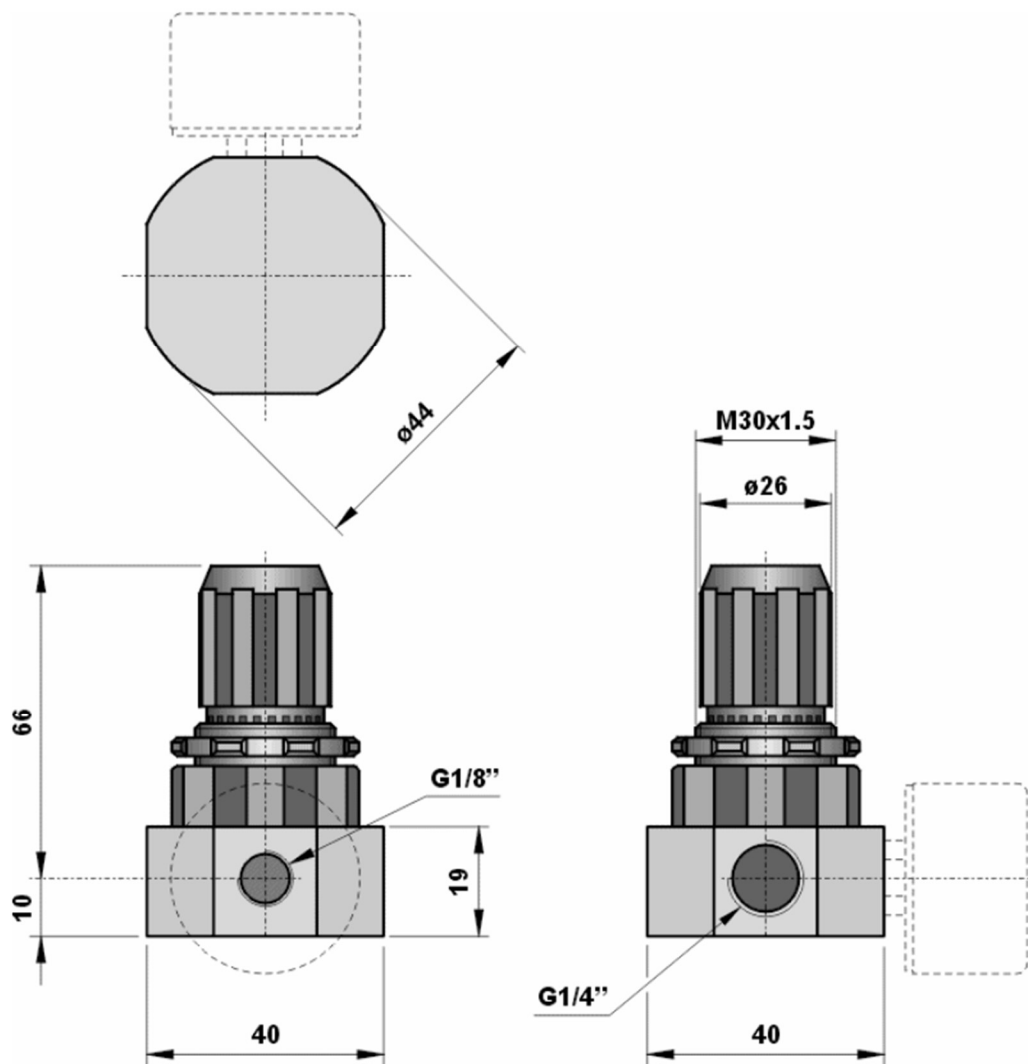
Slika 6.6. Pneumatska cijev AirTAC POLYURETHANE TUBE 8x5,5mm JS05-H-V03

6.4. Regulator tlaka i manometar

Pomoću regulatora tlaka može se prilagoditi tlak u sustavu na željenu razinu. Prilikom rada sustava troši se količina komprimiranog zraka u spremniku i tlak u spremniku postepeno opada, ali regulator tlaka zadržava jednaki tlak u sustavu. Prikaz samog regulatora tlaka vidljiv je na slici 6.7., a njegov tehnički nacrt na slici 6.8.



Slika 6.7. Regulator tlaka AZ MERG 2-08



Slika 6.8. Tehnički nacrt regulatora tlaka AZ MERG 2-08 [14]

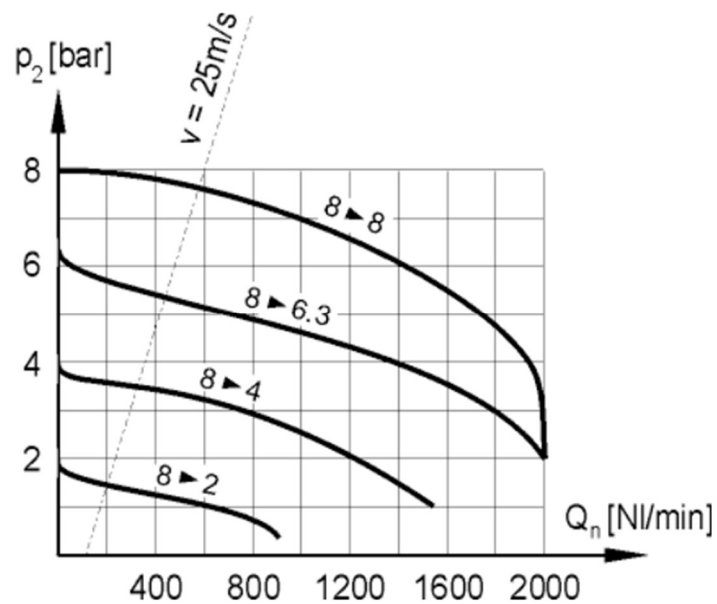
Tehničke specifikacije regulatora tlaka:

- | | |
|---|---------------|
| - Priključci: | G1/4" |
| - Max temperatura: | 50°C |
| - Ulazni tlak: | 0 ... 10 bar |
| - Izlazni tlak: | 0,5 ... 8 bar |
| - Minimalna razlika tlaka: | 0,2 bar |
| - Histereza (10 bar / 0 bar): | 1,6 |
| - Histereza (10 bar / 8 bar): | 0,6 |
| - Preporučeni protok (6,3 bar, 25 m/s): | 550 NI/min |

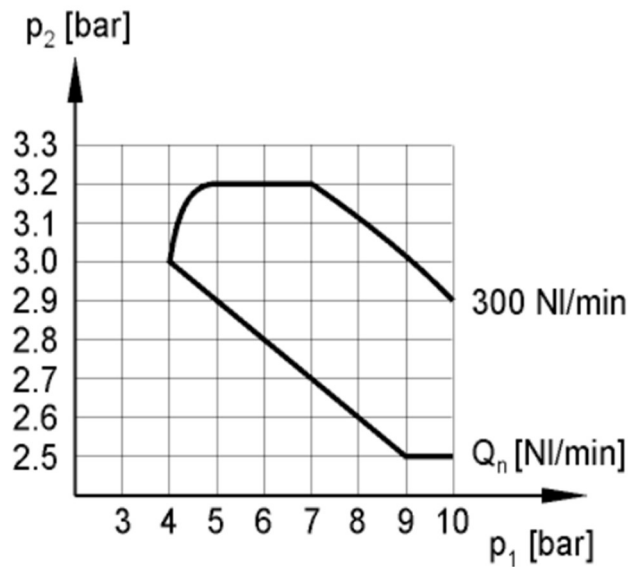
Materijali:

- Kućište: aluminij 11S (prirodno anodiziran)
- Brtva: NBR
- Opruga: INOX
- Unutarnji dijelovi: mjed, nehrđajući čelik i polimeri

Slijedeći graf na Slici 6.9. prikazuje karakteristike protoka zraka u zavisnosti u redukciji tlaka, brzini stlačenog zraka i o izlaznom tlaku. U nastavku na Slici 6.10. prikazana je i varijacija izlaznog tlaka s fluktuirajućem ulaznom tlaku.



Slika 6.9. Karakteristike protoka zraka [14]



Slika 6.10. Varijacija izlaznog tlaka s fluktuirajućem ulaznim tlakom [14]

Da bi regulatorom tlaka mogao namjestiti tlak na željenu razinu, potreban je manometar kako bi se mogla pratiti veličina tlaka u sustavu. Manometar se montira direktno na regulator tlaka kako bi se dobili najtočniji podaci i kako ne bi bilo kašnjenja u očitavanju. Odabrani manometar je „Manometar D40-1/8 0+12bar“ i prikazan je na Slici 6.11.



Slika 6.11. Manometar D40-1/8 0+12bar

Tehničke karakteristike manometra:

- Mjerno područje: 0 ... 10 bar
- Priključak: G1/8"

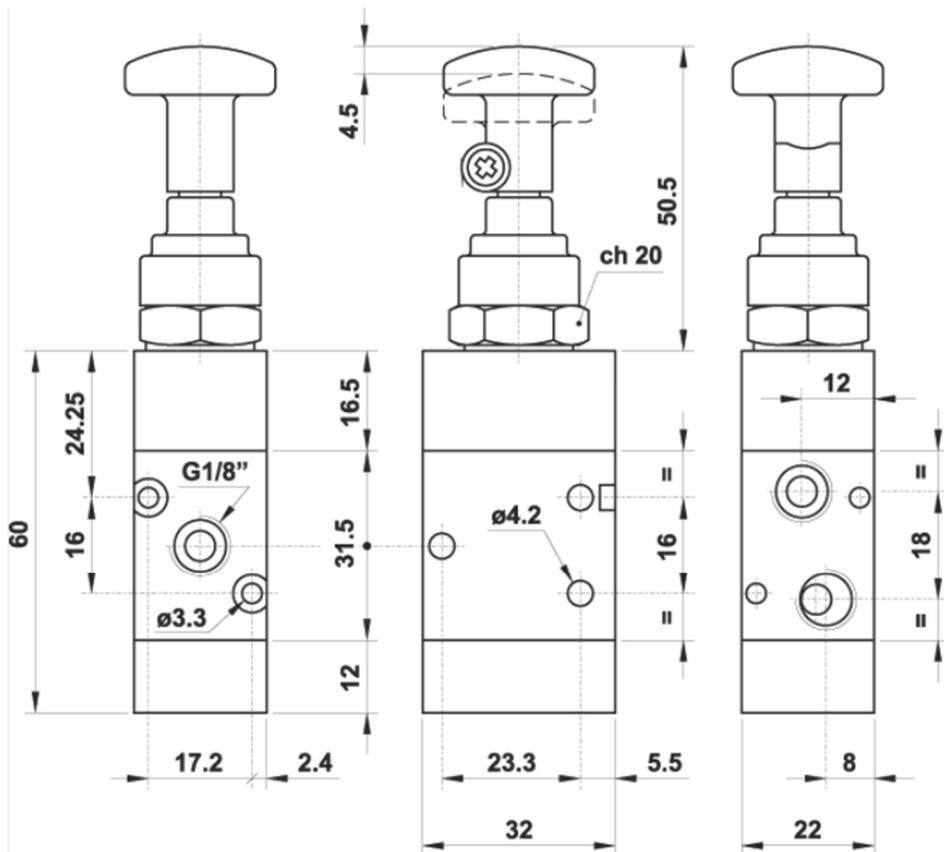
- Promjer kućišta: 40 mm

6.5. Razvodni ventil

Upravljanje sustava ostvaruje se pomoću razvodnog ventila, na način da se pritiskom na tipkalo propušta stlačeni zrak u pneumatske cilindre koji potom ostvaruju rad. Odabrani razvodni ventil za upravljanje je 3/2 mehanički pokretan ventil s povratnom oprugom. Naziv razvodnog ventila je „AZ 321 MT“ i prikazan je na slici 6.12. Njegov tehnički nacrt isto je dan u nastavku na slici 6.13.



Slika 6.12. 3/2 Razvodni ventil „AZ 321 MT“ [15]



Slika 6.13. Tehnički nacrt 3/2 razvodnog ventila „AZ 321 MT“ [15]

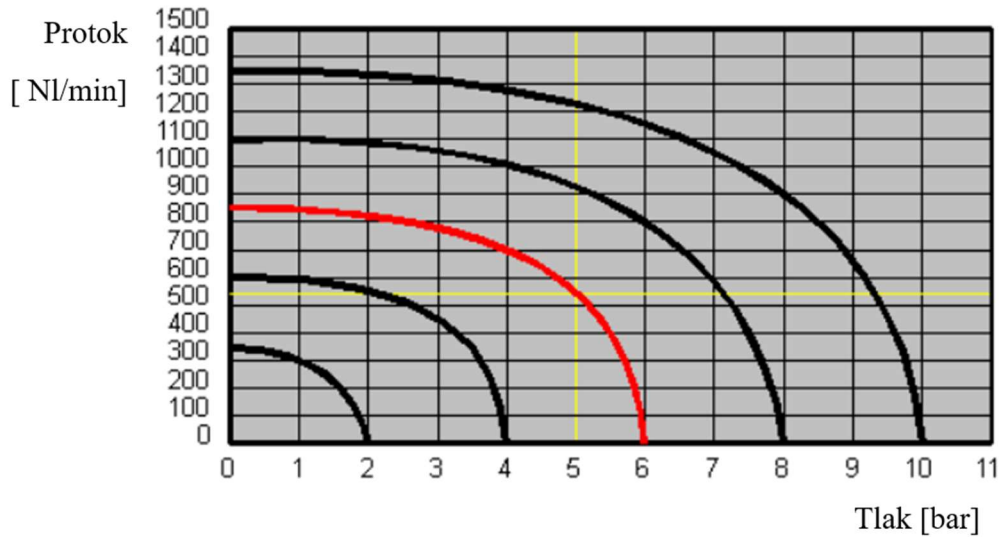
Tehnički podaci o razvodnom ventilu:

- Nominalni premijer: 5 mm
- Nominalni protok (na 6 bar): 550 NI/min
- Radna temperatura: max 60°C
- Radni tlak: -0,9 ... 10 bar
- Sila aktiviranja: 15 N
- Radni fluid: 50 μ filtrirani zrak sa ili bez podmazivanja

Materijali:

- Kućište: 11S anodizirani aluminij
- Upravljanje: tehropolimer
- Čunjak: 11S poniklani aluminij
- Brtve: NBR
- Opruge: nehrđajući čelik
- Unutarnji dijelovi: mesing OT 58

U nastavku na Slici 6.14. je i prikazan graf u kojemu se linijama prikazuje zavisnost protoka stlačenog zraka i tlaka koji se nalazi u razvodnom ventilu. Vrijednosti protoka su u mjernim jedinicama NI/min što bi označavalo normalni protok zraka u l/min ali pri normalnim atmosferskim uvjetima temperature (20 °C) i tlaku od 1 bar-a.



Slika 6.14. Zavisnost protoka o tlaku unutar razvodnog ventila [15]

6.6. Spajanje komponenti i izrada fizičkog modela

Izrada fizičkog modela započinje izradom bedrenog i lisnog prihvata. Za potrebe njihove izrade nabavljena je PVC-U vodovodna cijev. Cijev se inače koristi za transport vode sa velikim protokom vode i tlakovima u sustavu do 10 bar-a. Cijev se pomoću brusilice odrezala na približno željene dimenzije te se potom pomoću termičke obrade dodatno oblikovala. Prikaz izgleda cijevi prije rezanja oblika i termičke obrade prikazana je na Slici 6.15.



Slika 6.15. PVC-U cijev za izradu bedrenog i lisnog prihvata

PVC-U materijal spada u kategoriju elastomernih plastika, što bi značilo da se termičkim zagrijavanjem može promijeniti njegov oblik bez da se promijeni kemijski sastav. Stoga se cijev koja se ugrubo oblikovala stavlja u pećnicu dok ne omekša. Prikaz grube obrade vidljiv je na Slici 6.16. (lijevo). Cijev koja se omekšala u pećnici moguće je sada željeno oblikovati. Vruća cijev se postavlja na nogu korisnika, koja je prethodno izolirana kako je i prikazano na Slici 6.16. (desno). Cijev će potom poprimiti novi oblik, te će nakon hlađenja ostati o tome obliku.



Slika 6.16. Grubo obrađena cijev (lijevo) i izolirana noga korisnika (desno)

Prilikom jednog postupka termičke obrade prihvata (cijevi) dobiti će se približno željeni oblik, ali kako bedreni i lisni prihvat moraju odgovarati jedan na drugog i zajedno na korisnika, točan oblik je teško dobiti. Stoga se proces termičke obrade provodi više puta pojedinačno za bedreni i lisni prihvat, te potom zajedno. Svakim postupkom zagrijavanje, te potom hlađenja se bedreni i lisni prihvat približavaju željenom obliku dok se u konačnici ne postigne traženi oblik. Nakon što je proces termičke obrade završen, još se jednom korigira oblik mehaničkom obradom. Konačni izgled gdje su uspješno povezani bedreni i lisni prihvat prikazan je na Slici 6.17.



Slika 6.17. Rezultat višestruke termičke i mehaničke obrade

Bedreni i lisni prihvatni sa zglobom u koljenu su izrađeni, ali sad je potrebno izraditi poveznicu koja će povezati pneumatski cilindra sa bedrenim i lisnim prihvatom. Prihvat mora biti krut i nepomičan kako bi osigurao konstantnu kinetiku. Stoga se prihvat izrađuje od konstrukcijskog čelika koji se povezuje tehnikom zavarivanja. Izgled dobivenih prihvata cilindra i prihvata klipnjače prikazani su na Slici 6.18. Prihvati su prije montiranja očišćeni te je nanesena antikorozivna zaštita na njih.



Slika 6.18. Prihvat cilindra (lijevo) i prihvat klipnjače (desno)

Da bi se moglo povezati prihvat cilindra sa bedrenim prihvatom, te prihvat klipnjače sa lisnim prihvatom, bilo je potrebno izraditi provrte u plastičnim prihvatom kroz koje će se moći postaviti vijci. U konačnici je svaki prihvat povezan sa pet vijaka na način koji je prikazan na Slici 6.19.



Slika 6.19. Povezivanje prihvata cilindra na bedreni prihvat

Da bi se bedreni i lisni prihvat mogli učvrstiti na nogu korisnika bilo je potrebno montirati remene za zatezanje. Dva remena montiraju se na bedreni prihvat i dva na lisni prihvat, što bi značilo četiri remena po svakoj nozi korisnika. Remeni osiguravaju zajedničko i izjednačeno kretanje egzoskeleta i korisnika. Da bi se mogli montirati remeni za zatezanje, izrađeni su prolazi kroz bedreni i lisni prihvat.



Slika 6.20. Montiranje remena za zatezanje

Sve komponente koje se montiraju na tlačni spremnik izrađene su sa navojem, te se tako povezuju. Kako bi se osigurala nepropusnost zraka, na svaki navoj postavlja se teflonska traka baš kako je prikazano na Slici 6.21.



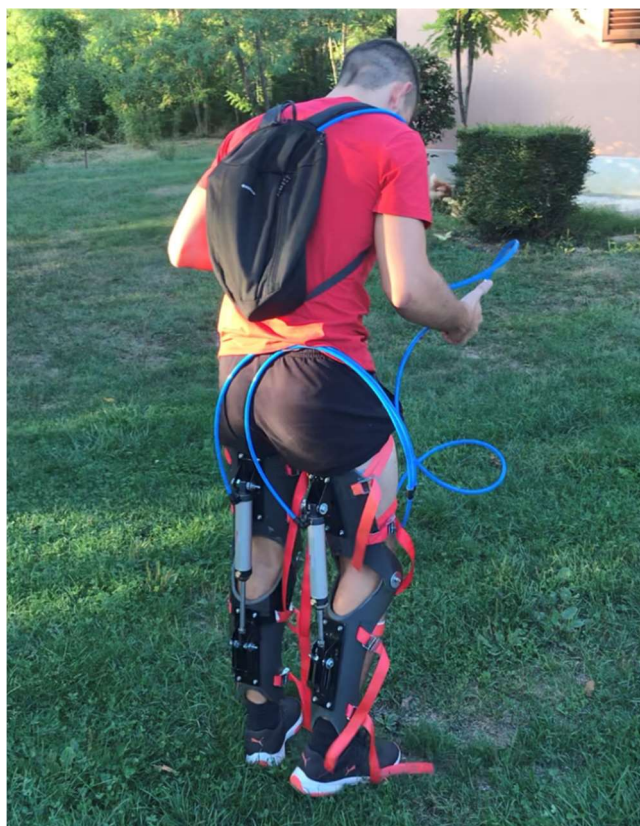
Slika 6.21. Postavljanje teflonske trake na navoj

Izgled tlačnog spremnika na koji su postavljene sve komponente moguće je vidjeti na Slici 6.22. Vidljivo je kako je montiran regulator tlaka zajedno sa manometrom, potom ventil prema razvodnom ventilu na koji je montirana brza spojnica za priključak pneumatske cjevčice. Na drugu stranu je ventil i brza spojnica za punjenje tlačnog spremnika.

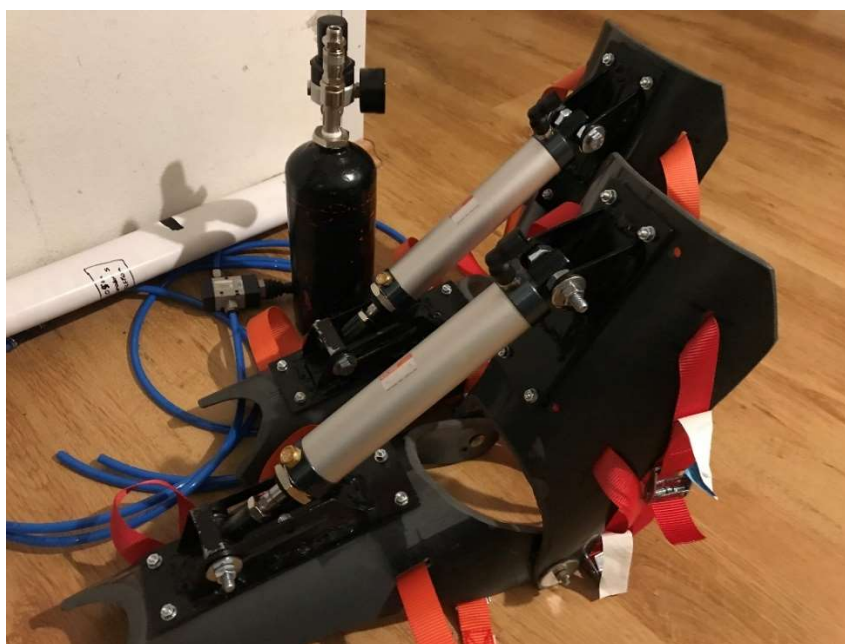


Slika 6.22. Tlačni spremni sa svim montiranim komponentama

Kada se sve komponente povežu zajedeno, uključujući pneumatske cijevi, dobiva se konačni izgled egzoskeleta koji je moguće vidjeti na Slici 6.23, 6.24 i 6.25.



Slika 6.23. Konačni izgled egzoskeleta



Slika 6.24. Izgled egzoskeleta bez korisnika



Slika 6.25. Izgled egzoskeleta u skoku

6.7. Testiranje fizičkog modela

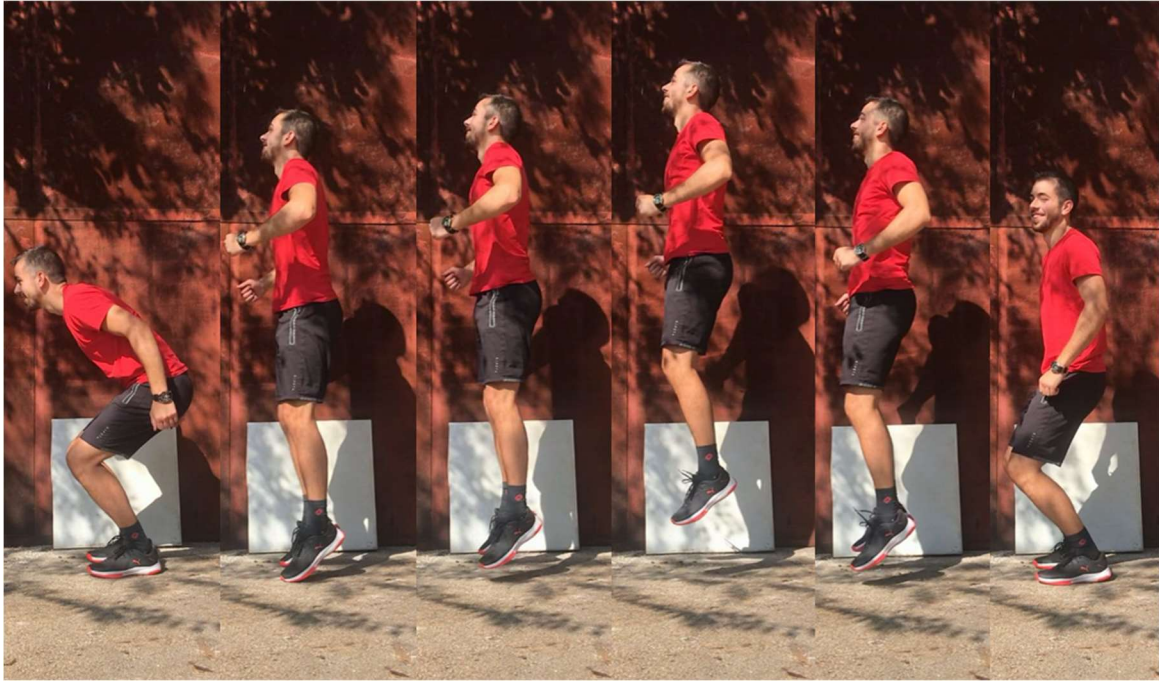
Testiranja su vršena u više navrata i sa različitim radnim tlakovima. Testiranja su započeta sa malim tlakovima od 1 do 2 bar-a kako bi se ispitala osnovna funkcionalnost sustava. Na takvim tlakovima korisnih je mogao osjetiti silu koja djeluje na njega, no ta sila nije bila ni približno dovoljna da bi se ostvarilo poboljšanje skoka. No na tim tlakovima uspjela se ispitati ispravnost opreme. Došlo se do zaključka da nema većih propuštanja u sustavu, te kako oprema zadovoljava na odgovarajućoj razini.

Nakon inicijalnog testiranja na malim tlakovima, postepeno se je prelazilo na veće tlakove gdje je korisnik počeo zapažati sve veću silu i asistenciju pri skoku. Pri ispitivanju od 6 bara-a korisnik je već osjećao silu koja mu pripomaže pri skoku, ali budući da je sustav postavljen na način da korisnik i egzoskelet moraju djelovati zajednički i sinkronizirano bilo je teško ostvariti vizualno poboljšanje iako ga je korisnik osjećao. Razlog tome je što korisnik kada na sebi nosi egzoskelet, zbog praktičnosti može ostvariti 70% svoje snage u odnosu na kada ga ne nosi. Isto tako egzoskelet ne djeluje na cijelome putu te zbog gubitaka u sustavu ostvaruje silu koja nadomješta onih izgubljenih 30% korisnika. U konačnici korisnik je na nekih 100% svoje snage u kombinaciji sa egzoskeletom pri skoku od 6 bar-a.

U konačnici su se vršila eksperimentalna ispitivanja pri tlaku od 10bar-a. Pri takvom tlaku već su zapaženi rezultati. Prikaz skoka pri tlaku od 10 bar-a vidljiv je na Slici 6.27. Za usporedbu prikazano je na Slici 6.26. faze skoka bez egzoskeleta kako bi se mogla zamijetiti razlika u skoku. Konkretnim mjerenjem izmjerio se skok sa egzoskeletom od 65 cm, dok je skok bez da se aktivira egzoskelet iznosio 40 cm. Što bi u konačnici značilo da se ostvarilo povećanje skoka od 38% kada se koristi egzoskelet u odnosu kada se ne koristi. Eksperimentom se nije uspio ostvariti skok od 1 m, a razloga tome bi bilo nekoliko. Jedan od razloga je nekoordinirano djelovanje korisnika i egzoskeleta, drugi razlog bi bila smanjena snaga korisnika zbog pričvršćenog egzoskeleta na njega. Treći razlog bi bio taj da pneumatski cilindar ne djeluje kroz cijeli proces skoka, već samo kroz dio i odstupa malo od centra mase korisnika budući da se kretanjem korisnika njegov centar mase konstantno pomiče. Četvrti razlog bi bio da se dešava gubitak tlaka prolazom zraka kroz pneumatske komponente.

U daljnjem razvoju egzoskeleta bi trebalo poraditi na ova četiri razloga gubitka snage. Trebalo bi istražiti na kojim se pneumatskim komponentama dešava najveći gubitak tlaka kako bi se ih zamijenilo. Potrebno je poboljšati ergonomiju i smanjiti masu egzoskeleta kako bi korisnik mogao isporučiti što veći postotak vlastite snage. Vrijedan doprinos radu bilo bi i ugradnja automatskog

elektronskog upravljanja koje bi samo prepoznalo kada treba aktivirati egzoskelet. Da bi se mogla ostvariti sila tijekom cijelog procesa skoka mogao bi se ugraditi pneumatski cilindar sa većim hodom, te još jedan dodatni pneumatski cilindar u gležanj korisnika kako bi se pravilnije pratilo anatomiju korisnika.



Slika 6.26. Faze skoka bez upotrebe egzoskeleta



Slika 6.27. Faze skoka pri eksperimentalnom testiranju egzoskeleta

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu konstruiran je egzoskelet za pojačanje snagu nogu. U startu su analizirani dosadašnji izrađeni egzoskeleti kako bi se upoznali sa pneumatskim sustavom te kako bi bolje shvatili način funkcioniranja tih sustava, te kao bi se to znanje potom moglo primijeniti na konstrukciju ovog egzoskeleta.

Cijeli proces konstruiranja je poprilično iterativan, proces započinje sa početnom idejom i skiciranjem nakon kojeg slijedi proračun komponenti. U fazi proračuna se često kao produkt izračuna, dolazi do zaključaka kako bi trebalo neke stvari izmijeniti u idejnoj skici. Stvari se potom izmjene u početnoj skici nakon čega je potrebno korigirati proračun. Nakon proračuna prelazi se na fazu simulacije koja ima za cilj dobiti podatke koji su što bliži podacima koje bi ostvario fizički model. Simulacija uključuje i razne faktore koji su bili zanemareni u proračunu zbog jednostavnosti proračuna. Ti faktori utječu na konačne rezultate koji u tom slučaju možda neće zadovoljavati te će ih trebati korigirati u proračunu ili čak i u samoj konstrukciji.

U ovom radu rezultati dobiveni simulacijom malo odstupaju od proračunatih rezultata, ali nalaze se u dopuštenim granicama tako da nema potrebe za nikakvim korekcijama. Odstupanje je kod početnog udara stlačenog zraka u cilindar gdje će tlak narasti nešto iznad proračunatog tlaka. Ta pojava događa se zbog inercije stlačenog zraka, ali porast tlaka je kratkotrajan i u dopuštenim granicama stoga se može zanemariti. Isto tako je vrijeme izvlačenja cilindra nešto kraće od proračunatog, ali to je zbog niza nepoznatih faktora koje je bilo nemoguće ukomponirati u proračun, ali i ta je vrijednost svedena unutar željenih granica. U konačnici rezultati simulacije odgovaraju rezultatima proračuna što znači da je ona uspješno provedena.

Dobivanjem zadovoljavajućih rezultata simulacije, kreće se u detaljnu konstrukcijsku razradu. U tom procesu nastoji se definirati svaki detalj, što će dovesti do toga da će trebati neke stvari izmijeniti te postoji mogućnost da će trebati ponešto izmijeniti proračun ili čak samu inicijalnu ideju, jer se u procesu detaljne konstrukcije razrade došlo do boljeg rješenja. Za primjer toga navest će se samo kako konačni izgled egzoskeleta se razlikuje od početne konstrukcije.

Sama završnica rada je izrada fizičkom modela te njegovo testiranje. U ovoj fazi će najviše doći do izražaja sve mane konstrukcije. Sam fizički model pružit će najviše povratnih informacija o funkcionalnosti konačnog produkta, ali isto tako će dopuštati najmanje korekcija u konstrukciji. Izrada fizičkog modela zahtijevala je puno vremena i korekcija iz razloga što je sama anatomija ljudskog tijela komplicirana te je prihvate trebalo izraditi kroz niz termičkih i mehaničkih obrada. Kasnije je bilo komplicirano pozicionirati komponente na prihvate zbog njihovog nepravilnog

oblika. Najveći problem ispitivanja funkcionalnosti ove konstrukcije je taj da se ispitivanje moglo vršiti tek nakon što je potpuno kompletiran fizički model.

Rezultat eksperimentalnog ispitivanja dao je rezultat povećanja sile skoka od 38%, što je značajno niže od predviđenih teoretskih 105%. No, to daje do znanja da postoje veliki gubici snage u sustavu čovjeka i egzoskeleta te bi trebalo poraditi na tim gubicima kako bi se minimizirao njihov iznos. Sve u svemu 38% se može smatrati kao uspješno provedeni eksperiment.

8. POPIS SLIKA I TABLICA

8.1. Popis slika

Slika 2.1. Carry - Egzoskelet lakta - Soft pneumatic elbow exoskeleton [1].....	5
Slika 2.2. Tri varijante Carry - Egzoskelet lakta [1]	5
Slika 2.3. Grafički prikaz smanjenja potrebne sile za odvijanje rada [1].....	6
Slika 2.4. Standardni omjeri dimenzija muškog i ženskog tijela [2].....	7
Slika 2.5. Elementi egzoskeleta donjih udova [2].....	8
Slika 2.6. Prikaz stvarnog izgleda egzoskeleta donjih ekstremiteta [2].....	9
Slika 2.7. EMG senzori na donjim ekstremitetima [2].....	10
Slika 2.8. Prikaz egzoskeleta ExoHand [3].....	11
Slika 2.9. Robotska ruka kopira pokrete ExoHand-a [3]	12
Slika 2.10. Egzoskelet gležnja [4].....	13
Slika 2.11. Poluautomatski egzoskelet za trčanje [5].....	15
Slika 2.12. Snaga ljudskih zglobova sa i bez pneumatskog aktuatora [5]	16
Slika 3.1. Skica prve varijante konstrukcijskog rješenja.....	18
Slika 3.2. Funkcionalna shema prve varijante konstrukcijskog rješenja.....	19
Slika 3.3. Skica druge varijante konstrukcijskog rješenja.....	20
Slika 3.4. Funkcionalna shema druge varijante konstrukcijskog rješenja.....	21
Slika 3.5. Izabrana varijanta egzoskeleta	22
Slika 3.6. Pneumatska shema sustava	23
Slika 3.7. 3D model izrađen u programu Catia	24

Slika 3.8. Prikaz pomicanja sustava prilikom skoka.....	24
Slika 4.1. Mjerenje akceleracije skoka 1. test	27
Slika 4.2. Mjerenje akceleracije skoka 2. test	27
Slika 4.3. Mjerenje akceleracije skoka 3. test	28
Slika 4.4. Mjerenje akceleracije skoka 3. test	29
Slika 4.5. Odnos pravca kretanja centra mase i pravca djelovanja sile cilindra	32
Slika 4.6. Minimalni hod pneumatskog cilindra	37
Slika 4.7. Ovisnost broja skokova o tlaku tlačnog spremnika za radni tlak od 6 bar-a	44
Slika 4.8. Ovisnost broja skokova o tlaku tlačnog spremnika za radni tlak od 8 bar-a	44
Slika 4.9. Ovisnost broja skokova o tlaku tlačnog spremnika za radni tlak od 10 bar-a	45
Slika 5.1 Upravljačka shema sustava	47
Slika 5.2 Model u programu SimulationX	48
Slika 5.3. Upravljački signal cilindra	50
Slika 5.4. Pad tlaka u tlačnom spremniku	52
Slika 5.5. Tlak zraka unutar cilindra	53
Slika 5.6. Pomak klipa cilindra	54
Slika 5.7. Brzina klipa unutar cilindra.....	54
Slika 5.8. Sile unutar cilindra	55
Slika 6.1. Pneumatski cilindar MAL 32	56
Slika 6.2. Tehnički nacrt pneumatskog cilindra	57
Slika 6.3. Tlačni spremnik.....	58
Slika 6.4. Tehnički nacrt tlačnog spremnika	59

Slika 6.5. Kapacitet pneumatskih cijevi [l/s] [13].....	62
Slika 6.6. Pneumatska cijev AirTAC POLYURETHANE TUBE 8x5,5mm JS05-H-V03	63
Slika 6.7. Regulator tlaka AZ MERG 2-08.....	63
Slika 6.8. Tehnički nacrt regulatora tlaka AZ MERG 2-08 [14].....	64
Slika 6.9. Karakteristike protoka zraka [14]	65
Slika 6.10. Varijacija izlaznog tlaka s fluktuirajućem ulaznim tlakom [14].....	66
Slika 6.11. Manometar D40-1/8 0+12bar.....	66
Slika 6.12. 3/2 Razvodni ventil „AZ 321 MT“ [15].....	67
Slika 6.13. Tehnički nacrt 3/2 razvodnog ventila „AZ 321 MT“ [15]	68
Slika 6.14. Zavisnost protoka o tlaku unutar razvodnog ventila [15]	69
Slika 6.15. PVC-U cijev za izradu bedrenog i lisnog prihvata	70
Slika 6.16. Grubo obrađena cijev (lijevo) i izolirana noga korisnika (desno)	71
Slika 6.17. Rezultat višestruke termičke i mehaničke obrade.....	72
Slika 6.18. Prihvat cilindra (lijevo) i prihvat klipnjače (desno).....	72
Slika 6.19. Povezivanje prihvata cilindra na bedreni prihvat.....	73
Slika 6.20. Montiranje remena za zatezanje.....	73
Slika 6.21. Postavljanje teflonske trake na navoj.....	74
Slika 6.22. Tlačni spremni sa svim montiranim komponentama	74
Slika 6.23. Konačni izgled egzoskeleta.....	75
Slika 6.24. Izgled egzoskeleta bez korisnika.....	75
Slika 6.25. Izgled egzoskeleta u skoku	76
Slika 6.26. Faze skoka bez upotrebe egzoskeleta.....	78

Slika 6.27. Faze skoka pri eksperimentalnom testiranju egzoskeleta	78
--	----

8.2. Popis tablica

Tablica 2.1. Kutovi udobnosti kretanja zglobova donjih ekstremiteta [2]	8
Tablica 4.1. Vrijednosti sustava u ovisnosti o radnome tlaku.....	39
Tablica 4.2. Broj ostvarivih skokova pri punoj snazi.....	45

9. LITERATURA

- [1] „Soft pneumatic elbow exoskeleton“, s Interneta, <https://www.nature.com/articles/s41598-021-91702-5#Sec12>, 6.7.2022.
- [2] „Design and control of hybrid actuation lower limb exoskeleton“, s Interneta, <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814015590988#>, 19.8.2022.
- [3] „Bionički egzoskelet – ExoHand“, s Interneta, <https://www.festo.com/group/en/cms/10233.htm>, 3.11.2020.
- [4] „Ankle Exoskeleton“, s Interneta, <https://www.proquest.com/openview/bf2cea5c9bb7231ea55e41871b24cf94/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>, 19.8.2022.
- [5] „Semi-Active Exoskeleton for Running“, s Interneta, <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimization-of-Semi-Active-Pneumatic-Actuators-for-Kim-Kwon/dc77b07db0d970d64dc499e3d6beff99a3e38548>, 9.9.2022.
- [6] „Pneumatski cilindar – FESTO DSNU/ENSU“, s Interneta, https://www.festo.com/cat/hr_hr/data/doc_engb/PDF/EN/DSNU_EN.PDF, 15.11.2020.
- [7] „L utični priključak - FESTO QSL-G1/8-8“, s Interneta, https://www.festo.com/cat/hr_hr/data/doc_engb/PDF/EN/QS_EN.PDF, 15.11.2020.
- [8] „Tlačni spremnik – FESTO CRVZS-2“ s Interneta, https://www.festo.com/cat/hr_hr/data/doc_engb/PDF/EN/AIR-RESERVOIRS_EN.PDF, 15.11.2020.
- [9] „Plastična savitljiva cijev – FESTO PAN-MF-8X1-SW“ s Interneta, https://www.festo.com/cat/hr_hr/data/doc_engb/PDF/EN/OD-TUBING_EN.PDF, 15.11.2020.
- [10] „Tlačni ventil – FESTO MS-LR“, s Interneta, https://www.festo.com/cat/hr_hr/data/doc_engb/PDF/EN/MS-REGULATORS_EN.PDF, 16.11.2020.
- [11] „Utični priključak – FESTO QS-G1/4-10“, s Interneta, https://www.festo.com/cat/hr_hr/products_QS, 16.11.2020.
- [12] „Višestruki razdjelnik – FESTO QST3-10-8“ s interneta, https://www.festo.com/cat/hr_hr/products_QS_V, 16.11.2020.

- [13] „Compressed Air Pipe Line Capacity - Engineering ToolBox“ s Interneta,
https://www.engineeringtoolbox.com/air-flow-compressed-air-pipe-line-d_1280.html, 15.5.2022.
- [14] „Reduktor tlaka – AZ pneumatica“, s Interneta,
<http://www.azpneumatica.srl/azweb/ingl/mreg208.htm>, 9.6.2022.
- [15] „Razvodni ventil – AZ pneumatica“, s Interneta,
<http://azpneumatica.com/it/304a80e5b21acb719622062870302e11/grupa-proizvoda/240/valvole-g1-8-22-mm-ad-azionamento-manuale/3716/az-pneumatica-3-2-1-8-tiretto--ritorno-a-molla.html>, 9.6.2022.
- [16] B. Kraut: Stojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
- [17] „Egzoskelet – definicija“, s Interneta,
<http://www.bioteka.hr/modules/lexikon/entry.php?entryID=403>, 15.9.2022.

10. POPIS OZNAKA

m – masa korisnika egzoskeleta zajedno s opremom [kg]

v_k – brzina koja se ostvaruje u trenutku odvajanja od podloge bez uporabe egzoskeleta [m/s]

v – brzina koja se ostvaruje u trenutku odvajanja od podloge uporabom egzoskeleta [m/s]

g – ubrzanje sile teže ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)

a_k – ubrzanje prilikom skoka bez egzoskeleta [m/s^2]

a – ubrzanje prilikom skoka s egzoskeletom [m/s^2]

h_k – visina skoka bez uporabe egzoskeleta [m]

h – visina skoka uporabom egzoskeleta [m]

E_k – kinetička energija [J]

E_p – potencijalna energija [J]

F_k – sila korisnika potrebna za skok bez uporabe egzoskeletom [N]

F' – pretpostavljena sila za 100% povećanje visine skoka [N]

F – stvarna sila za 100% povećanje visine skoka [N]

F_c' – pretpostavljena sila jednog cilindra za 100% povećanje visine skoka [N]

F_c – stvarna sila jednog cilindra za 100% povećanje visine skoka [N]

p – radni tlak pneumatskog cilindra [Pa]

A – površina klipa cilindra [m^2]

A_k – površina klipa cilindra sa strane klipnjače [m^2]

d' – izračunati promjer klipa cilindra [m]

d – odabrani promjer klipa cilindra [m]

d_k – promjer klipnjače [m]

t_k – vrijeme ubrzanja do postizanja brzine skoka bez uporabe egzoskeleta [s]

t – vrijeme ubrzanja do postizanja brzine skoka pri uporabi egzoskeleta [s]

f – frekvencija mjerenja rezultata pri skoku [Hz]

n – broj mjerenja pri skoku

s – hod pneumatskog cilindra [m]

x_k – put korisnika do odvajanja od podloge pri skoku bez egzoskeleta [m]

x – put korisnika do odvajanja od podloge pri skoku s egzoskeletom [m]

v_0 – početna brzina pri skoku [m/s]

F_6, F_8, F_{10} – sila koju ostvaruje cilindar pri radnom tlaku 6, 8, 10 bar-a [N]

p_{s0} – početni tlak unutar spremnika [bar]

p_{s1} – tlak unutar spremnika nakon ostvarenog jednog skoka [bar]

V_s – volumen spremnika [m³]

V_c – volumen pneumatskog cilindra [m³]

κ – koeficijent ekspanzije

\dot{V}_1 – volumni protok zraka za jedan pneumatski cilindar [m³/s]

\dot{V} – volumni protok zraka za oba pneumatska cilindra [m³/s]

11. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI NA HRVATSKOM I ENGLLESKOM JEZIKU

Sažetak

U ovome diplomskom radu napravljen je proračun i izrada egzoskelata koji omogućava nekoliko viših skokova korisnika egzoskeleta. U prvome dijelu rada analizirano je nekoliko sličnih pneumatskih sustava kako bi se čitatelja lakše uvelo u temu ovoga rada. U drugome dijelu slijedi prijedlog nekoliko varijanti egzoskeleta koje bi odgovarale zadanim kriterijima. Između predloženih varijanti izabrana se je najbolja koja se potom nastavlja detaljnije obrađivati u ovome radu. Izrađen je proračun egzoskeleta. Potom je izrađen i simulacijski model koji je dokazao da je moguće ostvariti pojačani skok, ali pri idealnom međudjelovanju korisnika i egzoskeleta. U konačnici se nakon uspješno provedenih simulacija izrađuje i fizički model čiji je tok izrade također dokumentiran u ovome radu. Rezultati eksperimentalnog ispitivanja su pokazali de se prilikom zajedničkog međudjelovanja korisnika i egzoskeleta, ostvaruju veliki gubici snage, ali svejedno da je moguće ostvariti pojačani skok.

Summary

In this thesis, the calculation and creation of an exoskeleton was made, which enables the user of the exoskeleton to make several higher jumps. In the first part of the paper, several similar pneumatic systems were analyzed in order to introduce the reader to the topic of this paper. In the second part, there is a proposal of several variants of the exoskeleton that would correspond to the given criteria. Among the proposed variants, the best one was chosen, which is then continued to be elaborated in detail in this paper. The calculation of the exoskeleton was made. Then a simulation model was created which proved that it is possible to achieve an enhanced jump, but with the ideal interaction between the user and the exoskeleton. Finally, after the successful simulations, a physical model is created, the process of which is also documented in this paper. The results of the experimental test showed that during the joint interaction of the user and the exoskeleton, large losses of power are realized, but it is still possible to achieve an enhanced jump.

Ključne riječi

Pneumatika, egzoskelet, 3D model, simulacija.

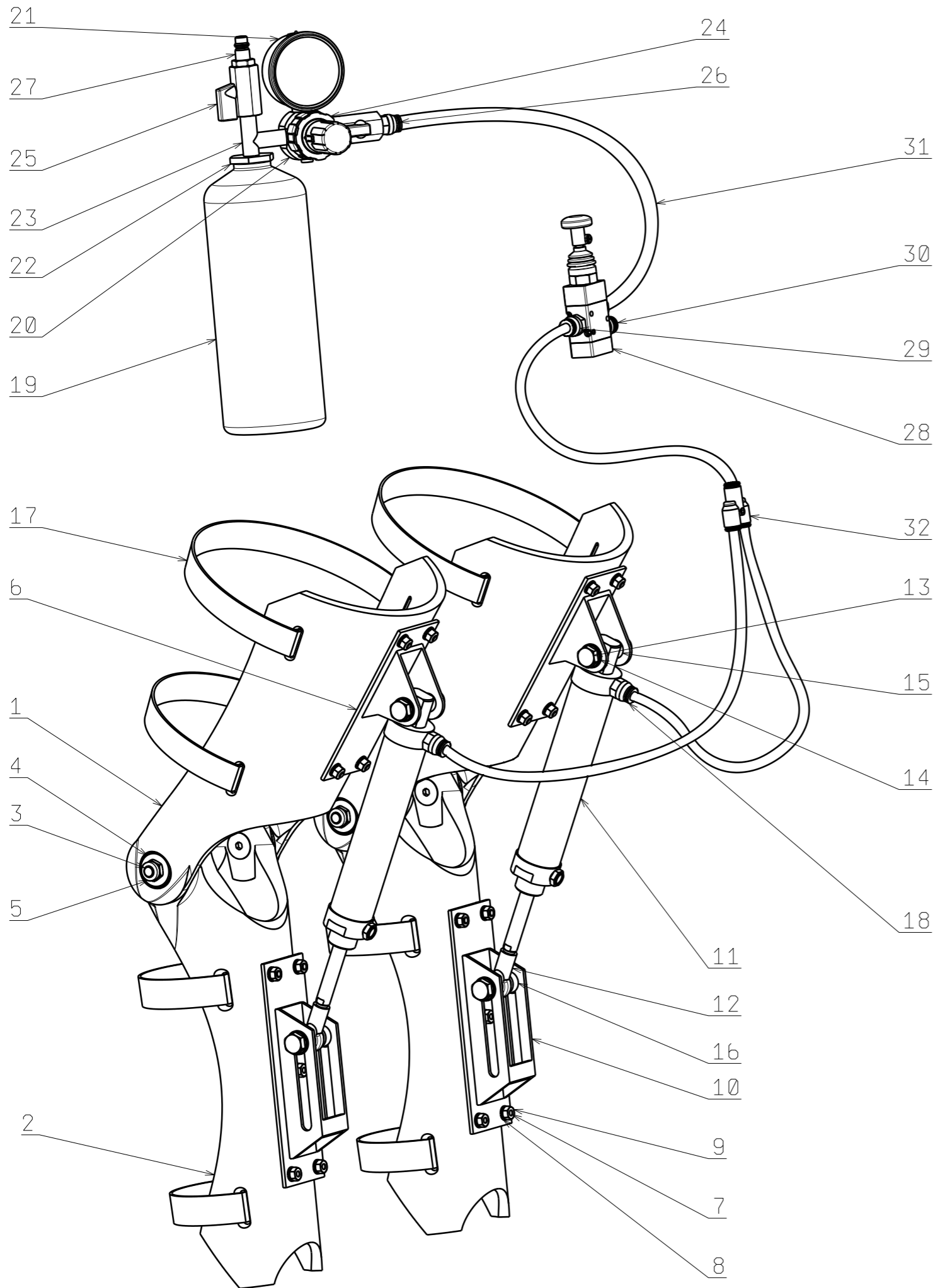
Keywords

Pneumatics, exoskeleton, 3D model, simulation.

12. PRIVITAK

U nastavku je priložena tehnička dokumentacija izrađenog 3D računalnog modela egzoskeleta. Tehnička dokumentacija je sljedeća:

1. Sklopni nacrt egzoskeleta
2. Raščlanjeni prikaz egzoskeleta
3. Prikaz tri faze skoka
4. Radionički nacrt bedrenog prihvata
5. Radionički nacrt lisnog prihvata
6. Radionički nacrt prihvata cilindra
7. Radionički nacrt prihvata klipnjače
8. Radionički nacrt odstojnika cilindra
9. Radionički nacrt odstojnika sikca
10. Tehnički nacrt pneumatskog cilindra
11. Radionički nacrt tlačnog spremnika

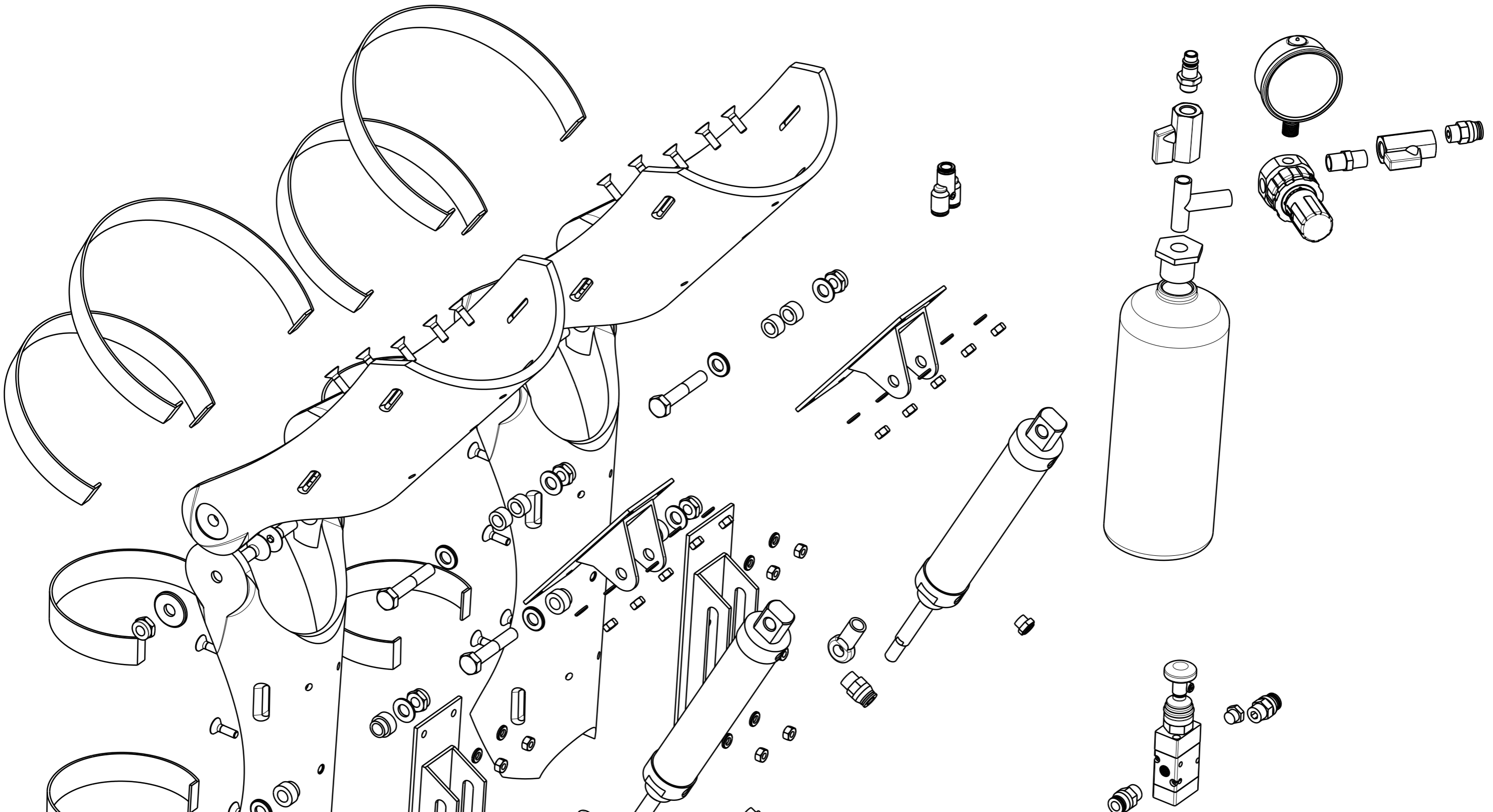


32	1	Y brza spojnica MB 29 08 08	-	Kombinacija
31	5	Pneumatska cijev 8x5,5 JS05-H-V03	-	Poliuretan
30	1	Prigušivač zraka MV 11 00 18-FE	-	Poniklani mesing
29	2	Brza spojnica MA 12 08 18	-	Kombinacija
28	1	3/2 Razvodni ventil AZ 321 MT	-	Kombinacija
27	1	Brza spojnica M1/4'	-	Čelik
26	1	Brza spojnica MA 12 08 14	-	Kombinacija
25	2	Kuglasti ventil L"1/4'	-	Čelik, poluetilen
24	1	Niple M1/4'-M1/4'	-	Čelik
23	1	T-spojnic M1/4'	-	Čelik
22	1	Reduktor M3/4'-L"1/4'	-	Čelik
21	1	Manometar D40-1/8' 0+12bar	-	Kombinacija
20	1	Reduktor tlaka MREG 2-08	-	Kombinacija
19	1	Tlačni spremnik	-	Čelik
18	2	L brza spojnica MA 16 08 18	-	Kombinacija
17	8	Remen za zatezanje	-	Poliester
16	4	Odstojnik skca	-	PVC-U
15	4	Odstojnik cilindra	-	PVC-U
14	8	Podloška osovnicke cilindra 10x20	ISO 7089	Čelik
13	4	Vijak / osovnicke cilindra M10x55	ISO 4014	Čelik
12	2	Ležaj sikac 10	ISO 8139	Čelik
11	2	Pneumatski cilindar MAL 32x125-CA	-	Kombinacija
10	2	Prihvat klipnjače	-	Čelik S235JR
9	20	Matica prihvata cilindra M6	ISO 4032	Čelik
8	20	Podloška prihvata cilindra 6x12	ISO 7089	Čelik
7	20	Vijak prihvata cilindra M6x20	ISO 10642	Čelik
6	2	Prihvat cilindra	-	Čelik S235JR
5	8	Sigurnosna matica M10	ISO 10511	Čelik
4	4	Podloška koljena 10x30	ISO 7093-1	Čelik
3	4	Vijak koljena M10x30	ISO 10642	Čelik
2	1	Lisni prihvat	-	PVC-U
1	2	Bedreni prihvat	-	PVC-U
Poz.	Kol.	Naziv	Norma	Materijal

NACRTAČ: Matej Mališa						I	-
DATUM: 9.9.2022.						H	-
PROVIJERIO:						G	-
DATUM:						F	-
FORMAT: A3			EGZOSKELET			E	-
MATERIJAL:						D	-
MASA (kg): 6,75		NAZIV CRTEŽA: Sklopni nacrt egzoskeleta				C	-
1:5		PAPIR: 1/11				B	-
						A	-

H G F E D C B A

4
3
2
1



NACRTAČ: Matej Mališa				I	-
DATUM: 19. 9. 2022.				H	-
PROVJERIO:				G	-
DATUM:				F	-
FORMAT: A3		EGZOSKELET		E	-
SCALE 1:3	MASA (kg): 6,76			D	-
NAZIV CRTEŽA: Rasčlanjeni prikaz egzoskeleta		PAPIR: 2/11		C	-
				B	-
				A	-

H G B A

H G F E D C B A

4

3

2

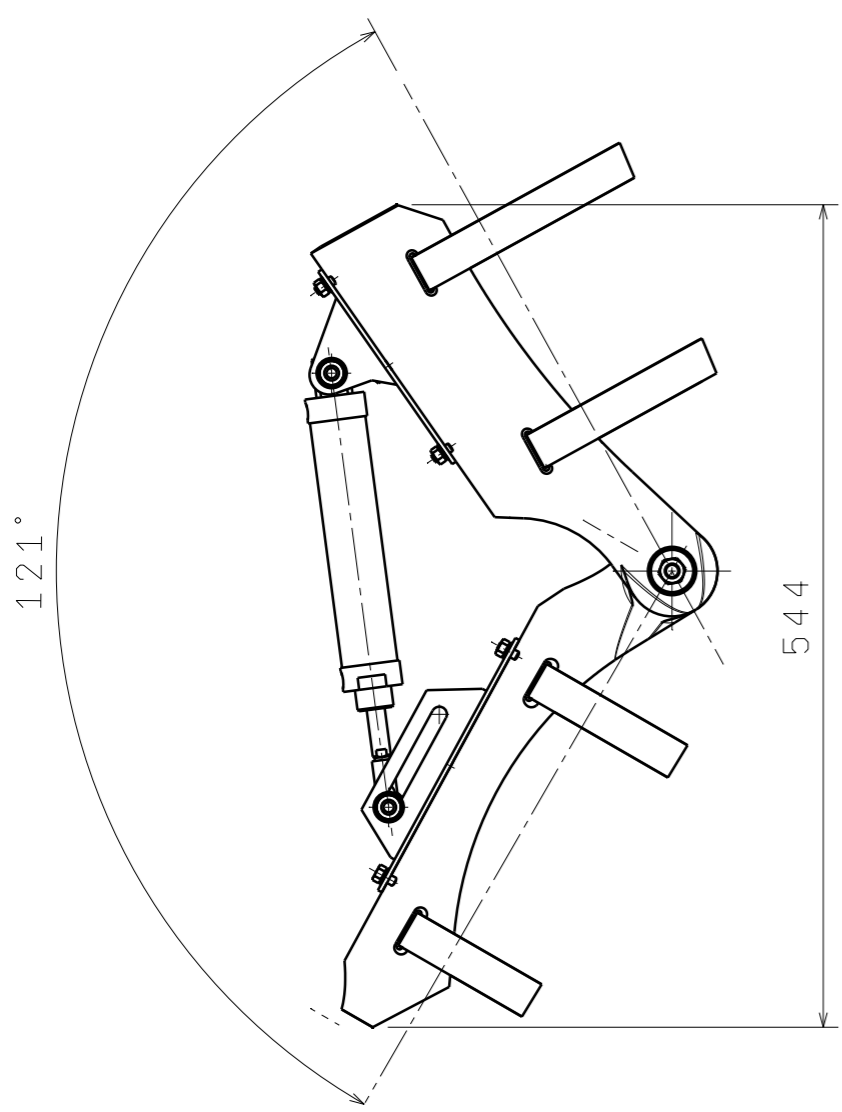
1

4

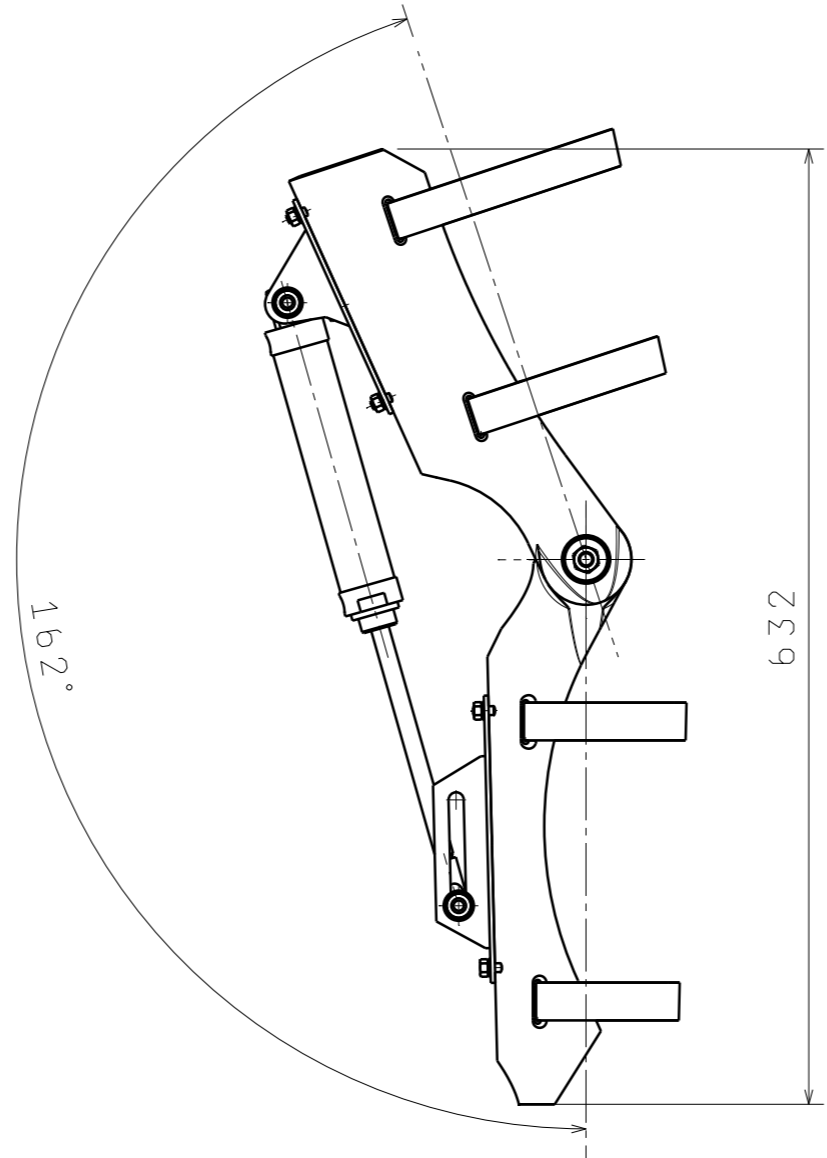
3

2

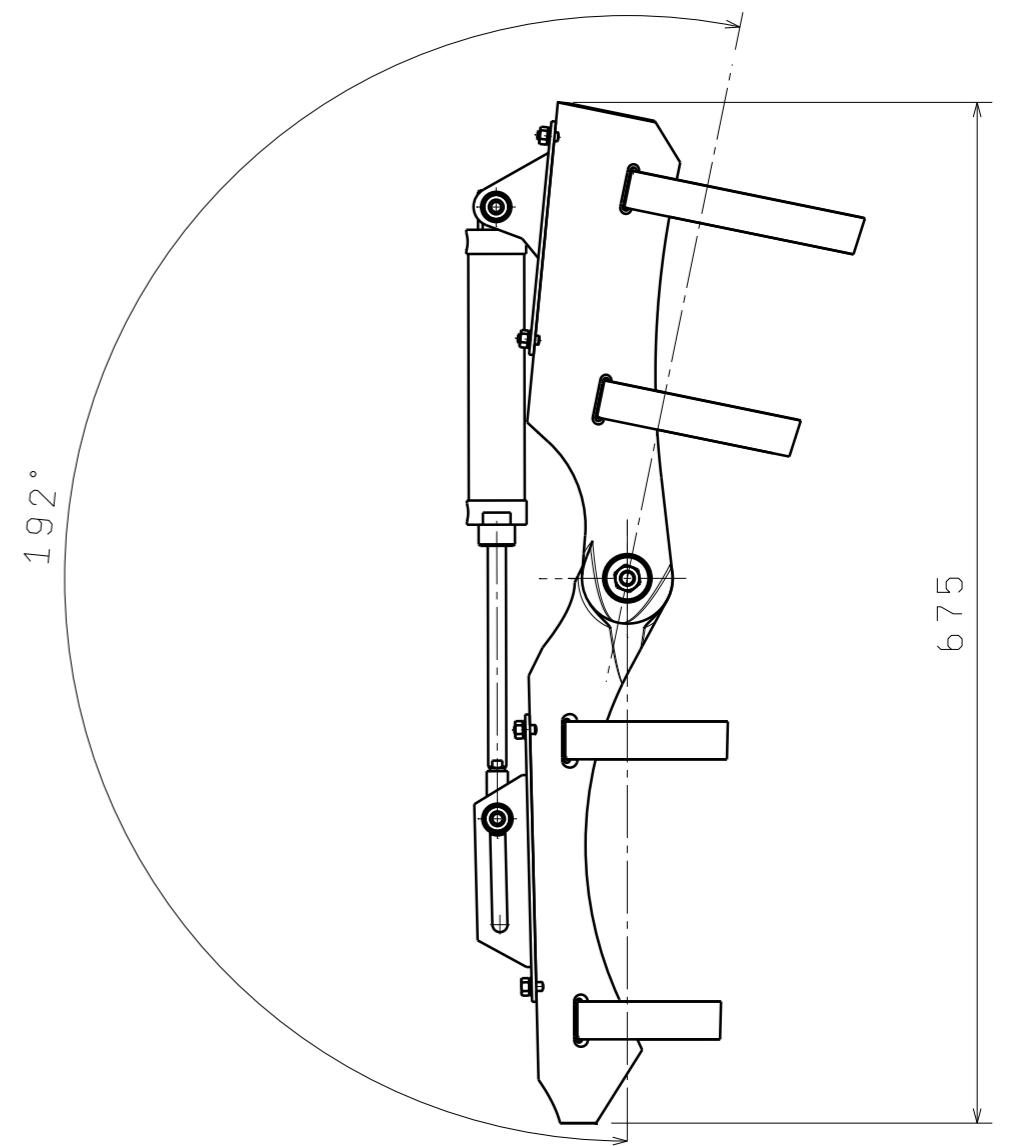
1



Početak djelovanja pneumatskog cilindra



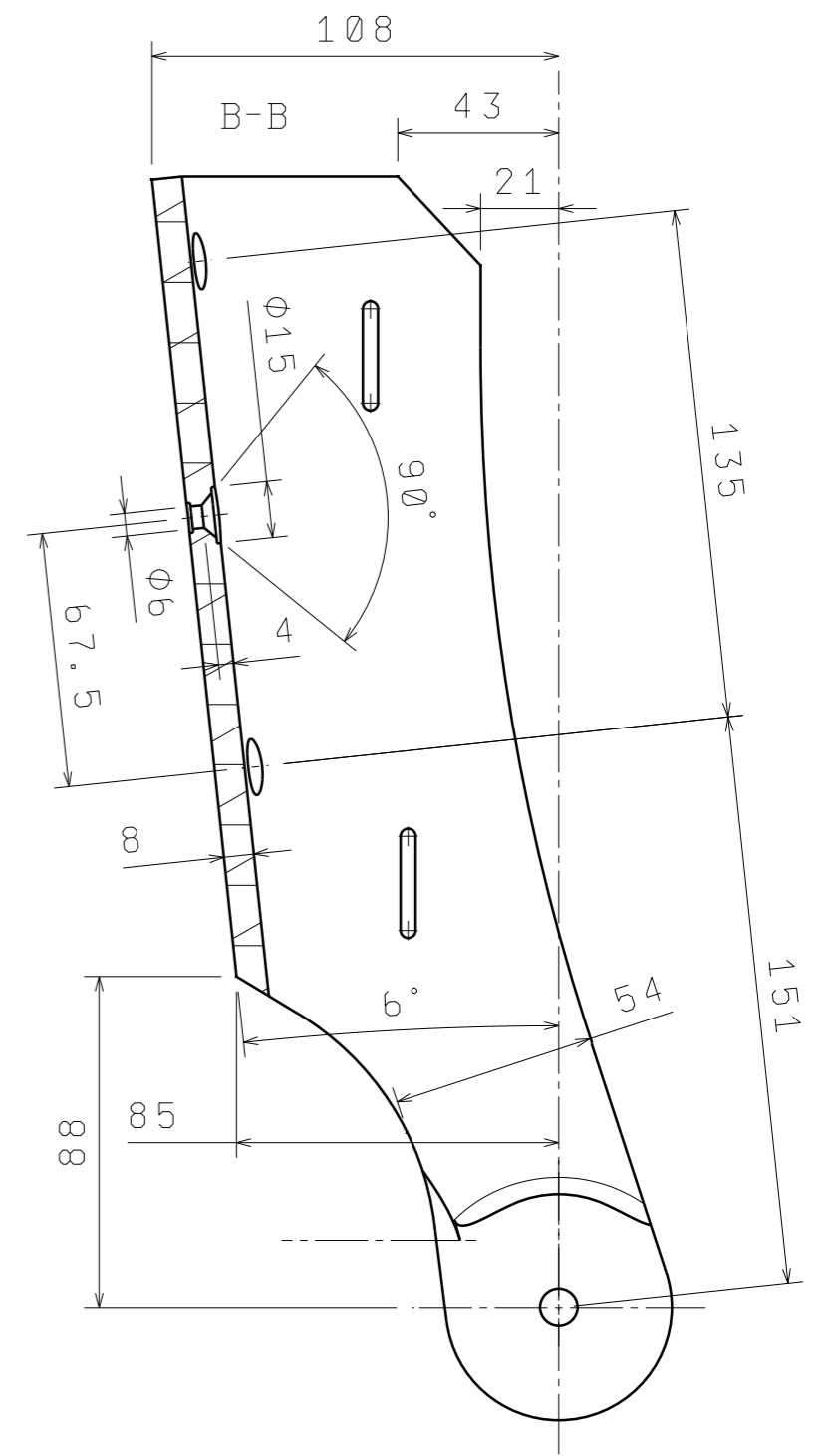
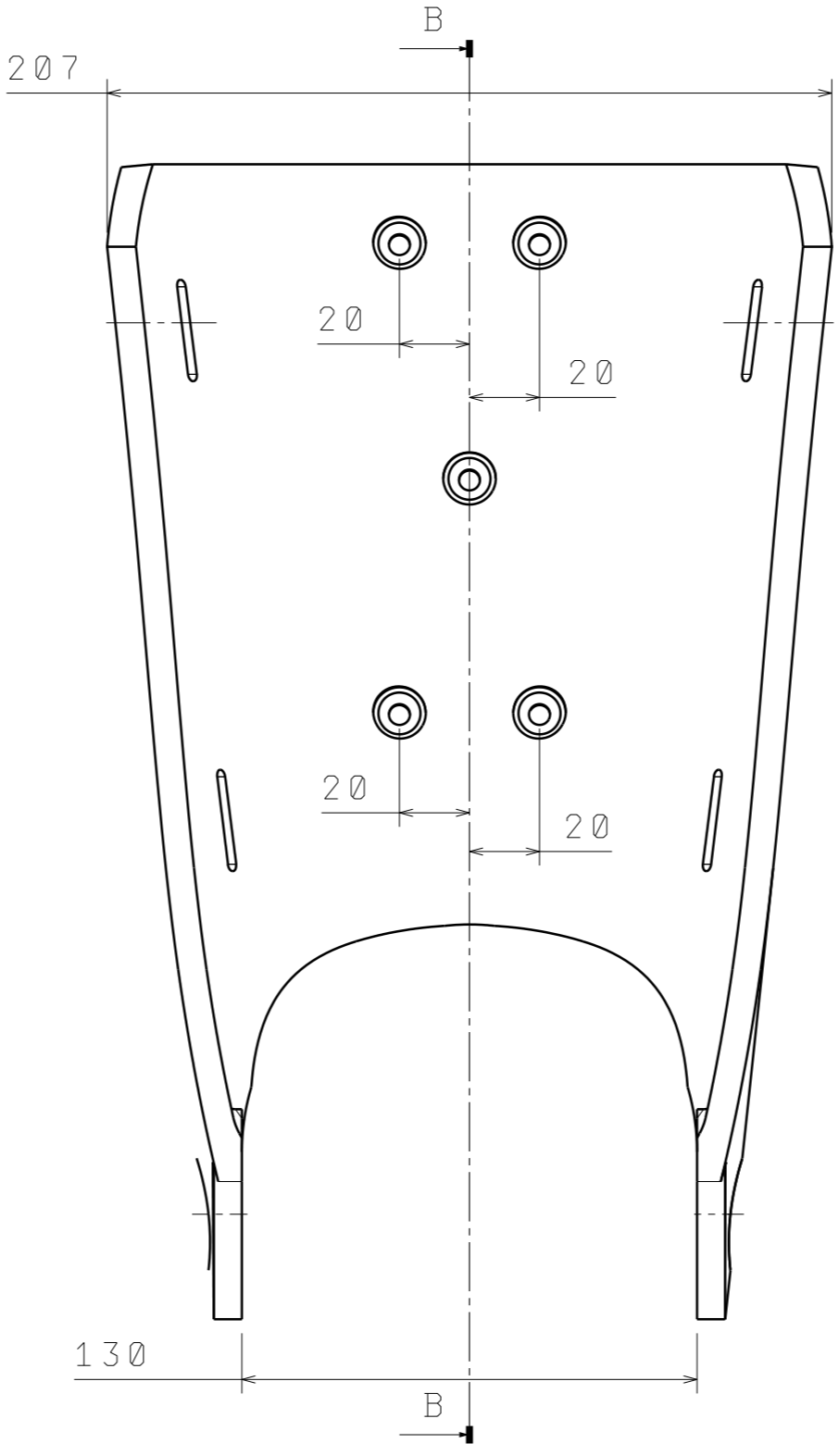
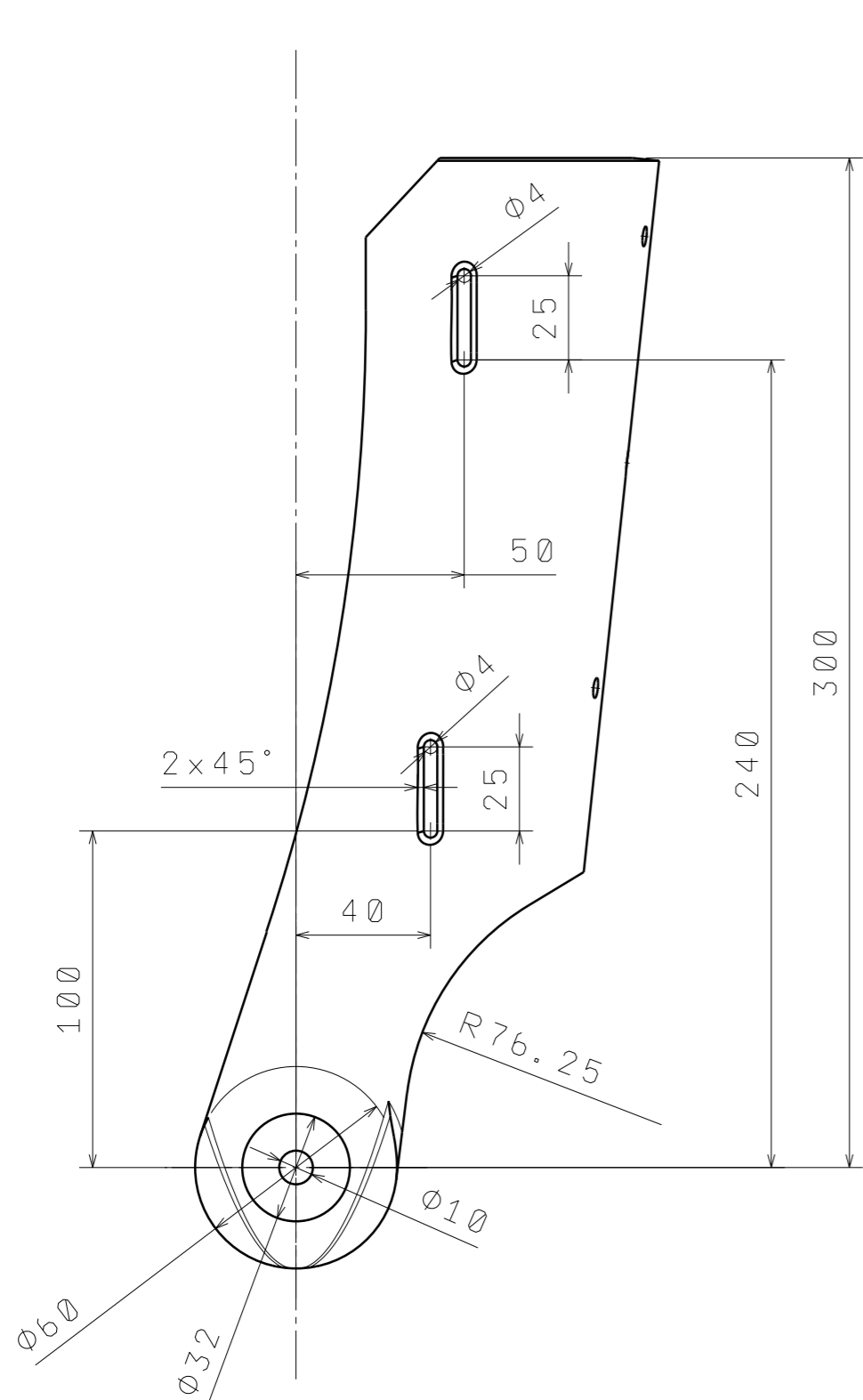
Kraj djelovanja pneumatskog cilindra



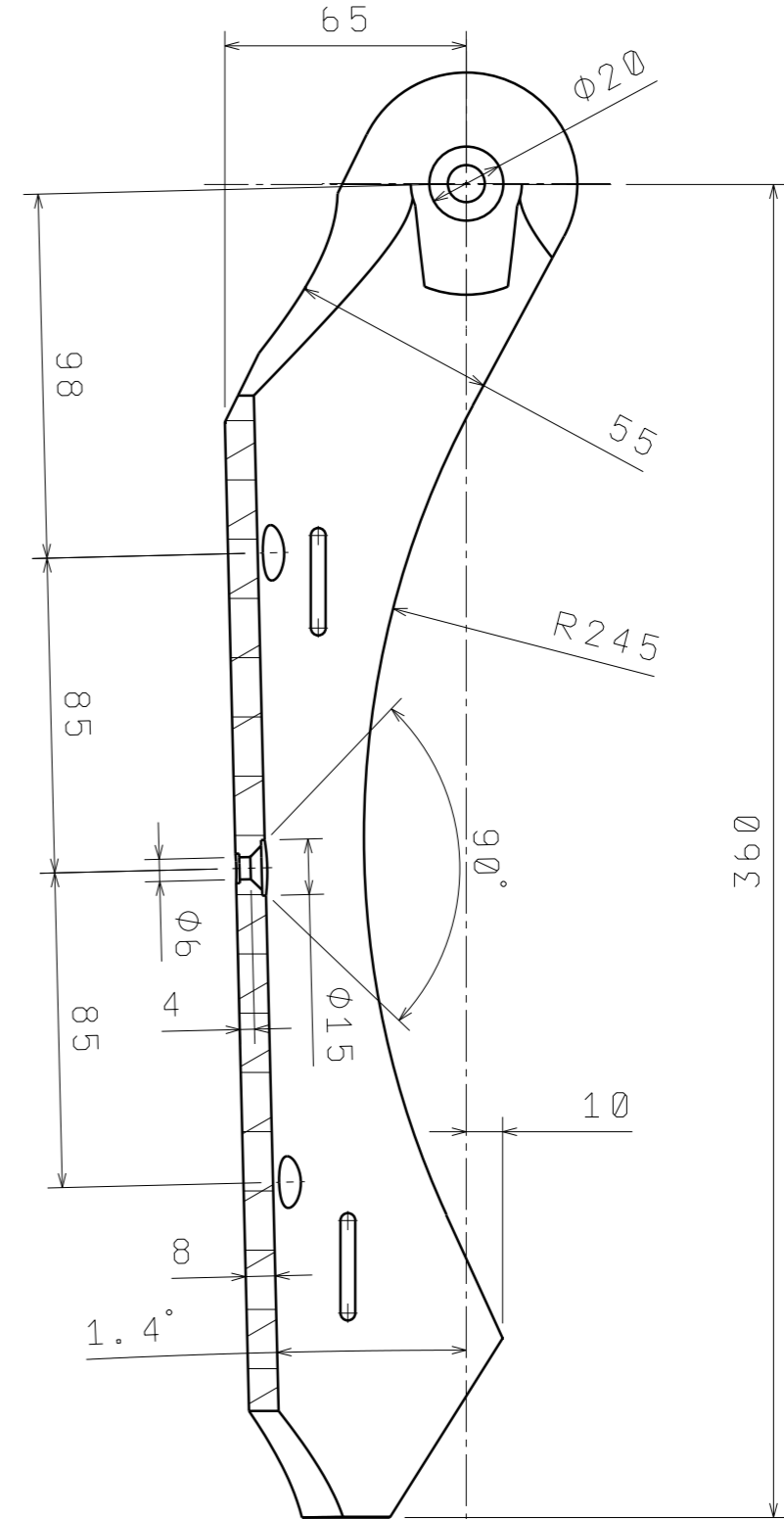
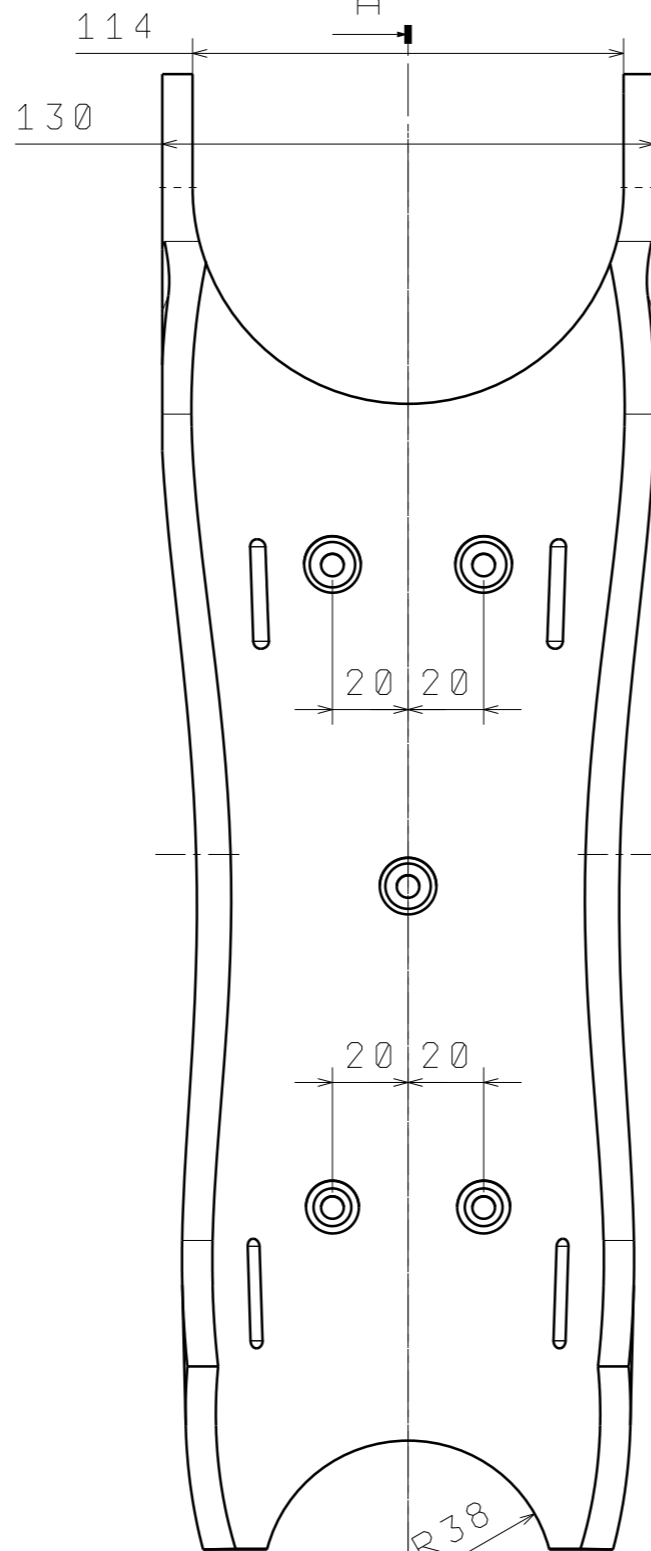
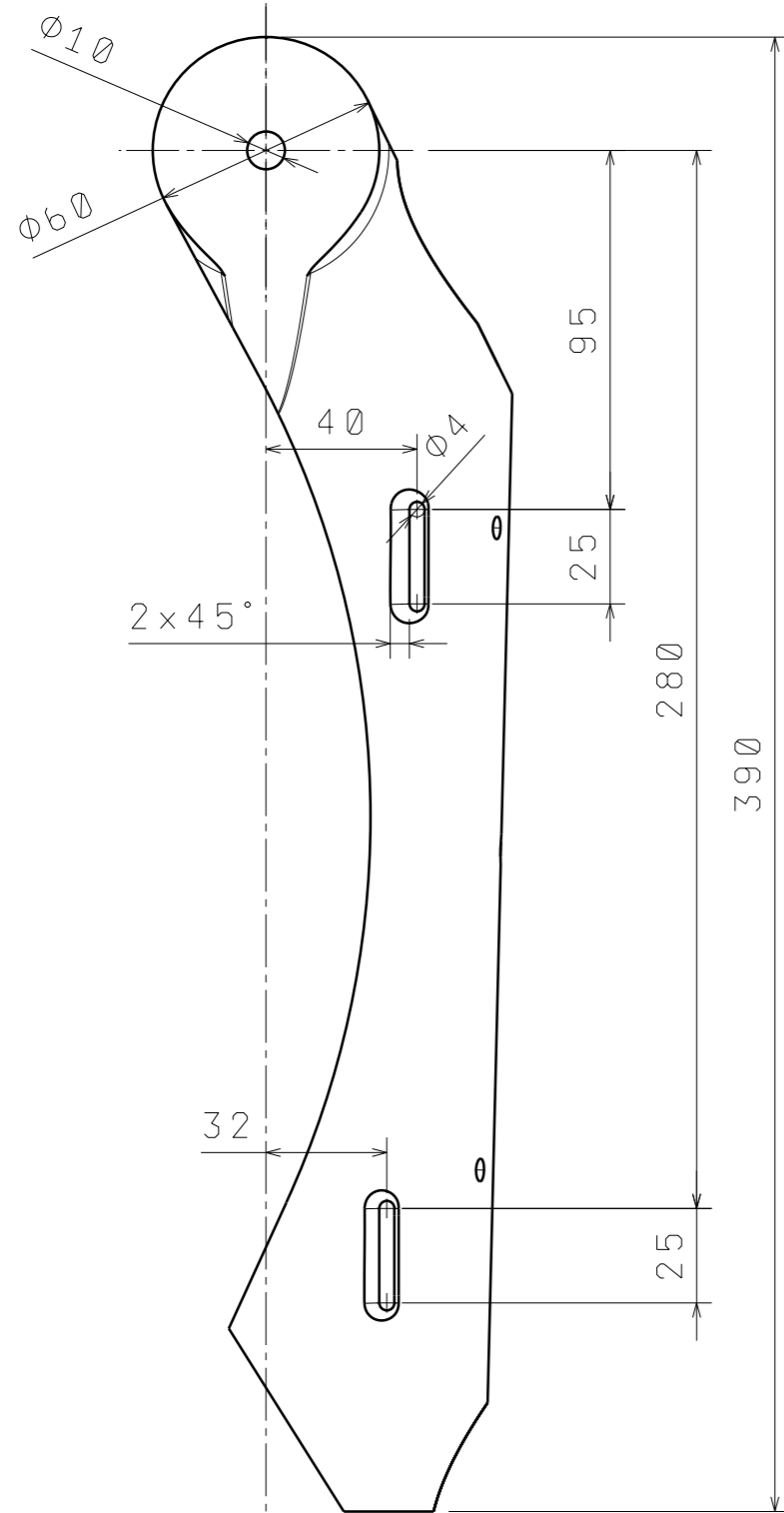
Slobodni hod po klizaču

NACRTAO: Matej Mališa		EGZOSKELET	I	-
DATUM: 8.9.2022.			H	-
PROVJERIO:		EGZOSKELET	G	-
DATUM:			F	-
FORMAT: A3		EGZOSKELET	E	-
PROJICIRAO:	MASA (kg): 2,87		D	-
NAZIV CRTEŽA: Tri faze skoka ekzoskeleta		PAPIR: 3/11	C	-
			B	-
			A	-

H G B A



NACRTAČ: Matej Mališa			I	-	
DATUM: 4.9.2022.			H	-	
PROVJERIO:			G	-	
DATUM:			F	-	
FORMAT: A3		EGZOSKELET		E	-
PROJECIJA:	PASA (kg): 0,67	NAZIV CRTEŽA: Radionički nacrt bedrenog prihvata		D	-
1:2		PAPIR: 4/11		C	-
				B	-
				A	-



NACRTAČ: Matej Mališa				I	-
DATUM: 5. 9. 2022.				H	-
PROVIJERIO:				G	-
DATUM:				F	-
FORMAT: A3		EGZOSKELET		E	-
MŠERILU: 1: 2		NAZIV CRTEŽA: Radionički nacrt lisnog prihвата		D	-
MASA (kg): XXX		PAPIR: 5/11		C	-
				B	-
				A	-

4
3
2
1

4
3
2
1

H G F E D C B A

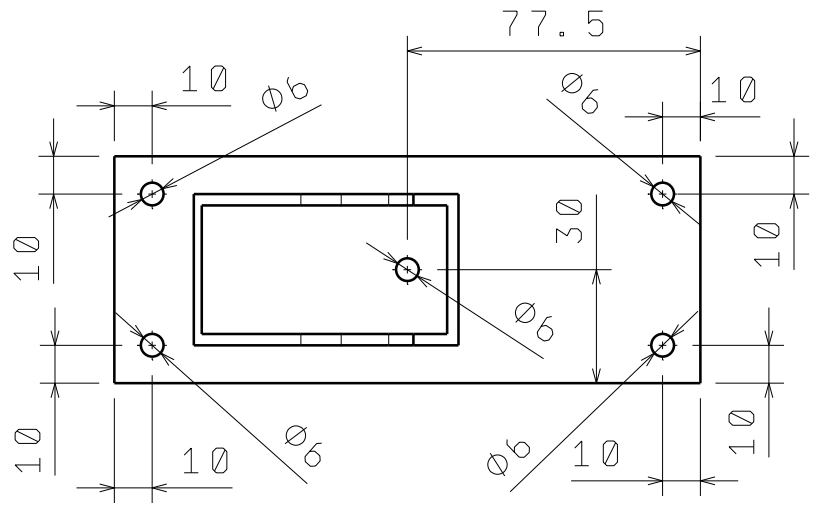
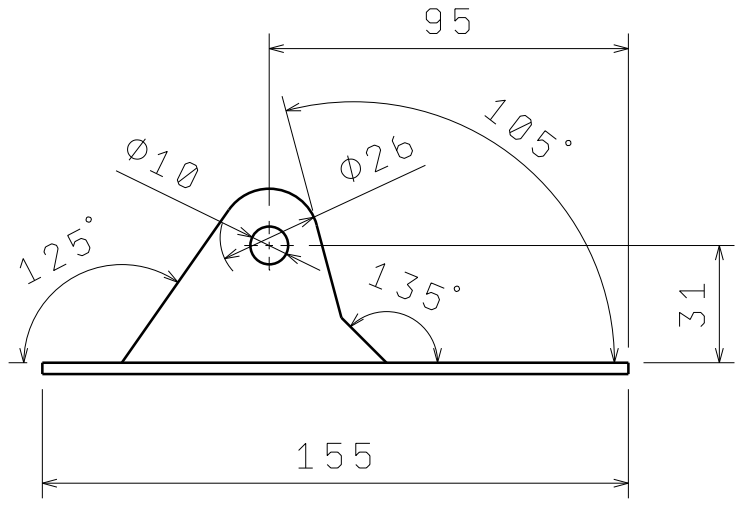
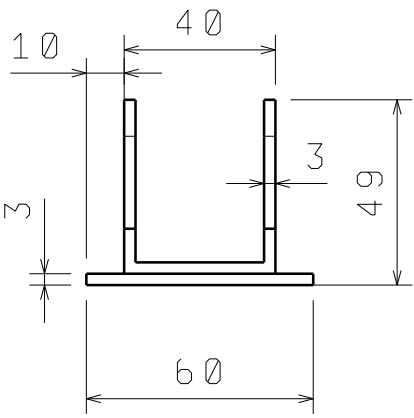
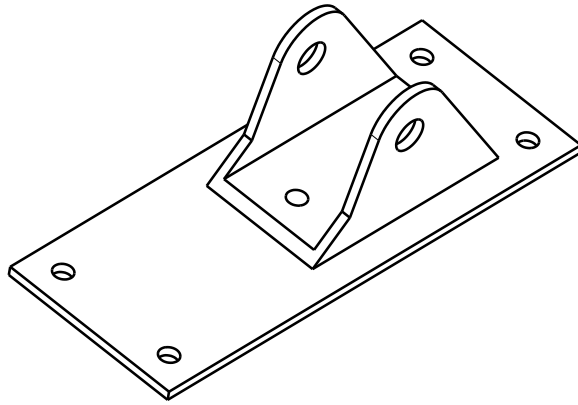
D

C

B

A

Izometrijski pogled

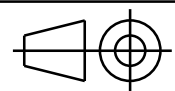


NACRTAO:
Matej Mališa
DATUM:
5. 9. 2022.

PROVJERIO:
DATUM:

FORMAT:
A4

MSERILO:
1: 2



MASA (kg):
0, 35

EGZOSKELET
Radionički nacrt
prihvata cilindra

PAPIR:
6/11

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

4

4

3

3

2

2

1

1

D

A

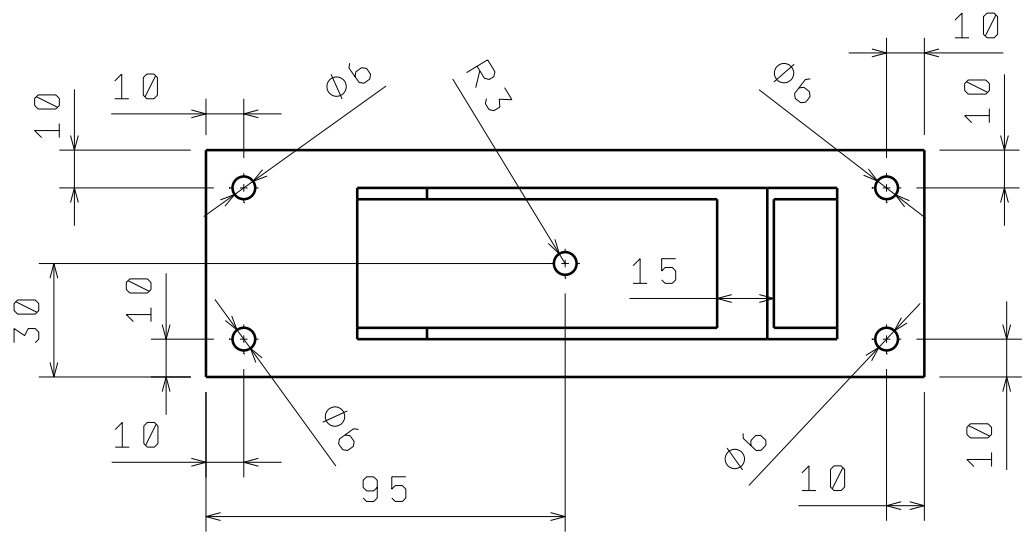
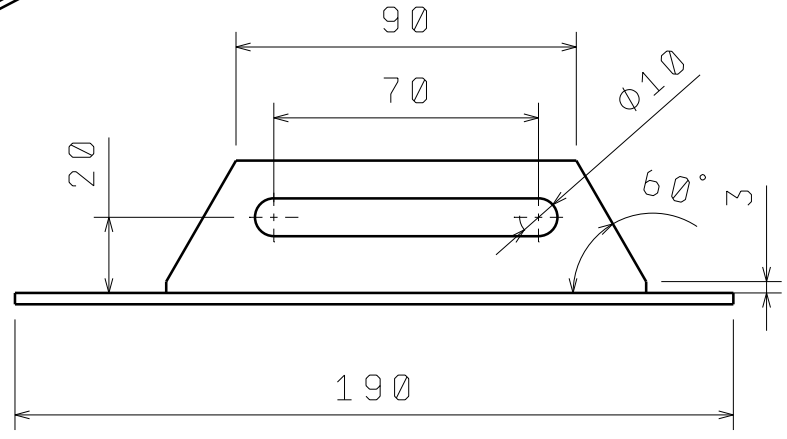
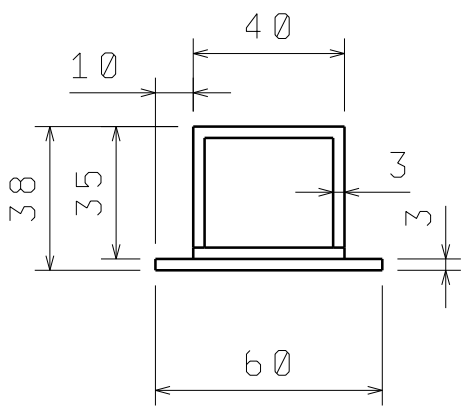
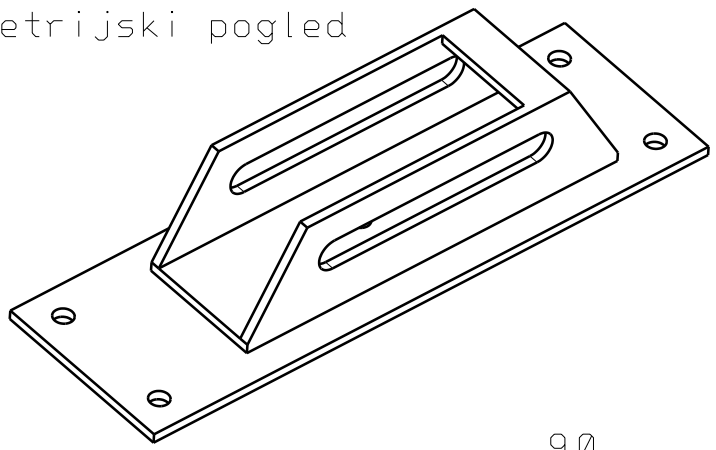
D

C

B

A

Izometrijski pogled

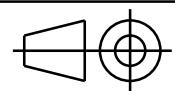


NACRTAO:
Matej Mališa
DATUM:
4.9.2022.

PROVJERIO:
DATUM:

FORMAT:
A4

MERILO:
1:2



EGZOSKELET
Radionički nacrt
prihvata klipnjače

PAPIR:
7/11

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

4

4

3

3

2

2

1

1

D

A

D

C

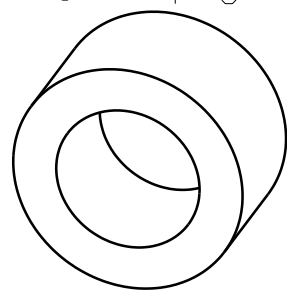
B

A

4

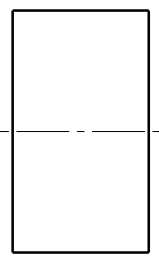
4

Izometrijski pogled

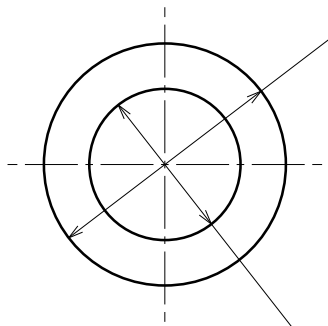


3

3



9



Ø16

Ø10

2

2

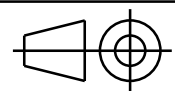
1

1

NACRTAO:
Matej Mališa
DATUM:
5. 9. 2022.

PROVJERIO:
DATUM:

FORMAT:
A4



EGZOSKELET

MERILO:
2: 1

MASA (kg):
0, 00

NAZIV CRTEŽA:
Radionički nacrt
odstojnika cilindra

PAPIR:
8/11

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D

A

D

C

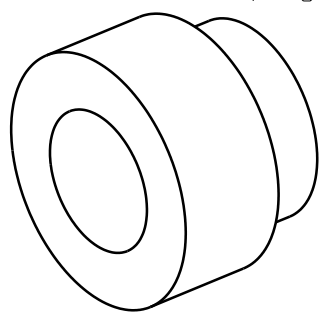
B

A

4

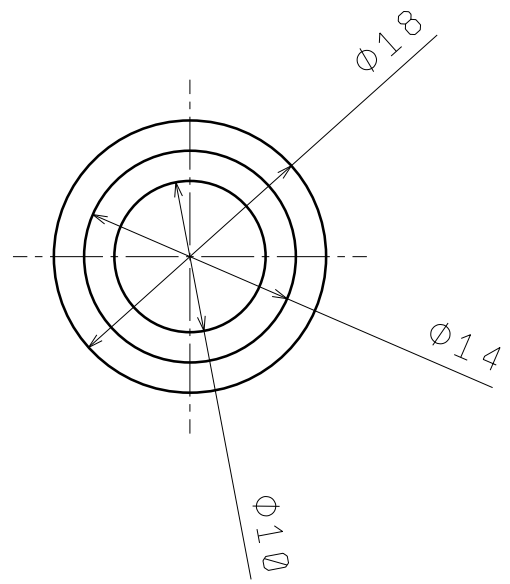
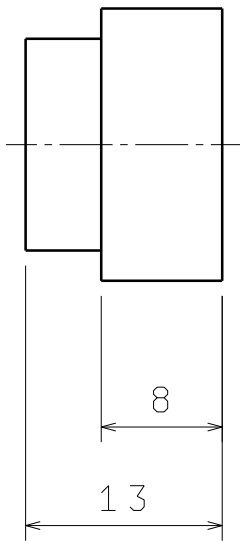
4

Izometrijski pogled



3

3



2

2

1

1

NACRTAO:
Matej Mališa
DATUM:
5. 9. 2022.

PROVJERIO:
DATUM:

FORMAT:
A4

MERILO:
2: 1

EGZOSKELET

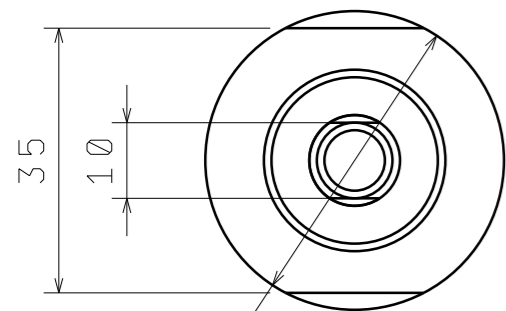
NAZIV CRTEZA:
Radionički nacrt
odstojnika sikca

PAPIR:
9/11

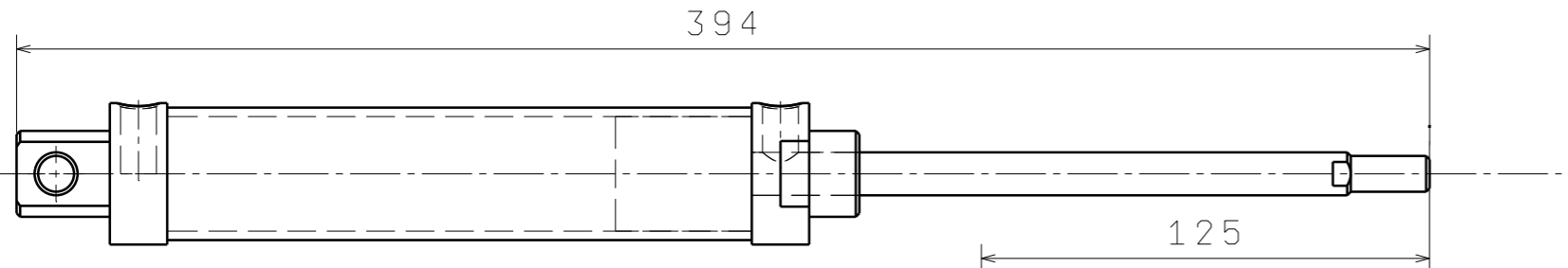
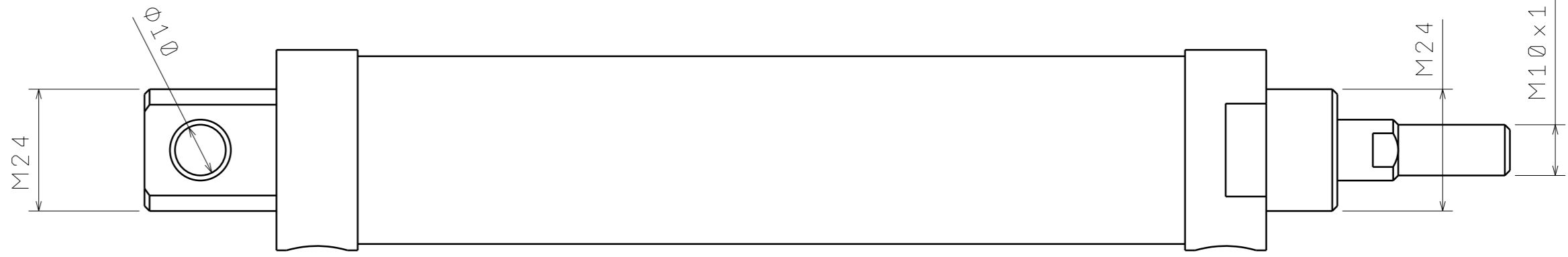
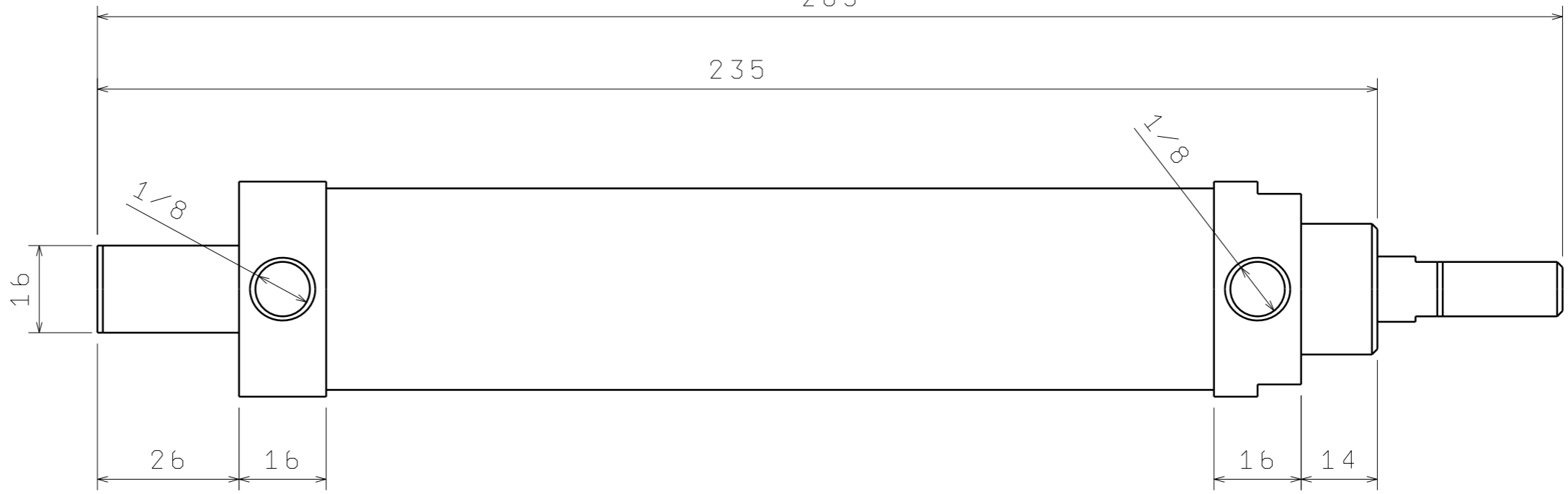
I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

D

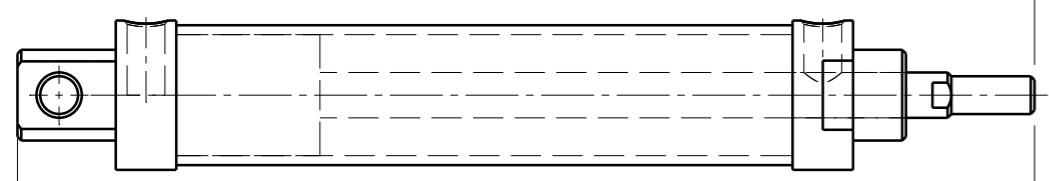
A



$\varnothing 39.5$



Prikaz ispruženog cilindra
M 1:2



Prikaz skupljenog cilindra
M 1:2

269

NACRTAČ: Matej Mališa		EGZOSKELET	I	-
DATUM: 5.9.2022.			H	-
PROVJERIO:		Tehnički nacrt pneumatskog cilindra	G	-
DATUM:			F	-
FORMAT: A3		10/11	E	-
PROJECIJA:			D	-
PROJECIJA:	MASA (kg): 0,65	PAPIR:	C	-
PROJECIJA:	NAZIV CRTEŽA:		B	-
1:1			A	-

4

3

2

1

4

3

2

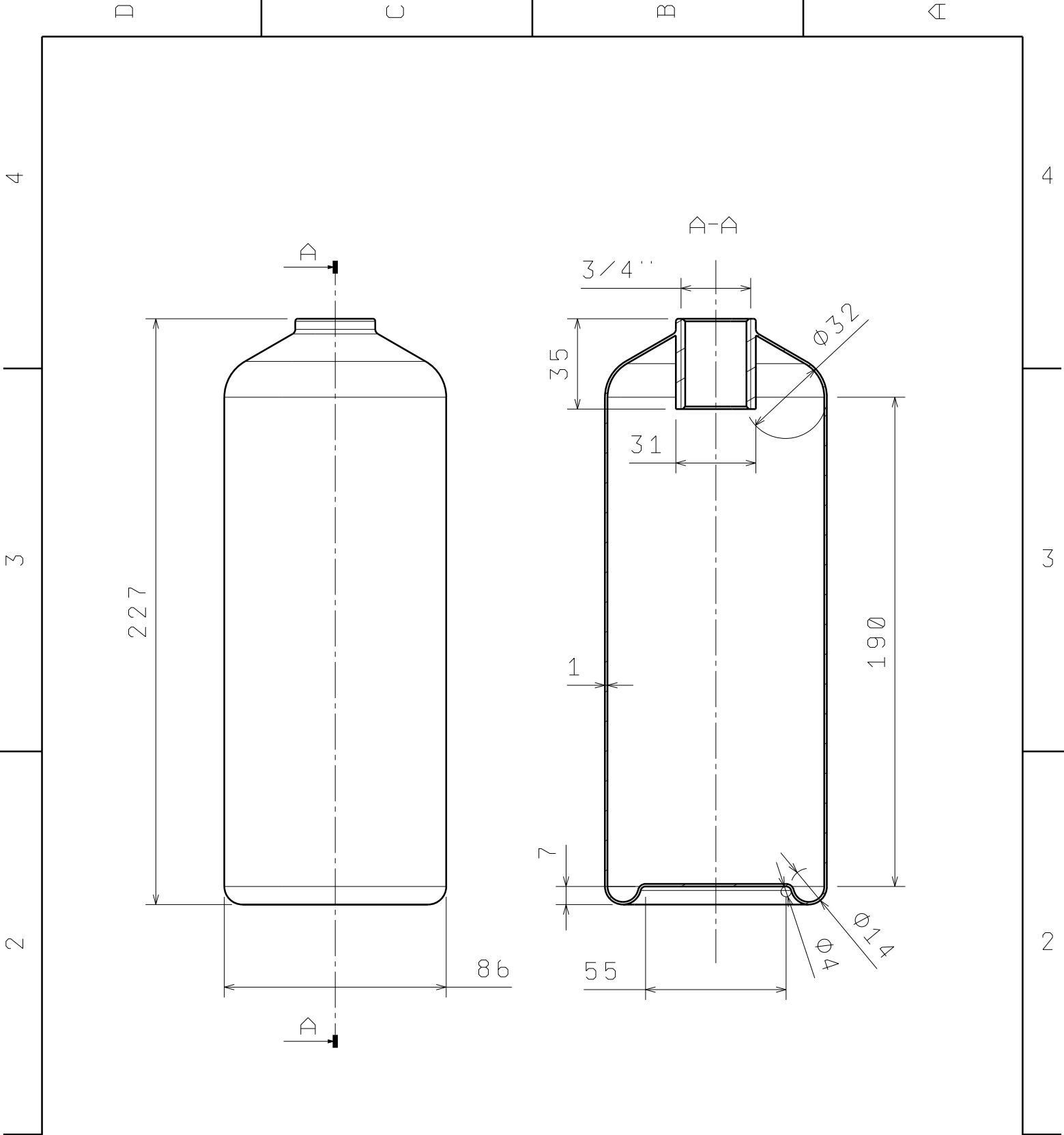
1

H

G

B

A



NACRTAO: Matej Mališa		I - H - G - F - E - D - C - B - A -
DATUM: 25. 2. 2022.		
PROVJERIO:		
PROJEKTOVALAŠ:		
FORMAT: A4		EGZOSKELET
Mjerilo: 1: 2	MASA (kg): 0, 60	NAZIV CRTEŽA: Radionički nacrt tlačnog spremnika
		PAPIR: 11/11

1

1

4

4

3

3

2

2

D

A