

# KONSTRUKCIJA PNEUMATSKOG AKTUATORA POMOĆU TERMO-DEFORMABILNIH POLIMERA

---

**Pongrac, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*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:190:388116>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-19**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**KONSTRUKCIJA PNEUMATSKOG AKTUATORA POMOĆU  
TERMO-DEFORMABILNIH POLIMERA**

Rijeka, rujan 2023.

Matija Pongrac

00690758708

SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**  
Sveučilišni diplomski studij strojarstva

Diplomski rad

**KONSTRUKCIJA PNEUMATSKOG AKTUATORA POMOĆU  
TERMO-DEFORMABILNIH POLIMERA**

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

Rijeka, rujan 2023.

Matija Pongrac

00690758708

## **ORIGINAL ZADATKA**

## **IZJAVA**

Sukladno Članku 11. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta u Rijeci, izjavljujem da sam samostalno izradio ovaj diplomski rad pod naslovom „Konstruiranje pneumatskog aktuatora pomoću tremo-deformabilnih polimera“ primjenom znanja stečenog tijekom studija uz korištenje navedene literature. Rad sam izradio prema zadatku Povjerenstva za završne ispite diplomskih sveučilišnih studija, iz predmeta Modeliranje hidrauličkih i pneumatskih sustava, pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Gorana Gregova.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem svojem mentoru izv. prof. dr. sc. Goranu Gregovu na pruženom znanju, iskazanom strpljenju, te savjetima tijekom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, kolegama i prijateljima na podršci tijekom studiranja i izrade ovog diplomskog rada.

Matija Pongrac

# SADRŽAJ

UVOD.....	1
1 PNEUMATSKI AKTUATOR.....	2
1.1 McKibben pneumatski mišić.....	2
1.2 Naborani pneumatski mišić.....	3
1.3 Pneumatski mišići s mijehom.....	4
1.4 Dosadašnja rješenja izrade mišića s pravocrtnim i kutnim pomakom .....	6
2 IZRADA MIŠIĆA .....	9
2.1 Termo-deformabilne polimerne cijevi.....	9
2.2 Metode izrade mišića .....	10
2.3 Izrada mišića s linearnim pomakom većeg promjera.....	12
2.4 Izrada mišića s linearnim pomakom manjeg promjera .....	18
2.5 Izrada mišića s kutnim pomakom većeg promjera.....	20
2.6 Izrada mišića s kutnim pomakom manjeg promjera .....	24
3 LABORATORIJSKA OPREMA.....	25
3.1 Pneumatske komponente.....	25
3.2 Elektroničke komponente.....	27
4 REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA.....	32
4.1 Ispitna konstrukcija za ispitivanje mišića s pravocrtnim pomakom .....	32
4.2 Ispitivanje najveće ostvarive sile mišića s pravocrtnim pomakom .....	33
4.3 Ispitivanje ovisnosti pomaka o vremenu i brzini kod mišića s pravocrtnim pomakom	37
4.4 Mjerenje najveće ostvarive sile mišića s kutnim pomakom.....	47
4.5 Ispitivanje ovisnosti pomaka o vremenu i brzini kod mišića s kutnim pomakom ..	53
5 ZAKLJUČAK.....	67
LITERATURA.....	69
POPIS SLIKA.....	70
POPIS TABLICA.....	73

SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI .....	74
ABSTRACT AND KEYWORDS .....	75



## UVOD

Umjetni pneumatski mišići koji obavljaju koristan rad pri podtlaku imaju velik potencijal za primjenu u industriji i medicini. Iako su pokazali mogućnost postizanja velikih sila, još uvijek su pretežno u eksperimentalnoj fazi. Jedno od područja istraživanja je testiranje najboljeg i najpovoljnijeg materijala za izradu ovojnice mišića

U prethodnim radovima ispitivanja su se provodila na mišićima koji su ostvarivali pravocrtni i kutni pomak čija je ovojnica predstavljala komercijalno dostupnu gumenu zaštitu amortizera motocikla. Mišići od gumene zaštite dali su dobre rezultate pri manjim pomacima, no pri većim pomacima postoji drastično opadanje ostvarene sile. Pokazalo se da debljina stijenke ima značajan utjecaj kod opadanja sile pri većim pomacima, te se u daljnjim istraživanjima ovojnica mišića nastoji izraditi sa što tanjom stjenkom kako bi se pad sila što više smanjio. Komercijalno dostupna gumena zaštita amortizera ima standardne vanjske promjere od 30 mm do 50 mm, te će se u ovom radu nastojati izraditi mišić manjih dimenzija promjera od 30mm. Jedno od mogućih rješenja predstavlja korištenje termo-deformabilnih polimernih cijevi za ovojnica mišića, često zvanih termo-bužiri. To su tankostijene polimerne cijevi koje se pod utjecajem topline skupljaju, dostupne su u velikom rasponu promjera, imaju određenu elastičnost, a najčešće su korišteni kao izolacija električnih instalacija.

Zadatak ovog rada je izrada pneumatskih mišića na principu dosadašnjih razvijenih konstrukcija [1,3], a koji za ovojnica koriste termo-deformabilne polimerne cijevi. Nadalje, za izrađene mišiće će se provesti laboratorijska mjerenja ostvarene sile, pomaka i brzine pri različitim vrijednostima podtlaka. Zadatak uključuje izradu mišića sa pravocrtnim pomakom i kutnim pomakom.

U prvom poglavlju opisani su pneumatski mišići koji ostvaruju koristan rad pri podtlaku. U drugom poglavlju detaljno će se opisati cijeli proces izrade mišića. To uključuje opis metode izrade, opis svake iteracije mišića, probleme koji su se pojavili pri izradi, te načine na koji su ti problemi riješeni. U trećem poglavlju opisana je laboratorijska oprema korištena tijekom mjerenja. U četvrtom poglavlju opisani su postupci mjerenja, prikazani su dobiveni rezultati u tablicama i u obliku grafova i opisani su zaključci na temelju dobivenih rezultata.

# 1 PNEUMATSKI AKTUATOR

Pneumatski mišići su vrsta aktuatora koji ostvaruju pomak reakcijom elastičnog dijela mišića (membrane) na utjecaj tlaka. Većina pneumatskih aktuatora rade koristeći pretlak. Jedan od primjera takvog aktuatora je McKibbenov mišić koji se pod utjecajem predtlaka kontrahira te mu krajevi ostvare pravocrtni pomak. Kod mišića koji koriste podtlak, prilikom izvlačenja zraka iz mišića dolazi do uvlačenja stijenki mišića što rezultira pravocrtnim pomakom krajeva. Primjer takvog aktuatora je mišić s mjehom, koji će se izrađivati u ovom radu. Primarni materijal izrade mišića u ovom radu su termodeformabilni polimeri. U nastavku ovog poglavlja opisati će se nekoliko vrsta pneumatskih mišića.

## 1.1 McKibben pneumatski mišić

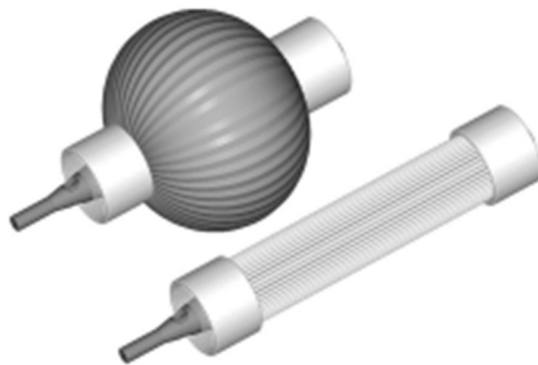
Kao što je prethodno spomenuto, McKibben pneumatski mišić obavlja koristan rad pri pretlaku. Sastoji se od elastičnog mjehura omotanog isprepletenim nerastezljivim najlonskim vlaknima. Prilikom djelovanja pretlaka, mjehur se napuhuje i radijalno rasteže, te se istovremeno skraćuje po duljini generirajući tako linearan pomak te vučnu silu od nekoliko stotina, pa čak i do nekoliko tisuća N [1]. Maksimalni pomaci koje McKibben mišići mogu ostvari iznose od 25% do 37% vlastite početne dužine. Mišić se samostalno vraća u početni položaj s prestankom djelovanja pretlaka. Na slici 1.1. prikazan je McKibben mišić proizvođača FESTO dostupan u Laboratoriju za pneumatiku na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Na gornjoj slici prikazan je mišić u opuštenom stanju bez djelovanja pretlaka, a na donjoj slici prikazan je mišić pod pretlakom. Prednosti McKibben mišića su jednostavna izrada, mala masa, te mogućnost postizanja visokih sila. Nedostaci su mala kontrakcija, trenje između mjehura i vanjskog omotača te histerežno ponašanje materijala što znači da se mišić ne može u potpunosti vratiti u početni položaj.



Slika 1.1. McKibben pneumatski mišić

## 1.2 Naborani pneumatski mišić

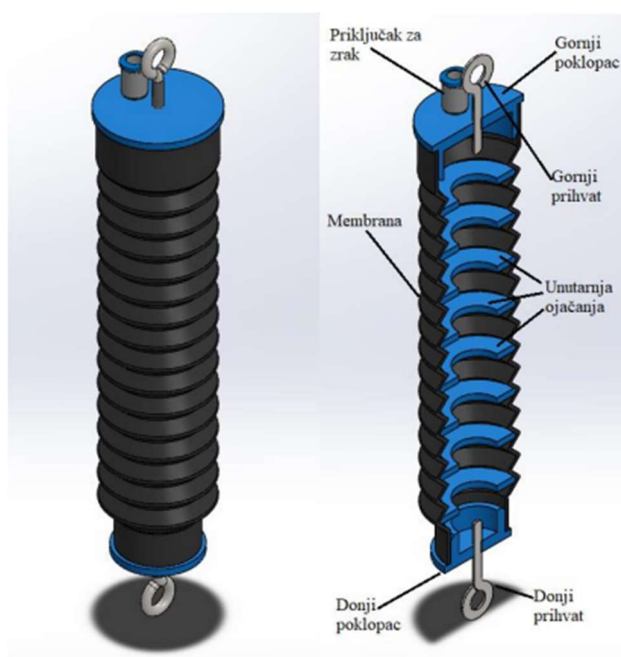
Naborani mišići (engl. *pleated pneumatic muscle*) rade na istom principu kao i McKibben pneumatski mišić u smislu da se pri djelovanju pretlaka napuhuju, rastežu se radijalno te se istovremeno skraćuju po duljini. Glavni dio ovog mišića je gumena membrana s velikim brojem nabora na aksijalnoj osi. U stanju mirovanja ti nabori su zbijeni, te membrana ima oblik cilindra, no pod djelovanja pretlaka ti nabori se šire te membrana tvori oblik sfere. Naprezanja mišića u radijalno smjeru su zanemarivo mala, te se dodatno smanjuju s povećanjem broja nabora. Prednost naboranog pneumatskog mišića nad McKiben mišićem je postojeće trenje u membrani te je time gotovo eliminirana histereza [2]. Naborani pneumatski mišić prikazana je na slici 1.2. Na lijevoj strani prikazan je mišić pod djelovanjem pretlaka, a na desnoj strani prikazan je neaktivan mišić.



Slika 1.2. Naborani pneumatski mišić [3]

### 1.3 Pneumatski mišići s mijehom

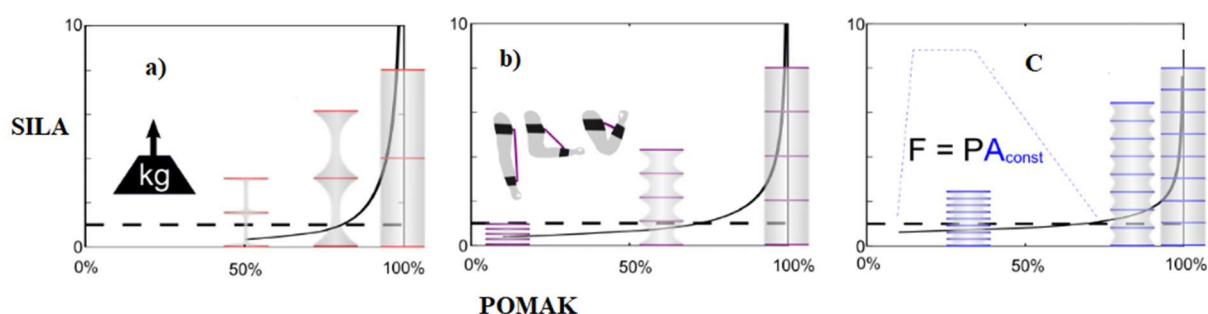
Mišići s mijehom spadaju u skupinu mekih aktuatora što im omogućava ne samo pravocrtno, već i kutno gibanje. Velika prednost ovakvih mišića je jednostavna konstrukcija koja se sastoji od 4 komponente. Razlika je to što umjesto na pretlak, mišići s mijehom obavljaju koristan rad pod utjecajem podtlaka. Glavne komponente mišića s mijehom su: elastična cilindrična membrana, plastični ili metalni prstenovi, te čepovi na krajevima cilindra. Elastična membrana je radni dio mišića koji pretvara podtlak u mehanički rad, prstenovi umetnuti u utore s jednakim međusobnim razmakom po cijeloj dužini mišića sprečavaju radijalnu imploziju membrane tijekom rada, a čepovi služe za zatvaranje i brtvljenje mišića. Prilikom djelovanja podtlaka membrana mišića se uvlači u prostore između prstenova što rezultira aksijalnim pomakom mišića. Primjer mišića s mijehom prikazan je na slici 1.2.



Slika 1.3. Primjer mišića s mijehom[5]

U znanstvenom radu [4] je opisano da se karakteristike mišića s mijehom mogu podešavati smanjivanjem i povećavanjem razmaka između prstenova. Kako se povećava razmak između prstenova povećava se i maksimalna ostvariva sila, ali se smanjuje maksimalni pomak. Kada je razmak između prstenova veći od promjera membrane, mišić postiže veće sile, ali mu je maksimalni pomak manji. Ako je razmak između prstenova približno jednak, dobije se velika kontrakcija mišića koja je ograničena debljinom prstenova i debljinom stijenke membrane.

Ako je razmak između prstenova manji od promjera mjeha, mišić ima približno konstantan omjer sile i tlaka. Na slici 1.4. prikazani su dijagrami koji prikazuju 3 izvedbe mišića s mijehom. Dijagram sa slike 1.4 a) prikazuje karakteristike mišića s razmakom prstenova većem od promjera membrane, dijagram b) prikazuje karakteristike mišića s razmakom prstenova jednakim promjeru membrane, a dijagram c) prikazuje karakteristike mišića s razmakom prstenova manjim od promjera membrane



Slika 1.4. Ovisnost karakteristika mišića o razmaku prstenova [4]

Iz dijagrama se može vidjeti da je na svakoj izvedbi razmaka prstenova mišića najveća ostvarena sila na početnom položaju mišića, tj. na pomaku od 0 mm. Sa dijagrama s slike 1.4 a) može se vidjeti da je kod razmaka prstenova većem od promjera ovojnice, na pomaku od 0 mm ostvarena velika sila, no kod takve izvedbe mišić ostvaruje pomake do 50% ukupne početne dužine mišića sa značajnim opadanjem ostvarene sile. Iz dijagrama sa slike 1.4. b) može vidjeti da mišić s razmakom prstenova od jednog promjera ovojnice ostvaruje nešto manju silu na početnom položaju, no pomak koji takva izvedba mišića ostvari je veći od prethodne izvedbe. Dijagram sa slike 1.4.c) prikazuje karakteristike mišića s razmakom prstenova manjim od promjera membrane. Može se vidjeti da takva izvedba mišića ostvaruje najmanju silu u početnom položaju. Ukupan ostvareni pomak sličan je izvedbi mišića sa slike 1.4. b), no pad ostvarene sile s pomakom je manji od prve dvije izvedbe. U nastavku rada takva izvedba mišića će se izraditi takva izvedba mišića.

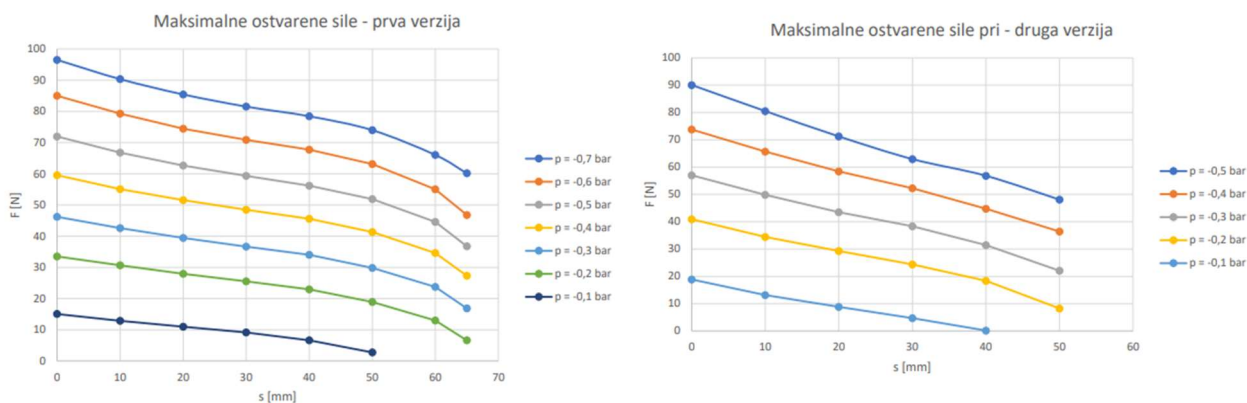
## 1.4 Dosadašnja rješenja izrade mišića s pravocrtnim i kutnim pomakom

Iz istraživanja u prethodnim diplomskim radovima [5] i [6] izrađeni su pneumatski mišići koji obavljaju koristan rad pri podtlaku čija je ovojnica komercijalno dostupna gumena zaštita amortizera motocikla. U diplomskom radu [5] izrađene su dvije verzije mišića s pravocrtnim pomakom. U obje iteracije su se koristile komercijalno dostupne gumene zaštite motocikla različitih dimenzija i krutosti. Slika 1.5. prikazuje obje verzije mišića.



Slika 1.5. Mišići iz prethodnog diplomskog rada [5]

Na gornjoj strani slike je prva verzija mišića, a na donjoj strani slike je druga verzija mišića. Prva iteracija mišića ima najveći vanjski promjer od 46 mm i najmanji unutarnji promjer od 35 mm, dok druga verzija mišića ima najveći vanjski promjer od 50 mm i najmanji unutarnji promjer od 38 mm. Početni oblik zaštitne gume ima ravne dijelove na krajevima, no ti dijelovi su različitih promjera, te su odrezani kako bi se dobila simetričnost mišića. Čepovi i prstenovi ovih mišića izrađeni su metodom 3D tiska. Problem je predstavljalo brtvljenje zbog hrapavosti površine čepa i oblika površina koje se brtve.



Slika 1.6. Odnos sile i pomaka dviju verzija prethodnih mišića [5]

Najveća ostvarena sila prve verzije mišića bila je 91 N dok je najveća ostvarena sila druge verzije mišića bila 130 N pri podtlacima od -0,75 bar. Na slici 1.6 prikazani su dijagrami odnosa sila i pomaka za prvu i drugu verziju mišića. Na dijagramu za drugu verziju mišića može se vidjeti da su prikazane samo sile za podtlake do -0,5 bar pošto na većim podtlacima dolazi do ispadanja čepova i prstenova iz utora. Prednosti korištenja komercijalno dostupne gumene zaštite kao ovojnice mišića su jednostavna izrada i niska nabavna cijena, relativno velik pomak, velike ostvarene sile i brzine. Nedostatci su potrebno krpanje gume prije korištenja, potrebno rezanje komada gume prije korištenja što otežava brtvljenje. U ovom radu također će se izraditi dva mišića različitih promjera, no razlika promjera biti će znatnija nego u prijašnjem diplomskom radu. Da bi se olakšalo brtvljenje, mišići će izrađivati sa ravnim krajevima jednakih promjera, te će prstenovi biti izrađeni od metala. Kako bi se dodatno olakšalo brtvljenje, čepovi će biti izrađeni od metalne cijevi s glatkom površinom.

U diplomskom radu [6] izrađeni su mišići sa kutnim pomakom. Ovojnica mišića također je komercijalno dostupna gumena zaštita amortizera motocikla najmanjeg promjera 49,5 mm i najvećeg promjera 56,5 mm. Slika 1.7. prikazuje spomenuti mišić. Na lijevoj strani slike 1.7. prikazan je mišić u opuštenom stanju, a na desnoj strani na maksimalnom ostvarenom pomaku od 135°.

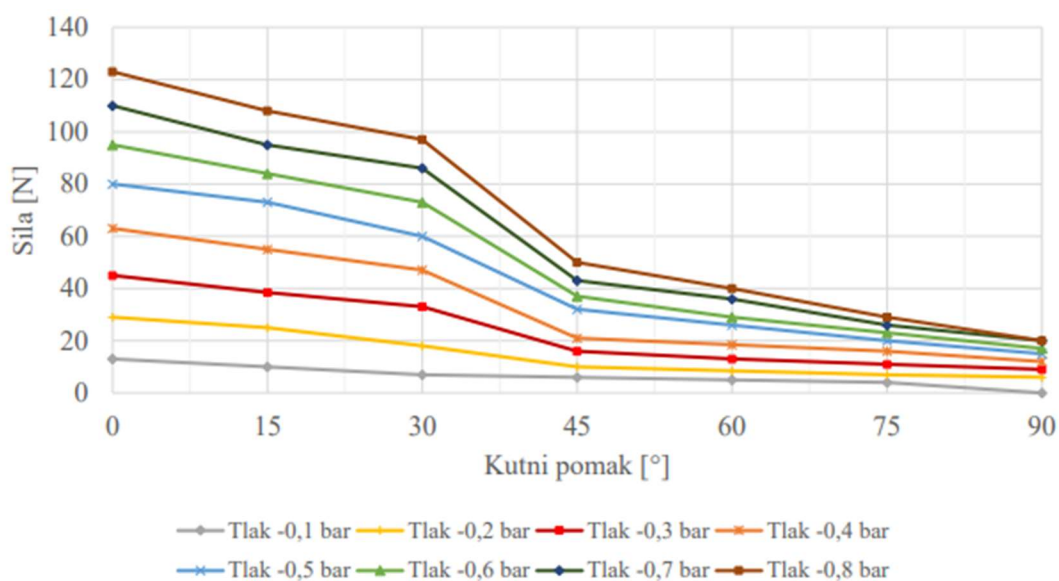


*Slika 1.7. Mišić iz prethodnog diplomskog rada [6]*

Za razliku od diplomskog rada [5], ravni krajevi gumene zaštite nisu odrezani što je znatno olakšalo brtvljenje. Čepovi i prstenovi su i u ovom radu izrađeni metodom 3D tiska. Za postizanje kutnog pomaka koristila se plastična vezica te plastični graničnici izrađeni metodom 3D tiska.



Najveća ostvarena sila ovog mišića je 123 N pri podtalku od -0,8 bar. Dijagram ovisnosti sile o pomaku prikazan je na slici 1.8.



Slika 1.8. Ovisnost sile i pomaka prethodne verzije mišića [6]

U ovom radu izraditi će se 3 verzije mišića s kutnim pomakom. Dvije verzije s većim promjerom, jedna verzija sa manjim razmakom prstenova i jedna verzija s većim razmakom prstenova, te jedna verzija s manjim promjerom. Oblik mišića izraditi će se na isti način kao što je opisano za mišić s pravocrtним pomakom, te će prstenovi i čepovi biti također izrađeni od metala. Graničnici prstenova također će biti izrađeni od metala.



## 2 IZRADA MIŠIĆA

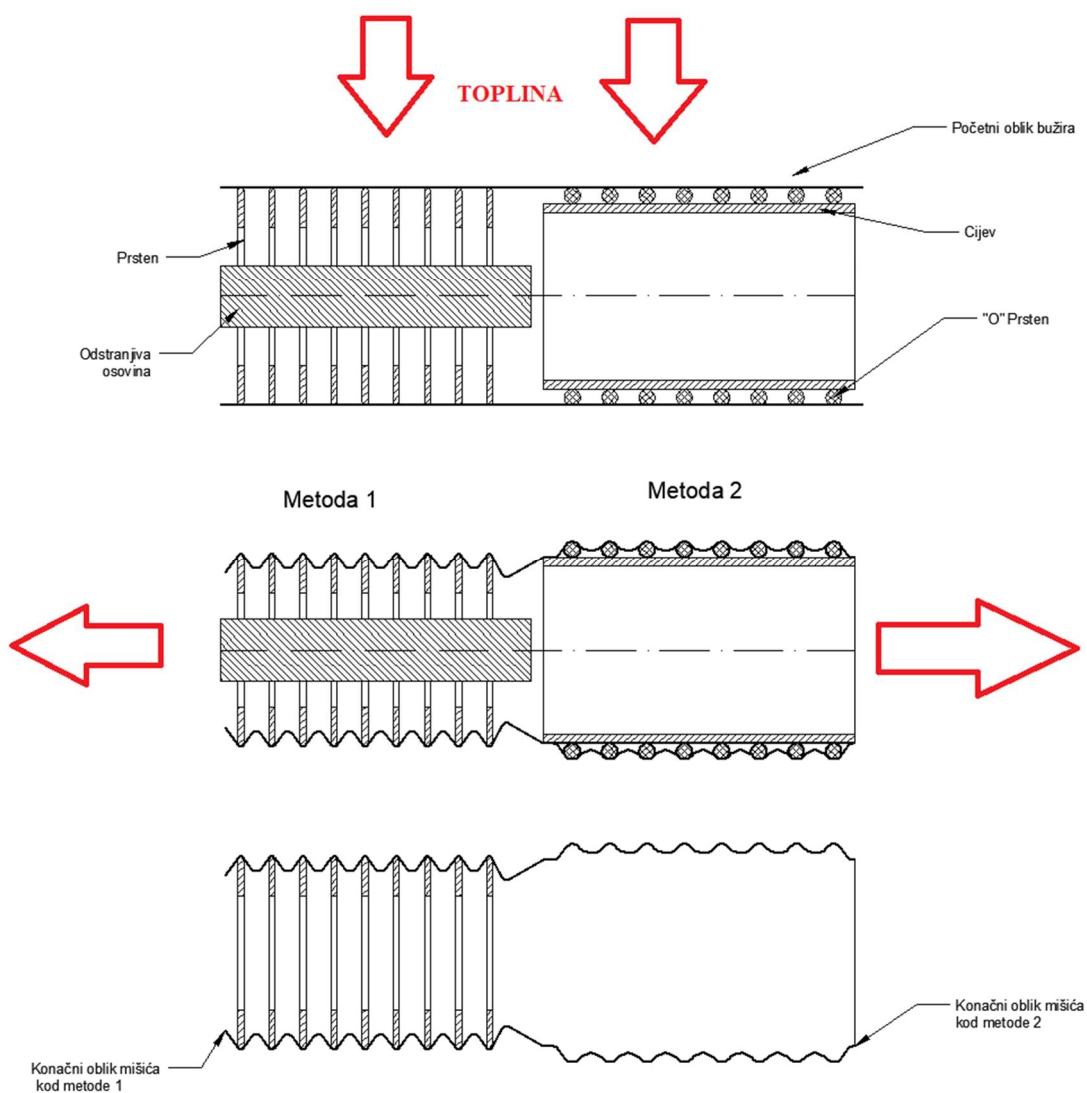
Zadatak zahtijeva izradu dvaju mišića, za ostvarivanje pravocrtnog i kutnog gibanja. Mišić se sastoji od četiri osnovna dijela: elastičnog mijeha, prstenova od metala ili plastike te dvaju brtvenih čepova na krajevima mišića. Kako je prethodno spomenuto, u prijašnjim diplomskim radovima su se ispitivali pneumatski mišići s mijehom čija je membrana bila komercijalno dostupna gumena zaštita amortizera motocikla dok se u ovom radu membrana nastoji samostalno izraditi od termodeformabilnih polimera. Nakon izrade mišića provesti će se ista ispitivanja kao i u spomenutim prethodnim radovima koja će biti detaljnije opisana u nadolazećim poglavljima. U ovom poglavlju biti će opisani svi dijelovi mišića i proces njihove izrade, te će se posebna pažnja posvetiti procesu izrade elastičnog mijeha.

### 2.1 Termo-deformabilne polimerne cijevi

Termo-deformabilne cijevi (*eng. Heat-shrink tubing*) su polimerne cijevi koje se skupljaju pod povišenim temperaturama, koji se primarno koriste za izolaciju električnih žica. Izrađuju od raznih materija čiji kemijski sastav ovisi o području namjene, no ni jedan korišteni materijal ne smije podržavati sagorijevanje, te njihove pare ne smiju biti otrovne. Izrađuju se na način da se prvo odabere materijal te mu se dodaju aditivi koji mu poboljšavaju svojstva. Sirovi materijal se formira u cijev koja se zagrijava do temperature kristalizacije polimera te se nakon toga proširuje i naglo hladi čime cijev zadržava novi oblik. Najčešće korišteni materijali izrade su: viton, silikonska guma, PVC i poliolefin. Viton je veoma fleksibilan, ima visoku kemijsku otpornost te radnu temperaturu između  $-55^{\circ}\text{C}$  i  $220^{\circ}\text{C}$ . Silikonska guma ima visoku otpornost od abrazije i visoku fleksibilnost. PVC je najpovoljniji što se tiče cijene i otporan je na vanjske uvijete. Poliolefin je najčešće korišten materijal, veoma je fleksibilan i brzo se skuplja. U teoriji se poliolefin skuplja samo radijalno u omjerima 2:1 i 3:1, no tijekom izrade mišića uočeno je i neželjeno aksijalno skraćanje od 6%. Usprkos boljim svojstvima posebnih materija poput silikonske gume, oni nisu široko dostupni, te će se zbog toga koristiti bužiri od poliolefina. Elastičnost i radna temperatura poliolefina zadovoljavaju potrebama ovog zadatka te su široko dostupni u raznim promjerima te imaju nisku cijenu. Za izradu širih mišića koristiti će se poliolefnski bužiri promjera 50,8 mm, a za izradu tanjih mišića bužiri promjera 25,4 mm.

## 2.2 Metode izrade mišića

Kod izrade mišića, kao konačni oblik nastoji se dobiti oblik mijeha. Kako bi se dobio ciljani oblik osmišljene su dvije metode. Kod prve metode prsteni bi se montirali na osovinu koja bi ih pridržavala na željenim udaljenostima tijekom procesa grijanja termo-deformabilne polimerne cijevi, te bi se po završetku izrade osovinu izvadila. Kod ove metode prstenovi bi bili trajno montirani u ovojnici mišića, te ih ne bi bilo moguće naknadno pomicati ili izvaditi bez da se ovojnica nepovratno ošteti. Kod druge metode izradio bih se modularni kalup od cijevi i brtvenih gumica, te bi se prsteni umetali naknadno po završetku grijanja termo deformabilne polimerne cijevi. Na slici 2.1. prikazane su skice opisanih metoda. Na lijevoj strani skicirana je metoda 1, a na desnoj strani je skicirana metoda 2.



Slika 2.1 Skice opisanih metoda izrade ovojnice mišića

Na slici 2.2 prikazana je ovojnica izrađena korištenjem obiju metoda.



Slika 2.2. Testna ovojnica

Lijeva strana ovojnice je rezultat prve metode izrade, a desna strana je rezultat druge metode izrade. Prva metoda se pokazala nepovoljna iz više razloga. Kada se termo deformabilna polimerna cijev jednom počne skupljati, neće stati dok ne dosegne neku graničnu stijenku ili dok se ne skupi do kraja, u slučaju ovog bužira 50% početnog promjera. Također, što se bužir više stisne, to više gubi na elastičnosti te postaje sve krući čime mišić ostvaruje manji pomak. Mišić dobiven ovom metodom imao bi jako malen pomak, te bi zbog manje površine presjeka postizao manju silu. Posljednji razlog je otežano zatvaranje krajevima mišića. Pokazalo se da se bužir neravnomjerno sužava čime se ne može predvidjeti krajnji presjek krajeva čime je njihovo zatvaranje znatno otežano.

Druga metoda pokazala se jednostavnijom, te su se njome riješili problemi koji se javljaju kod prve metode. Kod druge metode, termo deformabilna polimerna cijev se stisne samo do cijevi, čime se dobije veća površina presjeka, izbjegnuto je pretjerano ukrućivanje materija. Zaključeno je da druga metoda izrade ostvaruje optimalniji oblik ovojnice mišića te će ista koristiti u nastavku. Izraditi će se mišići s dva različita vanjska promjera. Mišići većih promjera biti će sličnih dimenzija kao u dosadašnjim radovima radi usporedbe dobivenih rezultata laboratorijskih mjerenja. Mišići manjih dimenzija vanjskih promjera će se izraditi kako bi se analizirala funkcionalnost mišića pri minimizaciji dimenzija.

### 2.3 Izrada mišića s linearnim pomakom većeg promjera

Kako je prethodno napomenuto, kod druge metode izrade, termo-deformabilna polimerna cijev se oblikuje po kalupu koje se sastoji od glatke cijevi na koju navučene brtvene gumice (O prsteni) promjera 5 mm. Kako bi se što više spriječilo ukrućivanje bužira, nastoji gase čim manje stegnuti. Pošto je početni unutarnji promjer termo-deformabilne cijevi je  $\Phi 50,8$  mm, odabrana je cijev promjera  $\Phi 39$  mm. Funkcija O prstenova je definiranje oblika mišića. Kada se gumice navuku na cijev, promjer kalupa na najširem mjestu je 49 mm, a na najužem je 39 mm, čime se minimaliziralo sužavanje termo-deformabilne cijevi. Prototip naprave, prikazan je na slici 2.3.



*Slika.2.3. Naprava za izradu mišića*

Korištenjem naprave sa slike 2.3 izrađen je prototipni mišić. Broj rebara na prototipu je 6 te je razmak između njih 10 mm. Kada je termo-deformabilna cijev navučena preko naprave, ona se grije fenom na vrući zrak. Rezultat prvog pokušaja prikazan je na slici 2.4. i 2.5. Slika 2.4. prikazuje termo deformabilnu cijev na kalupu prije zagrijavanja, a slika 2.5 prikazuje istu nakon zagrijavanja.



*Slika 2.4. Termo-deformabilna polimerna cijev na kalupu prije grijanja*



*Slika 2.5. Termo-deformabilna polimerna cijev na kalupu nakon zagrijavanja*

Prilikom skidanja izrađene ovojnice pokazalo se da termo deformabilna cijev jako dobro pirjanja na površinu na koju se stisne, te u kombinaciji sa brtvenim gubicama koje su također čvrsto stisnute na napravi, izvlačenje naprave je znatno otežano. Također, metalna cijev zadržava dovoljno topline iz procesa grijanja da održava Termo-deforambilnu cijev dovoljno toplom da svaka deformacija postaje trajna. Na slici 2.6 prikazana je prva iteracija ovojnice mišića nakon skidanja sa naprave.



*Slika 2.6. Prva iteracija ovojnice mišića nakon izvlačenja cijevi*

Zbog toga razloga prilikom vađenja metalne cijevi razmak između gumica se znatno smanjio. Kako bi se riješio taj problem, naprava će se prije vađenja ohladiti tako da se kroz nju pusti hladna voda. Kako bi se dobio veći hod, u daljnjim iteracijama mišić će se izraditi sa 10 rebara.

U sljedećoj iteraciji mišića pokazalo se da stegnuta termo-deformabilna cijev u kombinaciji sa gubicama iznimno dobro brtvi prostore između gumica. Pokazalo se da prilikom sužavanja termo-deformabilne cijevi zrak ostaje zarobljen u prostorima između gumica, te se zbog toga termo-deformabilna cijev na zadnjih nekoliko rebara sa desne strane nije mogla stegnuti do kraja. Ovojnica mišića dobivena u drugoj iteraciji izrade prikazana je na slici 2.7.



*Slika 2.7. Druga iteracija ovojnice mišića*



Sa slike se može vidjeti da je ovojnica ima pravilniji oblik na lijevoj strani, pošto se od te strane počeo grijati dok od sredine nadalje, zarobljeni zrak ne dopušta termo-deformabilnoj cijevi da se stisne do kraja. Kako bi se u daljnjim iteracijama riješio taj problem na napravi su svaki 15 mm izbušene rupe kroz koje zrak može izaći kako je prikazano na slici 2.8.



*Slika 2.8. Nova iteracija naprave za izradu mišića*

U trećoj iteraciji ovojnice, razmak između gumica postavljen je na 15 mm kako bi se dodatno osiguralo izbjegavanje zadržavanja zraka u međuprostorima. Sa slike 2.9. može se vidjeti da su u trećoj iteraciji ovojnice uspješno riješeni problemi sa prethodnih iteracija



*Slika 2.9. Treća iteracija ovojnice mišića*

Termo-deformabilna cijev se između gumica stisnula do metalne cijevi te dobivena ovojnica ima zadovoljavajući oblik. Nakon što je termo-deformabilna cijev poprimila željen oblik, slijedeći korak je umetanje prstenova. Prototip prstena prikazan na slici 2.10 lijevo, je 3D tiskani plastični prsten debljine 2 mm, vanjskog promjera 48 mm. Plastični prsten se pokazao jako savitljivim, što olakšava njegovo umetanje u mišić, no također predstavlja mogućnost loma kod većih opterećenja.

Zbog tog razloga umjesto plastičnih prstenova, dalje se koriste metalni prstenovi izrađeni od čelika Č.0361 debljine 2 mm izrezani laserskim rezačem. Na slici 2.10 desno prikazan je jedan spomenutih metalnih prstenova.



*Slika 2.10. Umetci (prstenovi)*

Pošto metal nema podatljivost plastike, kako bi se olakšalo umetanje, metalni prsten ima manji promjer od 47 mm, te širinu stijenke 3 mm. Prilikom umetanja prstenova, uočeno je da je ovojnica iznimno kruta na mjestima gdje joj se promjer naglo povećá, te je zbog toga gotovo nemoguće umetnuti metalne prstenove u utore. Na slici 2.9. to su mjesta gdje počinju i završavaju utori za prstenove, te se može vidjeti da stijenke međusobno tvore kut od  $90^\circ$  na mjestima promjene promjera.

Štoviše, prilikom testiranja pravocrtnog gibanja ovojnice uočeno je da se ona stišće samo na mjestima zaobljenja stijenke koja se u ovoj iteraciji javlja samo u utorima za prstenove, što značajno ograničava maksimalni hod mišića. Iz ove iteracije može se zaključiti su zaobljenja na stijenkama ovojnice ne samo poželjna već i neophodna kako bi mišić ostvario što veću silu i pomak, te da je potrebno izbjegavati nagle prijelaze promjera na ovojnici. Korištenjem spoznaja iz prethodnih iteracija, razmak između utora je ponovo smanjen na 10 mm kako bi se između njih dobila zaobljenja. Eliminiranjem naglih promjena promjera znatno je olakšano umetanje prstenova u utore te je ostvaren zadovoljavajući pravocrtni pomak. Slika 2.11. prikazuje ovojnicu dobivenu četvrtom iteracijom u koju su umetnuti metalni prstenovi.





*Slika 2.11. Četvrta iteracija ovojnice mišića u početnom i stisnutom položaju*

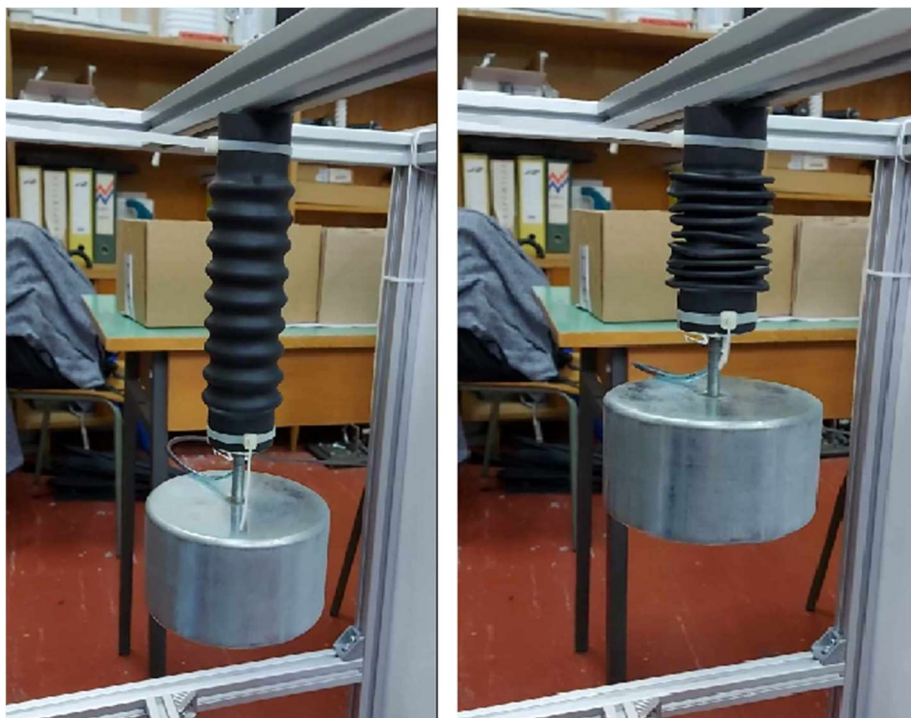
Sa slike 2.11. se može vidjeti da zbog zaobljenja između utora mišić ne gubi hod čak ni sa prstenovima u utorima. U sljedećem koraku ovojnicu je potrebno nepropusno zatvoriti. Čepovi mišića izrađeni su od metalne cijevi istog promjera kao i cijev naprave (39 mm) dužine 20 mm na koje su nepropusno zavarene pločice. Na jednom od čepova izbušena je rupa te urezan navoj M5 za pneumatski priključak, te su na njih zavarene navoje šipke M8 pomoću kojih će se mišić montirati na opremu za testiranje. Opisani čepovi prikazani su na slici 2.12



*Slika 2.12. Čepovi mišića*

Kako bi se poboljšalo brtvljenje, vanjski rubovi čepova su omotani teflonskom trakom. U prvom pokušaju zatvaranja mišića, za stezanje čepova sa buzirom se koriste obujmice za crijeva (šelne), no kada se mišić probno opterećen podtlakom pojavila su se velika puštanja na krajevima

cijevi. Prvi test mišića je pokazao da obujmice ne ostvaruju jednoliki kontakt po cijelom obodu, te se njima ne može ostvariti dovoljno brtvljenje između čepova i ovojnice mišića. Problem je riješen korištenjem vezica. Vezicama stegnut mišić je i kod manjih podtlaka ostvario znatno veći pomak u odnosu na mišić koji je bio stegnut obujmicama, te se nadalje koriste vezice za stezanje čepova na bužir. Kako bi se ispitala funkcionalnost izrađenog mišića, montiran je na konstrukciju za ispitivanje mišića te je opterećen utegom od 5 kg.



*Slika 2.13. Preliminarni test mišića*

Na slici 2.13. je prikazan preliminarni test mišića u kojem je mišić podigao uteg od 5 kg pri podtlaku od -0,8 bar. Na temelju provedenog testa može se zaključiti da mišić pri podtlaku -0,8 bar ostvaruje sile veće od 50 N.

## **2.4 Izrada mišića s linearnim pomakom manjeg promjera**

Nadalje se je izradio mišić s manjim vanjskim promjerom. Za izradu mijeha korištena je termo-deformabilna polimerna cijev početnog promjera  $\Phi 25$  mm. Kao kalup koristila se metalna cijev vanjskog promjera  $\Phi 14$  mm, te su i u ovom slučaju korišteni O-prstenovi promjera 5 mm. Kao prstenovi korištene su metalne podloške vanjskog promjera  $\Phi 23$  mm, što je dovoljno malo da može ući u mjech, a dovoljno veliko da ne ispadnu iz utora. Napravljeni su i čepovi je za manji mišić od cijevi  $\Phi 14$  mm kako je prikazano na slici 2.14.

Sa slike se vidi da je rupa za pneumatski cijevni priključak morala biti premještena na stranu čepa zbog nedostatka mjesta na vrhu pored navojne šipke.



*Slika 2.14. Čep za tanji mišić*

Na preliminarnom testiranju se pokazalo da zbog prevelike zaobljenosti površine na koju naliže pneumatski priključak, brtva pneumatskog priključku ne ostvaruje ravnomjeran kontakt po cijeloj površini brtvljenja zbog čega dolazi do curenja. Kako bi se riješio taj problem potrebno je pobrusti stranu cijevi tako da se dobije ravna površina, što se ne može ostvariti direktno na cijevi jer je debljina stijenke samo 1,5 mm. Umjesto brušenja cijevi, na cijev je zavarena metalna šipka  $\Phi 20$  mm kroz čije središte je izbušena rupa. Do te rupe je sa strane šipke izbušena još jedna rupa u koju je urezan navoj M5, te je na kraju površina na mjestu navoja pobrušena. Novi čep prikazan je na slici 2.15. Na lijevoj strani prikazan je konačni izgled čepa, a na desnoj strani je prikazana unutrašnjost čepa gdje se vidi rupa izbušena u zavarenoj šipki.



*Slika 2.15. Konačni oblik manjeg čepa*

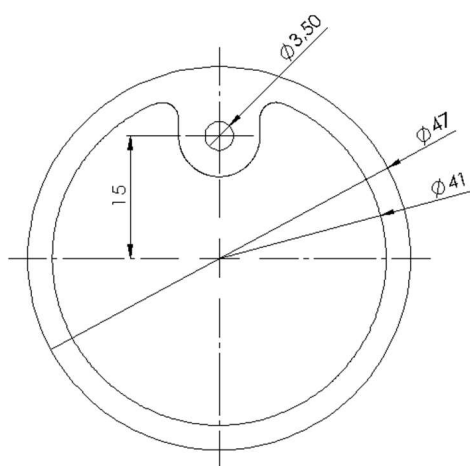
Pri preliminarnom testiranju mišića prikazanom na slici 2.16 prikazan je preliminarni test mišića manjeg promjera zatvorenog sa novim čepom. Na lijevoj slici prikazan je mišić u slobodnom stanju, a na desnoj je mišić opterećen podtlakom. Test je pokazao da je novi čep dobro zabrtvljen i da nema curenja, te je sa time zaključena izrada mišića s pravocrtnim pomakom.



Slika 2.16. Tanji mišić u opuštenom i opterećenom stanju

## 2.5 Izrada mišića s kutnim pomakom većeg promjera

Kako bi se postiglo kutno gibanje mišića koji ostvaruje koristan rad djelovanjem podtlaka potrebno mu je sa jedne strane ograničiti gibanje. Ideja je da se između svakoga prstena unutar mišića na jednom mjestu postavi graničnik. Kako bi graničnici mogli montirati, izrađeni su novi prstenovi kako je prikazano na slici 2.17.



Slika 2.17. Novi prstenovi



Lijeva slika prikazuje nacrt novog prstena, a desna slika prikazuje izrezani prsten. Kao graničnici koriste se komadi metalne slamke za piće prikazane na slici 2.18. na rezani na komade dužine 10 mm prikazano na slici 2.19.



*Slika 2.18. Metalne slamke za piće*



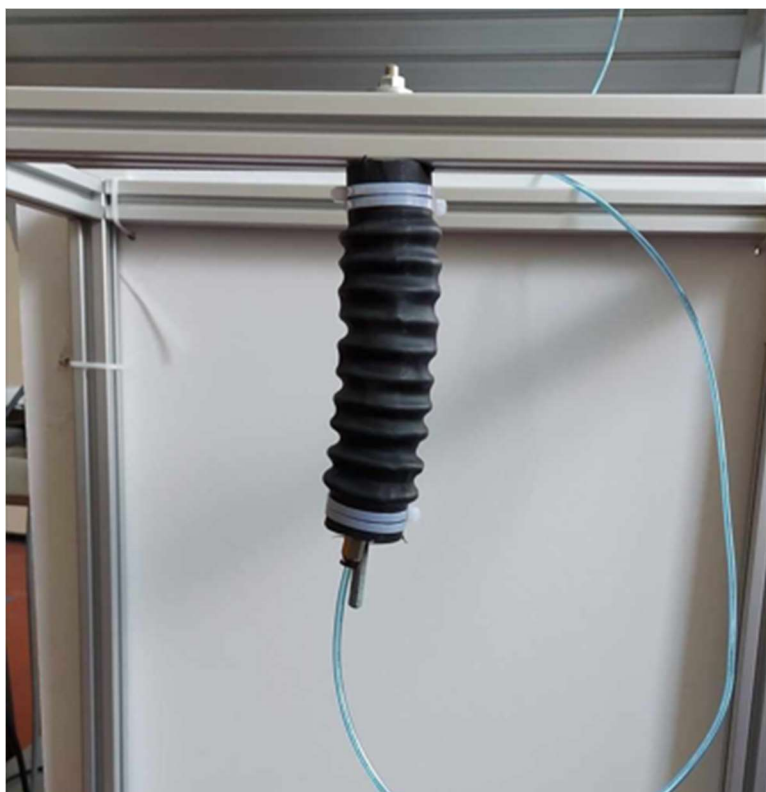
*Slika 2.19. Komad metalne slamke korišten kao graničnik*

Za poravnavanje graničnika te kako bi se graničnici održali poravnatima tijekom rada mišića, kroz prstenove i graničnike se provlači PVC nit za košnju trave (flaks) koja mišiću daje dodatnu stabilnost i čvrstoću. Nakon provlačenja flaksa kroz sve prstenove i graničnike, on se učvrsti s obje strane, te se na kraju mišić zatvori s čepovima.

Na slici 2.20 prikazana je unutrašnjost mišića s kutnim pomakom na kojoj se može vidjeti kako su graničnici postavljeni te poravnani na jednoj strani mišića, dok je na slici 2.21 prikazan gotov mišić montiran na testnu konstrukciju.



*Slika 2.20. Unutrašnjost mišića s kutnim pomakom*



*Slika 2.21. Mišić montiran na testnu konstrukciju*

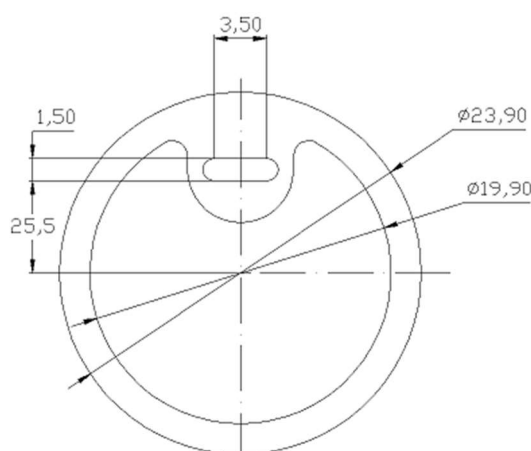
Kod preliminarnog testiranja mišića s kutnim pomakom pokazalo se da je najveći ostvarivi kutni pomak pri podtlaku od -0,8 bar 120°. Da bi se ispitaio utjecaj razmaka između prstenova na ostvarenu silu i brzinu gibanja mišića, izrađen je mišić sa znano većim razmacima između utora. Novi mišić ima samo 5 utora u odnosu na prethodni koji ima 10. Razmak između utora je 20 mm. Novi mišić montiran na testnu konstrukciju prikan je na slici 2.22. te je kod preliminarnog testiranja ostvario najveći kutni pomak od 130°.



*Slika 2.22. Novi mišić montiran na testnu konstrukciju*

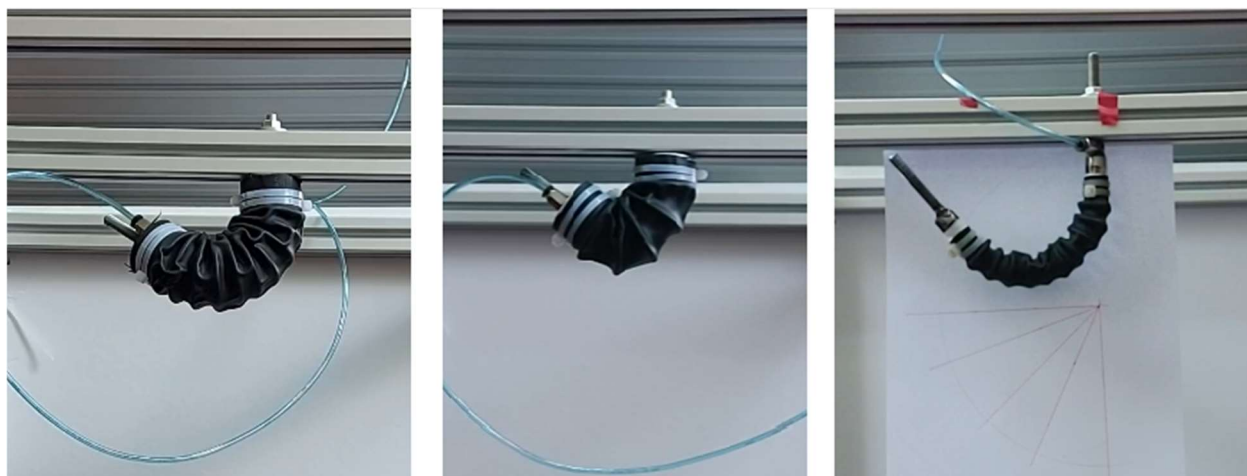
## 2.6 Izrada mišića s kutnim pomakom manjeg promjera

Posljednji izrađeni mišić bio je tanja verzija mišića s kutnim pomakom kao što je slučaj s linearnim mišićem. Kao i kod linearnog mišića korišten je bužir promjera  $\Phi 25$  mm U ovom slučaju flaks nije pogodan kao sredstvo koje drži graničnike poravnate zbog svoje debljine i krutosti jer bi montaža prstenova s istovremenim provlačenjem flaksa kroz prstenove bila nemoguća zbog premalog prostora unutar mišića. Za tu svrhu u novom mišiću je korištena vezica. Zbog tog razloga rupica na prstenovima više nije okrugla već je zaobljena kako bi vezica stala u nju. Slika 2.23 prikazuje nacrt novog prstena i izrađeni novi prsten.



Slika 2.23. Novi prsten

Na slici 2.24. prikazana je usporedba maksimalnog pomaka svih izrađenih mišića s kutnim pomakom. Sa slike 2.24. se može vidjeti da je prvi mišić ima najmanji kutni pomak od  $120^\circ$ , drugi mišić ima nešto veći od  $130^\circ$ , dok treći, tanji mišić ima najveći kutni pomak od  $135^\circ$ .



Slika 2.24. Usporedba maksimalnog pomaka triju izrađenih mišića

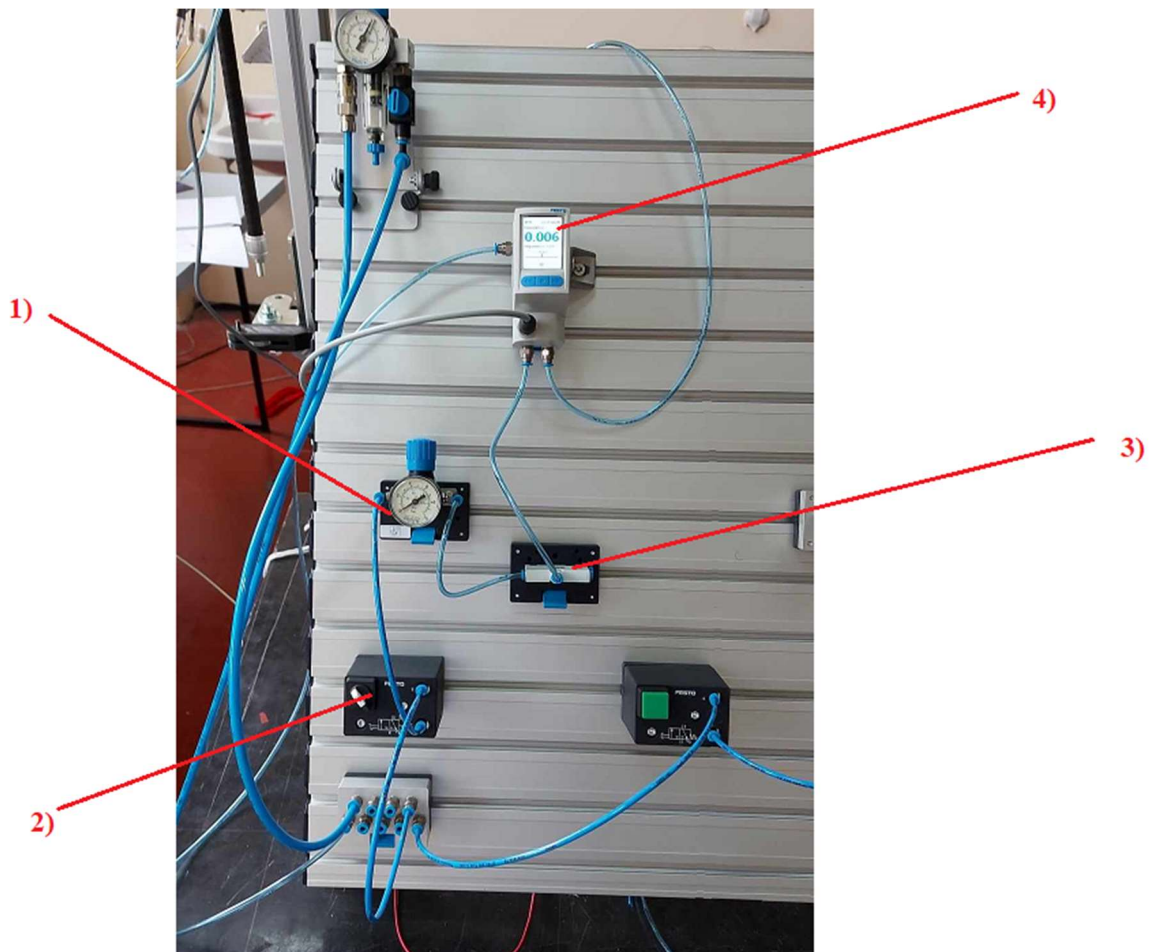


### 3 LABORATORIJSKA OPREMA

Nakon izrade svih mišića, te preliminarnih testiranja, sljedeći korak su laboratorijska ispitivanja. U ovom poglavlju biti će opisana laboratorijska oprema korištena u procesu ispitivanja. Sva mjerenja napravljena u ovom diplomskom radu izvedena su u laboratoriju za hidrauliku i pneumatiku na Tehničkom fakultetu u Rijeci. Mjerna oprema sadržava kombinaciju pneumatskih i elektroničkih komponenti koje su dostupne u laboratoriju.

#### 3.1 Pneumatske komponente

Korištena pneumatska oprema prikazana je na slici 3.1. Za dovod zraka koristi se centralni kompresor u zgradi laboratorija Tehničkog fakulteta u Rijeci. Maksimalni tlak doveden sustavu je 6 bar.



Slika 3.1 Pneumatska oprema

Komponenta broj 1 je ručni regulator tlaka. Njime se ograničava tlak koji ulazi u vakuumsku sapnicu (komponenta broj 3) na 6 bara. Komponenta broj 2 je razvodni ventil koji sliži za propuštanje i zaustavljanje zraka u sustav. Komponenta broj 3 je vakuumska sapnica koja služi za generiranje vakuuma u sustavu.

Specifikacije vakuumske sapnice su sljedeće:

- Nominalni radni tlak: 6 bar
- Pogonski tlak: od 0 do 8 bar
- Maksimalni podtlak: -0,88 bar
- Maksimalni protok: 6,2 l/min

Komponenta broj 4 je proporcionalni ventil FESTO VPPI-5L-3-G18-1V1H-V1-S1D prikazanog na slici 3.2.



Slika 3.2. Proporcionalni ventil FESTO VPPI-5L-3-G18-1V1H-V1-S1D

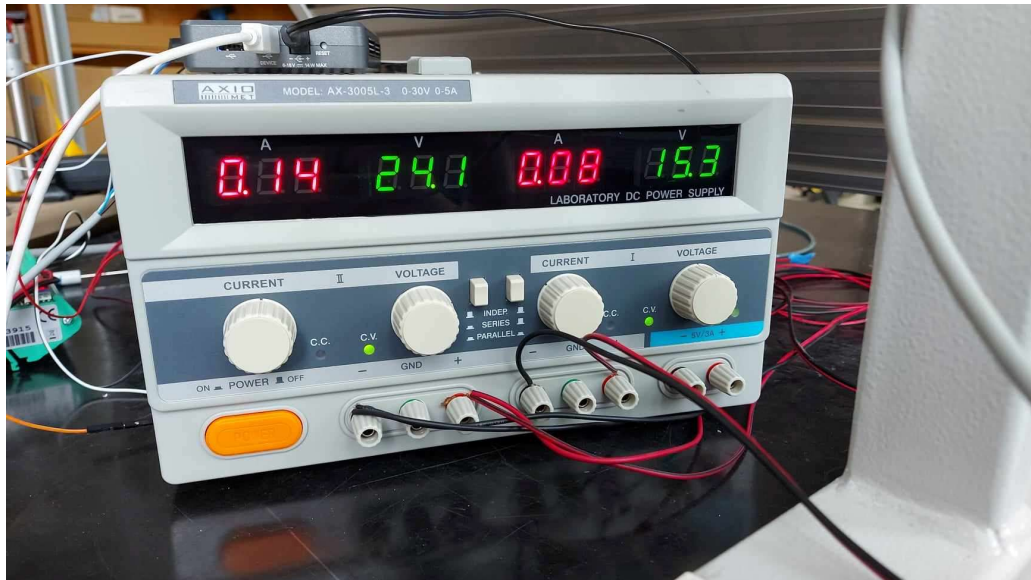
Specifikacije proporcionalnog ventila u sljedeće:

- Područje regulacije: od -1 do 1 bar
- Pogonski tlak: od 1 do 2 bar
- Raspon regulacijskog napona: od 0 do 10 V
- Potreban napon za rad: 15 do 30 V

Proporcionalni ventili su ventili čija je otvorenost, tj. propuštanje zraka proporcionalna sa naponom koji kroz njih prolazi. To znači da kada je kroz njega pušten upravljački napon od 10 V, on je u potpunosti otvoren, a kada kroz njega ne prolazi napon, on je u potpunosti zatvoren. Ovim ventilom će se uz pomoć upravljačkog LabVIEW programa vršiti regulacija podtlaka tijekom mjerenja.

### 3.2 Elektroničke komponente

Elektroničke komponente su sve one koje su korištene za napajanje, upravljanje drugih pneumatskih ili elektroničkih komponenti, te prikupljanje podatka podataka tijekom mjerenja. Za napajanje cijelog sustava se koristi se napajanje Axio AX3005L-3 prikazan na slici 3.3.



Slika 3.3. Izvor napajanja Axio AX3005L-3

Specifikacije ovog napajanja su sljedeće:

- Ulazni napon: 220 V
- Izlazni napon: od 0 do 30 V
- Izlazna struja: od 0 do 5 A

Za povezivanje proporcionalnog ventila s upravljačkim LabVIEW programom koristi se akvizicijska kartica NI myRIO 1900 prikazana na slici 3.4. Ona se može povezati sa računalom pomoću USB kabela te služi kao veza između upravljačkog programa i proporcionalnog ventila i senzora.



Slika 3.4. Akvizicijska kartica NI myRIO

NI myRIO ima 3 porta: A, B i C od kojih svaki ima analogne ulaze i izlaze. A i B portovi učitavaju i odašilju signale u rasponima od 0 do 5 V, dok C port radi isto sa naponima od 0 do 10 V. Pošto proporcionalni ventil ima raspon regulacijskog napona od 0 do 10 V, povezat će se na myRIO preko C porta.. Pomoću upravljačkog programa izrađenog u programu LabVIEW, prikazanog na slici 3.5. vrši se regulacija tlaka u proporcionalnom ventilu.





Za mjerenje pomaka mišića s pravocrtnim pomakom korišten je potenciometarski senzor pomaka Burster 8713-100 prikazan na slici 3.7. Mjerno područje ovog senzora je 100 mm sa razlučivošću od 0,01 mm, te maksimalnom brzinom pomaka od 10 m/s. Senzoru je također potrebno dovesti napajanje, no u slučaju ovog senzora, napajanje koje daje myRIO je dovoljno za njegovo pokretanje.



Slika 3.7. Senzor pomaka Burster 8713-100[9]

Za mjerenje sile koristi se senzor sile Zemic H3G-C3-50 kg-6B prikazan na slici 3.8. To je S tip senzora koristi se za mjerenje vlačnih i tlačnih opterećenja.



Slika 3.8. Senzor sile Zemic H3G-C3-50kg-6B

Sa slike 3.8. se može vidjeti da senzor ima rupe s navojem M8 na gornjem i donjem kraku koji mu omogućuju jednostavno i čvrsto montiranje kako bi se dobili što točniji rezultati. Maksimalna sila koju ovaj senzor može izmjeriti je 500 N, tj. 50 kg. Senzor je žičano povezan na pretvarač signala prikazan na slici 3.9.



Slika 3.9. Mjerni instrument senzora sile

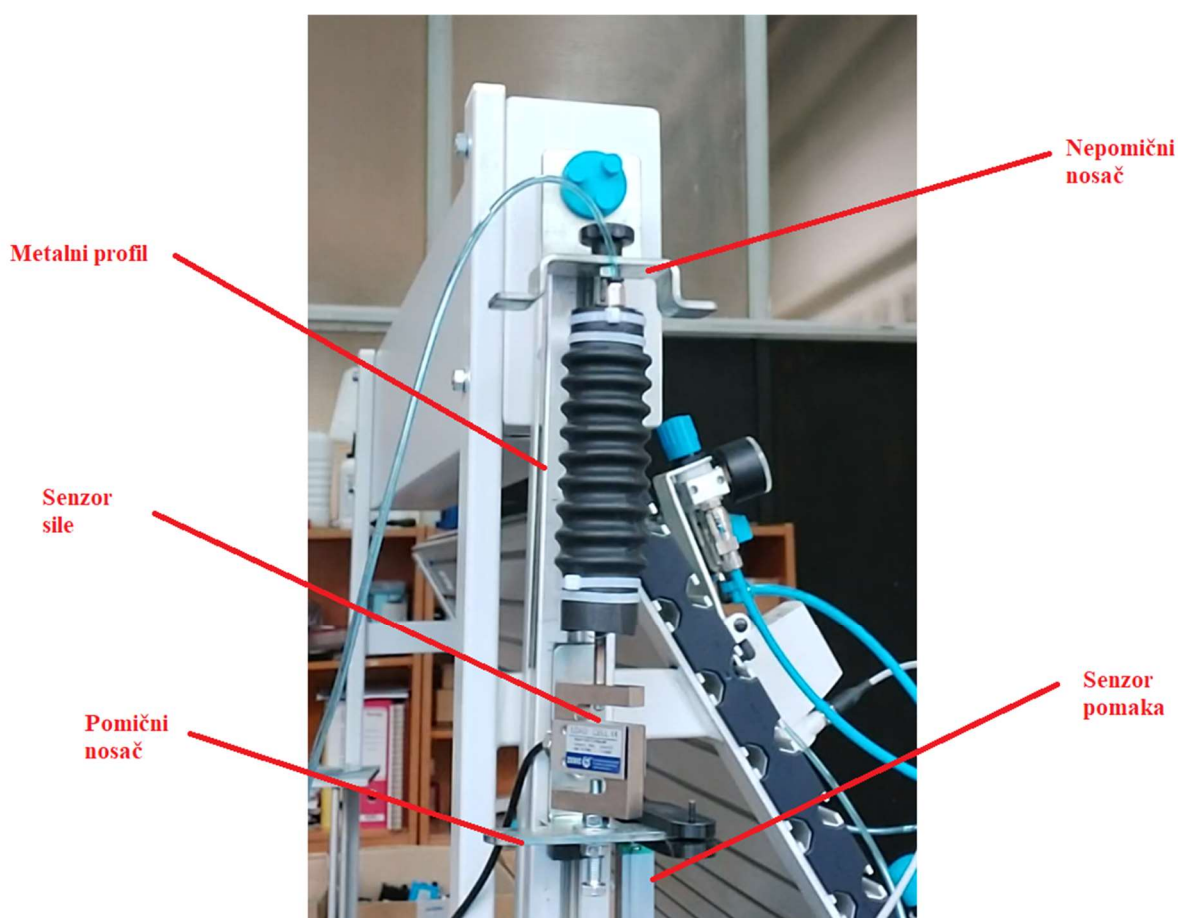
Sila koju ostvaruju mišići se očitava sa samog pretvarača signala kojeg je potrebno programirati prema uputama proizvođača tako prikaže silu u ispravnim mjernim jedinicama ( N ili kg). Pretvarač signala potrebno je spojiti na napajanje koje mora biti između 12 i 24 V, što se dovodi pomoću napajanja sa slike 3.3. Nakon što su se sve komponente spojile i kada je završeno programiranje u LabVIEW-u, može se početi sa mjerenjima.

## 4 REZULTATI LABORATORIJSKIH ISPITIVANJA

Laboratorijskim ispitivanjem nastoji se istražiti koju silu i pomak ostvaruju izrađeni mišići pri podtlacima u rasponu od  $-0.1$  bar do  $-0.8$  bar. U ovom poglavlju biti će opisani prikazani i opisani rezultati dobiveni mjerenjem.

### 4.1 Ispitna konstrukcija za ispitivanje mišića s pravocrtnim pomakom

Ispitna konstrukcija za ispitivanje mišića s pravocrtnim pomakom prikazana je na slici 4.1. Ona se sastoji od standardiziranog metalnog profila, pomičnog i nepomičnog, te senzora pomaka i sile. Metalni profil se vertikalno montira na radnu ploču te se na njega vijcima montira ostatak konstrukcije. Plavim vijkom se na vrh profila montira nepomični nosač koji tijekom mjerenja osigurava mišić. Pomični nosač se montira na donji dio profila te tijekom mjerenja osigurava pravilno gibanje mišića. Na njega se osim mišića montiraju i senzori sile i pomaka.



Slika 4.1 Oprema za ispitivanje mišića s pravocrtnim pomakom.



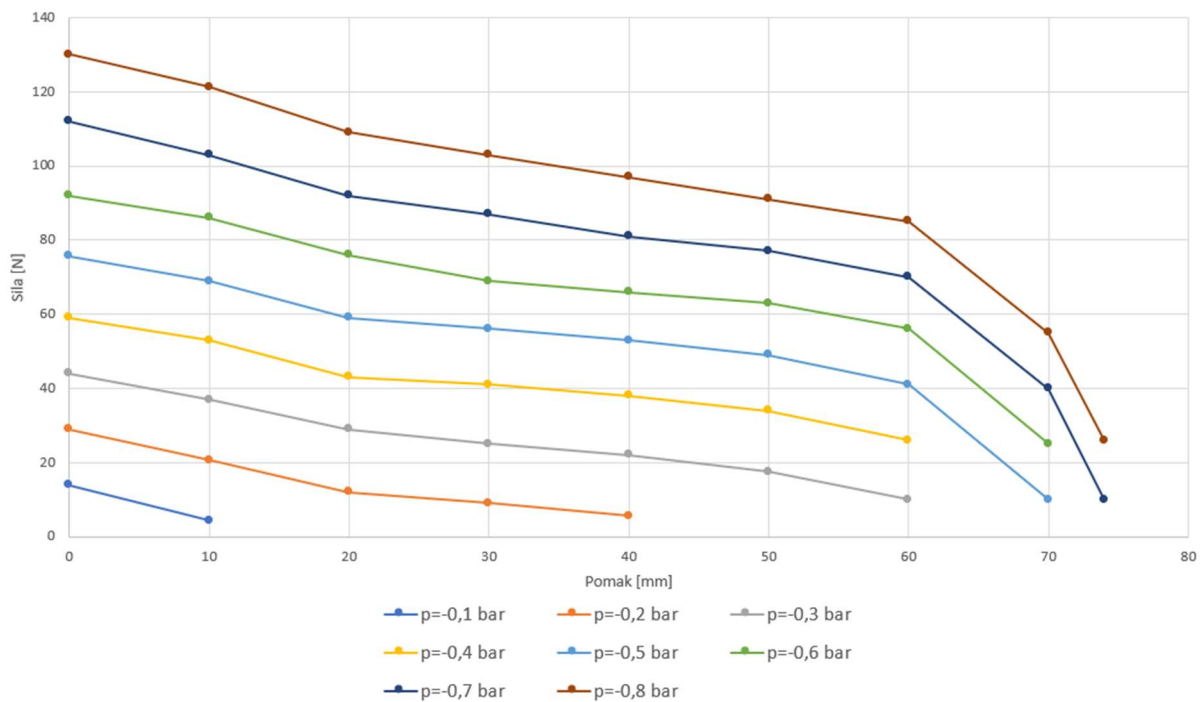
Tijekom mjerenja mišić se jednim krajem preko navojne šipke zavarene na čep i dviju matica pričvrsti na nepomični nosač, a drugi kraj se vijčano učvrsti na senzor sile. Ostvarena sila mjeri se na više pomaka počevši od 0 mm pa s intervalom od 10 mm do najvećeg pomaka. Kako bi se ta mjerenja izvela, blokira se pomak pomičnog nosača tako da se montira graničnik na metalnom profilu iznad pomičnog nosača. Kao graničnik koriste se vijak i metalna podloška.

## 4.2 Ispitivanje najveće ostvarive sile mišića s pravocrtnim pomakom

Kako bi se olakšalo razumijevanje mjerenja, u nastavku rada mišić većeg promjera će se zvati mišić 1, a mišić manjeg će se zvati mišić 2. Najbitnija karakteristika izrađenih mišića je njegova najveća ostvariva sila. Sila se mjeri na više različitih podtlaka s korakom od  $\Delta p = -0,1 \text{ bar}$  u granicama od  $p_{min} = -0,1 \text{ bar}$  i  $p_{max} = -0,8 \text{ bar}$ . Također, ovo mjerenje je izvršeno na više različitih pomaka mišića s korakom od  $\Delta s = 10 \text{ mm}$  s time da je prvo mjerenje na pomaku od 0 mm, a konačno mjerenje na najvećem, ostvarenom pomaku. Najveći ostvareni pomak mišića 1 je 74 mm, a mišića 2 je 50 mm. Izmjerene sile očitane su sa senzora sile. U tablici 4.1 prikazani su rezultati mjerenja koje je ostvario mišić 1, a tablica 4.2 prikazuje sile koje je ostvario mišić 2. Na slikama 4.2 i 4.3 su prikazani dijagrama ostvarenih sila u ovisnosti o podtlaku i ostvarenom pomaku.

Tablica 4.1. Ostvarene sile mišića 1

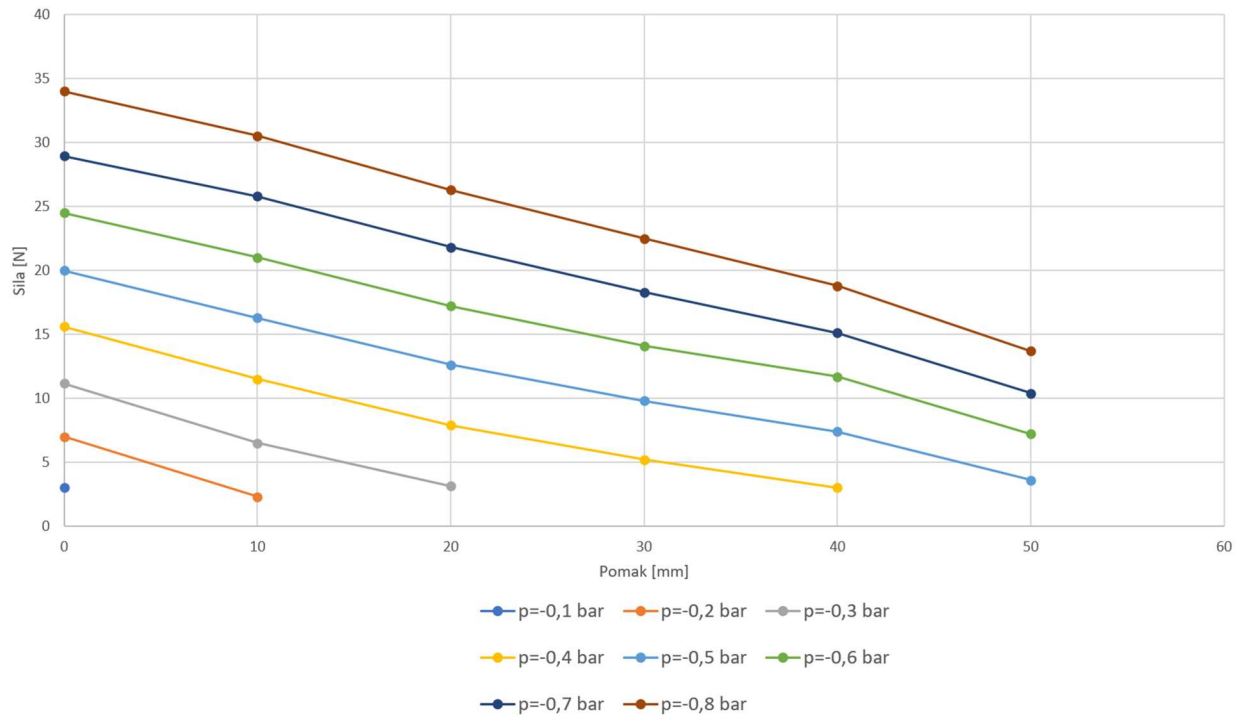
Sila N	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
0 mm	14	29	44	59	75,6	92	112	130
10 mm	4,3	20,7	37	53	69	86	103	121,3
20 mm		12	29	43	59	76	92	109
30 mm		9	25	41	56	69	87	103
40 mm		5,6	22	38	53	66	81	97
50 mm			17,5	34	49	63	77	91
60 mm			10	26	41	56	70	85
70 mm					10	25	40	55
74 mm							10	26



Slika 4.2. Maksimalna ostvarena sila u ovisnosti o pomaku i podtlaku kod mišića 1

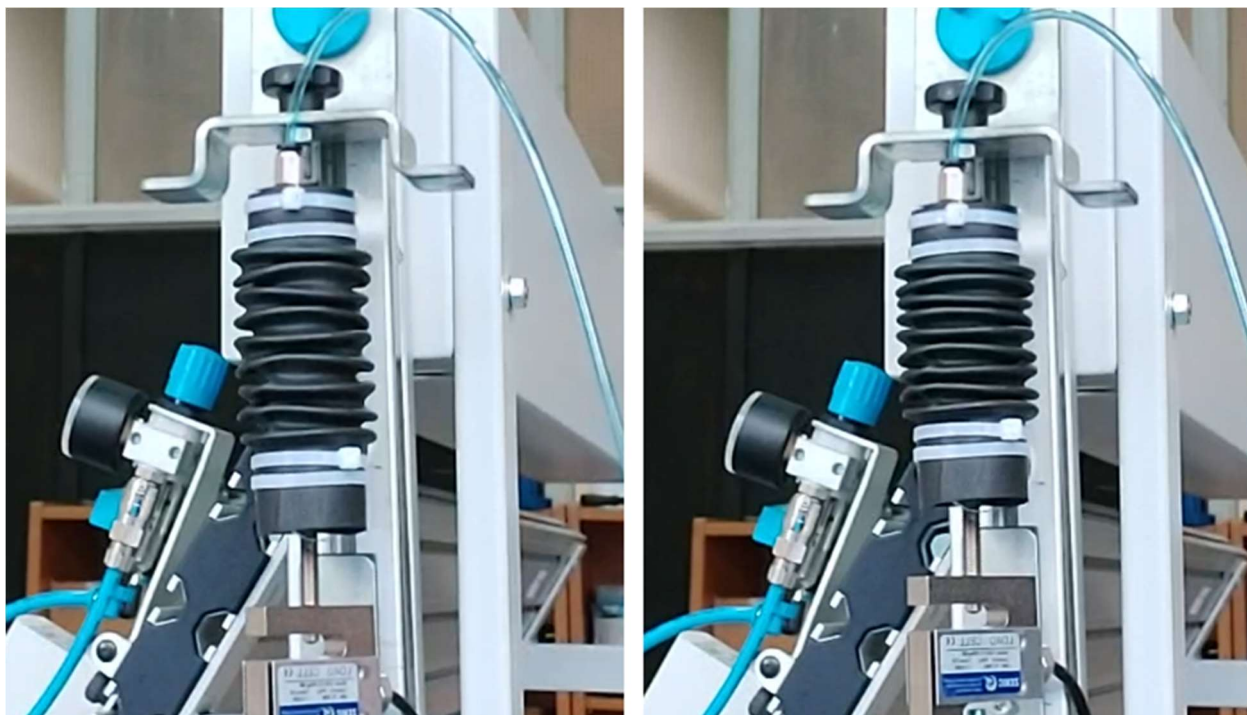
Tablica 4.2. Ostvarene sile mišića 2

Sila N	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
0 mm	3	7	11,15	15,6	20	24,5	28,95	34
10 mm		2,3	6,5	11,5	16,3	21	25,8	30,5
20 mm			3,15	7,9	12,6	17,2	21,8	26,3
30 mm				5,2	9,8	14,1	18,3	22,5
40 mm				3	7,4	11,7	15,1	18,8
50 mm					3,6	7,2	10,4	13,7



Slika 4.3. Maksimalna ostvarena sila u ovisnosti o pomaku i podtlaku kod mišića 2

Najveća sila koju je ostvario mišić 1 bila je 130 N pri podtlaku -0,8 bar te pomaku od 0 mm dok je najveća ostvarena sila mišića 2 bila 34 N. Iz dijagrama se može uočiti lagani pad ostvarenih sila s povećanjem pomaka za sve vrijednosti podtlaka. Iz dijagrama ostvarenih sila mišića 2 se također može uočiti pad ostvarenih sila nakon pomaka od 40 mm, no kod mišića 2 pad nije oštar kao kod mišića 1, štoviše mišić 2 ima linearniji pad sila od mišića 1. Razlog padova sila je to što s rastom pomaka i komprimiranjem mišića raste sila otpora u materijalu mijeha, tj. sam mijeh postaje opruga koja daje veću silu otpora što se mišić više stisne. Nagli padovi sila kod mišića 1 uzrokovani su nalijeganjem materijala što znači da su se stijenke na utorima za rebra počele dodirivati i pružati dodatni otpor. Pošto su zaobljenja u utorima za rebra manja od zaobljenja između utora može se pretpostaviti da će doći do dva pada ostvarenih sila, što je potvrđeno na dijagramu sa slike 4.2. Prvi nagli pad sila na pomaku od 60 mm je uzrokovan nalijeganjem unutarnjih stjenka rebara, a drugi pad sila je uzrokovan nalijeganjem vanjskih stijenki između utora. Početci nalijeganja materijala mogu se vidjeti na slici 4.4. gdje je na lijevoj slici prikazan početak prvog nalijeganja, a na desnoj početak drugog nalijeganja.



*Slika 4.4. Početak prvog naližeganja (lijevo) i početak drugog naližeganja (desno)*

Kada je mišiću 1 ograničen pomak, pri većim podtlacima su primijećene deformacije materijala na rebrima kako je prikazano na slici 4.5.



*Slika 4.5. Deformacija mišića pri većim podtlacima*

Te deformacije se javljaju zbog blokiranja pravocrtnog pomaka mišića te zračnosti između prstena i unutarnje stijenke utora. Mišić se svojim oblikom nastoji pravocrtno stisnuti, no pošto je pravocrtno gibanje ograničeno, materijal pod utjecajem podtlaka obavlja jedino moguće gibanje, imploziju koja je također ograničena pomoću prstenova. Ove deformacije nisu imale značajan utjecaj postojanost materijala mišića. Usporedbom rezultata iz prethodnog diplomskog rada [5], vidi se da je novo izrađeni mišić postigao veću silu od prve verzije prethodnog mišića, te istu kao i druga verzija prethodnog mišića, kojemu je dimenzijski gotovo isti. Bolje brtvljenje te učvršćenje čepova omogućilo je novom mišiću pouzdan rad pri svim podtlacima

### **4.3 Ispitivanje ovisnosti pomaka o vremenu i brzini kod mišića s pravocrtnim pomakom**

U ovom poglavlju opisano je ispitivanje mišića sa podizanjem određene mase čime se simuliraju stvarni uvjeti rada mišića. Svakom mišiću biti će izmjerena ostvarena pomak u vremenu, te brzina kojom su ostvarili pomaci. Spomenuta svojstva biti će izmjerena kada je mišić podiže 3 različite mase. Za mišić 1 su to 0 kg (0 N), 3 kg (30 N) i 5 kg (50 N), a mišić 2 su to 0 kg, 0,3 kg (3 N) te 0,55 kg (5,5 N). Ova mjerenja izvođena su slično kao i mjerenja sile, samo što se u ovom slučaju ne ograničava pomak mišića, već se za njega objese utezi, te se donji nosač poveže sa senzorom pomaka. Prilikom testiranja su očitani i zabilježeni pomaci mišića u stvarnom vremenu. Da bi se očitala vremena ostvarivanja tih pomaka, testiranja su snimana, te su vremena dobivena kasnije pažljivom analizom snimaka. Kao i u prethodnom mjerenju, ovo mjerenje se također izvodi na različitim podtlacima s granicama od  $p_{min}=-0,1$  bar i  $p_{max}=-0,8$  bar te korakom od  $\Delta p=-0,1$  bar. Prvo mjerenje se za oba mišića provodi bez opterećenja. Rezultati mjerenja prikazani su u tablicama 4.3. i 4.4., a slike 4.7 i 4.8 prikazuju dijagrame ovisnosti pomaka o vremenu.

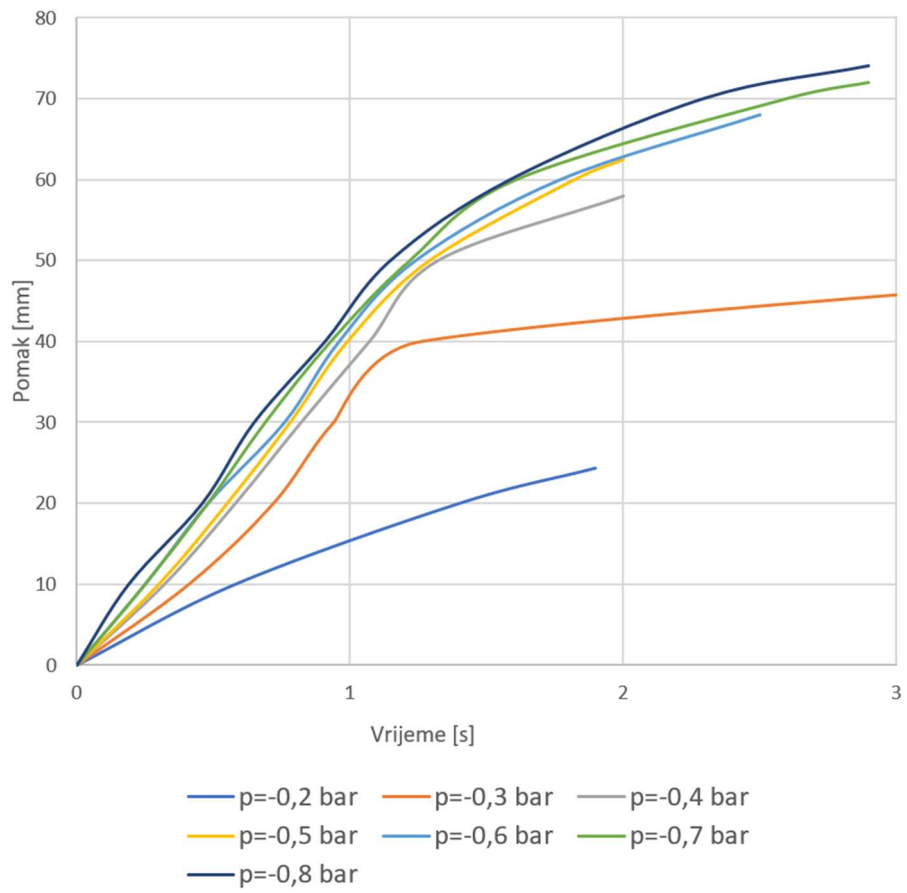
Tablica 4.3. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 1 s opterećenjem 0 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
10 mm	-	0,58	0,41	0,32	0,3	0,25	0,25	0,19
20 mm	-	9,4	0,72	0,58	0,55	0,48	0,48	0,46
30 mm	-	-	0,94	0,82	0,78	0,76	0,69	0,65
40 mm	-	-	1,26	1,07	0,99	0,96	0,93	0,91
50 mm	-	-	4,64	1,32	1,29	1,24	1,22	1,15
60 mm	-	-	-	-	1,82	1,77	1,61	1,59
70 mm	-	-	-	-	-	-	2,6	2,3

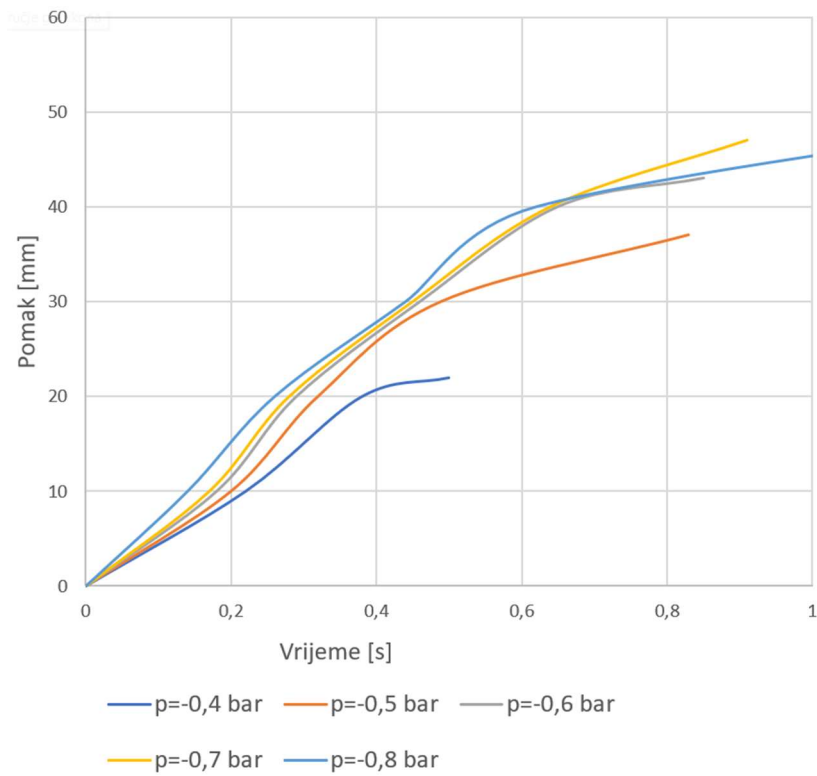
Tablica 4.4. Vremena ostvarivanja pomak mišića 2 s opterećenjem 0 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
10 mm	-	-	-	0,22	0,18	0,18	0,17	0,14
20 mm	-	-	-	0,38	0,32	0,29	0,28	0,26
30 mm	-	-	-	-	0,49	0,46	0,45	0,44
40 mm	-	-	-	-	-	0,65	0,64	0,62
50 mm	-	-	-	-	-	-	-	1,4

Iz tablica možemo vidjeti da kod mjerenja vremena pomaka mišići nisu ostvarili pomak koji su ostvarili tijekom mjerenja sile. Ta pojava može se pripisati protusili opruge u senzora pomaka. Izmjereni rezultati su pokazali da pri nižim podtlacima mišići ne daju dovoljnu silu za ostvarivanje većih pomaka što je znatno uočljivije kod mišića 2 koji čak i neopterećen ne može ostvariti pomak od 10 mm. Prvi značajan pomak on ostvari tek pri podtlaku od -0,4 bar. Usprkos tome, mišić 2 se pokazao bržim od mišića 1.

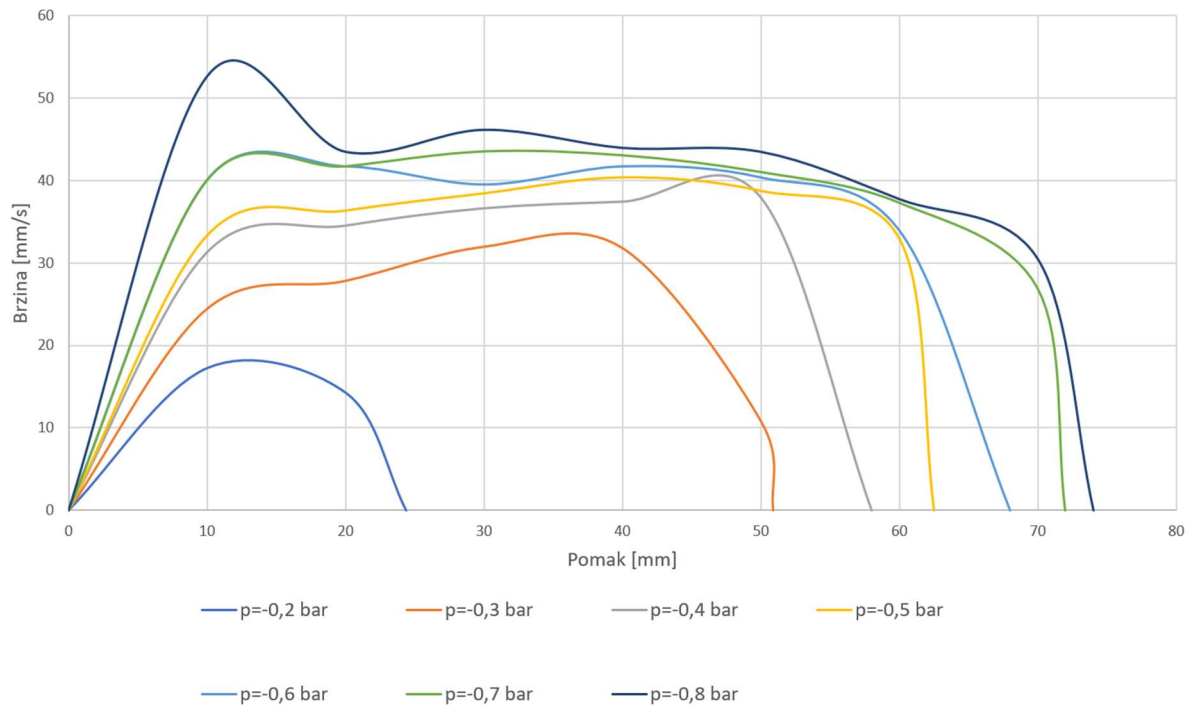


Slika 4.6. Ovisnost vremena o pomaku mišića 1 s opterećenjem 0 N

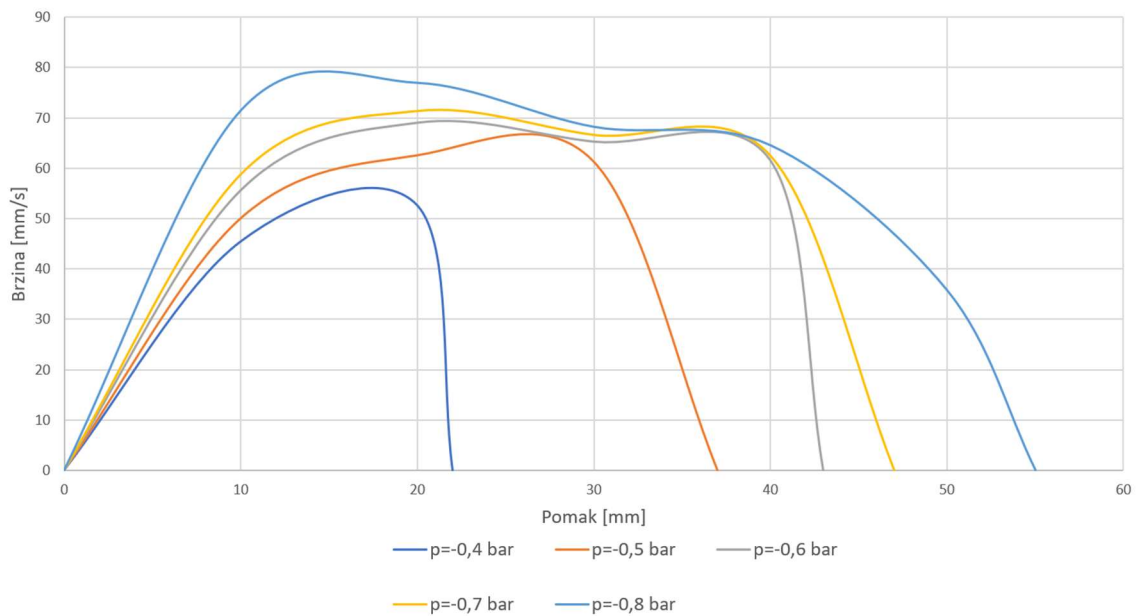


Slika 4.7. pomaka o vremenu mišića 2 s opterećenjem 0 N

Iz očitanih podataka izrađeni su i dijagrami odnosa brzine i pomaka neopterećenih mišića. Slika 4.8. prikazuje spomenuti dijagram za mišić 1, a slika 4.9. prikazuje dijagram za mišić 2.



Slika 4.8. Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 1 s opterećenjem 0 N



Slika 4.9. Dijagram odnosa brzine i pomaka za mišić 2 s opterećenjem 0 N

U sljedećem koraku obavlja se isto mjerenje, ali su mišići opterećeni nekom silom koju mogu savladati. Za mišić 1 to je 3 kg, a za mišić 2 je to 0.3 kg. Sila kojom je mišić opterećen se ostvaruje tako da se na mišić ovjese utezi. Za mišić 1 se to ostvaruje mjedenim zupčanikom mase 3 kg, a za



mišić 2 utegom od 0,3 kg. Ostvarena vremena i pomaci prikazani su u tablicama 4.5 za mišić 1 i 4.6. za mišić 2.

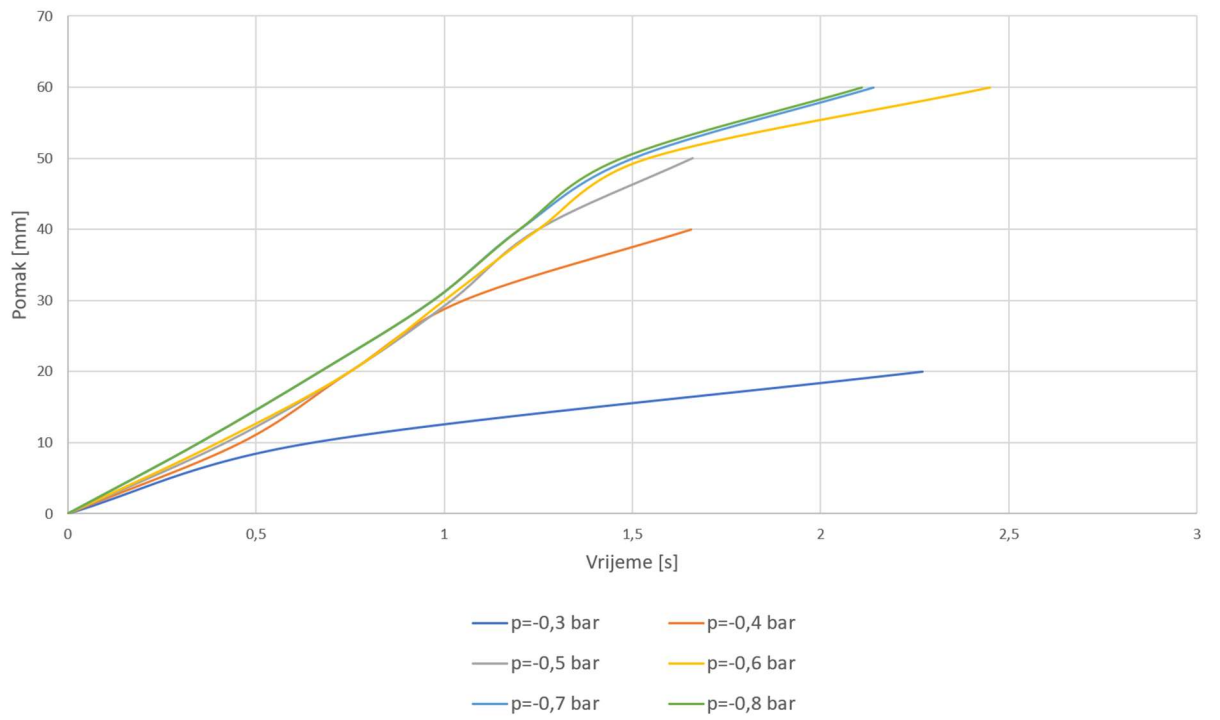
Tablica 4.5. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 1 opterećenog silom 30 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
10 mm	-	-	0,65	0,46	0,42	0,4	0,35	0,35
20 mm	-	-	2,27	0,75	0,75	0,75	0,67	0,67
30 mm	-	-	-	1,05	1,02	1	0,97	0,97
40 mm	-	-	-	1,65	1,25	1,25	1,2	1,2
50 mm	-	-	-	-	1,66	1,54	1,5	1,47
60 mm	-	-	-	-	-	2,45	2,14	2,11
70 mm	-	-	-	-	-	-	-	-

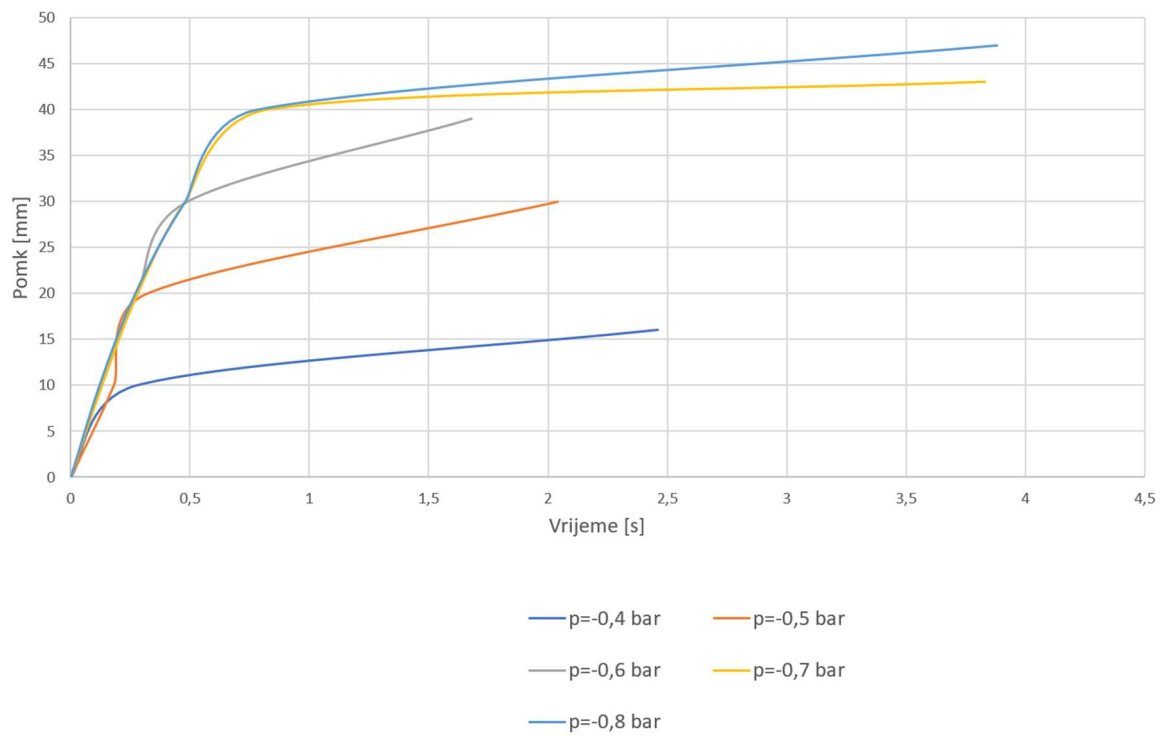
Tablica 4.6. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 2 opterećenog silom 3 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
10 mm	-	-	-	0,28	0,23	0,2	0,18	0,16
20 mm	-	-	-	-	0,32	0,3	0,3	0,28
30 mm	-	-	-	-	2,04	0,49	0,48	0,48
40 mm	-	-	-	-	-	-	0,83	0,78
50 mm	-	-	-	-	-	-	-	-

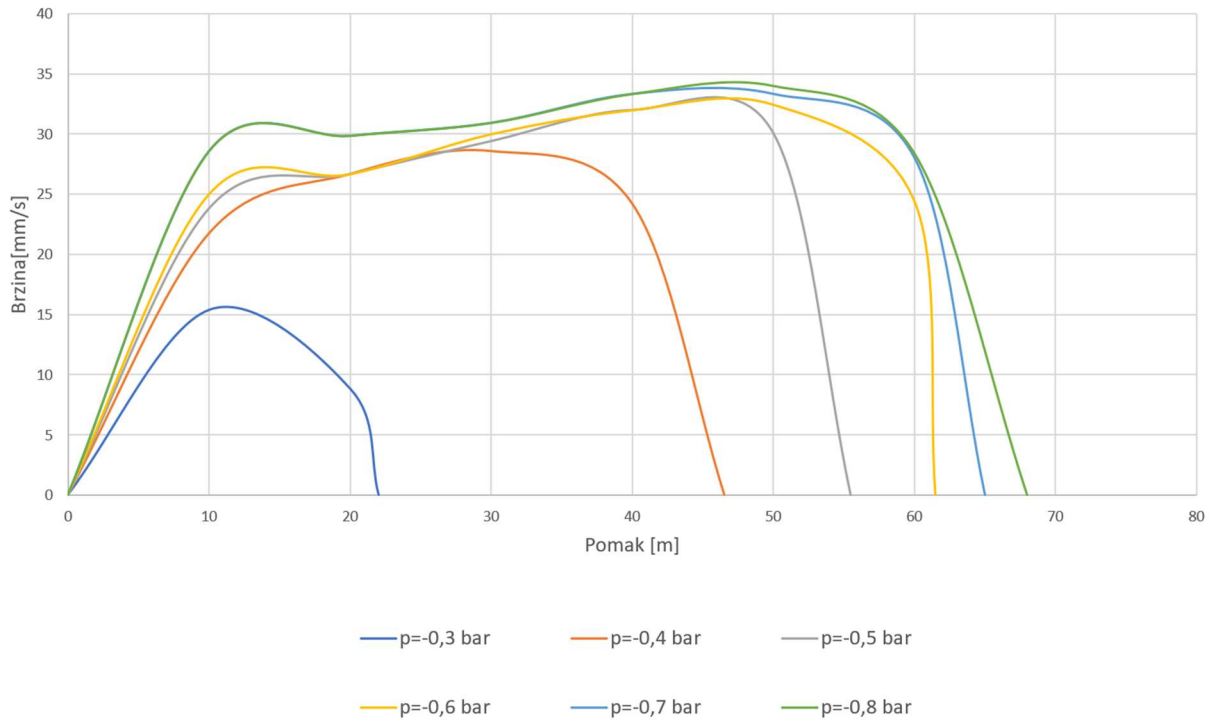
Iz rezultata može se vidjeti da je mišić 1 znatno usporio kada je opterećen silom od 30 N. Mišić 2 pod djelovanjem protusile 3 N više ne može ostvariti neke pomake, no one pomake koje je uspio ostvariti je vremenski ostvario veoma slično neopterećenom mišiću. U drugom mjeranju su izrađeni isti dijagrami kao i kod prvog mjeranja, te su prikazani na slikama 4.10, 4.11, 4.12. i 4.13.



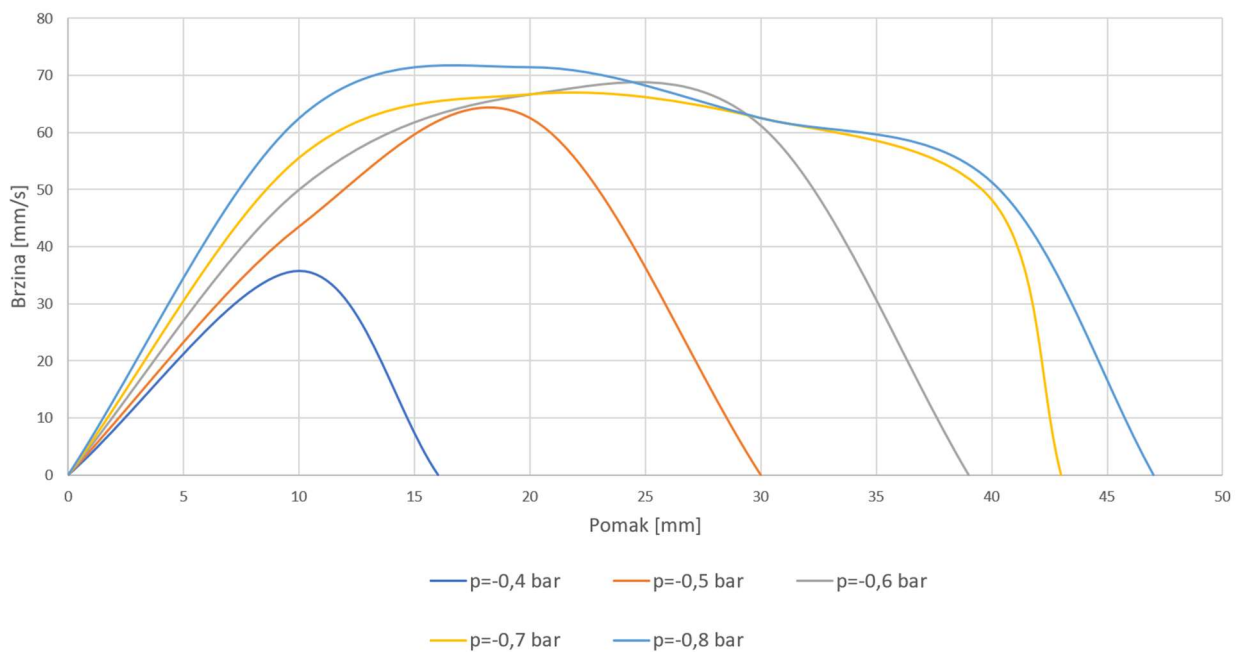
Slika 4.10 Ovisnost vremena o pomaku mišića 1 s opterećenjem 30 N



Slika 4.11.pomaka o vremenu mišića 2 s opterećenjem 3 N



Slika 4.12. Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 1 opterećenog silom 30 N



Slika 4.13 Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 2 opterećenog silom 3 N

Iz dijagrama sa slike 4.13. možemo vidjeti da brzina opterećenog mišića 2 u početku gibanja raste do određenog pomaka koji od prilike iznosi 12 mm, te daljnjim gibanjem polako opada sve dok ne dosegne krajnji pomak. Kod mišića 1 brzina se također povećava do određenog pomaka i počinje polako opadati, no kod mišića 1 kada je opterećen, brzina nakon pada počinje ponovno rasti, te naglo padne na krajnjem pomaku.

Posljednje mjerenje obavlja se na mišićima koji su opterećeni silama 50 N za mišić 1 i 5,5 N za mišić 2. Na mišiću 1 sila je uteg mase 5 kg, a na mišiću 2 je uteg mase 0,55 kg. Rezultati mjerenja prikazani su u tablicama 4.7 i 4.8.

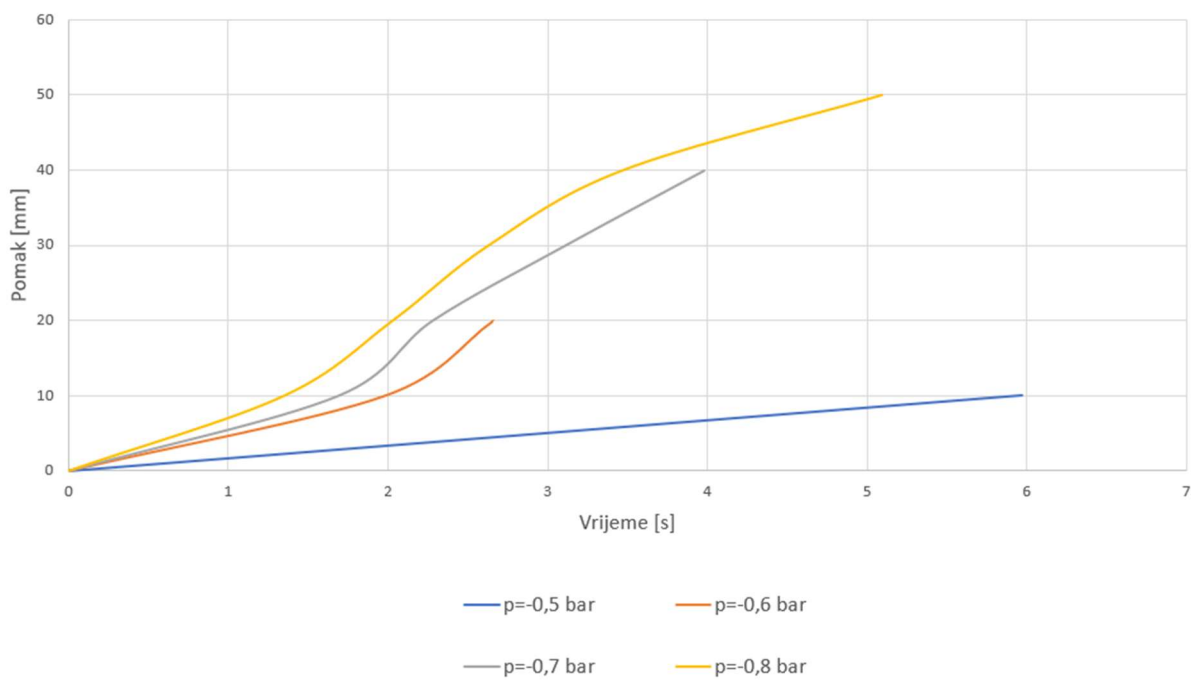
Tablica 4.7. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 1 opterećenog silom 50 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
10 mm	-	-	-	-	5,97	1,98	1,69	1,35
20 mm	-	-	-	-	-	2,66	2,28	2,03
30 mm	-	-	-	-	-	-	3,11	2,63
40 mm	-	-	-	-	-	-	3,98	3,47
50 mm	-	-	-	-	-	-	-	5,09

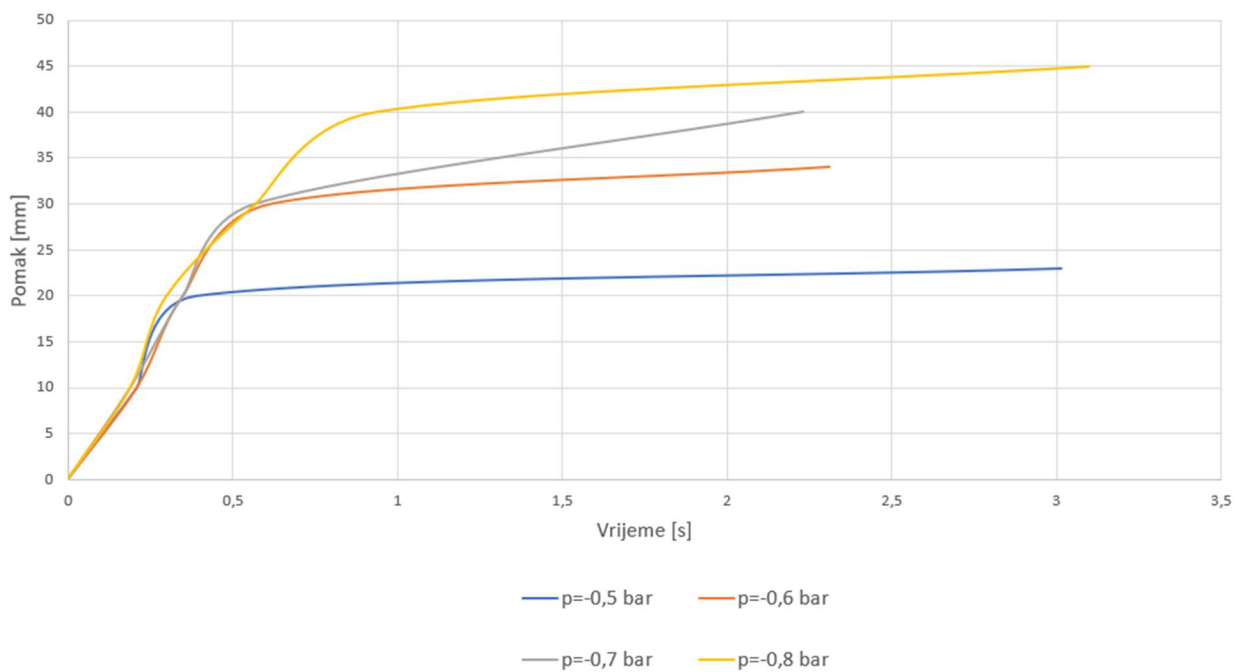
Tablica 4.8. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 2 opterećenog silom 5,5 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
10 mm	-	-	-	-	0,21	0,21	0,19	0,19
20 mm	-	-	-	-	0,39	0,35	0,35	0,3
30 mm	-	-	-	-	-	0,62	0,57	0,57
40 mm	-	-	-	-	-	-	2,23	0,93
50 mm	-	-	-	-	-	-	-	-

Iz rezultata se može vidjeti da kod većeg opterećenja mišići ostvare prve značajne pomake tek pri podtlaku od -0,5 bar. U ovom mjerenju su također izrađeni dijagrami ovisnosti pomaka o vremenu te su prikazani na slikama 4.14. za mišić 1 i 4.15. za mišić 2.

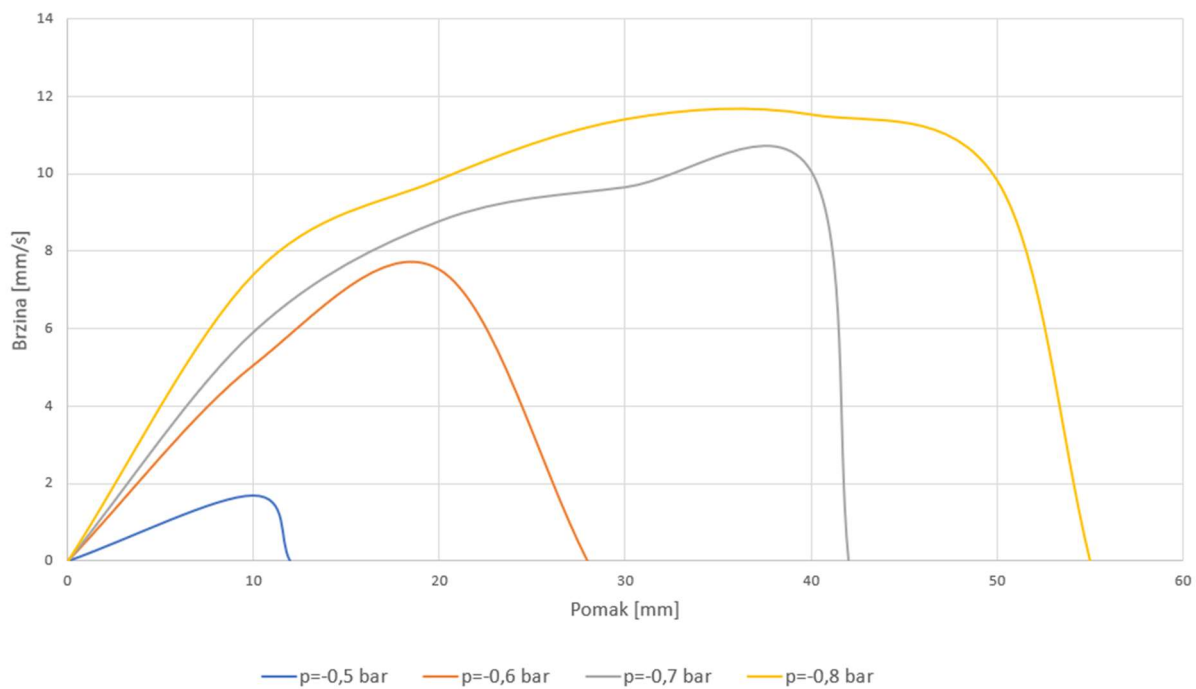


Slika 4.14. Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 1 opterećenog silom 50 N

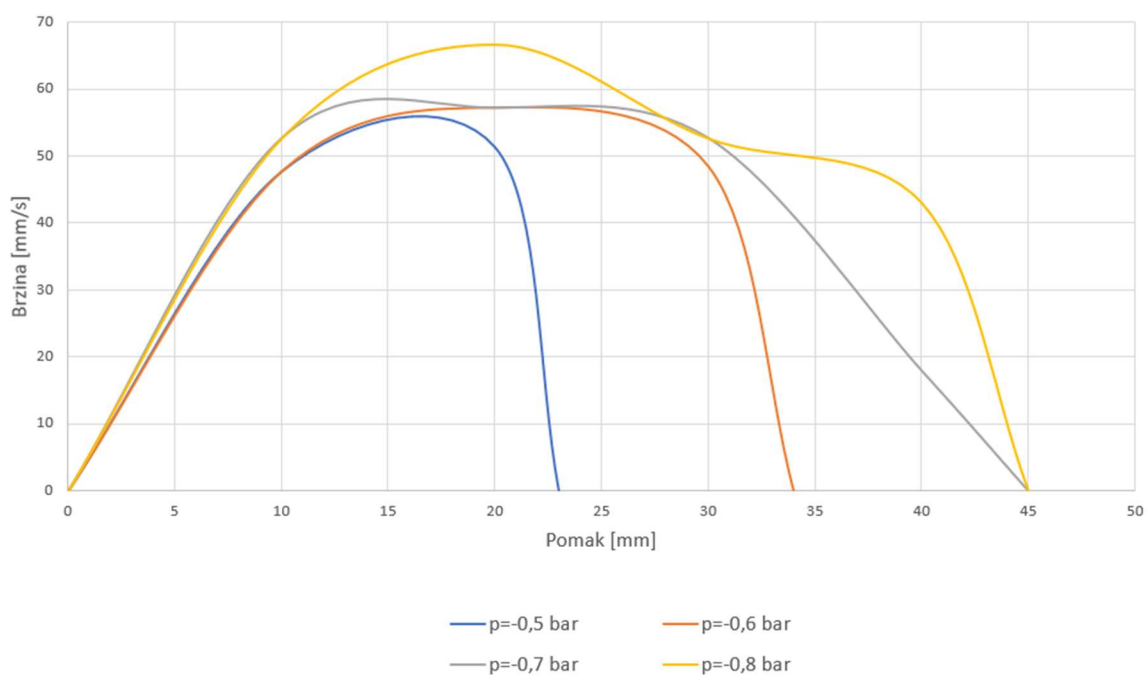


Slika 4.15 Dijagram ovisnosti pomaka o vremenu mišića 2 s opterećenjem 5 N

Kao i u prethodnim mjerenjima izrađeni su dijagrami odnosa brzine i pomaka te su prikazani na slikama 4.16. za mišić 1 i 4.17. za mišić 2.



Slika 4.16 Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 1 opterećenog silom 50 N

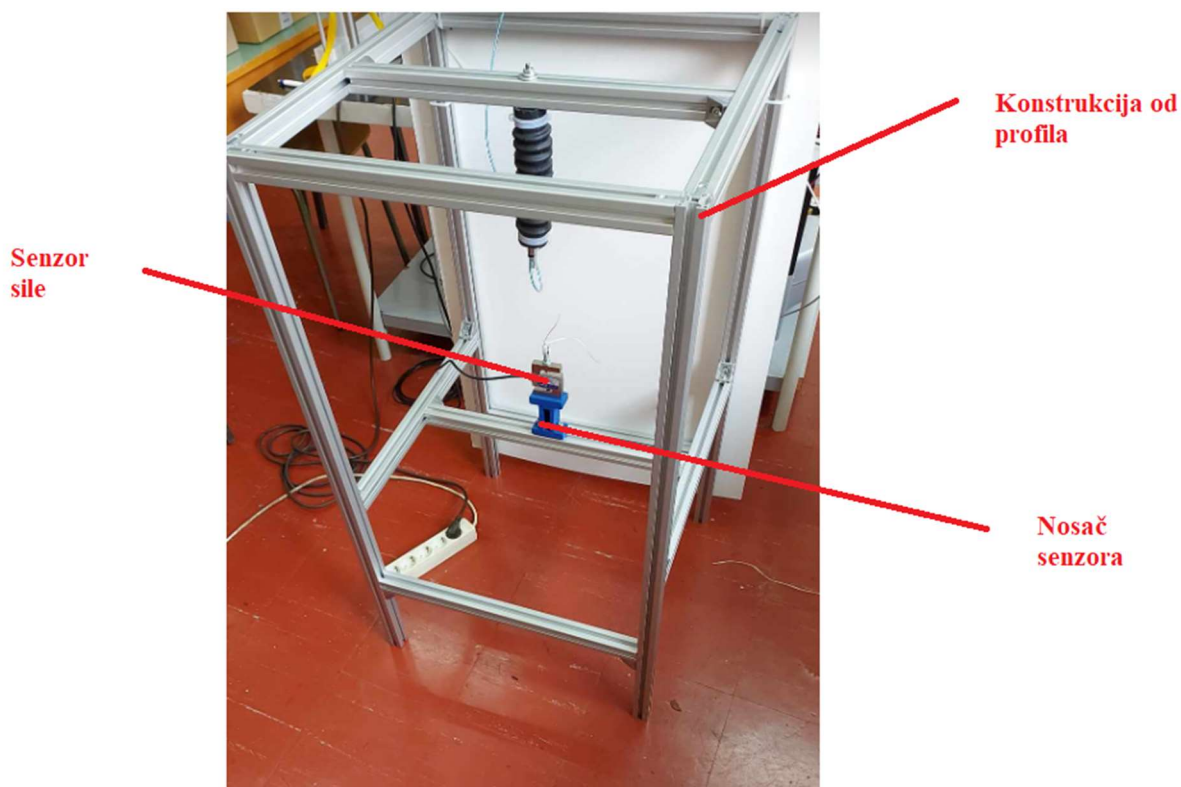


Slika 4.17. Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 2 opterećenog silom 5,5 N

Iz dijagrama sa slike 4.16 možemo vidjeti da kada je mišić 1 opterećen silom 50 N, za razliku od prethodnih mjerenja, brzina raste sve do trena kada ostvari najveći pomak, te zatim naglo padne. Tijekom provođenja zadnjeg ispitivanja mišića 1 je primijećeno da prvi pomak koji mišić ostvari pod opterećenjem nije linearno gibanje, već implozija nakon koje odmah velikom brzinom ostvaruje linearni pomak.

#### 4.4 Mjerenje najveće ostvarive sile mišića s kutnim pomakom

Za mišiće s kutnim pomakom izvodimo ista mjerenja kao i za mišiće s pravocrtnim pomakom. Mjerenja se izvode da posebno izrađenoj konstrukciji od aluminijskih profila prikazanoj na slici 4.18.



Slika 4.18 Konstrukcija za mjerenja mišića s kutnim pomakom

Mjerenje sila se izvodi na nekoliko kutnih pomaka, a to su  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  i  $90^\circ$ . Pošto se u ovom slučaju ne može mišić direktno povezati na senzor sile, potrebno je za svako mjerenje povezati senzor i mišić uzicom dovoljne dužine da mišić ostvari željeni kutni pomak kako je prikazano na slici 4.19. Kako bi se olakšalo i ubrzalo mjerenje, na uzicu su povezane podloške na određenim udaljenostima tako da svaka od njih dopušta mišiću samo određeni kutni pomak kada je povezana na njega.



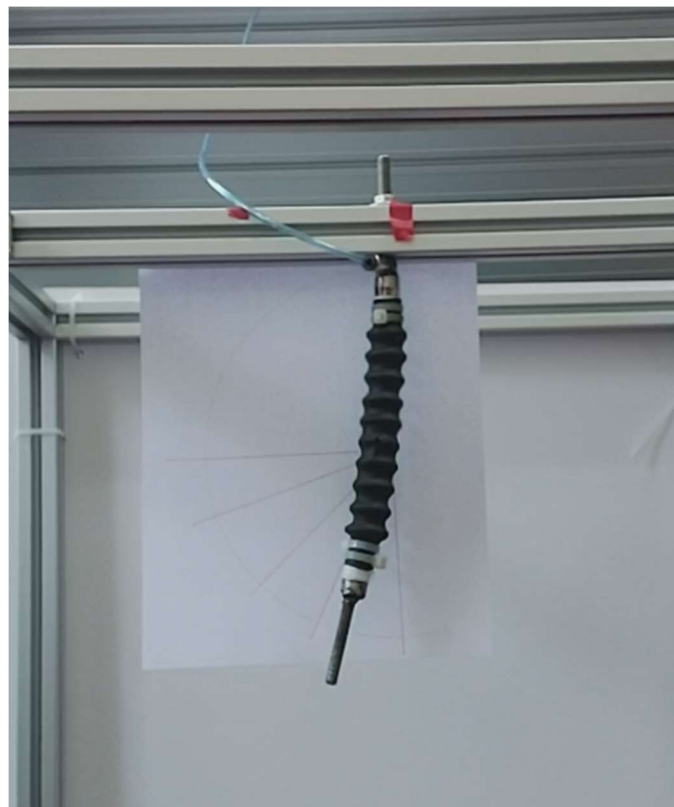


*Slika 4.19. Mišić 3 povezan na senzor sile*

Tijekom mjerenja se pokazalo da je taj način povezivanja nepouzdan, pošto su neke podloške dopuštale mišiću veći pomak nego su trebale. Bolje rješenje se dobilo povezivanjem jedne podloške za senzor i druge za mišić te su se za svako mjerenje ponovo povezivale središnjom uzicom. Ovo rješenje odužilo je proces ispitivanja, ali je dalo najbolje i najpouzdanije rezultate. Mjerenja sile su se vršila na 3 različita mišića s kutnim pomakom. Kako bi se olakšalo razumijevanje mjerenja, u nastavku rada mišić s većim promjerom i manjim razmakom između utora koji prikazan na slici 4.19. će se zvati mišić 3, mišić s većim promjerom i većim razmakom između utora kako bi se ispitaio utjecaj razmaka između utora utječe na radna svojstva mišića, prikazan na slici 4.20 će se zvati mišić 4, te kao i kod mišića s pravocrtanim pomakom, mišić s manjim promjerom prikazan na slici 4.21 će se zvati mišić 5.



*Slika 4.20. Mišić 4*

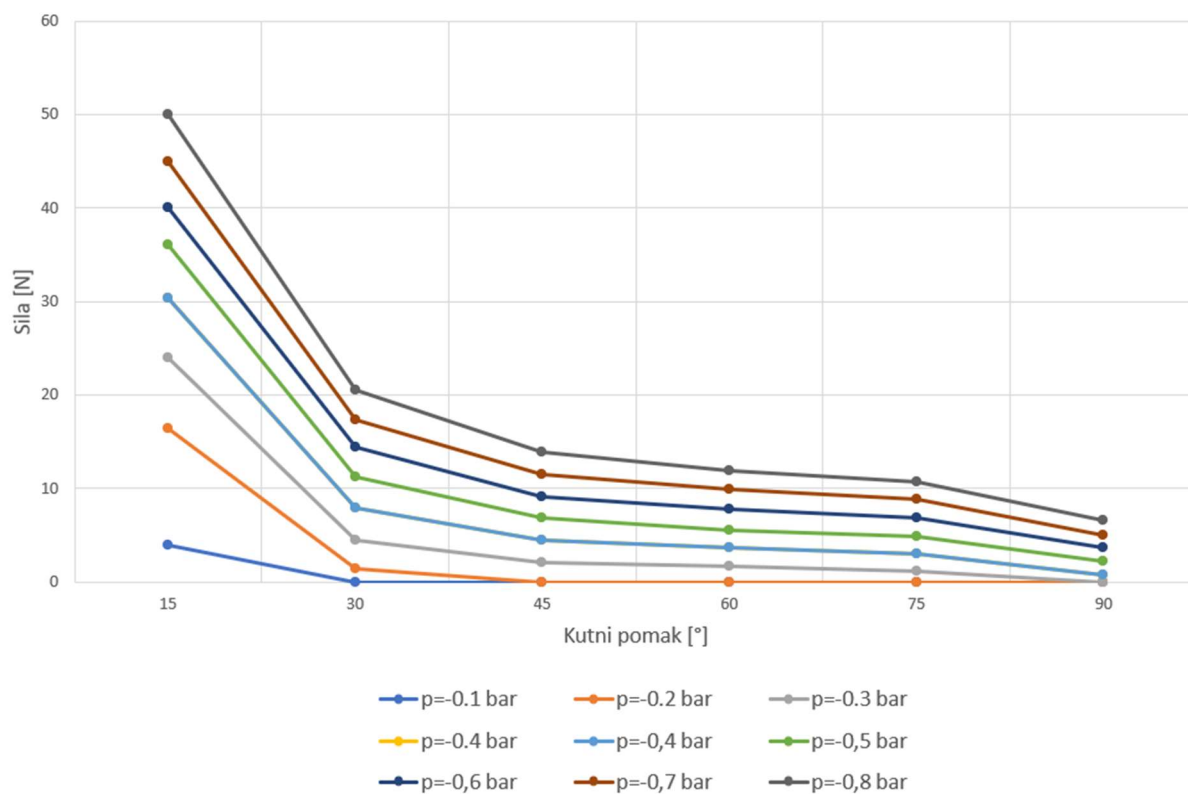


*Slika 4.21. Mišić 5*

Rezultati mjerenja sile prikazani su u tablici 4.9., te je na slici 4.22 prikazan dijagram ovisnosti sile i pomaka za širi mišić 3.

Tablica 4.9 Ostvarene sile mišića 3

Sila N	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
15°	4	16,4	24	30,4	36	40	45	50
30°	-	1,4	4,5	7,9	11,2	14,4	17,4	20,6
45°	-	-	2,05	4,5	6,85	9,15	11,5	13,85
60°	-	-	1,65	3,7	5,5	7,8	9,9	11,95
75°	-	-	1,2	3,05	4,95	6,85	8,85	10,7
90°	-	-	-	0,75	2,2	3,65	5	6,6



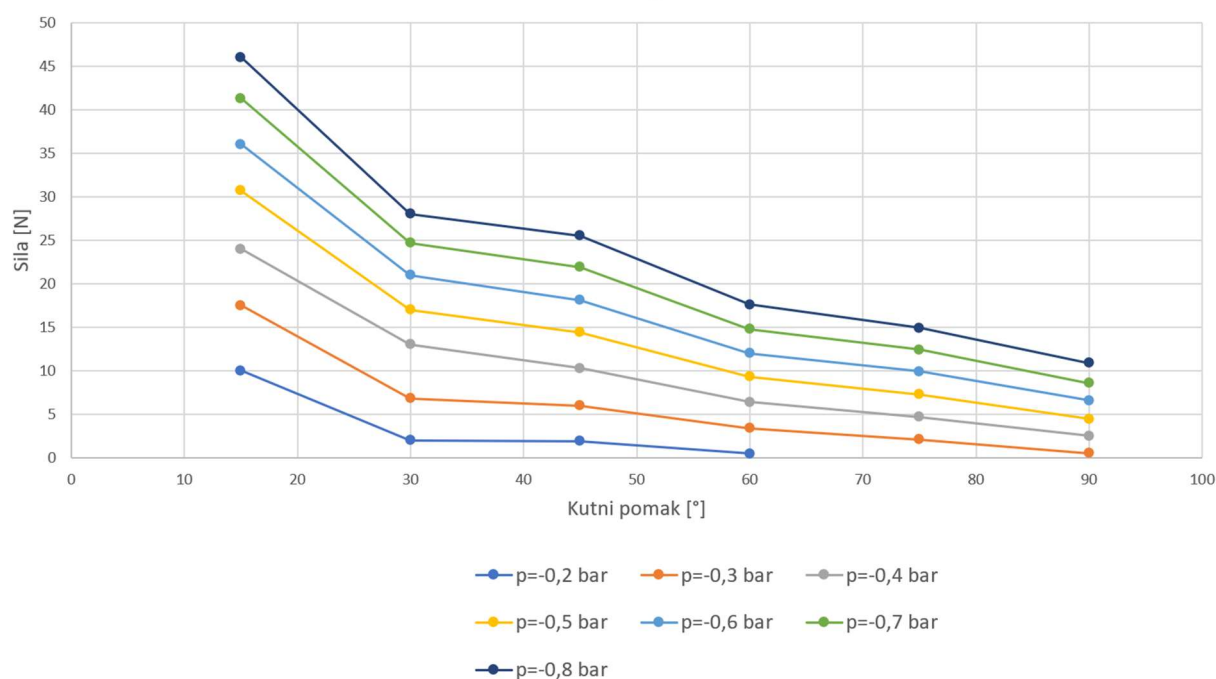
Slika 4.22 Maksimalna ostvarena sila u ovisnosti o kutnom pomaku i podtlaku mišića 3

Iz rezultata mjerenja može se vidjeti da ostvarena maksimalna sila naglo padne između pomaka 15° i 30° što ukazuje na snažnu protusilu zbog krutosti bužira.

Rezultati mjerenja mišića 4 prikazani su u tablici 4.10., te je dijagram ovisnosti sile o kutnom pomaku prikazan na slici 4.23.

Tablica 4.10. Ostvarene sile šireg mišića 4

Sila N	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
15°	3	10	17,5	24	30,7	36	41,3	46
30°	-	2	6,8	13	17	21	24,7	28
45°	-	1,9	6	10,3	14,4	18,1	21,9	25,5
60°	-	0,5	3,4	6,4	9,3	12	14,8	17,6
75°	-	-	2,1	4,7	7,3	9,9	12,4	11,9
90°	-	-	0,55	2,5	4,45	6,6	8,6	10,9



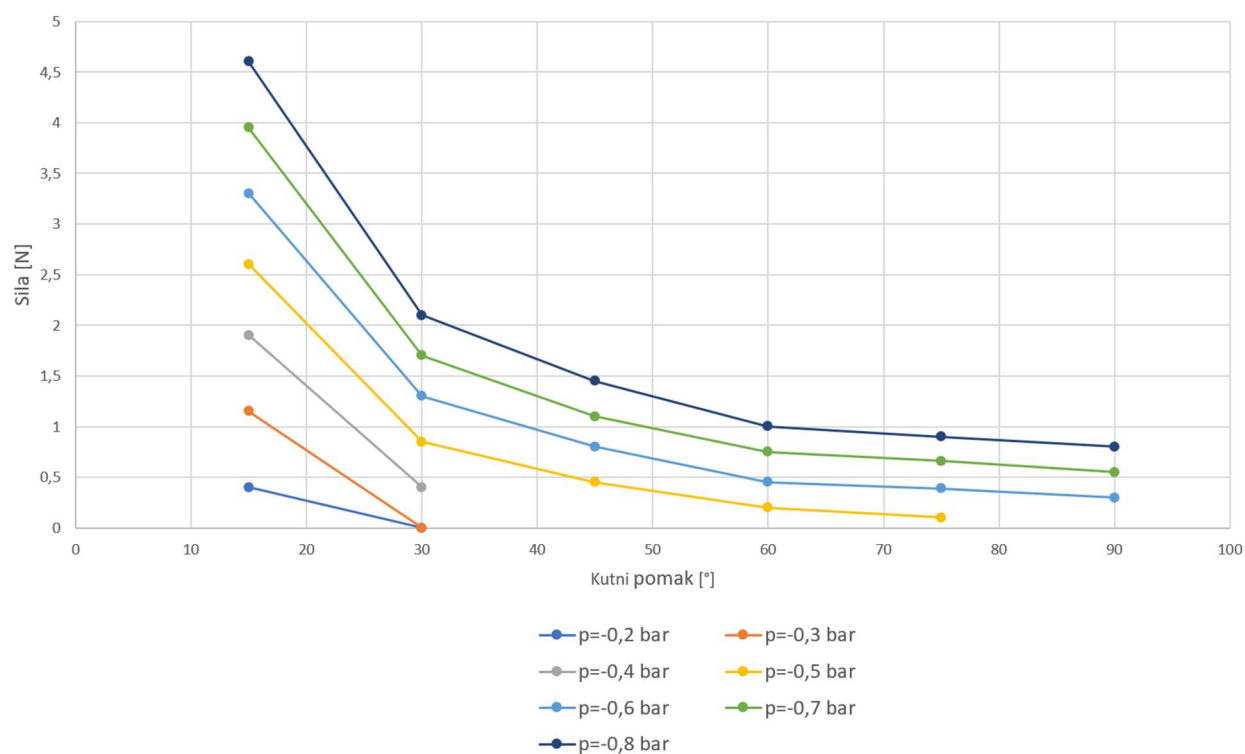
Slika 4.23 Maksimalna ostvarena sila u ovisnosti o kutnom pomaku i podtlaku mišića 4.

Usporedbom rezultata mjerenja mišića 3 i mišića 4 može se vidjeti da mišić 3 ostvaruje veće maksimalne sile, no mišić 4 ima manje opadanje maksimalne sile s porastom pomaka, te postiže veće kutne pomake što ukazuje na manju protusilu u materijalu mišića tijekom deformiranja. Usporedbom rezultata iz prethodnog diplomskog rada [6], može se vidjeti da novo izrađeni mišići ostvaruju znatno manju silu. Prethodni mišići ostvaruju maksimalnu silu od 123 N, dok novi mišići ostvaruju maksimalnu silu od samo 46 N. Štoviše, pad sile zbog nalijeganja materijala je znatnije manji od oba mišića šireg promjera.

Posljednje mjerenje sile je za mišić 5, te su rezultati toga mjerenja prikazani u tablici 4.11. te u pripadajućem dijagramu na slici 4.24.

Tablica 4.11. Ostvarene sile mišića 5

Sila N	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
15°	-	0,4	1,15	1,9	2,6	3,3	3,95	4,6
30°	-	-	-	0,4	0,85	1,3	1,7	2,1
45°	-	-	-	-	0,45	0,8	1,1	1,45
60°	-	-	-	-	0,20	0,45	0,75	1
75°	-	-	-	-	0,1	0,39	0,66	0,9
90°	-	-	-	-	-	0,3	0,55	0,8



Slika 4.24. Maksimalna ostvarena sila u ovisnosti o kutnom pomaku i podtlaku kod mišića 5

Iz rezultata mjerenja može se vidjeti da mišić 5 kod manjih podtlaka ne postiže dovoljnu silu za pomicanje iznad 15°. Također, postignute sile su iznimno male pa će se ispitivanje brzina i vremena gibanja pod opterećenjem morati provoditi sa utezima znatno manjih masa.

#### 4.5 Ispitivanje ovisnosti pomaka o vremenu i brzini kod mišića s kutnim pomakom

Kao i kod mišića s pravocrtnim pomakom mjere se pomaci u vremenu i brzine postizanja određenih pomaka za svaki mišić za 3 različita opterećenja. Mišići 3 i 4 biti će opterećeni silama od 0 N, 3 N i 5,5N, dok će mišić 5 biti opterećen silama od 0 N, 0,25 N i 0,5 N. Prvo se izvode mjerenja na neopterećenim mišićima. Pošto nema senzora koji bi pouzdano izmjerio kutni pomak mišića, postignuti kutni pomaci se određuju na način da se pomaci mišića snimaju, te se vremena kasnije odrede pažljivom analizom snimaka u nekom software-u za uređivanje snimaka, koji je u ovom slučaju Microsoft Clipchamp koji je dostupan besplatno na operativnom sustavu Window 11. U ovom ispitivanju mjere se vremena postizanja kutnih pomaka od 25°, 45°, 70°, 90°, te maksimalnog postignutog pomaka svakog mišića. Prethodno je spomenuto da svaki od izrađenih mišića ostvaruje postupno veći maksimalni pomak, što se može vidjeti na slici 1.21. Za mišić 3 maksimalni ostvareni pomak je 120°, za mišić 4 utora je 130°, te za mišić 5 je to 135°. Rezultati prvog ispitivanja mišića većih promjera prikazani su u tablicama 4.12. i 4.13.

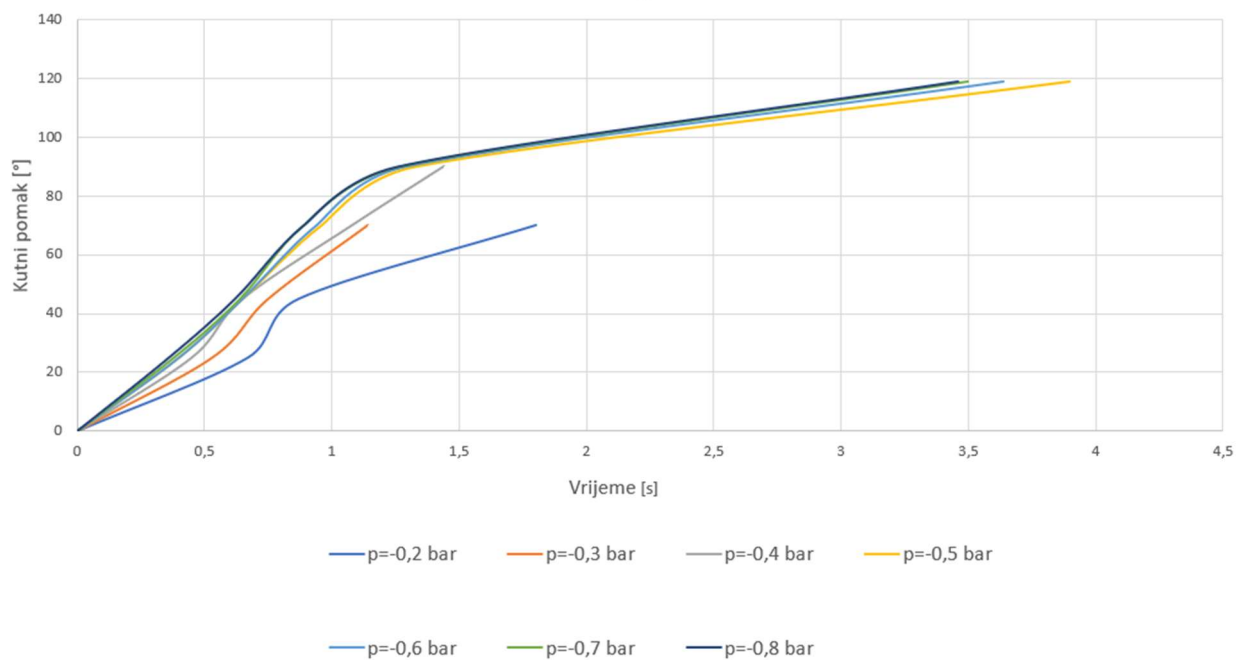
Tablica 4.12 Vremena ostvarivanja pomaka šireg mišića 3 opterećenog silom 0 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
25°	-	0,67	0,53	0,45	0,4	0,4	0,38	0,36
45°	-	0,87	0,75	0,65	0,65	0,65	0,64	0,62
70°	-	1,8	1,14	1,08	0,96	0,94	0,89	0,89
90°	-	-	-	1,44	1,33	1,29	1,27	1,26
120°	-	-	-	-	3,9	3,64	3,5	3,46

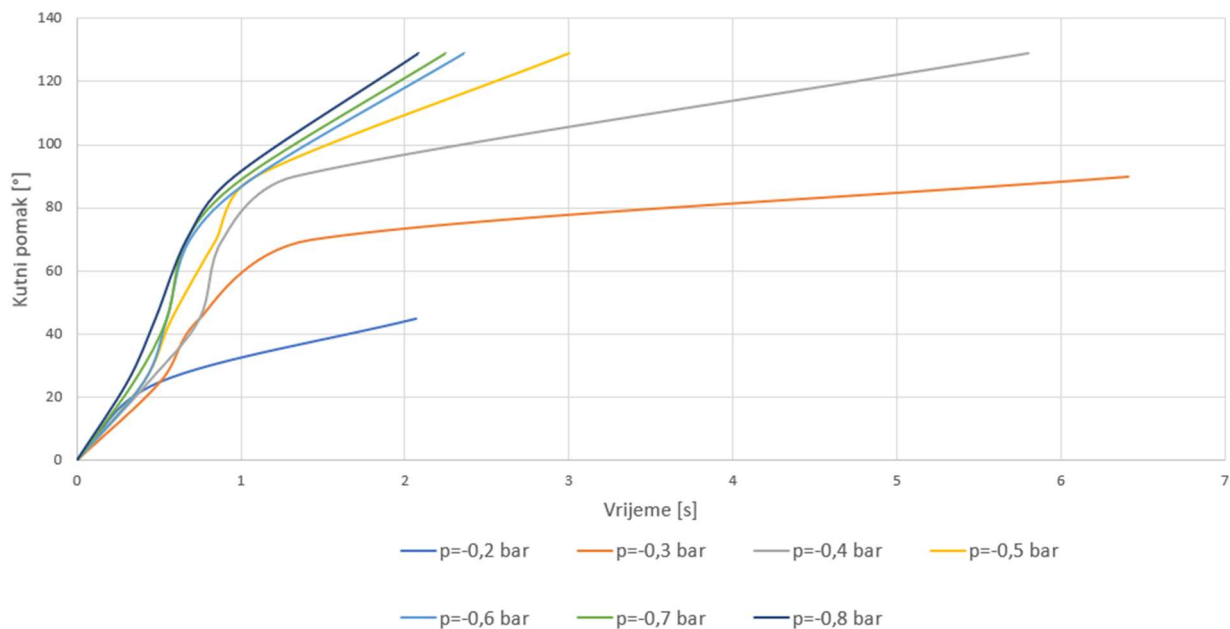
Tablica 4.13 Vremena ostvarivanja pomaka mišića 4 opterećenog silom 0 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
25°	-	0,51	0,51	0,44	0,41	0,41	0,35	0,31
45°	-	2,07	0,75	0,75	0,58	0,59	0,55	0,48
70°	-	-	1,43	1,43	0,85	0,69	0,67	0,67
90°	-	-	6,41	6,41	1,09	1,09	1,03	0,96
130°	-	-	-	-	3	2,25	2,25	2,08

Dijagrami ovisnosti pomaka o vremenu za mišiće većih promjera prikazani su na slikama 4.25 za mišić 3 i 4.26. za širi mišić 4.



Slika 4.25. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 3 s opterećenjem 0 N

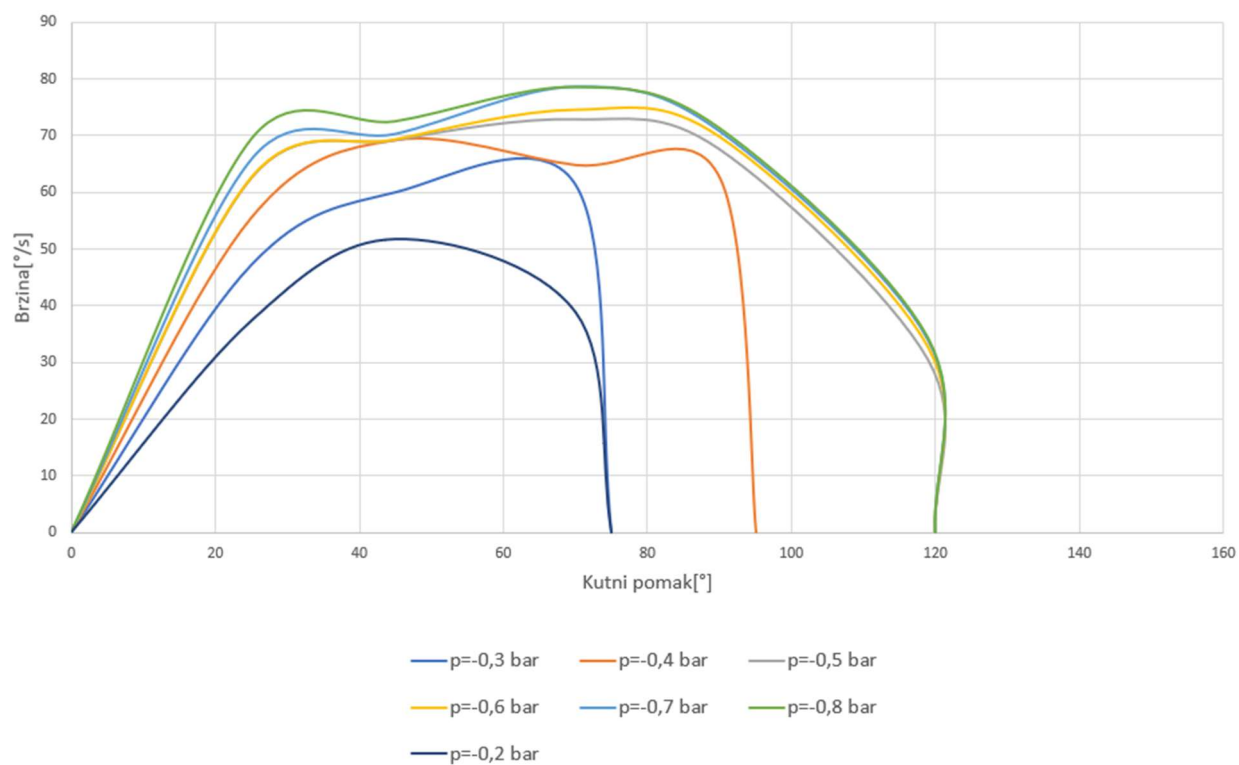


Slika 4.26 Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 4 s opterećenjem 0 N

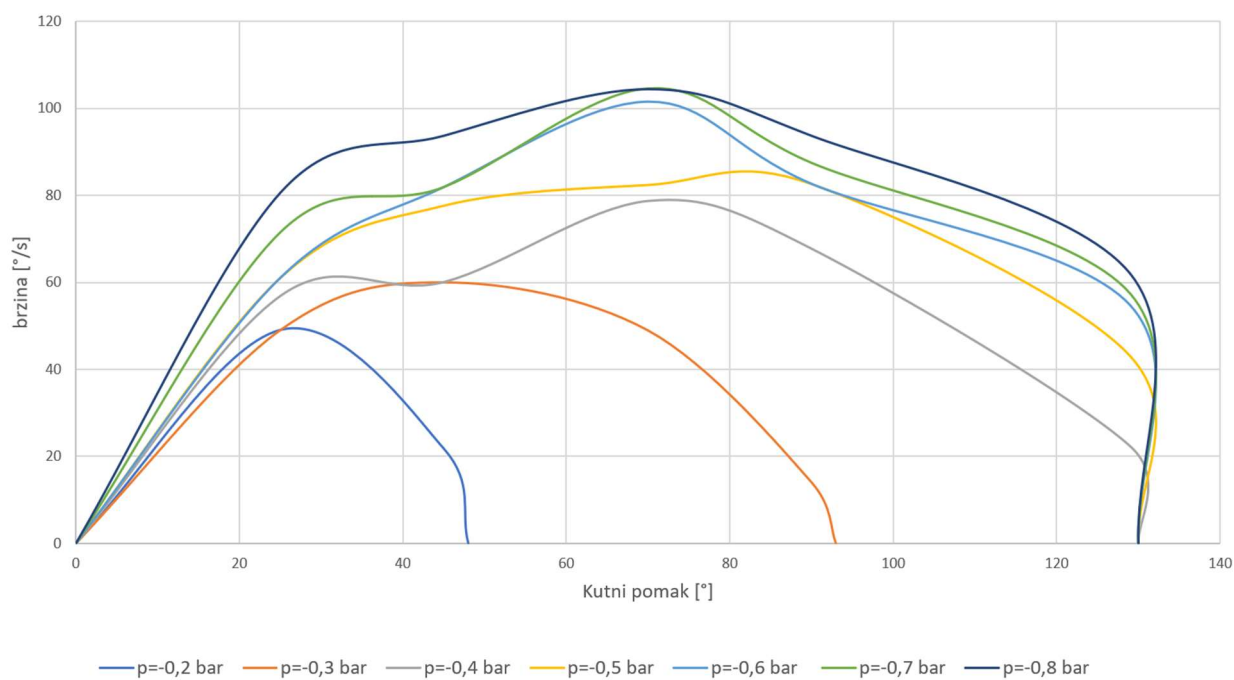


Dijagrami ovisnosti brzine i pomaka prikazani su na slikama 4.27 za mišić 3 i 4.28 za mišić

4.



Slika 4.27. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog mišića 3 opterećenog silom 0 N



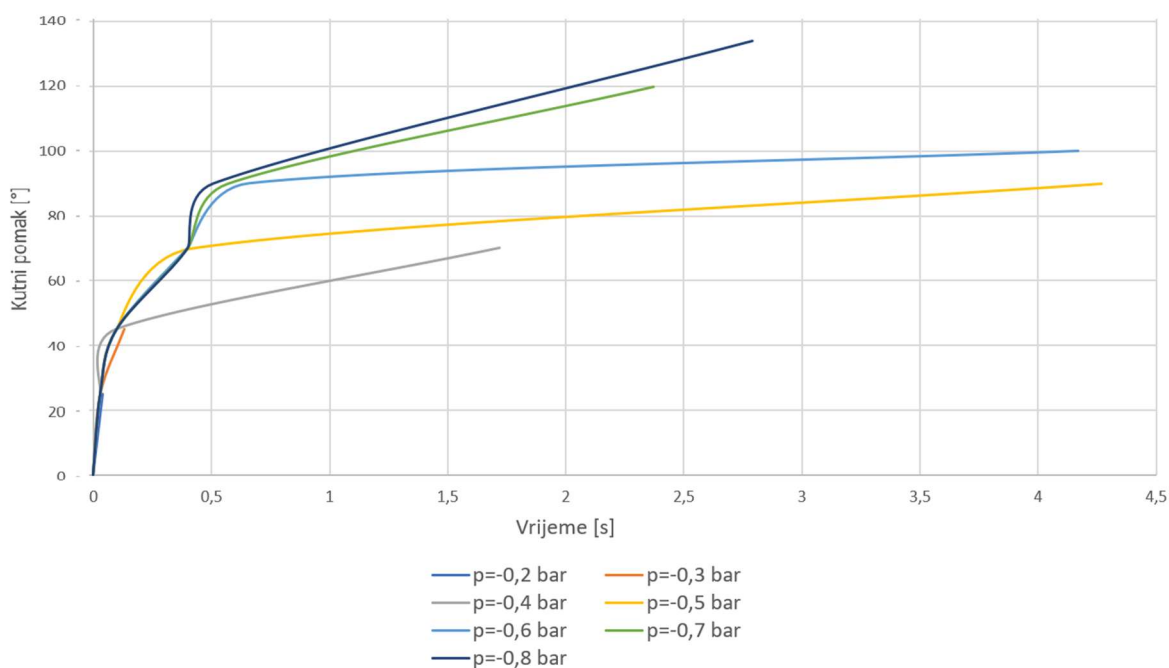
Slika 4.28. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 4 opterećenog silom 0 N

Iz rezultata možemo vidjeti da mišić 4 postiže veće brzine od mišića 3. Kako između utora ima manje materijala koji naliježe, u mišiću se javlja manja otporna sila što mu omogućuje ostvarivanje većih brzina i pomaka.

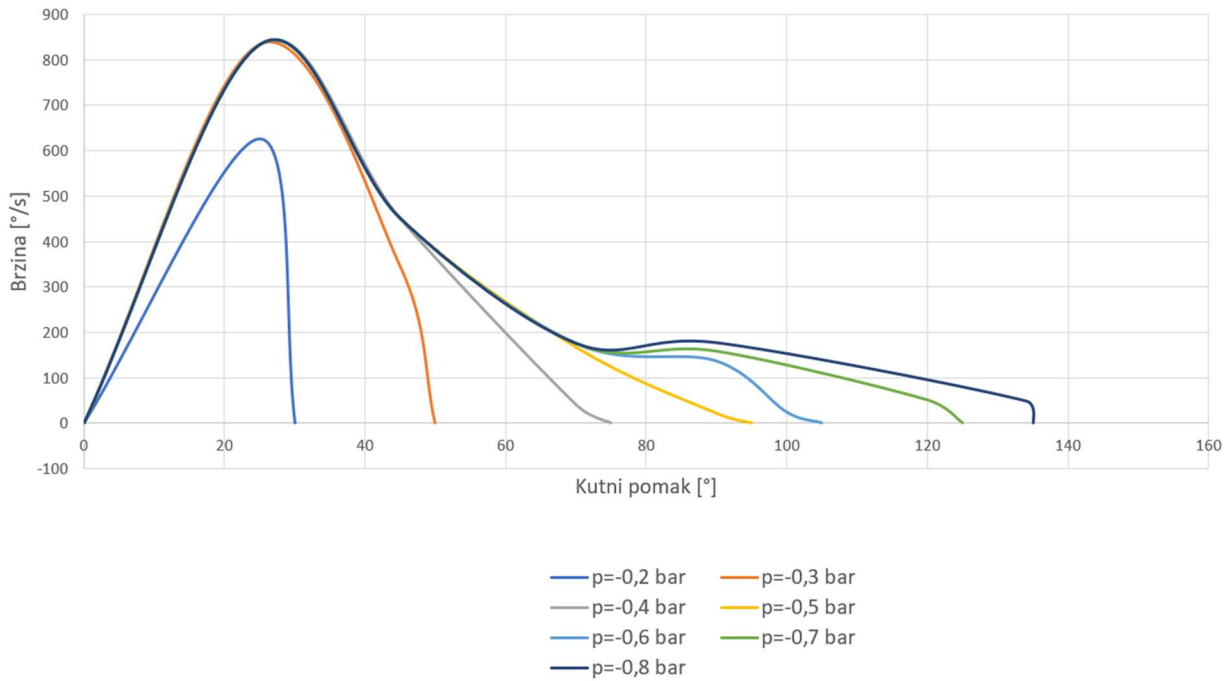
Rezultati ispitivanja mišića 5 prikazani su u tablici 4.14. zajedno s pripadajućim dijagramima na slikama 4.29 i 4.30.

Tablica 4.14. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 5 opterećenog silom 0 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
25°	-	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
45°	-	-	0,13	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
70°	-	-	-	1,72	0,42	0,4	0,4	0,4
90°	-	-	-	-	4,27	0,66	0,57	0,51
135°	-	-	-	-	-	-	-	2,79



Slika 4.29. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 5 s opterećenjem 0 N



Slika 4.30. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 5 opterećenog silom 0 N

Ispitivanje mišića 5 pokazalo je da on postiže iznimno visoke brzine do pomaka od približno 34°, nakon čega brzina oštro pada.

U sljedećem mjerenju ispituju se mišići opterećeni srednjom silom. Za mišiće većih promjera je to 3 N, a za mišić 5 je to 0,25 N. Za mišiće većih promjera su to isti utezi kao za mišić 2, a za mišić manjeg promjera je to metalna podloška vanjskog promjera  $\Phi 48$  mm. Rezultati drugog mjerenja prikazani su u tablicama 4.15, 4.16. za mišiće većeg promjera i 4.17 za mišić 5.

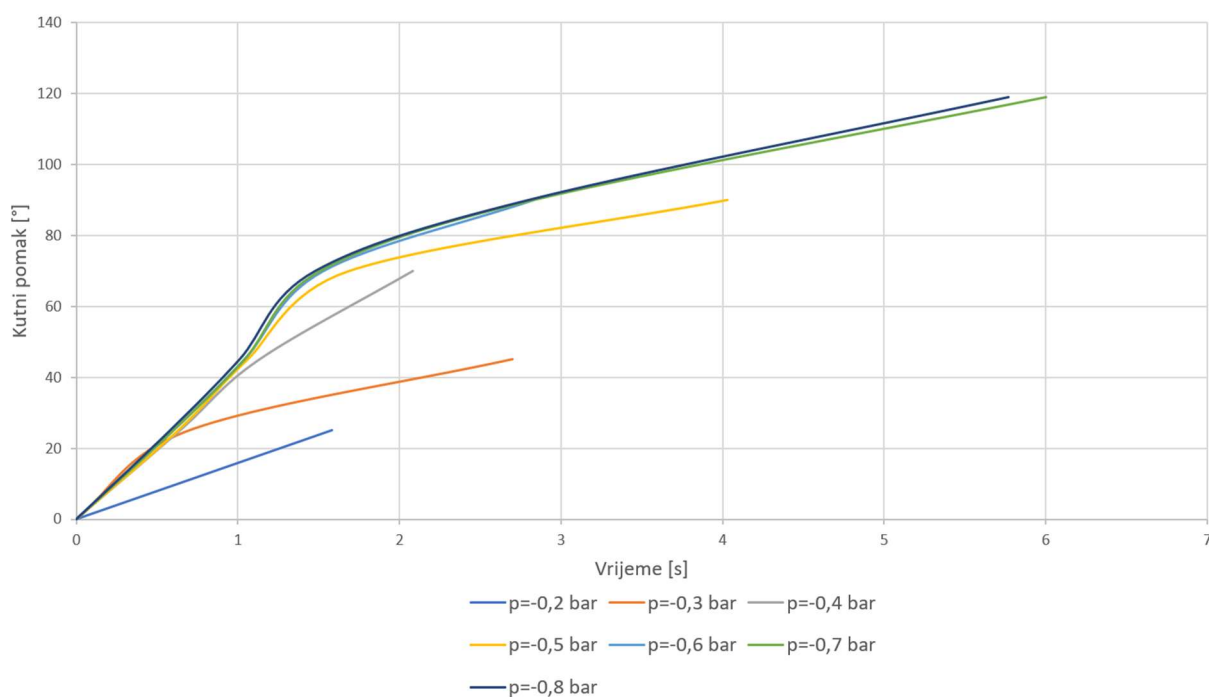
Tablica 4.15 Vremena ostvarivanja pomaka mišića 3 opterećenog silom 3 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
25°	-	1,58	0,7	0,64	0,63	0,6	0,6	0,58
45°	-	-	2,7	1,13	1,06	1,04	1,04	1,01
70°	-	-	-	2,08	1,69	1,53	1,51	1,48
90°	-	-	-	-	4,03	2,83	2,83	2,8
120°	-	-	-	-	-	-	6	5,77

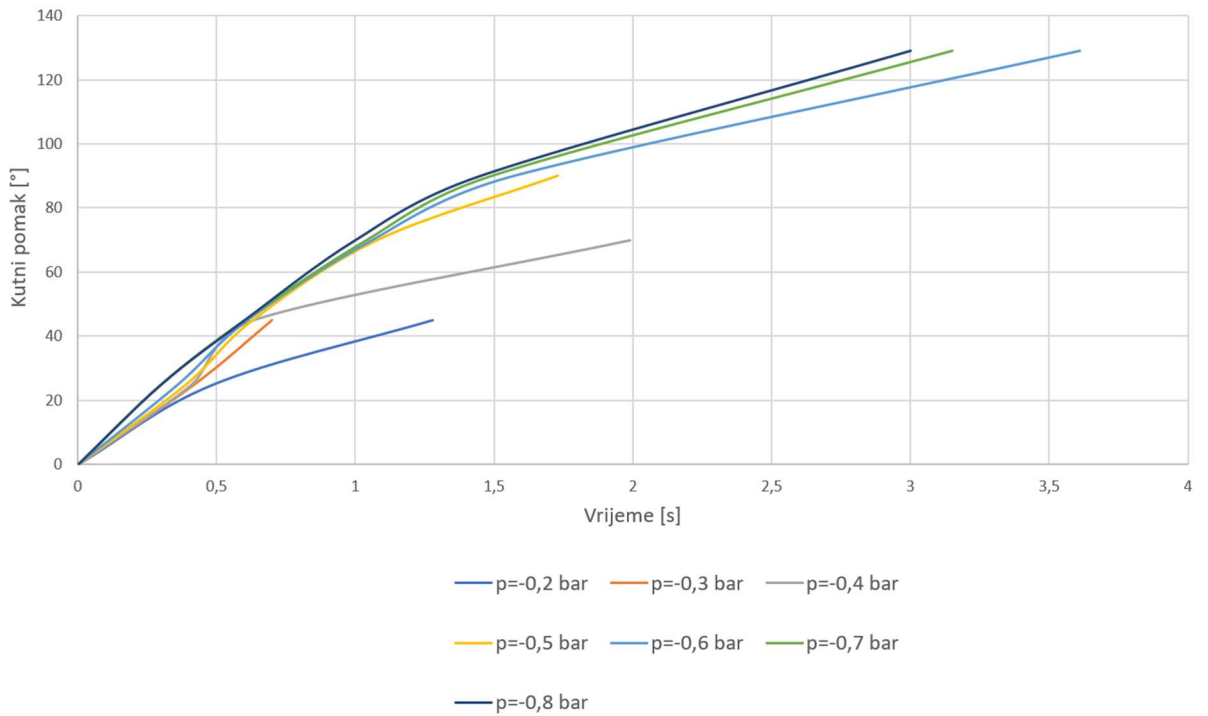
Tablica 4.16. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 4 opterećenog silom 3 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
25°	-	0,49	0,42	0,41	0,39	0,36	0,3	0,3
45°	-	1,28	0,7	0,63	0,63	0,61	0,6	0,6
70°	-	-	-	1,99	1,08	1,06	1,04	1
90°	-	-	-	-	1,73	1,57	1,49	1,45
120°	-	-	-	-	-	3,61	3,15	3

Iz rezultata drugog mjerenja mišića većeg promjera možemo vidjeti da je mišić 4 postignuo veće pomake od mišića 3, te pomake koje su oba postigla je ostvario brže. Dijagrami ovisnosti pomaka o vremenu prikazani su na slikama 4.31. za mišić 3 i 4.32. za mišić 4.

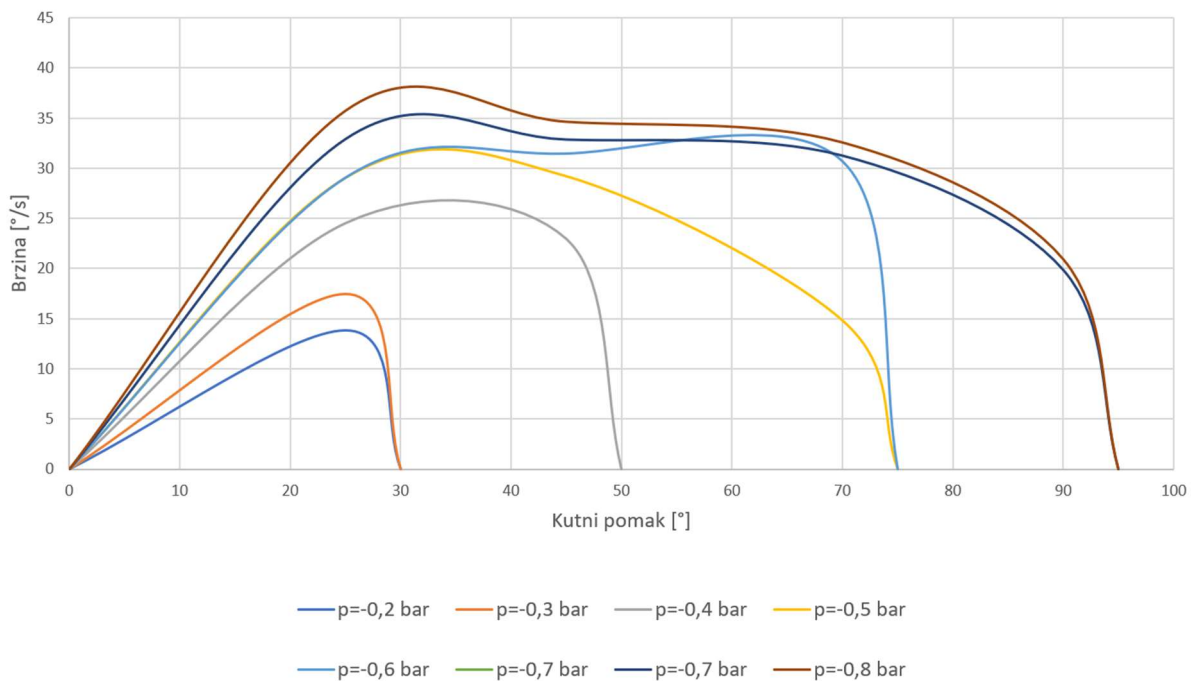


Slika 4.31 Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 3 s opterećenjem 3 N

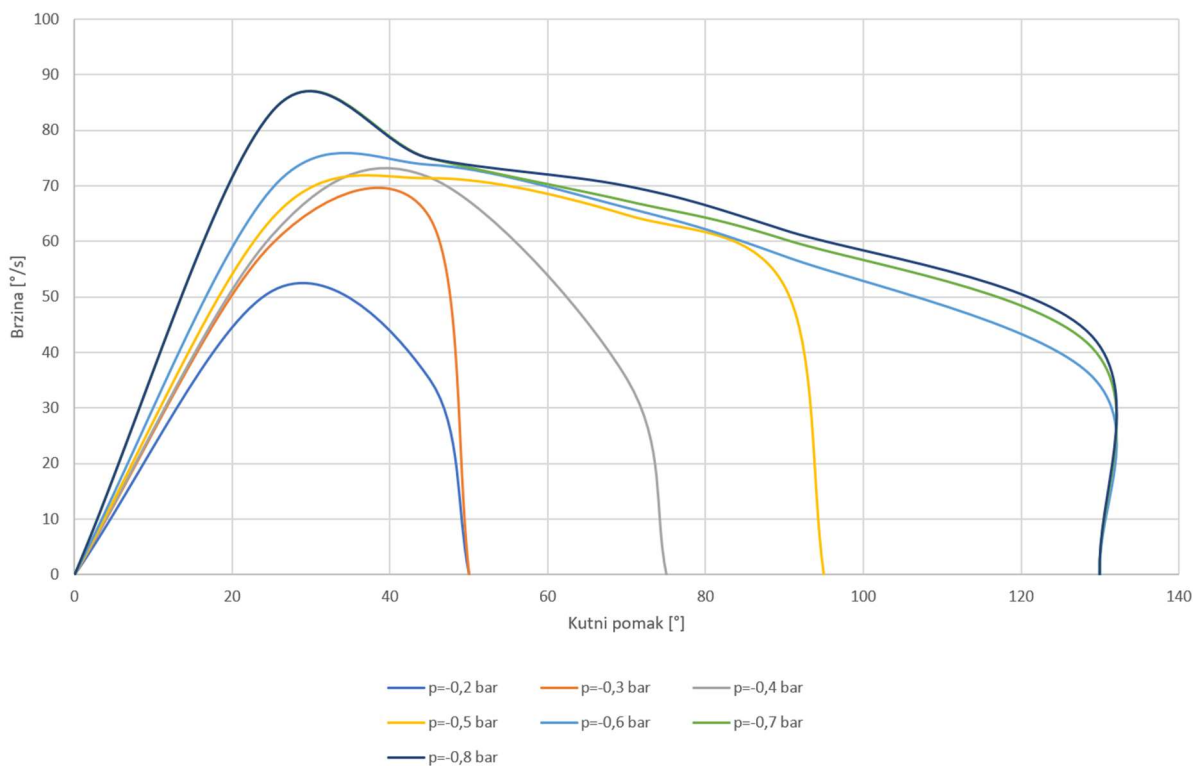


Slika 4.32 Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 4 s opterećenjem 3 N

Dijagrami ovisnosti brzine o pomaku za mišiće većeg promjera prikazani su na slikama 4.33. za mišić s manjim razmakom utora i 4.34. za mišiće s većim razmakom utora.



Slika 4.33 Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 3 opterećenog silom 3 N



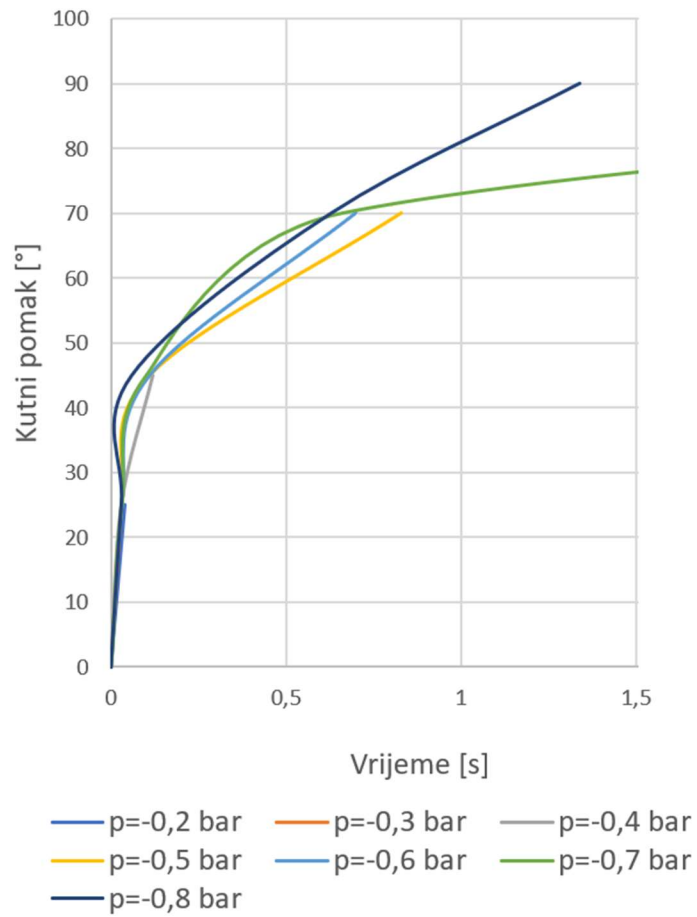
Slika 4.34 Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 4 opterećenog silom 3 N

Kako je prethodno spomenuto, mišić 5 postiže male sile pri kutnom pomaku pa su utezi trebali biti improvizirani sa dostupnim sredstvima u laboratoriju. Rezultati drugog mjerenja mišića 5 su prikazani u tablici 4.17

Tablica 4.17 Vremena ostvarivanja pomaka mišića 5 opterećenog silom 0,25 N

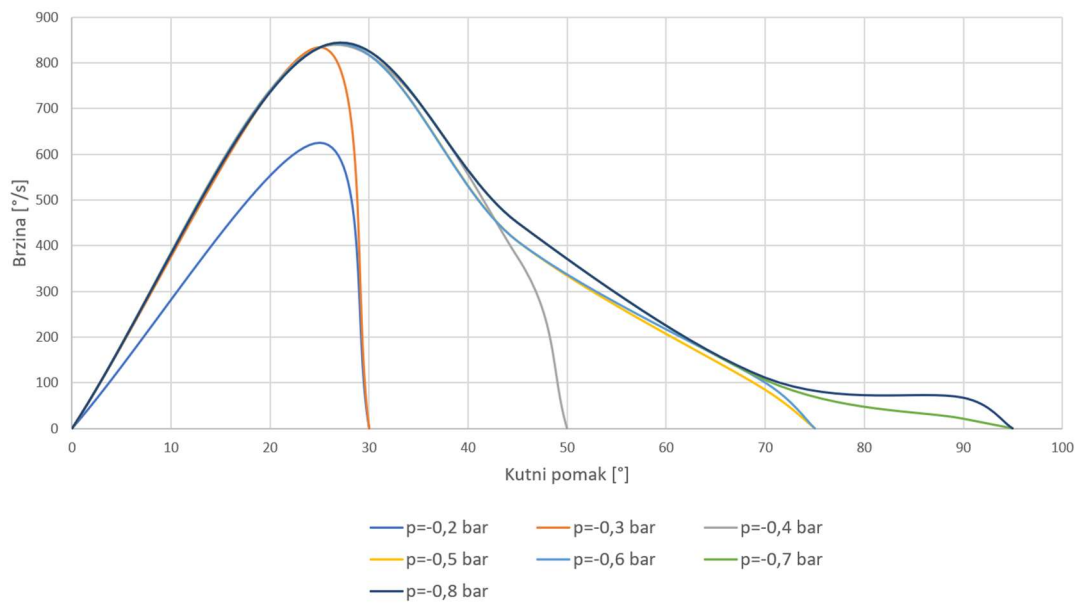
Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
25°	-	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
45°	-	-	-	0,12	0,11	0,11	0,1	0,1
70°	-	-	-	-	0,83	0,7	0,66	0,63
90°	-	-	-	-	-	-	4,23	1,34
120°	-	-	-	-	-	-	-	-

Dijagram ovisnosti kutnog pomaka u vremenu prikazan je na slici 4.35.



Slika 4.35. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 5 s opterećenjem 0,25 N

Dijagram ovisnosti brzine i pomaka mišića 5 u drugom ispitivanju prikazan je na slici 3.36.



Slika 4.36. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 5 opterećenog silom 0,25 N



Posljednje mjerenje vrši se kao o kod pravocrtnih mišića, s većim opterećenjem. Kod mišića većeg promjera to je uteg od 0,55 kg. Rezultati drugog mjerenja mišića većeg promjera prikazani su u tablicama 4.18. za mišić 3 i 4.19. za mišić 4. Iz rezultata mjerenja se može vidjeti da mišić 5 opterećen silom 0,25 N postiže gotovo iste brzine kao i neopterećen mišić 5 do kutnog pomaka od 45°, nakon čega mu brzina pada više nego neopterećenom mišiću 5. Najveći ostvareni kutni pomak mišića opterećenog silom 0,25 N je 90° dok je neopterećenom mišiću maksimalni ostvareni kutni pomak 135°.

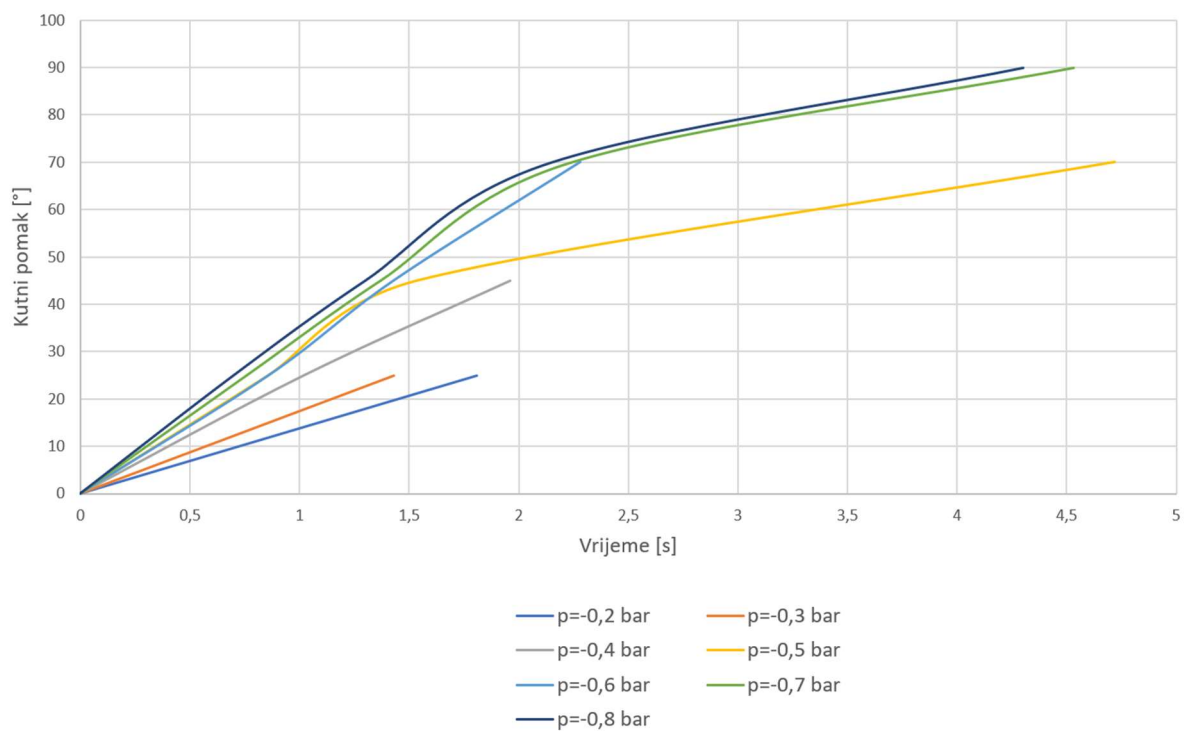
Tablica 4.18 Vremena ostvarivanja pomaka mišića 3 opterećenog silom 5,5 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
25°	-	1,81	1,43	1,02	0,86	0,86	0,76	0,7
45°	-	-	-	1,96	1,54	1,34	1,37	1,3
70°	-	-	-	-	4,72	2,28	2,24	2,15
90°	-	-	-	-	-	-	4,43	4,3
120°	-	-	-	-	-	-	-	-

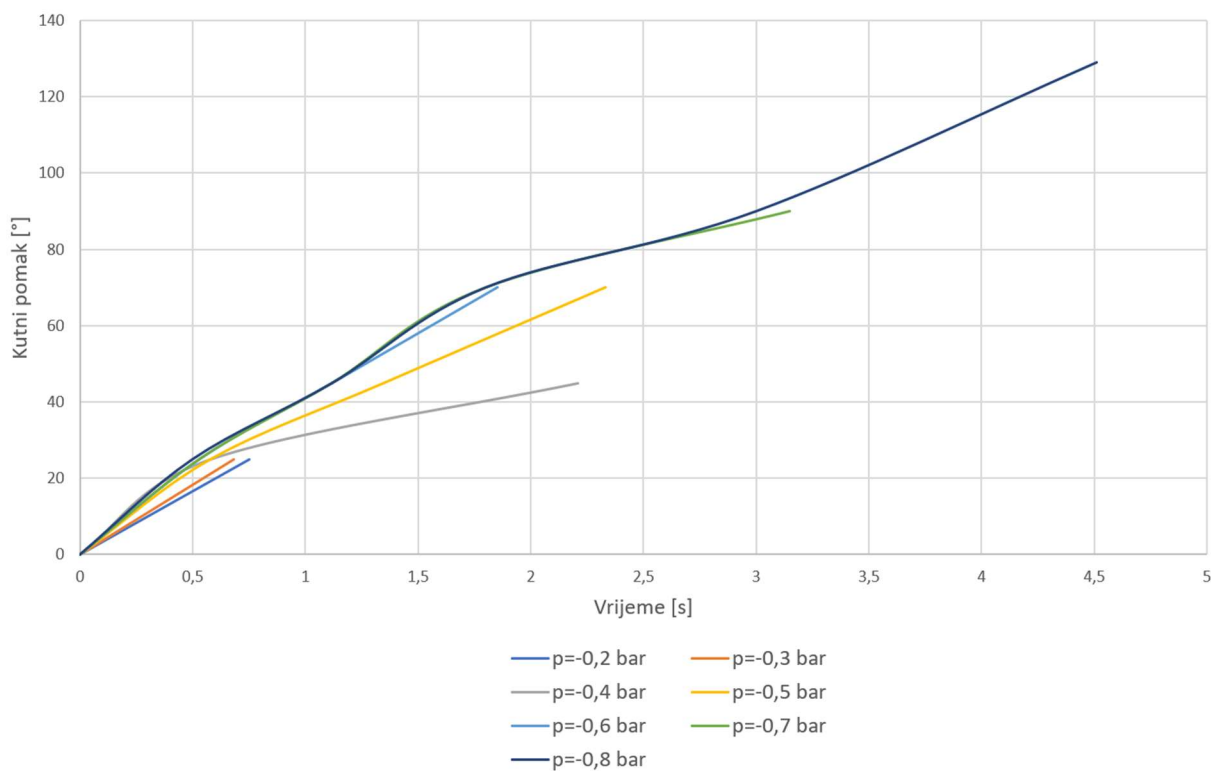
Tablica 4.19. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 4 opterećenog silom 5,5 N

Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
25°	-	0,75	0,68	0,58	0,58	0,53	0,53	0,5
45°	-	-	-	2,21	1,35	1,12	1,12	1,12
70°	-	-	-	-	2,33	1,85	1,8	1,8
90°	-	-	-	-	-	-	3,15	3
120°	-	-	-	-	-	-	-	4,51

Dijagrami ovisnosti pomaka i vremena za mišiće većeg promjera prikazani su na slikama 4.37 i 4.38.

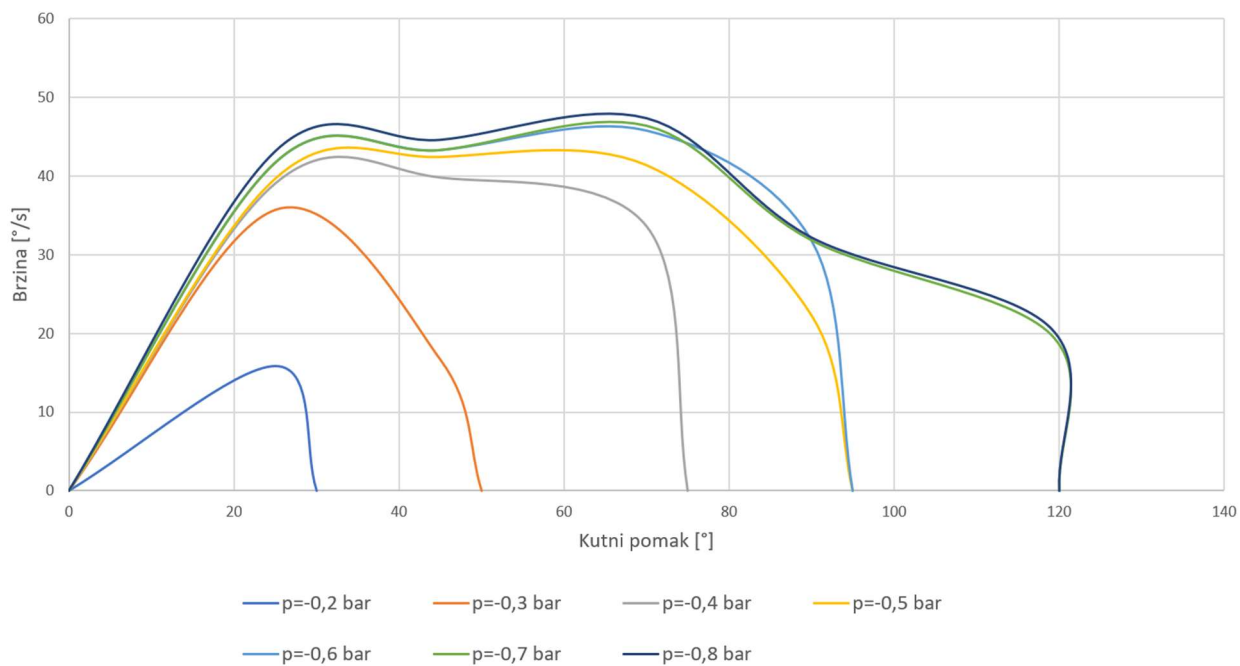


Slika 4.37 Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 3 opterećenog silom 5,5 N

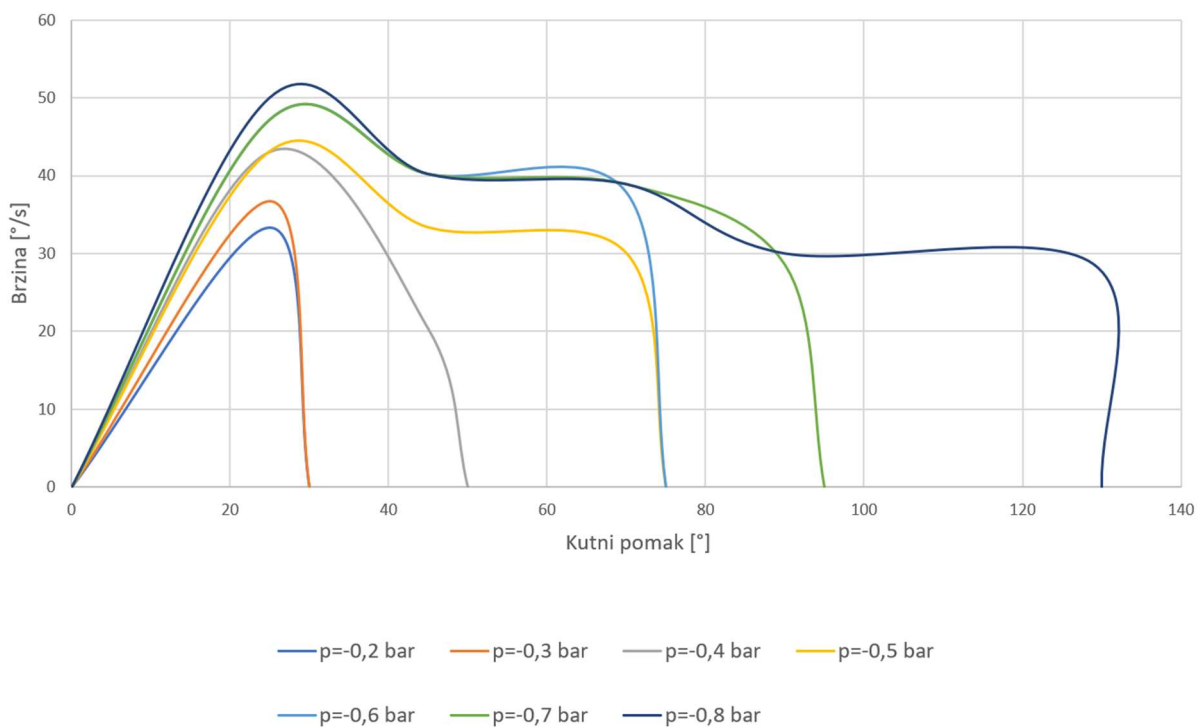


Slika 4.38 Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 4 opterećenog silom 5,5 N

Dijagrami ovisnosti brzine i pomaka mišića većih promjera prikazani su na slikama 4.39. i 4.40.



Slika 4.39 Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 3 opterećenog silom 5,5 N



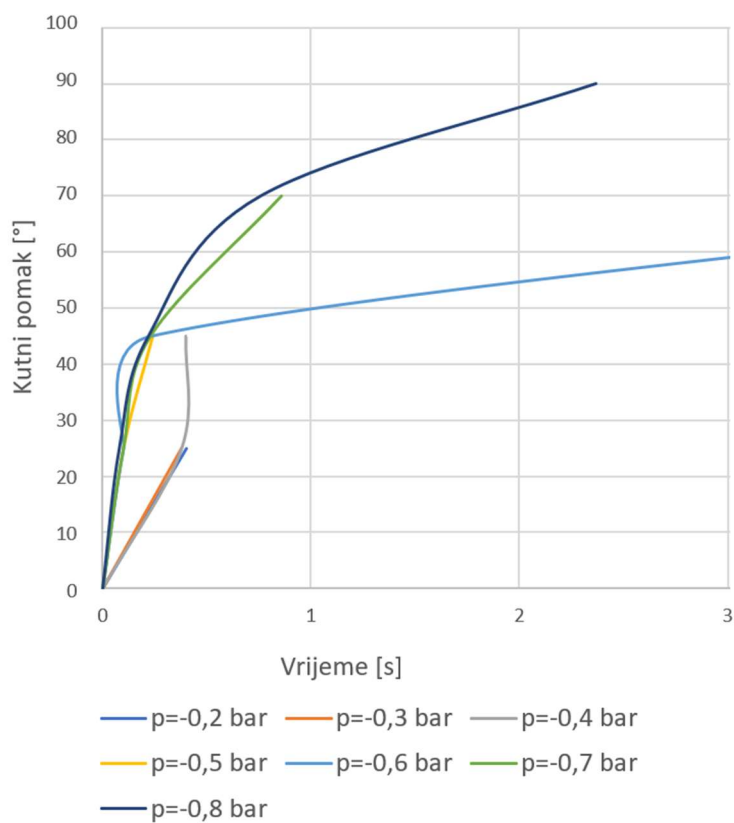
Slika 4.40. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 4 opterećenog silom 5,5 N

U posljednje ispitivanju, ispituje se mišić 5 s najvećim opterećenjem. Pošto mišić 5 ostvaruje male sile, najveća sila opterećenja je bila 0,5 N tako da se za njega objesila metalna ušica mase 50 g koja je bila dostupna u laboratoriju. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4.20.

Tablica 4.20 Vremena ostvarivanja pomaka mišića 5 opterećenog silom 0,5 N

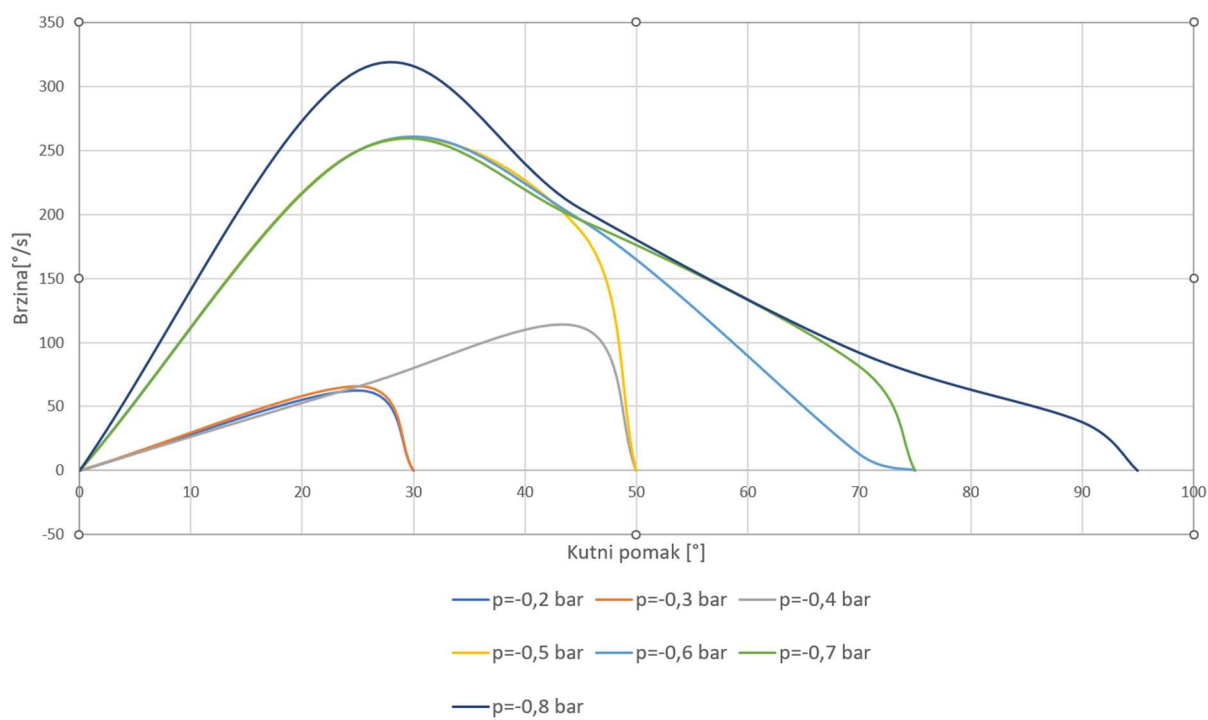
Vrijeme s	-0,1 bar	-0,2 bar	-0,3 bar	-0,4 bar	-0,5 bar	-0,6 bar	-0,7 bar	-0,8 bar
25°	-	0,4	0,38	0,38	0,1	0,1	0,1	0,08
45°	-	-	-	0,4	0,24	0,23	0,23	0,22
70°	-	-	-	-	-	5,56	0,86	0,76
90°	-	-	-	-	-	-	-	2,37
120°	-	-	-	-	-	-	-	-

Izrađen je dijagram ovisnosti vremena i pomaka prikaza na slici 4.41.



Slika 4.41 Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 5 s opterećenjem 0,5 N

Za posljednje mjerenje je također izrađen dijagram ovisnosti brzine i pomaka te je prikazan na slici 4.42.



Slika 4.42 Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 5 opterećenog silom 0,5 N

## 5 ZAKLJUČAK

U ovom radu uspješno je izrađeno više pneumatskih mišića od termo- deformabilnih polimernih cijevi, te su uspješno odrađena sva laboratorijska mjerenja. Izrađeno je ukupno 5 mišića od kojih su 3 većeg promjera i 2 od manjeg promjera. Od izrađenih mišića, 2 ostvaruju pravocrtni pomak, a ostala 3 ostvaruju kutni pomak. Tijekom izrade mišića pokazalo se da termo-deformabilne polimerne cijevi gube na elastičnosti što se više griju i skupljaju, te se time smanjuje maksimalni ostvarivi pomak i maksimalna ostvariva sila. Na temelju tog saznanja razvijena je metoda u kojoj se termo-deformabilna cijev grije i stišće oko kalupa koji se kasnije izvadi. Cijeli proces izrade usavršen je nekoliko iteracija. U svakoj iteraciji otkriveni problemi s metodom izrade, te su u sljedećoj iteraciji riješeni.

Kalup od metalne cijevi dugo zadržava temperaturu, te se ona prije skidanja mišića mora ohladiti jer je zagrijana termo-deformabilna polimerna cijev deformabilna, te dolazi do trajnih deformacija bužira. Pokazalo se da termo-termo-deformabilne polimerne cijevi odlično brtve kada se stisnu što olakšava zatvaranje bužira s čepovima ali je na cijevi potrebno izbušiti rupe kako bi se bužir što bolje stisnuo oko kalupa, također potrebno je izbjegavati nagle prijelaza promjera na mišiću jer je na tim mjestima stisnuti bužir veoma krut što otežava umetanje prstenova u utore mišića. Nakon izrade mišića provedena su laboratorijska mjerenja. Prvo su izmjerene ostvarene sile pri različitim pomacima s korakom pomaka od 10 mm za pravocrtne i 15° kutne mišiće. Nakon toga izmjerena su vremena potrebna da mišić ostvari konačni pomak kada je neopterećen i opterećen.

Mišić većeg promjera 49 mm s pravocrtnim pomakom ostvario je maksimalnu silu od 130 N te maksimalni pomak od 74 mm dok je mišić s manjim promjerom 24 mm s pravocrtnim pomakom ostvario maksimalnu silu od 34 N te maksimalnim pomakom od 50 mm. Zbog nalijeganja materijala tijekom stiskanja mišića dolazi do padova ostvarenih sila. Kod mišića s većim promjerom dva puta dolazi do nalijeganja zbog nejednakih širina utora i razmaka između utora. Kod mišića s manjim promjerom se ne pojavljuje nagli pad sile, već je po cijelom hodu ravnomjeran pad sila. Zbog ostvarenih malih sila može se zaključiti da nalijeganje materijala na tanjem mišiću daje dovoljno veliku protusilu da zaustavi daljnji pomak mišića. Mišić s većim promjerom uspio je podići uteg od 5 kg dok je mišić s manjim promjerom podigao uteg od 500 g. Kada su opterećeni utegom mišići pri malim podtlacima ne ostvaruju pomak, već se prvi pomaci javljaju tek pri podtlaku od -0,5 bar. Uočeno je da je prvi pomak koji opterećeni mišić s većim promjerom ostvari implozija koju zaustave prstenovi, dok se linearni pomak pojavljuje tek dok završi implozija. Mišić većeg promjera ostvario je najveću brzinu od 52,63 mm/s kada je opterećen

silom 0 N, 34,01 mm/s kada je opterećen silom 30 N, te 11,52 mm/s kada je opterećen silom 50 N. Mišić manjeg promjera ostvaruje najveću brzinu od 76,9 mm/s kada je opterećen silom 0 N, 71,42 mm/s, kada je opterećen silom 3 N, te 66,6 mm/s kada je opterećen silom 5 N

Izrađena su 3 mišića s kutnim pomakom od kojih su dva većeg promjera 49 mm koji se razlikuju po razmaku te broju utora, te manjeg promjera. Mišić s manjim razmakom utora ostvario je maksimalnu silu od 50 N te maksimalni kutni pomak od  $120^\circ$ , mišić s većim razmakom utora ostvario je maksimalnu silu od 46 N te maksimalni pomak od  $130^\circ$ , dok je tanji mišić promjer 24 mm ostvario maksimalnu silu od 4,6 N te maksimalni pomak od  $135^\circ$ . Usporedbom rezultata dvaju širih mišića se može vidjeti da mišić s manjim razmakom ostvaruje nešto veće sile, ali mišić s većim razmakom utora ima manje opadanje sile. Iako je tanji mišić ostvario znatno manje sile od širih mišića, uspio je ostvariti najveći kutni pomak. Širi mišići su uspjeli podignuti uteg od 500 g, no mišić s većim razmakom je bio brži od mišića s manjim razmakom utora, te je ostvario veći pomak. Mišić većeg promjera s manjim razmakom prstenova ostvario je najveću brzinu od 78,65 %/s kada je opterećen silom 0 N, 47,29 %/s kada je opterećen silom 3 N, te 35,7 %/s kada je opterećen silom 50 N. Mišić većeg promjera s većim razmakom prstenova ostvario je najveću brzinu od 104,47 %/s kada je opterećen silom 0 N, 83,33 %/s kada je opterećen silom 3 N, te 40,1 %/s kada je opterećen silom 5 N. Mišić manjeg promjera ostvaruje najveću brzinu od 833,33 %/s kada je opterećen silom 0 N, 833,33 %/s, kada je opterećen silom 0,25 N, te 312 %/s kada je opterećen silom 0,5 N



## LITERATURA

- [1] Gong D. i dr.: „Design and Control of the McKibben Artificial Muscles Actuated Humanoid Manipulator, IntechOpen, 28.8.2023.
- [2] Kalita B. i dr.: „A Review on the Development of Pneumatic Artificial Muscle Actuators: Force Model and Application“, Actuators 2022, 11, 288., 2022.
- [3] S interneta, [http://lucy.vub.ac.be/publications/Daerden\\_Lefeber\\_EJMEE.pdf](http://lucy.vub.ac.be/publications/Daerden_Lefeber_EJMEE.pdf) , 28.08.2023.
- [4] Felt, W.; Robertson, M. A.; Paik, J.: Modeling Vacuum Bellows Soft Pneumatic Actuators with Optimal Mechanical Performance, Livorno, Italy, Travanj 2018.
- [5] Ploh T.: „Konstrukcija umjetnog pneumatskog mišića“, Diplomski rad, Tehnički fakultet u Rijeci, 2021.
- [6] Vuković T.: „Konstrukcija pneumatskog aktuatora s kutnim pomakom“, Diplomski rad, Tehnički fakultet u Rijeci, 2023.
- [7] S interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Heat-shrink\\_tubing](https://en.wikipedia.org/wiki/Heat-shrink_tubing), 08.08.2023.
- [8] s Interneta, [https://www.festo.com/cat/en-us\\_us/data/doc\\_ENGB/PDF/EN/VN\\_EN.PDF](https://www.festo.com/cat/en-us_us/data/doc_ENGB/PDF/EN/VN_EN.PDF) , 11.08.2023.
- [9] S interneta, [https://www.burster.com/fileadmin/user\\_upload/redaktion/Documents/Products/Data-Sheets/Section\\_8/8712\\_EN.pdf](https://www.burster.com/fileadmin/user_upload/redaktion/Documents/Products/Data-Sheets/Section_8/8712_EN.pdf), 12.08.2023.
- [10] Gregov G. i dr.: „Design, Development and Experimental Assessment of a Cost-Effective Bellow Pneumatic Actuator“, Actuators, 11, 170, 2022.

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. McKibben pneumatski mišić .....	3
Slika 1.2. Naborani pneumatski mišić [3] .....	3
Slika 1.3. Primjer mišića s mijehom[5] .....	4
Slika 1.4. Ovisnost karakteristika mišića o razmaku prstenova [4] .....	5
Slika 1.5. Mišići iz prethodnog diplomskog rada [5] .....	6
Slika 1.6. Odnos sile i pomaka dviju verzija prethodnih mišića [5] .....	6
Slika 1.7. Mišić iz prethodnog diplomskog rada [6] .....	7
Slika 1.8. Ovisnost sile i pomaka prethodne verzije mišića [6] .....	8
Slika 2.1 Skice opisanih metoda izrade ovojnice mišića .....	10
Slika 2.2. Testna ovojnica .....	11
Slika.2.3. Naprava za izradu mišića .....	12
Slika 2.4. Termo-deformabilna polimerna cijev na kalupu prije grijanja .....	13
Slika 2.5. Termo-deformabilna polimerna cijev na kalupu nakon zagrijavanja .....	13
Slika 2.6. Prva iteracija ovojnice mišića nakon izvlačenja cijevi .....	14
Slika 2.7. Druga iteracija ovojnice mišića .....	14
Slika 2.8. Nova iteracija naprave za izradu mišića .....	15
Slika 2.9. Treća iteracija ovojnice mišića .....	15
Slika 2.10. Umetci (prstenovi) .....	16
Slika 2.11. Četvrta iteracija ovojnice mišića u početnom i stisnutom položaju .....	17
Slika 2.12. Čepovi mišića .....	17
Slika 2.13. Preliminarni test mišića .....	18
Slika 2.14. Čep za tanji mišić .....	19
Slika 2.15. Konačni oblik manjeg čepa .....	19
Slika 2.16. Tanji mišić u opuštenom i opterećenom stanju .....	20
Slika 2.17. Novi prstenovi .....	20
Slika 2.18. Metalne slamke za piće .....	21
Slika 2.19. Komad metalne slamke korišten kao graničnik .....	21
Slika 2.20. Unutrašnjost mišića s kutnim pomakom .....	22
Slika 2.21. Mišić montiran na testnu konstrukciju .....	22
Slika 2.22. Novi mišić montiran na testnu konstrukciju .....	23
Slika 2.23. Novi prsten .....	24
Slika 2.24. Usporedba maksimalnog pomaka triju izrađenih mišića .....	24

Slika 3.1 Pneumatska oprema .....	25
Slika 3.2. Proporcionalni ventil FESTO VPPI-5L-3-G18-1V1H-V1-S1D .....	26
Slika 3.3. Izvor napajanja Axio AX3005L-3 .....	27
Slika 3.4. Akvizicijska kartica NI myRIO.....	28
Slika 3.5. Upravljački program u LabVIEW-u .....	29
Slika 3.6. Korisničko sučelje LabVIEW-a .....	29
Slika 3.7. Senzor pomaka Burster 8713-100[9] .....	30
Slika 3.8. Senzor sile Zemic H3G-C3-50kg-6B.....	30
Slika 3.9. Mjerni instrument senzora sile .....	31
Slika 4.1 Oprema za ispitivanje mišića s pravocrtnim pomakom. ....	32
Slika 4.2. Maksimalna ostvarena sila u ovisnosti o pomaku i podtlaku kod mišića 1 .....	34
Slika 4.3. Maksimalna ostvarena sila u ovisnosti o pomaku i podtlaku kod mišića 2 .....	35
Slika 4.4. Početak prvog nalijeganja (lijevo) i početak drugog nalijeganja ( desno).....	36
Slika 4.5. Deformacija mišića pri većim podtlacima .....	36
Slika 4.6. Ovisnost vremena o pomaku mišića 1 s opterećenjem 0 N .....	39
Slika 4.7. pomaka o vremenu mišića 2 s opterećenjem 0 N.....	39
Slika 4.8. Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 1 s opterećenjem 0 N.....	40
Slika 4.9. Dijagram odnosa brzine i pomaka za mišić 2 s opterećenjem 0 N .....	40
Slika 4.10 Ovisnost vremena o pomaku mišića 1 s opterećenjem 30 N .....	42
Slika 4.11.pomaka o vremenu mišića 2 s opterećenjem 3 N.....	42
Slika 4.12. Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 1 opterećenog silom 30 N .....	43
Slika 4.13 Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 2 opterećenog silom 3 N .....	43
Slika 4.14. Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 1 opterećenog silom 50 N .....	45
Slika 4.15 Dijagram ovisnosti pomaka o vremenu mišića 2 s opterećenjem 5 N.....	45
Slika 4.16 Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 1 opterećenog silom 50 N .....	46
Slika 4.17. Dijagram ovisnosti brzine i pomaku mišića 2 opterećenog silom 5,5 N .....	46
Slika 4.18 Konstrukcija za mjerenja mišića s kutnim pomakom .....	47
Slika 4.19. Mišić 3 povezan na senzor sile .....	48
Slika 4.20. Mišić 4.....	49
Slika 4.21. Mišić 5.....	49
Slika 4.22 Maksimalna ostvarena sila u ovisnosti o kutnom pomaku i podtlaku mišića 3 .....	50
Slika 4.23 Maksimalna ostvarena sila u ovisnosti o kutnom pomaku i podtlaku mišića 4. ....	51
Slika 4.24. Maksimalna ostvarena sila u ovisnosti o kutnom pomaku i podtlaku kod mišića 5 ..	52
Slika 4.25. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 3 s opterećenjem 0 N.....	54
Slika 4.26 Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 4 s opterećenjem 0 N.....	54

Slika 4.27. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog mišića 3 opterećenog silom 0 N .....	55
Slika 4.28. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 4 opterećenog silom 0 N .....	55
Slika 4.29. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 5 s opterećenjem 0 N .....	56
Slika 4.30. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 5 opterećenog silom 0 N .....	57
Slika 4.31. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 3 s opterećenjem 3 N .....	58
Slika 4.32. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 4 s opterećenjem 3 N .....	59
Slika 4.33. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 3 opterećenog silom 3 N .....	59
Slika 4.34. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 4 opterećenog silom 3 N .....	60
Slika 4.35. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 5 s opterećenjem 0,25 N .....	61
Slika 4.36. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 5 opterećenog silom 0,25 N .....	61
Slika 4.37. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 3 opterećenog silom 5,5 N .....	63
Slika 4.38. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 4 opterećenog silom 5,5 N .....	63
Slika 4.39. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 3 opterećenog silom 5,5 N .....	64
Slika 4.40. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 4 opterećenog silom 5,5 N .....	64
Slika 4.41. Dijagram ovisnosti kutnog pomaka o vremenu mišića 5 s opterećenjem 0,5 N .....	65
Slika 4.42. Dijagram ovisnosti brzine i kutnog pomaka mišića 5 opterećenog silom 0,5 N .....	66

## POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Ostvarene sile mišića 1 .....	33
Tablica 4.2. Ostvarene sile mišića 2 .....	34
Tablica 4.3. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 1 s opterećenjem 0 N .....	38
Tablica 4.4. Vremena ostvarivanja pomak mišića 2 s opterećenjem 0 N .....	38
Tablica 4.5. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 1 opterećenog silom 30 N .....	41
Tablica 4.6. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 2 opterećenog silom 3 N .....	41
Tablica 4.7. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 1 opterećenog silom 50 N .....	44
Tablica 4.8. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 2 opterećenog silom 5,5 N .....	44
Tablica 4.9 Ostvarene sile mišića 3 .....	50
Tablica 4.10. Ostvarene sile šireg mišića 4 .....	51
Tablica 4.11. Ostvarene sile mišića 5 .....	52
Tablica 4.12 Vremena ostvarivanja pomaka šireg mišića 3 opterećenog silom 0 N .....	53
Tablica 4.13 Vremena ostvarivanja pomaka mišića 4 opterećenog silom 0 N .....	53
Tablica 4.14. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 5 opterećenog silom 0 N .....	56
Tablica 4.15 Vremena ostvarivanja pomaka mišića 3 opterećenog silom 3 N .....	57
Tablica 4.16. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 4 opterećenog silom 3 N .....	58
Tablica 4.17 Vremena ostvarivanja pomaka mišića 5 opterećenog silom 0,25 N .....	60
Tablica 4.18 Vremena ostvarivanja pomaka mišića 3 opterećenog silom 5,5 N .....	62
Tablica 4.19. Vremena ostvarivanja pomaka mišića 4 opterećenog silom 5,5 N .....	62
Tablica 4.20 Vremena ostvarivanja pomaka mišića 5 opterećenog silom 0,5 N .....	65

## SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

U ovom radu prikazana je izrada pneumatskih mišića u obliku mijeha koji ostvaruju koristan rad pri podtlaku. Razvijena je metoda izrade mišića iz termo deformabilnih polimera, tj. termo bužira koja uključuje grijanje termo bužira oko kalupa od metalne cijevi i O prstenova koji se nakon grijanja izvadi te se u dobiveni mišić umetu metalni prstenovi debljine 2 mm. Izrađeno je ukupno 5 mišića od kojih su 3 promjera 49 mm i 2 promjera 24 mm. Jedan većeg promjera i jedan manjeg promjera imaju pravocrtno gibanje, dok dva mišića većeg promjera i jedan manjeg promjera imaju kutno gibanje. Za pokretanje i mjerenje mišića koristila se laboratorijska oprema koja uključuje pneumatske i elektroničke komponente. Za upravljanje se koristio regulacijski program u softveru LabVIEW. Mjerile su se ostvarene sile na raznim pomacima i kutnim pomacima mišića te vremena kojima su mišići ostvarivali pomake. Mišići s pravocrtnim pomakom su postigli sljedeće rezultate: Najveća sila koju je ostvario mišić većeg promjera bila je 130 N pri pomaku od 0 mm na podtlaku od -0,8 bar s najvećom postignutom brzinom od 52,63 mm/s na pomaku od 10 mm, dok je mišić manjeg promjera ostvario najveću silu od 34 N te najveću brzinu od 71 mm/s. Mišići s kutnim pomakom su postigli sljedeće rezultate: mišić većeg promjera s manjim razmakom ostvario je silu od 50 N te najveću brzinu od 69 °/s, mišić većeg promjera s većim razmakom postigao je najveću silu od 46 N i najveću brzinu od 80 °/s, a mišić manjeg promjera je ostvario najveću silu od 4,6 N te najveću brzinu od 833 °/s.

KLJUČNE RIJEČI: pneumatski mišić, podtlak, termo deformabilni polimer, linearni pomak, kutni pomak

## ABSTRACT AND KEYWORDS

This paper shows construction of pneumatic bellows muscle that achieves movement with negative pressure. Muscle was made out of heat-shrink tubing so a method was developed that involves heating heat shrinking tube around a mold that is a metal pipe and has sealing rubber rings wrapped around it. After shrinking, pipe is removed from muscle and 2 mm metal rings are inserted into slots. Five muscles were made, 3 of which were 49 mm wide, and 2 were 24 mm wide. One wide and one narrow muscle had linear displacement, while the rest had angular displacement. For measuring and regulation pneumatic and electronic equipment was used. For pressure regulation LabVIEW program was used. Tests that were conducted measured highest force output of the muscles and their highest speeds. Muscles with linear movement achieved following results: Wide muscles highest force was 130 N at pressure of -0,8 bar with highest speed of 56,63 mm/s while narrow muscle achieved highest force of 34 N and highest speed of 71 mm/s. Muscles with angular movement achieved following results: Wide muscle with smaller space between the rings achieved highest force of 50 N with highest speed of 69 °/s, wide muscle with larger space between the rings achieved highest force of 46 N and highest speed of 80 °/s, while narrow muscle achieved highest force of 4,6 N and highest speed of 833 °/s.

**KEYWORDS:** pneumatic muscle, heat-shrink tubing, linear displacement, angular displacement