

# Karakterizacija deformacijskog sustava za linearni pomak

---

**Vardić, Petar Krešimir**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:811226>

*Rights / Prava:* [Attribution-ShareAlike 4.0 International / Imenovanje-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-11**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Petar Krešimir Vardić**

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**KARAKTERIZACIJA  
DEFORMACIJSKOG SUSTAVA  
ZA LINEARNI POMAK**

Mentor:

Prof. dr. sc. Marko Katić, dipl. ing.

Student:

Petar Krešimir Vardić

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof dr.sc. Marku Katiću, dipl. ing. i asistentu Marku Horvateku, mag. ing na strpljenju, savjetima i pomoći tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem se svim djelatnicima Zavoda za robotiku i automatizaciju proizvodnih sustava na ugodnom boravku i stečenom znanju tijekom studija.

Zahvaljujem se djelatnicima Zavoda za kvalitetu na inspiraciji i motivaciji da za diplomski rad izaberem temu iz njihovog područja.

Najveća zahvala mojoj obitelji na konstantnoj i bezrezervnoj podršci tijekom studija.

Petar Krešimir Vardić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **PETAR KREŠIMIR VARDIĆ** Mat. br.: 0035209271

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija deformacijskog sustava za linearni pomak**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of a linear flexure stage**

Opis zadatka:


Deformacijski sustavi za ostvarivanje preciznog linearnog pomaka pružaju brojne prednosti u odnosu na klasične strojne elemente. S obzirom na to da se u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a radi na razvoju navedenih sustava, u okviru ovog rada potrebno je:


1. opisati vrste deformacijskih sustava za pozicioniranje te sustav korišten u ovom radu
  2. eksperimentalno utvrditi stabilnost i odstupanje od linearnosti
  3. provesti numeričke simulacije s ciljem utvrđivanja ovisnosti pomaka o geometriji deformacijskih zglobova.
- U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:  
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:  
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:  
  
doc. dr. sc. Marko Katić

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
POPIS KRATICA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. DEFORMACIJSKI SUSTAVI.....	2
2.1. Deformacijski mehanizmi .....	5
2.1.1. Deformacijski zglobovi.....	7
3. POZICIONIRANJE .....	13
3.1. Nanopozicioniranje .....	13
3.2. Piezoelektrični aktuator.....	14
3.2.1. Histereza .....	14
3.2.2. Puzanje .....	15
3.2.3. Stabilnost u ovisnosti o temperaturi.....	16
4. LASERSKI INTERFEROMETAR .....	17
5. EKSPERIMENT .....	19
5.1. Deformacijski sustav .....	19
5.2. Piezoaktuator.....	19
5.3. Inicijalni eksperimentalni postav .....	20
5.3.1. Dodatna zaštita postava.....	23
5.4. Novi eksperimentalni postav .....	26
6. SIMULACIJA .....	35
7. ZAKLJUČAK.....	40
LITERATURA.....	41

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Klasifikacija deformacijskih sustava po funkciji [3].....	2
Slika 2.	Raspodijeljenost fleksibilnosti [6].....	3
Slika 3.	Varijabilnost fleksibilnosti [7].....	3
Slika 4.	Prikaz načina varijacije fleksibilnosti [7].....	4
Slika 5.	Deformacijski sustav s varijacijom svojstva uslijed promjene temperature [3].....	5
Slika 6.	Kategorizacija deformacijskih mehanizama [12].....	5
Slika 7.	Klasifikacija deformacijskih mehanizama [13].....	6
Slika 8.	Mehanizam od deformabilnog tijela (gore) i kruti ekvivalent (dolje) [14].....	7
Slika 9.	Uređaj za nanopozicioniranje [23].....	14
Slika 10.	Grafički prikaz pojave histereze kod piezokristala [30].....	15
Slika 11.	Prikaz puzanja (creep) kod piezoelementa [23].....	16
Slika 12.	Jednostavan prikaz konstruktivne (gore) i destruktivne (dolje) interferencije.....	17
Slika 13.	Osnovni koncept laserske interferometrije [33].....	18
Slika 14.	Prikaz primjene koncepta laserske interferometrije [33].....	18
Slika 15.	Deformacijski sustav korišten u eksperimentu.....	19
Slika 16.	Piezokontroler korišten u eksperimentu.....	20
Slika 17.	Thorlabs Kinesis softver korišten u eksperimentu.....	20
Slika 18.	Inicijalni eksperimentalni postav za mjerenje pomaka deformacijskog sustava...	21
Slika 19.	Mjerenja nestabilnosti pozicije bez kutije.....	22
Slika 20.	Kartonska kutija.....	23
Slika 21.	Mjerenja nestabilnosti pozicije s kutijom.....	24
Slika 22.	Pomak deformacijskog sustava uslijed povećanja napona korakom od 5 V (gore) i 0,5 V (dolje).....	26
Slika 23.	Nova eksperimentalni postav unutar laboratorija za nanomjeriteljstvo.....	27
Slika 24.	Graf pomaka nakon otklanjanja temperaturnog utjecaja mjeritelja.....	27
Slika 25.	Graf pomaka sustava pri povećanju i smanjenju napona.....	29
Slika 26.	Graf ovisnosti pomaka u naponu kod tri uzastopna mjerenja.....	31
Slika 27.	Prikaz raspona ponovljenih mjerenja u ovisnosti o naponu.....	33
Slika 28.	Usporedba raspona ponovljenih mjerenja sustava u različitim koracima eksperimenta.....	34
Slika 29.	Prikaz deformacijskog sustava s naznačenim horizontalnim opterećenjem.....	35
Slika 30.	Prikaz deformacijskog sustava s naznačenim vertikalnim opterećenjem.....	36
Slika 31.	Prikaz 3D modela deformacijskog sustava s presjekom na zglobu.....	37
Slika 32.	Pomak pri vertikalnom opterećenju s pet provrta po zglobu.....	38
Slika 33.	Prikaz von Mises naprezanja varijante s 5 zglobova uslijed horizontalnog opterećenja.....	38

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Klasifikacija deformacijskih zglobova po različitim kriterijima [16] .....	8
Tablica 2. Svojstva nekih piezoelektričnih materijala na 20°C.....	16
Tablica 3. Inicijalna mjerenja bez kutije .....	21
Tablica 4. Mjerenja s kutijom.....	24
Tablica 5. Pomak uzrokovan piezokontrolerom.....	25
Tablica 6. Inicijalno mjerenje nakon premještanja u mali laboratorij.....	28
Tablica 7. Pomaci triju uzastopnih mjerenja .....	31
Tablica 8. Svojstva ABS plastike .....	36
Tablica 9. Broj čvorova i elemenata svake varijante deformacijskog sustava.....	36
Tablica 10. Simulacijski pomaci i povezana učinkovitost .....	39



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
$l$	m	duljina
$E$	Pa	Youngov modul elastičnosti
$I_z$	$m^4$	aksijalni moment inercije s obzirom na os z
$F$	N	sila
$u_y$	m	pomak u smjeru osi y
$\eta$	m/N	linearna fleksibilnost
$U$	V	napon
$\rho$	$kg/m^3$	gustoća
$\epsilon_r$		relativna permitivnost
$\delta$	N/m	linearni modul elastičnosti
$d$	pC/N	piezoelektrični koeficijent
$k$	%	koeficijent elektromehaničke sprege
$\Delta x_{U+}$	nm	Pomak uslijed porasta napona za jedan korak
$\Delta x_{U-}$	nm	Pomak uslijed smanjenja napona za jedan korak
$\nu$		Poissonov koeficijent
$\sigma_{0,2}$	Pa	granica elastičnosti
$n_k$		broj kružnih provrta po zglobu
$S_{min}$		minimalni faktor sigurnosti
$F_x$	N	Sila u smjeru osi x
$F_z$	N	Sila u smjeru osi y
$\Delta x_{Fx}$	mm	maksimalni horizontalni pomak uslijed djelovanja horizontalne sile
$\Delta x_{Fz}$	mm	maksimalni horizontalni pomak uslijed djelovanja vertikalne sile
$\eta_{\Delta x}$		učinkovitost pomaka

## **POPIS KRATICA**

SPM	Mikroskopija skenirajućom sondom (engl. <i>Scanning Probe Microscopy</i> )
PVDF	Polivinildenfluorid (engl. <i>Polyvinylidene fluoride</i> )
BaTiO <sub>3</sub>	Barijev titanat
PZT	Olovni cirkonat-titanat
TGS	Triglicin sulfat

**SAŽETAK**

U ovom diplomskom radu dan je pregled deformacijskih sustava za ostvarivanje preciznog linearnog pomaka. Navedene su klasifikacije deformacijskih sustava, načini pozicioniranja i nanopozicioniranje, te prednosti i nedostaci korištenja deformacijskog sustava za pozicioniranje.

Kako se sustavom upravlja piezokontrolerom prikazane su prednosti i nedostaci piezoelektričnih aktuatora. Također, s obzirom na to da se za mjerenje pomaka sustava koristio laserski interferometar u radu je predstavljen koncept laserske interferometrije.

Obavljeno je eksperimentalno utvrđivanje stabilnosti i odstupanja od linearnosti deformacijskog sustava izrađenog u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a.

Rad se nastavlja numeričkom simulacijom kojom se utvrđuje ovisnost pomaka o geometriji deformacijskih zglobova.

Na kraju se iznose zaključci na temelju rezultata eksperimenta i numeričke simulacije koji pružaju podlogu za daljnju diskusiju i istraživanja.

Ključne riječi: deformacijski sustav, pozicioniranje, piezoelektrični aktuator

**SUMMARY**

This master thesis gives an overview of linear flexure stage. Classifications of flexure systems are presented, methods of positioning and nanopositioning, as well as the advantages and disadvantages of using a flexure stage for positioning.

As the flexure stage is controlled via a piezocontroller, the advantages and disadvantages of using a piezoelectric actuator are presented. Similarly, a laser interferometer was used to measure the displacement of the linear flexure stage, so a short summary of laser interferometry is given in the thesis.

Thereafter the results of the experiment to determine the stability and deviation from linearity of the linear flexure stage designed at the Laboratory for precise measurements of lengths at FSB are shown.

The thesis continues by displaying the results of a numerical simulation that show the dependence of displacement on the geometry of the flex stage's joints.

Finally, conclusions based on the results of the experiment and simulation are laid out. These conclusions provide a basis for further discussion and research.

Key words: flexure stage, positioning, piezoelectric actuator

## **1. UVOD**

U ovome diplomskome radu će se razraditi karakterizacija deformacijskog sustava za linearni pomak. Deformacijski sustavi za pozicioniranje pružaju brojne prednosti u odnosu na klasične strojne elemente.

S obzirom na to da se u laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a radi na razvoju navedenih sustava, u okviru ovog rada u sljedećem poglavlju će se predstaviti deformacijski sustavi, njihova klasifikacija i uporaba te prednosti i nedostaci.

U narednom poglavlju razjasnit će se koncept pozicioniranja, sustavi za pozicioniranje, i ono što je posebno relevantno u ovome diplomskome radu, sustavi za nanopozicioniranje.

Kao dio rada eksperimentalno su utvrđene stabilnost i odstupanje od linearnosti. Mjerenja su provedena korištenjem laserskog interferometra čiji se princip rada definira u poglavlju koje prethodi poglavlju eksperimenta.

U sklopu rada su također provedene numeričke simulacije s ciljem utvrđivanja ovisnosti pomaka o geometriji deformacijskih zglobova.

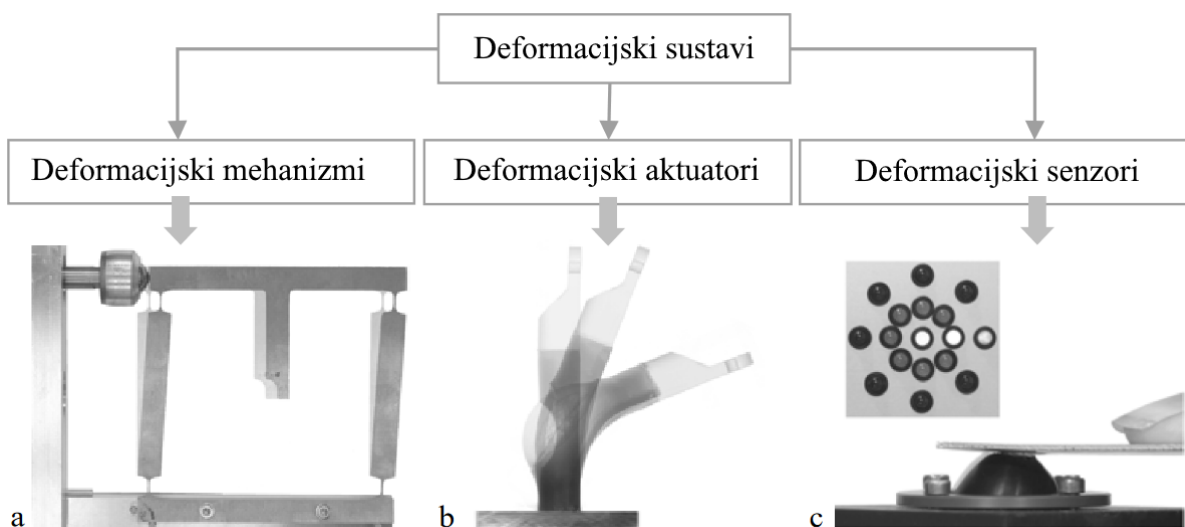
Na kraju se iznosi zaključak o prednostima i nedostacima ovakvog deformacijskog sustava za linearni pomak, uz predlaganje mogućih nastavaka na rad i potencijalna poboljšanja.

## 2. DEFORMACIJSKI SUSTAVI

Jedna od prvih pretpostavki strojarstva je pretpostavka idealnog krutog tijela, koje se uopće ne deformira nego uslijed sile dolazi isključivo do pomaka [1]. U stvarnosti ne postoji idealno kruto tijelo već su sva tijela deformabilna. Ta tijela se dalje dijele na elastična, plastična i viskoelastična [2]. Tehnički sustavi u strojarstvu u pravilu teže ka korištenju krutih tijela kod kojih se deformacija zanemaruje ili smatra nedostatkom.

Istraživanja i razvoj novih tehnologija su dovela do sve veće rasprostranjenosti deformacijskih sustava, gdje se iskorištavaju prednosti kao što su elastične sile, mogućnost spremanja energije te ti sustavi stoga imaju nova kvalitativna svojstva [3]. Tako u slučaju konstruiranja robotske ruke, kod koje dolazi do česte interakcije s ljudima, deformacijski sustavi povećavaju sigurnost, što je najbitnija značajka kod takvih robota [4].

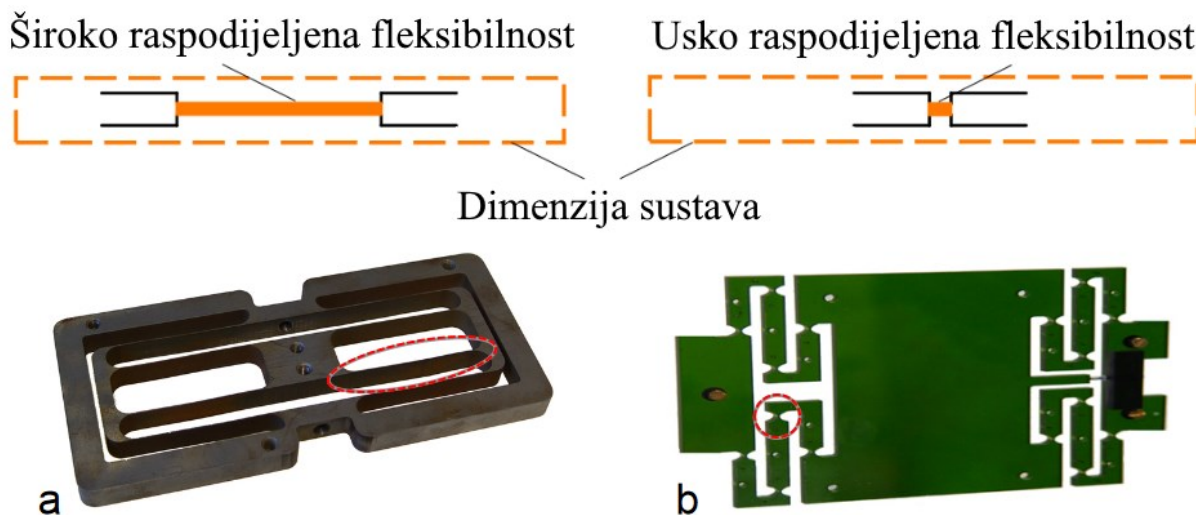
Da bi se moglo shvatiti različite vrste deformacijskih sustava za pozicioniranje potrebno je prvo razraditi klasifikaciju istih. Prvi tip je klasifikacija po funkciji, gdje deformacijski sustav može biti deformacijski mehanizam, deformacijski aktuator i/ili deformacijski senzor [3].



**Slika 1. Klasifikacija deformacijskih sustava po funkciji [3]**

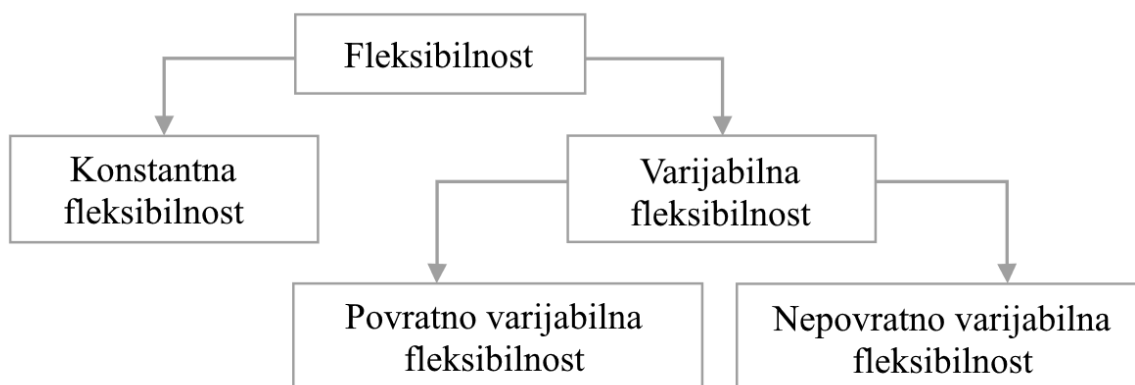
Prema terminologiji IFToMM-a (International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science) *compliance* (fleksibilnost) je karakteristika tijela koja pokazuje koliko se tijelo deformira uslijed utjecaja vanjske sile, te je recipročna krutosti [5]. Valja napomenuti da se fleksibilnost po toj terminologiji razlikuje od elastičnosti jer je fleksibilnost nadređeni pojam koji uključuje i elastičnu, plastičnu i viskoelastičnu deformaciju.

Deformacijski sustavi se također mogu kategorizirati po raspodijeljenosti fleksibilnosti. Raspodijeljenost fleksibilnost se odnosi na geometrijsku raspodijeljenost fleksibilnosti u sklopu tijela ili sustava [6].



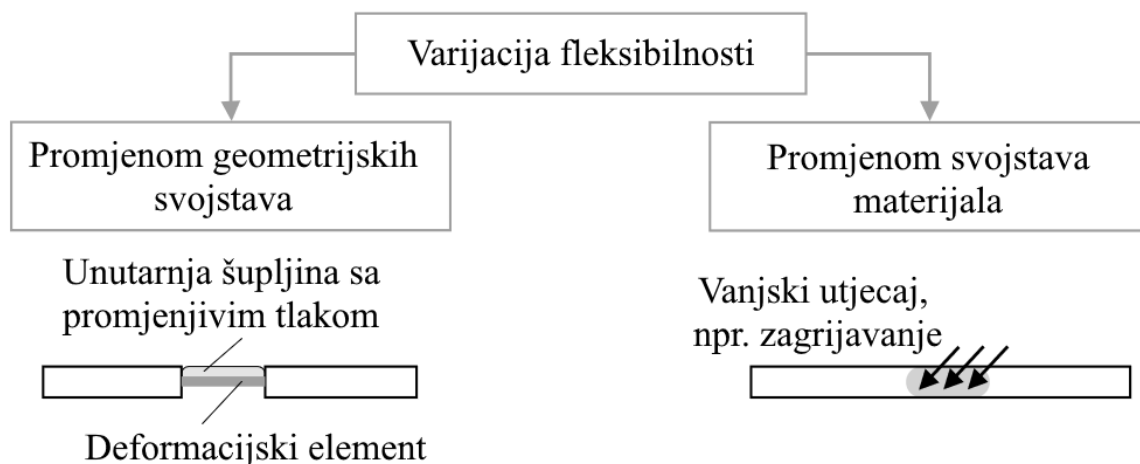
Slika 2. Raspodijeljenost fleksibilnosti [6]

Nadalje treba uzeti u obzir da fleksibilnost može, ali i ne mora biti, konstantna vrijednost. Prema tome se sustavi dijele na one s konstantom fleksibilnosti i one s varijabilnom fleksibilnosti. Kod konstantne fleksibilnosti se ubrajaju i sustavi načinjeni od krutih tijela, koji su većinom konstantne fleksibilnosti odnosno krutosti, a i neki deformacijski sustavi imaju konstantnu vrijednost fleksibilnosti. Varijabilna fleksibilnost može biti posljedica svojstava materijala ili geometrije, te se dalje dijeli na povratno varijabilnu i nepovratno varijabilnu fleksibilnost. Povratno varijabilna fleksibilnost označava situaciju gdje je moguće vratiti originalno stanje nakon što se ukloni uzrok promjene fleksibilnosti, dok kod nepovratno varijabilne fleksibilnosti nema povratka na originalno stanje.



Slika 3. Varijabilnost fleksibilnosti [7]

Promjena fleksibilnosti se može dogoditi uslijed promjene geometrije, ali i uslijed promjene materijala, što sustavima s varijabilnom fleksibilnosti daje još jedan način da ih se klasificira.



Slika 4. Prikaz načina varijacije fleksibilnosti [7]

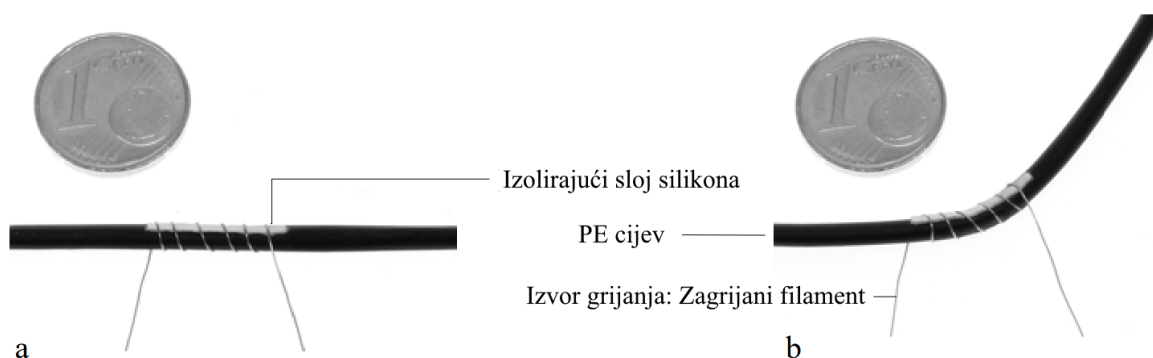
Fleksibilnost deformacijskog elementa može ovisiti o geometrijskim svojstvima pa se tako na primjeru prikazanom na slici (Slika 4.) može vidjeti sustav konstruiran na takav način da promjenom tlaka dolazi do promjene geometrijskih svojstava deformacijskog elementa. Naspram tome mijenjanje materijalnih svojstava je moguće termički, elektromagnetski ili nekim drugim načinom. Ako se zagrije određena točka, odnosno segment na sustavu ili elementu, na tom mjestu se promjenom temperature mijenjaju i svojstva. Fleksibilnost se stoga promjeni lokalno što tom segmentu daje funkciju zgloba [8].

Uzimajući za primjer jednostavan deformacijski sustav štapnog oblika može se detaljno razraditi promjena fleksibilnosti. Ako je sustav geometrijski linearan, ako su dopušteni samo mali pomaci te za materijal vrijedi Hookeov zakon, dobiva se sustav štapa duljine  $l$ , s Youngovim modulom elastičnosti  $E$ , i momentom  $I_z$  [9]. Kada se štap optereti silom  $F$  dolazi do pomaka  $u_y$ . Fleksibilnost  $\eta$  se matematički može definirati kao kvocijent pomaka i sile  $\delta u_y / \delta F$ , a u slučaju da je  $x = l$  slijedi (1):

$$\eta = \frac{\mu_y}{F} \quad (1)$$

Po tome je fleksibilnost sustava konstantna, no ako je elastičnost  $E$  ovisna o nekom drugome parametru, npr. temperaturi  $T$ , fleksibilnost  $\eta$  će također biti ovisna o temperaturi [9]. Na primjeru na slici (Slika 5.) može se vidjeti kako se svojstva deformacijskog sustava mijenjaju promjenom svojstava materijala.

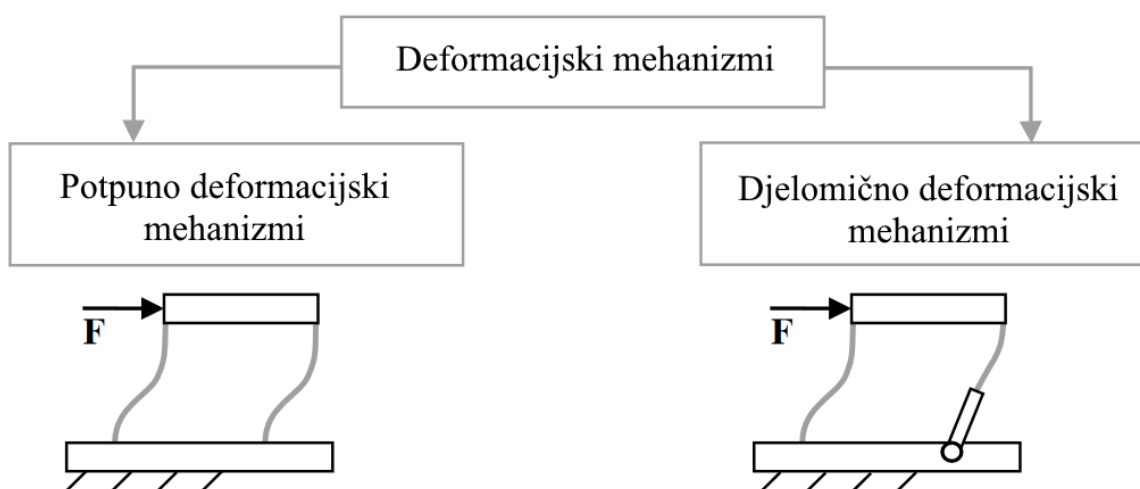




Slika 5. Deformacijski sustav s varijacijom svojstva uslijed promjene temperature [3]

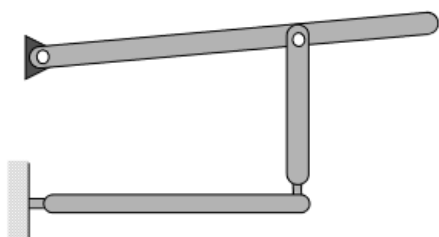
## 2.1. Deformacijski mehanizmi

Mehanizam je sklop povezan pomičnim zglobovima, koji stvara zatvoren kinematski lanac s ciljem prijenosa gibanja [10]. Tradicionalni mehanizmi se sastoje od krutih tijela, no također se mogu koristiti i deformabilna tijela za izradu mehanizama. Deformacijski mehanizmi su mehanizmi koji djelomično ili u cijelosti svoju mobilnost dobivaju od fleksibilnih dijelova, a ne krutih zglobova [11].

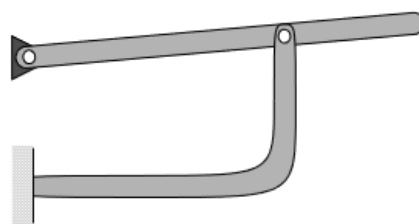


Slika 6. Kategorizacija deformacijskih mehanizama [12]

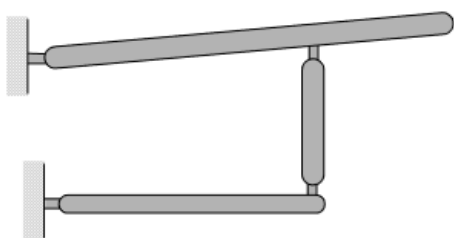
Ako se istovremeno uzimaju u obzir kategorije raspodjeljenosti fleksibilnosti deformacijskog sustava i kategorije deformacijskih mehanizama po prisutnosti deformacijskih elemenata, dobije se glavni način klasifikacije na slici (Slika 7.).



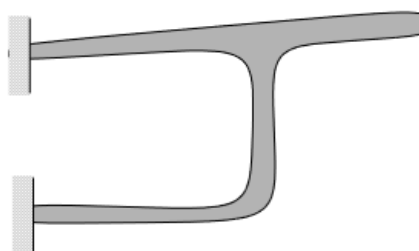
(a) Djelomično deformacijski mehanizam uske raspodijeljenosti



(b) Djelomično deformacijski mehanizam široke raspodijeljenosti



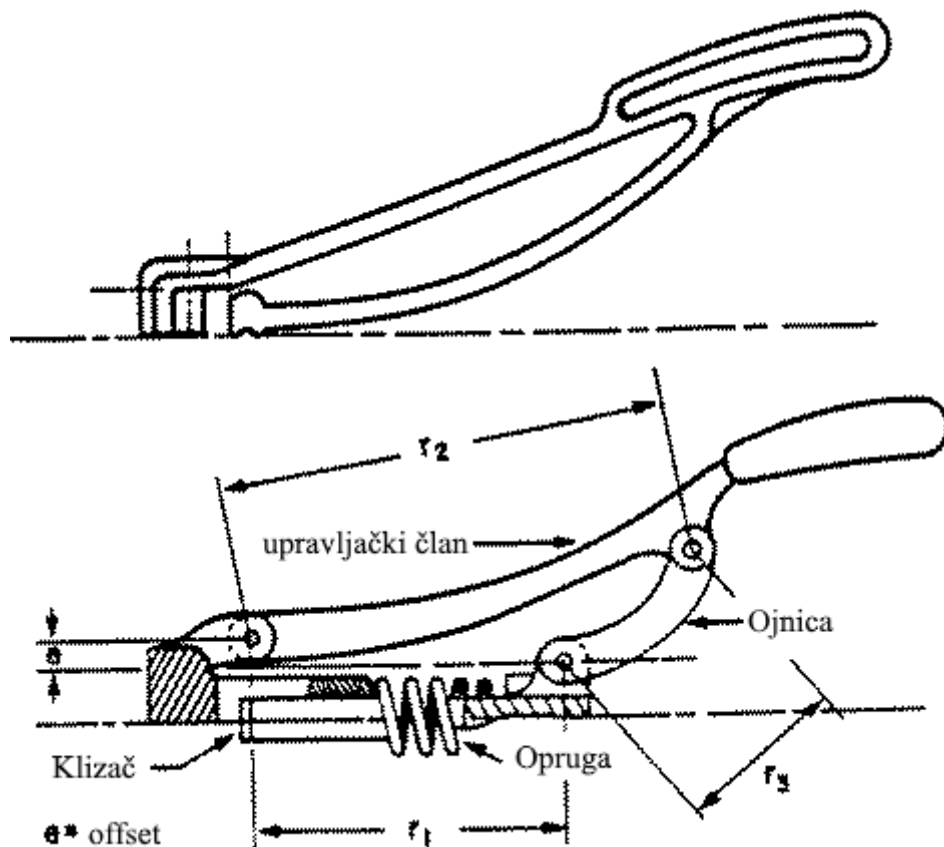
(c) Potpuno deformacijski mehanizam uske raspodijeljenosti



(d) Potpuno deformacijski mehanizam široke raspodijeljenosti

**Slika 7. Klasifikacija deformacijskih mehanizama [13]**

Jedna od glavnih prednosti deformacijskih sustava je što zahtijevaju manji broj dijelova što rezultira u smanjenju troškova proizvodnje i montaže [14]. Na slici se vide dvije izvedbe naprave za stezanje žica (Slika 8.). Naprava od deformabilnih tijela se sastoji od samo jednog tijela te je napravljena injekcijskim prešanjem, dok se naprava s krutim tijelima sastoji od dodatnih dijelova koji mogu dalje doprinosti cijeni konačnog proizvoda.



Slika 8. Mehанизam od deformabilnog tijela (gore) i kruti ekvivalent (dolje) [14]

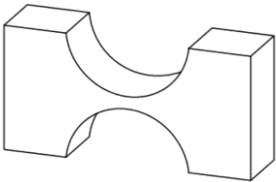
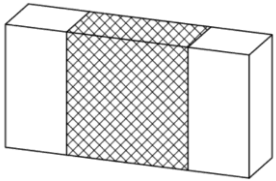
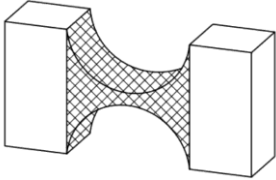
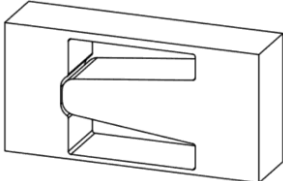
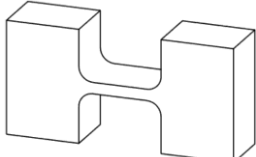
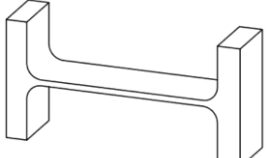
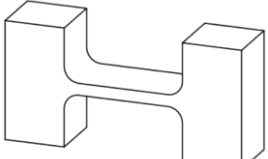
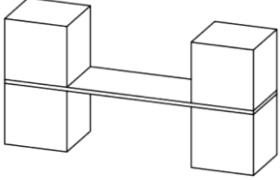
Deformabilni mehanizmi sa sobom donose i nove izazove. Manji broj dijelova znači da oni dijelovi koji su preostali moraju obavljati više funkcija, što zahtijeva drukčiji pristup tijekom konstruiranja proizvoda [15].

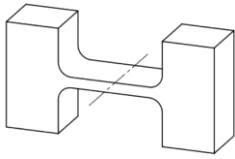
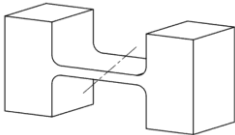
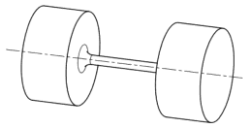
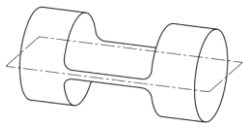
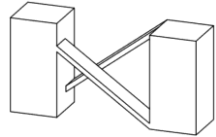
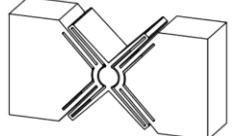
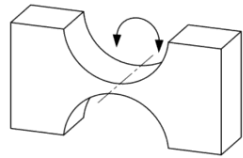
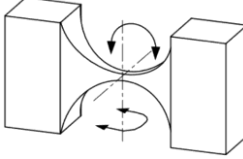
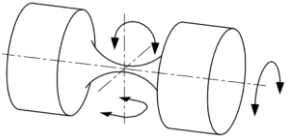
### 2.1.1. Deformacijski zglobovi

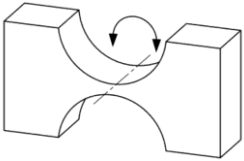
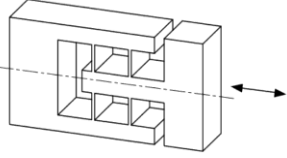
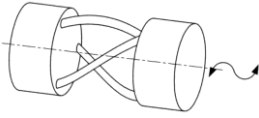
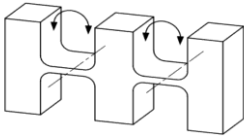
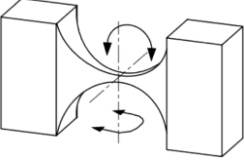
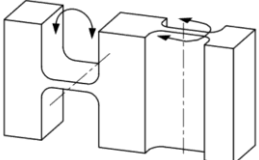
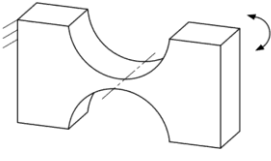
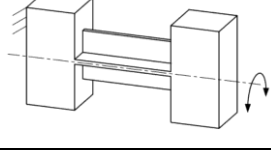
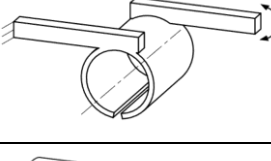
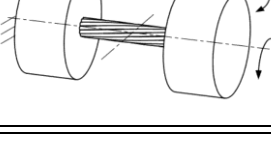
Dio strukture deformacijskog mehanizma koji ima znatno veću fleksibilnost se može smatrati deformacijskim zglobom. Deformacijski zglobovi olakšavaju proces konstruiranja jer se sveukupni sustav tada razdvaja na deformacijske zglobove i krute članove. Ako takva separacija nije moguće preporuča se modeliranje sustava kao potpuno deformacijskog.

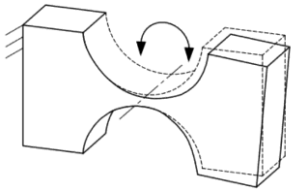
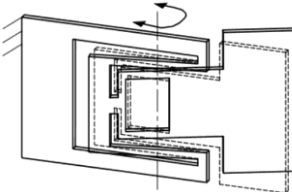
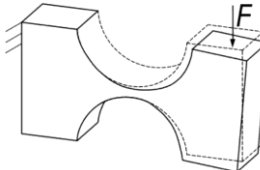
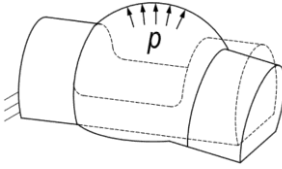
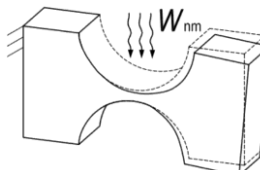
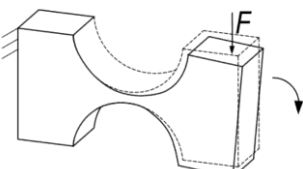
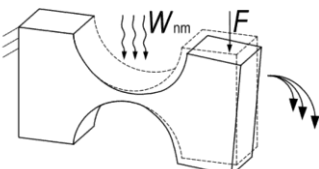
Uzimajući u obzir različite kategorije i kriterije dobiva se klasifikacija deformacijskih zglobova. Ti kriteriji uključuju uzrok relativnog pomaka, raspodijeljenost deformacije, različite inačice konstrukcije, geometrije, kompleksnosti, stupnjeva slobode, tipa gibanja i opterećenja i već spomenutu varijaciju fleksibilnosti.

Tablica 1. Klasifikacija deformacijskih zglobova po različitim kriterijima [16]

Kriterij	Kategorija	Potkategorija	Primjer
Uzrok relativnog pomaka	Fleksibilnost	Varijacija geometrije	
		Varijacija materijala	
		Miješani oblik	
	Fleksibilnost te spoj sile i/ili oblika		
Raspodijeljenost fleksibilnosti	Usko raspodijeljena		
	Široko raspodijeljena		
Konstrukcija dijela/sklopa	Jednodijelni		
	Više dijelova		

Kriterij	Kategorija	Potkategorija	Primjer
Geometrija tijela	Prizmatična	Ravna	
		Kosa	
	Neprizmatična	Osno simetrična	
		Ravninski simetrična	
		Asimetrična	
	Kompleksnost zgloba	Niska	
Visoka			
Stupanj slobode f zgloba	1		
	2		
	≥3		

Kriterij	Kategorija	Potkategorija	Primjer
Tip relativnog pomaka (za $f=1$ )	Rotacija		
	Translacija		
	Uvijanje		
Pozicija osi zgloba (za $f=2$ )	Ravninska		
	Sferična		
	Prostorna		
Vrsta opterećenja	Savijanje		
	Uvijanje (torzija)	Paralelno s x-osi	
		Paralelno s z-osi	
	Savijanje i uvijanje		

Kriterij	Kategorija	Potkategorija	Primjer
Pozicija osi prizmatičnog zgloba	Os normala na $xy$ ravninu (planarni zglob)		
	Os paralelna s $xy$ ravninom (ortoplanarni zglob)		
Funkcionalna integracija	Pasivni zglob (pomak uslijed vanjske sile)		
	Aktivni zglob (Pomak uslijed lokalne promjene energije)	Neaktivna radna tvar	
		Aktivna radna tvar	
Varijabilnost fleksibilnosti	Konstantna		
	Varijabilna		

Odabir deformacijskog zgloba ovisi o zadanome problemu, no mogu se pojaviti različiti izazovi. Primjerice kompleksni zglobovi se mogu primjenjivati u slučajevima kada je potrebna visoka preciznost, no mogu uzrokovati probleme prilikom konstrukcije, što se pak može riješiti korištenjem asimetrične geometrije [17].

Dosad su pokazane različite klasifikacije i kategorizacije deformacijskih sustava, mehanizama i zglobova, a u pravilu se koriste zglobovi s jednom osi slobode  $f=1$  [18]. U praksi se najčešće koriste jednostavni prizmatični zglobovi uske raspodijeljenosti fleksibilnosti zbog toga što se tada mogu konstruirati prema sličnim načelima kao i sustavi s krutim tijelima [19], što pojednostavljuje proces.

U ovome diplomskome radu analizirati će se potpuno deformacijski mehanizam s prizmatičnim zglobovima uske raspodijeljenosti i niske kompleksnosti.



### 3. POZICIONIRANJE

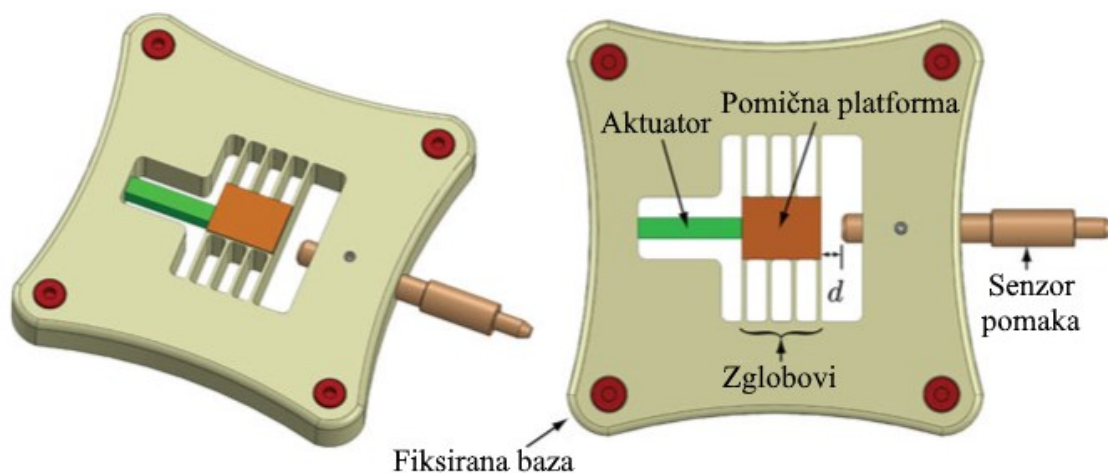
Pozicioniranje označava određivanje koordinate točaka ili tijela na Zemlji, u moru, svemiru u odnosu na referentni okvir [20].

Referentni okvir je fizička realizacija (referentnog) koordinatnog sustava. Izrazi referentni okvir i referentni sustav se ponekad u literaturi naizmjenice koriste i mogu zbuniti čitatelja. Referentni sustav opisuje položaj ili gibanje tijela u odnosu na teoretski prostor, dok referentni okvir zadovoljava matematička pravila pripadnog referentnog koordinatnog sustava tako što fizički realizira geometrijske točke nužne za definiranje koordinatnog sustava. Referentni okvir se definira svojim ishodištem i glavnim osima ili ishodištem, mjerilom i orijentacijom glavnih osi ili fundamentalnih ploha [21]. Često se koriste referentni okviri koji su različite realizacije trodimenzionalnog Kartezijevog koordinatnog sustava (lijevog ili desnog), što znači da su osi i temeljne plohe ortogonalne. Referentni okvir može imati ishodište u prostori (npr. pri kalibraciji mjernih uređaja ili gradnji), u središtu Zemlje (npr. referentni okvir kojeg koristi GNSS), senzoru (npr. težište senzora) kojeg koristimo itd. Točnost koordinata određenih pozicioniranjem ovisi o točnosti referentnog okvira u kojem vršimo mjerenje [22] i o mjernom uređaju.

Mjerni uređaji za pozicioniranje mogu mjeriti apsolutni ili relativni položaj. Mogu mjeriti linearne i/ili kutne pomake. Postoji mnogo vrsta uređaja za pozicioniranje i u slijedećem potpoglavlju opisuju se uređaji za nanopozicioniranje.

#### 3.1. Nanopozicioniranje

Uređaji za nanopozicioniranje su mehanički uređaji za pozicioniranje koji su sposobni proizvesti pomak s nanometarskom rezolucijom. Većina sustava za nanopozicioniranje koristi piezoelektrični aktuator za stvaranje sile i shodno pomaka. Aktuatori mogu na temelju električnog signala proizvesti pomak u iznosu do 0,1% njihove veličine. Maksimalni napon  $U$  koji se koristi u sustavima za nanopozicioniranje koji se temelje na piezoaktuatorima varira od 60 V do 200 V [23].



Slika 9. Uređaj za nanopozicioniranje [23]

Sustavi za nanopozicioniranje imaju različite primjene industrijske i komercijalne svrhe. Neke od primjena su poravnavanje vlakana [24], platforme za lateralno pozicioniranje [25], sustavi za nanoprodukciju [26] i mikroskopija na temelju sonde za skeniranje (SPM) [27] kao što je AFM sustav za mikroskopiju atomske sile.

### 3.2. Piezoelektrični aktuator

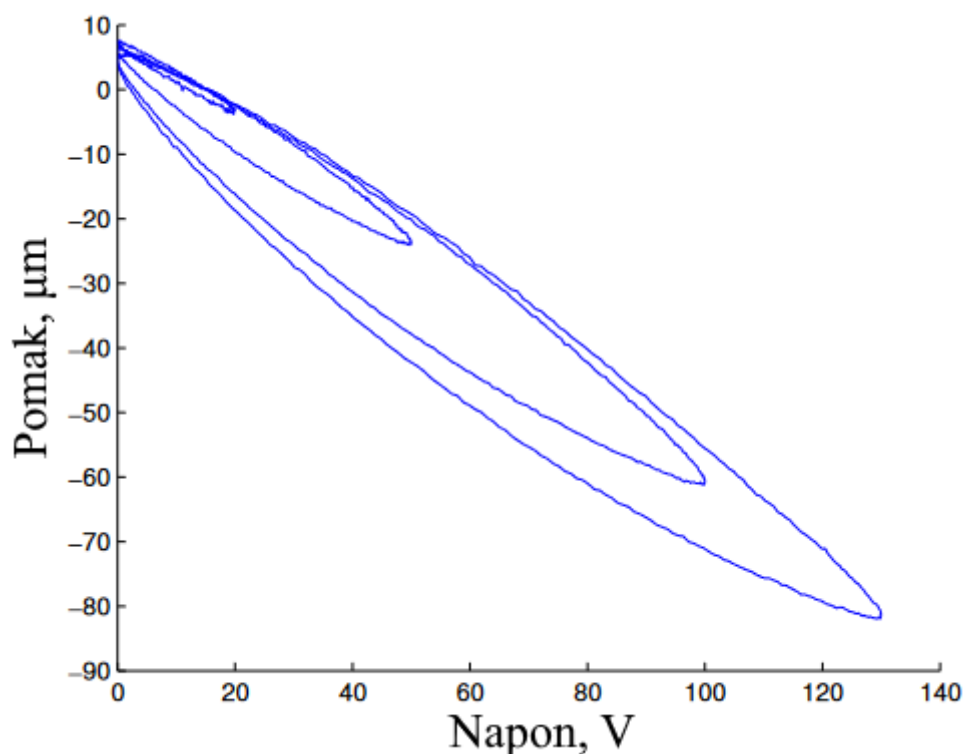
Aktuatori su uređaji koji na temelju ulaznog signala razvijaju gibanje, silu ili moment. U slučaju piezoelektričnih aktuatora uslijed pobude piezoelementa električnim signalom dolazi do elastične deformacije materijala.

Piezoelektrični efekt otkriven je 1880. godine kada se pokazalo da određeni materijali kao što je kvarc, proizvode električni naboj kada se deformiraju, a nedugo poslije je pokazano da efekt funkcionira i u obrnutom smjeru, odnosno da uslijed stimulacije s nabojem određeni se materijali deformiraju [28].

Korištenje piezoelektričnih aktuatora donosi sa sobom posebne izazove, posebice pojavu histereze, puzanja, i ovisnosti o temperaturi. U sljedećim potpoglavljima će se zasebno razraditi svaka spomenuta pojava.

#### 3.2.1. Histereza

Pojava histereze je kompleksan problem kod piezoelektričnoga efekta što je rezultat elektromehaničkog djelovanja materijala, a kvalitativno se razlikuje od histereze koja se pojavljuje u slučajevima gdje se radi o čisto električnim, magnetskim, ili elastičnim varijablama [29].

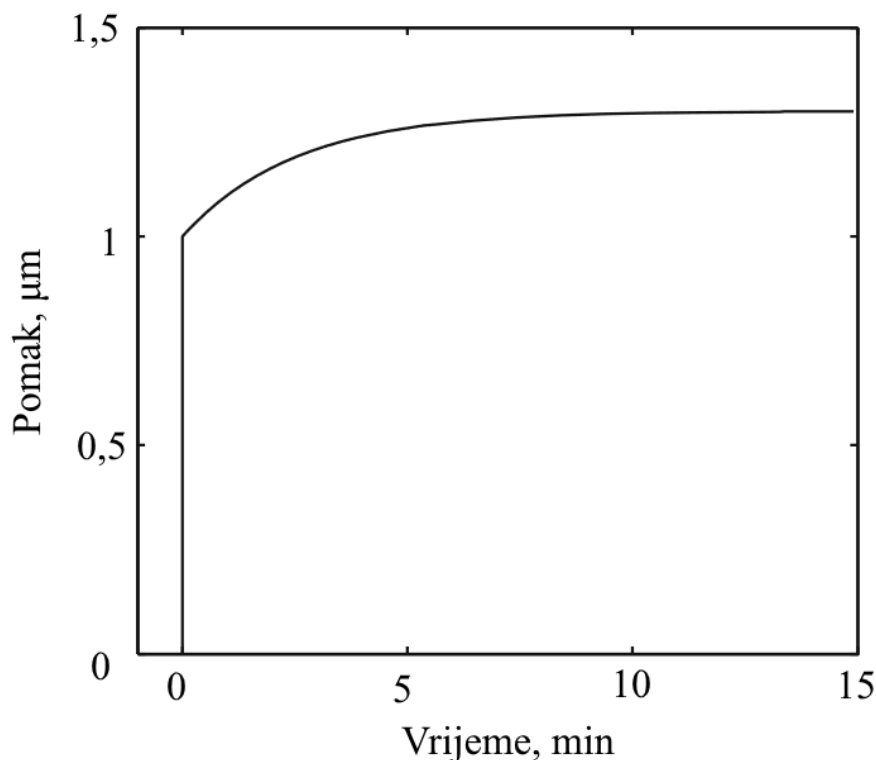


Slika 10. Grafički prikaz pojave histereze kod piezokristala [30]

Postoje različiti pristupi rješavanja problema histereze; Jedna opcija je pomno dizajniranje materijala na mikrorazini tako da se reducira histereza, a i dalje zadržava piezoelektrični efekt na makrorazini. Drugi, inženjerski način, je da se reducira histereza upravljanjem ulaznog signala. U oba slučaja je bitno shvatiti pojavu histereze prije no što ju pokušavamo regulirati [29].

### 3.2.2. Puzanje

Puzanje (creep) je pojava kod piezoelektričnih aktuatora zbog koje nakon određenog signala pomak puza prema stabilnoj vrijednosti odziva. Na slici (Slika 11.) se može vidjeti odziv piezoelementa na jedinični skok (step signal) s pojavom puzanja. Vremenska konstanta puzanja iznosi nekoliko minuta.



Slika 11. Prikaz puzanja (creep) kod piezoelementa [23]

### 3.2.3. Stabilnost u ovisnosti o temperaturi

Karakteristike piezoelementa značajno ovise o temperaturi. S porastom temperature mnoga svojstva opadaju te piezoelektrični materijali imaju tzv. Curie temperaturu nakon koje gube piezoelektrična svojstva [31].

Tablica 2. Svojstva nekih piezoelektričnih materijala na 20°C

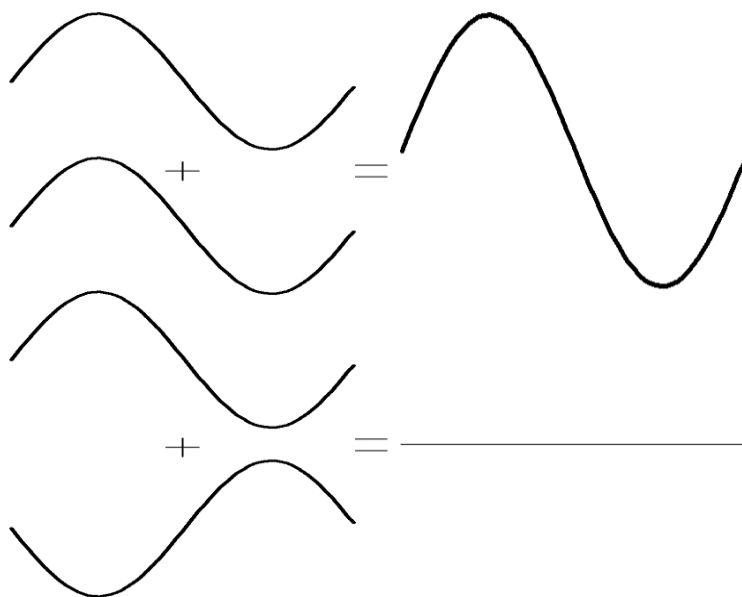
	PVDF	BaTiO <sub>3</sub>	PZT	Kvarc	TGS
$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	1780	5700	7500	2650	1690
$\epsilon_r$	12	1700	1200	4,5	45
$\delta$ , 10 <sup>10</sup> N/m	0,3	11	8,3	7,7	3
$d$ , pC/N	d <sub>31</sub> = 20 d <sub>32</sub> = 2 d <sub>33</sub> = 30	78	110	2,3	25
$k$ , %	11	21	30	10	-

Kako se u ovome radu cilja obavljati eksperiment u standardnim uvjetima, temperatura bi trebala imati manji učinak na radne uvjete piezoelementa.

#### 4. LASERSKI INTERFEROMETAR

U eksperimentu za ovaj diplomski rad korišten je laserski interferometar, stoga je potrebno objasniti što je interferometrija, a i samim time što je interferencija.

Interferencija valova je međudjelovanje dvaju ili više valova (redovito jednake valne duljine) koji istodobno prolaze kroz isti prostor. Shodno tomu, interferometrija je metoda mjerenja koja koristi načelo interferencije valova. Ti valovi mogu biti zvučni, radio valovi ili elektromagnetski valovi.

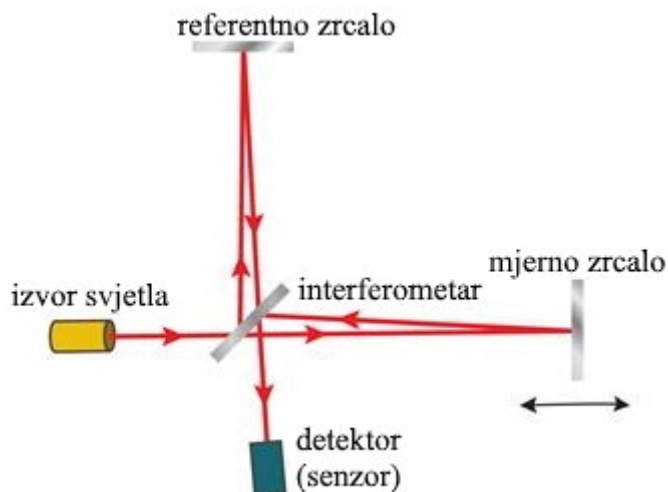


**Slika 12. Jednostavan prikaz konstruktivne (gore) i destruktivne (dolje) interferencije**

Budući da je valna duljina vidljive svjetlosti veoma mala (cca pola mikrometra za zeleno svjetlo), veoma male promjene u razlici optičkog puta proizvode mjerljive promjene intenziteta uzorka interferencije. Kao rezultat, optička interferometrija pruža veoma točna mjerenja i zbog toga se koristi već stotinu godina kao laboratorijska mjerna tehnika. Najbitniji napredak u točnosti optičke interferometrije je izum lasera. Za razvoj optičke interferometrije bitno je i sve veće korištenje fotodetektora i digitalne elektronike za obradu signala. Interferometrijska mjerenja se koriste za mjerenja duljine visoke točnosti, mjerenja pomaka i vibracija, testove optičkih sustava, istraživanje toka plinova i plazme, mjerenja temperature, tlaka, električnog i magnetskog polja, detektiranje rotacije, spektroskopiju visoke rezolucije, i gravimetrijska mjerenja.

U svojoj osnovi laserska interferometrija zahtjeva izvor svjetla, detektor (senzor). Prvi primjer interferometrije je pokazao Albert A. Michelson 1880-ih. Svjetlost prolazi kroz optičku leću

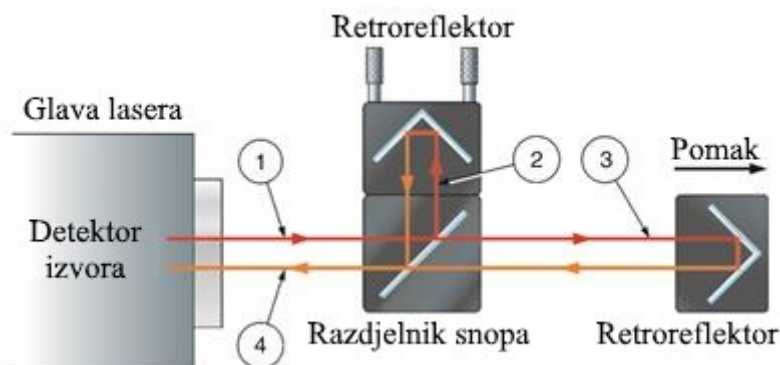
koja šalje zraku prema referentnom i mjernom zrcalu, te se obje nakon reflektiranja mjere detektorom, s kojim se može analizirati razlika između valova, na temelju čega se može odrediti pomak.



Slika 13. Osnovni koncept laserske interferometrije [33]

Nadalje, interferometrija također označava metode koje koriste svjetlosne valove za proučavanje promjena pomaka. Mjerenje pomaka interferometrijom ima široku uporabu u kalibraciji i mehaničkim upravljanjem pomaka visoko preciznih proizvodnih postupaka.

U ovom radu koristio se Renishaw ML10 laserski interferometar. U slučaju Renishaw ML10 laserskog interferometra koriste se dodatna zrcala koja omogućuju ja da se izvor svjetla (laser) i detektor nalaze u istom sklopu.



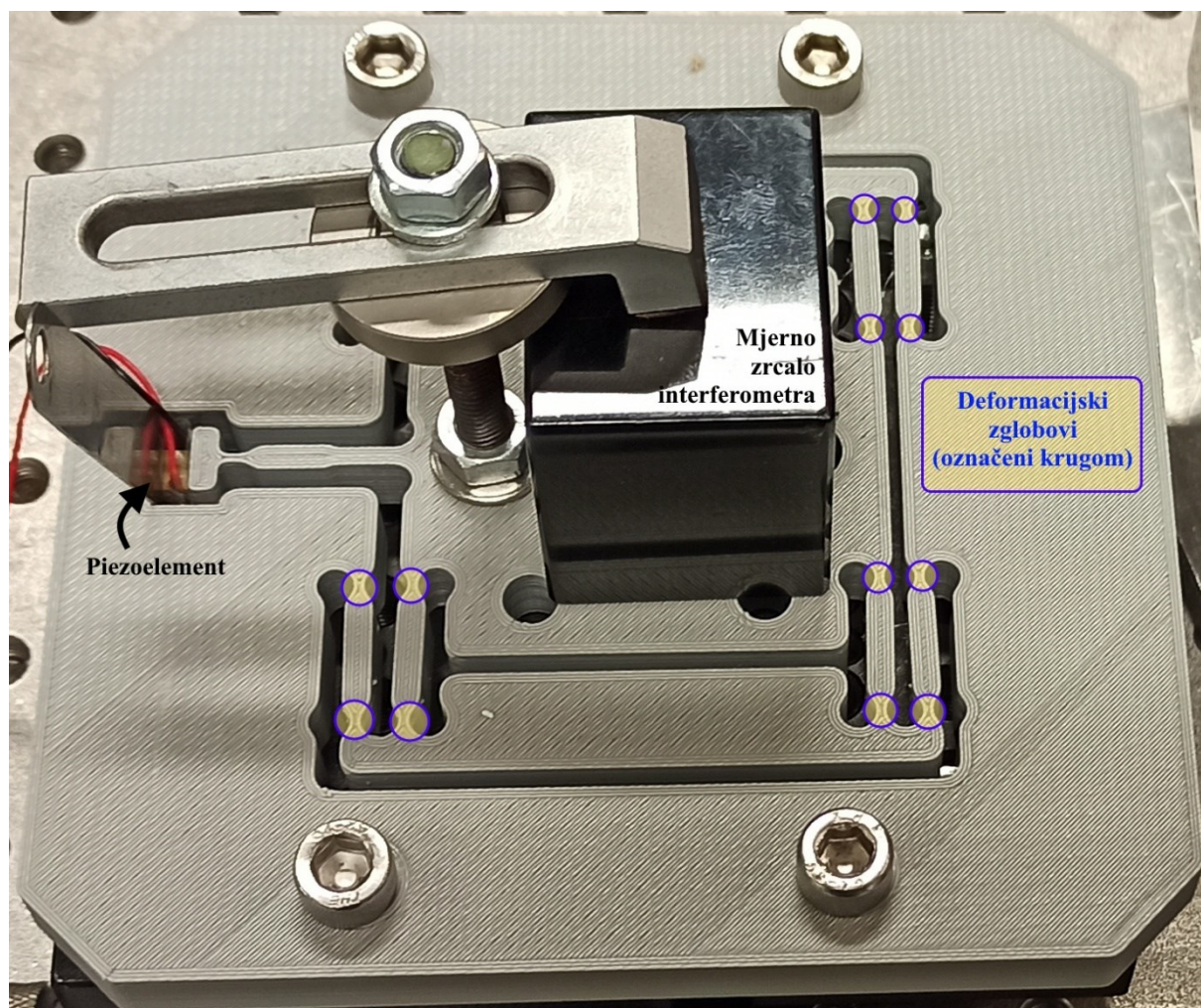
Slika 14. Prikaz primjene koncepta laserske interferometrije [33]

## 5. EKSPERIMENT

U laboratoriju za precizna mjerenja dužina izrađen je deformacijski sustav koji se koristio u ovome diplomskome radu. U eksperimentu se koristio laserski interferometar Renishaw ML10.

### 5.1. Deformacijski sustav

Deformacijski sustav korišten u eksperimentu izrađen je u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina FSB-a. Sustav je napravljen koristeći tehnologiju 3D printanja. Vijčanim spojem je pričvršćen na eksperimentalnu ploču dok je na sam sustav pričvršćen dio interferometra, razdjelnik snopa (u sredini), a na pomični dio na lijevom rubu je stavljen piezokristal koji je povezan s kontrolerom (Slika 15.).

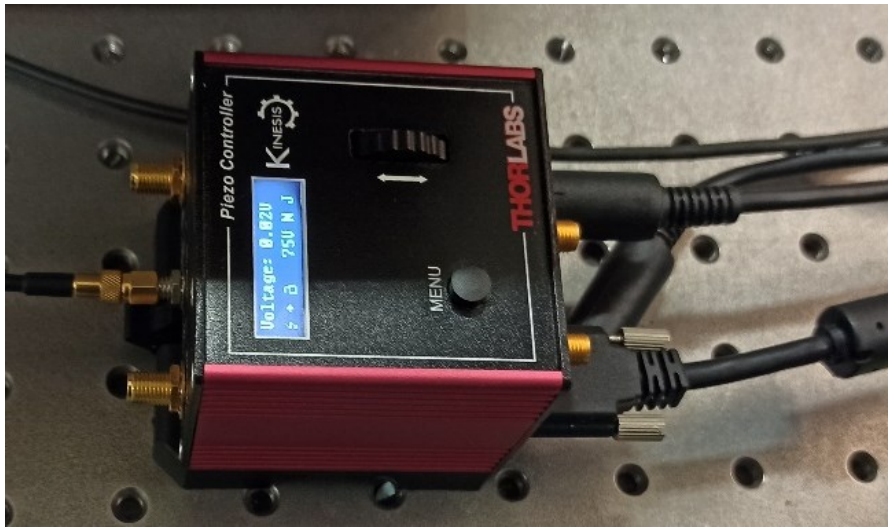


Slika 15. Deformacijski sustav korišten u eksperimentu

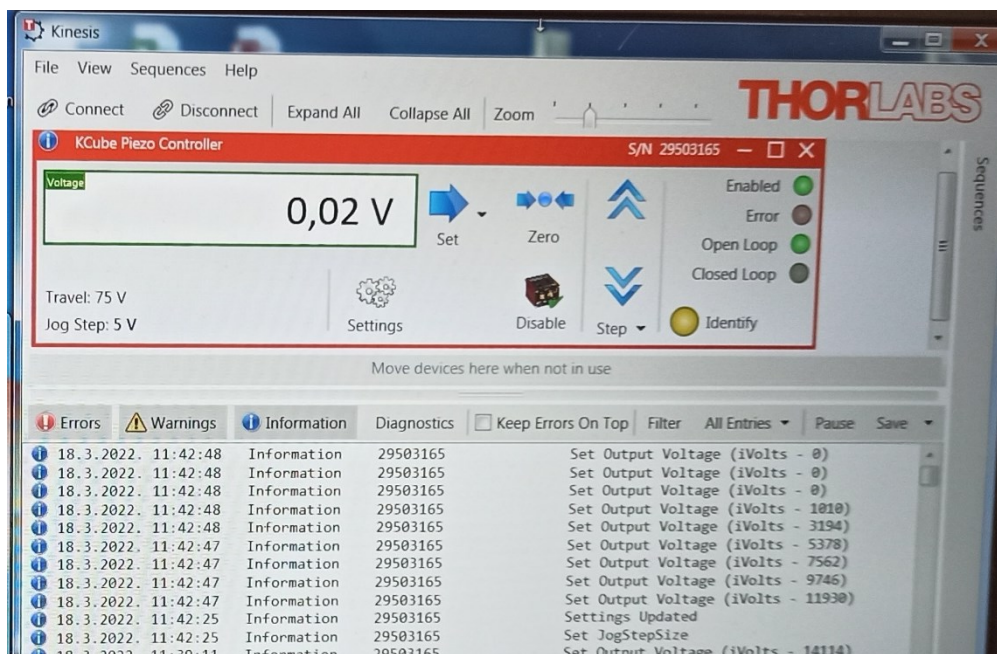
### 5.2. Piezoaktuator

U eksperimentu je korišten THORLABS piezokontroler model TA0505D024W kojim se upravlja s Kinesis softverom preko računala. Piezokontroler ima raspon napona od 0 V do 75

V s maksimalnim pomakom od  $2,8 \mu\text{m} \pm 15\%$  pri  $25^\circ\text{C}$ , a također je moguće proizvoljno odrediti korak tijekom upravljanja.



Slika 16. Piezokontroler korišten u eksperimentu

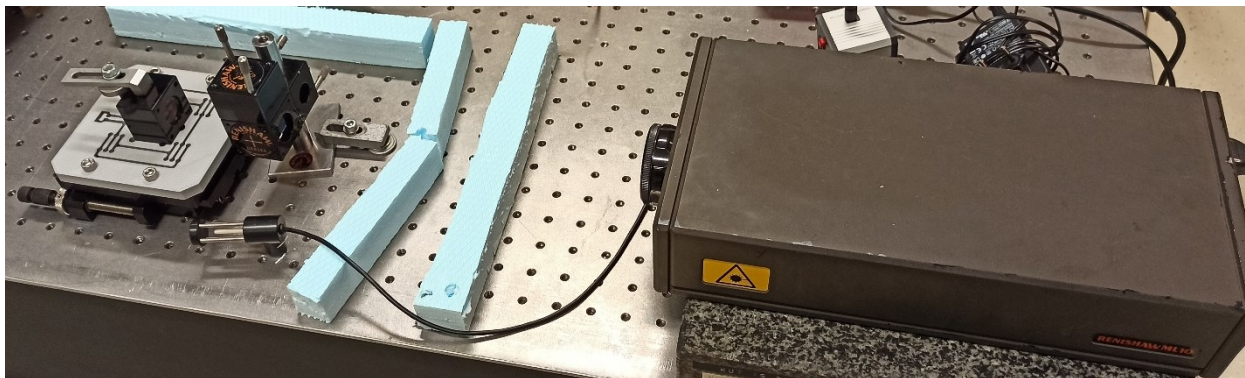


Slika 17. Thorlabs Kinesis softver korišten u eksperimentu

### 5.3. Inicijalni eksperimentalni postav

Da bi se utvrdila točnost mjernog uređaja prvi korak je bio provjeriti točnost mjerenja kada se na njega postavi samo mjerno zrcalo bez prisustva piezokristala.





**Slika 18. Inicijalni eksperimentalni postav za mjerenje pomaka deformacijskog sustava**

Mjerenje je odvijano tako da se deformacijski sustav nalazio na pomičnome postolju s kojim se moglo upravljati s navojnim vretenom. Ukupni raspon pomičnoga postolja je 50 mm, što se u prvom krugu mjerenja podijelilo na 12 točaka, svaka razmaknuta od susjedne 4 mm. U svakoj točki se obavljalo mjerenje tako da bi se sustav postavio u tu poziciju i vrijednost podesila na 0, cijeli mjerna postav bi odstajao u poziciji par minuta da se vrijednost stabilizira, te bi se zatim očitavala vrijednost. U drugom krugu mjerenja obavljalo se mjerenje samo sa 6 točaka, tako da su točke imale međusoban razmak od 8 mm. Pozitivna vrijednost se očitavala u smjeru djelovanja lasera, dakle od kućišta prema deformacijskom sustavu.

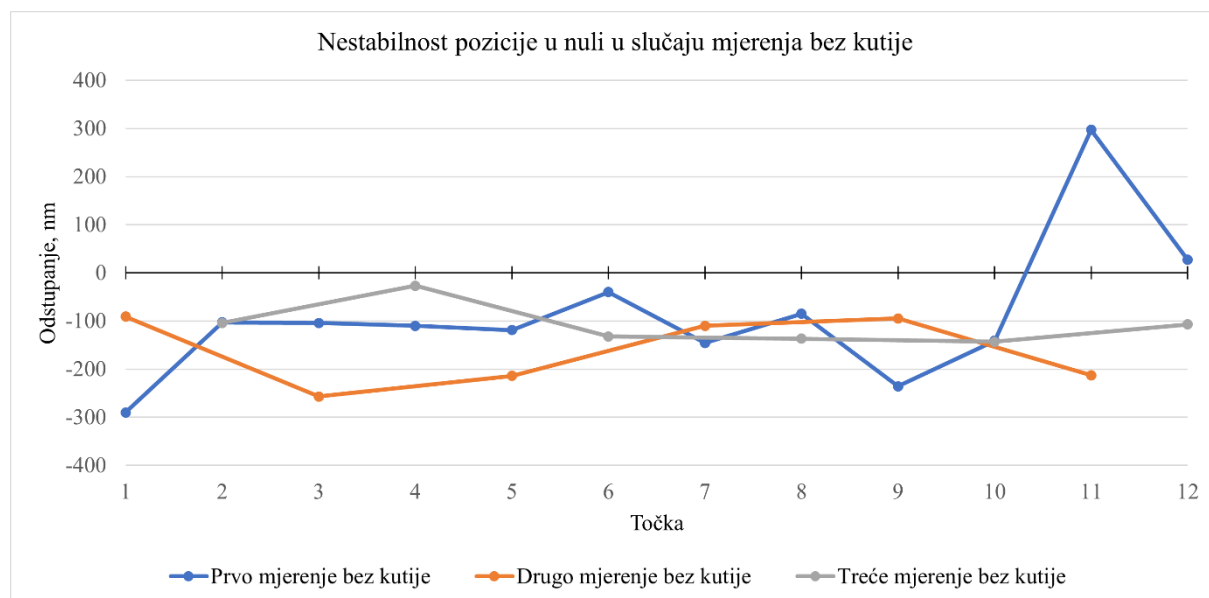
Valja napomenuti da se nije očitavala trenutna vrijednost koju bi mjerni uređaj dobivao već se opcijom „short term averaging“ prikazivao prosjek na temelju kratkog vremenskog raspona od 1ms.

**Tablica 3. Inicijalna mjerenja bez kutije**

Točka	Datum mjerenja	
	16. ožujka 2022	17. ožujka 2022
	Pomak uslijed nestabilnosti, nm	
1	-290	-91
2	-103	-104
3	-104	-257
4	-110	-27
5	-119	-214
6	-40	-132
7	-146	-110

8	-85		-137
9	-236	-95	
10	-141		-143
11	297	-213	
12	27		-107
$\sigma$	139,81	66,52	39,20

Na gore prikazanoj tablici se mogu vidjeti rezultati mjerenja bez kutije i povezana standardna devijacija. Također je vidljivo da nakon duljeg perioda stabilizacije zanošenje nakon ponovnog mjerenja postane manje izraženo.

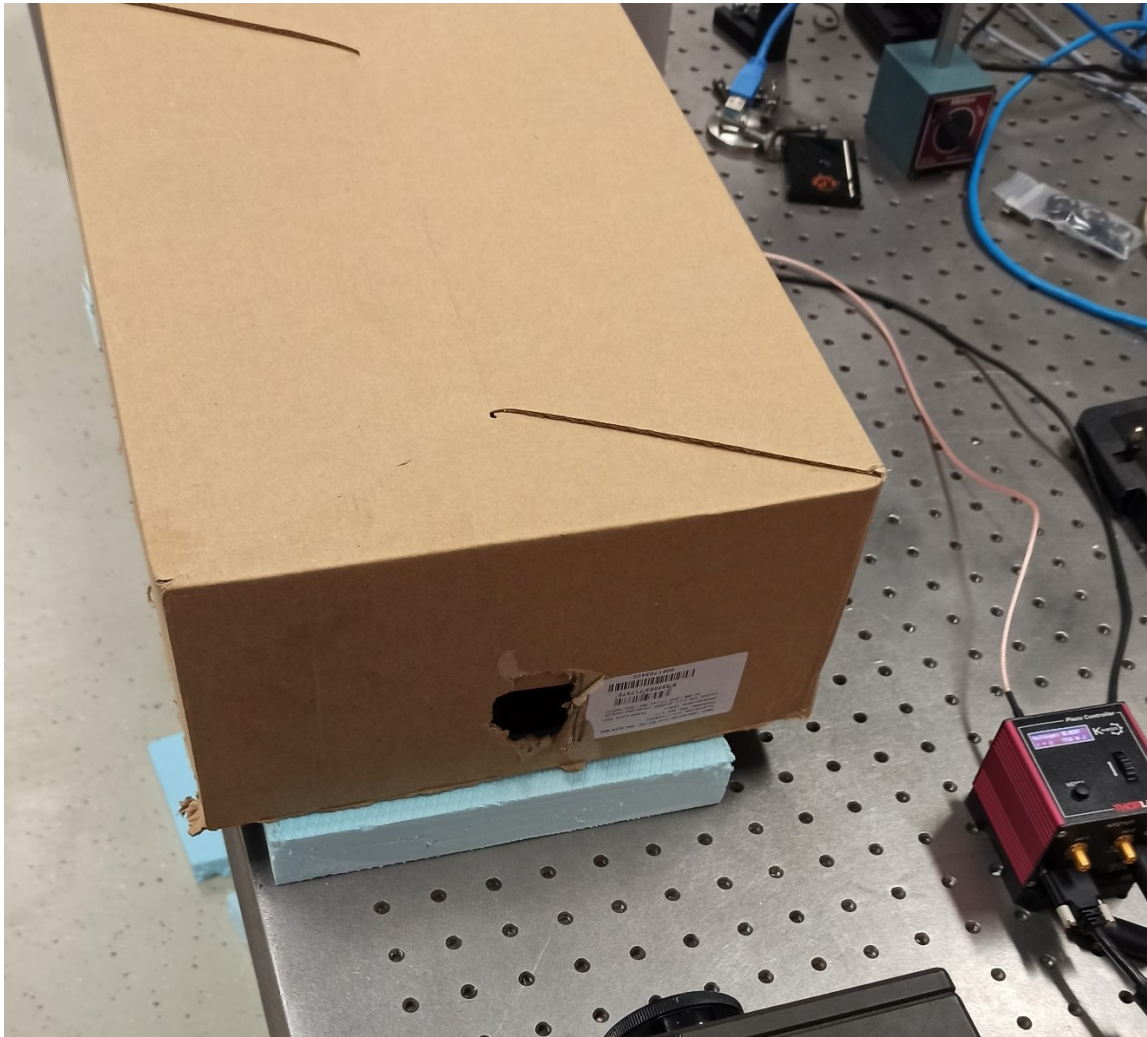


**Slika 19. Mjerenja nestabilnosti pozicije bez kutije**

Nakon provođenja inicijalnog mjerenja, prema rezultatima mjerenja je primijećena kontinuirana nestabilnost pozicije (drift) rezultata. Prvo mjerenje prikazano na slici (Slika 19.) je obavljeno netom poslije postavljanja inicijalnog eksperimentalnog postava. Nakon prvog mjerenja postav je ostavljen da par sati nastavi mjerenje nakon čega je nestabilnost pozicije prešlo vrijednost od 3000 nm.

Kako su se mjerenja obavljala u laboratoriju gdje se temperatura održava sa klima uređajima unutar samog laboratorija, pretpostavka nakon prvog mjerenja je da su glavni faktori koji uzrokuju nestabilnost pozicije bili temperatura i cirkulacija zraka. Shodno tome postava je modificirana tako da je deformacijski sustav zaštićen od cirkulacije s kartonskom kutijom.

### 5.3.1. Dodatna zaštita postava

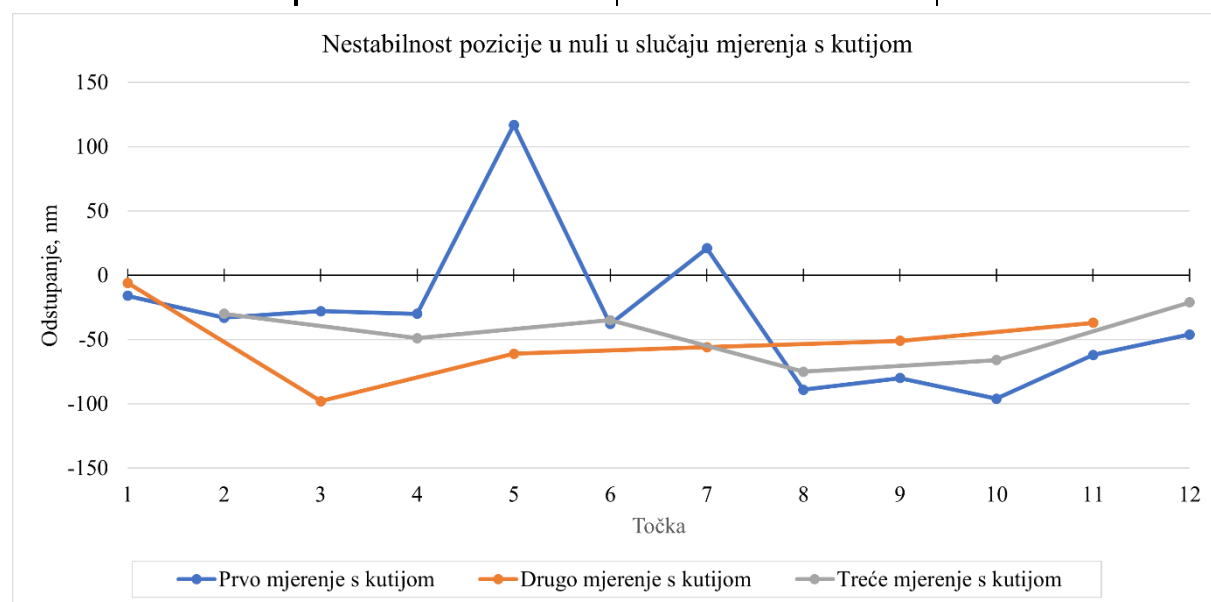


**Slika 20. Kartonska kutija**

Nakon provođenja dodatne serije mjerenja pokazano je da je kartonska kutija imala pozitivan utjecaj na stabilnost rezultata mjerenja, no ne dovoljno da bi se pouzdano mogla utvrditi ovisnost pomaka o naponu.

Tablica 4. Mjerenja s kutijom

Točka	Datum mjerenja		
	16. ožujka 2022	17. ožujka 2022	
	Pomak, nm		
1	-16	-6	
2	-33		-30
3	-28	-98	
4	-30		-49
5	117	-61	
6	-38		-35
7	-21	-56	
8	-89		-75
9	-80	-51	
10	-96		-66
11	-62	-37	
12	-46		-21
$\sigma$	54,83	27,55	19,37



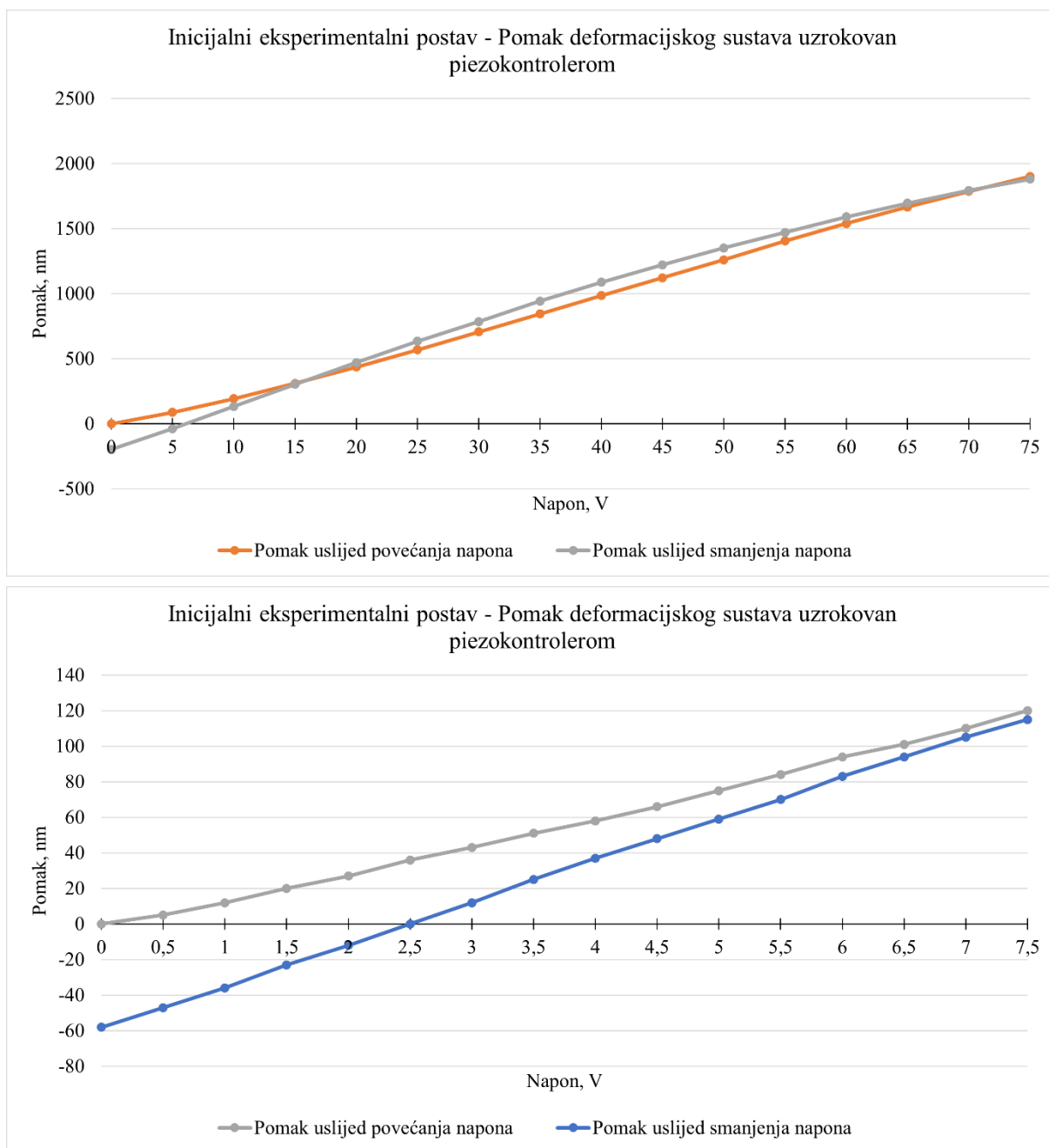
Slika 21. Mjerenja nestabilnosti pozicije s kutijom

Na tablici (Tablica 4.) i povezanom grafu (Slika 21.) može se vidjeti da je nestabilnost pozicije tijekom mjerenja primjetno manja nego u slučaju bez kutije. Nestabilnost pozicije nakon što je uređaj ostavljen da mjeri preko noći, slično kao i u slučaju bez kutije doseže značajnu vrijednost, ovaj put manje nego bez kutije, otprilike 1000 nm, no zbog nepoznatog razloga je laserska zraka prekinuta što je zaustavilo mjerenje tijekom noći.

Kako je s korištenjem kutije došlo do stabiliziranja rezultata mjerenja, napravljena je dodatna provjera s dodanim piezokristalom koji je povezan na kontroler. Koristeći kontroler napravljena su dva seta mjerenja, kod prvog je korak bio 5 V, dok je kod drugog bio 0,5 V. U oba slučaja napravljeno je mjerenje tijekom povećanja i tijekom smanjenja napona.

**Tablica 5. Pomak uzrokovan piezokontrolerom**

Korak, V	$\Delta x_{U+}$ , nm	$\Delta x_{U-}$ , nm	Korak, V	$\Delta x_{U+}$ , nm	$\Delta x_{U-}$ , nm
0	0	-197	0	0	-58
5	88	-37	0,5	5	-47
10	193	133	1	12	-36
15	311	303	1,5	20	-23
20	436	471	2	27	-12
25	569	635	2,5	36	0
30	707	786	3	43	12
35	845	942	3,5	51	25
40	985	1088	4	58	37
45	1122	1222	4,5	66	48
50	1260	1351	5	75	59
55	1405	1470	5,5	84	70
60	1539	1590	6	94	83
65	1666	1695	6,5	101	94
70	1786	1793	7	110	105
75	1901	1881	7,5	120	115



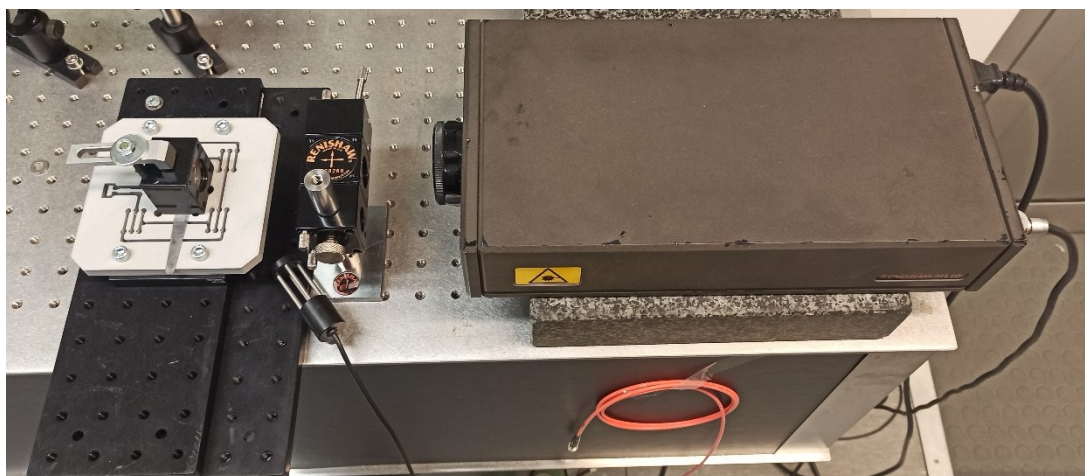
**Slika 22. Pomak deformacijskog sustava uslijed povećanja napona korakom od 5 V (gore) i 0,5 V (dolje)**

Kako ni u jednom ni u drugom slučaju nema pojave jasne histereze koja se očekuje u ovakvom sustavu, niti su grafovi pomaka međusobno slični, zaključuje se da treba naći novo rješenje kojim se dalje otklanjaju smetnje.

#### 5.4. Novi eksperimentalni postav

Sljedeće rješenje je bilo prebacivanje postave u manji laboratorij koji se ne hladi direktnim strujanjem zraka već se nalazi unutar druge prostorije koja se hladi strujanjem te ta soba onda hladi sami laboratorij. Mjerenja su pokazala daljnje poboljšanje stabilnosti, no procijenjeno je

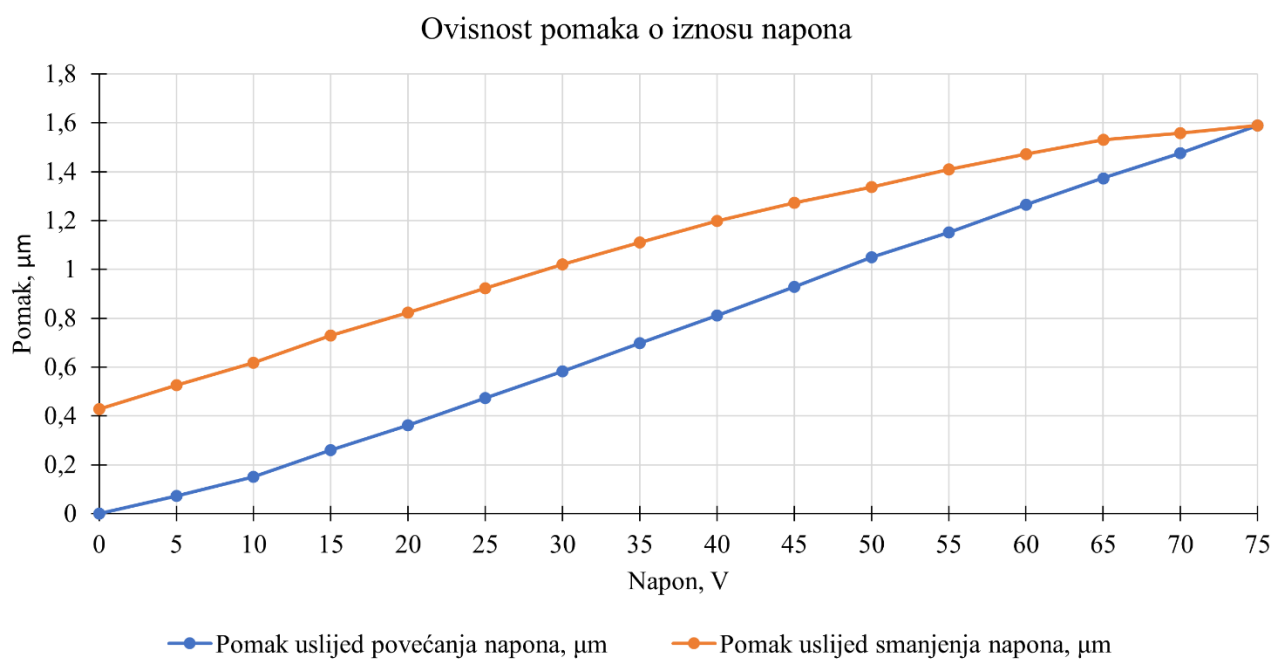
da postoji mogućnost za dodatnim poboljšanjem. Naime i tijekom ovih mjerenja mjeritelj se nalazio uz eksperimentalni postav radi očitavanja rezultata i mjerenja.



**Slika 23.** Nova eksperimentalni postav unutar laboratorija za nanomjeriteljstvo

Laptop na kojem su se očitavala mjerenja povezan je s računalom na lokaciji izvan laboratorija, te je tada nestabilnost pozicije smanjeno na znatno nižu razinu od 20 nm u 10 minuta nakon čega nije dolazilo do značajnijih promjena.

Na prvom grafu pomaka se može vidjeti da još postoji zanošenje kod mjerenja, što se može pripisati smetnjama koje su uvedene u sustav tijekom postavljanja veze s računalom.



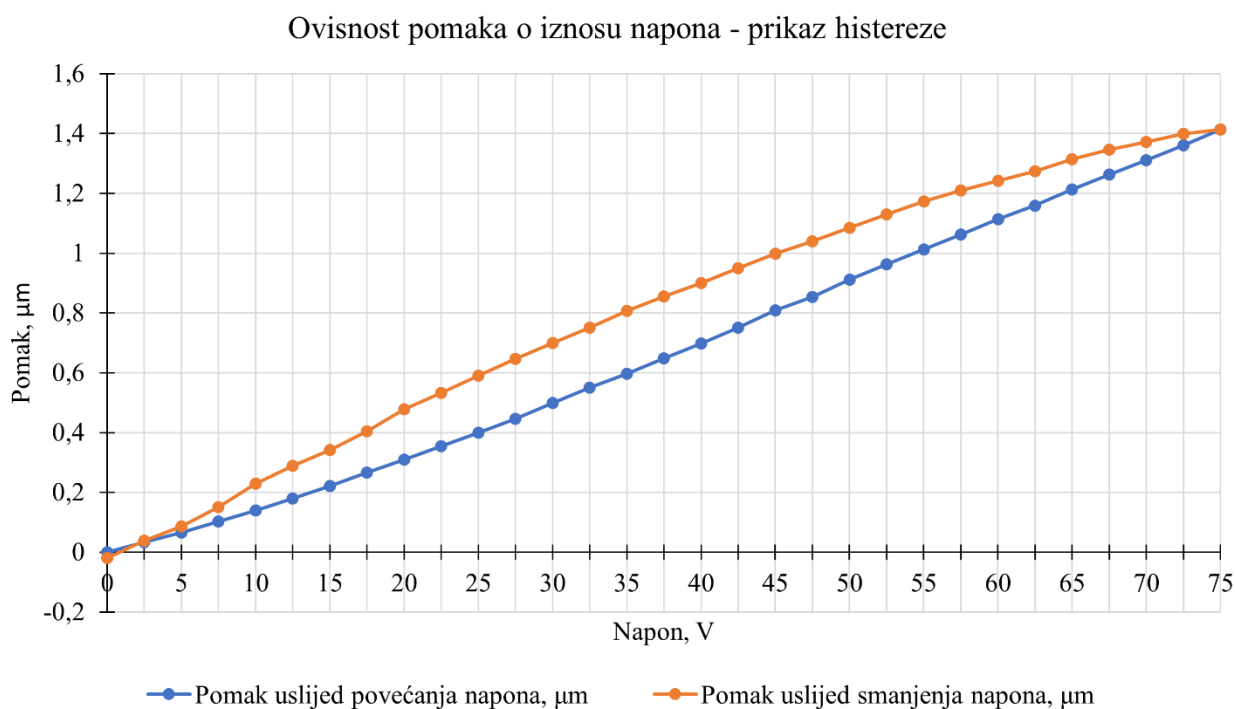
**Slika 24.** Graf pomaka nakon otklanjanja temperaturnog utjecaja mjeritelja

Tablica 6. Inicijalno mjerenje nakon premještanja u mali laboratorij

$U, V$	$\Delta x_{U+}, \mu m$	$\Delta x_{U-}, \mu m$
0	0	0,428
5	0,072	0,525
10	0,151	0,618
15	0,26	0,73
20	0,362	0,822
25	0,473	0,922
30	0,582	1,021
35	0,698	1,111
40	0,812	1,199
45	0,929	1,273
50	1,049	1,337
55	1,151	1,409
60	1,264	1,472
65	1,373	1,531
70	1,475	1,557
75	1,588	1,588

Kako su otklonjene najveće smetnje moglo se provesti mjerenje iz kojeg bi se mogao donijeti zaključak u vezi stabilnosti i odstupanja od linearnosti. Početno mjerenje (Slika 25.) prikazuje mogućnost histereze što bi se poklapalo sa prijašnjim istraživanjima o piezoelektričnome efektu, koji u pravilu sa sobom donosi histerezu, što je i naglašeno u dokumentaciji piezokontrolera korištenog u eksperimentu.



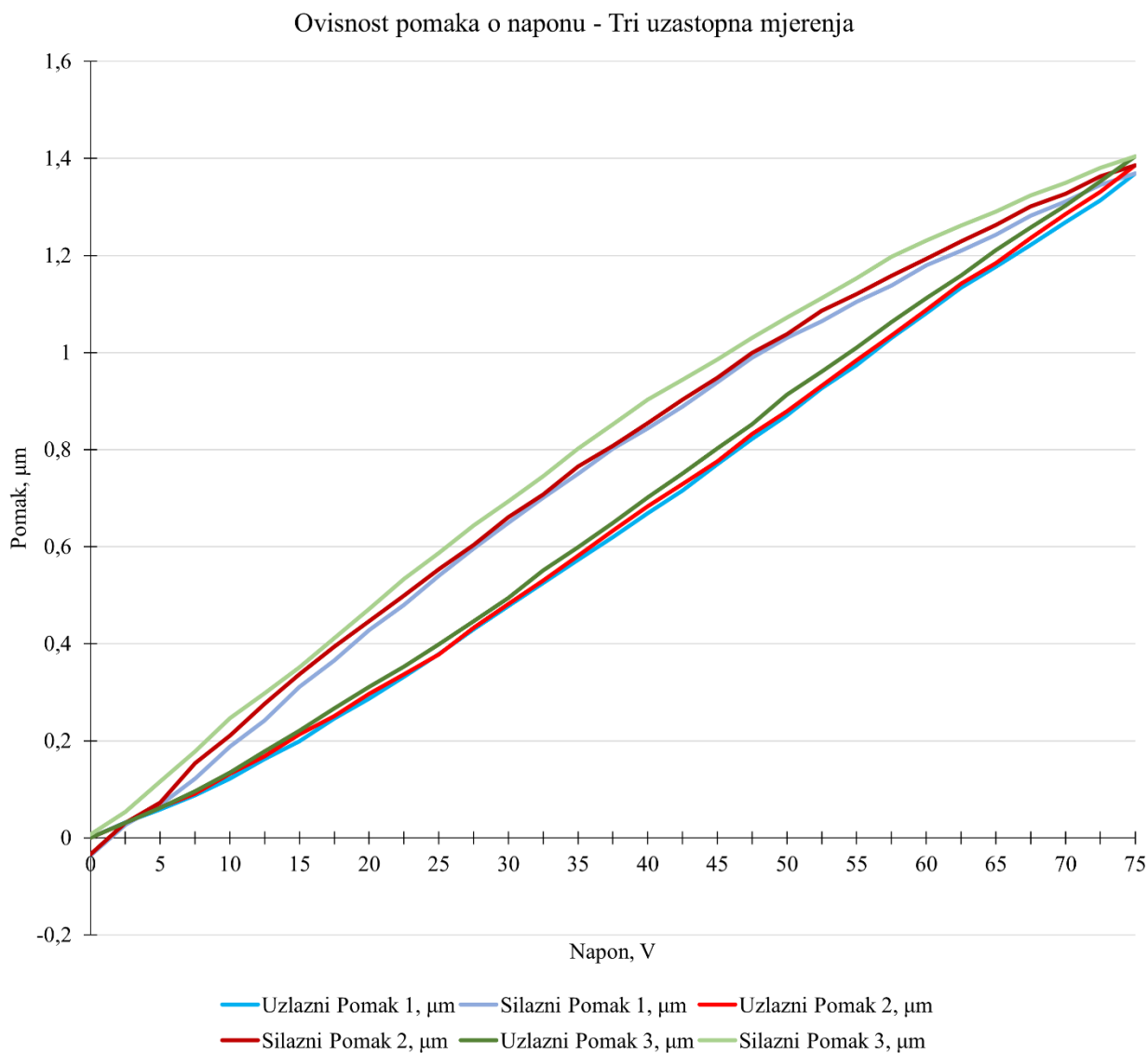


Slika 25. Graf pomaka sustava pri povećanju i smanjenju napona

$U, \text{V}$	$\Delta x_{U+}, \mu\text{m}$	$\Delta x_{U-}, \mu\text{m}$
0	0	-0,02
2,5	0,033	0,038
5	0,066	0,086
7,5	0,103	0,151
10	0,14	0,23
12,5	0,179	0,288
15	0,222	0,342
17,5	0,266	0,404
20	0,309	0,478
22,5	0,355	0,533
25	0,399	0,59
27,5	0,446	0,646
30	0,499	0,7
32,5	0,55	0,75

35	0,597	0,807
37,5	0,648	0,855
40	0,698	0,9
42,5	0,75	0,949
45	0,808	0,998
47,5	0,854	1,039
50	0,911	1,085
52,5	0,962	1,129
55	1,012	1,172
57,5	1,062	1,21
60	1,114	1,242
62,5	1,159	1,274
65	1,212	1,314
67,5	1,263	1,346
70	1,31	1,371
72,5	1,361	1,399
75	1,414	1,414

Da bi se sa sigurnošću dokazalo da se radi o histerezi potrebno je provesti dodatan broj mjerenja.



**Slika 26. Graf ovisnosti pomaka u naponu kod tri uzastopna mjerenja**

**Tablica 7. Pomaci triju uzastopnih mjerenja**

U, V	Prvo mjerenje		Drugo mjerenje		Treće mjerenje	
	$\Delta x_{U+}$ , μm	$\Delta x_{U-}$ , μm	$\Delta x_{U+}$ , μm	$\Delta x_{U-}$ , μm	$\Delta x_{U+}$ , μm	$\Delta x_{U-}$ , μm
0	0	-0,036	0	-0,034	0	0,007
2,5	0,032	0,027	0,031	0,031	0,031	0,054
5	0,059	0,068	0,063	0,073	0,062	0,116
7,5	0,088	0,122	0,091	0,154	0,096	0,178
10	0,122	0,188	0,132	0,211	0,135	0,247
12,5	0,162	0,242	0,168	0,276	0,178	0,298

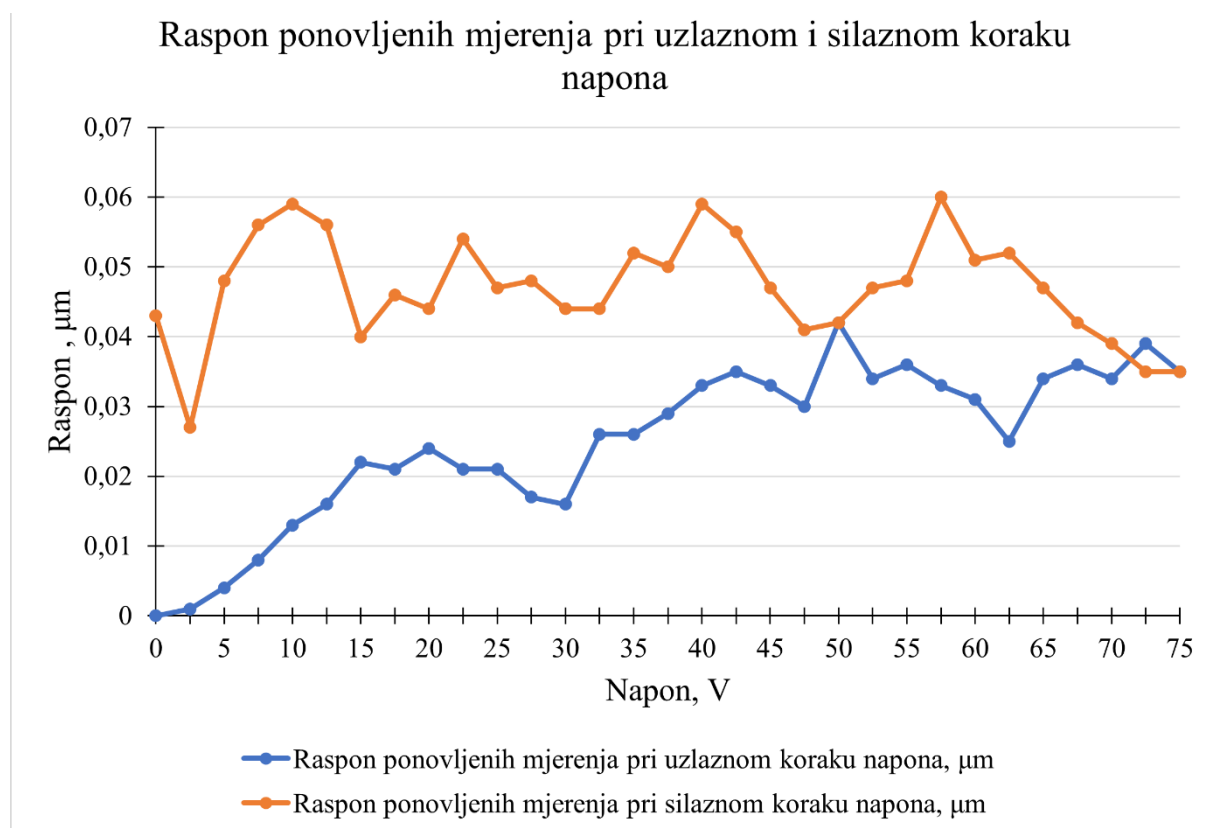
15	0,199	0,311	0,213	0,337	0,221	0,351
17,5	0,246	0,366	0,251	0,394	0,267	0,412
20	0,287	0,428	0,297	0,447	0,311	0,472
22,5	0,332	0,48	0,337	0,499	0,353	0,534
25	0,379	0,54	0,378	0,554	0,399	0,587
27,5	0,43	0,596	0,433	0,604	0,447	0,644
30	0,478	0,649	0,482	0,661	0,494	0,693
32,5	0,525	0,701	0,53	0,708	0,551	0,745
35	0,573	0,75	0,581	0,765	0,599	0,802
37,5	0,62	0,802	0,633	0,808	0,649	0,852
40	0,669	0,844	0,683	0,855	0,702	0,903
42,5	0,716	0,889	0,729	0,903	0,751	0,944
45	0,77	0,939	0,776	0,948	0,803	0,986
47,5	0,822	0,989	0,832	0,999	0,852	1,03
50	0,871	1,03	0,879	1,038	0,913	1,072
52,5	0,927	1,065	0,932	1,086	0,961	1,112
55	0,974	1,105	0,984	1,121	1,01	1,153
57,5	1,03	1,138	1,035	1,158	1,063	1,198
60	1,081	1,18	1,088	1,193	1,112	1,231
62,5	1,134	1,21	1,142	1,229	1,159	1,262
65	1,177	1,243	1,184	1,263	1,211	1,29
67,5	1,222	1,282	1,236	1,301	1,258	1,324
70	1,269	1,311	1,285	1,327	1,303	1,35
72,5	1,314	1,346	1,331	1,363	1,353	1,381
75	1,369	1,369	1,386	1,386	1,404	1,404

S obzirom da su prikupljena tri uzastopna ponovljena mjerenja, moguće je izračunati i ponovljivost pozicioniranja deformacijskog sustava. Mjerna ponovljivost je usko slaganje

između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u istim mjernim uvjetima koji uključuju:

1. isti mjerni postupak
2. istog mjeritelja
3. isto mjerilo upotrebljavano u istim uvjetima
4. isto mjerno mjesto
5. ponavljanje u kratkom vremenu

Ponovljivost u najvećoj mjeri određuje utjecaj mjerila u varijaciji mjernog sustava, a može se izraziti količinski s pomoću značajki rasipanja rezultata mjerenja [34]. Za iskazivanje ponovljivosti odabran je raspon ponovljenih mjerenja (posebno za svaki smjer), budući da tri ponovljena mjerenja nisu dovoljna za druge statističke parametre poput procijenjenog standardnog odstupanja. Raspon ponovljenih mjerenja je izračunat tako da se odredi razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti pomaka deformacijskog sustava za specifičnu vrijednost napona u jednom smjeru. Kako nema referentne vrijednosti za pomak deformacijskog sustava uslijed djelovanja napona u uzlaznom ili silaznom smjeru, ne mogu se davati zaključci o točnosti rezultata.

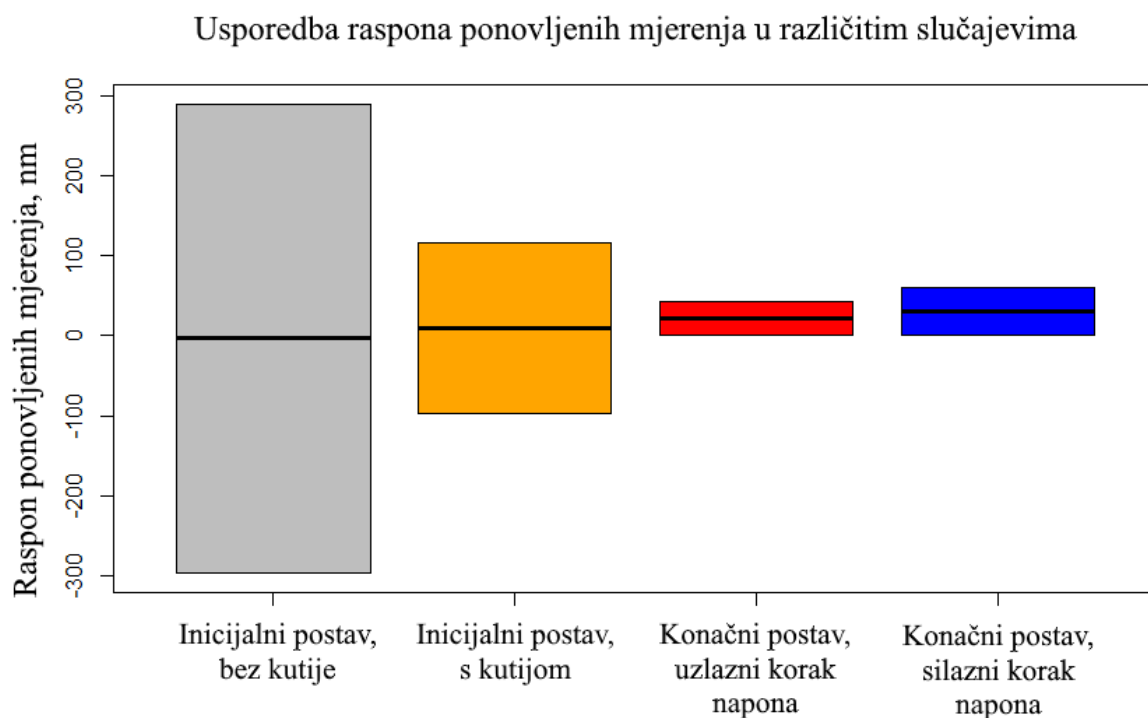


**Slika 27. Prikaz raspona ponovljenih mjerenja u ovisnosti o naponu**

Prema tako definiranome rasponu i dobivenome grafu (Slika 27.), može se vidjeti da raspon ponovljenih mjerenja poprima veće vrijednosti pri silaznom koraku napona. Raspon ponovljenih mjerenja u slučaju uzlazne koraka napona varira od 0  $\mu\text{m}$  do 0,042  $\mu\text{m}$ , dok raspon ponovljenih mjerenja u slučaju silaznog koraka napona varira od 0,027  $\mu\text{m}$  do 0,06  $\mu\text{m}$ .

Konačno, da bi se pokazala razlika nestabilnosti mjerenja na slici (Slika 28.) su tzv. „boxplot“ metodom uspoređeni rasponi ponovljenih mjerenja u različitim fazama eksperimenta.

Prvo je prikazan raspon ponovljenih mjerenja u slučaju bez kutije tijekom inicijalnog postava, zatim raspon ponovljenih mjerenja u slučaju s kutijom tijekom inicijalnog postava te konačno su uzete maksimalne vrijednosti raspona ponovljenih mjerenja za uzlazni i silazni korak napona koje su i prikazane na prethodnom grafu (Slika 27.). Kako za zadnja dva slučaja nema referentne vrijednost, zbog preglednosti i jednostavnije usporedbe uzeto je da su rubne točke intervala 0 i vrijednost najvećeg raspona za taj slučaj.



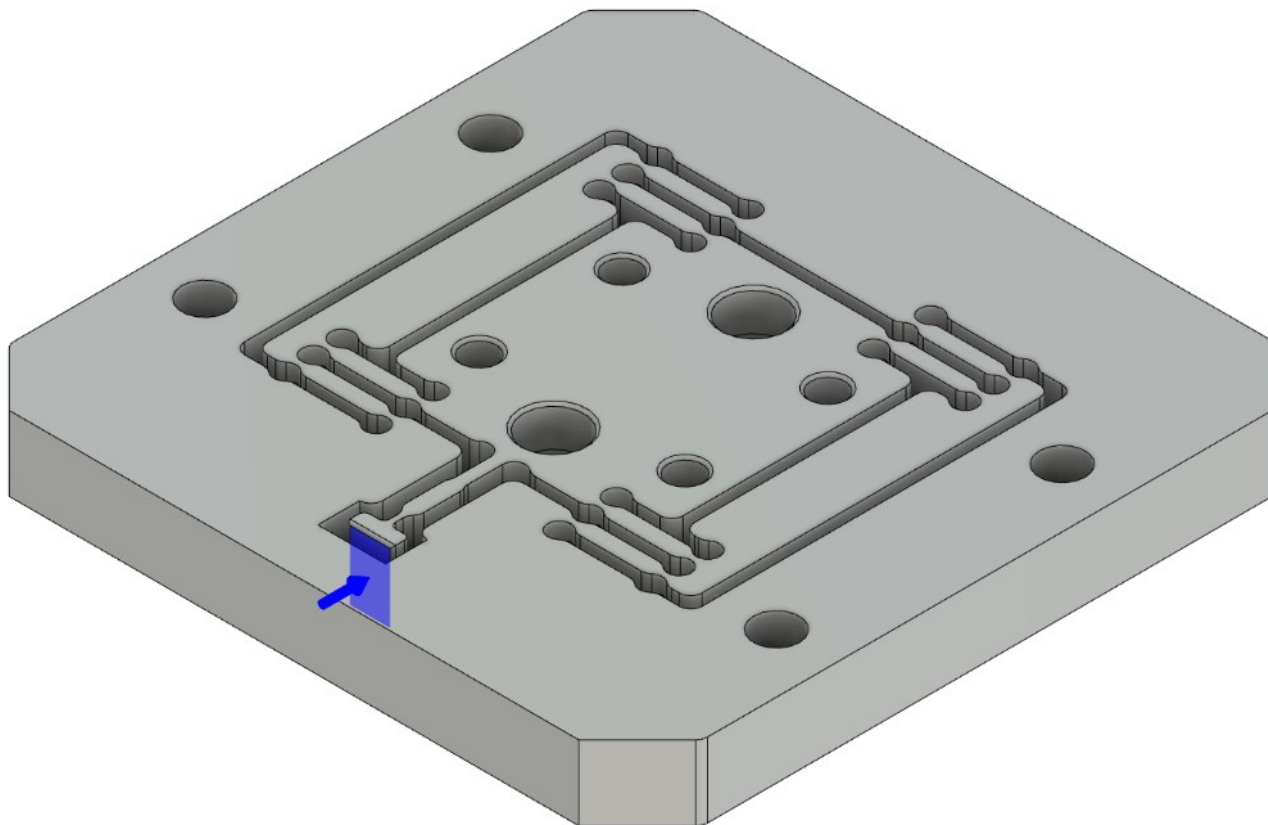
**Slika 28.** Usporedba raspona ponovljenih mjerenja sustava u različitim koracima eksperimenta

## 6. SIMULACIJA

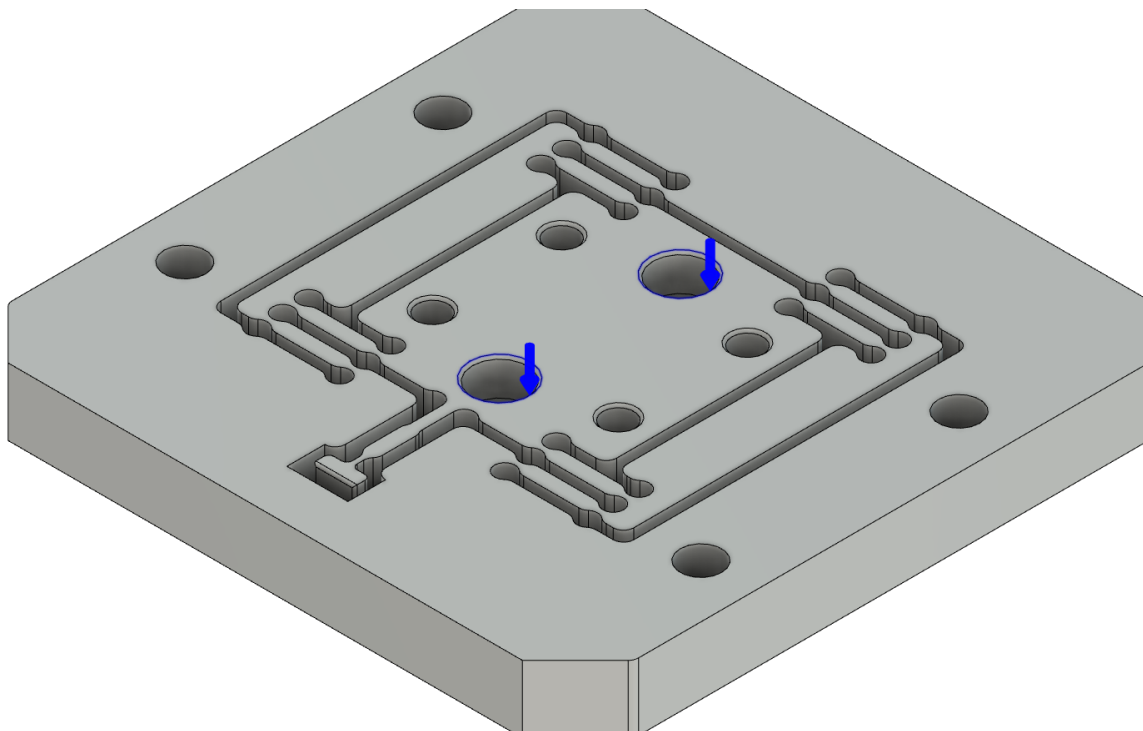
Numerička simulacija provedena je u softveru Fusion360, gdje je napravljena analiza za slučajevne horizontalnog, odnosno vertikalnog opterećenja.

U oba slučaja su provedene simulacije na 6 različitih varijanti deformacijskog sustava. Prva varijanta je nemodificirana, dok su se u narednima radili kružni provrti na zglobu. Prvo samo s jednim provrtom, zatim s dva provrta, sve do varijante s pet kružnih provrta. Svim varijanta s provrtima je zajedničko da je ukupna površina poprečnog presjeka provrta jednaka  $12\pi \text{ mm}^2$ .

U Laboratoriju za precizna mjerenja dužina su rađeni eksperimenti s modifikacijama, stoga je svrha modifikacija bila prikazati rezultate različitih varijanti bez potrebe za izradom više deformacijskih sustava. Konačni cilj modifikacija je odrediti kako povećati učinkovitost deformacijskoga sustava. Iznos opterećenja je 5 N.



**Slika 29. Prikaz deformacijskog sustava s naznačenim horizontalnim opterećenjem**



**Slika 30.** Prikaz deformacijskog sustava s naznačenim vertikalnim opterećenjem  
Materijal korišten u simulaciji je ABS plastika sljedećih svojstava:

**Tablica 8.** Svojstva ABS plastike

$\rho$ , $\text{kgm}^{-3}$	1060
$E$ , MPa	2240
$\nu$	0,38
$\sigma_{0,2}$ , MPa	20

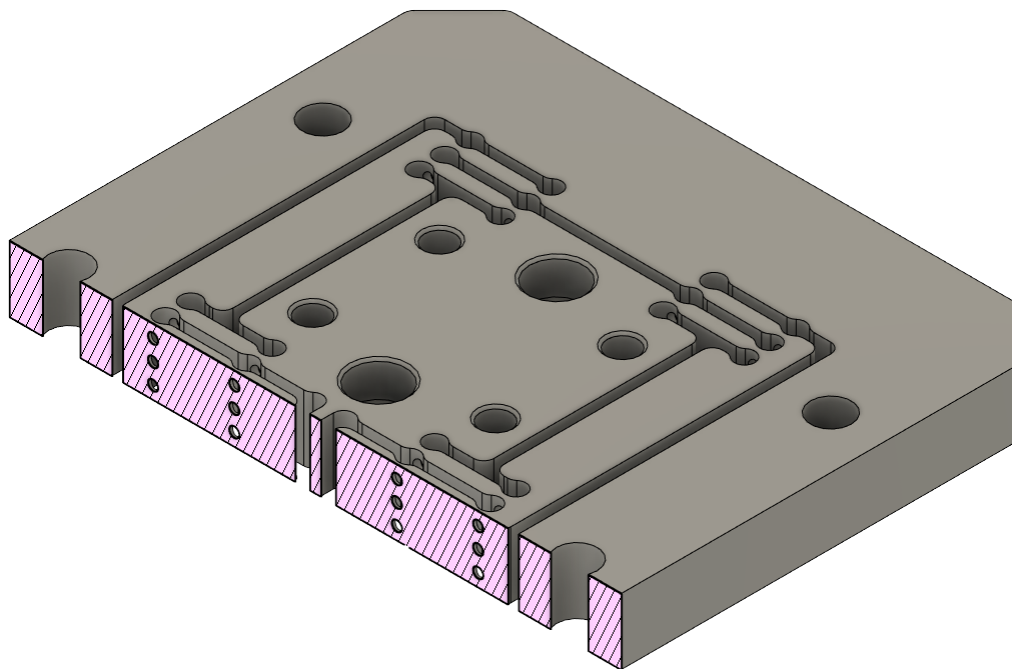
Podaci o mreži svake varijante su prikazani u tablici:

**Tablica 9.** Broj čvorova i elemenata svake varijante deformacijskog sustava

$n_o$	Broj čvorova	Broj elemenata
0	2289835	1539452
1	2260230	1513848
2	2344722	1566555
3	2471568	1645544
4	2570498	1706571
5	2679803	1776685



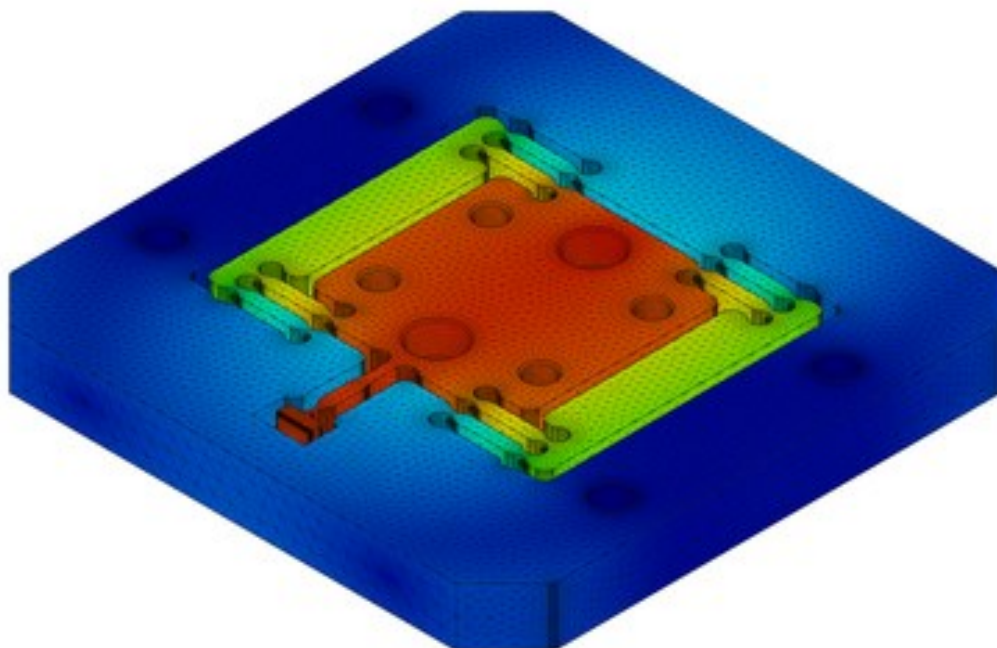
Na slici (Slika 31.) se može vidjeti poprečni presjek na mjestu zgloba u slučaju da svaki zglob ima tri provrta.



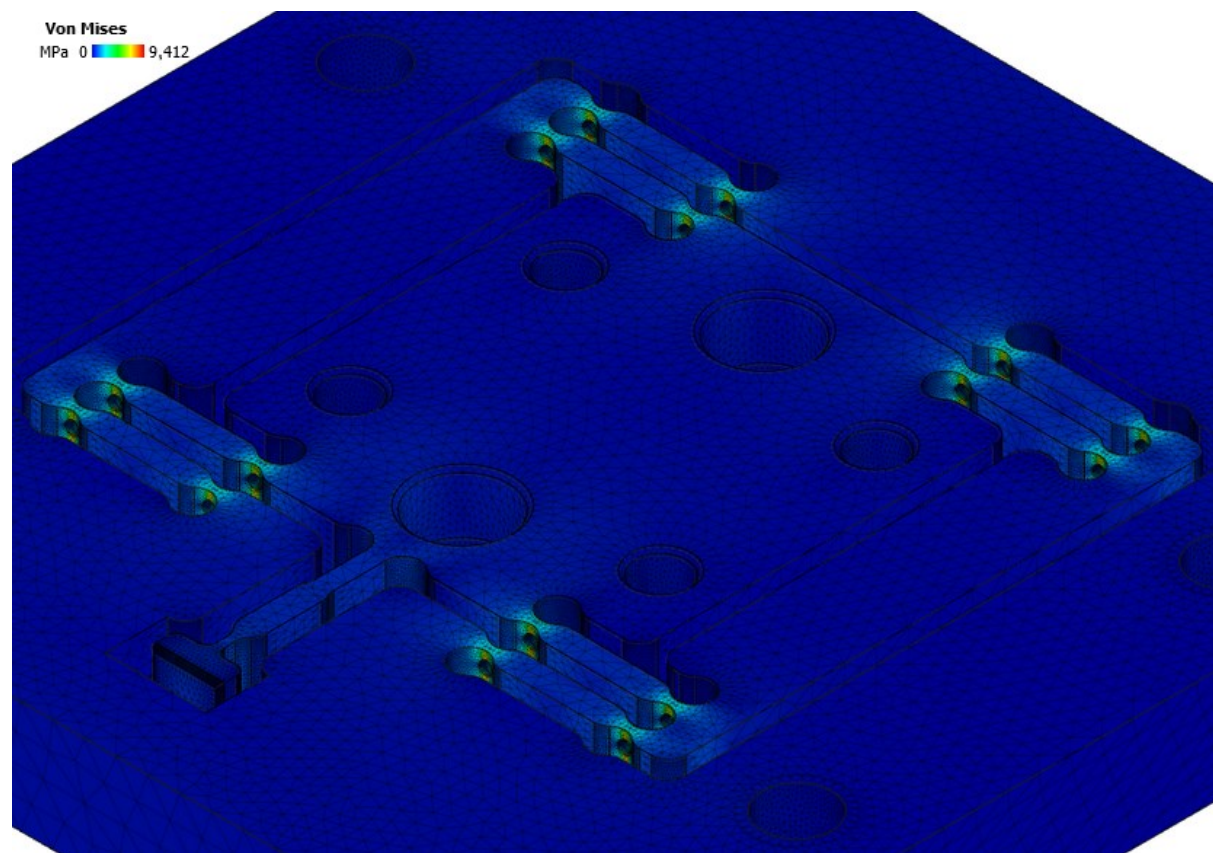
**Slika 31. Prikaz 3D modela deformacijskog sustava s presjekom na zglobu**

Nakon provedenih simulacija može se vidjeti maksimalni horizontalno, odnosno vertikalni pomak deformacijskog sustava.

mm 0  0,01733



Slika 32. Pomak pri vertikalnom opterećenju s pet provrta po zglobu



Slika 33. Prikaz von Mises naprezanja varijante s 5 zglobova uslijed horizontalnog opterećenja

Zbog toga što se piezoelement neće nužno širiti samo u horizontalnome smjeru, bitno je također odrediti učinkovitost pojedine varijante, koja se računa kao omjer horizontalnog naspram vertikalnog pomaka.

**Tablica 10. Simulacijski pomaci i povezana učinkovitost**

$n_k$	0	1	2	3	4	5
$\Delta x_{F_x}$ , mm	0,1414	0,1906	0,2166	0,2377	0,2585	0,2794
$\Delta x_{F_z}$ , mm	0,01385	0,01509	0,01569	0,01633	0,01680	0,01733
$\eta_{\Delta x}$	10,21	12,63	13,80	14,56	15,39	16,12
$S_{\min}$	7,138	4,125	3,268	2,839	2,422	2,125

Na tablici se može vidjeti da učinkovitost raste s brojem kružnih provrta, ali istovremeno se i smanjuje minimalni faktor sigurnosti, koji označava faktor sigurnosti na kritičnom dijelu sustava. Vrijednosti faktora sigurnosti su temeljene na iznosima naprežanja po von Mises teoriji naprežanja [35].

## 7. ZAKLJUČAK

U ovome radu su predstavljeni deformacijski sustavi i prikazani eksperimenti na specifičnom deformacijskom sustavu izrađenom na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, u Laboratoriju za precizna mjerenja i dužinu. Karakteristika sustava uključuje histerezu što je uzrok korištenja piezoelektričnog aktuatora.

Sustav je, uz pravilne okolne uvjete i otklanjanje predviđenih odstupanja, dovoljno stabilan te je tijekom eksperimenta nestabilnost pozicije smanjenja sa reda veličine  $1\ \mu\text{m}$  na red veličine  $10\ \text{nm}$ . U sklopu eksperimenta mjereno je odstupanje sustava od nule i ovisnost pomaka deformacijskog sustava uslijed povećanja i smanjenja napona na piezokontroleru. Nakon serije uzastopnih mjerenja izračunat je raspon ponovljivosti uzlazno od  $0$  do  $0,042\ \mu\text{m}$ , a silazno od  $0,027\ \mu\text{m}$  do  $0,06\ \mu\text{m}$ .

Glavni uzroci odstupanja su bili strujanje zraka i prisustvo mjeritelja u laboratoriju gdje se nalazio eksperimentalni postav. Strujanje zraka se u početku pokušalo korigirati korištenjem kartonske kutije za zaštitu postava od strujanja zraka, no nije bilo dovoljno učinkovito. Sljedeći način je bilo pomicanje eksperimentalnog postava u laboratorij za nanopozicioniranje koji se ne hladi direktno strujanjem zraka. U konačnici kada je zamijećen utjecaj prisustva mjeritelja na nestabilnost pozicije, taj čimbenik se uklonio povezivanjem laptopa za očitavanje mjerenja s računalom koje se nalazilo van laboratorija.

Provedena je i numerička simulacija s ciljem utvrđivanja učinkovitosti modificiranih varijanti deformacijskog sustava. Geometrija zgloba utječe na maksimalni pomak uslijed horizontalne sile, pomak uslijed vertikalne sile je znatno manji. Za učinkovitost je potrebno modificirati zglob na takav način da ima više provrta na zglobu. Zbog nedostatka smanjenja faktora sigurnosti uslijed povećanja broja zglobova, predlaže se daljnje istraživanje utjecaja oblika, količine, i rasporeda provrta na ponašanje sustava.

**LITERATURA**

- [1] Matejiček F, Semenski D, Vnučec Z. Uvod u Statiku sa zbirkom zadataka, drugo izdanje, Zagreb: Golden marketing-Tehnička Knjiga; 2005.
- [2] Alfirević, I. Nauka o Čvrstoći I, Zagreb: Tehnička knjiga; 1989.
- [3] Zentner L, Linß S. Compliant systems: Mechanics of elastically deformable mechanisms, actuators and sensors, Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg, 2019. <https://doi.org/10.1515/9783110479744>
- [4] Bicchi, A., Tonietti A.: Fast and “soft-arm” tactics, IEEE Robotics and Automation Magazine, 11, No. 2, 22–33, doi:10.1109/MRA.2004.1310939, 2004
- [5] IFToMM Terminology – Dynamics <https://www.iftomm-terminology.antonkb.nl/2057/03.html> pristupljeno 30. lipnja 2022.
- [6] Zentner, L. Klassifikation nachgiebiger Mechanismen und Aktuatoren, Ilmenau, Univ.-Verl., Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik 1, 3–12, ISSN 2194-9476, 2012.
- [7] Zentner, L. Nachgiebige Mechanismen, München: De Gruyter Oldenbourg, 2014. <https://doi.org/10.1524/9783486858907>
- [8] Zentner, L.: Mathematischer Formalismus zur Bildung von Starrkörpermodellen für nachgiebige Mechanismen, In: 9. Kolloquium Getriebetechnik, Berger, M. (Ed.), Chemnitz, Univ.-Verl., 227–244, ISBN 978-3-941003-40-8, 2011.
- [9] Zentner, L., Böhm, V.: On the Mechanical Compliance of Technical Systems, Mechanical Engineering, Gokcek, M. (Ed.), InTech, doi:10.5772/26379, 2012
- [10] Shigley JE, Uicker JJ, Pennock GR. Theory of machines and mechanisms. 5th ed. New York: Oxford University Press; 2016.
- [11] Christen G, Pfefferkorn H.: Mehr Beweglichkeit: Nachgiebige Mechanismen eignen sich als elastische Getriebe, MM – Das Industrie-Magazin, 37, 2002.
- [12] Zentner L, Böhm V. On the Classification of Compliant Mechanisms. In: Ceccarelli M. (eds) Proceedings of EUCOMES 08. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8915-2\\_52](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8915-2_52) 2009.
- [13] Hetrick J.A. An energy efficiency approach for unified topological and dimensional synthesis of compliant mechanisms. Michigan: University of Michigan, Diss; 1999.
- [14] About Compliant Mechanisms: <https://www.compliantmechanisms.byu.edu/about-compliant-mechanisms-old>, Pristupljeno: 19. svibnja 2022.

- [15] Howell LL, Magleby SP, Olsen BM. Handbook of Compliant Mechanisms, John Wiley & Sons Ltd; 2013.
- [16] Linß S. Ein Beitrag zur geometrischen Gestaltung und Optimierung prismatischer Festkörper-gelenke in nachgiebigen Koppelmechanismen, Doctoral thesis, Ilmenau, Technische Universität Ilmenau, urn:nbn:de:gbv:ilm1-2015000283, 2015.
- [17] Linß S. et al. The influence of asymmetric flexure hinges on the axis of rotation. In: Innovation in Mechanical Engineering – Shaping the Future: proceedings ; 56. IWK 2011, 12 - 16 September 2011, Ilmenau, University of Technology. Ilmenau. S. Session 1.3. 2011.
- [18] Christen G, Pfefferkorn H. Nachgiebige Mechanismen: Aufbau, Gestaltung, Dimensionierung und experimentelle Untersuchung, In: VDI-Berichte Nr. 1423 1998, VDI-Getriebetagung, Kassel, Germany, 309–329, 1998.
- [19] Lobontiu, N. Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges, Boca Raton, Fla., CRC Press, ISBN 0-8493-1367-8, 2003.
- [20] Mertikas S.P. Geodesy, Ground Positioning and Leveling. In: Gupta H.K. (eds) Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia, 2011.
- [21] Wolfgang Torge and Jurgen Müller. Geodesy, 4th ed. De Gruyter, 2012.
- [22] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer, Vienna. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1> 2008.
- [23] Fleming AJ, Leang KK. Design, Modeling and Control of Nanopositioning Systems, Cham, Springer International Publishing Switzerland; 2014.
- [24] Wang Z, Chen L, Sun L. An integrated parallel micromanipulator with flexure hinges for optical fiber alignment. In: Proceeding of IEEE international conference on mechatronics and automation, Harbin, pp 2530–2534. 2007.
- [25] Devasia S, Eleftheriou E, Moheimani SOR. A survey of control issues in nanopositioning. IEEE Trans Control Syst Technol 15(5):802–823, 2007.
- [26] Tseng AA. Nanofabrication: fundamentals and applications. World Scientific, Singapore. 2008.
- [27] Salapaka S.M, Salapak M.V. "Scanning Probe Microscopy," in IEEE Control Systems Magazine, vol. 28, no. 2, pp. 65-83, April 2008, doi: 10.1109/MCS.2007.914688. 2008.

- [28] Manbachi, A, Cobbold, R.S.C. "Development and Application of Piezoelectric Materials for Ultrasound Generation and Detection". *Ultrasound*. 19 (4): 187–96. doi:10.1258/ult.2011.011027. 2011.
- [29] Damjanovic D. Hysteresis in piezoelectric and ferroelectric materials. In Mayergoyz I and Bertotti G (eds) *The science of hysteresis*, vol. 3. Amsterdam: Elsevier, pp. 337–465; 2005.
- [30] Rodriguez-Fortun, J. M., Orus, J., Alfonso, J., Buil, F., & Castellanos, J. A. Hysteresis in Piezoelectric Actuators: Modeling and Compensation. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 5237–5242. doi:10.3182/20110828-6-it-1002.01063 2011.
- [31] Lee, H.-J., & Saravanos, D. A. The Effect of Temperature Dependent Material Properties on the Response of Piezoelectric Composite Materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 9(7), 503–508. doi:10.1177/1045389x9800900702 1998.
- [32] Fraden J. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 3rd edition, New York: Springer-Verlag Inc.; 2004.
- [33] <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854> pristupljeno 28. lipnja. 2022.
- [34] Runje, B. *Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja*, Zagreb, 2013.
- [35] von Mises, R. *Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand*. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen (Mathematisch-physikalische Klasse)*, 1, 582-592, 1913.