



UNIVERZITET U NIŠU
MAŠINSKI FAKULTET U NIŠU



Andrija P. Milojević

**RAZVOJ ADAPTIVNOG GIPKOG SISTEMA ZA
UPRAVLJANJE OBLIKOM RADNE POVRŠINE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Niš, 2016.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
IN NIŠ



Andrija P. Milojević

**DEVELOPMENT OF ADAPTIVE COMPLIANT
SYSTEM FOR CONTROLLABLE SHAPE MORPHING**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2016.

Podaci o doktorskoj disertaciji

Mentor:	dr Nenad D. Pavlović, redovni profesor, Univerzitet u Nišu, Mašinski Fakultet u Nišu
Naslov:	Razvoj adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine
Rezime:	<p>U ovoj disertaciji razvijen je adaptivni gipki sistem odnosno adaptivna gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima i sensorima koja može da upravlja oblikom svoje radne površine. Ugradnjom aktuatora unutar gipke strukture, sistemu je omogućeno da ostvari više složenih deformacija svoje radne površine što znači da sistem poseduje strukturnu adaptivnost, a ugradnjom senzora je sistemu omogućeno i da detektuje promene u svojoj okolini i primenom odgovarajućeg upravljanja da postane adaptivan - "inteligentan". U disertaciji je razvijen algoritam koji automatski generiše optimalnu topologiju adaptivnog gipkog sistema za postavljene zadatke sinteze, pri čemu je u proces sinteze uključena i postavka aktuatora (tip, orijentacija, veličina i lokacija). Pokazano je da dobijeno rešenje adaptivnog gipkog sistema može da ostvari više različitih oblika radne površine sa tri ugrađena aktuatora; istovremenom aktivacijom više aktuatora (različitim kombinacijama aktivnih aktuatora) gipki sistem može da ostvari i mnogo složenije oblike svoje radne površine. Na osnovu dobijenog rešenja razvijen je i 3D model adaptivnog gipkog sistema i sprovedena je numerička nelinearna MKE analiza njegovog ponašanja. Izrađen je i fizički prototip adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima, u vidu monolitne strukture koja je i testirana. Predstavljene su i dve potencijalne primene razvijenog adaptivnog gipkog sistema, kao adaptivnog gipkog hvatača i kao adaptivnog krila letilice. Razvijeni su i nove vrste aktuatora i senzora koji bi mogli jednostavno da se ugrade u strukturu gipkog sistema. Aktuatori su razvijeni korišćenjem legura koje pamte oblik, a senzori su razvijeni od provodne pene koja ispoljava svojstvo da pri deformaciji menja svoju električnu otpornost. Izvršena je analiza rada gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i sensorima od provodne pene i pokazano da ovakav gipki sistem može da ostvari više različitih oblika radne površine. Razvijeni adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i sensorima od provodne pene i sa odgovarajućim kontrolerom (koji je takođe razvijen), predstavlja visokointegrirani mehatronički sistem koji ima mnogo prednosti nad postojećim rešenjima struktura koje mogu da menjaju svoj oblik.</p>
Naučna oblast:	Tehničko-tehnološke nauke
Naučna disciplina:	Mehatronika
Ključne reči:	adaptivni gipki sistem, ugrađeni aktuatori i senzori, promena oblika radne površine, optimizacija, gipki hvatač, adaptivno krilo letilice
UDK:	681.513.6:531.133.3(043.3) 004.896:007.52(043.3)
CERIF klasifikacija:	T125 Automatizacija, robotika, kontrolni inženjering
Tip licence Kreativne zajednice:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	PhD Nenad D. Pavlović, Full time Professor, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering in Niš
Title:	Development of Adaptive Compliant System for Controllable Shape Morphing
Abstract:	<p>This dissertation presents the new solution of adaptive compliant system i.e. adaptive compliant structure with embedded actuators and sensors that is capable of changing its shape on demand. By embedding actuators and sensors within the compliant mechanism structure, the system can realize both sensing (via sensors) and appropriate response (via actuators and internal structure) to the unknown external environment, thus making the system adaptive - "intelligent". In dissertation a computer-coded algorithm for the synthesis of the adaptive shape morphing compliant system is developed, where placement of actuators (type, orientation, size and location) is also included in the synthesise process. It is shown that obtained solution of adaptive compliant system can achieve multiple shapes of its output surface with tree embedded actuators; by using combination of different active actuators compliant system can realize more complex shapes of its output surface. Based on the obtained solution, the 3D model of adaptive compliant system with embedded actuators is designed. The nonlinear FEM simulations are performed to investigate the behaviour of the developed compliant system. The physical prototype of the adaptive shape morphing compliant structure with embedded actuators is manufactured as one monolithic structure and tested. Two possible applications of the developed compliant system are presented, for the adaptive compliant gripper and the shape morphing wing. The actuators and sensors that can easily be embedded within the complaint system structure are developed. Actuators are developed by using shape memory alloy wires, and sensors were developed by using conductive foam that can change its electrical resistance when deformed. The adaptive compliant system with embedded nitinol wire actuators and conductive foam sensors is tested, and it is shown that such compliant system can achieve multiple shapes of its output surface. The developed adaptive compliant system with embedded nitinol wire actuators and conductive foam sensors and with controller (which was also developed) represents highly embedded mechantronical system which has many advantages over existing solution of shape morphing structure.</p>
Scientific Field:	Technical - technological sciences
Scientific Discipline:	Mechatronics
Key Words:	adaptive compliant system, embedded actuators and sensors, shape morphing, optimization, compliant gripper, adaptive wing
UDC:	681.513.6:531.133.3(043.3) 004.896:007.52(043.3)
CERIF Classification:	T125 Automation, robotics, control engineering
Creative Commons License Type:	CC BY-NC-ND

*Mojoj Milkici, koja je najbolji deo mene, koja me čini srećnim i boljim
i sve čini da bude bolje.....*

"Svaki korak napred u nauci, korak je bliže Bogu."

Sv. Vladika Nikolaj Velimirović

Reč autora

Ova doktorska disertacija predstavlja rezultat mog višegodišnjeg putovanja kroz carstvo nauke i čudesni svet optimizacije, gipkih mehanizama i gipkih sistema. Ovaj put za mene je bio koliko naporan i težak toliko i uzbudljiv, dinamičan, pun novih izazova koje sam sa radošću prihvatao. Sa velikim uživanjem sam istraživao nepregledne predele oblasti gipkih sistema, tražeći istinu i idući putem od znanja ka saznanju. Otkrivajući svaki novi deo imao sam osećaj da otkrivam malo više o svetu oko nas, nama samima i da sam svakim korakom sve bliži Bogu. Zahvalan sam svim dobrim ljudima koji su mi pomogli da svoj put privedem kraju i nađem se na početku jednog novog putovanja, noseći sa sobom najlepše uspomene.

Svoju veliku i duboku zahvalnost dugujem mom mentoru dr Nenadu D. Pavloviću, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta u Nišu, za korisne savete, zalaganje, i veliki trud i rad koji je uložio da mi nesebično pomogne tokom izrade svih delova ove disertacije. On me je prvi uveo u svet nauke i gipkih sistema dajući mi istraživačku slobodu da sam biram put, uvek stojeći uz mene kao oslonac i poluga uz pomoć kojih sam mogao da podignem svet. On mi je bio i više od mentora, zahvalan sam mu na svo vreme koje smo proveli zajedno tokom izrade ove disertacije. Veliku zahvalnost dugujem i dr Nenadu T. Pavloviću, redovnom profesoru i dekanu Mašinskog fakulteta u Nišu, što mi je omogućio da u sklopu projekta: "Razvoj i optimalno projektovanje adaptivnih gipkih mehanizama sa integrisanim aktuatorima" (finansiranog od strane DAAD-a i Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije), čiji je rukovodilac bio, uradim najveći deo svoje disertacije na Mašinskom fakultetu Tehničkog Univerziteta u Ilmenau, Nemačka. Zahvaljujem mu se i na velikoj pomoći, savetima i podršci tokom izrade disertacije. Posebnu zahvalnost dugujem i Prof.Dr.-Ing. Habil. Leni Zentner, na pomoći, korisnim savetima, sugestijama i što mi je omogućila da eksperimentalni deo disertacije uradim na Katedri za mehanizme, na TU Ilmenau, Nemačka. Svoju zahvalnost dugujem i mom dragom kolegi i prijatelju Dr.-Ing. Sebastianu Linß-u na mnogobrojnim savetima i velikoj pomoći u istraživačkom radu i tokom izrade ove disertacije. Veliku zahvalnost dugujem i dr Žarku Čojbašiću, redovnom profesoru Mašinskog fakulteta u Nišu, koji mi je omogućio kao rukovodilac projekta: "Inteligentno upravljanje aktivne strukture u robotici i mehatronici" (finansiranog od strane DAAD-a i Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije), da deo eksperimenata uradim i na Tehničkom Univerzitetu u Berlinu. Takođe sam mu zahvalan na nesebičnoj pomoći, korisnim savetima i podršci koja mi je puno značila tokom izrade ove disertacije. Svoju veliku zahvalnost dugujem i mom dragom kolegi i prijatelju Mast. inž. maš. Miši Tomiću, na velikoj nesebičnoj pomoći u realizaciji eksperimenata i virtualne instrumentacije. Zahvalan sam mu i na vremenu koje smo proveli zajedno radeći na istraživačkim projektima i mnogim istraživačkim radovima. Zahvalnost dugujem i Slavenku Đukiću, laborantu na Katedri za mehatroniku i upravljanje, na безусловnoj pomoći u realizaciji pojedinih eksperimenata. Ovom prilikom se zahvaljujem i dr Milošu Miloševiću, vanrednom profesoru Mašinskog fakulteta u Nišu, koji me je prvi uveo u svet MKE analize, i od koga sam mnogo toga naučio i čiji su mi saveti puno značili tokom mog istraživačkog rada i izrade disertacije. Zahvalnost dugujem i mr Slobodanu Jovanoviću kao i dipl.inž. mašinstva Draganu Jovanoviću, asistentima Mašinskog fakulteta u Nišu, na pomoći oko izbora materijala i tehnologiji izrade fizičkog prototipa. Takođe zahvalnost dugujem i svim članovima Katedre za mehatroniku i upravljanje, koji su mi, svako na svoj način, pružili pomoć i podršku tokom izrade disertacije.

Veliku zahvalnost dugujem i svojim roditeljima Predragu i Jasmini, kao i sestrama Andrei i Anđeli, jer su imali razumevanja za moju posvećenost radu i pružili mi najveću podršku i pomoć tokom izrade disertacije.

Na kraju, najveću zahvalnost dugujem mojoj budućoj supruzi Milkici, kojoj sam i posvetio ovu disertaciju. Zahvalan sam joj jer je uvek verovala u mene i bila mi velika inspiracija i podrška tokom izrade disertacije. Ona mi je pokazala puteve kojima nikad nisam znao da mogu ići i visine koje nikada nisam znao da mogu dostići.

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Predmet istraživanja	1
1.2. Motivacija i ciljevi	7
1.3. Organizacija disertacije	9
2. Stanje istraživanja u oblasti struktura koje mogu da menjaju svoj oblik	11
3. Metodologija razvoja adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine	52
3.1. Metodologija sinteze gipkih mehanizama	60
3.1.1. Postavka zadatka sinteze gipkih mehanizama	62
3.1.2. Diskretizacija oblasti optimizacije.....	65
3.1.2.1. Diskretizaciji oblasti optimizacije u vidu seta kontinuum-elemenata	65
3.1.2.2. Diskretizaciji oblasti optimizacije u vidu seta strukturnih elemenata	71
3.1.3. Optimizacija.....	75
3.2. Algoritam sinteze gipkih mehanizama	79
3.2.1. Diskretizacija oblasti optimizacije setom strukturnih elemenata	81
3.2.2. Strukturna analiza metodom konačnih elemenata	84
3.2.3. Formulacija funkcije cilja i ograničenja pri sintezi gipkih mehanizama	86
3.2.4. Optimizacija topologije gipkih mehanizama primenom genetskih algoritama	87
3.3. Sinteza gipkog invertora pomeranja.....	92
3.4. Sinteza gipkog mehanizma hvatača	100
3.5. Problem preseka elemenata u strukturi	104
3.6. Sinteza gipkih mehanizama bez preseka elemenata.....	109
3.7. Metodologija sinteze adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine.....	116

3.7.1. Postavka zadatka sinteze adaptivnog gipkog sistema.....	120
3.7.2. Diskretizacija oblasti optimizacije pri sintezi gipkog sistema.....	122
3.7.3. Model aktuatora.....	123
3.7.4. Upravlјivost gipkog sistema	125
3.7.5. Funkcija cilja pri sintezi gipkog sistema	127
3.7.6. Ograničenja pri sintezi gipkog sistema.....	128
3.7.7. Optimizacija topologije adaptivnog gipkog sistema	130
3.7.8. Rezultati optimizacije topologije gipkog sistema.....	131
4. Numerička analiza rada adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine i moguće primene.....	137
4.1. Geometrijski model.....	137
4.2. Analiza metodom konačnih elemenata (MKE).....	138
4.3. Analiza upravljivosti	150
4.4. Moguće primene adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine.....	154
4.4.1. Primena razvijenog sistema kao adaptivnog gipkog hvatača	154
4.4.2. Primena razvijenog sistema kao adaptivnog krila letilice	162
5. Aktuatori razvijenog adaptivnog gipkog sistema	168
5.1. Pregled postojećih gipkih aktuatora	169
5.1.1. Elektroaktivni polimeri.....	169
5.1.2. Piezoelektrični aktuatori	174
5.1.3. Gipki fluidni aktuatori	176
5.1.4. Legure koje pamte oblik.....	178
5.2. Razvoj aktuatora od legure koja pamti oblik	180
5.2.1. Biometalno vlakno - BMV	181

5.2.2. Flexinol® žica	183
5.2.3. Nitinol žica (NiTi)	185
5.3. Razvoj aktuatora od nitinol (NiTi) žice.....	187
5.4. Adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice	197
6. Razvoj senzora	207
6.1. Provodna pena	208
6.2. Razvoj senzora od provodne pene.....	210
6.3. Ugradnja senzora od provodne pene u strukturu adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine	217
6.4. Razvoj senzora "veštačke kože" od kompozita silikona i provodne pene	221
7. Razvoj upravljačkog algoritma adaptivnog gipkog sistema	226
8. Zaključak	232
Literatura.....	240
Biografija autora	265

1. Uvod

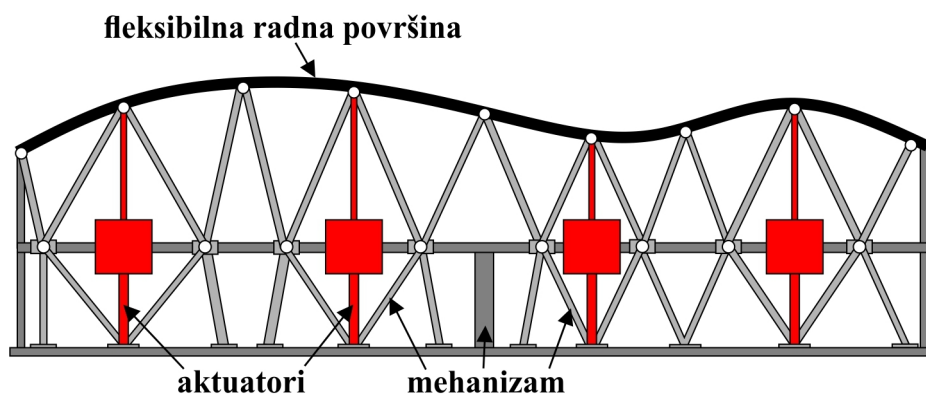
1.1. Predmet istraživanja

Performanse mnogih tehničkih sistema/strukture direkno zavise od geometrijskog oblika izvršnih delova sistema ili pak geometrijskog oblika celog sistema. Da bi radile optimalno, takve strukture zahtevaju različite oblike izvršnog elementa pri različitim uslovima rada odnosno njihov geometrijski oblik treba da bude prilagođen uslovima rada odn. da zavisi od (promenljivih uslova) radne okoline sistema. Ovakve strukture se nazivaju **strukturama koje menjaju oblik** (engl. *shape morphing structures*) i imaju široku primenu. Klasičan primer takve strukture je krilo aviona koje treba da menja svoj oblik kako bi se prilagodilo različitim režimima leta i kako bi ostvarilo bolje aerodinamičke performanse aviona (visoka manevarska sposobnost, smanjenje otpora vazduha, bolje podizanje aviona, postizanje velikih brzina, ušteda goriva).

Poznati primer strukture koja menja oblik je i adaptivni hvatač manipulacionih robota. Najčešće se za manipulaciju objekata koriste univerzalni hvatači kojima se mogu realizovati hvatanja objekata najrazličitijih gabarita. Međutim, manipulacija objekata nepravilnog i nepredvidivog oblika zahteva od hvatača veću fleksibilnost i adaptivnost. Pored ovoga, hvatači sa krutim dodirom hvataljki i krtih objekata mogu da dovedu do oštećenja objekata pa se u tim slučajevima zahteva upravljački sistem koji bi kontrolisao sile dodira. Za razliku od ovakvih hvatača, adaptivni hvatač može da menja svoj oblik (oblik površine kojom realizuje hvatanje) kako bi se prilagodio obliku objekta koga hvata i time ostvario bezbednu manipulaciju objekata. Na ovaj način adaptivni hvatač može da realizuje adaptivnost koju poseduje i ljudska ruka.

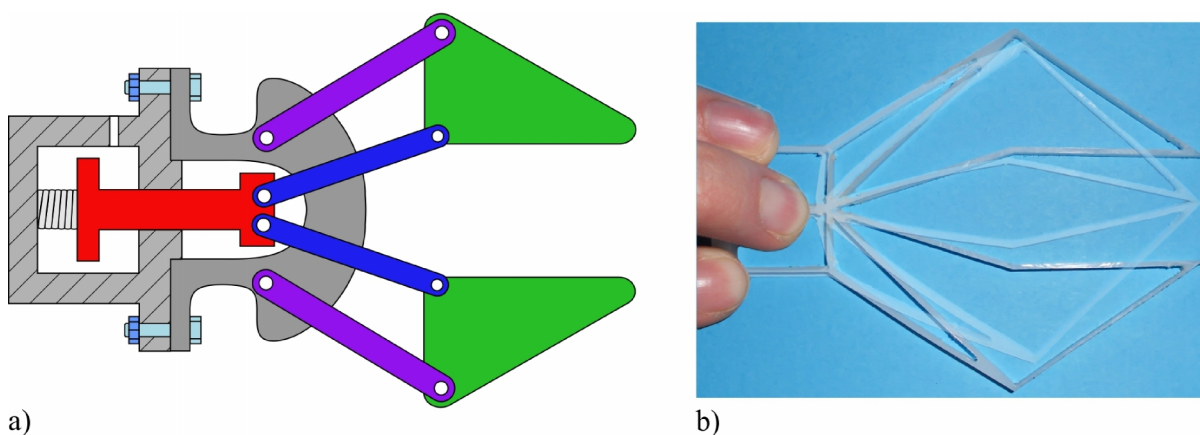
Reflektor aktivne antene na satelitima koji se šalju u svemir predstavlja takođe primer strukture koja menja oblik, pošto ovi reflektori menjaju svoj oblik kako bi usmeravali i fokusirali odbijene elektromagnetne talase na određeni region Zemljine površine u cilju prilagođavanja promenljivim uslovima komunikacije.

Strukture koje menjaju oblik se uglavnom sastoje iz aktuatora (pogona), mehanizma koji prenosi dejstvo aktuatora na radnu površinu i fleksibilne radne površine (slika 1.1.) pa su stoga i složene za izradu, zahtevaju montažu i veoma su skupe. Posebno pogodno rešenje za primene koje zahtevaju promenu geometrijskog oblika strukture predstavljaju gipki mehanizmi.



slika 1.1. Koncept rešenja strukture koja može da menja oblik

Gipki mehanizmi (engl. *compliant mechanisms*), za razliku od klasičnih mehanizama koji se sastoje od krutih članova i klasičnih zglobova (obrtnih i translatorskih) (slika 1.2.a), predstavljaju pokretljive materijalno koherentne strukture (slika 1.2.b) koje mogu da prenose sile i transformišu kretanje samo zahvaljujući elastičnosti (elastičnoj deformaciji) odgovarajućih segmenata strukture.



slika 1.2. a) Mehanizam klasičnog hvatača; b) gipki mehanizam hvatača

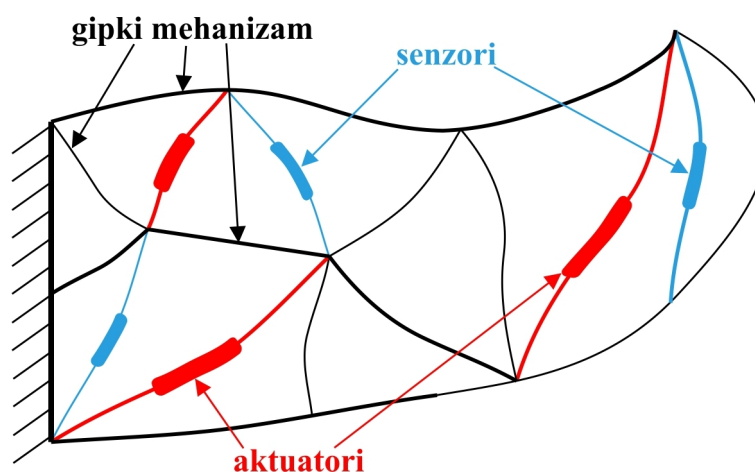
Postoje mnoge prednosti primene gipkih mehanizama u poređenju sa klasičnim mehanizmima:

- mogu realizovati visoku tačnost pomeranja,
- nema zazora,
- nema trenja,
- nema habanja,
- ne zahtevaju održavanje (nema potrebe za podmazivanjem),
- nema buke pri radu,
- jednostavnost izrade,
- ne zahtevaju montažu,
- smanjena kompleksnost strukture (veća kompaknost),
- mogućnost minijaturizacije i
- niska cena izrade.

Upravo zbog ovih mnogobrojnih prednosti gipki mehanizmi nalaze primenu kod hirurških instrumenata, u biomedicinskim uređajima, kao precizni sistemi, pozicioneri, hvatači, pojačivači prenosa kretanja/sila, mikromehatronički sistemi (engl. *Micro-Electromechanical Systems - MEMS*).

Gipki mehanizmi su posebno pogodni za primene koje zahtevaju promenu geometrijskog oblika struktura jer mogu da eliminišu mnogobrojne nedostatke postojećih rešenja struktura koje menjaju oblik. Gipki mehanizmi se deformišu kontinualno, kao jedna monolitna struktura, pa ovakva jedinstvena osobina gipkih mehanizama pruža nove mogućnosti za ostvarivanje promene oblika strukture i nudi mnogobrojne prednosti. Pored ovoga, mala težina gipkih mehanizama i jednostavan algoritam za njihovo upravljanje su posebno atraktivni za različite primene u kojima je potrebno ostvariti promenu oblika. Dosadašnja istraživanja na polju gipkih mehanizama bila su uglavnom usmerena ka razvoju gipkih mehanizama za primene u kojima je potrebno ostvariti prenos kretanja/sila, a malo pažnje je bilo posvećeno razvoju gipkih mehanizama za primene u kojima je potrebno ostvariti zadatu promenu oblika strukture. Ono malo istraživanja na polju gipkih mehanizama koji treba da realizuju odgovarajući oblik bilo je usmereno na mehanizme koji treba da ostvare samo jedan radni oblik, pri čemu je taj oblik definisan unapred. Međutim, postoje mnogobrojne situacije u kojima konačan oblik koji je potrebno ostvariti nije poznat unapred odnosno može zavistiti od sredine u kojoj se struktura nalazi ili zadatka koji treba da realizuje. Takođe, može postojati i potreba za ostvarivanjem više željenih oblika odnosno stanja strukture. Za ovakve primene, struktura koja menja oblik treba da bude adaptivna i da ima upravljivi odziv sa izuzetnom manipulativnošću.

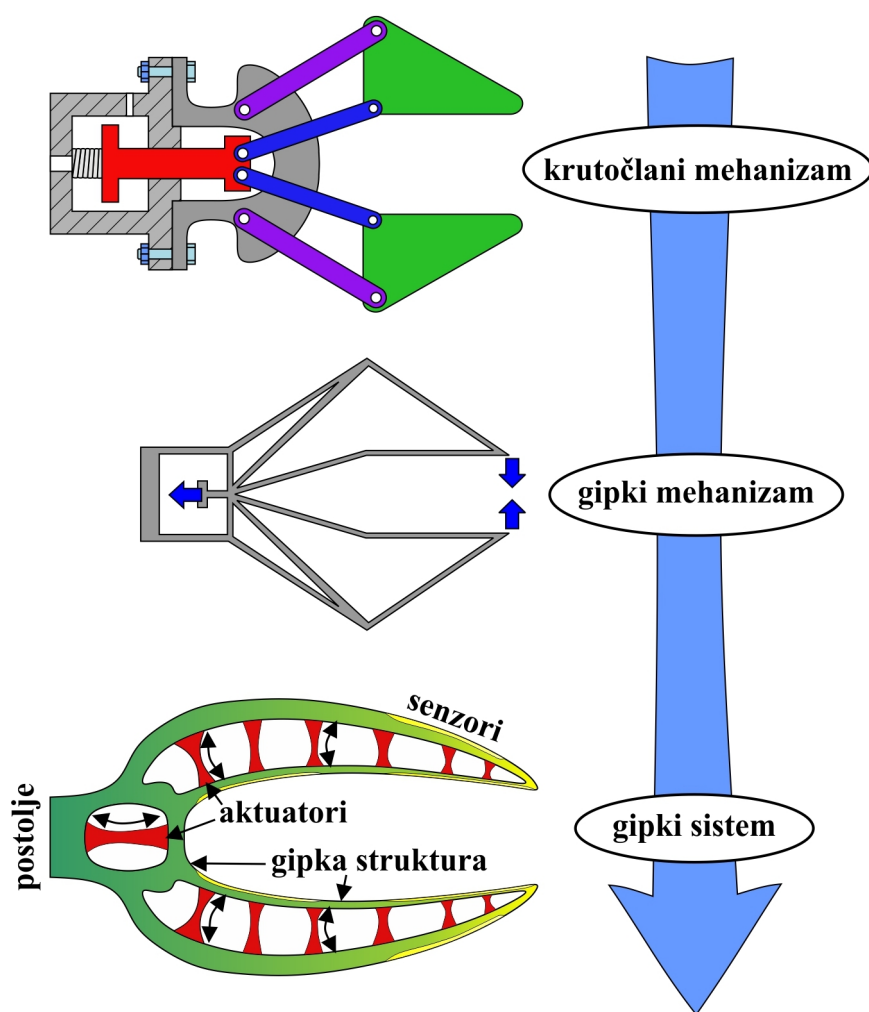
Ova doktorska disertacija se upravo bavi problemom projektovanja strukture koja bi bila adaptivna, upravljiva i koja bi mogla da ostvari ne samo jedan već više željenih oblika odnosno stanja. Takva adaptivna struktura imala bi više primena, posebno kod aplikacija koje zahtevaju promenu oblika izvršnog dela strukture. Jedna takva adaptivna struktura mogla bi da se projektuje kao **gipki sistem** (slika 1.3.) - gipki mehanizam sa **ugrađenim** (engl. *embedded*) aktuatorima (pogonom) i senzorima čija je svrha da detektuju karakteristike svoje okoline odnosno registruju njihove promene. Uvođenjem aktuatora i senzora u strukturu gipkog mehanizma dobio bi se sistem koji je adaptivan odnosno koji može da vrši detekciju (preko senzora) i da odgovori (posredstvom aktuatora i gipke strukture) različitim i nepoznatim (novim) situacijama u kojima se nađe, npr. da detektuje i adekvatno odgovori na nepoznato opterećenje. Ovakav sistem bi mogao da "oseti" svoju okolinu i da se na osnovu toga prilagodi konkretnoj sredini odnosno sistem bi mogao da "komunicira" sa svojom okolinom. Gipki sistemi su inspirisani biološkim sistemima i predstavljaju sisteme koji su monolitni, autonomni, efikasni, samoodrživi, integrisani, visoko funkcionalni, višenamenski i adaptivni. Mnoštvo novih primena moglo bi imati koristi od ovakvih sistema uključujući: medicinske implantate, egzoskeletone, adaptivne proteze, veštačke organe, hirurške instrumente, hvatače i mnoštvo drugih aplikacija u biomedicini i robotici.



slika 1.3. Gipki mehanizam sa ugrađenim aktuatorima i senzorima (gipki sistem)

Osnovnu premisu gipkog sistema predstavlja integracija prenosa kretanja/sila sa (ugrađenom) aktucijom i sensorikom. Pod ugrađenim aktuatorima i senzorima u strukturu gipkog mehanizma podrazumevamo da su aktuatori, senzori i struktura gipkog mehanizma jedna neodvojiva celina odnosno aktuatori i senzori su deo strukture gipkog mehanizma

(njegovi strukturni elementi) i deformišu se zajedno sa njim slično kao kod bioloških sistema kod kojih je aktuacija i senzorika ugrađena u sam sistem i predstavlja njen neodvojivi deo. Stoga i aktuatori moraju biti gipki; klasični generatori sile (aktuatori) su kruti. Kombinacija novih principa aktuacije, novih materijala i naprednih tehnologija izrade omogućuje projektovanje gipkih aktuatora kao što su npr. veštački mišići, legure koje pamte oblik – SMA, termički, elektrostatički i piezoelektrični aktuatori. Gipki aktuatori mogu imati krutost kao i gipka struktura u koju se ugrađuju odnosno ovakvi aktuatori mogu biti gipki kao i sam gipki mehanizam. Kombinacija gipke strukture i gipkih aktuatora omogućava povratnu spregu sile, slično kao kod bioloških struktura, za razliku od tradicionalnih rešenja sa klasičnim mehanizmima i krutim aktuatorima sa kojima se to ne može postići. Na slici 1.4. prikazana je hronologija razvoja mehanizma hvatača, od klasičnih mehanizama preko gipkih mehanizama do adaptivnih gipkih sistema sa ugrađenim gipkim aktuatorima i senzorima.



slika 1.4. Hronologija razvoja mehanizma hvatača

Ugradnjom aktuatora u gipku strukturu sistem može ostvariti više izlaznih oblika pa time poseduje **strukturnu adaptivnost** i idealan je za primene koje zahtevaju promenu oblika. Gipki sistemi imaju potencijala da budu "inteligentni" odnosno da pored strukturne adaptivnosti budu i **adaptivni** jer se mogu snaći u novim nepredviđenim okolnostima. Da bi posedovali ovakvu vrstu "inteligencije" potrebno je razviti i odovarajuće upravljanje koje bi na osnovu informacija/signala primljenih sa senzora upravljalo aktuatorima.

Gipki sistemi predstavljaju i mehatroničke sisteme. **Mehatronika** je interdisciplinarna oblast inženjerskih nauka koja predstavlja simbiozu mašinstva, elektronike, informatike i upravljanja. Mehatronika kao naučna oblast razvijena je početkom devedesetih godina prošlog veka i omogućila je razvoj mehatroničkih sistema koji danas već imaju široku primenu u skoro svim sferama života (klasični primeri mehatroničkog sistema su robot i savremeni automobil). Proces projektovanja klasičnih mehatroničkih sistema uključuje najpre razvoj mehaničkog dela sistema (mehanizma), a nakon toga se dodaju odgovarajući aktuatori i senzori pri čemu se na kraju razvija i upravljanje za takav sistem. Međutim, projektovanje gipkih sistema zahteva drugačiji pristup. Pri razvoju gipkih sistema postavljanje aktuatora/senzora (tip, orijentacija, veličina i lokacija) mora biti integrisano u proces sinteze strukture gipkog mehanizma. Kod ovog pristupa, formiranje strukture gipkog mehanizma utiče na to kako će aktuatori/senzori biti postavljeni u strukturu mehanizma, ali u isto vreme i postavka aktuatora/senzora utiče na formiranje strukture gipkog mehanizma. Pod ugrađenim aktuatorima odnosno sensorima podrazumevamo i da se postavka aktuatora/senzora istovremeno definiše sa gipkom strukturom sistema kako bi se projektovao sistem optimalnih performansi. Da bi gipki sistem mogao da ostvari više oblika/stanja potrebno je koristiti i više aktuatora u sistemu, pa se postavlja i pitanje upravljanja gipkim sistemom. Uključivanje upravljanja u proces projektovanja/sinteze može poboljšati upravljivost adaptivnog sistema. Ovo predstavlja jedan potpuno novi pristup projektovanju mehatroničkih sistema.

Gipki sistemi odnosno gipki mehanizmi sa ugrađenim aktuatorima i sensorima predstavljaju jedan novi koncept mehatroničkih sistema koji do sada nije u potpunosti istražen. Stoga bi trebalo poboljšati postojeće i razviti nove alate za projektovanje ovakvih sistema. Potrebno je takođe razviti nove vrste aktuatora izrađenih od "pametnih" materijala kao i nove vrste senzora koji bi se lako ugradili u strukturu gipkog mehanizma. Tema ove doktorske disertacije je razvoj adaptivnog upravljivog gipkog sistema odnosno adaptivne upravljive gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima i sensorima koja bi trebalo ciljano (upravljivo) da menja svoj oblik i koja bi po svojoj funkciji bila više nalik biološkim sistemima. Ovakva struktura bi imala mnoštvo primena.

1.2. Motivacija i ciljevi

Postoji velika potreba za sistemima koji menjaju oblik izvršnog elementa jer mnoge primene to zahtevaju pa je motiv za disertaciju proizašao iz potrebe za novom vrstom ovakvih adaptivnih sistema jer postojeća rešenja imaju svoja ograničenja.

Projektovanje struktura koje su sposobne da menjaju svoj oblik predstavlja veoma izazovan zadatak koji uključuje sintezu mehanizma, aktuatora (pogona) i fleksibilne površine (slika 1.1.). Izazov je projektovati strukturu koja može da izdrži spoljašnja opterećenja, ali koja u isto vreme može i da kontinualno menja svoj oblik; pri ovome idealno bi bilo da mehanizam, aktuator i fleksibilna površina predstavljaju neodvojivi sistem odnosno jednu celinu. Većina postojećih rešenja struktura koje mogu da menjaju oblik su veoma komplikovana za izradu, zahtevaju montažu, skupa su, često mogu da ostvare samo jedan unapred poznat oblik i često su razvijena za samo jednu konkretnu aplikaciju i stoga ne mogu imati širu primenu. Ovo predstavlja i motiv za razvoj nove vrste adaptivnih struktura koje bi menjale oblik i mogle da ostvare ne jedan nego više oblika, koje bi bile monolitne (ne zahtevaju montažu), jednostavne za izradu, jeftine i koje bi imale više primena. Kao što smo napomenuli u prethodnom odeljku, gipki sistemi odnosno gipki mehanizmi sa ugrađenim aktuatorima i sensorima nude alternativu za projektovanje ovakve vrste struktura. Gipki sistemi ostvaruju prenos kretanja/sila posredstvom gipkih mehanizama pa koriste i njihove mnogobrojne prednosti. Ugrađeni aktuatori u strukturu gipkog mehanizma daju mogućnost gipkom sistemu da ostvari više izlaznih oblika (imaju strukturnu adaptivnost), a preko ugrađenih senzora mogu i da detektuju promene u svojoj okolini što ih čini i adaptivnim. Zbog svega ovoga gipki sistemi su idealni za primene koje zahtevaju upravljivu promenu oblika strukture.

Analizom literature mogu se uočiti više do sada neobrađenih segmenata razvoja gipkih sistema:

- 1) razvijena metodologija razvoja gipkih sistema ne može se smatrati celovitom jer često kao rezultat daje veoma komplikovana rešenja koja nije jednostavno izraditi klasičnim metodama proizvodnje kao što su obrada rezanjem ili livenje u kalupima,
- 2) postojeći komercijalno dostupni aktuatori nisu pogodni za primenu u ovakvim sistemima jer realizuju mali hod, ostvaruju male pogonske sile, nisu upravljivi odnosno imaju samo on/off upravljanje, a često zahtevaju snažnije izvore električnog napajanja,

- 3) odgovarajuće senzorske tehnologije, pogodne za ugradnju odnosno za primenu kod gipkih sistema, nisu komercijalno dostupne ili su skupe,
- 4) veoma malo pažnje je posvećeno razvoju odgovarajućeg upravljanja odnosno upravljačkih algoritama za gipke sisteme (gotovo da ih i nema),
- 5) do sada nije razvijen ni jedan fizički prototip gipkog sistema koji bi bio u potpunosti funkcionalan; postojeća rešenja predstavljaju samo koncepte koje je teško fizički realizovati,
- 6) ne postoji adaptivna upravljiva gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima i sensorima koja bi imala ne samo jednu nego više primena.

Stoga je cilj ove disertacije razvoj jednog adaptivnog upravljivog gipkog sistema odnosno adaptivne upravljive gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima i sensorima koja može upravljivo da menja oblik i realizuje ne samo jednu nego više primena. Iz prethodnog proizilaze i sledeći ciljevi disertacije:

- 1) poboljšanje postojeće metodologije za projektovanje gipkih sistema odnosno gipkih mehanizama sa ugrađenim aktuatorima i sensorima tako da se dobiju rešenja koja se mogu fizički izraditi klasičnim metodama proizvodnje, i primena ove metodologije za razvoj adaptivne gipke strukture,
- 2) razvoj odgovarajućih aktuatora za adaptivnu gipku strukturu, koji ostvaruju relativno veliki hod, relativno velike sile, upravljivi su i pogodni za ugradnju u strukturu gipkog mehanizma; primenom ovakvih aktuatora gipka struktura bi mogla da ostvari relativno velike deformacije svoje spoljne površine i bila sposobna da realizuje mnoštvo različitih oblika,
- 3) razvoj nove vrste senzora za gipku strukturu koji bi bili izrađeni od komercijalno dostupnih materijala, koji bi bili jeftini i pogodni za ugradnju u strukturu gipkog mehanizma, a koji bi omogućili gipkoj strukturi da registruje promene u svojoj okolini,
- 4) razvoj odgovarajućeg upravljačkog algoritma za gipku strukturu sa ugrađenim aktuatorima i sensorima,
- 5) izrada fizičkog prototipa adaptivne upravljive gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima i sensorima.

1.3. Organizacija disertacije

Drugo poglavlje se bavi opisom stanja tehnike odnosno pregledom literature u oblasti struktura koje menjaju oblik. Detaljno je opisana većina realizovanih rešenja struktura koje mogu da menjaju oblik kao i primene za koje su razvijene. Drugo poglavlje daje i uvid u nedostatke postojećih rešenja, a samim tim nudi mogućnosti za poboljšanje postojećih rešenja kao i mogućnosti za dalje istraživanje ove oblasti. Poglavlje se završava detaljnijim opisom onoga što će biti urađeno u disertaciji.

U trećem poglavlju je detaljno opisana metodologija sinteze gipkih sistema, a efikasnost metode je demonstrirana sintezom konkretne adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima koja može da menja oblik radne površine. Na početku je dat pregled postojećih metoda sinteze gipkih mehanizama, uz navođenje primera gipkih mehanizama koji se dobijaju primenom ovih metoda. Zatim je ponuđen originalni, u disertaciji razvijeni algoritam sinteze gipkih mehanizama, a efikasnost algoritma je demonstrirana primerima sinteze gipkih mehanizama dobijenih primenom ovog algoritma. U ovom poglavlju su predstavljeni i izrađeni fizički prototipovi dobijenih rešenja gipkih mehanizama i izvršena je odgovarajuća analiza njihovog rada. Poglavlje se završava opisom sinteze gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima, koja može da menja oblik, a koja je dobijena primenom razvijene poboljšane metode sinteze; u ovom poglavlju je izvršena i odgovarajuća analiza rada dobijenog rešenja.

Četvrto poglavlje je posvećeno razvoju 3D modela adaptivnog upravljivog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima koji može da menja oblik, razvijenog na osnovu rešenja dobijenog primenom poboljšane metode sinteze gipkih sistema. Izvršena je odgovarajuća numerička analiza rada 3D modela gipkog sistema primenom **metode konačnih elemenata** (MKE) odnosno urađene su odgovarajuće numeričke simulacije radi ispitivanja mogućnosti novorazvijene adaptivne gipke strukture. Izrađen je i fizički prototip modela adaptivnog gipkog sistema i izvršena analiza njegovog rada. Poglavlje se završava opisom odgovarajućih koncepata i mogućih primena razvijenog gipkog sistema.

Peto poglavlje je posvećeno razvoju nove vrste aktuatora napravljenih od legura koje pamte oblik (engl. *Shape Memory Alloys - SMA*), a koji su upravljivi i veoma lako ih je ugraditi u strukturu gipkog mehanizma. Poglavlje započinje opisom stanja tehnike na polju novih aktuatorskih tehnologija odnosno aktuatora napravljenih od "pametnih" materijala. Opisane su prednosti i nedostaci postojećih aktuatorskih tehnologija i motivacija za razvoj novih aktuatora. Zatim je detaljno opisan proces razvoja novih aktuatora od legura koje pamte oblik. Ispitane su njihove karakteristike, njihova funkcionalnost i opisano je

ugrađivanje aktuatora u strukturu novorazvijene adaptivne gipke strukture. Poglavlje se završava analizom rada dobijenog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima napravljenim od legura koje pamte oblik.

Šesto poglavlje govori o razvoju nove vrste senzora za razvijenu gipku strukturu koja može da menja oblik. Poglavlje započinje opisom problema i zahtevanih karakteristika senzora za primenu kod razvijenog gipkog sistema. Zatim je detaljno opisan razvoj nove vrste senzora koji se lako mogu ugraditi u strukturu gipkog sistema. Senzori su razvijeni od provodne pene koja pri deformaciji menja svoju električnu otpornost; ovakvi senzori mogu da detektuju pritisno opterećenje. Ispitane su karakteristike senzora i njihova funkcionalnost. Zatim je opisano ugrađivanje senzora u strukturu gipkog sistema sa aktuatorima od legura koje mogu da pamte oblik. Izvršena je i odgovarajuća analiza rada dobijene adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima i sensorima. Poglavlje se završava opisom razvoja senzora "veštačke kože" koji bi mogli da imaju primenu i u drugim sistemima.

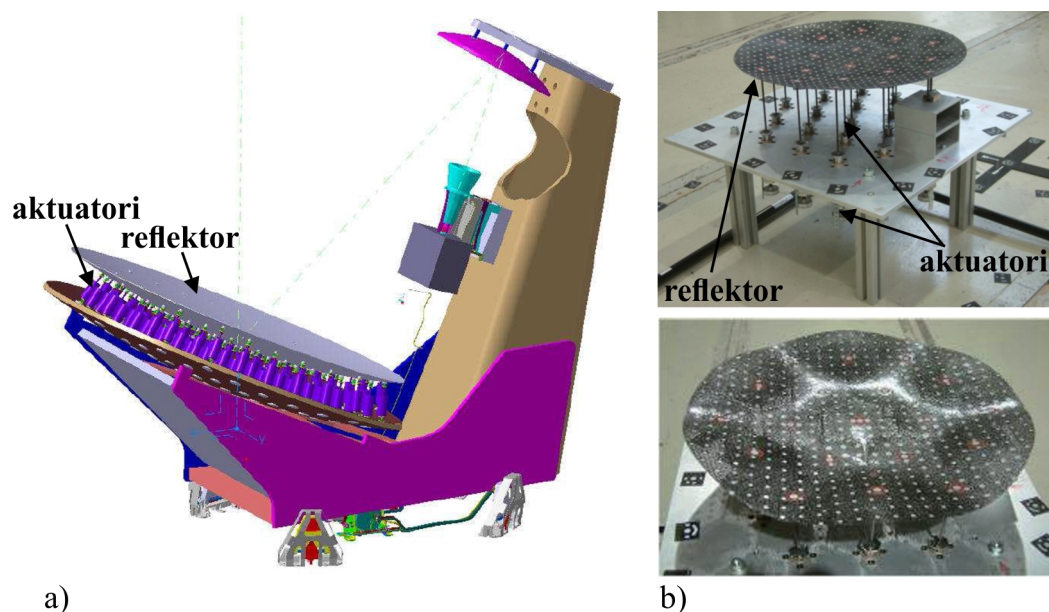
Sedmo poglavlje je posvećeno opisu razvoja odgovarajućeg upravljačkog algoritma adaptivnog gipkog sistema. Poglavlje započinje opisom upravljačke logike i upravljačkog algoritma, kako bi se pokazale mogućnosti gipkog sistema koji bi sadržao i odgovarajuće upravljanje. Zatim je prikazan uređaj na kome se izvršava algoritam upravljanja, kao i kratak opis dodatnog električnog kola; električno kolo je razvijeno radi povezivanja aktuatora i senzora gipkog sistema sa uređajem na kome se izvršava algoritam upravljanja. Poglavlje se završava ispitivanjem rada adaptivnog gipkog sistema koji poseduje i odgovarajuće upravljanje.

U osmom poglavlju su sumirani zaključci, navedeni su doprinosi disertacije i ukazano je na moguće pravce daljih istraživanja.

2. Stanje istraživanja u oblasti struktura koje mogu da menjaju svoj oblik

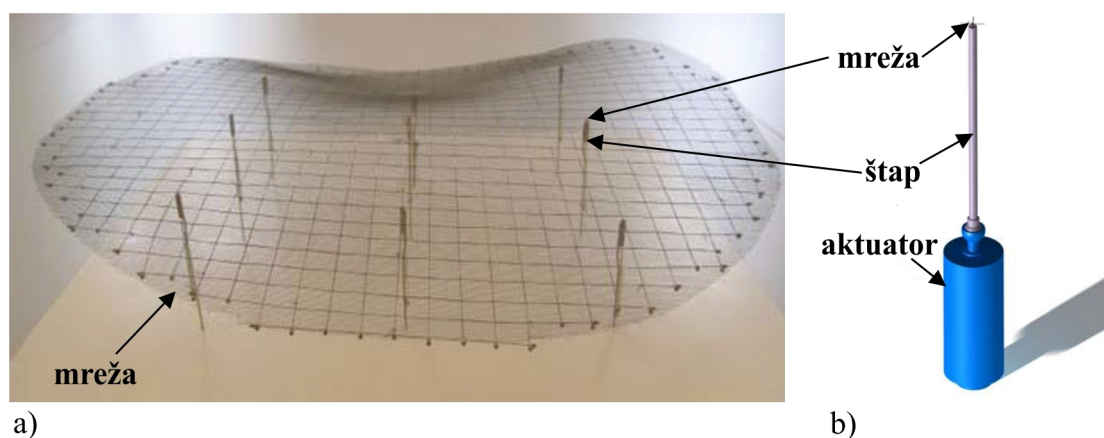
Strukture koje mogu da menjaju svoj geometrijski oblik, kada se od njih to zahteva, imaju danas široku primenu. Neke od ovih primena mogu se sresti kod aktivnih svemirskih antena [1-5], vetrenjača (vetrogeneratora) [6-11], mlaznica turbo motora [12, 13], ogledala za primenu u optici [14-18], građevinskih objekata [19-21], ortopedskih pomagala koja služe kao oslonac kičmi (engl. *lumbar support systems*) [5], karoserija automobila [22-24] i avionskih krila [25-53].

Reflektori aktivnih antena na satelitima koji se šalju u svemir, mogu da menjaju svoj oblik (slika 2.1.) kako bi usmeravali i fokusirali odbijene elektromagnetne talase na određeni region Zemljine površine u cilju prilagođavanja promenljivim zahtevima komunikacije. Pored ovoga, reflektori aktivnih antena mogu da promenom svoga oblika menjaju i šablon reflektovanih talasa (engl. *radiation patterns*) kako bi ublažili gubitke signala usled promenljivih meteoroloških uslova. Ovakve aktivne antene mogu komunikacijski pokriti različite regione Zemljine površine čime zamenjuju nekoliko satelita sa reflektorima koji bi imali jedan nepromenljiv oblik i mogli da pokriju samo jednu, relativno usku oblast. Na slici 2.1.a prikazano je jedno rešenje aktivne antene koje se sastoji od reflektora (tanjira) i niza aktuatora koji njime upravljaju (slika 2.1.b). Prečnik reflektora iznosi 500 mm i predstavlja laboratorijski model aktivne antene koji ima 19 aktuatora. Reflektor antene napravljen je od fleksibilnog kompozitnog materijala CFRS (engl. *carbon fiber reinforced silicone*) [1] koga čini niz upredenih ugljeničnih vlakana prekrivenih odgovajućim silikonom. Ovakav materijal male je debljine i ima malu savojnu krutost u ravni upravnoj na površinu reflektora, a dobru krutost u njegovoj ravni. Reflektor je napravljen od dva sloja CFRS i dodatih paketa CFRS veće debljine, sa zadnje strane površine reflektora, na mestu spoja sa aktuatorima, kako bi se obezbedilo kontinualno opterećenje koje unosi aktuator. Aktuatori vrše pomeranje pojedinih tačaka na reflektoru ostvarujući na taj način i promenu njegovog oblika (slika 2.1.b). Pri ovome, ovakva fleksibilna površina (reflektor) ne zahteva velike pogonske sile (sile su reda veličine do 20 N), a veličine pomeranja tačaka kojima se upravlja kreću se od -15 mm do +5 mm.



slika 2.1. a) Koncept aktivne satelitske antene [3]; b) reflektor antene koji menja oblik iz početnog paraboloidnog (slika gore) u željeni oblik (slika dole) [1]

Na slici 2.2. prikazano je još jedno rešenje reflektora aktivne antene, koje može da menja oblik. Kod ovog rešenja reflektor je napravljen od mreže isprepletenih tankih žica koje su upravne jedna na drugu, pri čemu je mreža oslonjena na niz od 9 aktuatora (slika 2.2.a). Mreža koja čini reflektor dovoljno je fleksibilna i sastavljena je od dva sloja isprepletenih žica, gušćeg sloja (takozvana RF mreža – radio frekventna mreža) koji se oslanja na ređi sloj. Slično kao i kod prethodnog rešenja, aktuatori pomeraju pojedine tačke mreže preko odgovarajućih štapova, ostvarujući na taj način promenu oblika mreže (reflektora) (slika 2.2.b).



slika 2.2. a) Reflektor aktivne antene koji može da menja oblik, napravljen od mreže isprepletenih tankih žica; b) model aktuatora [4]

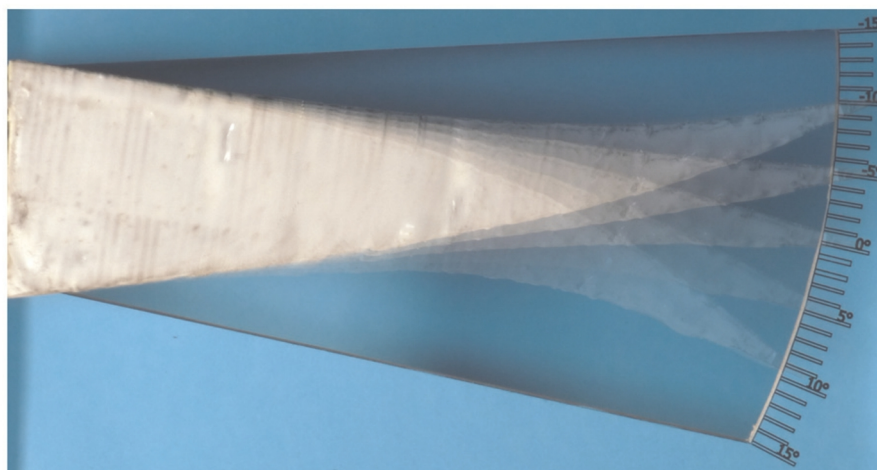
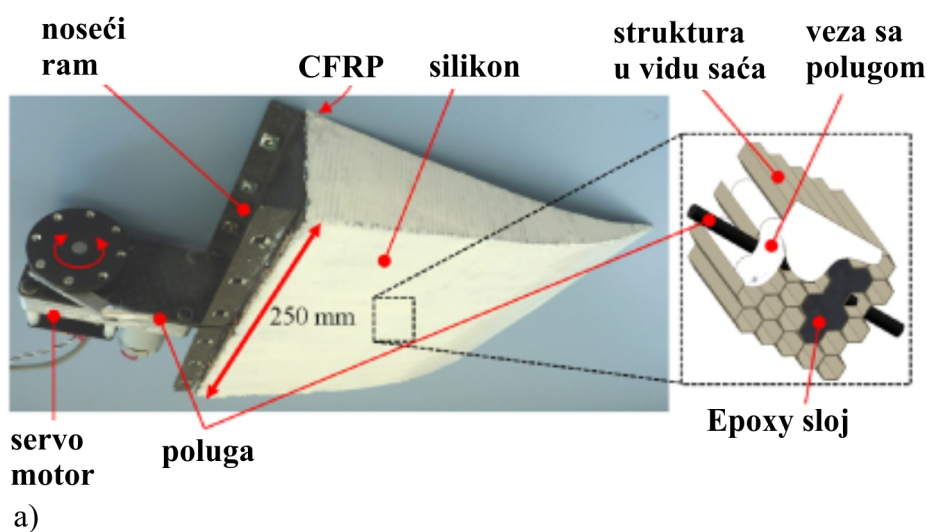
Lopaticice vetrenjača mogu da menjaju svoj oblik (slika 2.3.) kako bi smanjile promenljiva aerodinamička opterećenja koja deluju na njih i povećale aerodinamičku efikasnost cele vetrenjače. Promenljiva aerodinamička opterećenja koja potiču od promene pravca vetra, turbulencije i udara vetra, mogu dovesti do povećanja naprezanja u lopaticama vetrenjača i izazvati njihovo oštećenje pa je potrebno smanjiti ova opterećenja i upravljati njima. Kod konvencionalnih vetrenjača aerodinamička opterećenja se smanjuju zakretanjem cele lopaticice (pri čemu su lopaticice relativno krute) odnosno promenom ugla između profila lopaticice i pravca kretanja vetra (engl. *blade pitch*). Međutim, sama inercija lopaticice ograničava brzinu kojom je moguće zakretati lopaticicu u odnosu na brzopromenljiva aerodinamička opterećenja. Pored ovoga, zakretanjem lopaticice nije moguće kontrolisati odnosno smanjiti lokalna aerodinamička opterećenja na svakom delu lopaticice vetrenjače. Lopaticice koje bi mogle da menjaju oblik svog profila imale bi mogućnost da brzo smanje aerodinamička opterećenja na bilo kom delu lopaticice odnosno mogle bi da aktivno menjaju svoj oblik u zavisnosti od pravca kretanja vetra.

Na slici 2.3. prikazano je jedno rešenje lopaticice vetrenjače koja može da menja svoj oblik. Ovde se promena oblika lopaticice postiže promenom oblika zakrilca (engl. *flaps*).



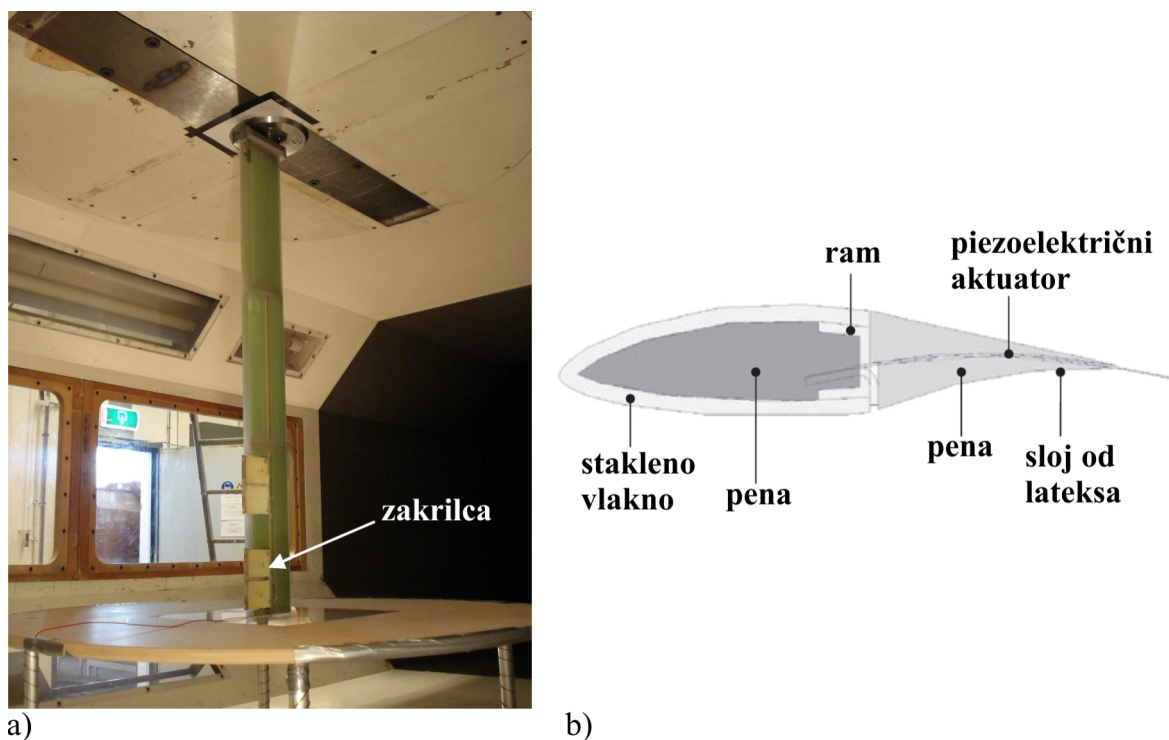
slika 2.3. Lopatica vetrenjače koja menja oblik svog profila zakretanjem zakrilca [6]

Osnovu zakrilca koje može da menja oblik čini struktura od aramida u obliku saća koja je sa gornje strane prekrivena fleksibilnom kompozitnom plastikom ojačanom ugljeničnim vlaknima (engl. *carbon fiber reinforced plastic - CFRP*) [6], a sa donje strane prekrivena je slojem silikona (slika 2.4.a). Struktura u obliku saća ima veliku krutost u ravni upravnoj na ravan deformacije, a malu savojnu krutost u ravni deformacije profila lopatice koja omogućava kontinualnu promenu oblika. Odgovarajući servo motor (aktuator) preko poluge (slika 2.4.a) pomera (gura i vuče) zakrilca i na taj način vrši i kontinualnu promenu oblika profila lopatice vetrenjače (slika 2.3. i slika 2.4.b).



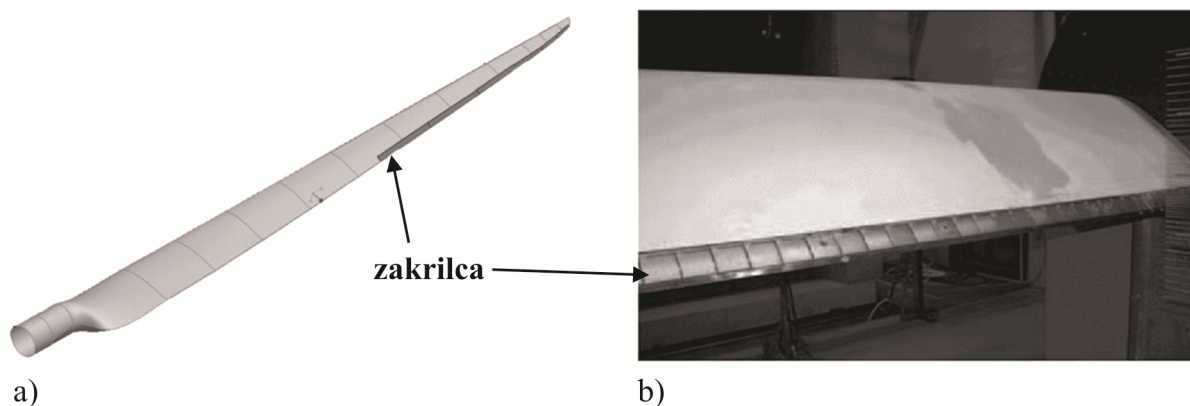
slika 2.4. a) Struktura zakrilca lopatice vetrenjače [6]; b) promena oblika zakrilca [7]

Kod rešenja prikazanog na slici 2.5.a promena oblika profila lopatice se takođe postiže zakretanjem zakrilca samo što se ovde zakrilca pogone piezoelektričnim aktuatorima (slika 2.5.b) [8, 9].



slika 2.5. a) Lopatica vetrenjače sa zakrilcima koja omogućavaju promenu oblika profila lopatice primenom piezoelektričnih aktuatora [8]; b) poprečni presek profila lopatice [9]

Slično rešenje lopatice koja može da menja oblik prikazano je na slici 2.6. Kao i u prethodnom slučaju, zakretanje zakrilca se vrši pomoću piezoelektričnih aktuatora, samo što kod ovog rešenja 36 piezoelektričnih aktuatora pokreće 36 zakrilca, pri čemu veći broj zakrilca pružaju veću mogućnost promene oblika pa samim tim i veće smanjenja lokalnih aerodinamičkih opterećenja na lopatici.

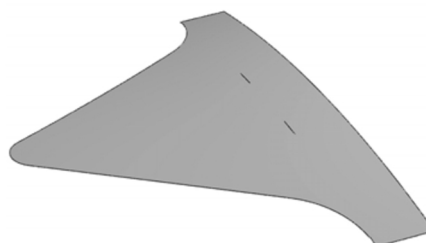


slika 2.6. a) Model lopatice vetrenjače sa zakrilcima koja menjaju oblik; b) zakrilca [10]

Aktivne mlaznice turbo motora aviona (slika 2.7.a) mogu da menjaju svoj oblik kako bi smanjile buku koju proizvodi motor prilikom uzletanja aviona i kako bi povećale njegovu efikasnost [12]. Na ivici mlaznice nalazi se nazubljeni deo (engl. *chevron*) (slika 2.7.a i slika 2.7.b) koji može da menja oblik. Na svakom ovakvom zubu nalaze se po tri SMA aktuatora (slika 2.7.c i slika 2.7.d). SMA (engl. *Shape Memory Alloys*) predstavljaju legure koje "pamte" svoj oblik [12] odnosno ispoljavaju svojstvo da se iz bilo kog drugog oblika vraćaju u svoj prethodno zapamćeni položaj, kada se izlože toploti (vidi poglavlje 5). SMA aktuatori na slici 2.7.c imaju takav zapamćeni oblik da kada se zagreju (aktiviraju) vrše savijanje pojedinačnih zuba mlaznica ka centru mlaznice odnosno prema smeru kretanja vazduha. Kao posledica savijanja pojedinačnih zuba dolazi do promene oblika zadnjeg dela mlaznice (nazubljenog dela) čime se menja i prečnik površine mlaznice i ostvaruje se bolje mešanje vrućeg vazduha koji izlazi iz motora sa hladnim vazduhom iz ventilatora turbine čime se i smanjuje buka motora. Nakon uzletanja aviona, u periodu leta, SMA aktuatori se deaktiviraju (hlade se) i zauzimaju nedeformisani položaj, čime se mlaznica dovodi u oblik koji je optimalan za režim leta aviona.



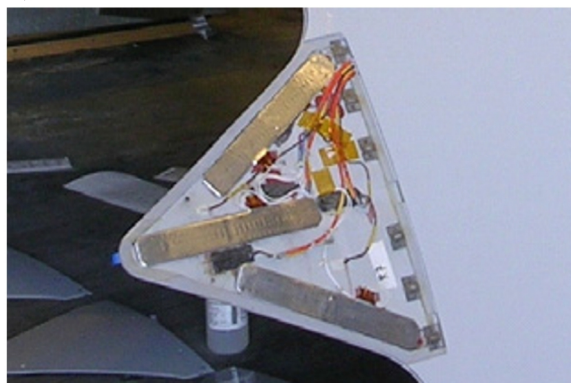
a)



b)



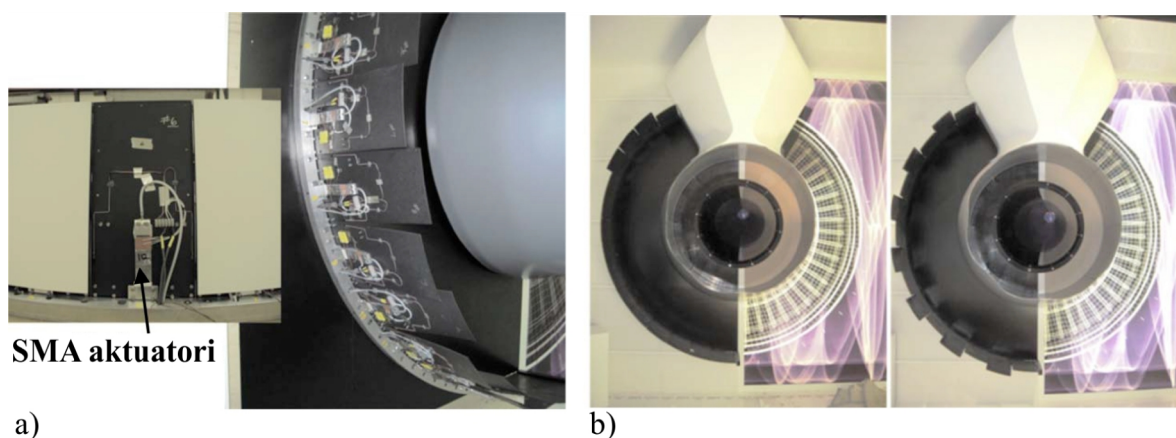
c)



d)

slika 2.7. Aktivna mlaznica turbo motora aviona: a) nazubljeni deo mlaznice; b) jedan zub mlaznice; c) SMA aktuator (engl. *Shape Memory Alloy*); d) zub mlaznice sa tri SMA aktuatora [12]

Na slici 2.8. prikazano je drugačije rešenje aktivne mlaznice. SMA aktuatori pomeraju odgovarajuće panele na izlazu mlaznice (slika 2.8.a) čime vrše skupljanje i širenje mlaznice odnosno menjaju prečnik mlaznice (slika 2.8.b). Kao i u prethodnom slučaju, podešavanjem prečnika mlaznice smanjuje se buka koju proizvodi motor tokom poletanja aviona. Takođe, u toku leta aviona, podešavanjem prečnika mlaznice u zavisnosti od spoljašnjih uslova može se smanjiti i potrošnja goriva. Pojedini SMA aktuatori su memorisani na istežanje a pojedini na skupljanje, pri čemu je svaki aktuator na jednom kraju fiksiran za nepokretni prsten mlaznice, a na svom slobodnom kraju oslanja se na pojedine panele. Aktivacijom aktuatora koji su memorisani na skupljanje, vrši se savijanje panela ka centru mlaznice odnosno dolazi do skupljanja mlaznice, a aktivacijom aktuatora na istežanje, vrši se pomeranje panela dalje od centra mlaznice odnosno dolazi do širenja mlaznice.



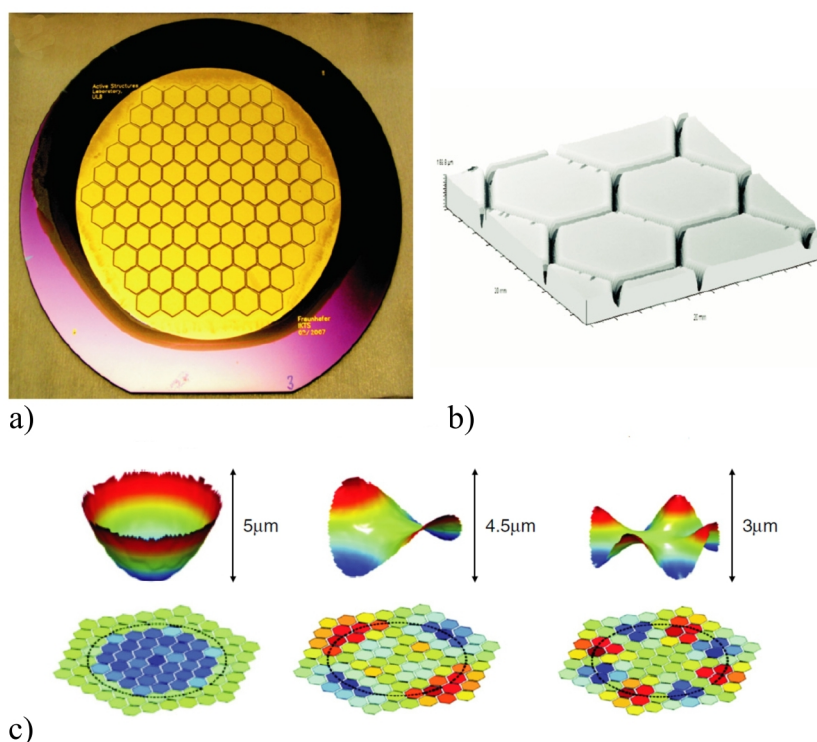
slika 2.8. Koncept aktivne mlaznice turbo motora: a) SMA aktuatori koji pomeraju pojedine panele mlaznice; b) različiti oblici mlaznice koji se dobijaju pomeranjem pojedinačnih panela [13]

U različitim optičkim sistemima koriste se i aktivna ogledala koja mogu da menjaju svoj oblik kako bi ispravila aberacije optičkog sistema¹ u cilju dobijanja kvalitetnije slike koju daje optički sistem. Pored ovoga, vrlo često realni oblik profila ogledala odstupa od projektovanog (nominalnog) oblika, kao posledica geometrijskih deformacija i površinskih neravnina ogledala. Aktivna ogledala mogu da promenom svoga oblika približe, što je više moguće, realni oblik profila ogledala projektovanom obliku i tako isprave nedostatke optičkog sistema odnosno poboljšaju njegove performanse [14-18].

Na slici 2.9.a prikazano je jedno rešenje aktivnog ogledala koje služi da ispravi aberacije optičkog sistema. Ispod ogledala se nalazi pločica sa nizom piezoelektričnih aktuatora, sa

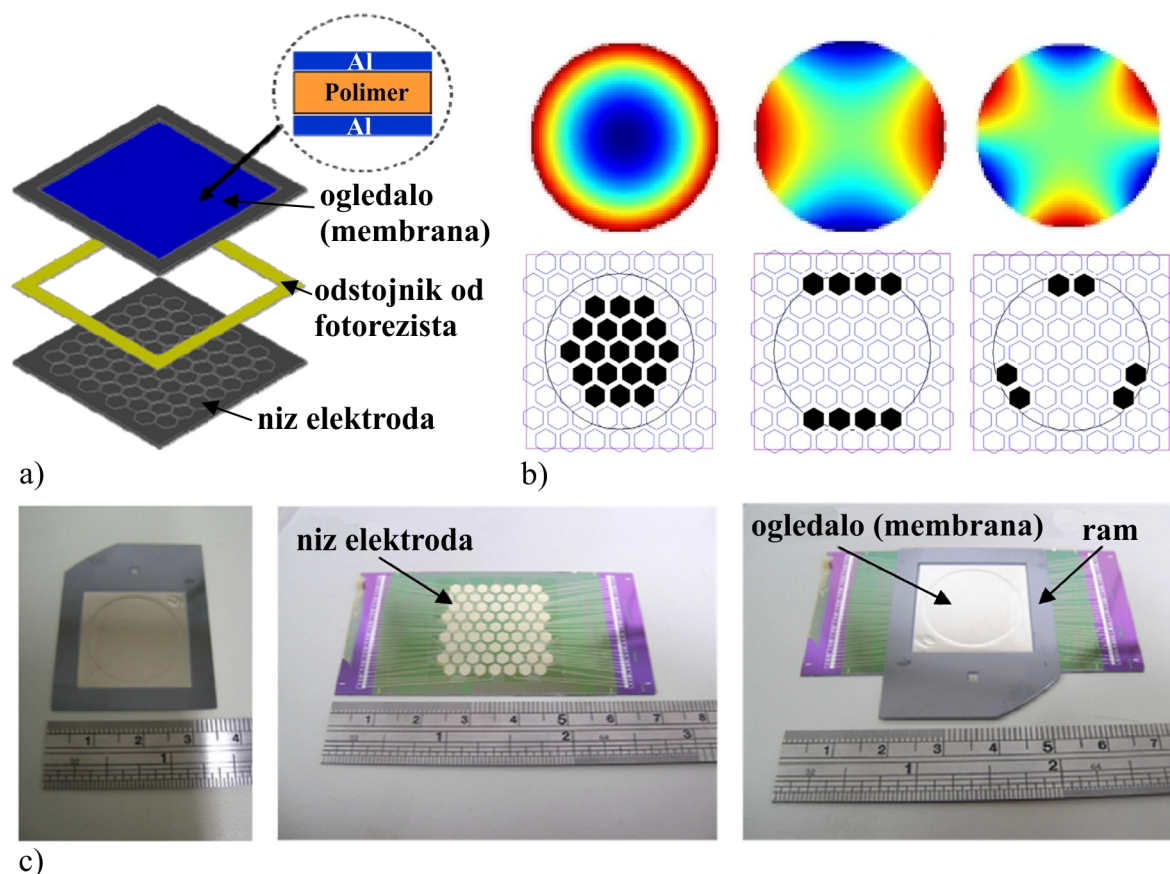
¹ Nedostaci optičkog sistema zbog kojih se formira lik koji ne odgovara idealnom liku.

elektrodama u vidu šestostrane prizme (slika 2.9.b). Aktivacijom aktuatora vrši se pomeranje pojedinih oblasti ogledala, a samim tim i promena njegovog oblika (slika 2.9.c).



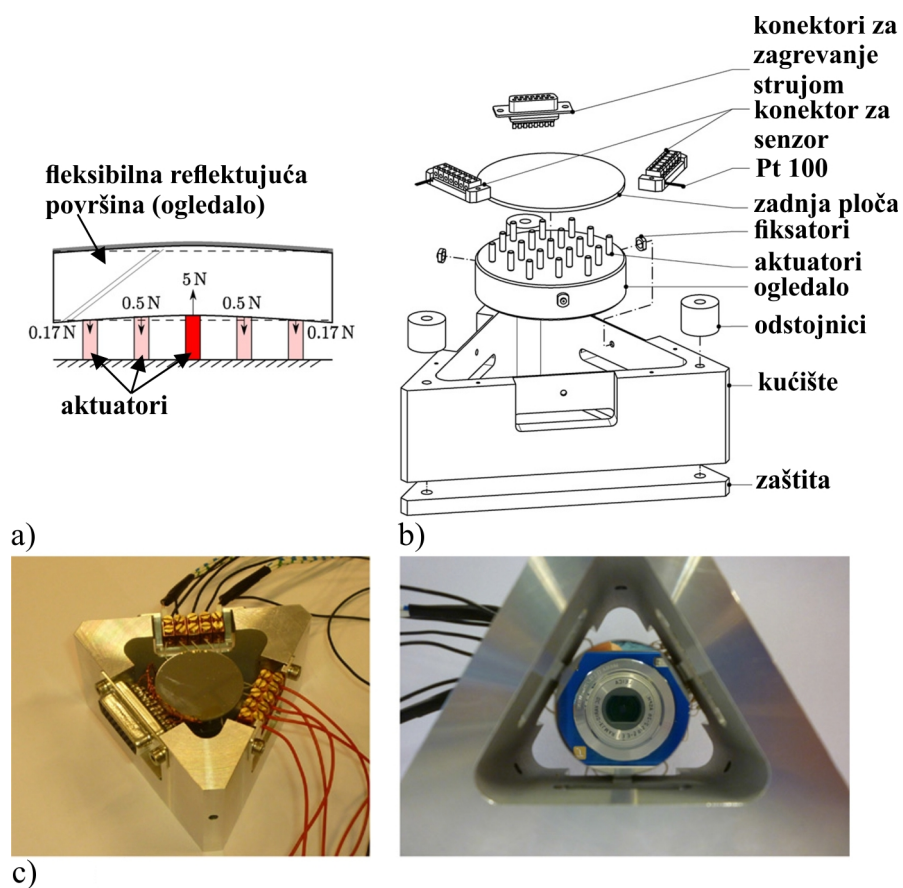
slika 2.9. a) Ogledalo koje može da menja oblik; b) piezoelektrični aktuatori sa elektrodama u vidu šestostrane prizme; c) različiti oblici koje ogledalo može da ostvari aktivacijom piezoelektričnih aktuatora (označeni plavom bojom) [14]

Drugačije rešenje aktivnog ogledala prikazano je na slici 2.10. Ogledalo (u vidu membrane) sastoji se od sloja polimera koji je sa gornje i donje strane prekriven tankim slojem aluminijuma (slika 2.10.a). Ispod ogledala se nalazi pločica sa nizom elektroda u obliku šetougaonika pri čemu su ogledalo i niz elektroda razdvojeni slojem fotorezista kao odstožnikom (slika 2.10.a). Sloj polimera daje fleksibilnost ogledalu dok gornji sloj aluminijuma igra ulogu reflektujuće površine. Donji sloj aluminijuma igra ulogu druge elektrode sistema. Dovođenjem električnog napona između pojedinih šestougaonih elektroda i donjeg sloja aluminijuma stvara se elektrostatička sila privlačenja koja vrši lokalnu deformaciju ogledala. U zavisnosti od toga koje od šestougaonih elektroda su aktivirane vrši se i odgovarajuća promena oblika ogledala (slika 2.10.b).



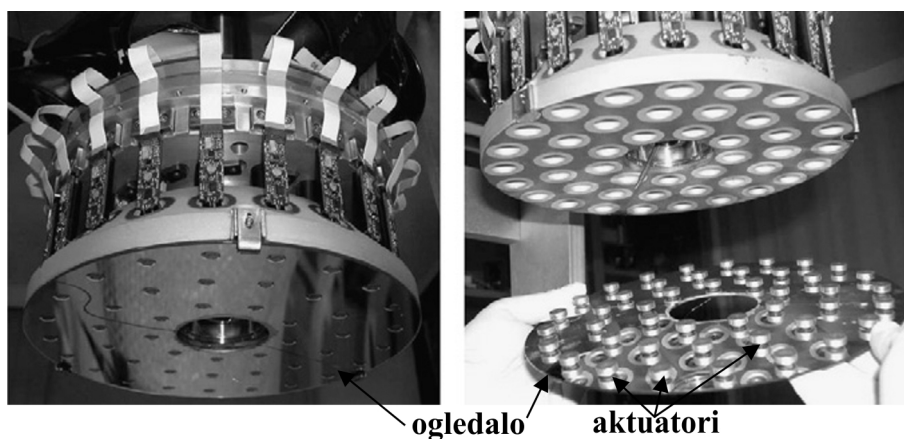
slika 2.10. a) Komponente aktivnog ogledala; b) različiti oblici ogledala koji se postižu dovođenjem napona na pojedinačne elektrode (crnom bojom su označene aktivne elektrode); c) fizički prototip ogledala koje može da menja svoj oblik [15]

Litografija predstavlja važnu tehnološku operaciju pri izradi mikromehaničkih komponenata. Na površini ogledala koje se koristi u sistemima za razvijanje sloja rezista, često dolazi do neuniformne raspodele ultraljubičaste svetlosti što dovodi do lokalnog povećanja temperature na pojedinim mestima na površini ogledala pa dolazi do lokalnih deformacija ogledala usled različite termalne ekspanzije [16]. Aktivna ogledala odnosno ogledala koja imaju sposobnost da menjaju svoj oblik mogu da koriguju ove deformacije. Na slici 2.11. prikazano je jedno takvo rešenje ogledala koje se sastoji od fleksibilne reflektujuće površine i niza upravno postavljenih termomehaničkih aktuatora (slika 2.11.a i slika 2.11.b); kada se izlože toploti, termomehanički aktuatori se istežu i generišu pomeranje/sile [16]. Aktuatori vrše pomeranje pojedinih tačaka na površini ogledala u pravcu upravnom na ogledalo, a samim tim menja se i oblik ogledala.



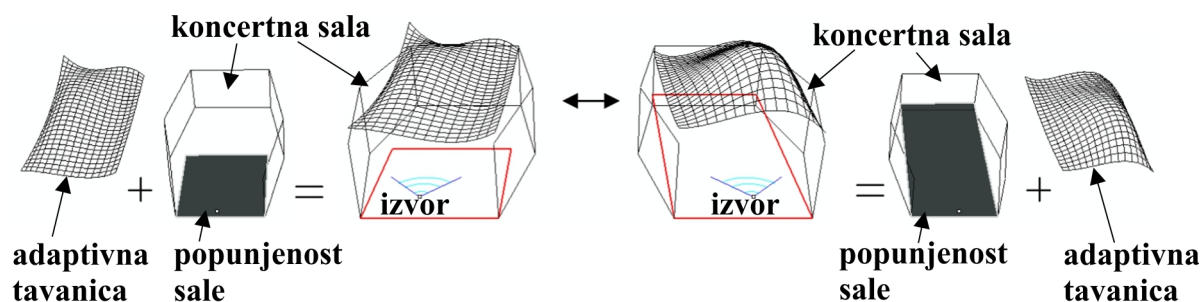
slika 2.11. Aktivno ogledalo koje može da menja oblik: a) princip rada; b) rasklopljeni model ogledala; c) fizički prototip aktivnog ogledala (pogled odozdo na slici levo i pogled odozgo na slici desno) [16]

Na sličnom principu kao i kod prethodnih rešenja, vrši se i promena oblika ogledala pikazanog na slici 2.12. Ovo ogledalo se koristi za primene u velikim teleskopskim sistemima, a promenu oblika ogledala realizuje niz elektromagnetnih aktuatora.



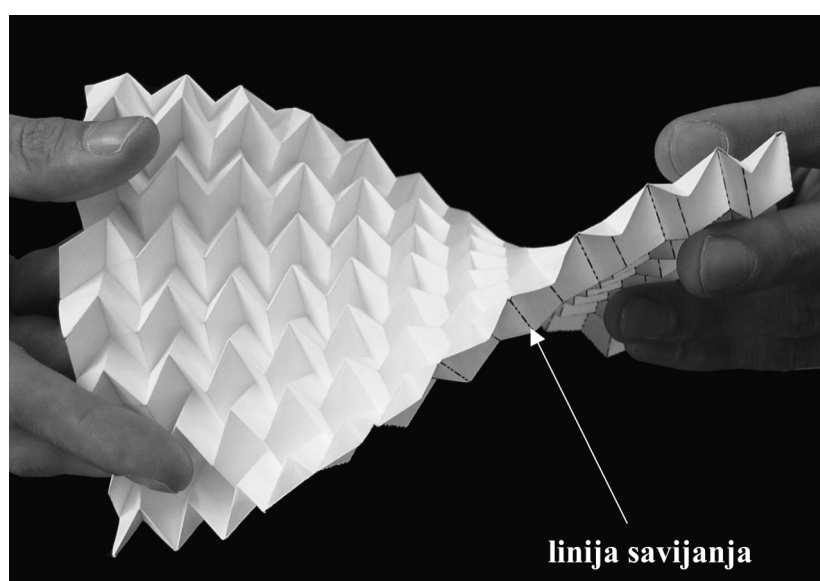
slika 2.12. Ogledalo velikog teleskopa koje može da menja oblik [17]

Strukture koje mogu da menjaju svoj oblik su sve više atraktivne i za primene kod građevinskih objekata. Tavanica neke koncertne sale bi mogla da menja svoj oblik (slika 2.13.) u zavisnosti od toga koliko je sala ispunjena slušaocima i u kom delu sale su slušaoci najviše koncentrisani, kako bi se ostvarila optimalna akustičnost cele prostorije.



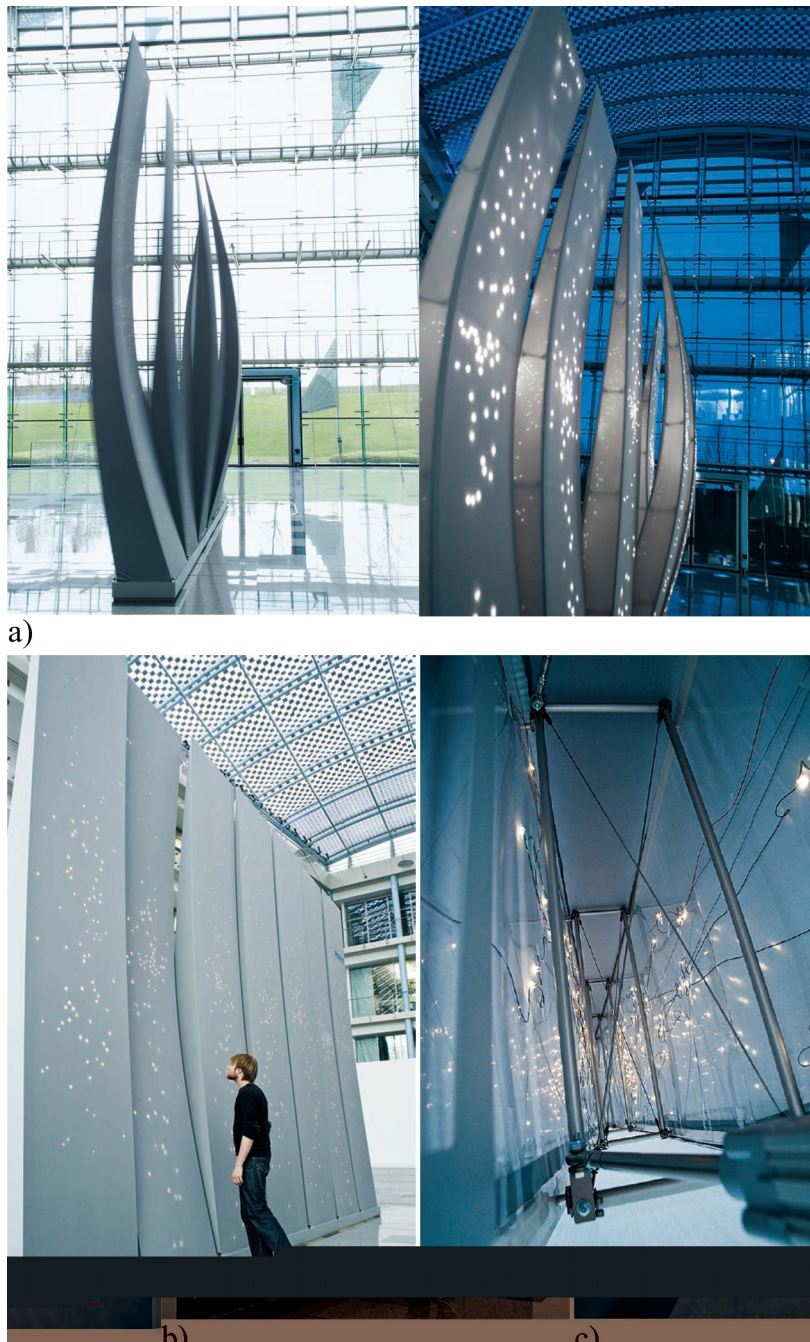
slika 2.13. Koncept adaptivne tavanice koja bi menjala svoj oblik u zavisnosti od ispunjenosti koncertne sale kako bi se ostvarila optimalna akustičnost [19]

Pod pretpostavkom da je moguće uz pomoć odgovarajućih senzora odrediti u kom delu sale je skoncentrisan najveći broj slušalaca, cilj bi bio da se promenom oblika tavanice prostorije zvuk koncentriše ka lokacijama u kojima se nalaze slušaoci, sa uniformnom raspodelom zvuka. Tavanica bi mogla biti napravljena u vidu origami strukture (engl. *rigid-foldable origami*) (slika 2.14.), pri čemu bi struktura bila napravljena od krutih panela, a na mestima linija savijanja origami strukture (slika 2.14.) trebalo bi ugraditi odgovarajuće zglobove.



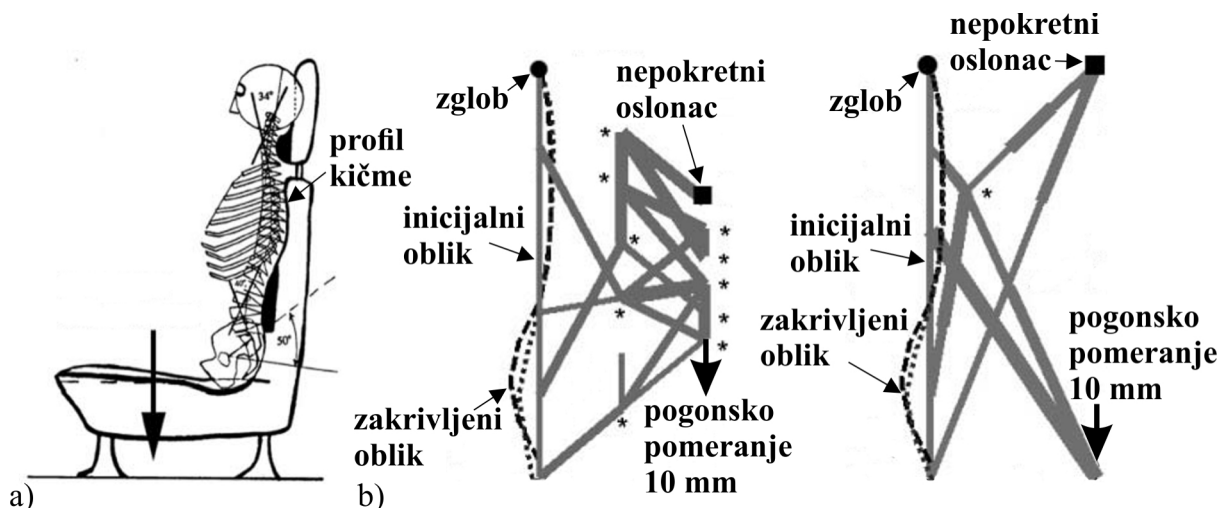
slika 2.14. Origami struktura koja bi mogla da se koristi kao model adaptivne tavanice [20]

Primer građevinskih struktura koje mogu da menjaju oblik jesu i aktivni zidovi firme FESTO (slika 2.15.a) [21]. Ovi zidovi mogu da ostvare interakciju sa ljudima koji stoje ispred njih tako što pri približavanju osobe zidu on menja svoj oblik (savija se) tako da se udaljava od osobe (slika 2.15.b); ukoliko se osoba udaljava od zida on menja svoj oblik tako da se približava posmatraču. Panele zida pomeraju odgovarajući mehanizmi koji pogonjeni električnim i penumatskim aktuatorima vrše promenu oblika celog zida (slika 2.15.c).



slika 2.15. a) Paneli zidova koji mogu da menjaju oblik; b) interakcija zida sa čovekom; c) struktura zida pogonjenog električnim i pneumatskim aktuatorima [21]

Strukture koje mogu da menjaju oblik, mogu se primeniti i u sistemima koji služe kao oslonac kičmi kod sedišta automobila ili kancelarijskih fotelja (slika 2.16.a), sa zadatkom da spreče bolove u kičmi. Sedanje čoveka na sedište/fotelju predstavlja pogonsko pomeranje sistema za oslonac kičme, koji vrši promenu oblika inicijalno uspravljenog oslonca u odgovarajući zakrivljeni oblik (slika 2.16.b). Takav zakrivljeni oblik oslonca treba da odgovara prirodnom obliku profila kičme [5].

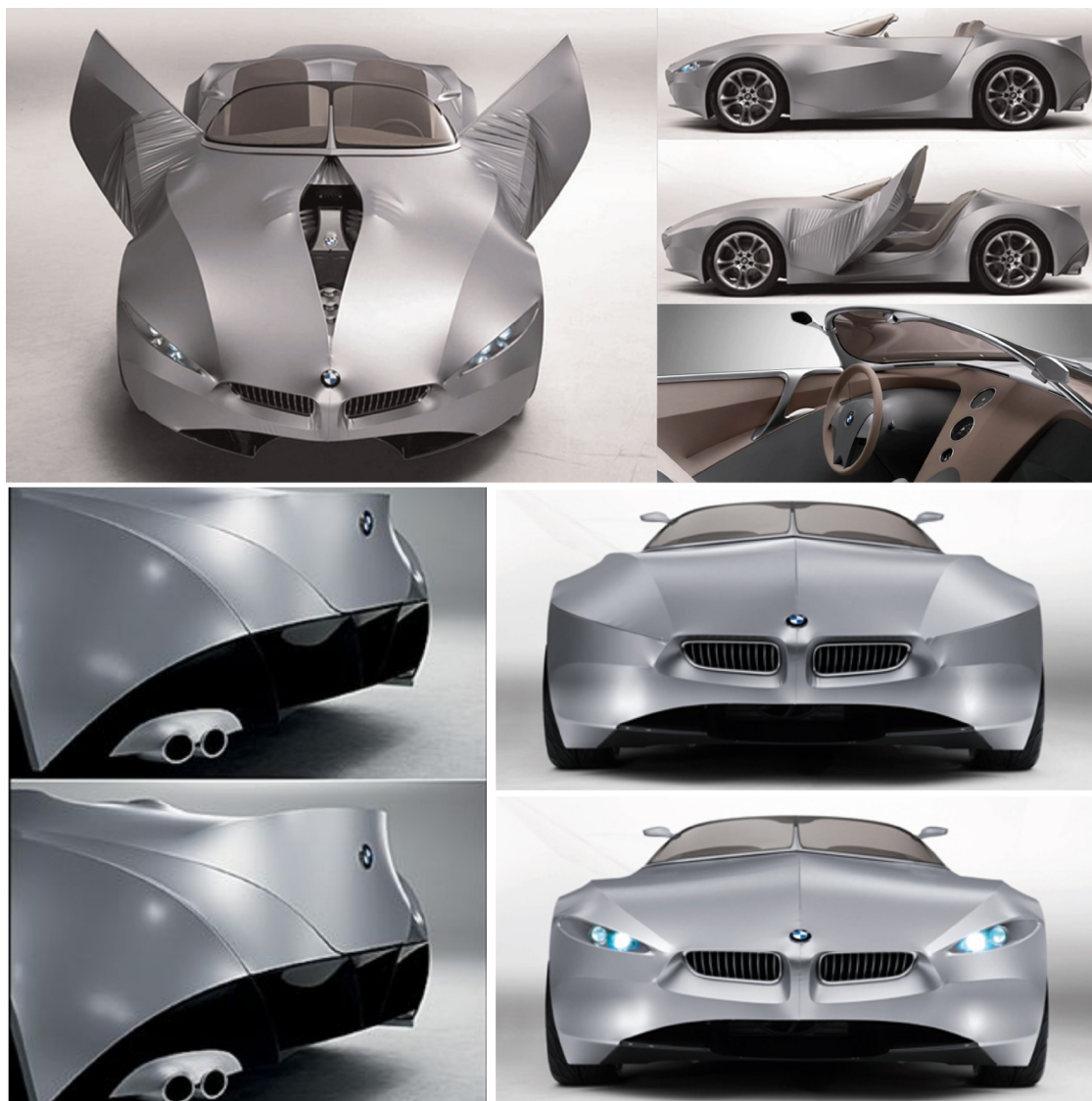


slika 2.16. a) Profil kičme; b) dva koncepta sistema za oslonac kičme koji vrše promenu oblika inicijalno uspravljenog oslonca u odgovarajući zakrivljeni oblik [5]

Strukture koje mogu da menjaju oblik imaju potencijalnu primenu i u automobilskoj industriji [22, 23]. Promenom oblika karoserije automobila tokom vožnje moguće je poboljšati aerodinamičke karakteristike automobila. Oblik karoserije automobila projektuje se tako da otpor vazduha prilikom kretanja automobila bude što je moguće manji. Automobil koji bi mogao da menja oblik svoje karoserije u zavisnosti od spoljašnjih uslova vožnje, može da upravlja svojim aerodinamičkim karakteristikama (da smanji otpor kretanja vazduha) i tako smanji potrošnju gorivu.

Na slici 2.17. prikazan je BMW-ov koncept automobila koji može da menja oblik svoje karoserije. Ovaj automobil poznatiji kao GINA (engl. *Geometry and functions In 'N' Adaptations*) može da menja oblik svoje haube, prednjih i zadnjih spojlera, i oblik zadnjeg dela (slika 2.17.). Karoserija automobila je napravljena u vidu žičane (ramovske) strukture koju prekrivaju paneli od fleksibilnog poliuretanskog materijala koji je otporan na vodi i providan na mestima gde se nalaze farovi. Četiri panela od ovog materijala prekrivaju četiri dela automobila: haubu, dve bočne strane automobila i prtljažnik. Delovi karoserije na kojima

je potrebno realizovati deformaciju (hauba, spojleri, vrata automobila, zadnji deo automobila) napravljeni su u vidu žičane strukture od fleksibilnih ugljeničnih štapova kojima se upravlja uz pomoć električnih i hidrauličnih aktuatora koji i vrše promenu oblika karoserije automobila.



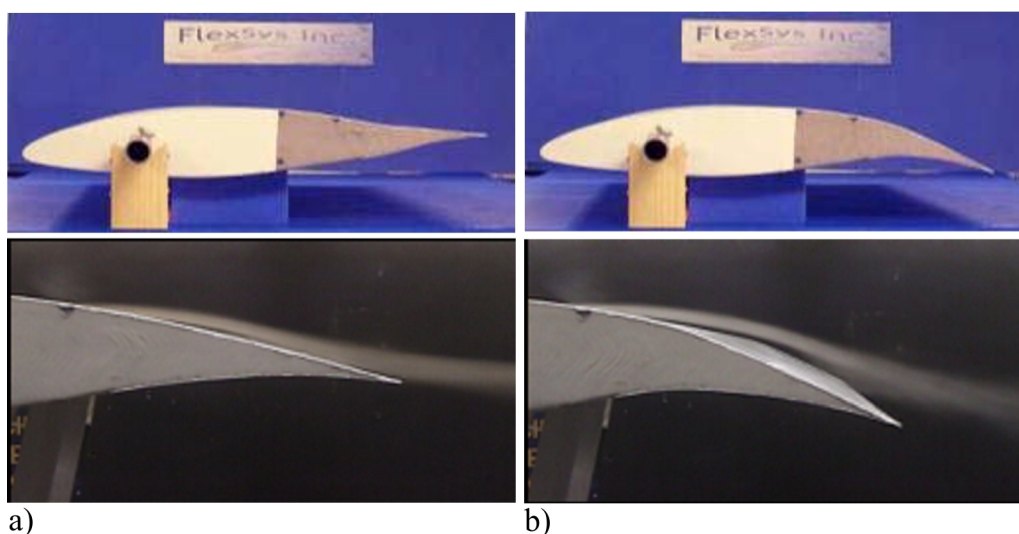
slika 2.17. BMW–ov koncept automobila GINA (engl. *Geometry and functions In 'N' Adaptations*) koji može da menja oblik svoje karoserije [24]

U oblasti aeronautike, termin "promena oblika" (engl. *shape morphing*) koristi se za definisanje letilica koje mogu da menjaju geometrijski oblik pojedinih delova svoje strukture kako bi poboljšale svoj rad ili se prilagodile promenljivim zahtevima misije [25]. Kao primer pomenimo i krilo koje može da menja svoj oblik (engl. *shape morphign wing*) kako bi se prilagodilo različitim režimima leta (različitim uslovima) i tako ostvarilo bolje aerodinamičke

performanse aviona (bolja manevarska sposobnost, smanjenje otpora vazduha, bolje podizanje aviona, postizanje velikih brzina, ušteda goriva). Kod klasičnih putničkih i borbenih aviona, promena oblika krila vrši se zakretanjem mehaničkih zakrilca (slika 2.18.). Mehanička zakrilca, međutim, često dovode do pojave diskontinuiteta u protoku vazduha koji stoji oko krila pa dolazi do povećavanja otpora vazduha. Danas postoje mnogobrojni predlozi rešenja avionskih krila koja bi mogla kontinualno da menjaju svoj oblik [25-53] obezbeđujući time kontinualno strujanje oko krila i smanjujući otpor vazduha (slika 2.19.). Neka od ovih rešenja biće navedena na narednim slikama.

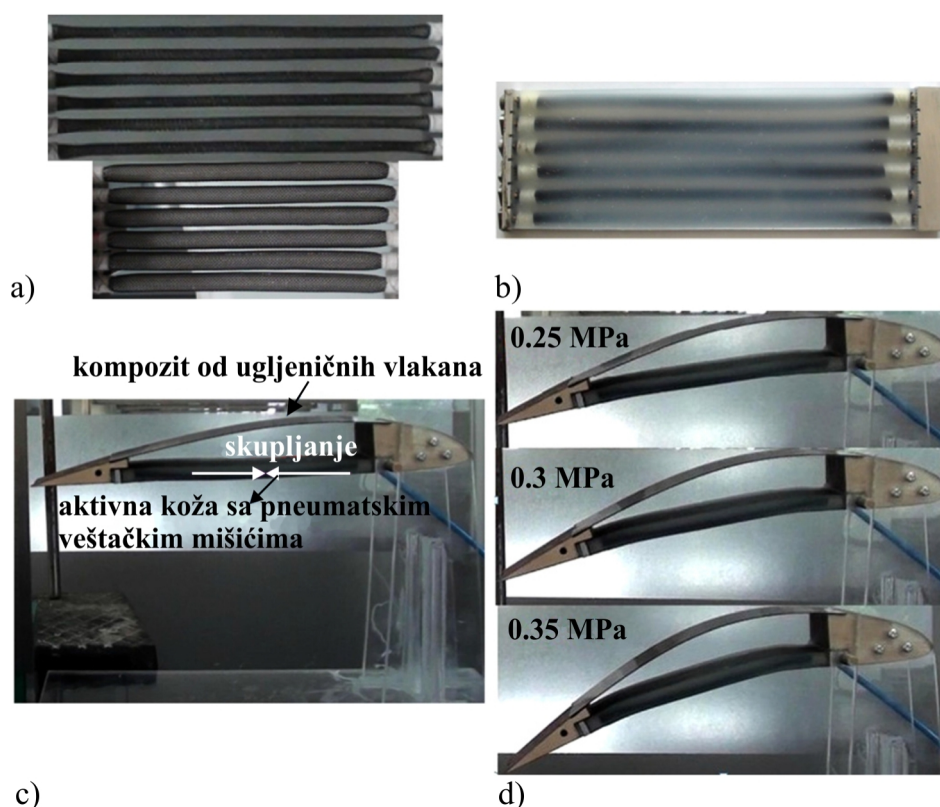


slika 2.18. Mehanička zakrilca kod putničkog aviona [54-57]



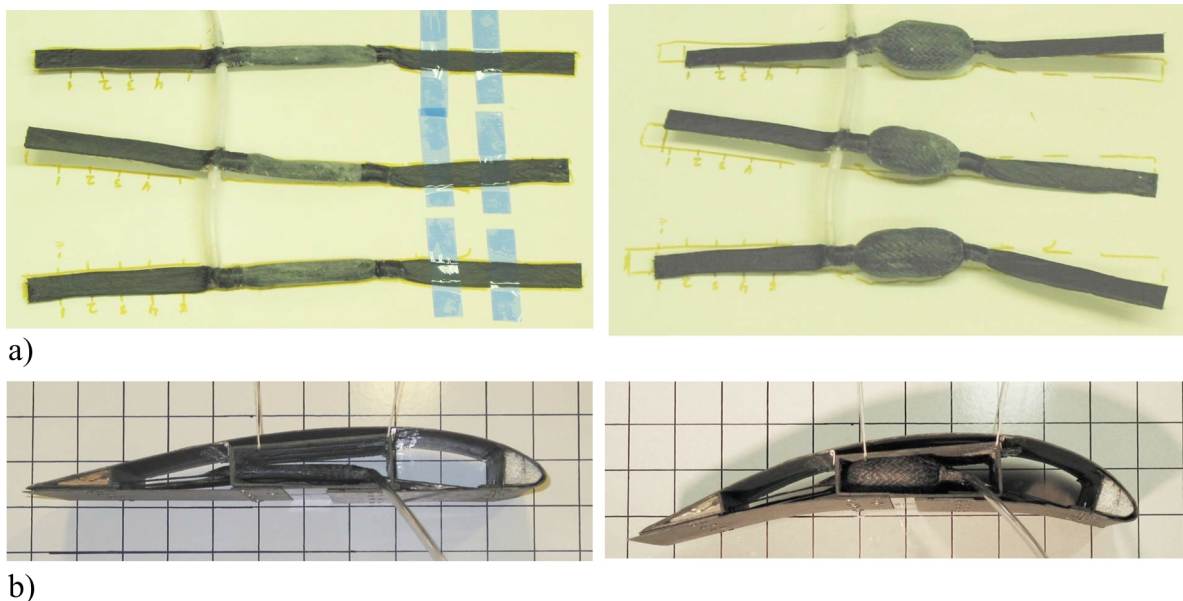
slika 2.19. Koncept krila aviona koje može da menja svoj oblik, u nedeformisanom (a) i deformisanom položaju (b) [26]

Na slici 2.20. prikazano je rešenje avionskog krila koje može da menja oblik svog profila korišćenjem aktuatora u obliku pneumatskih veštačkih mišića PMF (engl. *Pneumatic Muscle Fibers*) [27] (slika 2.20.a) koji funkcionišu na sličnom principu kao i ljudski mišići – kada se izlože pritisku (komprimovanom vazduhu) dolazi do skupljanja aktuatora (komprimovani vazduh dovodi do širenja/ekspanzije aktuatora u trasverzalnom pravcu, a samim tim i skupljanja aktuatora u aksijalnom pravcu). Šest ovakvih pneumatskih veštačkih mišića je integrisano u slikonsku gumu kako bi formirali kompaktnu strukturu u obliku aktivne elastične kože (engl. *active morphing skin*) [27] (slika 2.20.b). Ovakva, aktivna silikonska guma je postavljena sa donje strane avionskog krila i jednim svojim krajem je pričvršćena za prednji, nepokretni deo krila dok je drugim svojim krajem pričvršćena za zadnji deo krila koji je slobodan (slika 2.20.c). Gornja strana avionskog krila napravljena je od kompozitnog materijala izrađenog od ugljeničnih vlakana (slika 2.20.c). Dovođenjem komprimovanog vazduha dolazi do skupljanja pneumatskih mišića, a samim tim i skupljanja aktivnog silikona koji zatim savija krilo i vrši promenu njegovog oblika (slika 2.20.d).



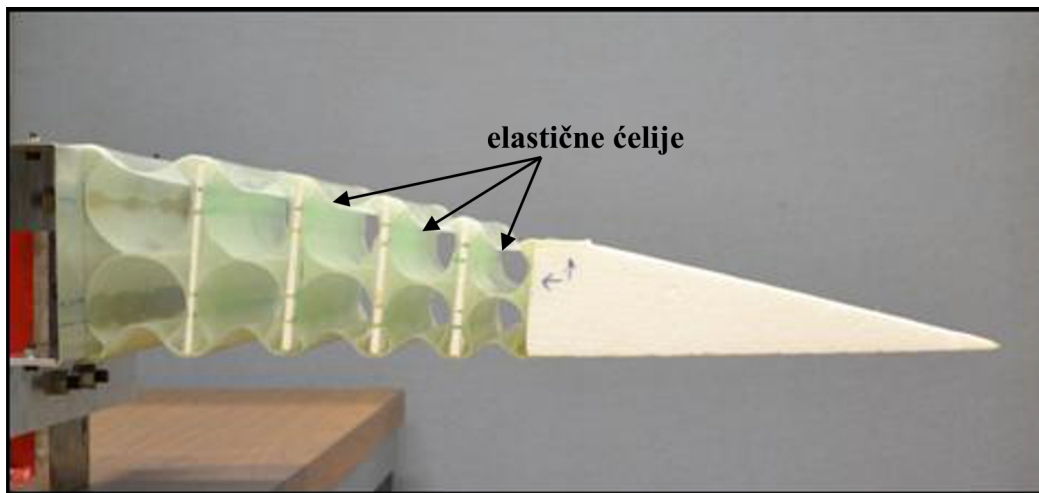
slika 2.20. Koncept avionskog krila koje može da menja oblik: a) pneumatski veštački mišići u neaktivnom stanju (slika gore) i aktivnom stanju (slika dole); b) pneumatski mišići integrisani u silikon; c) avionsko krilo u nedeformisanom položaju; d) promena oblika avionskog krila pri različitim radnim pritiscima [27]

Sličan koncept krila koje može da menja svoj oblik prikazan je na slici 2.21. Kao i kod prethodnog rešenja, za promenu oblika krila koriste se pneumatski veštački mišići (slika 2.21.a) koji vrše promenu oblika krila. Aktuatori se nalaze na sredini krila i svojim krajevima su vezani za prednji i zadnji deo profila krila. Kada se dovede komprimovani vazduh dolazi do skupljanja aktuatora u aksijalnom pravcu usled čega se i prednji i zadnji deo krila savijaju odnosno dolazi do promene oblika krila (slika 2.21.b).

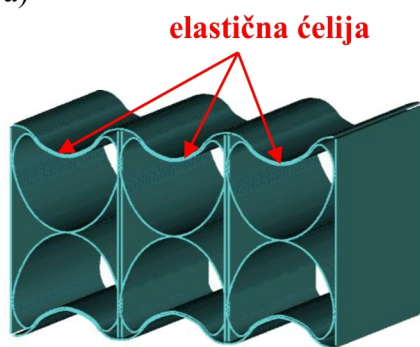


slika 2.21. a) Pneumatski veštački mišići u neaktivnom (slika levo) i aktivnom stanju (slika desno); b) krilo koje menja oblik, u nedeformisanom (slika levo) i deformisanom položaju (slika desno) [28]

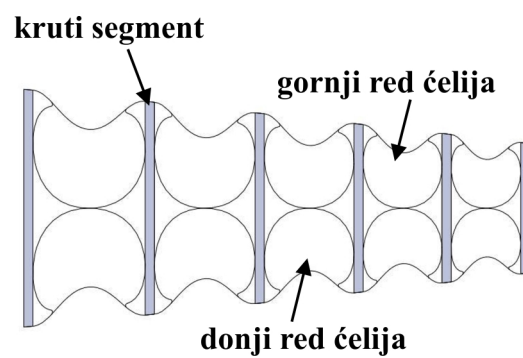
Na slici 2.22. i slici 2.23. prikazan je koncept zadnjeg dela krila (repa) koji je napravljen u vidu elastične strukture koja može da menja svoj oblik dejstvom komprimovanog vazduha. Struktura je sastavljena od niza pojedinačnih elastičnih ćelija (napravljenih od plastike ojačane staklenim vlaknima) (slika 2.22.a) koje se deformišu (šire se) kada se izlože komprimovanom vazduhu. Elastične ćelije su postavljene u dva reda (gornji i donji) i međusobno su razdvojene odgovarajućim krutim segmentima (slika 2.22.b). Kada se dovede komprimovani vazduh u gornji red ćelija, dolazi do savijanja repa krila na dole (slika 2.23.a), a kada se dovede komprimovani vazduh u donji red ćelija dolazi do savijanja repa krila na gore (slika 2.23.b).



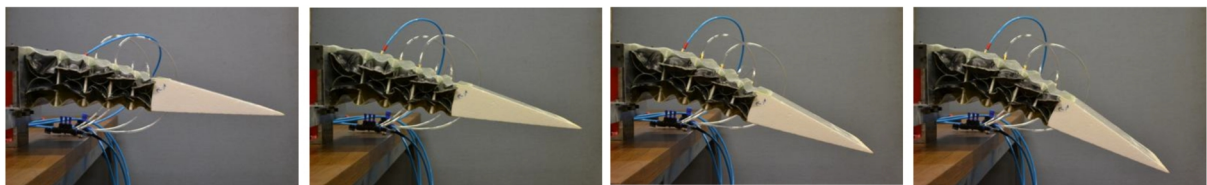
a)



b)



slika 2.22. Zadnji deo (rep) krila (a) sastavljen od niza elastičnih ćelija (b) [29]



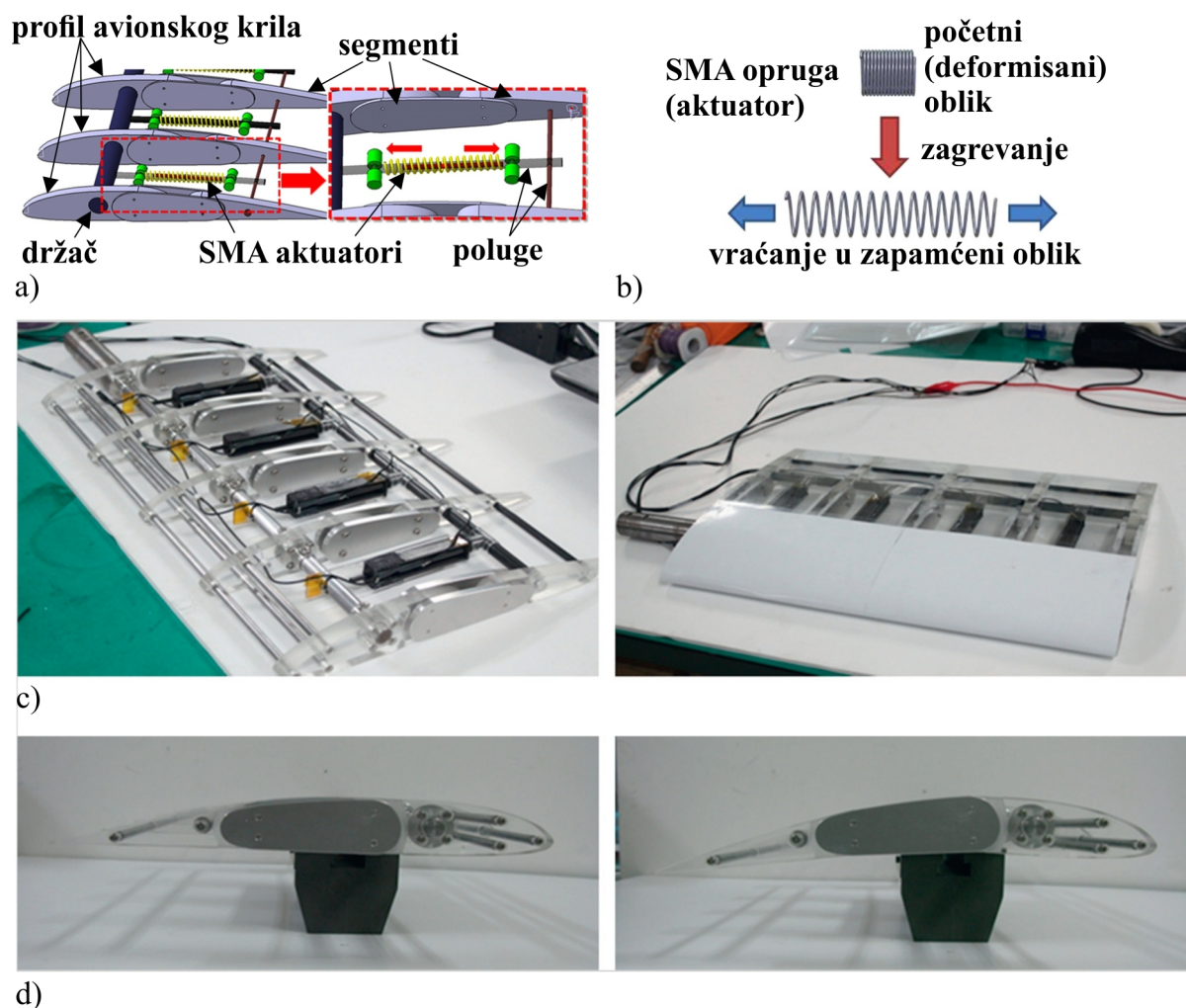
a)



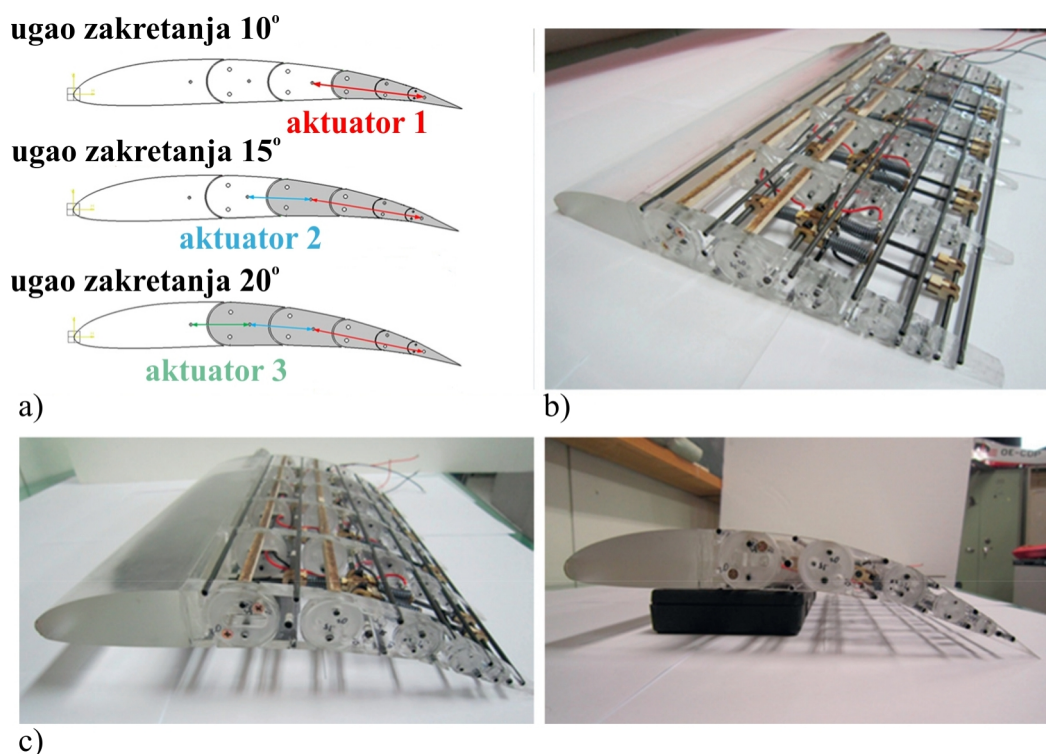
b)

slika 2.23. Promena oblika zadnjeg dela (repa) krila kada se dovede koprimovani vazduh u gornji red ćelija (a) i donji red ćelija (b) [29]

Drugačiji koncept avionskog krila koje može da menja svoj oblik prikazan je na slici 2.24. i slici 2.25. Strukturu krila čini više pojedinačnih krila koja su postavljena paralelno i međusobno povezana odgovarajućim držačima i polugama (slika 2.24.a, slika 2.24.c i slika 2.25.b). Svaki pojedinačni profil krila je sastavljen iz više segmenata (međusobno povezanih odgovarajućim zglobovima) koji mogu da se zakreću jedan u odnosu na drugi (slika 2.24.a i slika 2.25.a). Između svaka dva susedna profila krila postavljeni su SMA aktuatori u vidu opruga koje su memorisane na istežanje (slika 2.24.b) i služe da zakreću (pomeraju) pojedinačne segmente. Kada se dovede električni napon dolazi do zagrevanja SMA opruga koje se istežu (teže da se vrate u svoj zapamćeni oblik) i preko odgovarajućih poluga vrše pomeranje pojedinačnih segmenata čime se i ostvaruje kontinualna promena oblika celog krila (slika 2.24.d i slika 2.25.c).



slika 2.24. Krilo aviona sastavljeno iz tri segmenta koje može da menja svoj oblik: a) model krila; b) SMA aktuatori u vidu opruga; c) fizički prototip krila; d) promena oblika krila: nedeformisan položaj na slici levo i deformisan položaj na slici desno [30]

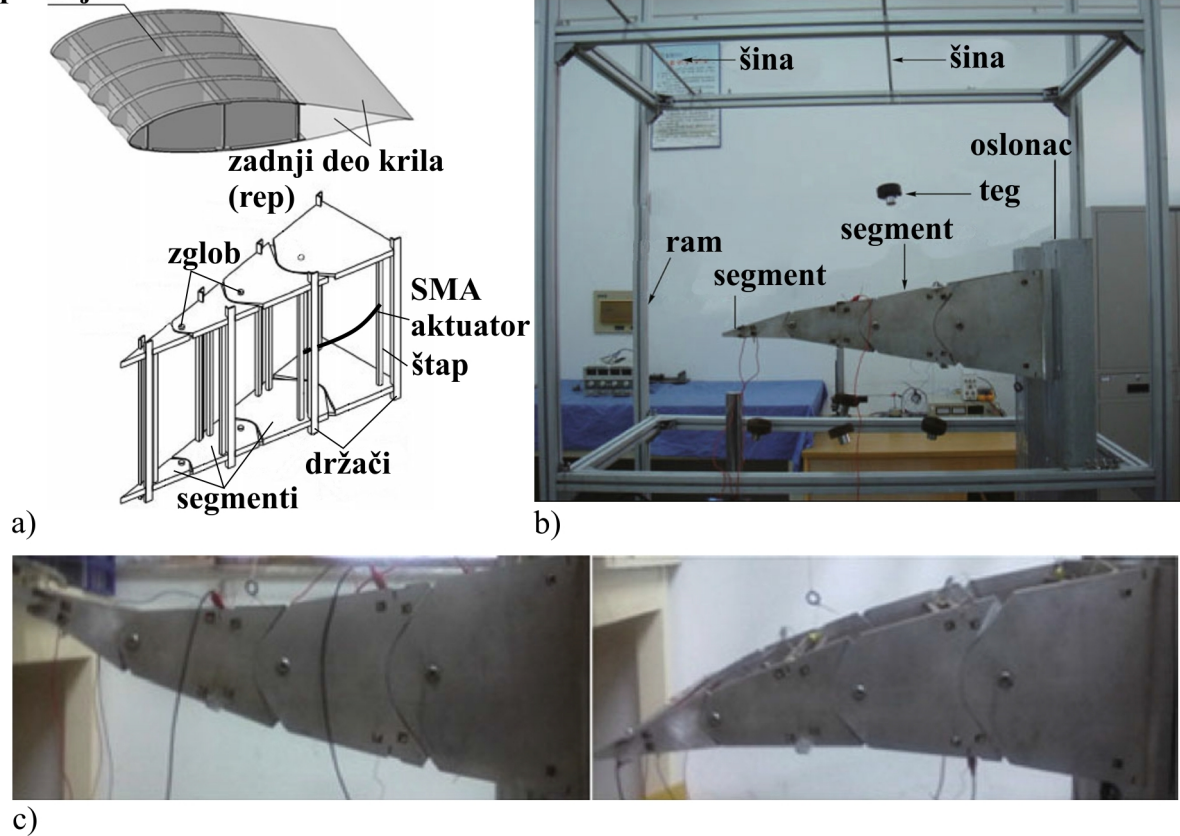


slika 2.25. a) Princip rada krila aviona koje može da menja oblik, a sastavljeno je iz šest segmenata; b) fizički prototip; c) promena oblika krila [30]

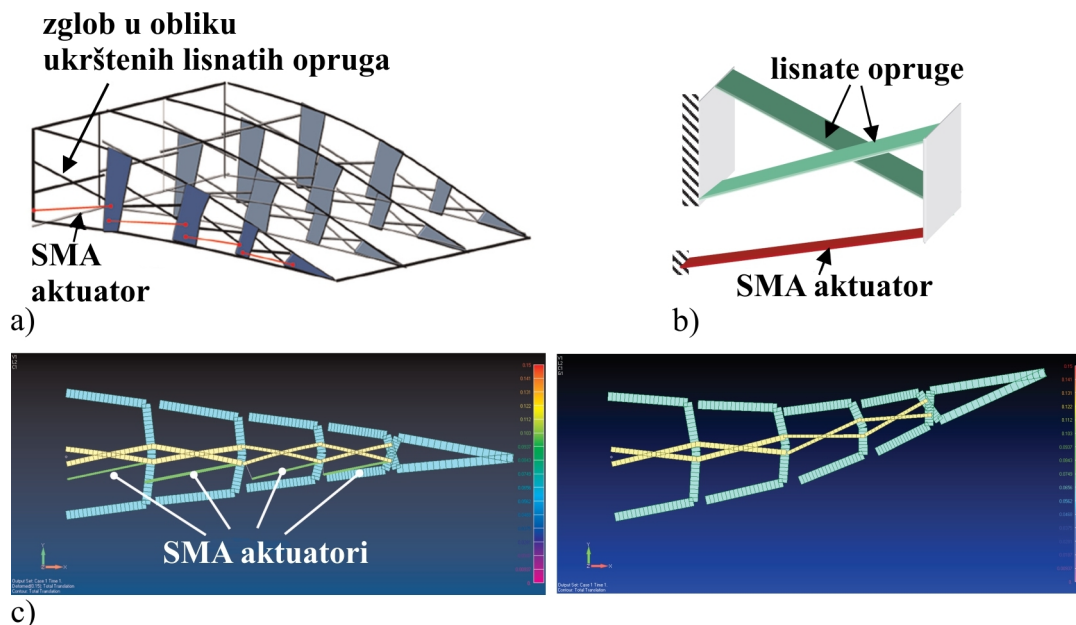
Sličan koncept krila koje može da menja svoj oblik prikazan je na slici 2.26. Zadnji deo krila (rep), sastoji se iz niza segmenata (međusobno povezanih zglobovima) koji mogu da se relativno zakreću jedan u odnosu na drugi (slika 2.26.a i slika 2.26.b). Kao i kod prethodnog rešenja, aktivacijom SMA aktuatora vrši se zakretanje pojedinačnih segmenata, a samim tim ostvaruje se i promena oblika zadnjeg dela krila (slika 2.26.c).

Interesantan koncept avionskog krila koje može da menja svoj oblik, prikazan je i na slici 2.27. Krilo formiraju 4 gipka mehanizma sa zglobovima u obliku ukrštenih listanih opruga povezanih krutim segmentima (slika 2.27.a i slika 2.27.b). Zglobovi su vezani redno i formiraju četiri segmenta krila (slika 2.27.a). Prvi zglob je jednim svojim krajem fiksiran dok je na drugom kraju vezan sa narednim zglobom na koji se nadovezuju i ostala dva zgloba (slika 2.27.a). Na svakom od pojedinačnih segmenata (zglobova u vidu ukrštenih lisnatih opruga) postavljeni su SMA aktuatori. Aktuatori su memorisani tako da kada se vraćaju u zapamćeni oblik dolazi do njihovog skupljanja, usled čega dolazi do elastične deformacije lisnatih opruga koje realizuju relativno kretanje jednog segmenta u odnosu na drugi, čime se i vrši kontinualna promena oblika krila (slika 2.27.c).

prednji deo krila

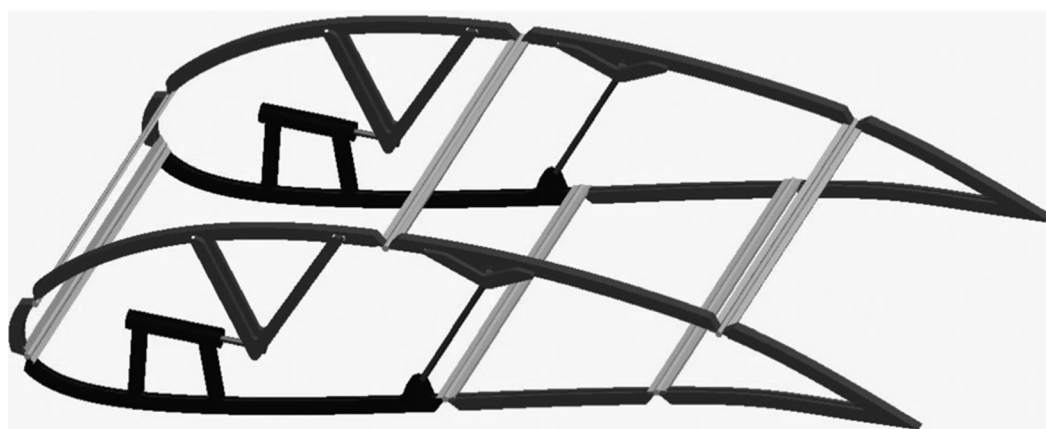
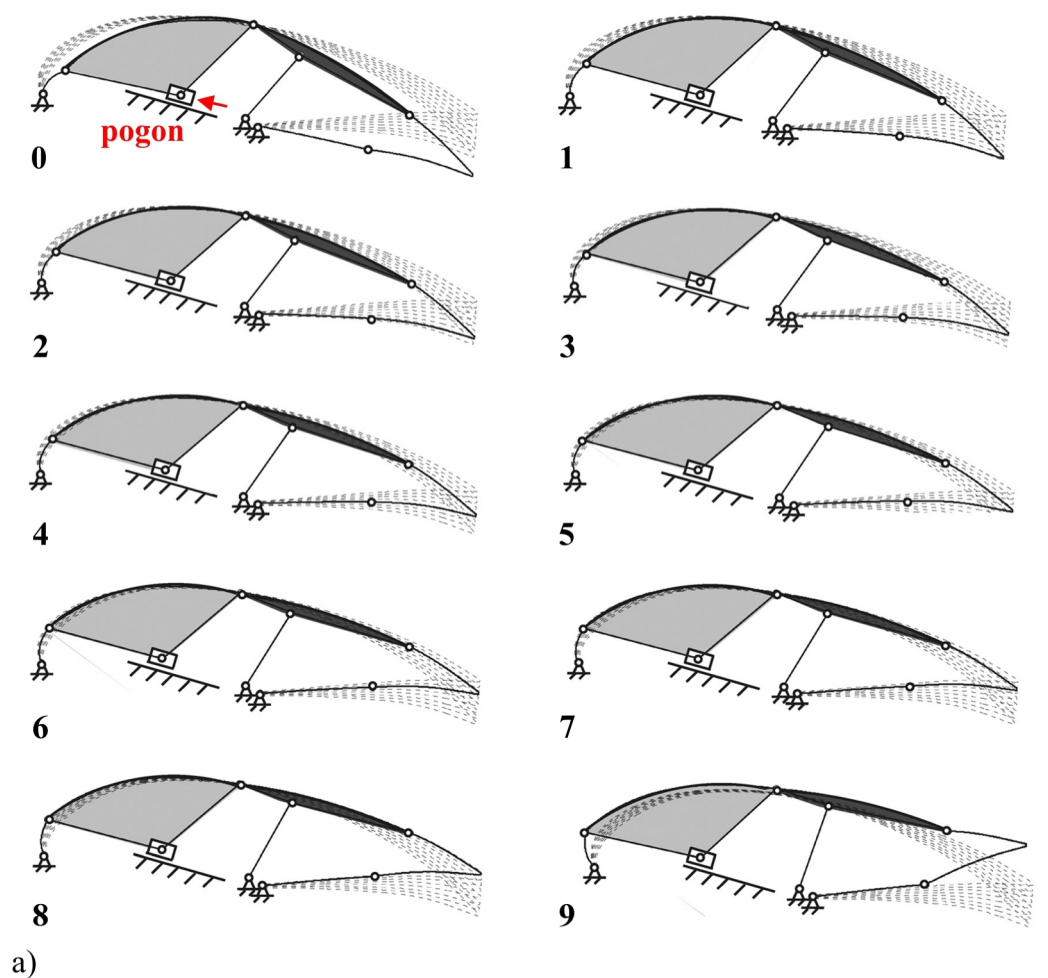


slika 2.26. Zadnji deo (rep) avionskog krila koji može da menja oblik: a) 3D model; b) fizički prototip (u nedeformisanom položaju); c) promena oblika [31]



slika 2.27. a) Koncept krila koje može da menja svoj oblik deformacijom elastičnih zglobova u vidu ukrštenih lisnatih opruga; b) elastični zglob u vidu ukrštenih lisnatih opruga; c) promena oblika krila aktivacijom SMA aktuatora [32]

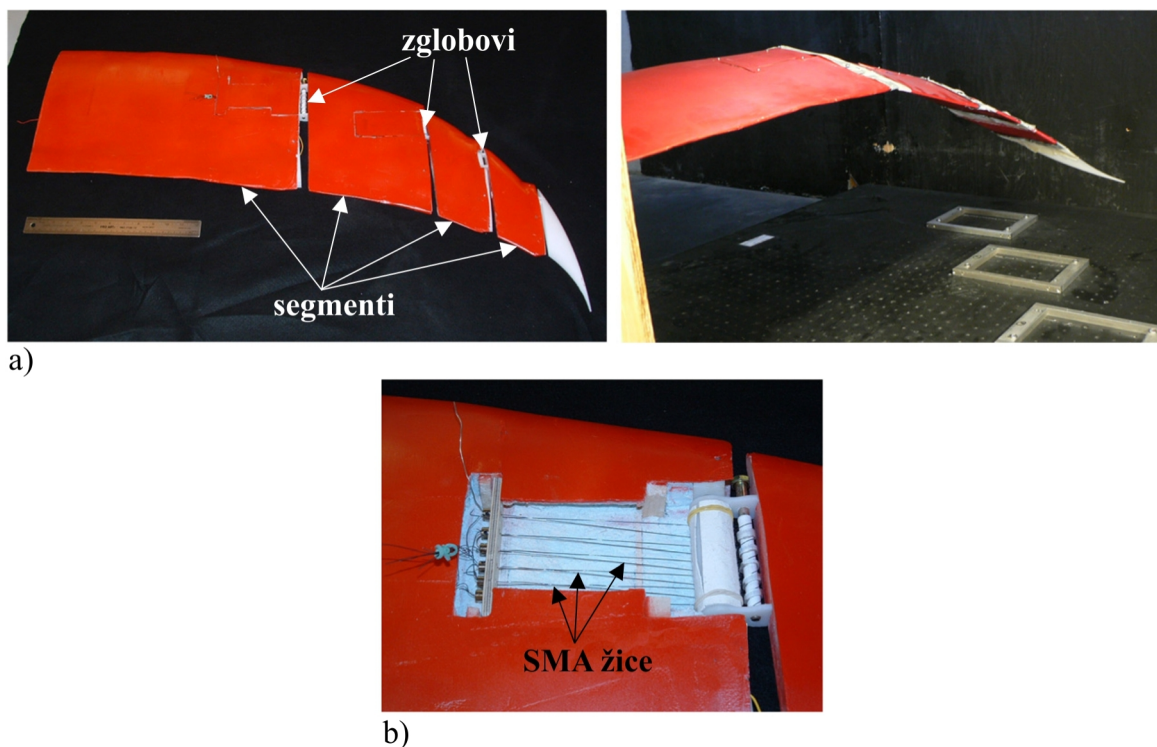
Na slici 2.28. prikazan je koncept krila koje može da menja oblik, izvedenog kao krutočlani mehanizam sa jednim stepenom slobode kretanja. Pomeranjem pogonskog klipa mehanizma pomera se i prednji i zadnji deo krila čime se vrši i promena oblika krila (slika 2.28.a).



b)

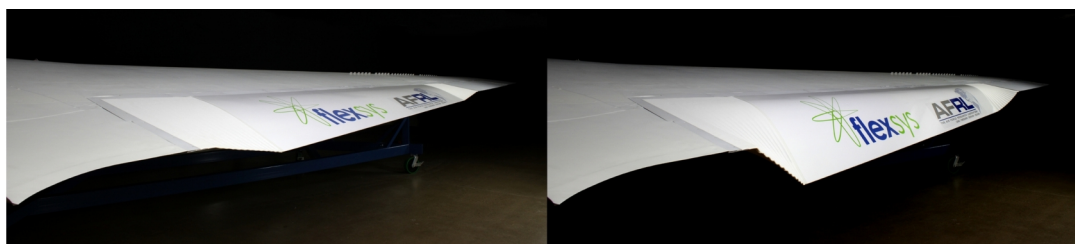
slika 2.28. Krilo u vidu krutočlanog mehanizma, koje može da menja oblik: a) različiti oblici koje krilo može da ostvari; b) 3D model krila [33]

Drugačija promena oblika krila prikazana je na slici 2.29. Krilo se sastoji iz niza segmenata koji su međusobno povezani obrtnim zglobovima i može da menja oblik u ravni koja je upravna na ravan profila krila (slika 2.29.a). Na svakom zglobu postavljen je niz SMA aktuatora u obliku žice (slika 2.29.b) koji su memorisani tako da kada se zagreju dolazi do njihovog skraćivanja. Skraćivanjem SMA žice realizuje se pomeranje odgovarajućeg segmenta i na taj način se ostvaruje promena oblika krila.



slika 2.29. Koncept krila koje može da menja oblik u ravni upravnoj na ravan profila krila (a) dejstvom SMA aktuatora u obliku žice (b) [34]

Prethodno opisana rešenja avionskih krila koja mogu da menjaju svoj oblik predstavljaju rešenja koja nisu do sada implementirani na realnoj letelici. Na slici 2.30. prikazano je krilo letelice *Gulfstream III business jet* koje može da menja svoj oblik, a koje je napravila firma *FlexSys* [35]. Promenom oblika krila tokom leta aviona ostvarena je ušteda goriva od 5% i smanjenje buke od 40% u odnosu na letelicu kod koje takva promena oblika krila nije moguća.



a)



b)

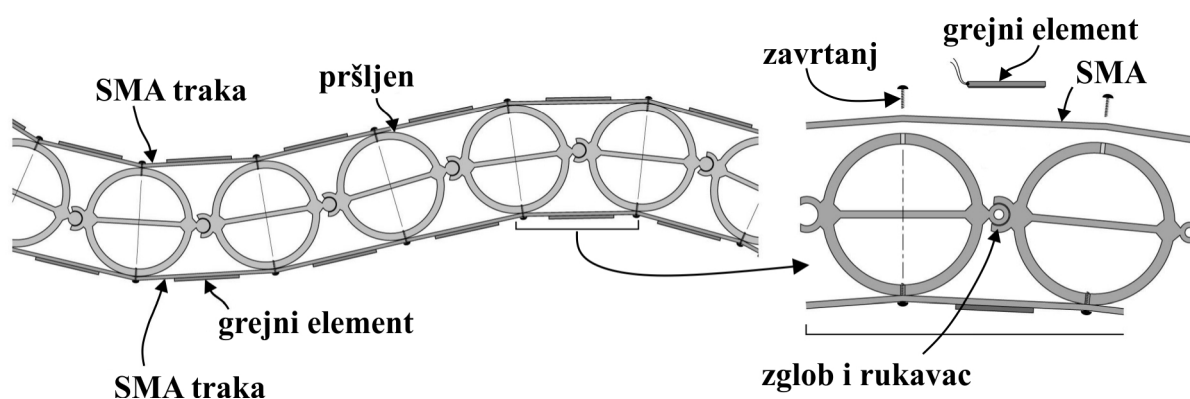
slika 2.30. Avionsko krilo koje može da menja svoj oblik (a) implementirano na letelici *Gulfstream III business jet* (b) [35]

Kao što se može videti iz prethodno opisanih rešenja, postoji velika potreba za strukturama koje mogu da menjaju svoj oblik. Neka od ograničenja ovih rešenja su da ne postoji jedinstvena metodologija za njihovu sintezu, i da ih nije moguće skalirati. Postojeća rešenja često mogu da ostvare samo jedan unapred zadat oblik, razvijena su samo za jednu konkretnu aplikaciju i stoga ne mogu imati širu primenu. Upravo zbog ovoga, cilj ove disertacije je poboljšanje postojećih rešenja struktura koje mogu da menjaju oblik, a idealno bi bilo razviti takvu strukturu koja bi imala više primena odnosno koja bi mogla da se primeni za više prethodno navedenih aplikacija.

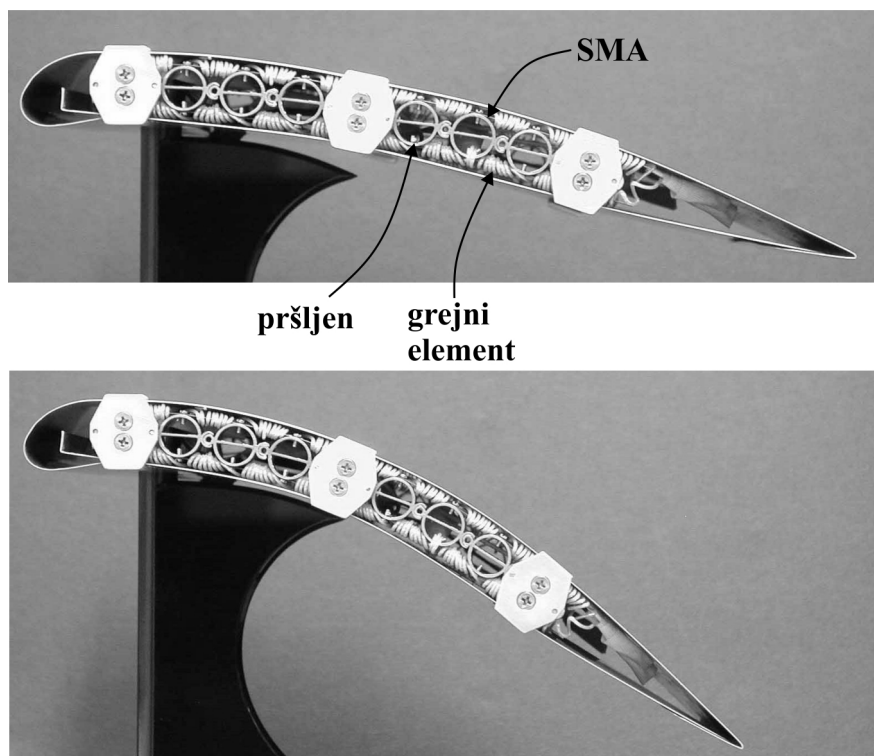
Projektovanje strukture koja može da menja oblik predstavlja veoma izazovan zadatak. Na osnovu prethodno opisanih rešenja ovakvih struktura može se zaključiti da njihovo projektovanje uključuje sintezu pogona odnosno aktuatora [58], mehanizma koji prenosi dejstvo aktuatora na radnu površinu [36-38, 59-65] i fleksibilne površine [66-72] (slika 1.1.). Pri ovome idealno bi bilo da mehanizam, aktuator i fleksibilna površina predstavljaju neodvojivi sistem odnosno jednu celinu.

Mnogi istraživači su razvili različite vrste mehanizama koji prenose dejstvo aktuatora na radnu površinu i tako omogućavaju strukturi da promeni svoj oblik (slika 2.1.- slika 2.30.).

Međutim, ovi mehanizmi su razvijeni samo za jednu konkretnu aplikaciju i ne mogu imati širu primenu. Neki od mehanizama sa aktuatorom predstavljaju i samu strukturu (mehanizam, aktuator i struktura su jedna neodvojiva celina) [36-38, 73-82]. Jedan primer takvog mehanizma kojim se ostvaruje promena oblika strukture prikazan je na slici 2.31. Struktura mehanizma sastoji se od niza cevastih elemenata i po svojoj funkciji slična je kičmi koja se može sresti kod pojedinih bioloških sistema. Cevasti elementi (pršljenovi) povezani su međusobno cilindričnim zglobovima (slika 2.31.) koji omogućavaju elementima da rotiraju relativno jedan u odnosu na drugi. Sa gornje i donje strane "pršljenova" nalaze se SMA aktuatori u vidu traka koje su zavrtnejem pričvršćene za svaki od "pršljenova". Zagrevanjem SMA traka na donjoj ili gornjoj površini strukture, što se postiže grejnim elementima koji spiralno okružuju SMA trake, dolazi do njihovog skupljanja što dovodi i do zakretanja pojedinih pršljenova i promene oblika cele strukture (slika 2.31. i slika 2.32.). Ovakva struktura odnosno mehanizam prvenstveno je razvijen za primenu kod krila koje bi primenom ovakvog mehanizma moglo da menja svoj oblik (slika 2.32.). Naizmeničnom aktivacijom SMA traka na gornjoj i donjoj površini strukture vrši se i promena oblika krila aviona.

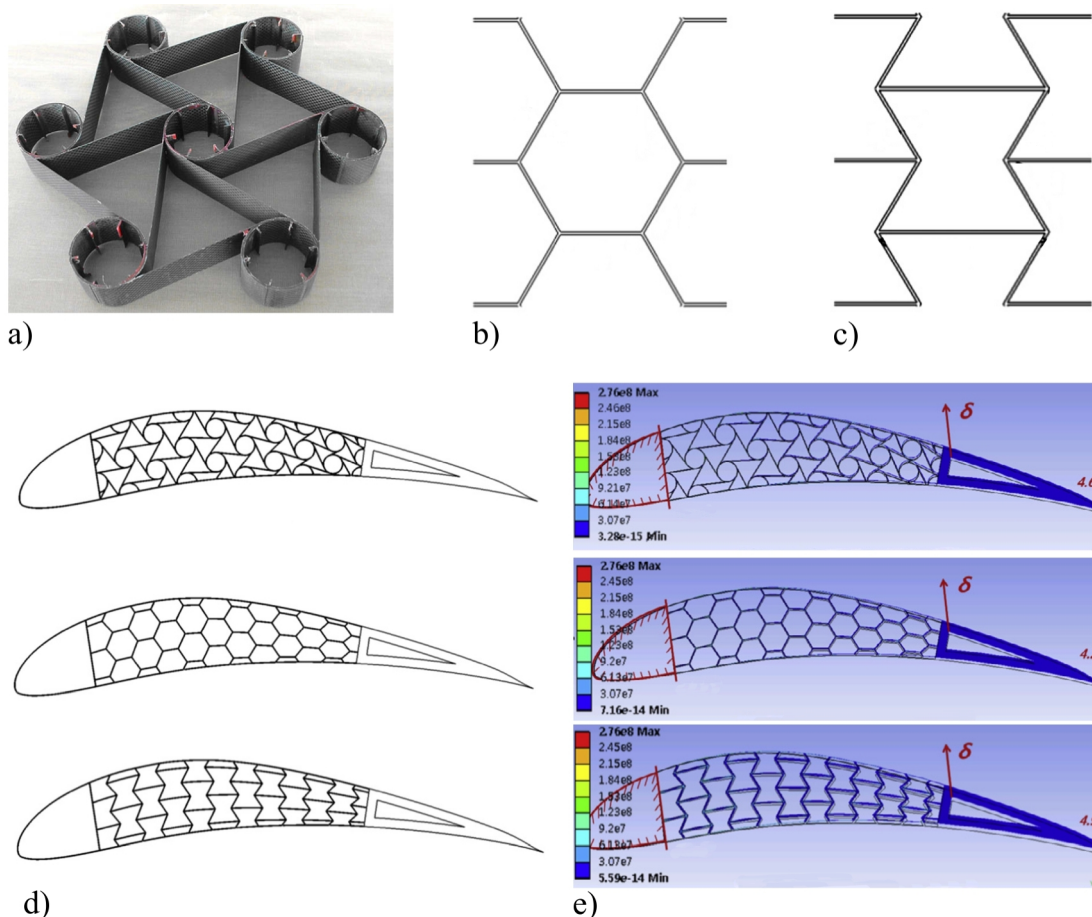


slika 2.31. Biološki inspirisan mehanizam koji omogućava promenu oblika strukture, sastavljen od niza cevastih elemenata (pršljenova) i SMA traka koje vrše zakretanje "pršljenova" [36]



slika 2.32. Koncept avionskog krila koje može da menja oblik uz pomoć biološki inspirisanog mehanizma sa slike 2.31. prikazanog u položaju kada su aktivne SMA trake na gornjoj površini (slika gore) i kada su aktivne SMA trake na donjoj površini strukture (slika dole) [36]

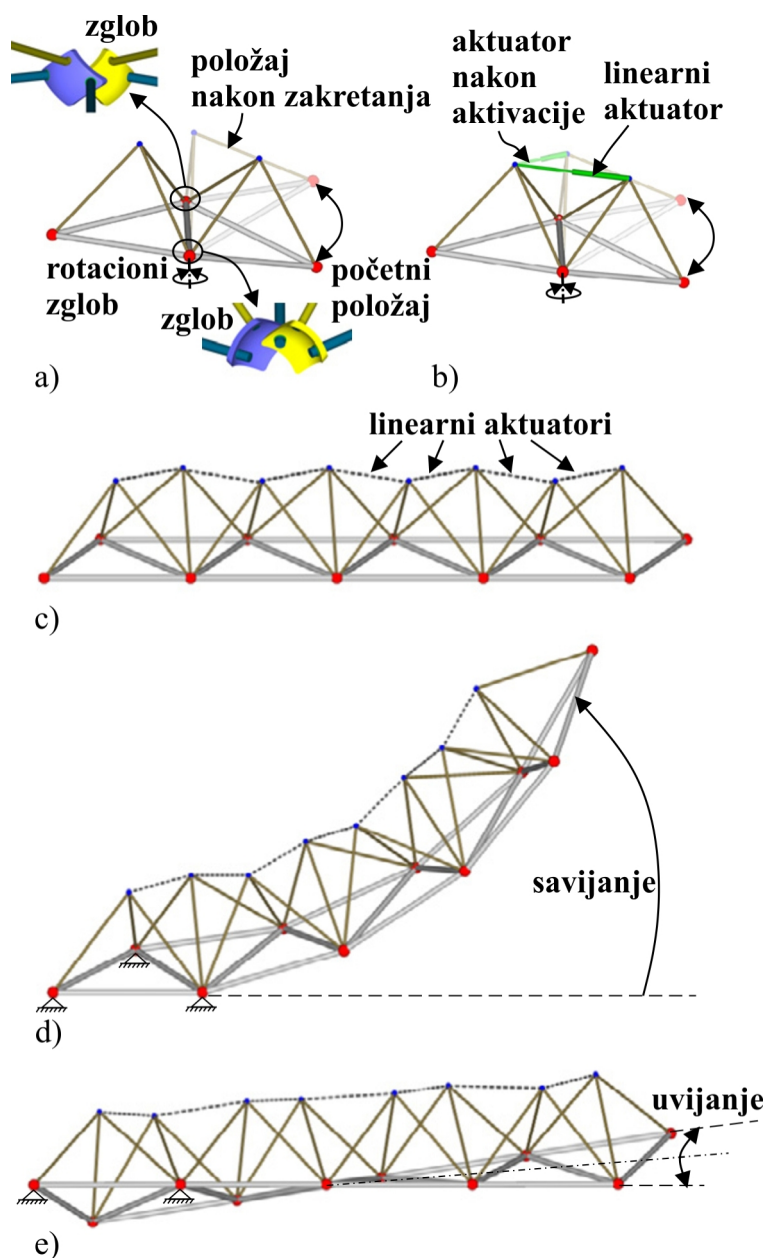
Na slici 2.33. prikazan je još jedan mehanizam koji omogućava strukturi da menja svoj oblik. Mehanizam ujedno predstavlja i mehanički deo strukture i sastavljen je od niza pojedinačnih elastičnih ćelija oblika hiralnih molekula (slika 2.33.a), heksagonalnog oblika (slika 2.33.b) i inverznog heksagonalnog oblika (slika 2.33.c). Ove ćelije poseduju dovoljnu krutost, a ujedno su i dovoljno elastične pa se ponašaju i kao gipki mehanizam. Zbog ovakvih karakteristika cela struktura poseduje dovoljno veliku krutost, a ujedno može i da menja svoj oblik. Elementi oblika hiralnih molekula sastoje se od kružnih elemenata koji su spojeni lisnatim oprugama, kod elemenata sa ćelijama heksagonalnog oblika lisnate opruge su spojene tako da formiraju šestougao, a kod elemenata sa ćelijama inverznog heksagonalnog oblika lisnate opruge formiraju oblik dva spojena trapezoida. Dejstvom spoljašnje sile na pojedinačne elastične ćelije dolazi do njihove elastične deformacije, a samim tim i promene oblika cele strukture (slika 2.33.e). Ovakve strukture su prvenstveno razvijene za primene kod avionskog krila koje treba da menja svoj oblik (slika 2.33.d i slika 2.33.e). Mana ovih struktura je ta što zahtevaju da se na svakoj pojedinačnoj ćeliji postavi odgovarajući aktuator kako bi se ostvarila kontrolisana (upravljiva) promena oblika.



slika 2.33. Mehanizam koji se sastoji od elastičnih ćelija različitog oblika koje omogućavaju strukturi da menja oblik: a) elastične ćelije oblika hiralnih molekula [37]; b) elastične ćelije heksagonalnog oblika [38]; c) elastične ćelije inverznog heksagonalnog oblika [38]; d) primena kod krila koje treba da menja oblik [38]; e) promena oblika krila dejstvom spoljašnje sile [38]

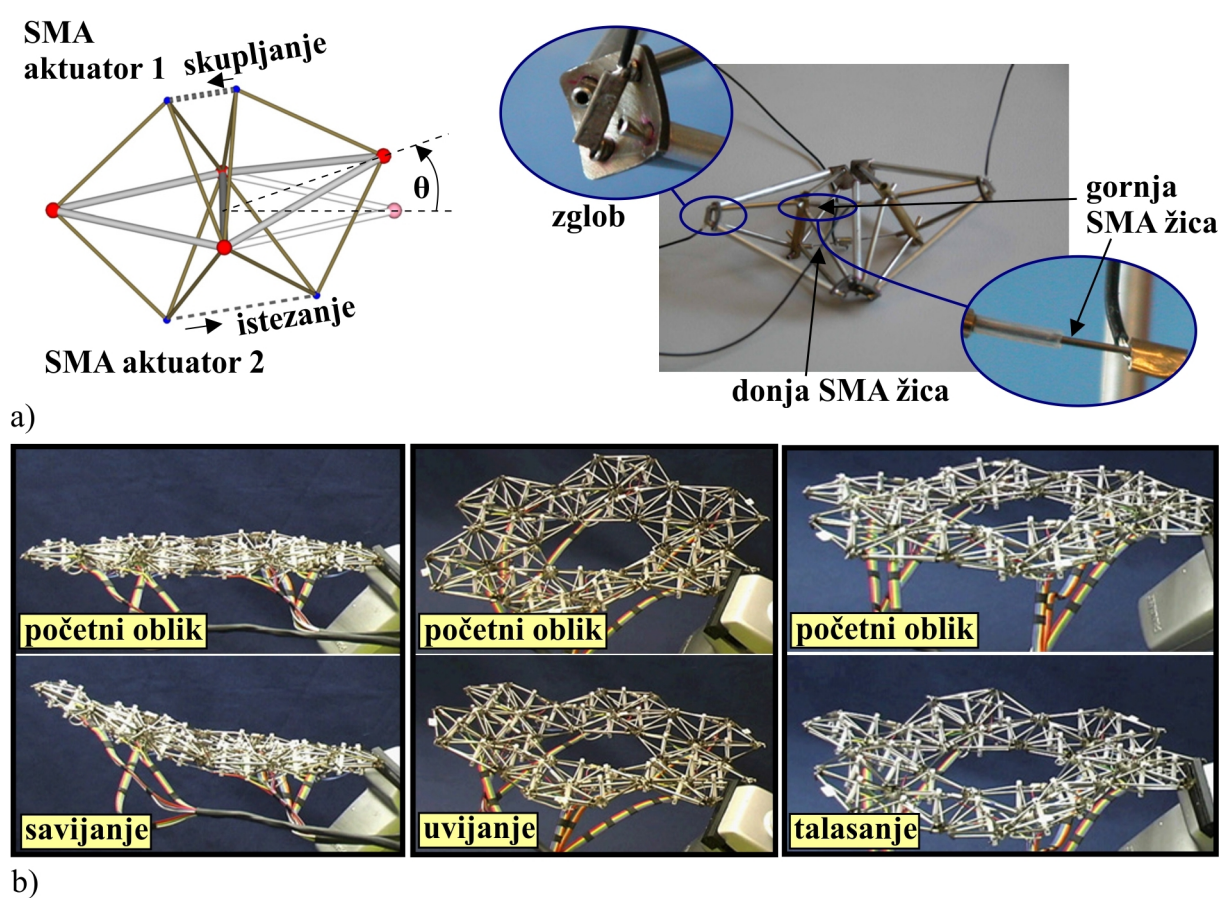
Posebnu grupu mehanizama koji omogućavaju strukturi da menja oblik predstavljaju strukture u vidu rešetkastih nosača (engl. *shape morphing hinged truss structures*) (slika 2.34.). Klasični rešetkasti nosači se koriste za primene koje zahtevaju strukture koje imaju malu masu, a mogu da izdrže velika opterećenja (građevinske dizalice - kranovi, dalekovodi i mostovi). Čvorovi klasičnih rešetkastih nosača se projektuju tako da ne dozvoljavaju relativno kretanje štapova ovakvih nosača, odnosno tako da krutost celog nosača bude što je moguće veća kako bi izdržao spoljašnja opterećenja. Strukture u vidu rešetkastih nosača koje omogućavaju promenu oblika imaju čvorove (zglobove) koji dozvoljavaju nezavisno kretanje pojedinih štapova strukture. Na slici 2.34.a i slici 2.34.b prikazana su dva tetraedarna rešetkasta segmenta međusobno povezana zglobovima koji dozvoljavaju njihovo relativno pomeranje. Niz ovakvih tetraedarnih rešetkastih segmenata međusobno povezanih

zglobovima čine strukturu koja može da menja oblik (slika 2.34.c). Postavljanjem linearnih aktuatora između pojedinih tetraedarnih rešetkastih segmenata (slika 2.34.b) i njihovom aktivacijom vrši se relativno pomeranje tetraedarnih segmenata, a samim tim i promena oblika cele strukture (slika 2.34.d. i slika 2.34.e.).



slika 2.34. a) Tetraedarni rešetkasti segmenti međusobno spojeni zglobovima koji dozvoljavaju njihovo relativno pomeranje; b) pomeranje tetraedarnih segmenata aktivacijom linearnih aktuatora; c) niz redno vezanih tetraedarnih rešetkastih segmenata koji formiraju strukturu koja može da menja svoj oblik dejstvom linearnih aktuatora; d) savijanje strukture usled aktivacije svih aktuatora; e) uvijanje strukture usled skupljanja i istežanja pojedinih aktuatora [59]

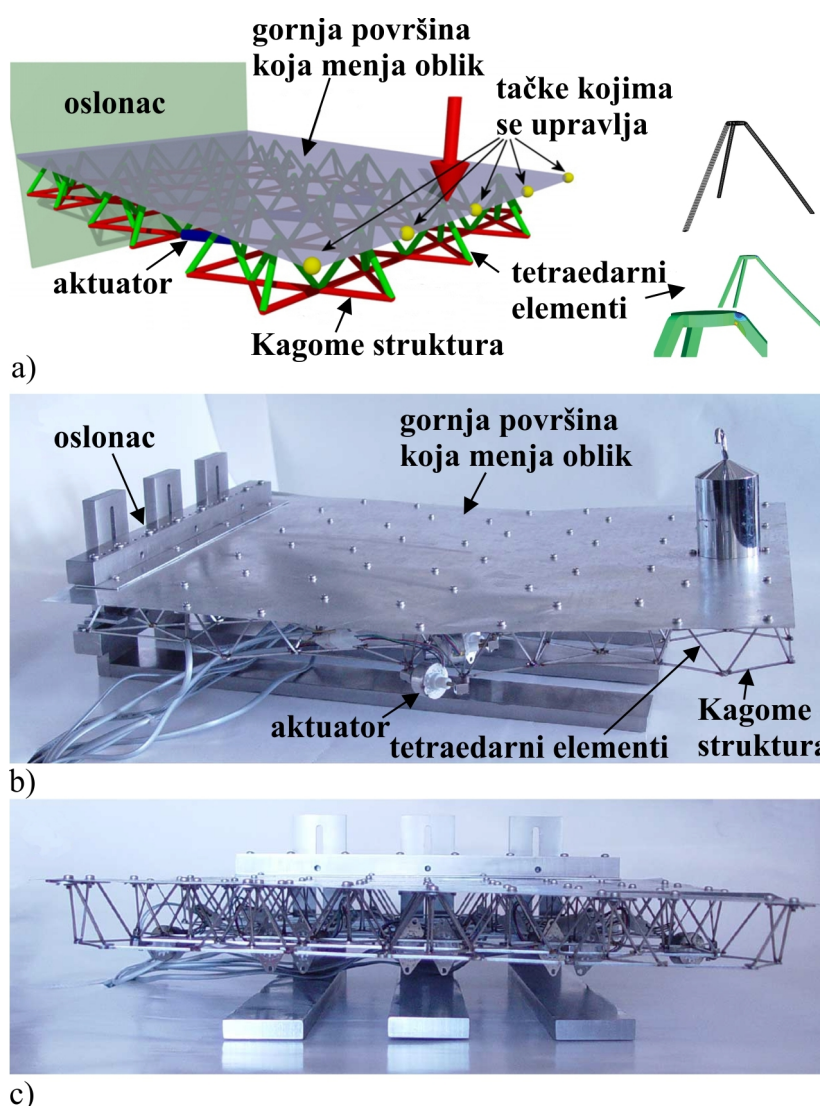
Kao aktuatori mogu se koristiti SMA žice. Kako bi se obezbedila ponovljivost promene oblika strukture, rešetkasti segmenti na slici 2.35.a su napravljeni u obliku dvostruke piramide (engl. *hinged bi-pyramid*). Zagrevanjem SMA aktuatora dolazi do njegovog skupljanja i zakretanja piramidalnog segmenta u jednu stranu dok se aktivacijom drugog SMA aktuatora vrši zakretanje piramidalnog segmenta u suprotnu stranu, odnosno vrši se njegovo vraćanje u početni položaj (slika 2.35.a). Više ovakvih dvostrukih piramidalnih rešetkastih segmenata povezanih u planarnu formaciju čine strukturu koja može da menja svoj oblik (slika 2.35.b). Aktivacijom pojedinih SMA aktuatora vrši se promena oblika cele strukture. Fizički prototip ovakve strukture prikazan je na slici 2.35.b.



slika 2.35. a) Rešetkasti segmenti u obliku dvostruke piramide sa SMA aktuatorima; b) više rešetkastih segmenata povezanih u planarnu strukturu koja može da menja svoj oblik dejstvom SMA aktuatora [59]

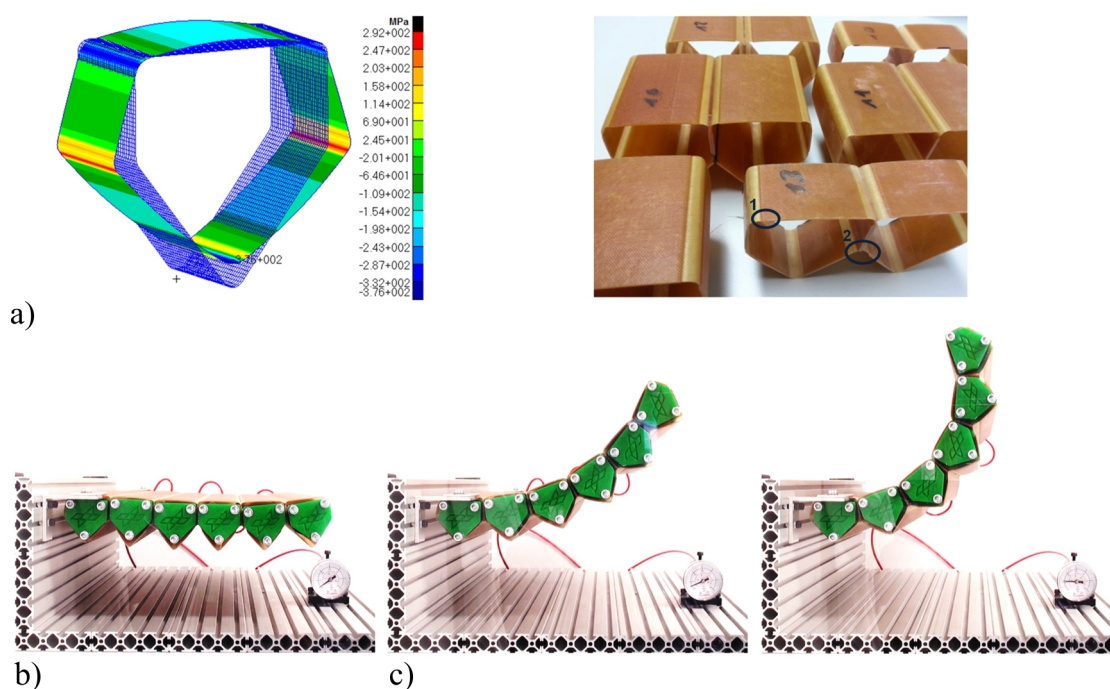
Na slici 2.36. prikazana je slična struktura u obliku rešetkastog nosača koja može da menja svoj oblik. Osnova strukture je triheksagonalnog oblika takozvane *Kagome* strukture [60] i spojena je pojedinačnim tetraedarnim elementima, koje formiraju tri međusobno kruto

vezana štapa, sa gornjom površinom (male debljine) u pojedinim tačkama (slika 2.36.a). Za razliku od prethodnog rešenja kod koga su štapani spojeni zglobovima, ovde su štapani rešetkaste strukture međusobno kruto vezani (zavareni), ali i dovoljno elastični da mogu da se deformišu (da se istežu i skupljaju pod dejstvom sile). Zamenom pojedinih štapova rešetkaste strukture linearnim aktuatorima omogućena je i promena oblika gonje površine (slika 2.36.b i slika 2.36.c); aktivacijom aktuatora dolazi do deformacije, širenja ili skupljanja štapova, a samim tim i do promene oblika površine strukture. Iako ovakva struktura može da vrši promenu oblika i izdrži relativno velika spoljašnja opterećenja, složena je za izradu, zahteva montažu i veliki broj linearnih aktuatora kako bi ostvarila promenu oblika.

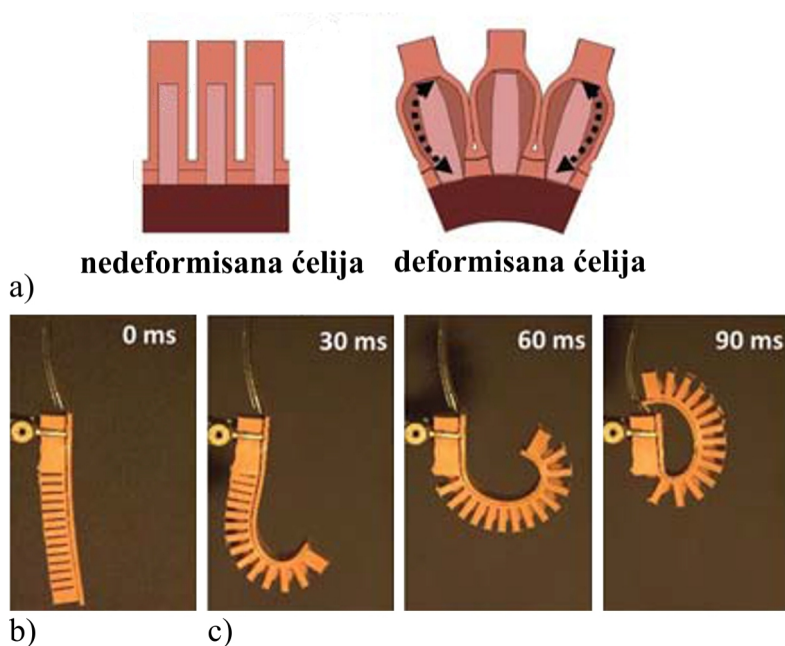


slika 2.36. Struktura u obliku rešetkastog nosača koja aktivacijom pojedinih linearnih aktuatora može da menja oblik: a) osnovni elementi strukture; b) savijanje gornje površine; c) uvijanje gornje površine [60]

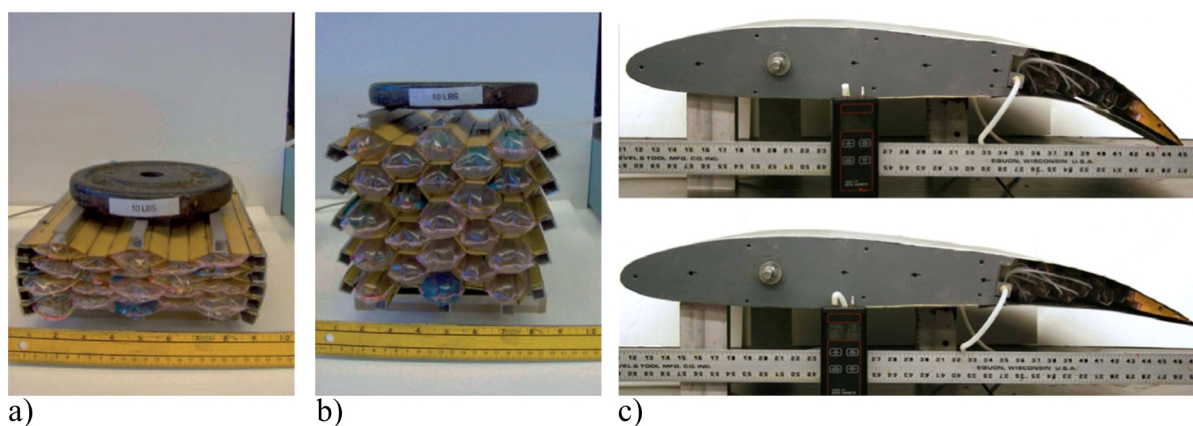
Na slikama 2.37., 2.38. i 2.39. prikazane su pneumatski pogonjene ćelijske strukture koje omogućavaju promenu oblika strukture. Ovakve strukture istovremeno predstavljaju i mehanizam i strukturu (mehanizam, aktuator i struktura su neodvojiva celina) i mogu da menjaju svoj oblik dejstvom komprimovanog vazduha. Inspiracija za ovakve strukture je nađena kod karnivornih biljaka (biljke mesožderke ili biljke muholovke - *Dionaea muscipula*) koje menjajući pritisak u svojim ćelijama menjaju svoj oblik. Struktura se sastoji od niza pojedinačnih ćelija (slika 2.37.a i slika 2.38.a) koje su spojene redno ili paralelno tako da formiraju strukturu (slika 2.37.b, slika 2.38.b, slika 2.39.a i slika 2.39.b). Kada se dovede komprimovani vazduh na pojedine ćelije strukture, ćelije se zbog svoje geometrije tako deformišu da vrše i promenu oblika cele strukture (slika 2.37.c, slika 2.38.c, slika 2.39.b i slika 2.39.c). Ovakve ćelijske strukture zahtevaju veliki spoljašnji izvor komprimovanog vazduha i ne mogu ostvariti više različitih oblika strukture.



slika 2.37. Pneumatski pogonjene ćelijske strukture: a) ćelija u obliku petougona koja se deformiše pod dejstvom komprimovanog vazduha; b) niz redno vezanih ćelija; c) promena oblika strukture pod dejstvom komprimovanog vazduha [73]



slika 2.38. Pneumatski pogonjena ćelijska struktura: a) ćelija u obliku pravougaonika koja se deformiše pod dejstvom komprimovanog vazduha; b) niz redno vezanih ćelija; c) promena oblika strukture pod dejstvom komprimovanog vazduha [74]

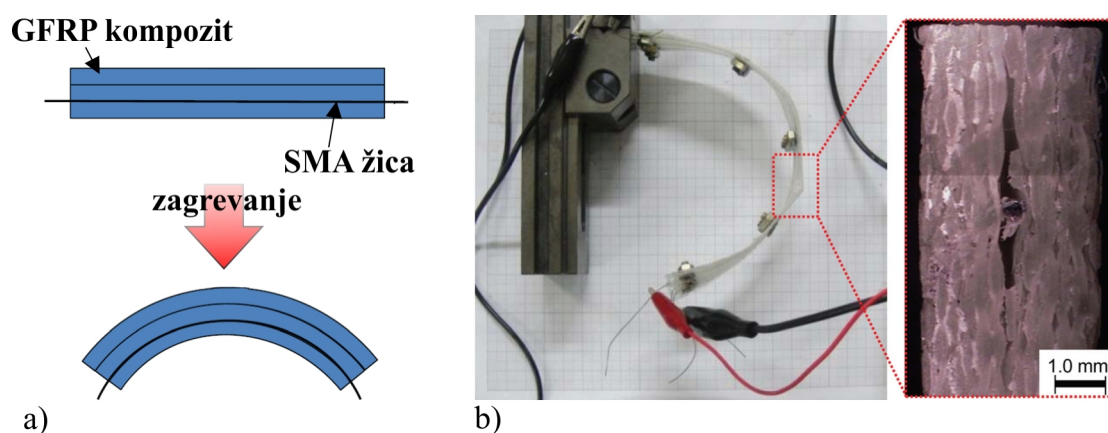


slika 2.39. Pneumatski pogonjena ćelijska struktura u obliku saća: a) nedeformisani oblik; b) položaj nakon dovođenja komprimovanog vazduha; b) koncept avionskog krila koje može da menja svoj oblik uz pomoć pneumatski pogonjene ćelijske strukture u obliku saća u nedeformisanom (slika gore) i deformisanom položaju (slika dole) [47, 75]

Većina prethodno opisanih mehanizama koji omogućavaju strukturi da menja svoj oblik veoma je složena za izradu, zahtevaju montažu, mogu ostvariti samo jedan ili dva oblika i često su razvijeni za samo jednu konkretnu aplikaciju i stoga ne mogu imati širu primenu.

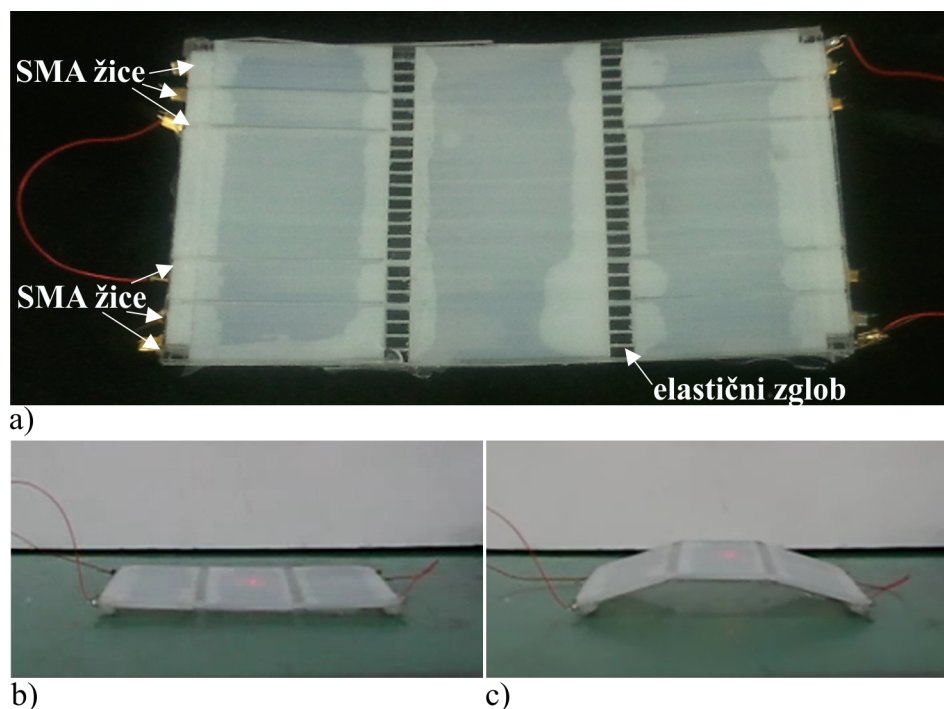
Takođe, ne postoji jedinstvena metodologija sinteze ovakvih struktura sa odgovarajućim mehanizmima koji prenose dejstvo aktuatora na radnu površinu.

Čest pristup za ostvarivanje promene oblika je realizovanje pomeranja fleksibilne površine aktuatorima izrađenim od "pametnih" materijala [83-90]. Jedna takva fleksibilna površina, izrađena od polimera ojačanog staklenim vlaknima (engl. *glass fiber reinforced polymer* – *GFRP*) [83], sa integrisanom SMA žicom kao aktuatorom, prikazana je na slici 2.40. SMA žica je memorisana tako da u svom zapamćenom stanju formira oblik parabole (slika 2.40.a). Pri zagrevanju, SMA žica teži da se vrati u svoj zapamćeni oblik pa dolazi i do pomeranja i pomene oblika cele fleksibilne površine (slika 2.40.b).



slika 2.40. Fleksibilna površina (izrađena od GFRP kompozita) koja može da menja oblik uz pomoć SMA žice: a) princip rada; b) fizički prototip prikazan u deformisanom položaju [83]

Slično rešenje površine koja može da menja oblik uz pomoć SMA aktuatora u obliku žice prikazano je na slici 2.41. Površina koja menja oblik je napravljena od ABS plastike i sastoji se iz tri panela koja su međusobno povezana elastičnim zglobovima pri čemu je ovde integrisano više SMA žica (slika 2.41.a). Zagrevanjem SMA žica vrši se zakretanje zadnja dva panela u odnosu na srednji čime se i vrši promena oblika površine (slika 2.41.b i slika 2.41.c).



slika 2.41. Površina koja može da menja svoj oblik uz pomoć integrisanih SMA aktuatora u obliku žice (a) prikazana u nedeformisanom (b) i deformisanom položaju (c) [84]

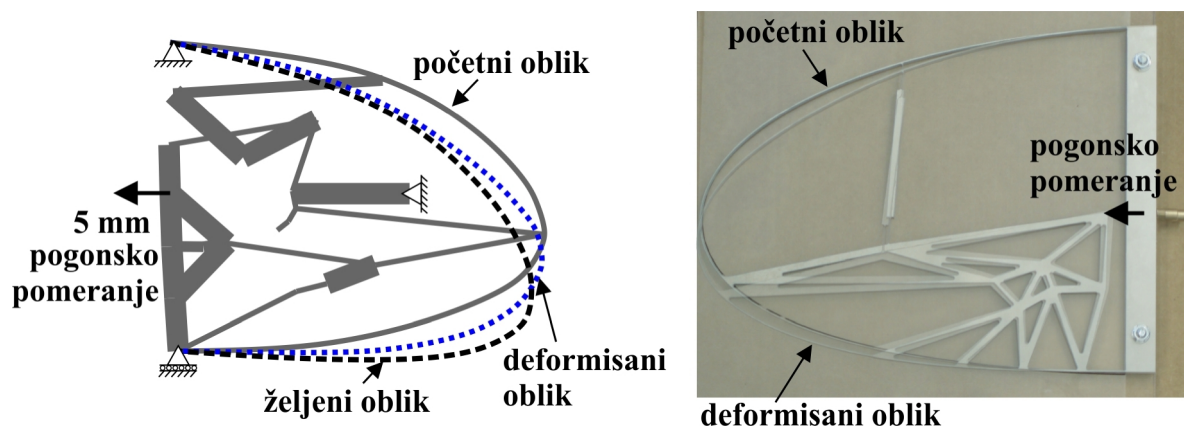
Drugačija rešenja površina koje mogu da menjaju svoj oblik uz pomoć aktuatora koji su integrisani u strukturu površine moguće je naći u [85-90]. Nedostatak većine ovakvih rešenja (slika 2.40. i slika 2.41.) je to što aktuatori izrađeni od "pametnih" materijala mogu da ostvare samo mala pomeranja kada na strukturu deluju spoljašnja opterećenja; pored toga, ovakve strukture ne mogu da ostvare više oblika.

Gipki mehanizmi (slika 1.2.b) koji menjaju svoj oblik deformacijom strukture nude alternativu za ostvarivanje željene promene oblika, sa mnogobrojnim prednostima (vidi poglavlje 1). Kako gipki mehanizmi [91-93] nemaju klasične zglobove, to se oni mogu posmatrati i kao struktura koja ima odgovarajuću krutost i može da podnese spoljašnja opterećenja. Kod gipkih mehanizama je strukturna deformacija poželjan efekat jer omogućava pokretljivost gipkih mehanizama [91-93]. Drugim rečima, gipki mehanizmi su kombinacija strukture i mehanizma jer liče na strukture dok njihova funkcija odgovara funkciji mehanizama. Gipki mehanizmi se projektuju tako da budu dovoljno fleksibilni kako bi ostvarili prenos kretanja/sila, a u isto vreme da budu dovoljno kruti kako bi podneli spoljašnja opterećenja. Gipki mehanizmi se razlikuju od konvencionalnih krutočlanih mehanizama po tome što su namerno napravljeni da budu fleksibilni i ostvaruju kretanje elastičnom deformacijom svojih gipkih članova [91-93]; gipki mehanizmi se deformišu

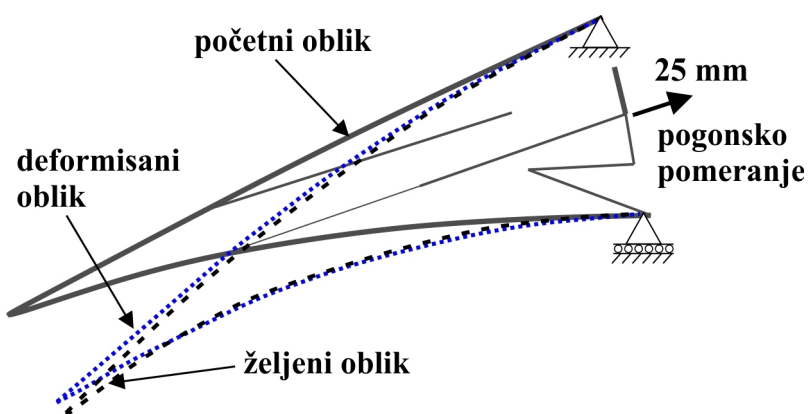
kontinualno kao jedna monolitna struktura. Ova jedinstvena osobina gipkih mehanizama pruža novu mogućnost za postizanje promene oblika neke strukture i nudi mnogobrojne prednosti. Mala težina gipkih mehanizama i jednostavan algoritam za njihovo upravljanje su posebno atraktivni za različite primene u kojima je potrebno ostvariti promenu oblika. Pored ovoga, gipki mehanizmi mogu prevazići mnogobrojne nedostatke različitih mehanizama koji omogućuju promenu oblika strukture i fleksibilnih površina sa aktuatorima napravljenim od "pametnih" materijala, pošto se cela struktura koja menja oblik može posmatrati kao jedan gipki mehanizam.

Sintezi gipkih mehanizama posvećeno je dosta pažnje u literaturi [91-134], ali malo pažnje je posvećeno problemima koji se odnose na sintezu gipkih mehanizama za primene gde je potrebno ostvariti promenu oblika strukture [5, 53, 135-140]. U [136] predstavljen je sistematičan pristup sintezi gipkih mehanizama koji mogu da ostvare željenu promenu oblika iz nekog početnog u željeni oblik. Predstavljeni metod sinteze gipkih mehanizama za primene koje zahtevaju promenu oblika, uključuje tehniku optimizacije strukture fleksibilnog kontinuuma [94, 95] (vidi odeljak 3.1.) i primenu genetskih algoritama (engl. *Genetic Algorithms - GA*) [141] kao metode za određivanje optimalnog rešenja. Metod se fokusira na određivanje optimalne topologije gipkih mehanizama (optimalna raspodeljenost materijala) odnosno najbolje geometrije kontinuuma gipke strukture tako da ona realizuje zahtevani oblik spoljne površine; pri ovome željeni oblik površine mora biti zadat unapred od strane projektanta. Pri ovom pristupu, funkcija cilja (da li je postignut željeni oblik površine) implementirana je preko metode najmanjih kvadrata (engl. *least-square formulation*) izračunavanjem odstupanja pojedinih tačaka na spoljnoj površini strukture koja se deformiše (menja oblik) od odgovarajućih tačaka površine čiji oblik želimo da ostvarimo [136]. Na slici 2.42., slici 2.43., slici 2.44. i slici 2.45. prikazani su gipki mehanizmi koji mogu da realizuju zahtevani oblik spoljne površine, dobijeni optimizacijom topologije. Pomeranjem pogonske tačke dolazi do elastične deformacije pojedinih segmenata strukture gipkog mehanizma, a samim tim i do promene oblika njegove spoljne površine.

Na slici 2.42. prikazan je prednji deo avionskog krila koji može da menja svoj oblik. Napravljen je kao gipka pokretljiva struktura (gipki mehanizam) koja pri pomeranju pogonske tačke vrši promenu oblika krila posredstvom elastične deformacije pojedinih delova strukture (slika 2.42.). Na sličan način ostvaruje promenu oblika i gipki mehanizam zadnjeg dela avionskog krila (repa) (slika 2.43.).

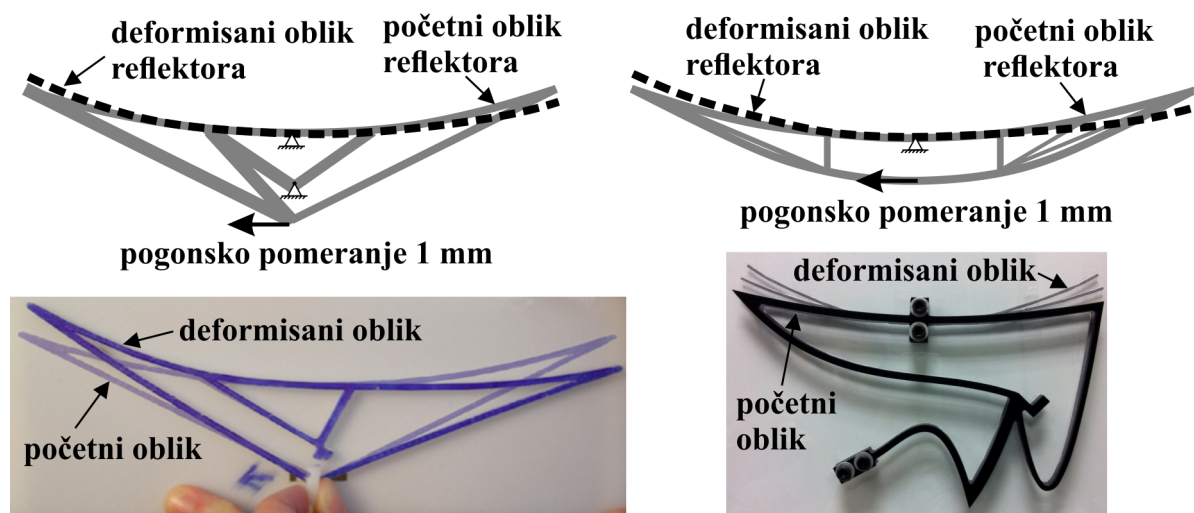


slika 2.42. Dva koncepta prednjeg dela avionskog krila koje može da menja svoj oblik, izvedenog u vidu gipkog mehanizma [138, 53]



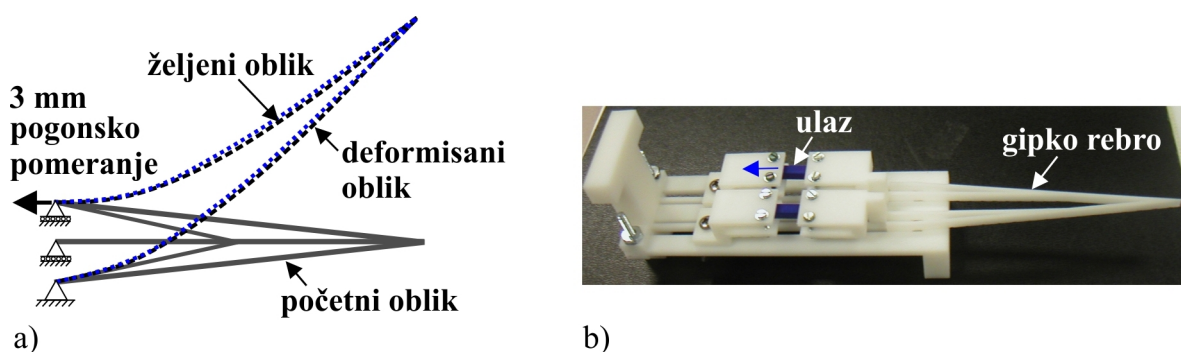
slika 2.43. Gipki mehanizam zadnjeg dela avionskog krila (repa) koje može da menja svoj oblik [138]

Na slici 2.44. prikazani su gipki mehanizmi za promenu oblika aktivne antene. Ovde reflektor antene i noseća struktura predstavljaju monolitnu strukturu odnosno gipki mehanizam koji vrši promenu oblika reflektora iz početnog paraboličnog u željeni oblik. Pomeranjem pogonske tačke u levo, posredstvom elastičnih članova, površina reflektora se zakreće u suprotnu stranu kako bi preusmerili odbijeni signal udesno (slika 2.44.).



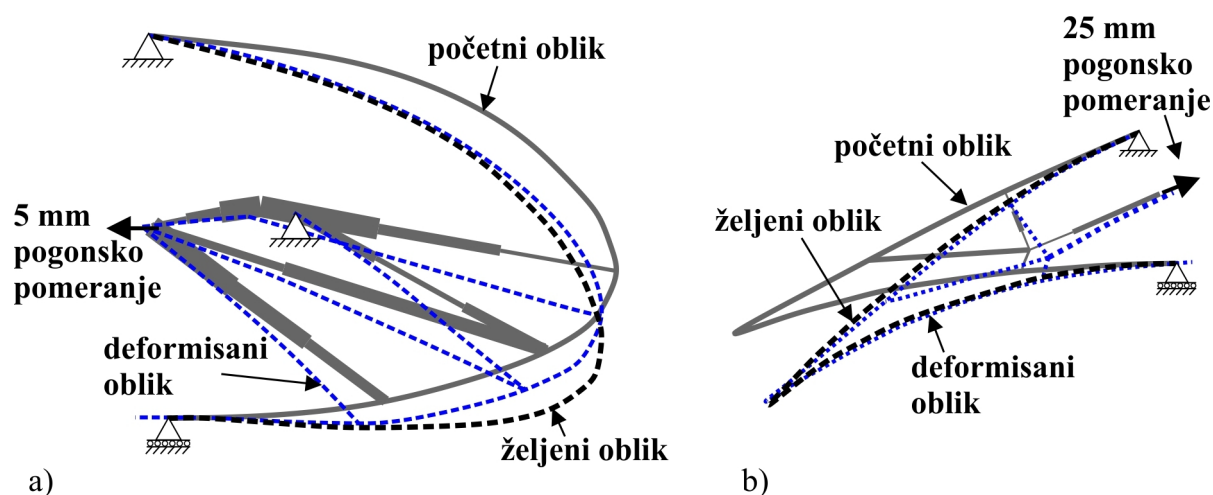
slika 2.44. Četiri koncepta aktivne antene u vidu gipkih mehanizama koji vrše promenu oblika reflektora elastičnom deformacijom pojedinih delova strukture [5, 138, 142]

Rešenje gipkog mehanizma prikazano na slici 2.45, predstavlja biološki inspirisanu strukturu koja imitira ponašanje rebra peraja ribe.



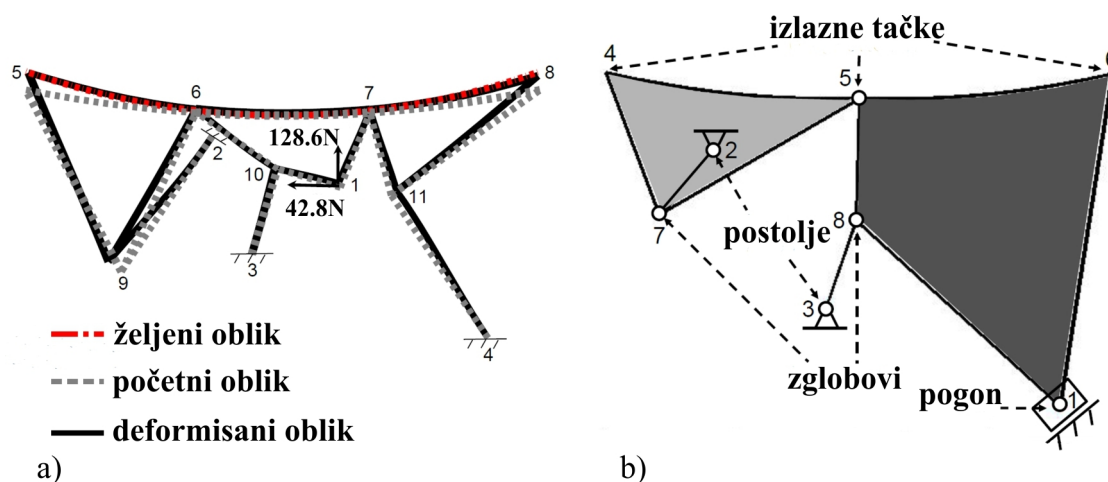
slika 2.45. Gipki mehanizam biološki inspirisane strukture koja imitira ponašanje rebra peraja ribe: a) princip rada; b) fizički prototip [137]

U radu [5] je korišćena *load path representation* [5], kao metoda za sintezu gipkog mehanizma koji menja oblik spoljne površine. Na slici 2.46. prikazani su gipki mehanizmi koji su dobijeni primenom ove metode, a koji imaju istu primenu kao i gipki mehanizmi prikazani na slici 2.42. i slici 2.43.



slika 2.46. Gipki mehanizmi koji mogu da menjaju oblik spoljne površine, dobijeni korišćenjem *load path representation* kao metode za sintezu: a) primena kod prednjeg dela avionskog krila; b) primena kod zadnjeg dela (repa) avionskog krila [138]

Još jedan interesantan pristup sintezi gipkih mehanizama koji treba da menjaju oblik spoljne površine predstavljen je u [140]. Ovaj pristup uključuje primenu topologije krutočlanih mehanizama za sintezu gipkih mehanizama koji menjaju oblik spoljne površine (slika.2.47.).



slika 2.47. Gipki mehanizam koji može da menja oblik spoljne površine (a) dobijen na osnovu topologije odgovarajućeg krutočlanog mehanizma (b) [140]

U radovima [5, 53, 135-140] razmatran je problem sinteze gipkog mehanizma čija spoljašnja površina može da menja oblik (slika 2.42., slika 2.43., slika 2.44., slika 2.45., slika 2.46. i slika 2.47.) i pri tome da ostvari samo jedan unapred zadat oblik (najčešće je oblik zadat od strane projektanta prilikom definisanja funkcije cilja). Međutim, postoje mnogobrojne

situacije u kojima konačan oblik koji je potrebno ostvariti nije poznat unapred i može zavisiti od sredine u kojoj se struktura nalazi. Takođe, može postojati i potreba za ostvarivanjem više željenih oblika radne površine. Za ovakve primene, struktura koja menja oblik treba da bude adaptivna i da ima upravljivi odziv sa izuzetnom manipulativnošću.

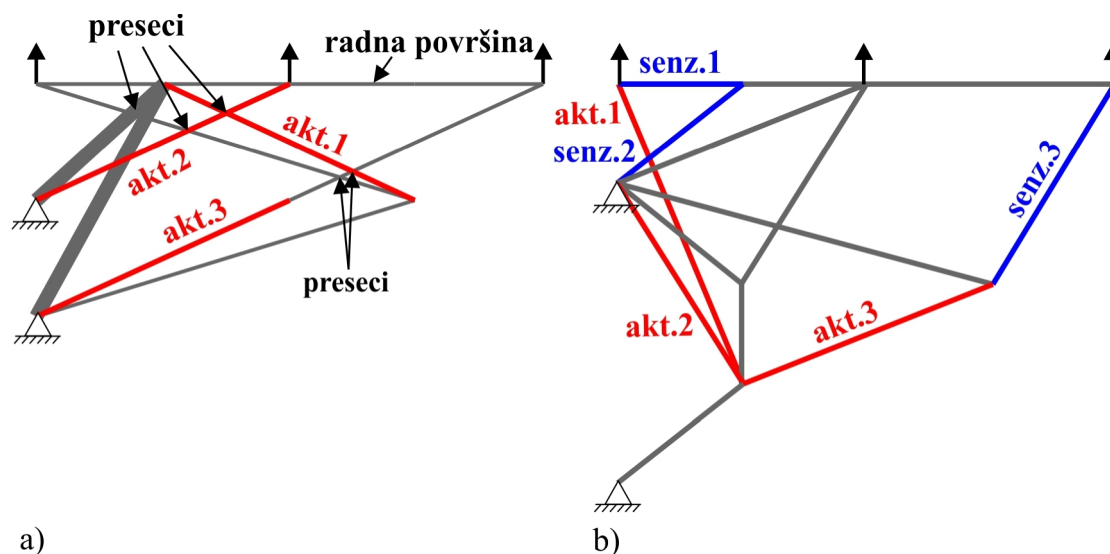
Ova doktorska disertacija sagledava problem projektovanja strukture koja može da izvrši promenu oblika, da bude pri tome upravljiva i da može da ostvari ne samo jedan već više oblika (što je više moguće) svoje spoljašnje površine. Jedna takva adaptivna struktura koja može da postigne više izlaznih oblika (stanja) mogla bi da se projektuje kao **gipki sistem** (slika 1.3.) - gipki mehanizam sa ugrađenim aktuatorima i senzorima. Kao što je u Uvodu već rečeno, uvođenjem aktuatora i senzora u strukturu gipkog mehanizma (gipki mehanizam, aktuatori i senzori predstavljaju neodvojivu celinu) dobio bi se sistem koji može da "oseti" okolinu (preko senzora) i da se na osnovu toga prilagodi okolini u kojoj se nalazi (posredstvom aktuatora i gipke strukture); sistem bi na taj način postao adaptivan. Ovakvi gipki sistemi su biološki inspirisani i imaju potencijal da se razviju ka usko integrisanim, visokofunkcionalnim, višenamenskim, adaptivnim sistemima. Mnoštvo novih primena mogu imati koristi od ovakvih sistema.

U prethodnim istraživanjima na polju gipkih mehanizama su aktuatori/senzori dodavani nakon što je sintezom dobijeno optimalno rešenje gipkog mehanizma [5, 94-140]. U ovakvom pristupu, postavka aktuatora/sezora nije uključena u proces optimizacije i ostavljeno je projektantu u kasnijim fazama projektovanja da o tome odluči. Za razvoj adaptivne gipke strukture koja može upravljivo da menja svoj oblik, istovremeno mora biti određena strukturna topologija gipkog mehanizma i postavka aktuatora (tip aktuatora, njegova orijentacija, veličina i lokacija moraju biti uključene kao promenljive u procesu sinteze). U ovom slučaju, formiranje strukturne topologije gipkog mehanizma utiče na to kako će aktuatori/senzori biti postavljeni u strukturu mehanizma i obrnuto.

U cilju razvoja adaptivne strukture koja može da ostvari više oblika, mora se koristiti više aktuatora. U literaturi je uglavnom razmatrana sinteza mehanizama koji su pogonjeni jednim aktuatorom [94-140]. Kada se koristi više aktuatora u strukturi, mora se razmotriti i problem upravljanja takvim sistemom. Uključivanje upravljanja u proces optimizacije može poboljšati upravljivost (engl. *controllability*) [143] adaptivnog sistema. Centralno u ovoj metodi je koncept strukturne ortogonalnosti [143], koja se odnosi na jedinstveni odziv sistema kada je aktivan pojedinačni aktuator u sistemu. Ovi koncepti (upravljivost i strukturna ortogonalnost) [143] predstavljaju strukturnu adaptivnost sistema i biće detaljno obrađeni u disertaciji. Cilj ove disertacije je razvoj adaptivnog gipkog sistema koji može da

upravlja oblikom radne površine sa maksimalnom upravljivošću (maksimalnom strukturnom adaptivnošću) i minimalnim brojem aktuatora odnosno koji može da ostvari maksimalnu upravljivost sa minimalnim brojem aktuatora.

Metoda za sintezu gipkog sistema odnosno aktivne gipke strukture sa optimalnom postavkom aktuatora i senzora unutar strukture je već razvijena u [143], međutim, često kao rezultat daje rešenja koja su veoma složene strukture i koja je teško izraditi klasičnim metodama proizvodnje kao što su obrada rezanjem ili livenje u kalupima. Tehnika optimizacije topologije predložena u [143] često kao rešenje daje gipke mehanizme sa mnoštvom preseka strukturnih elemenata pri čemu se često javljaju i preseci strukturnih elemenata sa aktuatorima i sensorima (slika 2.48.) [143]. Pored složenosti izrade, preseci elemenata povećavaju i krutost cele strukture što takođe može dovesti do značajnog smanjenja funkcionalnosti sistema. Upravo zbog ovoga, do sada nije razvijen ni jedan fizički prototip gipkog sistema sa realnim aktuatorima i sensorima koji bi bio u potpunosti funkcionalan. Pored toga nisu ni razvijeni odgovarajući realni aktuatori i senzori koji bi mogli lako da se ugrade u strukturu gipkog mehanizma.



slika 2.48. Rešenja gipkih sistema kod kojih se javljaju preseci strukturnih elemenata kao i preseci strukturnih elemenata sa aktuatorima i sensorima: a) gipki mehanizmi sa ugrađenim aktuatorima [143]; b) gipki mehanizmi sa ugrađenim aktuatorima i sensorima [144]

U ovoj disertaciji biće predstavljena poboljšana metodologija za projektovanje adaptivne strukture koja menja oblik odnosno metodologija za istovremenu sintezu gipkog mehanizma i postavke aktuatora. Metodologija je poboljšana u smislu da se dobijaju gipki sistemi (gipki

mehanizmi sa ugrađenim aktuatorima) bez presečnih elemenata (za razliku od rešenja koja su dobijena u [143], slika 2.48.). Biće pokazano da poboljšana metoda za razvoj gipkih sistema omogućuje brzu i jednostavnu izradu ovakvih sistema klasičnim metodama proizvodnje. Sinteza gipkih mehanizama sa ugrađenim aktuatorima i bez presečnih tačaka elemenata i aktuatora predstavlja poboljšanje postojeće metode sinteze gipkih sistema.

Biće predstavljena nova adaptivna gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima i senzorima koja može upravljivo da menja oblik svoje radne površine. Biće pokazano da ova struktura može da ostvari visoku upravljivost (ima visoku strukturnu adaptivnost) sa tri ugrađena aktuatora.

Biće pokazano da adaptivna struktura koja menja oblik može da ostvari mnogo složenih oblika (deformacija) svoje spoljne površine, imajući stoga mnogo prednosti nad postojećim rešenjima struktura koje menjaju svoj oblik i mogu da ostvare samo jedan unapred definisani oblik [135-140].

Mogućnost skaliranja strukture će takođe biti prikazana, a biće prikazano kako projektant može jednostavno da modifikuje strukturu ako je potrebno ugraditi aktuatore drugačije veličine hoda pri čemu sposobnost strukture da ostvari više izlaznih oblika (stanja), ostaje ista.

Posebna pažnja biće posvećena razvoju novih aktuatora i senzora koji bi mogli jednostavno da se ugrađuju u strukturu gipkog mehanizma.

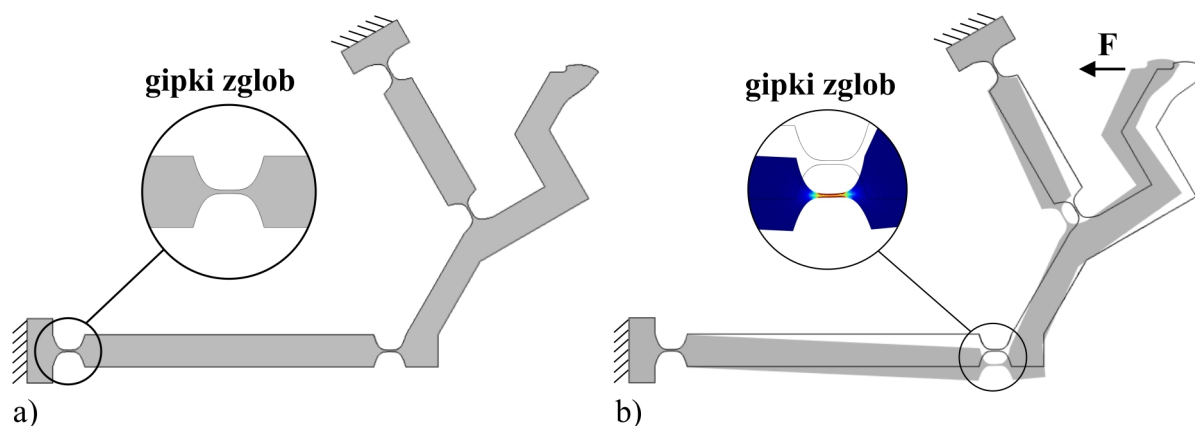
Biće razvijeno odgovarajuće upravljanje odnosno upravljački algoritam za gipku strukturu. Algoritam će omogućiti gipkoj strukturi da pored toga što poseduje strukturnu adaptivnost bude i adaptivna.

Biće izrađen funkcionalan fizički prototip gipkog sistema (gipkog mehanizma sa ugrađenim aktuatorima i senzorima). Funkcionalnost takvog fizičkog prototipa biće detaljno analizirana. Za razliku od mnogih prethodnih istraživanja gde su strukture koje menjaju oblik razvijene za samo jednu konkretnu primenu, biće pokazano kako struktura razvijena u ovoj disertaciji, može da se koristi za različite aplikacije.

3. Metodologija razvoja adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine

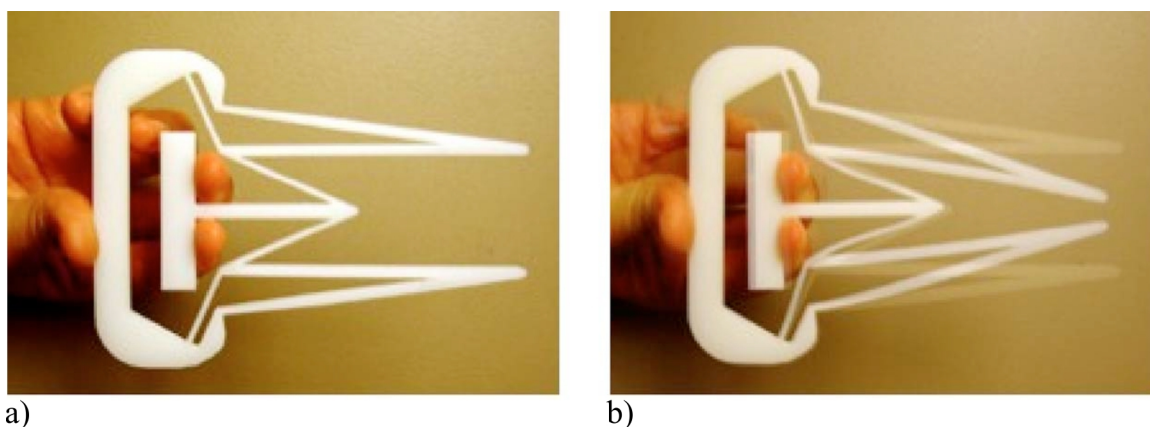
Gipki mehanizmi se generalno mogu podeliti u dve grupe, na gipke mehanizme sa **koncentrisanom gipkošću** (slika 3.1.) (engl. *concentrated compliance*) [146-150] i gipke mehanizme sa **raspodeljenom gipkošću** (slika 3.2.) (engl. *distributed compliance*) [99, 100, 104, 145].

Gipki mehanizmi sa koncentrisanom gipkošću ostvaruju kretanje zahvaljujući elastičnoj deformaciji **gipkih zglobova** (engl. *flexures*) [151], pri čemu je elastična deformacija ograničena na usku oblast zgloba (slika 3.1.). Gipki zglob se često definiše kao segment male debljine između dva kruta segmenta (slika 3.1.a), koji se deformiše (savija) pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja, ostvarujući na taj način relativno kretanje jednog krutog segmenta u odnosu na drugi (slika 3.1.b). Međutim, gipki zglobovi lokalizuju deformacije pa se često kod njih javlja velika koncentracija napona u samom zglobu (slika 3.1.b) što dovodi do zamora materijala i često otkaza celog mehanizma. Upravo zbog ovoga, gipki zglobovi ostvaruju ograničeni opseg relativnog kretanja susednih krutih segmenata, a samim tim ograničen je i opseg kretanja celog gipkog mehanizma [146-150] (slika 3.1.b) pa ovi mehanizmi nisu pogodni za realizovanje gipkih sistema koji zahtevaju što je moguće veće pomeranje tačaka na radnoj površini strukture.



slika 3.1. Gipki mehanizam sa koncentrisanom gipkošću, prikazan u nedeformisanom (a) i deformisanom položaju (b) [150]

Za razliku od gipkih mehanizama sa koncentrisanom gipkošću, gipki mehanizmi sa raspodeljenom gipkošću (slika 3.2.) eliminišu probleme zamora materijala (ograničenog veka trajanja) izazvanog koncentracijom napona (u gipkim zglobovima) zahvaljujući činjenici da energija deformacije nije koncentrisana u zglobovima već je raspodeljena duž celog mehanizma; svaki segment mehanizma prenosi deo energije elastične deformacije. Gipki mehanizmi sa raspodeljenom gipkošću sastoje se od dugih i relativno tankih elastičnih segmenata (najčešće u vidu štapa) koji obezbeđuju kontinualnu deformaciju gipkog mehanizma, pri čemu se ceo mehanizam deformiše, za razliku od gipkih mehanizama sa koncentrisanom gipkošću kod kojih je deformacija ograničena samo na lokacije gipkih zglobova. Zahvaljujući ovome, gipki mehanizmi sa raspodeljenom gipkošću mogu da ostvare relativno velika pomeranja [99, 100, 104, 145]. Upravo zbog ove osobine, u ovoj disertaciji će, za razvoj gipke strukture koja može da upravlja oblikom svoje radne površine, biti korišćeni gipki mehanizmi sa raspodeljenom gipkošću.



slika 3.2. Gipki mehanizam hvatača, sa raspodeljenom gipkošću, prikazan u nedeformisanom (a) i deformisanom položaju (b) [109]

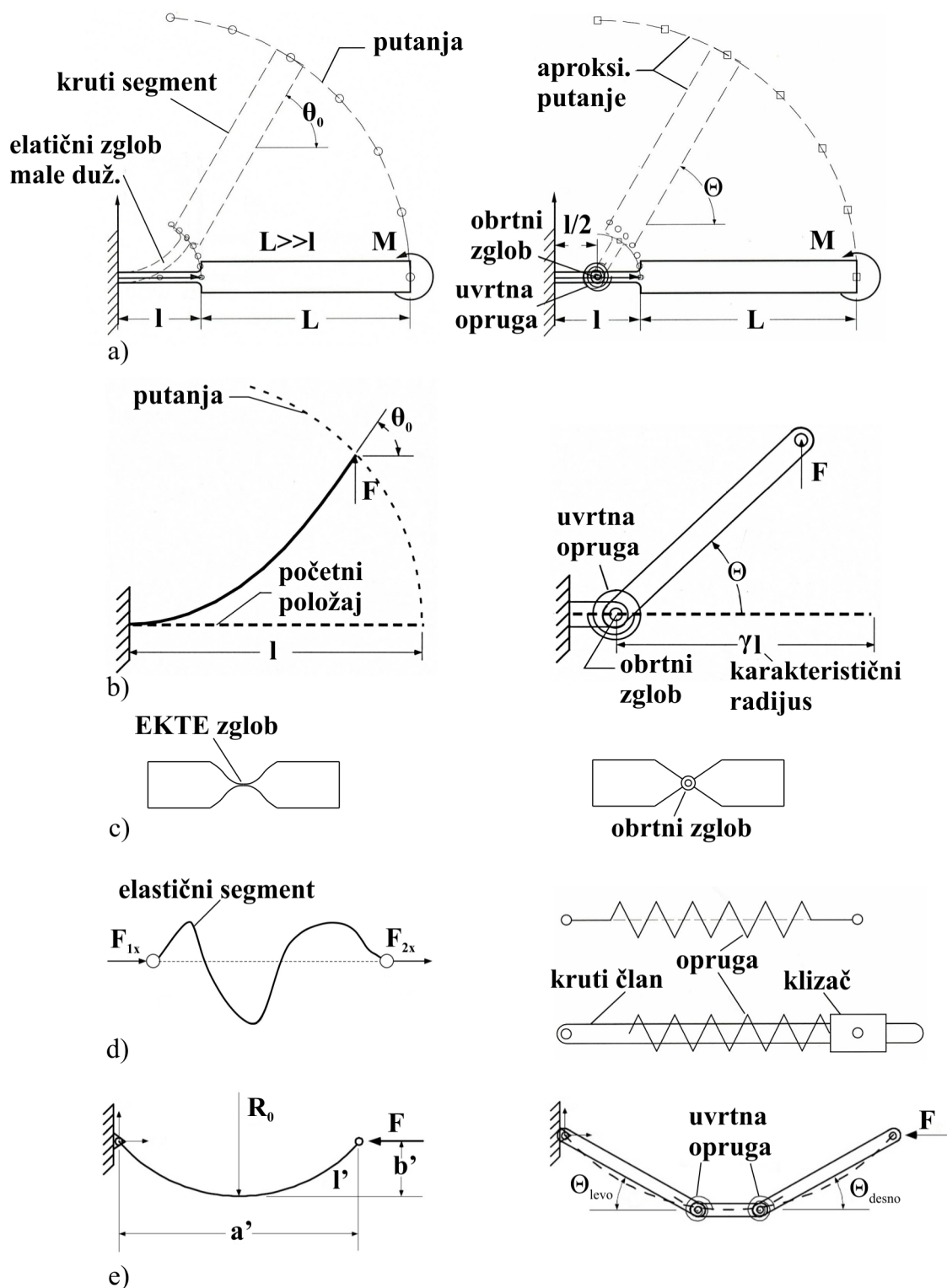
Analiza i sinteza gipkih mehanizama sa raspodeljenom gipkošću, međutim, često nije jednostavna. Pri deformaciji (kretanju) ovakvih gipkih mehanizama, njihovi elastični segmenti su često izloženi velikim, nelinearnim deformacijama, pa je za tačno predviđanje njihovog kretanja potrebno sprovesti znatno složeniju, nelinearnu analizu [92].

Ako su elastični segmenti izloženi veoma malim deformacijama prilikom kretanja gipkog mehanizma, ove deformacije se mogu lako predvideti rešavanjem poznatih jednačina savijanja grede; analiza i sinteza se u tom slučaju mogu realizovati jednostavnim analitičkim modelima. Ukoliko se javljaju veće deformacije i složenija kretanja, onda se za tačno

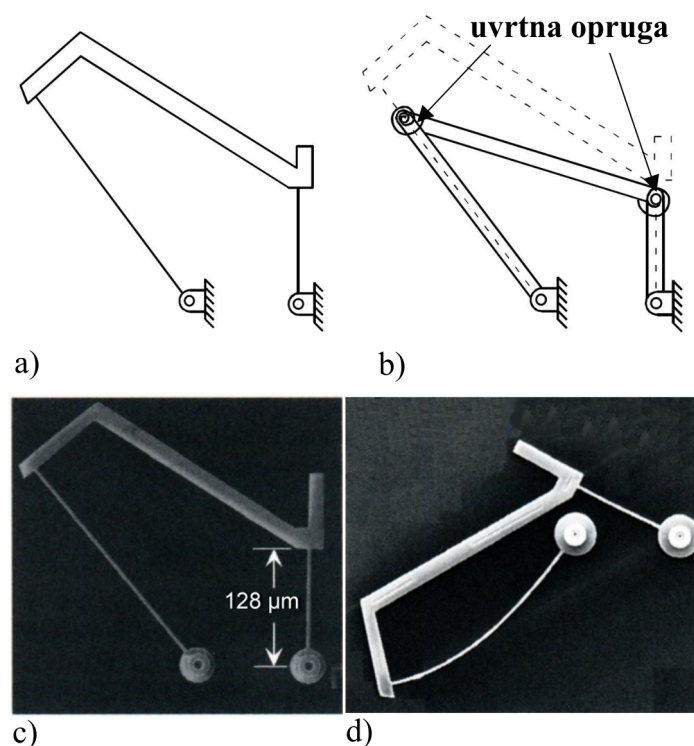
predviđanje kretanja odgovarajućih članova moraju primeniti nelinearne diferencijalne jednačine [92]. Rešavanje ovakvih jednačina obično uključuje eliptične integrale, koji su funkcija opterećenja i geometrije članova [92]. Uključivanje rešavanja ovakvih jednačina u proces sinteze gipkih mehanizama bilo bi veoma kompleksno. Pored toga, analitička rešenja jednačina koje predviđaju ponašanje elastičnih članova, moguće je naći samo za relativno jednostavne geometrije elastičnih članova i jednostavne slučajeve opterećenja mehanizma. Ukoliko je geometrija gipkih mehanizama složenija, parcijalne diferencijalne jednačine koje opisuju elastične deformacije članova mehanizma rešavaju se korišćenjem numeričkih metoda, kao što je **metod konačnih elemenata - MKE** (engl. *Finite Element Method - FEM*) [152]. Upravo zbog ovoga u literaturi su razvijene različite metode i tehnike optimizacije za sintezu gipkih mehanizama sa raspodeljenom gipkošću [94-173].

Pregledom postojeće literature može se zaključiti da postoje dva generalna pristupa sintezi gipkih mehanizama sa raspodeljenom gipkošću: sinteza bazirana na **kinematici krutočlanih mehanizama** (engl. *kinematics-based approach*) [153-159] i sinteza bazirana na **optimizaciji strukture** gipkog mehanizma (engl. *structural-optimization-based approach*) [94-118, 133-141, 143-145, 160-173].

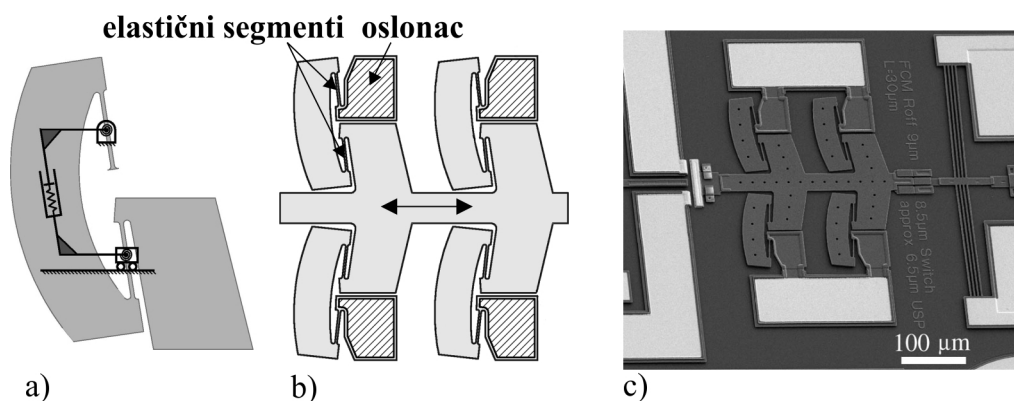
Kod sinteze bazirane na kinematici krutočlanih mehanizama, predviđanje ponašanja gipkih mehanizama odnosno njihova sinteza vrši se na osnovu ponašanja (kretanja) krutočlanih mehanizama. Kako bi se predvidele nelinearne deformacije različitih tipova elastičnih segmenata, koristi se **model kvazikrutog tela** (engl. *pseude-rigid-body model*), razvijenog u [153-157], koji aproksimira deformacione karakteristike gipkih segmenata (slika 3.3.). U ovom modelu elastični segmenti su predstavljeni u vidu dva (ili više) kruta segmenta međusobno spojena zglobovom, na kome se nalazi opruga (uvrtna ili cilindrično zavojna) [92, 153-155]. Opruga modelira krutost gipkih segmenata. Pozicija zgloba kao i vrednost krutosti (konstante) opruge mogu se odrediti primenom modela kvazikrutog tela [92, 153-157]. Model kvazikrutog tela razvijen je za pet tipova elastičnih segmenata [92]: elastične zglobove male dužine (slika 3.3.a), konzolne segmente (elastični segmenti uklješteni na jednom kraju) (slika 3.3.b), ekstremno kratke i tanke elastične zglobove - EKTE zglobovi (engl. *living hinges*) (slika 3.3.c), elastične segmente između krutih zglobova (engl. *functionally binary pinned-pinned segments - FBPP*) (slika 3.3.d) i inicijalno zakrivljene elastične segmente između krutih zglobova, opterećene silom na slobodnom kraju (slika 3.3.e). Primenom modela kvazikrutog tela odnosno sinteze bazirane na kinematici krutočlanih mehanizama, razvijeni su i gipki mehanizmi prikazani na slikama 3.4, 3.5 i 3.6.



slika 3.3. Elastični segmenti predstavljeni modelom kvazikrutog tela: a) elastični zglob male dužine prikazan na slici levo i njegov model kvazikrutog tela (desno); b) konzolni segment (levo) i njegov model kvazikrutog tela (desno); c) ekstremno kratki i tanki elastični zglob (levo) i njegov model kvazikrutog tela (desno); d) elastični segment između krutih zglobova opterećen silama na oba kraja (levo) i njegov model kvazikrutog tela (desno); e) inicijalno zakrivljeni elastični segment između krutih zglobova opterećen silom na slobodnom kraju (levo) i njegovog modela kvazikrutog tela (desno) [92]



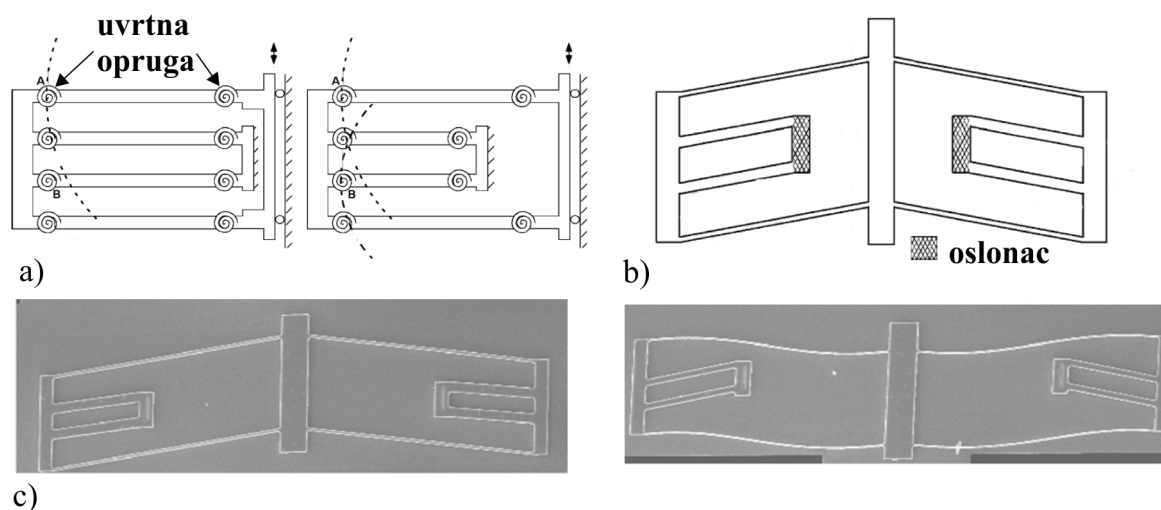
slika 3.4. Gipki mehanizam u vidu polužnog četvorougla (a) i odgovarajući model kvazikrutog tela (krutočlani polužni četvorougao sa oprugama na zglobovima) (b); izrađeni prototip mehanizma za primenu u mikromehatroničkim sistemima, prikazan u nedeformisanom (c) i deformisanom (d) položaju [156]



slika 3.5. Gipki mehanizam za realizovanje električnog kontakta za primene u mikromehatroničkim sistemima: a) krutočlani mehanizam – model kvazikrutog tela; b) gipki mehanizam izveden iz modela kvazikrutog tela; c) izrađeni prototip gipkog mehanizma [158]

I pored toga što ovaj model aproksimira nelinerane deformacije elastičnih segmenata sa dovoljno velikom tačnošću pa je pogodan i za analizu već postojećih gipkih mehanizama, za sintezu gipkih mehanizama primenom ovog pristupa potrebno je da krutočlani mehanizam

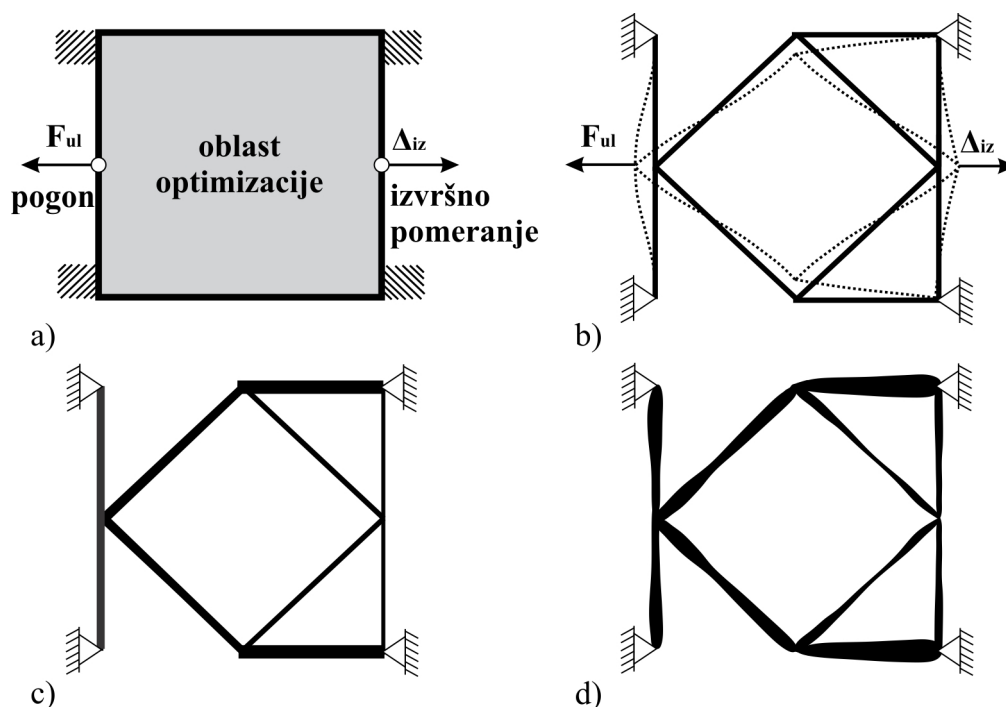
bude poznat unapred, što i predstavlja glavni nedostatak ovog pristupa sintezi. Sinteza gipkih mehanizama bazirana na kinematici krutočlanih mehanizama ima stoga ograničenu primenu jer projektant prvo treba da izvrši sintezu krutočlanog mehanizma (ili iskoristi već postojeći mehanizam) (slika 3.6.a), a zatim da na osnovu njega, primenom modela kvazikrutog tela, izvrši i sintezu i analizu gipkog mehanizma (slika 3.6.b). Ovakav pristup nije pogodan za neintuitivnu sintezu što predstavlja razlog zbog čega ovakav pristup neće biti korišćen u ovoj disertaciji.



slika 3.6. Gipki mehanizam za realizovanje pomeranja komponenti mikromehatroničkih sistema: a) krutočlani mehanizam – model kvazikrutog tela; b) gipki mehanizam; c) fizički prototip mehanizma prikazan u nedeformisanom (na slici levo) i deformisanom položaju (na slici desno) [159]

Za razliku od sinteze bazirane na kinematici krutočlanih mehanizama, sinteza bazirana na optimizaciji strukture gipkog mehanizma pogodna je za neintuitivan razvoj mehanizma jer se, za zadatu postavku zadatka sinteze, rešenja gipkih mehanizama dobijaju automatski (slika 3.7.). U ovom pristupu, gipki mehanizmi sa raspodeljenom gipkošću posmatraju se kao fleksibilni kontinuum odnosno modeliraju se korišćenjem metoda mehanike kontinuuma. Geometrijska struktura gipkog mehanizma i karakteristike materijala od koga je izrađen određuju njegove mogućnosti za prenos sila i kretanja pa sinteza gipkih mehanizama predstavlja problem kod koga treba odrediti geometriju kontinuuma od datog elastičnog materijala tako da realizuje zadate sile i pomeranje. Za rešavanje ovog problema koristi se metod **optimizacije kontinuuma** (engl. *continuum synthesis approach*) [94-118, 145]. Ovaj metod može se podeliti na dve faze: određivanje (generisanje) **optimalne topologije mehanizma** (raspodeljenost materijala i praznina u strukturi) (engl. *topology optimization*)

[94-117, 145] i određivanje **dimenzija segmenata strukture** (veličine, geometrije i oblika segmenata) (engl. *dimensional synthesis*) [118, 105, 160-163]. Optimizacija topologije predstavlja teži i "kreativniji" deo procesa sinteze pa će u disertaciji više pažnje biti posvećeno ovoj fazi sinteze.



slika 3.7. Sinteza gipkog invertora pomeranja kod koga su pogonska sila F_{ul} i pomeranje izvršne tačke Δ_{iz} suprotnog smera: a) oblast optimizacije; b) optimalna topologija gipkog invertora pomeranja (deformisani položaj prikazan je isprekidanom linijom) [103]; c) optimizacija veličine elastičnih segmenata dobijenog gipkog invertora pomeranja; d) optimizacija oblika elastičnih segmenata dobijenog gipkog invertora pomeranja

Na slici 3.7. prikazan je originalni primer sinteze gipkog invertora pomeranja primenom metode optimizacije kontinuuma. Pri optimizaciji topologije, dozvoljeni prostor odnosno oblast u koju bi mehanizam svojim gabaritima trebalo da se uklopi naziva se **oblast optimizacije** (engl. *design domain*) (slika 3.7.a). Topologija fleksibilnog kontinuuma odnosno mehanizma definiše se kao raspodeljenost materijala i šupljina unutar oblasti optimizacije ili kao povezanost segmenata mehanizma u strukturi (engl. *pattern of connectivity*) (slika 3.7.b). Metod optimizacije kontinuuma fokusira se na određivanje optimalne topologije odnosno kako najbolje materijalno povezati različite delove gipkog mehanizma kako bi on pod dejstvom pogonskih sila/pomeranja realizovao zadate izvršne sile/pomeranja. Projektant treba jedino da definiše željenu veličinu (dimenzije) oblasti

optimizacije u koju bi mehanizam trebalo da se uklopi, položaj **oslonaca mehanizma (postolje mehanizma)** (engl. *supports*), lokaciju **napadnih tačaka** pogonskih sila ili pogonskih pomeranja (engl. *input port*), lokaciju **izvršnih tačaka** (engl. *output port*), intenzitet **pogonskih sila** ili veličinu **pogonskih pomeranja** (slika 3.7.a), kao i **karakteristike materijala** od koga bi mehanizam trebao da bude izrađen. Algoritam optimizacije zatim sam generiše najbolju materijalnu povezanost (postolja, napadne tačke sile/pomeranja i tačke koja treba da realizuje izvršno kretanje) odnosno optimalnu topologiju gipkog mehanizma koji može da realizuje željeno pomeranje izvršne tačke zadatom pogonskom silom (slika 3.7.b). Nakon generisanja optimalne topologije mehanizma sledi optimizacija veličine i oblika njegovih elastičnih segmenata (slika 3.7.c i slika 3.7.d). Optimizacija veličine segmenata predstavlja određivanje optimalne distribucije debljine ili površine članova u strukturi kako bi se minimizovala ili maksimizovala neka fizička veličina (srednja vrednost krutosti, maksimalni napon, savijanje itd.) (slika 3.7.c). Cilj optimizacije oblika segmenata je određivanje optimalnog oblika segmenata kako bi se poboljšalo realizovanje karakteristika definisanih postavkom zadatka sinteze (povećanje pomeranja izvršne tačke zadatom pogonskom silom) (slika 3.7.d).

Jedinstvenost sinteze bazirane na optimizaciji strukture je da se optimalna rešenja gipkih mehanizama, za datu postavku problema, mogu generisati automatski, bez subjektivnog odlučivanja projektanta o fizičkom obliku gipkog mehanizma (izuzev definisanja prostora u koji bi gabarijom trebalo da se uklopi). U disertaciji će za razvoj gipkih mehanizama, odnosno adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine, biti korišćen ovaj metod sinteze.

Metod optimizacije kontinuuma je pogodan za razvoj optimizacionog algoritma koji bi vršio automatsku sintezu gipkih mehanizama. U disertaciji je razvijen novi optimizacioni algoritam, u vidu kompjuterskog koda, za sintezu gipkih mehanizama i gipkih sistema. Algoritam je najpre razvijen samo za sintezu gipkih mehanizama, jer je to jednostavniji problem sinteze u poređenju sa sintezom gipkih sistema. Uspešnost algoritma da generiše rešenja gipkih mehanizama za zadatak postavku zadatka sinteze, ispitana je na primeru sinteze gipkog invertora pomeranja i gipkog mehanizma hvatača; pri čemu su dobijena nova rešenja ovih mehanizama. Postojeći metod optimizacije topologije (koji algoritam takođe koristi) je zatim poboljšan tako da se dobijaju rešenja gipkih mehanizama bez presečnih elemenata. Poboljšani algoritam je takođe proveren na primeru sinteze gipkog invertora pomeranja i gipkog mehanizma hvatača pri čemu su dobijena rešenja mehanizama bez presečnih elemenata. Ovaj algoritam je predstavljao osnovu za dalji razvoj algoritma za sintezu gipkih

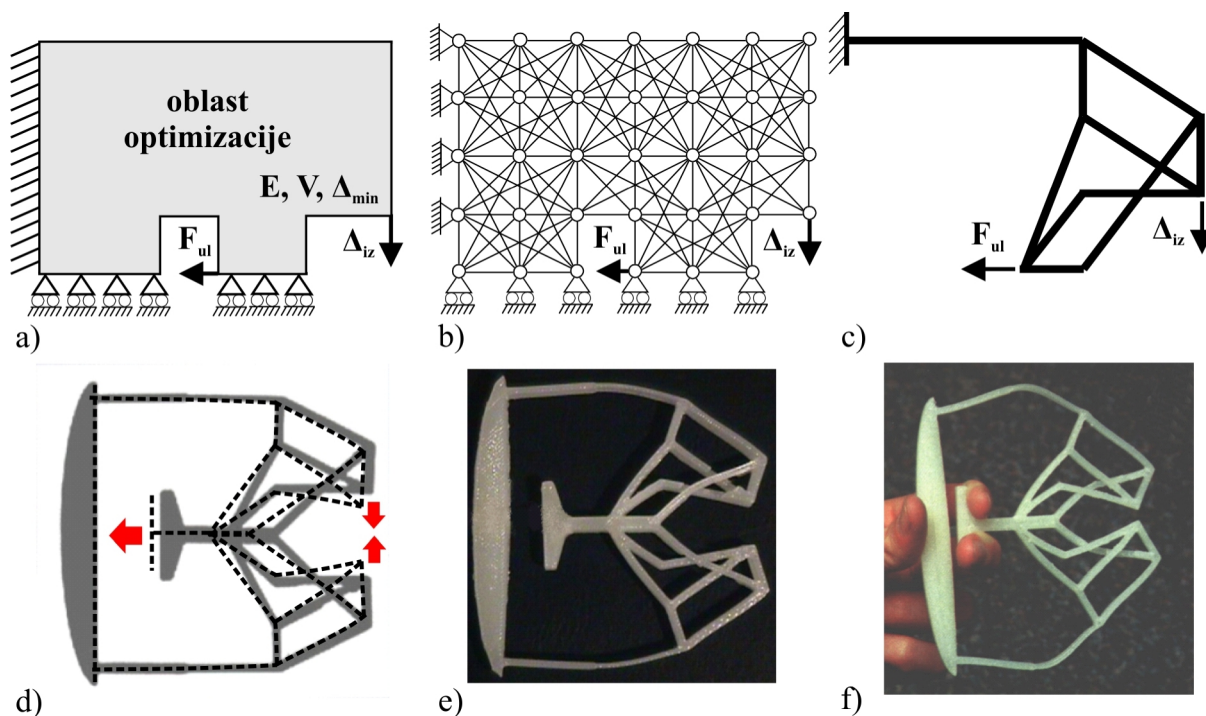
sistema (bez presečnih elemenata) odnosno adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine. Algoritam je modifikovan i dopunjen tako da je pored optimizacije topologije i postavka aktuatora takođe uključena u proces sinteze. Aktuatori, modelirani i kao elementi koji generišu silu (generatori sile) i kao strukturni elementi gipkog mehanizma, uključeni su u proces optimizacije kao optimizacione promenljive. Takođe je i upravljanje uključeno u proces sinteze primenom koncepta strukture ortogonalnosti [143]. Primenom razvijenog algoritma izvršena je sinteza adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine.

U narednim odeljcima biće detaljno opisana metodologija (algoritam) sinteze gipkih mehanizama i gipkih sistema odnosno adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine.

3.1. Metodologija sinteze gipkih mehanizama

Osnovni koncept metodologije koja je korišćena u disertaciji za sintezu gipkih mehanizama sa raspodeljenom gipkošću prikazan je na slici 3.8. na primeru sinteze gipkog mehanizma hvatača razvijenog u [100]. Kao što je bilo reči u prethodnom odeljku, potrebno je prvo definisati postavku zadatka sinteze odnosno problema optimizacije topologije (slika 3.8.a). Postavka zadatka sinteze uključuje definisanje: tipa i veličine (dimenzija) oblasti optimizacije, položaj i tip oslonaca mehanizma (postolje mehanizma), lokaciju napadnih tačaka pogonskih sila ili pogonskih pomeranja, veličinu, pravac i smer pogonskih sila ili pogonskih pomeranja, lokaciju izvršnih tačaka, pravac i smer pomeranja izvršnih tačaka ili izvršne sile koju mehanizam treba da ostvari, karakteristike materijala od koga će mehanizam biti izrađen - Jangov (*Young*) modul elastičnosti E i drugih ograničenja kao što su željena zapremina materijala strukture i minimalna vrednost pomeranja ili sile koje mehanizam treba da ostvari na mestu izvršnih tačaka. Zadatkom sinteze može se zahtevati da mehanizam ostvari ne samo pomeranje izvršne tačke već i da ostvari određenu izvršnu silu. Pored ovoga, može se zahtevati i da mehanizam realizuje vođenje izvršne tačke duž neke zadate putanje [102, 106, 113, 129]. U primeru prikazanom na slici 3.8., zadatak sinteze je odrediti optimalnu topologiju gipkog mehanizma hvatača koji treba, pod dejstvom sile F_{ul} u zadatoj napadnoj tački, da pomeri izvršnu tačku za Δ_{iz} u zadatom pravcu (slika 3.8.a), kako bi ostvario hvatanje objekta. Ovde je definisana pravougaona oblast optimizacije u koju bi mehanizam svojim gabaritima trebalo da se uklopi, pri čemu se postavljeni problem može

smatrati simetričnim, pa je potrebno optimizovati samo polovinu oblasti optimizacije (slika 3.8.a). Oslonac (postolje) postavljen je na levoj strani oblasti optimizacije, a na donjoj stani postavljen je uslov simetririje (dozvoljeno je pomeranje tačaka samo u horizontalnom pravcu dok je pomeranje u vertikalnom pravcu ograničeno). Kao posledica uslova simetririje postavljeno je i da se napadna tačka pogonske sile ne pomera u vertikalnom pravcu.



slika 3.8. Metodologija sinteze gipkog mehanizma hvatača sa raspodeljenom gipkošću: a) postavka zadatka sinteze (zbog simetričnosti problema prikazana je samo gornja polovina oblasti optimizacije); b) diskretizacija oblasti optimizacije; c) rešenje odnosno optimalna topologija gipkog mehanizma hvatača (prikazana je gornja polovina hvatača); d) model celog gipkog mehanizma (isprekidanim linijama prikazan je hvatač u deformisanom položaju); e) fizički prototip; f) fizički prototip u deformisanom položaju [100]

U sledećem koraku sinteze potrebno je izvršiti **diskretizaciju oblasti optimizacije** (engl. *parameterization*) (slika 3.8.b). Oblast optimizacije mora biti predstavljena u vidu odgovarajućeg skupa promenljivih veličina koje se mogu optimizovati (optimizacione promenljive). U primeru na slici 3.8.b, oblast optimizacije je diskretizovana mrežom linijskih elemenata, pri čemu ovakav set elemenata ujedno predstavlja i početno rešenje problema optimizacije. Ovde su optimizacione promenljive debljina svakog od pojedinačnih linijskih elemenata; ukoliko bi debljina nekog od elemenata bila jednaka 0, to znači da dati element

treba odstraniti iz početnog seta linijskih elemenata dok ostale vrednosti predstavljaju debljinu linijskog elementa.

Nakon diskretizacije oblasti optimizacije potrebno je primeniti odgovarajući metod za pretragu kako bi pronašli optimalno rešenje postavljenog zadatka sinteze - za slučaj primera prikazanog na slici 3.8. potrebno je naći optimalnu topologiju gipkog mehanizma hvatača koji može da realizuje zadatkom postavljene zahteve. Kao metod pretrage pri sintezi topologije najčešće se primenjuju optimizacione metode kao što su gradijentne [94-96, 98-100] ili heurističke [102, 103, 106, 112, 113, 117, 145, 171, 172] metode optimizacije. Izbor metode zavisi od tipa zadatog problema i načina diskretizacije oblasti optimizacije. Primenom odgovarajuće metode optimizacije dobijeno je i rešenje prikazano na slici 3.8.c. Kao što se može videti sa slike 3.8.c, neki od linijskih elemenata su tokom procesa optimizacije odstranjeni iz početnog seta elemenata, a preostali linijski elementi definišu topologiju gipkog mehanizma hvatača. Dobijeni gipki mehanizam hvatača predstavlja optimalno rešenje za zadati problem (ovde je zbog simetričnosti problema dobijena samo gornja polovina mehanizma hvatača).

Na osnovu dobijenog rešenja napravljen je i model celog mehanizma hvatača (slika 3.8.d). Kako bi se izvršila provera da li dobijeno rešenje gipkog mehanizma realizuje zadate podatke postavke zadatka sinteze, izvršena je analiza rešenja metodom konačnih elemenata (slika 3.8.d).

Na kraju, izrađen je fizički prototip rešenja (slika 3.8.e) čija je funkcionalnost i proverena (slika 3.8.f).

U narednim odeljcima biće detaljnije obrađena prva tri koraka sinteze.

3.1.1. Postavka zadatka sinteze gipkih mehanizama

Prilikom definisanja postavke zadatka sinteze gipkih mehanizama možemo razlikovati sledeće tipove problema sinteze:

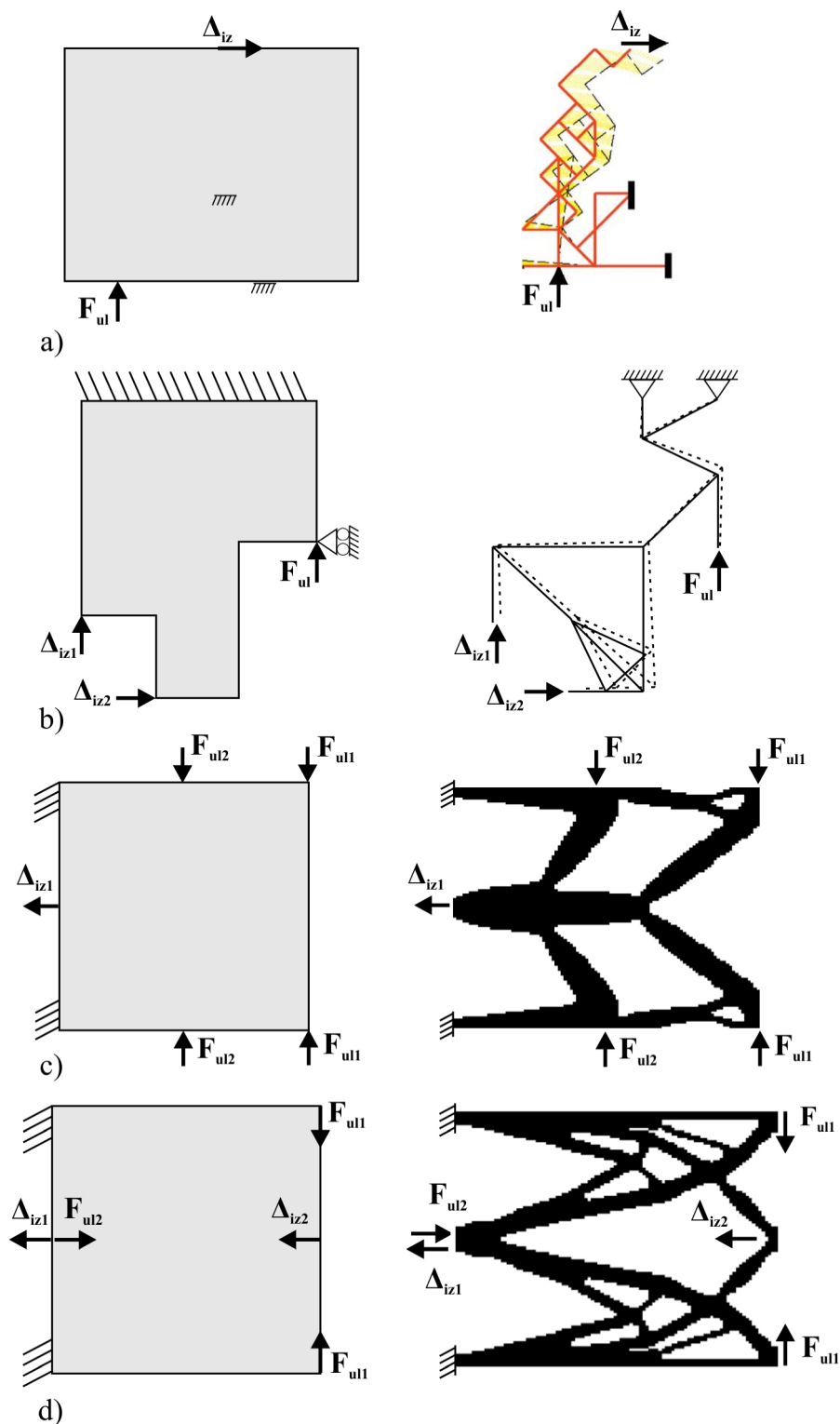
- definisana je jedna napadna tačka pogonske sile/pomeranja i jedna izvršna tačka odnosno pod dejstvom jedne pogonske sile/pomeranja gipki mehanizam treba da ostvari pomeranje jedne izvršne tačke (slika 3.8.a i slika 3.9.a); tip sinteze **jedan ulaz/jedan izlaz (JUJI)** – engl. *singl-input/singl-output (SISO)*,
- definisana je jedna napadna tačka pogonske sile/pomeranja i više izvršnih tačaka odnosno pod dejstvom jedne pogonske sile/pomeranja gipki mehanizam treba da

ostvari pomeranje više izvršnih tačaka (slika 3.9.b); tip sinteze **jedan ulaz/više izlaza (JUVI)** – engl. *singl-input/multiple-output (SIMO)*,

- definisano je više napadnih tačaka pogonskih sila/pomeranja i jedna izvršna tačka odnosno pod dejstvom više pogonskih sila/pomeranja (na više lokacija) gipki mehanizam treba da ostvari pomeranje jedne izvršne tačke (slika 3.9.c); tip sinteze **više ulaza/jedan izlaz (VUJI)** – engl. *multiple-input/singl-output (MISO)*,
- definisano je više napadnih tačaka pogonskih sila/pomeranja i više izvršnih tačaka odnosno pod dejstvom više pogonskih sila/pomeranja (na više lokacija) gipki mehanizam treba da ostvari pomeranje više izvršnih tačaka (slika 3.9.d); tip sinteze **više ulaza/više izlaza (VUVI)** – engl. *multiple-input/multiple-output (MIMO)*.

U literaturi je dosta pažnje posvećeno rešavanju problema sinteze gipkih mehanizama tipa JUJI [94-96, 99, 100, 103, 107], JUVI [98, 100, 104, 107, 164] i VUJI [161, 164-166], međutim malo pažnje je posvećeno rešavanju problema tipa VUVI [143, 164, 166]. Sinteza gipkih sistema, a time i sinteza adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine predstavlja problem sinteze tipa VUVI. Dejstvom više pogonskih sila na strukturu gipkog mehanizma treba ostvariti pomeranje više izvršnih tačaka, a u slučaju adaptivnog gipkog sistema treba ostvariti upravljanje oblikom njegove radne površine. Kod gipkih sistema, pogonske sile obezbeđuju aktuatori, pri čemu je dejstvom većeg broja aktuatora ugrađenih u strukturu gipkog mehanizma moguće ostvariti različite oblike radne površine. Problem sinteze gipkih sistema ne predstavlja klasičan problem sinteze tipa VUVI. Pri sintezi gipkih mehanizama tipa VUVI, projektant mora sam unapred da definiše lokacije napadnih tačaka pogonskih sila dok kod gipkih sistema to nije slučaj. Pri sintezi gipkih sistema vrši se istovremeno određivanje i optimalne topologije gipkog mehanizma i optimalne postavke aktuatora pa nema potrebe da projektant definiše napadne tačke pogonskih sila; projektant treba samo da definiše veličinu pogonske sile koju aktuator ostvaruje.

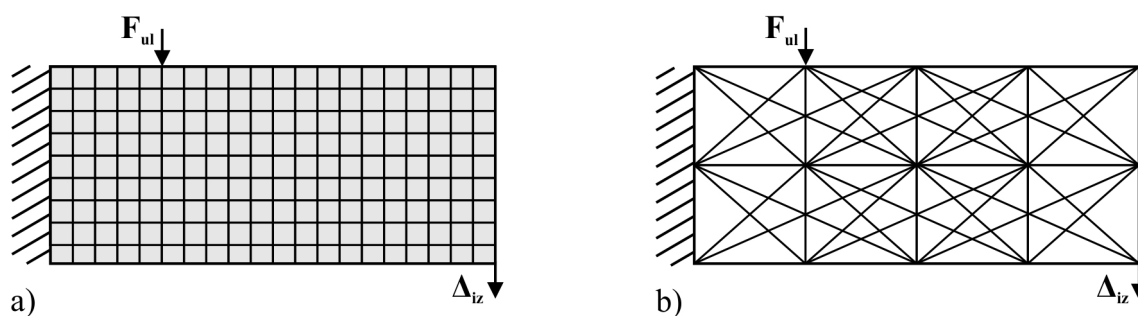
U disertaciji je više pažnje posvećeno rešavanju problema sinteze tipa JUJI, kao osnovnog problema sinteze gipkih mehanizama, i rešavanju problema sinteze tipa VUVI (za gipke sisteme) kao najstroženijeg problema sinteze; problemi tipa JUVI i VUJI se veoma lako rešavaju kada je rešen problem sinteze tipa JUJI, a vrlo često se problemi tipa JUVI mogu svesti i na probleme tipa JUJI. Na osnovu metodologije rešavanja problema tipa JUJI rešen je i problem sinteze gipkih sistema odnosno sinteze adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine (problem tipa VUVI).



slika 3.9. Različiti tipovi problema za različite postavke zadatka sinteze: a) problem tipa jedan ulaz/jedan izlaz (slika levo) i odgovarajuće rešenje gipkog mehanizma (slika desno) [107]; b) problem tipa jedan ulaz/više izlaza (slika levo) i odgovarajuće rešenje gipkog mehanizma (slika desno) [98]; c) problem tipa više ulaza/jedan izlaz (slika levo) i odgovarajuće rešenje gipkog mehanizma (slika desno) [164]; d) problem tipa više ulaza/više izlaza (slika levo) i odgovarajuće rešenje gipkog mehanizma (slika desno) [164]

3.1.2. Diskretizacija oblasti optimizacije

Fizički prostor unutar koga se vrši optimizacija kontinuuma mora biti predstavljen u vidu odgovarajućeg skupa optimizacionih promenljivih odnosno skupa promenljivih veličina koje se mogu optimizovati. Potrebno je stoga diskretizovati oblast optimizacije. U literaturi mogu se sresti dva pristupa diskretizaciji oblasti optimizacije: pristup baziran na **diskretizaciji u vidu seta kontinuum-elemenata** (engl. *continuum-based approach*) [94, 96, 104, 134] (slika 3.10.a) i pristup baziran na **diskretizaciji u vidu seta strukturnih elemenata** (engl. *ground structure approach*) [95, 98, 99, 100, 103, 145] (slika 3.10.b). Kod oba pristupa, oblast optimizacije je diskretizovana setom konačnih elemenata (engl. *finite element mesh*), pri čemu se postupkom optimizacije uklanjaju nepotrebni elementi kako bi se dobila optimalna topologija gipkog mehanizma. Upravo zato što je oblast optimizacije predstavljena setom konačnih elemenata, za strukturnu analizu ponašanja gipkog mehanizma tokom procesa optimizacije koristi se metod konačnih elemenata [152].



slika 3.10. Dva različita pristupa diskretizaciji oblasti optimizacije: a) diskretizacija u vidu seta kontinuum-elemenata; b) diskretizacije u vidu seta strukturnih elemenata

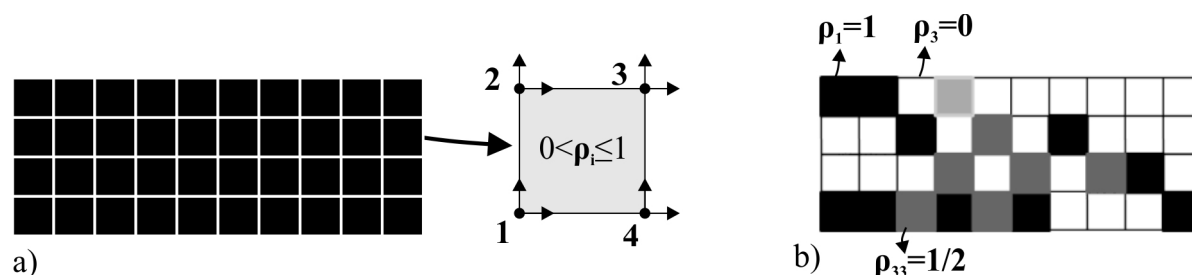
3.1.2.1. Diskretizaciji oblasti optimizacije u vidu seta kontinuum-elemenata

Pri diskretizaciji u vidu seta kontinuum-elemenata oblast optimizacije je diskretizovana setom pravougaonih konačnih elemenata koji sadrže 4 čvorne tačke (engl. *quadrilateral elements*) (slika 3.11.a). Optimizacione promenljive su karakteristike konačnog elementa (npr. gustina materijala elementa). Variranjem ovih karakteristika može se odrediti optimalna raspodela materijala odnosno optimalna topologija strukture. Dve najčešće korišćene metode diskretizacije kontinuum-elemenatima su: **diskretizacija relativne gustine materijala** (engl. *solid isotropic material with penalization - SIMP*) [94, 104, 105] i **metod homogenizacije** (engl. *homogenization method*) [96, 167, 168].

Kod diskretizacije relativne gustine materijala (SIMP metoda) optimizacione promenljive su relativna gustina svakog konačnog elementa (ρ_i). Karakteristika materijala svakog elementa odnosno efektivni Jangov modul elastičnosti i -tog elementa računa se prema izrazu [105]:

$$\begin{aligned} E_i &= \rho_i \cdot E_0 \\ 0 < \rho_i^{\min} &\leq \rho_i \leq 1 \end{aligned} \quad (1)$$

gde E_0 predstavlja stvarni modul elastičnosti materijala. Ukoliko je relativna gustina elementa ρ_i jednaka 1, dati element sastoji se od čvrstog materijala - $E_i=E_0$ pa se element tretira kao materijal i predstavlja deo rezultujućeg optimalnog gipkog mehanizma (slika 3.11.b). Ako tokom procesa optimizacije relativna gustina elementa ρ_i dostigne donju graničnu vrednost (ρ_i^{\min}), dati element ima malu vrednost E_0 pa se smatra šupljinom (slika 3.11.b). Kako bi se izbegli problemi singularnosti u matrici krutosti strukture, za donju graničnu vrednost gustine elementa ρ_i^{\min} ne usvaja se vrednost nula već neka vrednost bliska nuli. Ukoliko se optimizacijom dobije vrednost za ρ_i između donje i gornje granične vrednosti, ovi elementi formiraju prelaznu oblast - predstavljaju elemente koji imaju srednju vrednost gustine i mogu se od strane projektanta protumačiti kao materijal ili šupljina (slika 3.11.b). Na slici 3.11.b, prikazana je ilustracija topologije koja bi se dobila diskretizacijom relativne gustine materijala, pri čemu su crnom bojom označeni elementi koji predstavljaju čvrst materijal, belom bojom – elementi koji predstavljaju šupljine, a sivom bojom – elementi koji imaju srednju vrednost gustine.

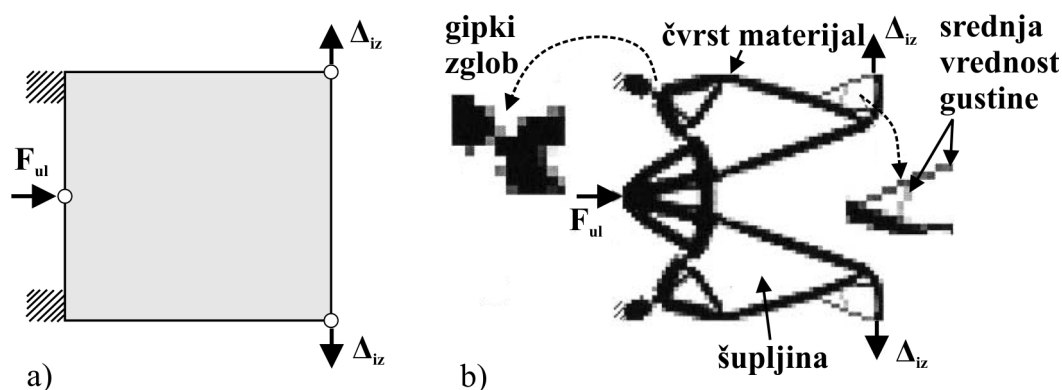


slika 3.11. a) Diskretizacija oblasti optimizacije setom pravougaonih elemenata sa 4 čvorne tačke; b) ilustracija topologije koja bi se dobila diskretizacijom relativne gustine materijala (SIMP metoda), pri čemu elementi crne boje predstavljuju čvrst materijal, elementi bele boje – šupljinu i elementi sive boje – srednju vrednost gustine [91]

Relativna vrednost gustine ρ_i može imati različite vrednosti, pa se optimizacijom može dobiti mnoštvo različitih topologija (oblika). Na slici 3.12, prikazan je jedan primer rešenja gipkog mehanizma koje pod dejstvom pogonske sile u zadatoj napadnoj tački realizuje pomeranje izvršnih tačaka u zadatim pravcima, a koje je dobijeno metodom diskretizacije relativne gustine materijala (crnom bojom je označen čvrst materijal, belom bojom – šupljina, a sivom bojom – srednja vrednost gustine). Ukoliko bi se izradio fizički protip rešenja prikazanog na slici 3.12.b, to bi značilo da treba koristiti materijal, na primer kompozit, koji realizuje datu interpolaciju gustine modela. Izrada strukture sa vrednostima gustine između graničnih vrednosti bila bi skupa. Kako bi se ovo izbeglo, uvodi se odgovarajući faktor penalizacije (p) prilikom izračunavanja krutosti i -tog elementa [94, 104, 105]:

$$k_i = (\rho_i)^p \cdot k_0 \quad (2)$$

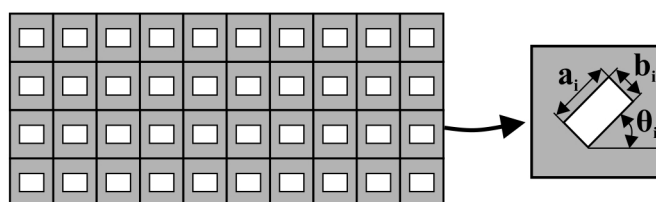
gde je k_0 matrica krutosti elementa od materijala Jangovog modula elastičnosti E_0 , a za p najčešće se usvaja vrednost 3 [94, 104, 105]. Primenom ove tehnike, eliminišu se elementi koji imaju vrednost gustine između graničnih vrednosti odnosno usmeravaju ka bližoj od dve granične vrednosti kako bi se dobile topologije koje nemaju srednju vrednost gustine materijala. Pored ove, u literaturi postoje i mnoge druge tehnike koje se bave problemom smanjenja broja elemenata koji imaju srednju vrednost gustine materijala [105, 169].



slika 3.12. Primer rešenja gipkog mehanizma dobijenog metodom diskretizacije srednje vrednosti gustine (SIMP metoda): a) postavka zadatka sinteze; b) dobijeni gipki mehanizam [104]

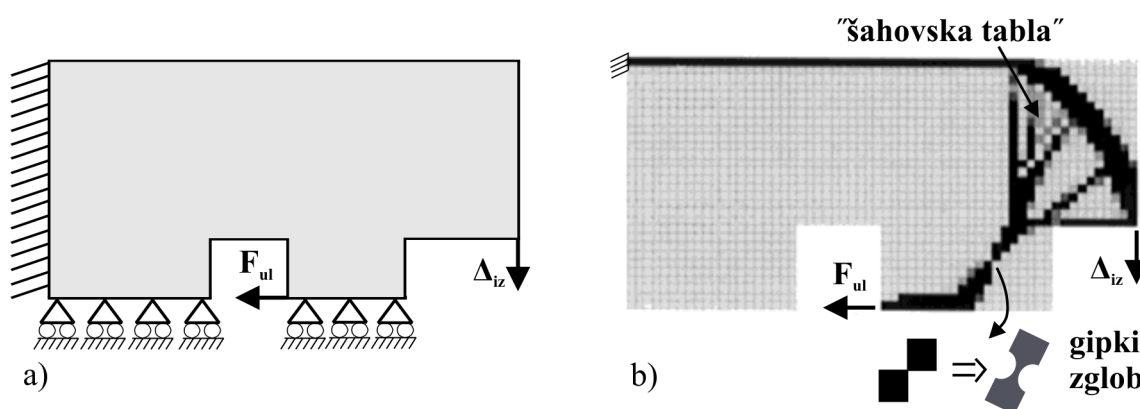
Za razliku od metode diskretizacije relativne gustine materijala, kod metode homogenizacije oblast optimizacije je diskretizovana konačnim elementima koji sadrže šupljine (slika 3.13.). Ovde su optimizacione promenljive dimenzije i orijentacija

pravougaone šupljine u elementu i : a_i , b_i i θ_i (slika 3.13.). Na osnovu dimenzija i orijentacije šupljine u elementu, sračunava se efektivna vrednost karakteristike materijala elementa odnosno homogenizovan tenzor elastičnosti E^H . Ukoliko je vrednost za $a_i=b_i=0$, konačni element ne sadrži šupljinu odnosno ispunjen je materijalom i usvaja se kao čvrsti element, a ukoliko je vrednost za $a_i=b_i=1$, konačni element je u potpunosti ispunjen šupljinom (veličina šupljine je dostigla veličinu konačnog elementa koji u tom slučaju ima malu vrednost E^H i smatra se šupljinom u strukturi). Vrednosti za a_i i b_i između 1 i 0 definišu poroznu strukturu.



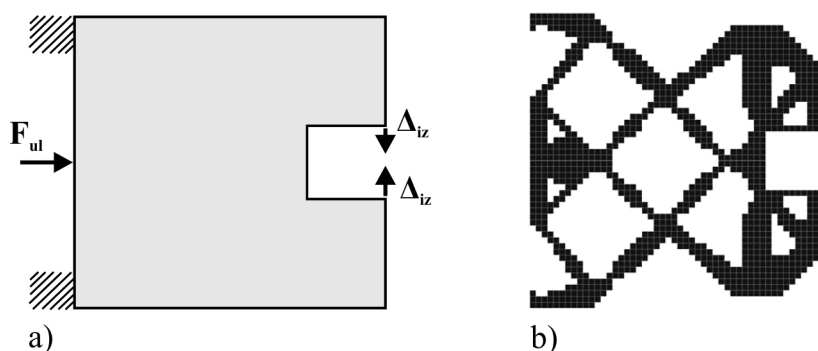
slika 3.13. Diskretizacija oblasti optimizacije konačnim elementima koji sadrže šupljine (metod homogenizacije)

Variranjem dimenzija i orijentacije šupljina mogu se dobiti različite optimalne topologije struktura. Primer rešenja gipkog mehanizma hvatača dobijenog metodom homogenizacije prikazan je na slici 3.14.; kao što se može videti, dobijaju se slična rešenja kao i primenom SIMP metode. Kod metode homogenizacije se takođe javlja problem konačnih elemenata koji imaju srednju vrednost gustine. Kako bi se ovo izbeglo može se, slično kao i kod SIMP metode, koristiti penalizacija (jednačina 2).



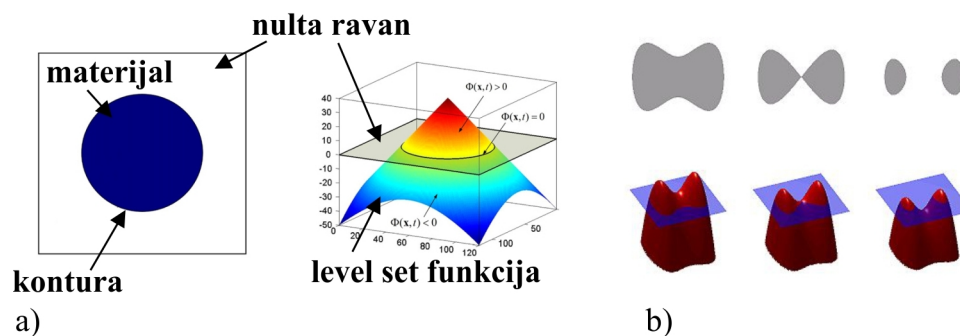
slika 3.14. Rešenje gipkog mehanizma hvatača dobijenog metodom diskretizacije konačnim elementima koji sadrže šupljine (metod homogenizacije): a) postavka zadatka sinteze (zbog simetričnosti problema prikazana je samo gornja polovina oblasti optimizacije); b) dobijeno rešenje gipkog mehanizma hvatača (gornja polovina) [96]

Pored SIMP i metode homogenizacije postoje i mnoge druge modifikacije ovih metoda diskretizacije oblasti optimizacije [123, 127]. Jedna od takvih je i **ESO metoda** (engl. *Evolutionary Structural Optimization*) [170] kod koje konačni elementi imaju diskretne vrednosti gustine ρ_i (1 ili ρ_i^{\min}) i predstavljaju ili čvrst materijal ili šupljinu odnosno ne mogu imati vrednosti gustine između donje i gornje granice. Na slici 3.15. prikazano je rešenje gipkog mehanizma hvatača dobijenog ESO metodom. Razvijene su i razne modifikacije i proširenja ove metode kao što su: **aditivna ESO metoda – AESO** (engl. *additive ESO*) [117, 170, 172, 173] ili **bi-direkciona ESO metoda – BESO** (engl. *bi-directional ESO*) [131, 170, 171]. Kod AESO metode inicijalano su napadne tačke pogonskih sila, oslonci i izvršne tačke spojeni minimalnim brojem elemenata, a zatim se tokom optimizacije dodaju novi elementi kako bi se formirala konačna topologija strukture. BESO metoda eliminiše nepotrebne elemente, ali u isto vreme dodaje nove elemente tamo gde je potrebno, tako da ona u stvari predstavlja kombinaciju ESO i AESO metode.



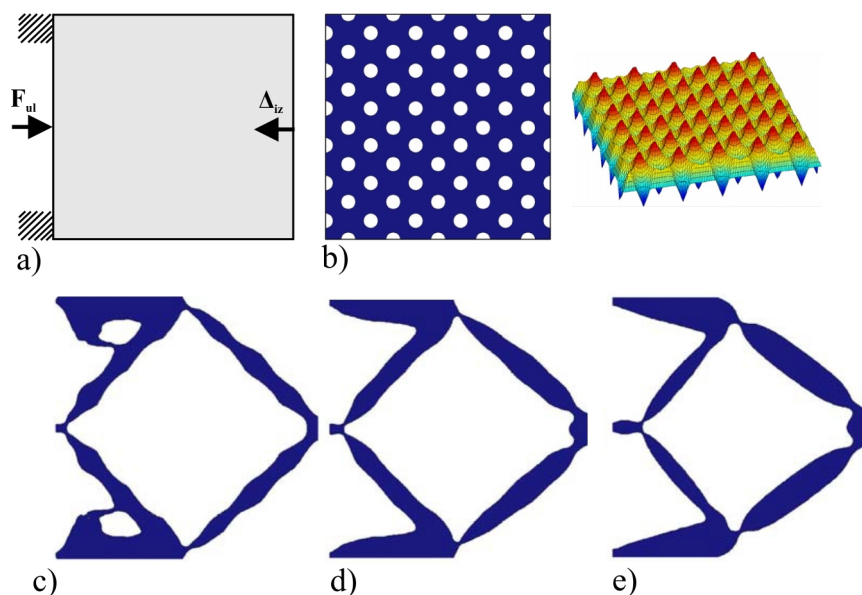
slika 3.15. Rešenje gipkog mehanizma hvatača dobijenog AESO metodom: a) postavka zadatka sinteze; b) dobijeno rešenje gipkog mehanizma hvatača [117]

Pored gore navedenih metoda diskretizacije u vidu seta kontinuum-elemenata za diskretizaciju oblasti optimizacije razvijena je i – **metoda nultog nivoa** (engl. *Level Set method*) [114-116]. Kod ove metode je oblast optimizacije predstavljena u vidu niza funkcija oblika kao na slici 3.16.; topologija kontinuuma je definisana funkcijama koje prekrivaju celu oblast optimizacije (slika 3.17.b). Funkcija predstavlja površinu koja, kada se preseče horizontalnom ravni, tzv. nultom ravni (engl. *level set*), deli oblast optimizacije na dva dela: deo iznad i deo ispod ove površine. Ova dva dela se posmatraju kao šupljine, a u preseku nulte ravni i funkcije dobija se odgovarajuća kontura koja je ispunjena čvrstim materijalom (slika 3.16.a). Translatornim "pomeranjem" funkcije, nulta ravan seče funkciju na različitim mestima tako da se formiraju različiti oblici konture koja je ispunjena materijalom kao i različiti oblici šupljine (slika 3.16.b).



slika 3.16. Princip metode nultog nivoa: a) formiranje konture ispunjene materijalom presekom, nulte ravni i *level set* funkcije [114]; b) translatorno "pomeranje" funkcije kako bi se obrazovale različite konture ispunjene materijalom [174]

U toku procesa optimizacije, variranjem položaja pojedinih funkcija, formiraće se na nultoj ravni i optimalan oblik strukture. Na slici 3.17., prikazano je rešenje gipkog invertora pomeranja dobijenog primenom "metode nultog nivoa".



slika 3.17. Sinteza gipkog invertora pomeranja primenom "metode nultog nivoa": a) postavka zadatka sinteze; b) diskretizacija oblasti optimizacije nizom funkcija oblika kao na slici 3.16.a. (na slici desno prikazana je diskretizacija oblasti optimizacije u prostoru); c) topologija mehanizma nakon 30 iteracija optimizacije; d) nakon 85 koraka; e) konačna topologija gipkog invertora pomeranja [116]

Metode diskretizacije oblasti optimizacije u vidu seta kontinuum-elemenata imaju i određene nedostatke. Ove metode često vode ka rešenjima gipkih mehanizama sa koncentrisanom gipkošću (slika 3.12., slika 3.14., slika 3.15. i slika 3.17.). Kako SIMP i

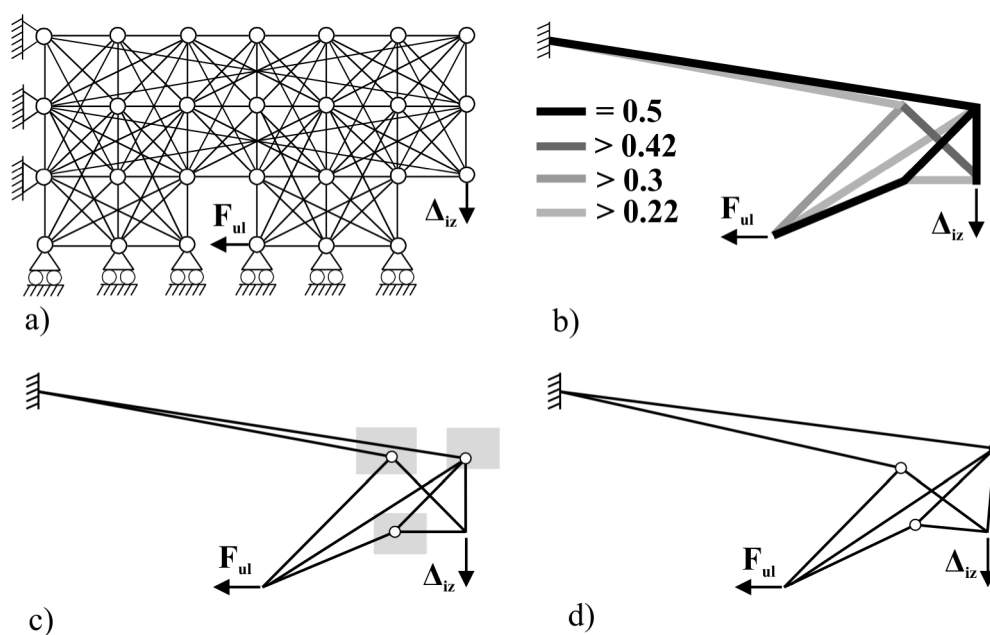
metod homogenizacije koriste za diskretizaciju pravougaone konačne elemente, to se često dobijaju rešenja kod kojih su pojedini elementi spojeni samo jednim čvorom, pri čemu se čvorna tačka ponaša kao obrtni zglob (slika 3.12.b, slika 3.14.b, slika 3.15.b). Fizička realizacija ovakvih struktura je neizvodljiva pa se kontakti između dva elementa često zamenjuju gipkim zglobovima (slika 3.14.b). Kao što je već bilo reči na početku poglavlja, na mestima gipkih zglobova može se javiti prevelika koncentracija napona usled koje dolazi do otkaza zgloba, a samim tim i otkaza celog mehanizma. Pored ovoga, mogu se javiti i površine koje sadrže mnogo elemenata sa jednim čvorom (mnogo zglobova sa jednim čvorom), koje izgledaju kao "šahovska tabla" (slika 3.14.b). U literaturi su razvijene mnoge metode i algoritmi za rešavanje ovog problema [105, 175-179], međutim, oni vrlo često komplikuju sam proces optimizacije [91, 92] i u mnogim slučajevima je potrebno dobijena rešenja dodatno modifikovati. Kod "metode nultog nivoa" ne javljaju se problemi elemenata koji su spojeni jednim čvorom i problem "šahovske table", međutim, ova metoda takođe često vodi ka rešenjima gipkih mehanizama sa koncentrisanom gipkošću (slika 3.17.e).

3.1.2.2. Diskretizaciji oblasti optimizacije u vidu seta strukturnih elemenata

Za razliku od diskretizacije u vidu seta kontinuum-elemenata gde se koriste pravougaoni konačni elementi, kod diskretizacije u vidu seta strukturnih elemenata oblast optimizacije je diskretizovana odgovarajućim **brojem čvorova** (engl. *nodes*) i mrežom **linijskih konačnih elemenata** koji povezuju ove čvorove (slika 3.18.a). Linijski elementi predstavljaju strukturne elemente u vidu **štapova/greda** (engl. *beam elements*) [152] ili u vidu **nosaa** (engl. *truss elements*) [152]. Debljina svakog pojedinačanog linijskog elementa t_i , ili veličina površine poprečnog preseka linijskog elementa A_i , predstavlja optimizacionu promenljivu. Ukoliko se optimizacijom dobije da je vrednost debljine nekog elementa t_i (ili površina A_i) jednaka 0, to znači da dati element treba odstraniti iz strukture dok ostale vrednosti definišu debljinu linijskog elementa (ili veličinu površine njegovog poprečnog preseka). Kako bi se pri optimizaciji izbegle numeričke poteškoće (kao što je singularnost matrice krutosti), vrlo često se za donju granicu debljine elementa (površine poprečnog preseka elementa) ne uzima vrednost 0, već neka vrednost bliska nuli. Pri optimizaciji najčešće se definiše donja i željena gornja granica debljine linijskih elemenata (donja i gornja granica veličine površine linijskih elemenata). Početni set linijskih elemenata predstavlja početno rešenje zadatog problema optimizacije. Variranjem debljine elemenata (površine poprečnog preseka) između donje i gornje granice, neki elementi biće odstranjeni iz početnog seta elemenata (elementi čija je

debljina bliska donjoj granici debljine), dok preostali linijski elementi definišu topologiju gipkog mehanizma (slika 3.18.b). Debljine (veličine površine poprečnog preseka) koje pri optimizaciji ne dostignu donju ili gornju graničnu vrednost imaju vrednosti između ovih granica, definišući na taj način različite debljine segmenata gipkog mehanizma. Na ovaj način mogu se formirati različite optimalne topologije gipkih mehanizama za zadatak postavku zadatka sinteze. Na slici 3.18.b prikazan je jedan primer rešenja gipkog mehanizma koji se dobija kada je oblast optimizacije diskretizovana setom strukturnih elemenata, pri čemu je različitim nijansama sive boje označena različita debljina strukturnih elemenata.

Kako bi se pretražio celi prostor oblasti optimizacije, moguće je pojedinim čvorovima dobijene topologije gipkog mehanizma dozvoliti da budu aktivni i da se pomeraju unutar definisanog prostora (slika 3.18.c). Na ovaj način moguće je dalje poboljšati dobijena rešenja gipkih mehanizama (slika 3.18.d) [97].



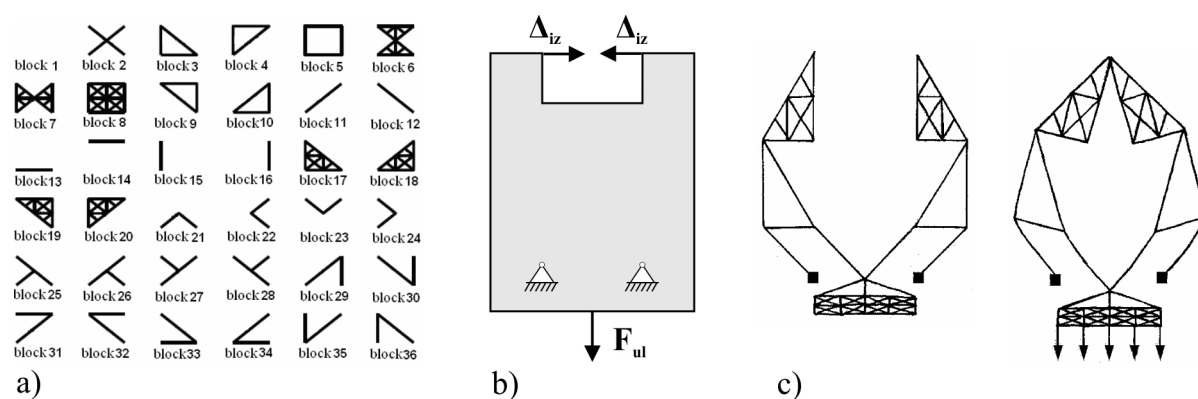
slika 3.18. Sinteza gipkog mehanizma hvatača kada je oblast optimizacije diskretizovana setom strukturnih elemenata: a) postavka zadatka sinteze i početni set linijskih elemenata; b) rešenje gipkog mehanizma hvatača [95]; c) definisanje prostora unutar koga je pojedinim čvorovima dozvoljeno da se pomeraju (ovde je prikazana samo ilustracija koncepta); d) poboljšano rešenje gipkog mehanizma hvatača (prikazana je samo ilustracija rešenja)

U literaturi se, pri sintezi gipkih mehanizama, kao linijski elementi koriste i strukturni elementi u vidu štapa [97, 99, 100, 103, 145] i strukturni elementi u vidu nosača [95, 98, 99]. Za razliku od elemenata u vidu nosača koji trpe samo aksijalna opterećenja, strukturni

elementi u vidu štapa mogu da trpe i aksijalna i opterećenja na savijanje, pa mogu preciznije da opišu ponašanje elastičnih segmenata gipkih mehanizama koji ostvaruju svoju pokretljivost uglavom zahvaljujući savijanju.

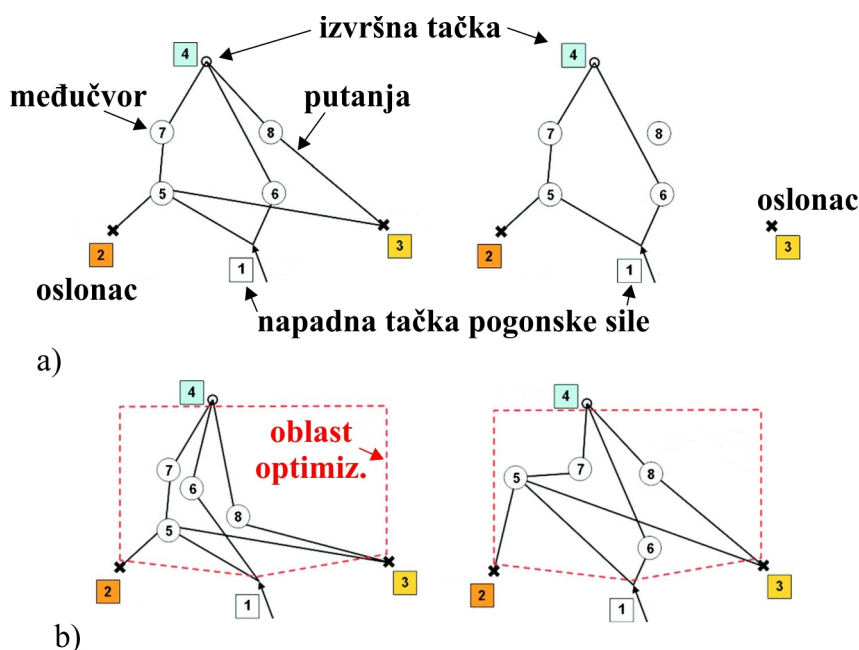
Glavna prednost diskretizacije oblasti optimizacije u vidu seta strukturnih elemenata u odnosu na diskretizaciju u vidu seta kontinuum-elemenata je ta što ona vodi ka rešenjima gipkih mehanizama sa raspedeljenom gipkošću (zbog samog načina i prirode diskretizacije dobijaju se rešenja gipkih mehanizama koja sadrže duge i tanke elastične segmente) (slika 3.8. i slika 3.18.). Prednost ove metode leži i u tome što se pored optimizacije topologije istovremeno vrši i optimizacija veličine segmenata gipkog mehanizma (optimizuju se dimenzije poprečnog preseka linijskih elemenata). Sa stanovišta razvoja adaptivnog gipkog sistema, gipki mehanizam treba modelirati linijskim elementima odnosno štapovima, zato što se savijanjem segmenata u vidu štapova mogu postići različiti oblici radne površine. Zbog svega ovoga, u disertaciji će biti korišćen metod diskretizacije oblasti optimizacije u vidu seta strukturnih elemenata.

U literaturi se mogu naći i druge metode koje se baziraju na diskretizaciji setom strukturnih elemenata, kao što su: **metod primene elastičnih blokova** *FlexIn* (engl. *flexible building blocks*) [180-183] i **load path representation** metoda [5, 112]. Kod metode primene elastičnih blokova, optimizacione promenljive su pojedini gipki blokovi koji se sastoje od linijskih strukturnih elemenata spojenih na različite načine, pri čemu jedan blok ne sadrži elemente i predstavlja šupljinu. Kombinacijom različitih gipkih blokova, koji se biraju iz biblioteke blokova, tokom procesa optimizacije formira se i gipki mehanizam (slika 3.19.).

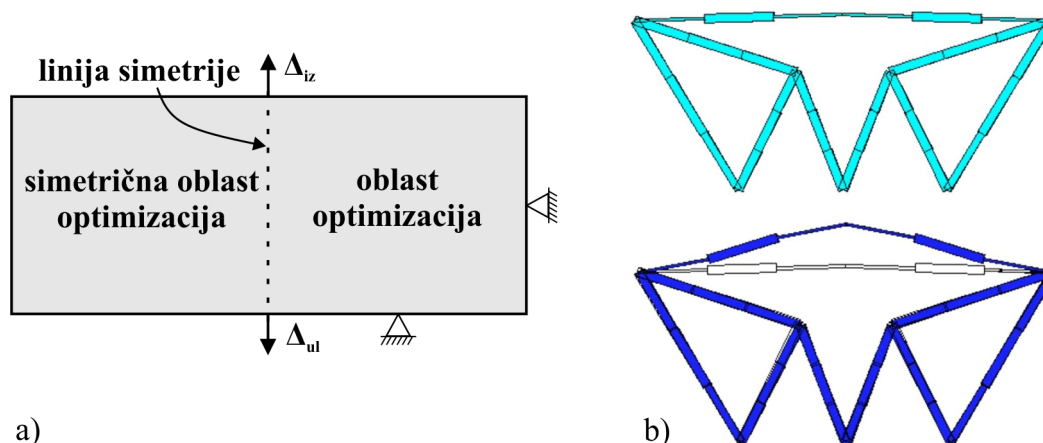


slika 3.19. Rešenje gipkog mehanizma hvatača dobijenog metodom primene elastičnih bolokova: a) biblioteka elastičnih blokova [180]; b) postavka zadatka sinteze; c) dobijeni gipki mehanizam hvatača [183]

Razvoj adaptivnog gipkog sistema prevazilazi mogućnosti metode elastičnih blokova zato što svaki akuator u strukturi drugačije interaguje sa ostalim elementima odnosno postavka akuatora utiče na formiranje topologije i obrnuto. Upravo zbog ovoga, ovaj metod neće biti primenjen u disertaciji. Kod *load path representation* metode, oblast optimizacije je diskretizovana početnim setom putanja (linijskim elementima) koje preko odgovarajućeg seta međučvorova povezuju napadnu tačku pogonske sile (ulaz), izvršnu tačku (izlaz) i oslonac (slika 3.20.). Za svaku putanju koja povezuje ulaz i izlaz, ulaz i oslonac, oslonac i izlaz, postoji odgovarajuća optimizaciona promenljiva $pTop_i$ koja može imati vrednost 0 (putanja je uklonjena iz početnog seta putanja) ili 1 (putanja je zadržana) (slika 3.20.a). Pored ovih postoji i dodatna optimizaciona promenljiva $pathSeq$ koja definiše sekvencu putanje odnosno definiše preko kojih međučvorova je povezan ulaz sa izlazom, ulaz sa osloncem i oslonac sa izlazom (slika 3.20.b). Variranjem promenljivih $pTop_i$ i $pathSeq$ mogu se formirati različite topologije gipkog mehanizma (slika 3.21.). Ovaj metod diskretizacije oblasti optimizacije je korišćen pri sintezi gipkih mehanizama, ali ova metoda se može primeniti i pri sintezi adaptivnog gipkog sistema (u literaturi još uvek neobrađeno).



slika 3.20. Ilustracija metode diskretizacije oblasti optimizacije početnim setom putanja: a) početni set putanja prikazan na slici levo i uklanjanje pojedinih putanja iz početnog seta (slika desno); b) variranje položaja međučvorova [112]



slika 3.21. Rešenje gipkog pojačavača ulaznog pomeranja dobijenog diskretizacijom oblasti optimizacije početnim setom putanja: a) postavka zadatka sinteze; b) gipki pojačivač ulaznog pomeranja prikazan u nedeformisanom (slika gore) i deformisanom položaju (slika dole) [112]

3.1.3. Optimizacija

Postupak optimizacije pri sintezi gipkih mehanizama može se podeliti na tri faze:

- izbor optimizacionih promenljivih,
- definisanje funkcije cilja i ograničenja, i
- izbor metode optimizacije.

Izbor optimizacionih promenljivih zavisi od načina diskretizacije oblasti optimizacije. Ovaj problem je detaljno obrađen u prethodnom odeljku. Podsetićemo ovde samo da se za diskretizaciju oblasti optimizacije u disertaciji koristi metod diskretizacije u vidu seta strukturnih elemenata pa su optimizacione promenljive debljina svakog od linijskih elemenata.

Da bi se realizovala optimizacija, potrebno je definisati funkciju cilja koja bi vodila optimizaciju ka optimalnom rešenju. Funkcija cilja predstavlja kriterijum koji ocenjuje performanse dobijene strukture tokom procesa optimizacije. Optimizacija gipkih mehanizama predstavlja problem optimizacije sa ograničenjima i može se formulisati na sledeći način:

Odrediti optimalne vrednosti optimizacionih promenljivih tako da funkcija cilja $f(\mathbf{X})$ ima minimalnu vrednost, pri čemu je potrebno zadovoljiti:

- ograničenja u obliku nejednakosti $\mathbf{g}_i(\mathbf{X}) \leq 0, \quad (i = 1, 2, \dots, m),$
- ograničenja u obliku jednakosti $\mathbf{h}_j(\mathbf{X}) = 0, \quad (j = 1, 2, \dots, p),$

gde je:

\mathbf{X} – n -dimenzioni vektor optimizacionih promenljivih x_n .

Funkciju cilja treba formulisati tako da ona reflektuje sve zahteve koji se odnose na funkciju mehanizma ili njegove karakteristike kao što su fleksibilnost, krutost, težina i sl. Jedna od ovih karakteristika ili više njih, u zavisnosti od primarnog zadatka sinteze, koriste se za definisanje funkcije cilja. Ostali kriterijumi biće uključeni u ograničenja u obliku jednakosti ili nejednakosti. Primer za ovo može biti minimizacija težine strukture uz zadovoljenje zahteva fleksibilnosti koji može biti definisan kao ograničenje u obliku jednakosti [93].

Gipki mehanizmi ostvaruju kretanje zahvaljujući elastičnoj deformaciji određenih segmenata strukture, pa je jedan od važnih ciljeva da gipki mehanizam bude dovoljno fleksibilan kako bi mogao da realizuje zahtevano pomeranje; ovo predstavlja kinematski zahtev [92, 95, 97, 99]. U isto vreme, gipki mehanizam mora da poseduje i dovoljnu krutost kako bi mogao da izdrži odgovarajuće opterećenje odnosno da se suprotstavi sili kojom neki spoljašnji objekat deluje na tačku koju treba da pomeri (slično kao kod krutočlanih mehanizama koji prenose dejstvo sile od pogonskog do izvršnog člana mehanizma); ovo predstavlja strukturni zahtev [92, 94, 99]. Na primer, gipki mehanizam hvatača (slika 3.18.) treba da bude dovoljno fleksibilan kako bi elastičnom deformacijom realizovao hvatanje objekta (kinematski zahtev), ali u isto vreme mora da bude i dovoljno krut kako bi izdržao dejstvo spoljašnjih i sila reakcije koje se suprotstavljaju kretanju (strukturni zahtev). Sukobljenost ova dva cilja stvara prostor za optimizaciju [93]. U literaturi, su razvijene različite formulacije funkcije cilja koje vode ka rešenju gipkih mehanizama koji mogu da u određenoj meri ispune ova dva sukobljena zahteva [92, 95-100, 105, 107].

Pri sintezi gipkih mehanizama najčešće je cilj optimizacije povećanje ulaznog (pogonskog) pomeranja (prenosni odnos gipkog mehanizma, engl. *geometrical advantage*) [92, 100, 103, 145], pri čemu je funkcija cilja formulisana izrazom:

$$\text{maksimizovati } f = \frac{\text{pomeranje na izlazu}}{\text{pomeranje na ulazu}} = \frac{\Delta_{iz}}{\Delta_{ul}} \quad (3)$$

Pored ovoga, cilj može biti i pojačanje dejstva pogonske sile (engl. *mechanical advantage*) [92, 94, 100, 103], pri čemu je u tom slučaju funkcija cilja formulisana izrazom:

$$\text{maksimizovati } f = \frac{\text{sila na izlazu}}{\text{sila na ulazu}} = \frac{F_{iz}}{F_{ul}} \quad (4)$$

Gipki mehanizmi, pri prenosu sila i transformaciji kretanja, konvertuju uloženu energiju (ulaznu energiju) na odgovarajući način u rad na izlazu (proizvod sile i pomeranja). Deo uložene energije (engl. *input energy*) troši se na deformaciju mehanizma (engl. *strain energy*), dok se ostatak energije prenosi na izvršnu tačku (engl. *output load*). Energija akumulirana deformacijom mehanizma se često smatra gubitkom energije (engl. *energy loss*) pošto se ne prenosi do izvršne tačke [93]. Cilj optimizacije može biti i smanjenje gubitka energije odnosno energije akumulirane deformacijom mehanizma ili maksimiziranje energije koja mehanizmu stoji na raspolaganju u izvršnoj tački (energetska efikasnost kao funkcija cilja). U literaturi su razvijene različite formulacije funkcije cilja koje vode ka rešenju gipkih mehanizama kod kojih je smanjenja energija akumulirana deformacijom [97, 103, 105]. Opšti oblik funkcije cilja energetske efikasnosti strukture definisan je izrazom:

$$\text{maksimizovati } f = \text{energetska efikasnost} \left\{ = \frac{\text{energija na izlazu}}{\text{energija na ulazu}} \right\} \quad (5)$$

Više o formulacijama funkcije cilja pri sintezi gipkih mehanizama moguće je naći u [91, 92, 105]. Ukoliko treba optimizovati strukturu sa više aspekata, funkcija cilja uključuje više kriterijuma (višekriterijumska formulacija funkcije cilja) [93].

Definisanje funkcije cilja u velikoj meri zavisi od tipa problema koji treba rešiti odnosno od zahteva postavljenih zadatkom sinteze, a koje mehanizam treba da ispuni. Na projektantu ostaje da sam odluči koja od formulacija funkcije cilja najbolje kvantifikuje ono što je gipkim mehanizmom potrebno ostvariti (izvršno pomeranje, izvršnu silu, promenu oblika itd.). U disertaciji je više pažnje posvećeno sintezi gipkih mehanizama koji mogu da ostvare povećanje ulaznog pomeranja pa će funkcija cilja imati oblik kao u jednačini (3). Za razvoj adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine, funkcija cilja mora imati fundamentalno drugačiji oblik od oblika funkcije cilja pri sintezi klasičnih gipkih mehanizama. U disertaciji će posebna pažnja biti posvećena formulaciji funkcije cilja koja bi vodila ka rešenju adaptivnog gipkog sistema, što će detaljnije biti objašnjeno u nekom od narednih odeljaka.

Nakon definisanja funkcije cilja i ograničenja, potrebno je primeniti odgovarajući metod za pretragu kako bi pronašli optimalno rešenje (optimalnu topologiju gipkog mehanizma). Upravo zbog velikog broja optimizacionih promenljivih odnosno velikog prostora promenljivih koji treba pretražiti, problemi sinteze topologije se rešavaju primenom

optimizacionih metoda kao što su **gradijentne** [94-96, 98-100, 105, 114, 123, 184] i **heurističke** [103, 106, 112, 145, 185-205] metode optimizacije.

U gradijentne metode optimizacije spadaju npr. **sekvencijalno linearno programiranje** – **SLP** (engl. *sequential linear programming*) [94-96, 98, 100], **sekvencijalno kvadratno programiranje** – **SQP** (engl. *sequential quadratic programming*) [99, 105], **metoda pokretljivih asimptota** – **MMA** (engl. *method of moving asymptotes*) [92, 123, 114, 184], dok u heurističke metode optimizacije spadaju npr. **genetski algoritmi** – **GA** (engl. *genetic algorithms*) [103, 106, 141], **simulirano kaljenje** – **SA** (engl. *simulated annealing*) [185-187], **algoritam kolonije mrava** – **ACO** (engl. *ant colony optimization*) [188-195], **optimizacija rojem čestica** – **PSO** (engl. *particle swarm optimization*) [196-199] i **ćelijski automat** – **CA** (engl. *cellular automata*) [200-205]. Izbor metode optimizacije u velikoj meri zavisi od prirode problema koji treba rešiti i broja optimizacionih promenljivih. Gradijentne metode predstavljaju dobar izbor kada optimizacione promenljive kontinualno menjaju svoju vrednost (optimizacione promenljive mogu imati bilo koju vrednost između definisane donje i gornje granice, uključujući i granične vrednosti), zato što brzo konvergiraju ka rešenju. Ove metode daju rešenja kada se cela funkcija cilja može sračunati brzo i lako za ceo prostor optimizacionih promenljivih i kada je moguće izračunati izvod funkcije cilja u zatvorenom obliku, što može značajno ubrzati konvergenciju procesa optimizacije ka optimalnom rešenju. Međutim, kada funkcija cilja i ograničenja nisu eksplicitne funkcije optimizacionih promenljivih, gradijente nije lako sračunati, što predstavlja i glavni nedostatak ovih metoda. Takođe, ove metode vode jedino ka nalaženju lokalnog minimuma funkcije cilja. Pored ovoga, kada su optimizacione promenljive, kao u disertaciji, debljine strukturnih elemenata (pri čemu su one kontinualne promenljive), gradijentne metode često vode ka rešenju gipkih mehanizama kod kojih se ne može razlikovati koje elemente je potrebno zadržati, a koje odstraniti iz strukture. Vrlo često se dobijaju rešenja gipkih mehanizama koji sadrže elemente čija debljina nije dovoljno blizu donjoj granici debljine da bi tokom optimizacije bili odstranjeni iz strukture, a sa druge strane nije ni dovoljno blizu gornjoj granici debljine da bi takvi elementi sa sigurnošću mogli da se smatraju segmentima gipkog mehanizma; npr. ukoliko bi donja granica debljine bila $2 \cdot 10^{-5}$ mm, često se dobijaju vrednosti debljine 0.1 mm. Ovakva rešenja gipkih mehanizama je teško protumačiti i ona često dovode do situacije gde nije jasno koji elementi doprinose funkciji mehanizma, a koje elemente je potrebno odstraniti iz strukture, pri čemu ovo ostaje na projektantu da sam odluči na osnovu svoje intuicije. Kako bi se ovo izbeglo, koriste se optimizacione promenljive (debljine elemenata) koje imaju diskretne vrednosti (npr. 0, 0.5, 0.7 mm). Međutim, kada je parametrizacija oblasti optimizacije diskretna (optimizacione

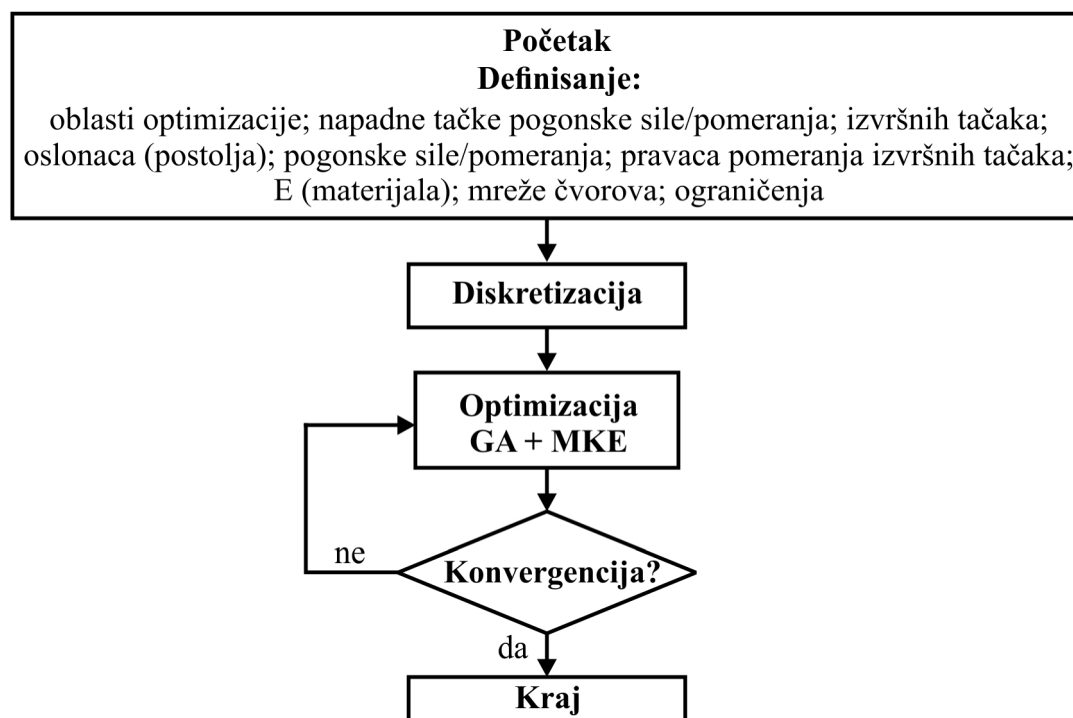
promenljive imaju diskretne vrednosti), gradijentne metode su često od malog značaja jer ne vode optimizaciju ka rešenju [92].

U slučajevima kada se radi o diskretnom problemu, koristi se drugačiji set algoritama odnosno metoda optimizacije. Heurističke metode optimizacije rade na drugačijem principu od gradijentnih metoda; ne zahtevaju izračunavanje gradijenata i konvergiraju ka globalnom optimumu. Od heurističkih metoda, genetski algoritmi predstavljaju najčešće korišćene algoritme za sintezu topologije gipkih mehanizama sa raspodeljenom gipkošću [103, 106, 107, 109, 145], zbog njihovih mnogobrojnih prednosti; u literaturi su ređe korišćeni drugi tipovi heurističkih metoda kao što je algoritam kolonije mrava [193-195], optimizacija rojem čestica [199] i ćelijski automat [205] jer nisu dobijeni značajno bolji rezultati. Genetski algoritmi spadaju u grupu evolucionih algoritama (rade na principu Darvinove teorije evolucije) koji predstavljaju metod veštačke inteligencije i vrše globalnu pretragu optimalnog rešenja unutar velikog prostora optimizacionih promenljivih pa su pogodni i za sintezu gipkih mehanizama kada je oblast optimizacije diskretizovana velikim brojem linijskih elemenata, a samim tim i velikim brojem optimizacionih promenljivih. Kod genetskih algoritama funkcija cilja ne mora biti eksplicitna funkcija optimizacionih promenljivih, pri čemu funkcija cilja može biti definisana na najrazličitije načine odnosno moguće je u funkciju cilja uključiti velik broj različitih zahteva što ih čini idealnim za razvoj gipkih mehanizama, ali i adaptivnog gipkog sistema. Pored ovoga, genetski algoritmi izbegavaju problem elemenata čija debljina nije blizu ni donjoj ni gornjoj graničnoj vrednosti debljine jer koriste diskretne vrednosti optimizacionih promenljivih pa se dobijaju rešenja gipkih mehanizama koje je lako analizirati i fizički izraditi. Upravo zbog svega predhodno navedenog, u ovoj disertaciji se kao metod optimizacije koriste genetski algoritmi; više reči o genetskim algoritmima biće u narednim odeljcima.

3.2. Algoritam sinteze gipkih mehanizama

Na osnovu metodologije opisane u prethodnim odeljcima, u disertaciji je razvijen odgovarajući optimizacioni algoritam (u vidu kompjuterskog koda u MATLAB-u) koji automatski generiše optimalna rešenja gipkih mehanizama (optimalnu topologiju gipkih mehanizama sa optimalnom debljinom segmenata) za zadatu postavku problema sinteze (slika 3.22.) [145]. Na osnovu zahteva (zadatih parametara) unetih od strane korisnika (veličina i tip oblasti optimizacije, veličina mreže kojom je oblast optimizacije diskretizovana, lokacija napadnih tačaka pogonskih sila/pomeranja, lokacija izvršnih tačka,

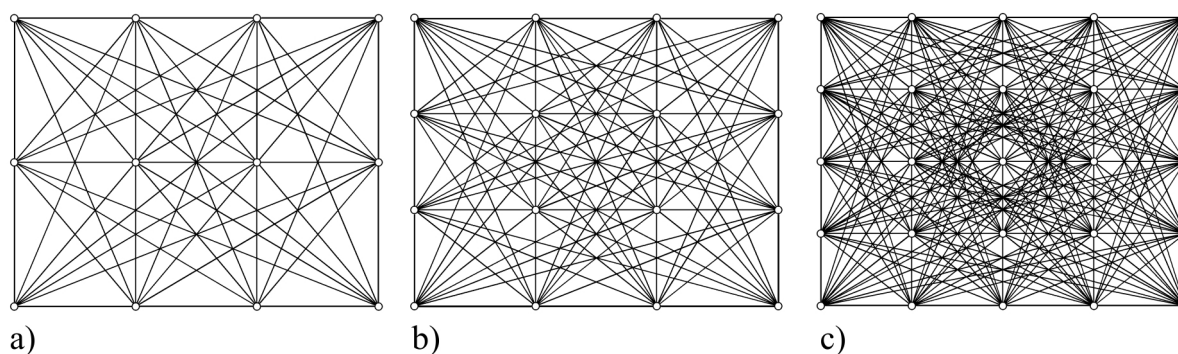
veličina, smer i pravac pogonskih sila/pomeranja, željeni smer i pravac pomeranja izvršnih tačaka, karakteristika materijala – Jangov modul elastičnosti E , minimalno pomeranje koje izvršne tačke treba da ostvare i ostala ograničenja), algoritam vrši diskretizaciju oblasti optimizacije setom linijskih elemenata što predstavlja početno rešenje zadanog problema. Zatim, uz pomoć optimizacione rutine - genetskih algoritama i analize MKE, razvijeni algoritam vrši pretragu unutar oblasti optimizacije, kako bi pronašao optimalno rešenje. Nakon konvergencije procesa optimizacije, algoritam nudi optimalno rešenje gipkog mehanizma (optimalnu topologiju, ali i optimalne debljine segmenata gipkog mehanizma) koji može da realizuje zadatkom postavljene zahteve. Razvijeni algoritam se može koristiti za sintezu najrazličitijih tipova gipkih mehanizama. U disertaciji ćemo se ograničiti na probleme sinteze tipa JUJI i JUVI (vidi odeljak 3.1.1.), ali se jednostavnom izmenom formulacije funkcije cilja, uz pomoć algoritma, mogu rešiti i problemi sinteze tipa VUJI; u odeljku 3.7. će biti reči i o algoritmu za rešavanje sinteze tipa VUVI odnosno za sintezu adaptivnog gipkog sistema. Sposobnost razvijenog algoritma da generiše optimalna rešenja gipkih mehanizama za zadatu postavku zadatka sinteze biće prikazana na primeru sinteze gipkog invertora pomeranja i gipkog mehanizma hvatača, kao dva u praksi najčešće korišćena tipa gipkih mehanizama. Algoritam za sintezu, kao i sama sinteza gipkog invertora pomeranja i gipkog mehanizma hvatača, biće detaljno opisani u narednim odeljcima.



slika 3.22. Algoritam sinteze gipkih mehanizama

3.2.1. Diskretizacija oblasti optimizacije setom strukturnih elemenata

Kao što smo napomenuli u prethodnom odeljku, na osnovu parametara zadatih od strane korisnika, algoritam vrši diskretizaciju oblasti optimizacije primenom metode diskretizacije u vidu seta strukturnih (linijskih) elemenata. Oblast optimizacije je diskretizovana mrežom čvorova ($n_{\text{dužina}} \times n_{\text{visina}}$) koji su međusobno povezani linijskim elementima (slika 3.23.), a kao optimizacione promenljive usvojene su vrednosti debljine svakog od linijskih elemenata u ravni deformacije mehanizma; debljina linijskih elemenata u ravni upravnoj na ravan deformacije je usvojena kao konstantna vrednost. Izbor broja čvorova i broja elemenata kojim će oblast optimizacije biti diskretizovana, zavisi od tipa problema sinteze. Dobijena rešenja gipkih mehanizama u velikoj meri zavise od izbora gustine mreže. Većom gustinom mreže biće i oblast optimizacije diskretizovana većim brojem linijskih elemenata, a samim tim postoji i veći izbor potencijalnih rešenja zadanog problema odnosno sam prostor optimizacije je veći pa sadrži i veći broj potencijalnih rešenja. Kada je oblast optimizacije diskretizovana suviše malim brojem čvorova, mnoga od potencijalnih, dobrih rešenja zadanog problema mogu biti izgubljena na samom početku procesa sinteze. Na primer, ukoliko se za diskretizaciju koristi mali broj čvorova, dobijeno rešenje predstavlja optimum samo u okviru datog broja čvorova i linijskih elemenata, pa se može desiti da, ukoliko bi mreža čvorova bila veća, postoji i bolje rešenje zadanog problema sinteze. Međutim, kako sve zavisi od tipa problema sinteze, veća gustina mreže ne mora nužno da vodi ka boljim rezultatima; dovoljno dobra rešenja se mogu dobiti i manjim brojem čvorova. Na primer, ukoliko je cilj razviti gipki mehanizam hvatača koji treba da ostvari pomeranje izvršnih tačaka tako da njima uhvati predmet, malim brojem čvorova moguće je dobiti relativno jednostavno rešenje gipkog mehanizma koji može da realizuje postavljeni zahtev, dok se većim brojem čvorova može dobiti znatno složenije rešenje pri čemu se ne bi postigli značajno bolji rezultati. Pored ovoga, pri izboru gustine mreže mora se imati u vidu da veća gustina mreže znači i znatno veći broj optimizacionih promenljivih, a samim tim i vreme konvergencije procesa optimizacije biće znatno duže (konvergencija u velikoj meri zavisi od broja čvorova i linijskih elemenata). Na projektantu je da sam odluči o izboru gustine mreže odnosno kolikom brojem čvorova i linijskih elemenata treba diskretizovati oblast optimizacije, što dalje zavisi od problema definisanog postavkom zadatka sinteze. Na slici 3.23. je prikazana diskretizacija oblasti optimizacije istih dimenzija ali različitom gustinom mreže: 4x3 čvora (slika 3.23.a), 4x4 čvora (slika 3.23.b), 5x5 čvorova (slika 3.23.c) (slike su dobijene primenom razvijenog algoritma).

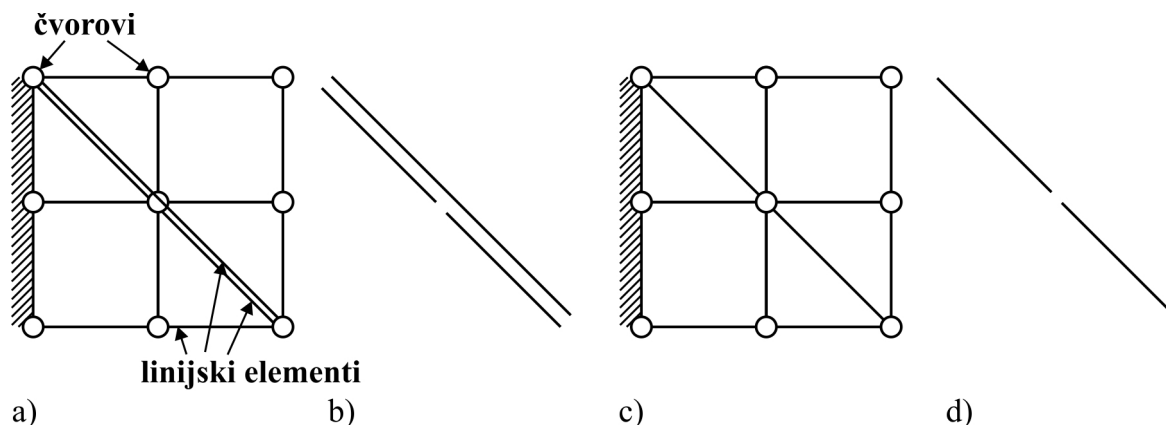


slika 3.23. Diskretizacija oblasti optimizacije za različite brojeve čvorova i elemenata: a) 4x3 čvorova, 66 elemenata; b) 4x4 čvorova, 120 elemenata; c) 5x5 čvorova, 300 elemenata

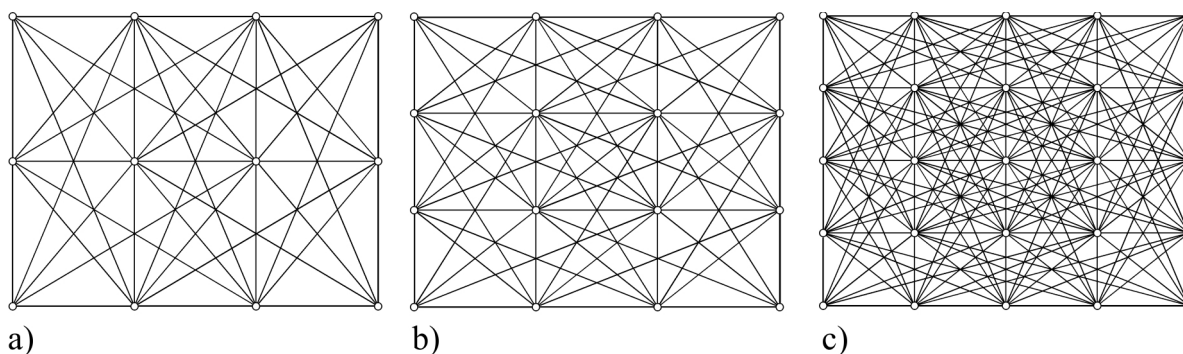
Kada je oblast optimizacije diskretizovana setom linijskih elemenata, inicijalno su svi čvorovi u početnom setu strukturnih elemenata međusobno povezani (slika 3.23.) odnosno svaki čvor u strukturi je povezan sa susednim čvorom, ali i sa svim ostalim čvorovima u strukturi, jednim linijskim elementom. Za ovakav početni set strukturnih elemenata kažemo da je "u potpunosti povezan" (engl. *fully connected*). Početni set linijskih elemenata kod koga su svi čvorovi u potpunosti povezani sadrži preklapajuće elemente (elemente koji leže u paralelnim ravnima, jedan ispod drugog) odnosno često vodi ka rešenju gipkih mehanizama koji sadrže preklapajuće elemente koje je teško izraditi (slika 3.24.a i slika 3.24.b). Kako bi se prevazišao ovaj problem, u razvijenom optimizacionom algoritmu za sintezu gipkih mehanizama razvijen je i implementiran odgovarajući filter (u vidu kompjuterskog koda) koji "filtrira" početnu strukturu odnosno traži i eliminiše ovakve preklapajuće elemente iz početnog seta linijskih elemenata (slika 3.24.c i slika 3.24.d). Dobijeni, delimično redukovani početni set linijskih elemenata ne sadrži preklapajuće elemente odnosno u ovakvoj početnoj strukturi nisu svi čvorovi međusobno povezani. Redukovani početni set strukturnih elemenata sadrži i značajno manji broj optimizacionih promenljivih, a samim tim i značajno skraćuje vreme koje je potrebno da optimizacija konvergira ka rešenju. Iako je broj optimizacionih promenljivih značajno redukovano, oblast optimizacije je diskretizovana sa dovoljnim brojem čvorova i linijskih elemenata koji i dalje efektivno predstavljaju oblast optimizacije.

U razvijenom algoritmu je početni set strukturnih elemenata dalje redukovano i uvođenjem stepena međusobne povezanosti čvorova n_{step} , (engl. *degree of nodal connectivity*) [143, 145] odnosno uvođenjem broja koji definiše sa koliko čvorova može maksimalno biti povezan svaki čvor u strukturi i to u pravcu širine i pravcu visine oblasti optimizacije (kroz koliko polja je dozvoljeno da se prostire svaki linijski element) (slika 3.23.). Ovakva redukcija početne mreže linijskih elemenata koji povezuju čvorove može dalje značajno

ubrzati konvergenciju procesa optimizacije. Na slici 3.25. prikazana je diskretizacija oblasti optimizacije sa slike 3.23. redukovanim setom linijskih elemenata, pri čemu su eliminisani preklapajući elementi i uveden je stepen međusobne povezanosti čvorova. U algoritmu, ostavljena je sloboda da projektant sam odluči da li želi da definiše stepen međusobne povezanosti čvorova ili ne odnosno da li je potrebno da početni set čvorova i linijskih elemenata bude dalje redukovan.



slika 3.24. Ilustracija preklapajućih linijskih elemenata: a) potpuno povezan početni set linijskih elemenata (sa preklapajućim elementima); b) preklapajući elementi; c) redukovani početni set linijskih elemenata (bez preklapajućih elemenata); d) nema preklapajućih elemenata



slika 3.25. Diskretizacija oblasti optimizacije delimično redukovanim početnim setom linijskih elemenata: a) 4x3 čvorova, $n_{step}=2$, 43 elemenata; b) 4x4 čvorova, $n_{step}=2$, 66 elemenata; c) 5x5 čvorova, $n_{step}=3$, 152 elemenata

3.2.2. Strukturna analiza metodom konačnih elemenata

Za strukturnu analizu ponašanja gipkih mehanizama, tokom procesa optimizacije, u algoritmu se koristi linearna analiza, primenom metode konačnih elemenata (u daljem tekstu MKE) [152]. I linearna i nelinearna MKE mogu se koristiti za strukturnu analizu. Nelinearna analiza daje po pravilu tačnije rezultate kada se radi o velikim deformacijama, međutim, ona zahteva više vremena za izračunavanje pa bi značajno usporavala i konvergenciju procesa optimizacije, pogotovo zbog velikog broja optimizacionih promenljivih. Pored toga, ne može se sa sigurnošću tvrditi da bi nelinearna analiza, pri sintezi gipkih mehanizama, dala značajno bolje rezultate odn. bolje topologije gipkog mehanizma u odnosu na linearnu MKE [138]. U literaturi, pri sintezi gipkih mehanizama, najčešće se koristi linearna MKE, pri čemu se dobijaju rešenja gipkih mehanizama koja sa dovoljnom tačnošću realizuju postavljene zahteve [99-101, 103, 112, 145]. Nelinearna analiza se može sprovesti nakon dobijanja konačnog rešenja gipkog mehanizma kako bi se potvrdila njegova funkcionalnost. Zbog jednostavnosti analize i brzine konvergencije, u disertaciji je za strukturnu analizu usvojena linearna MKE; naknadno će analizom dobijenih rešenja gipkih mehanizama biti provereno da li je sa linearnom MKE moguće dobiti zadovoljavajuća rešenja gipkih mehanizama.

U algoritmu se MKE analiza koristi za izračunavanje pomeranja izvršnih tačaka koja ostvaruje gipki mehanizam kada na njega deluju pogonske sile i pomeranja. Kao linijski konačni element usvojen je ravanski strukturni element u vidu štapa (engl. *beam element*) koji može da opiše ponašanje odnosno elastične deformacije (savijanje) segmenata gipkog mehanizma [100]. Strukturni elementi u vidu štapa mogu da trpe i aksijalna i opterećenja na savijanje, pa su pogodni za modeliranje gipkih mehanizama kada se vrši analiza metodom konačnih elemenata. Ravanski strukturni element u vidu štapa ima 6 stepena slobode kretanja, po tri na svakom kraju (dve translacije u x i y pravcu i jednu rotaciju θ oko ose upravne na ravan deformacije). U disertaciji se, pod pretpostavkom da se radi o linearnoj elastičnosti, deformacija pojedinih štapova izračunava na osnovu matrice krutosti definisane izrazom:

$$[k_e] = \begin{bmatrix} \frac{EA_e}{l_e} & 0 & 0 & -\frac{EA_e}{l_e} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_e}{l_e^3} & \frac{6EI_e}{l_e^2} & 0 & -\frac{12EI_e}{l_e^3} & \frac{6EI_e}{l_e^2} \\ 0 & \frac{6EI_e}{l_e^2} & \frac{4EI_e}{l_e} & 0 & -\frac{6EI_e}{l_e^2} & \frac{2EI_e}{l_e} \\ -\frac{EA_e}{l_e} & 0 & 0 & \frac{EA_e}{l_e} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_e}{l_e^3} & -\frac{6EI_e}{l_e^2} & 0 & \frac{12EI_e}{l_e^3} & -\frac{6EI_e}{l_e^2} \\ 0 & \frac{6EI_e}{l_e^2} & \frac{2EI_e}{l_e} & 0 & -\frac{6EI_e}{l_e^2} & \frac{4EI_e}{l_e} \end{bmatrix} \quad (6)$$

gde je: E – Jangov modul elastičnosti, A_e – površina poprečnog preseka štapa, l_e – dužina štapa i I_e – aksijalni moment inercije štapa.

Pored deformacija, potrebno je izračunati i napone u štapovima odnosno napone u elastičnim segmentima gipkog mehanizma. Ukoliko u dobijenom rešenju postoje elementi koji se ne deformišu ili je njihova deformacija isuviše mala (naponi u elementu su bliski nuli ili veoma mali), potrebno je ovakve elemente eliminisati iz strukture jer oni ne doprinose funkciji mehanizma. Naponi u štapu koji je izložen aksijalnom naprezanju i naprezanju na savijanje izračunavaju se na osnovu jednačine:

$$\sigma_e(x, y) = \frac{F_{Ne}(x)}{A_e(x)} \pm \frac{M_e(x) \cdot y_e}{I_x^e(x)} \quad (7)$$

gde je: x – rastojanje duž štapa (od 0 do dužine štapa l_e), F_{Ne} – normalna sila u štapu, A_e – površina poprečnog preseka štapa, M_e – moment savijanja, y_e – normalno rastojanje od neutralne ose, I_x^e – aksijalni moment inercije. Za svaki štap (element), napon se izračunava na oba kraja štapa ($x=0$, $x=l_e$), za oba slučaja (\pm), pri čemu se najveći napon od ova četiri uzima kao napon na osnovu koga se odlučuje da li dati element treba zadržati ili ga eliminisati iz strukture.

3.2.3. Formulacija funkcije cilja i ograničenja pri sintezi gipkih mehanizama

Izbor funkcije cilja pri sintezi gipkih mehanizama detaljno je objašnjen u odeljku 3.1.3.; ovde će samo biti data formulacija funkcije cilja koju algoritam koristi pri sintezi. Cilj je sinteza gipkih mehanizama koji treba da ostvare pojačanje pogonskog pomeranja pa je na osnovu jednačine (3) opšti oblik funkcije cilja formulisan izrazom:

$$\text{maksimizovati } \left[\frac{\Delta_{iz}}{\Delta_{ul}} \pm w_n \cdot (n \text{ raznih ograničenja}) \right] \quad (8)$$

gde je n broj različitih ograničenja (jednak broju relativnih težinskih koeficijenata w_n). Problem sinteze gipkih mehanizama predstavlja mutikriterijumski optimizacioni problem, ali je u disertaciji sveden na jednokriterijumski problem, primenom težinskih koeficijenata.

Ograničenja mogu biti različita i zavise od tipa problema sinteze, npr. za slučaj ove sinteze gipkog mehanizma hvatača i gipkog invertora pomeranja pojedina ograničenja bi se razlikovala. U literaturi se obično kao jedno od ograničenja koristi i ograničenje ukupne težine ili ukupne zapremine strukture (ovo je posebno karakteristično kada je oblast optimizacije diskretizovana u vidu seta kontinuum-elemenata) [94, 105]. Međutim, u disertaciji, cilj sinteze gipkih mehanizama nije smanjenje težine ili zapremine već smanjenje kompleksnosti strukture koja se dobija kao rešenje. Kada je reč o diskretizaciji setom linijskih elemenata, ograničenje zapremine često vodi ka rešenjima struktura koja sadrže tanke elastične segmente [143]. Zato se umesto jednog ovakvog ograničenja (zapremine) koristi ograničenje ukupnog zbira dužina svih linijskih elemenata u strukturi L_{ukup} [143]. Ovo ograničenje se u funkciju cilja uvodi definisanjem željene zbirne dužine elemenata (L_{cilj}) koja se određuje izrazom:

$$L_{cilj} = \eta_L \cdot L_{dijag} \quad (9)$$

gde L_{dijag} predstavlja dužinu dijagonale oblasti optimizacije. U praksi se češće kao željena vrednost zadaje η_L , koja prema jednačini (9) predstavlja količnik željene zbirne dužine elemenata i dužine dijagonale oblasti optimizacije ($\eta_L = L_{cilj}/L_{dijag}$) [143]. Funkcija cilja sa ograničenjem zbirne dužine elemenata imaće oblik:

$$\text{maksimizovati } \left[\frac{\Delta_{iz}}{\Delta_{ul}} \pm w_n \cdot (n \text{ raznih ograničenja}) - w_{n+1} \cdot |L_{ukup} - L_{cilj}| \right] \quad (10)$$

3.2.4. Optimizacija topologije gipkih mehanizama primenom genetskih algoritama

U ovoj disertaciji se kao metoda za traženje optimalnog rešenja (unutar prostora optimizacionih promenljivih) odnosno optimalne topologije gipkih mehanizama, ali i adaptivnog gipkog sistema, koriste genetski algoritmi. Genetski algoritmi spadaju u grupu nelinearnih metoda optimizacije, koje traže globalni optimum, i posebno su pogodni za rešavanje diskretnih nelinearnih problema [141]. Pored ovoga, genetski algoritmi pripadaju i grupi heurističkih pretraživačkih metoda, a optimum nalaze imitirajući proces prirodne selekcije. Njihov princip rada zasniva se na principu Darvinove teorije evolucije - preživljava jedinka koja može da se adaptira uslovima u kojima živi (engl. *survival of the fittest*). Svako potencijalno rešenje (gipki mehanizam) predstavljeno je u vidu hromozoma (analogno nizu DNK lanca). Hromozom se sastoji od odgovarajućih gena pri čemu geni predstavljaju optimizacione promenljive. Optimizacija primenom genetskih algoritama počinje sa populacijom nasumično izabranih jedinki odnosno hromozoma (gipkih mehanizama) koji u stvari predstavljaju početnu grupu rešenja zadatog problema. Nova generacija jedinki (gipkih mehanizama) formira se kroz proces reprodukcije koji uključuje operacije selekcije, ukrštanja i mutacije. Za svaku jedinku (gipki mehanizam) u populaciji, sračunava se vrednost funkcije cilja. Jedinke se zatim sortiraju i rangiraju prema vrednosti koju funkcija cilja ima za datu jedinku. Jedinke za koje funkcija cilja ima najveće vrednosti (jedinke koje su visoko rangirane) imaju veće šanse da prežive, a samim tim i veće šanse za reprodukciju i stvaranje potomaka (imaju veću verovatnoću da budu izabrane kao roditelji za narednu generaciju, a samim tim i da prenesu svoje gene/osobine potomcima). Jedinke za koje funkcija cilja ima niže vrednosti (jedinke koje su niže rangirane) i dalje mogu preživeti, ali sa malom verovatnoćom za reprodukciju, a samim tim i malom verovatnoćom da se njihove osobine (geni) prenesu na naredne generacije. Tokom procesa reprodukcije, jedinke koje su izabrane za reprodukciju (tzv. "roditelji") međusobno se ukrštaju (razmenjuju gene/osobine) kako bi stvorili potomke (tzv. "decu") koji nose deo gena/osobina svojih roditelja. Pojedine jedinke mutiraju kako bi stvorile potomke, dok pojedine jedinke za koje funkcija cilja ima najveće vrednosti direktno se prenose u narednu generaciju odnosno direktno postaju potomci (tzv. elitne jedinke). Na ovaj način dobijaju se potomci koji bi trebalo da imaju bolje osobine od

svojih roditelja (dobijaju se rešenja koja bi trebalo da budu bliža funkciji cilja nego što su to rešenja iz prethodnog koraka iteracije). Proces reprodukcije se ponavlja sve dok se ne dostigne maksimalan broj generacija (maksimalan broj interacija tokom optimizacije) pri čemu se u zadnjoj generaciji ona jedinka odnosno onaj gipki mehanizam za koji funkcija cilja ima najveću vrednost, smatra optimalnim rešenjem. Detaljnija objašnjenja o genetskim algoritmima moguće je naći u [141].

Za svaku strukturu odnosno gipki mehanizam koji predstavlja potencijalno rešenje, vrednost funkcije cilja sračunava se primenom MKE - jednačine (6) i (10). U razvijenom optimizacionom algoritmu, za iniciranje pretraživanja odnosno traženja optimalnog rešenja primenom genetskih algoritama potrebno je definisati:

- *veličinu inicijalne populacije*. Veličina početne populacije predstavlja broj nasumično generisanih početnih rešenja odnosno struktura;
- *broj generacija*. Broj iteracija procesa optimizacije;
- *funkciju selekcije*. Funkcija koja definiše kako genetski algoritam bira jedinke koje će predstavljati roditelje za stvaranje novih potomaka odnosno za dobijanje naredne generacije jedinki. U literaturi su razvijene različite funkcije selekcije [141], pri čemu u disertaciji se koristi rulet kao funkcija selekcije (engl. *Roulette*). Rulet bira roditelje tako što simulira rad točka - ruleta. Delovi površine ruleta odgovaraju vrednostima funkcije cilja za određenu jedinku. Funkcija selektuje jedinku sa verovatnoćom koja je proporcionalna veličini površine dela ruleta; ova površina dela ruleta jednaka je vrednosti koju funkcija cilja ima za datu jedinku;
- *elitne jedinke* (engl. *elit count*). Broj elitnih jedinki (jedinke za koje funkcija cilja ima najveće vrednosti) kojima je garantovano da će preživeti do naredne generacije odnosno broj elitnih jedinki koji se direktno prenosi u narednu generaciju;
- *procenat ukrštanja* (engl. *crossover*). Procenat jedinki koji se tokom procesa reprodukcije dobijaju ukrštanjem i predstavljaju potomke odnosno nove jedinke za formiranje naredne generacije;
- *funkciju ukrštanja* (engl. *crossover function*). Funkcija koja definiše način na koji se vrši ukrštanje između jedinki koje predstavljaju roditelje. U literaturi su razvijene različite funkcije ukrštanja [141], pri čemu se u disertaciji koristi funkcija *Crossoverscattered* [206];

- *procenat mutacije (engl. mutation)*. Procenat jedinki koji se tokom procesa reprodukcije dobijaju mutacijom i predstavljaju potomke odnosno nove jedinke za formiranje naredne generacije;
- *funkciju mutacije (engl. mutation function)*. Funkcija koja definiše način na koji se vrši mutacija pojedinih jedinki. U disertaciji je usvojena uniformna mutacija (engl. *mutationuniform*) kao funkcija mutacije [206]. Funkcija selektuje određeni deo gena jedinke (u zavisnosti od procenta mutacije) i zamenjuje ga nasumično izabranim genom (drugom promenljivom) iz dozvoljenog opsega gena (opsega optimizacionih promenljivih).

Problem kod optimizacije genetskim algoritmima je to što proces konvergencije ka jedinstvenom rešenju može trajati beskonačno dugo pa je potrebno usvojiti odgovarajući zaustavni kriterijum procesa optimizacije. Vrlo čest pristup za zaustavljanje procesa optimizacije kod genetskih algoritama jeste usvajanje graničnog broja iteracija - kada se dostigne maksimalan broj generacija (iteracija) proces optimizacije se zaustavlja [106, 110, 141]. Drugi pristupi uključuju zaustavljanje optimizacije:

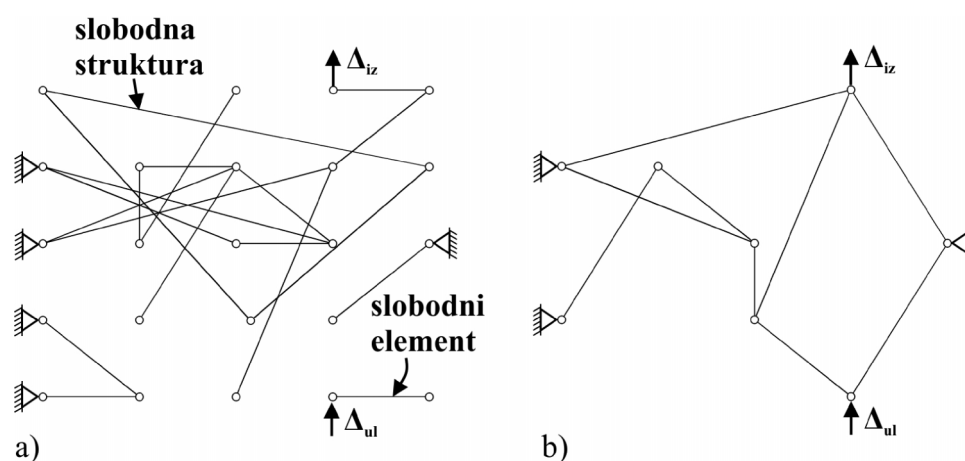
- nakon određenog vremenskog intervala, pri čemu je ovaj interval definisan od strane projektanta;
- ukoliko se ne javlja poboljšanje vrednosti funkcije cilja odnosno ukoliko se vrednost funkcije cilja ne menja tokom određenog vremenskog intervala (definisanog od strane projektanta);
- kada je vrednost funkcije cilja za najbolju jedinku u trenutnoj populaciji jednaka ili manja od unapred zadate vrednosti funkcije cilja (engl. *fitness limit*);
- kada ukupno poboljšanje vrednosti funkcije cilja za datu populaciju jedinki dostigne ustaljenu vrednost odnosno kada nema više poboljšanja vrednosti funkcije cilja (kada se konvergencija procesa optimizacije ustali) [103];

Više o kriterijumima za zaustavljanje procesa optimizacije genetskim algoritmima mogu je naći u [141]. U razvijenom optimizacionom algoritmu je, kao kriterijum za zaustavljanje procesa optimizacije topologije gipkih mehanizama, korišćen poslednji od gore navedenih kriterijuma.

U literaturi su genetski algoritmi već detaljno obrađeni [141] pa će ovde više pažnje biti posvećeno opisu problema koji se mogu javiti kada se genetski algoritmi koriste kao metod optimizacije pri sintezi gipkih mehanizama.

Kada se za diskretizaciju oblasti optimizacije koriste čvorovi koji su međusobno povezani strukturnim elementima, pri čemu se kao optimizaciona metoda koriste genetski

algoritmi, vrlo često se javlja problem povezanosti strukture [112, 143, 145]. Ovo znači da oslonci (postolje), napadne tačke pogonskih sila/pomeranja i izvršne tačke nisu međusobno povezani odnosno nisu deo iste strukture pa se javljaju takozvane slobodne strukture² i slobodni strukturni elementi³ (slika 3.26.a.). Kako bi se prevazišao ovaj problem, potrebno je koristiti odgovarajuće ograničenje koje će nam obezbediti da se kao rešenja dobijaju povezane strukture odnosno da nema slobodnih struktura i slobodnih elemenata (slika 3.26.b). Ograničenje povezanosti nije dodato direktno u funkciju cilja, u vidu izraza, već je implementirano u optimizacionom algoritmu kao filter. Ovaj filter (u obliku kompjuterskog koda) tokom optimizacije traži i odbacuje nepovezane strukture i linijske elemente i zamenjuje ih strukturama kod kojih su postolje, napadne tačke pogonskih sila/pomeranja i izvršne tačke međusobno povezani i bez slobodnih linijskih elemenata (slika 3.26.b). Drugačiji pristup rešavanju problema nepovezanosti strukture bila bi primena metode diskretizacije oblasti optimizacije početnim setom putanja (vidi odeljak 3.1.2.) [5].



slika 3.26. a) Primer nepovezane strukture koja sadrži slobodne elemente i slobodne strukture;
b) primer povezane strukture

Drugi problem koji se često javlja kada je oblast optimizacije diskretizovana linijskim elementima i kada se koriste genetski algoritmi jeste prevelika gustina linijskih elemenata kod početnih rešenja (početne strukture) u inicijalnoj populaciji. Prilikom nasumičnog generisanja inicijalne populacije početnih rešenja (početne topologije gipkih mehanizama), genetski algoritmi često daju strukture koje sadrže mnoštvo linijskih elemenata sa mnoštvom

² Strukture koje nisu povezane ni sa postoljem ni sa radnom površinom ili su povezane samo sa postoljem ili samo sa radnom površinom.

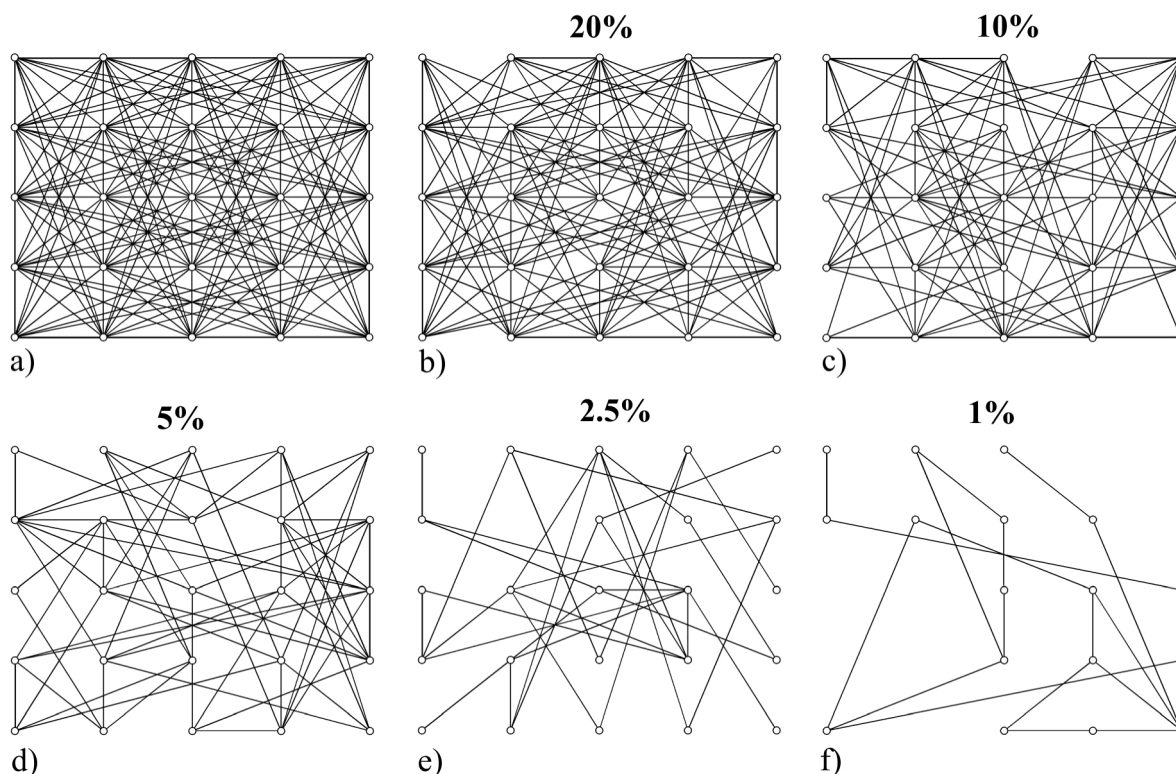
³ Elementi koji nisu povezani sa ostatkom strukture ili su na jednom svom kraju slobodni.

međusobno povezanih čvorova (mnogi elementi i čvorovi egzistiraju u početnom rešenju). Za ovakva rešenja kažemo da imaju veliku gustinu i ona predstavljaju skoro krute strukture (slika 3.27.b) odnosno mogu dovesti do rešenja gipkih mehanizama koji bi predstavljali isuviše krute strukture. Pored ovoga, ovakva početna rešenja značajno usporavaju konvergenciju procesa optimizacije ka optimalnom rešenju. Rešenja sa velikim brojem linijskih elemenata sadrže i veliki broj optimizacionih promenljivih pa genetskim algoritmima treba više vremena da eliminišu nepotrebne elemente i pronađu optimum. Zato je potrebno osigurati da se pri generisanju inicijalne populacije dobijaju početna rešenja koja ne predstavljaju guste strukture odnosno koja ne sadrže preveliki broj čvorova i linijskih elemenata (slika 3.27.e). U optimizacionom algoritmu je ovo implementirano u vidu filtra (kompjuterski kod) koji obezbeđuje da se pri formiranju inicijalne populacije nasumično generišu rešenja koja sadrže manji broj linijskih elemenata i čvorova. Filter radi tako što je potrebno definisati procenat koji određuje verovatnoću da linijski element ostane u strukturi. Veća verovatnoća znači da element ima veću verovatnoću da bude deo strukture. Na slici 3.27. prikazan je primer smanjenja gustine početnih rešenja sa verovatnoćom od: 20% (slika 3.27.b), 10% (slika 3.27.c), 5% (slika 3.27.d), 2.5% (slika 3.27.e), 1% (slika 3.27.f).

Prilikom smanjenja gustine početnih rešenja javlja se takođe problem povezanosti strukture jer se sa smanjenjem broja elemenata često javljaju slobodne strukture i slobodni elementi. Za razrešenje ovog problema koristi se filter koji ovakve strukture odbacuje i ponovo generiše neko nasumično rešenje. Izbor procenta redukcije broja linijskih elemenata zavisi od gustine mreže kojom je oblast optimizacije diskretizovana, npr. za relativno malu gustinu početne mreže nije potrebno da gustina struktura u inicijalnoj populaciji bude redukovana. Iako se čini da bi sa smanjenjem gustine mnoga od dobrih rešenja bila izgubljena na samom početku procesa optimizacije, ovo ne mora biti u potpunosti tačno jer se tokom procesa reprodukcije mnogi od elemenata mogu ponovo aktivirati i postati deo strukture mehanizma; elementni nikada ne iščezavaju u potpunosti iz strukture (imaju vrednost debljine blisku nuli pa i ne doprinose funkciji mehanizma). Smanjenje gustine početnih rešenja pri formiranju inicijalne populacije osigurava da se dobijaju rešenja gipkih mehanizama koja ne predstavljaju komplikovane strukture, pri čemu je proces konvergencije značajno ubrzan.

U optimizacionom algoritmu je implementiran i "genetski inženjering" - odbacivanje slobodnih elemenata iz strukture pre izračunavanja vrednosti funkcije cilja, i "*Lamarckian trimming*" - odbacivanje nepotrebnih elemenata (strukturnih elemenata čiji je unutrašnji napon jednak ili blizak 0) nakon izračunavanja vrednosti funkcije cilja [143]. U svakom

koraku optimizacije proverava se da li struktura koja predstavlja potencijalno rešenje sadrži slobodne elemente i slobodne strukture; ovakvi elementi strukture se odbacuju odnosno nepovezana struktura se zamenjuje novom stukturom koja je povezana.



slika 3.27. Primer smanjenja gustine početnih rešenja struktura pri formiranju inicijalne populacije: a) početna gustina mreže kojom je diskretizovana oblast optimizacije; b) struktura sa elementima koji imaju verovatnoću od 20% da ostanu u strukturi; c) verovatnoću od 10%; d) verovatnoću od 5%; e) verovatnoću od 2.5%; f) verovatnoću od 1%

U narednim odeljcima biće opisane sinteze gipkog invertora pomeranja i gipkog mehanizma hvatača primenom razvijenog optimizacionog algoritma.

3.3. Sinteza gipkog invertora pomeranja

Cilj sinteze je odrediti optimalnu topologiju gipkog mehanizma (gipkog invertora pomeranja) koji treba, pod dejstvom pogonskog pomeranja Δ_{ul} u zadatoj napadnoj tački, da pomeri izvršnu tačku za Δ_{iz} u zatom pravcu, pri čemu smer pomeranja izvršne tačke treba da bude suprotan od smera pomeranja pogonske tačke (slika 3.28.a). Zadatak sinteze gipkog invertora pomeranja predstavlja problem sinteze tipa JUJI (vidi odeljak 3.1.1.). Gipki invertor

pomeranja nalazi primenu u mikromehatroničkim sistemima i najčešće služi za pomeranje raznih mikromehaničkih komponenti (češljastih struktura, mikroKonzola, mikropozicioniranje itd.) [94, 101, 207, 208]. Postavka zadatka sinteze prikazana je na slici 3.28.a. Prostor u koji bi gipki mehanizam trebalo svojim gabaritima da se uklopi definisan je kao pravougaona oblast optimizacije (dimenzije su date u tabeli 1). Definisana je samo gornja polovina oblasti optimizacije jer se postavljeni problem može smatrati simetričnim, pa je potrebno optimizovati samo gornju polovinu oblasti optimizacije; nakon dobijanja rešenja kompletan mehanizam invertora se može dobiti preslikavanjem gornje polovine oko ose simetrije. Oslonci (postolje mehanizma) postavljeni su u gornjoj zoni leve i desne strane oblasti optimizacije (slika 3.28.a). Uslov simetrije je postavljen na donjoj strani oblasti optimizacije (svim tačkama koje pripadaju donjoj granici oblasti optimizacije dozvoljeno je pomeranje samo u horizontalnom pravcu). Zadana je i lokacija napadne tačke pogonskog pomeranja, veličina, pravac i smer pogonskog pomeranja, lokacija, željeni pravac i smer pomeranja izvršne tačke. Takođe je zadana i karakteristika materijala (E) od koga bi mehanizam trebalo da bude izrađen (tabela 1).

Oblast optimizacije je diskretizovana gustinom mreže od 3x2 čvora i 13 linijskih elemenata (slika 3.28.b). Optimizacione promenljive su diskretne vrednosti debljine svakog od linijskih elemenata, pri čemu debljina može biti jedna od četiri unapred definisane vrednosti (tabela 1).

Funkcija cilja definisana je u obliku datom u jednačini (10). Cilj je ostvariti i pojačanje veličine pogonskog pomeranja (ukoliko je to moguće). Funkciji cilja je dodato odgovarajuće ograničenje koje bi osiguralo da gipki mehanizam realizuje dovoljno veliko pomeranje izvršne tačke. Ograničenje je postavljeno u vidu nejednakosti odnosno uslova da pomeranje izvršne tačke bude veće od zadate minimalne granice pomeranja ($\Delta_{iz} > \Delta_{iz, min}$) koja je definisana unapred (tabela 1). U svakom koraku optimizacije proverava se da li je ovaj uslov ispunjen pri čemu, ukoliko je uslov narušen, primenjuje se odgovarajuća penalizacija funkcije cilja. Pored ovog ograničenja, koristi se i ograničenje zbirne dužine elemenata L_{cilj} (vidi odeljak 3.2.3 i tabelu 1). Konačan oblik funkcije cilja pri sintezi gipkog invertora pomeranja dat je izrazom:

$$\text{maksimizovati } \left[\frac{\Delta_{iz}}{\Delta_{ul}} + w_1 \cdot (\Delta_{iz} - \Delta_{iz, min}) - w_2 \cdot |L_{ukup} - L_{cilj}| \right] \quad (11)$$

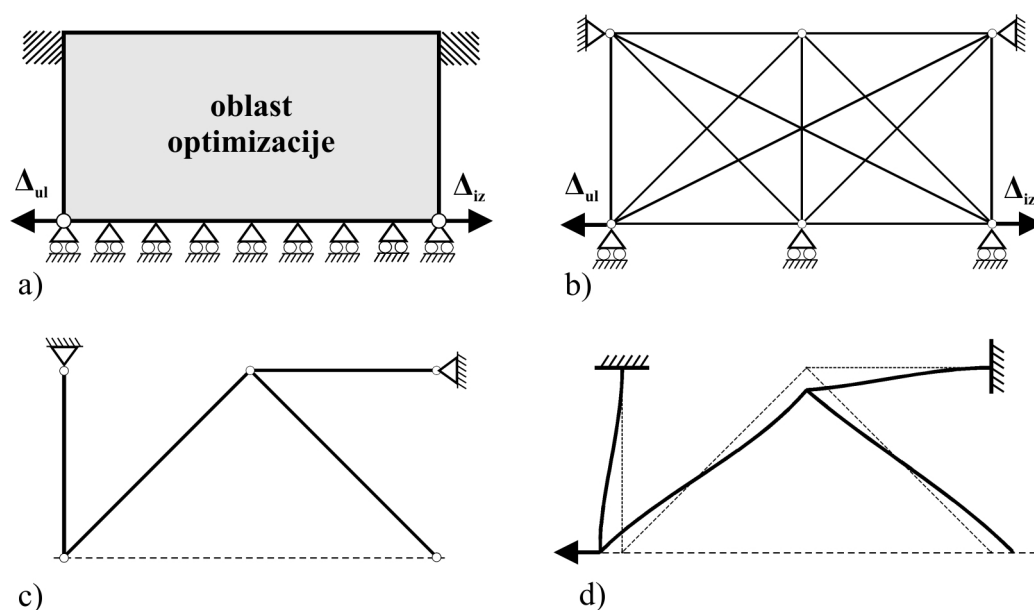
gde su w_1 i w_2 težinski koeficijenti (tabela 1); težinski koeficijenti su usvojeni na osnovu iskustva pri rešavanju problema optimizacije topologije. Za iniciranje pretraživanja rešenja odnosno optimizacije topologije primenom genetskih algoritama, definisani su odgovarajući parametri u tabeli 1.

Tabela 1. Postavka zadatka sinteze gipkog invertora pomeranja

<i>Postavka problema</i>	
dimenzije oblasti optimizacije	50 mm × 25 mm
veličina mreže čvorova	3 × 2
ukupan broj linijskih elemenata	13
veličina pogonskog pomeranja	$\Delta_{ul} = 1$ mm
Jangov modul elastičnosti	E=2.48 GPa
debljina linijskih elemenata u ravni upravnoj na ravan deformacije	1.5 mm
debljina linijskih elemenata u ravni deformacije	0 mm, 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm (moguće vrednosti)
<i>Parametri optimizacije</i>	
minimalna vrednost pomeranja izvršne tačke	$\Delta_{iz\ min} = 0.5$ mm
težinski koeficijenti	$w_1=0.3$; $w_2=0.1$
η_L	2
<i>Parametri genetskog algoritma</i>	
inicijalna populacija	200
ukupan broj generacija	500
funkcija selekcije	roulette
procenat ukrštanja	80%
procenat mutacije	9%
broj elitnih jedinki	2

Nakon konvergencije procesa optimizacije dobijeno je rešenje prikazano na slici 3.28.c [209]. Kao što se može videti sa ove slike, neki od linijskih elemenata su tokom optimizacije eliminisani iz početnog seta elemenata dok preostali elementi definišu optimalnu topologiju gipkog mehanizma. Dobijeni gipki mehanizam predstavlja optimalno rešenje postavljenog zadatka sinteze. Interesanto je da se slična rešenja dobijaju i u literaturi [99, 103]. Rezultati

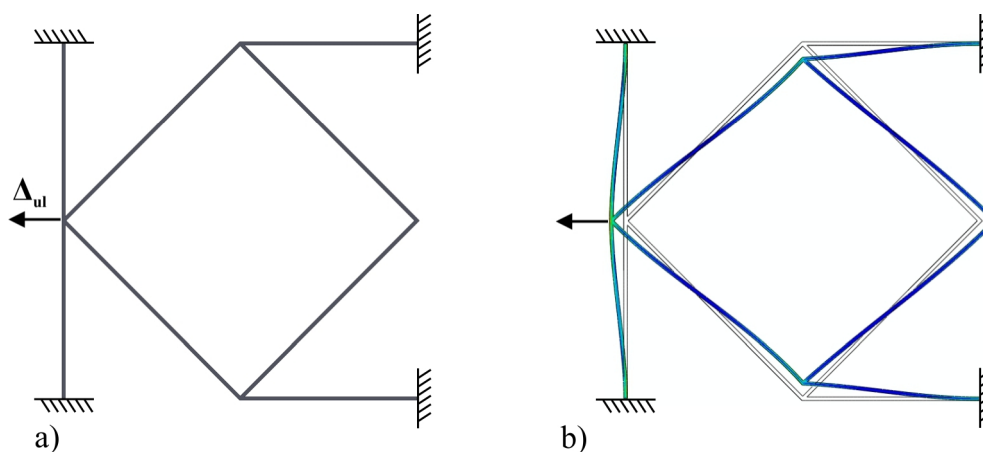
pokazuju da pri dejstvu pogonskog pomeranja od $\Delta_{ul}=1$ mm, gipki mehanizam ostvaruje pomeranje izvršne tačke od $\Delta_{iz}=0.996$ mm u smeru suprotnom od smera pomeranja pogonske tačke (slika 3.28.d) što znači da mehanizam ispunjava sintezom zahtevanu funkciju (inverzija smera pogonskog pomeranja). Pored ovoga, analiza rezultata pokazuje da gipki invertor pomeranja ne ostvaruje pojačanje pogonskog pomeranja, jer je vrednost prenosnog odnosa mehanizma manja od 1 ($\Delta_{iz}/\Delta_{ul}=0.996$), ali je, i pored ovoga, osnovna funkcija mehanizma ispunjena.



slika 3.28. Sinteza gipkog invertora pomeranja: a) postavka zadatka sinteze; b) diskretizacija oblasti optimizacije (3x2 čvora); c) optimalna topologija gipkog invertora pomeranja; d) mehanizam prikazan u deformisanom položaju; isprekidanom linijom prikazan je mehanizam u nedeformisanom položaju (veličina deformacije je skalirana radi preglednosti) [209]

Kako bi se potvrdila funkcionalnost dobijenog rešenja i dobijeni rezultati, sprovedena je dodatna nelinearna analiza MKE u komercijalno dostupnom softveru ABAQUS. Pored ovog postoje i drugi komercijalno dostupni softveri kao što je ANSYS i COMSOL. Međutim, ABAQUS je veoma efikasan kada je reč o nelinearnim problemima pa je zato u disertaciji usvojen kao softver za analizu rešenja (gipkih mehanizama) dobijenih optimizacijom. Na osnovu dobijenog rešenja (slika 3.28.c) razvijen je 3D model celog gipkog invertora pomeranja (slika 3.29.a). Za analizu MKE postavljeni su isti granični uslovi (sem uslova simetričnosti) kao i pri postavci zadatka sinteze odnosno pri linearnoj analizi MKE u algoritmu (slika 3.28.a i tabela 1). Nepokretni oslonci (sprečeno je svih 6 stepeni slobode

kretanja) postavljeni su na nepokretne delove gipkog mehanizma, dok je za pogonsko pomeranje usvojena ista veličina pomeranja kao i pri analizi u razvijenom algoritmu (slika 3.29.a). Za diskretizaciju modela korišćen je tetraedarni element C3D10 (10 čvornih tačaka) kao standardni tetraedarni konačni element koji se koristi za analizu strukturnih 3D problema u ABAQUS-u [210]. Rezultati analize prikazani su na slici 3.29.b i dati u tabeli 2.



slika 3.29. a) Model gipkog invertora pomeranja; b) rezultati nelinearne analize MKE

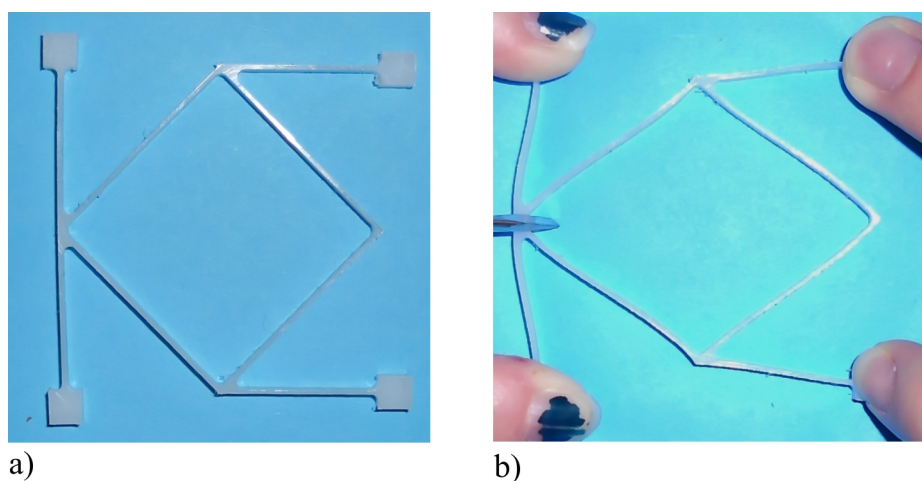
Tabela 2. Rešenje zadatka optimizacije topologije gipkog invertora pomeranja diskretizacijom oblasti optimizacije mrežom od 3x2 čvora

<i>Rezultati</i>				
ukupan broj linijskih elemenata	4			
debljina linijskih elemenata	0.5 mm			
prenosni odnos mehanizma	0.996			
L _{ukup}	120.71 mm			
Ostvareno pomeranje izvršne tačke Δ_{iz}				
linearna MKE (optimizacioni algoritam)	nelinearna MKE (ABAQUS)	greška	fizički prototip	greška
0.996 mm	1.059 mm	6.32%	1.1 mm	10.44%

Analizom rezultata može se zaključiti da mehanizam realizuje istu funkciju kao i mehanizam dobijen optimizacionim algoritmom (slika 3.28.d). Interesantno je primetiti da u slučaju nelinearne analize MKE, mehanizam realizuje pomeranje izvršne tačke koje je skoro jednako veličini pogonskog pomeranja. Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 2 vidimo da

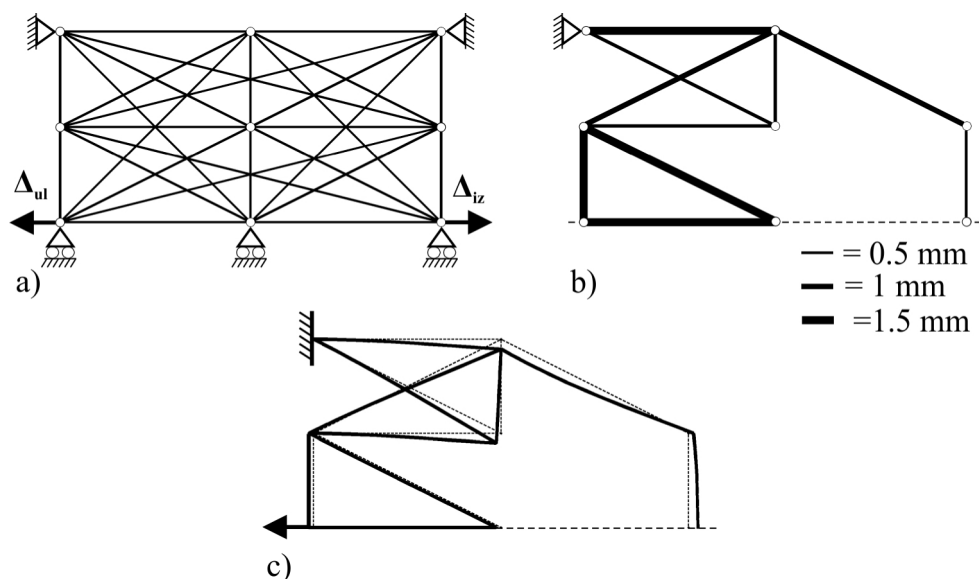
postoji određena greška linearnog modela (6.32%), koja se u ovom slučaju može smatrati dovoljno malom. Deformacije mehanizma su male pa je i greška linearnog modela mala (razlika rezultata ostvarenog pomeranja izvršne tačke dobijenog nelinearnom i linearnom MKE iznosi svega 0.063 mm), pri čemu bi, ukoliko se radi o većim deformacijama mehanizma, i netačnost linearnog modela bila veća. Međutim, i pored netačnosti linearnog modela dobija se rešenje gipkog invertora pomeranja koje realizuje zahteve postavljene zadatkom sinteze (tabela 1) odnosno možemo zaključiti da linearna analiza MKE pri sintezi generiše topologije gipkih mehanizama koji u dovoljnoj meri realizuju zahteve postavke zadatka sinteze.

Kako bi se izvršila verifikacija dobijenih rezultata odnosno rešenja gipkog mehanizma dobijenog optimizacionim algoritmom, izrađen je i fizički prototip gipkog invertora pomeranja (slika 3.30.). Model je izrađen od HDPE plastike (engl. *high density polyethylene* – polietilen modula elastičnosti $E=0.5$ GPa) na CNC glodalici. Sa slike 3.30. može se videti da izrađeni prototip takođe realizuje funkciju zadatu postavkom zadatka sinteze odnosno realizuje slično ponašanje kao i mehanizam dobijen optimizacionim algoritmom i mehanizam koji je analiziran u ABAQUS-u; u tabeli 2 prikazana je veličina pomeranja izvršne tačke koju realizuje fizički prototip gipkog invertora pomeranja pri pomeranju ulazne tačke za 1 mm. Odavde proizilazi zaključak da se razvijeni optimizacioni algoritam može koristiti za dobijanje optimalnih topologija gipkih mehanizama.



slika 3.30. Fizički prototip gipkog invertora pomeranja prikazan u nedeformisanom (a) i deformisanom položaju (b)

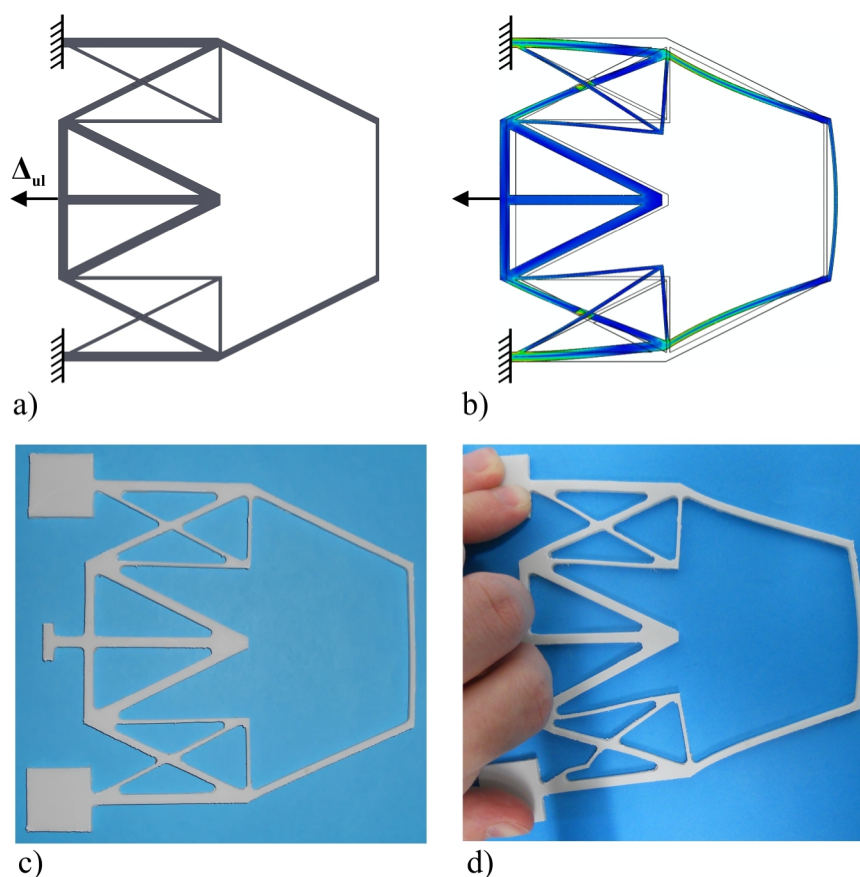
Kao što smo napomenuli, dobijeno rešenje gipkog invertora pomeranja ne realizuje pojačanje pogonskog pomeranja. Zbog relativno male gustine mreže kojom je oblast optimizacije diskretizovana, pa samim tim i malim brojem linijskih elemenata, prostor potencijalnih rešenja zadanog problema optimizacije je relativno mali pa se i ne mogu dobiti bolja rešenja postavljenog zadatka sinteze. Zato je izvršena nova sinteza, odnosno optimizacija topologije, ali sada sa većom gustinom mreže čvorova i linijskih elemenata. Postavka zadatka sinteze je ista kao i u prethodnom slučaju (slika 3.28.a i tabela 1), ali je sada oblast optimizacije diskretizovana mrežom od 3x3 čvorova i 28 linijskih elemenata i $\eta_L=4$ (slika 3.31.). Korišćena je ista funkcija cilja kao u jednačini (11), i isti parametri za genetske algoritme (tabela 1). Dobijeno rešenje prikazano je na slici 3.31. [209].



slika 3.31. Sinteza gipkog invertora pomeranja gustinom mreže od 3x3 čvorova: a) postavka zadatka sinteze i diskretizacija oblasti optimizacije; b) dobijeno rešenje; c) gipki inverter pomeranja prikazan u deformisanom položaju (isprekidanom linijom prikazan je mehanizam u nedeformisanom položaju) [209]

Dobijena topologija gipkog mehanizma je drugačija u odnosu na topologiju gipkog invertora pomeranja prikazanog na slici. 3.28.c. Oblast optimizacije je diskretizovana većim brojem linijskih elemenata pa samim tim postoji i veći broj potencijalno dobrih rešenja zadanog problema optimizacije. Analiza dobijenog rešenja je sprovedena na isti način kao i u prethodnom slučaju. Pri dejstvu pogonskog pomeranja od $\Delta_{ul}=1$ mm gipki mehanizam realizuje pomeranje izvršne tačke od $\Delta_{iz}=1.857$ mm, u smeru suprotnom od smera dejstva pogonskog pomeranja (tabela 3). Rezultati pokazuju da gipki mehanizam ostvaruje prenosni odnos od $\Delta_{iz}/\Delta_{ul}=1.857$ (veći od 1) što znači da ovaj gipki inverter realizuje i pojačanje

pogonskog pomeranja. Oдавde se može zaključiti da, kada je oblast optimizacije diskretizovana većom gustinom mreže, mogu se dobiti rešenja gipkih invertora pomeranja koja realizuju i pojačanje pogonskog pomeranja; u slučaju dobijenog rešenja izvršna tačka realizuje pomeranje koje je skoro dvostruko veće u odnosu na pomeranje pogonske tačke. Kao i u prethodnom slučaju, na osnovu dobijenog rešenja razvijen je 3D model (slika 3.32.a) i izvršena je analiza MKE u ABAQUS-u. Rezultati nelinearne analize MKE prikazani su na slici 3.32.b i u tabeli 3. Sa slike 3.32.b može se videti da mehanizam realizuje istu funkciju kao i mehanizam dobijen optimizacionim algoritmom. Opet se javlja greška linearnog modela, ali mehanizam realizuje pojačanje pogonskog pomeranja (tabela 3). Izrađen je i fizički prototip mehanizma (slika 3.32.c i slika 3.32.d). Možemo zapaziti da i u ovom slučaju fizički prototip gipkog invertora pomeranja realizuje istu funkciju kao i mehanizam dobijen algoritmom i invertor analiziran nelinearnom MKE (slika 3.31.c i slika 3.32.b).



slika 3.32. a) Model gipkog invertora pomeranja; b) rezultati nelinearne MKE; c) izrađeni prototip prikazan u nedeformisanom položaju; d) izrađeni prototip u deformisanom položaju [209]

Tabela 3. Rešenje zadatka optimizacije topologije gipkog invertora pomeranja diskretizacijom oblasti optimizacije mrežom od 3x3 čvora

<i>Rezultati</i>		
ukupan broj linijskih elemenata	10	
prenosni odnos mehanizma	1.857	
L_{ukup}	224.31 mm	
Ostvareno pomeranje izvršne tačke Δ_{iz}		
linearna MKE (optimizacioni algoritam)	nelinearna MKE (ABAQUS)	greška
1.857 mm	1.660 mm	10.60%

3.4. Sinteza gipkog mehanizma hvatača

Cilj je izvršiti sintezu gipkog mehanizma hvatača koji treba, pod dejstvom pogonskog pomeranja Δ_{ul} u zadatoj napadnoj tački, da pomeri izvršne tačke za Δ_{iz} u zadatom pravcu kako bi njima uhvatio objekat (slika 3.33.a). Gipki hvatači nalaze primenu u mikromehatroničkim sistemima za hvatanje i manipulisanje mikroobjektima, kada je potrebno manipulirati krtime (lako lomljivim) objektima, u medicini kao hirurški instrumenti, u biomedicini za manipulisanje pojedinim ćelijama i bakterijama i dr. [94, 95, 100, 101, 211]. Postavka zadatka sinteze je prikazana na slici 3.33.a. Prostor u koji bi gipki mehanizam hvatača trebalo svojim gabaritima da se uklopi definisan je kao pravougaona oblast optimizacije koja sadrži odgovarajuću prazninu odnosno prostor koji zauzima objekat kojim se manipuliše (dimenzije su date u tabeli 4). Zadatak sinteze gipkog mehanizma hvatača predstavlja problem sinteze tipa JUVI (gipki mehanizam treba da jednim pogonskim pomeranjem ostvari pomeranje dve izvršne tačke, vidi odeljak 3.1.1.). Zbog simetričnosti, definisana je samo gornja polovina oblasti optimizacije (optimizuje se samo gornja polovina hvatača, a kao i u slučaju gipkog invertora pomeranja mehanizam hvatača se može dobiti preslikavanjem gornje polovine oko ose simetrije) tako da se ovaj problem može svesti na problem tipa JUJI. Oslonac (postolje mehanizma) postavljen je na levoj strani oblasti optimizacije, a uslov simetrije je postavljen na donjoj strani oblasti optimizacije (slika 3.33.a). Zadana je i lokacija napadne tačke pogonskog pomeranja, veličina, pravac i smer pogonskog pomeranja, lokacija, željeni pravac i smer pomeranja izvršne tačke kao i veličina minimalnog pomeranja izvršne tačke koje treba

mehanizam da ostvari. Zadana je i karakteristika materijala od koga bi mehanizam trebalo da bude izrađen (tabela 4).

Oblast optimizacije diskretizovana je mrežom od 3x4 čvora (minus 1 čvor zbog prostora koji zauzima predmet) i setom od 37 linijskih elemenata koji povezuju čvorove (slika 3.33.b). Optimizacione promenljive su diskretne vrednosti debljine linijskih elemenata (tabela 4).

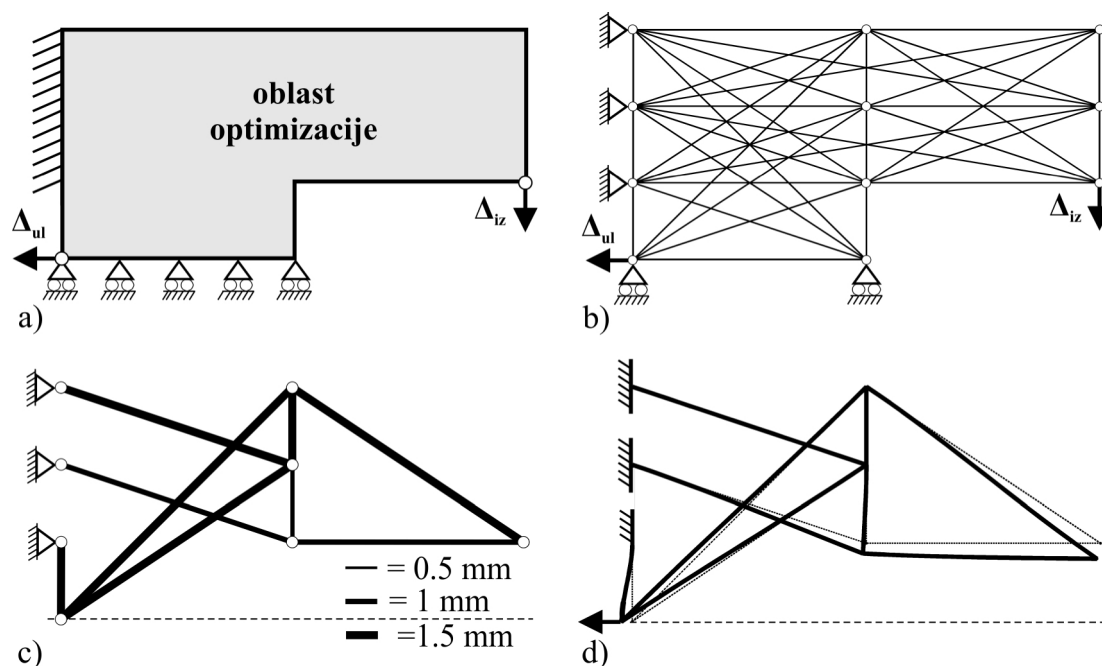
Tabela 4. Postavka zadatka sinteze gipkog mehanizma hvatača

<i>Postavka problema</i>	
dimenzije oblasti optimizacije	50 mm × 25 mm
veličina mreže čvorova	3 × 4
ukupan broj linijskih elemenata	37
stepen međusobne povezanosti čvorova	3
veličina pogonskog pomeranja	$\Delta_{ul} = 1 \text{ mm}$
Jangov modul elastičnosti	$E = 2.48 \text{ GPa}$
debljina linijskih elemenata u ravni upravnoj na ravan deformacije	1.5 mm
debljina linijskih elemenata u ravni deformacije	0 mm, 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm (moguće vrednosti)
<i>Parametri optimizacije</i>	
minimalna vrednost pomeranja izvršne tačke	$\Delta_{iz \text{ min}} = 1 \text{ mm}$
$\Delta_{\text{max}}^{\perp}$	0.5 mm
težinski koeficijenti	$w_1 = 0.3; w_2 = 0.3; w_3 = 0.1$
η_L	3
<i>Parametri genetskog algoritma</i>	
inicijalna populacija	200
ukupan broj generacija	500
funkcija selekcije	roulette
procenat ukrštanja	80%
procenat mutacije	9%
broj elitnih jedinki	2

Funkcija cilja pri sintezi gipkog mehanizma hvatača je istog oblika kao i pri sintezi gipkog invertora pomeranja (jednačina 11), pri čemu je dodato i još jedno ograničenje kako bi se osiguralo da mehanizam realizuje pomeranje izvršne tačke u zadanom pravcu. Ograničenje je postavljeno u vidu nejednakosti odnosno uslova da pomeranje izvršne tačke u pravcu upravnom na pravac zadanog pomeranje Δ_{iz}^\perp bude manje od zadate vrednosti ($\Delta_{iz}^\perp < \Delta_{max}^\perp$) koja je definisana unapred (ukoliko je uslov narušen primenjuje se odgovarajuća penalizacija funkcije cilja). Konačni oblik funkcije cilja koju smo koristili pri sintezi gipkog mehanizma hvatača dat je izrazom:

$$\text{maksimizovati } \left[\frac{\Delta_{iz}}{\Delta_{ul}} + w_1 \cdot (\Delta_{iz} - \Delta_{iz \min}) + w_2 \cdot (\Delta_{max}^\perp - |\Delta_{iz}^\perp|) - w_3 \cdot |L_{ukup} - L_{cilj}| \right] \quad (12)$$

Vrednosti težinskih koficijenata, ograničenja i parametara genetskih algoritama dati su u tabeli 4. Nakon završetka procesa optimizacije dobija se rešenje koje predstavlja optimalnu topologiju gipkog mehanizma hvatača (slika 3.33.c) [209].



slika 3.33. Sinteza gipkog mehanizma hvatača: a) postavka zadatka sinteze; b) diskretizacija oblasti optimizacije (3x4-1 čvor); c) optimalna toplogija gipkog mehanizma hvatača; d) meahnizam prikazan u deformisanom položaju

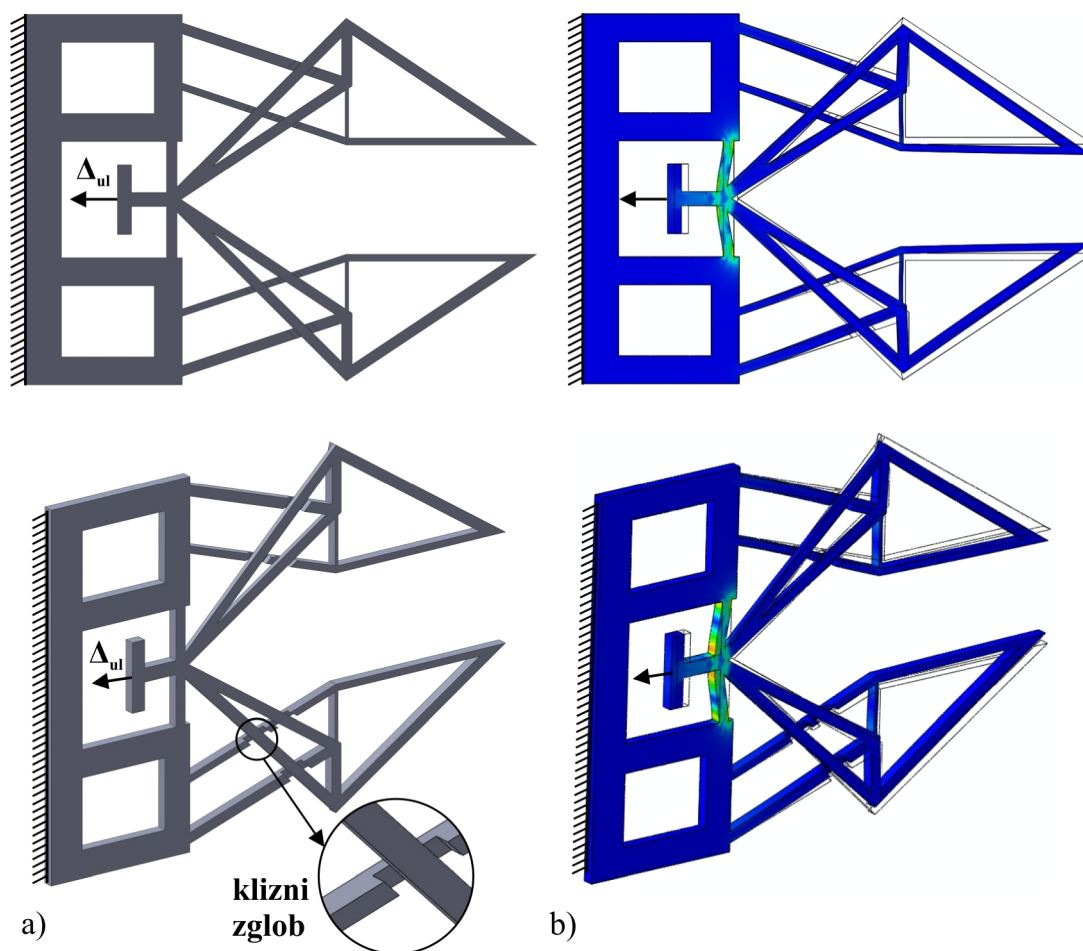
Pod dejstvom pogonskog pomeranja $\Delta_{ul}=1$ mm u zadatoj napadnoj tački, gipki mehanizam realizuje pomeranje izvršne tačke $\Delta_{iz}=1.501$ mm u zadatom pravcu (slika 3.33.d). Rezultati pokazuju da gipki mehanizam hvatača ostvaruje pojačanje pogonskog pomeranja od $\Delta_{iz}/\Delta_{ul}=1.501$, što znači da dobijeno rešenje ispunjava zahteve postavljene zadatkom sinteze. Ostali rezultati prikazani su u tabeli 5.

Tabela 5. Rešenje zadatka optimizacije topologije gipkog mehanizma hvatača

<i>Rezultati</i>		
ukupan broj linijskih elemenata	9	
prenosni odnos mehanizma	1.501	
Δ_{iz}^{\perp}	0.334 mm	
L_{ukup}	181.485 mm	
Ostvareno pomeranje izvršne tačke Δ_{iz}		
linearna MKE (optimizacioni algoritam)	nelinerana MKE (ABAQUS)	greška
1.501 mm	1.465 mm	2.39%

Kako bi se potvrdila funkcionalnost dobijenog rešenja, razvijen je i 3D model gipkog mehanizma hvatača (slika 3.34.a) i izvršena je nelinearna analiza MKE. Potrebno je naglasiti da se kod rešenja gipkog mehanizma hvatača dobijenog optimizacionim algoritmom javljaju i preseki elemenata odnosno elementi koji se ukrštaju u ravni deformacije mehanizma, i trebalo bi ih realizovati u paralelnim ravnima jedan ispod drugog, pa je i 3D model razvijen u skladu sa dobijenim rešenjem (na mestu ukrštanja ugrađen je klizni zglob). Za MKE analizu postavljena su ista ograničenja kao i pri definisanju postavke zadatka sinteze (osim uslova simetrije) (tabela 4). Rezultati nelinearne analize MKE prikazani su na slici 3.34.b i u tabeli 5. Analizom dobijenih rezultata može se zaključiti da mehanizam realizuje zahteve postavljene zadatkom sinteze, pri čemu ostvaruje istu funkciju kao i rešenje dobijeno algoritmom.

Fizički prototip ovakvog rešenja nije realizovan; strukturu sa elementima koji se nalaze u različitim ravnima teško je izraditi obradom rezanjem na CNC glodalici. U disertaciji je razvijena metodologija sinteze gipkih mehanizama kod kojih ne bi dolazilo do preseka elemenata u strukturi, a što će biti detaljno objašnjeno u narednom odeljku.

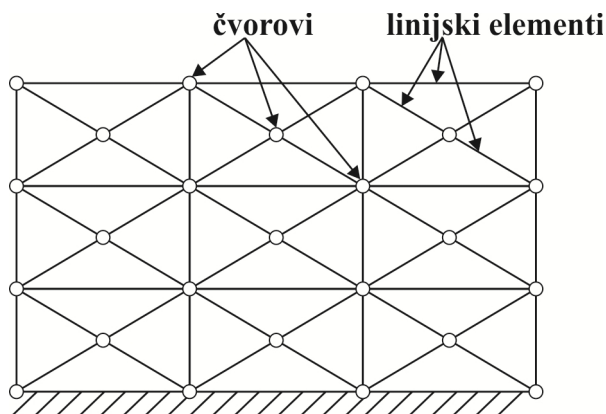


slika 3.34. a) Model gipkog mehanizma hvatača; b) rezultati nelinearne MKE

3.5. Problem preseka elemenata u strukturi

Pri optimizaciji topologije gipkih mehanizama veoma je važan izbor početnog seta strukturnih elemenata kojim je oblast optimizacije diskretizovana, jer početni set strukturnih elemenata u stvari predstavlja prostor potencijalnih rešenja unutar koga se traži optimalno rešenje postavljenog zadatka sinteze. Autori, u literaturi, pri sintezi gipkih mehanizama najčešće koriste redukovani početni set strukturnih elemenata (linijskih elemenata) sa samo jednim stepenom međusobne povezanosti čvorova [99, 103, 113, 207, 211]; kod redukovano početog seta strukturnih elemenata, svaki linijski element povezuje odgovarajući čvor sa jednim od njemu susednih čvorova, u istom pravouganom polju oblasti optimizacije (slika 3.35.). Redukovani početni set strukturnih elemenata sadrži značajno manji broj optimizacionih pomenljivih, pri čemu su čvorovi postavljeni i na mestu preseka (ukrštanja) dva linijska elementa (slika 3.35.). U ovakvom početnom setu strukturnih elemenata ne

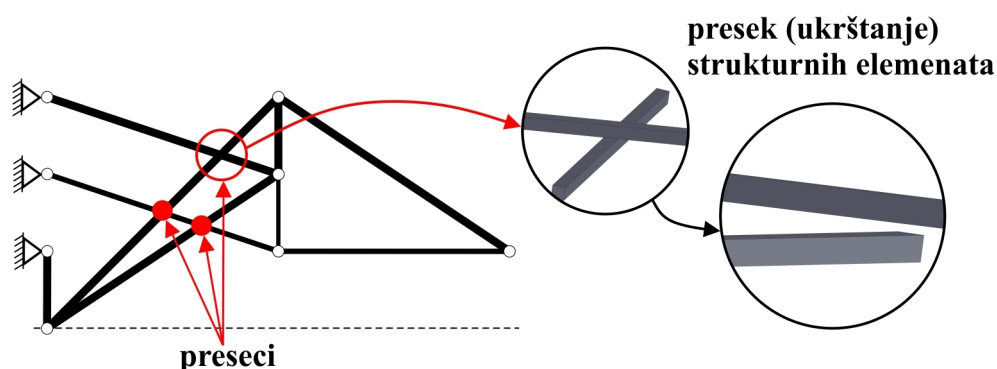
javljaju se preseki strukturnih elemenata već su elementi koji se ukrštaju unutar jednog pravougaonog polja oblasti optimizacije "razbijeni" na četiri manja linijska elementa koja su međusobno spojena jednim čvorom (slika 3.35.).



slika 3.35. Redukovani početni set strukturnih (linijskih) elemenata

I pored toga što značajno skraćuje vreme koje je potrebno da optimizacija konvergira ka rešenju, a dobijaju se i gipki mehanizmi bez preseka strukturnih elemenata, redukovani početni set strukturnih elemenata ne može uvek da diskretizuje oblast optimizacije dovoljnim brojem optimizacionih promenljivih; zbog redukcije početne mreže čvorova i linijskih elemenata koji povezuju čvorove mnoga potencijalna rešenja zadatog problema sinteze biće izgubljena i pre početka procesa optimizacije.

U optimizaciji topologije gipkih mehanizama se takođe koristi i delimično povezani početni set strukturnih elemenata (slika 3.25. i slika 3.33.b) [95, 98, 100, 110, 143, 145]; delimično povezani set strukturnih elemenata je korišćen i pri sintezi gipkog invertora pomeranja (odjeljak 3.3) i pri sintezi gipkog mehanizma hvatača (odjeljak 3.4.). Ovakvim, delimično povezanim početnim setom strukturnih elemenata oblast optimizacije je efikasnije diskretizovana jer ima viši stepen međusobne povezanosti čvorova u strukturi odnosno svaki čvor je povezan linijskim elementom sa mnogo više ostalih čvorova u strukturi. Mana ovakvog postupka je, međutim, što se primenom delimično povezanog početnog seta strukturnih elemenata dobijaju rešenja gipkih mehanizama kod kojih se strukturni elementi ukrštaju (slike 3.8.c, 3.18.b, 3.31.b, 3.33.c ili pogledaj [95, 98, 100, 110, 143, 145]), u tačkama u kojima nisu postavljeni čvorovi (slika 3.36.). U literaturi je problem preseka strukturnih elemenata okarakterisan kao nedostatak tehnike optimizacije koja koristi delimično povezani set strukturnih elemenata, pri čemu je ovaj problem teško prevazići [110].



slika 3.36. Primer strukturnih elemenata koji se presecaju (ukrščaju)

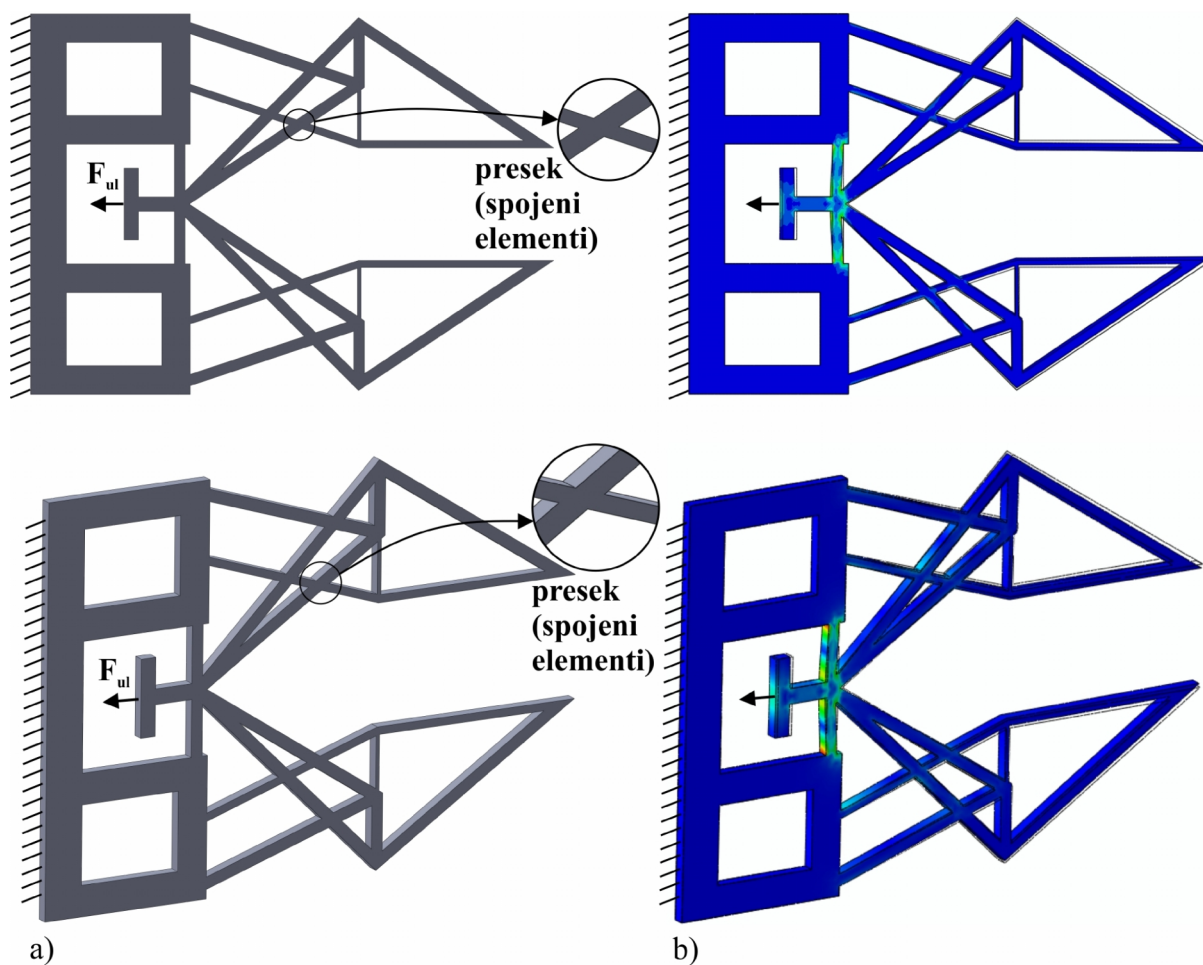
Postavljanje čvorova na mestu preseka linijskih elemenata, u delimično povezanom setu linijskih elemenata, značajno bi produžilo vreme konvergencije procesa optimizacije ka rešenju zato što bi takav set strukturnih elemenata bio veoma kompleksan, sa mnogo strukturnih elemenata (slika 3.25.), a samim tim i mnogo optimizacionih promenljivih. Pored ovoga ovakvim pristupom, dobijala bi se rešenja gipkih mehanizama koja mogu da sadrže strukturne elemente veoma male dužine, koji bi se ponašali kao gipki zglobovi (slika 3.1.).

Projektant mora imati na umu da elementi koji se ukrštaju moraju biti izrađeni tako da leže u različitim, međusobno paralelnim ravnima, jedan ispod drugog (slika 3.36.), ili je potrebno na mestu preseka napraviti nešto slično kliznom zgobu kao što je to urađeno na slici 3.34.a ili u [100]. Izrada strukturnih elemenata koji leže u paralelnim ravnima, a deo su iste monolitne strukture, veoma je kompleksna (klasičnim metodama izrade kao što su obrada rezanjem ili livenje u kalupima), a i izrada kliznog zgloba na mestu preseka bila bi takođe veoma složena. Ovakve strukture, moguće je izraditi 3D štampom (engl. *3D printing*), međutim, ovakav postupak izrade je još uvek skup, veoma spor i manje precizan u poređenju sa klasičnim metodama proizvodnje.

Ukoliko bi ukrštene elemente izradili u istoj ravni i elemente kruto vezali u tački preseka, kao na slici 3.37.a, krutost takve strukture bi se značajno povećala, a i funkcionalnost celog mehanizma bi opala u odnosu na rešenje dobijeno optimizacijom (rešenje sa presecima linijskih elemenata pri čemu na mestu preseka čvorovi nisu postavljeni). Inače, ovakvu strukturu bi bilo moguće mnogo lakše i brže izraditi, iz jednog komada materijala, recimo glodanjem.

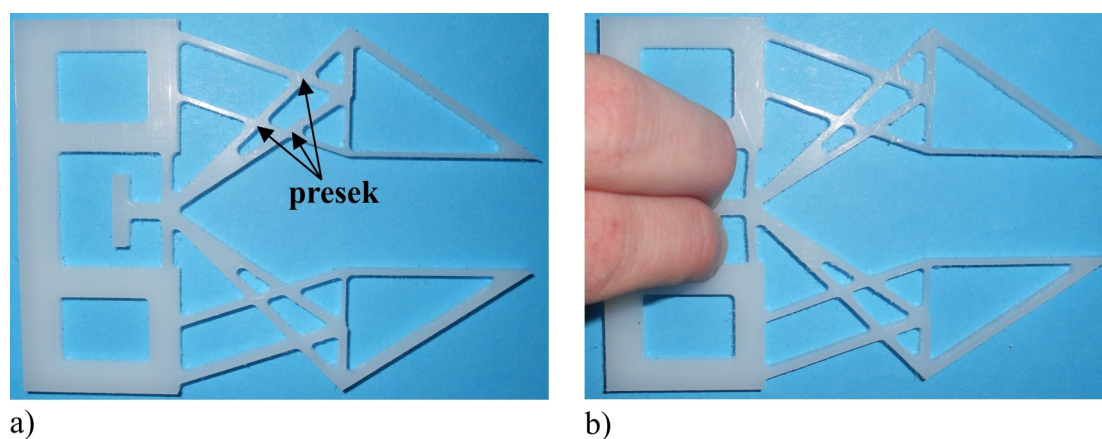
Kako bi pokazali uticaj ovakvog rešenja preseka elemenata na funkciju mehanizma, sprovedena je uporedna analiza ponašanja MKE (u ABAQUS-u) razvijenog gipkog mehanizma hvatača koji sadrži ukrštene strukturne elementima koji leže u različitim ravnima

(slika 3.36.) i ponašanja gipkog mehanizma hvatača sa međusobno kruto vezanim ukrštenim strukturnim elementima u istoj ravni. Za analizu MKE, pored već razvijenog 3D modela prikazanog na slici 3.34, razvijen je još jedan 3D model istog gipkog mehanizma hvatača, ali sa međusobno kruto vezanim ukrštenim elementima u istoj ravni (slika 3.37.a). Pri analizi MKE, u slučaju oba mehanizma korišćena su ista ograničenja - kao pogon na ulazu primenjena je pogonska sila intenziteta 5N (slika 3.37.a).



slika 3.37. a) Model gipkog mehanizma hvatača sa međusobno kruto vezanim ukrštenim elementima; b) rezultati nelinearne analize MKE

Analiza dobijenih rezultata pokazuje da, pri dejstvu iste pogonske sile, gipki mehanizam sa međusobno kruto vezanim ukrštenim elementima (leže u istoj ravni), realizuje manje pomeranje izvršnih tačaka (slika 3.37.b i tabela 6). Izrađen je i fizički prototip ovakvog gipkog mehanizma hvatača (slika 3.38.) čije ponašanje je potvrdilo prethodni zaključak. Može se zaključiti da ovakvo rešenje preseka elemenata negativno utiču na funkcionalnost mehanizma.



slika 3.38. Izrađeni model gipkog mehanizma hvatača (plastika) sa međusobno kruto vezanim ukrštenim elementima

Tabela 6. Rezultati uporedne analize ponašanja gipkog mehanizma hvatača bez i sa međusobno kruto vezanim ukrštenim elementima

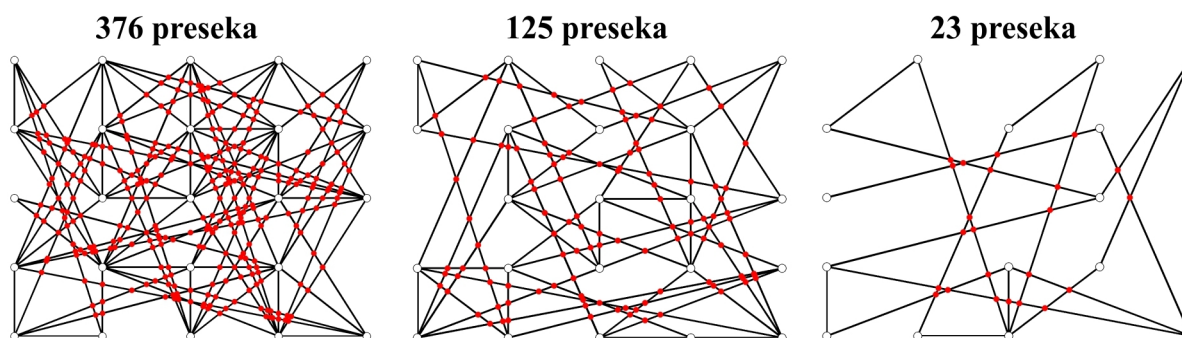
<i>Rezultati</i>	
Pomeranje izvršne tačke kod strukture sa ukrštenim strukturnim elementima koji leže u različitim ravnima	Pomeranje izvršne tačke kod strukture sa međusobno kruto vezanim ukrštenim elementima
0.603 mm	0.496 mm

Ovi nedostaci predstavljaju motivaciju za poboljšanje postojeće tehnike optimizacije topologije [95, 98, 100, 110, 143], eliminisanjem preseka strukturnih elemenata tokom procesa optimizacije [209], što bi vodilo rešenjima gipkih sistema bez elemenata koji se ukrštaju. U literaturi [95, 98, 100, 110, 143] mogu se sresti pristupi koji eliminišu preklapajuće elemente, ali ne i eliminisanje elemenata koji se ukrštaju.

U disertaciji je, za eliminaciju preseka strukturnih elemenata tokom procesa optimizacije topologije, razvijen odgovarajući algoritam u vidu kompjuterskog koda koji služi kao pretraživački filter [209]. U svakoj iteraciji procesa optimizacije algoritam traži u datoj strukturi presečne tačke elemenata (slika 3.39.). Cilj je eliminisati po mogućstvu sve preseke koji se javljaju u strukturi pa minimizacija ukupnog broja presečnih tačaka treba da predstavlja jedan od ciljeva optimizacije (mogla bi da bude uključena u funkciju cilja). U optimizacionom algoritmu koji je razvijen u ovoj disertaciji, međutim, minimizacija ukupnog broja preseka (n_{pres}) ne koristi se kao cilj već kao ograničenje (vidi odeljak 3.2.3.); kada se tokom optimizacije javi struktura koja sadrži preseke, elementi koji se ukrštaju se zamenjuju

novim elementima koji formiraju strukturu bez preseka. Opšti oblik funkcije cilja koja bi garantovala da se dobijaju rešenja gipkih mehanizama bez ukrštenih elemenata, dat je izrazom:

$$\text{maksimizovati } \left[\frac{\Delta_{iz}}{\Delta_{ul}} \pm w_n \cdot (n \text{ raznih ograničenja}) - w_{n+1} \cdot |L_{ukup} - L_{cilj}| - w_{n+2} \cdot n_{pres} \right] \quad (13)$$



slika 3.39. Određivanje presečnih tačaka elemenata u različitim koracima optimizacije (preseci su označeni crvenim tačkama)

3.6. Sinteza gipkih mehanizama bez preseka elemenata

Sinteza gipkih mehanizama koji ne sadrže preseke elemenata biće prikazana na primeru sinteze gipkog mehanizma hvatača i gipkog invertora pomeranja (uzeti su isti primeri za sintezu kao i u prethodnom slučaju, kako bi se sprovedla odgovarajuća uporedna analiza dobijenih rešenja). Cilj i postavka zadatka sinteze u oba slučaja su isti kao i pri sintezi odgovarajućih gipkih mehanizama sa slike 3.28. odnosno slike 3.33. Potrebno je sintezom dobiti odgovarajuću topologiju gipkog mehanizma hvatača koji može da realizuje zahtevano pomeranje izvršnih tačaka u zadatom pravcu (slika 3.40.a), odnosno potrebno je sintezom dobiti optimalnu topologiju gipkog invertora pomeranja koji može da pomeri izvršnu tačku u smeru suprotnom od smera pomeranja pogonske tačke (slika 3.40.e). Svi podaci postavke zadatka sinteze gipkog mehanizma hvatača su isti kao i podaci iz tabele 4, a u slučaju gipkog invertora pomeranja podaci su isti kao i podaci iz tabele 1.

Oblast optimizacije je diskretizovana (u slučaju oba mehanizma) delimično povezanim početnim setom linijskih elemenata sa parametrima datim u tabeli 4 i tabeli 1. Na slici 3.40. prikazane su diskretizovane oblasti optimizacije, koja, u početnom setu linijskih elemenata, u

slučaju gipkog mehanizma hvatača sadrži 81 presečnu tačku (slika 3.40.b), a u slučaju gipkog invertora pomeranja sadrži 9 presečnih tačaka (slika 3.40.f) (mesta preseka linijskih elemenata prikazana su crvenim tačkama).

Funkcija cilja pri sintezi gipkog mehanizma hvatača ima isti oblik kao i funkcija cilja definisana jednačinom (12), ali je sada u jednačini dodato i ograničenje ukupnog broja preseka u strukturi (n_{pres}):

$$\text{maksimizovati} \left[\begin{array}{l} \frac{\Delta_{iz}}{\Delta_{ul}} + w_1 \cdot (\Delta_{iz} - \Delta_{iz \min}) + w_2 \cdot (\Delta_{\max}^{\perp} - |\Delta_{iz}^{\perp}|) - w_3 \cdot |L_{ukup} - L_{cilj}| - w_4 \cdot n_{pres} \end{array} \right] \quad (14)$$

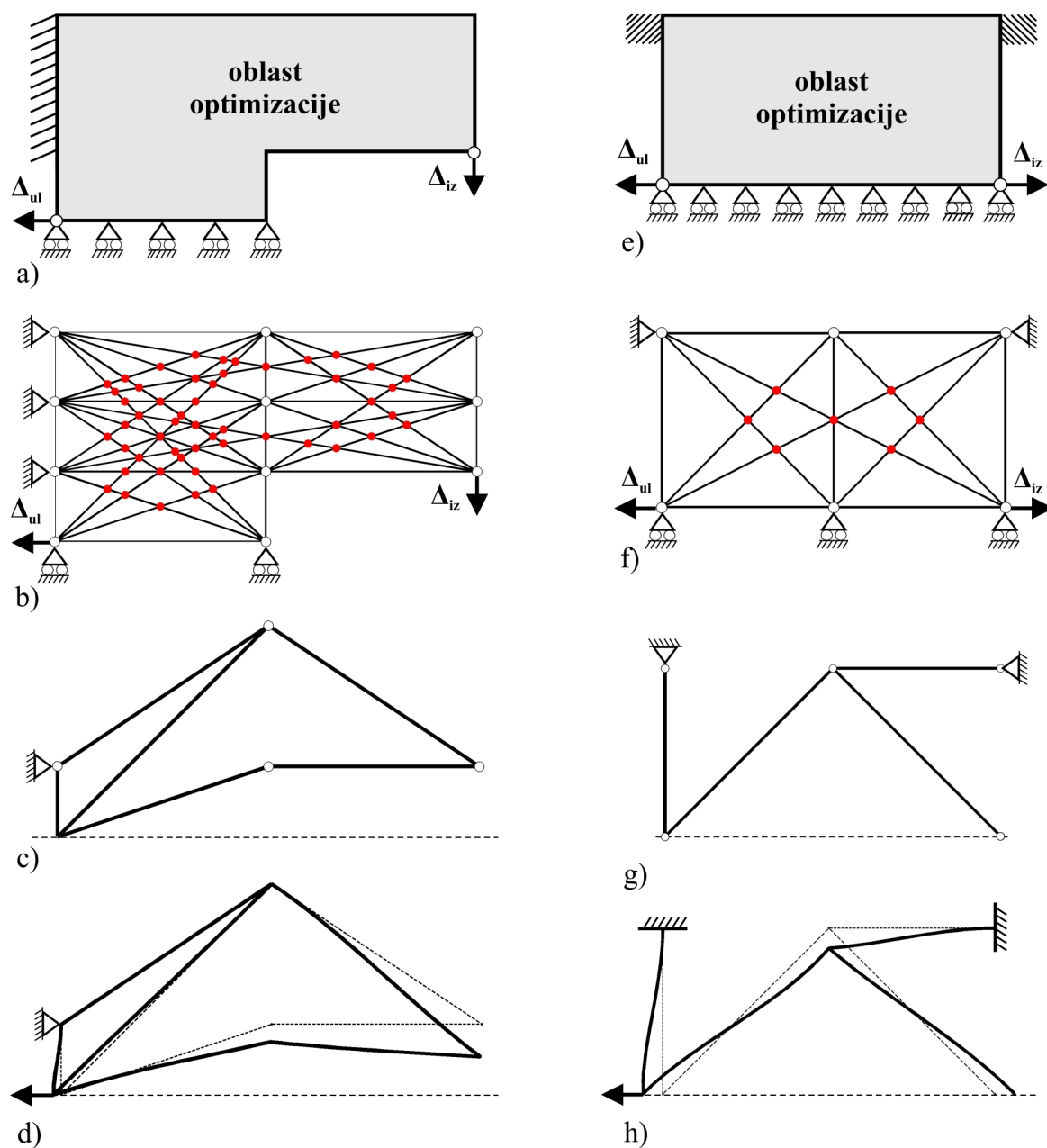
Za slučaj sinteze gipkog invertora pomeranja, funkcija cilja ima isti oblik kao u jednačini (11), pri čemu je takođe dodato ograničenje ukupnog broja preseka u strukturi:

$$\text{maksimizovati} \left[\begin{array}{l} \frac{\Delta_{iz}}{\Delta_{ul}} + w_1 \cdot (\Delta_{iz} - \Delta_{iz \min}) - w_2 \cdot |L_{ukup} - L_{cilj}| - w_3 \cdot n_{pres} \end{array} \right] \quad (15)$$

Parametri odgovarajućih ograničenja, kao i parametri genetskog algoritma, pri sintezi gipkog mehanizma hvatača su isti kao i u tabeli 4 (vrednost težinskog koeficijenta $w_4=1$), a pri sintezi gipkog invertora pomeranja parametri su isti kao i u tabeli 1 pri čemu je vrednost težinskog koeficijenta $w_3=1$. Dobijene optimalne topologije gipkog mehanizma hvatača i gipkog invertora pomeranja prikazane su na slici 3.40.c i slici 3.40.g [209].

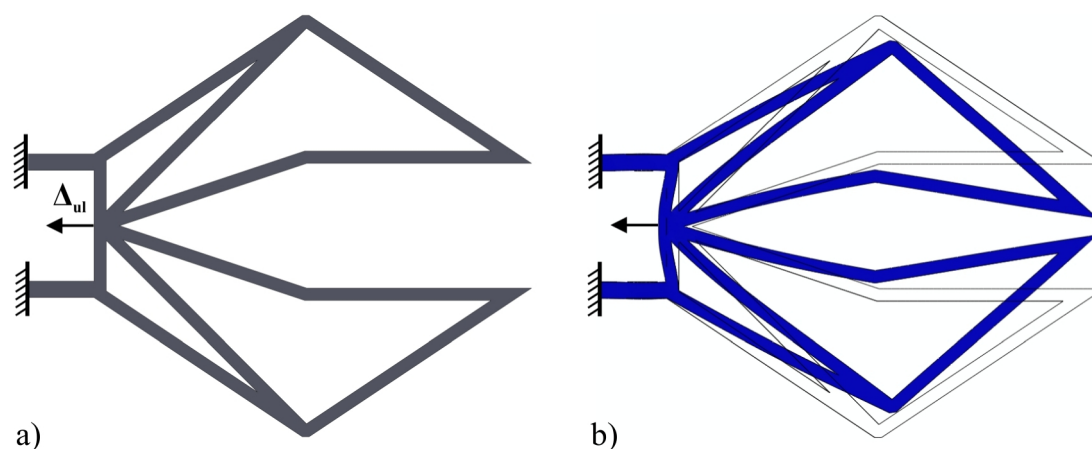
U slučaju gipkog mehanizma hvatača, za razliku od rešenja prikazanog na slici 3.33.c, ovde se dobija rešenje gipkog mehanizma koje ne sadrži strukturne elemente koji se ukrštaju (slika 3.40.c). Rezultati analize pokazuju da pri dejstvu pogonskog pomeranja $\Delta_{ul}=1$ mm, gipki mehanizam hvatača realizuje pomeranje izvršne tačke $\Delta_{iz}=5.937$ mm u zadatom pravcu odnosno ostvaruje pojačanje pogonskog pomeranja $\Delta_{ul}/\Delta_{iz}=5.937$ (tabela 7). Poređenjem rezultata analize gipkog mehanizma hvatača sa presecima (slika 3.33.c) i bez preseka elemenata (slika 3.40.c), može se zaključiti da gipki mehanizam koji ne sadrži elemente koji se ukrštaju realizuje veće pojačanje pogonskog pomeranja (poboljšava funkcionalnost) u odnosu na rešenje sa elementima koji se ukrštaju. Međusobno kruto vezani ukršteni elementi povećavaju krutost strukture pa samim tim smanjuju i funkcionalnost celog mehanizma. Važno je primetiti da je topologija dobijenog gipkog mehanizma hvatača formirana

uglavnom od elemenata koji ne bi egzistirali da je za diskretizaciju oblasti optimizacije korišćen redukovani početni set strukturnih elemenata (slika 3.35.).



slika 3.40. Sinteza gipkih mehanizama bez preseka elemenata: a) postavka zadatka sinteze gipkog mehanizma hvatača; b) diskretizacija oblasti optimizacije (81 presek); c) optimalna topologija gipkog mehanizma hvatača; d) mehanizam prikazan u deformisanom položaju; e) postavka zadatka sinteze gipkog invertora pomeranja; f) diskretizacija oblasti optimizacije (9 preseka); g) rešenje gipkog invertora pomeranja; h) mehanizam prikazan u deformisanom položaju [209]

Na osnovu dobijenog rešenja (slika 3.40.c), razvijen je i 3D model gipkog mehanizma dvoprstog hvatača koji ne sadrži elemente koji se ukrštaju (slika 3.41.a) i sprovedena je odgovarajuća nelinearna analiza MKE u ABAQUS-u (kao ograničenja korišćeni su isti parametri kao i pri definisanju postavke zadatka sinteze). Rezultati analize prikazani su na slici 3.41. i u tabeli 7. Kao što se može videti sa slike i na osnovu rezultata datih u tabeli, gipki mehanizam hvatača realizuje istu funkciju kao i mehanizam dobijen optimizacionim algoritmom (interesantno je primetiti da je nelinearnom MKE dobijeno veće pojačanje pogonskog pomeranja nego linearnim modelom).

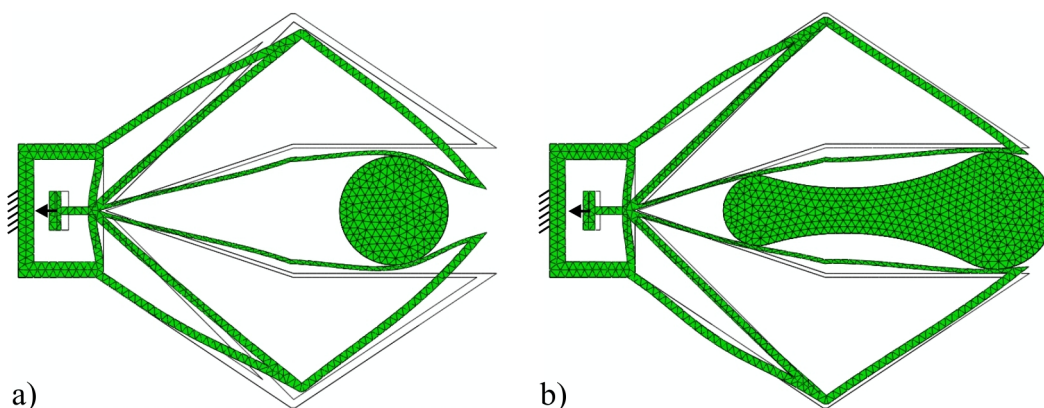


slika 3.41. a) Model gipkog mehanizma dvoprstog hvatača koji ne sadrži elemente koji se ukrštaju; b) rezultati nelinearne analize MKE [209]

Tabela 7. Rešenje zadatka optimizacije topologije gipkog mehanizma hvatača koji ne sarži elemente koji se ukrštaju

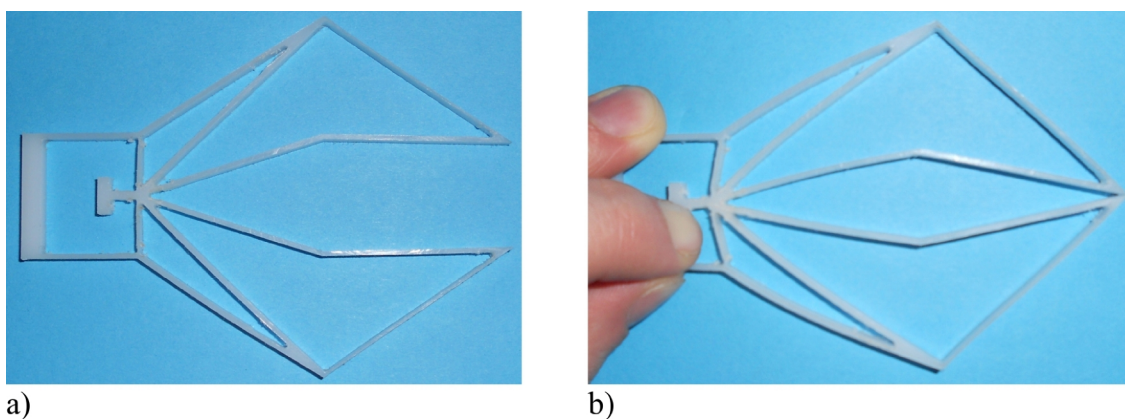
<i>Rezultati</i>		
ukupan broj linijskih elemenata	6	
debljina linijskih elemenata	1.5 mm	
prenosni odnos mehanizma	5.937	
Δ_{iz}^{\perp}	0.303 mm	
L_{ukup}	155.133 mm	
Ostvareno pomeranje izvršne tačke Δ_{iz}		
linearna MKE (optimizacioni algoritam)	nelinearna MKE (ABAQUS)	greška
5.937 mm	6.550 mm	10.32%

Dobijeno rešenje gipkog mehanizma hvatača može se primeniti i kao hvatač robotske ruke, za manipulaciju objekata različitog oblika. Kako bi ovo proverili, izvršena je dodatna analiza MKE, sa konveksnim i konveks-konkavnim predmetima kao objektima koje gipki hvatač treba da uhvati (slici 3.42). Kao što se može uočiti sa slike 3.42. gipki hvatač realizuje hvatanje različitih objekata odnosno ima potencijala da se koristi kao hvatač u robotici, ali i kao hirurški instrument u medicini ili u biomedicini.



slika 3.42. Rezultati nelinearne analize MKE ponašanja gipkog mehanizma hvatača koji ne sadrži elemente koji se ukrštaju, pri hvatanju predmeta: a) konveksnog oblika; b) konveks-konkavnog oblika

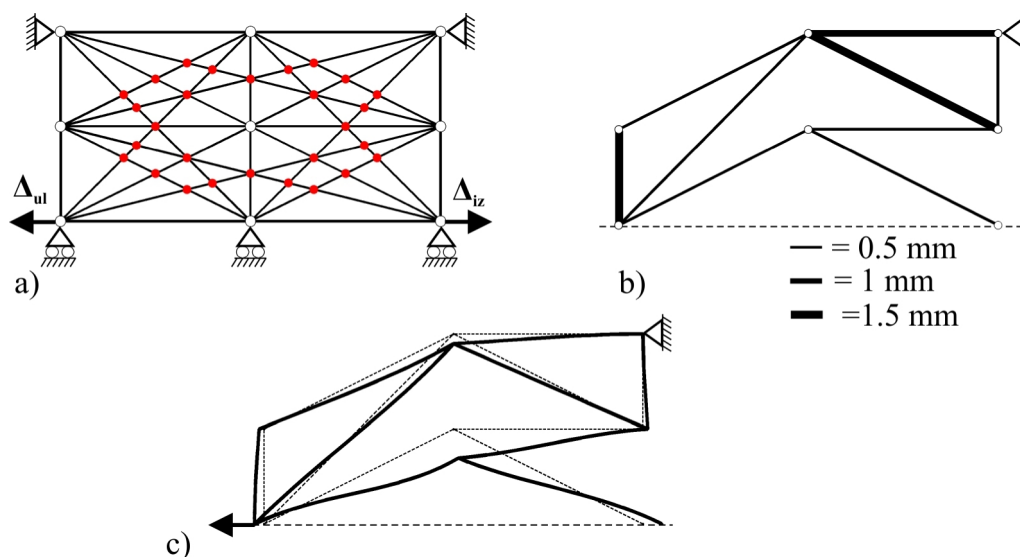
Izrađen je i fizički prototip gipkog mehanizma hvatača od HDPE plastike (slika 3.43.), čije je ponašanje potvrdilo da mehanizam realizuje istu funkciju kao i rešenje dobijeno algoritmom i analizirano u ABAQUS-u.



slika 3.43. Izrađeni prototip gipkog mehanizma hvatača koji ne sadrži elemente koji se ukrštaju (HDPE plastika) prikazan u nedeformisanom (a) i deformisanom položaju (b)

Dobijeno rešenje gipkog invertora pomeranja na slici 3.28. ne sadrži elemente koji se ukrštaju pa je i ovim optimizacionim algoritmom, koji eliminiše preseke elemenata, dobijeno isto rešenje (slika 3.40.g).

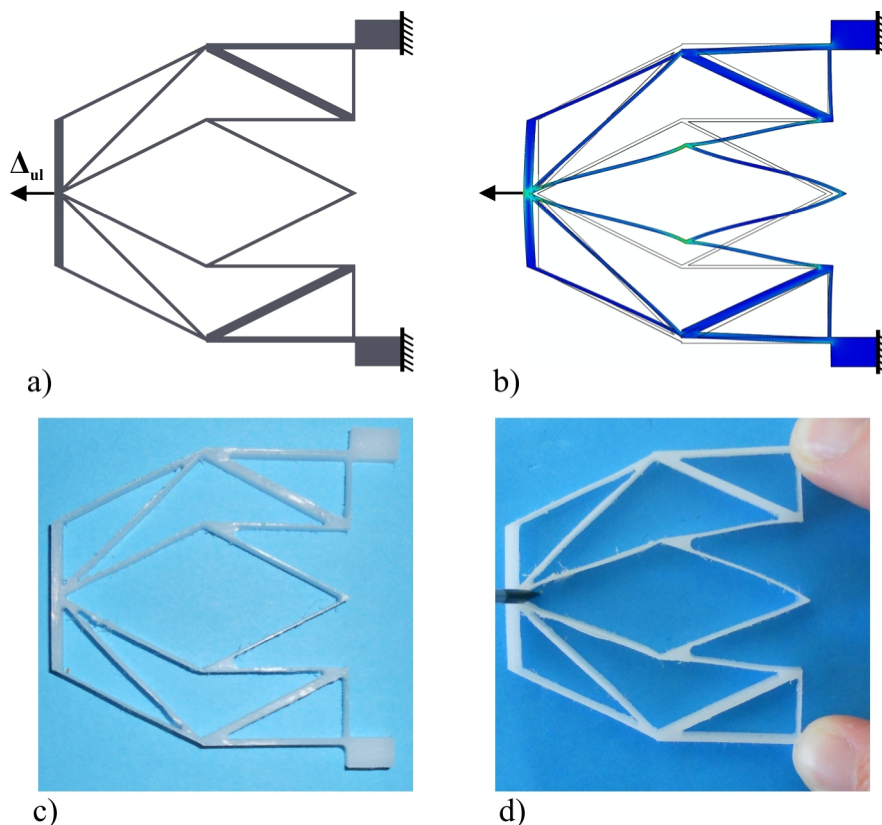
Kako bi proverili učinak ovog optimizacionog algoritma i na primeru sinteze gipkog invertora pomeranja, izvršena je dodatna sinteza, ali sada sa većom gustinom mreže čvorova i linijskih elemenata (3x3 čvora i 28 linijska elementa), kao i u slučaju sinteze gipkog invertora pomeranja prikazanog na slici 3.31. Svi ostali podaci postavke zadatka sinteze, ograničenja, parametri genetskog algoritma isti su kao i pri sintezi gipkog invertora sa slike 3.31. (tabela 1), uz izmenu vrednosti težinskog koeficijenta $w_3=1$ i $\eta_L=4$. Dobijena optimalna topologija gipkog mehanizma prikazana je na slici 3.44. [209], a u tabeli 8 dati su rezultati analize.



slika 3.44. Sinteza gipkog invertora pomeranja bez preseka elemenata, sa oblašću optimizacije diskretizovanom većom gustinom mreže: a) postavka zadatka sinteze i diskretizacija oblasti optimizacije (3x3 čvora); b) optimalna topologija gipkog invertora pomeranja; c) mehanizam prikazan u deformisanom položaju [209]

Za razliku od rešenja prikazanog na slici 3.31., ovim algoritmom je dobijen gipki mehanizam bez elemenata koji se ukrštaju (slika 3.44.b). Prethodno pomenuti zaključak potvrđen je i ovde, da se sa većom gustinom mreže može dobiti gipki invertor pomeranja koji realizuje pojačanje pogonskog pomeranja (tabela 8); u poređenju sa gipkim mehanizmom prikazanim na slici 3.31, gipki invertor pomeranja bez elemenata koji se ukrštaju realizuje već pojačanje pogonskog pomeranja. Slično kao i u slučaju gipkog mehanizma hvatača, optimalna topologija gipkog invertora sadrži elemente koji ne bi egzistirali da je za

diskretizaciju oblasti optimizacije korišćen redukovani početni set strukturnih elemenata. Dobijeni rezultati su potvrđeni analizom MKE u ABAQUS-u (tabela 8 i slika 3.45.b). Izrađen je i fizički prototip mehanizma od HDPE plastike (slika 3.45.c i slika 3.45.d). Interesantno je primetiti da je nelinearnom analizom dobijeno veće pojačanje pogonskog pomeranja nego linearnim modelom (tabela 8). Međutim, i pored relativno male greške linearnog modela evidentno je da mehanizam realizuje istu funkciju (slika 3.45.b i slika 3.45.d).



slika 3.45. a) Model gipkog invertora pomeranja dobijenog većom gustinom početne mreže čvorova i strukturnih elemenata; b) rezultati nelinearne analize MKE; c) fizički prototip rešenja (HDPE plastika) prikazan u nedeformisanom položaju; d) prototip prikazan u deformisanom položaju

Tabela 8. Rešenje zadatka optimizacije topologije gipkog invertora pomeranja dobijenog većom gustinom početne mreže čvorova i linijskih elemenata

<i>Rezultati</i>				
ukupan broj linijskih elemenata		9		
prenosni odnos mehanizma		1.952		
L _{ukup}		222.158 mm		
Ostvareno pomeranje izvršne tačke Δ_{iz}				
linearna MKE (optimizacioni algoritam)	nelinearna MKE (ABAQUS)	greška	fizički prototip	greška
1.952 mm	2.334 mm	19.56%	1.8 mm	7.78%

Na kraju, može se izvesti generalni zaključak da razvijena metodologija optimizacije topologije gipkih mehanizama daje rešenja gipkih mehanizama koji ne sadrže strukturne elemente koji se ukrštaju (presecaju), pri čemu dobijena rešenja bolje realizuju zahteve zadatka sinteze u odnosu na rešenja sa presekom elemenata.

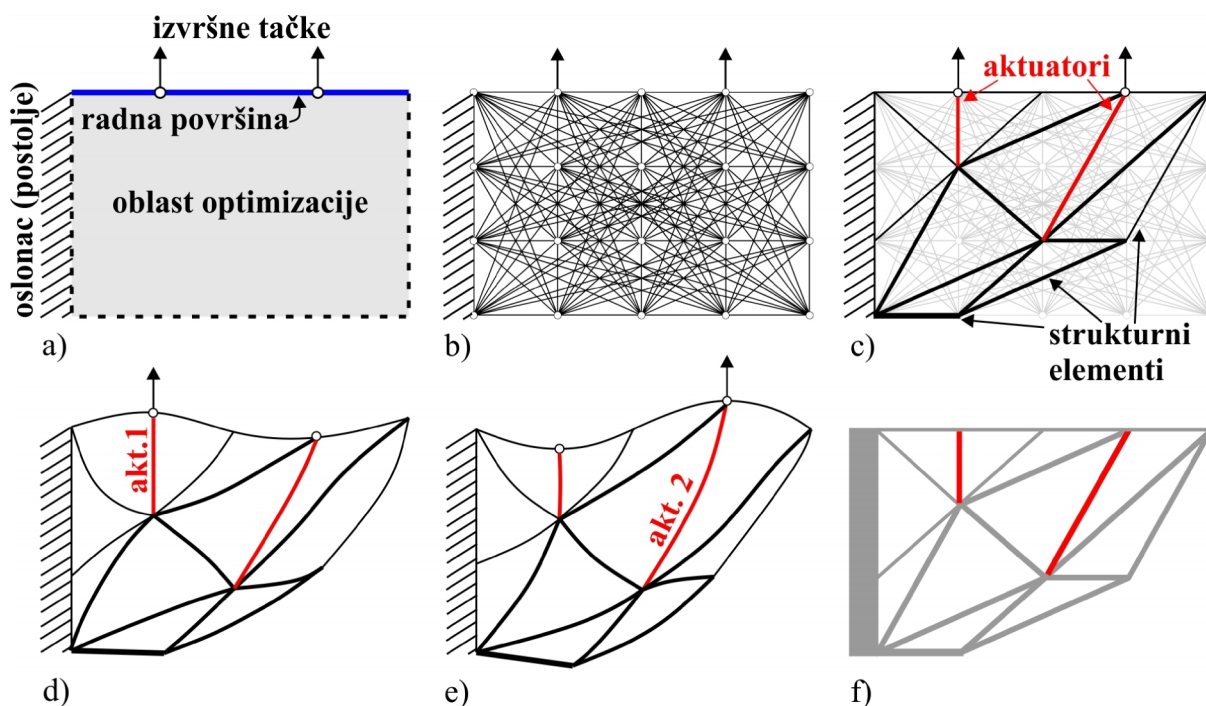
3.7. Metodologija sinteze adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine

U prethodnim odeljcima pažnja je bila posvećena sintezi klasičnih gipkih mehanizama odnosno razvoju optimizacionog algoritma za rešavanje problema sinteze tipa JUJI (vidi odeljak 3.1.1.). U ovom odeljku biće predstavljena metodologija sinteze adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine odnosno biće predstavljen odgovarajući optimizacioni algoritam, razvijen za rešavanje sinteze tipa VUVI (za gipke sisteme) [212]; razvoj ovog algoritma baziran je na prethodno razvijenom algoritmu za sintezu gipkih mehanizama.

Kao što je bilo reči u poglavljima 1 i 2, razvoj gipkog sistema uključuje istovremenu sintezu topologije gipkog mehanizma i postavke aktuatora/senzora. Primarni cilj ove disertacije je razvoj strukture koja može da realizuje više oblika izlazne (radne) površine strukture odnosno razvoj sistema koji ima strukturnu adaptibilnost. Za razvoj adaptibilnog gipkog sistema potrebno je u proces sinteze uključiti samo aktuator; ugradnjom aktuatora unutar gipke strukture sistem može ostvariti više složenih deformacija izlazne površine

odnosno sistem bi posedovao strukturnu adaptibilnost. Da bi sistem bio i adaptivan, u strukturu gipkog mehanizma moraju biti ugrađeni i senzori, ali oni ne moraju biti uključeni u proces sinteze jer je njihov zadatak samo da omogućće gipkoj strukturi da registruje promene na svojoj spoljašnjoj, radnoj površini.

Osnovni koncept metodologije koja je korišćena za razvoj adaptivne upravljive gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima prikazan je u vidu primera na slici 3.46. [212]. Slično kao i pri sintezi klasičnih gipkih mehanizama potrebno je najpre definisati postavku problema sinteze topologije (slika 3.46.a). Ovo uključuje definisanje: dimenzija oblasti optimizacije, radne površine gipke strukture (engl. *output region*) i broja izvršnih tačaka na radnoj površini, oslonaca (postolja), karakteristika materijala od koga će mehanizam biti izrađen (Jangov modul elastičnosti) i drugih ograničenja kao što su željena zbirna dužina elemenata i minimalna vrednost pomeranja koje treba da ostvare izvršne tačke radne površine. Kao rešenje zadatog problema sinteze trebalo bi dobiti topologiju gipkog mehanizma sa ugrađenim aktuatorima.



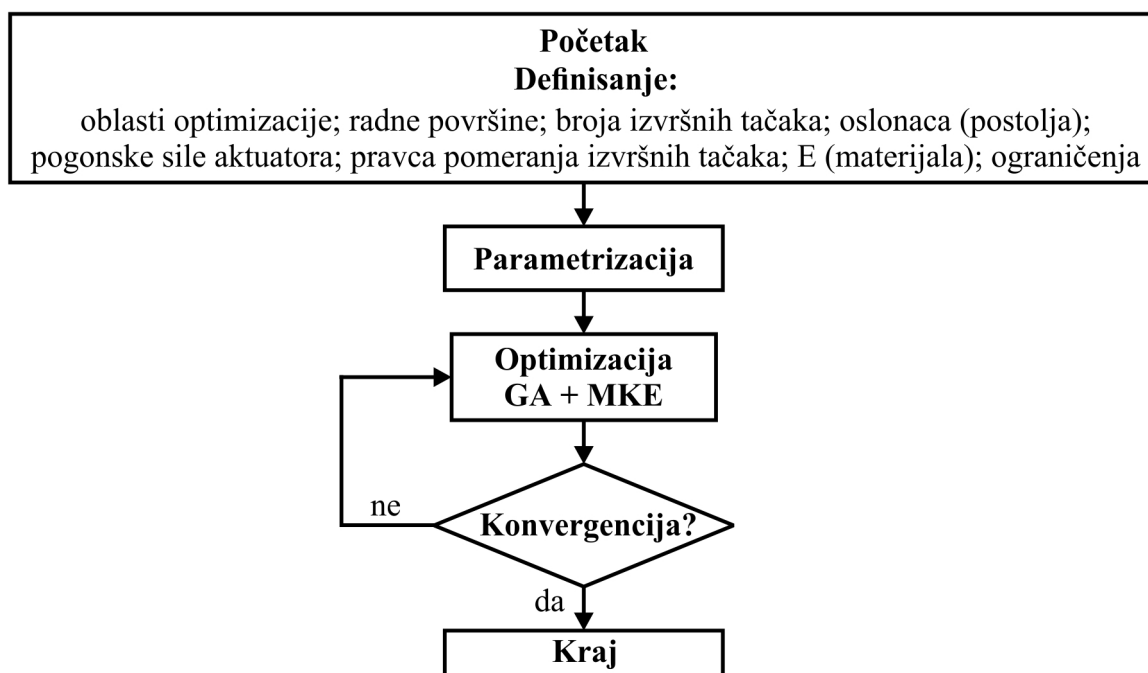
slika 3.46. Metodologija sinteze adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine: a) postavka zadatka sinteze; b) diskretizacija oblasti optimizacije; c) optimalna topologija adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima koja može da menja oblik radne površine; d) deformisani položaj strukture kada je aktivan aktuator 1; e) deformisani položaj strukture kada je aktivan aktuator 2; f) skica fizičkog prototipa [212]

U sledećem koraku, potrebno je izvršiti diskretizaciju oblasti optimizacije (slika 3.46.b). Usvojeno je da će za razvoj adaptivnog gipkog sistema u ovoj diskretizaciji biti korišćeni gipki mehanizmi sa raspodeljenom gipkošću (slika 3.2. i slika 3.43.) pa je oblast optimizacije diskretizovana odgovarajućim brojem čvorova i mrežom linijskih elemenata koji povezuju ove čvorove, kao i pri sintezi gipkih mehanizama. Kao optimizacione promenljive usvojene su debljina svakog pojedinačnog linijskog elementa i promenljive koje označavaju koji će elementi biti izabrani za aktuatorske elemente date strukture. Ukoliko se optimizacijom dobije da je vrednost debljine nekog elementa jednaka 0, to znači da dati element treba odstraniti iz strukture dok ostale vrednosti predstavljaju debljinu linijskog elementa. Optimizaciona promenljiva koja označava element izabran da bude aktuatorski element date strukture uzima vrednosti između 1 i ukupnog broja linijskih elemenata u strukturi (svaki element može biti izabran da bude aktuatorski), pri čemu je broj ovih promenljivih jednak broju aktuatora u strukturi. Ukoliko npr. želimo da struktura ima dva aktuatora, (slika 3.46.c) uvodimo dve promenljive (jednu za prvi i jednu za drugi aktuator). Ukoliko promenljiva za prvi aktuator ima vrednost 2, to znači da je strukturni element označen brojem 2 izabran da bude aktuatorski element date strukture. Ukoliko promenljiva za drugi aktuator ima vrednost 23, to znači da je strukturni element označen brojem 23 izabran da bude aktuatorski element date strukture.

Nakon diskretizacije oblasti optimizacije, primenjen je odgovarajući metod za pretragu koji treba da nađe optimalno rešenje topologije gipkog mehanizma sa ugrađenim aktuatorima. Cilj optimizacije pri sintezi gipkih mehanizama sa ugrađenim aktuatorima jeste minimizacija ukupnog broja aktuatora u strukturi i istovremeno maksimizacija strukturne adaptivnosti gipkog sistema odnosno razvoj gipkog sistema koji može da sa minimalnim brojem aktuatora u strukturi ostvari što je moguće više različitih oblika svoje radne površine, pri čemu treba da budu zadovoljena i zadata ograničenja, kao što je npr. ograničenje pomeranja izvršnih tačaka. Osnovnu strukturu gipkog sistema čine gipki mehanizmi sa raspodeljenom gipkošću pa se i pri sintezi adaptivnog gipkog sistema kao metod optimizacije koriste genetski algoritmi (vidi odeljak 3.2.4.). Po okončanju procesa optimizacije, neki od linijskih elemenata biće odstranjeni iz početne strukture (početnog seta strukturnih elemenata), a neki elementi će biti izabrani za aktuatorske elemente. Preostali linijski elementi, zajedno sa aktuatorima, definišu topologiju gipkog sistema, koja predstavlja optimalno rešenje za zadati problem; optimizovani gipki sistem se sastoji od mreže međusobno povezanih linijskih elemenata (štapova) i elemenata koji su izabrani da prerastu u aktuatorske elemente strukture (slika 3.46.c).

Kako bi se izvršila provera da li dobijeno rešenje gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine realizuje zadate podatke postavke zadatka sinteze, izvršena je analiza dobijenog rešenja metodom konačnih elemenata (slika 3.46.d i slika 3.46.e). Na kraju, izrađen je fizički prototip rešenja kako bi se potvrdila njegova funkcionalnost (slika 3.46.f).

Na osnovu prethodno opisane metodologije razvijen je odgovarajući optimizacioni algoritam (u vidu kompjuterskog koda u MATLAB-u) koji automatski generiše optimalno rešenje adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine (adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima) za datu postavku problema (slika 3.47.) [212]. Algoritam se zasniva na prethodno razvijenom algoritmu za sintezu gipkih mehanizama (slika 3.22.). U prethodnim odeljcima opisani algoritam sinteze gipkih mehanizama proširen je i dopunjen tako da je pored optimizacije topologije gipkih mehanizama i postavka aktuatora uključena u proces optimizacije; istovremeno se vrši i optimizacija topologije i optimizacija postavke aktuatora pri čemu formiranje topologije mehanizma utiče na izbor lokacije aktuatora u strukturi i obrnuto. Svi koraci prethodno opisane metodologije sinteze biće detaljno obrađeni u narednim odeljcima.



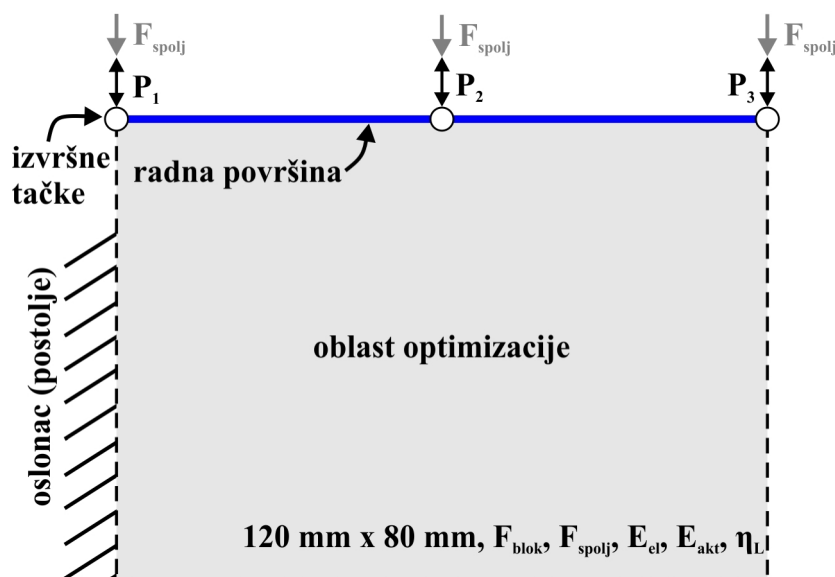
slika 3.47. Algoritam sinteze adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine [212]

3.7.1. Postavka zadatka sinteze adaptivnog gipkog sistema

Cilj je projektovati adaptivni gipki sistem koji može da upravlja oblikom svoje radne površine odnosno projektovati adaptivnu gipku strukturu sa ugrađenim aktuatorima koja može da ostvari više stanja svoje radne površine. Kao što je već bilo reči u prethodnim odeljcima, takva struktura bi imala mnogo prednosti nad postojećim strukturama koje menjaju oblik i mnogo različitih primena. Projektovati sistem koji može da upravlja svakom tačkom na radnoj površini predstavlja izuzetno komplikovan zadatak koji bi uključivao veliki broj optimizacionih promenljivih (veću gustinu diskretizacije). Stoga je važno odrediti najmanji potreban broj izvršnih (aktivnih) tačaka na radnoj površini kojima bi se upravljalo. Svaka izvršna tačka uvodi jedan stepen slobode kretanja sistema. Stepenu slobode kretanja radne površine gipkog sistema predstavlja broj različitih modova njenog oblika i odgovara željenoj složenosti mogućih oblika radne površine. Upravljanjem pomeranja pojedinih tačaka na radnoj površini moguće je ostvariti bilo koji oblik radne površine, međutim, na projektantu ostaje da sam unapred odluči koliku složenost oblika treba da ostvari gipki sistem odnosno kolika složenost oblika je potrebna kako bi sistem realizovao zadatak za koji se projektuje. To znači da je potrebno unapred odabrati kojim brojem izvršnih tačaka na radnoj površini želimo da upravljamo odnosno koliko stepeni slobode kretanja će imati naš sistem, što zavisi od složenosti oblika radne površine, koje želimo da naš gipki sistem realizuje. Prilikom definisanja broja izvršnih tačaka radne površine potrebno je naći kompromis jer preveliki broj izvršnih tačaka znači i mnogo više optimizacionih promenljivih i više aktuatora u strukturi, a samim tim i znatno složeniji problem koji treba rešiti optimizacijom. Prethodna istraživanja i dobijeni rezultati u oblasti projektovanja gipkih sistema [143] pokazali su da su tri modova oblika (tri stepena slobode kretanja) odnosno upravljanje sa samo tri izvršne tačke, dovoljni za ostvarivanje upravljanja oblikom cele radne površine (moguće je ostvariti skoro 100% upravljivih oblika). Usvojicemo stoga da su tri stepena slobode kretanja dovoljna za realizovanje adaptivnog gipkog sistema koji može da ostvari različite oblike svoje radne površine koji su dovoljno složeni za veći broj primena. Modovi oblika u ravni upravnoj na radnu površinu su glatke krive čijom kombinacijom je moguće ostvariti skoro sve moguće željene oblike površine [143]. U pravo stoga, zbog kontinualnosti radne površine, moguće je i upravljanjem samo tri izvršne tačke ostvariti delimično ali zadovoljavajuće upravljanje i svih ostalih tačaka radne površine.

Za upravljanje trima izvršnim tačkama (slika 3.48.) potrebno je najmanje tri aktuatora, po jedan aktuator za direktno upravljanje svakom tačkom. Ukupan broj potrebnih aktuatora u strukturi stoga nije uključen u proces optimizacije već je usvojen kao konstanta.

Postavka zadatka sinteze adaptivne gipke strukture prikazana je na slici 3.48 i u tabeli 9. Prostor u koji bi gipki sistem trebalo svojim gabaritima da se uklopi definisan je kao pravougaona oblast optimizacije (slika 3.48.). Leva strana oblasti optimizacije (jedan njen deo) usvojena je kao postolje odnosno kao nepokretan oslonac. Gornja granica oblasti optimizacije usvojena je kao radna površina strukture, predstavljena sa tri izvršne tačke (P_1 , P_2 i P_3) pri čemu je vertikalni pravac usvojen kao željeni pravac pomeranja izvršnih tačaka. Kao materijal od koga će struktura biti izrađena izabrana je ABS plastika.



slika 3.48. Postavka zadatka sinteze adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine [212]

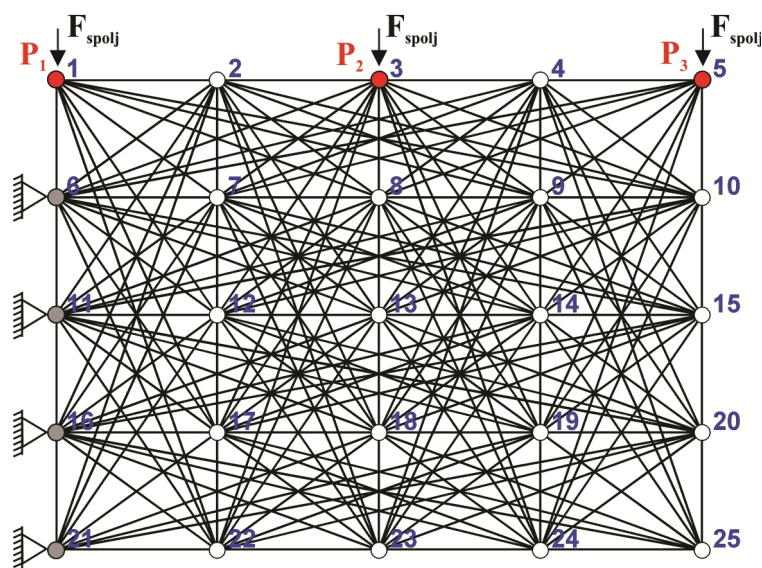
Tabela 9. Postavka zadatka sinteze adaptivnog gipkog sistema (adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima) za upravljanje oblikom radne površine

<i>Postavka problema</i>	
dimenzije oblasti optimizacije	120 mm × 80 mm
veličina mreže čvorova	5 × 5
stepen povezanosti čvorova	4
izvršne tačke radne površine	čvorovi = 1, 3, 5
oslonci (postolje)	čvorovi = 6, 11, 16, 21
Jangov modul elastičnosti	E=2.48 GPa
modul elastičnosti aktuatora	E _{akt} =500 MPa
blok sila aktuatora	F _{blok} = 90 N
spoljašnje opterećenje (sila)	F _{spolj} = 0.1 N
debljina linijskih elemenata u ravni upravnoj na ravan deformacije	1.5 mm
debljina linijskih elemenata u ravni deformacije	0 mm, 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm (moguće vrednosti)
debljina radne površine u ravni deformacije	0.5 mm
aktuator 1, aktuator 2, aktuator 3	1-168 (moguće vrednosti)

3.7.2. Diskretizacija oblasti optimizacije pri sintezi gipkog sistema

Oblast optimizacije je diskretizovana primenom metode koja koristi linijske elemente (slika 3.46.b). Oblast optimizacije je podeljena mrežom od 5x5 čvorova koji su međusobno povezani sa 168 linijskih elemenata (slika 3.49.). Debljina svakog od elemenata predstavlja optimizacionu promenljivu, pri čemu debljina svakog elementa može biti jedna od četiri unapred definisane vrednosti (tabela 9). Pored ovoga, postoji dodatna optimizaciona promenljiva za svaki aktuator u strukturi, pri čemu ova promenljiva uzima vrednosti između 1 i ukupnog broja linijskih elemenata u strukturi (168). Kako bi osigurali da radna površina bude kontinualna, linijski elementi koji predstavljaju radnu površinu strukture (elementi na gornjoj stanici oblasti optimizacije, slika 3.48. i slika 3.49.) nisu uključeni u proces optimizacije već im je unapred dodeljena konstantna vrednost debljine (tabela 9). Kao i pri sintezi gipkih mehanizama, i ovde su eliminisani preklapajući elementi koji se javljaju u početnoj strukturi (vidi odeljak 3.2.1.) pri čemu je početni set strukturnih elemenata

redukovan i uvođenjem stepena međusobne povezanosti čvorova (tabela 9). Ostali parametri diskretizacije oblasti optimizacije dati su u tabeli 9.



slika 3.49. Početni, delimično redukovani set strukturnih elemenata pri razvoju adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine [212]

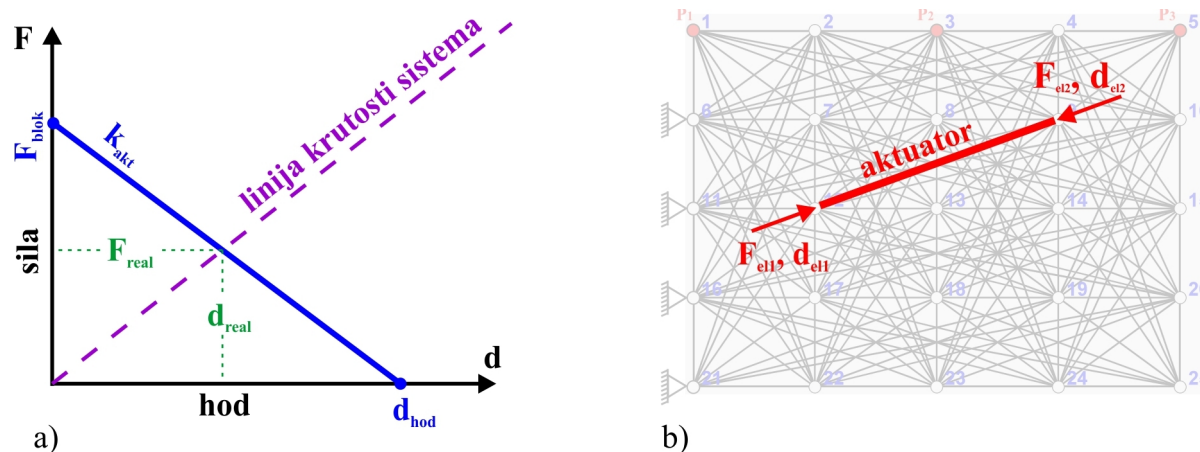
3.7.3. Model aktuatora

Aktivacijom aktuatora (dovođenjem struje ili odgovarajućeg fluida, što zavisi od tipa aktuatora), on generiše silu koja zavisi od krutosti sistema na koji aktuator deluje pri čemu je karakteristika generisane sile definisana karakterističnom krivom aktuatora (sila-hod). Svaki tip aktuatora ima svoju jedinstvenu karakteristiku sila-hod koja prikazuje kako se sila koju generiše aktuator menja sa hodom aktuatora⁴. Pošto karakteristika sila-hod aktuatora opisuje ponašanje aktuatora, veoma je važno na isti način opisati ponašanje aktuatora i pri strukturnoj analizi gipkog sistema (u toku procesa sinteze); karakteristika sila-hod mora biti implementirana na neki način u strukturnoj analizi. Strukturnom analizom ponašanja gipkog sistema, kada su aktuatori aktivni u strukturi, dobićemo koliku stvarnu silu i pomeranje realizuje aktuator; kao što smo prethodno napomenuli, u zavisnosti od krutosti sistema na koji aktuator deluje zavisi i sila koju on ostvaruje.

⁴ Kod nekih aktuatora je zavisnost sile koju aktuator ostvaruje i njegovog hoda linearna, a kod nekih tipova aktuatora je ova zavisnost nelinearna. Većina klasičnih aktuatora (električnih, hidrauličnih ili pneumatskih) ostvaruje silu koja se ne menja sa porastom hoda aktuatora. Međutim, kod većine aktuatora koji su napravljeni od pametnih materijala (piezoelektrični aktuatori, aktuatori izrađeni od legura koje pamte oblik) sila koju aktuator ostvaruje opada sa porastom hoda aktuatora.

Za sintezu adaptivne gipke strukture koja može da upravlja oblikom svoje radne površine korišćen je linearni model aktuatora (slika 3.50.a) pri čemu aktuatori istovremeno predstavljaju i generatore sile i strukturne elemente (slika 3.50.b). Primenjeni model aktuatora razvijen je u radu [143]. Aktivni aktuator ostvaruje silu koja predstavlja deo njegove blok sile (F_{blok}) i ostvaruje hod koji predstavlja deo njegovog slobodnog hoda (d_{hod}) pri čemu odnos $F_{\text{blok}}/d_{\text{hod}}$ predstavlja krutost aktuatora k_{akt} . Blok sila aktuatora (F_{blok}) predstavlja maksimalnu silu koju aktuator ostvaruje kada je njegov hod fizički ograničen (krajevi aktuatora su fiksirani tako da aktuator ne može da ostvari hod). Slobodni hod (d_{hod}) predstavlja pomeranje koje ostvaruje aktuator na svojim krajevima kada ne postoje opterećenja koja se suprotstavljaju pomeranju aktuatora (aktuator realizuje slobodan hod). Stvarna sila (F_{real}) i hod (d_{real}) koje aktuator ostvaruje određuju se u zavisnosti od njegove interakcije sa ostatkom gipke strukture odnosno zavise od krutosti celog gipkog sistema (linija krutosti na slici 3.50.a); ukoliko se koristi više aktuatora u strukturi, stvarna sila i hod koje realizuje neki aktuator zavise i od krutosti ostalih aktuatora u sistemu.

Linearni model aktuatora je implementiran u razvijenom optimizacionom algoritmu tako što su na krajevima linijskog elementa koji je izabran da bude aktuatorski element u datoj strukturi, postavljene pogonske aksijalne sile koje su jednake blok sili aktuatora ($F_{\text{el1}}=F_{\text{el2}}=F_{\text{blok}}$ na slici 3.50.) i usvajajući da krutost izabranog linijskog elementa bude jednaka krutosti aktuatora. Ovde je primenjena blok sila zato što ona predstavlja maksimalnu silu koju aktuator može potencijalno da ostvari.



slika 3.50. a) Linearni model aktuatora [143]; b) aktuator, kao generator sile i kao strukturni element [212]

3.7.4. Upravlјivost gipkog sistema

Kao što smo napomenuli u prvom i drugom poglavlju, uključivanje upravljanja u proces projektovanja/sinteze može poboljšati upravljivost adaptivnog sistema. Pri razvoju adaptivne gipke strukture koja može da menja oblik svoje radne površine, upravljanje je u ovoj disertaciji uključeno u proces sinteze primenom koncepta upravljivosti. Koncept upravljivosti prvobitno je razvijen u [143]. Upravlјivost se u teoriji upravljanja definiše na sledeći način: *"Za sistem kažemo da je upravljiv ukoliko je moguće posredstvom upravljačkog vektora (vektora upravljačkih promenljivih veličina) prevesti sistem iz bilo kog početnog stanja u bilo koje drugo stanje u konačnom intervalu vremena"* [213]. U ovoj disertaciji, cilj nije optimizacija parametara kontrolera koji bi na osnovu informacija dobijenih sa senzora ostvario optimalno upravljanje aktuatorima odnosno gipkim sistemom, već je cilj optimizovati upravljačke karakteristike (osobine) gipkog sistema. Upravljačke karakteristike gipkog sistema definisane su kao mera sposobnosti seta aktuatora u strukturi da ostvari što je više moguće izlaznih stanja (oblika) radne površine gipkog sistema odnosno kao mera sposobnosti aktuatora da ostvare što je moguće veću strukturnu adaptivnost gipkog sistema [143]. Pri sintezi gipkih sistema, upravljivost je samo termin koji je preuzet iz teorije upravljanja i primenjen na upravljanje oblikom radne površine strukture (u ovom slučaju sistem kojim treba upravljati predstavlja struktura odnosno radna površina strukture). Cilj je dakle naći (optimizacijom) optimalnu topologiju gipkog mehanizma sa optimalnom postavkom aktuatora koji bi ostvarili najveću moguću strukturnu adaptivnost gipkog sistema odnosno razvoj gipkog sistema koji bi mogao da realizuje najbolje upravljanje oblikom radne površine. Upravlјivost strukture se definiše i kao mera linearne nezavistosti odabrane grupe aktuatora što je i implemenirano u optimizacionom algoritmu.

Upravlјivost se izračunava kao količnik determinante kvadratne matrice koju formiraju vektori pomeranja izvršnih tačaka radne površine gipkog sistema (\vec{d}_i) i skalarnog proizvoda intenziteta ovih vektora [143]:

$$\eta_c = \frac{\det \begin{bmatrix} \vec{d}_A & \vec{d}_B & \dots & \vec{d}_m \end{bmatrix}}{\begin{vmatrix} \vec{d}_A \\ \vec{d}_B \\ \dots \\ \vec{d}_m \end{vmatrix}} \quad (16)$$

gde je:

$$\left[\vec{d}_A \ \vec{d}_B \ \dots \ \vec{d}_m \right] = \begin{bmatrix} d_{1\theta A} & d_{2\theta A} & \dots & d_{m\theta A} \\ d_{1\theta B} & d_{2\theta B} & \dots & d_{m\theta B} \\ \vdots & & & \\ d_{1\theta m} & d_{2\theta m} & \dots & d_{m\theta m} \end{bmatrix} \quad (17)$$

gde m predstavlja broj izvršnih tačaka radne površine, pri čemu je ovaj broj jednak broju aktuatora u strukturi. Vektor \vec{d}_m predstavlja vektor pomeranja svih izvršnih tačaka (u pravcu koji je izabran kao željeni pravac pomeranja θ) kada je u strukturi aktivan aktuator m . Upravlјivost se izražava broјčano i mođe imati vrednost između 0 i 1.

Prethodno je usvojeno da radna površina adaptivnog gipkog sistema koji mođe da upravlјa oblikom radne površine bude predstavljena sa tri izvršne tačke (P_1 , P_2 i P_3) pa su u strukturi potrebna najmanje tri aktuatora (označićemo ih kao aktuatore A, B i C) kako bi se upravljalo pomeranjima ovih tačaka (po jedan aktuator koji bi direktno upravljao pomeranjem jedne izvršne tačke). Drugim rečima, za upravlјanje trima izvršnim tačkama radne površine minimalno potreban broj aktuatora u strukturi je tri, pa jednačina kojom se definiše upravljivost sistema (16) dobija oblik [212]:

$$\eta_c = \frac{\left| \det \left[\vec{d}_A \ \vec{d}_B \ \vec{d}_C \right] \right|}{\left| \vec{d}_A \right| \left| \vec{d}_B \right| \left| \vec{d}_C \right|} \quad (18)$$

gde je:

$$\left[\vec{d}_A \ \vec{d}_B \ \vec{d}_C \right] = \begin{bmatrix} d_{1yA} & d_{2yA} & d_{3yA} \\ d_{1yB} & d_{1yB} & d_{1yB} \\ d_{1yC} & d_{1yC} & d_{1yC} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Kako bi smo izračunali vektore pomeranja izvršnih tačaka kada su aktivni aktuatori A, B i C (vektore \vec{d}_A , \vec{d}_B i \vec{d}_C), korišćena je linearna analiza MKE koja je implemetirana u optimizacionom algoritmu (vidi odelјak 3.2.2.). Kada je aktivan jedan od aktuatora u strukturi, izvršna tačka P_1 ostvaruje pomeranje (d_{1x}, d_{1y}) , izvršna tačka P_2 ostvaruje pomeranje (d_{2x}, d_{2y}) , a izvršna tačka P_3 ostvaruje pomeranje (d_{3x}, d_{3y}) . Kako izvršne tačke treba da realizuju pomeranja u vertikalnom pravcu (slika 3.48.), za izračunavanje upravljivosti gipkog

sistema bitne su samo vrednosti pomeranja izvršnih tačaka u vertikalnom pravcu (d_{iy}). Tokom svake iteracije procesa optimizacije vrše se tri zasebne analize MKE (po jedna za svaki aktuator u strukturi, kada je aktivan pojedinačni aktuator u strukturi) kako bi se za dobijenu strukturu izračunala vrednost upravljivosti gipkog sistema. To znači, pokrenuta je jedna analiza MKE za slučaj kada je aktivan aktuator A, koja izračunava vrednosti vertikalnog pomeranja koje ostvaruju izvršne tačke radne površine usled dejstva aktuatora A, pri čemu je vertikalno pomeranja izvršnih tačaka predstavljeno vektorom $\vec{d}_A = [d_{1y}, d_{2y}, d_{3y}]_A$. Druga analiza MKE je pokrenuta kako bi izračunali vertikalno pomeranje izvršnih tačaka za slučaj kada je aktivan aktuator B u strukturi pri čemu je pomeranje izvršnih tačaka definisano vektorom $\vec{d}_B = [d_{1y}, d_{2y}, d_{3y}]_B$. Na sličan način, pokrenuta je i treća analiza MKE kada je aktivan aktuator C, pri čemu je pomeranje izvršnih tačaka definisano vektorom $\vec{d}_C = [d_{1y}, d_{2y}, d_{3y}]_C$. Upravljivost se definiše kao stepen nezavisnosti ovih vektora (\vec{d}_A , \vec{d}_B i \vec{d}_C) odnosno kao mera jedinstvenog odziva sistema kada je aktivan pojedinačni aktuator u strukturi. Vrednost upravljivosti jednaka 0 ukazuje na to da su vektori pomeranja izvršnih tačaka, kada su aktivni pojedinačni aktuatori u strukturi, međusobno linearno zavisni, dok vrednost upravljivosti bliža vrednosti 1 ukazuje na ortogonalnost odnosno upravnost ovih vektora. Upravljivost se može opisati i na sledeći način: ukoliko su tri vektora pomeranja izvršnih tačaka međusobno ortogonalni (upravljivost je jednaka 1), oni formiraju paralelepiped najveće zapremine, dok manje vrednosti upravljivosti označavaju i manju zapreminu paralelepipeda koga ovi vektori obrazuju. Kako nam vrednost upravljivosti definiše meru strukturne adaptivnosti sistema, to upravljivost η_c predstavlja funkciju cilja koju treba maksimizovati tokom procesa optimizacije. Detaljnije objašnjenje o upravljivosti moguće je naći u [143].

3.7.5. Funkcija cilja pri sintezi gipkog sistema

Formulacija funkcije cilja pri sintezi gipkih sistema je drugačija nego što je to slučaj pri sintezi klasičnih gipkih mehanizama (vidi odeljak 3.1.3.). Glavni cilj kod sinteze adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine je maksimizacija upravljivosti sistema i minimizacija ukupnog broja aktuatora u strukturi, pri čemu je potrebno zadovoljiti i odgovarajuća zadata ograničenja. Maksimizacijom upravljivosti, strukturna adaptivnost sistema biće maksimizovana odnosno vektori pomeranja izvršnih tačaka \vec{d}_A , \vec{d}_B i \vec{d}_C biće

međusobno linearno skoro nezavisni što znači da dejstvo svakog od pojedinačnih aktuatora na radnu površinu gipke strukture neće biti redundantno. Ovo pak znači da će gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima moći da ostvari više izlaznih stanja svoje radne površine. Kao što smo napomenuli ranije, za direktno upravljanje trima izvršnim tačkama radne površine potrebno je minimalno tri aktuatora u strukturi (slika 3.48.) pa ukupan broj aktuatora nije optimizovan tokom procesa optimizacije, već je usvojen kao konstanta. Opšti oblik funkcije cilja koja je korišćena za sintezu adaptivne gipke strukture za upravljanje oblikom radne površine odnosno adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima je [212]:

$$\text{maksimizovati} \left[\eta_c \pm w_n \cdot (n \text{ raznih ograničenja}) \right] \quad (20)$$

gde je n broj ograničenja koji je jednak broju relativnih težinskih koeficijenata w_n .

Svi članovi u funkciji cilja izračunavaju se na osnovu rezultata linearne analize MKE, koja je implementirana u optimizacionom algoritmu, pri čemu su svaka dva čvora međusobno povezana samo jednim linijskim elementom.

3.7.6. Ograničenja pri sintezi gipkog sistema

Da bi gipki sistem realizovao dovoljno veliko pomeranje svoje radne površine (dovoljno veliku deformaciju) odnosno dovoljno veliko pomeranje izvršnih tačaka radne površine, u funkciji cilja je dodato odgovarajuće ograničenje. Ograničenje je postavljeno u vidu uslova da pomeranje izvršnih tačaka u željenom pravcu (za naš slučaj u vertikalnom pravcu) bude veće od zadate vrednosti pomeranja $d_{\min, \text{želj}}^{\text{akt}}$ (jednačina 21) odnosno potrebno je da izvršne tačke realizuju pomeranje koje je veće od zadatog minimalnog pomeranja ($d_{\min}^{\text{akt}} > d_{\min, \text{želj}}^{\text{akt}}$) koje je definisano unapred. Ovo ograničenje je implementirano u optimizacionom algoritmu tako što se proverava uslov da svaku tačku bar jedan od tri aktuatora dovoljno pomera odnosno da to pomeranje bude veće od zadatog minimalnog pomeranja. Pri ovome, za svaku pojedinačnu izvršnu tačku uzima se najmanja vrednost pomeranja koje realizuje izvršna tačka kada je aktivan jedan od tri aktuatora u strukturi, a zatim se najmanja vrednost među njima usvaja za d_{\min}^{akt} (jednačina 21).

Za sintezu adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine, a da se u isto vreme odupre poznatim spoljašnjim opterećenjima koja deluju na njega, dodato je

ograničenje koje treba da ograniči pomeranje izvršnih tačaka radne površine usled dejstva spoljašnjeg opterećenja, pri čemu je ovo pomeranje u funkciji cilja označeno sa d_{\max}^{spolj} . Spoljašnje opterećenje (sila) je unapred zadato (tabela 9) i deluje u vertikalnom pravcu na sve tri izvršne tačke istovremeno (slika 3.49.). Nakon toga, primenom MKE izračunava se vrednost pomeranja izvršnih tačaka, kao posledica dejstva spoljašnjeg opterećenja, pri čemu aktuatori nisu aktivni u strukturi. Najveća vrednost pomeranja izvršnih tačaka pod dejstvom spoljašnjeg opterećenja d_{\max}^{spolj} se onda pridodaje funkciji cilja, kako bi se i ova vrednost minimizovala (jednačina 21). Ako na strukturu deluju spoljašnja opterećenja značajno većeg inteziteta, moguće je napraviti takav optimizacioni algoritam koji bi sam tokom optimizacije odabrao najbolji materijal od koga bi struktura trebalo da bude izrađena kako bi gipki sistem mogao da izdrži dejstvo zadatih spoljašnjih opterećenja. Ideja je da Jangov modul elastičnosti materijala takođe predstavlja diskretnu optimizacionu promenljivu tako da bi optimizacija mogla da izabere najpodesniji Jangov modul za materijal strukture što bi zavisilo od inteziteta spoljašnjih opterećenja.

U jednačini 21 je ograničena i zbirna dužina strukturnih elemenata (L_{cilj}); L_{cilj} predstavlja zbir dužina svih strukturnih elemenata u datoj strukturi i primarni cilj ograničenja je smanjenje kompleksnosti strukture (vidi odeljak 3.2.3.).

Funkcija cilja (jednačina 21) sadrži i ograničenje ukupnog broja preseka (n_{pres}) (vidi odeljak 3.5.). U slučaju sinteze gipkih mehanizama sa ugrađenim aktuatorima, pri čemu je oblast optimizacije diskretizovana delimično povezanim setom strukturnih elemenata (slika 3.49.), dobijaju se rešenja gipkih sistema kod kojih se pored preseka strukturnih elemenata, ukrštaju i aktuatori sa strukturnim elementima (slika 2.48.). Kao što je bilo reči u odeljku 3.5., preseci povećavaju krutost sistema i smanjuju funkcionalnost gipke strukture. Pored ovoga, izrada strukture sa elementima i aktuatorima u istoj ravni, pri čemu se aktuatori međusobno ukrštaju ili presecaju elemente, veoma je kompleksna. Ograničenje ukupnog broja preseka nam obezbeđuje da se dobijaju rešenja gipkih sistema bez elemenata koji se ukrštaju kao i bez ukrštanja aktuatora i strukturnih elemenata, za razliku od rešenja koja su dobijena tehnikom optimizacije topologije razvijenom u [143].

Na osnovu navedenog, konačan oblik funkcije cilja, koja će biti korišćena za sintezu adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine, biće [212]:

$$\text{maksimizovati} \left[\eta_c - w_1 \cdot (d_{\min, \text{želj}}^{\text{akt}} - d_{\min}^{\text{akt}}) - w_2 \cdot |d_{\max}^{\text{spolj}}| - w_3 \cdot |L_{\text{ukup}} - L_{\text{želj}}| - w_4 \cdot n_{\text{pres}} \right] \quad (21)$$

gde su w_1 , w_2 , w_3 i w_4 težinski koeficijenti. Parametri koji definišu ograničenja i vrednosti težinskih koeficijenata dati su u tabeli 10 (vrednosti za težinske koeficijente su dobijene na osnovu iskustva sa problemima sinteze gipkih sistema).

Problem razvoja adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine predstavlja multikriterijumski optimizacioni problem, ali je sveden na jednokriterijumski problem primenom težinskih koeficijenata.

Tabela 10. Parametri optimizacije koji su korišćeni za sintezu adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine

<i>Parametri optimizacije</i>	
težinski koeficijenti	$w_1=0.3; w_2=0.3; w_3=0.1; w_4=1$
$d_{\min, \text{želj}}^{\text{akt}}$	1 mm
$L_{\text{želj}}$	$\eta_L = 5; L_{\text{dijag}} = 144.22$ mm

3.7.7. Optimizacija topologije adaptivnog gipkog sistema

Kao i pri sintezi gipkih mehanizama, u disertaciji se koriste genetski algoritmi kao metoda za traženje optimalnog rešenja odnosno optimalne topologije gipkog sistema, unutar prostora optimizacionih promenljivih. Genetski algoritmi su već detaljno objašnjeni u odeljku 3.2.4. pa će ovde biti ukratko izloženi problemi koji se mogu javiti kada se za sintezu gipkih sistema koriste genetski algoritmi.

Kao što je bilo reči u odeljku 3.2.4. kada se za diskretizaciju oblasti optimizacije koriste linijski elementi, pri čemu se kao optimizaciona metoda koriste genetski algoritmi, vrlo često se javlja problem povezanosti strukture [112, 143, 145]. Pri sintezi gipkih sistema, pored slobodnih struktura i elemenata (strukture i elementi koji nisu povezani sa postoljem, aktuatorima ili izvršnim tačkama), vrlo često se dešava da je neki od aktuatora deo slobodne strukture ili da i sami aktuatori predstavljaju slobodne elemente. Kako bi se prevazišao ovaj problem, korišćen je isti filter kao i pri sintezi gipkih mehanizama (vidi odeljak 3.2.4.). Filter tokom optimizacije traži i odbacuje nepovezane strukture, linijske elemente i aktuatore, i zamenjuje ih strukturama koje su povezane. Pored ovoga, pri formiranju inicijalne populacije gipkih sistema javlja se takođe problem prevelike gustine linijskih elemenata u početnim rešenjima. Kako bi se rešio ovaj problem, korišćen je isti metod kao i pri sintezi gipkih mehanizama (vidi odeljak 3.2.4.).

Kao kriterijum za zaustavljanje procesa optimizacije topologije adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine, odnosno za zaustavljanje genetskog algoritma, korišćen je isti kriterijum kao i pri sintezi gipkih mehanizama (vidi odeljak 3.2.4.).

Parametri genetskog algoritma koji je korišćen za sinezu adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima dati su u tabeli 11.

Tabela 11. Parametri genetskog algoritma

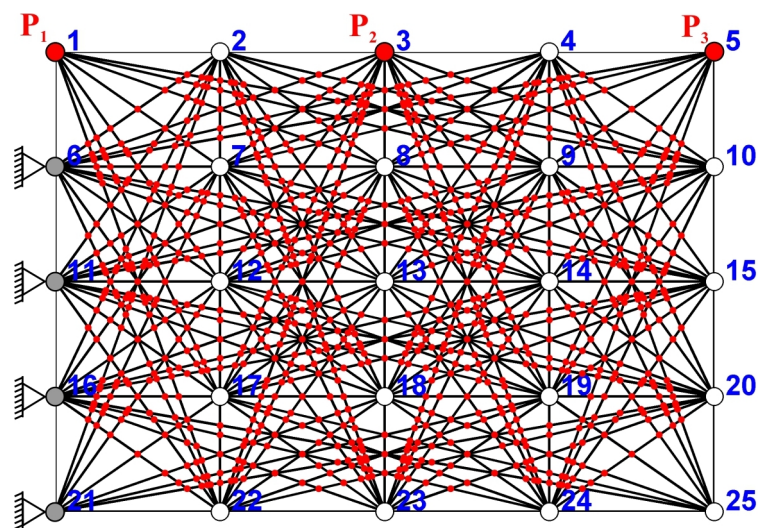
<i>Parametri</i>	
početna populacija	200 jedinki
ukupan broj generacija	1000
funkcija odabira	roulette
procenat ukrštanja	95 %
procenat mutacije	9%
broj elitnih jedinki	2

Slično kao i kod sinteze gipkih mehanizama i ovde je implementiran

- "genetski inženjering" odnosno odbacivanje lutajućih elemenata iz strukture pre izračunavanja vrednosti funkcije i
- "Lamarckian trimming" odnosno odbacivanje nepotrebnih elemenata (strukturnih elemenata čiji je unutrašnji napon jednak 0) nakon izračunavanja vrednosti funkcije cilja.

3.7.8. Rezultati optimizacije topologije gipkog sistema

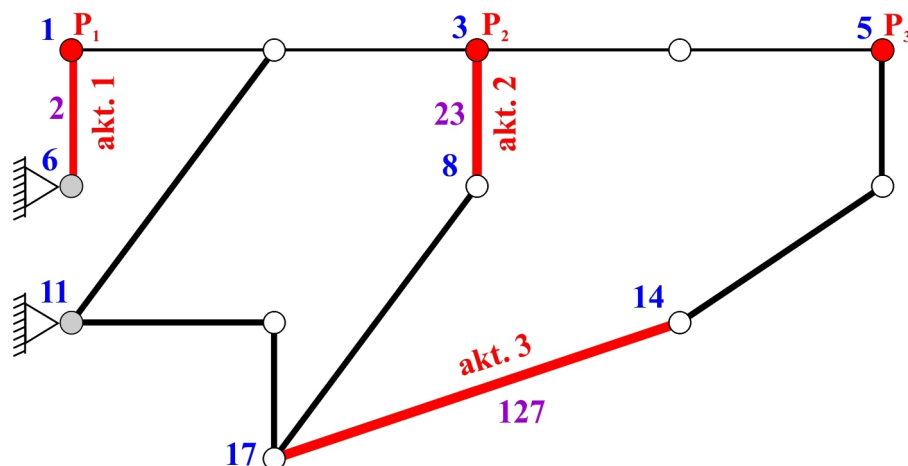
Za razvoj adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine proces optimizacije genetskim algoritmima pokrenut je više od dvadeset puta, sa ulaznim parametrima datim u tabeli 9, tabeli 10 i tabeli 11. Početno rešenje procesa optimizacije (diskretizovana oblast optimizacije) sastoji se od 168 linijskih elemenata koji formiraju 1664 ukrštanja (slika 3.51.).



slika 3.51. Početni set strukturnih elemenata sa 1664 međusobnih preseka (preseci su označeni crvenim tačkama) [212]

Na slici 3.52. prikazano je dobijeno optimalno rešenje za zadatu postavku zadatka sinteze, koje predstavlja najbolju jedinku u populaciji od 200 jedinki, dobijenu nakon 300 generacija. Dobijeno rešenje predstavlja gipku strukturu sa ugrađenim aktuatorima pri čemu su tokom procesa optimizacije neki strukturni elementi uklonjeni iz početnog seta strukturnih elemenata, a neki izabrani da budu aktuatori. Preostali strukturni linijski elementi, sa elementima koji bi trebalo da budu aktuatorski elementi, definišu optimalnu topologiju adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine. Rezultujući sistem ne predstavlja trivijalno rešenje⁵ pošto samo aktuator 1 povezuje izvršnu tačku sa postoljem (slika 3.52.).

⁵ Kod trivijalnog rešenja svi aktuatori u strukturi direkno povezuju izvršne tačke sistema sa postoljem.

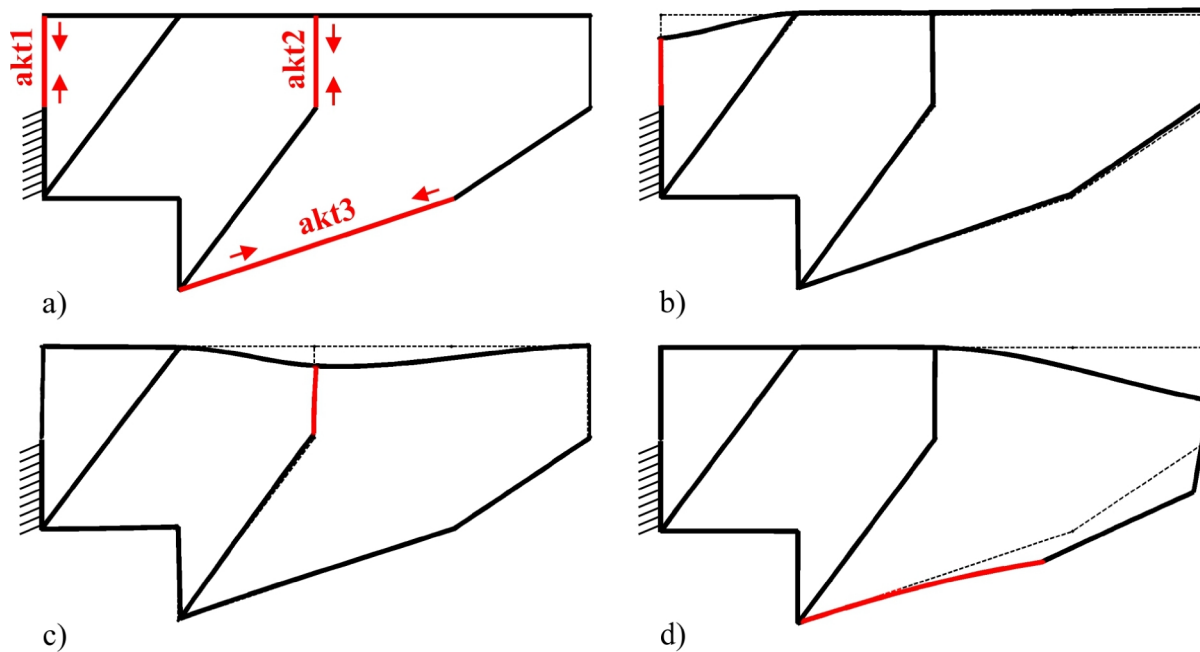


slika 3.52. Rešenje zadatka sinteze adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine (aktuatori su označeni crvenom linijom) [212]

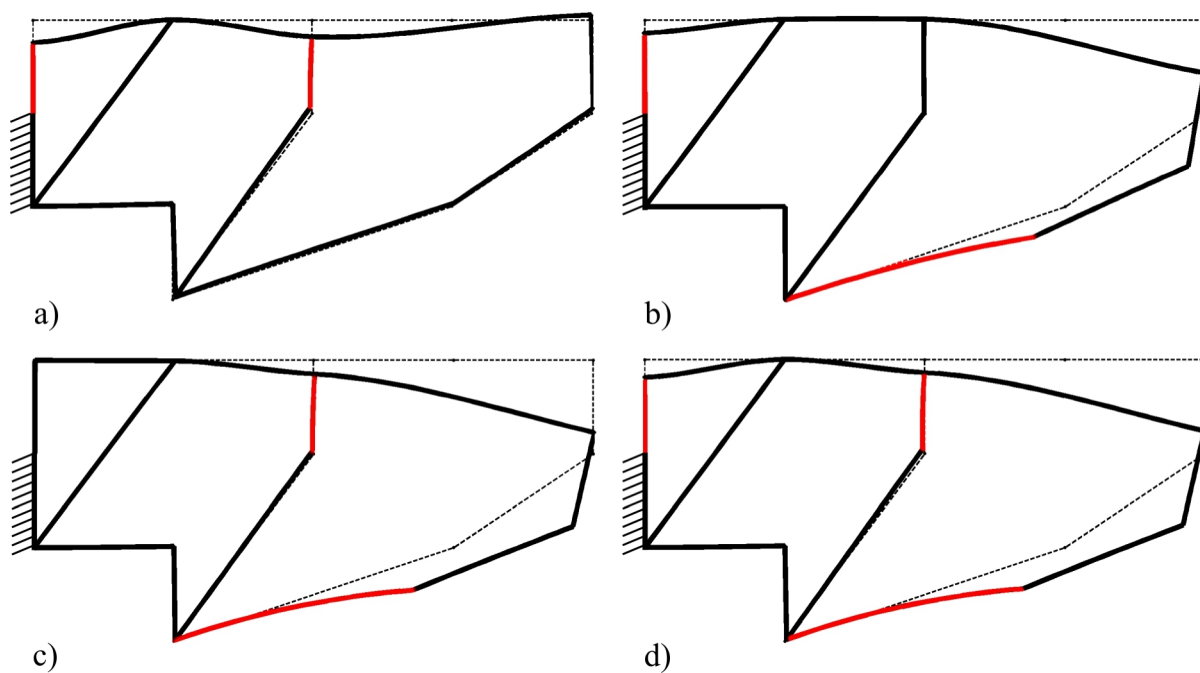
Za razliku od rešenja koja su dobijena u [143] (slika 2.48.), ovde se dobija gipki sistem kod koga se strukturni elementi i aktuatori ne ukrštaju (slika 3.52.). Ovo znači da je tokom procesa optimizacije eliminisano ukupno 1664 preseka linijskih elemenata. Važno je naglasiti da je topologija dobijenog gipkog sistema formirana od strukturnih elemenata koji ne bi egzistirali ukoliko bi se kao polazno rešenje koristio redukovani početni set strukturnih elemenata (slika 3.35). Na slici 3.53. prikazani su oblici radne površine koje dobijeno rešenje adaptivnog gipkog sistema može da ostvari. Gipki sistem ostvaruje visoku vrednost upravljivosti radne površine ($\eta_c=97.57\%$) sa tri ugrađena aktuatora, pri čemu svaki od aktuatora primarno upravlja jednom izvršnom tačkom radne površine (vidi tabelu 12). Interesantno je primetiti da aktuator 3 realizuje i pojačanje pomeranja 3 izvršne tačke (čvor 5) radne površine (tabela 12). Pored oblika prikazanih na slici 3.53., kombinacijom više aktivnih aktuatora u strukturi, adaptivna gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima može da ostvari i neke druge oblike radne površine (slika 3.54.).

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 3.53. i slici 3.54. može se zaključiti da dobijeno rešenje gipkog sistema može da upravlja oblikom radne površine odnosno može da ostvari različite oblike radne površine, pri čemu se različitim hodom aktuatora mogu ostvariti različiti radijusi ovih oblika. Rezultati pokazuju da su i sva zadata ograničenja zadovoljena (tabela 12).

U tabeli 12 dati su broj strukturnih elemenata koji formiraju topologiju gipkog sistema, elementi koji su izabrani da budu aktuatori, debljina svih elemenata i zbirna dužina elemenata, rezultati za veličinu pomeranja izvršnih tačaka radne površine kada su aktuatori aktivni i veličinu pomeranja izvršnih tačaka usled dejstva spoljašnjih opterećenja.



slika 3.53. Rešenje adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima (a) koji može da ostvari različite oblike radne površine kada je aktivan aktuator 1 (b), 2 (c) ili 3 (d); veličina deformacije je skalirana radi preglednosti



slika 3.54. Oblici radne površine koje adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima može da ostvari kada su aktivni aktuatori 1 i 2 (a), 1 i 3 (b), 2 i 3 (c), 1, 2 i 3 (d); veličina deformacije je skalirana radi preglednosti

Tabela 12. Rešenje zadatka optimizacije topologije adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine

Rezultati						
ukupan broj strukturnih elemenata	13					
aktuator 1	strukturni element broj 2					
aktuator 2	strukturni element broj 23					
aktuator 3	strukturni element broj 127					
debljina strukturnih elemenata	1.5 mm					
zbirna dužina strukturnih elemenata L_{ukup}	429.3 mm					
upravljivost η_c	97.57%					
ostvareni hod aktuatora u mm	akt. 1		akt. 2		akt. 3	
	čvor		čvor		čvor	
	1	6	3	8	14	17
	-1.599	0	-1.310	0.289	-4.033	-0.026
pomeranje izvršnih tačaka usled dejstva aktuatora	čvor	1	3	5		
	akt. 1	-1.599 mm	0.1455 mm	0.3256 mm		
	akt. 2	$3.93 \cdot 10^{-5}$ mm	-1.310 mm	0.0348 mm		
	akt. 3	$-4.94 \cdot 10^{-6}$ mm	-0.0055 mm	-6.898 mm		
pomeranje izvršnih tačaka usled dejstva spoljašnjih sila	čvor 1		čvor 3		čvor 5	
	-0.0012 mm		-5.7345 mm		-15.5825 mm	

Na osnovu rezultata datih u tabeli 12, može se videti da gipki sistem ostvaruje relativno malo pomeranje izvršnih tačaka 1 i 3 radne površine. Adaptivni gipki sistem može da ostvari i veća pomeranja izvršnih tačaka ukoliko bi vrednost blok sile aktuatora bila veća (tabela 9). Kako bi ovo dokazali, izvršena je analiza ponašanja dobijenog rešenja sa aktuatorima koji imaju vrednosti blok sile date u tabeli 13. Veličina pomeranja izvršnih tačaka radne površine u ovom slučaju date su takođe u tabeli 13. Analiza rezultata pokazuje da dobijeno rešenje gipkog sistema može da ostvari i mnogo veća pomeranja izvršnih tačaka pri čemu vrednost upravljivosti gipkog sistema ostaje ista (tabela 13). Vrednost upravljivosti je konstantna za sve slučajeve analize ovakvog rešenja gipkog sistema jer je korišćen linearni model (linearna MKE) pa i ponašanje strukture karakteriše linearnost. Međutim, kako se u dobijenom rešenju,

pri analizi sa aktuatorima koji imaju veće blok sile, javljaju velike deformacije, potrebno je sprovesti odgovarajuću nelinearnu analizu kako bi se proverilo da li postoji greška lineranog modela odnosno da li bi se vrednost upravljivosti sistema menjala sa porastom veličine pomeranja izvršnih tačaka. Potrebno je naglasiti da vrednost upravljivosti gipkog sistema u velikoj meri zavisi od pomeranja izvršnih tačaka i krutosti aktuatora kao i krutosti celog sistema. Visoku vrednost upravljivosti je moguće postići kada se koriste aktuatori relativno velike krutosti. Sa druge strane, upravljivost opada ispod 90% sa porastom pomeranja izvršnih tačaka [143]. Visoka vrednost upravljivosti dobijenog rešenja gipkog sistema (97.57%) postignuta je zato što aktuatori imaju relativno veliku krutost (debljina aktuatora je 1.5 mm) pa realizuju relativno mala pomeranja izvršnih tačaka (tabela 12); kao što se može videti iz tabele 12, debljina svih strukturnih elemenata, a samim tim i debljina aktuatora iznosi 1.5 mm.

Tabela 13. Veličina pomeranja izvršnih tačaka kada se u dobijenom rešenju adaptivnog gipkog sistema koriste aktuatori koji imaju veće vrednosti blok sile

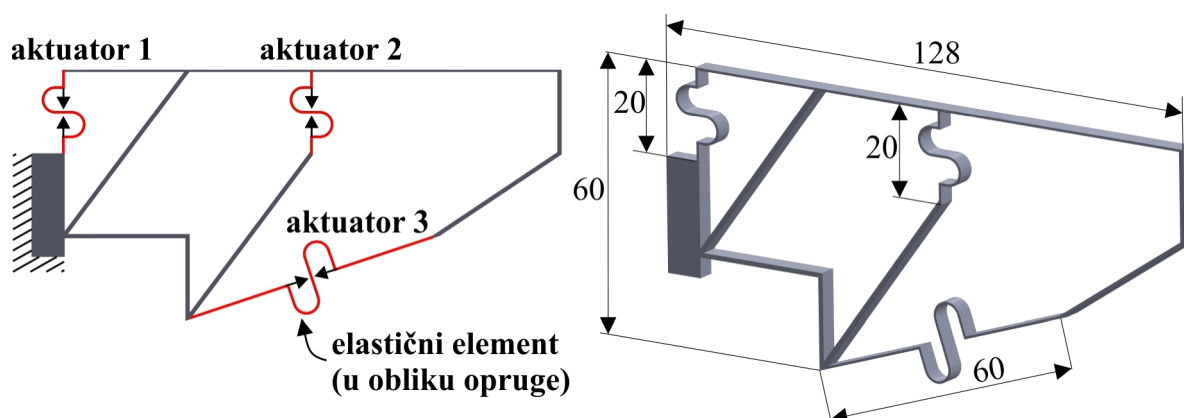
<i>Rezultati</i>										
Blok sila aktuatora (N)		250			500			1000		
Pomeranje izvršnih tačaka usled dejstva aktuatora (mm)	čvor	1	3	5	1	3	5	1	3	5
akt.1		-4.4	0.4	0.90	-8.8	0.80	1.8	-17.7	1.61	3.6
akt.2		0.0	-3.6	0.09	0	-7.2	0.2	0	-14.5	0.4
akt.3		0.0	-0.01	-19.2	0	-0.03	-38.3	0	-0.06	-76.6
$\eta_c=97.57\%$										

U narednom poglavlju biće sprovedena nelinearna analiza (MKE) ponašanja dobijenog adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima. Biće pokazano da struktura koja je analizirana nelinearnom MKE realizuje istu funkciju kao i rešenje koje je dobijeno optimizacionim algoritmom odnosno realizuje promenu oblika radne površine.

4. Numerička analiza rada adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine i moguće primene

4.1. Geometrijski model

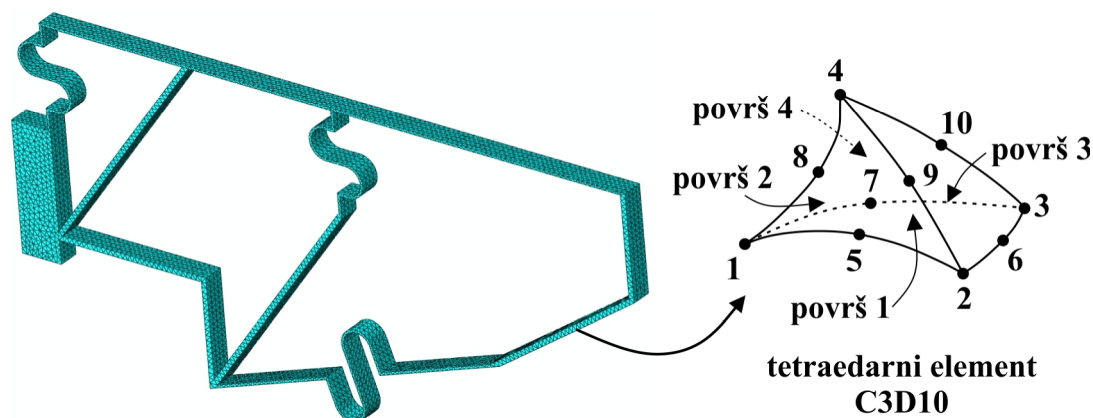
Na osnovu rešenja dobijenog optimizacijom (slika 3.52.) razvijen je 3D model adaptivnog gipkog sistema (sa ugrađenim aktuatorima) koji može da upravlja oblikom radne površine (slika 4.1.). Umesto korišćenja pravih aktuatora, u 3D modelu aktuatori su predstavljeni tankim elastičnim elementima u obliku opruge (slika 4.1.) koje karakteriše aksijalna i savojna krutost. Ovakvi elastični elementi (opruge) mogu se lako deformisati dejstvom sile ili pomeranja (mogu se izdužiti ili skupiti) simulirajući time dejstvo aktuatora. Aktuatori su modelirani na ovaj način ne da bi opisali ponašanje nekog konkretnog aktuatora, već da bi se demonstrirala mogućnost gipkog sistema da realizuje upravljanje oblikom radne površine odnosno da ostvari različite oblike radne površine. Kao realni aktuatori mogu se koristiti bilo koji aktuatori koji mogu da ostvare odgovarajući hod/silu na oba svoja kraja; u disertaciji će kasnije biti posvećena posebna pažnja izboru aktuatora koji bi bili pogodni za primenu kod razvijenog adaptivnog gipkog sistema.



slika 4.1. 3D model adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine [212]

4.2. Analiza metodom konačnih elemenata (MKE)

Za analizu rada razvijenog modela adaptivnog gipkog sistema odnosno za proveru sposobnosti adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima da ostvari više oblika radne površine, spovedena je numerička nelinearna analiza primenom metode konačnih elemenata (MKE), pri čemu je korišćen komercijalno dostupan programski paket ABAQUS (kao i pri analizi dobijenih rešenja gipkih mehanizama u poglavlju 3). Razvijeni 3D model gipkog sistema diskretizovan je tetraedarnim elementima C3D10 sa 10 čvornih tačaka (slika 4.2.); ovaj konačni element se u ABAQUS-u standardno koristi za analizu 3D strukturalnih problema. Diskretizovani model gipkog sistema sadrži ukupno 20731 element (slika 4.2.).



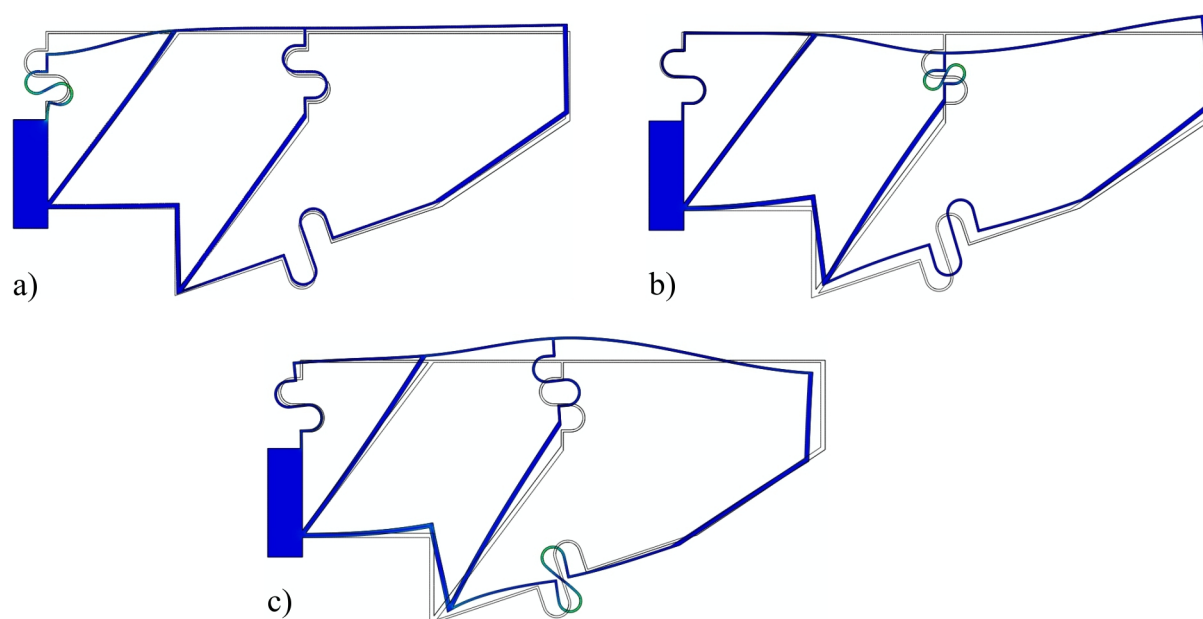
slika 4.2. Diskretizovani 3D model adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine (mrežom tetraedarnih C3D10 konačnih elemenata)

Pri analizi MKE je kao granični uslov postavljen nepokretni oslonac na nepokretne delove gipke strukture (ograničeno je svih šest stepena slobode kretanja) (slika 4.1.), pri čemu je za modul elastičnosti materijala usvojena vrednost $E=0.5$ GPa. Skupljanje/istezanje svakog od aktuatora simulirano je dejstvom pogonskog pomeranja od 5 mm (hod aktuatora) u pravcu ose aktuatora, na oba njegova kraja (slika 4.1.). Simuliran je najgori mogući slučaj sa stanovišta upravljivosti gipkog sistema (ovo će kasnije biti detaljnije objašnjeno), kada aktuator ima dovoljno veliku silu da ostvari jednak hod na oba svoja kraja, kako bi se pokazala sposobnost razvijenog adaptivnog gipkog sistema da ostvari promenu oblika i u ovom slučaju. Pri primeni realnih aktuatora veličina hoda koju aktuator ostvaruje zavisi od njegove krutosti kao i krutosti celog sistema (gipke strukture i ostalih aktuatora u sistemu). U razvijenom 3D modelu adaptivnog gipkog sistema moguće je koristiti kao aktuatore koji se pri pogonskom dejstvu

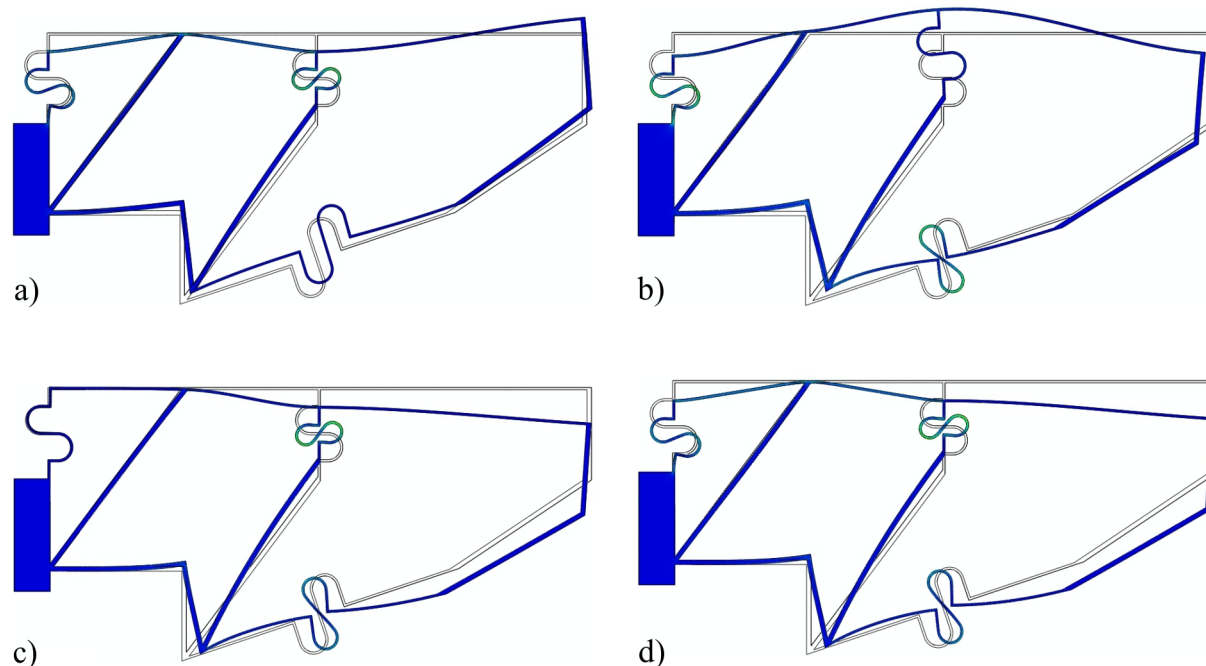
istežu tako i aktuatorima koji se skupljaju, pa su iz tog razloga simulirana oba slučaja. Na slici 4.3. prikazani su rezultati numeričke analize za slučaj kada se aktuatori skupljaju. Rezultati analize MKE biće najpre analizirani sa stanovišta realizovanih oblika radne površine, a kasnije će biti prikazani i rezultati u vezi upravljivosti razvijenog modela gipkog sistema odnosno koliku upravljivosti radne površine ostvaruje gipki sistem.

Analizom rezultata numeričke MKE analize može se zaključiti da adaptivna gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima, razvijena u ovoj disertaciji, može da ostvari različite oblike svoje radne površine (slika 4.3.) odnosno realizuje istu funkciju kao i gipki sistem dobijen optimizacijom (slika 3.53.). Među ovim oblicima moguće je uočiti da gipki sistem pomerajući izvršne tačke realizuje dva oblika radne površine koji se često sreću u tehničkoj okolini: konkavni (slika 4.3.b) i konveksni (slika 4.3.c) oblik; kada je aktivan aktuator 2, gipki sistem realizuje konkavni oblik radne površine (slika 4.3.b), a kada je aktivan aktuator 3, gipki sistem realizuje konveksni oblik radne površine (slika 4.3.c). Aktivacijom aktuatora 1 gipki sistem realizuje oblik prikazan na slici 4.3.a.

Gipki sistem može ostvariti mnogo različitih oblika svoje radne površine ukoliko se aktivira više aktuatora istovremeno; neki od ovih oblika radne površine prikazani su na slici 4.4. Rezultati pokazuju da adaptivni gipki sistem može da ostvari na primer i konkavno-konveksne oblike ukoliko su aktivni aktuatori 1 i 2 (slika 4.4.a). Na slici 4.4. moguće je uočiti i složenost realizovanih oblika radne površine.



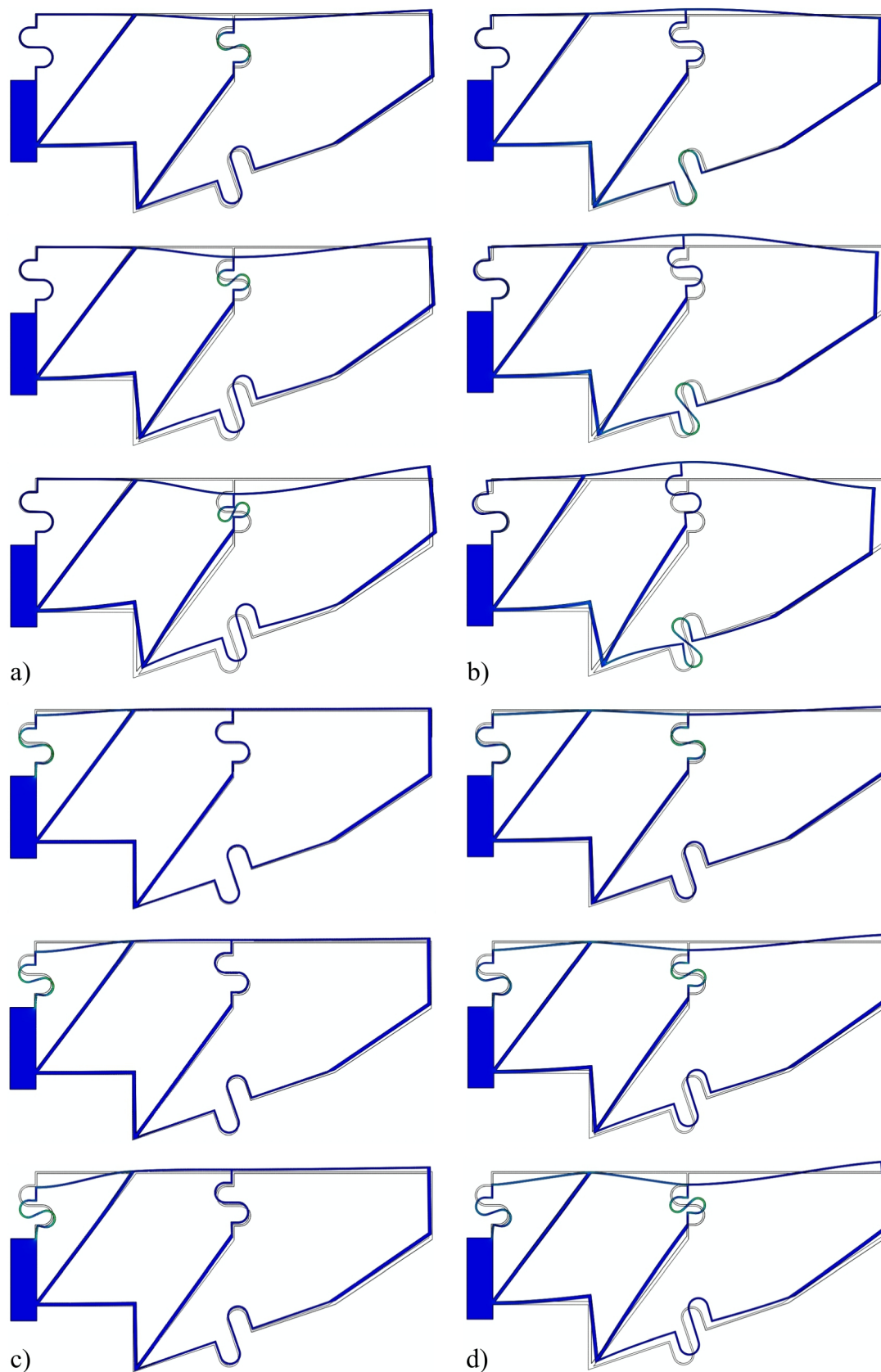
slika 4.3. Rezultati numeričke analize rada adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima, primenom MKE, kada je aktivan aktuator 1 (a), aktuator 2 (b) i aktuator 3 (c) [212]



slika 4.4. Rezultati numeričke analize rada adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima, primenom MKE, kada je istovremeno aktivno više aktuatora: a) aktuatori 1 i 2; b) aktuatori 1 i 3; c) aktuatori 2 i 3; d) aktuatori 1, 2 i 3 [212]

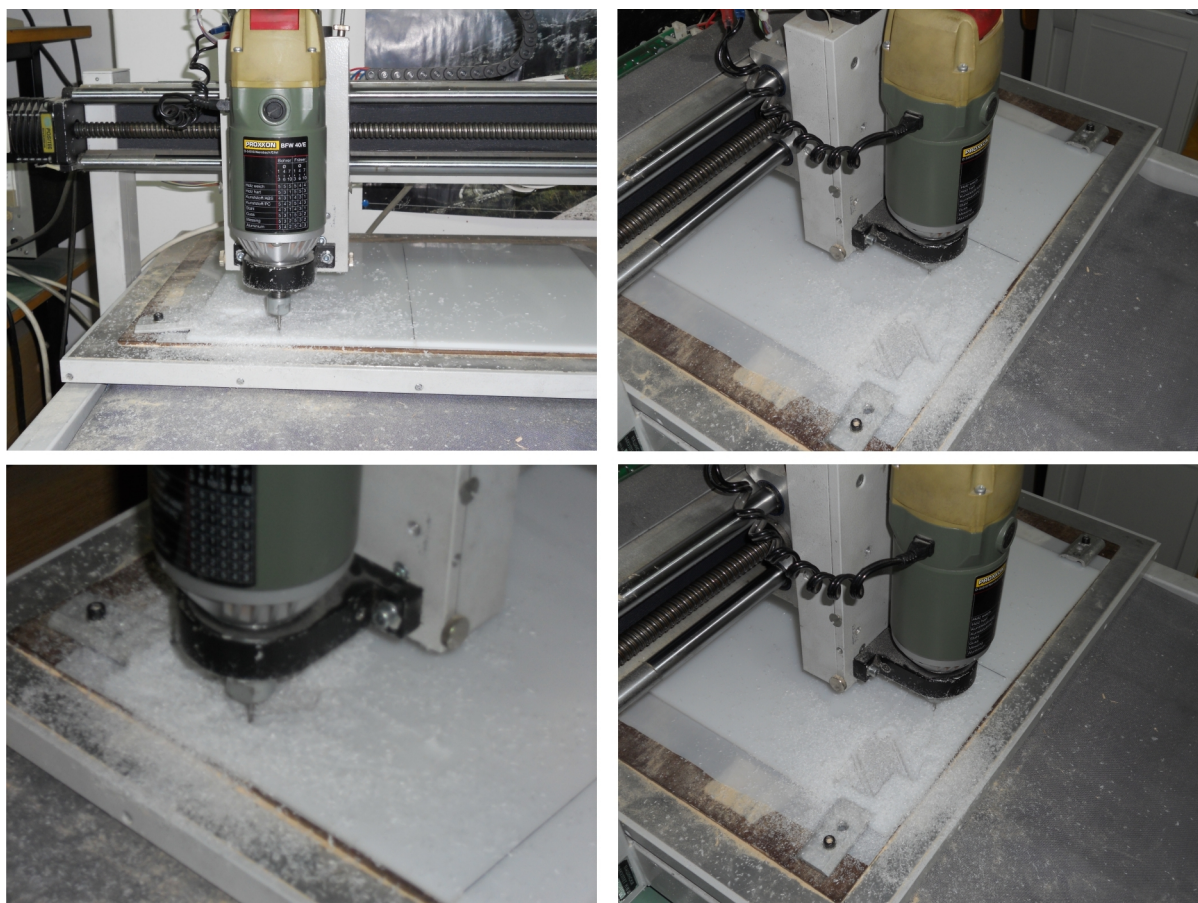
U zavisnosti od hoda aktuatora moguće je ostvariti oblike radne površine različitog radijusa krivine. Na primer, kada je aktivan aktuator 2 (slika 4.3.b), za različit hod aktuatora (1 mm, 2 mm, ...) moguće je ostvariti konkavne oblike radne površine različitog radijusa krivine (slika 4.5.a). Ovo takođe važi i kada je aktivan samo aktuator 1 (slika 4.5.c) ili aktuator 3 (slika 4.5.b) kao i za slučaj kombinacije više aktivnih aktuatora - za različit hod aktuatora mogu se ostvariti oblici radne površine različitog radijusa krivine (slika 4.5.d).

U modelu adaptivne gipke strukture prikazane na slici 4.1., moguće je koristiti i aktuatore koji imaju hod veći od 5 mm (na oba svoja kraja); ovde je simuliran hod aktuatora od 5 mm zbog oblika elastičnih elemenata u vidu opruga, pri čemu su oblici elastičnih elemenata tako modelirani da mogu i da se jednostavno izrade. Hod aktuatora je ograničen veličinom prostora u koji aktuator treba umetnuti. U slučaju aktuatora 1 i aktuatora 2 moguće je koristiti aktuatore čiji je ukupni hod približno jednak 20 mm (po 10 mm na oba njegova kraja), dok u slučaju aktuatora 3, ukupan hod aktuatora može iznositi približno 60 mm (po 30 mm na oba njegova kraja) (slika 4.1.).

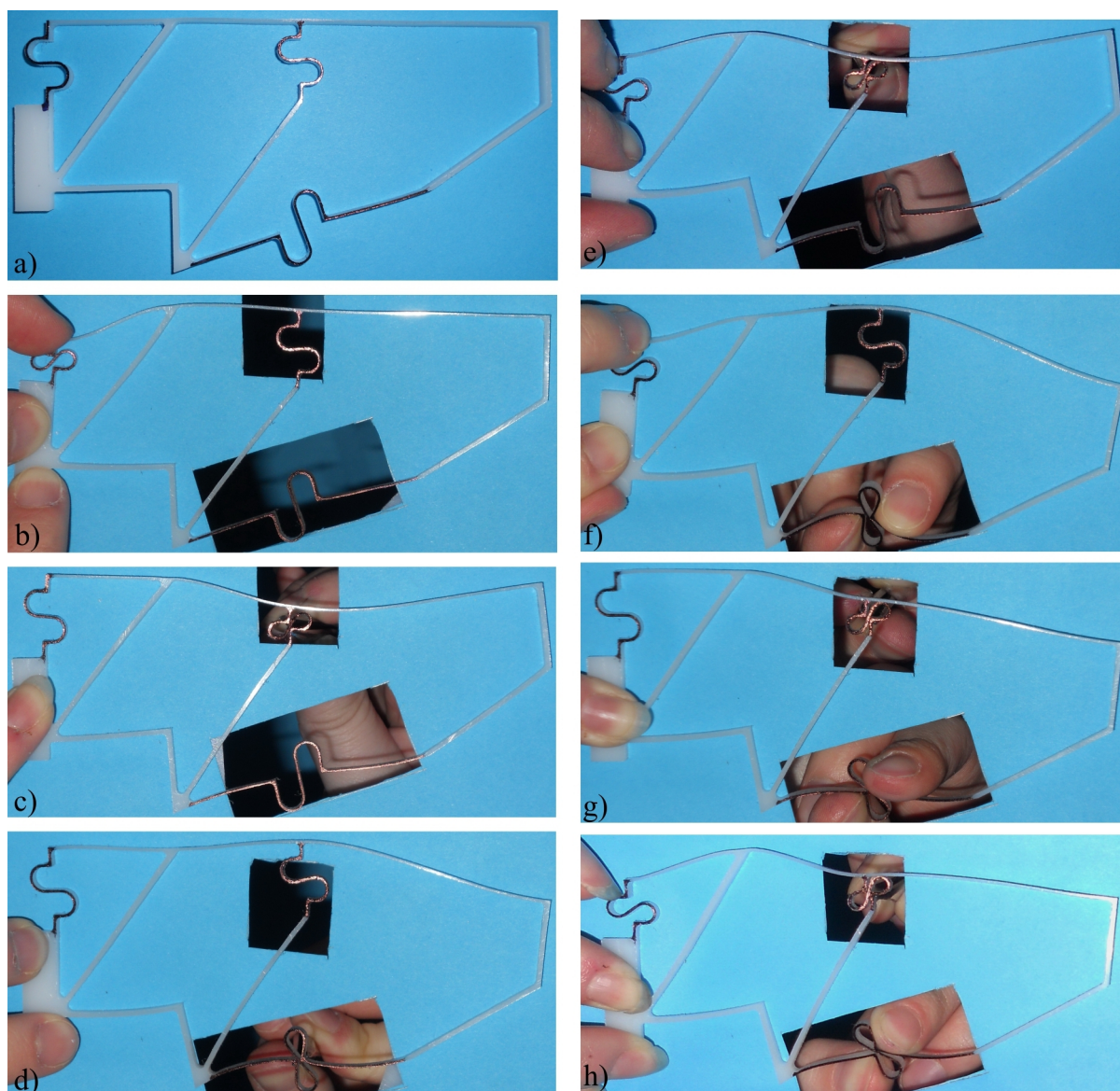


slika 4.5. Oblici radne površine različitog radijusa koje gipki sistem ostvaruje kada je: a) aktuator 2 aktivan (konkavni oblici); b) aktuator 3 aktivan (konveksni oblici); c) aktuator 1 aktivan; d) aktuator 1 i 2 aktivni (konkavno-konveksni oblici) [212]

Kako bi se izvršila verifikacija rezultata dobijenih numeričkom analizom (primenom MKE), izrađen je fizički prototip adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine (slika 4.7.a). Model adaptivne gipke strukture izrađen je od HDPE plastike (engl. *high density polyethylene* – polietilen visoke gustine, modula elastičnosti $E=0.5$ GPa) na CNC glodalici (slika 4.6.). Slično kao i kod numeričke analize, umesto uvođenja stvarnih aktuatora korišćeni su tanki elastični elementi (u vidu opruga). Fizički prototip je testiran pomeranjem krajeva elastičnih elemenata kako bi se simuliralo ponašanje aktuatora koji se skupljaju (slika 4.7.). Kao što se može videti sa slike 4.7. izrađeni fizički prototip adaptivnog gipkog sistema pokazuje adaptivno ponašanje odnosno može da ostvari različite oblike radne površine kada su aktivni različiti aktuatori u strukturi, pri čemu su pomeranja izvršnih tačaka relativno velika. Na osnovu ovoga može se zaključiti da izrađeni prototip realizuje istu funkciju kao i gipki sistem analiziran nelinearnom MKE (slika 4.3. i slika 4.4.) odnosno kao i gipki sistem dobijen optimizacionim algoritmom (slika 3.53.).



slika 4.6. Izrada fizičkog prototipa adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine



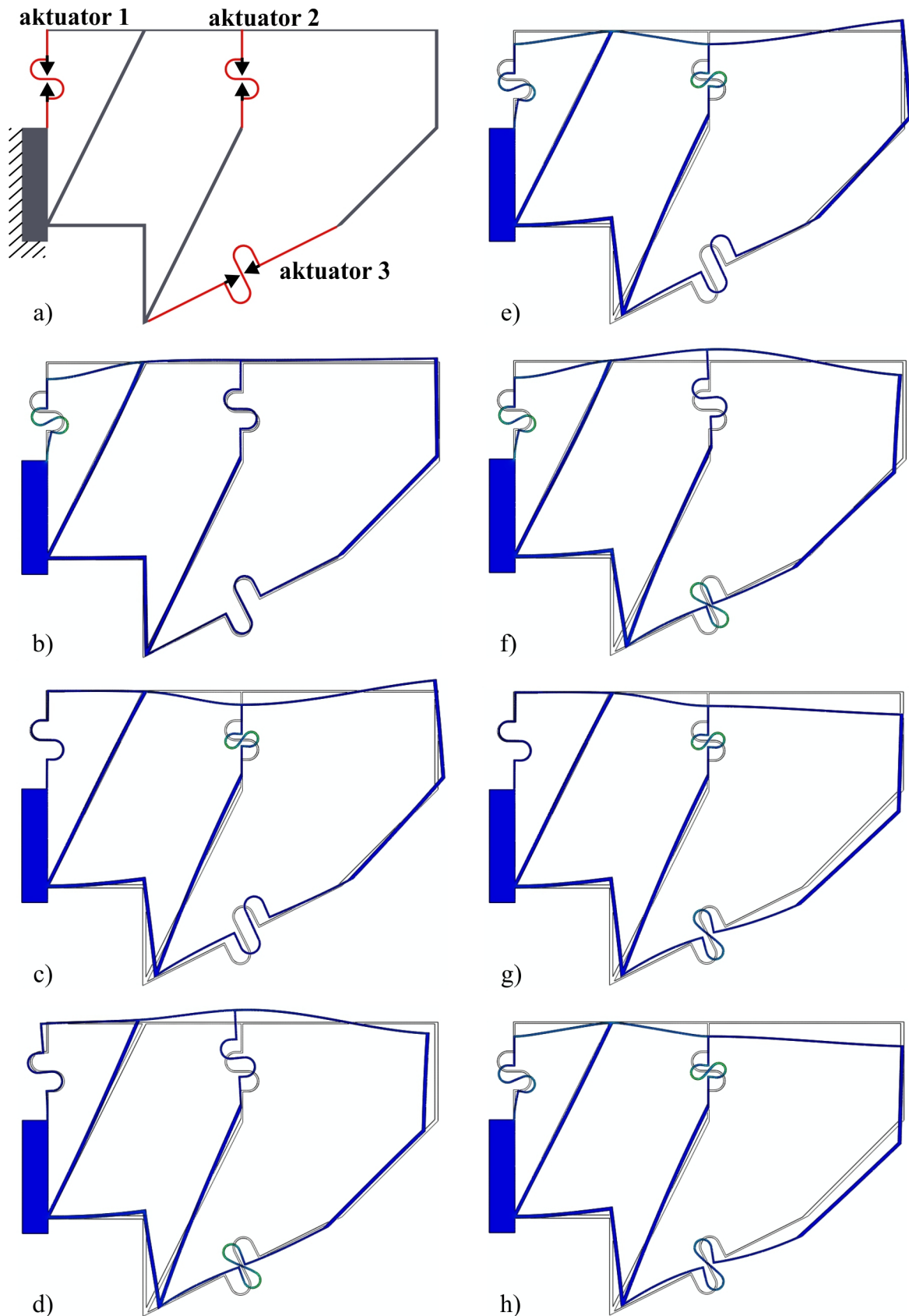
slika 4.7. Izrađeni model adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine (a) i oblici radne površine koje ostvaruje kada je aktivan aktuator 1 (b), 2 (c) ili 3 (d), kao i kada su aktivni aktuatori 1 i 2 (e), 1 i 3 (f), 2 i 3 (g), 1, 2 i 3 (h) [212]

Za analizu mogućnosti skaliranja adaptivnog gipkog sistema kao i analizu mogućnosti ugrađivanja aktuatora različitog hoda pri čemu bi sposobnost strukture da ostvari više oblika radne površine ostala ista, modifikovan je model gipkog sistema prikazanog na slici 4.1. Gipka struktura je modifikovana povećanjem rastojanja između krajnjih tačaka svih strukturnih elemenata (štapova) u vertikalnom pravcu, a samim tim povećan je i prostor u koji se aktuatori mogu ugraditi (slika 4.8.a i slika 4.9.a), dok je rastojanje između krajnjih tačaka strukturnih elemenata u horizontalnom pravcu ostalo nepromenjeno. Analizirana su dva slučaja odnosno dve strukture, jedna sa aktuatorima koji mogu da realizuju hod od 30

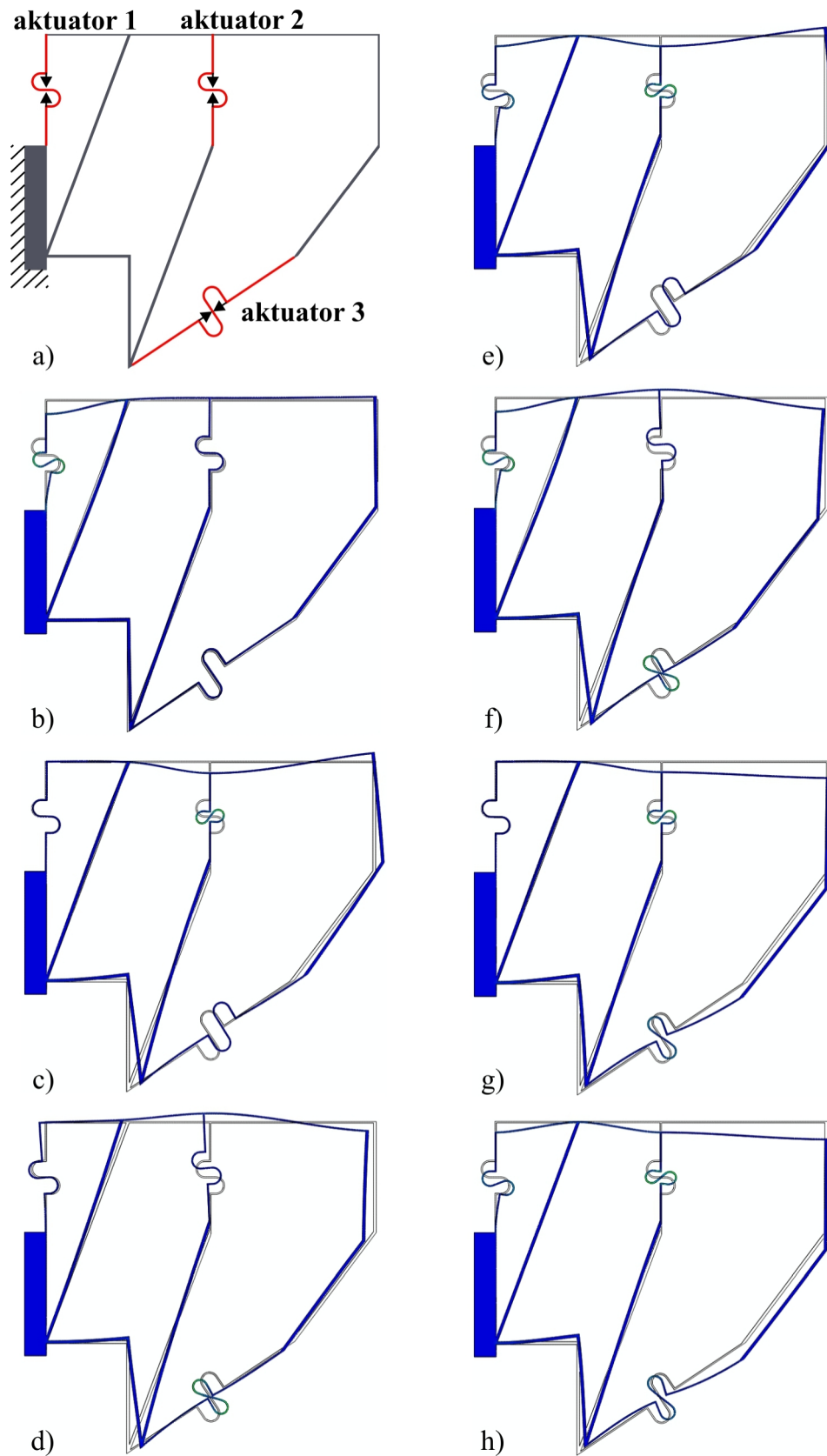
mm (po 15 mm na oba kraja) (slika 4.8.a) i jedna sa aktuatorima koji mogu da realizuju hod od 40 mm (po 20 mm na oba kraja) (slika 4.9.a); ovo se odnosi na aktuatore 1 i 2. Aktuator 3 je i na slici 4.1. mogao da realizuje dovoljno veliki hod pa je njegova dužina modifikovana u skladu sa povećanjem vertikalnog rastojanja između krajnjih tačaka strukturnog elementa za koji je vezan. Numerička analiza MKE sprovedena je na isti način kao i u prethodnim slučajevima. Kao ograničenje postavljen je nepokretni oslonac na nepokretne delove gipke strukture (ograničeno je svih šest stepena slobode kretanja) (slika 4.8.a i slika 4.9.a). Kao pogon usvojeno je pomeranje od 5 mm na oba kraja svih aktuatora u pravcu njihovih osa (slika 4.8.a i slika 4.9.a). Rezultati numeričke analize prikazani su na slici 4.8. i slici 4.9.

Na osnovu dobijenih rezultata analize rada modifikovanog gipkog sistema može se uočiti da ovaj gipki sistem realizuje oblike radne površine koji su slični oblicima koje realizuje gipki sistem prikazan na slici 4.1. (oblike prikazane na slici 4.3. i slici 4.4.). Rezultati pokazuju da je razvijeni adaptivni gipki sistem skalabilan odnosno da je moguće modifikovati gipku strukturu tako da se koriste aktuatori različitog hoda, što zavisi od primene.

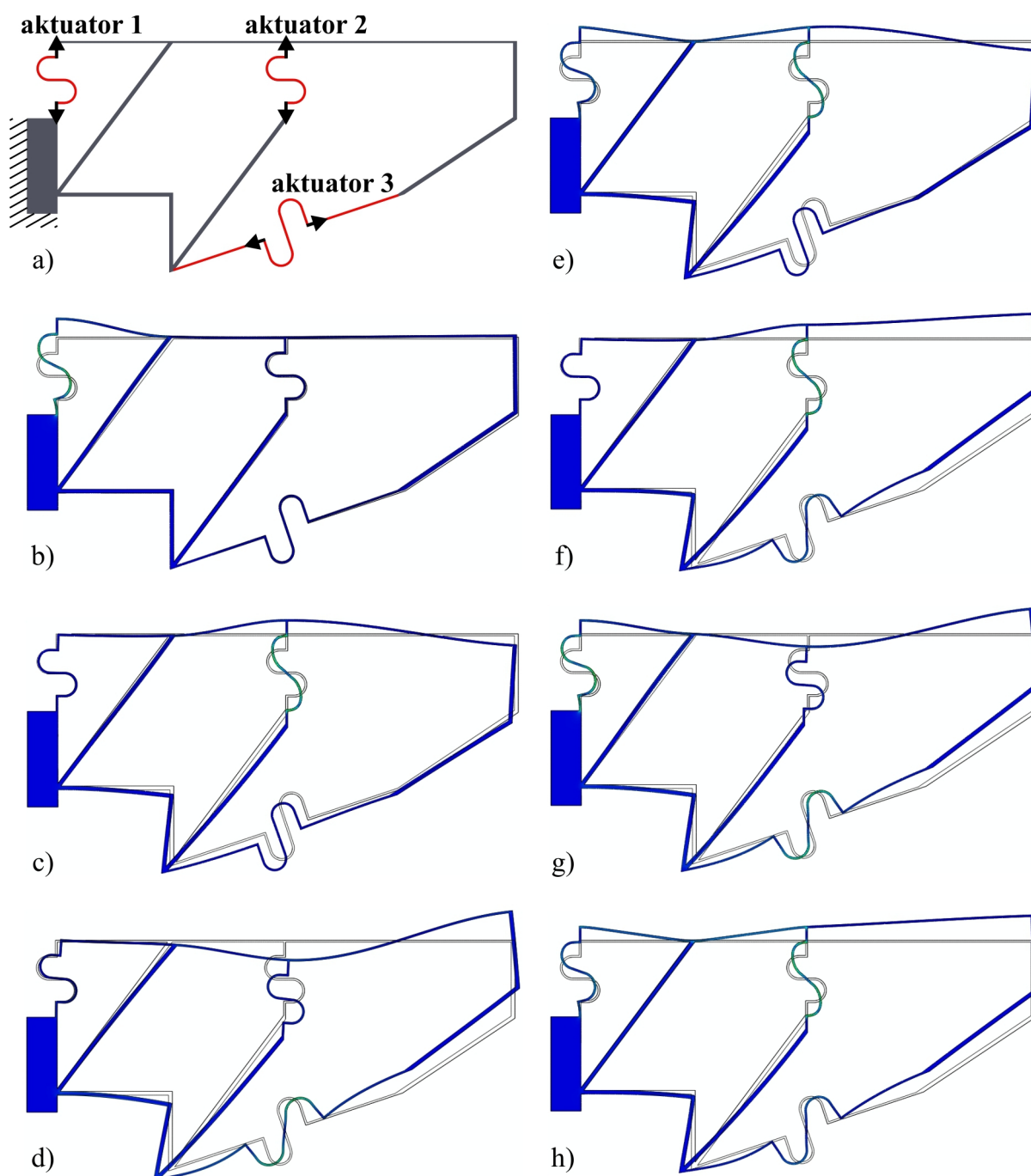
Sproveden je i set numeričkih analiza za slučaj primene aktuatora koji se istežu. Rezultati analize prikazani su na slici 4.10. Kao i u slučaju primene aktuatora koji se skupljaju, i gipki sistem sa aktuatorima koji se istežu može da ostvari konkavni (slika 4.10.d) i konveksni oblik radne površine (slika 4.10.c). Međutim, za razliku od aktuatora koji se skupljaju (slika 4.3.), ovde se konkavni oblik radne površine ostvaruje dejstvom aktuatora 3 (slika 4.10.d), a konveksni oblik dejstvom aktuatora 2 (slika 4.10.c). Pored oblika prikazanih na ovim slikama, kombinacijom više aktivnih aktuatora koji se istežu adaptivna gipka struktura može da ostvari i neke druge oblike radne površine (slika 4.10.e, slika 4.10.f, slika 4.10.g i slika 4.10.h).



slika 4.8. Adaptivna gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima koji se skupljaju i imaju hod od 30 mm (a) i rezultati numeričke analize MKE kada je aktivan aktuator 1 (b), 2 (c) ili 3 (d), i kada su aktivni aktuatori 1 i 2 (e), 1 i 3 (f), 2 i 3 (g), 1, 2, i 3 (h) [212]



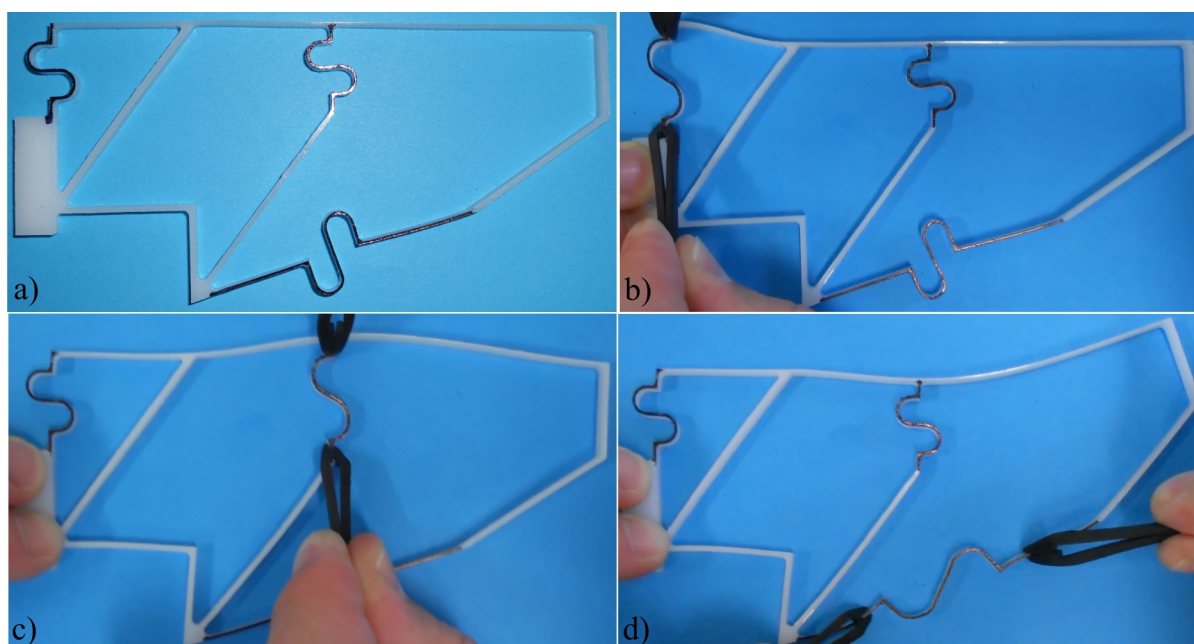
slika 4.9. Adaptivna gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima koji se skupljaju i imaju hod od 40 mm (a) i rezultati numeričke analize MKE kada je aktivan aktuator 1 (b), 2 (c) ili 3 (d), i kada su aktivni aktuatori 1 i 2 (e), 1 i 3 (f), 2 i 3 (g), 1, 2, i 3 (h) [212]



slika 4.10. Adaptivna gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima koji se istežu (a) i rezultati numeričke analize MKE kada je aktivan aktuator 1 (b), 2 (c) ili 3 (d) i kada su aktivni aktuatori 1 i 2 (e), 2 i 3 (f), 1 i 3 (g) ili 1, 2 i 3 (h) [212]

Slično kao i pri dejstvu aktuatora koji se skupljaju, moguće je i primenom aktuatora koji se istežu, zavisno od hoda aktuatora, ostvariti oblike radne površine različitog radijusa. Verifikacija rezultata dobijenih analizom MKE, sprovedena je na istom, izrađenom modelu gipke strukture (slika 4.7.a). Fizički prototip je sada testiran pomeranjem krajeva elastičnih

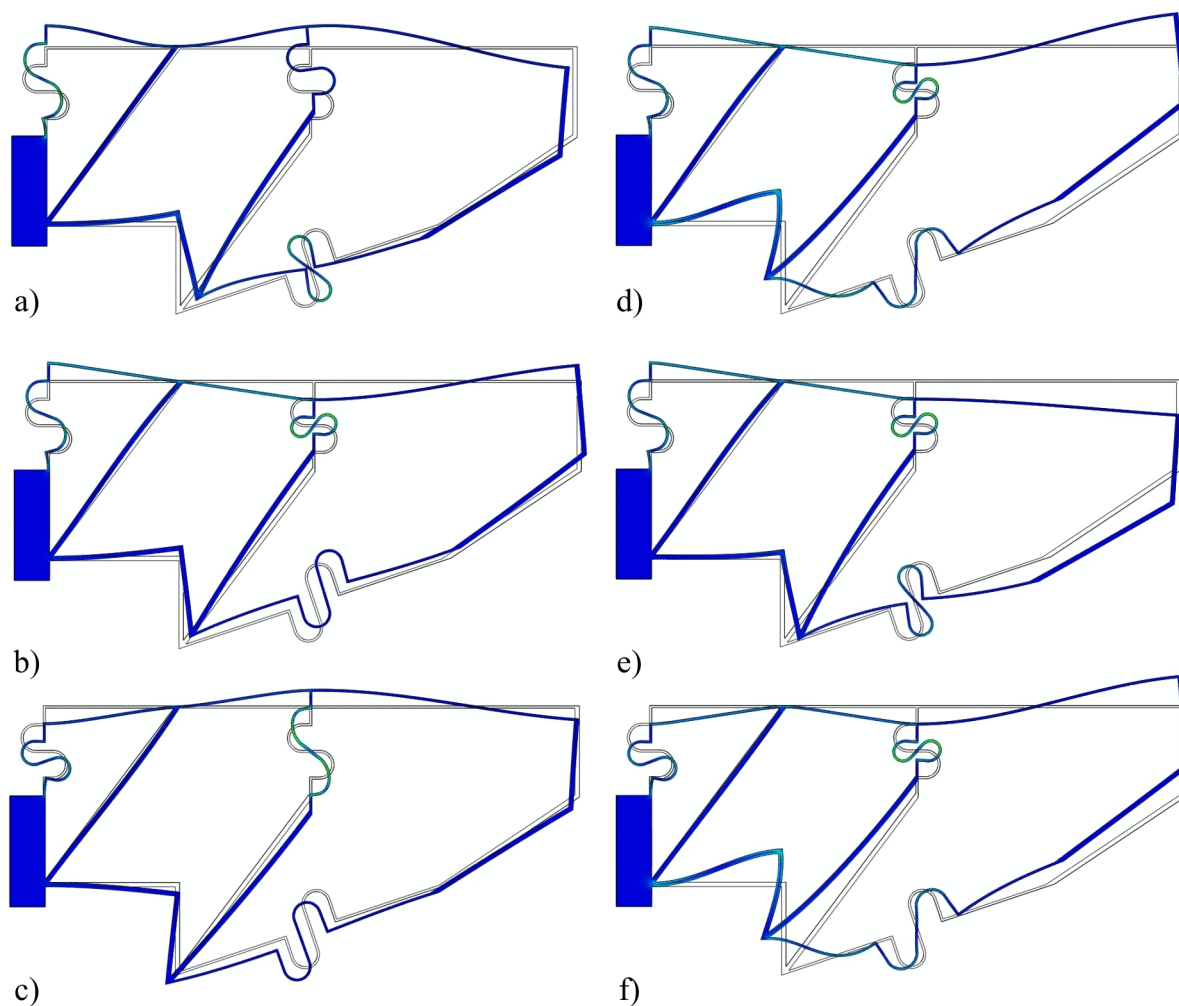
elemenata u smeru dejstva aktuatora koji se istežu (slika 4.11.). Kao što se može videti sa slike 4.11., izrađeni model gipkog sistema pokazuje adaptivno ponašanje i u ovom slučaju odnosno može da ostvari različite oblike radne površine i kada bi se koristili aktuatori koji se istežu. Upoređivanjem rezultata numeričke analize (slika 4.10.) i ponašanja fizičkog modela (slika 4.11.) može se zaključiti da se postižu veoma slični oblici radne površine.



slika 4.11. Izrađeni model adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine (a) i oblici radne površine koje ostvaruje pri istezanju aktuatora 1 (b), aktuatora 2 (c) i aktuatora 3 (d) [214]

Pored gipkih sistema koje pogone samo aktuatori koji se skupljaju ili samo aktuatori koji se istežu moguće je realizovati i gipki sistem koji sadrži oba tipa aktuatora u strukturi odnosno može se koristiti i kombinacija aktuatora koji se skupljaju i aktuatora koji se istežu. Kako bi se ispitala ova mogućnost odnosno oblici radne površine koji se time postižu, sprovedena je dodatna analiza MKE. Neki od oblika radne površine koje gipki sistem postiže kada koristi kombinaciju aktivnih aktuatora koji se skupljaju i aktuatora koji se istežu prikazani su na slici 4.12. Kao što se i sa ove slike vidi, i u ovom slučaju gipki sistem može ostvariti više različitih oblika radne površine; na slici 4.12. prikazani su rezultati za samo neke od kombinacija aktivnih aktuatora, a ukoliko bi se koristile sve moguće kombinacije aktivnih aktuatora na istezanje i skupljanje, gipki sistem bi mogao da ostvari i znatno više različitih oblika radne površine.

Na osnovu svih prethodno prikazanih rezultata i ispitivanja ponašanja izrađenog modela, može se zaključiti da dobijeno rešenje adaptivnog gipkog sistema predstavlja sistem koji u jednoj strukturi može da koristi kako samo aktuatora na skupljanje ili aktuatora na istezanje tako i kombinaciju oba ova tipa aktuatora kako bi zavisno od primene (radne okoline) ostvario odgovarajuće oblike radne površine.



slika 4.12. Rezultati analize MKE rada adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima koji se istežu ili skupljaju kada su aktivni aktuatori: a) 1 (istezanje) i 3 (skupljanje); b) 1 (istezanje) i 2 (skupljanje); c) 1 (skupljanje) i 2 (istezanje); d) 1 (istezanje), 2 (skupljanje) i 3 (istezanje); e) 1 (istezanje), 2 (skupljanje) i 3 (skupljanje); f) 1 (skupljanje), 2 (skupljanje) i 3 (istezanje) [214]

4.3. Analiza upravljivosti

Prethodna analiza dobijenih rezultata sprovedena je sa stanovišta postignutih oblika radne površine, pri čemu je pokazano da razvijeni gipki sistem može da ostvari različite oblike radne površine. Naredna analiza biće sprovedena sa stanovišta realizovane upravljivosti gipkog sistema odnosno upravljivosti radne površine. Za slučaj rezultata numeričke analize prikazanih na slici 4.3., veličina pomeranja izvršnih tačaka, kada su aktivni pojedinačni aktuatori u strukturi, data je u tabeli 14, pri čemu upravljivost gipkog sistema iznosi $\eta_c=16.44\%$.

Tabela 14. Veličina pomeranja izvršnih tačaka radne površine i upravljivost gipkog sistema za slučaj numeričke analize prikazane na slici 4.3.

<i>Rezultati</i>			
aktivni aktuator	pomeranje izvršnih tačaka		
	1	2	3
aktuator 1	- 5 mm	0.354 mm	0.390 mm
aktuator 2	0.0674 mm	- 5 mm	4.113 mm
aktuator 3	-0.327 mm	5.450 mm	-6.223 mm
upravljivost $\eta_c=16.44\%$			

Upravljivost razvijenog 3D modela adaptivnog gipkog sistema je niža u odnosu na gipki sistem dobijen optimizacionim algoritmom (tabela 12), zato što je pri numeričkoj analizi u ABAQUS-u simuliran najgori mogući slučaj sa stanovišta upravljivosti, kada aktuator ima dovoljno veliku silu da ostvari jednak hod na oba svoja kraja. U slučaju razvijenog 3D modela, kada je aktivan aktuator 2 u strukturi (slika 4.3.b), jedan kraj aktuatora realizuje pomeranje izvršne tačke 2 (tačka kojom se primarno upravlja), dok drugi kraj aktuatora realizuje izvesno pomeranja i izvršne tačke 3. Kada je aktivan aktuator 3 (slika 4.3.c), jedan kraj aktuatora realizuje pomeranja izvršne tačke 3 (tačka kojom se primarno upravlja) dok drugi kraj aktuatora realizuje izvesno pomeranje i izvršne tačke 2. Ako jedan aktuator u strukturi pored izvršne tačke čijim pomeranjem primarno upravlja, realizuje izvesno pomeranje i ostalih tačaka radne površine, i upravljivost gipkog sistema je manja. Upravo zato što kada je aktivan aktuator 2 dolazi do pomeranja i izvršne tačke 3, a kada je aktivan aktuator 3 dolazi do pomeranja izvršne tačke 2 (tabela 14), manja je nezavisnost dejstva

aktuatora u strukturi (manja je ortogonalnost vektora pomeranja izvršnih tačaka). Potrebno je naglasiti da vrednost upravljivosti gipkog sistema u velikoj meri zavisi od veličine pomeranja izvršnih tačaka. Pri aktivaciji pojedinačnih aktuatora gipkog sistema dobijenog optimizacionim algoritmom, svaki aktuator u strukturi primarno upravlja pomeranjem jedne izvršne tačke, pri čemu je pomeranje ostalih tačaka radne površine veoma malo (slika 3.53., tabele 12 i 13) pa je i upravljivost gipkog sistema veća.

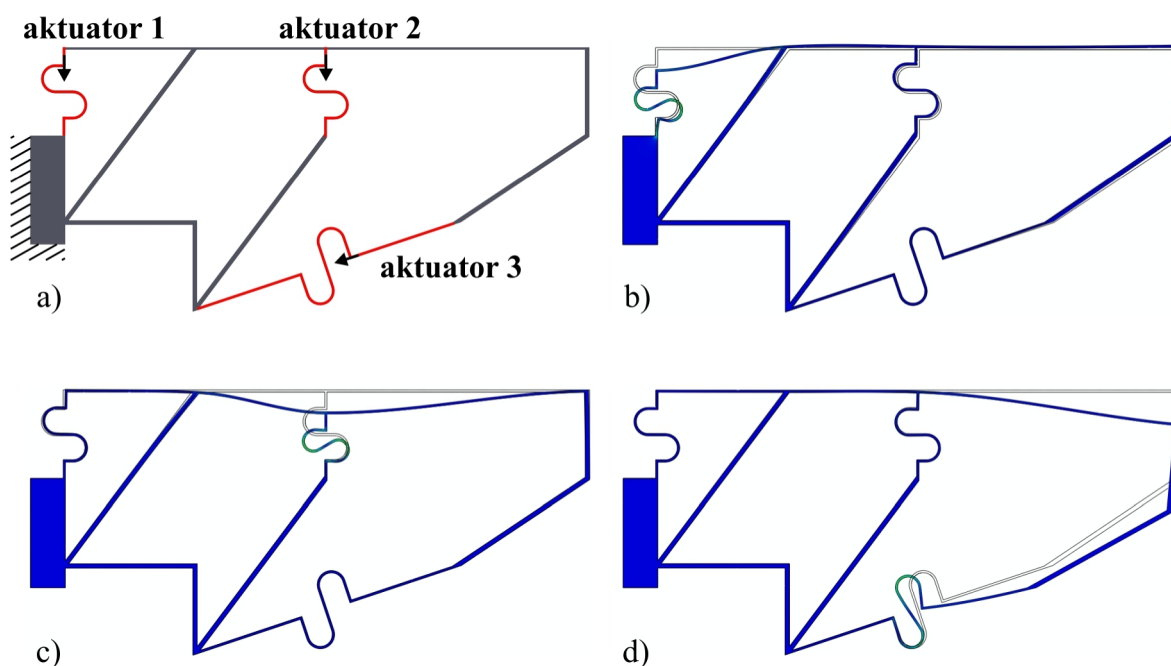
Kao što je ranije napomenuto, pri numeričkoj analizi rada razvijenog 3D modela gipkog sistema aktuatori ostvaruju jednak hod na oba svoja kraja (najgori slučaj sa stanovišta upravljivosti). Ukoliko bi se, međutim, koristili realni aktuatori, veličina hoda aktuatora zavisila bi od njegove krutosti i krutosti celog gipkog sistema (strukture i ostalih aktuatora), pa bi vrednost upravljivosti razvijenog gipkog sistema (radne površine) bila drugačija.

U slučaju numeričke analize 3D modela gipkog sistema primenjeno je pogonsko pomeranje kao granični uslov pa hod elastičnih elemenata ne zavisi od krutosti gipkog sistema. Pri analizi MKE adaptivnog gipkog sistema u optimizacionom algoritmu, primenjena je blok sila na krajevima aktuatora (vidi odeljak 3.7.3.), a ne pomeranje kao pri analizi MKE rada 3D modela gipkog sistema, pa i hod koji aktuatori realizuju zavisi od krutosti gipkog sistema. Ovde svaki od aktuatora realizuje veći hod na kraju koji je povezan sa odgovarajućom izvršnom tačkom radne površine (u slučaju aktuatora 3, kraj koji je preko linijskih elemenata povezan sa izvršnom tačkom) (slika 3.53.), dok na drugom kraju realizuje veoma malo pomeranje pa samim tim i ne utiče toliko na pomeranje ostalih izvršnih tačaka (vidi tabele 12 i 13). Na mestu spoja aktuatora sa ostatkom gipkog sistema krutost je relativno velika pa je i pomeranje kraja aktuatora malo, dok je na mestu spoja aktuatora sa izvršnom tačkom krutost sistema manja pa je i pomeranje kraja aktuatora veće. Pored ovoga, aktuatori gipkog sistema u optimizacionom algoritmu imaju relativno veliku krutost pa je i krutost celog sistema relativno velika; pri pomeranju pojedinačnih izvršnih tačaka odgovarajućim aktuatorom krutost sistema je dovoljno velika da spreči pomeranje ostalih tačaka radne površine.

Kako bi pokazali da i razvijeni 3D model adaptivnog gipkog sistema (slika 4.1.) može da ostvari veću vrednost upravljivosti radne površine, simuliran je slučaj kada aktuatori realizuju najveći hod na jednom svom kraju (na kraju bližem izvršnim tačkama), kao i u slučaju gipkog sistema dobijenog optimizacionim algoritmom (slika 3.53.). Ovo bi odgovaralo slučaju kada svi aktuatori imaju relativno veliku krutost pa prilikom aktivacije pojedinih aktuatora u strukturi, zbog krutosti celog sistema, oni realizuju najveći hod na krajevima koji su bliži izvršnim tačkama radne površine jer je na tim mestima krutost sistema manja. Kao

ograničenje za analizu MKE postavljen je nepokretni oslonac isto kao i za slučaj analize sa slike 4.1.a, a kao pogonsko pomeranje (hod aktuatora) usvojeno je pomeranje od 5 mm samo na jednom kraju svakog od aktuatora u pravcu njegove ose dok je na onim drugim krajevima aktuatora primenjena mala vrednost pomeranja (slika 4.13.a). Rezultati analize prikazani su na slici 4.13. i u tabeli 15.

Kao što možemo videti sa slike 4.13. i na osnovu rezultata iz tabele 15, upravljivost razvijenog gipkog sistema je sada mnogo veća ($\eta_c=98.41\%$), skoro jednaka kao u slučaju gipkog sistema dobijenog algoritmom (vidi tabelu 12). Svaki od aktuatora primarno realizuje pomeranje jedne izvršne tačke (slika 4.13.b, slika 4.13.c i slika 4.13.d); za razliku od rezultata prikazanih na slici 4.3.b, aktuator 2 primarno realizuje pomeranje izvršne tačke 2 (slika 4.13.c), a za razliku od rezultata sa slike 4.3.c, aktuator 3 primarno realizuje pomeranje izvršne tačke 3 (slika 4.13.d). Interesantno je primetiti da aktuator 3 realizuje i pojačanje pomeranja 3 izvršne tačke radne površine (tabela 15), slično kao i u slučaju gipkog sistema dobijenog optimizacionim algoritmom (tabela 12).



slika 4.13. Adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima veće krutosti (a) i rezultati analize MKE kada je aktivan aktuator 1 (b), 2 (c) i 3 (d)

Potrebno je naglasiti da je pri numeričkoj analizi 3D modela gipkog sistema kao pogon primenjeno pomeranje, a ne sila, zato što aktuatori u algoritmu imaju drugačiju vrednost krutosti od krutosti elastičnih elemenata koji su korišćeni kao aktuatori u 3D modelu gipkog sistema.

Elastični elementi u vidu opruga imaju relativno malu krutost tj. veoma su gipki i lako se deformišu pa ukoliko bi se primenila ista vrednost sile kao i za aktuator u optimizacionom algoritmu, ponašanje elastičnih elemenata odnosno strukture bilo bi drugačije.

Tabela 15. Veličina pomeranja izvršnih tačaka radne površine i upravljivost gipkog sistema za slučaj numeričke analize prikazane na slici 4.13.

<i>Rezultati</i>			
aktivni aktuator	pomeranje izvršnih tačaka		
	1	2	3
aktuator 1	- 5 mm	0.514 mm	0.607 mm
aktuator 2	0.133 mm	- 5 mm	-0.013 mm
aktuator 3	0.011 mm	-0.185 mm	-7.697 mm
upravljivost $\eta_c=98.41\%$			

Upravljivost sistema u velikoj meri zavisi od modula aktuatora i krutosti celog gipkog sistema. Pored ovoga, upravljivost drastično opada sa porastom pomeranje izvršnih tačaka. Razvijeni adaptivni gipki sistem za upravljanje oblikom radne površine može ostvariti visoku vrednost upravljivosti radne površine kada se koriste krući aktuatori, kao što je pokazano numeričkom analizom na slici 4.13. ($\eta_c=98.41\%$). Primenom različitih tipova realnih aktuatora moguće je ostvariti različite vrednosti upravljivosti sistema, što zavisi od sile i hoda koji aktuator ostvaruje, ali u isto vreme i od krutosti celog sistema (strukture i aktuatora).

Na osnovu prethodno sprovedene analize može se zaključiti da dobijeno rešenje adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima može da upravlja oblikom radne površine odnosno da realizuje različite oblike radne površine i kada je upravljivost gipkog sistema mala. Pokazano je da dobijeno rešenje adaptivnog gipkog sistema može da realizuje i visoku upravljivost radne površine, što zavisi od krutosti aktuatora odnosno tipa realnih aktuatora koji bi se ugradili u gipku strukturu. Iako je za dobijanje rešenja adaptivnog gipkog sistema, pri optimizaciji korišćena linearna MKE, numeričkom nelinearnom analizom i ispitivanjem izrađenog 3D modela adaptivne gipke strukture pokazano je da model gipkog sistema realizuje istu funkciju kao i rešenje dobijeno algoritmom, pri čemu su ostvareni oblici radne površine veoma slični. Odavde se može zaključiti da se pri optimizaciji gipkih sistema može koristiti linearna analiza; dobijena rešenja obično realizuju relativno mala pomeranja izvršnih tačaka pa je i linearni model dovoljno tačan. Na osnovu dobijenog rešenja moguće je, međutim, razviti i

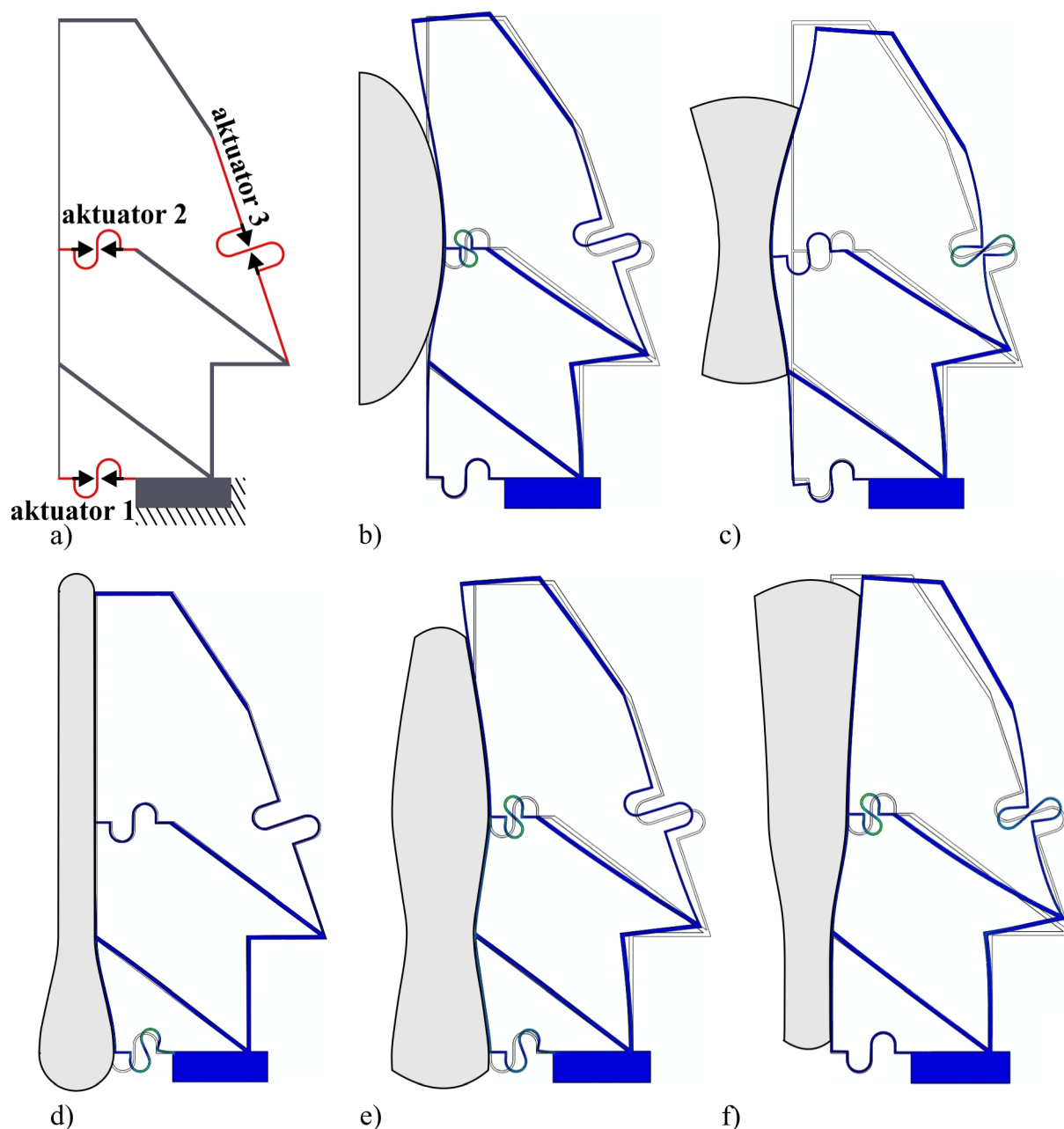
gipki sistem koji realizuje i mnogo veća pomeranja izvršnih tačaka radne površine, kao što je to pokazano na primeru gipkog sistema koji je razvijen u disertaciji, pri čemu bi zbog topologije samog rešenja dobijenog optimizacijom i oblici koje realizuje razvijeni gipki sistem bili veoma slični. Pored ovoga, projektant može odlučiti i da nakon dobijanja optimalnog rešenja promeni tip aktuatora i usvoji kruće aktuatore nego što je to postavkom zadatka sinteze specificirano. Na ovaj način može se, ukoliko je potrebno, povećati upravljivost sistema ali po cenu smanjenja realizovane veličine pomeranja izvršnih tačaka, pošto krući aktuatori obično realizuju manji hod. Na kraju, može se zaključiti da razvijeni optimizacioni algoritam daje optimalne topologije adaptivnih gipkih sistema sa ugrađenim aktuatorima koji i kada se provere nelinearnom MKE i kada se izrade realizuje zahteve postavljene zadatkom sinteze.

4.4. Moguće primene adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom radne površine

Većina postojećih rešenja struktura koje mogu da menjaju svoj oblik razvijena su samo za jednu konkretnu primenu. Za razliku od njih adaptivni gipki sistem koji može da upravlja oblikom svoje radne površine, razvijen u ovoj disertaciji, može da ima više različitih primena; u ovoj disertaciji biće predstavljene primene ovog sistema kao adaptivnog gipkog hvatača i kao adaptivnog krila.

4.4.1. Primena razvijenog sistema kao adaptivnog gipkog hvatača

Razvoj hvatača koji bi mogao da manipuliše objektima nepravilnog i nepredvidivog oblika predstavlja veoma izazovan zadatak. Za bezbednu i pouzdanu manipulaciju takvim objektima potrebno je da hvatač bude adaptivan, pogotovu kada se radi o manipulaciji krutim (lako lomljivim) objektima ili objektima različite krutosti. Upravo zbog ovoga su u literaturi razvijeni različiti univerzalni fleksibilni hvatači [76, 82, 215-220]. Većina ovih hvatača, međutim, zahteva spoljašnji pogon (kompresor ili relativno velike električne motore), snažan izvor napajanja (veliku voltažu) i montažu. Pored ovoga, do sada nije ponuđena jedinstvena metodologija sinteze ovakvih hvatača. Gipki mehanizmi sa ugrađenim aktuatorima predstavljaju jedan od načina za realizovanje hvatača koji bi mogao da prilagodi svoju radnu površinu (oblik površine kojom realizuje hvatanje) obliku objekata koji hvata i da na taj način ostvari bezbednu manipulaciju objekata hvatanja.



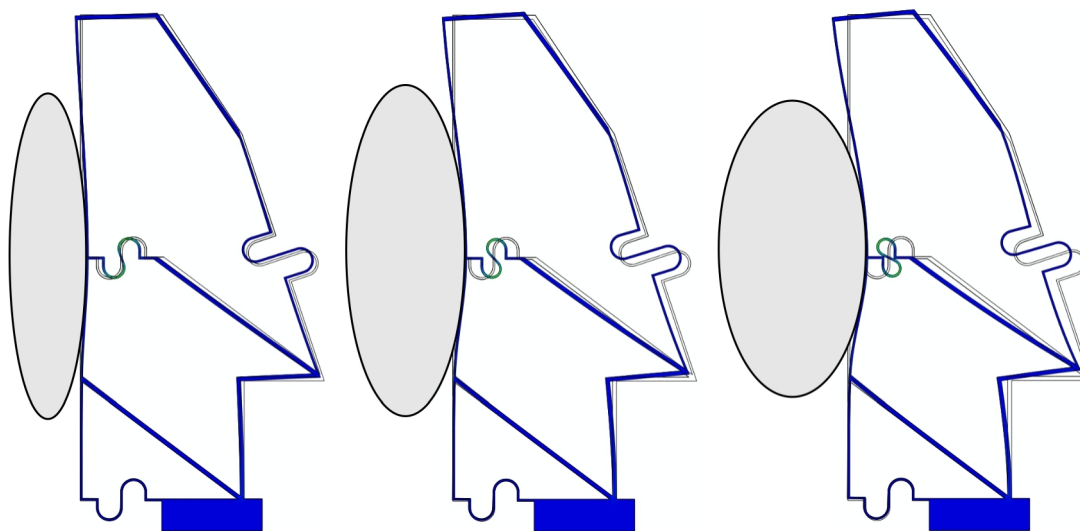
slika 4.14. a) Adaptivni gipki sistem prsta hvatača; b) realizovanje hvatanja objekta konveksnog oblika (aktuator 2 je aktivan); c) hvatanje objekta konkavnog oblika (aktuator 3 je aktivan); d) hvatanje odgovarajućeg objekta kada je aktivan aktuator 1; e) hvatanje objekta konkavno-konveksnog oblika; f) hvatanje odgovarajućeg objekta kada su aktivni aktuator 2 i aktuator 3 [212, 214]

Adaptivni gipki sistem koji može da upravlja oblikom radne površine (adaptivna gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima koja može da menja svoj oblik), razvijen u ovoj disertaciji, može da se koristi kao adaptivni gipki prst hvatača (slika 4.14.a) [212, 214, 221-223]. Na slici je predstavljen samo jedan prst hvatača. Ovakav adaptivni gipki sisitem (gipki prst) mogao bi da hvata objekte različitog oblika. Na primer, kada se aktuator 2 skuplja

moгуće je hvatati objekte konveksnog oblika (slika 4.14.b), a kada se aktuator 3 skuplja moguće je hvatati objekte konkavnog oblika (slika 4.14.c). Aktivacijom aktuatora 1 gipki prst hvatača može da prilagodi svoju radnu površinu objektu prikazanom na slici 4.14.d. Aktivacijom više različitih aktuatora gipki prst može realizovati hvatanja objekata složenog oblika; na primer, aktivacijom aktuatora 1 i aktuatora 2 moguće je hvatati konkavno-konveksne objekte (slika 4.14.e).

Slično kao i primenom aktuatora koji se skupljaju, adaptivni gipki prst kod koga bi se aktuatori istežali (slika 4.10.), ili bi se pogonili kombinacijom aktuatora koji se skupljaju i istežu (slika 4.12.), mogao bi da prilagodi oblik svoje radne površine različitim oblicama objekata kojima manipuliše.

Realizovanjem različitog hoda aktuatora gipki prst hvatača može hvatati objekte različitog oblika. Kada je aktivan aktuator 2 (slika 4.14.b) za različit hod aktuatora moguće je realizovati hvatanje konveksnih objekata različitog radijusa krivine (slika 4.15.). Ovo važi i kada je aktivan aktuator 1 ili aktuator 3 kao i kod kombinacije više aktivnih aktuatora.



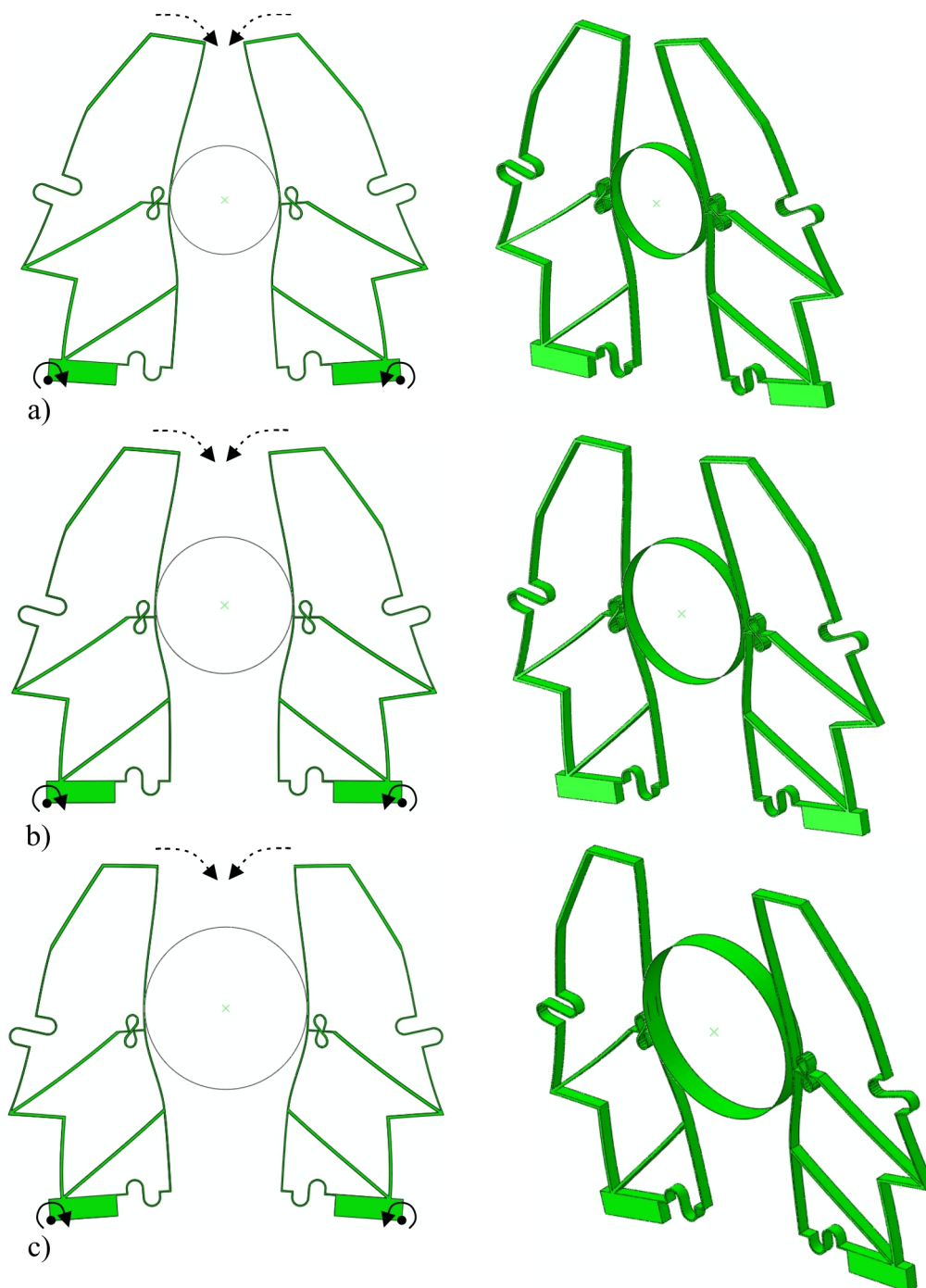
slika 4.15. Hvatanje konveksnih oblika različitog radijusa krivine odgovarajućim hodom aktuatora 2 [214]

Na slici 4.16. prikazani su rezultati numeričke MKE analize (u ABAQUS-u) dva gipka prsta hvatača koja realizuju hvatanja cilindričnih objekata različitog prečnika (aktivan je aktuator 2). Kao granični uslov pri MKE analizi:

- usvojena je rotacija oba prsta hvatača oko odgovarajućih osa (slika 4.16.a),
- postavljen je uslov kontakta između radne površine prstiju (površina kojom se realizuje hvatanje) i spoljašnje površine cilindričnog objekta, a

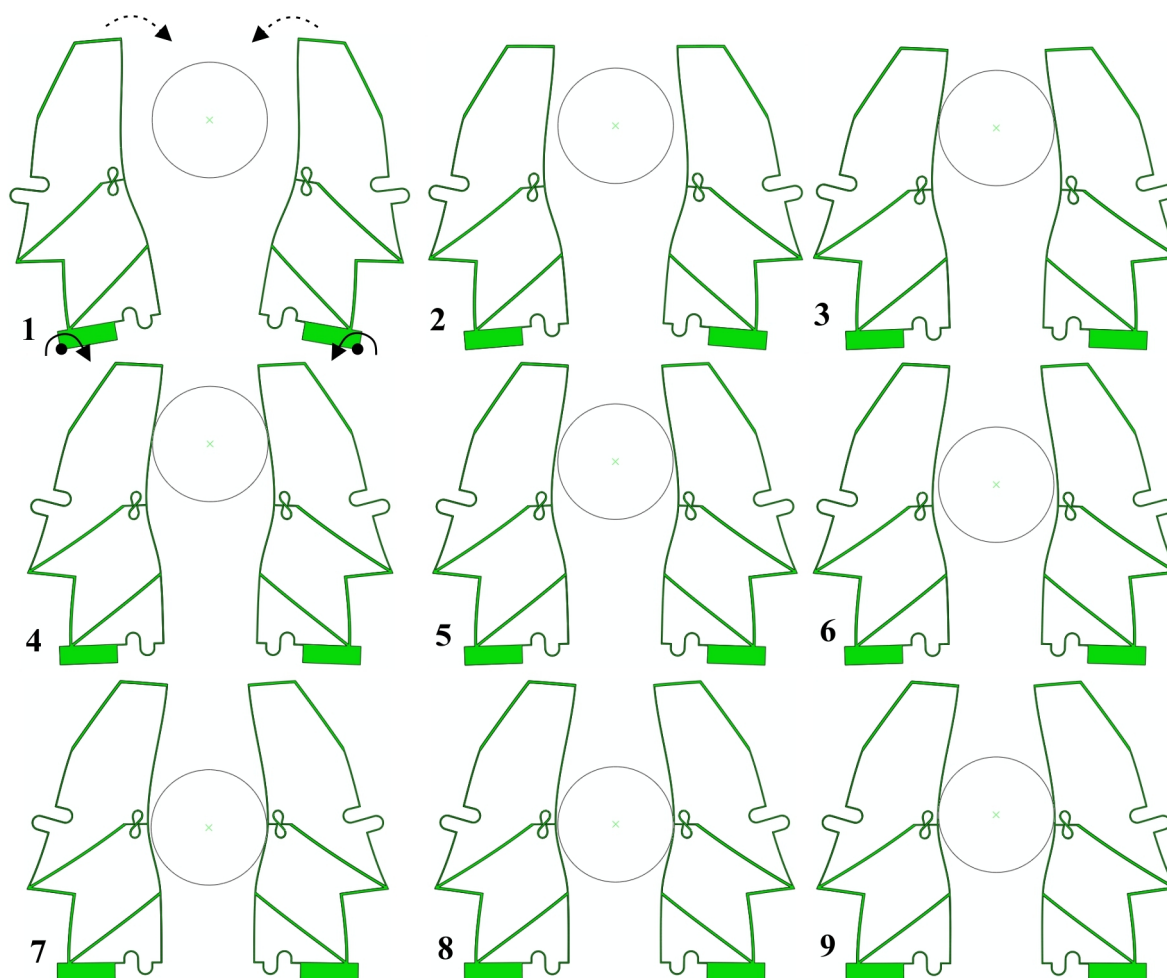
– cilindričnom objektu je ograničeno svih 6 stepeni slobode kretanja.

Sa slike 4.16. može se videti da gipki prsti hvatača mogu da realizuju hvatanje objekata različite veličine, pri čemu je potrebno sprovesti dalja ispitivanja sa aspekta težine predmeta sa kojom bi ovakav hvatač mogao da manipuliše.



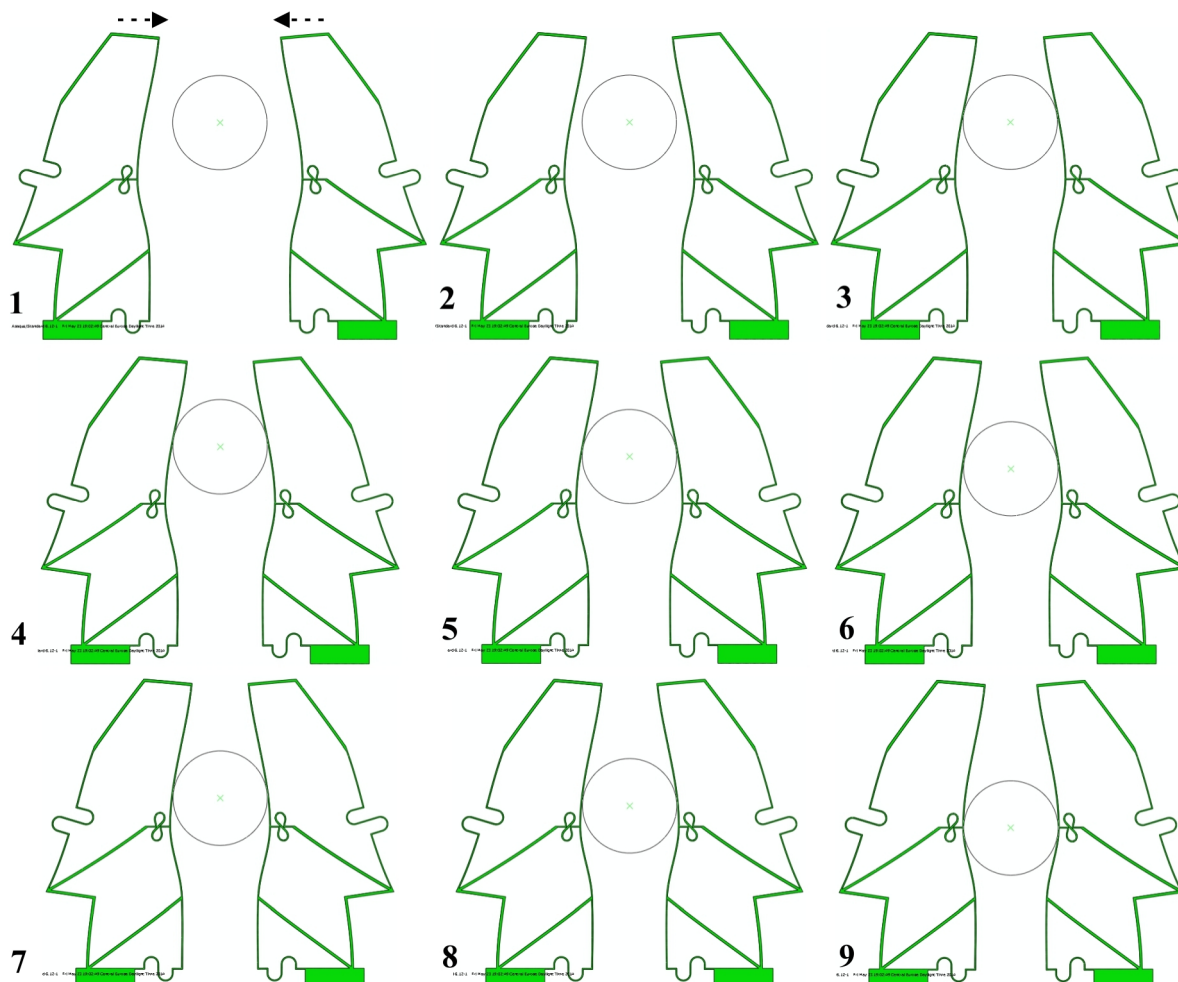
slika 4.16. Rezultati MKE analize kada dva gipka prsta realizuju hvatanje cilindričnog objekta prečnika: a) 40 mm; b) 50 mm; c) 60 mm, (aktivan je aktuator 2)

Adaptivni gipki sistem dvoprstog hvatača mogao bi da realizuje hvatanje objekata i kada se oni ne bi nalazili u tačno određenom položaju. Na slici 4.17. prikazani su rezultati numeričke analize kod ovakvog hvatanja objekta, na slici 4.17. prikazan je položaj prstiju hvatača i objekta u sukcesivnim trenucima procesa hvatanja cilindričnog objekta. Granični uslovi pri analizi su isti kao i u slučaju analize prikazane na slici 4.16., samo što je ovde cilindričnom objektu dozvoljeno da se pomera u ravni kretanja prstiju hvatača (objekat ima 3 stepena slobode kretanja, dve translacije u ravni i jednu rotaciju oko ose upravne na ravan kretanja objekta).



slika 4.17. Rezultati MKE analize realizovanja hvatanja cilindričnog objekta koji može da se pomera u ravni kretanja gipkih prstiju hvatača; rezultati analize su prikazani u sukcesivnim trenucima procesa hvatanja cilindričnog objekta

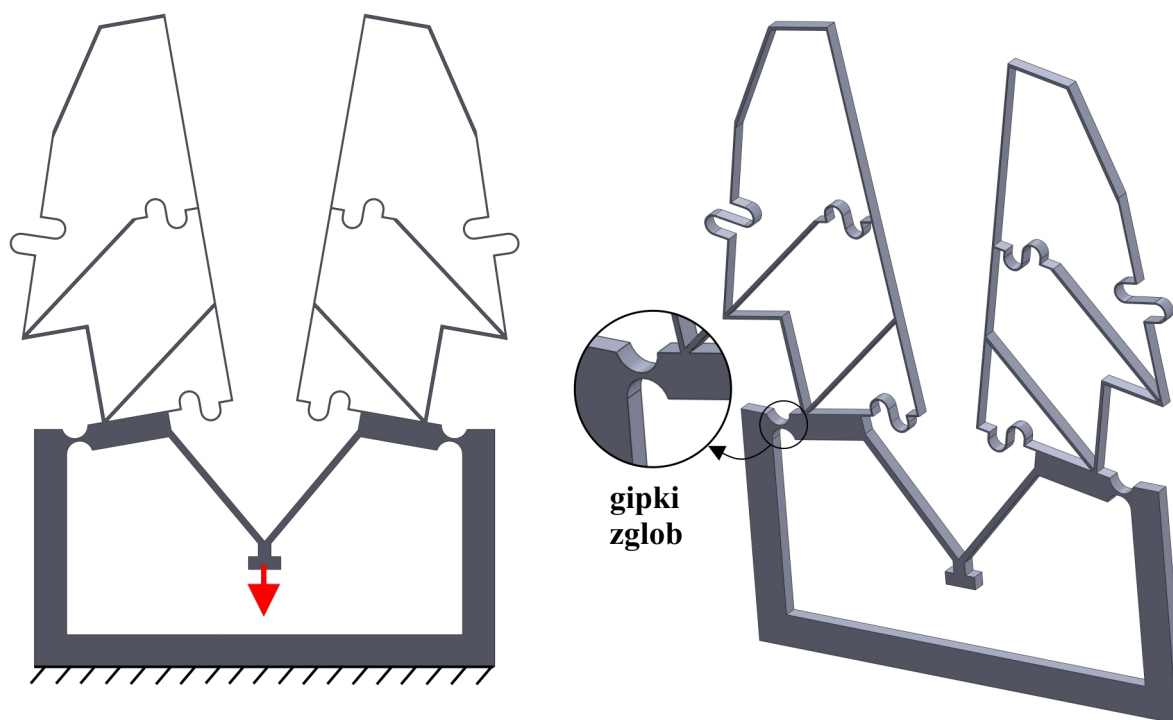
Slična analiza je sprovedena i na slici 4.18., samo što je ovde analiziran slučaj kada bi se prsti hvatača translatorno pomerali. Sa slike 4.18. je evidentno da i u ovom slučaju gipki prsti hvatača mogu da realizuju hvatanje objekta.



slika 4.18. Rezultati MKE analize realizovanja hvatanja cilindričnog objekta koji može da se pomera u ravni kretanja prstiju hvatača, pri čemu prsti hvatača realizuju translatorno pomeranje (rezultati analize su prikazani u sukcesivnim trenucima procesa hvatanja cilindričnog objekta)

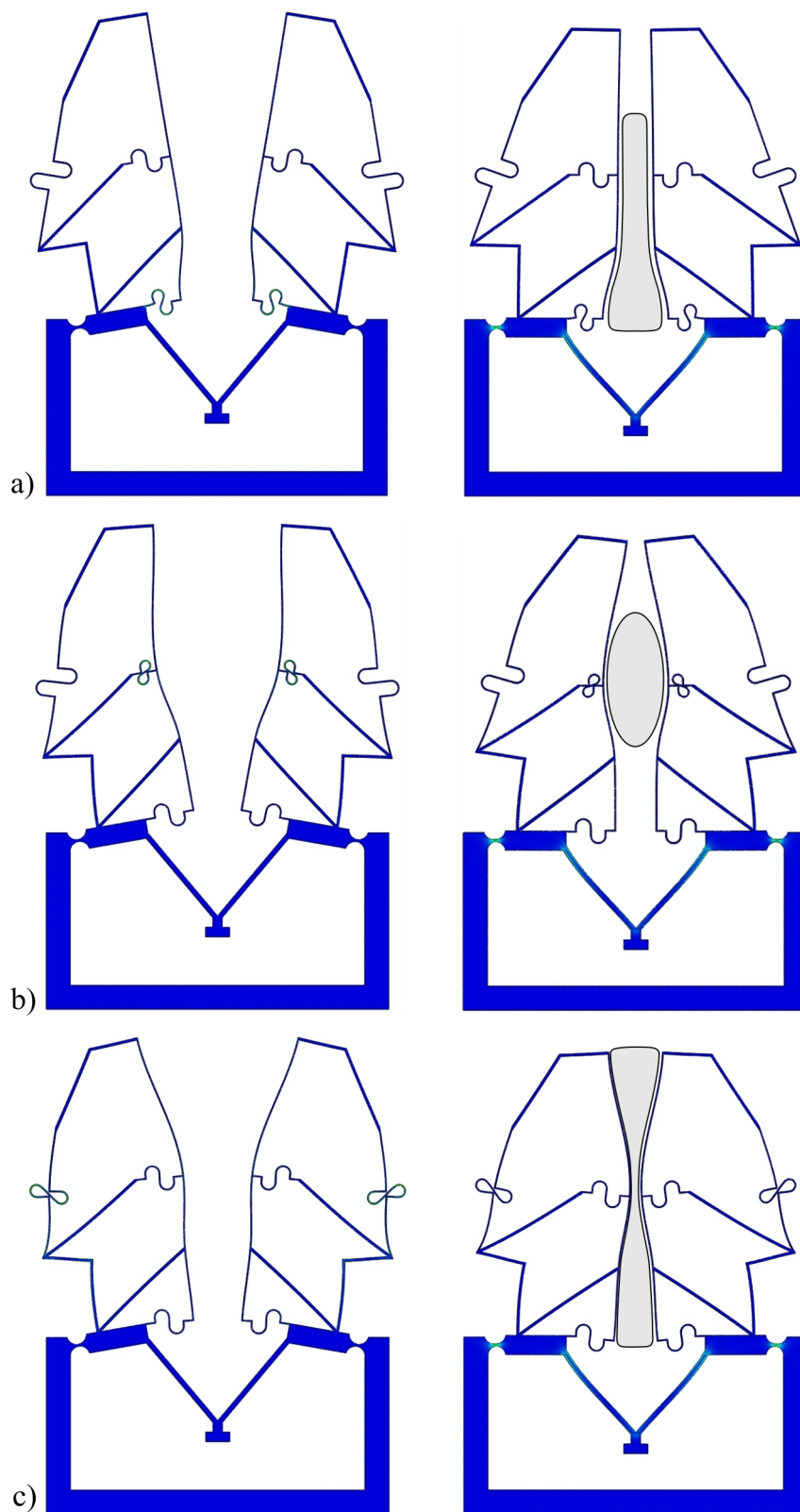
Na osnovu rešenja adaptivnog gipkog sistema dobijenog optimizacijom (slika 4.1.) razvijen je i 3D model gipkog mehanizma dvoprstog hvatača (slika 4.19.), sa prstima u vidu razvijenog adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima. Prsti hvatača realizuju obrtno kretanje zahvaljujući gipkim zglobovima koji povezuju oba prsta sa ramom osnove hvatača (slika 4.19.). Za analizu rada dvoprstog hvatača sprovedena je MKE analiza, pri čemu kao granični uslov postavljen je nepokretni oslonac na donjoj površini rama osnove hvatača i primenjeno je odgovarajuće pogonsko pomeranje (slika 4.19.). Na slici 4.20.

prikazani su rezultati analize kada je aktivan aktuator 1 (slika 4.20.a), aktuator 2 (slika 4.20.b) i aktuator 3 (slika 4.20.c). Hvatač može da uhvati objekte konveksnog oblika dejstvom aktuatora 2 (slika 4.20.b), a objekte konkavnog oblika dejstvom aktuatora 3 (slika 4.20.c), takođe moguće je realizovati hvatanje objekta različitog nepravilnog oblika dejstvom aktuatora 1 (slika 4.20.a). Prikazani su rezultati i kada se prsti hvatača nalaze u krajnjem položaju, kao i oblici objekta koje bi dvoprsti hvatač mogao da hvata kada se nalazi blizu krajnjeg položaja. Pored ovoga, sprovedena je i numerička analiza rada gipkog mehanizma dvoprstog hvatača kada realizuje hvatanja cilindričnih objekata različitog prečnika (slika 4.21.). Kao granični uslovi, pored uslova sa slike 4.19., postavljen je i kontakt između radne površine prstiju hvatača i spoljašnje površine cilindra, dok je cilindru ograničeno svih 6 stepeni slobode kretanja.

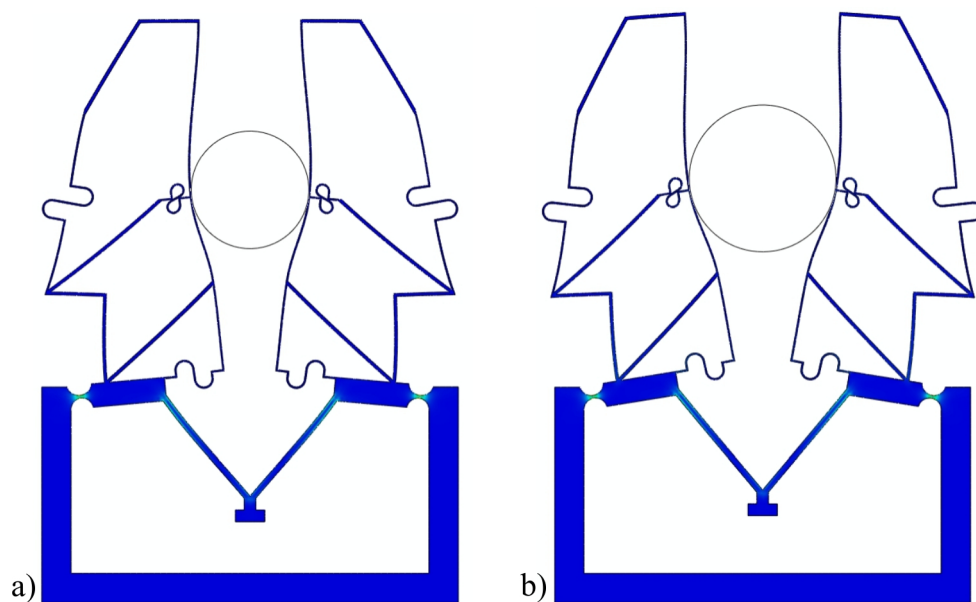


slika 4.19. Model gipkog mehanizma dvoprstog hvatača, realizovanog korišćenjem adaptivnog gipkog sistema (adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima)

Na osnovu prethodno sprovedene analize, može se zaključiti da razvijeni adaptivni gipki sistem, kao prst hvatača, može da realizuje hvatanje objekata različitog oblika. Takav hvatač imao bi mnogo prednosti u odnosu na postojećim rešenjima adaptivnih hvatača.



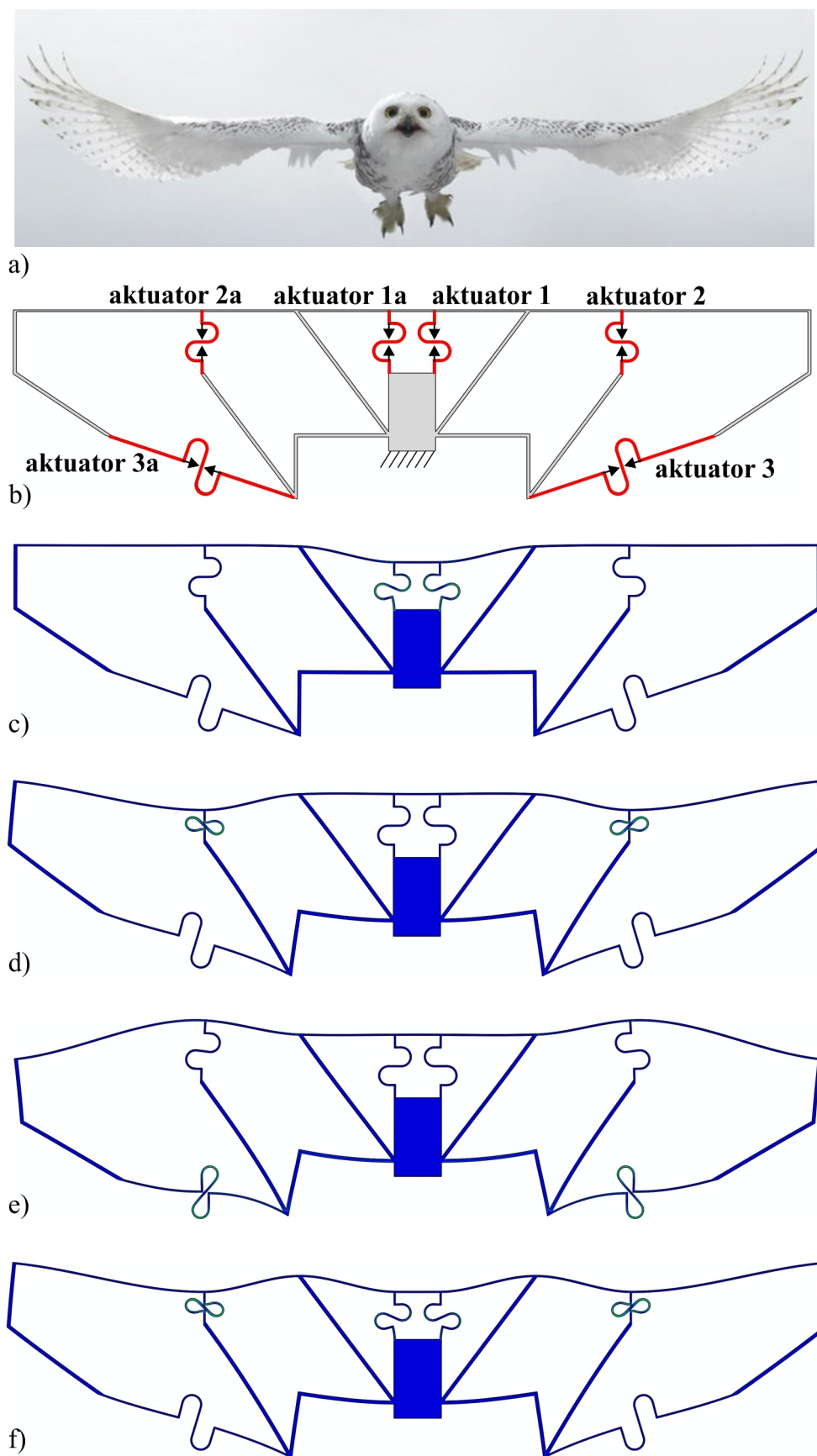
slika 4.20. Rezultati numeričke analize rada gipkog mehanizma dvoprstog hvatača i oblici objekata koje hvatač može da uhvati kada je aktivan: a) aktuator 1 (na slici levo hvatač je prikazan u početnom položaju, a na slici desno u krajnjem položaju); b) aktuator 2; c) aktuator 3



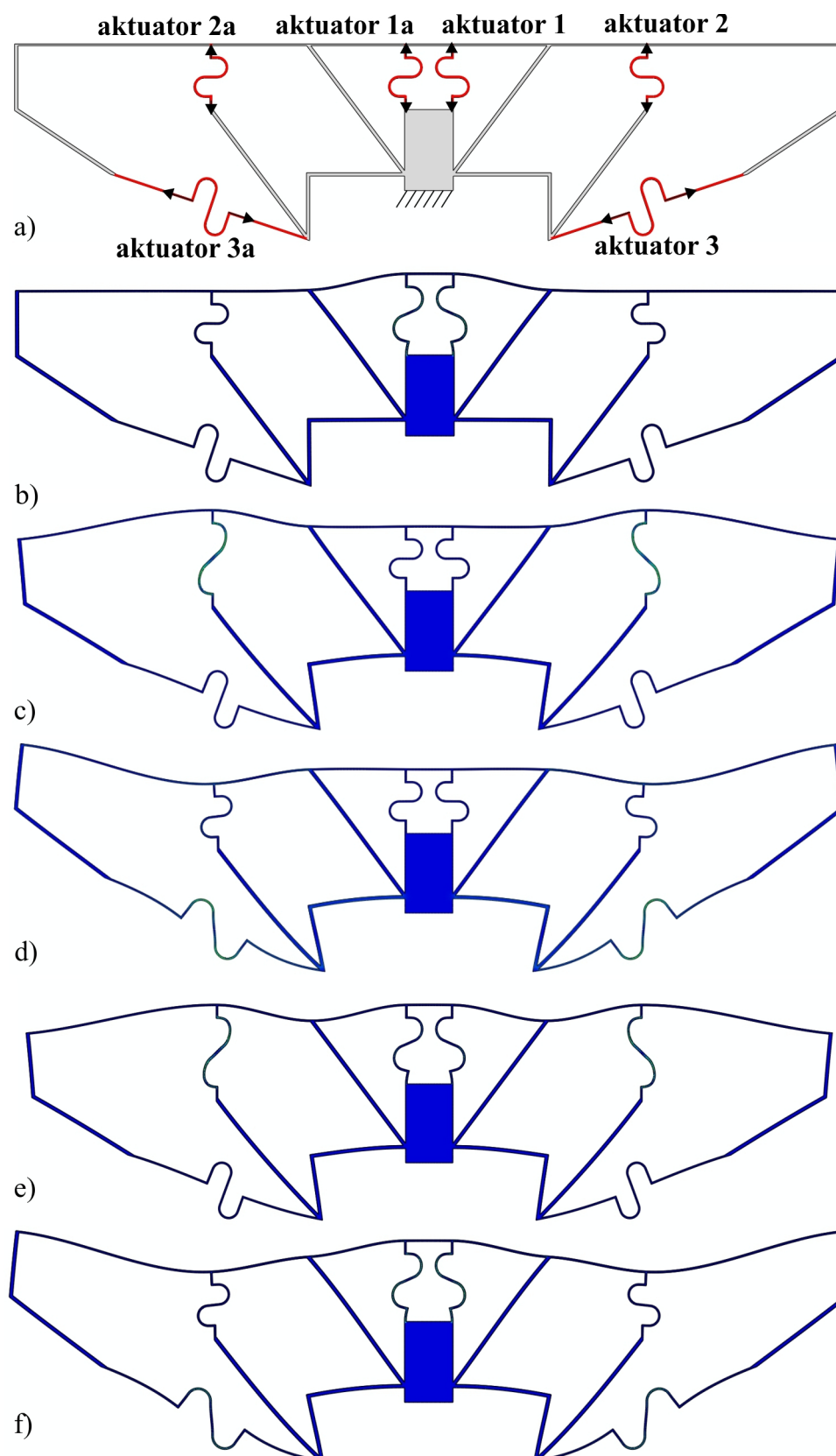
slika 4.21. Rezultati MKE analize rada gipkog mehanizma hvatača pri hvatanju cilindričnog objekta prečnika: a) 40 mm; b) 50 mm

4.4.2. Primena razvijenog sistema kao adaptivnog krila letilice

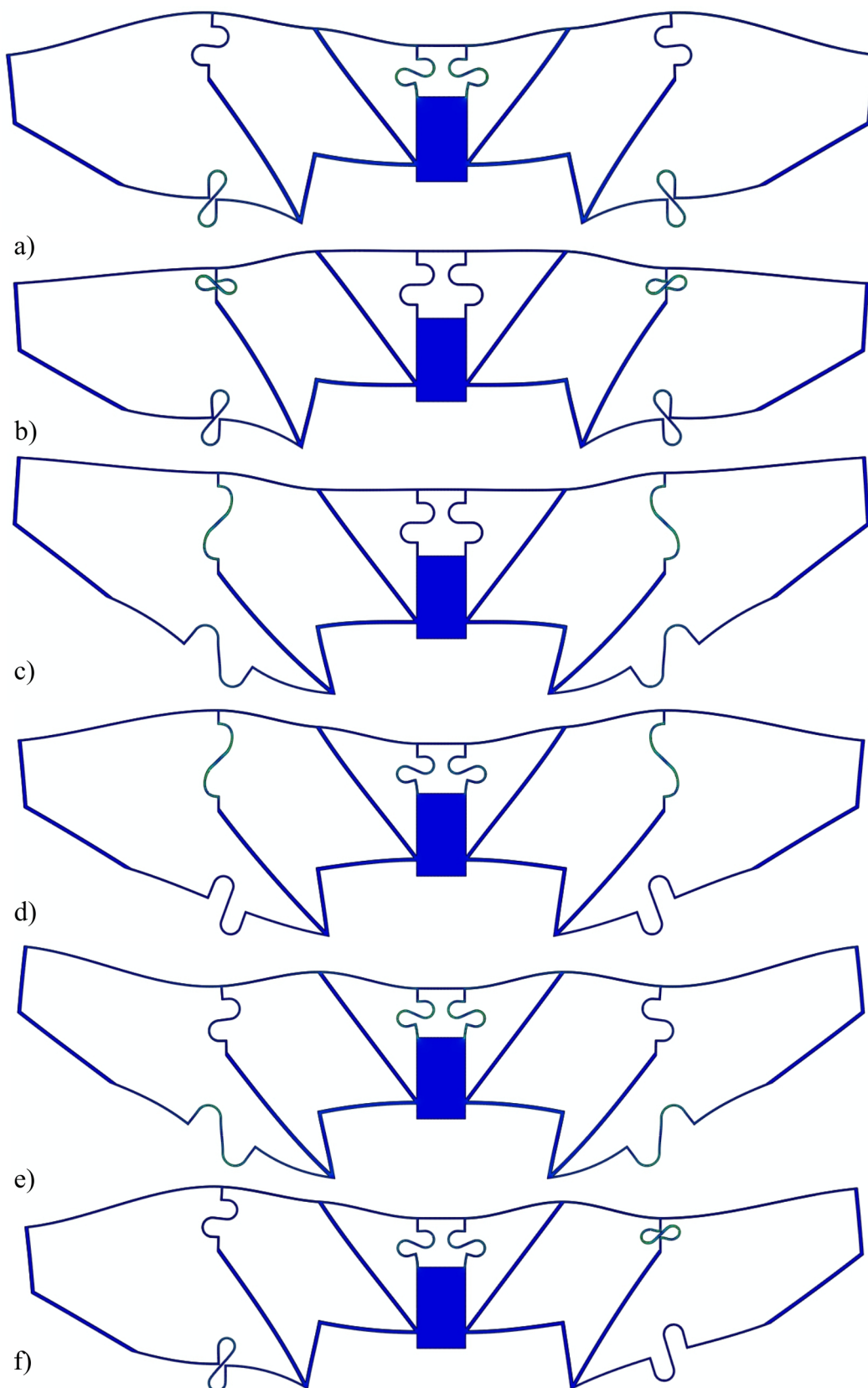
Korišćenjem razvijenog adaptivnog gipkog sistema može se realizovati i adaptivno krilo letilice, koje bi moglo promenom svoga oblika da se prilagodi promenljivim aerodinamičkim uslovima okoline kako bi realizovalo optimalan režim leta letilice [25-53]. Struktura krila je formirana spajanjem dva simetrično preslikana modela adaptivnog gipkog sistema oko njegove vertikalne ose tako da obrazuju monolitnu strukturu (slika 4.22.b). Kao što se može videti sa ove slike, dobijena struktura krila slična je profilu krila ptice (slika 4.22.a i slika 4.25.). Ovo nam pokazuje da je adaptivno krilo sa ugrađenim aktuatorima, razvijeno u ovoj disertaciji, inspirisano biološkim sistemima. Analiza rada adaptivnog krila sprovedena je primenom MKE, na isti način kao i u prethodnim slučajevima analize. Na slici 4.22. prikazani su rezultati analize ponašanja adaptivnog krila letilice pri korišćenju aktuatora koji se skupljaju, a na slici 4.23. pri korišćenju aktuatora koji se istežu [212]. Sa slike 4.22. i slike 4.23. može se videti da ovakvo krilo, sa ugrađenim aktuatorima, može da ostvari mnogo različitih oblika površine krila, odnosno da je ovakvo krilo adaptivno. Različitim kombinacijama aktivnih aktuatora (koji se skupljaju ili istežu) može se ostvariti širok opseg različitih oblika površine krila; neki od ovih oblika prikazani su na slici 4.24.



slika 4.22. Adaptivno krilo letilice sa ugrađenim aktuatorima koji se skupljaju, koje je slično profilu krila ptice (a) [224] i rezultati MKE analize (b) kada su aktivni aktuatori 1 i 1a (c), 2 i 2a (d), 3 i 3a (e) 1, 1a, 2, 2a, (f)

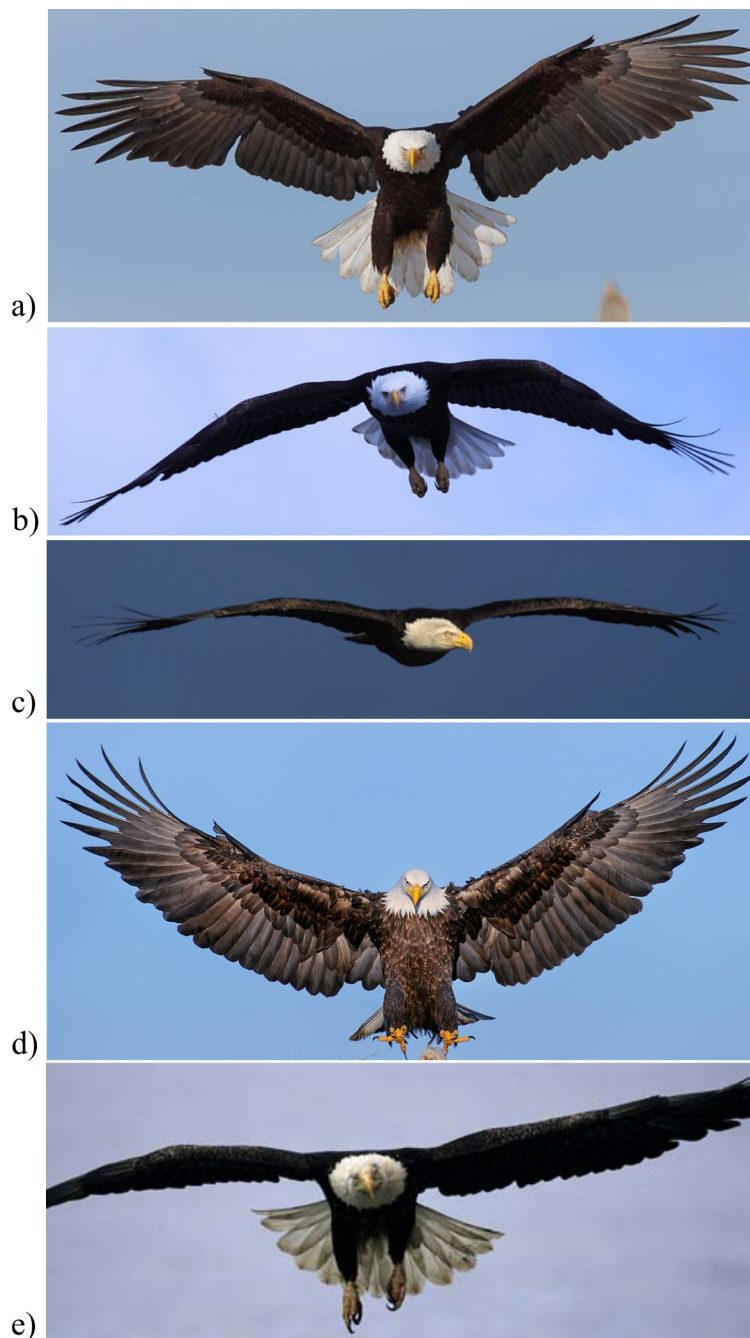


slika 4.23. Adaptivno krilo letilice sa ugrađenim aktuatorima koji se istežu (a) i rezultati MKE analize kada su aktivni aktuatori 1 i 1a (b), 2 i 2a (c), 3 i 3a (d), 1, 1a, 2, 2a (e), 1, 1a, 3, 3a (f) [212]



slika 4.24. Adaptivno krilo letilice sa ugrađenim aktuatorima koji se istežu i skupljaju i rezultati MKE analize kada se aktuatori 1 i 1a, 3, 3a skupljaju (a), 2, 2a, 3, 3a skupljaju (b), 2, 2a, 3, 3a istežu (c), 1, 1a skupljaju a 2, 2a istežu (d), 1, 1a skupljaju a 3, 3a istežu (e), 1, 1a, 2 i 3a skupljaju (f) [212]

Na slici 4.25., prikazani su različiti oblici krila koje ptica formira tokom njenog leta pri čemu možemo uočiti i odgovarajuću sličnost sa oblicima koje ostvaruje razvijeno adaptivno krilo letilice (npr. oblik krila sa slike 4.25.a [225] sličan je obliku koji ostvaruje adaptivno krilo letilice na slici 4.24.a, oblik na slici 4. 25.b [226] sličan je obliku na slici 4.24.b, oblik na slici 4.25.c [227] sličan je obliku na slici 4.22.e i slici 4.23.c, oblik na slici 4.25.d [228] sličan je obliku na slici 4.23.f, a oblik na slici 4.25.e [229] sličan je obliku na slici 4.24.f).



slika 4.25. Oblici krila koje ptica formira tokom njenog leta [225-229] i analogija sa oblikom: a) na slici 4.24.a; b) na slici 4.24.b; c) na slici 4.22.e i slici 4.23.c; d) na slici 4.23.f; e) na slici 4. 24.f

Kod adaptivnog krila letilice upravlja se sa šest izvršnih tačaka radne površine (postoji šest aktuatora u strukturi) pa je i broj oblika radne površine koje je moguće ostvariti mnogo veći; u disertaciji su prikazani samo neki od ovih oblika. Različite oblike radne površine moguće je osvariti ne samo aktivacijom parova aktuatora, kao što je to prikazano na slici 4.22. i slici 4.23., već i aktivacijom pojedinačnih aktuatora u strukturi; npr. moguće je koristiti kombinaciju aktivnih aktuatora 1, 1a, 2 i 3a (slika 4.22.b) kako bi se osvario odgovarajući oblik radne površine (slika 4.24.f). Na ovaj način moguće je ostvariti najrazličitije oblike radne površine. U disertaciji je predstavljen samo koncept adaptivnog krila letilice pa je potrebno sprovesti odgovarajuću analizu kako bi se utvrdilo koji bi od realizovanih oblika krila doprineo poboljšanju aerodinamičnosti samog krila odnosno kako se aerodinamičnost menja sa promenom oblika krila.

5. Aktuatori razvijenog adaptivnog gipkog sistema

U prethodnim poglavljima opisan je razvoj adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine, pri čemu su aktuatori modelirani u vidu tankih elastičnih opruga koje su ručno pogonjene kako bi se pokazala sposobnost gipkog sistema da ostvari više različitih oblika radne površine. Kako bi struktura mogla upravljivo da menja oblik radne površine, potrebno je ugraditi realne aktuatore koji bi bili pogodni za primenu kod gipkog sistema.

Kao što je već bilo reči u poglavlju 1, kod gipkog sistema su aktuatori ugrađeni u strukturu gipkog mehanizma kao jedna neodvojiva celina; aktuatori su deo strukture gipkog mehanizma (njegovi strukturni elementi) i deformišu se zajedno sa njim. Stoga su za primenu kod razvijenog adaptivnog gipkog sistema pogodni aktuatori koji imaju svojstvo strukturnih elemenata (aksijalnu i savojnu krutost). Klasični aktuatori (elektromotori, linearni elektromotori, hidraulični i pneumatski radni cilindri) su isuviše kruti i stoga nisu pogodni kao aktuatori gipkih sistema. Međutim, danas postoje mnogi novi principi akcije, novi materijali i napredne tehnologije koje nam omogućavaju projektovanje gipkih aktuatora odnosno aktuatora koji ispoljavaju svojstva strukturnih elemenata; kao što su veštački mišići [230-245], piezoelektrični aktuatori [246-249], gipki fluidni aktuatori [250-257], legure koje pamte oblik – SMA [258-269] i termo-mehanički aktuatori [270]. Ovakvi gipki aktuatori mogu imati istu krutost kao i sama gipka struktura u koju se ugrađuju. Postojeći, komercijalno dostupni aktuatori, napravljeni od novih materijala, naprednim tehnologijama izrade ili sa novim principa akcije, u mnogome nisu pogodni za primenu kod gipkih sistema jer imaju svoja ograničenja; samim tim nisu pogodni za aktuatore adaptivnog gipkog sistema razvijenog u ovoj disertaciji, jer realizuju mali hod, ostvaruju male pogonske sile, nisu upravljivi (imaju samo on/off upravljanje), a često zahtevaju i snažnije izvore napajanja. Upravo iz ovih razloga postoji potreba za razvojem novog tipa aktuatora koji bi bio pogodan za primenu kod razvijenog adaptivnog gipkog sistema.

Aktuatori koji bi bili pogodni za primenu kod razvijenog adaptivnog gipkog sistema odnosno za ugrađivanje u razvijenu adaptivnu gipku strukturu treba da zadovolje sledeće kriterijume:

- da poseduju izvesnu aksijalnu i savojnu gipkost,
- da realizuju radni hod u aksijalnom pravcu (skupljaju se ili istežu),
- mogu da ostvare hod od 20 mm (aktuatori 1 i 2 na slici 4.1.) i hod od 60 mm (aktuator 3 na slici 4.1.),
- ukupna dužina aktuatora 1 i 2 trebalo bi da iznosi 20 mm, a u slučaju aktuatora 3 - 60 mm,
- da su upravljivi (da mogu da ostvare diskretne vrednositi hoda u rasponu od 0 do 20 mm odn. od 0 do 60 mm),
- da su male težine (reda veličine 1 grama),
- da se mogu lako ugraditi u razvijenu adaptivnu gipku strukturu,
- da ne zahtevaju snažan izvor napajanja,
- da rade bešumno,
- relativno jednostavan postupak izrade,
- niska cena.

U ovom poglavlju dat je opis većine postojećih novih aktuatorskih tehnologija, njihovih prednosti i mana, a zatim je opisana vrsta materijala, tehnologija izrade i procedura koja je korišćena za razvoj novog tipa aktuatora. Data je detaljna analiza njihovog rada i opisane su njihove karakteristike, a na kraju je opisan i način na koji su ovi aktuatori ugrađeni u strukturu razvijenog adaptivnog gipkog sistema. Sva merenja, eksperimenti i analize realizovani su u Laboratoriji za Mehanizme na Tehničkom Univerzitetu u Ilmenau, Nemačka.

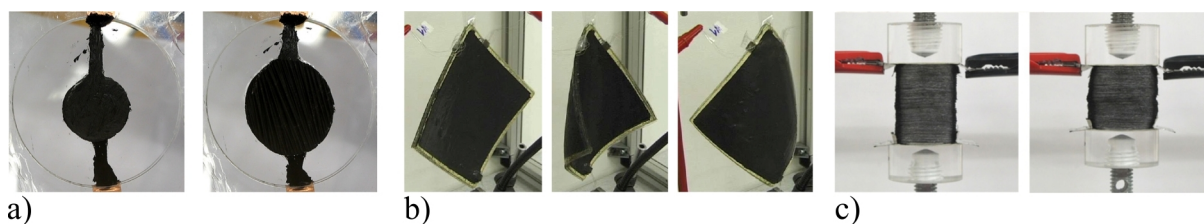
5.1. Pregled postojećih gipkih aktuatora

Za primenu kod gipkih sistema su pogodni aktuatori koji ispoljavaju svojstva strukturnih elemenata gipkog mehanizma odnosno karakteriše ih aksijalna i savojna krutost (gipkost). U takve aktuatore spadaju: elektroaktivni polimeri (engl. *Electroactive Polymers*) [230-245], piezoelektrični aktuatori [246-249], gipki fluidni aktuatori [250-257], legure koje pamte oblik - SMA (engl. *Shape Memory Alloys*) [258-269] i gipki termo-mehanički aktuatori [270].

5.1.1. Elektroaktivni polimeri

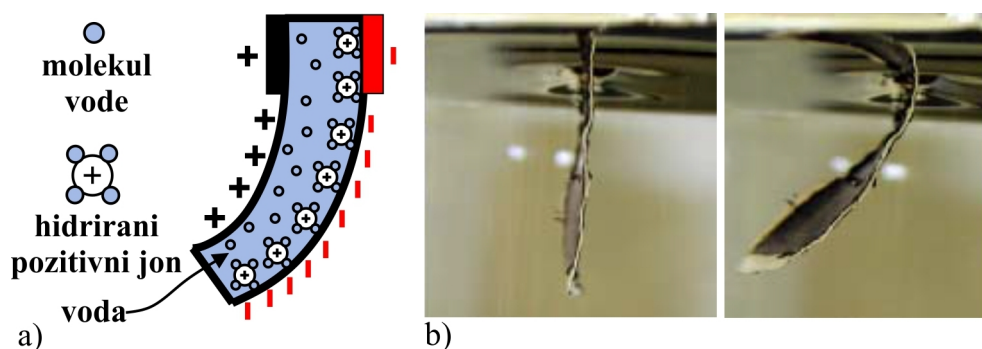
Elektroaktivni polimeri predstavljaju vrstu takozvanih "pametnih" materijala odnosno polimera koji menjaju svoju veličinu ili oblik kada se izlože dejstvu električnog polja (slika

5.1.). Ovakvi polimeri mogu da ostvare relativno velike deformacije i relativno velike sile pod dejstvom električnog polja [230-234]. Elektroaktivni polimeri se ponašaju kao mišići bioloških sistema i najčešće se koriste za razvoj aktuatora u vidu veštačkih mišića (slika 5.1.c); elektroaktivni polimeri se i sami često nazivaju veštačkim mišićima [230-234]. Aktuatore od elektroaktivnih polimera moguće je geometrijski oblikovati tako da se istežu, skupljaju ili savijaju (slika 5.1.). U zavisnosti od principa rada, osnovna podela elektroaktivnih polimera je na: **jonske** (engl. *Ionic*) [233-237] i **elektronske** (engl. *Electronic*) [238-245].



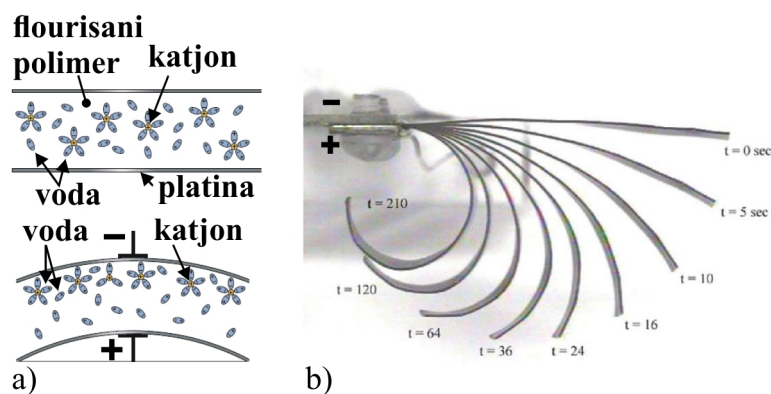
slika 5.1. Promena veličine i oblika elektroaktivnih polimera pri dejstvu električnog polja: a) promena veličine (površine) polimera [238]; b) savijanje polimera [239]; c) skupljanje polimera [240]

Jonski elektroaktivni polimeri realizuju pomeranje zahvaljujući kretanju odnosno difuziji jona ili molekula koje se javlja pod dejstvom primenjenog električnog polja (slika 5.2.). Postoji više vrsta jonskih elektroaktivnih polimera, pri čemu se svi sastoje od dve elektrode i odgovarajućeg elektrolita (slika 5.2.a). Primeri jonskih elektroaktivnih polimera su: provodni polimeri, jonski polimer gelovi, jonski polimer-metal kompozit, ugljenična nano-vlakna i elektoreološki fluidi [233, 234, 236]. Za aktivaciju jonskih elektroaktivnih polimera potreban je niski napon, svega 1-2 V, što predstavlja i njihovu glavnu prednost. Međutim, većina ovih polimera mora biti uronjena u odgovarajući elektrolit (slika 5.2.b), što znatno ograničava njihovu primenu. Pored ovoga, jonske elektroaktivne polimere je teško održati u deformisanom (aktivnom) stanju pod dejstvom napona jednosmerne struje (ovo se ne odnosi na provodne polimere i ugljenična nano-vlakna) [232]; jonski elektroaktivni polimeri mogu ostati u deformisanom stanju samo par sekundi. Dejstvo jonskih elektroaktivnih polimera je veoma sporo odnosno potrebno vreme za realizovanje pune deformacije ili sile je relativno dugo (slika 5.3.b), realizuju male pogonske sile, izrada ovakvih aktuatora nije jednostavna, pri čemu procedura izrade nije standardizovana, pa je veoma teško realizovati njihovu masovnu proizvodnju. Loša karakteristika ovakvih polimera je i da ukoliko se izlože dejstvu napona većeg od 1.23 V, dolazi do elektrolize [230].



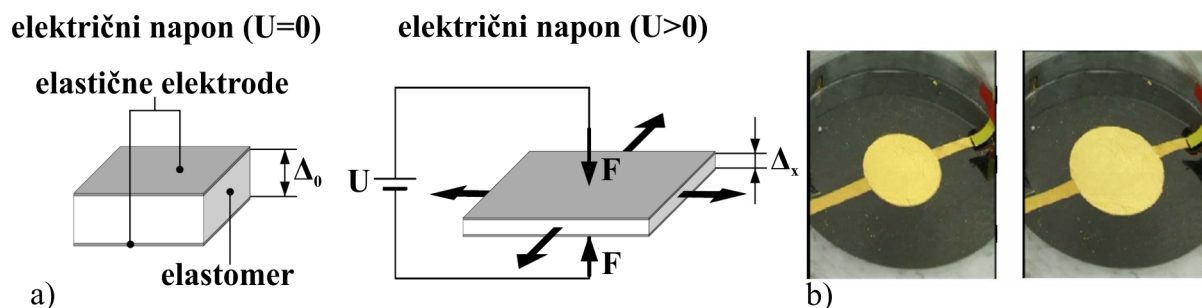
slika 5.2. Jonski elektroaktivni polimer: a) princip rada; b) jonski elektroaktivni polimer prikazan u nedeformisanom (na slici levo) i deformisanom položaju (na slici desno) [232]

Od jonskih polimera najveći potencijal za aktuatorsku primenu imaju jonski polimer-metal kompozit aktuatori tzv. IPMC aktuatori (engl. *Ionic Polymer Metal Composite*) [216, 233, 234-237], zato što mogu da rade i u suvoj i u tečnoj sredini (i u vazduhu i u vodi) (slika 5.3.). Ovaj aktuator čine dve metalne elektrode između kojih se nalazi sloj fluorisanog polimera obogaćenog jonskom provodnom tečnošću (slika 5.3.a) pa IPMC aktuatori i ne zahtevaju prisustvo elektrolita. Glavna prednost IPMC aktuatora je ta što mogu da ostvare velike deformacije (slika 5.3.b) pri čemu je za njihovu aktivaciju potreban niski napon (do 2 V). IPMC aktuatori, međjutim, realizuju male pogonske sile odnosno momente savijanja i, kao većinu jonskih elektroaktivnih polimera, nije ih moguće održati dugo u deformisanom (savijenom) položaju (pod dejstvom električnog napona), pri čemu je vremenski interval do dostizanja pune deformacije relativno dug (slika 5.3.b) [233]. Pored ovoga, IPMC aktuatori realizuju deformaciju savijanjem što dodatno ograničava njihovu primenu u gipkim sistemima jer ne realizuju željeni radni hod u pravcu ose aktuatora, pa je pri sintezi gipkih sistema potrebno opisati modelom aktuatora ovakvo njihovo ponašanje.



slika 5.3. IPMC aktuator: a) princip rada [235]; b) aktuator prikazan u deformisanom položaju nakon odgovarajućeg vremenskog intervala [233]

Drugu grupu elektroaktivnih polimera čine elektronski elektroaktivni polimeri koji realizuju pomeranje zahvaljujući kretanju elektrona nekog čvrstog materijala pod dejstvom električnog polja ili Kulonove sile (slika 5.4.). U elektronske elektroaktivne polimere spadaju elektrostriktivni, piezoelektrični i feroelektrični materijali kao i dielektrični elastomeri [230-233]. Za razliku od jonskih, elektronski elektroaktivni polimeri mogu da ostanu u deformisanom (aktivnom) položaju/stanju pod dejstvom napona jednosmerne struje, što predstavlja i njihovu glavnu prednost u odnosu na jonske polimere. Pored ovoga, oni mogu da rade u suvoj sredini odnosno ne zahtevaju prisustvo elektrolita. Takođe, mnogo brže realizuju radni hod odnosno mnogo brže dostižu svoju punu deformaciju i mogu da ostvare znatno veće pogonske sile u poređenju sa jonskim elektroaktivnim polimerima. Glavni nedostatak elektronskih elektroaktivnih polimera je taj što je za njihovu aktivaciju potreban veoma visok napon, reda veličine nekoliko kV odn. jačina električnog polja veća od $100 \text{ V}/\mu\text{m}$ [230-233]. Od elektronskih elektroaktivnih polimera, najveći potencijal za aktuatorsku primenu kod gipkih sistema imaju dielektrični elektroaktivni polimeri (engl. *Dielectric Electroactive Polymers - DEAP*) [241-245]. DEAP (slika 5.4.) predstavlja u stvari kondenzator koji se sastoji od tankog sloja (filma) elastomera (kao što su npr. akrilni film VHB 4910, 4905 ili silikonski film) postavljenog između dve elastične elektrode (od zlata ili ugljenika) pa se može reći da DEAP predstavlja elastični kondenzator (slika 5.4.a). Kada se između elektroda dovede električni napon jednosmerene struje (reda kV), između njih se javlja elektrostatička sila privlačenja koja ostvaruje pritisak na sloj elastomera. Usled dejstva pritiska odnosno elektrostatičke sile u pravcu debljine elastomera, dolazi do širenja nestišljivog elastomera u svim pravcima upravnim na pravac dejstva elektrostatičke sile. Kada se isključi električni napon odnosno kada se elektrode kratko spoje, usled elastičnosti samog elastomera kondenzator se vraća u svoj prvobitni položaj. Ovaj efekat širenja elastomera pri dejstvu električnog napona iskorišćen je za aktuciju.

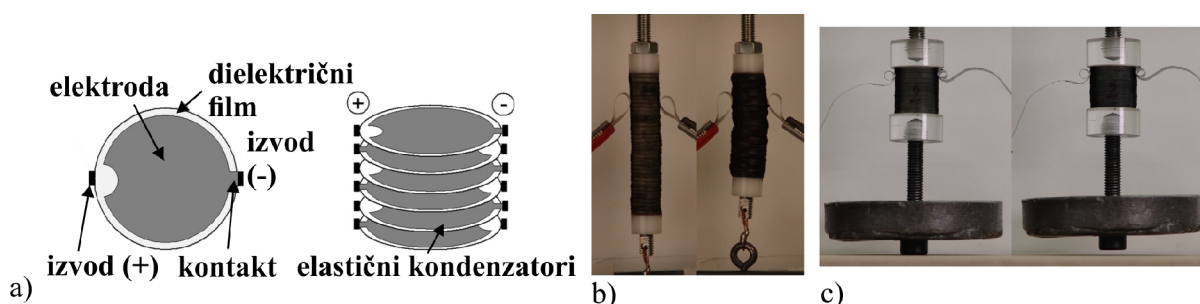


slika 5.4. Dielektrični elektroaktivni polimer: a) princip rada [243]; b) elektroaktivni polimer u neaktivnom (na slici levo) i aktivnom stanju (na slici desno) [241]

Primenom DEAP, razvijeni su različiti tipovi aktuatora [243], od kojih su za primenu u gipkim sistemima najpogodniji linearni aktuatori (slika 5.5. i slika 5.6.). Ovi aktuatori realizuju radni hod u aksijalnom pravcu (pravcu ose aktuatora) tako što se skupljaju (skraćuju) ili istežu, pa se mogu primeniti i kao aktuatori gipkih sistema. U zavisnosti od načina izrade, postoje dva tipa linearnih DEAP aktuatora: aktuatori dobijeni obavijanjem sloja DEAP oko sabijene opruge (realizuju istežanje, slika 5.5.) [242, 243] i aktuatori dobijeni slaganjem više slojeva elastičnih kondenzatora, jedan preko drugog (realizuju skupljanje, slika 5.6.) [240].



slika 5.5. Dielektrični elektroaktivni polimer aktuatori koji realizuju aksijalani radni hod na istežanje: a) izrada aktuatora [242]; b) DEAP aktuator prečnika 10 mm i dužine 150 mm, koji može da realizuje pogonske sile od 11 N i radni hod od 25 mm [242]; c) DEAP aktuator prečnika 12 mm i dužine 40.5 mm, koji može da realizuje pogonske sile od 5.5 N i radni hod od 2.7 mm [243]



slika 5.6. Dielektrični elektroaktivni polimer aktuatori koji realizuju aksijalani radni hod na skupljanje: a) formiranje aktuatora; b) DEAP aktuator prečnika 14 mm i dužine 70 mm, koji može da realizuje radni hod od 21 mm (u neopterećenom stanju); c) DEAP aktuator prečnika 20 mm i dužine 21 mm, koji može da realizuje podizanje tereta težine do 1 kg, pri čemu realizuje radni hod od 2 mm [240]

Linearni DEAP aktuatori realizuju relativno velike pogonske sile (do 20 N), ali ostvaruju mala pogonska pomeranja odnosno mali radni hod (pri pogonskoj sili od 20 N, radni hod aktuatora je svega 2.5 mm) [240]. Veličina radnog hoda DEAP aktuatora u velikoj meri

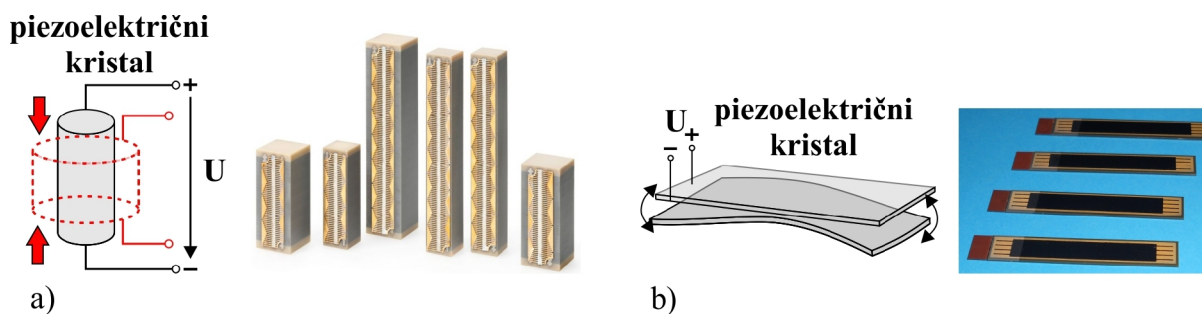
zavisi od dužine aktuatora pa je za realizovanje velikog radnog hoda potrebna i velika dužina aktuatora; u zavisnosti od konstrukcije aktuatora, radni hod se kreće u granicama od 10%-35% od ukupne dužine aktuatora [240]. Pored ovoga, za aktivaciju aktuatora potreban je veliki električni napon, reda kV (za realizovanje radnog hoda koji iznosi 35% od ukupne dužine aktuatora, potreban je napon od 4.2 kV) [240], što dodatno ograničava njihovu primenu u gipkim sistemima jer nije moguće ostvariti visoku integraciju aktuatora i sistem bi zahtevao velike uređaje za napajanje.

U poređenju sa jonskim EAP, elektronski EAP imaju veći potencijal za aktuatorске primene kod gipkih sistema. Jonski elektroaktivni polimeri, i pored toga što za aktivaciju zahtevaju veoma mali napon, nisu robusni, nisu skalabilni, osetljivi su na kontaminaciju i zahtevaju da budu zaštićeni kako bi radili efikasno. Pored ovoga, obe grupe aktuatora (i jonski i električni EAP) imaju ograničeni vek trajanja (mogu da realizuju samo određeni broj ciklusa) pa bi i gipki sistem sa ovakvim aktuatorima imao ograničeni radni vek. Takođe, ovi aktuatori nisu upravljivi (imaju samo on/off upravljanje) i mogu da realizuju samo jednu vrednost hoda aktuatora; ostaju u deformisanom položaju samo pri realizaciji punog radnog hoda. Potrebno je napomenuti i da većina postojećih aktuatora napavljenih od elektroaktivnih polimera, koji bi mogli da se primene kao aktuatori gipkih sistema, nisu komercijalno dostupni - još su u fazi razvoja.

5.1.2. Piezoelektrični aktuatori

Piezoelektrični aktuatori predstavljaju aktuatore koji se sastoje od piezoelektričnog materijala (kristala) koji se pod dejstvom električnog napona deformiše (isteže ili skuplja u zavisnosti od polariteta) (slika 5.7.) [234]. Piezoelektrični materijali ne zatevaju visoki električni napon za aktivaciju (do 230 V). Međutim, njih karakteriše izuzetno malo pomeranje odnosno mala deformacija (pod dejstvom električnog napona), svega 0.1 % od ukupne dužine piezoelektričnog kristala (za ostvarivanje pomeranja od 1 mm, dužina piezoelektričnog materijala treba da iznosi 1 m). Upravo zbog ovoga, piezoelektrični aktuatori nisu pogodni za primene kod kojih je potrebno ostvariti znatno veća pomeranja. Neznatno veća pomeranja, sa manjom dužinom aktuatora, moguće je ostvariti ukoliko se koristi više slojeva piezoelektričnog materijala, poređanih redno (jedan iznad drugog). Piezoelektrični aktuatori mogu da realizuju radni hod u aksijalnom pravcu pa se mogu koristiti kao linearni aktuatori koji se istežu/skupljaju (slika 5.7.a) ili mogu da realizuju radni

hod oko ose koja je upravna na ravan deformacije aktuatora čime bi realizovali savijanje (slika 5.7.b).



slika 5.7. Piezoelektrični aktuatori: a) piezoelektrični aktuatori koji realizuju linearni radni hod [246]; b) piezoelektrični aktuatori koji realizuju savijanje [247]

Linearni piezoelektrični aktuatori realizuju velike pogonske sile (1 - 10 kN), međutim kao i svi piezoelektrični materijali, realizuju izuzetno mala pogonska pomeranja (10 - 100 μm) [234]. Pored ovoga, linearni piezoelektrični aktuatori su isuviše kruti odnosno imaju relativno veliku savojnu krutost pa nisu pogodni za aktuatorске primene kod gipkih sistema. Piezoelektrični aktuatori koji realizuju savijanje mogu da ostvare veća pogonska pomeranja (100 – 1000 μm), međutim, realizuju male pogonske sile (0.1 – 2 N) [248]. Ovi aktuatori imaju takođe veliku savojnu krutost, pri čemu je smanjenjem debljine aktuatora moguće postići znatno manju krutost aktuatora (slika 5.8.) i veća pomeranja (reda nekoliko milimetara); u ovom slučaju, međutim, znatno opada i pogonska sila koju aktuator realizuje. Pri projektovanju gipkog sistema sa piezoelektričnim aktuatorima koji realizuju pogonsko kretanje u vidu savijanja, potrebno je modelom aktuatora uzeti u obzir ovakvo ponašanje aktuatora. Velika pažnja je posvećena razvoju različitih piezoelektričnih aktuatora, pri čemu su oni i komercijalno dostupni. Međutim, u pogledu primene u gipkim sistemima, najveća ograničenja piezoelektričnih aktuatora su njihova velika krutost i mala pogonska pomeranja.



slika 5.8. Piezoelektrični aktuatori, male debljine, koji realizuju savijanje [249]

5.1.3. Gipki fluidni aktuatori

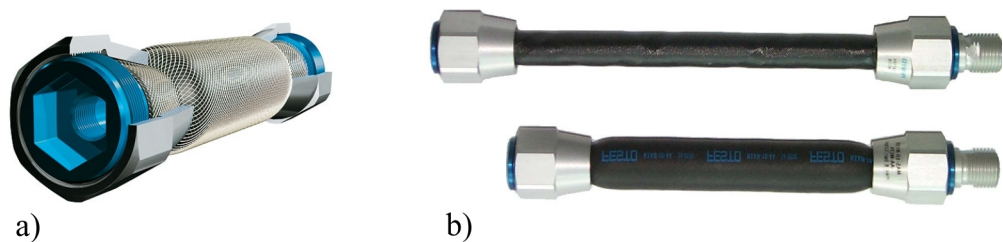
Gipki fluidni aktuatori realizuju kretanje zahvaljujući širenju/ekspanziji fluida pod pritiskom unutar neke zatvorene elastične strukture koja uokviruje određeni prostor (slika 2.38., slika 5.9., slika 5.10. i slika 5.11.). Kao radni fluid najčešće se koristi vazduh pod pritiskom (komprimovani vazduh). U zavisnosti od oblika zatvorene elastične strukture zavisi i način na koji aktuator realizuje radni hod.



slika 5.9. Gipki fluidni aktuatori koji realizuju radni hod u aksijalnom pravcu (a) [250, 251] i aktuator koji realizuje radni hod u vidu savijanja (b) [252]

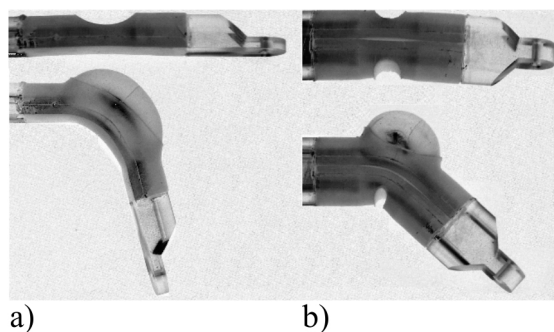
Generalno uzevši, gipki fluidni aktuatori mogu se podeliti na aktuatore koji realizuju radni hod u aksijalnom pravcu - linearni aktuatori [234, 250, 253, 254], (slika 5.9.a i slika 5.10.) i na aktuatore koji realizuju radni hod u vidu savijanja (slika 5.9.b i slika 5.11.) [74, 76, 77, 81, 82, 255].

Danas postoje različiti tipovi i rešenja gipkih fluidnih aktuatora [93, 234], od kojih ćemo ovde opisati samo dva primera aktuatora. Na slici 5.10. je prikazan fluidni aktuator firme FESTO, koji realizuje skupljanje aktuatora. Aktuator je razvijen u vidu šupljeg cilindra koji se sastoji od odgovarajućeg elastomera u kome su integrisana vlakna od aramdida (slika 5.10.a). Kada se aktuator ispuni vazduhom, dolazi do njegovog širenja u radijalnom pravcu (povećava se njegov prečnik), a samim tim i skupljanja u aksijalnom pravcu (pravcu dužine aktuatora) (slika 5.10.b). Kako ovaj aktuator imitira rad mišića bioloških sistema, to se on često naziva i bionički mišić (engl. *bionic muscle*). Ovi aktuatori mogu da realizuju velike pogonske sile (0 - 6 kN), pri čemu se dimenzije komercijalno dostupnih aktuatora kreću u sledećim granicama: dužina 40 - 9000 mm, prečnik 10 - 40 mm [256]. Mana ovih aktuatora je ta što realizuju veličinu hoda koja iznosi maksimalno 25% od ukupne dužine aktuatora.



slika 5.10. Gipki fluidni aktuator firme FESTO: a) konstrukcija aktuatora [257]; b) aktuator prikazan u neaktivnom (na slici gore) i aktivnom stanju (na slici dole) [254]

Na slici 5.11. prikazan je fluidni aktuator koji realizuje savijanje [93, 294]. Ovakav aktuator predstavlja u stvari homogenu šuplju strukturu sa lokalno uklonjenim materijalom (unesena je geometrijska asimetrija u strukturu) [93, 294]. Usled povećanja pritiska u unutrašnjosti aktuatora dolazi do deformacije strukture; asimetričan oblik aktuatora (udubljenje) uslovljava da se usled unutrašnjeg pritisknog opterećenja struktura deformiše (savija) oko tog udubljenja [93, 294].



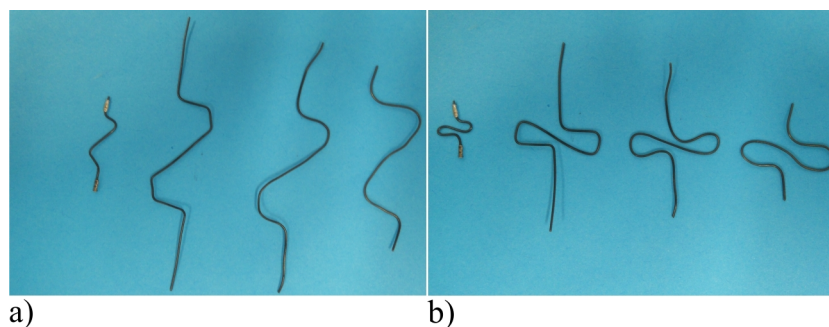
slika 5.11. Gipki fluidni aktuator koji realizuje savijanje prikazan u nedeformisanom položaju (na slici gore) i deformisanom položaju (na slici dole): a) fluidni aktuator koji može da realizuje savijanje u jednom smeru; b) fluidni aktuator koji može da realizuje savijanje u dva smera [294]

Ukoliko bi se gipki fluidni aktuatori koristili u gipkim sistemima, potrebno je uzeti u obzir i odgovarajuća ograničenja ovih aktuatora. Kako fluidni aktuatori koriste komprimovani vazduh, oni zahtevaju i relativno velike kompresorske stanice (nije moguće ostvariti visoko integrisani sistem), a takođe zahtevaju i odgovarajuće priključke za dovod i odvod vazduha što bi dodatno povećalo krutost sistema na mestu spoja aktuatora i gipke strukture, a smanjilo bi i stepen integrisanosti sistema. Nedostatak je i što su dimenzije aktuatora relativno velike u odnosu na veličinu hoda koji realizuju. Pored ovoga, većina fluidnih aktuatora ima veoma malu krutost u neaktivnom stanju pa je prilikom ugradnje aktuatora u gipku strukturu potrebno prednapregnuti aktuatore; kako bi aktuator ostao u

ovakvom stanju, potrebno je i da gipka struktura bude dovoljno kruta - potrebno je optimizacijom dobiti takav gipki sistem koji bi imao dovoljnu krutost da održi aktuator u prednapregnutom stanju.

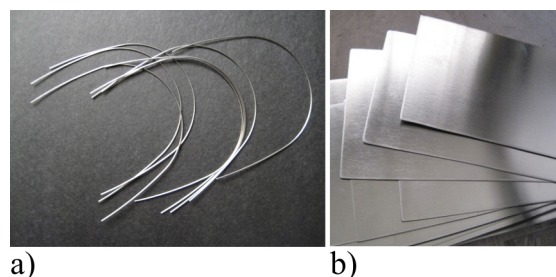
5.1.4. Legure koje pamte oblik

Legure koje pamte oblik (slika 5.12.) predstavljaju posebnu vrstu materijala (legure metala) koji ispoljava svojstvo vraćanja u svoj prethodno "zapamćeni" oblik, kada se izloži dejstvu toplote (kada se zagreje do određene temperature) [234, 258-266]. Ukoliko se takav materijal deformiše tako da zauzme oblik koji je različit od prethodno zapamćenog oblika (slika 5.12.a), legura se usled zagrevanja vraća u svoj početni (zapamćeni) oblik (slika 5.12.b). Proces vraćanja legure u zapamćeni oblik može se iskoristiti za aktuciju.



slika 5.12. Legure koje pamte oblik: a) legura u vidu žice prikazana u deformisanom stanju; b) vraćanje legure u početni (zapamćeni) oblik usled zagrevanja

Legure koje pamte oblik komercijalno su dostupne u vidu žice (prečnik žice se kreće u opsegu od 0.025 mm do 8 mm) [267] i u vidu lima (debjine od 0.1 mm do 0.35 mm) (slika 5.13.) [267]. Ove legure danas imaju veoma široku primenu u industriji automobila, avio industriji, medicini i biomedicini [30-32, 42, 51, 259].



slika 5.13. Komercijalno dostupne legure koje pamte oblik, izvedene u vidu žice (a) [268] i u vidu lima (b) [269]

Od legura koje pamte oblik, a koje su izvedene u vidu žice, moguće je formirati različite oblike aktuatora. Aktuatori u vidu žice od legura koje pamte oblik (slika 5.12. i slika 5.13.a) realizuju zadovoljavajuće pogonske sile (veličina sile zavisi od prečnika žice), ne zahtevaju visoke temperature za aktivaciju (od 20°C do 90°C), laki su, mogu realizovati i do milion radnih ciklusa (vraćanja u zapamćeni oblik), upravljivi su, moguće je formirati aktuatore koji imaju i aksijanu i savojnu krutost (gipkost), i za razliku od prethodno opisanih aktuatora rade bešumno. Najveća prednost ovih aktuatora je ta što hod aktuatora ne zavisi od prečnika ili dužine žice već od formiranog oblika aktuatora; moguće je tako formirati aktuator da se sa relativno malom aktivnom dužinom aktuatora postiže relativno veliki radni hod, i do 90% od aktivne dužine aktuatora (slika 5.12.). Upravo zbog ovoga, ovakvi aktuatori su i veoma kompaktni. Takođe, zagrevanje aktuatora/žice moguće je postići i strujom, pri čemu je potreban nizak električni napon (1.5 - 5 V), što znači da ih je moguće aktivirati i baterijom. Pored ovoga, žice od legura koje pamte oblik su komercijalno dostupne, pri čemu je njihova cena relativno niska. Zbog svojih mnogobrojnih prednosti, aktuatori u vidu žice od legura koje pamte oblik imaju najvećeg potencijala za aktuatorске primene kod gipkih sistema.

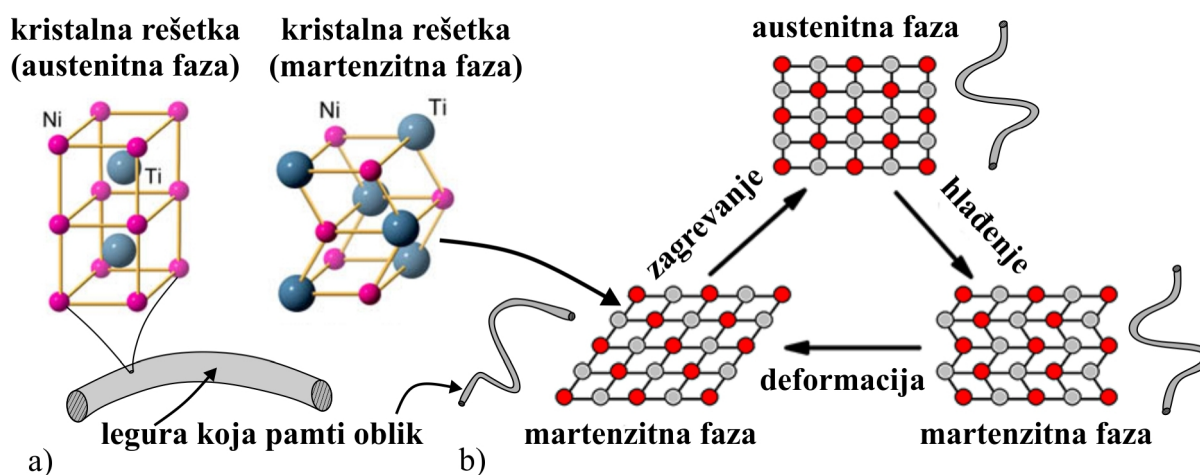
Od prethodno opisanih aktuatora, jonski elektroaktivni polimeri (slika 5.2.), piezoelektrični (slika 5.7.b) i gipki fluidni aktuatori (slika 5.9.b) koji realizuju savijanje ne mogu se primeniti kao aktuatori razvijenog gipkog sistema jer su potrebni aktuatori koji ostvaruju radni hod u aksijalnom pravcu. Dielektrični elektroaktivni polimeri (slika 5.5. i slika 5.6.) ne bi bili pogodni ni stoga što, ako bi se ugradio aktuator dužine 20 mm (aktuator 1 i 2) odnosno dužine 60 mm (aktuator 3) realizovani hod aktuatora bi bio relativno mali pa bi i veličina pomeranja izvršnih tačaka bila mala; ovi aktuatori zahtevaju i snažnije izvore napajanja, reda kV. Slično je i sa piezoelektričnim (slika 5.7.a) i gipkim fluidnim aktuatorima (slika 5.10.) koji realizuju linearni radni hod - veličina hoda aktuatora je mala u poređenju sa njihovom dužinom, a u slučaju fluidnog aktuatora potrebna je i kompresorska stanica dok su piezoelektrični aktuatori kruti. Primenom žica od legura koje pamte oblik moguće je formirati aktuatore koji bi zadovoljili većinu prethodno opisanih kriterijuma. Ovakve aktuatore je moguće veoma lako ugraditi u gipku strukturu zbog njihove kompaktnosti. Kako je za njihovu aktivaciju potreban nizak napon, moguće je ostvariti visoko integrisani sistem koji bi bio nezavisan od spoljašnjih izvora napajanja (od velikih stanica za napajanje). Pored ovoga, ovi aktuatori mogu da realizuju veliki radni hod pa samim tim mogu i da realizuju velika pomeranja izvršnih tačaka radne površine gipkog sistema. U disertaciji je razvijen novi tip aktuatora primenom legura koje pamte oblik, koji najpribližnije realizuje gore postavljene

zahteve odnosno sa kojima razvijena adaptivna gipka struktura najbolje realizuje zahteve postavljene zadatkom sinteze (najveće pomeranje izvršnih tačaka radne površine).

5.2. Razvoj aktuatora od legure koja pamti oblik

Legure koje pamte oblik predstavljaju legure dva ili više metala, kao što su npr. legure: Fe-Mn-Si, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni i Ni-Ti. Ukoliko se ovakva legura metala deformiše (savije), dolazi do njene plastične deformacije, pri čemu ona ostaje u deformisanom položaju (slika 5.12.a). Pri zagrevanju, usled dejstva toplote, legura se vraća u svoj prvobitan položaj odnosno u oblik koji je imala pre deformacije (slika 5.12.b), pa se može reći da legure koje pamte oblik konvertuju toplotnu energiju u mehaničku energiju. Ovaj efekat vraćanja u početni oblik/položaj naziva se "pamćenje oblika".

Kako legure koje pamte oblik predstavljaju u stvari metal, atomi ovih legura formiraju kristalnu rešetku (slika 5.14.a). Pri deformaciji legure dolazi i do pojave unutrašnjeg napona u kristalnoj rešetki i do dislokacije atoma u kristalnoj rešetki (slika 5.14.b). Usled zagrevanja (iznad određene temperature koja se naziva temperatura transformacije i čija vrednost zavisi od odnosa komponenti koje formiraju leguru), toplotna energija dovodi do preraspodele atoma unutar kristalne rešetke tako da oni zauzimaju pravilan raspored u prostoru, što prouzrokuje i vraćanje legure u početni oblik (slika 5.14.).



slika 5.14. Struktura legura koje pamte oblik (a) [271] i njihov princip rada (b) [272]

Kod legura koje pamte oblik unutrašnja struktura materijala (kristalografska struktura), u zavisnosti od temperature, ima dve različite kristalografske forme; atomi kristalne rešetke se

usled zagrevanja preuređuju na reverzibilan način. Proces promene iz jedne forme u drugu naziva se fazna promenu u čvrstom stanju, pri čemu su ove faze poznate kao martenzitna faza i austenitna faza (slika 5.14.). Pri nižim temperaturama (npr. na sobnoj temperaturi) legura se nalazi u martenzitnoj fazi i moguće je leguru veoma lako deformisati (kristalna rešetka materijala je kao na slici 5.14.b). Pri zagrevanju iznad temperature transformacije, legura prelazi u austenitnu fazu (vraća se u svoj zapamćeni oblik) odnosno atomi unutar kristalne rešetke zauzimaju položaj sličan kao kod čvrstih materijala (slika 5.14.b), pa je i leguru teže deformisati. Nakon hlađenja, legura prelazi iz austenitne u martenzitnu fazu, pri čemu i ostaje u istom položaju i leguru je opet moguće lako deformisati.

Da bi legure zapamtile odgovarajući oblik, potrebno je zagrejati leguru do temperature koja je viša od temperature transformacije - faza visoke temperature (faza kaljenja) [234]. Pri zagrevanju do temperatura većih od 500°C, atomi kristalne rešetke se tako preraspoređuju da "zapamte" svoje trenutno stanje. Ovde je potrebno voditi računa da se ne pređe tačka topljenja koja se, u zavisnosti od vrste legure, kreće u granicama od 1240°C do 1310°C.

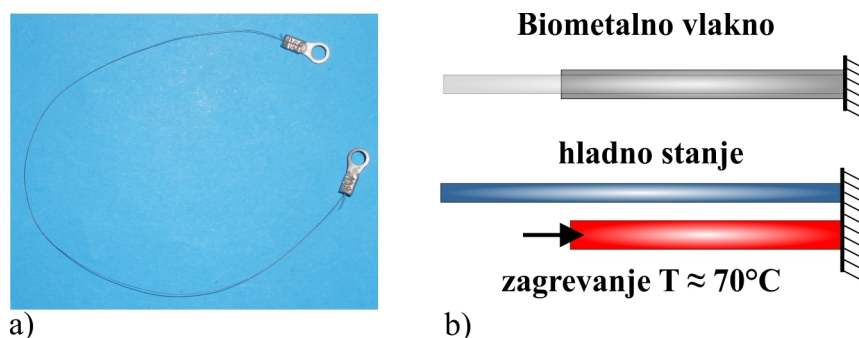
Kao što je već napomenuto legure koje pamte oblik, komercijalno su dostupne u vidu žice ili lima; za razvoj aktuatora adaptivnog gipkog sistema razvijenog u ovoj disertaciji biće korišćene legure u obliku žice. Komercijalno su dostupna tri različita tipa žica od legura koje pamte oblik:

- biometalno vlakno – BMV (engl. *BioMetal Fiber - BMF*) [273-275],
- Flexinol® [262, 276-278] i
- NiTi (nikl-titanijum) žica, koja se još naziva i nitinol [234, 258-260, 263-266].

U narednim odeljcima biće detaljnije objašnjen princip rada i karakteristike ovih žica.

5.2.1. Biometalno vlakno - BMV

Biometalno vlakno (BMV) [273-275] predstavlja leguru koja ima takav zapamćeni oblik da žica usled zagrevanja realizuje skupljanje (skraćivanje) u aksijalnom pravcu (pravcu dužine žice) (slika 5.15.). Ove žice realizuju kretanje koje je slično ponašanju vlakana bioloških mišića pa zbog toga i nose naziv biometalno vlakno [273]. Skupljanje BMV, pri zagrevanju, može se iskoristiti za aktuciju pa se ove žice često nazivaju i aktuatorima u vidu vlakana (engl. *fiber-like actuators*).

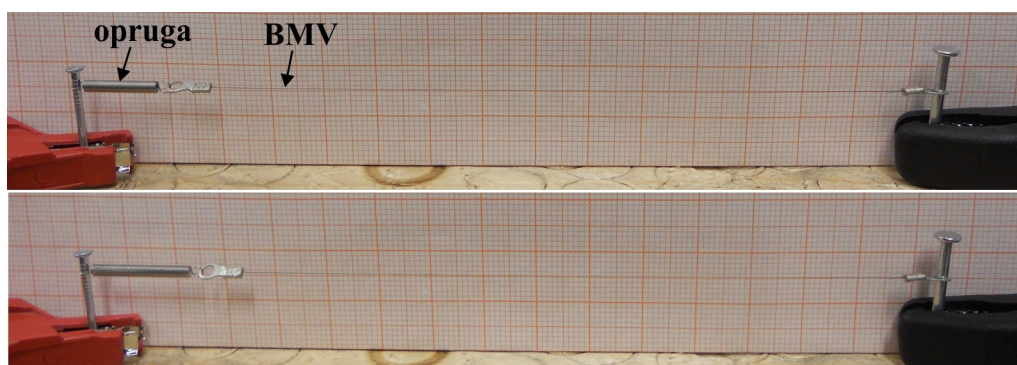


slika 5.15. a) Biometalno vlakno; b) princip rada biometalnog vlakna

BMV vlakna u neaktivnom stanju imaju veoma malu krutost da bi se pri zagrevanju (temperaturom od približno 70°C) vlakna vratila u svoj zapamćeni oblik i postala znatno kruća (ima znatno veću krutost u aksijalnom pravcu odnosno postaje zategnuta). Nakon hlađenja, žica se opušta i ne vraća se u položaj koji je imala pre zagrevanja, pa je potrebno primeniti odgovarajuću spoljašnju silu koja bi realizovala istežanje žice do njenog početnog položaja. Da bi se realizovao aktuator koji ostvaruje linijski radni hod u aksijalnom pravcu, potrebno je prilikom ugradnje prednapregnuti BMV vlakna, pri čemu je za realizovanje povratnog radnog hoda odnosno vraćanja u početni položaj potrebno primeniti neku spoljašnju silu; ovo se najčešće postiže primenom cilindrične zavojne opruge odgovarajuće krutosti.

BMV vlakna karakteriše: izuzetno mala težina, bešuman rad, dugi radni vek, relativno niska cena, zagrevanje je moguće postići električnom strujom niskog napona. BMV vlakna, međutim, imaju izuzetno mali prečnik (u granicama od 0.05 mm do 0.15 mm) pa realizuju i male pogonske sile (najviše do 1.4 N); pored ovoga, realizuju radni hod koji iznosi svega 4% od ukupne dužine žice (npr. ukupan hod/skupljanje za dužinu žice od 20 mm iznosi svega 0.8 mm) [273]. I pored ovih ograničenja, kako bi se proverila mogućnost primene BMV kao aktuatora razvijenog adaptivnog gipkog sistema, u disertaciji je ispitano ponašanje komercijalno dostupnog biometalnog vlakna prečnika 0.15 mm (najveći prečnik žice koja se komercijalno može naći) koje može da realizuje pogonsku silu od 1.4 N [273]. Na slici 5.16. prikazano je BMV čiji je jedan kraj nepokretan (fiskiran) dok je za drugi kraj vezana odgovarajuća cilindrična zavojna opruga. Nakon zagrevanja električnom strujom, BMV realizuje skraćivanje u aksijalnom pravcu, dok nakon hlađenja sila opruge postaje veća od pogonske sile BMV i realizuje istežanje žice do njenog početnog položaja. Kao što se može videti sa slike 5.16., za realizovanje hoda aktuatora reda veličine nekoliko milimetara, potrebna je velika dužina biometalnog vlakna; biometalno vlakno prikazano na slici 5.16. je

dužine 125 mm i realizuje hod od 5 mm. Upravo zbog ovoga i prethodno opisanih ograničenja, BMV vlakna nisu pogodna za aktuatorsku primenu kod razvijenog adaptivnog gipkog sistema; ukoliko bi se koristili ovakvi aktuatori, veličina pomeranja izvršnih tačaka radne površine bila bi veoma mala. Ovakvi aktuatori bi možda bili pogodni za primenu u mikromehatroničkim sistemima odnosno za razvoj gipkog sistema u μm -oblasti. Pored ovoga, BMV vlakno nije moguće formirati tako da zapamti neki određeni oblik odnosno nije moguće realizovati aktuator koji bi imao veći radni hod.



slika 5.16. Biometalno vlakno (BMV) prikazano u neaktivnom (na slici gore) i aktivnom stanju (na slici dole)

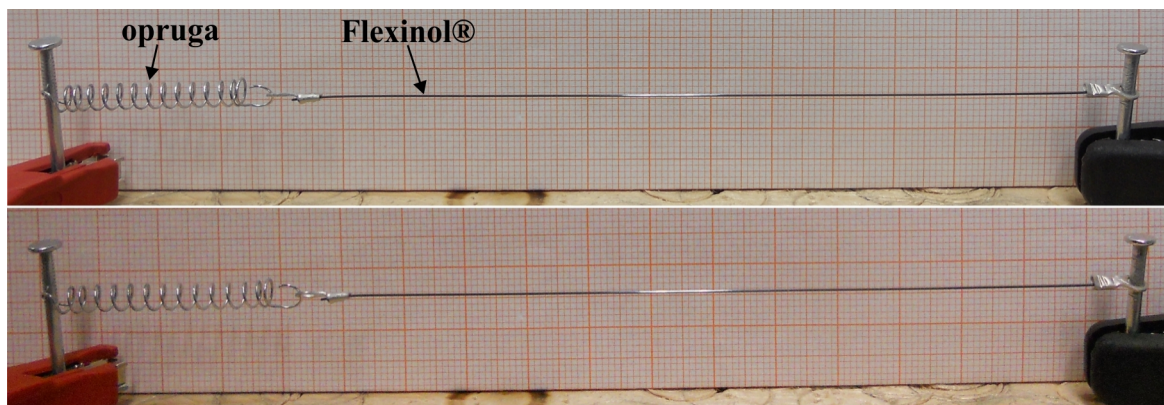
5.2.2. Flexinol® žica

Flexinol® žica [262, 276-278] je slična biometalnom vlaknu. Flexinol® predstavlja takođe leguru koja pamti oblik, pri čemu ova žica pri zagrevanju realizuje skupljanje (skraćivanje) u aksijalnom pravcu (slika 5.17.). Flexinol® žica se zbog svog ponašanja koje je slično mišićima bioloških sistema i sama često naziva veštački mišić odnosno aktuator u vidu mišića. Pri zagrevanju Flexinol® žice iznad prelazne temperature (iznad 70°C ili 90°C , zavisno od tipa žice) [276], dolazi do skupljanja (skraćivanja) žice, pri čemu nakon hlađenja ona ostaje u ovom skupljenom položaju. Za realizovanje aktuatora od Flexinol® žice, koji bi realizovao pravolinijski radni hod, potrebno je žicu prednapregnuti (kao i u slučaju BMV) i držati u ovom stanju, pri čemu je za vraćanje žice u položaj koji je imala pre zagrevanja potrebno primeniti odgovarajuću spoljašnju silu (najčešće primenom opruge odgovarajuće krutosti).

Za razliku od BMV, Flexinol® žice mogu da realizuju znatno veće pogonske sile, u opsegu od 0.08 N do 35 N (u zavisnosti od prečnika žice koji može biti od 0.025 mm do 0.5

mm). One takođe rade bešumno, pri čemu je zagrevanje žica moguće postići i električnom strujom (električnim naponom reda veličine do 3 V). Međutim, Flexinol® realizuje izuzetno mali radni hod, svega 4% od ukupne dužine žice, što predstavlja i njihov glavni nedostatak [276].

Kako bi se proverila mogućnost primene ovih žica za aktuatorске primene kod razvijenog gipkog sistema, u disertaciji je ispitano ponašanje komercijalno dostupne Flexinol® žice prečnika 0.375 mm koja može da realizuje pogonske sile od 20 N, pri čemu je aktivaciona (prelazna) temperatura 70°C. Slično kao i u slučaju BMV, jedan kraj žice je vezan za nepokretni oslonac, dok je na drugom kraju vezana opruga odgovarajuće krutosti, a zagrevanje žice je realizovano električnom strujom (slika 5.17.). Na slici 5.17. prikazana je Flexinol® žica dužine 125 mm koja pri aktivaciji realizuje hod od 4.8 mm.



slika 5.17. Flexinol® žica prikazana u neaktivnom (na slici gore) i aktivnom stanju (na slici dole)

Može se zaključiti da ova žica ne bi bila pogodna za aktuatorsku primenu kod razvijenog adaptivnog gipkog sistema jer za dužinu žice od 20 mm (ukoliko bi se ova žica primenila kao aktuator 1 ili 2) realizovani hod bi iznosio svega 0.8 mm, dok za dužinu žice od 60 mm (ako bi je primenili kao aktuator 3) realizovani hod bi iznosio 2.4 mm. Takođe, krutost razvijenog gipkog sistema nije dovoljno velika da može da realizuje silu koja bi vraćala Flexinol® žicu u početni položaj (položaj koji je imala pre zagrevanja), dok bi primena opruge za vraćanje znatno usložila razvijeni sistem. Ukoliko bi se želele koristiti ove žice kao aktuatori, potrebno je razviti gipki sistem koji bi imao dovoljno veliku krutost odnosno silu da nakon skupljanja žice (nakon prestanka zagrevanja) realizuje njeno istežanje i vraćanje u položaj koji je imala pre zagrevanja. Pored ovoga, Flexinol® žicu (isto kao i BMV) nije moguće formirati tako da zapamti neki željeni oblik/položaj već se može koristiti samo fabrički zapamćeni položaj. Ovo znači da primenom Flexinol® žice nije moguće razviti aktuator koji bi sa malom

aktivnom dužinom realizovao relativno veliki radni hod jer veličina skupljanja (skraćivanja) aktuatora u ovom slučaju zavisi od dužine žice.

5.2.3. Nitinol žica (NiTi)

Za razliku od biometalnog vlakna i Flexinol® žice, NiTi žicu odnosno nitinol moguće je oblikovati odn. formirati tako da zapamti najrazličitije oblike (položaje) (slika 5.12.) [234, 258-260, 263-266], što predstavlja i njenu glavnu prednost. Primenom nitinol žice moguće je razviti takav aktuator koji sa relativno malom aktivnom dužinom realizuje relativno veliki hod (veličina hoda može biti i do 90% od aktivne dužine aktuatora) u aksijalnom pravcu. Nitinol žice mogu da realizuju relativno velike pogonske sile pri čemu veličina sile zavisi od prečnika žice (može biti u rasponu od 0.25 mm do 8 mm) [279], odnosa količine nikla i titanijuma u leguri i zapamćenog oblika/položaja [234]. Pored ovoga, nitinol žice rade bešumno. Aktivaciona temperatura odnosno temperatura transformacije kreće se u granicama od 20°C do 90°C (zavisno do odnosa nikla i titanijuma u leguri). Ako se primeni odgovarajući vremenski period zagrevanja žice, vraćanje u zapamćeni oblik/položaj može biti veoma brzo (skoro trenutno). Zagrevanje je moguće realizovati električnom strujom niskog napona, reda veličine od 1.5 do 5 V; većim vrednostima električnog napona moguće je realizovati i brže vraćanje nitinol žice u zapamćeni oblik/položaj. Nitinol žice su lake, upravljive, relativno lako i brzo je moguće formirati žicu da zapamti željeni oblik/položaj, komercijalno su dostupne pri čemu im je i cena relativno niska. Upravo zbog svega prethodno navedenog, u disertaciji će za razvoj aktuatora adaptivnog gipkog sistema, biti korišćene nitinol žice.

Kao i sve legure koje pamte oblik, nitinol žice realizuju samo jednosmerno kretanje odnosno realizuju radni hod samo prilikom vraćanja u zapamćeni oblik/položaj. Pri zagrevanju nitinol žice (iznad temperature transformacije), ona se vraća u svoj zapamćeni oblik/položaj, pri čemu nakon hlađenja ostaje u tom položaju (slika 5.12.b). Za realizovanje povratnog hoda, odnosno vraćanje žice u oblik/položaj koji je imala pre zagrevanja, potrebno je primeniti odgovarajuću spoljašnju silu. Ovo predstavlja i ograničenje za primenu nitinol žica. Vraćanje nitinol žice u početni oblik/položaj, može se postići:

- primenom opruge odgovarajuće krutosti koja bi vraćala nitinol žicu u početni položaj (nitinol žica pri aktivaciji realizuje pogonsku silu koja je veća od sile u opruzi, a nakon hlađenja, žica više ne generiše pogonsku silu pa sila opruge postaje dominantna i realizuje vraćanje nitinol žice u početni položaj) [234],

- odgovarajućom krutošću sistema u kome se nitinol žica primenjuje kao aktuator, tako da nakon hlađenja žice sistem realizuje dovoljno veliku silu da može da vrati žicu u početni položaj,
- primenom još jedne nitinol žice čiji bi oblik/položaj bio tako memorisan da pri njenoj aktivaciji (zagrevanjem) realizuje vraćanje prve nitinol žice u početni položaj; na ovaj način je moguće razviti i aktuator koji može da realizuje upravljiv radni hod u oba smera.

U disertaciji će za vraćanje nitinol žice u početni položaj biti korišćen poslednji od prethodno opisanih principa, što će detaljnije biti objašnjeno u narednom odeljku.

Dodatna mogućnost za realizovanje povratnog radnog hoda bila bi primenom nitinol žice koja ima dva zapamćena oblika/položaja, jedan u toplom stanju i jedan u hladnom stanju [264-266]. Pri zagrevanju, nitinol žica se vraća u zapamćeni oblik/položaj koji odgovara toplom stanju, a nakon hlađenja žica se vraća u zapamćeni oblik/položaj koji odgovara hladnom stanju. Na ovaj način, žica u stvari realizuje i povratni radni hod. Nitinol žica koja realizuje dva zapamćena oblika/položaja (tzv. topli i hladni oblik/položaj), predstavlja u stvari leguru koja pamti oblik samo u toplom stanju. Odgovarajućim procesom tretiranja žice može se postići da ova nitinol žica zapamti i odgovarajući oblik/položaj u hladnom stanju [265]. Nedostatak je što takav proces tretiranja žice nije jednostavan, a pri pamćenju oblika/položaja u hladnom stanju javlja se efekat da žica delimično "zaboravi" oblik/položaj koji ima u toplom stanju [265]. Ovo u stvari znači da se pri zagrevanju žica ne vraća u potpunosti u svoj zapamćeni oblik/položaj već zauzima neki međuoblik/položaj, što takođe predstavlja nedostatak ovakvog tretiranja žice; upravo zbog ovoga, u disertaciji nije korišćen ovaj pristup.

Formiranje oblika/položaja žice koji ona treba da zapamti odvija se procesom tretiranja žice u vidu kaljenja odnosno zagrevanjem žice na temperaturama iznad 500°C. Nitinol žicu je potrebno najpre postaviti u oblik/položaj koji treba da zapamti, pri čemu je potrebno i držati (fiksirati) žicu u datom položaju tokom celog procesa zagrevanje. Nakon toga je žicu potrebno grejati određeno vreme na temperaturi od oko 500 °C (ili više) [265], pri čemu period grejanja zavisi od prečnika žice i načina zagrevanja i može biti u rasponu od 1 min do 20 min. Ukoliko se žica greje u odgovarajućoj pećnici, potrebno je duže vremena grejati žicu (oko 20 min), a ako se zagrevanje realizuje propuštanjem električne struje kroz žicu (jačine do 6 A), potrebno je znatno kraće vreme grejanja (od 1 min do 5 min) [234]. U literaturi ne postoje jedinstveni podaci o temperaturi i vremenu zagrevanja žice kako bi zapamtila

odgovarajući oblik/položaj jer sve zavisi od prečnika žice, načina zagrevanja, odnosa nikla i titanijuma u leguri, oblika/položaja koji treba da zapamti. Podaci koji su dati u prethodnom delu teksta predstavljaju samo uopštene vrednosti kojih se treba držati pri formiranju oblika/položaja žice koja ona treba da zapamti. Nakon završetka procesa grejanja potrebno je realizovati brzo hlađenje žice vodom ili hladnim vazduhom; pri visokim temperaturama dolazi do oksidacije koja menja odnos količine nikla i titanijuma u leguri i može doći od promene karakteristika legure, posebno u pogledu temperature transformacije koja vremenom može opasti, pa kako bi se ovo sprečilo, potrebno je realizovati hlađenje žice [234].

U literaturi se mogu naći različiti tipovi aktuatora, razvijenih primenom nitinol žice, koji realizuju radni hod u aksijalnom pravcu [234]. Komercijalno su dostupni i aktuatori od nitinol žice realizovani u vidu cilindrične zavojne opruge [258, 263]. Međutim, ni jedan od postojećih komercijalno dostupnih ili aktuatora u literaturi nije pogodan za aktuatorске primene kod razvijenog adaptivnog gipkog sistema. U disertaciji je razvijen novi tip aktuatora od nitinol žice, koji može da realizuje aksijalni radni hod, pri čemu je veličina hoda skoro 90% od aktivne dužine aktuatora. Ovaj aktuator poseduje i aksijalnu i savojnu krutost (gipkost), ne zahteva snažan izvor napajanja, lak je, radi bešumno, upravljiv je, može se lako i brzo izraditi, jeftin je i lako se ugrađuje u strukturu razvijenog gipkog sistema. U narednom odeljku dat je detaljan opis razvoja ovih aktuatora.

5.3. Razvoj aktuatora od nitinol (NiTi) žice

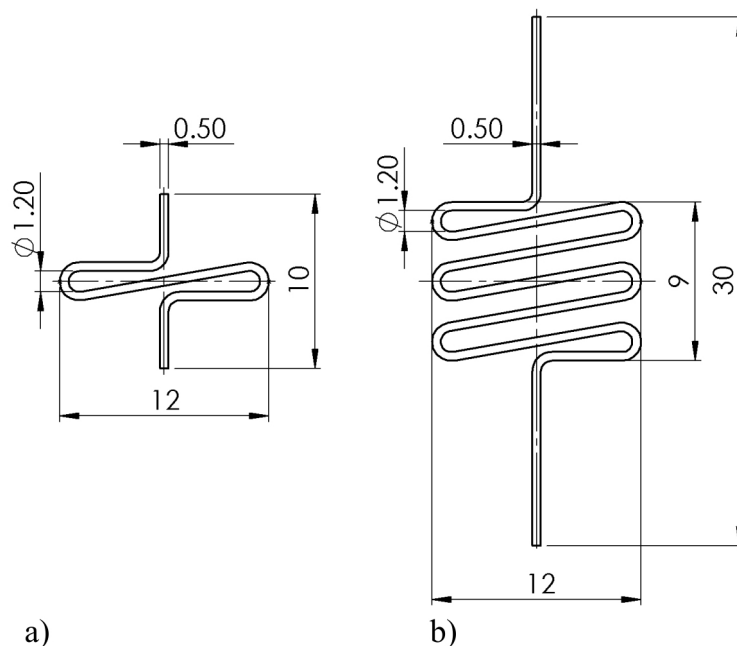
Za razvoj aktuatora adaptivnog gipkog sistema korišćena je komercijalno dostupna nitinol žica, firme *Smartwires*® [280], sa karakteristikama datim u tabeli 16 (sivom bojom je označen red sa karakteristikama žice koja je izabrana za formiranje aktuatora); u tabeli 16 su date karakteristike i drugih nitinol žica firme *Smartwires*®.

Tabela 16. Karakteristike komercijalno dostupnih nitinol žica firme *Smartwires*®

prečnik žice	temperatura transformacije
0.25 mm	35°C, 45°C
0.5 mm	45°C, 70°C
1 mm	35°C, 45°C, 70°C
2 mm	70°C

Za razvoj aktuatora u disertaciji izabrana je žica prečnika 0.5 mm (slika 5.21.b), zato što je nitinol žicu ovog prečnika moguće deformisati relativno malom silom odnosno moguće je realizovati male radijuse savijanja žice, a da pritom ne dođe do plastične deformacije žice posle koje ona ne može realizovati vraćanje u svoj zapamćeni oblik/položaj. Savijanjem žice na male radijuse krivine, moguće je formirati aktuator koji bi imao malu gabaritnu dužinu, a koji bi mogao da realizuje relativno veliki radni hod. Pri izboru prečnika žice uzeto je u obzir i da veličina pogonske sile koju nitinol žica može da realizuje u velikoj meri zavisi i od njenog prečnika. Iako bi žicu manjeg prečnika bilo moguće deformisati i znatno manjom silom i realizovati još manje radijuse krivina, ona bi realizovala manje pogonske sile. Žica većeg prečnika bi realizovala veće pogonske sile, ali u tom slučaju ne bi bilo moguće realizovati savijanje žice na male radijuse krivine (pri savijanju žice većeg prečnika na male radijuse krivine došlo bi do prevelike koncentracije napona na mestu savijanja, pa samim tim i do loma žice), a bila bi potrebna i velika sila za deformisanje žice. Pored ovoga, i cena nitinol žice raste sa porastom njenog prečnika, pa prečnik žice od 0.5 mm predstavlja kompromis između mogućnosti realizovanja malih radijusa savijanja žice, realizovanih pogonskih sila i cene. Izabrana je žica čija je sa temperaturom transformacije od 70°C, kako bi se izbegao moguć uticaj temperature okoline.

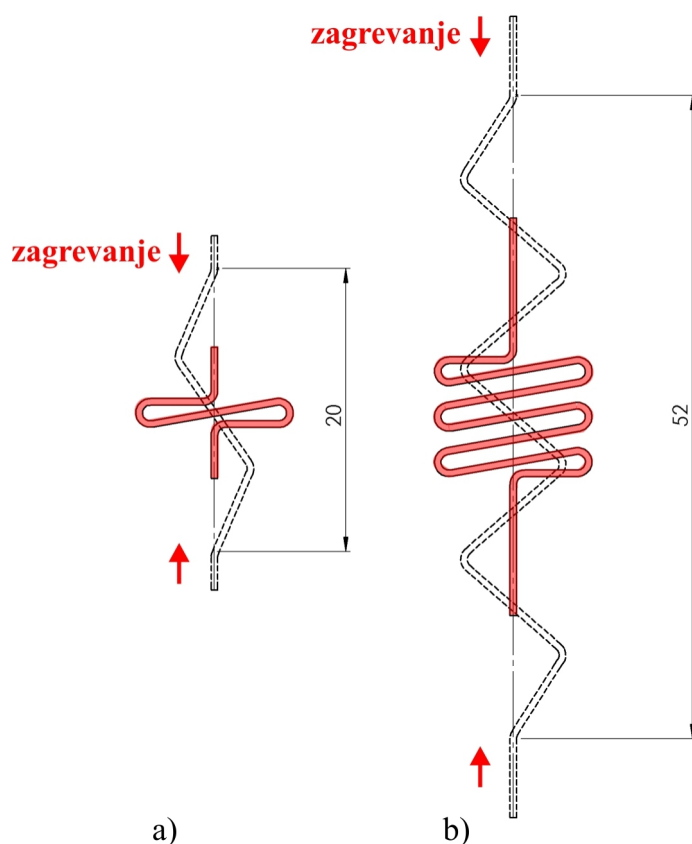
Kao što je već bilo reči, za adaptivni gipki sistem potrebno je razviti aktuatore koji imaju izvesnu aksijalnu i savojnu krutost (gipkost) i koji mogu da realizuju relativno veliki radni hod u poređenju sa njihovim dimenzijama. U slučaju aktuatora 1 i 2 (slika 4.1. i slika 4.3.) potrebno je razviti aktuator čija je aktivna dužina 20 mm, i koji teorijski može da realizuje radni hod od 20 mm (po 10 mm na oba kraja). U slučaju aktuatora 3 (slika 4.1. i slika 4.3.) potrebno je razviti aktuator čija je aktivna dužina 60 mm, i koji teorijski može da realizuje radni hod od 60 mm (po 30 mm na oba kraja). Na slici 5.18. prikazani su oblici aktuatora 1, 2 i 3, koje nitinol žica treba da realizuje pri zagrevanju (na temperaturi od 70°C); nitinol žicu treba oblikovati i formirati (procesom kaljenja) tako da zapamti oblike prikazane na slici 5.18.



slik 5.18. Oblici aktuatora koje nitinol žica treba da realizuje pri zagrevanju: a) aktuatori 1 i 2; b) aktuator 3

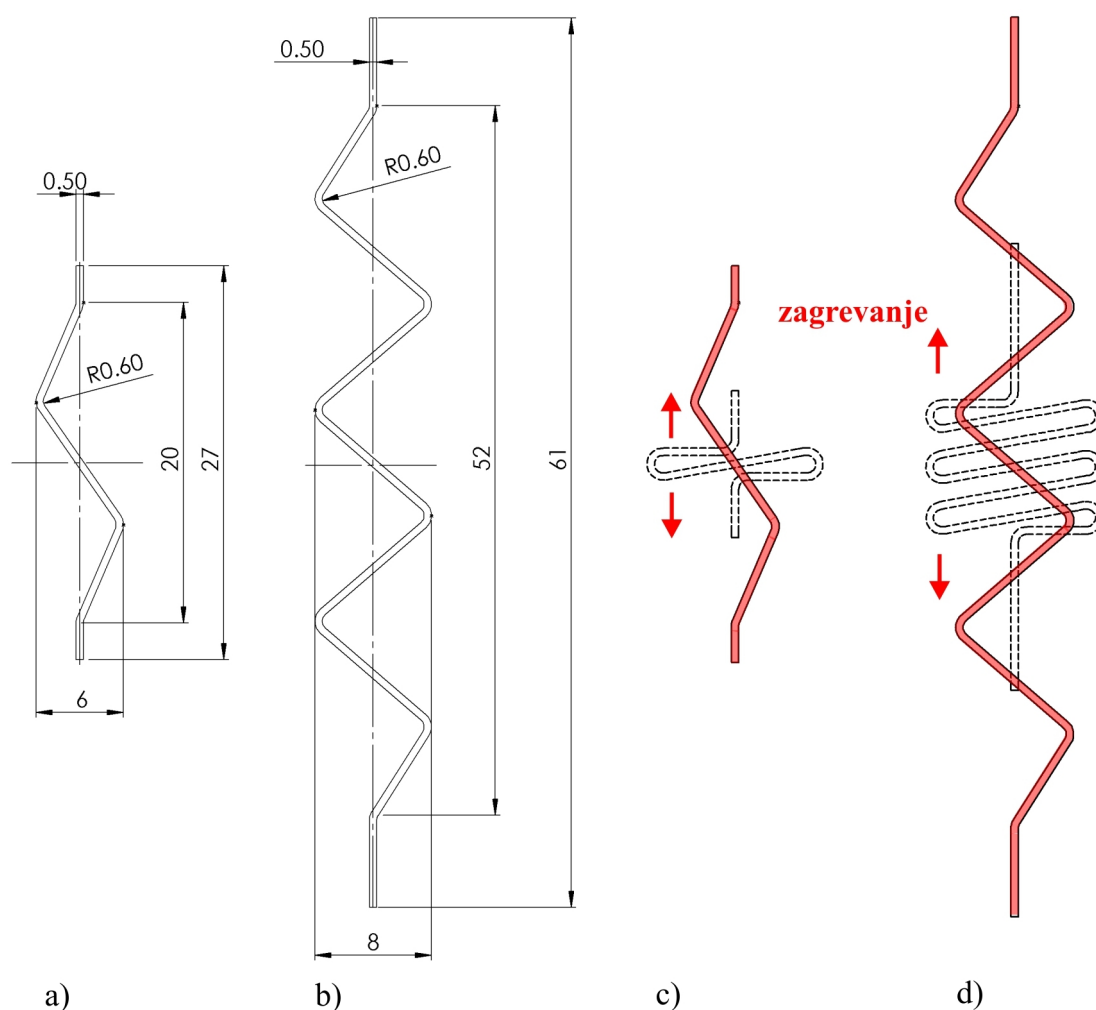
Oblici aktuatora 1, 2 i 3 (slika 5.18.) razvijeni su u skladu sa prethodno pomenutim zahtevima, a uzimajući u obzir prečnik žice koja se koristi za formiranje aktuatora. U slučaju aktuatora 1 i 2 (slika 5.18.a), ovakav zapamćeni oblik nitinol žice trebalo bi da obezbedi linearan radni hod krajeva aktuatora od ukupno 18.8 mm (po 9.4 mm na oba kraja), dok bi u slučaju aktuatora 3 (slika 5.18.b), trebalo da obezbedi radni hod od ukupno 51.9 mm (po 25.95 mm na oba kraja). Ovakvi aktuatori bi pri aktivaciji realizovali skupljanje aktuatora (slika 5.19.) i posedovali bi odgovarajuću aksijalnu i savojnu krutost; aktuatori su u vidu elastičnih opruga i sličnog su oblika kao i aktuatori (elastični elementi) na slici 4.1. Potrebno je napomenuti da su oblici žice od nitinola za aktuatore 1 i 2 identični jer oba aktuatora treba da realizuju istu veličinu radnog hoda. Princip rada aktuatora prikazan je na slici 5.19. Kako bi realizovali radni hod, potrebno je aktuatore, pre aktivacije, deformisati tako da zauzmu oblik prikazan isprekidanom linijom na slici 5.19., a zatim aktuatore ovog oblika ugrađivati u strukturu razvijenog adaptivnog gipkog sistema. Ovo ujedno predstavlja i početni oblik aktuatora koji oni treba da zauzmu u neaktivnom stanju. Pri aktivaciji bi aktuatori realizovali skupljanje aktuatora - vraćanje u oblik sa slike 5.18. (na slici 5.19. je ovaj oblik označen crvenom bojom), a samim tim realizovali bi i zahtevano pomeranje izvršnih tačaka radne površine gipkog sistema odnosno promenu oblika radne površine; ovde se polazi od

pretpostavke da bi ovakvi aktuatori generisali dovoljno veliku pogonsku silu koja bi mogla da realizuje i pomeranje izvršnih tačaka.



slika 5.19. Princip rada aktuatora koji bi bili formirani od nitinol žice: a) aktuator 1 i 2; b) aktuator 3

Kao što je bilo reči u odeljku 5.2.3., aktuatori od nitinol žice realizuju radni hod samo u jednom smeru odnosno samo pri vraćanju u zapamćeni oblik i ostaju u tom obliku i nakon aktivacije. U disertaciji su razvijena i 3 dodatna aktuatora od nitinol žice - aktuator 1a (slika 5.20.a), aktuator 2a (slika 5.20.a) i aktuator 3a (slika 5.20.b) - koji bi realizovali vraćanje aktuatora prikazanih na slici 5.18. u početni, neaktivni oblik. Ovi aktuatori treba pri aktivaciji da realizuju oblik koji bi bio identičan obliku aktuatora 1, 2 i 3 kada se oni nalaze u neaktivnom stanju (slika 5.19.); zapamćeni oblik aktuatora 1a, 2a i 3a (slika 5.20.a i slika 5.20.b) sličan je obliku aktuatora 1, 2 i 3 u njihovom deformisanom neaktivnom stanju (prikazano isprekidanom linijom na slici 5.19.).



slika 5.20. Oblici aktuatora koji bi realizovali povratni radni hod (istezanje): a) aktuator 1a i 2a; b) aktuator 3a; c) princip rada aktuatora 1a i 2a; d) princip rada aktuatora 3a

Pri zagrevanju aktuatora 1a, 2a i 3a oni bi se vraćali u svoj zapamćeni oblik, prikazan na slici 5.20., usled čega bi preko gipke strukture realizovali i vraćanje aktuatora 1, 2 i 3 u njihov neaktivni oblik. Drugim rečima, ukoliko bi u gipkoj strukturi bili ugrađeni aktuatori 1, 2, 3, 1a, 2a i 3a, pri čemu su odgovarajući parovi aktuatora (npr. 1 i 1a) ugrađeni u međusobno paralelnim ravnima, i aktuatori 1, 2 i 3 se nalaze u svom neaktivnom obliku, pri aktivaciji aktuatora 1, 2 ili 3, oni bi realizovali skupljanje aktuatora i zauzeli oblik na slici 5.18. Usled skupljanja aktuatora 1, 2 i 3 došlo bi i do deformacije i skupljanja aktuatora 1a, 2a i 3a, pri čemu bi oni i ostali u ovom položaju. Ukoliko bi se sada aktivirali aktuatori 1a, 2a i 3a, došlo bi do njihovog istežanja odnosno vraćali bi se u svoj zapamćeni oblik (slika 5.20.c i slika 5.20.d), a samim tim bi realizovali i vraćanje aktuatora 1, 2 i 3 u njihov neaktivni oblik/položaj (oblik prikazan isprekidanom linijom na slici 5.19.). Na ovaj način je moguće razviti aktuatore koji bi realizovali radni hod u oba smera odnosno aktuatore koji bi mogli da

realizuju i skupljanje i istežanje aktuatora. Ugradnjom ovakvih aktuatora u strukturu gipkog sistema moglo bi da se postigne mnogo različitih oblika radne površine jer bi ovakvi aktuatori mogli da upravljaju pomeranjem izvršnih tačaka radne površine u oba smera; pri skupljanju aktuatora (slika 4.1.) mogao bi se realizovati niz različitih oblika radne površine, pri njihovom istežanju (slika 4.10.) niz drugačijih oblika, a kombinovanim dejstvom aktuatora koji se skupljaju i istežu (slika 4.12.) potpuno drugačiji oblici radne površine.

Kako bi formirali aktuatore od nitinol žice odnosno kako bi realizovali da nitinol žica zapamti oblike prikazane na slici 5.18. i slici 5.20., potrebno je žicu postaviti u željeni oblik i grejati određeno vreme na temperaturi iznad 500°C . Ovaj proces se naziva "treniranje" žice jer se u nekom smislu žica trenira da bi zapamtila određeni oblik. Potrebno je naglasiti da je nitinol žica fabrički tako formirana da se pri zagrevanju na temperaturi od 70°C , vraća u pravolinijski položaj prikazan na slici 5.21.c. Međutim, procesom treniranja žice moguće je realizovati da nitinol žica zapamti bilo koji drugi željeni oblik. Procesom grejanja žice, na temperaturama višim od 500°C , nitinol žica "zaboravlja" svoj stari prethodno zapamćeni oblik i pamti oblik u kome se nalazi pri zagrevanju.

Proces treniranja nitinol žice može se podeliti u tri faze:

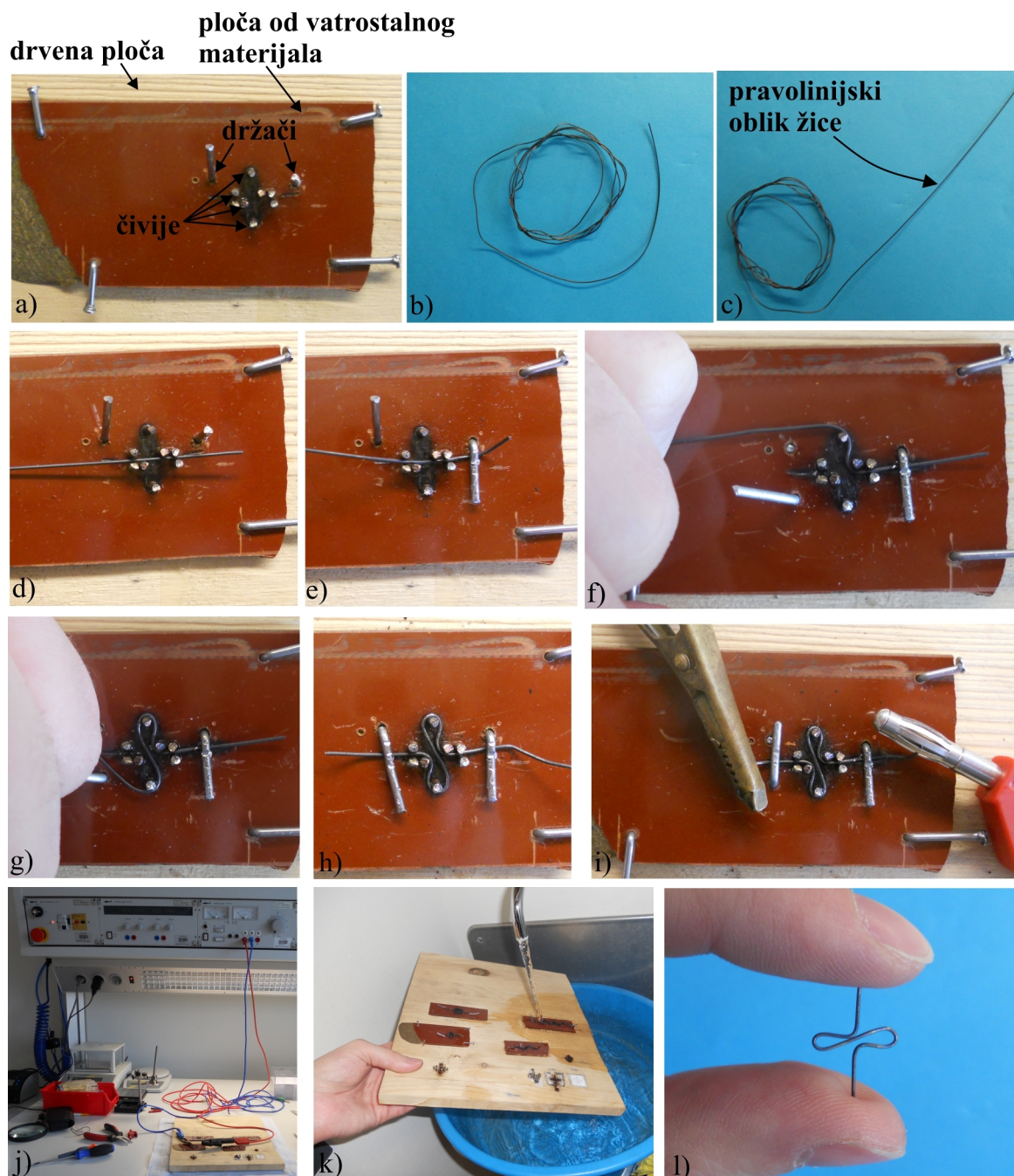
- fiksiranje oblika žice koji ona treba da zapamti tokom procesa zagrevanja,
- zagrevanje žice,
- hlađenje žice.

Proces "treniranja" nitinol žice, za potrebe ove disertacije, prikazan je na slici 5.21. i slici 5.22.

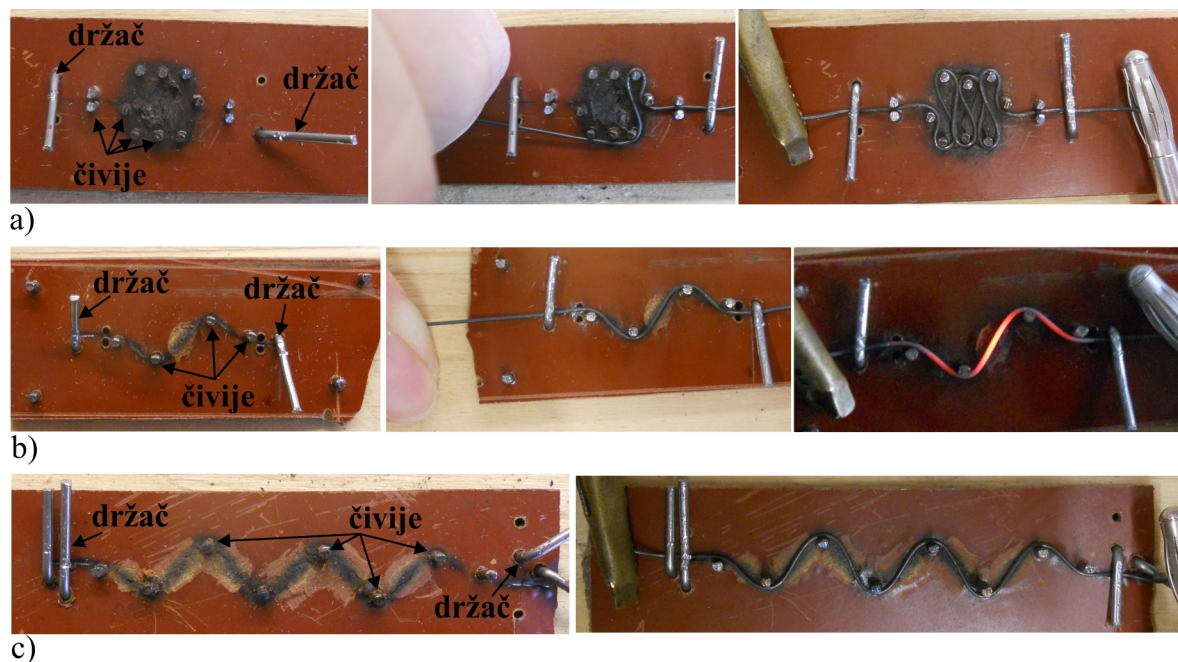
Kao što je prethodno rečeno, kako žica ima fabrički zapamćen pravolinijski oblik (slika 5.21.c), pri pamćenju novog oblika žica će težiti da se vrati u svoj prvobitno zapamćeni oblik pa je potrebno tokom treniranja (zagrevanja) žicu držati u obliku prikazanom na slici 5.18. i slici 5.20. kako se ne bi vraćala u svoj početni oblik.

Za fiksiranje žice u odgovarajućem obliku, napravljen je alat za oblikovanje aktuatora za potrebe disertacije prikazan na slikama 5.21.a, 5.22.a, 5.22.b i 5.22.c. Na odgovarajućoj ploči od drveta postavljena je druga tanja ploča od vatrostalnog materijala. Zatim su na ploči, na mestima gde je potrebno realizovati savijanje žice (na odgovarajući radijus) postavljene čivije prečnika 1.2 mm. Čivije su tako postavljene i raspoređene da se savijanjem žice oko njih dobija oblik aktuatora prikazan na slici 5.18. odn. na slici 5.20. Za oblikovanje nitinol žice u oblik koji treba da zapamti, jedan kraj žice je fiksiran za ploču držačem (slika 5.21.e), zatim je žica prednapregnuta (slika 5.21.f) i savijena oko čivija (slika 5.21.g), a nakon toga je i

drugi kraj žice fiksiran za ploču (slika 5.21.h). Ovim je obezbeđeno da žica ostane u datom obliku tokom procesa treniranja žice.



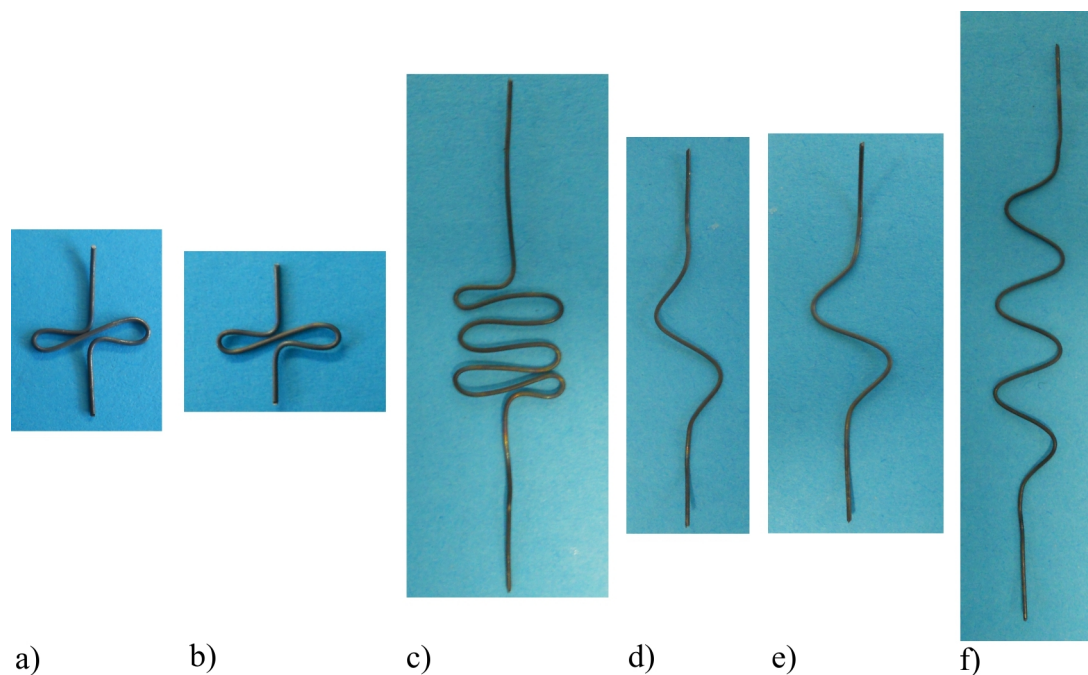
slika 5.21. Proces formiranja aktuatora 1 i 2 (slika 5.18.a) od nitinol žice – proces "treniranja" žice: a) alat za oblikovanje aktuatora; b) nitinol žica; c) priprema žice za fiksiranje – zagrevanje žice do temperature transformacije kako bi zauzela fabrički memorisani pravolinijski oblik; d) postavljanje žice u alat za oblikovanje; e) osiguranje, držačem, kraja žice od pomeranja; f) prednaprezanje žice; g) savijanje žice oko čivija; h) osiguranje, držačem, drugog kraja žice od pomeranja; i) priključenje kontakata za zagrevanje električnom strujom; j) grejanje žice strujom; k) hlađenje žice vodom; l) aktuator od nitinol žice



slika 5.22. Formiranje aktuatora 3 (a), aktuatora 1a i 2a (b) i aktuatora 3a (c) od nitinol žice

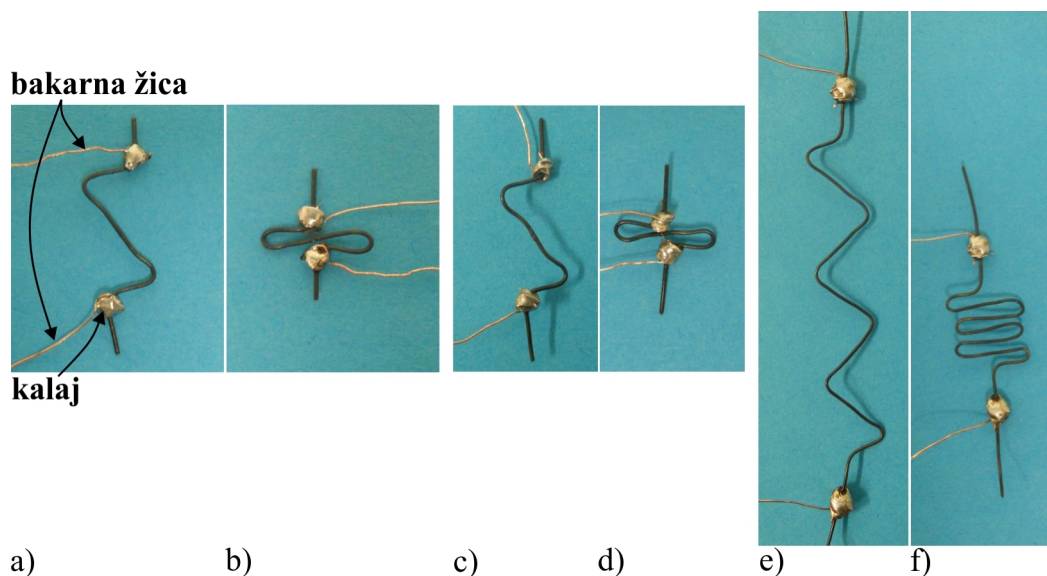
Nakon fiksiranja nitinol žice potrebno je realizovati njeno zagrevanje. U disertaciji je zagrevanje žice realizovano propuštanjem električne struje odgovarajuće jačine kroz žicu, pri čemu se u ovom slučaju žica ponaša kao otpornik. Krajevi žice su povezani odgovarajućim kontaktima za izvor napajanja (slika 5.21.i). Grejanje žice je realizovano jačinom struje od 7 A u vremenskom intervalu od 5 min (slika 5.21.j). Nakon završetka procesa grejanja, hlađenje žice je realizovano vodom (slika 5.21.k) i formiran je aktuator prikazan na slici 5.21.l.

Za formiranje aktuatora od nitinol žice oblika kao na slici 5.18., slici 5.20.a i slici 5.20.b, prethodno opisani proces je realizovan za svaki od aktuatora (slika 5.21. i slika 5.22.), pri čemu je u svim slučajevima za grejanje korišćena ista jačina struje (7A) i isti vremenski interval (5 min). Time su formirani aktuatori od nitinol žice oblika prikazanog na slici 5.23.

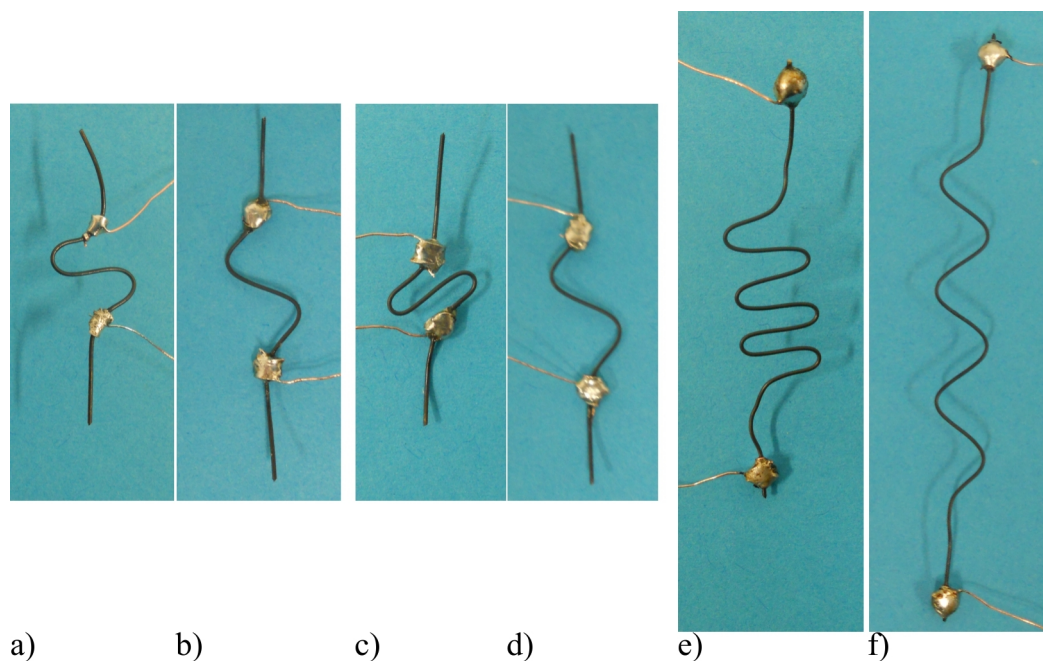


slika 5.23. Aktuatori formirani od nitinol žice: a) aktuator 1; b) aktuator 2; c) aktuator 3; d) aktuator 1a; e) aktuator 2a; f) aktuator 3a

Kako bi ispitali funkcionalnost aktuatora odnosno da li aktuatori realizuju vraćanje u svoj zapamćeni oblik, aktuatori su zagrejani na temperaturi od 70°C (temperatura transformacije) propuštanjem električne struje. Radi ostvarivanja električnog kontakta, na krajevima svih aktuatora obmotana je bakarna žica, a spoj sa aktuatorom osiguran je nanošenjem sloja kalaja na bakarnu žicu (slika 5.24.a). Aktuatori 1, 2 i 3, koji bi trebalo da realizuju skupljanje aktuatora, ručno su deformisani i postavljeni u istegnuti oblik koji bi imali prilikom ugrađivanja u strukturu gipkog sistema (slika 5.24.a, slika 5.24.c i slika 5.24.e). Nakon aktivacije (zagrevanja) električnom strujom jačine 1.5 A i naponom od 1.5 V (baterijom od 1.5 V), ustanovljeno je da se sva tri aktuatora vraćaju u zapamćeni (skupljeni) oblik (slika 5.24.b, slika 5.24.d i slika 5.24.f), koji odgovara obliku sa slike 5.18. Slično je urađeno i pri ispitivanju ponašanja aktuatora 1a, 2a i 3a koji bi trebali da realizuju istežanje (slika 5.25.). Aktuatori su ručno deformisani i postavljeni u oblik koji bi imali pri ugrađivanju u gipki sistem (slika 5.25.a, slika 5.25.c i slika 5.25.e), odnosno u početni oblik koji odgovara obliku aktuatora 1, 2 i 3 u neaktivnom stanju (prikazano isprekidanom linijom na slici 5.19.). Aktivacijom električnom strujom ustanovljeno je da se i ovi aktuatori vraćaju u zapamćeni istegnuti oblik (slika 5.25.b, slika 5.25.d i slika 5.25.f) koji odgovara obliku na slici 5.18.



slika 5.24. Realizovanje radnog hoda (skupljanje) aktuatora od nitinol žice: a) aktuator 1 prikazan u deformisanom položaju; b) aktuator 1 nakon aktivacije (zagrevanja); c) aktuator 2 prikazan u deformisanom položaju; d) aktuator 2 nakon aktivacije; e) aktuator 3 prikazan u deformisanom položaju; f) aktuator 3 nakon aktivacije



slika 5.25. Realizovanje radnog hoda (istezanje) aktuatora od nitinol žice: a) aktuator 1a prikazan u deformisanom položaju; b) aktuator 1a nakon aktivacije (zagrevanja); c) aktuator 2a prikazan u deformisanom položaju; d) aktuator 2a nakon aktivacije; e) aktuator 3a prikazan u deformisanom položaju; f) aktuator 3a nakon aktivacije

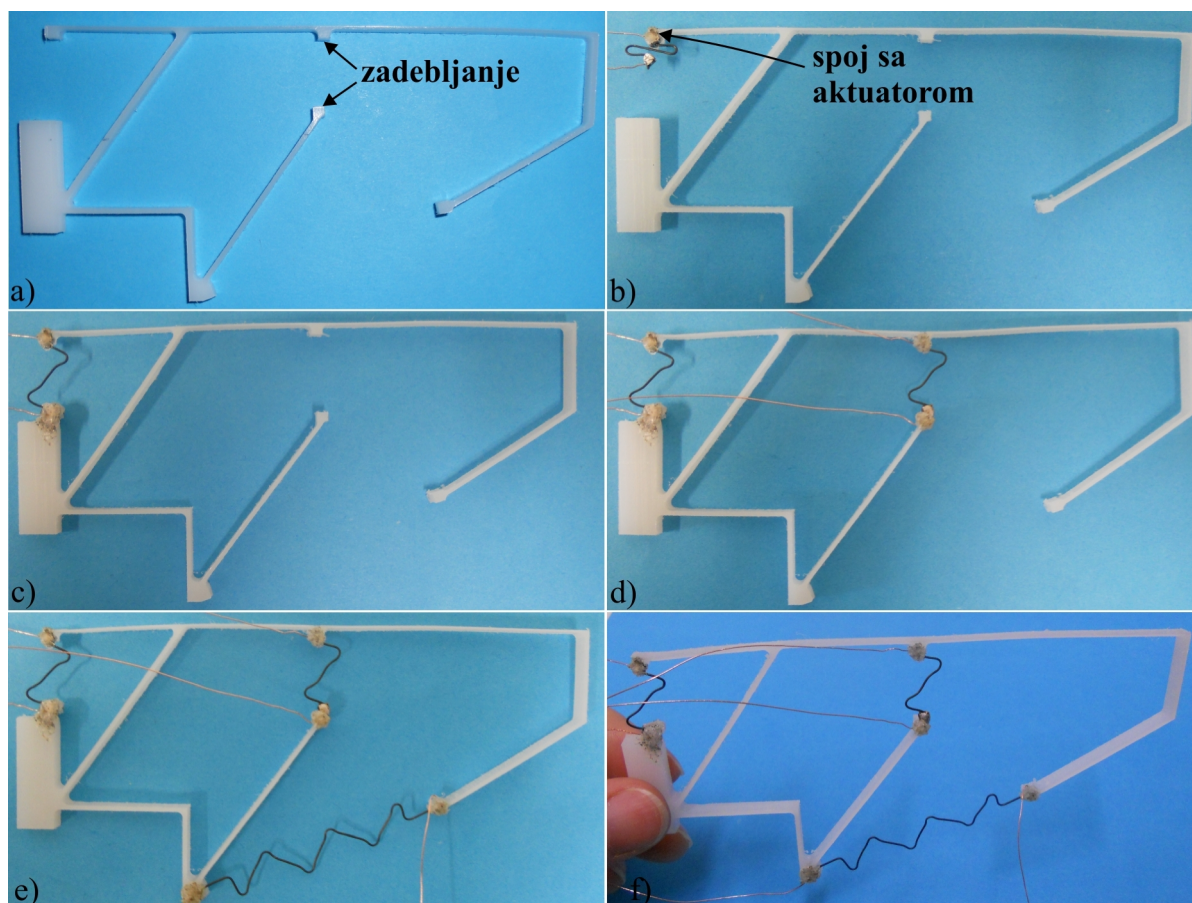
Pored ovoga, sprovedeno je i ispitivanje da li su razvijeni aktuatori i upravljivi. Ovo je realizovano tako što je prilikom zagrevanja žice električnom strujom, nakon trenutka kada je aktuator započeo vraćanje u svoj zapamćeni oblik, dovod struje prekinut i pokazalo se da aktuator nakon tog trenutka ostaje u trenutnom položaju. Pri zagrevanju nitinol žice iznad temperature transformacije, ona započinje vraćanje u svoj zapamćeni oblik, pri čemu, ako se u tom trenutku (ili bilo kojim drugom trenutku pre nego što je dostigla svoj zapamćeni oblik) prekine sa zagrevanjem, žica ostaje u tom međuobliku. Ovo znači da je upravljanjem jačinom struje ili električnim naponom kojim se žica zagreva (upravljanjem temperaturom kojom se žica zagreva) moguće realizovati i upravljanje veličinom radnog hoda koji aktuator realizuje.

Na osnovu svega prethodnog može se i vizuelno zaključiti da razvijeni aktuatori od nitinol žice realizuju relativno veliki radni hod u poređenju sa njihovom aktivnom dužinom i ostalim dimenzijama, da su upravljivi, laki, da rade bešumno, izrada aktuatora je jednostavna i brza i jeftini su (cena žice za izradu aktuatora 1 i 2 iznosi svega 0.13 €). Odavde se može dalje zaključiti da razvijeni aktuatori realizuju većinu zahteva koji se postavljaju pred aktuatore adaptivnog gipkog sistema, pri čemu se oni mogu koristiti i kao aktuatori drugih sistema.

5.4. Adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice

U prethodnom odeljku opisan je razvoj aktuatora od nitinol žice koji bi bili pogodni za aktuatorsku primenu kod razvijenog adaptivnog gipkog sistema. U ovom odeljku biće opisan način ugrađivanja ovih aktuatora u gipku strukturu kako bi se dobio adaptivni gipki mehanizam sa ugrađenim aktuatorima koji može da realizuje odgovarajuće pomeranje izvršnih tačaka radne površine odnosno da upravlja oblikom radne površine.

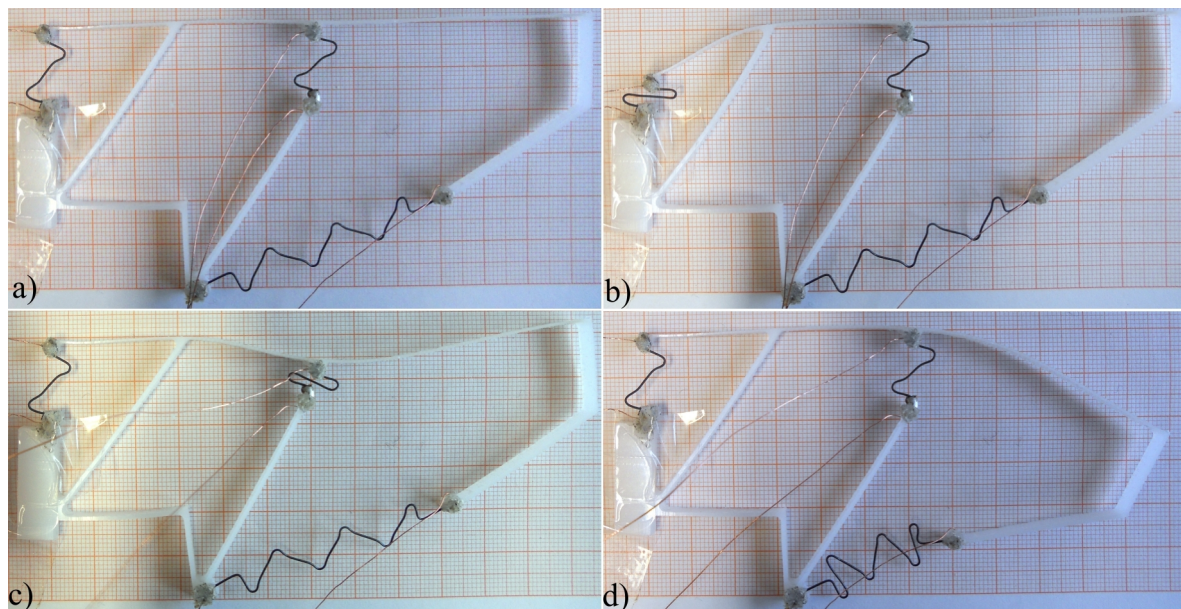
Najpre je na CNC glodalici izrađena gipka struktura (gipki mehanizam) od HDPE plastike tako da je na mestima gde je potrebno ostvariti spoj gipke strukture sa krajevima aktuatora naptavljeno odgovarajuće zadebljanje strukture (slika 5.26.a).



slika 5.26. Ugrađivanje aktuatora od nitinol žice (koji realizuju skupljanje) u gipku strukturu: a) gipka struktura bez aktuatora; b) zatapanje kraja aktuatora 1 u gipku strukturu; c) zatapanje drugog kraja aktuatora 1; d) zatapanje aktuatora 2; e) zatapanje aktuatora 3; f) gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice

Ugrađivanje aktuatora je realizovano zatapanjem aktuatora u gipku strukturu tako što su krajevi aktuatora (mesto spoja bakarne žice i kraja aktuatora) zagrevani iznad temperature topljenja plastike i tako uronjeni u odgovarajuća zadebljanja na mestu gde treba postaviti aktuator (slika 5.26.b, slika 5.26.c, slika 5.26.d i slika 5.26.e). Pri procesu zatapanja dolazi do topljenja plastike na mestu spoja sa krajem aktuatora, a nakon hlađenja dolazi do stvrdnjavanja plastike pa se samim tim ostvaruje i čvrst spoj sa krajem aktuatora. Potom je mesto spoja dodatno učvršćeno nanošenjem naknadnog sloja plastike. Na ovaj način je realizovano ugrađivanje svih aktuatora u gipku strukturu i formiran adaptivni gipki sistem sa aktuatorima od nitinol žice (slika 5.26.f). Najpre je realizovano ugrađivanje aktuatora 1, 2 i 3, odnosno samo aktuatora koji se skupljaju, kako bi se ispitalo ponašanje gipkog sistema kada se koristi ovakav tip aktuatora.

Za ispitivanje ponašanja ovako formiranog gipkog sistema svaki od aktuatora je pojedinačno aktiviran zagrevanjem strujom jačine 1.5 A i naponom od 1.5 V (baterijom od 1.5 V). Rezultati su prikazani na slici 5.27. (ispod strukture je postavljen odgovarajući milimetarski papir radi vizuelne procene veličine pomeranja izvršnih tačaka radne površine).



slika 5.27. Rezultati analize rada adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice (a) kada je aktivan samo aktuator 1 (b), samo aktuator 2 (c) i samo aktuator 3 (d)

Kao što se može videti sa slike 5.27., gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima (koji se pri aktivaciji skupljaju), realizuje promenu oblika svoje radne površine, pri čemu su oblici radne površine slični oblicima koji su dobijeni numeričkom analizom rada gipkog sistema (slika 4.3. i slika 4.13.) odnosno oblicima koje realizuje gipki sistem dobijen optimizacionim algoritmom (slika 3.53.). Kada je aktivan aktuator 2, gipki sistem realizuje konkavni oblik radne površine (slika 5.27.c), kada je aktivan aktuator 3 gipki sistem realizuje konveksni oblik radne površine (slika 5.27.d), a kada je aktivan aktuator 1, realizuje se oblik prikazan na slici 5.27.b.

Interesantno je primetiti da se i vizuelnom proverom može zaključiti da adaptivni gipki sistem realizuje visoku vrednost upravljivosti radne površine; svaki od aktuatora primarno upravlja pomeranjem jedne od izvršnih tačaka dok je veličina pomeranja ostalih tačaka radne površine relativno mala. Pri aktivaciji pojedinačnih aktuatora može se videti da krajevi aktuatora bliži izvršnim tačkama realizuju znatno veće pomeranje (hod) nego što su to suprotni krajevi aktuatora koji su povezani sa ostatkom gipke strukture. Ovo dokazuje

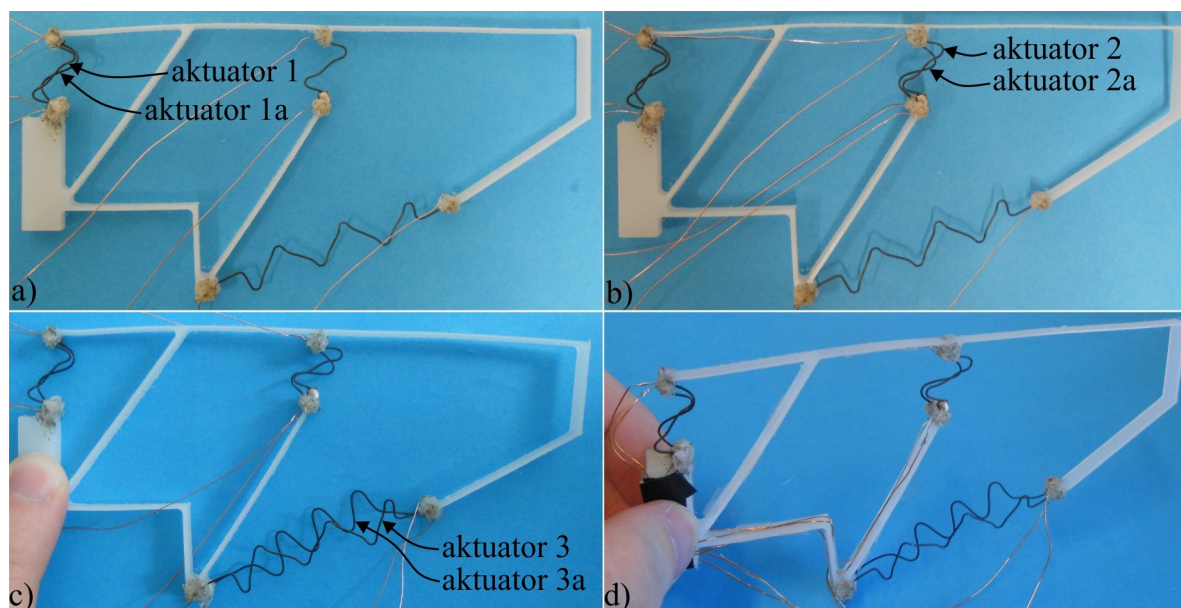
prethodno tvrđenje (vidi poglavlje 3 i 4) da hod aktuatora koji on ostvaruje, pored njegove krutosti, zavisi i od krutosti celog gipkog sistema (i gipke strukture i ostalih aktuatora u strukturi).

Upravlјivost radne površine koju realizuje izrađena adaptivna gipka struktura sa aktuatorima koji se pri aktivaciji skupljaju, data je u tabeli 17. Veličina pomeranja izvršnih tačaka radne površine, kada su aktivni pojedinačni aktuatori merena je uz pomoć milimetarskog papira (slika 5.27.), pri čemu je upravljivost izračunata prema jednačini (18). Pomeranje izvršnih tačaka mereno je u vertikalnom pravcu (pravcu y-ose), a radni hod aktuatora je meren u pravcu kretanja krajeva aktuatora (pravcu realizovanja radnog hoda). Upravlјivost gipkog sistema je izračunata za različitu veličinu radnog hoda aktuatora, kako bi se ispitalo da li se upravljivost gipkog sistema menja sa porastom radnog hoda aktuatora, kao i za slučaj dostizanja njihovog punog radnog hoda (vidi poslednja 3 reda u tabeli 17). Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 17 može se zaključiti da se upravljivost radne površine adaptivnog gipkog sistema menja sa porastom hoda aktuatora, pri čemu je promena vrednosti upravljivosti nelinearna zbog nelinearnog ponašanja gipke strukture i celog gipkog sistema. Ovo potvrđuje prethodno donete zaključke (vidi odeljak 3.7.8. i poglavlje 4) da vrednost upravljivosti gipkog sistema u velikoj meri zavisi od veličine pomeranja izvršnih tačaka radne površine, ali i od krutosti samih aktuatora i celog gipkog sistema; kao što se može videti iz tabela 12, 14 i 15, vrednost upravljivosti gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice razlikuje se od vrednosti upravljivosti gipkog sistema dobijenog optimizacionim algoritmom i sistema analiziranog nelinearnom MKE, zato što su korišćeni aktuatori različite krutosti. I pored ovoga, adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice (slika 5.27.) realizuje istu funkciju kao i gipki sistem dobijen optimizacionim algoritmom (slika 3.53.) odnosno realizuje upravljanje oblikom radne površine, pri čemu je vrednost upravljivosti relativno visoka, a vrednost pomeranja izvršnih tačaka je relativno velika. Interesantno je primetiti da pri aktivaciji aktuatora 3 gipki sistem realizuje i pojačanje pomeranja izvršne tačke 3 (vidi tabelu 17).

Tabela 17. Upravljivost adaptivne gipke strukture sa aktuatorima od nitinol žice koji pri aktivaciji realizuju skupljanje (poslednja tri reda se odnose na maksimalnu vrednost radnog hoda)

<i>Rezultati</i>					
hod aktuatora (kraj bliži izvršnoj tački)	aktuatori	pomeranje izvršnih tačaka			upravljivost η_c
		1	2	3	
2 mm	aktuator 1	-2 mm	-0.3 mm	-0.2 mm	73.15 %
	aktuator 2	0 mm	-2 mm	1.8 mm	
	aktuator 3	0 mm	0 mm	-2.8 mm	
5 mm	aktuator 1	- 5 mm	-0.4 mm	-0.4 mm	92.25 %
	aktuator 2	0 mm	- 5 mm	2 mm	
	aktuator 3	0 mm	0 mm	-6.5 mm	
10 mm	aktuator 1	-10 mm	1.3 mm	3.2 mm	87.76 %
5 mm	aktuator 2	0 mm	-5 mm	2 mm	
19.8 mm	aktuator 3	0 mm	0 mm	-23.1 mm	

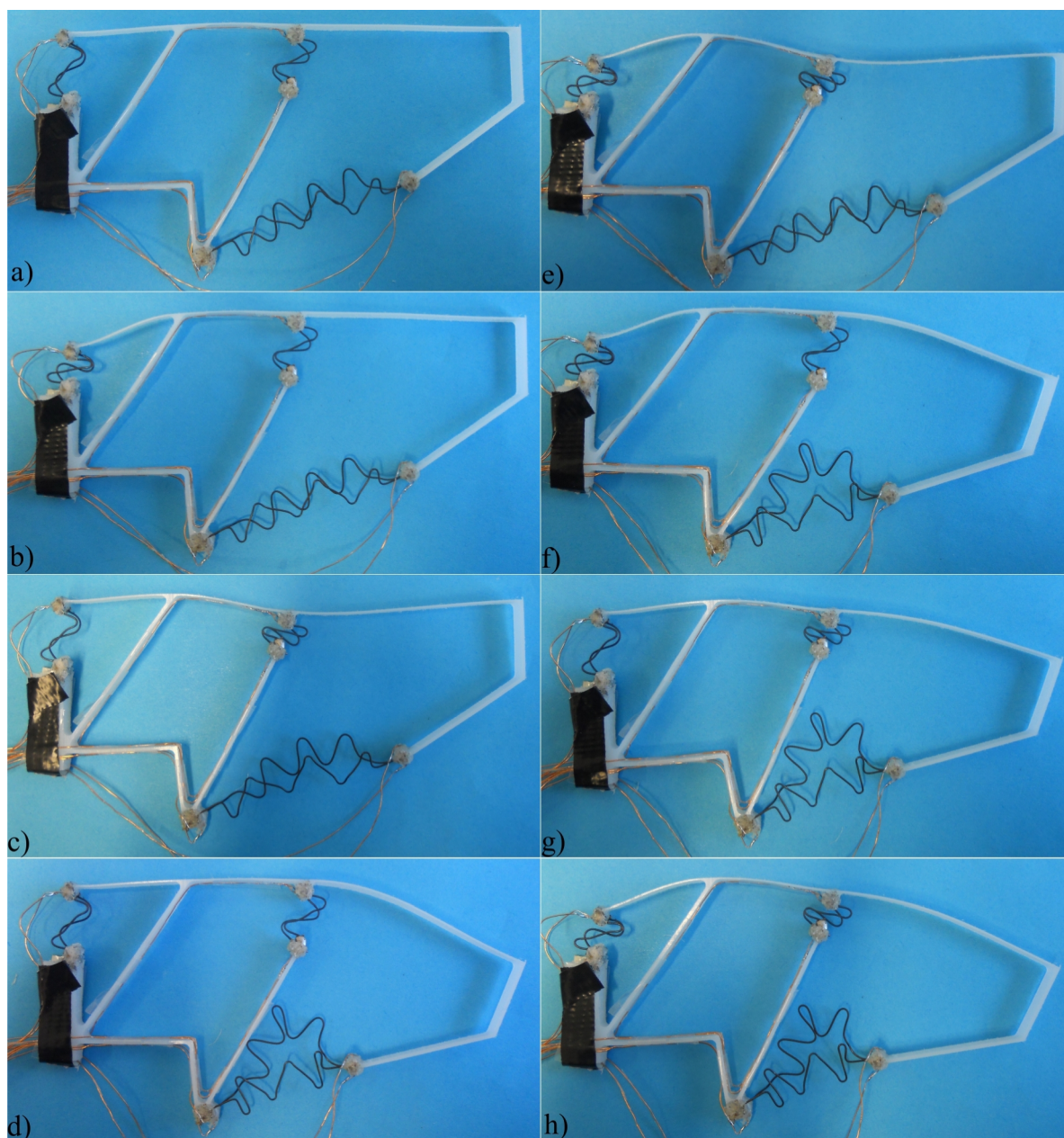
Adaptivna gipka struktura, sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice koji se skupljanju, ne može da realizuje vraćanje radne površine u početni položaj (nedeformisani položaj) odnosno ne može da realizuje pomeranje izvršnih tačaka radne površine u suprotnom smeru jer nitinol žice ne mogu da ostvare povratni radni hod. Upravo zbog ovoga, u strukturu adaptivnog gipkog sistema ugrađeni su i dodatni aktuatori 1a, 2a i 3a (slika 5.28.) koji se pri aktivaciji istežu. Aktuatori su ugrađeni na isti način kao i aktuatori 1, 2 i 3, zatapanjem krajeva aktuatora u gipku strukturu, pri čemu su aktuatori postavljeni paralelno odgovarajućim aktuatorima koji se skupljaju (slika 5.28.); aktuator 1a postavljen je paralelno aktuatoru 1, aktuator 2a paralelno aktuatoru 2, a aktuator 3 paralelno aktuatoru 3a.



slika 5.28. Ugrađivanje aktuatora od nitinol žice koji realizuju povratni radni hod (istezanje): a) zatapanje aktuatora 1a paralelno aktuatoru 1; b) zatapanje aktuatora 2a paralelno aktuatoru 2; c) zatapanje aktuatora 3a paralelno aktuatoru 3; d) adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima na skupljanje i na istežanje

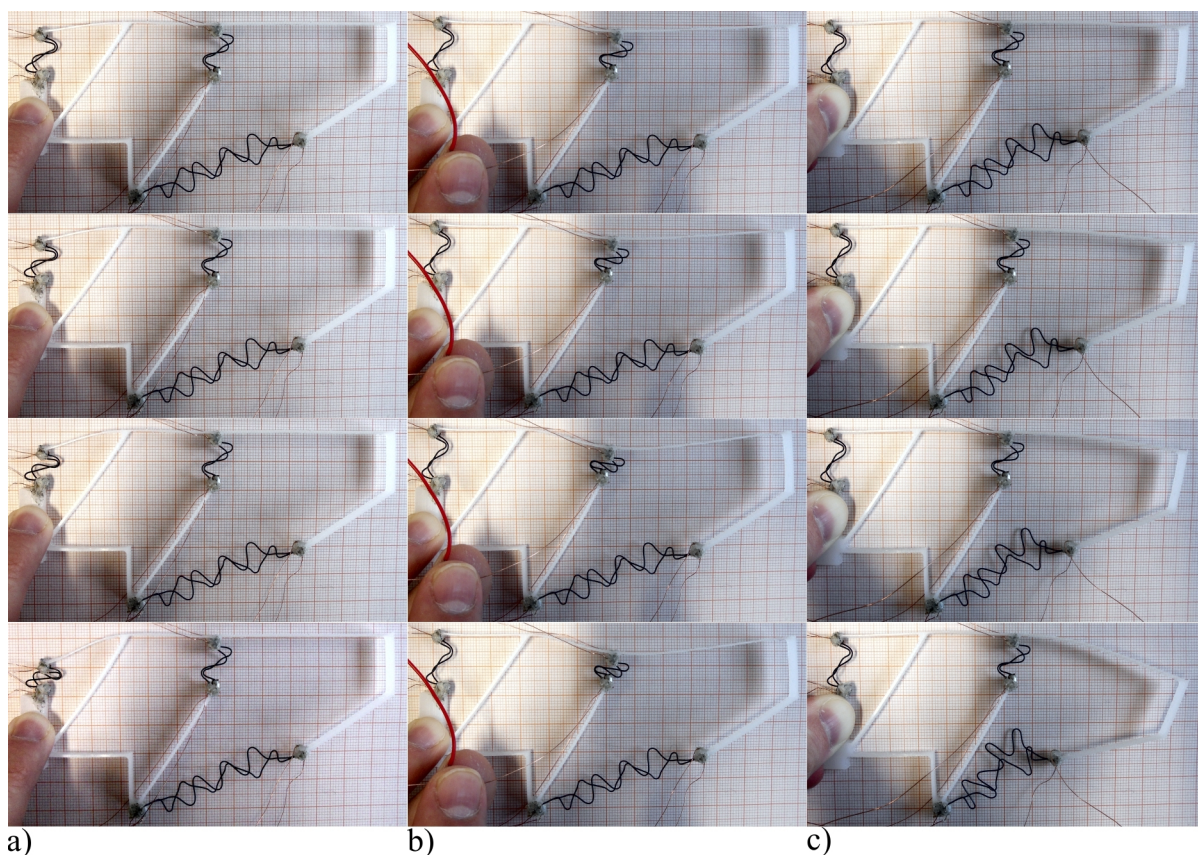
Ispitivanje ponašanja gipkog sistema odnosno gipke strukture, sa ugrađenim aktuatorima koji se skupljaju i aktuatora koji se istežu, realizovano je najpre aktiviranjem pojedinačnih aktuatora na skupljanje (aktuatori 1, 2 i 3), kako bi se ustanovilo da li gipki sistem realizuje i dalje promenu oblika radne površine, odnosno da li aktuatori 1, 2 i 3 mogu da ostvare dovoljno veliku silu da pri vraćanju u svoj zapamćeni oblik savladaju otpor aktuatora 1a, 2a i 3a; aktuatori su aktivirani primenom dve baterije od 1.5 V. Rezultati ovog ispitivanja prikazani su na slici 5.29. Kao što se može videti sa ove slike, aktuatori 1, 2 i 3 realizuju pomeranje izvršnih tačaka radne površine odnosno realizuju promenu oblika radne površine, pri čemu su oblici veoma slični onima na slici 3.53., slici 3.54., slici 4.3., slici 4.13. i slici 5.27., na kojima su prikazana ponašanja gipkog sistema koji sadrži samo aktuatore koji se skupljaju. Kada je aktivan aktuator 2, gipki sistem realizuje konkavni oblik radne površine (slika 5.29.c), kada je aktivan aktuator 3 gipki sistem realizuje konveksni oblik radne površine (slika 5.29.d), a kada je aktivan aktuator 1 realizuje se oblik prikazan na slici 5.29.b. Kako bi se realizovalo povratno kretanje ovih aktuatora odnosno vraćanje radne površine u početni (nedeformisani) položaj, aktivirani su odgovarajući aktuatori na istežanje (1a, 2a i 3a). Analizom rada ovakvog gipkog sistema ustanovljeno je da aktuatori 1a, 2a i 3a realizuju istežanje, a samim tim i vraćanje aktuatora 1, 2 i 3 u njihov početni položaj odnosno realizuju

vraćanje radne površine u početni položaj. Na ovaj način razvijen je adaptivni gipki sistem koji može da realizuje različite oblike svoje radne površine jer u istoj strukturi sadrži i aktuator koji se skupljaju i aktuator koji se istežu, pa je moguće realizovati upravljanje izvršnim tačkama radne površine u oba smera. Na slici 5.29.e, slici 5.29.f, slici 5.29.g i slici 5.29.h prikazani su i oblici koje realizuje adaptivni gipki sistem kada je aktivno više aktuatora u strukturi.



slika 5.29. Adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice koji realizuju skupljanje i sa aktuatorima koji realizuju istežanje (a) i promena oblika radne površine kada je aktivan samo aktuator 1 (b), samo aktuator 2 (c), samo aktuator 3 (d), aktuatori 1 i 2 (e), aktuatori 1 i 3 (f), aktuatori 2 i 3 (g), aktuatori 1, 2 i 3 (h)

Radi ispitivanja upravljivosti gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima koji se skupljaju i koji se istežu, svaki od aktuatora na skupljanje (aktuatori 1, 2 i 3) aktiviran je pojedinačno, pri čemu je veličina pomeranja izvršnih tačaka radne površine merena uz pomoć milimetarskog papira (slika 5.30.), a upravljivost je izračunata prema jednačini (18); pomeranje izvršnih tačaka mereno je u vertikalnom pravcu (pravcu y-ose). Slično kao i u slučaju gipke strukture sa aktuatorima koji se skupljaju (slika 5.27.), upravljivost gipkog sistema izračunata je za različitu veličinu radnog hoda aktuatora. Hod aktuatora, veličina pomeranja izvršnih tačaka i upravljivost gipkog sistema sa aktuatorima koji se skupljaju i aktuatorima koji se istežu, data je u tabeli 18 i tabeli 19.



slika 5.30. Ispitivanje upravljivosti radne površine adaptivnog gipkog sistema sa aktuatorima od nitinol žice koji se skupljaju i koji se istežu: a) za različiti hod aktuatora 1; b) za različiti hod aktuatora 2; c) za različiti hod aktuatora 3

Tabela 18. Upravljivost adaptivne gipke strukture sa aktuatorima od nitinol žice koji pri aktivaciji realizuju skupljanje i aktuatorima koji realizuju istežanje (poslednja tri reda se odnose na maksimalnu vrednost radnog hoda)

<i>Rezultati</i>					
hod aktuatora (kraj bliži izvršnoj tački)	aktuatori	pomeranje izvršnih tačaka			upravljivost η_c
		1	2	3	
1 mm	aktuator 1	-1 mm	0 mm	0 mm	≈100 %
	aktuator 2	0 mm	-1 mm	0 mm	
3.4 mm	aktuator 3	0 mm	0 mm	-2.7 mm	
2 mm	aktuator 1	-2 mm	0 mm	0 mm	98 %
	aktuator 2	0 mm	-2 mm	-0.4 mm	
6 mm	aktuator 3	0 mm	0 mm	-4.7 mm	
5 mm	aktuator 1	-5 mm	0 mm	0 mm	99.2 %
	aktuator 2	0 mm	-5 mm	-0.6 mm	
8.1 mm	aktuator 3	0 mm	0 mm	-6.5 mm	
7 mm	aktuator 1	-7 mm	0.3 mm	0.8 mm	98.5 %
5 mm	aktuator 2	0 mm	-5 mm	-0.6 mm	
15.5 mm	aktuator 3	0 mm	0 mm	-16.1 mm	

Tabela 19. Hod aktuatora 3 (skupljanje), adaptivne gipke strukture sa aktuatorima od nitinol žice koji pri aktivaciji realizuju skupljanje i aktuatorima koji realizuju istežanje

<i>Rezultati</i>			
ukupan hod	hod u pravcu x ose	hod u pravcu y ose	pomeranje izvršne tačke 3
3.4 mm	-3.3 mm	-0.7 mm	-2.7 mm
6 mm	-5.9 mm	-1.3 mm	-4.7 mm
8.1 mm	-7.9 mm	-1.6 mm	-6.51 mm
15.5 mm	-15.3 mm	-0.5 mm	-16.1 mm

Poslednjih 7.4 mm hoda od ukupnog hoda (15.5 mm) aktuator 3 realizuje u aksijalnom pravcu (pravcu ose aktuatora), pri čemu pomeranje izvršne tačke 3 iznosi 9.5 mm. Oдавde se može zaključiti da aktuator 3 realizuje i pojačanje pomeranja 3 izvršne tačke radne površine.

Na osnovu rezultata prikazanih u tabeli 18 može se zaključiti da se i u slučaju adaptivne gipke strukture sa aktuatorima od nitinol žice koji realizuju skupljanje i sa aktuatorima koji realizuju istežanje, upravljivost gipkog sistema menja nelinearno sa porastom hoda aktuatora zbog nelinearnog ponašanja celog gipkog sistema. Za razliku od gipke strukture koja sadrži samo aktuatora koji realizuju skupljanje, gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima koji se skupljaju i koji se istežu realizuje znatno veću vrednost upravljivosti radne površine. Razlog za ovo leži u činjenici da su, pored aktuatora koji realizuju skupljanje, u strukturi gipkog sistema ugrađeni i aktuatori koji realizuju istežanje, pa je i krutost celog sistema veća što dovodi i do povećanja upravljivosti gipkog sistema; ako bi se dva aktuatora koji se nalaze paralelno jedan drugom (npr. aktuator 1 i aktuator 1a) posmatrali kao jedan aktuator koji može da realizuje i skupljanje i istežanje, krutost takvog aktuatora je veća u odnosu na aktuator koji može da realizuje samo skupljanje, pa je i upravljivost gipkog sistema veća u odnosu na gipki sistem sa slike 5.27. Ovo dodatno potvrđuje prethodno donete zaključke da upravljivost sistema zavisi od krutosti aktuatora, pri čemu je upravljivost veća ukoliko se koriste krući aktuatori u strukturi (vidi odeljak 3.7.8. i poglavlje 4). Kao što se može videti iz tabela 12, 14, 15 i 17, vrednost upravljivosti gipkog sistema sa aktuatorima od nitinol žice koji se skupljaju i sa aktuatorima koji se istežu je različita od vrednosti upravljivosti gipkog sistema dobijenog optimizacionim algoritmom, sistema analiziranog nelinearnom MKE i gipkog sistema sa aktuatorima od nitinol žice koji se skupljaju, zato što su korišćeni aktuatori različite krutosti. Ovo znači da je za dobijeno rešenje adaptivnog gipkog sistema, pogodnim izborom aktuatora moguće ostvariti upravljivost sistema koja je i veća od upravljivosti gipkog sistema dobijenog optimizacionim algoritmom. Rezultati pokazuju da gipki sistem sa aktuatorima od nitinol žice može da realizuje visoku vrednost upravljivosti radne površine, pri čemu je i pomeranje izvršnih tačaka relativno veliko (upravljivost gipkog sistema za slučaj dostizanja punog radnog hoda aktuatora iznosi $\eta_c=98.5\%$). Potrebno je naglasiti da aktuator 3, pri aktivaciji, ne realizuje linearni radni hod u pravcu ose aktuatora; pravac pomeranja kraja aktuatora bliže izvršnoj tački se pri aktivaciji ne poklapa sa osom aktuatora već ima nepravilnu putanju (aktuator 3 realizuje linearan radni hod samo jednim delom svog ukupnog hoda). U tabeli 19 dat je ukupan hod aktuatora 3, hod razložen na pravac x i y ose, kao i veličina pomeranja izvršne tačke 3 koju aktuator ostvaruje (iz tabele 18 može se videti da pri aktivaciji aktuatora 3 ne dolazi do pomeranja ostalih izvršnih tačaka radne površine).

Na kraju možemo konstatovati da razvijeni adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice, razvijeni u disertaciji, može da realizuje upravljanje oblikom radne površine, a samim tim može da realizuje i različite oblike radne površine.

6. Razvoj senzora

U prethodnom poglavlju opisan je razvoj aktuatora od nitinol žice čijim je ugrađivanjem u gipku strukturu dobijen adaptivni gipki sistem odnosno adaptivna gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima koja može upravljivo da menja oblik svoje radne površine. Međutim, za ovakav gipki sistem, potrebno je razviti i odgovarajuće senzore koji bi omogućili gipkom sistemu da detektuje promene u svojoj okolini odnosno da detektuje spoljašnje sile koje deluju na njegovu radnu površinu. Na osnovu signala sa senzora gipki sistem bi mogao posredstvom odgovarajućeg kontrolera da upravlja aktuatorima i da ostvari odgovarajuću promenu oblika kako bi mogao adekvatno da odgovori na nepoznato opterećenje. Na primer, ukoliko bi se razvijeni adaptivni gipki sistem primenjivao kao adaptivni gipki hvatač (slika 4.19.), na osnovu ugrađenih senzora hvatač bi mogao da registruje kontakt sa predmetom kojim treba da manipuliše. Ukoliko bi se pak gipki sistem primenjivao kao adaptivno krilo (slika 4.22.), krilo bi, posredstvom senzora, moglo da detektuje spoljašnji pritisak odnosno raspored pritiska koji dejstvuje na krilo, kako bi na osnovu toga sistem mogao, za zadate uslove, da formira optimalan oblik radne površine.

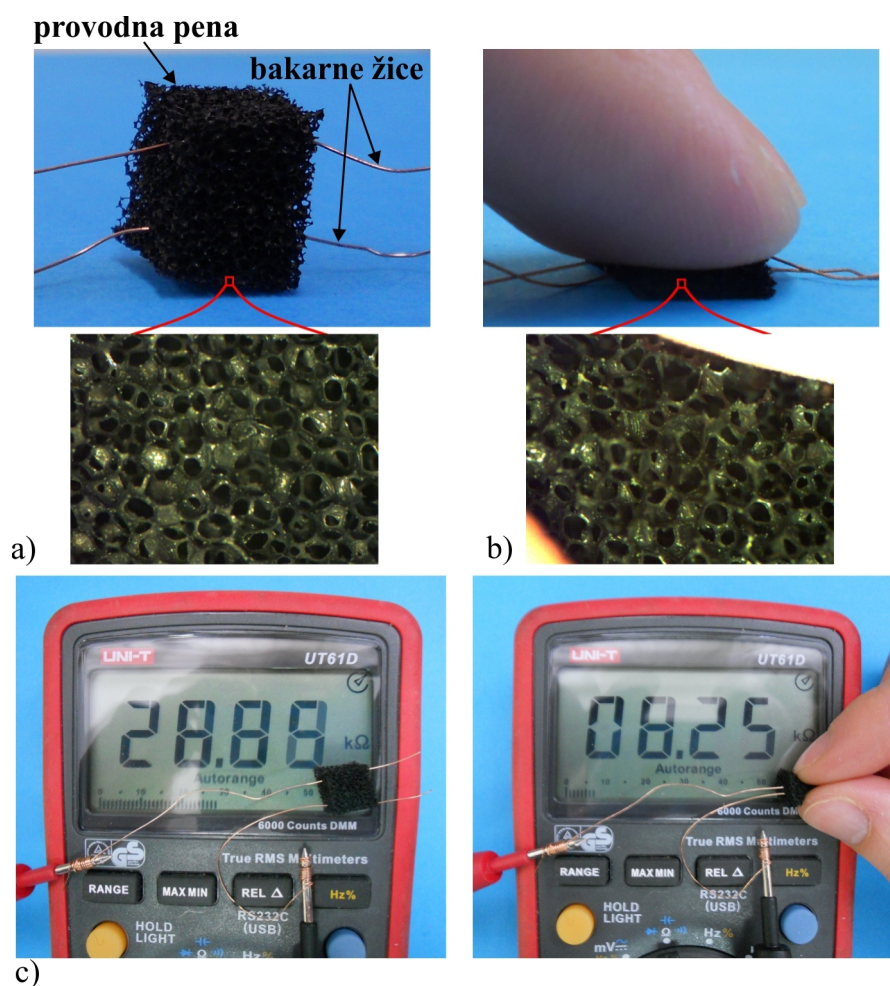
Senzore adaptivnog gipkog sistema treba razviti tako da mogu da detektuju pritisak. Kako spoljašnje sile deluju na gipki sistem preko radne površine koja predstavlja izvršni deo adaptivnog gipkog sistema, senzore je potrebno ugraditi na samoj radnoj površini odnosno duž radne površine. Ovo znači da je potrebno razviti senzore koji mogu i da se deformišu zajedno sa radnom površinom. Ovakvi senzori bi trebalo da imaju malu krutost (da budu gipki) i da ne generišu signale pri promeni oblika radne površine; ukoliko bi senzori generisali signale pri promeni oblika, gipki sistem bi protumačio ove signale kao da na njega dejstvuju spoljašnje sile ili bi bilo potrebno razviti takve senzore koji daju različite signale pri dejstvu sile i pri promeni oblika. Ovo ukazuje na to da bi kao senzori razvijene adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima, najpogodniji bili senzori u vidu veštačke kože. Ovakvi senzori bi znači trebalo da detektuju pritisak, da budu male krutosti i da mogu da se ugrade duž cele radne površine gipkog sistema. Međutim, većina razvijenih senzora u vidu veštačke kože [234, 281-284], koji bi bili pogodni za primenu kod razvijenog gipkog sistema,

nisu komercijalno dostupni ili su još uvek u fazi razvoja, a proces izrade senzora je veoma složen ili skup. Ovo ujedno predstavlja i motivaciju za razvoj novog tipa senzora od komercijalno dostupnih materijala.

U disertaciji je razvijen novi tip senzora od provodne pene koja je komercijalno dostupna [285]. Provodna pena ispoljava svojstvo da pri deformaciji menja svoju električnu otpornost. Ovo svojstvo provodne pene je iskorišćeno za razvoj senzora koji mogu da detektuju pritisak. U narednim odeljcima detaljno je opisan razvoj senzora od provodne pene. Biće pokazano da razvijeni senzori imaju dobre karakteristike, lako ih je formirati, jednostavno se mogu ugraditi u gipku strukturu i mogu da se deformišu zajedno sa radnom površinom pri čemu u ovom slučaju ne generišu signale. Biće pokazano da razvijeni senzori mogu da se koriste i za detekciju pritiska u drugim sistemima, a posebno kao taktilni senzori robotskih sistema. Sva merenja, eksperimenti i analize realizovani su u Laboratoriji za Mehanizme na Tehničkom Univerzitetu u Ilmenau, Nemačka.

6.1. Provodna pena

Provodna pena predstavlja porozni materijal u vidu pene (slika 6.1.) koji je izrađen od grafita ili je duž svih spoljašnjih i unutrašnjih površina obložen slojem grafita. Kako grafit predstavlja provodni materijal (provodi naelektrisanje), samim tim je i pena obložena grafitom provodna. Ovakva pena ispoljava svojstvo da pri deformaciji (usled dejstva pritisknog opterećenja) menja svoju električnu otpornost (slika 6.1.c) odnosno da dolazi do smanjenja električne otpornosti. Kako pena predstavlja memorijski materijal, nakon prestanka pritisknog opterećenja ona se vraća u svoj prvobitni oblik. Provodna pena može se posmatrati kao otpornik koji menja svoju električnu otpornost pri deformaciji. Ova promena otpornosti može se iskoristiti za detekciju pritiska, merenje veličine sile ili pomeranja pa se provodna pena može koristiti kao senzor. Svojstvo provodne pene da menja svoju otpornost pri deformaciji može se objasniti na sledeći način: kada se pena nalazi u nedeformisanom stanju, gustina pene je relativno mala zbog porozne strukture same pene pa u tom slučaju manji broj slojeva grafita u strukturi pene dolazi u međusobni kontakt (slika 6.1.a) pa je i električna otpornost veća. Međutim, pri dejstvu pritisknog opterećenja dolazi do smanjenja debljine sloja pene, a samim tim se povećava i gustina (formira se manje porozna struktura) odnosno više slojeva grafita dolazi u međusobni kontakt (slika 6.1.b) pa je i otpornost manja.



slika 6.1. Senzor od provodne pene: a) provodna pena prikazana u nedeformisanom stanju; b) provodne pene prikazana u deformisanom stanju; c) promena električne otpornosti pene pri dejstvu pritisknog opterećenja [293]

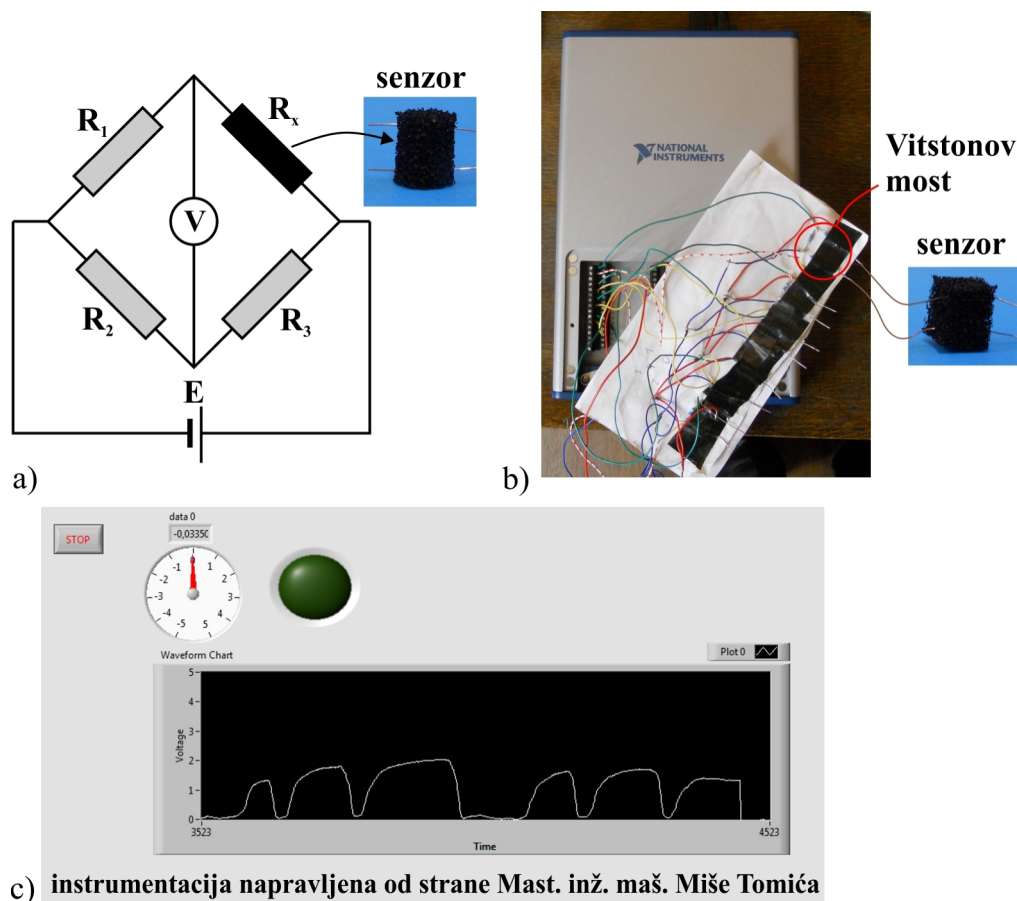
Provodna pena predstavlja u stvari poliuretanski elastomer koga karakterišu visoka termalna provodnost, nizak koeficijent termalne ekspanzije, porozna struktura i hemijska otpornost na rastvarače [285-287]. U literaturi nije posvećeno mnogo pažnje razvoju senzora od ovakvog materijala [288]; u literaturi su razvijeni senzori u vidu pene, ali je kao provodni materijal kojim je obložena pena korišćen *polypyrrale* [289, 290] i grafin [291, 292]. Ovo ujedno predstavlja i motivaciju za dalje istraživanje i razvoj novog tipa senzora od grafitne provodne pene. U narednom odeljku detaljnije je opisan razvoj ovih senzora.

6.2. Razvoj senzora od provodne pene

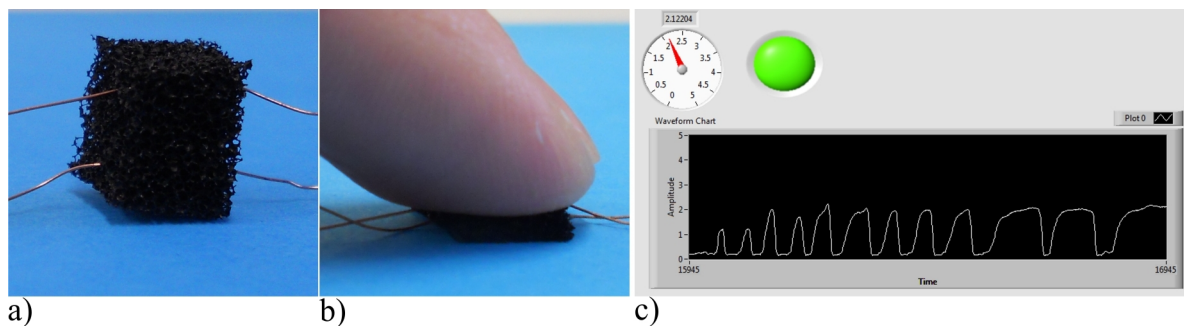
U disertaciji je za razvoj senzora korišćena komercijalno dostupna poliuretanska grafitna pena firme INDUCTION® [285]. Senzorski element je formiran umetanjem para bakarnih žica unutar pene, u spoljašnjim zonama provodne pene pri čemu su žice postavljene paralelno jedna drugoj (slika 6.1.a). Kako bi se merila promena električne otpornosti provodne pene pri njenoj deformaciji, drugi krajevi žica povezani su na odgovarajućem mernom instrumentu (slika 6.1.c). Kao što se može videti sa slike 6.1.c pri dejstvu pritisknog opterećenja dolazi do smanjenja električne otpornosti provodne pene za 20.63 kΩ. Nakon prestanka dejstva pritisknog opterećenja pena se vraća u oblik koji je imala pre deformacije, pri čemu vrednost električne otpornosti pene raste i vraća se na početnu vrednost (vrednost pre deformacije). Ovako formirani senzorski elementi mogu se koristiti kao senzori koji bi detektovali pritisak.

Kako bi se detaljnije ispitale karakteristike ovakvog senzorskog elementa, formiran je odgovarajući Vitstonov most koji pretvara promenu električne otpornosti u odgovarajuću promenu električnog napona (slika 6.2.a). Vitstonov most formiraju 3 otpornika čije su vrednosti električne otpornosti: $R_1=R_2=300 \Omega$ i $R_3=1000 \Omega$ i senzor koji ima promenljivu vrednost otpornosti R_x , kao četvrti otpornik (slika 6.2.a). Kako bi se merila vrednost promene električnog napona korišćena je akviziciona kartica DAQU NIUSB6363, firme *NationalInstruments*® (slika 6.2.b). Vitstonov most je povezan na odgovarajuće analogne ulaze akvizicione kartice (slika 6.2.b), pri čemu je u softveru *LabView* formirana virtuelna instrumentacija za merenje i akviziciju podataka (slika 6.2.c). Potrebno je napomenuti da je početna vrednost električnog napona različita za svaki povezani senzor; kako bi se merila ukupna promena napona, početna vrednost električnog napona je nulovana (oduzimanjem ove početne vrednosti).

Najpre je ispitan senzorski element sa slike 6.1. tako što je senzorski element više puta ciklično pritisnut i rasterećen, a rezultati merenja prikazani su na slici 6.3. Analizom rezultata može se zaključiti da pri dejstvu pritisknog opterećenja napon raste; maksimalna promena napona iznosila je $\Delta U=2V$. Nakon prestanka dejstva pritisknog opterećenja, pena (senzorski element) vraća se u oblik koji je imala pre deformacije, pri čemu i napon opada i dostiže približno istu vrednost kao i pre deformacije što znači da je promena napona ponovljiva. Kako bi se pokazao princip detekcije pritiska, u *LabView*-u je formirana virtuelna instrumentacija (slika 6.3.c) koja, kada se dostigne vrednost promene napona od 1.7 V, pali indikaciono svetlo koje ukazuje na to da je detektovan pritisak.



slika 6.2. Instrumentacija za ispitivanje karakteristika senzora od provodne pene: a) šema Vitstonovog mosta; b) Vitstonov most povezan na akvizicionu karticu firme *NationalInstruments®* i povezan Vitstonov most; c) virtuelna instrumentacija za merenje i akviziciju podataka



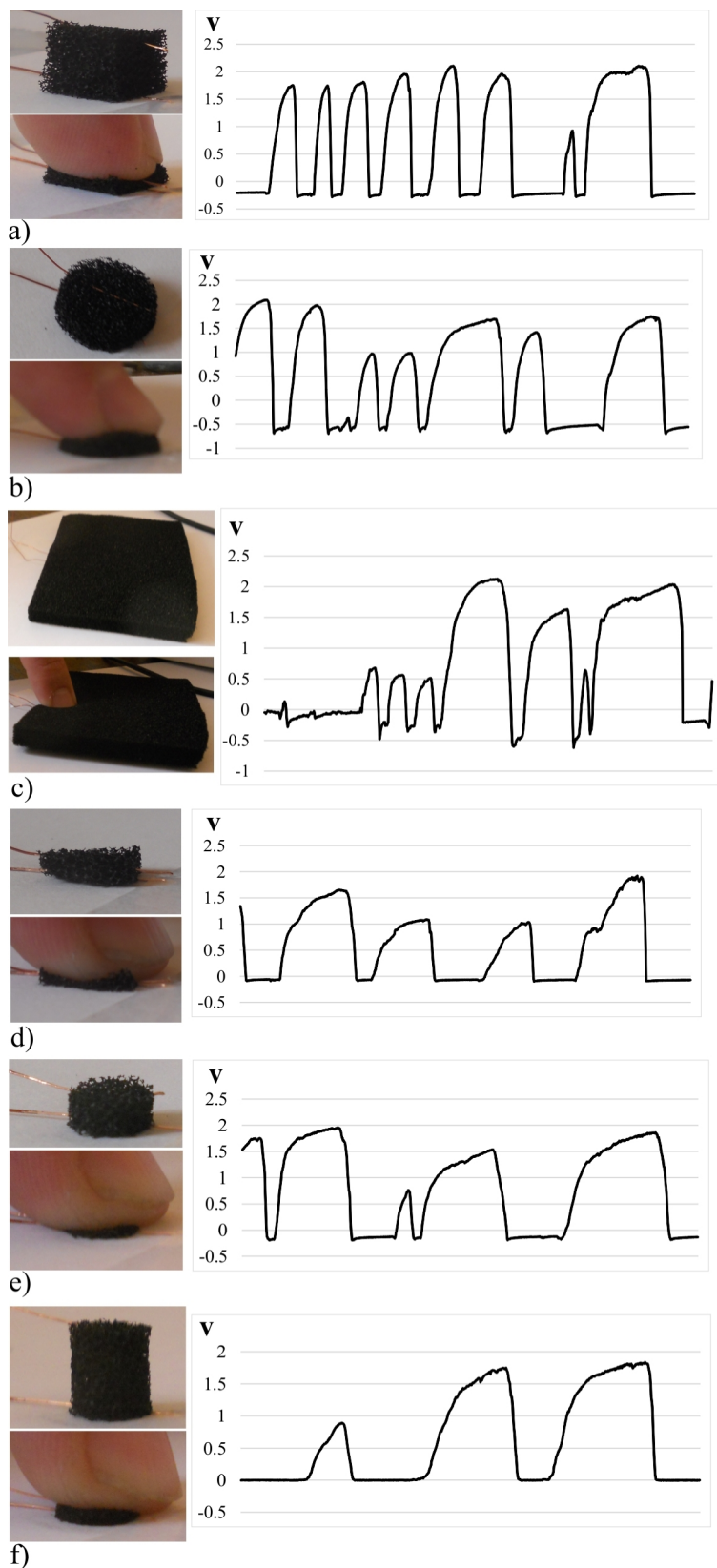
slika 6.3. Merenje promene električnog napona senzora od provodne pene pri dejstvu pritisknog opterećenja: a) senzorski element prikazan u nedeformisanom stanju; b) i u deformisanom stanju; c) odgovarajuća promena električnog napona

Kako bi ispitali da li maksimalna vrednost promene električnog napona zavisi od oblika odnosno površine senzora, od provodne pene su formirani senzorski elementi prizmatičnog i

cilindričnog oblika (slika 6.4.a i slika 6.4.b); dimenzije senzorskih elemenata date su u tabeli 20. Rezultati merenja promene napona, pri dejstvu pritisknog opterećenja na senzorske elemente, prikazani su na slici 6.4.a i slici 6.4.b u vidu grafika; merenje je realizovano cikličnom deformacijom i rasterećenjem senzorskih elemenata. Kao što se može videti sa ovih slika, u oba slučaja, i kod senzora prizmatičnog i kod senzora cilindričnog oblika, napon se menja do $\Delta U=2V$. Odavde se može zaključiti da maksimalna promena električnog napona senzorskog elementa ne zavisi od oblika odnosno površine senzora formiranog od provodne pene. Kako bi se ovo dodatno potvrdilo, izvršeno je ispitivanje rada senzorskog elementa velike površine, formiranog od provodne pene; na slici 6.4.c prikazana je i lokacija umetnutih bakarnih žica. Na istoj slici su prikazani i rezultati promene napona pri cikličnom dejstvu pritisknog opterećenja. Kao što se može videti sa ove slike, i kod senzora velike površine maksimalna promena električnog napona iznosi $\Delta U=2V$, što potvrđuje zaključak da je maksimalna promena napona nezavisna od površine senzora koji bi se formirao od provodne pene.

Tabela 20. Dimenzije senzora, formiranih od provodne pene, prikazanih na slici 6.4.

senzor	dužina	širina	debljina
slika 6.4.a	8.8 mm	8.2 mm	6.8 mm
slika 6.4.d	10 mm	6.2 mm	2.4 mm
senzor	prečnik		debljina
slika 6.4.b	Ø13 mm		4 mm
slika 6.4.e	Ø6 mm		3.5 mm
Slika 6.4.f	Ø6 mm		8.6 mm



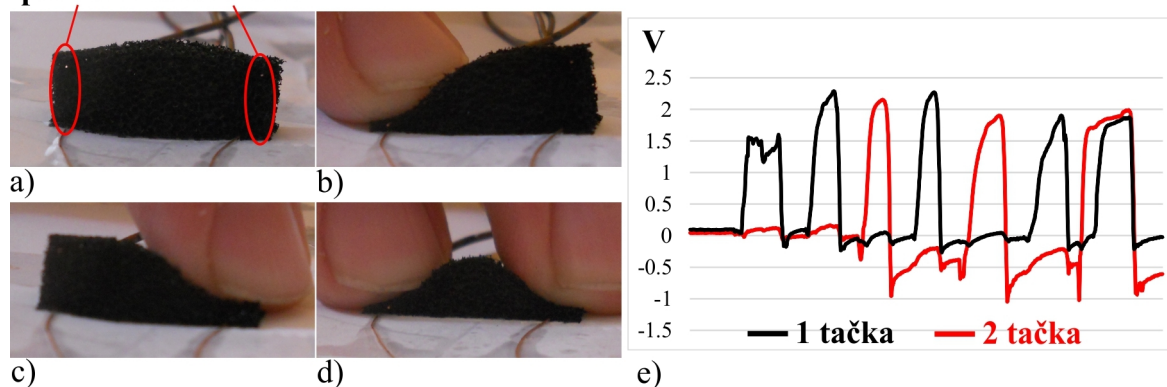
slika 6.4. Rezultati ispitivanja maksimalne promene električnog napona pri korišćenju senzorskih elemenata formiranih od provodne pene: a) senzor prizmatičnog oblika; b) senzor cilindričnog oblika; c) senzor velike površine; d) senzor prizmatičnog oblika male debljine; e) senzor cilindričnog oblika male debljine; f) senzor cilindričnog oblika velike debljine

Pored ispitivanja uticaja veličine i oblika površine senzora na vrednost ukupne promene električnog napona, ispitano je i da li debljina senzora formiranih od provodne pene utiče na maksimalnu promenu električnog napona. U cilju ovog ispitivanja, formirani su od provodne pene senzori prizmatičnog i cilindričnog oblika različitih debljina (slika 6.4.d, slika 6.4.e, slika 6.4.f i tabela 20). Na istim slikama su prikazani i rezultati merenja promene napona, pri dejstvu pritiskog opterećenja, za senzore različitih debljina. Analizom rezultata može se zaključiti da je maksimalna vrednost promene električnog napona približno ista za senzorske elemente različitih debljina odnosno da je ukupna promena napona nezavisna od debljine senzora.

Na osnovu prethodnih ispitivanja može se zaključiti da se od provodne pene mogu formirati senzori različitih dimenzija (površine i debljine), za različite primene, pri čemu bi maksimalna veličina promene električnog napona bila približno ista.

Senzore od provodne pene je moguće iskoristiti i za detekciju pritiskog opterećenja u više tačaka (slika 6.5.). Kako bi se demonstrirao ovakav princip detekcije, formiran je senzor od komada provodne pene veće dužine. Na mestima gde je potrebno detektovati pritiskno opterećenje (na krajevima senzorskog elementa od provodne pene), u penu su umetnuti parovi bakarnih žica kojima je moguće detektovati pritiskno opterećenje u dve tačke (slika 6.5.a). Za detekciju pritiskog opterećenja u dve tačke potrebna su dva Vitstonova mosta, pa je jedan par žica povezan sa dodatnim Vitstonovim mostom (slika 6.2.a) koji je formiran na isti način kao i u slučaju detekcije pritiskog opterećenja u jednoj tački. Rezultati promene napona pri dejstvu pritiskog opterećenja u dve tačke prikazani su na slici 6.5.e. pri čemu su na grafiku različitim bojom označeni rezultati dejstva pritiskog opterećenja u jednoj i drugoj tački. Analizom rezultata može se zaključiti da senzori mogu da detektuju pritisak u različitim tačkama, pri čemu je i u ovom slučaju maksimalna promena napona iznosila približno $\Delta U=2V$. Potrebno je naglasiti da maksimalna vrednost promene električnog napona zavisi i od vrednosti električne otpornosti otpornika koji formiraju Vitstonov most. Otpornicima drugačije vrednosti otpornosti može se postići da maksimalni opseg promene napona bude i veći. Ukoliko bi se dejstvovalo pritiskim opterećenjem na nekom drugom mestu duž senzorskog elementa (na kome se ne bi nalazio par bakarnih žica), ne bi došlo do promene napona. Na ovaj način je moguće formirati senzor od jednog komada provodne pene, koji može da detektuje pritiskno opterećenje u više tačaka, pri čemu je na mestu detekcije potrebno umetnuti odgovarajući par žica.

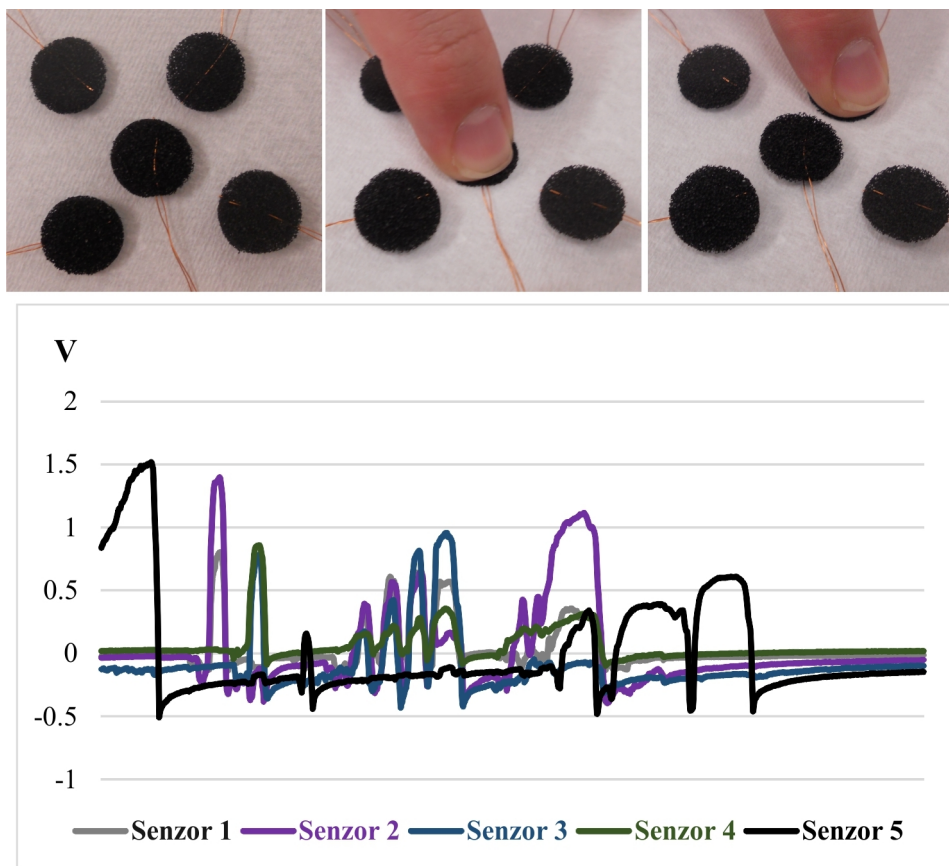
parovi bakarnih žica



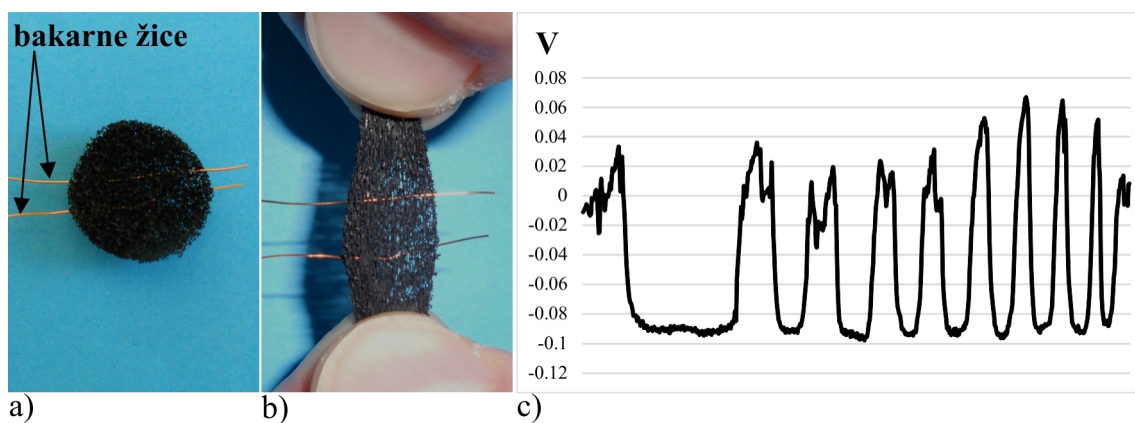
slika 6.5. Senzor od provodne pene za detekciju pritisknog opterećenja u dve tačke: a) formiranje senzora; b) dejstvo pritisknog opterećenja u prvoj tački; c) dejstvo pritisknog opterećenja u drugoj tački; d) istovremena dejstvo pritisknog opterećenja u dve tačke; e) rezultati merenja promene napona koju daje senzor pri dejstvu pritisknog opterećenja

Detekciju pritisknog opterećenja u različitim tačkama moguće je ostvariti i sa više manjih senzora od provodne pene. Ovakav princip detekcije prikazan je na slici 6.6. Pet senzora formiranih od provodne pene, postavljeni su tako da je moguće vršiti detekciju pritisknog opterećenja u 5 različitih tačaka (korišćeno je 5 Vitstonovih mostova, po jedan za svaki senzor). Pri dejstvu pritisknog opterećenja dolazi do promene električnog napona, a samim tim i detekcije pritisknog opterećenja. Ovakav princip detekcije i ovakvi senzori mogli bi da se primene kao taktilni senzori kod robotskih hvatača, pri čemu bi senzori bili postavljeni na površini kojom robot ostvaruje hvatanje.

Pored detekcije pritisknog opterećenja, senzori od provodne pene bi mogli da se iskoriste i za detekciju naprezanja na istezanje (slika 6.7.). Da bi se proverila ova mogućnost, dve bakarne žice su umetnute u strukturu provodne pene, paralelno jedna drugoj, ali tako da obe leže u ravni deformacije (upravno na pravac istezanja) senzora (slika 6.7.a). Senzorski element je ciklično istezan i rasterećivan (slika 6.7.b), a dobijena promena električnog napona prikazana je na slici 6.7.c. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da pri istezanju senzora dolazi do smanjenja električnog napona pa se senzori od provodne pene mogu koristiti kako za detekciju pritisknog opterećenja tako i za detekciju naprezanja na istezanje.



slika 6.6. Detekcija pritisknog opterećenja u pet različitim tačkama, primenom senzora od provodne pene



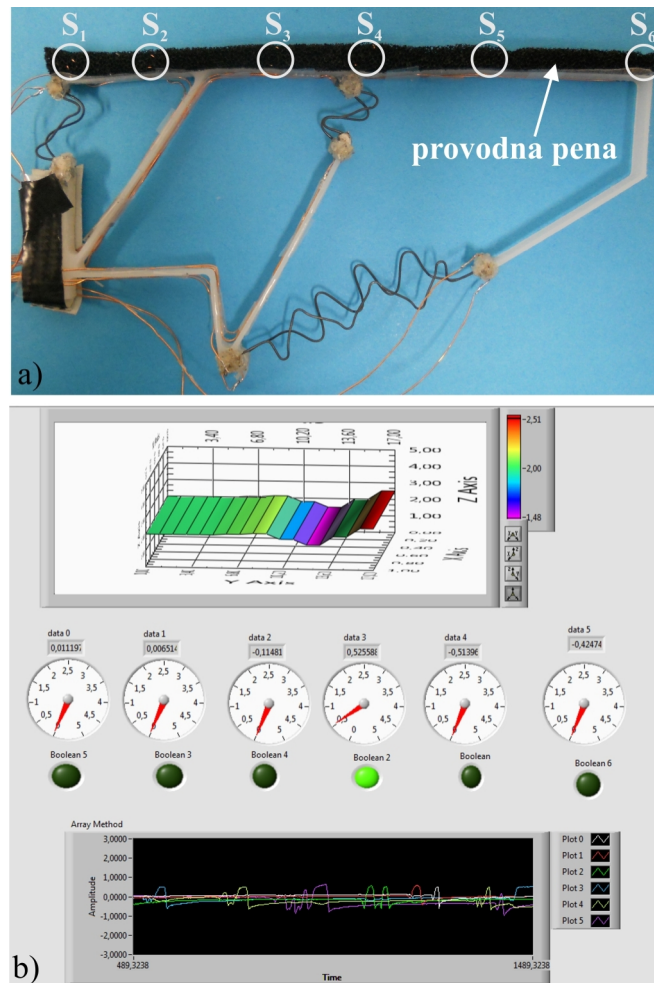
slika 6.7. Detekcija napreznja na istezanje primenom senzora od provodne pene: a) formiranje senzora; b) istezanje senzora; c) promena električnog napona pri istezanju senzora

U narednom odeljku bice opisana primena razvijenih senzora od provodne pene kod adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice.

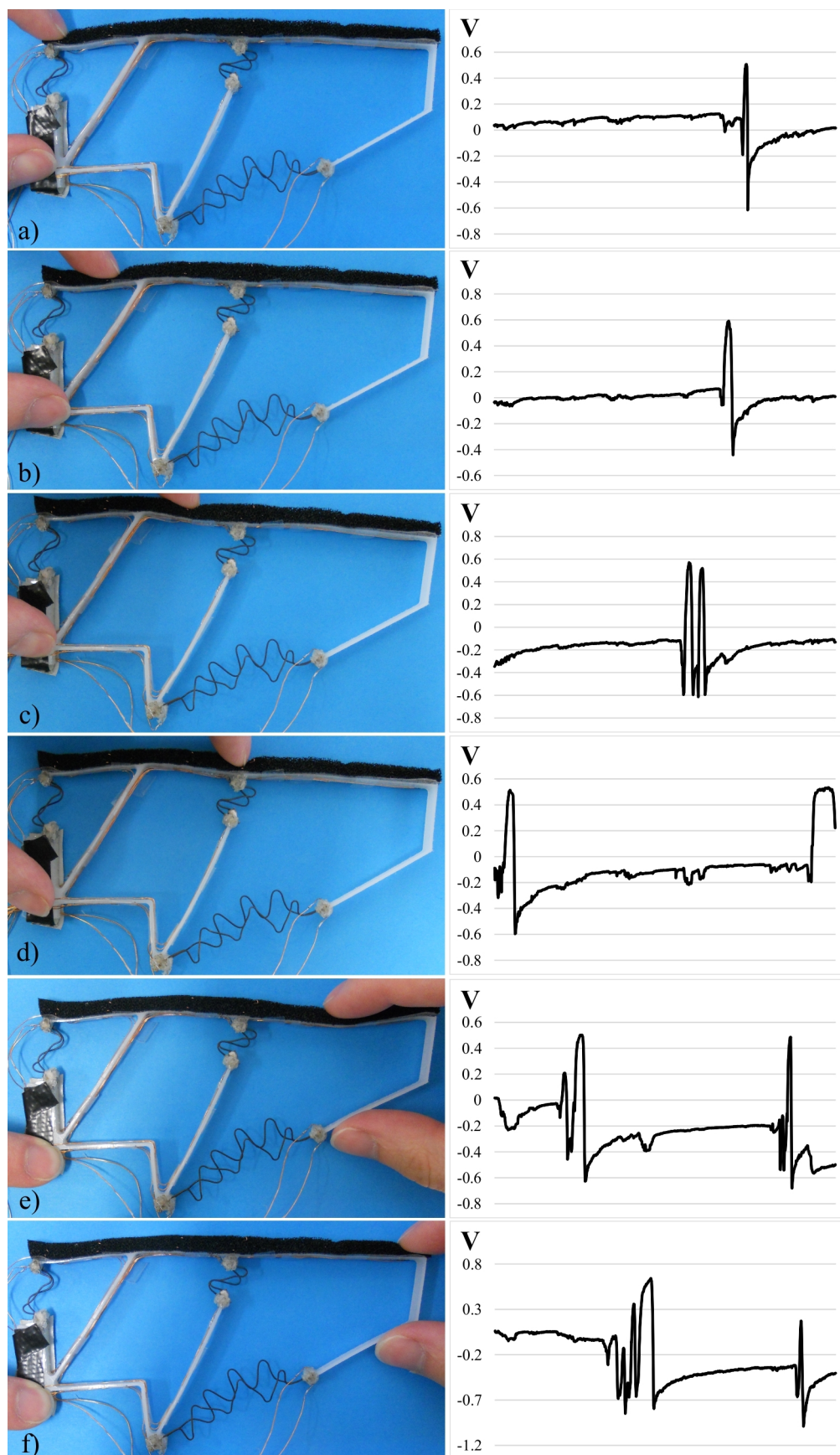
6.3. Ugradnja senzora od provodne pene u strukturu adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine

Kao što je bilo reči u uvodnom odeljku, da bi adaptivni gipki sistem mogao da detektuje dejstvo spoljašnjih sila, potrebno je ugraditi senzore duž cele radne površine gipkog sistema. Razvijeni senzori od provodne pene (vidi odeljak 6.2.) bili bi pogodni za ovakvu primenu pošto bi omogućili gipkom sistemu da detektuje pritisno opterećenje na svojoj radnoj površini.

Provodna pena je postavljena duž cele radne površine razvijenog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice (slika 6.8.a). Spoj provodne pene i radne površine ostvaren je dvoslojnom samolepljivom trakom. Parovi bakarnih žica su umetnuti u provodnu penu na 6 različitih lokacija kako bi gipki sistem mogao da ostvari detekciju pritisnog opterećenja u 6 različitih tačaka na radnoj površini (slika 6.8.a); u disertaciji je izabrano 6 tačaka samo radi demonstracije principa detekcije. Gipki sistem može da ostvari detekciju pritisnog opterećenja i u bilo kojoj drugoj tački duž radne površine ukoliko se na mestu detekcije postavi odgovarajući par bakarnih žica. Na ovaj način je u stvari formirano 6 senzora od provodne pene, koji su preko odgovarajućih Vitstonovih mostova (po jedan za svaki senzor), povezani sa akvizicionom karticom DAQU NIUSB6363 (slika 6.2.b). U programskom paketu *LabView*-u je napravljena odgovarajuća virtuelna instrumentacija prikazana na slici 6.8.b. Promena električnog napona vizuelno je prikazana uz pomoć odgovarajuće površine koja menja oblik kada na senzor dejstvuje pritisno opterećenje. Pored ovoga, postavljeni su i odgovarajući indikatori u vidu led dioda, koji se pale kada dođe do detekcije pritisnog opterećenja (slika 6.8.b). Detekcija pritiska je ostvarena tako što je usvojena granična vrednost električnog napona U_g , iz opsega promene napona senzora $0 \text{ V} < U_g < 2 \text{ V}$, pri kojoj dolazi do detekcije pritisnog opterećenja; kada se pri deformaciji senzora dostigne vrednost promene električnog napona od $U_g=0.3 \text{ V}$, to znači da je došlo do detekcije pritisnog opterećenja.



slika 6.8. a) Formiranje adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i sensorima od provodne pene (mogu da detektuju pritisno opterećenje u šest tačaka radne površine); b) virtuelna instrumentacija za merenje i akviziciju podataka [293]

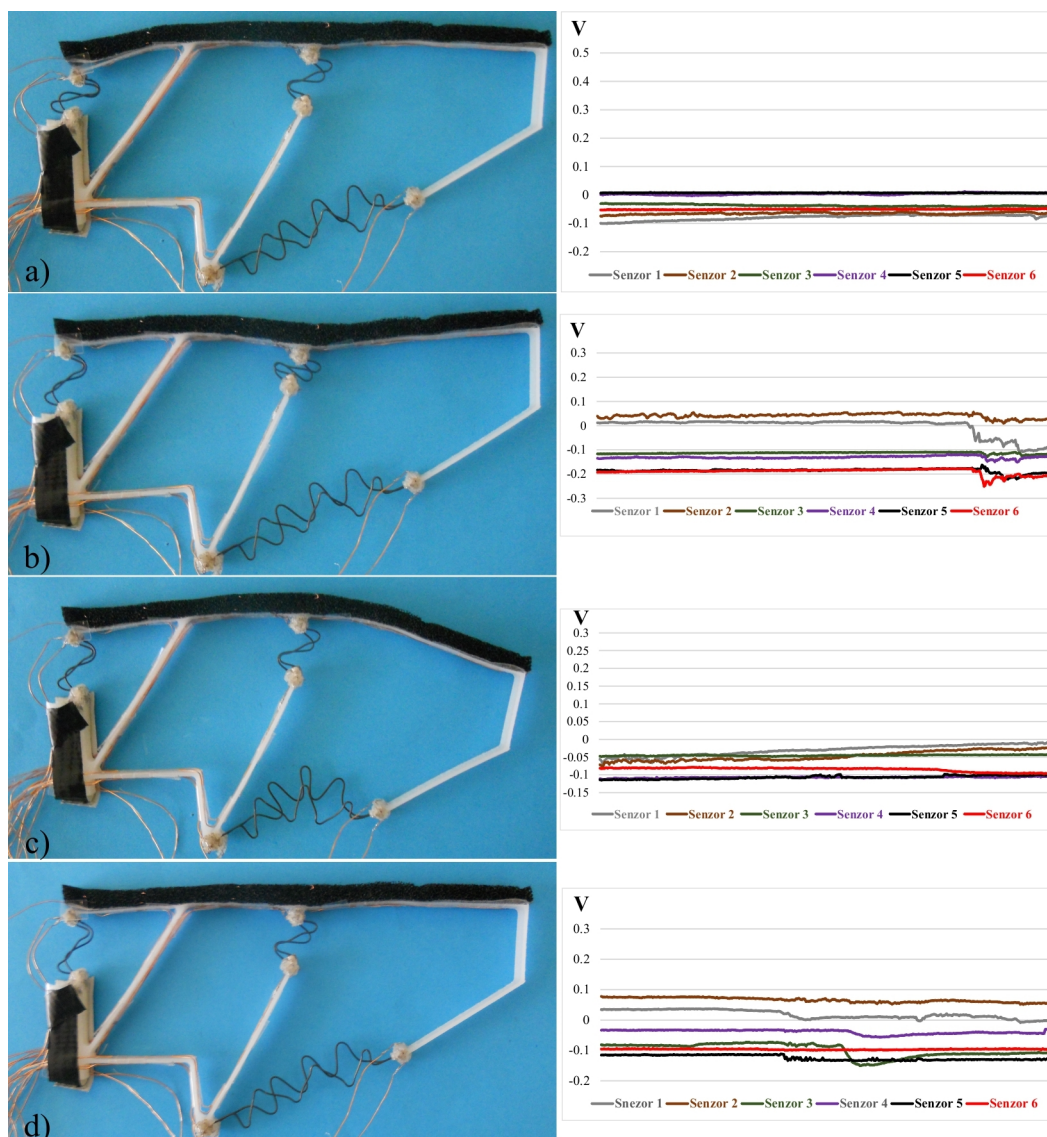


slika 6.9. Detekcija pritiskog opterećenja u različitim tačkama na radnoj površini adaptivnog gipkog sistema i rezultati promene električnog napona pri dejstvu pritiskog opterećenja u tački: a) 1; b) 2; c) 3; d) 4; e) 5; f) 6

Na slici 6.9., prikazane su promene napona pri dejstvu pritisknog opterećenja u svakoj od tačaka detekcije na radnoj površini gipkog sistema. Na osnovu rezultata sa slike 6.9. može se uočiti da pri dejstvu pritiskne sile dolazi do promene napona odnosno do detekcije pritisknog opterećenja. Ovo znači da gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i ugrađenim sensorima od provodne pene, može da detektuje pritiskno opterećenje u svih 6 tačaka detekcije na radnoj površini.

Da bi se ispitalo da li senzori od provodne pene generišu promenu električnog napona i pri promeni oblika radne površine, svaki od aktuatora je aktiviran posebno, pri čemu je merena promena napona svih senzora, pri aktivaciji svakog od aktuatora. Rezultati su prikazani na slici 6.10. Analizom rezultata može se zaključiti da pri promeni oblika radne površine, senzori od provodne pene ne generišu značajne promene električnog napona odnosno da deformacija radne površine ne utiče na rad senzora koji bi trebali da detektuju samo pritiskno opterećenje; pri deformaciji radne površine dolazi do male promene električnog napona, čija je vrednost ispod granice detekcije pritisknog opterećenja. Ovo znači da gipki sistem može da detektuje pritiskno opterećenje i pri promeni oblika radne površine.

Na ovaj način je razvijen adaptivni gipki sistem koji može da upravlja oblikom svoje radne površine, sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i ugrađenim sensorima od provodne pene.



slika 6.10. Provera uticaja promene oblika radne površine na rad senzora za detekciju pritisknog opterećenja, kada je aktivan: a) aktuator 1 (na skupljanje); b) aktuator 2 (na skupljanje); c) aktuator 3 (na skupljanje); d) aktuator 2a (na istežanje)

6.4. Razvoj senzora "veštačke kože" od kompozita silikona i provodne pene

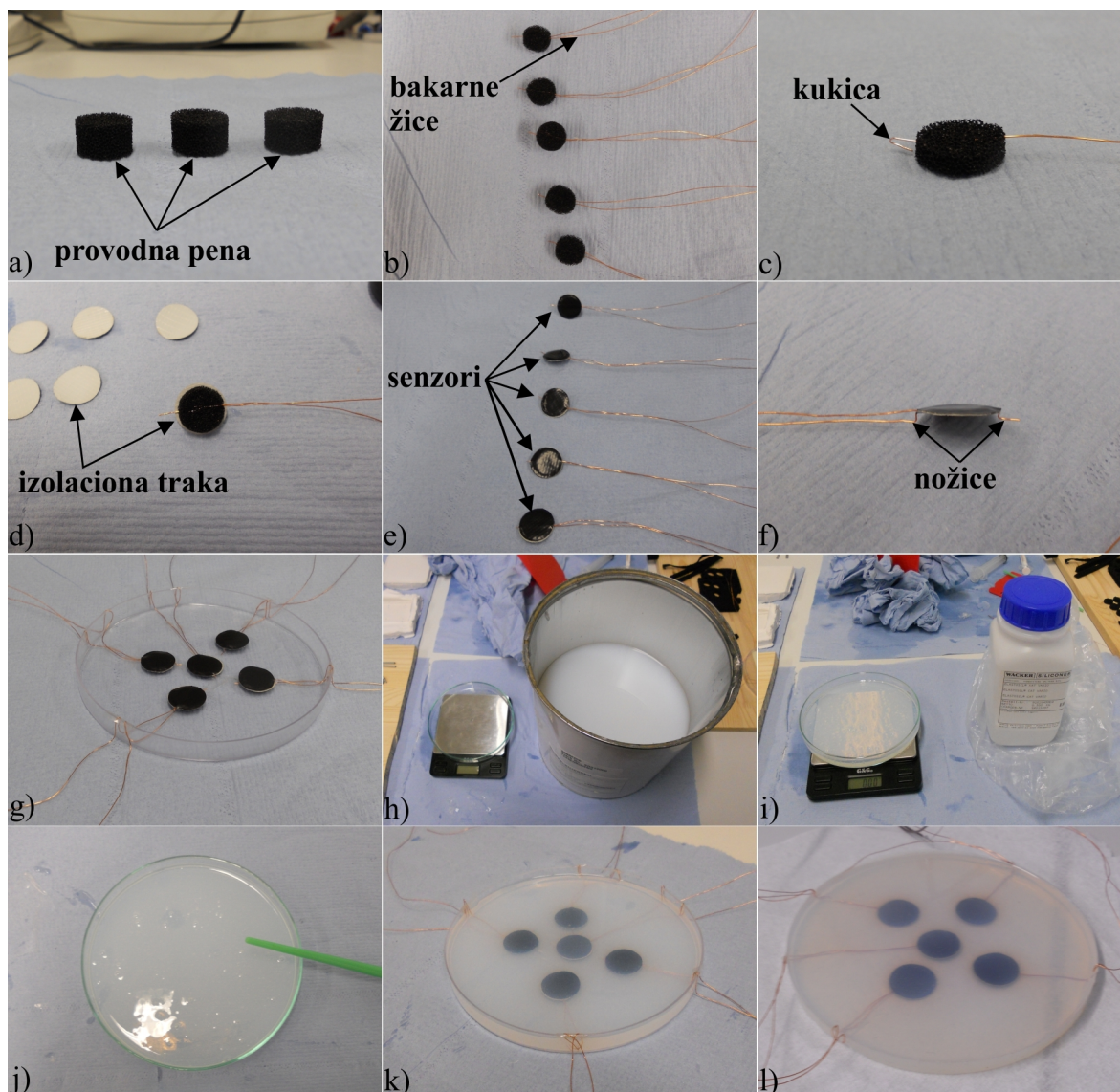
Senzori od provodne pene mogu se iskoristiti i za razvoj senzora "veštačke kože". Provodnu penu je moguće ugraditi u neki elastični materijal (npr. silikonsku gumu) kako bi se dobio elastični kompozit (u vidu kože). Kompozit silikona i provodne pene bi imao svojstva elastičnog materijala dok bi u isto vreme mogao i da detektuje pritiskno opterećenje. Ovakvi senzori bi imali primenu u različitim oblastima robotike, npr.

- za detekciju kontakta robotskih hvatača sa predmetom kojim se manipuliše,

- kao koža humanoidnih robota,
- kod različitih biološki inspirisanih robota i u
- drugim sistemima gde je potrebno detektovati pritisno opterećenje.

Osnovni cilj je razvoj senzora koji bi mogli da detektuju pritisno opterećenje u više tačaka. U okviru rada na ovoj disertaciji razvijen je kompozit silikona i provodne pene odnosno senzor "veštačke kože" koji može da detektuje pritisno opterećenje u 5 tačaka. Procedura izrade senzora prikazana je na slici 6.11. Najpre je oformljeno (izrezano) 5 komada provodne pene cilindričnog oblika (slika 6.11.b), dimenzije komada provodne pene od kojih će senzori biti formirani su: Ø6 mm i debljina 4 mm. Senzorski elementi od provodne pene formirani su umetanjem para bakarnih žica u strukturu pene (slika 6.11.b), pri čemu su žice postavljene paralelno jedna drugoj tako da obe leže u ravni deformacije senzora. Krajevi žica su savijeni u vidu kukica (slika 6.11.c) kako bi se osiguralo da ne dođe od aksijalnog pomeranja žice odnosno njenog izvlačenja iz strukture pene. Pri formiranju kompozita silikona i provodne pene, silikon je inicijalno u tečnom stanju, da bi nakon određenog vremena došlo do njegovog očvršćavanja. Ukoliko bi se formirani senzori od provodne pene ugradili u silikon koji je u tečnom stanju, šupljine unutar pene bi se ispunile silikonom, pa senzori ne bi više imali isti opseg promene napona (otpornost senzora ispunjenih silikonom bila bi suviše velika pa bi promena napona bila suviše mala). Kako bi se ovo sprečilo, senzorske elemente smo obložili izolacionom trakom (slika 6.11.d). Izolaciona traka je kružnog oblika, većeg prečnika od prečnika senzorskog elementa. Zatim je traka nalepljena na obe površine senzorskih elemenata; pri tome treba senzorski element držati pritisnut kako bi se ostvario dobar spoj krajeva izolacione trake i kako bi se eliminisale šupljine kroz koje bi silikon mogao da uđe u strukturu senzorskog elementa (slika 6.11.e). Pri formiranju kompozita senzora i silikona, potrebno je fiksirati senzorske elemente u odgovarajućem položaju, na određenoj dubini u samom silikonu. U tu svrhu je jedna od bakarnih senzora savijena tako da formira odgovarajući držač senzora u vidu nožica (slika 6.11.f). Ovako formirani senzorski elementi su zatim postavljeni u odgovaraću posudu i fiksirani nožicama i lepljivom trakom za dno posude (slika 6.11.g). Kao silikon za izradu senzora "veštačke kože", korišćen je dvokomponentni silikon firme *WACKER*. Silikon je formiran mešanjem **A** komponente (silikona) - *vario 15* (slika 6.11.h) i **B** komponente (silikona) -*M 4600* (slika 6.11.i), koje se nalaze u tečnom stanju; mešanjem ovih dveju komponenti, dolazi do očvršćavanja silikona. Ovako pripremljena smeša (slika 6.11.j) se zatim sipa u posudu sa sensorima tako da senzori budu u potpunosti prekriveni silikonom, sa

svih strana (slika 6.11.k). Nakon vremenskog perioda od 2 h dolazi do potpunog očvršćavanja silikona i formiranja kompozita silikona i provodne pene (slika 6.11.l).

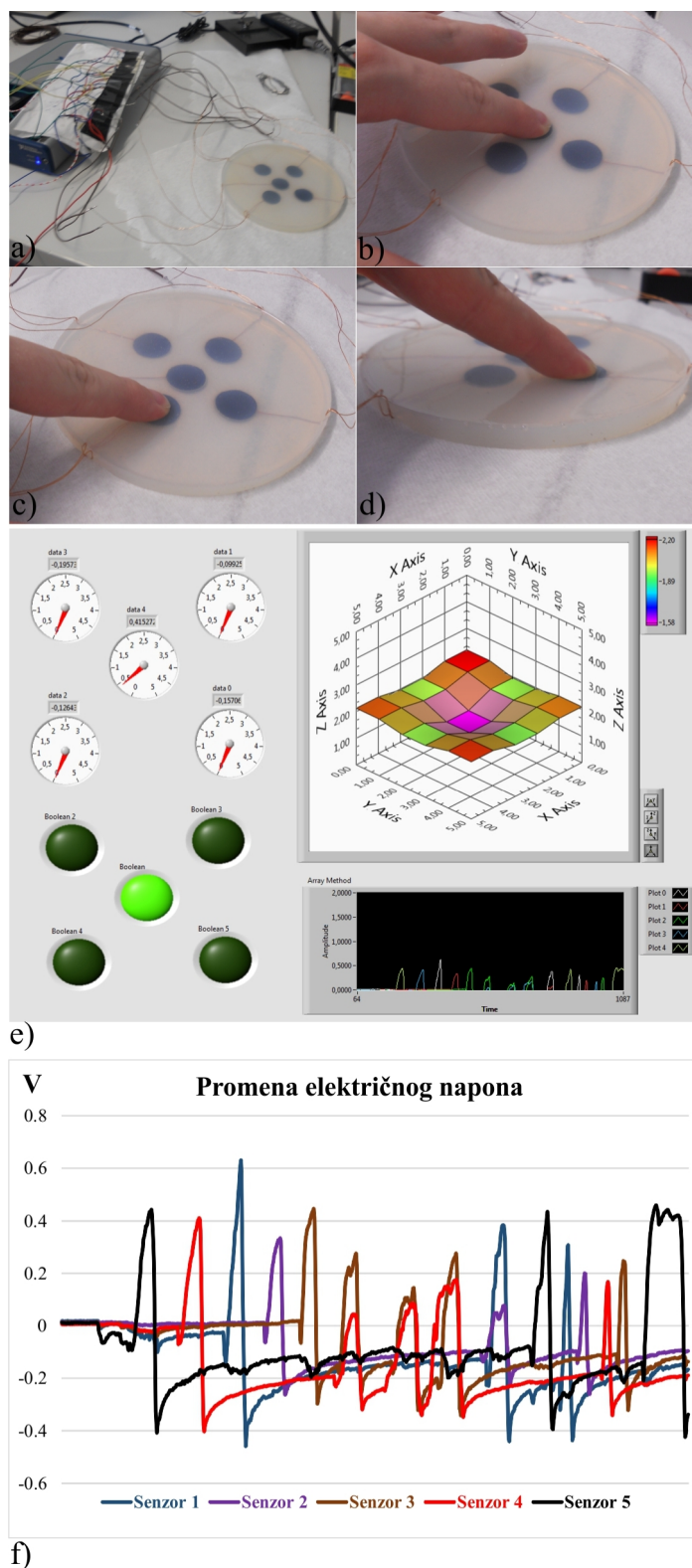


slika 6.11. Izrada senzora od kompozita silikona i provodne pene: a) komadi provodne pene, cilindričnog oblika; b) umetanje parova bakarnih žica u provodnu penu; c) formiranje kukice za eliminisanje aksijalnog pomeranja žice; d) lepljenje izolacione trake na senzorske elemente radi osiguranja od prodiranja silikona; e) senzorski elementi obloženi izolacionom trakom; f) formiranje držača u vidu nožice; g) fiksiranje senzora za dno posude; h) silikon u tečnom stanju – komponenta A; i) silikon – komponenta B; j) mešanje komponenata A i B silikona; k) senzori prekriveni tečnim silikonom; l) senzor od kompozita silikona i provodne pene

Na ovaj način je formiran odgovarajući senzor od kompozita silikona i provodne pene, koji bi mogao da detektuje pritisno opterećenje u 5 različitih tačaka (slika 6.12.). Kako bi se

ispitala funkcionalnost senzora odnosno da li senzor detektuje pritisno opterećenje, senzor je preko Vitstonovih mostova povezan sa akvizicionom karticom (slika 6.12.a). U *LabViewi*-u je formirana odgovarajuća virtuelna instrumentacija, pri čemu je promena napona vizuelno prikazana u vidu odgovarajuće površine koja menja oblik pri promeni električnog napona (slika 6.12.e). Pored ovoga, postavljeni su odgovarajući indikatori u vidu led dioda koje se pale kada dođe do detekcije pritisnog opterećenja (granična vrednost detekcije pritisnog opterećenja iznosi $\Delta U_g = 0.5V$). Pritiskom prsta na senzor, na lokaciji senzorskih elemenata ispitana je detekcija pritisnog opterećenja u odgovarajućoj tački (slika 6.12.b, slika 6.12.c, slika 6.12.d). Rezultati merenja promene napona za slučaj pojedinačnog dejstva pritisnog opterećenja u svakoj od 5 tačaka, prikazani su na slici 6.12.f; dejstvo pritisnog opterećenja realizovano je ciklično. Kao što se može videti sa slike 6.12., pri dejstvu pritisnog opterećenja u različitim tačkama dolazi do promene električnog napona. Sa slike 6.12.e može se videti i da dolazi do aktiviranja indikacionih led dioda, što znači da je senzor detektovao pritisno opterećenje. Nakon prestanka dejstva deformacije senzor se, zahvaljujući elastičnosti silikona, vraća u svoj početni položaj, a samim tim i vrednost električnog napona opada na približno istu vrednost kao i pre deformacije.

Na osnovu prethodne analize, možemo reći da senzori razvijeni od kompozita silikona i provodne pene mogu da detektuju pritisno opterećenje odnosno da se mogu primeniti kao senzori "veštačke kože".



slika 6.12. Senzor od kompozita silikona i provodne pene za detekciju pritisknog opterećenja u 5 tačaka: a) povezivanje senzora sa akvizicionom karticom; b) dejstvo pritisknog opterećenja na lokaciju senzora 1; c) dejstvo pritisknog opterećenja na lokaciju senzora 2; d) dejstvo pritisknog opterećenja na lokaciju senzora 3; e) virtualna instrumentacija za merenje promene električnog napona; f) rezultati promene električnog napona pri dejstvu pritisknog opterećenja na senzor, u 5 različitim tačaka

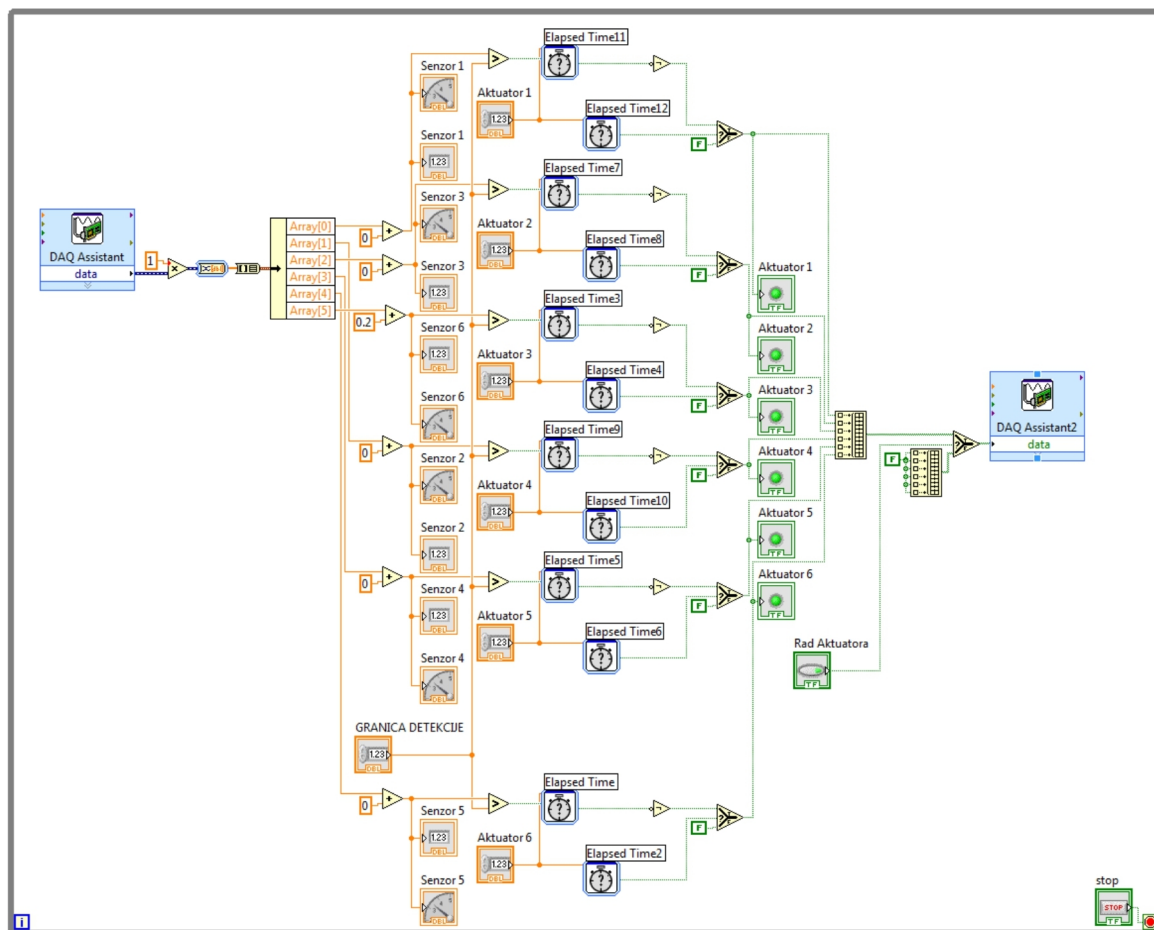
7. Razvoj upravljačkog algoritma adaptivnog gipkog sistema

U prethodnim odeljcima je bilo reči o razvoju adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine. Za razvijeni adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i ugrađenim sensorima od provodne pene, potrebno je, međutim, razviti i odgovarajući algoritam upravljanja (upravljanje) odnosno kontroler. Primenom ovog algoritma upravljanja gipki sistem bi na osnovu signala/informacija dobijenih sa senzora mogao da odluči koji aktuator da aktivira kako bi gipki sistem ostvario odgovarajuću promenu oblika radne površine i prilagodio se uslovima sredine u kojoj se nalazi. Razvijeni gipki sistem poseduje strukturnu adaptivnost (vidi odeljak 3.7.4.), a razvojem odgovorajućeg upravljanja gipki sistem bi posedovao određenu vrstu "inteligencije" jer bi mogao da se snađe u novim i nepredviđenim okolnostima. Razvojem upravljačkog algoritma gipki sistem bi postao adaptivan, potpuno autonoman i nezavisan od korisnikovog odlučivanja.

Razvoj algoritma upravljanja odnosno kontrolera zavisi od konkretne primene gipkog sistema. U disertaciji je razvijen algoritam upravljanja adaptivnog gipkog sistema (on/off upravljanje), kako bi se demonstrirao princip rada odnosno mogućnosti adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima i sensorima, koja bi posedovala i odgovarajuću "inteligenciju"; ovaj algoritam nije razvijen za neku konkretnu aplikaciju već samo za demonstraciju mogućnosti adaptivnog gipkog sistema sa upravljačkim algoritmom. Sva merenja i eksperimenti realizovani su u Laboratoriji za Mehanizme na Tehničkom Univerzitetu u Ilmenau, Nemačka.

Upravljanje gipkim sistemom je razvijeno u programskom paketu *LabView*-u; algoritam upravljanja prikazan je na slici 7.1.a. Upravljanje je razvijeno tako da kada senzor S_1 detektuje pritisno opterećenje, aktivira se aktuator 1 (na skupljanje), kada senzor S_3 detektuje pritisno opterećenje, aktivira se aktuator 2 (na skupljanje), a kada senzor S_6 detektuje pritisno opterećenje dolazi do aktiviranja aktuatora 3 (na skupljanje). Takođe, kada senzori S_1 i S_3 detektuju pritisno opterećenje, aktiviraju se aktuatori 1 i 2, kada senzori S_1 i S_6 detektuju pritisno opterećenje, aktiviraju se aktuatori 1 i 3, kada senzori S_3 i S_6 detektuju pritisno opterećenje, aktiviraju se aktuatori 2 i 3, a ukoliko senzori S_1 , S_3 i S_6 detektuju pritisno

opterećenje dolazi do aktivacije sva tri aktuatora. Algoritam upravljanja je tako formiran, da nakon određenog vremenskog intervala dolazi do deaktivacije aktuatora odnosno aktuatori su aktivni samo određeni vremenski interval (od 5 do 10 s, zavisno od aktuatora).



a)



b)

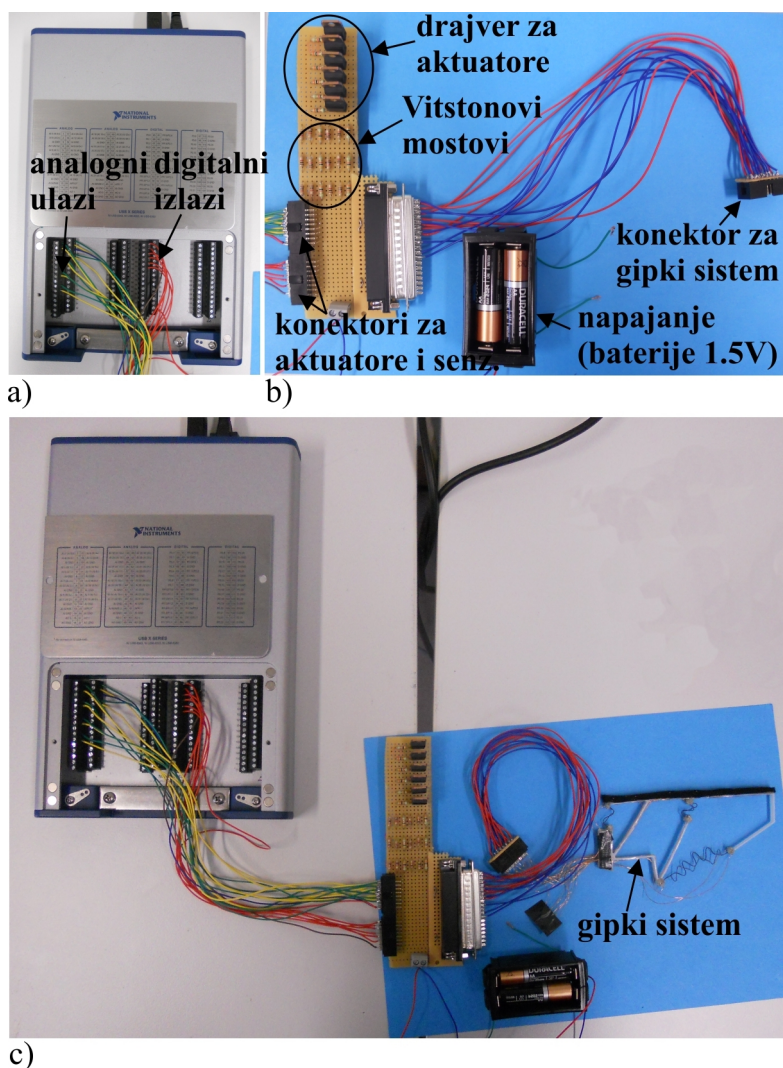
slika 7.1. a) Algoritam upravljanja adaptivnom gipkom strukturom sa aktuatorima od nitinol žice i senzorima od provodne pene, razvijen u programskom paketu *LabView*; b) odgovarajuća virtualna instrumentacija

Kako se u svim prethodno spomenutim slučajevima aktiviraju aktuatori na skupljanje, radna površina bi i nakon prestanka dejstva aktuatora ostala u deformisanom položaju (vidi poglavlje 5). Kako bi se realizovalo vraćanje radne površine u početni, nedeformisani položaj, algoritam upravljanja je formiran tako da kada senzor S_2 detektuje pritisno opterećenje, aktivira se aktuator 1a (na istežanje), kada senzor S_4 detektuje pritisno opterećenje, aktivira se aktuator 2a (na istežanje), a kada senzor S_5 detektuje pritisno opterećenje, dolazi do aktivacije aktuatora 3a (na istežanje); aktuatori 1a, 2a i 3a pri istežanju realizuju povratni radni hod odnosno vraćanje radne površine u početni položaj. Na primer, pri aktivaciji aktuatora 1 (na skupljanje) koji realizuje pomeranje izvršne tačke radne površine u jednom smeru (smeru skupljanja aktuatora), nakon što je senzor S_2 detektovao pritisno opterećenje, aktivira se i aktuator 1a koji se isteže i realizuje povratni radni hod izvršne tačke, a samim tim i vraćanje radne površine u položaj pre deformacije. Isto važi i za ostale aktuatore u strukturi.

Pored algoritma upravljanja, u programskom paketu *LabView* je razvijena i virtuelna instrumentacija prikazana na slici 7.1.b. Za svaki senzor formiran je odgovarajući pokazivač koji prikazuje promenu električnog napona, kao i indikaciono svetlo u vidu led diode koja se pali kada senzor detektuje pritisno opterećenje. U odgovarajuće polje se unosi granična vrednost električnog napona; kada promena napona postane veća od ove granične vrednosti, senzor je detektovao pritisno opterećenje. Pored ovoga, za svaki aktuator u strukturi formirano je odgovarajuće polje u koje je moguće uneti dužinu trajanja aktivacije aktuatora (u sekundama). Formiran je, takođe, i odgovarajući sigurnosni prekidač "Rad Aktuatora" čijim gašenjem je, u slučaju potrebe, moguće deaktivirati sve aktuatore u strukturi.

Kao uređaj koji izvršava algoritam upravljanja, izabrana je akviziciona kartica DAQU NI6363 (slika 7.2.a) koja je povezana sa računarom na kome se izvršava odgovarajući program. Sensori od provodne pene su konektorom povezani preko Vitstonovih mostova (slika 7.2.b) na odgovarajuće analogne ulaze kartice (slika 7.2.a), dok je za aktuatore od nitinol žice razvijena dodatna elektronika koja služi kao drajver aktuatora (slika 7.2.b). Preko ovih drajvera aktuatori su povezani na odgovarajuće analogne izlaze kartice (slika 7.2.a). Za aktivaciju aktuatora odnosno kao napajanje za drajver korišćene su dve baterije napona 1.5 V (slika 7.2.b). Nakon povezivanja senzora i aktuatora gipkog sistema, sa akvizicionom karticom, preko odgovarajuće elektronike (slika 7.2.c), u *LabView*-u je inicirano izvršavanje algoritma upravljanja. Na slici 7.3. i slici 7.4. prikazano je ponašanje adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i ugrađenim sensorima od provodne pene, kada se na radnu površinu dejstvuje odgovarajućom pritisnom silom u tačkama u kojima se

vrši detekcija pritisknog opterećenja. Na primer, pri dejstvu pritisknog opterećenja na lokaciju senzora 6, dolazi do aktiviranja aktuatora 3 i promene oblika radne površine (slika 7.3.f), a pri dejstvu pritisknog opterećenja na lokaciju senzora 5, dolazi do aktivacije aktuatora 3a i vraćanja radne površine u početni, nedeformisani položaj. Isto važi i pri dejstvu pritisknog opterećenja na lokacije ostalih senzora na radnoj površini (slika 7.3. i slika 7.4.).

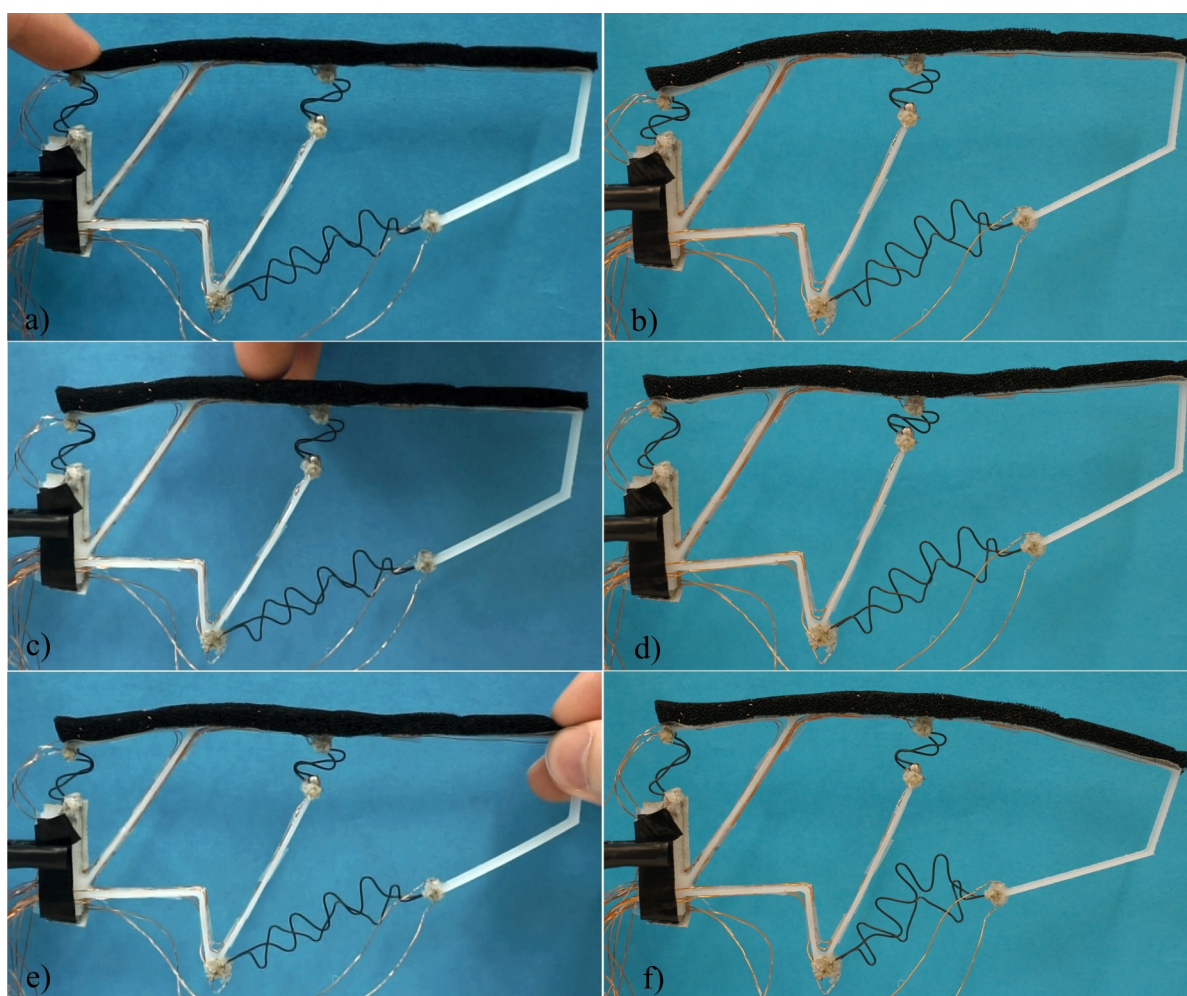


slika 7.2. a) Akviziciona kartica DAQU NI6363; b) elektronika (drajver i Vitstonovi mostovi) za povezivanje aktuatora i senzora adaptivnog gipkog sistema na digitalne izlaze i analogne ulaze akvizicione kartice; c) povezivanje adaptivnog gipkog sistema sa elektronikom i akvizicionom karticom

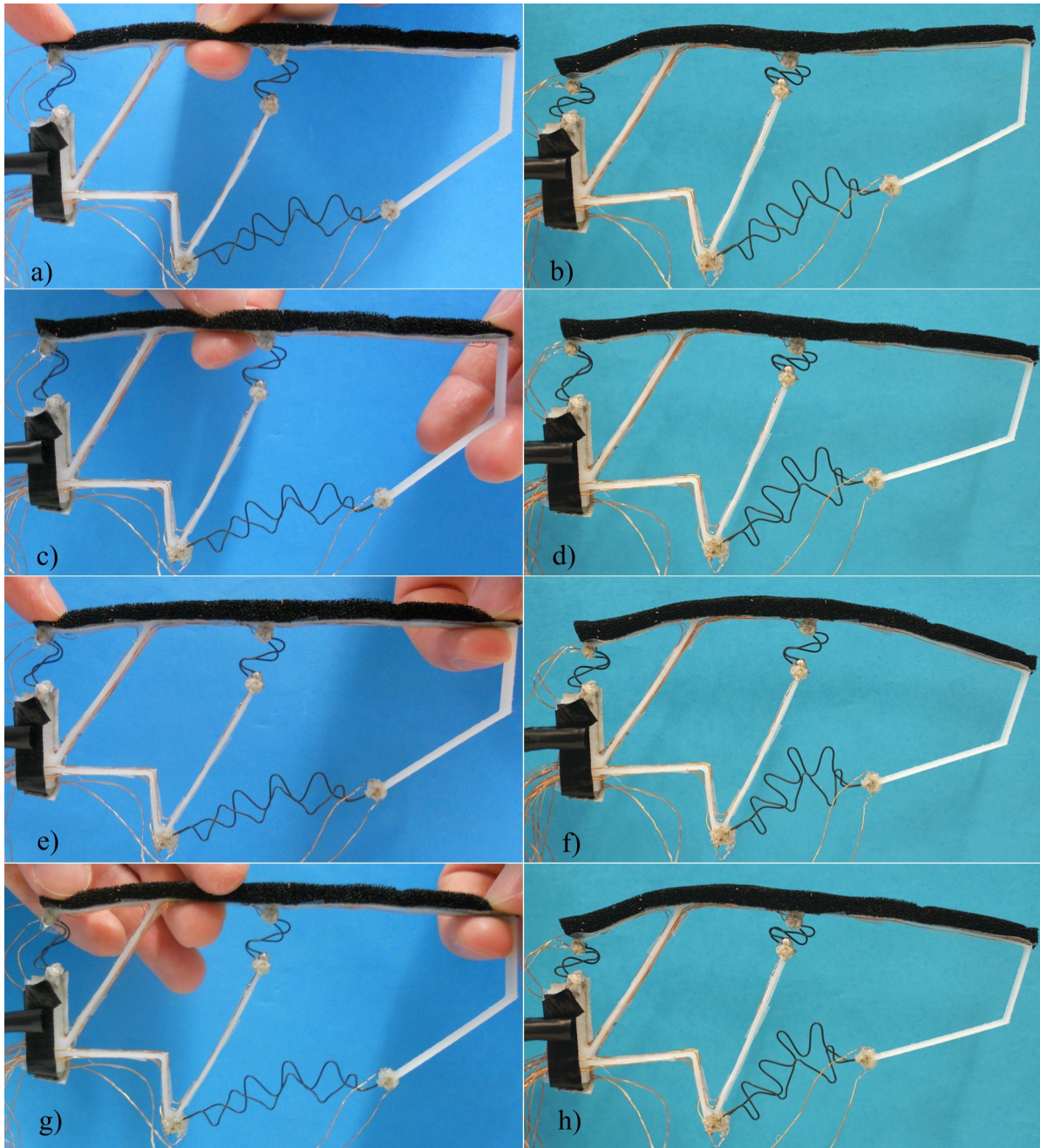
Na osnovu eksperimentalne provere rada adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i sensorima od provodne pene, može se zaključiti da gipki sistem

realizuje razvijeni algoritam upravljanja odnosno da realizuje upravljanje oblikom radne površine prema datom algoritmu.

U slučaju razvijenog adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima i sensorima, moguće je razviti različite upravljačke algoritme. Moguće je razviti i više upravljačkih algoritama koji bi se izvršavali u zavisnosti od sredine u kojoj se nalazi gipki sistem ili u zavisnosti od njegove primene. Pored ovoga, moguće je razviti i naprednije upravljanje koje bi uključivalo i primenu veštačkih neuronskih mreža koje bi vodile ka razvoju inteligentnijeg adaptivnog gipkog sistema. Razvijeni adaptivni gipki sistem sa odgovarajućim upravljanjem bi imao mnoštvo različitih primena.



slika 7.3. Ponašanje adaptivnog gipkog sistema pri korišćenju razvijenog upravljačkog algoritma: a) detekcija pritisknog opterećenja u tački 1; b) aktivacija aktuatora 1; c) detekcija pritisknog opterećenja u tački 3; d) aktivacija aktuatora 2; e) detekcija pritisknog opterećenja u tački 6; f) aktivacija aktuatora 3



slika 7.4. Ponašanje adaptivnog gipkog sistema pri korišćenju razvijenog upravljačkog algoritma: a) detekcija pritisknog opterećenja u tačkama 1 i 3; b) aktivacija aktuatora 1 i 2; c) detekcija pritisknog opterećenja u tačkama 3 i 6; d) aktivacija aktuatora 2 i 3; e) detekcija pritisknog opterećenja u tačkama 1 i 6; f) aktivacija aktuatora 1 i 3; g) detekcija pritisknog opterećenja u tačkama 1, 3 i 6; h) aktivacija aktuatora 1, 2 i 3

8. Zaključak

U ovoj disertaciji razvijen je adaptivni gipki sistem odnosno adaptivna gipka struktura sa ugrađenim aktuatorima i sensorima koja može da upravlja oblikom svoje radne površine. Ugradnjom aktuatora unutar gipke strukture, sistemu je omogućeno da ostvari više složenih deformacija svoje radne površine što znači da sistem poseduje strukturnu adaptivnost, a ugradnjom senzora je sistemu omogućeno i da detektuje promene u svojoj okolini i primenom odgovarajućeg upravljanja da postane adaptivan - "inteligentan". Aktuatori i senzori ovog gipkog mehanizma predstavljaju neodvojivi deo gipke strukture – gipkog mehanizma i deformišu se kao njegovi strukturni elementi, slično kao kod bioloških sistema. Mnoštvo primena moglo bi imati koristi od razvijenog gipkog sistema uključujući: adaptivne antene, adaptivna ogledala, krila letelice, hirurške instrumente, hvatače i mnoštvo drugih aplikacija u biomedicini i robotici; postojeća rešenja struktura koje mogu da menjaju oblik svoje radne površine složena su za izradu, izuzetno su skupa, nisu skalabilna, razvijena su samo za jednu konkretnu primenu, mogu da ostvare samo jedan ili dva oblika radne površine, a i ne postoji jedinstvena metodologija sinteze ovakvih struktura.

Razvoj adaptivnog gipkog sistema baziran je na sintezi gipkih mehanizama pa je u disertaciji najpre razvijen odgovarajući optimizacioni algoritam koji automatski generiše optimalne topologije gipkih mehanizama za postavljeni zadatak sinteze; kao optimizaciona metoda korišćeni su genetski algoritmi. Uspešnost algoritma da generiše odgovarajuća rešenja gipkih mehanizama prikazana je na primeru sinteze gipkog invertora pomeranja i gipkog mehanizama hvatača. Dobijena rešenja gipkih mehanizama realizuju zahteve postavljene zadatkom sinteze, ali, kao i sva rešenja dobijena aktuelnim postupcima optimizacije topologije, sadrže strukturne elemente koji se ukrštaju pa ovakva rešenja nije jednostavno izraditi konvencionalnim tehnologijama. Ukoliko bi ukrštene elemente izradili u istoj ravni i elemente kruto vezali u tački preseka, povećala bi se krutost i smanjila funkcionalnost gipkog mehanizma. Problem dobijanja rešenja sa ukrštenim strukturnim elementima, u literaturi je okarakterisan kao nedostatak aktuelnih postupaka optimizacije topologije, koji je teško prevazići. Upravo zbog ovog problema, u disertaciji je poboljšana

aktuelna metoda optimizacije tako što je razvijena metodologija za sintezu gipkih mehanizama koji neće sadržati elemente koji se ukrštaju. Nova metodologija sinteze demonstrirana je na primerima sinteze gipkog invertora pomeranja i gipkog mehanizma hvatača. Dobijena rešenja gipkih mehanizama ne sadrže elemente koji se ukrštaju, pri čemu je pokazano da rešenja bez preseka elemenata bolje realizuju zahteve postavljenje zadatkom sinteze u odnosu na rešenja gipkih mehanizama sa elementima koji se ukrštaju. Takođe je pokazano da je i primenom linearne MKE moguće dobiti rešenja gipkih mehanizama koja realizuju zadatak funkciju, što potvrđuju i izrađeni modeli mehanizama. Razvijeni optimizacioni algoritam može se koristiti za sintezu najrazličitijih gipkih mehanizama, u zavisnosti od postavke zadatka sinteze.

Uvođenjem aktuatora u proces sinteze moguće je razviti gipki sistem koji može da ostvari više različitih oblika svoje radne površine. Istovremenom sintezom topologije gipkog mehanizma i postavke aktuatora, pošto način na koji se formira topologija gipkog mehanizma utiče na izbor lokacije aktuatora i obrnuto – izbor postavke aktuatora utiče na formiranje optimalne topologije gipkog mehanizma, dobija se kao rezultat optimalna topologija gipkog mehanizma sa optimalnim izborom i postavkom aktuatora (tip, orijentacija, veličina i lokacija). Ovakav pristup sintezi struktura koje mogu da menjaju svoj oblik predstavlja jedinstvenu metodologiju sinteze.

Na osnovu razvijenog algoritma za sintezu gipkih mehanizama razvijen je i algoritam za sintezu adaptivnih gipkih sistema (u proces sinteze uključeni su i aktuatori), kod kojih se ne bi međusobno ukrštali kako strukturni elementi tako ni strukturni elementi sa aktuatorima (ovakva rešenja je jednostavnije fizički realizovati). Primenom ovog algoritma izvršena je sinteza adaptivnog gipkog sistema koji može da upravlja oblikom svoje radne površine i koji ne sadrži elemente koji se ukrštaju. Pored ovoga, cilj sinteze je bio i realizovati gipki sistem koji može da ostvari maksimalnu upravljivost radne površine sa minimalnim brojem aktuatora. Dobijeno rešenje adaptivnog gipkog sistema predstavlja optimalno rešenje za zadatak postavku zadatka sinteze, sa optimalno postavljenim aktuatorima u strukturi. Pokazano je da dobijeno rešenje adaptivnog gipkog sistema može da ostvari više različitih oblika radne površine sa tri ugrađena aktuatora, pri čemu je upravljivost radne površine vrlo visoka; aktivacijom pojedinačnih aktuatora, gipki sistem može da ostvari različite oblike svoje radne površine, pri čemu svaki aktuator primarno upravlja pomeranjem jedne izvršne tačke radne površine. Pored ovoga, pokazano je da istovremenom aktivacijom više aktuatora (različitim kombinacijama aktivnih aktuatora) gipki sistem može da ostvari i mnogo složenije

oblike svoje radne površine. Razvijeni optimizacioni algoritam može se koristiti za sintezu različitih gipkih sistema, u zavisnosti od tipa problema koji projektant želi da reši.

Na osnovu rešenja adaptivnog gipkog sistema dobijenog optimizacijom razvijen je i 3D model adaptivnog gipkog sistema (sa ugrađenim aktuatorima). Aktuatori su u 3D modelu predstavljeni tankim elastičnim elementima u obliku opruge, koje karakteriše aksijalna i savojna krutost; deformacijom ovih elemenata (njihovim istežanjem i skupljanjem) simulirano je dejstvo aktuatora. Sprovedena je numerička nelinearna MKE analiza ponašanja adaptivnog gipkog sistema kada se svaki od aktuatora isteže ili skuplja, kao i za slučaj kombinovanog dejstva aktuatora koji se istežu i koji se skupljaju. Rezultati pokazuju da razvijeni 3D model adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima može da realizuje različite oblike radne površine (poseduje strukturnu adaptibilnost). Sprovedena je i detaljna analiza upravljivosti radne površine 3D modela adaptivnog gipkog sistema. Pokazano je da gipki sistem može da realizuje visoku vrednost upravljivosti radne površine i pri relativno velikom pomeranju izvršnih tačaka radne površine. Iako je za dobijanje rešenja adaptivnog gipkog sistema, pri optimizaciji, korišćena linearna MKE, numeričkom nelinearnom analizom rada 3D modela adaptivne gipke strukture pokazano je da model gipkog sistema realizuje istu funkciju kao i rešenje dobijeno optimizacijom, pri čemu su ostvareni oblici radne površine veoma slični.

Mogućnost skaliranja adaptivnog gipkog sistema je takođe proverena. Rezultati pokazuju da projektant može lako da modifikuje strukturu razvijenog adaptivnog gipkog sistema tako da se koriste aktuatori različitog hoda, što nije slučaj sa postojećim rešenjima struktura koje mogu da menjaju svoj oblik.

Izrađen je i fizički prototip adaptivne gipke strukture sa ugrađenim aktuatorima (tanki elastični elementi u vidu opruga), u vidu monolitne strukture koja je i testirana. Na osnovu rezultata može se zaključiti da izrađeni fizički prototip realizuje istu funkciju kao i gipki sistem analiziran nelinearnom MKE odnosno kao i gipki sistem dobijen optimizacionim algoritmom.

Predstavljene su i dve potencijalne primene razvijenog adaptivnog gipkog sistema, kao adaptivnog gipkog hvatača i druga kao adaptivnog krila letilice. Pokazano je da adaptivni hvatač može da realizuje različite oblike svoje radne površine (površine kojom realizuje hvatanje predmeta) pa bi takav hvatač mogao da manipuliše predmetima različitog oblika. Pored ovoga, za različit hod aktuatora, adaptivni gipki hvatač može da realizuje hvatanje objekata različitih radijusa krivine. Takav hvatač može da prevaziđe ograničene mogućnosti postojećih krutočlanih hvatača ili gipkih hvatača realizovanih postupkom koji ne uključuje

postavku aktuatora u proces sinteze. Ovakva vrsta hvatača bi mogla naći primenu kako u medicini, gde postoji opasnost od oštećenja tkiva ili organa pri operaciji, tako i u industrijskoj robotici gde bi mogao učiniti robote adaptivnijim u odnosu na uslove okoline u kojima rade.

Druga predstavljena potencijalna primena razvijenog adaptivnog gipkog sistema za upravljanje oblikom radne površine, kao adaptivnog krila letilice, inspirisana je promenom profila krila ptica. Pokazano je da adaptivno krilo letilice može da menja svoj oblik posredstvom 6 ugrađenih aktuatora, odnosno da realizuje različite oblike svoje radne površine. Takvo krilo bi moglo, promenom svoga oblika, da prilagodi let letilice promenljivim aerodinamičkim uslovima okoline kako bi realizovalo optimalan režim leta.

Posebna pažnja u disertaciji je posvećena razvoju novih aktuatora i senzora koji bi mogli jednostavno da se ugrade u strukturu gipkog sistema; komercijalno dostupni aktuatori i senzori nisu pogodni za primenu kod razvijenog adaptivnog gipkog sistema. Aktuatori su razvijeni korišćenjem legura koje pamte oblik odnosno primenom nitinol žice koja pri zagrevanju na određenu temperaturu (temperatura transformacije) ispoljava svojstvo vraćanja u svoj zapamćeni oblik. Razvijeno je i izrađeno 6 aktuatora, od kojih se tri aktuatora pri aktivaciji skupljaju, a druga tri istežu. Svi ovi aktuatori mogu da realizuju upravljiv radni hod na svojim krajevima. Pokazano je da su razvijeni aktuatori pogodni za aktuatorsku primenu kod gipkih sistema, ali i da imaju i mnoge druge prednosti. Razvijeni aktuatori mogu da ostvare relativno veliki radni hod u odnosu na njihove dimenzije što predstavlja i njihovu glavnu prednost u odnosu na postojeće aktuatore. Antagonističkim dejstvom aktuatora na istežanje i aktuatora na skupljanje moguće je prevazići nedostatak nitinol žica da pri aktivaciji realizuju radni hod samo pri vraćanju u svoj zapamćeni oblik; ugradnjom odgovarajućih aktuatora na istežanje i aktuatora na skupljanje, na istim lokacijama, moguće je ostvariti upravljiv radni hod u oba smera. Kako većina aktuatora treba da realizuje linearan radni hod u aksijalnom pravcu, ovakvi aktuatori se mogu primeniti i kao aktuatori u drugim sistemima gde je potrebno ostvariti odgovarajuće pogonsko pomeranje. Opisana je i odgovarajuća procedura za razvoj ovakvih aktuatora pri čemu se ona može koristiti za razvoj različitih aktuatora od nitinol žice. Ovi aktuatori su zatim ugrađeni u strukturu razvijenog adaptivnog gipkog sistema. Izvršena je analiza rada i pokazano da ovakav gipki sistem može da ostvari visoku vrednost upravljivosti svoje radne površine, pri čemu je i pomeranje izvršnih tačaka relativno veliko. Analiza upravljivosti je pokazala i da je pogodnim izborom aktuatora moguće ostvariti upravljivost radne površine sistema koja je i veća od upravljivosti radne površine teorijskog gipkog sistema, dobijenog optimizacionim algoritmom. Aktivacijom aktuatora koji se skupljaju ili aktuatora koji se istežu, kao i njihovim simultanim

delovanjem, razvijeni gipki sistem može da ostvari najrazličitije oblike radne površine. Ovim je u stvari pokazano da optimizacioni algoritam, razvijen u disertaciji, daje rešenje adaptivnog gipkog sistema koji i sa realnim aktuatorima realizuje zahteve postavljene zadatkom sinteze.

Senzori za primenu kod adaptivnog gipkog sistema su razvijeni od materijala - provodne pene koja ispoljava svojstvo da pri deformaciji menja svoju električnu otpornost. Senzorski elementi su formirani tako da pri dejstvu pritisknog opterećenja dolazi do promene električnog napona, pa se ovi senzori mogu iskoristiti za detekciju pritisknog opterećenja. Formirani su senzorski elementi različitih oblika i dimenzija i sprovedena su odgovarajuća merenja promene električnog napona. Na osnovu rezultata ispitivanja ovih senzorskih elemenata može se zaključiti da se razvijeni senzori od provodne pene mogu iskoristiti za detekciju pritisknog opterećenja, pri čemu je maksimalna vrednost promene električnog napona približno ista za sve formirane senzorske elemente. Ovakvi senzori se mogu iskoristiti i za detekciju pritisknog opterećenja u više tačaka; senzore od provodne pene je moguće tako formirati da detektuju i istežanje. Ovakvi senzorski elementi su postavljeni duž cele radne površine adaptivnog gipkog sistema sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice. Senzori su u izrađeni model gipkog sistema ugrađeni tako da sistem može da detektuje pritiskno opterećenje u 6 različitih tačaka duž radne površine, samo radi demonstracije principa detekcije. Sprovedena su odgovarajuća merenja i ispitivanja rada ugrađenih senzora, a rezultati su pokazali da ovakav adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i sensorima od provodne pene može da detektuje pritiskno opterećenje u navedenih 6 tačaka detekcije na radnoj površini. Pokazano je i da senzori od provodne pene mogu da se deformišu zajedno sa radnom površinom i da pri tome ne generišu "lažne" signale, što predstavlja jednu od prednosti ovakvih senzora.

Daljom nadgradnjom senzora od provodne pene, razvijen je i senzor "veštačke kože" od kompozita silikona i provodne pene. Ovakav senzor ima svojstva elastičnog materijala koji može da detektuje pritiskno opterećenje. Senzor "veštačke kože" je izrađen tako da može da detektuje pritiskno opterećenje u 5 različitih tačaka. Sprovedena je odgovarajuća analiza rada ovakvog senzora, a rezultati analize su pokazali da senzor od kompozita silikona i provodne pene može da detektuje pritiskno opterećenje i da se primeni kao senzor "veštačke kože". Ovakvi senzori bi imali primenu u različitim oblastima robotike, gde je potrebno detektovati kontakt sa nekim objektom.

Za razvijeni adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i sensorima od provodne pene razvijen je i odgovarajući algoritam upravljanja - kontroler. Primenom razvijenog algoritma upravljanja, gipki sistem može na osnovu signala sa senzora (kada

detektuje pritisno opterećenje na svojoj radnoj površini) da odluči koji aktuator da aktivira kako bi ostvario odgovarajuću promenu oblika radne površine i prilagodio se uslovima sredine u kojoj se nalazi. Upravljački algoritam, u disertaciji, nije razvijen za neku konkretnu primenu već samo da bi se demonstrirao princip rada odnosno mogućnosti gipkog sistema sa odgovarajućim upravljačkim algoritmom. Algoritam upravljanja se izvršava preko odgovarajuće akvizicione kartice na računaru; razvijena je i dodatna elektronika za povezivanje aktuatora i senzora gipkog sistema sa akvizicionom karticom, a aktuatori se pogone primenom dve baterije od 1.5 V. Eksperimentalno je demonstrirano da kada senzori od provodne pene detektuju pritisno opterećenje na radnoj površini gipkog sistema, dolazi do aktivacije odgovarajućih aktuatora i promene oblika radne površine odnosno da gipki sistem realizuje razvijeni algoritam upravljanja. Ovakav gipki sistem je, pored strukturne adaptibilnosti, i adaptivan odnosno poseduje odgovarajuću "inteligenciju" i može da se snađe u novim i nepredviđenim okolnostima.

Razvijeni adaptivni gipki sistem sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i sensorima od provodne pene i sa odgovarajućim kontrolerom, predstavlja jedan visokointegrirani mehatronički sistem koji ima mnogo prednosti nad postojećim rešenjima struktura koje mogu da menjaju svoj oblik. Glavne prednosti razvijenog rešenja gipkog sistema nad postojećim rešenjima struktura koje mogu da menjaju oblik, su:

- može da ostvari više različitih oblika svoje radne površine,
- može imati više primena,
- optimizovano rešenje,
- aktuatori, senzori i gipka struktura predstavljaju jedan monolitan visoko integrirani sistem,
- jednostavan koncept za realizaciju,
- jednostavna izrada - nema montaže,
- mogućnost skaliranja,
- niska cena izrade (ukupna cena izrađenog rešenja gipkog sistema iznosi svega 2€),
- aktuatori i senzori su razvijeni od komercijalno dostupnih materijala,
- napajanje sistema baterijama.

Navešćemo na kraju i neke moguće pravce budućih istraživanja u okviru ove tematike:

- Razviti algoritam koji bi pri sintezi gipkih sistema koristio nelinearnu MKE i sagledati da li bi se optimizacijom dobila slična rešenja gipkih sistema; u razvijenom algoritmu je za sintezu gipkih sistema korišćena linearna MKE;

- Kao optimizaciona metoda u razvijenom algoritmu korišćeni su genetski algoritmi; interesantno bi bilo istražiti kakva bi se rešenja gipkih sistema dobijala korišćenjem nekih drugih optimizacionih metoda kao što su: algoritam kolonije mrava, optimizacija rojem čestica ili ćelijski automat;
- Potrebno je sprovesti detaljniju analizu zavisnosti upravljivosti radne površine razvijenog rešenje adaptivnog gipkog sistema sa promenom krutosti (debljine članova) gipke strukture; možda bi se većom debljinom članova dobijenog rešenja gipkog sistema mogla ostvariti veća upravljivost radne površine;
- U disertaciji su predstavljeni samo koncepti gipkog mehanizma adaptivnog dvoprstog hvatača i adaptivnog krila letilice, koje bi trebalo detaljnije obraditi.
 - U slučaju gipkog mehanizma dvoprstog hvatača, potrebno je analizirati kojim oblicima objekata, kao i kojom veličinom i težinom predmeta, bi ovakav hvatač mogao da manipuliše. Trebalo bi, takođe, razviti fizički prototip gipkog mehanizma dvoprstog hvatača sa ugrađenim aktuatorima od nitinol žice i ugrađenim sensorima od provodne pene, i analizirati rad jednog takvog hvatača na realnoj robotskoj ruci.
 - U slučaju adaptivnog krila letilice, potrebno je ustanoviti koje bi oblike krila trebalo realizovati sa stanovišta aerodinamike i šta bi se time postiglo po pitanju režima leta. Potrebno je detaljnije istražiti i sličnosti oblika koje ostvaruje adaptivno krilo i oblika krila ptice tokom njenog leta što može voditi ka razvoju biološki inspirisanih sistema.
- Potrebno je sprovesti dalje istraživanje mogućih primena razvijenog rešenja gipkog sistema;
- Potrebno je sprovesti detaljnije ispitivanje razvijenih aktuatora kako bi se utvrdila veličina blok sile aktuatora, veličina slobodnog hoda aktuatora, a samim tim i njegova krutost, a potrebno je i preciznije izmeriti veličinu hoda aktuatora nakon ugrađivanja u adaptivnu gipku strukturu;
- Potrebno je ispitati da li je moguće primenom razvijenih senzora od provodne pene kao i senzora "veštačke kože" izmeriti silu i pomeranje, pri čemu je potrebno uspostaviti odgovarajuću zavisnost između promene električnog napona i veličine deformacije senzora; potrebno je razviti i odgovarajući analitički model ovih senzora na osnovu koga bi se moglo predvideti ponašanje senzora pri deformaciji;
- Potrebno je razviti naprednije algoritme upravljanja za adaptivni gipki sistem (upravljanje koje ne bi bilo samo on/off). Moguće je razviti upravljanje koje bi uključivalo i primenu

fazi kontrolera ili veštačkih neuronskih mreža koje bi vodile ka "inteligentnijem" adaptivnom gipkom sistemu.

Gipki sistemi predstavljaju novi koncept mehatroničkih sistema koji je detaljno obrađen u disertaciji. Sa daljim razvojem aktuatorskih i senzorskih tehnologija, kao i proizvodnih tehnologija, i gipki sistemi će dobijati sve više na značaju i nalaziće sve veću primenu. Gipki sistemi omogućuju realizovanje složenih zadataka i funkcija primenom relativno jednostavnog koncepta koji je preuzet iz prirode, pa se mnogo toga može očekivati od ovakvih sistema u budućnosti.

Literatura

- [1] Datashvili L., Baier H., Wei B., Hoffman J., Wehrle E., Schreider Lu., Mangelot C., Santiago-Prowald J., Scolamiero L., Angevain J-C.: Mechanical investigations of in-space-reconfigurable reflecting surfaces. In: Proceedings of the 32nd ESA antenna workshop on antennas for space applications, ESA/ESTEC, Noordwijk, 5–8 October, 2010.
- [2] Santiago-Prowald J., Baier H.: Advances in deployable structures and surfaces for large apertures in space, CEAS Space Journal, Vol. 5 (3-4), pp. 89-115, 2013.
- [3] Rodrigues G., Angevain J-C., Santiago-Prowald J.: Shape optimization of reconfigurable antenna reflectors, CEAS Space Journal, Vol. 5 (3-4), pp. 221-232, 2013.
- [4] Pontoppidan K., Cappellin C., Jessen N.C., Nørgaard-Nielsen H.U.: Latest achievements on reconfigurable reflector antennas modelling. In: Proceedings of the 32nd ESA antenna workshop on antennas for space applications, ESA/ESTEC, Noordwijk, 5–8 October, 2010.
- [5] Lu K-J., Kota S.: An Effective Method of Synthesizing Compliant Adaptive Structures using Load Path Representation, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16 (4), pp. 307-317, 2005.
- [6] Daynes S., Weaver P.M.: Design and testing of a deformable wind turbine blade control surface, Smart Materials and Structures, Vol. 21 (10), 105019 (10pp), 2012.
- [7] Daynes S., Weaver P.M.: A morphing trailing edge device for a wind turbine, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 23 (6), pp. 691-701, 2012.
- [8] Barlas T., van Wingerden J-W., Hulskamp A., van Kuik G.: Closed-Loop Control Wind Tunnel Tests on an Adaptive Wind Turbine Blade for Load Reduction. In: Proceedings of the 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 7 - 10 January, AIAA 2008-1318 (11pp), 2008.
- [9] Barlas T.K., van Kuik G.A.M.: Review of state of the art in smart rotor control research for wind turbines, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 46 (1), pp. 1-27, 2010.
- [10] Lachenal X., Daynes S., Weaver P.M.: Review of morphing concepts and materials for wind turbine blade applications, Wind Energy, Vol. 16 (2), pp. 283-307, 2013.

- [11] Loth E., Selig M., Moriarty P.: Morphing Segmented Wind Turbine Concept. In: Proceedings of the 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference, Chicago, Illinois, 28 June – 1 July, AIAA 2010-4400 (6pp), 2010.
- [12] Hartl D.J., Lagoudas D.C., Calkins F.T., Mabe J.H.: Use of a Ni60Ti shape memory alloy for active jet engine chevron application: I. Thermomechanical characterization, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19 (1), 015020 (14pp), 2010.
- [13] Calkins F.T., Mabe J.H.: Shape Memory Alloy Based Morphing Aerostructures, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 132 (11), 111012 (7pp), 2010.
- [14] Bastaits R., Rodrigues G., Jetteur Ph., Hagedorn P., Preumont A.: Multi-layer adaptive thin shells for future space telescopes, *Smart Materials and Structures*, Vol. 21 (6), 064004 (8pp), 2012.
- [15] Lin P-Y., Hsieh H-T., Su G-D.J.: Design and fabrication of a large-stroke MEMS deformable mirror for wavefront control, *Journal of Optics*, Vol. 13 (5), 055404 (8pp), 2011.
- [16] Ravensbergen S.K., Rosielle P.C.J.N., Steinbuch M.: Deformable mirrors with thermo-mechanical actuators for extreme ultraviolet lithography: Design, realization and validation, *Precision Engineering*, Vol. 37 (2), pp. 353-363, 2013.
- [17] Manetti M., Morandini M., Mantegazza P., Biasi R., Gallieni D., Riccardi A.: Experimental validation of massively actuated deformable adaptive mirror numerical models, *Control Engineering Practice*, Vol. 20 (8), pp. 783-791, 2012.
- [18] Bonora S.: Distributed actuators deformable mirror for adaptive optics, *Optics Communications*, Vol. 284 (13), pp. 3467–3473, 2011.
- [19] Del Grosso A.E., Basso P.: Adaptive building skin structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19 (12), 124011 (12pp), 2010.
- [20] Schenk M., Guest S.D.: Origami Folding: A Structural Engineering Approach. In: Proceedings of 5OSME, 5th international conference on Origami in Science, Mathematics and Education, Singapore, 14-15 July, pp. 293-305, 2011.
- [21] FESTO, Interactive Wall, Brochure, www.festo.com., pristupljeno decembra 2015.
- [22] Daynes S., Weaver P.M.: Review of shape-morphing automobile structures: concepts and outlook, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 227 (11), pp. 1603-1622, 2013.
- [23] Han M-W., Rodrigue H., Cho S., Song S-H., Wang W., Chu W-S., Ahn S-H.: Woven type smart soft composite for soft morphing car spoiler, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 86, pp. 285-298, 2016.

- [24] <http://www.bmwusa.com/Standard/Content/AllBMW/ConceptVehicles/GINA/>, pristupljeno decembra 2015.
- [25] Valasek J.: *Morphing aerospace vehicles and structures*. John Wiley & Sons, 2012.
- [26] Kota S., Osborn R., Gregory E., Maric D., Flick P., Donald P.: *Mission Adaptive Compliant Wing – Design, Fabrication and Flight Test*, Nato Otan, RTO-MP-AVT-168 (18pp), 2006.
- [27] Feng N., Liu L., Liu Y., Leng J.: A bio-inspired, active morphing skin for camber morphing structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24 (3), 035023 (7pp), 2015.
- [28] Peel L.D., Mejia J., Narvaez B., Thompson K., Lingala M.: Development of a Simple Morphing Wing Using Elastomeric Composites as Skins and Actuators, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 131 (9), 091003 (8pp), 2009.
- [29] Vasista S., Tong L.: Design Considerations of a Pressure Driven Morphing Wing Structure. In: *Proceedings of the 28th International Congress of the Aeronautical Sciences*, Brisbane, Australia, 23 - 28 September, ICAS 2012-8.4.1 (10pp), 2012.
- [30] Ko S-H., Bae J-S., Rho J-H.: Development of a morphing flap using shape memory alloy actuators: the aerodynamic characteristics of a morphing flap, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23 (7), 074015 (21pp), 2014.
- [31] Wang Q., Xu Z., Zhu Q.: Structural design of morphing trailing edge actuated by SMA, *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 8 (3), pp. 268–275, 2013.
- [32] Ameduri S., Brindisi A., Tiseo B., Concilio A., Pecora R.: Optimization and integration of shape memory alloy (SMA)-based elastic actuators within a morphing flap architecture, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23 (4), pp. 381–396, 2012.
- [33] Zhao K., Schmiedeler J.P., Murray A.P.: Design of Planar, Shape-Changing Rigid-Body Mechanisms for Morphing Aircraft Wings, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 4 (4), 041007 (10pp), 2012.
- [34] Manzo J., Garcia E.: Demonstration of an in situ morphing hyperelliptical cambered span wing mechanism, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19 (2), 025012 (11pp), 2010.
- [35] Kota S.: FlexSys - Shape morphing wing, Press Release, 13 January, <http://www.flxsys.com/>, 2014.

- [36] Elzey D.M., Sofla A.Y.N., Wadley H.N.G.: A bio-inspired high-authority actuator for shape morphing structures, In: Proceedings of the SPIE 5053, smart structures and materials 2003: active materials: behavior and mechanics, San Diego, CA, 2 March, pp. 92–100. Bellingham, WA: SPIE., 2003.
- [37] Bettini P., Airoidi A., Sala G., Di Landro L., Ruzzene M., Spadoni A.: Composite chiral structures for morphing airfoils: Numerical analyses and development of a manufacturing process, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41 (2), pp. 133–147, 2010.
- [38] Hyeonu H., Jaehyung J., Doo-Man K.: Compliant cellular structures: Application to a passive morphing airfoil, *Composite Structures*, Vol. 106, pp. 560–569, 2013.
- [39] Dayyani I., Shaw A.D., Saavedra Flores E.I., Friswell M.I.: The mechanics of composite corrugated structures: A review with applications in morphing aircraft, *Composite Structures*, Vol. 133, pp. 358-380, 2015.
- [40] Molinari G., Quack M., Arrieta A.F., Morari M., Ermanni P.: Design, realization and structural testing of a compliant adaptable wing, *Smart Materials and Structures*, Vol. 24 (10), 105027 (20pp), 2015.
- [41] Sun J., Scarpa F., Liu Y., Leng J.: Morphing thickness in airfoils using pneumatic flexible tubes and Kirigami honeycomb, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Special Issue Article, DOI 10.1177/1045389X15580656 (9pp), 2015.
- [42] Basaeri H., Yousefi-Koma A., Zakerzadeh M.R., Mohtasebi S.S.: Experimental study of a bio-inspired robotic morphing wing mechanism actuated by shape memory alloy wires, *Mechatronics*, Vol. 24 (8), pp. 1231-1241, 2014.
- [43] Kuder I.K., Arrieta A.F., Raither W.E., Ermanni P.: Variable stiffness material and structural concepts for morphing applications, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 63, pp. 33-55, 2013.
- [44] Quantian L., Liyong T.: Adaptive pressure-controlled cellular structures for shape morphing I: design and analysis, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22 (5), 055014 (16pp), 2013.
- [45] Barbarino S., Bilgen O., Ajaj R.M., Friswell M.I., Inman D.J.: A Review of Morphing Aircraft, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22 (9), pp. 823–877, 2011.
- [46] Juan Carlos G., Ephrahim G.: Morphing unmanned aerial vehicles, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20 (10), 103001 (16pp), 2011.

- [47] Vos R., Barrett R.: Mechanics of pressure-adaptive honeycomb and its application to wing morphing, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20 (9), 094010 (11pp), 2011.
- [48] Grant D.T., Abdulrahim M., Lind R.: Design and analysis of biomimetic joints for morphing of micro air vehicles, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 5 (4), 045007 (8pp), 2010.
- [49] Sofla A.Y.N., Meguid S.A., Tan K.T., Yeo W.K.: Shape morphing of aircraft wing: Status and challenges, *Materials and Design*, Vol. 31 (3), pp. 1284–1292, 2010.
- [50] Wildschek A., Havar T., Plötner K.: An all-composite, all-electric, morphing trailing edge device for flight control on a blended-wing-body airliner, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 224 (1), pp. 1-9, 2010.
- [51] Barbarino S., Pecora R., Lecce L., Concilio A., Ameduri S., Calvi E.: A Novel SMA-based Concept for Airfoil Structural Morphing, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 18 (5-6), pp. 696–705, 2009.
- [52] Spadoni A., Ruzzene M.: Numerical and experimental analysis of the static compliance of chiral truss-core airfoils, *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 2 (5), pp. 965-981, 2007.
- [53] Santer M.J., Pellegrino S.: Topology Optimization of Adaptive Compliant Aircraft Wing Leading Edge. In: *Proceedings of the 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Honolulu, Hawaii, 23 - 26 April, AIAA 2007-1714 (13pp), 2007.
- [54] <http://aviation.stackexchange.com/questions/1734/what-is-the-difference-between-flaps-and-slats>, pristupljeno decembra 2015.
- [55] <http://www.decodedscience.org/wing-flaps-for-lift-augmentation-in-aircraft/11831>, pristupljeno decembra 2015.
- [56] <http://www.airliners.net/photo/Air-France/Airbus-A380-861/1660028/M/>, pristupljeno decembra 2015.
- [57] <http://www.abovetopsecret.com/forum/thread893277/pg7>, pristupljeno decembra 2015.
- [58] Steeves C.A., Timpano K.H., Maxwell P.T., Martinelli L., Miles R.B.: Design and Manufacture of a Morphing Structure for a Shape-Adaptive Supersonic Wind Tunnel Nozzle, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 76 (3), 031012 (6pp), 2009.
- [59] Sofla A.Y.N., Elzey D.M., Wadley H.N.G.: Shape morphing hinged truss structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 18 (6), 065012 (8pp), 2009.

- [60] Dos Santos e Lucato S.L, Wang J., Maxwell P., McMeeking R.M, Evans A.G: Design and demonstration of a high authority shape morphing structure, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41 (13), pp. 3521–3543, 2004.
- [61] Dos Santos e Lucato S.L., McMeeking R.M., Evans A.G.: Actuator placement optimization in a Kagome based high authority shape morphing structure, *Smart Materials and Structures*, Vol. 14 (4), pp. 869–875, 2005.
- [62] Wang J., Nausieda A., Dos Santos e Lucato S.L., Evans A.G.: Twisting of a high authority morphing structure, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44 (9), pp. 3076–3099, 2007.
- [63] Hutchinson R.G., Wicks N., Evans A.G., Fleck N.A., Hutchinson J.W.: Kagome plate structures for actuation, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40 (25), pp. 6969–6980, 2003.
- [64] Luo Q., Tong L.: Adaptive pressure-controlled cellular structures for shape morphing I: design and analysis, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22 (5), 055014 (16pp), 2013.
- [65] Luo Q., Tong L.: Adaptive pressure-controlled cellular structures for shape morphing: II. Numerical and experimental validation, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22 (5), 055015 (12pp), 2013.
- [66] Wu R., Sun J., Chang Z., Bai R., Leng J.: Elastic composite skin for a pure shear morphing wing structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 26 (3), pp. 352–363, 2015.
- [67] Jinjin C., Xing S., Jiefeng L.: Zero Poisson's ratio flexible skin for potential two-dimensional wing morphing, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 45, pp. 228–241, 2015.
- [68] Chen Y.J., Scarpa F., Farrow I.R., Liu Y.J., Leng J.S.: Composite flexible skin with large negative Poisson's ratio range: numerical and experimental analysis, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22 (4), 045005 (12pp), 2013.
- [69] Asheghian L., Reich G., Enke A., Kudva J.: Shear Morphing Skins - Simulation and Testing of Optimized Design, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22 (9), pp. 945–960, 2011.
- [70] Olympio K.R., Gandhi F.: Flexible Skins for Morphing Aircraft Using Cellular Honeycomb Cores, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21 (17), pp. 1719–1735, 2010.

- [71] Olympio K.R., Gandhi F., Asheghian L., Kudva J.: Design of a Flexible Skin for a Shear Morphing Wing, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21 (17), pp. 1755–1770, 2010.
- [72] Joo J.J., Reich G.W., Westfall J.T.: Flexible Skin Development for Morphing Aircraft Applications via Topology Optimization, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20 (16), pp. 1969–1985, 2009.
- [73] Gramüller B., Boblenz J., Hühne C.: PACS—Realization of an adaptive concept using pressure actuated cellular structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23 (11), 2014.
- [74] Mosadegh B., Polygerinos P., Keplinger C., Wennstedt S., Shepherd R.F., Gupta U., Shim J., Bertoldi K., Walsh C.J., Whitesides G.M.: Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly, *Advanced Functional Materials*, Vol. 24 (15), pp. 2163–2170, 2014.
- [75] Vos R.: Mechanics and Applications of Pressure Adaptive Honeycomb. PhD Thesis, Graduate Faculty of the University of Kansas, 2009.
- [76] Martinez R.V., Branch J.L., Fish C.R., Jin L., Shepherd R.F., Nunes R.M.D., Suo Z., Whitesides G.M.: Robotic Tentacles with Three-Dimensional Mobility Based on Flexible Elastomers, *Advanced Materials*, Vol. 25 (2), pp. 205–212, 2013.
- [77] Shepherd R.F., Stokes A.A., Nunes R.M.D., Whitesides G.M.: Soft Machines That are Resistant to Puncture and That Self Seal, *Advanced Materials*, Vol. 25 (46), pp. 6709–6713, 2013.
- [78] Kuder I.K., Arrieta A.F., Raither W.E., Ermanni P.: Variable stiffness material and structural concepts for morphing applications, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 63, pp. 33-55, 2013.
- [79] Pagitz M., Bold J.: Shape-changing shell-like structures, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 8 (1), 016010 (11pp), 2013.
- [80] Pagitz M., Lamacchia E., Hol J.M.A.M.: Pressure-actuated cellular structures, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 7 (1), 016007 (19pp), 2012.
- [81] Chang B.C-M., Berring J., Venkataram M., Menon C., Parameswaran M.: Bending fluidic actuator for smart structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 20 (3), 035012 (8pp), 2011.
- [82] Ilievski F., Mazzeo A.D., Shepherd R.F., Chen X., Whitesides G.M.: Soft Robotics for Chemists, *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 50 (8), pp. 1890–1895, 2011.

- [83] Jung B-S., Kong J-P., Li N., Kim Y-M., Kim M-S., Ahn S-H., Cho M.: Numerical simulation and verification of a curved morphing composite structure with embedded shape memory alloy wire actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 24 (1), pp. 89-98, 2012.
- [84] Kim J-S., Lee J-Y., Lee K-T., Kim H-S., Ahn S-H.: Fabrication of 3D soft morphing structure using shape memory alloy (SMA) wire/polymer skeleton composite, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 27 (10), pp. 3123–3129, 2013.
- [85] Li H., Dai F., Du S.: The morphing bi-stable glass fiber-reinforced polymer laminates actuated by embedded electrothermal alloy, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 26 (1), pp. 69–78, 2014.
- [86] Murray D.V., Myers O.J.: Modeling Bistable Composite Laminates for Piezoelectric Morphing Structures, *ISRN Materials Science*, Vol. 2013 (17), 428624 (12pp), 2013.
- [87] Ahn, S-H., Lee K-T., Kim H-J., Wu R., Kim J-S., Song S-H.: Smart soft composite: An integrated 3D soft morphing structure using bend-twist coupling of anisotropic materials, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13 (4), pp. 631–634, 2012.
- [88] L'Hostis G., Buet-Gautier K., Durand B.: Thermally Active Structures for Shape Morphing Applications, *Smart Materials Research*, Vol. 2012, 530217 (9pp), 2012.
- [89] Ryu J., Jung B-S., Kim M-S., Kong J., Cho M., Ahn S-H.: Numerical simulation of hybrid composite shape-memory alloy wire-embedded structures, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 22 (17), pp. 1941–1948, 2011.
- [90] Samer T.A., Dancila S.D., Erian A.: Unsymmetric composite laminates morphing via piezoelectric actuators, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 42 (7), pp. 748–756, 2011.
- [91] Howell L.L., Magleby S.P., Olsen B.M.: *Handbook of Compliant Mechanisms*. John Wiley & Sons, 2013.
- [92] Howell L.L.: *Compliant Mechanisms*. John Wiley & Sons, 2001.
- [93] Pavlović N.D., Pavlović N.T.: *Gipki Mehanizmi*. Mašinski Fakultet, Univerzitet u Nišu, 2013.
- [94] Sigmund O.: On the Design of Compliant Mechanisms Using Topology Optimization, *Mechanics of Structures and Machines*, Vol. 25 (4), pp. 493-524, 1997.
- [95] Frecker M.I., Ananthasuresh G.K., Nishiwaki S., Kikuchi N., Kota S.: Topological Synthesis of Compliant Mechanisms Using Multi-Criteria Optimization, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 119, pp. 238-245, 1997.

- [96] Nishiwaki S., Frecker M.I., Min S., Kikuchi N.: Topology optimization of compliant mechanisms using the homogenization method, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 42 (3), pp. 535–559, 1998.
- [97] Kota S., Hetrick J., Li Z., Saggere L.: Tailoring unconventional actuators using compliant transmissions: design methods and applications, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 4 (4), pp. 369-408, 1999.
- [98] Frecker M., Kikuchi N., Kota S.: Topology optimization of compliant mechanisms with multiple outputs, *Structural Optimization*, Vol. 17, pp. 269-278, 1999.
- [99] Saxena A., Ananthasuresh G.K.: On an optimal property of compliant topologies, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 19 (1), pp. 36-49, 2000.
- [100] Joo J., Kota, S., Kikuchi N.: Topological Synthesis of Compliant Mechanisms Using Linear Beam Elements, *Mechanics of Structures and Machines*, Vol. 28 (4), pp. 245-280, 2000.
- [101] Kota S., Joo J., Zhe L., Rodrigues S.M., Snięowski J.: Design of Compliant Mechanisms: Applications to MEMS, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Vol. 29, pp. 7-15, 2001.
- [102] Tai K., Cui G.Y., Ray T.: Design Synthesis of Path Generating Compliant Mechanisms by Evolutionary Optimization of Topology and Shape, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 124 (3), pp. 492-500, 2002.
- [103] Parsons R., Canfield S.L.: Developing genetic programming techniques for the design of compliant mechanisms, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 24 (1), pp. 78–86, 2002.
- [104] Yin L., Ananthasuresh G.K.: Design of Distributed Compliant Mechanisms, *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, Vol. 31 (2), pp. 151-179, 2003.
- [105] Bendsøe M.P., Sigmund O.: *Topology Optimization: Theory, Methods and Applications*. Springer, 2003.
- [106] Saxena A.: Synthesis of Compliant Mechanisms for Path Generation using Genetic Algorithm, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 127 (4), pp. 745-752, 2005.
- [107] Saxena A.: Topology design of large displacement compliant mechanisms with multiple materials and multiple output ports, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 30 (6), pp. 477–490, 2005.
- [108] Luo Z., Chen L., Yang J., Zhang Y., Abdel-Malek K.: Compliant mechanism design using multi-objective topology optimization scheme of continuum structures, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 30 (2), pp. 142-154, 2005.

- [109] Kota S., Lu K.-J., Kreiner Z., Trease B., Arenas J., Geiger J.: Design and Application of Compliant Mechanisms for Surgical Tools, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 127 (6), pp. 981-989, 2005.
- [110] Prasad J., Diaz A.R.: Synthesis of Bistable Periodic Structures Using Topology Optimization and a Genetic Algorithm, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 128 (6), pp. 1298-1306, 2006.
- [111] Pedersen C.B.W., Fleck N.A., Ananthasuresh G.K.: Design of a Compliant Mechanism to Modify an Actuator Characteristic to Deliver a Constant Output Force, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 128 (5), pp. 1101-1112, 2006.
- [112] Lu K.-J., Kota S.: Topology and Dimensional Synthesis of Compliant Mechanisms Using Discrete Optimization, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 128 (5), pp. 1080-1091, 2006.
- [113] Rai A.K., Saxena A., Mankame N.D.: Synthesis of Path Generating Compliant Mechanisms Using Initially Curved Frame Elements, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 129 (10), pp. 1056-1063, 2007.
- [114] Luo Z., Tong L., Wang M.Y., Wang S.: Shape and topology optimization of compliant mechanisms using a parameterization level set method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 227 (1), pp. 680–705, 2007.
- [115] Wang M.Y., Luo Z.: Shape and Topology Optimization for Compliant Mechanisms Using Level Set- Based Parameterization Method. In: *Proceedings of the 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), 18-21 June*, 8pp, 2007.
- [116] Luo Z., Tong L., Wang M.Y.: Design of distributed compliant micromechanisms with an implicit free boundary representation, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 36 (6), pp. 607–621, 2008.
- [117] Veguería E., Ansola R., Maturana A., Canales J.: Topology synthesis of compliant mechanisms using an evolutionary method. In: *Proceedings of the EngOpt 2008 - International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 01 - 05 June*, 185 (9pp), 2008.
- [118] Lan C.-C., Cheng Y.-J.: Distributed Shape Optimization of Compliant Mechanisms Using Intrinsic Functions, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130 (7), 072304 (10pp), 2008.
- [119] Yanling T., Bijan S., Dawei Z., Gursel A.: Development and dynamic modelling of a flexure-based Scott–Russell mechanism for nano-manipulation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23 (3), pp. 957–978, 2009.

- [120] Pavlović N.T., Pavlović N.D.: Compliant mechanism design for realizing of axial link translation, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 44 (5), pp. 1082–1091, 2009.
- [121] Hasse A., Campanile L.F.: Design of compliant mechanisms with selective compliance, *Smart Materials and Structures*, Vol. 18 (11), 115016 (10pp), 2009.
- [122] Reddy A.N., Maheshwari N., Sahu D.K., Ananthasuresh G.K.: Miniature Compliant Grippers With Vision-Based Force Sensing, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26 (5), pp. 867–877, 2010.
- [123] Jiangzi L., Zhen L., Liyong T.: A new multi-objective programming scheme for topology optimization of compliant mechanisms, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 40 (1-6), pp. 241–255, 2010.
- [124] Ansola R., Veguería E., Maturana A., Canales J.: 3D compliant mechanisms synthesis by a finite element addition procedure, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 46 (9), pp. 760–769, 2010.
- [125] Zahan J., Zahang X.: Topology Optimization of Compliant Mechanisms with Geometrical Nonlinearities Using the Ground Structure Approach, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 24 (2), pp. 257-264, 2011.
- [126] Milojević A.: Compliant Bistable Mechanisms. In *Proceedings of the first international symposium for students with papers from mechanical engineering – SRMA 2011*, Vrnjačka Banja, 29 June – 1 July, pp. 181-186, 2011.
- [127] Zhou H., Mandala A.R.: Topology Optimization of Compliant Mechanisms Using the Improved Quadrilateral Discretization Model, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 4 (2), 2012.
- [128] Limaye P., Ramu G., Pamulapati S., Ananthasuresh G.K.: A compliant mechanism kit with flexible beams and connectors along with analysis and optimal synthesis procedures, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 49, pp. 21-39, 2012.
- [129] Nagendra R.B.V.S., Naik S.V., Saxena A.: Systematic Synthesis of Large Displacement Contact-Aided Monolithic Compliant Mechanisms, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 134, 01100 (12pp), 2012.
- [130] Saxena A.: A Contact-Aided Compliant Displacement-Delimited Gripper Manipulator, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 5 (4), 041005 (12pp), 2013.
- [131] Huang X., Li Y., Zhou S.W., Xie Y.M.: Topology optimization of compliant mechanisms with desired structural stiffness, *Engineering Structures*, Vol. 79, pp. 13–21, 2014.

- [132] Noveanu S., Lobontiu N., Lazaro J., Mandru D.: Substructure compliance matrix model of planar branched flexure-hingemechanisms: Design, testing and characterization of a gripper, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 91, pp. 1-20, 2015.
- [133] Krishnakumar A., Suresh K.: Hinge-Free Compliant Mechanism Design Via the Topological Level-Set, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 137 (3), 031406 (10pp), 2015.
- [134] Jin M., Zhang X.: A new topology optimization method for planar compliant parallel mechanisms, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 95, pp. 42-58, 2016.
- [135] Saggere L., Kota S.: Static Shape Control of Smart Structures Using Compliant Mechanisms, *AIAA Journal*, Vol. 37 (5), pp. 572–578, 1999.
- [136] Lu K-J., Kota S.: Design of compliant mechanisms for morphing structural shapes, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14 (6), pp. 379–391, 2003.
- [137] Trease B., Lu K-J., Kota S.: Biomimetic Compliant System for Smart Actuator-Driven Aquatic Propulsion: Preliminary Results. In: *Proceedings of the IMECE'03, 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress*, Washington, D.C., November 16 Washington, D.C., 15–21 November, IMECE2003-41446 (10pp), 2003.
- [138] Lu K-J.: *Synthesis of Shape Morphing Compliant Mechanisms*. PhD Thesis, University of Michigan, 2004.
- [139] Dorozhkin D.: *Constraint-based synthesis of shape-morphing compliant structures in virtual reality*. PhD Thesis, Iowa State University, 2011.
- [140] Zhao K., Schmiedeler J.P.: Using rigid-body mechanism topologies to design shape changing compliant mechanisms. In: *Proceedings of ASME 2013 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference*, Portland, OR, 4–7 August, DETC2013-12576, (11pp), 2013.
- [141] Reeves C.R., Rowe J.E.: *Genetic Algorithms: Principles and Perspectives: A Guide to GA Theory*. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [142] <http://ame-robotics.nd.edu/LAB/Design/Morphing.php>, pristupljeno decembra 2015.
- [143] Trease B., Kota S.: Design of Adaptive and Controllable Compliant Systems With Embedded Actuators and Sensors, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 131 (11), 111001 (12pp), 2009.
- [144] Trease B.: *Topology Synthesis of Compliant Systems with Embedded Actuators and Sensors*. PhD Thesis, University of Michigan, 2008.

- [145] Milojević A., Pavlović N.D., Milošević M., Tomić M.: New Software for Synthesis of Compliant Mechanisms. In: Proceedings of the 2nd International Conference Mechanical Engineering in XXI Century, 20-21 June, Niš, Serbia, pp. 273-278, 2013.
- [146] Linß S., Milojević A., Pavlović N.D., Zentner L.: Synthesis of Compliant Mechanisms based on Goal-Oriented Design Guidelines for Prismatic Flexure Hinges with Polynomial Contours. In: Proceedings of the 14th World Congress in Mechanism and Machine Science, Taipei, Taiwan, 25-30 October, PS10-008 (6pp), 2015.
- [147] Linß S.: Ein Beitrag zur geometrischen Gestaltung und Optimierung prismatischer Festkörpergelenke in nachgiebigen Koppelmechanismen. Doktorarbeiten, Technische universität Ilmenau, 2015.
- [148] Linß S., Milojević A., Zentner L.: Considering the Design of the Flexure Hinge Contour for the Synthesis of Compliant Linkage Mechanisms. In: Proceedings of the 58th Ilmenau Scientific Colloquium, 08-12 September, Ilmenau, Germany, 033:4 (12pp), 2014.
- [149] Linß S., Milojević A., Zentner L.: On the Influence of Flexure Hinge Geometry on the Motion Range and Precision of Compliant Gripping Mechanisms. In: Proceedings of the 2nd International Conference Mechanical Engineering in XXI Century, 20-21 June, Niš, Serbia, pp. 255-260, 2013.
- [150] Linß S., Milojević A.: Model-Based Design of Flexure Hinges for Rectilinear Guiding With Compliant Mechanisms in Precision Systems. In: Proceedings of the Mechanismtechnik in Ilmenau, Budapest und Niš, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany, 29 - 31 August, pp. 13-24, 2012.
- [151] Lobontiu N.: Compliant Mechanisms, Design of Flexure Hinges. CRC Press, 2003.
- [152] Bathe K.-J.: Finite Element Procedures. Prentice Hall, 1996.
- [153] Howell L.L., Midha A.: A Method for the Design of Compliant Mechanisms With Small-Length Flexural Pivots, Journal of Mechanical Design, Vol. 116 (1), pp. 281-290, 1994.
- [154] Howell L.L., Midha A.: Parametric Deflection Approximations for End-Loaded, Large-Deflection Beams in Compliant Mechanisms, Journal of Mechanical Design, Vol. 117 (1), pp. 156–165, 1995.
- [155] Howell L.L., Midha A., Norton T.W.: Evaluation of Equivalent Spring Stiffness for Use in a Pseudo-Rigid-Body Model of Large-Deflection Compliant Mechanisms, Journal of Mechanical Design, Vol. 118 (1), pp. 126-131, 1996.

- [156] Jensen B.D., Howell L.L., Salmon L.G.: Design of Two-Link, In-Plane, Bistable Compliant Micro-Mechanisms, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 121 (3), pp. 416–423, 1999.
- [157] Jensen B.D., Howell L.L.: Bistable Configurations of Compliant Mechanisms Modeled Using Four Links and Translational Joints, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 126 (4), pp. 657–666, 2004.
- [158] Masters N.D., Howel L.L.: A self-retracting fully compliant bistable micromechanism, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 12 (3), pp. 273–280, 2003.
- [159] Wilcox D.L., Howell L.L.: Fully compliant tensural bistable micromechanisms (FTBM), *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 14 (6), pp. 1223–1235, 2005.
- [160] Hetrick J.A., Kota S.: An Energy Formulation for Parametric Size and Shape Optimization of Compliant Mechanisms, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 121 (2), pp. 229–234, 1999.
- [161] Xu D., Ananthasuresh G.K.: Freeform Skeletal Shape Optimization of Compliant Mechanisms, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 125 (2), pp. 253–261, 2003.
- [162] Zhou H., Ting K-L.: Shape and Size Synthesis of Compliant Mechanisms Using Wide Curve Theory, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 128 (3), pp. 551–558, 2005.
- [163] Zhou H., Ting K-L.: Geometrie Modeling and Optimization of Multimaterial Compliant Mechanisms Using Multilayer Wide Curves, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 130 (6), 062303 (7pp), 2008.
- [164] Alonso C., Ansola R., Querin O.M.: Topology synthesis of Multi-Input–Multi-Output compliant mechanisms, *Advances in Engineering Software*, Vol. 76, pp. 125–132, 2014.
- [165] Wang Y., Luo Z., Zhang X., Kang Z.: Topological design of compliant smart structures with embedded movable actuators, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23 (4), 045024 (15pp), 2014.
- [166] Carbonari R.C., Silva E.C.N., Nishiwaki S.: Design of piezoelectric multi-actuated microtools using topology optimization, *Smart Materials and Structures*, Vol. 14 (6), pp. 1431–1447, 2005.
- [167] Bendsoe M.P., Kikuchi N.: Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197–224, 1988.

- [168] Suzuki K., Kikuchi N.: A homogenization method for shape and topology optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 93 (3), pp. 291–318, 1991.
- [169] Yin L., Ananthasuresh G.K.: Topology optimization of compliant mechanisms with multiple materials using a peak function material interpolation scheme, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 23 (1), pp. 49-62, 2001.
- [170] Huang X., Xie Y.M.: *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [171] Li Y.: *Topology Optimization of Compliant Mechanisms Based on the BESO Method*. PhD Thesis, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering College of Science Engineering and Health, RMIT University, 2014.
- [172] Ansola R., Veguería E., Canales J., Tárrago J.A.: A simple evolutionary topology optimization procedure for compliant mechanism design, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 44 (1-2), pp. 53-62, 2007.
- [173] Querin O.M., Steven G.P., Xie Y.M.: Evolutionary structural optimisation using an additive algorithm, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 34 (3-4), pp. 291–308, 2000.
- [174] https://en.wikipedia.org/wiki/Level_set_method#/media/File:Level_set_method.jpg, pristupljeno decembra 2015.
- [175] Sigmund O., Petersson J.: Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 16 (1), pp. 68–75, 1998.
- [176] Jang G-W., Jeong J.H., Kim Y.Y., Sheen D., Park C., Kim M-N.: Checkerboard-free topology optimization using non-conforming finite elements, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 57 (12), pp. 1717–1735, 2003.
- [177] Bruggi M.: On the solution of the checkerboard problem in mixed-FEM topology optimization, *Computers and Structures*, Vol. 86 (19-20), pp. 1819–1829, 2008.
- [178] Talischi C., Paulino G.H., Le C.H.: Honeycomb Wachspress finite elements for structural topology optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 37 (6), pp. 569–583, 2009.
- [179] Talischi C., Paulino G.H., Pereira A., Menezes I.F.M.: Polygonal finite elements for topology optimization: A unifying paradigm, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 82, pp. 671-698, 2010.

- [180] Grossard M., Rotinat-Libersa C., Chaillet N., Perrot Y.: Flexible building blocks method for the optimal design of compliant mechanisms using piezoelectric material. In: Proceedings of the 12th IFToMM World Congress, Besançon (France), 18-21 June, 6pp, 2007.
- [181] Grossard M., Rotinat-Libersa C., Chaillet N., Boukallel M.: Mechanical and Control-Oriented Design of a Monolithic Piezoelectric Microgripper Using a New Topological Optimization Method, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 14 (1), pp. 32–45, 2009.
- [182] Rotinat-Libersa C., Perrot Y., Friconneau J-P.: Potentialities of optimal design methods and associated numerical tools for the development of new micro - and nano - intelligent systems based on structural compliance - An example -. In: Proceedings of the IARP - IEEE/RAS - EURON Joint Workshop on Micro and Nano Robotics, Paris, France, 23-24 October, pp. 1-11, 2006.
- [183] Bernardoni P., Riwan A., Tsitsiris H., Millet O., Buchaillet L., Regnier S., Bidaud P.: From the mechanical analysis of a polyarticulated microgripper to the design of a compliant microgripper. In: Proceedings of the SPIE 5383, Smart Structures and Materials 2004: Modeling, Signal Processing, and Control, 26 July, 469, 2004.
- [184] Pedersen C.B.W., Buhl T., Sigmund O.: Topology synthesis of large-displacement compliant mechanisms, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 50 (12), pp. 2683–2705, 2001.
- [185] Bertsimas D., Tsitsiklis J.: Simulated Annealing, Statistical Science, Vol. 8 (1), pp. 10-15, 1993.
- [186] Shalaby M.M., Saitou K.: Topology optimization of structural supports for MEMS switches using discrete simulated annealing. In: Proceedings of the Cairo University Conference on Mechanical Design and Production, Cairo, Egypt, 4-6 January, pp. 77-84, 2004.
- [187] Bureerat S., Limtragool J.: Structural topology optimisation using simulated annealing with multiresolution design variables, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 44 (12-13), pp. 738-747, 2008.
- [188] Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A.: The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B, Vol. 26 (1), pp. 1-13, 1996.
- [189] Stützle T., Hoos H.H.: Max - Min Ant System, Future Generation Computer Systems, Vol. 16 (8), pp. 889-914, 2000.

- [190] Kaveh A., Hassani B., Shojaee S., Tavakkoli S.M.: Structural topology optimization using ant colony methodology, *Engineering Structures*, Vol. 30 (9), pp. 2559–2565, 2008.
- [191] Luh G-C., Lin C-Y.: Structural topology optimization using ant colony optimization algorithm, *Applied Soft Computing*, Vol. 9 (4), pp. 1343–1353, 2009.
- [192] Yoo K-S., Han S-Y.: Modified ant colony optimization for topology optimization of geometrically nonlinear structures, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 15 (4), pp. 679–687, 2014.
- [193] Rubbert L., Renaud P., Gangloff J.: A Design Method Based on Ant Colony Optimization for Compliant Mechanisms: Introduction and Application to a Surgical Tool. In: *Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, 12-15 August, Chicago, IL, USA, DETC2012-70383 (10pp), 2012.
- [194] Kim S-C., Chang D-H., Yoo K-S., Han S-Y.: Development of Modified Ant Colony Optimization Algorithm for Compliant Mechanisms. In: *Proceedings of the SIMUL 2012 : The Fourth International Conference on Advances in System Simulation*, 18-23 November, Lisbon, Portugal, pp. 152-157, 2012.
- [195] Yoo K-S., Han S-Y.: Topology optimum design of compliant mechanisms using modified ant colony optimization, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 29 (8), pp. 3321–3327, 2015.
- [196] Kennedy J., Eberhart R.: Particle Swarm Optimization. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 4, pp. 1942–1948, 1995.
- [197] Luh G-C., Lin C-Y., Lin Y-S.: A binary particle swarm optimization for continuum structural topology optimization, *Applied Soft Computing*, Vol. 11 (2), pp. 2833–2844, 2011.
- [198] Felkner J., Chatzi E., Kotnik T.: Interactive particle swarm optimization for the architectural design of truss structures. In: *Proceedings of the IEEE Symposium on Computational Intelligence for Engineering Solutions (CIES)*, 16-19 April, Singapore, pp. 15-22, 2013.
- [199] Padhye N.: Topology Optimization of Compliant Mechanism using Multi-Objective Particle Swarm Optimization. In: *Proceedings of the GECCO'08*, 12–16 July, Atlanta, Georgia, USA, pp. 1831–1834, 2008.

- [200] Cortés H., Tovar A., Munoz J.D., Patel N.M., Renaud J.E.: Topology Optimization of Truss Structures using Cellular Automata with Accelerated Simultaneous Analysis and Design. In: Proceedings of the 6th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 30 May - 03 June, 10pp, 2005.
- [201] Tovar A., Patel N.M., Niebur G.L., Sen M., Renaud J.E.: Topology Optimization Using a Hybrid Cellular Automaton Method With Local Control Rules, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 128 (6), pp. 1205-1216, 2006.
- [202] Sanaei E., Babaei M.: Cellular Automata in Topology Optimization of Continuum Structures, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, Vol. 3 (4), pp. 27-41, 2011.
- [203] Faramarzi A., Afshar M.H.: Application of cellular automata to size and topology optimization of truss structures, *Scientia Iranica*, Vol. 19 (3), pp. 373–380, 2012.
- [204] Bochenek B., Tajs-Zielinska K.: Topology optimization with efficient rules of cellular automata, Vol. 30 (8), pp. 1086–1106, 2013.
- [205] Narváez C.A., Lopez R., Tovar A., Garzón D.: Topology Synthesis of Compliant Mechanisms using Cellular Automata. In: Proceedings of the EngOpt 2008 - International Conference on Engineering Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, 01 - 05 June, 11pp, 2008.
- [206] <http://www.mathworks.com/help/gads/ga.html>, pristupljeno decembra 2015.
- [207] Huang, S-C., Lan G-J.: Design and fabrication of a micro-compliant amplifier with a topology optimal compliant mechanism integrated with a piezoelectric microactuator, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 16 (3), pp. 531-538, 2006.
- [208] Ananthasuresh G.K., Vinoy K.J., Gopalakrishnan S., Bhat K.N., Aatre V.K.: *Micro and Smart Systems*. Wiley, 2012.
- [209] Milojević A., Pavlović N.D.: Software for Synthesis of Compliant Mechanisms Without Intersecting Elements, *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanical Engineering*, Vol. 11 (2), pp. 156-168, 2013.
- [210] Abaqus 6.14. Documentation, 2014.
- [211] Reddy A.N., Maheshwari N., Sahu D.K., Ananthasuresh G.K.: Miniature Compliant Grippers With Vision-Based Force Sensing, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 26 (5), pp. 867-877, 2010.
- [212] Milojević A., Pavlović N.D.: Development of a new adaptive shape morphing compliant structure with embedded actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Accepted, first published on June 16, 2015 as doi:10.1177/1045389X155902702015.

- [213] Ogata K.: *Modern Control Engineering* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [214] Milojević A., Pavlović N.D.: Development of Adaptive Compliant Gripper Finger with Embedded Actuators. Book chapter in: *Microactuators and Micromechanisms, Mechanisms and Machine Science*, Springer, Vol. 30, pp. 33-49, 2015.
- [215] Choi H., Koc M.: Design and feasibility tests of a flexible gripper based on inflatable rubber pockets, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46 (12-13), pp. 1350–1361, 2006.
- [216] Jain R.K., Majumder S., Dutta A.: SCARA based peg-in-hole assembly using compliant IPMC micro gripper, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 61 (3), pp. 297-311, 2013.
- [217] Jung G-P., Koh J-S., Cho K-J.: Underactuated Adaptive Gripper Using Flexural Buckling, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol 29 (6), pp. 1396-1407, 2013.
- [218] Giannaccini M.E., Georgilas I., Horsfield I., Peiris B.H.P.M., Lenz A., Pipe A.G., Dogramadzi S.: A variable compliance, soft gripper, *Autonomous Robots*, Vol. 36 (1), pp. 93–107, 2014.
- [219] Araromi O.A., Gavrilovich I., Shintake J., Rosset S., Richard M., Gass V., Shea H.R.: Rollable multisegment dielectric elastomer minimum energy structures for a deployable microsatellite gripper, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* Vol. 20 (1), pp. 438-446, 2014.
- [220] Amend J.R.Jr., Brown E., Rodenberg N., Jaeger H., Lipson H.: A positive pressure universal gripper based on the jamming of granular material, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 28, pp. 341-350, 2012.
- [221] Milojević A., Pavlović N.D., Pavlović N.T.: Adaptive Compliant Gripper Finger with Embedded Extending Actuators. In: *Proceedings of the 58th Ilmenau Scientific Colloquium*, 08-12 September, Ilmenau, Germany, 121:9 (11.pp), 2014.
- [222] Milojević A., Linss S., Zentner L., Pavlović N.T., Pavlović N.D., Petrović T., Milošević M., Tomić M.: Optimal Design of Adaptive Compliant Mechanisms with Inherent Actuators Comparing Discrete Structures with Continuum Structures Incorporating Flexure Hinges. In: *Proceedings of the 58th Ilmenau Scientific Colloquium*, 08-12 September, Ilmenau, Germany, 141:4 (12.pp), 2014.

- [223] Milojević A., Pavlović N.D., Čojbasić Ž., Tomić M., Linss S., Pavlović N.T., Milošević M.: A Concept of Adaptive Compliant Gripper with Embedded Actuators and Sensors. In: Proceedings of the 3rd International Conference Mechanical Engineering in XXI Century, 17-18 September, Niš, Serbia, 2015.
- [224] Hopkins J.B., Culpepper P.M.L.: MIT Lecture, Compliant Mechanisms, 2.994: Lectures on Flexures, slajd 16, 2010.
- [225] <https://www.pinterest.com/pin/493918284104602790/>, pristupljeno decembra 2015.
- [226] <http://fineartamerica.com/featured/soaring-eagle-dean-gribble.html>, pristupljeno decembra 2015.
- [227] http://newthingsintech.blogspot.rs/2012_10_01_archive.html, pristupljeno decembra 2015.
- [228] <http://www.robertotoole.com/>, pristupljeno decembra 2015.
- [229] http://www.firstlighttours.com/PHOTOS/eagle09_1009.jpg, pristupljeno decembra 2015.
- [230] Yoseph B-C.: Electroactive Polymers as Artificial Muscles – Reality and Challenges. In: Proceedings of the 42nd AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference (SDM), Gossamer Spacecraft Forum (GSF), Seattle WA, 16-19 April, 2001-1492 (10pp), 2001.
- [231] Yoseph B-C.: Electroactive polymers as artificial muscles - capabilities, potentials and challenges, Handbook on Biomimetics, Yoshihito Osada (Chief Ed.), Section 11, in Chapter 8, “Motion” paper #134, publisher: NTS Inc., Aug. 2000.
- [232] Yoseph B-C.: Electro-active polymers: current capabilities and challenges. In: Proceedings of the SPIE Smart Structures and Materials Symposium, EAPAD Conference, San Diego, CA, 18-21 March, 4695-02 (6pp), 2002.
- [233] Mirfakhrai T., Madden J.D.W., Baughman R.H.: Polymer artificial muscles, Materials Today, Vol. 10 (4), pp. 30-38, 2007.
- [234] Berselli G., Vertechy R., Vassura G.: Smart Actuation and Sensing Systems - Recent Advances and Future Challenges. InTech, 2012.
- [235] Kruusmaa M., Fiorini P.: Electroactive Polymers in Space: Design Considerations and Possible Applications. In: Proceedings of the 9th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robots and Automation, ASTRA 2006 ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 28-30 November, 7pp, 2006.
- [236] Bhandari B., Lee G-Y., Ahn S-H.: A review on IPMC material as actuators and sensors: Fabrications, characteristics and applications, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13 (1), pp. 141-163, 2012.

- [237] Chung C.K., Fung P.K., Hong Y.Z., Ju M.S., Lin C.C.K., Wu T.C.: A novel fabrication of ionic polymer-metal composites (IPMC) actuator with silver nano-powders, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 117 (2), pp. 367-375, 2006.
- [238] Rossiter J., Yap B., Conn A.: Biomimetic chromatophores for camouflage and soft active surfaces, *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol. 7 (3), 036009 (10pp), 2012.
- [239] Lochmatter P.: Development of a Shell-like Electroactive Polymer (EAP) Actuator. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2007.
- [240] Kovacs G., Düring L., Michel S., Terrasi G.: Stacked dielectric elastomer actuator for tensile force transmission, *Sensors and Actuators A*, Vol. 155 (2), pp. 299–307, 2009.
- [241] Wissler M.T.: Modeling Dielectric Elastomer Actuators. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2007.
- [242] Silvain M.: Rolled actuators based on Electro Active Polymers (EAP), Data sheet, Electro Active Polymer Group, Mechanical Systems Engineering, Empa, 2011.
- [243] Zhang R.: Development of Dielectric Elastomer Actuators and their Implementation in a Force Feedback Interface. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2007.
- [244] Gabor K., Soon Mok H., Silvain M., Ron P., Qibing P.: Study on core free rolled actuator based on soft dielectric EAP. In: *Proceedings of the SPIE*, Vol. 6927, ators and 69270X (15pp), 2008.
- [245] Ahmed S., Ounaies Z., Frecker M.: Investigating the performance and properties of dielectric elastomer actuators as a potential means to actuate origami structures, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23 (9), 094003 (14pp), 2014.
- [246] <http://www.piceramic.com/product-detail-page/p-882-p-888-100810.html>, pristupljeno decembra 2015.
- [247] http://www.analog-eetimes.com/en/haptics-technology-picking-up-good-vibrations.html?cmp_id=71&news_id=222902251&page=3, pristupljeno decembra 2015.
- [248] Johnson Matthey Piezo Products, Piezo Products Company Brochure, <http://www.piezoproducts.com/en/>, 2015.
- [249] <http://www.invent-gmbh.de/en/company/business-activities/innovative-actuators-and-sensors-duraact-piezo-patches/>, pristupljeno decembra 2015.
- [250] Daerden F., Lefeber D.: Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation, *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, Vol. 47 (1), pp. 10–21, 2002.

- [251] <http://hydraulicspneumatics.com/other-technologies/it-looks-piece-hose-its-pneumatic-tensile-actuator>, pristupljeno decembra 2015.
- [252] <http://biodesign.seas.harvard.edu/research>, pristupljeno decembra 2015.
- [253] Greef A.de, Lambert P., Delchambre A.: Towards flexible medical instruments: Review of flexible fluidic actuators, *Precision Engineering*, Vol. 33 (4), pp. 311–321, 2009.
- [254] Aschenbeck K.S., Kern N.I., Bachmann R.J., Quinn R.D.: Design of a Quadruped Robot Driven by Air Muscles. In: *Proceedings of the First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2006.*, Pisa, 20-22 February, pp. 875-880, 2006.
- [255] Polygerinos P., Wang Z., Overvelde J.T.B., Galloway K.C., Wood R.J., Bertoldi K., Walsh C.J.: Modeling of Soft Fiber-reinforced Bending Actuators. *IEEE Transactions on Robotics*. Accepted, 2015.
- [256] FESTO, Fluidic Muscle DMSP/MAS, https://www.festo.com/cms/en-us_us/15737_15744.htm, pristupljeno decembra 2015.
- [257] <https://www.festo.com/group/de/cms/10248.htm>, pristupljeno decembra 2015.
- [258] Abiri R., Nadafi R., Kabganian, M.: Design, fabrication, and nonlinear control of a flexible minirobot module by using shape memory alloy actuators, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Accepted, first published on 2015 as doi: 10.1177/1045389X15590638.
- [259] McGrath, D.J., O'Brien B., Bruzzi M., McHugh P.E.: Nitinol stent design – understanding axial buckling, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 40, pp. 252-263, 2014.
- [260] Mohd Jani J., Leary M., Subic A., Gibson M.A.: A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Materials and Design*, Vol. 56, pp. 1078–1113, 2014.
- [261] Nohouji H.S., Hamed M., Salehi M.: Modeling, validation, and testing of a Ti-49.8%Ni shape memory actuator, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, first publish on 2014 as doi: 10.1177/1045389X14551430.
- [262] Furst S.J., Seelecke S.: Modeling and experimental characterization of the stress, strain, and resistance of shape memory alloy actuator wires with controlled power input, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23 (11), pp. 1233–1247, 2012.

- [263] Costanza G., Tata M.E., Calisti C.: Nitinol one-way shape memory springs: Thermomechanical characterization and actuator design, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 157 (1), pp. 113-117, 2010.
- [264] Rykлина E.P., Prokoshkin S.D., Khmelevskaya I.Yu., Shakhmina A.A.: One-way and two-way shape memory effect in thermomechanically treated TiNi-based alloys, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 481-482, pp. 134-137, 2008.
- [265] Luo H.Y., Abel E.W.: A comparison of methods for the training of NiTi two-way shape memory alloy, *Smart Materials and Structures*, Vol. 16 (6), pp. 2543–2549, 2007.
- [266] Auricchio F., Marfia S., Sacco E.: Modelling of SMA materials: Training and two way memory effects, *Computers and Structures*, Vol. 81 (24-25), pp. 2301–2317, 2003.
- [267] <http://jmmedical.com/nitinol/64/Wire.html>, pristupljeno decembra 2015.
- [268] <https://katehutch.wordpress.com/>, pristupljeno decembra 2015.
- [269] http://www.alibaba.com/product-detail/TiNi-shape-memory-Alloy-sheet-plate_283493286.html, pristupljeno decembra 2015.
- [270] Chiorean R-S.: Electro-Thermo-Mechanical Modeling of V-beam Actuators, *Procedia Technology*, Vol. 19, pp. 56-61, 2015.
- [271] http://www.hk-phy.org/iq/memory_alloy/memory_alloy_e.html, pristupljeno decembra 2015.
- [272] https://en.wikipedia.org/wiki/Nickel_titanium, pristupljeno decembra 2015.
- [273] Toki Corporation: Artificial Metal-Based Muscle, BioMetal Fiber, BMF series – technical manuscript, <http://www.toki.co.jp/biometal/english/contents.php>, pristupljeno decembra 2015.
- [274] Tadesse Y., Hong D., Priya S.: Twelve Degree of Freedom Baby Humanoid Head Using Shape Memory Alloy Actuators, *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 3 (1), 011008 (18pp), 2011.
- [275] Oh H-U., Izawa K., Taniwaki S.: Development of variable-damping isolator using bio-metal fiber for reaction wheel vibration isolation, *Smart Materials and Structures*, Vol. 14 (5), pp. 928–933, 2005.
- [276] DYNALLOY, Inc.: Technical Characteristics of Flexinol® Actuator Wires, <http://www.dynalloy.com/flexinol.php>, pristupljeno decembra 2015.
- [277] Gilbertson R.G.: Muscle Wires Project Book. <http://www.musclewires.com/MWProjectBooks.php>, pristupljeno 2015.

- [278] Misun R., Eun-Ho K., Woo-Ram K., In L.: Development of a shape memory alloy wire actuator to operate a morphing wing, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 52 (2), pp. 519-531, 2014.
- [279] <http://jmmedical.com/nitinol/64/Wire.html>, pristupljeno decembra 2015.
- [280] <http://smartwires.eu/index.php>, pristupljeno decembra 2015.
- [281] Vatani M., Engeberg E.D., Choi J-W.: Detection of the position, direction and speed of sliding contact with a multi-layer compliant tactile sensor fabricated using direct-print technology, *Smart Materials and Structures*, Vol. 23 (9), 095008 (11pp), 2014.
- [282] Vogt D.M., Park Y-L., Wood R.J.: Design and Characterization of a Soft Multi-Axis Force Sensor Using Embedded Microfluidic Channels, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 13 (10), pp. 4056–4064, 2013.
- [283] Park Y-L., Chen B-R., Wood R.J.: Design and Fabrication of Soft Artificial Skin Using Embedded Microchannels and Liquid Conductors, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 12 (8), pp. 2711–2718, 2012.
- [284] Park Y-L., Majidi C., Kramer R., Bérard P., Wood R.J.: Hyperelastic pressure sensing with a liquid-embedded elastomer, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 20 (12), 125029 (6pp), 2010.
- [285] <http://www.mayser-schaumstofftechnik.de/english/products/inducon/>, pristupljeno decembra 2015.
- [286] Sanchez-Coronado J., Chung D.D.L.: Thermomechanical behavior of a graphite foam, *Carbon*, Vol. 41 (6), pp. 1175–1180, 2003.
- [287] Coursey J.S., Roh H., Kim J., Boudreaux P.J.: Graphite Foam Thermosyphon Evaporator Performance: Parametric Investigation of the Effects of Working Fluid, Liquid Level, and Chamber Pressure. In: *Proceedings of the IMECE2002 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, New Orleans, Louisiana, 17-22 November, IMECE2002-33733 (6pp), 2002.
- [288] Linß S., Griebel S., Lena Z.: Pneumatically driven compliant structures based on the multi-arc principle for the use in adaptive support devices. In: *Proceeding of the 56th International Scientific Colloquium*, Ilmenau University of Technology, 12 – 16 September, urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011iwk-137:4 (6pp), 2011.
- [289] Brady S., Diamond D., Lau K-T.: Inherently conducting polymer modified polyurethane smart foam for pressure sensing, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 119 (2), pp. 398–404, 2005.

- [290] Dunne L.E., Brady S., Smyth B., Diamond D.: Initial development and testing of a novel foam-based pressure sensor for wearable sensing, *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, Vol. 2 (1), 7pp, 2005.
- [291] Samad Y.A., Li Y., Schiffer A., Alhassan S.M., Liao K.: Graphene Foam Developed with a Novel Two-Step Technique for Low and High Strains and Pressure-Sensing Applications, *Small*, Vol. 11 (20), pp. 2380–2385, 2015.
- [292] Tian H., Shu Y., Wang X-F., Mohammad A.M., Bie Z., Xie Q-Y., Li C., Mi W-T., Yang Y., Ren T-L.: A Graphene-Based Resistive Pressure Sensor with Record-High Sensitivity in a Wide Pressure Range, *Scientific Reports*, Vol. 5, 8603 (6pp), 2015.
- [293] Milojević A., Pavlović N.D., Linß S., Zentner L.: A new adaptive controllable shape morphing compliant structure with embedded actuators and sensors. In: *Proceedings of the 14th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Taipei, Taiwan, 25-30 October, OS13-051 (8pp), 2015.
- [294] Zentner L., Turkevi-Nagy N., Böhm V.: Entwicklung von fluidischen Elastomeraktuatoren. In: *Proceedings of the 47. Internationales wissenschaftliches Kolloquium TU Ilmenau*, Ilmenau, pp. 260-261, 2002.

Biografija autora

Kandidat Andrija Milojević, dipl.inž. mašinstva, rođen je 17.07.1987. godine u Nišu gde je sa odličnim uspehom završio osnovnu i srednju, Mašinsku tehničku školu "15. Maj", u kojoj je kao đak generacije stekao zvanje Mašinski tehničar za kompjutersko konstruisanje. Za iskazan izvanredan uspeh u završenom srednjem obrazovanju dobio je juna 2006. godine Pohvalnicu Nj.K.V. Prestolonaslednika Aleksandra II.

Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu upisao je 2006. godine. Diplomirao je 1.07.2011. godine na smeru "Mehatronika i upravljanje" sa prosečnom ocenom 10 odbranivši diplomski rad pod nazivom "Gipki bistabilni mehanizmi" sa ocenom 10. Na svakoj godini studija proglašavan je najboljim studentom generacije. Kao član ekipe Mašinskog fakulteta učestvovao je na takmičenjima u znanju iz Matematike i Mehanike na "Mašinjadama", takmičenjima studenata mašinskih i tehničkih fakulteta sa prostora bivših jugoslovenskih republika, i dve godine zaredom osvajao prva mesta (iz Mehanike 2009. i 2010. godine i iz Matematike 2010. godine). Januara 2010. godine i Januara 2011. godine dobio je najvišu nagradu grada Niša "11. januar", kao najbolji student Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu. Kao najbolji diplomirani student Univerziteta u Nišu u školskoj 2010/11. godini dobio je nagradu "Srebrni znak" Univerziteta u Nišu.

Za svoje uspehe tokom studija nagrađivan je i stipendijom PECD (Partnerstvo za obrazovanje i razvoj zajednice 2009/2010), stipendijama grada Niša (kao najbolji student Mašinskog fakulteta u Nišu u 2010. i 2011. godini), stipendijom Fonda za mlade talente (2010/2011), stipendijom EFG Banke (2010/2011) i stipendijom Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja (2011-2013). Dobitnik je i jednokratne stipendije Internacionalne Federacije za Promociju Nauke o Mehanizmima i Mašinama - Young Delegate Program (YDP) Grant of the International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science, IFToMM (2014).

Kandidat je 2011. godine upisao doktorske studije na Mašinskom fakultetu u Nišu na studijskom programu Mehatronika i upravljanje sistemima. Položio je sve ispite predviđene nastavnim planom i programom sa prosečnom ocenom 10.

Neposredno nakon diplomiranja uključen je u međunarodni Projekt bilateralne saradnje sa Tehničkim Univerzitetom u Ilmenau ("Razvoj metoda za projektovanje funkcionalnih gipkih mehanizama i integraciju senzora u gipke mehanizme"), koji su finansirala odgovarajuća ministarstva Republike Srbije i Savezne Republike Nemačke. U okviru ovog projekta proveo je dva puta po 2 meseca (2011. i 2012. godine) na TU Ilmenau.

Kao stipendista Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, kandidat je u svojstvu istraživača bio uključen u rad na projektu III 44004 "Razvoj i integracija tehnologija projektovanja inteligentnog mehatroničkog interfejsa za primenu u medicini (HUMANISM)" u periodu od 2011. do 2013. godine.

Kandidat je aprila 2013. godine izabran u zvanje asistenta na Mašinskom fakultetu u Nišu, uža naučna oblast Mehatronika.

Od 2011. godine kandidat izvodi vežbanja na osnovnim i master akademskim studijama na Mašinskom fakultetu u Nišu, na predmetima: Gipki mehanizmi, Mehanizmi i Mašine, Projektovanje Mehanizama, Mikromehatronika, Mehatronika, Komponente mehatroničkih sistema (optičke komponente), Optički elementi u mehatronici, Inženjerska grafika (deo grafika mašinskih delova) i Informacione tehnologije 1 (deo grafika mašinskih delova).

Bio je jedan od realizatora akreditovanog programa stručnog usavršavanja zaposlenih u obrazovanju (u okviru Zavoda za unapređivanje obrazovanja i vaspitanja Vlade Republike Srbije) u školskoj 2008/2009. godini: "Primena robota kao nastavnih sredstava u laboratorijskoj nastavi", a držao je, u organizaciji Mašinskog fakulteta u Nišu, i naučno-popularna predavanja o robotima kao mehatroničkim sistemima u srednjim školama u Nišu, Leskovcu, Paraćinu, Kragujevcu, Kruševcu, Zaječaru, Boru, Pirotu, Vladičinom Hanu, Surdulici i Negotinu. Držao je i radionice za učenike srednjih škola u okviru predmeta Optički elementi u mehatronici. Više puta je bio učesnik na festivalu "Nauk nije bauk". Učestvovao je i u organizaciji naučno-stručnih konferencija:

- "Mašinsko inženjerstvo u XXI veku", Niš, 2010. i 2015. godine,
- XIV Naučno-stručne Konferencije o železnici ŽELKON'10, Niš, 2010. godine,
- CONSTRUCTIVE MATHEMATICS - Foundations and Practice, Niš, 2013. godine.

U toku angažovanja na Mašinskom fakultetu u Nišu učestvuje u realizaciji dva međunarodna projekta: "Razvoj i optimalno projektovanje adaptivnih gipkih mehanizama sa integrisanim aktuatorima" i "Inteligentno upravljanje aktivne strukture u robotici i mehatronici", finansiranih od strane DAAD-a i Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. U okviru ovih projekata proveo je dva puta po 2 meseca (2014. i 2015. godine) na TU Ilmenau i kraći boravak od 12 dana na TU Berlin (2015. godine). Takođe je i učesnik nacionalnog projekta TR35005 "Istraživanje i razvoj nove generacije vetrogeneratora visoke energetske efikasnosti", finansiranog od strane Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Autor je ili koautor 26 rada objavljenih u međunarodnim časopisima i prezentovanih na međunarodnim konferencijama (3 rada u časopisima sa SCI liste), jednog poglavlja u monografiji međunarodnog značaja i tri tehnička rešenja.

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме, име једног
родитеља и име Милојевић (Предраг) Андрија
Датум и место рођења 17.07.1987., Ниш

Основне студије

Универзитет
Факултет
Студијски програм
Звање
Година уписа
Година завршетка
Просечна оцена

Мастер студије, магистарске студије

Универзитет Универзитет у Нишу
Факултет Машински факултет
Студијски програм Машинско инжењерство
Звање Дипломирани инжењер машинства
Година уписа 2006/2007
Година завршетка 2010/2011
Просечна оцена 10.00
Научна област Мехатроника
Наслов завршног рада Гипки бистабилни механизми

Докторске студије

Универзитет Универзитет у Нишу
Факултет Машински факултет
Студијски програм Машинско инжењерство
Година уписа 2011/2012
Остварен број ЕСПБ бодова 150
Просечна оцена 10.00

НАСЛОВ ТЕМЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Наслов теме докторске
дисертације Развој адаптивног гипког система за управљање обликом радне површине
Име и презиме ментора,
звање Ненад Д. Павловић, редовни професор
Број и датум добијања
сагласности за тему
докторске дисертације 8/20-01-001/16-033; 17.02.2016. године

ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Број страна 267
Број поглавља 8
Број слика (шема, графикона) 177
Број табела 20
Број прилога -

**ПРИКАЗ НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КАНДИДАТА
који садрже резултате истраживања у оквиру докторске дисертације**

Р. бр.	Аутор-и, наслов, часопис, година, број волумена, странице	Категорија
1	<p>Milojević A., Pavlović N. D., Development of a new adaptive shape morphing compliant structure with embedded actuators, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Accepted, first published on June 16, 2015 as doi:10.1177/1045389X155902702015.</p>	M21
	<p><i>У раду је представљено оригинално решење адаптивне гипке структуре са уграђеним актуаторима, која може управљиво да мења облик своје радне површине како би задовољила захтеве примене. Побољшаном методологијом синтезе је у овом раду добијено решење гипког система код кога се структурни елементи и актуатори међусобно не укрштају тако да је класичном технологијом израђен физички прототип ове структуре. Испитана је и могућност скалирања добијене адаптивне гипке структуре, а представљене су и две могуће примене ове структуре, као адаптивног гипког хватача и као адаптивног крила летилице чијим обликом би се управљало тако да опонаша крила птице при њеном лету.</i></p>	
2	<p>Milojević A., Pavlović N. D., Development of Adaptive Compliant Gripper Finger with Embedded Actuators, book chapter in: Microactuators and Micromechanisms, Mechanisms and Machine Science, Vol. 30, Springer,2015, pp. 33-49. DOI 10.1007/978-3-319-15862-4_4.</p>	M14
	<p><i>Гипки механизми са уграђеним актуаторима представљају један од начина за реализовање хватача који би могао да прилагоди своју радну површину облику објекта који хвата и да на тај начин оствари безбедну манипулацију и објекта неправилног и непредвидивог облика. У овом раду представљено је оригинално решење једног таквог адаптивног гипког прста хватача са уграђеним актуаторима. Демонстриран је и нови приступ синтези гипких механизма са уграђеним актуаторима, код кога је избор локације актуатора укључен у процес синтезе. Показано је да понуђено решење прста гипког хватача може да реализује различите облике површине којом реализује хватање.</i></p>	
3	<p>Milojević A., Pavlović N. D., Software for Synthesis of Compliant Mechanisms Without Intersecting Elements, FACTA UNIVERSITATIS, Series: Mechanical Engineering, Vol. 11, No 2, 2013, pp. 156-168.</p>	M51
	<p><i>Гипки механизми се дефинише као покретна, материјално кохерентна структура која може да пренесе силе и трансформише кретање само захваљујући еластичној деформацији одговарајућих сегмената структуре. За синтезу гипких механизма се најчешће користе поступци оптимизације топологије. У овом раду је представљен побољшани приступ синтези гипких механизма (и одговарајући софтвер), који унапређује актуелне поступке оптимизације топологије тиме што елиминира укрштања одговарајућих сегмената гипког механизма, која повећавају крутост структуре која мора бити довољно еластична, а није их ни једноставно израдити. Методологија коју софтвер користи и његове могућности демонстрирани су на примеру синтезе гипког хватача и гипког инвертора померања.</i></p>	
4	<p>Milojević A., Pavlović N. D., Pavlović N. T., Adaptive Compliant Gripper Finger with Embedded Extending Actuators, In Proceedings of 58th Ilmenau Scientific Colloquium, 2014, Ilmenau, Germany, 121:9 (11.pp).</p>	M33
	<p><i>Гипки механизми са уграђеним актуаторима представљају један од начина за реализовање хватача који би могао да прилагоди своју радну површину, којом реализује хватање, различитим облицима објекта којима манипулише. У овом раду је представљено ново решење адаптивног гипког прста хватача са уграђеним актуаторима. Приказано је и какве све облике радне површине може да реализује овакво решење хватача уколико се користе актуатори који реализују екстензију крајњих тачака актуатора.</i></p>	
5	<p>Milojević A., Linss S., Zentner L., Pavlović N. T., Pavlović N. D., Petrović T., Milošević M., Tomić M., Optimal Design of Adaptive Compliant Mechanisms with Inherent Actuators Comparing Discrete Structures with Continuum Structures Incorporating Flexure Hinges, In Proceedings of 58th Ilmenau Scientific Colloquium, 2014, Ilmenau, Germany, 141:4 (12.pp).</p>	M33
	<p><i>Адаптивни гипки системи се уобичајено пројектују тако што се најпре оптимизацијом топологије долази до оптималног решења гипке структуре, а након тога се усваја оптимална локација актуатора и сензора гипког система. У овом раду је представљена методологије за истовремено (оптимално) пројектовање гипке структуре, актуације (погона) и сензорике (детекције) гипког система, при чему се топологија структуре гипких механизма и избор локације актуатора/сензора симултано дефинишу. Методологија је демонстрирана на примеру развоја адаптивног гипког хватача. Извршена је и оптимизација облика појединих структурних елемената гипког хватача. Ради побољшања перформанси развијеног решења хватача, гипки зглобови су изведени у облику зареза чији је облик формулисан одговарајућим полиномима.</i></p>	
6	<p>Linss S., Milojević A., Zentner L., Considering the Design of the Flexure Hinge Contour for the Synthesis of Compliant Linkage Mechanisms, In Proceedings of 58th Ilmenau Scientific Colloquium, 2014, Ilmenau, Germany, 033:4 (12.pp).</p>	M33
	<p><i>Због својих многобројних предности, гипки механизми имају велику примену у системима за прецизно вођење. Као зглобови гипких механизма, код примена у оваквим системима, често се користе гипки зглобови у облику зареза. У овом раду је приказан утицај димензија гипких зглобова у облику зареза на прецизност вођења гипких механизма. Применом методе коначних елемената (МКЕ анализа) извршена је оптимизација облика гипких зглобова механизма који треба да реализује праволинијско вођење извршне тачке механизма. Закључено је и да гипки механизми са зглобовима у облику зареза, чији облик одговара полиному 4. реда, реализују високу прецизност вођења и велики опсег кретања извршне тачке механизма.</i></p>	
7	<p>Milojević A., Pavlović N. D., Milošević M., Tomić M., New Software for Synthesis of Compliant Mechanisms, In Proceedings of the 2nd International Conference „Mechanical Engineering in XXI Century“, 2013, Niš, pp. 273-278.</p>	M33
	<p><i>У раду је развијен нови софтвер (алгоритам) за синтезу гипких механизма. Софтвер користи методу оптимизације топологије континуума. Могућности софтвера су демонстриране на примеру синтезе гипког механизма хватача и гипког инвертора померања.</i></p>	

8	<p>Linss S., Milojević A., Zentner L., On the Influence of Flexure Hinge Geometry on the Motion Range and Precision of Compliant Gripping Mechanisms, In Proceedings of the 2nd International Conference „Mechanical Engineering in XXI Century“, 2013, Niš, pp. 255-260.</p> <p><i>У раду је представљена могућност за побољшање прецизности и повећање опсега кретања гинких механизма хватача (са концентрисаном гинкошћу) погодним избором контуре/облика гинких зглобова у облику зареза. Поступак пројектовања приказан је на примеру два гинка механизма хватача који представљају одговарајуће гинке копије познатих круточланих механизма. Прецизност и опсег кретања извршних сегмената гинких механизма хватача анализирани су применом методе коначних елемената, а добијени резултати упоређени су са презиношћу и опсегом кретања одговарајућих круточланих механизма хватача.</i></p>	M33
9	<p>Linss S., Milojević A., Model-Based Design of Flexure Hinges for Rectilinear Guiding With Compliant Mechanisms in Precision Systems, In Proceedings of the conference „Mechanismtechnik in Ilmenau, Budapest und Niš“, Ilmenau (Germany), 2012, pp.13-24.</p> <p><i>Гинки зглобови се често користе у системима за прецизно вођење. У овом раду представљена је могућност за побољшање прецизности вођења као и опсега кретања гинких механизма погодним избором димензија гинких зглобова у облику зареза. Ово побољшање је демонстрирано на примеру два гинка механизма за праволинијско вођење извршне тачке механизма, који представљају гинке копије одговарајућих круточланих механизма. Механизми су анализирани применом методе коначних елемената, а добијени резултати су упоређени са грешком вођења одговарајућих круточланих механизма.</i></p>	M33
10	<p>Milojević A., Compliant Bistable Mechanisms, In Proceedings of the first international symposium for students with papers from mechanical engineering – SRMA 2011 (ISBN 978-86-82631-59-0), 2011, pp. 181-186.</p> <p><i>У раду је демонстриран поступак анализе рада гинких механизма (нелинеарних деформација њихових гинких сегмената) моделом квазикрутог тела, на примеру анализе стабилности положаја једног конкретног, гинког механизма бистабилног затварача.</i></p>	M33

НАПОМЕНА: уколико је кандидат објавио више од 3 рада, додати нове редове у овај део документа

ИСПУЊЕНОСТ УСЛОВА ЗА ОДБРАНУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кандидат испуњава услове за оцену и одбрану докторске дисертације који су предвиђени Законом о високом образовању, Статутом Универзитета и Статутом Факултета.	ДА
Одлуком Научно-стручног већа за техничко-технолошке науке, бр. 8 /20-01-001/16-033 од 17.02.2016. год., дата је сагласност на тему ове докторске дисертације и тиме усвојена оцена Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације, да кандидат испуњава све потребне услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Нишу и Статутом Машинског факултета Универзитета у Нишу за стицање права на пријаву теме и израду докторске дисертације. Кандидат је у међувремену поднео радну верзију докторске дисертације одговарајуће садржине, обима и квалитета, у складу са одобреном темом докторске дисертације.	

ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Кратак опис појединих делова дисертације (до 500 речи)

На самом почетку докторске дисертације кандидата Андрије Милојевића, дипл.маш.инж., дати су подаци о дисертацији на српском и енглеском језику, предговор и изложен је садржај дисертације на 3 странице. Иза тога следи текст дисертације, изложен на 239 страница формата А4 и подељен у 8 поглавља, а на самом крају је на 25 страница наведена цитирана литература са 294 библиографске јединице.

У **уводном** поглављу је најпре објашњен предмет истраживања, а затим су наведени мотиви за израду дисертације, њени циљеви и представљена је њена структура.

У **другом** поглављу је описано стање технике односно преглед литературе на пољу структура које мењају облик. Детаљно је описана већина постојећих решења као и примене за које су развијене. Ово поглавље даје увид у недостатке постојећих решења и сагледава могућности за побољшање постојећих решења као и могућности за даља истраживања. На крају поглавља детаљно је наведено шта је планирано да буде урађено у дисертацији.

У **трећем** поглављу је детаљно описана методологија синтезе гинких система као и синтеза конкретне адаптивне гинке структуре са уграђеним актуаторима и сензорима, која може да мења облик. Поглавље започиње описом постојећих метода за синтезу класичних гинких механизма, уз навођење примера гинких механизма који се добијају применом ових метода. Након тога су у поглављу представљена оригинална побољшања усвојене методе синтезе. Ефикасност методе је демонстрирана на примеру синтезе гинких механизма. Поглавље се завршава синтезом гинког система који може циљано да мења облик, а који је добијен применом ове побољшане методе синтезе.

Четврто поглавље је посвећено развоју 3Д модела адаптивног управљивог гинког система развијеног у претходном поглављу. У овом поглављу су представљене и могућности новоразвијене адаптивне структуре, нумеричким симулацијама њеног понашања.

Петом поглављу је посвећено развоју нове врсте актуатора (направљених од легура које памте облик), који би били управљиви и које би било једноставно уградити у структуру гинког механизма. Поглавље започиње описом стања технике на пољу нових актуаторских технологија односно актуатора направљених од "паметних" материјала. Описане су предности и недостаци постојећих актуаторских технологија и мотивација за развој нових актуатора. Описан је затим детаљно оригинални процес развоја нових актуатора од легура које памте облик. Испитане су карактеристике ових актуатора и њихова функционалност и приказана је њихова уградња у структуру новоразвијене адаптивне структуре. Поглавље се завршава описом функционалности тако добијеног гинког

система - гипке структуре са уграђеним актуаторима направљеним од легура које памте облик. Испитане су могућности оваквог система и потенцијална примена.

Шесто поглавље говори о развоју нове врсте сензора за гипку структуру која треба да мења свој облик. Поглавље започиње описом стања технике на пољу нових сензорских технологија. Затим је детаљно описана процедура развоја нове врсте сензора који се могу једноставно уградити у структуру гипког система. Испитане су карактеристике сензора, њихова функционалност и предложен је аналитички модел за опис њихове функционалности. Поглавље се завршава описом уградње сензора у структуру гипког механизма и испитивања функционалности таквог система.

Седмо поглавље је посвећено опису развоја одговарајућег управљачког алгоритма гипког система.

Осмо поглавље говори о могућим применама новоразвијеног гипког система. Приказани су концепти и описане су могуће примене оваквог система.

У **деветом** поглављу су сумирани закључци, дат је опис доприноса дисертације и указано је на могуће правце даљих истраживања.

ВРЕДНОВАЊЕ РЕЗУЛТАТА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ниво остваривања постављених циљева из пријаве докторске дисертације (до 200 речи)

Кандидат је успешно остварио све постављене циљеве из пријаве докторске дисертације:

- Развијен је оптимизациони алгоритам који врши аутоматску синтезу гипких система и примењен на решавање конкретних проблема;
- Развијен је адаптивни гипки систем који може да оствари различите облике своје радне површине и управљиво да мења њен облик; оваква структура би могла да има мноштво примена од којих су у дисертацији представљене само две потенцијалне примене, као адаптивног гипког хватача и као адаптивног крила летилице;
- Развијена је нова врста актуатора адаптивне гипке структуре, релативно малих габарита, који могу да реализују релативно велики радни ход, лаки су, раде бешумно, управљиви су и не захтевају снажне изворе напајања;
- Развијени су сензори од комерцијално доступних материјала, који могу да детектују притисно оптерећење, имају релативно малу крутост, могу се једноставно уградити на радну површину гипког система и могу да се деформишу, заједно са радном површином, при промени њеног облика;
- Развијен је управљачки алгоритам (контролер) који, на основу информација добијених са сензорских елемената, управља актуаторима и остварује одговарајућу промену облика радне површине;
- Израђен је функционални прототип адаптивне гипке структуре са уграђеним актуаторима и сензорима.

Вредновање значаја и научног доприноса резултата дисертације (до 200 речи)

Докторска дисертација кандидата Андрије Милојевића, дипл.маш.инж., садржи више оригиналних доприноса и решења у области адаптивних гипких система са интегрисаним актуаторима и сензорима, како са теоријског становишта тако и са аспекта практичне реализације. Део резултата, непосредно проистеклих или везаних за ову дисертацију, већ је верификован публикавањем у високо ранжираним часописима из уже научне области којој припада тема докторске дисертације, као и у Зборницима с међународних и домаћих конференција. Најзначајнији научни доприноси докторске дисертације су:

- Оригинална побољшања постојеће методологије синтезе гипких механизма којима се добијају једноставнија решења гипких механизма, која се могу производити класичним технологијама израде;
- Развијен је оригинални оптимизациони алгоритам који врши аутоматску синтезу гипких система (гипких механизма са интегрисаним актуаторима) и примењен на решавање конкретних проблема;
- Развијен је адаптивни гипки систем који може да управља обликом своје радне површине; основне предности оваквог решења над постојећим су да може да реализује више различитих облика радне површине и да може имати више примена;
- Развијена је нова врста актуатора адаптивне гипке структуре;
- Развијена је нова врста гипких сензора који могу да се деформишу, заједно са радном површином гипке структуре, при промени њеног облика.

Оцена самосталности научног рада кандидата (до 100 речи)

Кандидат је испољио изузетан ниво самосталности у раду, анализе научних сазнања у областима истраживања (гипки системи, актуаторика, сензорика), иницирање нових истраживања и оригиналност у осмишљавању и креирању одређених научних и стручних решења. Резултати спроведених истраживања, публиковани и у високо ранжираним часописима из уже научне области којој припада тема докторске дисертације, у потпуности потврђују да је кандидат оспособљен за самосталан научни рад.

ЗАКЉУЧАК (до 100 речи)

На основу изложене анализе докторске дисертације и увидом у публиковане научне радове кандидата, чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације констатују да поднета докторска дисертација у потпуности одговара теми прихваћеној од стране Наставно-научног већа Машинског факултета у Нишу и Научно-стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу и да представља оригиналан и вредан допринос области адаптивних гипких система са интегрисаним актуаторима и сензорима, и са задовољством предлажу Наставно-научном већу Машинског факултета Универзитета у Нишу да рад кандидата Андрије Милојевића, дипл.маш.инж., под називом:

Развој адаптивног гипког система за управљање обликом радне површине

прихвати као докторску дисертацију и кандидата позове на усмену јавну одбрану.



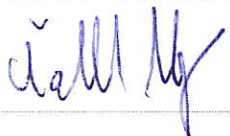


КОМИСИЈА

Број одлуке НСВ о именовану Комисије

8/20-01-003/16-029

Датум именовања Комисије

18.04.2016. године

Р. бр.	Име и презиме, звање		Потпис
1.	др Ненад Д. Павловић, редовни професор	председник, ментор	
	Мехатроника (Научна област)	Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)	
2.	Prof.Dr.-Ing. Habil. Lena Zentner	члан	
	Теорија машина и механизма (Научна област)	Машински факултет Техничког универзитета у Илменау (Немачка) (Установа у којој је запослен)	
3.	др Ненад Т. Павловић, редовни професор	члан	
	Мехатроника (Научна област)	Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)	
4.	др Александар Вег, редовни професор	члан	
	Теорија машина и механизма (Научна област)	Машински факултет Универз. у Београду (Установа у којој је запослен)	
5.	др Жарко Ђојбашић, редовни професор	члан	
	Аутоматско управљање и роботика (Научна област)	Машински факултет Универзитета у Нишу (Установа у којој је запослен)	

Датум и место:

27.04. 2016.

у Нишу, Београду, Именау-у

ЗАПИСНИК

са усмене одбране докторске дисертације Андрије Милојевића, дипломираног инжењера машинства, одржане 12. јула 2016. године на Машинском факултету у Нишу.

Одбрана докторске дисертације почела је у 11⁰⁰ часова уводним излагањем Председника Комисије, који је саопштио основне биографске податке о кандидату, ток поступка израде докторске дисертације као и Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације.

Кандидат је приступио излагању докторске дисертације, износећи методологију рада и постигнуте резултате до којих је дошао.

После завршеног усменог излагања кандидата, чланови Комисије су поставили више питања на које је кандидат дао одговоре.

Одбрана је завршена у 12³⁰ часова.

На основу усмене одбране, одговора кандидата на постављена питања чланова Комисије и на основу Одлуке о усвајању Извештаја Наставно-научног већа Факултета и Научно-стручног већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Нишу, чланови Комисије су једногласно донели


О Д Л У К У


Андрија Милојевић, дипломирани инжењер машинства, одбранио је докторску дисертацију под називом:


„РАЗВОЈ АДАПТИВНОГ ГИПКОГ СИСТЕМА ЗА УПРАВЉАЊЕ ОБЛИКОМ РАДНЕ ПОВРШИНЕ“


и стекао научни назив

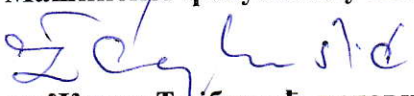
ДОКТОР НАУКА – МАШИНСКО ИНЖЕЊЕРСТВО


др Ненад Д. Павловић, редовни професор
Машинског факултета у Нишу


Prof. Dr – Ing. Habil. Lena Zentner
Машински факултет Техничког
Универзитета у Илменау (Немачка)


др Ненад Т. Павловић, редовни професор
Машинског факултета у Нишу


др Александар Вег, редовни професор
Машинског факултета у Београду


др Жарко Ђојбашић, редовни професор
Машинског факултета у Нишу

IZJAVA O AUTORSTVU

Izjavljujem da je doktorska disertacija, pod naslovom

RAZVOJ ADAPTIVNOG GIPKOG SISTEMA ZA UPRAVLJANJE OBLIKOM RADNE POVRŠINE

koja je odbranjena na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu:

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da ovu disertaciju, ni u celini, niti u delovima, nisam prijavljivao/la na drugim fakultetima, niti univerzitetima;
- da nisam povredio/la autorska prava, niti zloupotrebio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci, koji su u vezi sa autorstvom i dobijanjem akademskog zvanja doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada, i to u katalogu Biblioteke, Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Nišu, kao i u publikacijama Univerziteta u Nišu.

U Nišu, 14.10.2016.

Potpis autora disertacije:



Andrija Milojević

**IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANOG I ELEKTRONSKOG OBLIKA
DOKTORSKE DISERTACIJE**

Naslov disertacije:

**RAZVOJ ADAPTIVNOG GIPKOG SISTEMA ZA
UPRAVLJANJE OBLIKOM RADNE POVRŠINE**

Izjavljujem da je elektronski oblik moje doktorske disertacije, koju sam predao/la za unošenje u **Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu**, istovetan štampanom obliku.

U Nišu, 14.10.2016.

Potpis autora disertacije:



Andrija Milojević

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Nikola Tesla“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu unese moju doktorsku disertaciju, pod naslovom:

RAZVOJ ADAPTIVNOG GIPKOG SISTEMA ZA UPRAVLJANJE OBLIKOM RADNE POVRŠINE


Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom obliku, pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju, unetu u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Nišu, mogu koristiti svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons), za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
- 3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade (CC BY-NC-ND)**
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerade (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

U Nišu, 14.10.2016.

Potpis autora disertacije:


Andrija Milojević