

# PRIMJENA BIOMIMETIČKIH MATERIJALA

---

**Filipčić, Antonio**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Karlovac University of Applied Sciences / Veleučilište u Karlovcu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:128:542057>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-07**



**VELEUČILIŠTE U KARLOVCU**  
Karlovac University of Applied Sciences

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Karlovac University of Applied Sciences - Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU

STROJARSKI ODJEL

STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVA

ANTONIO FILIPČIĆ

# **PRIMJENA BIOMIMETIČKIH MATERIJALA**

DIPLOMSKI RAD

KARLOVAC, 2024. godina

VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
STROJARSKI ODJEL  
STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVA

ANTONIO FILIPČIĆ

# PRIMJENA BIOMIMETIČKIH MATERIJALA

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

dr. sc. Tihana Kostadin, prof. stručnog studija

KARLOVAC, 2024. godine



VELEUČILIŠTE U KARLOVCU  
Karlovac University of Applied Sciences

Klasa:  
602-07/\_\_\_-01/\_\_\_

Ur broj:  
2133-61-04-\_\_\_-01

Datum:

## ZADATAK ZAVRŠNOG / DIPLOMSKOG RADA

|  |  |   |  |
|--|--|---|--|
| * Ime i prezime                                      | ANTONIO FILIPČIĆ                       |   |  |
| OIB / JMBG   |  |   |  |
| Adresa   |  |   |  |
| Tel. / Mob./e-mail                                   |  |   |  |
| Matični broj studenta                                | 0123422013                             |   |  |
| JMBAG  | 0248070454                             |   |  |
| Studij (staviti znak X ispred odgovarajućeg studija) | <input type="checkbox"/> preddiplomski | <input checked="" type="checkbox"/> Specijalistički diplomski |  |
| Naziv studija  | STRUČNI DIPLOMSKI STUDIJ STROJARSTVO   |   |  |
| Godina upisa   | 2022.                                  |   |  |
| Datum podnošenja molbe                               | 29.04.2024.                            |   |  |
| Vlastoručni potpis studenta/studentice               | <i>Filipčić</i>                        |   |  |

\* Naslov teme na hrvatskom: PRIMJENA BIOMIMETIČKIH MATERIJALA

\* Naslov teme na engleskom: APPLICATION OF BIOMIMETIC MATERIALS

### Opis zadatka:

Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela. U teorijskom dijelu opisati povijest i svojstva biomimetičkih materijala i njihovu primjenu. U eksperimentalnom dijelu, temeljem dostupne literature, dati pregled i obraditi konkretne primjere primjene biomimetičkih materijala u tehnici i medicini, prikazati rezultate ispitivanja za navedene literaturne primjere, pa analizirati s obzirom na svojstva, interdisciplinarnost, primjenu, kao i biokompatibilnost. Također na kraju rada napisati zaključak. Rad urediti prema Uputama za pisanje završnog / diplomskog rada na Strojarskom odjelu, kako je objavljeno na web stranicama Veleučilišta u Karlovcu.

Mentor:

Predsjednik Ispitnog povjerenstva:

## Izjava

Izjavljujem da sam diplomski rad s temom Primjena biomimetičkih materijala izradio samostalno koristeći se znanjem koje sam stekao tijekom studiranja na Veleučilištu u Karlovcu uz korištenje navedene literature i uz konzultacije s mentoricom.

Karlovac 30. 4. 2024.

Antonio Filipčić

## **PREDGOVOR**

Želio bih se zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška u studiranju.

Također bih se želio zahvaliti svim profesorima koji su mi prenijeli svoje znanje za vrijeme mog studiranja na Veleučilištu u Karlovcu.

Posebno bih se želio zahvaliti mentorici profesorici Tihani Kostadin za svu pomoć i savjete pri izradi diplomskog rada.

## **SAŽETAK**

Cilj ovog diplomskog rada bio je opisati biomimetiku kao granu znanosti kroz primjere primjene biomimetičkih materijala.

Rad se sastoji od teorijskog dijela i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu pojašnjeni su osnovni pojmovi: biomimetika i biokompatibilnost. U tom dijelu rada opisana je povijest biomimetike, te su pojašnjeni osnovni ciljevi biomimetike.

U eksperimentalnom dijelu obrađeni su konkretni primjeri primjene biomimetičkih materijala u medicini kao i u tehnici, gdje je poseban naglasak stavljen na analizu svojstva, biokompatibilnost i interdisciplinarnost. Odabrani primjeri su umjetni mišići: GeometRy based actuators that contract and elongate (GRACE) i nanovlaknasti umjetni mišić.

Ključne riječi: biomimetika, biokompatibilnost, interdisciplinarnost, primjena biomimetike

## **SUMMARY : APPLICATION OF THE BIOMIMETIC MATERIALS**

The goal of this final paper was to describe biomimetics as a branch of science through examples of application of biomimetic materials.

This final paper consists of two parts, experimental and theoretical parts.

In the theoretical part, the basic terms: biomimetics and biocompatibility are clarified. In this part of the paper, the history of biomimetics is described and the basic goals of biomimetics are explained.

In the experimental part, concrete examples of the application of the biomimetic materials in medicine and engineering were explained, with the emphasis on mechanical properties, biocompatibility and interdisciplinarity. Selected examples are artificial muscles: GeometRy based actuators that contract and elongate (GRACE) and nanofibrous artificial muscle.

Key words: biomimetics, biocompatibility, interdisciplinarity, application of the biomimetics



## SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD.....   | 1  |
| 1.1. Povijest biomimetike.....   | 2  |
| 1.2. Principi biomimetike.....   | 3  |
| 1.3. Ciljevi biomimetike.....  | 4  |
| 2. PRIMJENA BIOMIMETIČKIH MATERIJALA .....                               | 5  |
| 2.1. Arhitektura.....  | 6  |
| 2.1.1. Pametni materijali.....   | 7  |
| 2.1.1.1. Hidrogelovi.....  | 7  |
| 2.1.1.2. Termobimetalni .....  | 8  |
| 2.1.1.3. Polimeri s memorijom oblika .....                               | 9  |
| 2.2. Medicina.....   | 9  |
| 2.2.1. Uzgojeno koštano tkivo .....                                      | 9  |
| 2.2.2. Uzgojena hrskavica.....   | 10 |
| 2.2.3. Uzgojena koža .....   | 11 |
| 2.3. Robotika.....   | 13 |
| 2.3.1. Biomimetički robot po uzoru na ribu .....                         | 13 |
| 2.3.2. Biomimetički robot po uzoru na guštera .....                      | 14 |
| 2.4. Tekstilna industrija .....  | 16 |
| 2.5. Zrakoplovna i svemirska industrija .....                            | 17 |
| 2.6. Dentalna medicina .....   | 19 |
| 2.7. 3D bioprintanje.....  | 19 |
| 2.7.1. Bioisprintana robotska ruka.....                                  | 20 |
| 3. EKSPERIMENTALNI DIO.....  | 22 |
| 3.1. Umjetni biomimetički mišić (GRACE).....                             | 22 |
| 3.1.1. Geometrija GRACE-a.....   | 23 |
| 3.1.2. Modeli GRACE-a.....   | 23 |
| 3.1.3. Ispitivanje svojstava GRACE-a .....                               | 25 |
| 3.1.3.1. Ispitivanje izotoničke kontrakcije modela Grace-C.....          | 29 |
| 3.1.3.2. Ispitivanje izometričke kontrakcije modela GRACE-C.....         | 32 |
| 3.1.3.3. Dinamičko ispitivanje modela GRACE-C .....                      | 35 |
| 3.1.4. Robotska šaka GRACE.....  | 37 |
| 3.2. Biomimetička nanovlaknasta struktura po uzoru na ljudski mišić..... | 39 |
| 3.2.1. Priprema strukture biomimetičkog mišića.....                      | 39 |
| 3.2.2. Toplinska ispitivanja .....                                       | 41 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 3.2.3. Morfološka ispitivanja..... | 43 |
| 3.2.4. Mehanička ispitivanja.....  | 44 |
| 4. ANALIZA PRAKTIČNOG DIJELA.....  | 48 |
| 5. ZAKLJUČAK.....                  | 50 |
| LITERATURA.....                    | 52 |
| PRILOZI.....                       | 55 |

**POPIS SLIKA**

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Skica letećeg stroja od Leonarda Da Vincija.....         | 3  |
| Slika 2. Ljepljiva vrpca za odjeću.....                           | 5  |
| Slika 3. All seasons tent tower.....                              | 6  |
| Slika 4. Termobimetalni ventilacijski koncept.....                | 8  |
| Slika 5. Maioregen.....   | 11 |
| Slika 6. Umjetna koža na djetetu.....                             | 12 |
| Slika 7. Mamba robot.....   | 14 |
| Slika 8. Pustinjski gušter.....                                   | 15 |
| Slika 9. Biomimetički model gušter robota.....                    | 15 |
| Slika 10. Fastskin kupaći kostim.....                             | 17 |
| Slika 11. Šumska osa.....   | 18 |
| Slika 12. Biomimetička bušilica.....                              | 18 |
| Slika 13. Eksperiment pomicanja bioinsprantane robotske ruke..... | 21 |
| Slika 14. Model GRACE-a.....                                      | 23 |
| Slika 15. Modeli GRACEA-a.....                                    | 24 |
| Slika 16. Modeli GRACE-a izrađeni različitim tehnologijama.....   | 24 |
| Slika 17. Form 2 i Form 3 SLA 3D printeri.....                    | 25 |
| Slika 18. Analiza modela u SolidWorks programu.....               | 26 |
| Slika 19. Uređaj Zwick/Roell Z005.....                            | 28 |
| Slika 20. Izotonička kontrakcija mišića.....                      | 29 |
| Slika 21. Ispitivanje izotoničke kontrakcije GRACE- C.....        | 30 |
| Slika 22. Izometrička kontrakcija.....                            | 32 |
| Slika 23. Ispitivanje izometričke kontrakcije modela GRACE-C..... | 33 |
| Slika 24. Printanje robotske šake.....                            | 37 |
| Slika 25. Robotska šaka sastavljena od GRACE-a.....               | 38 |
| Slika 26. Uređaj Spinbow.....                                     | 40 |
| Slika 27. Mikrostruktura umjetnog mišića.....                     | 40 |
| Slika 28. Uređaj TGA Q500.....                                    | 41 |
| Slika 29. Axioskop mikroskop.....                                 | 43 |
| Slika 30. Usmjerenje nanovlakana.....                             | 44 |
| Slika 31. Mod 4465 Instrop.....                                   | 45 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Mehanička svojstva Flexible 80A filamenta.....         | 26 |
| Tablica 2. Rezultati ispitivanja izotoničke kontrakcije .....     | 31 |
| Tablica 3. Rezultati ispitivanja izometričke kontrakcije .....    | 34 |
| Tablica 4. Rezultati ispitivanjem na 1000 dinamičkih ciklusa..... | 36 |
| Tablica 5. Vrijednosti mehaničkih svojstava .....                 | 45 |

## POPIS GRAFIKONA

|   |    |
|---|----|
| Grafikon 1. Rezultat analize modela na izometričku kontrakciju..... | 27 |
| Grafikon 2. Rezultati analize modela na izotoničku kontrakciju..... | 27 |
| Grafikon 3. Mjerenja ispitivanja izotoničke kontrakcije.....        | 30 |
| Grafikon 4. Mjerenja ispitivanja izometričke kontrakcije.....       | 33 |
| Grafikon 5. Dinamičko ispitivanje modela GRACE-C.....               | 35 |
| Grafikon 6. Rezultati dinamičkog ispitivanja.....                   | 36 |
| Grafikon 7. Rezultati toplinskih ispitivanja.....                   | 42 |
| Grafikon 8. Rezultat ispitivanja slučajno raspoređenih vlakana..... | 46 |
| Grafikon 9. Rezultat ispitivanja usmjerenih vlakana.....            | 46 |
| Grafikon 10. Rezultat ispitivanja modela umjetnog mišića.....       | 47 |

**POPIS FIZIKALNIH VELIČINA I MJERNIH JEDINICA**

| <b>Veličina</b>     | <b>Oznaka</b> | <b>Mjerna jedinica</b> |
|---------------------|---------------|------------------------|
| Brzina              | $v$           | m/s                    |
| Modul elastičnosti  | $E$           | MPa                    |
| Dužina              | $l$           | mm                     |
| Širina              | $b$           | mm                     |
| Debljina            | $d$           | mm                     |
| Vlačna čvrstoća     | $R_m$         | MPa                    |
| Naprezanje          | $\sigma$      | MPa                    |
| Sila otpora         | $F$           | N                      |
| Tlak                | $p$           | Pa                     |
| Kontrakcija         | $Z$           | %                      |
| Istezanje           | $\varepsilon$ | %                      |
| Vrijeme             | $t$           | s                      |
| Frekvencija         | $f$           | Hz                     |
| Kut savijanja       | $\alpha$      | °                      |
| Napon               | $U$           | V                      |
| Temperatura         | $T, t$        | K, °C                  |
| Promjer             | $d$           | mm                     |
| Brzina zagrijavanja | $v_h$         | °C/min                 |
| Produljenje         | $\Delta l$    | mm                     |

## 1. UVOD

Biomimetika, izvedena od grčkih riječi bio što znači život, i mimesis što znači oponašanje, predstavlja rastuće područje koje pokušava integrirati prirodne biološke mehanizme, adaptacije i strukture s ciljem da se ti koncepti kasnije prilagode za bioinspirirane proizvode ili rješenja određenih tehničkih izazova.

Izravan prijenos određenog materijala ili strukture u tehnički svijet često nije potpuno praktičan; stoga je korisnije prenositi principe konstrukcije. Biljke i životinje se suočavaju sa sličnim izazovima kao inženjeri i konstruktori, rješavajući konstrukcijske probleme s visokom učinkovitošću materijala pod zadanim uvjetima opterećenja, a istovremeno minimalizirajući štetan utjecaj na okoliš.

Pojam "biomimetički" stvoren je 1972. godine kao termin u području sintetskih enzima. Danas se može definirati kao sakupljanje dobrih konstrukcijskih rješenja iz prirode. Priroda je stvorila materijale i konstrukcije zapanjujuće funkcionalnosti, heterogenosti i stabilnosti, uz upotrebu relativno malog broja različitih građevnih elementa. Temeljni principi konstruiranja su u prirodi često vrlo jednostavni, a funkcionalnost rješenja je određena načinom na koji su posloženi građevni elementi i materijali. [1]

Riječ biokompatibilnost ima dva korijena bio, što znači element tvorbe riječi koji označava život, i kompatibilnost, što znači sposobnost postojanja u harmoniji (iz latinskog, *compatibilis*). Život implicira živ i harmonija implicira međusobno koristan suživot.

U ranoj fazi istraživanja materijala, ljudi su definirali biokompatibilnost materijala. Danas se često koristi definicija, sposobnost materijala da izazove odgovarajući odgovor u ljudskom tijelu u određenoj primjeni. Prilikom pažljivijeg razmatranja ove definicije, odgovarajući odgovor ljudskog tijela znači da materijal, kao minimalni zahtjev, ne bi trebao uzrokovati neželjene reakcije, kao što su toksične reakcije, u tkivu gdje se materijal koristi. Odgovor ljudskog tijela također može obuhvatiti želju za poticanjem pozitivnih reakcija, poput poticanja procesa zacjeljivanja i smanjenja vremena potrebnog da materijal ili uređaj postane funkcionalan. Na primjer, biomaterijal može biti biokompatibilan u kostima, ali ne i u krvi, ili obrnuto. Također, može biti biokompatibilan za kratkotrajnu uporabu u određenom tkivu, ali ne nužno za dugotrajnu primjenu u istom tkivu. Standard za provjeru biokompatibilnosti je ISO 10993.

## 1.1. Povijest biomimetike

Modeliranje prirode kako bi se stvarali učinkoviti dizajni nije novost, a biomimetika (ili biomimikrija) predstavlja pojavljivanje discipline koja proizlazi iz drevnih praksi prisutnih u većini autohtonih kultura.

Povijest otkriva iskre biomimetike, koje su kratko zasvijetlile kod pojedinačnih izumitelja poput Da Vincija, Franka Lloyda Wrighta, Freija Otta i Buckminstera Fullera. Svaki izumitelj očigledno je tražio inspiraciju u prirodi. Svaki od njih smatran je genijem svog vremena. [2]

Leteći uređaji Leonarda da Vincija predstavljaju najraniji primjer biomimetike (slika 1.). Pažljivo je promatrao let ptica te zabilježio mnoge bilješke i detaljne skice svojih promatranja. Te skice predloženih letećih strojeva nadahnula su braću Wright. Braća Wright su izumili, izgradili i poletjeli prvim avionom na motorni pogon u svijetu. [2]

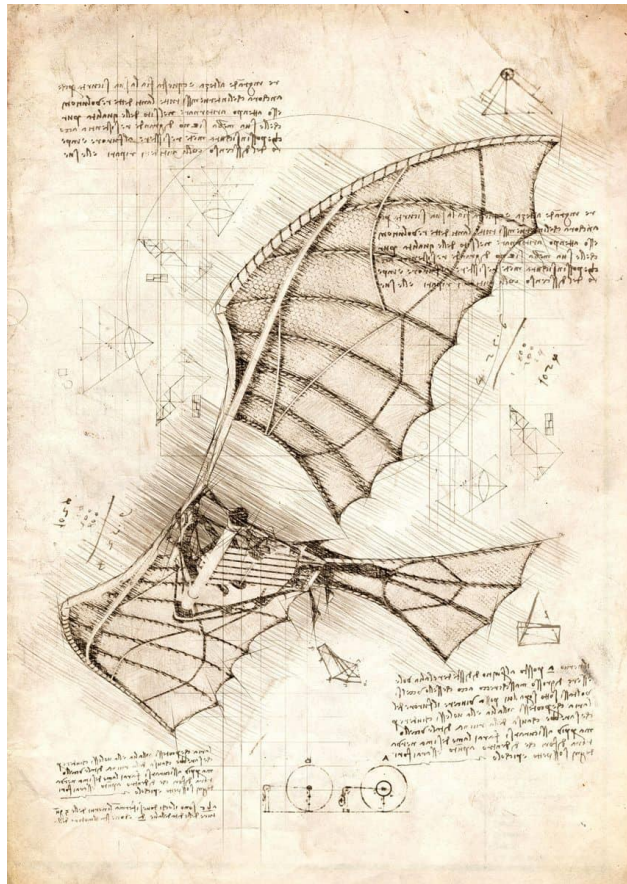
Opće prekretnice biomimetike kroz povijest:

- Era osnovne biomimetike: rane opservacije i inspiracija (prije 15. stoljeća),
- Pojava ranih inovatora u biomimetici (15. - 20. stoljeće),
- Pojava modernih pristupa biomimetike (kasno 20. stoljeće) i
- Porast istraživanja u biomimetici (21. stoljeće do danas). [2]

Povijesni primjeri biomimetike:

- Lu Ban (5. stoljeće pr.Kr.) – zaslužan za izum suncobrana po uzoru na velike lopočeve listove,
- Leonardo Da Vinci (15. stoljeće) – zaslužan za skiciranje letećeg stroja na ljudski pogon s krilima po uzoru na šišmiševa krila,
- George de Mestral (1941.) – zaslužan za izum velcra (samoljepljiva vrpca za odjeću) po uzoru na čičke,
- Otto Schmidt (1972) – zaslužan za termin biomimetika, izumio je Schmittov okidač po uzoru na živčani sustav lignji. [2]





Slika 1. Skica letećeg stroja od Leonarda Da Vincija [1]

## 1.2. Principi biomimetike

Biomimetički dizajn djeluje prema nizu temeljnih principa koja vode njegovu primjenu. Ovi principi pomažu spojiti genijalnost prirode i ljudskih inovacija.

Principi biomimetike su:

- Priroda kao model – priroda je izvor inspiracije, oponašanjem prirodnih sistema mogu se dobiti rješenja za probleme,
- Priroda kao standard – priroda pruža standard izvrsnosti, biomimetika potiče usporedbu proizvoda sa standardima postavljenih od same prirode,
- Priroda kao mentor – priroda kao učitelj ljudima, biomimetika potiče da ljudi uče iz principa i strategija prirode. [4]

### 1.3. Ciljevi biomimetike

Istraživanje biomimetike i biomimetičkih materijala ima neke osnovne ciljeve:

- Razumijevanje bioloških sustava i njihovih svojstava,
- Izrada biološkog modela na kojemu bi se mogli provoditi eksperimenti i teorijski postupci kemije, fizike i biologije,
- Uz pomoć stečenog znanja o biološkom modelu izraditi nove vrste materijala, koji imaju određena biološka, fizikalna i kemijska svojstva, ali su uz to i biokompatibilni,
- Primjena novih biomimetičkih materijala u strojarstvu, tekstilnoj industriji, zrakoplovnoj industriji, medicini, dentalnoj medicini, ...

Ostali ciljevi biomimetike:

- Optimizacija upotreba resursa – minimizacija otpada, reciklaža materijala i energije,
- Prilagodljivost - biomimetički dizajn nastoji oponašati prirodne sisteme koji su izuzetno prilagodljivi i otporni,
- Održivost – biomimetika promovira upotrebu materijala iz obnovljivih izvora,
- Biokompatibilnost – upotreba materijala koji su kompatibilni sa živim organizmima,
- Povezanost – biomimetika nastoji upotrijebiti proizvode koji će se bez problema integrirati u ekosustav,
- Povratna veza - uključivanje povratnih veza u dizajn kako bi se omogućila samoregulacija i kontinuirano poboljšanje,
- Simbioza - biomimetički proizvodi istražuju mogućnosti suradnje i međusobne koristi, ...

## 2. PRIMJENA BIOMIMETIČKIH MATERIJALA

Traženje odgovora na razne probleme u prirodi potaknulo je razvoj tehnologije. Biomimetički materijali nastali su oponašanjem procesa, sustava i organizama iz same prirode. Danas se biomimetički materijali koriste u mnogim granama industrije. Primjenjuju se u:

- Arhitekturi,
- Građevinarstvu,
- Medicini,
- Dentalnoj medicini,
- Tekstilnoj industriji,
- Energetskoj industriji,
- Zrakoplovnoj industriji,
- Robotici,
- 3D printanju.

Ovo područje je interdisciplinarno, zbog toga svoju su namjenu biomimetički materijali pronašli i u fizici, kemiji i biologiji. [4]

U svakodnevnom životu moguće se susresti s primjerima primjene biomimetičkih materijala u obliku kupaćih kostima, implantata u medicini kao i u dentalnoj medicini, raznih konstrukcija u građevinarstvu, ljepljive vrpce za odjeću (slika 2.).



Slika 2. Ljepljiva vrpca za odjeću [1]

## 2.1. Arhitektura

Biomimetika u arhitekturi ne odnosi se samo na prilagodbu dizajna inspiriranog prirodom, već uključuje i razmatranje kako koristiti učinkovite funkcije prirode poput sustava grijanja i hlađenja, zaštite prirodne svjetlosti i ventilacije. Ideja biomimetike u arhitekturi je izrada zgrada koje bi postale integralni dio prirode, tako da ne ometaju ekosustav nego se uklapaju u njega.

Primjer biomimetike u arhitekturi je All seasons tent tower (slika 3.), zgrada koja je umjetno stvorena u obliku vulkana od strane arhitektonskog studija OFIS. Zgrada je cilindričan toranj koji ima više namjena, toranj je napajan solarnom energijom. Toranj je prekriven mrežastim omotačem koji filtrira sunčevu svjetlost zbog regulacije temperature. Toranj se nalazi u gradu Yerevan u Armeniji, to područje sklono je potresima što je uvelike utjecalo na odabir strukturnog sastava zgrade. Zgrada se sastoji od vertikalne strukture koja se suprotstavlja gravitacijskom djelovanju i silama koje nastaju tijekom potresa, odabrana je takva struktura kako bi se ojačala betonska jezgra tornja i složeni stupovi. Vanjske fasade tornja imaju omotač s prilagodljivim vanjskim uređajem za smanjenje solarnih utjecaja ljeti. Betonski sustav s ugrađenim cijevima pruža hlađenje bez problema s propuhivanjem, dok zimi pruža grijanje. Tijekom ljeta hlađenje unutarnjih prostorija odvija se upotrebom pločastog sustava, tijekom zime svjež zrak grije se unutar jedinica tornja i distribuira u prostorije koristeći princip disperzijske ventilacije. [5]



Slika 3. All seasons tent tower [5]

### 2.1.1. Pametni materijali

Pametni materijali i strukture su objekti koji osjete okolišne događaje, obrade tu senzorsku informaciju, a zatim djeluju s obzirom na okoliš.

Korištenje pametnih materijala koji reagiraju na okolne podražaje, poput polimera s memorijom oblika, može znatno doprinijeti energetski učinkovitom dizajnu. Pametni materijali integrirani u dizajn i izgradnju zgrade mogu obavljati istu funkciju termoregulacije koju koža obavlja za tijelo. [5]

Ovi materijali su jedinstveni, njihova jedinstvenost može se iščitati iz njihova ponašanja. Ova vrsta materijala pokazuje sljedeće karakteristike:

- Reagiranje u stvarnom vremenu,
- Reagiranje na više od jednog okolišnog stanja,
- Samopokretanje,
- Selektivnost i
- Neposrednost.

U ovu vrstu materijala spadaju:

- Hidrogelovi,
- Termobimetali i
- Polimeri s memorijom oblika.

#### 2.1.1.1. Hidrogelovi

Hidrogel je polimerni materijal koji se sastoji od polimernih lanaca, može se pojaviti i kao koloidni gel u kojemu je disperzijsko sredstvo voda. Karakterizira ih visoko svojstvo upijanja, jer sadrže i do 90 % vode u svojoj strukturi. Vrlo su fleksibilni materijal, vrlo slični kao i prirodno tkivo, zbog značajnog udjela vode u strukturi. Hidrogelovi su razvijeni nakon istraživanja o hidrofobnom vezivanju materijala. [5]

### 2.1.1.2. Termobimetali

Termobimetali spadaju u vrstu laminatnih kompozitnih materijala, oni se sastoje od minimalno dvije komponente, komponente su pruge ili trake. Pruge ili trake napravljene su od metala s različitim koeficijentima toplinskog širenja, moraju biti trajno povezani postupkom galvanizacije. Termobimetali postoje od samih početaka industrijske revolucije, stoga su relativno stari pametni materijali. Danas se primjenjuju u sustavima za kontrole i mjerenja kao npr. termostati ili s električnom kontrolom kao dio mehaničkih sustava. Ova vrsta materijala u arhitekturi primjenjuje se na fasadama zgrada kao zaštita od sunca, kao vrsta materijala koja pruža dobru ventilaciju. [5]



Slika 4. Termobimetalni ventilacijski koncept [5]



### 2.1.1.3. Polimeri s memorijom oblika

Polimeri s memorijom oblika su materijali s dvostrukim oblikom koji pripadaju skupini aktivno pokretnih polimera. [5]

Efekt memorije oblika nije intrinzično svojstvo, što znači da polimeri sami po sebi ne pokazuju ovaj učinak. Memorija oblika proizlazi iz kombinacije morfologije polimera i specifične obrade te se može razumjeti kao funkcionalizacija polimera. Takve primjene mogu se pronaći u pametnim tkaninama, topljivim cijevima za elektroniku ili filmovima za pakiranje, mobilnim telefonima i inteligentnim medicinskim uređajima. U arhitekturi ovi materijali se primjenjuju za izolaciju zgrada. [5]

## 2.2. Medicina

Kroz primjenu dizajna inspiriranog organizmima, biomimetika je unaprijedila ljudski život kroz razne praktične proizvode. U budućnosti će biomimetika imati još značajniji utjecaj kombiniranjem medicine, znanosti i biomedicinskog inženjeringa za liječenje bolesti, oštećenja i rana. Posebno obećavajuća područja obuhvaćaju regenerativnu medicinu. Principi i funkcije biomimetike koji se primjenjuju u biomedicinskom inženjeringu inspirirani su različitim izvorima, uključujući regeneraciju repa guštera i godišnje obnavljanje rogova jelena, ljepljiva i regenerativna svojstva paučine.

### 2.2.1. Uzgojeno koštano tkivo

Koštano tkivo može se oštetiti tumorom, bolestima ili traumom, oštećenje koštanog tkiva postalo je uobičajeno kao klinička bolest. Kao opcija za liječenje tih oštećenja moguće je koristiti ortopedске implantate. Presađivanje kostiju je u porastu, godišnje se presadi više od 2,2 milijuna kostiju diljem svijeta.

Sadašnji stupanj razvoja znanosti o biomaterijalima omogućava kiruršku rekonstrukciju samo manjih oštećenja kostiju i kostiju koje nisu pod velikim opterećenjem. Za takva opterećenja često se koristi ili autologne koštane graftove (tj. tkivo dobiveno od samog pacijenta) ili od donora. To je zbog toga što je kost živo tkivo sa specifičnim biološkim i

mehaničkim karakteristikama koje kombiniraju elastičnost i krutost, omogućujući prilagodbu različitim promjenjivim uvjetima opterećenja. Ova sposobnost prilagodbe proizlazi prije svega iz međudjelovanja stanica koje stvaraju kost i stanica koje vrše resorpciju kosti. [1]

Kod proizvodnje koštanog tkiva treba uzeti u obzir morfologiju površine, mehaničke čvrstoće te regulacije bioaktivnih molekula. Do danas uspješno su uzgojene koštane stanice od koza, štakora, zečeva i ljudi. Moguće je potaknuti homogeno stvaranje kostiju u tijelu miševa nakon implantacije uzgojene koštane srži na bazi kalcij-fosfata. [1]

### 2.2.2. Uzgojena hrskavica

Centralna ideja o idealnom biomaterijalu u ortopediji jest da implantat treba imitirati biologiju, arhitekturu i funkcionalna svojstva prirodnog tkiva. Potrebno je poticati infiltraciju, pričvršćivanje, proliferaciju i diferencijaciju stanica u novo formiranom tkivu. Biokompatibilnost i biodegradabilnost putem sigurnih biokemijskih putanja u određenim vremenskim intervalima također su ključni faktori. Treba pružiti podršku za rano formiranje tkiva i postupno dopuštati zamjenu regenerirajućim tkivom. Konačno, trebala bi pojednostaviti regenerativnu strategiju prevladavajući ograničenja povezana s manipulacijom stanicama, tako da postane gotov proizvod za kliničku primjenu. [6]

Primjer umjetno uzgojene hrskavice je osteohondralni biomimetički potporni materijal Maioregen (slika 5.) proizveden u Italiji, ima poroznu 3D kompozitnu strukturu koja oponaša cijelu anatomiju osteohondralnog sloja u tri različite slojevite strukture. Dublja mineralna faza sastoji se od magnezij-hidroksiapatita (Mg–HA), srednji sloj se sastoji od kombinacije kolagena tipa I i Mg–HA, površinski sloj je sličan hrskavici jer je potpuno izrađen od kolagena tipa I, s glatkom površinom. [6]





Slika 5. Maioregen [6]

Korištenje ovog biomimetičkog materijala za liječenje hrskavičnih defekata koljena pokazalo se učinkovitim u smislu kliničkih ishoda u kratkom vremenskom praćenju kod velikog broja pacijenata. Potrebna su daljnja istraživanja kako bi se mogli usporediti rezultati s ostalim metodama liječenja hrskavica. [6]

### 2.2.3. Uzgojena koža

Ozljede kože liječe se presađivanjem kože, ako pacijent s ozbiljnim oštećenjima kože ili opeklinama prima vlastitu kožu kao presađenu, postoji mogućnost da ima nove rane na koži s drugih područja. Postoji nedostatak autologne opskrbe kože, zbog toga njena upotreba je ograničena. Umjetno uzgojena koža organski kombinira inženjerske i biološke principe, kako bi stvorila zamjenu za kožu. Umjetnom kožom pokušava se riješiti problem nedostatka donora kože prilikom liječenja defekata na koži.

Za liječenje ozljeda koža koje ne zarastaju danas se najčešće koristi koža s trupala, što u SAD-u daje samo šestinu potrebne potrebe za kožom. [1]

Biorazgradivi i biokompatibilni potporni materijali uključeni s višestrukim faktorima epidermalne indukcije mogli bi poslužiti kao najperspektivniji medicinski uređaji za

regeneraciju kožnog tkiva. Druga istraživanja su pokazala da usklađeni potporni materijali s nanovlaknima mogu imitirati mikrostrukturu kože.

Tehnologija 3D printanja pruža metodu za uporabu potpornih materijala u proizvodnji umjetne kože. Moguće je koristiti različite tehnologije za proizvodnju umjetne kože s različitim promjerima. Potporni materijali koji su 3D isprintani imaju vrlo dobru biokompatibilnost.

Elektronička koža ili e-koža i tkiva imaju veliki potencijal za poboljšanje kvalitete života u područjima liječenja bolesti i praćenju zdravlja. Za izradu e-kože koristi se legure na bazi galija s glutenskim proteinima, zbog mogućnosti samoizlječenja i biokompatibilnosti. E-koža već je prošla ispitivanja na životinjama i nisu zapažene nikakve štetne reakcije. [1]



Slika 6. Umjetna koža na djetetu [1]

Na slici 6. prikazano je korištenje umjetno uzgojene kože za liječenje opekline kod dvogodišnjeg djeteta. Umjetnu kožu trgovačkog naziva Dermagraft proizvela je Američka tvrtka Advanced Tissue Sciences. U roku od šest mjeseci dijete je u potpunosti izliječeno od opekline.

## 2.3. Robotika

Ideja biomimetičke kontrole, gdje kontrolni sustavi oponašaju biološke organizme u načinu upravljanja, a ne samo ljude, rezultirala je definiranjem nove klase biološki nadahnutih robota. Ovi roboti pokazuju značajnu robusnost u izvođenju u nestrukturiranim okruženjima u usporedbi s trenutno dostupnim robotima. Za biomimetičke robote istražuje se oponašanje sposobnosti životinja za izvođenje specijaliziranih radnji poput jastoga na morskom dnu, kukaca i ptica u letu te štakora u kretanju. Cilj je izgraditi robote koji nadmašuju druge u izvedbi, agilnosti i spretnosti.

Osnovna karakteristika biomimetičkih robota leži u njihovoj sposobnosti prilagodbe okolini i brzjoj reakciji i učenju. Ovaj pristup također koristi nove materijale, mikrosustavnu tehnologiju i dublje razumijevanje biološkog ponašanja. Biomimetički roboti se konstruiraju s naglaskom na značajnoj fleksibilnosti i stabilnosti, što ih razlikuje od tradicionalnih kontroliranih robota.

### 2.3.1. Biomimetički robot po uzoru na ribu

Podvodni roboti imaju važnu ulogu u budućem razvoju morskog okoliša i podvodnih aktivnosti te imaju široku perspektivu primjene i veliku potencijalnu vrijednost.

Podvodni roboti proizvedeni su od čvrstih materijala. Tradicionalni podvodni roboti pokreću se propelerima. Propelerski pogon nije moguće koristiti u zahtjevnim morskim okolišima, zbog mogućnosti oštećenja morskog života, morskog dna ili je moguće zapetljanje u vodeno bilje. [7]

Biomimetički podvodni roboti odnose se na one robote koji imaju funkciju, strukturu i vrstu kretanja poput ribljih vrsta. Posjeduju karakteristike pokreta riba i u stalnom su razvoju kojim se optimiziraju i poboljšavaju njihove performanse. Mogu imati razne funkcije, snažnu prilagodljivost raznim okolišima i visoku stabilnost. [7]

Iako je postignuto mnogo uspjeha s podvodnim biomimetičkim robotima još uvijek postoje neka ograničenja. U budućnosti podvodni biomimetički roboti približit će se obliku i funkciji pravih riba, a njihova izvedba i operativna sposobnost bit će unaprijeđena, imat će široki

spektar primjena kao npr. istraživanje podmorja, spašavanje pod vodom i podvodna arheologija.



Slika 7. Mamba robot [7]

Na slici 7. prikazan je voodootporni Mamba robot po uzoru na zmiju, spada u biomimetičke robote u obliku lignje. Robot je proizveden 2014. godine u cilju istraživanja robotskih kretanja, kao i kretanja u vodi.

### 2.3.2. Biomimetički robot po uzoru na guštera

Istraživanje svemira oduvijek je bilo bitno za čovječanstvo kako bi se doprinijelo planetologiji i otkrivanju novih resursa izvan Zemlje. Trenutno se pripremaju misije u kojima će ljudi istraživati tijela izvan Zemlje. Primjer jednog takvog istraživanja je biomimetički robot po uzoru na guštera, koji je izrađen s ciljem istraživanja površine Marsa. [8]

Ovaj robot je biomimetički četveronožni robot temeljen na strukturi i mehanizmu gmizanja pustinjskog guštera koji se učinkovito kreće po granuliranom tlu kao i stjenovitom tlu. Taj robot može stabilnije hodati zbog niže točke teže i strukture zglobova. Kako bi se osiguralo usklađeno kretanje između stopala, noge i kralježnice, uspostavljeni su

kombinirani kinematički modeli temeljeni na njihovim istovremenim pokretima tijekom hodanja. Rezultati sugeriraju da je biomimetički robot prilagodljiv terenima Marsa. [8]



Slika 8. pustinjski gušter [8]



Slika 9. Biomimetički model gušter robota [8]

Na slici 8. prikazan je pustinjski gušter koji je poslužio kao uzor za izradu biomimetičkog gušter robota (slika 9.) za ispitivanje površine Marsa.

## 2.4. Tekstilna industrija

Biomimetika je vrlo važan fenomen u modernim tekstilima, jer pomaže u razvoju novog koncepta prilagodbe okolini i stvaranju novih ideja koje su slične prirodi. Biomimetika predstavlja imitaciju i otkrivanje sintetičkih materijala temeljenih na prirodnim mehanizmima, procesima i metodama. Malo je vjerojatno otkriti sve značajke prirode i njene sposobnosti, gotovo sva znanstvena otkrića kopiraju ili oponašaju prirodu.

Priroda je bila uzor za mnoga rješenja tekstilnih materijala, poput funkcionalnih vanjskih slojeva, dizajna kamuflaže, organizacije boja, termičkih izolacijskih svojstava te uvjeta suhog prianjanja. [1]

Neki primjeri tehničkih tekstila koji su inspirirani prirodom su:

- Tehnički tekstili koji se koriste u sportskoj odjeći razvijeni su oponašanjem svojstava prirodnih vlakana poput svile, koja su lagana, snažna i čvrsta,
- Strukture po uzoru na lotus listove koje su vodootporne i odbojne na mrlje,
- Kupaći kostimi po uzoru na morskog psa,
- Tekstili za zaštitu od kiše po uzoru na koru bora,
- Tekstili koji se koriste u uvjetima ekstremne hladnoće po uzoru na pingvine,
- Čvrsti tekstili po uzoru na paukove niti,
- Elastični tekstili po uzoru na mimoza biljke i
- Tkanine s mogućnošću samoizlječenja po uzoru na sisavce.





Slika 10. Fastskin kupaći kostim [1]

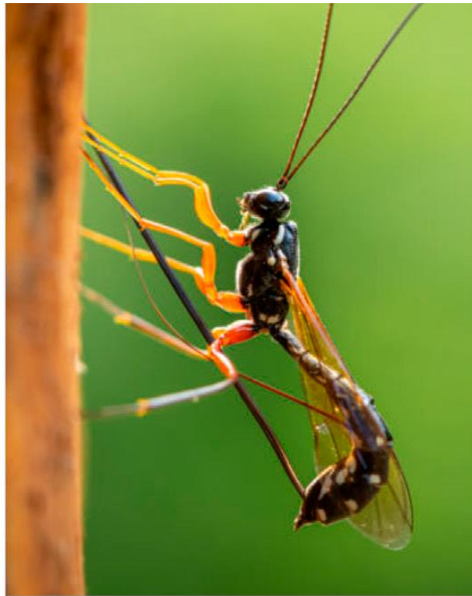
Na slici 10. (lijevo) vidimo strukturu kože od morskog psa koja je poslužila za izradu kupaćeg kostima Fastskin (desno). Ovaj kupaći kostim svojom strukturom smanjuje otpor strujanja.

## 2.5. Zrakoplovna i svemirska industrija

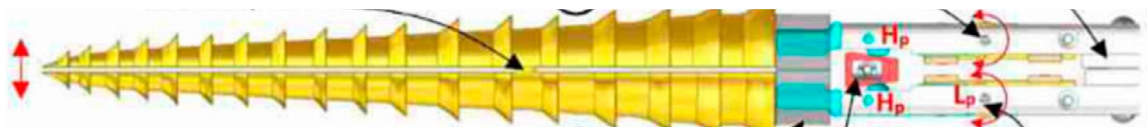
Kao i u drugim sektorima, biomimetika je pristup koji nije nepoznat u zrakoplovnoj industriji. S obzirom na trenutni nedostatak dokaza o biološkom životu izvan Zemlje u surovom svemirskom okruženju, direktni prirodni primjeri ne mogu poslužiti kao modeli. Zato se sektor svemirske tehnologije ističe kao izvrstan primjer za biomimetički dizajn, gdje se istražuje proces razumijevanja osnovnih prirodnih mehanizama i njihova prilagodba tehničkim primjenama, bez obzira na izvornu biološku funkciju, umjesto jednostavnog kopiranja. Razni sustavi, poput alata za bušenje, teleskopa, značajki disanja, već su konceptualno razrađeni i djelomično primijenjeni u razvoju svemirske tehnologije, pružajući inovativna rješenja gdje konvencionalne tehnologije nisu sposobne replicirati visoko optimizirane biološke modele. [8]

Svemirsko okruženje je izuzetno zahtjevno, zbog prisutnih uvjeta niske do nulte gravitacije, ekstremnih promjena temperature, povećanih razina ultraljubičastog zračenja, elektromagnetskog i čestičnog zračenja, reaktivnog atomskog kisika, te prirodnih meteorita i svemirskog otpada. Biološki organizmi ključni su za svemirske

sustave, zbog prilagodljivost, otpornosti, lagane konstrukcije, energetske učinkovitosti i sposobnosti zacjeljivanja. [8]



Slika 11. Šumska osa [8]



Slika 12. Biomimetička bušilica [8]

Jedno od obećavajućih područja primjene biomimetike unutar svemirske industrije su postupci bušenja za istraživanje planeta i prikupljanje uzoraka. Stoga su razvijeni brojni koncepti koji su osmislili bioinspirirane metode i postupke kako bi unaprijedili ove aktivnosti. Jedan dobro razvijen biomimetički koncept temelji se na recipročnom pokretu bušenja drva, po uzoru na šumske ose (slika 11.). Šumske ose koriste svoje nazubljene žalce, kako bi probile koru drveća i položile jaja. Postižu brzinu bušenja od otprilike 1–1,5 mm/min, pri čemu se pretpostavlja da žalac ima modul elastičnosti od oko 10 GPa. Ovaj način bušenja ima nekoliko povoljnih karakteristika, uključujući učinkovitost bušenja i niske zahtjeve za masom. Osim toga, izbjegava ključni izazov rotacijskog pokreta povezanog s konvencionalnim dizajnima planetarnih bušilica. Postoje različiti prototipovi koji su temeljito testirani na različitim podlogama. Ipak, bušilice inspirirane šumskom osom (slika 12.) za svemirske primjene još uvijek nisu implementirane niti testirane u svemirskom okruženju. [8]



## 2.6. Dentalna medicina

Glavni cilj biomimetičke dentalne medicine jest vratiti tvrda tkiva (caklina, dentin, cement) kako bi se postigla potpuna funkcionalnost s pomoću restaurativnog materijala koji može imitirati ili obnoviti biomehaniku prirodnog zuba. Ovo omogućuje zubu da djeluje kao jedna cjelina protiv funkcionalnih sila te pruža gotovo normalnu biologiju i estetiku.

Materijali koji spadaju u grupu biomimetičkih materijala, a upotrebljavaju se u dentalnoj su:

- Kompoziti na bazi smole,
- Staklo-ionomer cement,
- Dentalne keramike,
- Kompoziti na bazi polimera i
- Metali.

## 2.7. 3D bioprintanje

Trodimenzijski (3D) print je aditivni postupak proizvodnje koji stvara fizički objekt u tri dimenzije iz digitalnog dizajna. Proces funkcionira tako da se slažu tanki slojevi materijala dok se ne dobije željeni model. 3D print omogućava ogroman stupanj slobode dizajna, pomaže u stvaranju kompliciranih objekata s lakoćom, što je teško postići drugim metodama proizvodnje.

Tehnika 3D bioprintanja omogućava izradu složenih geometrija, poroznih struktura, međusobno povezanih mreža i precizno pozicioniranje stanica za izradu modela koji su biokompatibilni. 3D bioprinter je poseban tip 3D pisača koji može stvarati trodimenzionalne biološke strukture slojevito polaganjem bioloških materijala, kao što su stanice, tkiva i biomaterijali, na precizan i kontroliran način. Učinkoviti rezultati bioprintanih modela ovise o korištenju odgovarajućih biomaterijalnih tinti s optimalnim svojstvima i visokom biokompatibilnošću. [15]

Postoje više vrsta bioprintanja, a to su:

- Tintni printeri,
- Printeri s mehaničkim ekstruderom i

- Laserski printeri.

Tintni print je beskontaktna tehnika bioprintanja. Filament ove vrste printa su sitne kapi tinte. Ova metoda prije je korištena u mikro-inženjeringu i elektrotehnici, te se od nedavno koristi u biomedici. Metoda ispisa ovom tehnologijom je svestrana, brza i jeftina. Postoje tri vrste ovakvih printera:

- Elektromagnetski,
- Piezoelektrični i
- Toplinski.

Printeri s mehaničkim ekstruderom koriste ekstruder za stavljanje čestica biotinte na biopapir prema računalom generiranim predlošcima. Filament ove vrste su mali fragmenti tkiva. Ova metoda nema široku primjenu zbog svoje visoke cijene.

3D bioprintanje nalazi primjenu u regenerativnoj medicini, tkivnom inženjerstvu i zdravstvenoj skrbi. Primjenu ograničava razvoj biotinte, upitan imunološki odgovor, dugoročna sigurnost i učinkovitost, printanje s više vrsti stanica, visoka cijena i ograničena dostupnost printera.

### 2.7.1. Bioisprintana robotska ruka

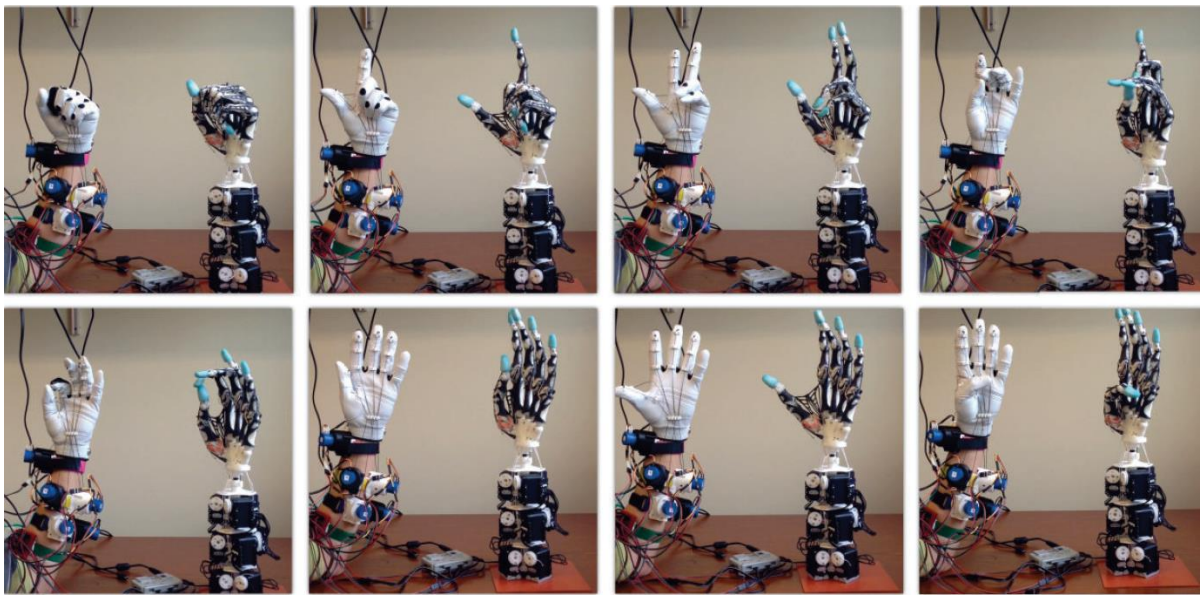
Širok raspon istraživačkih područja, od manipulacije u robotici do regeneracije udova u inženjeringu tkiva, mogao bi imati koristi od antropomorfne robotske ruke koja imitira ključne značajke ljudske ruke. Biomehanika ljudske ruke je ključna komponenta spretnosti ruke i može se replicirati biomimetičkim dizajnom. [12]

Dizajnom ove ruke žele se oponašati motorni potezi ruke kako bi se mogle obnoviti izgubljene spretnosti ruke ili u budućnosti napraviti protetska ruka za ljude. Trenutno jedini način za nadomjestiti izgubljenu ruku je presađivanje ruke, međutim postoji manjak darivatelja i mogućnost odbacivanja presađene ruke. [12]

Uobičajeni dizajni antropomorfnih robotskih ruka često uključuje mehanizaciju bioloških dijelova s pomoću spojnica, kardanskih zglobova ili šarki kako bi se pojednostavila kompliciranost ljudske ruke. Time se rade razlike između ljudske i robotske ruke.

U sklopu bioinsprintane robotske šake je identificirati važne biomehantičke informacije ljudske ruke, te ih biomimetički replicirati.

Oblik prstiju zabilježen je s pomoću laserskog skenera, a zatim 3D isprintan s detaljnim površinskim karakteristikama poput oblika zgloba i mjestu umetanja tetiva. Upotrebom elastičnih silikonskih guma oponašana je ljudska koža. Za tetive korišteni su gumirani listovi koji su izrezani laserom. Pokretanje ruke omogućeno je uporabom Dynamixel servo motora. [12]



Slika 13. Eksperiment pomicanja bioinsprintane robotske ruke [12]

Na slici 13. prikazan je eksperiment pomicanja bioinsprintane robotske ruke. U ovom eksperimentu čovjek predaje objekte robotskoj ruci istovremeno koristeći drugu ruku kako bi daljinski upravljao prstima robotske šaka preko podatkovne rukavice. Moguće je izvesti različite pozicije hvatanja predmeta korištenjem ove ruke, a da se pritom zadrži važna biomehanika ljudske ruke.

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela rada je opisati, sukladno zadatku rada, kroz literaturne primjere pregled najsuvremenijih trendova u konkretnoj primjeni biomimetičkih materijala, kao i prikaz rezultata ispitivanja svojstava tih materijala, koji proizlaze iz znanstvenih studija. Korištenjem odgovarajuće literature obrađeni su primjeri koji prikazuju interdisciplinarnu primjenu biomimetike u području tehnike i medicine i njihova inovativna svojstva.

#### 3.1. Umjetni biomimetički mišić (GRACE)

Svi životinjski mišići sastoje se od snopova vlakana, koji su sastavljeni od identičnih jedinica, međutim svaki se mišić znatno razlikuje. Mišići mogu biti veličine od par milimetara do nekoliko metara. Svaki mišić ima različitu strukturu i oblike. Zbog različitosti mišića životinje imaju veliku raznolikost pokretljivosti, različite brzine kretanja, različite snage i širok raspon kretanja. Zbog toga mišići služe kao uzor umjetnim uređajima, ne samo zbog izvanrednih performansi u smislu izdržljivosti, sile, snage, već zbog velike svestranosti koja je i dalje većinom nedostižna umjetnim uređajima.

Biomimetički mišići su umjetni aktuatori koji postižu performanse pravih mišića kao što su rastezanje i fleksibilnost, međutim kompleksnost pravih mišića često je nedostižna. Aktuatori koji su dizajnirani da proizvode kontrakciju poput pravih mišića poznati su kao umjetni mišići. Pneumatski umjetni mišići prvi put predstavljani su 1950-ih godina. U području robotike razvijeno je puno pneumatskih aktuatora koji postaju lakši i jeftiniji, time se poboljšava njihova kompaktnost i smanjuju im se dimenzije, čime će se proširiti primjena umjetnih mišića.

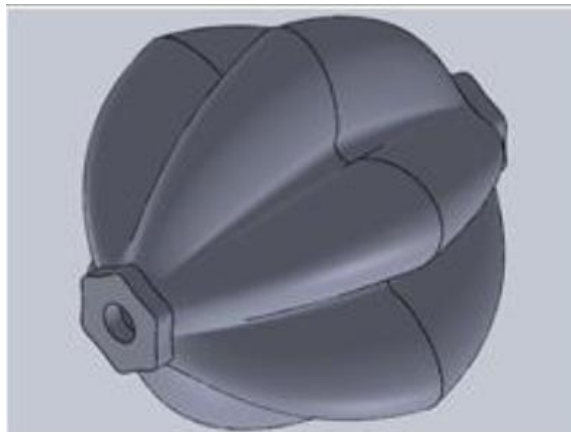
Jedan od primjera pneumatskog umjetnog mišića je GeometRy based actuators that contract and elongate (GRACE). Mišić GRACE sastoji se od jednostavne membrane s naborima od jednog materijala i ne zahtijeva nikakve dodatne elemente za ograničenja naprezanja. Uređaj je moguće dobiti u različitim dimenzijama, koristeći različite materijale i mehaničke performanse što omogućava realizaciju različitih prirodnih pokreta. Ovakav uređaj može se proizvesti putem pristupačne aditivne proizvodnje ili se kompletno 3D ispisati, te ugraditi u funkcionalne uređaje poput pneumatske umjetne ruke.

### 3.1.1. Geometrija GRACE-a

Grace se sastoji od zatvorenog niza eliptičnih lukova, konkavnost lukova se izmjenjuje kako bi se generirali nabori. Površina GRACE-a rezultat je glatkog prijelaza presjeka duž uzdužnih paraboličnih krivulja do završnog dijela s obje strane. Model omogućava korištenje bilo kojeg broja nabora.

Ako je potreban profil koji se bolje ponaša kod kontrakcije, bolje se ponašaju oni s uskim elipsama i dubokim naborima, ako je pak potreban profil koji bolje podnosi istezanje potrebno je koristiti pliće nabore.

Za potrebe ispitivanja uzeti su modeli dužine 40 mm, dok je debljina stijenka ovisila o vrsti materijala i potrebi profila.



Slika 14. Model GRACE-a [9]

Na slici 14. prikazan je model GRACE-a napravljen u SolidWorks CAD programu za 3D modeliranje.

### 3.1.2. Modeli GRACE-a

Za potrebe ispitivanja svojstava izrađena su tri modela GRACE-a, a to su:

- GRACE-A,
- GRACE-C i
- GRACE-E.

Svi modeli GRACE-a prikazani su slikom 15.

Od navedenih modela, model C zbog svog dizajna ima najbolja svojstva pri kontrakciji, dok se model E najbolje ponaša pri istezanju. Model A napravljen je tako da se ponaša dobro pri kontrakciji i pri istezanju.



Slika 15. Modeli GRACEA-a [9]

Modeli su izrađeni aditivnom tehnologijom (3D print) i to FDM (Fused deposition modeling) i SLA (Stereolitography) tehnologijama (slika 16.).

Za FDM tehnologiju korišten je i3 MK3S Prusa printer, dok su filamenti NinjaFlex od proizvođača NinjaTek, FlexMark 7-8-9 od proizvođača Treed Filaments, FlexFill TPU od proizvođača Fillamentum i FilaFlexible40 od proizvođača FilaTech.

Za SLA tehnologiju korišteni su Form 2 i Form 3 Formlabs printer, a filamenti su Flexible v2 i Flexible 80A od proizvođača Formlabs.



Slika 16. Modeli GRACE-a izrađeni različitim tehnologijama [9]

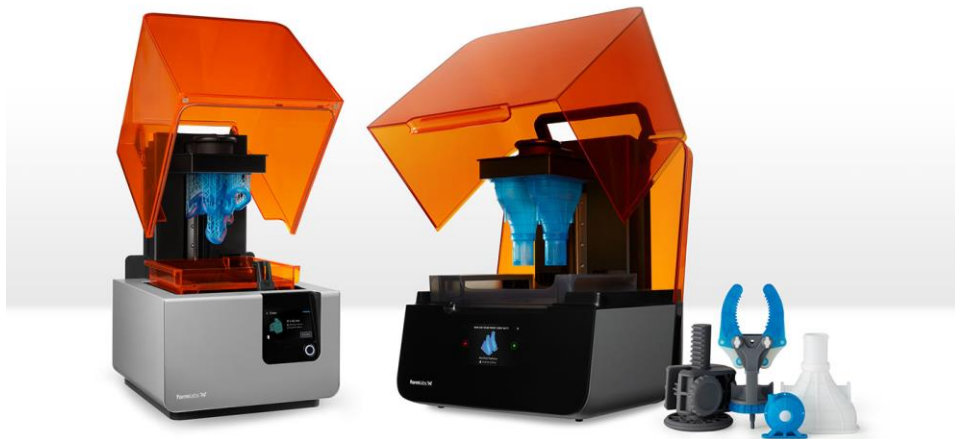
### 3.1.3. Ispitivanje svojstava GRACE-a

Za ispitivanje izabrani su modeli i materijali koji imaju modul elastičnosti 5 MPa i Poissonov omjer 0,4. Ispitivana su sva tri modela GRACE-a izrađeni SLA tehnologijom na printeru Form 2 i Form 3, te od Flexible 80A filameta. Ovaj filament spada u elastične smole nastale po uzoru na gumu. Flexible 80A filament može izdržati savijanje, tlačenje i istezanje na puno ponovljenih ciklusa, pogodan je za ublažavanje udaraca, prigušivanje i apsorpciju. Razlog odabira ovog materijala je njegovo svojstvo fotoelastičnosti.

Modul elastičnosti je mjera krutosti materijala, to je ustvari omjer vlačnog naprezanja i produljenja. Mjerna jedinica za modul elastičnosti je pascal. Pascal je dosta mala mjerna jedinica pa se u tehnici koristi megapascal [ $\text{MPa} = \text{N}/\text{mm}^2$ ].

Poissonov omjer predstavlja omjer poprečnog smanjenja i uzdužnog produljenja materijala prilikom ispitivanja na kidalici.

Svojstvo fotoelastičnosti znači da materijal mijenja svoja optička svojstva kao odgovor na lokalne napetosti.



Slika 17. Form 2 i Form 3 SLA 3D printeri [10]

Na slici 17. prikazani su 3D printeri koji su korišteni za printanje testnih uzoraka umjetnog mišića GRACE.



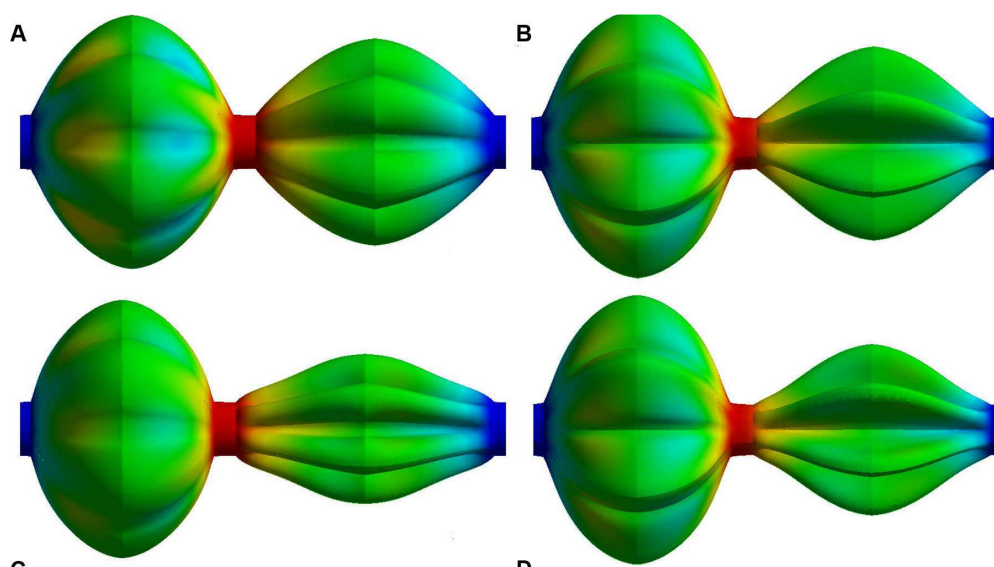
Tablica 1. Mehanička svojstva Flexible 80A filameta [11]

| Mehaničko svojstvo                | Prije stvrdnjavanja | Poslije stvrdnjavanja |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|
| Vlačna čvrstoća                   | 3,7 MPa             | 8,9 MPa               |
| Naprezanje pri istezanju od 50 %  | 1,5 MPa             | 3,1 MPa               |
| Naprezanje pri istezanju od 100 % | 3,5 MPa             | 6,3 MPa               |
| Istezanje pri lomu                | 100 %               | 120 %                 |

U tablici 1. prikazane su vrijednosti mehaničkih svojstava Flexible 80A filameta. Ovaj filament ima dobra svojstva elastičnosti i zbog toga je korišten za izradu modela.

Ispitivana su svojstva modela pri izotoničkoj kontrakciji i pri izometričkoj kontrakciji. Pri ispitivanju izotoničke kontrakcije konstantna je sila, dok je kod ispitivanja izometričke kontrakcije konstantna duljina. Provedena su i dinamička ispitivanja modela, na 1000 ciklusa kontrakcije i istezanja.

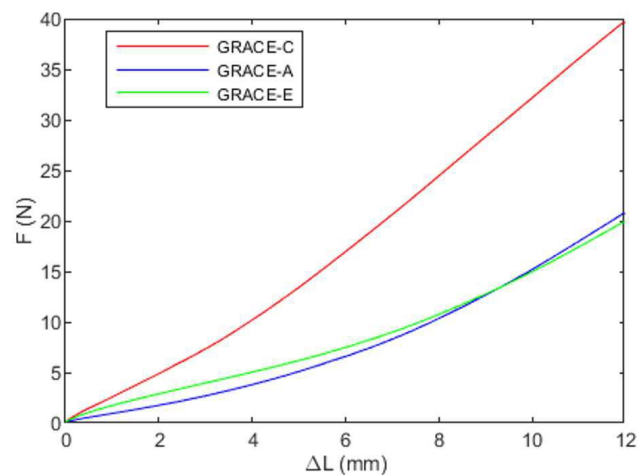
Prije ispitivanja svojstava modela provedena je analiza svojstava u SolidWorks sustavu.



Slika 18. Analiza modela u SolidWorks programu [9]



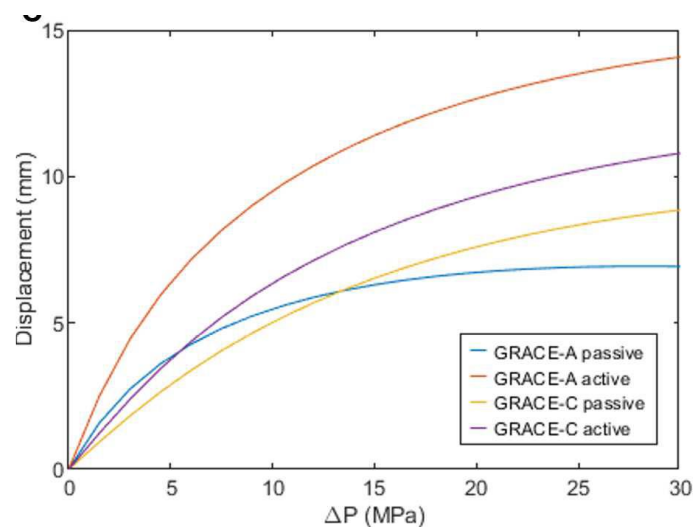
Na slici 18. prikazana je analiza svojstava pri opterećenjima, cilj analize je dobiti podatak o tome koliko će se ukupno modeli moći rastezati. Rastezanje uzima u obzir ukupno područje aktiviranja, odnosno ukupnu kontrakciju i istežanje za jedan model.



Grafikon 1. Rezultat analize modela na izometričku kontrakciju [9]

Na grafikonu 1. prikazani su rezultati analize modela provedene u SolidWorks programu za ispitivanje izometričke kontrakcije. Očekivane sile otpora pri produljenju od 8 mm su:

- 18 N za model GRACE-C,
- 10 N za model GRACE-A i
- 8 N za model GRACE-E.



Grafikon 2. Rezultati analize modela na izotoničku kontrakciju [9]

Na grafikonu 2. prikazani su rezultati analize modela provedene u SolidWorks programu za ispitivanje izotoničke kontrakcije. Očekivana kontrakcija pri tlaku od 20 MPa je:

- 10 mm za model GRACE-A i
- 7 mm za model GRACE-C.

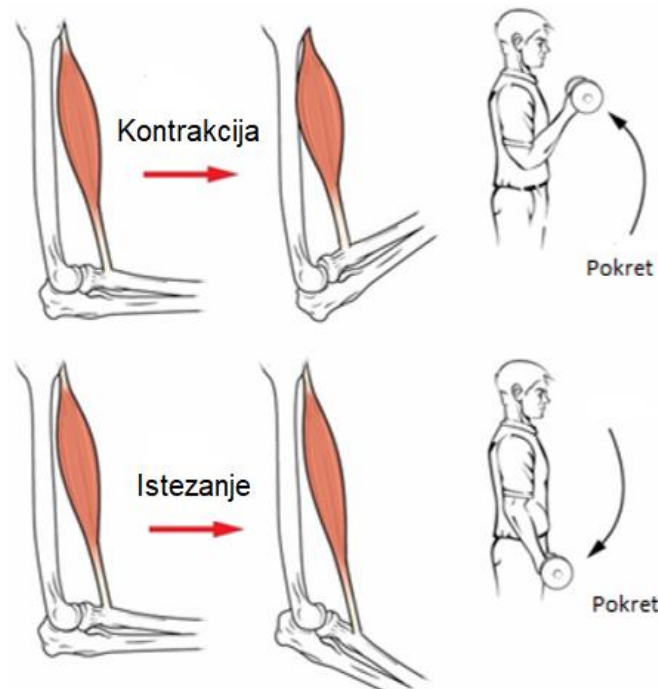


Slika 19. Uređaj Zwick/Roell Z005 [9]

Ispitivanja izotoničke i izometrične kontrakcije provedena su uz pomoć uređaja Zwick/Roell Z005 (slika 19.).

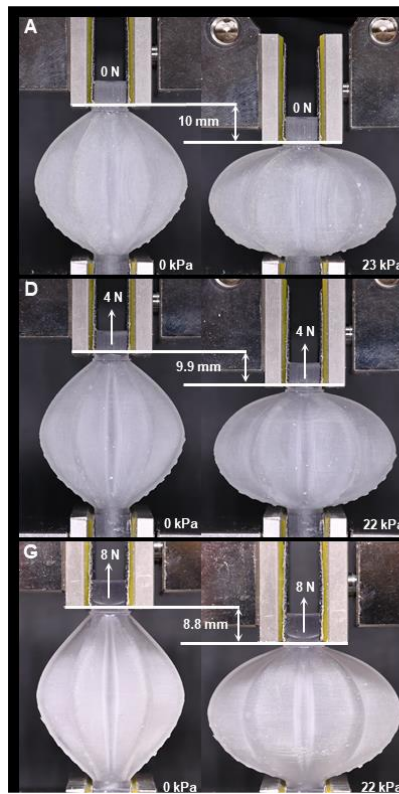
## 3.1.3.1. Ispitivanje izotoničke kontrakcije modela Grace-C

Izotonička kontrakcija kod mišića je ona kontrakcija koja uzrokuje skraćivanje i istežanje mišića pri pokretu, kako je prikazano na slici 20.

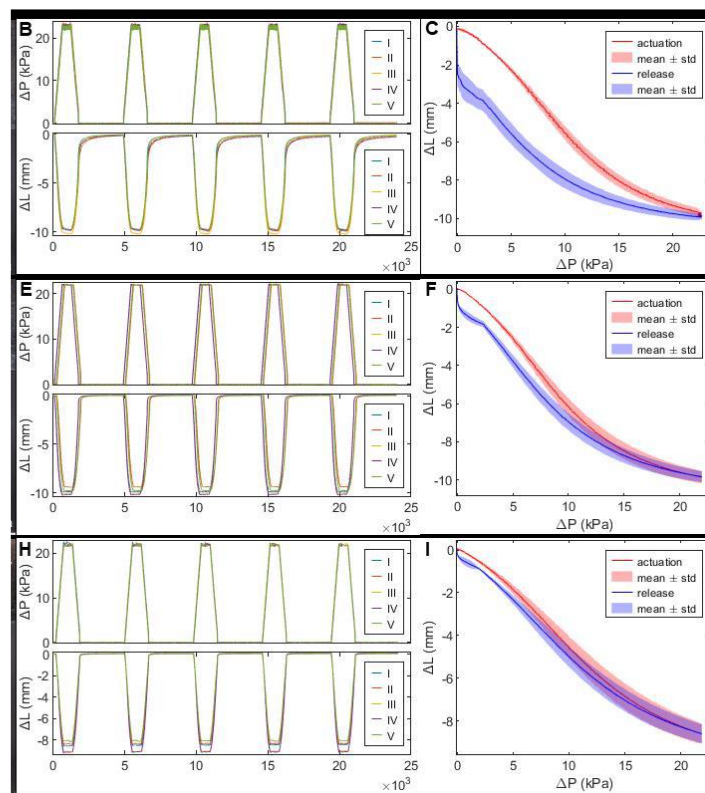


Slika 20. Izotonička kontrakcija mišića [9]

U ispitivanju izotoničke kontrakcije modela primijenjena su tri različita opterećenja (sila) od 0 N, 4 N i 8 N kako je prikazano na slici 21. Ispitivanje je provedeno u 5 ciklusa. Ispitivanje je provedeno uz pomoć Zwick/Roell Z005 uređaja. Kako bi ispitivanje bilo moguće provesti potrebno je stvarati pretlak i podtlak, to se izvodi korištenjem kompresora i vakuumske pumpe. Ciklusi su pokrenuti korištenjem valnog generatora koji stvara trapezoidne valove. Vrijeme između ciklusa iznosi 5 minuta.



Slika 21. Ispitivanje izotoničke kontrakcije GRACE- C [9]



Grafikon 3. Mjerenja ispitivanja izotoničke kontrakcije [9]

Tablica 2. Rezultati ispitivanja izotoničke kontrakcije [9]

| Model   | Opterećenje | Kontrakcija | Istezanje |
|---------|-------------|-------------|-----------|
| GRACE-C | 0 N         | 25 %        | /         |
|         | 4 N         | 24,8 %      | /         |
|         | 8 N         | 22 %        | /         |
| GRACE-E | 0 N         | 20,5 %      | 20,5 %    |
|         | 4 N         | 13 %        | 13 %      |
|         | 8 N         | 8,3 %       | 8,3 %     |
| GRACE-A | 0 N         | 11,3 %      | 19,8 %    |
|         | 4 N         | 16,5 %      | 10,5 %    |
|         | 8 N         | 17,5 %      | 7,3 %     |

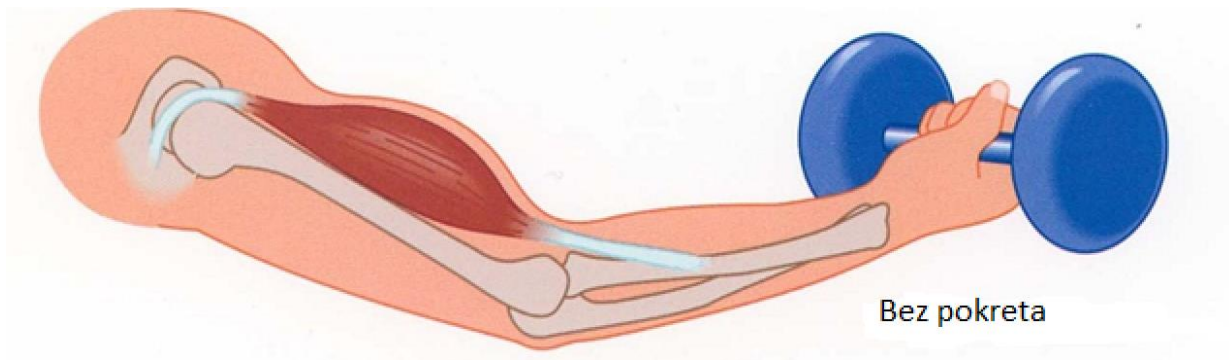
Model GRACE-C ispitivan je pod tlakom od 22 kPa, model GRACE-A pod tlakom od 18 kPa. Model GRACE-A ispitivan je i na istezanje i to pod podtlakom od -8,6 kPa. Model GRACE-E ispitivan je i na istezanje pod podtlakom od -8,3 kPa i opterećenjem od 0 N, pod podtlakom od -7,4 kPa i opterećenjem od 4 N, te pod podtlakom od 6 kPa i opterećenjem od 8 N. Model GRACE-E ispitivan je pri nižim tlakovima kako ne bi došlo do unutarnjeg uništenja nabora.

Grafikon 3. i tablica 2. pokazuju da model GRACE-A ima raspon aktiviranja (kontrakcija+istezanje) od 25 do 30 %, što je nešto veće od modela GRACE-C koji ima raspon aktiviranja 25 %. Model GRACE-C ima najbolja svojstva kontrakcije, dok model GRACE-E ima najbolja svojstva istezanja.

U grafikonu 3. prikazana su dva grafikona, grafikon tlak/vrijeme i istezanje/vrijeme. U grafikonu tlaka u ovisnosti o vremenu prikazani su impulsi opterećenja, dok su u grafikonu istezanje/kontrakcije u ovisnosti o vremenu prikazana mjerena istezanja odnosno kontrakcije.

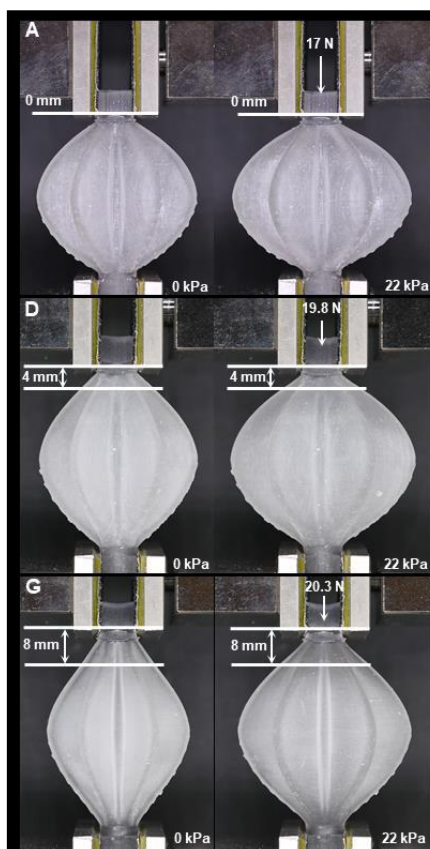
## 3.1.3.2. Ispitivanje izometričke kontrakcije modela GRACE-C

Izometrička kontrakcija još se zove i statička kontrakcija, karakterizira ju to da ne dolazi do pokreta (kontrakcije ili istežanja) mišića, već mišić samo pruža silu otpora nekoj težini bez pomicanja. Ova vrsta kontrakcije prikazana je slikom 22.

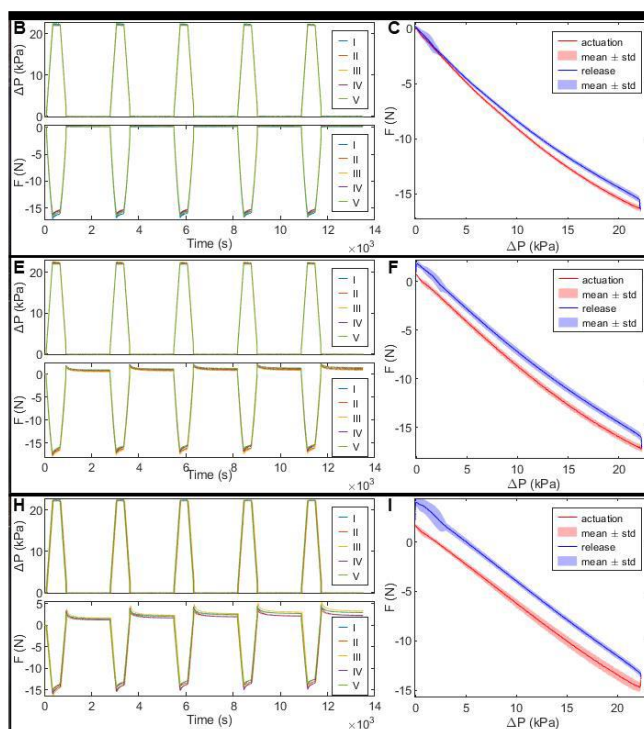


Slika 22. Izometrička kontrakcija [9]

U ispitivanju svojstava pri izometričkoj kontrakciji modela primijenjene su tri različite vrijednosti fiksne elastičnosti i to od 0 mm, 4 mm i 8 mm (slika 23.). Ispitivanje je provedeno u 5 ciklusa, gdje su se mjerile sile. Ispitivanje je provedeno uz pomoć Zwick/Roell Z005 uređaja. Kako bi ispitivanje bilo moguće provesti potrebno je stvarati pretlak i podtlak, to se izvodi korištenjem kompresora i vakuumske pumpe. Ciklusi su pokrenuti korištenjem valnog generatora koji stvara trapezoidne valove. Vrijeme između ciklusa iznosi 3 minute.



Slika 23. Ispitivanje izometričke kontrakcije modela GRACE-C [9]



Grafikon 4. Mjerena ispitivanja izometričke kontrakcije [9]

Tablica 3. Rezultati ispitivanja izometričke kontrakcije [9]

| Model   | Produljenje | Sile otpora pri pretlaku | Sile otpora pri podtlaku |
|---------|-------------|--------------------------|--------------------------|
| GRACE-C | 0 mm        | 17 N                     | /                        |
|         | 4 mm        | 17,8 N                   | /                        |
|         | 8 mm        | 15,6 N                   | /                        |
| GRACE-E | 0 mm        | /                        | 2,1 N                    |
|         | 4 mm        | /                        | 8,4 N                    |
|         | 8 mm        | /                        | 8,7 N                    |
| GRACE-A | 0 mm        | 7,1 N                    | 7,5 N                    |
|         | 4 mm        | 11,3 N                   | 8,3 N                    |
|         | 8 mm        | 14,2 N                   | 9,5 N                    |

Modeli su opterećeni pod tri različite vrijednosti produljenja, 0 mm, 4 mm što odgovara 10 % duljine mišića i 8 mm što odgovara 20 % duljine mišića.

Model GRACE-C ispitivan je pod tlakom od 22 kPa, model GRACE-A ispitivan je pod pretlakom od 18 kPa i podtlakom od -8,3 kPa. Model GRACE-E ispitivan je pri podtlakom od -8,3 kPa pri produljenju od 0 mm, podtlakom od -7,8 kPa pri produljenju od 4 mm i pri podtlaku od -7,9 kPa pri produljenju od 8 mm.

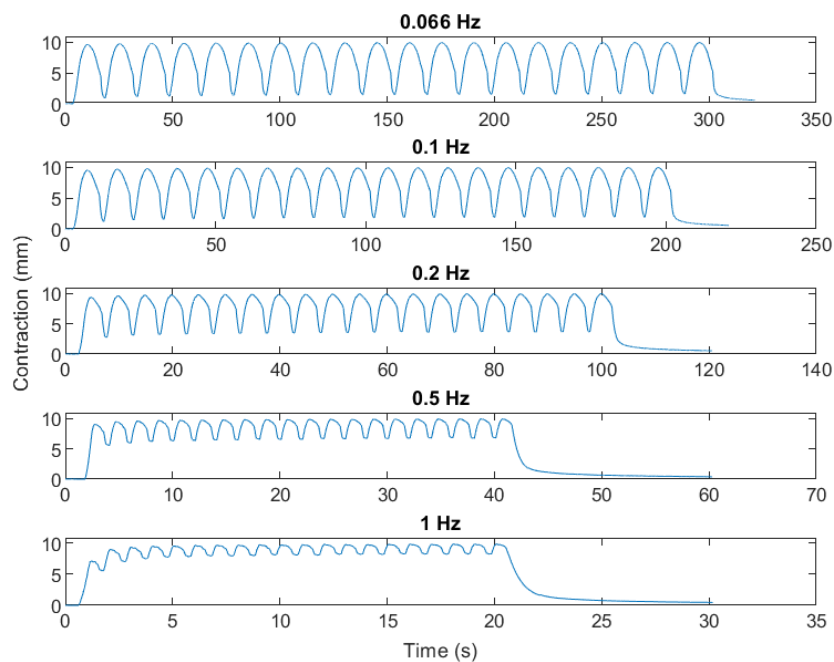
Tablica 3. dokazuje da se model GRACE-A bolje ponaša pri opterećenju pretlakom.

U grafikonu 4. prikazani su dijagrami tlak/vrijeme i sila/vrijeme. U grafikonu tlaka u ovisnosti o vremenu prikazani su impulsi opterećenja korištenjem tlaka, dok u grafikonu sile u ovisnosti o vremenu su prikazane sile otpora na impulse opterećenja.

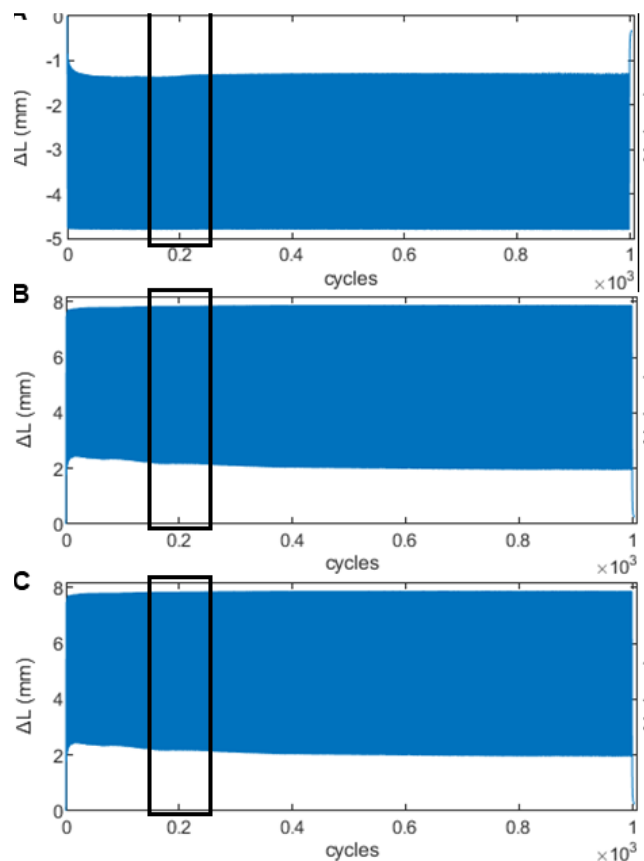


### 3.1.3.3. Dinamičko ispitivanje modela GRACE-C

Dinamičko ispitivanje modela provedeno je tako da se model optereti na 1000 ciklusa slobodne kontrakcije ili istežanja korištenjem valnog generatora koji stvara trokutaste valove. Frekvencija ispitivanja varira od 0.066 Hz do 1 Hz. Pauza između svakog ciklusa je 30 sekundi. Ispitivanje je provedeno uz pomoć sustava praćenja Aurora Magnetic Tracking proizvođača Northern Digital Inc.



Grafikon 5. Dinamičko ispitivanje modela GRACE-C [9]



Grafikon 6. Rezultati dinamičkog ispitivanja [9]

Tablica 4. Rezultati ispitivanjem na 1000 dinamičkih ciklusa [9]

| Model   | Tlak opterećenja | Kontrakcija    | Istezanje       |
|---------|------------------|----------------|-----------------|
| GRACE-C | 23 kPa           | 10,4 mm (26 %) | /               |
| GRACE-A | 19 kPa           | 4,8 mm (12 %)  | /               |
|         | -8,6 kPa         | /              | 7,9 mm (19,8 %) |
| GRACE-S | -8,6 kPa         | /              | 8,4 mm (21 %)   |

Dinamičkim ispitivanjem na 1000 ciklusa nije došlo do oštećenja ili puknuća mišića GRACE, što potvrđuje kako je model pogodan za korištenje.

U grafikonu 5. prikazan je grafikon kontrakcija u ovisnosti o vremenu za različite frekvencije opterećenja, dok je u grafikonu 6. prikazano mjerenje kontrakcije odnosno istezanja na 1000 ciklusa opterećenja.

### 3.1.4. Robotska šaka GRACE

Kako bi se prikazala svestranost i mogućnost napravljena je pneumatska robotska šaka. Cijela robotska šaka je kompletno 3D isprintana. Robotska šaka sastoji se od pet prstiju s tetivama i fleksibilnim zglobovima te pokretnim zglobom.

Dimenzije šake su 160 mm širine, 180 mm visine i 50 mm debljine. Ruka se sastoji od ukupno 18 GRACE modela različitih modela i veličina. U dlanu ruke nalaze se 14 GRACE-C modela duljine 20 mm i četiri GRACE-A modela duljine 30 mm.



Slika 24. Printanje robotske šake [9]

Robotska šaka printana je SLA tehnologijom 3D printanja (slika 24.) i to na FORM 3 3D printeru, korišteni filament je Flexible 80A.

Svaki prst može se kretati neovisno od drugih, prsti su upravljani uz pomoć tetiva. Svaki prst sastoji se od tri GRACE-c modela u seriji, dok se palac sastoji od dva modela. Zglobovi se sastoje od četiri modela GRACE-A.

Svaki zglob prstiju može dostići kut savijanja od  $25^\circ$ , zglob može postići kut savijanja od  $\pm 15^\circ$  pa do  $\pm 30^\circ$ .

Pokretanje robotske šake omogućeno je korištenjem elektro ventila i Arduino Mega ploče. Za pokretanje prstiju korišteni su 2/2 elektro ventili i regulator predtlaka, za pokretanje zgloba korišteni su 3/2 elektro ventili, regulator predtlaka i regulator vakuuma. Za prste korišteni su tlakovi od 20 kPa, za zglob tlak od 16 kPa.



Slika 25. Robotska šaka sastavljena od GRACE-a [9]

Kako bi se prikazala svestranost pokreta ove vrste robotske šake, ljudska ruka rukovala se s robotskom šakom sastavljenom od umjetnog mišića GRACE (slika 25.).

Robotska šaka sastavljena od GRACE modela daje naznaku svestranosti biomimetičkih pokreta koji se mogu postići korištenjem GRACE-a, također robotsku šaku moguće je napraviti i na jednostavnijim modelima 3D printera.

### 3.2. Biomimetička nanovlaknasta struktura po uzoru na ljudski mišić

Ljudski ili životinjski mišići smatraju se najboljim postojećim aktuatorima u prirodi zahvaljujući višeslojnoj vlaknastoj strukturi. Evolucija je dovela do organizacije mišićnog tkiva u kompleksnu vlaknastu strukturu.

Mehanička svojstva mišića mogu se podijeliti na aktivna i pasivna. Prva su povezana sa skraćivanjem, uzrokovanog klizanjem filamenata tijekom mišićne kontrakcije; dok su drugi ovisni samo o mehaničkom odgovoru tkiva dok vanjska sila isteže neaktivni mišić.

Kao obećavajući materijal za biomimetički mišić je poliuretan (PUR). Poliuretan pokazuje dobro mehaničko svojstvo elastičnosti, te je biokompatibilan i biorazgradiv. Kompoziti sastavljeni od poliuretanskih vlakana imaju visoku deformabilnost (140 - 400 %) i visoku elastičnost (1,5 – 4 MPa modul elastičnosti). Nadalje, što je niži početni modul elastičnosti, to veća mora biti deformacija potrebna za ponovno pokretanje i skupljanje nanovlakana.

#### 3.2.1. Priprema strukture biomimetičkog mišića

Nanovlaknasta struktura biomimetičkog mišića izrađena je na uređaju Spinbow, koji je opremljen mlaznicom s četiri igle i rotirajućim bubnjem. Četiri igle kontrolirale su brzinu protoka poliuretana. Nanovlakna su promjera 1 mikrometar.

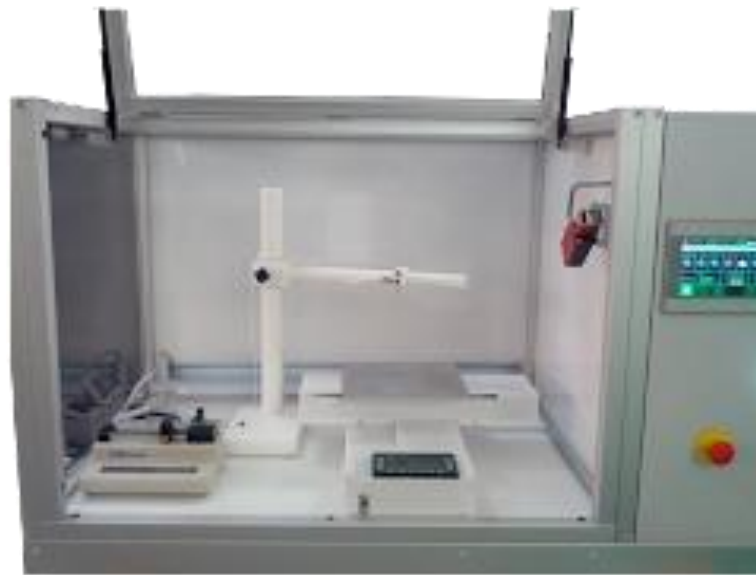
Poliuretanska otopina pripremljena je pri sljedećim uvjetima:

- Napon = 23 kV,
- Stopa dovoda = 0,3 ml/h,
- Temperatura = 20 °C,
- Relativna vlažnost = 30 – 40 %.

Karakteristike uređaja Spinbow su:

- Promjer igle = 0,51 mm,
- Udaljenost igle od kolektora = 180 mm.
- Dužina = 405 mm,
- Promjer bubnja 150 mm,

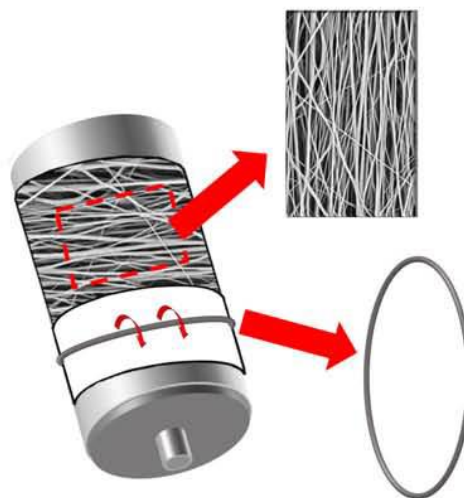
- Brzina 50 o/min.



Slika 26. Uređaj Spinbow [13]

Na slici 26. je prikazan uređaj Spinbow, korištenjem ovog uređaja izrađen je model biomimetički nanovlaknasti mišić.

Poliuretanska nanovlakna prikupljena su u obliku ravne nepletene matrice na bubnju kolektora, dok su nanovlakna nasumično raspodijeljena. Kako bi se lako odvojile matrice bubanj je prekriven listom polietilena. Kako bi se dobio sklop sličan mišiću korišteni su snopovi usklađenih vlakana.



Slika 27. Mikrostruktura umjetnog mišića [13]

Na slici 27. prikazana je mikrostruktura umjetnog mišića sastavljenog od snopova usklađenih vlakana poliuretana.

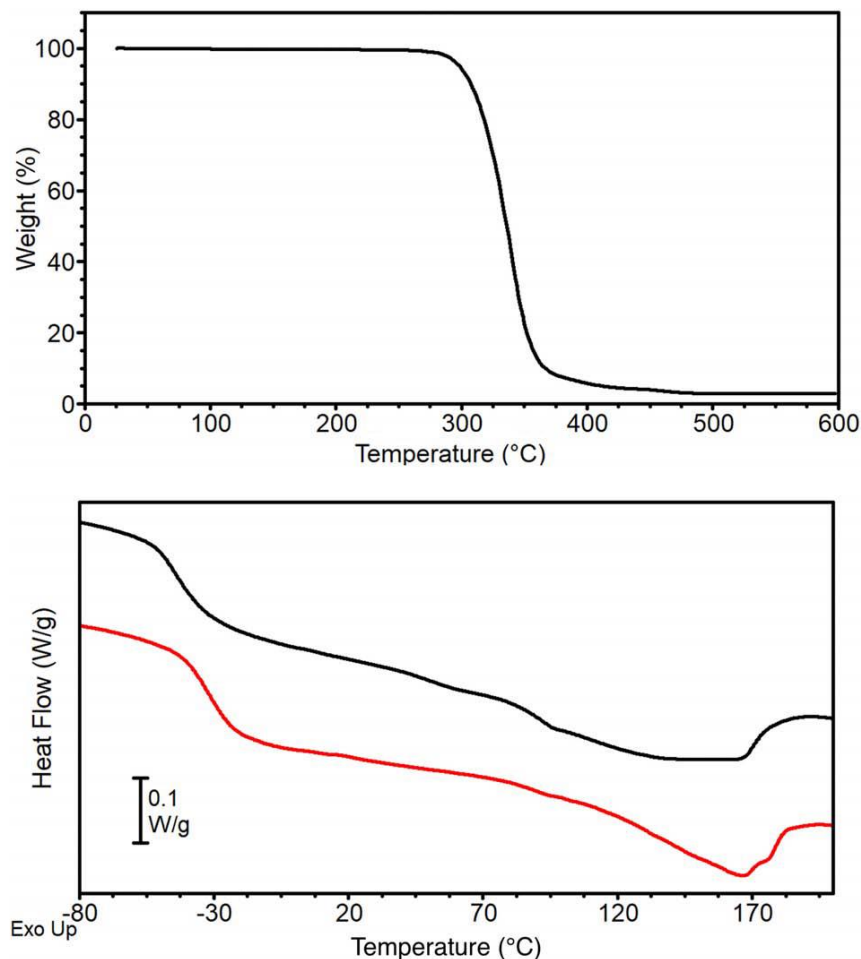
Provedena su morfološka, toplinska i mehanička ispitivanja modela mišića.

### 3.2.2. Toplinska ispitivanja

Toplinska ispitivanja nanovlaknastog mišića izvršena su korištenjem termogravitacijskog uređaja TGA Q500 (slika 28.). Ispitivanja su provedena na način da se zagrijava od radne temperature do 700 °C i to brzinom zagrijavanja od 10 °C/min. Uzorci mišića testirani su u dva ciklusa skeniranja zagrijavanja brzinom od 20 °C/min i jednom kontroliranom hlađenju brzinom 10 °C/min. Temperatura staklišta ( $T_g$ ) uzeta je na polovici visine koraka kapaciteta, dok je temperatura taljenja ( $T_m$ ) uzeta na vrhuncu maksimuma taljenja.



Slika 28. Uređaj TGA Q500 [13]



Grafikon 7. Rezultati toplinskih ispitivanja [13]

Na gornjem grafikonu 7. prikazan je dijagram mase u ovisnosti o temperaturi. Na grafikonu je vidljivo da se termički raspad događa u jednom koraku u temperaturnom rasponu od 250 – 450 °C s gubitkom mase od otprilike 96 %. Ovime je dokazano da poliuretan ima nisku termičku stabilnost.

Na donjem grafikonu 7. prikazan je dijagram toka topline u ovisnosti o temperaturi. Na grafikonu crna krivulja odnosi se na prvo zagrijavanje, pokazuje  $T_g$  od -42 °C i  $T_m$  od 138 °C. Nakon hlađenja drugo zagrijavanje prikazano crvenom krivuljom pokazuje viši  $T_g$  i to od -32 °C i  $T_m$  od 166 °C. Te razlike u temperaturi mogu se pojasniti pretpostavkom da je hlađenje otežalo segregaciju segmenata.



### 3.2.3. Morfološka ispitivanja

Površina uzoraka promatrana je uz pomoć elektronskog mikroskopa SEM Phenom ProX, primjenom 10 kV na uzorcima prekrivenima zlatom metodom raspršivanja. Ukupno je mjereno oko 200 promjera nanovlakana. Promjeri snopova i mišića uzeti su uz pomoć optičkog mikroskopa Axioskop (slika 29.). Rezultati ispitivanja prikazani su kao srednja vrijednost i standardna devijacija.



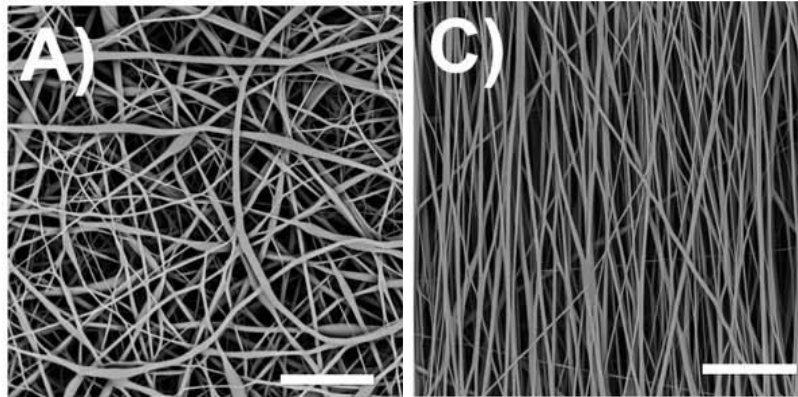
Slika 29. Axioskop mikroskop [13]

Nanovlakna nasumičnog rasporeda imala su srednji promjer od  $0,95 \pm 0,40 \mu\text{m}$  odmah nakon izrade na polietilenskom papiru, a od  $0,89 \pm 0,34 \mu\text{m}$  nakon odvajanja s polietilenskog papira. Usmjerenana nanovlakna pokazala su srednji promjer od  $0,65 \pm 0,29 \mu\text{m}$  na polietilenskom papiru i  $0,71 \pm 0,33 \mu\text{m}$  nakon smanjenja. Nasumične podloge imale su debljinu od  $18,6 \pm 2,3 \mu\text{m}$ , a usmjerene podloge od  $14,2 \pm 1,4 \mu\text{m}$ .

Za strukturalna ispitivanja proizvedeni su prstenasti snopovi nasumičnih i aksijalno usmjerenih nanovlakana. Snopovi promjera nasumičnih snopova su  $468 \pm 33 \mu\text{m}$ , a usmjerenih  $419 \pm 37 \mu\text{m}$ . Nakon uklanjanja s kolektora usmjereni snopovi smanjili su se za 16 %, dok su nasumični smanjeni za 3 %.

Kako bi se približilo pravom mišiću, napravljena je struktura nanovlakana grupiranjem, kao i membrana koja je zategnula i čvrsto upakirala snopove. To je dalo proizvod cilindričnog oblika s promjerom  $1,14 \pm 0,17$  mm.

Istraživanje otkrilo je da su nasumična i usmjerena nanovlakna homogena, glatka, kontinuirana i bez defekata.



Slika 30. Usmjerenje nanovlakana [13]

Na slici 30. pod a) je prikazana morfološka slika nasumično raspoređenih vlakana, dok je pod c) prikazana morfološka slika usmjerenih nanovlakana.

#### 3.2.4. Mehanička ispitivanja

Mehanička ispitivanja vlačnih svojstava nanovlaknastog biomimetičkog vlakna izvršena je pomoću uređaja Mod 4465 Instron (slika 31.) s opterećenjem od 100 N. Testiranje je provedeno u 10 ponavljanja za nasumična i usmjerena vlakna. Efektivne dimenzije uzorka za nasumično raspoređena vlakna bile su 45x20 mm, dok je efektivna dimenzija uzorka s usmjerenim vlaknima 40x20 mm.

Ispitivani su uzorci snopova nasumično raspoređenih nanovlakana, uzorci snopova usmjerenih vlakana i modela biomimetičkog mišića.

Kao rezultat ispitivanja dobiveni su dijagrami opterećenja u ovisnosti o naprezanju za:

- Uzorak sa slučajno raspoređenim vlaknima – prikazano grafikonom 8.

- Uzorak s usmjerenim vlaknima – prikazano grafikonom 9.
- Model biomimetičkog mišića – prikazano grafikonom 10.

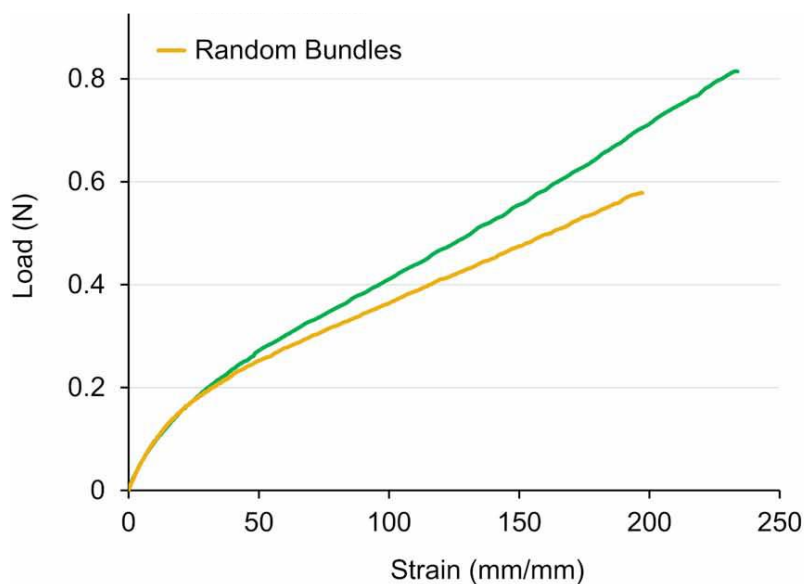


Slika 31. Mod 4465 Instrop [13]

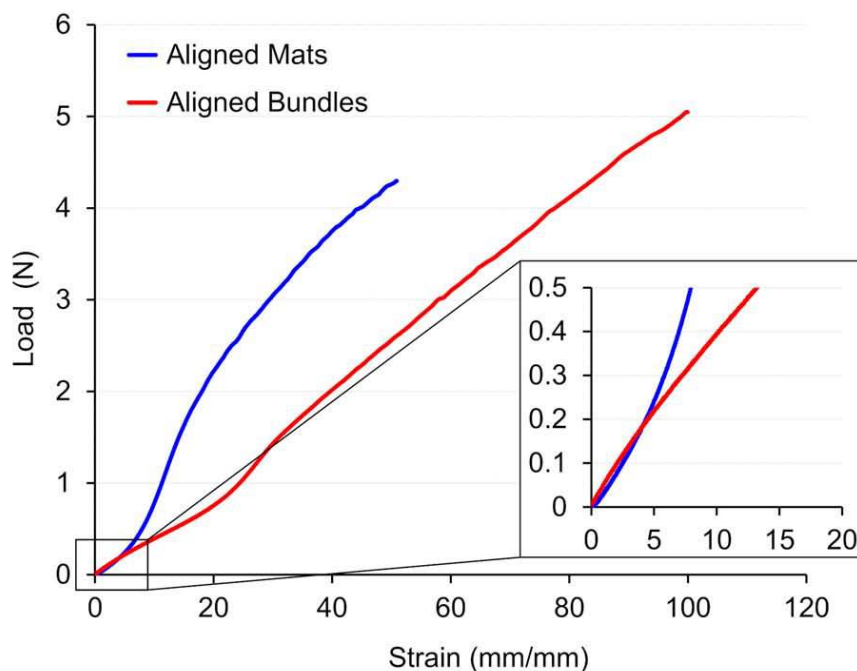
Tablica 5. Vrijednosti mehaničkih svojstava [13]

| <b>Mehaničko svojstvo</b> | <b>Snop nasumičnih vlakana</b> | <b>Snop usmjerenih vlakana</b> | <b>Model biomimetičkog mišića</b> |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Sila                      | 0,5 N                          | 6,70 N                         | 19,1 N                            |
| Vlačno naprezanje         | 1,50 MPa                       | 24 MPa                         | 18,9 MPa                          |
| Istezanje                 | 182 %                          | 104 %                          | 100 %                             |
| Modul elastičnosti        | 2,7 MPa                        | 37,9 MPa                       | 30,5 MPa                          |

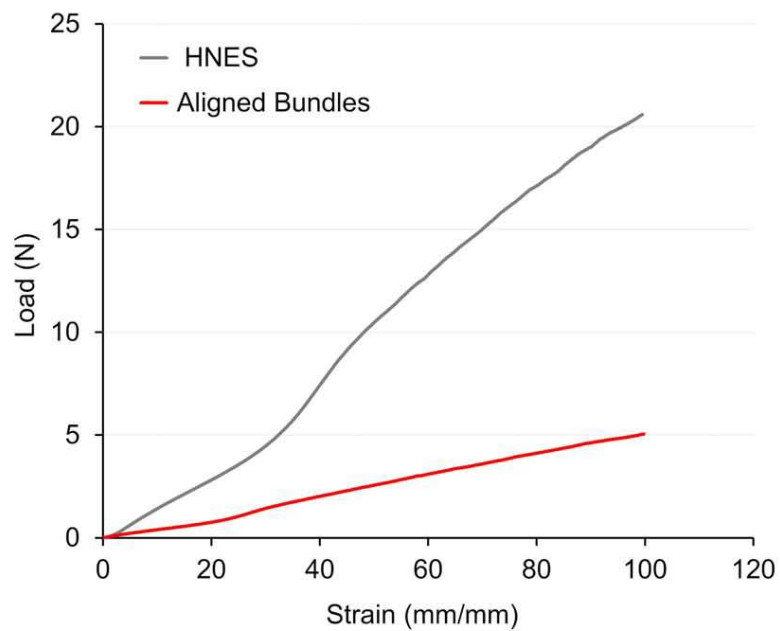
Na osnovu ispitivanja na kidalici MOD 4665 Instrop izmjerena su svojstva vlačnog naprežanja, istežanje i modul elastičnosti kako je prikazano u tablici 5.



Grafikon 8. Rezultat ispitivanja slučajno raspoređenih vlakana [13]



Grafikon 9. Rezultat ispitivanja usmjerenih vlakana [13]



Grafikon 10. Rezultat ispitivanja modela umjetnog mišića [13]

Kako je vidljivo u grafikonima 8., 9. i 10., te tablici 5. model umjetnog mišića može izdržati najveće sile, ali zato ima i najmanju vrijednost istežanja. Snopovi usmjerenih vlakana imaju najveće vrijednosti vlačnog naprežanja i najveći modul elastičnosti, dok snopovi nasumično raspoređenih vlakana imaju najveću vrijednost istežanja.

## 4. ANALIZA PRAKTIČNOG DIJELA

Mišić GRACE pokazao se dobrim modelom za umjetni mišić. U usporedbi s pravim mišićima pokazuje slične deformacije, ali nešto niže sile. Opseg aktivacije GRACE-a približava se rasponu pravog mišića (40 %). Prednost korištenja ovakve vrste umjetnog mišića je njegova fleksibilnost, moguće ga je izraditi od više vrsti materijala, od različitih veličina i postoji više vrsta modela koji se mogu koristiti ovisno o željenim svojstvima. Robotska šaka sastavljena od GRACE mišića može ostvariti složene pokrete kao i ljudi i životinje. U sklopu robotske šake korišteno je više modela mišića u serijskom i paralelnom spoju, takvi spojevi mišića omogućuju implementaciju mišića u kompleksne uređaje.

Velika prednost ovog modela mišića je njegova jednostavna proizvodnja aditivnom tehnologijom, stoga je moguća automatizirana masovna proizvodnja.

Pravi životinjski mišići mogu podnijeti naprezanje od 350 kPa i rastezanje od 20 – 40 %, dok umjetni mišić GRACE može podnijeti naprezanje od 26 kPa i -9 kPa, te rastezanje od 30 %. Ovime se potvrđuje kako je model pogodan za korištenje, ali je potrebno daljnje istraživanje kako bi se unaprijedio model.

Jedan od najvećih izazova u biomimetičkom mišiću je reproduciranje kompleksne morfologije i performanse mišića, to je uspješno reproducirano biomimetičkim nanovlaknastim mišićem. Za proizvodnju mišića odabran je poliuretan zbog visoke deformabilnosti. Kako bi se dobila struktura slična pravom mišiću, nanovlakna su postavljena aksijalno u cilindrični profil koji ima funkciju membrane. Membrana je isto izrađena od poliuretana i to s nasumično poredanim vlaknima.

Zbog potrebe da se napravi najbolji spoj između morfologije i mehaničkih svojstava, ispitivana su nasumično poredana vlakna i usmjerena (aksijalno) vlakna. Nakon ispitivanja usmjerena vlakna zadržala su svoju orijentaciju, što potvrđuje elastičnost modela, a ujedno je i karakteristika pravih mišića.

Istraživanje nanovlaknastih biomimetičkih mišića omogućuju dublju analizu mehaničkog ponašanja nanovlaknastih struktura. Posebno važna stavka istraživanja su dijagrami naprezanje u ovisnosti o deformaciji.

Umjetni mišić GRACE i nanovlaknasti umjetni mišić dokazuju da je biomimetika interdisciplinarno područje, mišići su nastali kao spoj robotike, medicine i strojarstva.

Ovakva istraživanja su vrlo bitna za napredak svojstava bioinspiriranih mišića kako bi se dodatno unaprijedila svojstva.

Umjetni mišić GRACE spada pod pneumatske umjetne mišiće i kao takav nudi veliku fleksibilnost u korištenju. Može se primijeniti u medicinske svrhe, robotske svrhe, vojne svrhe, strojarske svrhe i u generatorima energije.

Umjetni nanovlaknasti biomimetički mišić ima nanovlaknastu strukturu kao i pravi mišić, a izrađen je od biokompatibilnog polimera. Ovakvi umjetni mišići imat će primjenu u medicini, robotici, zrakoplovstvu, automobilskoj industriji, industriji igračaka i odjeće, u energetske svrhe.

## 5. ZAKLJUČAK

Biomimetika je grana znanosti koja se bavi proučavanjem prirode u cilju pronalaska inspiracije za tehnička rješenja proizvoda. Od samih ljudskih početaka ljudi su koristili prirodu kao izvor informacija, a biomimetika kao grana znanosti pojavila se tek 1972. kada je definiran pojam biomimetika. Priroda je uspjela stvoriti materijale koji imaju izuzetne spojeve svojstava, funkcionalnosti, a uz to su i biokompatibilni.

Biokompatibilnost je pojam koji se veže uz biomimetiku, a znači sposobnost postojanja i korištenja materijala koji ne štete ljudskom tijelu, ali ni okolišu.

Osnovni biomimetički ciljevi su razumijevanje bioloških sustava, razumijevanje svojstava bioloških sustava, izrada modela po uzoru na biološke sustave, stvaranje biokompatibilnih modela, razvoj i primjena biomimetičkih materijala u industriji.

Biomimetika ima širok spektar primjena i to u raznim granama industrije. Neke od grana industrije gdje se primjenjuju biomimetički materijali i sustavi su:

- Medicina,
- Dentalna medicina,
- Robotika,
- Arhitektura,
- Građevinarstvo,
- Zrakoplovna industrija,
- Svemirska industrija,
- Tekstilna industrija,
- Energetska industrija,
- Automobilaska industrija i
- Vojna industrija.

Ovaj rad zamišljen je kao pregledni rad, s ciljem prikazivanja raznovrsnosti primjene biomimetike na primjerima primjene u medicini i tehnici. Zbog toga izabrani su primjeri umjetnih mišića. Umjetni mišići, poznati kao i aktuatori su uređaji koji oponašaju prirodne mišiće. Za razvoj bioinspiriranog umjetnog mišića potrebno je koristiti odgovarajući materijal sposoban podržati i pratiti mehaničku kontrakciju ili ekstenziju. Zbog toga se mora koristiti vrlo elastičan materijal.



Umjetni mišići nastali su kao spoj strojarstva, medicine i robotike, te dokazuju kako je biomimetika interdisciplinirana grana znanosti.

Trenutno ovakvi mišići imaju ograničenu primjenu, međutim sve se više istražuju modeli različitih umjetnih mišića u svrhu poboljšanja svojstava modela. Istražuje se i primjena biokompatibilnih materijala za izradu umjetnih mišića. U budućnosti umjetni mišići imat će veliku primjenu u robotici i medicini.

U robotici umjetni mišići primjenjuju se:

- Kao aktuatori,
- Za izradu modela koji se kreću prirodnije i
- U mekoj robotici zbog fleksibilnosti.

U medicini umjetni mišići primjenjuju se:

- Za izradu protetskih udova,
- Za izradu uređaja koji pomažu osobama s invalidnošću,
- Za pomoć pri rehabilitaciji,
- Za sustave dostave lijekova i
- Za pomoć pri kirurgiji.

**LITERATURA**

- [1] Filetin F., Ivanković H., Zmak I.: *Suvremeni materijali i postupci: Biomimetički materijali i proizvodi*, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2005.
- [2] Learn biomimicry; dostupno na: <https://www.learnbiomimicry.com/blog/history-of-biomimicry>, pristupljeno 4. 3. 2024.
- [3] LinkedIn; dostupno na: <https://www.linkedin.com/pulse/biomimicry-nature-inspired-design-sustainable-denismarie-uche-k2cvf>, pristupljeno 4. 3. 2024.
- [4] Črep L. *Biomimetički materijali i primjena*, Reprizotorij Sveučilišta u Rijeci, Fakultet za fiziku, Rijeka, 2023.
- [5] R. Rao; *Biomimicry in Architecture*, International Journal of Advanced Research in Civil, Structural, Environmental and Infrastructure Engineering and Developing; M.S. Ramaiah Institute of Technology, Bangalore, 2014.
- [6] Kon E., Filardo G., Perdisa F., Di Martino A., Busacca M., Balboni F., Sessa A., Marcacci M.; *A one-step treatment for chondral and osteochondral knee defects: clinical results of a biomimetic scaffold implantation at 2 years of follow-up*; Springer Science+Business Media, New York, 2014.
- [7] Gongbo L., Gujie L., Leng D., Xin F., Guangbao L., Wenqian W.; *Underwater Undulating Propulsion Biomimetic Robots: A Review*; Department of Mechanical and Electrical Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 2023.
- [8] Banken E., Johannes O., *Biomimetics for innovative and future-oriented space applications -A review*; Fraunhofer Center for Maritime Logistics and Services; Hamburg, 2022.
- [9] De Pascali C., Naselli G. A., Palagani S., Schraff R. B. N., Mazzolai B.; *3D-printed biomimetic artificial muscles using soft actuators that contract and elongate*; American Association for the Advancement of Science; SAD; 2022.
- [10] Formalabs; dostupno na: <https://formlabs.com/uk/blog/form-3-form-2-3d-printer-comparison/>; pristupljeno 8. 3. 2024.

- [11] Formalabs: dostupno na: <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001418-TDS-ENUS-0.pdf>; pristupljeno 8. 3. 2024.
- [12] Zhe Xu; Todorov E.; *Design of a Highly Biomimetic Anthropomorphic Robotic Hand towards Artificial Limb Regeneration*; University of Washington; Washington; 2023.
- [13] Gotti C.; Sensini A.; Fornaia G.; Gualandi C.; Zucchelli A.; Focarete M. L.; *Biomimetic Hierarchically Arranged Nanofibrous Structures Resembling the Architecture and the Passive Mechanical Properties of Skeletal Muscles: A Step Forward Toward Artificial Muscle*; Frontiersin; 2020.
- [14] Naletilić D.; *Razvoj i primjena biomimetičkih materijala*; Reprizatorij Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija; Osijek; 2023.
- [15] Vuk T.; *3D printanje organa*; Reprizatorij Prirodoslovno-matematičkog fakulteta; Zagreb; 2015.
- [16] Ciulla M., Massironi A., Sugni M., Ensign M., Marzorati S., Forouharshad M.; *Recent Advances in the Development of Biomimetic Materials*; MDPI; 2023.
- [17] Hwang J., Jeong Y., Min Park J.; Hong Lee K., Wook Hong J., Choi J.; *Biomimetics: forecasting the future of science, engineering, and medicine*; International journal of nanomedicine; 2015.
- [18] Tadese M. G.; Loghin E., Loghin C.; *Biomimetics and technical textiles: overview*; sciendo; 2021.
- [19] Singer L.; Fouda A., Bourauel C.; *Biomimetic approaches and materials in restorative and regenerative dentistry: review article*; BMC; 2023.
- [20] Azmy Nessim M.; *Biomimetic architecture as a new aproach for energy efficient buildings through smart building materials*; Journal of green building; 2024.
- [21] Yan X., Bethers B., Chen H., Xioa S., Lin S., Tran B., Jiang L., Yang Y., *Recent Advancements in Biomimetic 3D Printing Materials With Enhanced Mechanical Properties*; Frontiers in materials; 2021.
- [22] Formalabs; dostupno na: <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001418-TDS-ENUS-0.pdf>; pristupljeno 8. 3. 2024.
- [23] Vepa R.; *Biomimetic robotics mechanisms and control*; Cambridge; 2009.

- [24] Milwich M., Speck T., Speck O., Stegmeier T., Planck H.; *Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom*; American journal of botany; 2006.
- [25] Zafar M. S., Amin F., Amber Fareed M., Ghabbani H., Riaz S., Khursaid Z., Kumar N.; *Biomimetic Aspects of Restorative Dentistry Biomaterials*; MDPI; 2020.
- [26] Štajner L.; *Mehanizmi nastajanja biokompozitnih materijala u sustavima kalcijeva karbonata i biološki značajnih molekula*; Reprizotorij Sveučilišta u Zagrebu; Prirodoslovno-matematički fakultet; Zagreb; 2018.
- [27] Kobeščak J.; *Analiza mehaničkih svojstava bioloških letećih sustava*; Reprizotorij Sveučilišta u Zagrebu; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb; 2011.
- [28] Jambrečić A.; *Meke pneumatske mreže u oblikovanju proteze šake*; Reprizotorij Sveučilišta u Zagrebu; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb; 2020.

## **PRILOZI**

1. CD