

# Primjena kompozitnih materijala u izradi invalidskih kolica

---

Čabradi, Bojan

Undergraduate thesis / Završni rad

2012

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:024850>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-14**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Bojan Čabradi**

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Student:

Bojan Čabradi

Zagreb, 2012.

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

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Zdravku Schauperlu na strpljenju i utrošenom slobodnom vremenu koje je izdvojio za pomoć pri izradi ovog rada te svim korisnim savjetima. Također se zahvaljujem asistentu Zoranu Domitranu, dipl.ing. na pomoći pri pribavljanju ispitnih uzoraka te tehničkim suradnicima Romanu Divjaku te Tomislavu Habeku na pomoći pri laboratorijskim ispitivanjima.

Bojan Čabradi



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Bojan Čabradi** Mat. br.:0035169518

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena kompozitnih materijala u izradi invalidskih kolica**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of composites in wheelchair production**

Opis zadatka:

Polimerni kompoziti predstavljaju vrlo raširen konstrukcijski materijal koji se sve češće koristi u svim segmentima strojarstva, brodogradnje i zrakoplovstva. Zbog dobrih mehaničkih svojstava i dobre tehnološkičnosti ti materijali nalaze svoju primjenu i u izradi medicinskih pomagala.

U ovom radu potrebno je analizirati zahtjeve koji se postavljaju na materijal za izradu invalidskih kolica. Na temelju tih zahtjeva i literaturnih podataka potrebno je analizirati da li se postojeći materijali u izradi kolica mogu zamijeniti s kompozitnim materijalima, te odrediti vrstu i svojstva polimernih kompozita koji se mogu koristiti u izradi najopterećenijih dijelova invalidskih kolica.

Nakon izbora materijala a na konkretnom primjeru invalidskih kolica, potrebno je steći uvid u primjenjivost polimernih kompozita u njihovoj izradi, te analizirati sve prednosti i mane provedene zamjene konstrukcijskog materijala.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
14. studenog 2011.

Rok predaje rada:  
1. rok: 10. veljače 2012.  
2. rok: 6. srpnja 2012.  
3. rok: 14. rujna 2012.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 15., 16. i 17. veljače 2012.  
2. rok: 9., 10. i 11. srpnja 2012.  
3. rok: 19., 20. i 21. rujna 2012.

Zadatak zadao:

  
Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Povijesni razvoj invalidskih kolica .....	1
1.2. Kategorije invalidskih kolica .....	2
1.3. Dijelovi i dizajn kolica .....	6
1.3.1. Dizajn okvira.....	6
1.3.2. Kotači i ovjes .....	8
1.4. Materijali.....	9
2. KOMPOZITNI MATERIJALI.....	11
2.1. Vlaknima ojačani kompoziti .....	11
2.2. Predviđanje svojstava vlaknima ojačanih kompozita .....	13
2.2.1. Predviđanje gustoće kompozita .....	13
2.2.2. Predviđanje modula elastičnosti.....	13
2.2.3. Predviđanje čvrstoće kompozita .....	14
2.3. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita.....	16
2.3.1. Omjer „duljina/promjer“ .....	16
2.3.2. Volumni udio vlakana .....	16
2.3.3. Usmjerenost vlakana .....	16
2.4. Kompoziti s polimernom matricom .....	17
2.5. Primjena polimernih kompozita u medicini.....	18
3. ANALIZA ZAHTJEVA NA MATERIJAL .....	20
3.1. Nosivi okvir.....	21
3.1.1. Analiza naprezanja.....	22
3.2. Nosač prednjeg kotača .....	25
3.2.1. Analiza naprezanja.....	25

---

3.3. Nosač pogonskog kotača.....	27
3.3.1. Analiza naprezanja.....	27
3.4. Cijev ručke za guranje.....	29
3.4.1. Analiza naprezanja.....	29
4. IZBOR NOVIH MATERIJALA .....	31
4.1. Testiranje uzorka.....	31
4.1.1. Ispitivanje savijanjem .....	32
4.1.2. Ispitivanje tlačenjem .....	36
4.1.3. Analiza rezultata .....	38
4.2. Odabir materijala korištenjem CES programa .....	39
4.2.1. Nosač prednjeg kotača .....	40
4.2.2. Nosač pogonskog kotača.....	42
5. ZAKLJUČAK.....	44
LITERATURA.....	45
PRILOZI.....	46

## POPIS SLIKA

Slika 1	Model sa ispletenom šibom.....	1
Slika 2	Prva metalna invalidska kolica.....	2
Slika 3	Motorizirana invalidska kolica.....	2
Slika 4	Kolica za opću namjenu .....	3
Slika 5	Kolica sa pogonom na jednom kotaču .....	4
Slika 6	Kolica za primjenu u kući .....	4
Slika 7	Ultra-lagana kolica .....	5
Slika 8	Kolica za košarku .....	5
Slika 9	Kolica za utrivanje.....	5
Slika 10	Kolica sa mogućnošću promjene položaja tijela .....	6
Slika 11	Kutijasta izvedba okvira.....	7
Slika 12	Konzolna izvedba okvira.....	7
Slika 13	Žičani kotači .....	8
Slika 14	Lijevani kotači.....	8
Slika 15	Primjer kompozitnih invalidskih kolica .....	10
Slika 16	Osnovni tipovi ojačanja.....	11
Slika 17	Različiti načini slaganja vlakana .....	12
Slika 18	Dijagram „naprezanje-istezanje“ vlaknima ojačanog kompozita .....	14
Slika 19	Vlačno opterećeni kompozit.....	14
Slika 20	Tlačno opterećeni kompozit .....	15
Slika 21	Smično opterećeni kompozit.....	15
Slika 22	Savijanje kompozita .....	15
Slika 23	Utjecaj volumnog udjela vlakana na svojstva kompozita .....	16
Slika 24	Utjecaj usmjerenja vlakna obzirom na naprezanje.....	17
Slika 25	Nosivi okvir.....	21
Slika 26	Dijelovi nosivog okvira .....	22
Slika 27	Rezultat analize naprezanja bočne cijevi.....	23
Slika 28	Rezultat analize naprezanja poprečne dvostruke cijevi.....	23
Slika 29	Rezultat analize naprezanja poprečne cijevi šesterokutnog presjeka .....	24



---

Slika 30	Nosač prednjeg kotača.....	25
Slika 31	Rezultat analize naprezanja nosača prednjeg kotača.....	26
Slika 32	Nosač pogonskog kotača .....	27
Slika 33	Rezultat analize naprezanja nosača pogonskog kotača .....	28
Slika 34	Cijev ručke za guranje .....	29
Slika 35	Rezultat analize naprezanja cijevi ručke za guranje.....	30
Slika 36	Uzorak kompozitne cijevi .....	31
Slika 37	Vaganje uzoraka .....	32
Slika 38	Uređaj za testiranje.....	33
Slika 39	Dijagram ispitivanja savijanjem u 3 točke .....	33
Slika 40	Oštećenja uslijed ispitivanja savijanjem.....	34
Slika 41	Dijagram ispitivanja tlačnim naprežanjem.....	36
Slika 42	Oštećenja uslijed ispitivanja tlačenjem .....	37
Slika 43	Pregled materijala prema granici elastičnosti i tlačnoj čvrstoći .....	40
Slika 44	Pregled materijala prema granici elastičnosti i tlačnoj čvrstoći .....	42

## POPIS TABLICA

Tablica 1	Primjene kompozita u medicini.....	18
Tablica 2	Pregled svojstava mogućih zamjena za nosač prednjeg kotača .....	41
Tablica 3	Pregled svojstava mogućih zamjena za nosač pogonskog kotača.....	43

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$A$	$\text{mm}^2$	Površina poprečnog presjeka uzorka cijevi
$d$	mm	Unutarnji promjer uzorka cijevi
$D$	mm	Vanjski primjer uzorka cijevi
$E_c$	GPa	Modul elastičnosti kompozita
$E_f$	GPa	Modul elastičnosti vlakna
$E_m$	GPa	Modul elastičnosti matrice
$E_{uz}$	GPa	Modul elastičnosti uzorka cijevi
$F_{f,max}$	N	Maksimalna sila savijanja
$F_k$	N	Sila izvijanja
$F_{t,max}$	N	Maksimalna sila tlačenja
$I_{min}$	$\text{mm}^4$	Najmanji aksijalni moment tromosti presjeka
$l$	mm	Razmak među osloncima
$l_0$	mm	Slobodna duljina izvijanja
$M_{max}$	Nmm	Maksimalni moment savijanja
$V_f$	-	Volumni udio vlakana
$V_m$	-	Volumni udio matrice
$W$	$\text{mm}^3$	Moment otpora presjeka

### Grčke oznake

$\rho_c$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća kompozita
$\rho_f$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća materijala vlakna
$\rho_m$	$\text{kg/m}^3$	Gustoća materijala matrice
$\sigma_f$	MPa	Naprezanje na savijanje
$\sigma_k$	MPa	Naprezanje na izvijanje
$\sigma_t$	MPa	Naprezanje na tlak

## **SAŽETAK**

Invalidska kolica su mnogim ljudima jedini način transporta i mnogi su vezani uz njih svaki dan, cijeli dan. Uzroci potrebe za invalidskim kolicima mogu biti različiti, od bolesti do raznih ozljeda, što privremenih, što trajnih. Oporavak tih ljudi ili održavanje dostojnog života uvelike ovisi i o kolicima stoga je važno uvažavati razne zahtjeve prilikom konstruiranja takvih kolica. Jedan od faktora su i materijali koji se koriste. U praksi je uvaženo korištenje klasičnih i široko dostupnih materijala poput aluminija i čelika. Cilj ovog rada je ispitati mogućnosti zamjene tih materijala sa polimernim materijalima, odnosno polimernim kompozitima. Postaviti će se zahtjevi na materijal te će se tražiti moguće zamjene, što laboratorijskim eksperimentom, što izborom u računalnom programu.

## 1. UVOD

### 1.1. Povijesni razvoj invalidskih kolica

Stoljećima prije, osobe sa invaliditetom koje su preživjele dulji period bile su prenošene na visećim mrežama obješenim na grede koje su drugi nosili. To je bio preferirani način transporta u višoj klasi. Kasnije su razvijene tačke i brzo su postale čest način transporta osoba s invaliditetom. Budući da su se tačke koristile i za prijevoz materijala, tijekom tog razdoblja u povijesti, osobe sa invaliditetom smatralo se izopćenicima društva. Tijekom renesanse, Francuski dvor popularizirao je prva invalidska kolica. To su bili naslonjači sa dodanim kotačima. Omogućili su mobilnost ali samo unutar kuće i uz nečiju pomoć. Kasnije je razvijen drveni model sa ispletenom šibom kao sjedištem i naslonom (Slika 1). Taj model ostao je standardan do 1930. godine. Franklin D. Roosevelt nije bio zadovoljan drvenim modelom pa je zatražio da mu se mnogi kuhinjski stolci opreme sa kotačima. U 1930-ima, mladi rudarski inženjer Everest doživio je nesreću koja ga je ostavila paraliziranim. U suradnji sa kolegom inženjerom Jenningsom razvili su metalna kolica (Slika 2). U svega nekoliko godina osnovali su tvrtku Everest & Jennings koja proizvodi invalidska kolica. Po završetku Drugog svjetskog rata, medicinska dostignuća spasila su živote mnogim pacijentima sa ozljedama kralježnice ili sa amputiranim donjim ekstremitetima koji bi inače umrli. Medicinski centar za vojne veterane opremio je bolnice sa kolicima sa metalnom konstrukcijom i 18 inča širokim sjedištima. Ta kolica su dizajnirana za mobilnost unutar bolnice ili kućanstva, bez optimizirane ergonomičnosti [1].



**Slika 1 Model sa ispletenom šibom**



**Slika 2 Prva metalna invalidska kolica**

## **1.2. Kategorije invalidskih kolica**

Postoje dvije glavne skupine invalidskih kolica:

1. Manualno pokretana invalidska kolica
2. Motorizirana invalidska kolica (Slika 3)

Motorizirana invalidska kolica pokreću se pomoću ugrađenog elektromotora, a manualna invalidska kolica pomoću mišića samog korisnika. Zbog elektromotora i potrebnih baterija motorizirana invalidska kolica su još uvijek relativno glomazna, teška, imaju ograničen krug djelovanja, skupa su i teško se transportiraju. Iz tih razloga motorizirana kolica koriste korisnici koji nisu sposobni sami pokretati kolica. To su osobe koje imaju visok stupanj oduzetosti gornjeg dijela tijela te starije nemoćne osobe. Kod njih su motorizirana kolica jedini izbor [1].



**Slika 3 Motorizirana invalidska kolica**

Manualna kolica s druge strana predstavljaju daleko češće korištenu opciju pri transportu korisnika, što zbog praktičnosti, što zbog cijene. Iz tog razloga razvijen je čitav niz različitih kolica imajući u vidu stupanj aktivnosti korisnika, mjesto korištenja i slično pa će se navesti nekoliko izvedbi i primjera [1].

Kolica za opću namjenu (Slika 4) namijenjena su za kliničku upotrebu gdje više osoba može koristiti ista kolica. Nisu prikladna za aktivne korisnike koji koriste kolica za osobnu mobilnost. Dizajnirana su da budu jeftina, prikladna za upotrebu ljudi širokog spektra veličina, jednostavna za održavanje i uglavnom pokretana od druge osobe. Konstrukcija im je teška i sa vrlo limitiranim performansama. Tipična izvedba takovih kolica ima njišuće odmorište za noge, izmjenjiv naslon za ruke, jednodijelnu konstrukciju i čvrste kotače [1].



**Slika 4**    **Kolica za opću namjenu**

Korisnici sa smanjenom funkcijom jedne ruke i jedne ili obje noge mogu imati veće koristi od kolica koja imaju povezane stražnje kotače (Slika 5). To omogućuje da korisnik pokretanjem samo jednog kotača pokreće oba. Kako je u tom slučaju nemoguće skrenuti kolica, mora postojati mehanizam koji razdvaja tu vezu među kotačima [1].



**Slika 5 Kolica sa pogonom na jednom kotaču**

Unutarnji prostori poput stana predstavljaju veću limitiranost u pogledu toga da se korisnik često mora jako približiti namještaju ili sanitarnim čvorovima da bi ih pravilno koristio. Stoga se koriste kolica sa smanjenim međuosovinskim razmakom i malim kotačima na stražnjoj strani (Slika 6) što ima za posljedicu smanjenu stabilnost gledano s bočne strane.



**Slika 6 Kolica za primjenu u kući**

Aktivni korisnici preferiraju kolica sa boljom upravljivošću i odazivom koja odgovaraju njihovom fizičkom i psihičkom karakteru. Ultra-lagana kolica (Slika 7) nastala su iz potrebe korisnika za funkcionalnim i ergonomičnim kolicima. Takva kolica izrađuju se od



aluminija, legura čelika, titana ili kompozitnih materijala. Najveće prednosti tih kolica su mala masa, kvalitetni materijali i funkcionalni dizajn [1].



**Slika 7 Ultra-lagana kolica**

Potreba za većim performansama dovela je do razvoja kolica za sport. Nema nekog konkretnog dizajna jer to najviše ovisi o vrsti sporta. Na primjer, kolica za tenis i košarku (Slika 8) imaju jako malo zajedničkih svojstava s kolicima za utrivanje (Slika 9) ili pucanje.



**Slika 8 Kolica za košarku**



**Slika 9 Kolica za utrivanje**

Neka kolica napravljena su u svrhu promjene položaja tijela od zavaljenosti do sjedenja ili od sjedenja do stajanja (Slika 10). Većina kolica koja omogućuju podizanje u stojeći stav ne mogu se kretati u tom položaju zbog smanjene sigurnosti. Stajanje omogućuje doseganje polica ili ladica na visinama koje nisu dosegljive iz sjedećeg položaja. Stajanje ima i dodatne terapijske prednosti kao npr. poboljšanje cirkulacije ili ublažavanje osteoporoze [1].



**Slika 10** Kolica sa mogućnošću promjene položaja tijela

### **1.3. Dijelovi i dizajn kolica**

Nekoliko faktora mora se uzeti u obzir pri dizajniranju okvira: koja je namjena kolica, kakve su mogućnosti korisnika, koliki su raspoloživi resursi, koja rješenja već postoje. Ti faktori određuju da li će se i kako dizajnirati i izrađivati okvir kolica. Uspješan dizajn može biti ostvaren samo uz konstantnu interakciju korisnik-proizvođač. Trajnost, estetika, udobnost u vožnji i cijena okvira ovise o korištenim materijalima, geometriji okvira i načinu proizvodnje. Jedan od problema koji komplicira razvoj kolica je činjenica da mnogi korisnici ovise o takvoj mobilnosti svaki dan, skoro cijeli dan [1].

#### **1.3.1. Dizajn okvira**

Svi današnji dizajni okvira temelje se na cijevnim konstrukcijama. Cijevi se ili zavaruju ili spajaju vijcima. Postoje dvije osnovne izvedbe okvira: kutijasti oblik ili konzolni oblik. Kutijasti (Slika 11) je dobio naziv zbog pravokutnog oblika gdje su cijevi postavljene kao po

rubovima kutije. Mogu biti vrlo čvrsti i trajni. Konzolni ima takav naziv zbog činjenice da ako se kolica gledaju s bočne strane, kotači izgledaju kao da su povezani sa samo jednom cijevi; to je slično kao da su prednji kotači učvršćeni na konzolu koja je fiksirana na stražnje kotače. Kutijasta izvedba zahtijeva poprečne križno postavljene cijevi zbog dodatne krutosti i čvrstoće [1].



**Slika 11 Kutijasta izvedba okvira**

Kutijasti oblik je veoma krut i čvrst pa se kod pravilnog oblikovanja istog mogu postići vrlo male deformacije prilikom korištenja kolica i većina suspenzije se svodi na sjedište, kotače i nosače kotača. Većina proizvođača dizajnira kutijasti oblik kojem nije omogućena potrebna fleksibilnost.

Konzolni oblik (Slika 12) se bazira na nekoliko temeljnih principa: 1) okvir preuzima ulogu suspenzije, 2) manje je cijevi i postavljene su bliže tijelu pa cijela kolica nisu toliko upadljiva i 3) manje je dijelova i manje zavara što pojednostavljuje konstrukciju [1].



**Slika 12 Konzolna izvedba okvira**

### 1.3.2. Kotači i ovjes

Kako svi proizvođači koriste inče kao mjernu jedinicu za veličine kotača, u ovom poglavlju će se zadržati ta mjerna jedinica. Prednji kotači mogu biti veliki od 2 do 12 inča, ovisno o namjeni. Ovjes se izvodi sa sustavom nosača koji može biti pneumatski, polu-pneumatski ili čvrste izvedbe (poliuretanski). Pneumatski ovjes omogućuje ugodniju vožnju pod cijenu skupljeg održavanja, dok su poliuretanski ovjesi vrlo trajni. Polu-pneumatski ovjes ovdje predstavlja kompromis. Većina aktivnih korisnika preferira prednje kotače veličine 5 inča poliuretanske izvedbe ili 8 inča pneumatske izvedbe ovjesa za svakodnevnu upotrebu. Kotači veličine 8 inča predstavljaju ugodniju vožnju ali pod cijenu manjeg prostora za noge. Prostor za noge je maksimalan sa kotačima veličine 2 inča. Kotači te veličine slični su onima na koturaljkama i koriste se uglavnom za sportske terene. Pogonski kotači dolaze u tri standardne veličine: 22, 24 ili 26 inča. Postoje dvije izvedbe: žičana (Slika 13) i lijevana (MAG) izvedba (Slika 14). Lijevani se uglavnom rade od plastike ili nekih laganih legura, npr. magnezija. Zahtijevaju minimalno održavanje i sporo se troše. S druge strane, žičana izvedba je laganija i češće se koristi [1].



Slika 13 Žičani kotači



Slika 14 Lijevani kotači

#### 1.4. Materijali

Većina kolica napravljena je iz aluminija ili čelika. Neka su napravljena od titana ili kompozitnih materijala, prvenstveno sa ugljičnim vlaknima te se očekuje povećanje udjela kompozitnih kolica u budućnosti. Svi ti materijali imaju svoje prednosti i nedostatke [1].

Obična aluminijska kolica zavarena su TIG postupkom. Ponekad se umjesto zavara koriste vijčani spojevi. Kao tip aluminija uglavnom se koristi aluminij 6061 (DIN 3.3211). To je jedna od najjeftinijih legura koja ima većinu poželjnih svojstava aluminija, dobra mehanička svojstva i visoku antikorozivnost [1].

Većina čeličnih kolica izrađena su od nelegiranog konstrukcijskog čelika (Č 1040 ili Č 1060) ili krom-molibden legura (Č 4130 ili Č 4140) bešavnih cijevi. Konstrukcijski čelik je jako jeftin i lagano se obrađuje. Široko je dostupan i pokazuje se zadovoljavajućim u različitim primjenama. No, ima malen omjer čvrstoće i težine (specifičnu čvrstoću) u usporedbi s ostalim materijalima. Cr-Mo legura se koristi zbog dobre zavarljivosti i jednostavnosti obrade. Obična kolica napravljena su od cijevi debljine stjenke 0,7 - 0,9 mm a promjeri mogu varirati od 6 do 35 mm, ovisno o predviđenom opterećenju [1].

Sve više i više suvremenih kolica izrađuje se od titana. Titan je lagan, čvrst metal. Okviri od titana zavaruju se TIG postupkom. On je najjeftiniji materijal za izradu invalidskih kolica te stoga i najskuplji. Titan zahtijeva posebne alate i vještine da bi ga se obrađivalo i varilo. Ima vrlo dobra mehanička svojstva i dobru antikorozivnost. Podložan je trošenju. Titan se koristi zbog svoje dostupnosti, izgleda, visoke antikorozivnosti, vrlo dobrih mehaničkih svojstava i male težine. Prepreka upotrebi je, osim visoke cijene, sklonost krhkom lomu [1].

Napredni kompoziti se koriste u zrakoplovstvu i industriji već dugi niz godina. Ti materijali uključuju aramidna vlakna, ugljična vlakna i poliestervapnenac kompozite. Ti materijali se sada polako uvode i u proizvodnju invalidskih kolica (Slika 15). Aramidna vlakna su jedna od najlakših struktura danas dostupnih na tržištu. Imaju ekstremnu vlačnu čvrstoću i žilavost ali slabu tlačnu čvrstoću. Ugljična vlakna su vrlo kruta (velik modul elastičnosti), vrlo čvrsta (visoka vlačna čvrstoća) uz vrlo malu gustoću. Ti kompoziti se uglavnom koriste u obliku tkanine ili pletiva. Tkanina se izvodi jednosmjerno ili dvosmjerno. Jednosmjerno pletena tkanina ima veću čvrstoću u smjeru pletenja. Kompoziti se moraju povezati pomoću osnove (matrice). Uglavnom se koriste poliesterske matrice ili epoksidne

smole. Za dobivanje maksimalne čvrstoće mora se upotrijebiti minimalna količina epoksida prilikom umakanja vlakna. Za povećanje čvrstoće i krutosti strukturnog kompozita koriste se pjenaste jezgre (stiropor, uretan ili PVC pjena). Poliester i vapnenac koriste se za dobivanje mješavine koja se pod visokim tlakom i temperaturom pretvori u kruti i trajan proizvod. Poliester-vapnenac kompoziti imaju visoku udarnu čvrstoću ali značajno manji omjer čvrstoće i težine u odnosu na ostale kompozite. Njihova glavna prednost su mala cijena i dostupnost. Kompoziti se općenito mogu ljevati u raznolike oblike što stvara mnoge mogućnosti oblika invalidskih kolica [1].

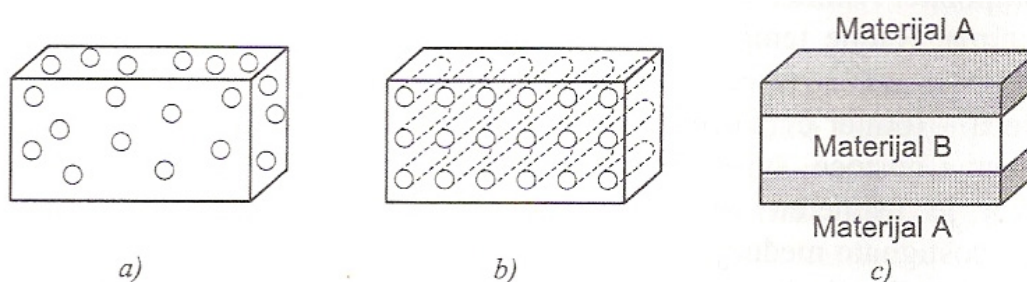


**Slika 15** Primjer kompozitnih invalidskih kolica

## 2. KOMPOZITNI MATERIJALI

U svojem osnovnom obliku, kompozitni materijal je dobiven umjetnim spajanjem barem dvije komponente različitih materijala u svrhu dobivanja materijala takvih svojstava kakve ne sadrži ni jedna komponenta za sebe. U praksi, kompoziti se sastoje od neke osnove (matrice) i ojačanja nekog oblika koje povećava krutost i čvrstoću matrice. Ojačanje može biti u obliku čestica ili vlakna ili u obliku slojevitog kompozita, odnosno sendvič konstrukcija (Slika 16). Danas najčešće proizvedeni kompoziti mogu se podijeliti u tri glavne skupine prema materijalu matrice:

1. Kompoziti s polimernom matricom – najčešći u primjeni pa će se i najdetaljnije opisati u ovom radu. Ovi materijali koriste matricu na polimernoj bazi sa vlaknastim ojačanjima koja su najčešće staklena, ugljična ili aramidna [2].
2. Kompoziti s metalnom matricom – najčešće korišteni u automobilske industriji, ovi materijali koriste matricu na bazi metala poput aluminija ili čelika i ojačanja poput silicij karbida (SiC) [2].
3. Kompoziti s keramičkom matricom – koriste se u uvjetima velikih temperatura. Matrica je izrađena na bazi keramike sa ojačanjima, najčešće kratkim vlaknima ili viskerima, napravljenim od silicij-karbida ili bor-nitrida [2].



**Slika 16 Osnovni tipovi ojačanja**

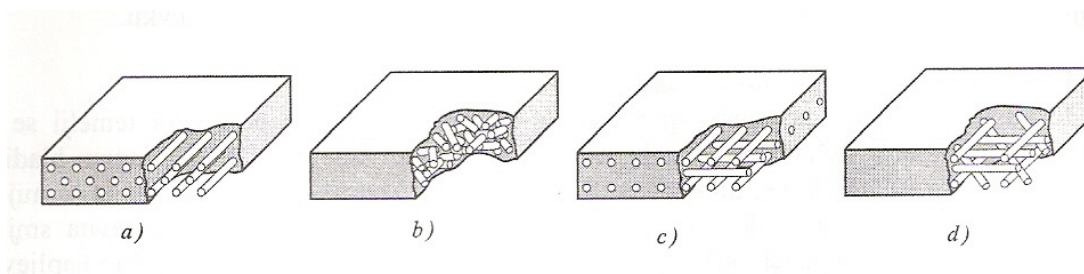
(a) čestice, (b) vlakna, (c) slojeviti kompozit

### Vlaknima ojačani kompoziti

Efikasnost ojačanja najveća je kod kompozita s vlaknima (vlaknima ojačanih kompozita). Kod ovih kompozita opterećenje se prenosi i distribuira među vlaknima i to putem matrice

koja je u većini slučajeva osrednje duktilna. Znatno ojačavanje ovih kompozita moguće je jedino ako je veza vlakno-matrica jaka. Prema njihovom promjeru vlaknasta ojačala dijelimo na viskere, vlakna i žice. Viskeri su vrlo tanke niti keramičkih monokristala, visoke čvrstoće koji imaju ekstremno velik omjer „duljina/promjer“. Ukoliko su vlakna diskontinuirana, efikasnost ojačanja ovisi o duljini vlakana. Za svaku kombinaciju vlakno-matrica postoji tzv. kritična duljina, dok duljine kontinuiranih vlakna uvelike premašuju ovu kritičnu vrijednost [2].

Način slaganja vlakana (Slika 17) bitno utječe na svojstva vlaknastih kompozita. Mehanička svojstva kompozita ojačanih kontinuiranim usmjerenim vlaknima su vrlo anizotropna. U smjeru vlakana čvrstoća je maksimalna dok je u smjeru okomitom na vlakna čvrstoća minimalna. Kod kompozita ojačanih kratkim vlaknima vlakna mogu biti ili usmjerena ili slučajno raspoređena. Značajne vrijednosti čvrstoće i krutosti moguće je postići u uzdužnom smjeru kod spomenutih kompozita. Unatoč nekim ograničenjima na efikasnost ojačavanja, kod kompozita ojačanih slučajno usmjerenim kratkim vlaknima svojstva su izotropna. Kako takav kompozit čini sistem od matrice i ojačanja, svojstva nastalog kompozita bit će kombinacija svojstava matrice i svojstava vlakana [3].



**Slika 17** Različiti načini slaganja vlakana

- (a) Kontinuirana jednosmjerna vlakna, (b) slučajno usmjerena diskontinuirana vlakna, (c) ortogonalno raspoređena vlakna, (d) višesmjerno usmjerena vlakna



## 2.2. Predviđanje svojstava vlaknima ojačanih kompozita

### 2.2.1. Predviđanje gustoće kompozita

Zakonom miješanja uvijek se može predvidjeti gustoća vlaknima ojačanih kompozita:

$$\rho_c = V_m \cdot \rho_m + V_f \cdot \rho_f \quad (1)$$

gdje je  $\rho_c$  gustoća kompozita,  $V_m$  volumni udio matrice,  $\rho_m$  gustoća matrice,  $V_f$  volumni udio vlakana i  $\rho_f$  gustoća materijala vlakana.

Osim toga, s pomoću zakona miješanja može se točno predvidjeti električna i toplinska vodljivost vlaknima ojačanog materijala u smjeru vlakana ako su vlakna kontinuirana i jednosmjerna [3].

### 2.2.2. Predviđanje modula elastičnosti

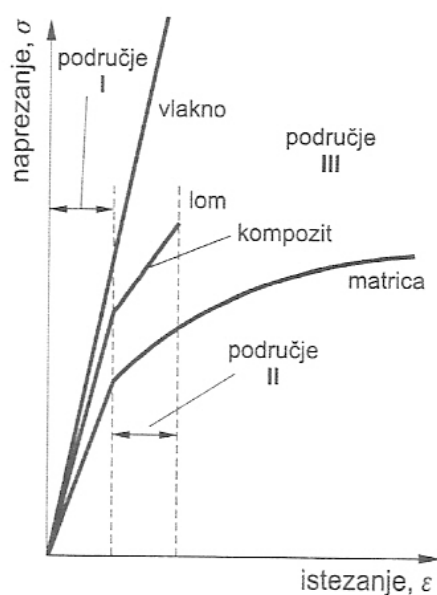
Ako opterećenje djeluje paralelno s kontinuiranim jednosmjernim vlaknima, zakonom miješanja može se točno predvidjeti modul elastičnosti:

$$E_c = V_m \cdot E_m + V_f \cdot E_f \quad (2)$$

gdje je  $E_c$  modul elastičnosti kompozita,  $E_m$  modul elastičnosti matrice i  $E_f$  modul elastičnosti vlakna.

Pri visokim naprežanjima započinje deformiranje matrice te dijagram „naprežanja-istezanje“ više nije linearan (Slika 18). U slučaju kada opterećenje djeluje okomito na smjer vlakana, komponente djeluju neovisno jedna o drugoj [3]. Modul elastičnosti može se predvidjeti izrazom:

$$E_c = \frac{E_m \cdot E_f}{E_f \cdot V_m + E_m \cdot V_f} \quad (3)$$



Slika 18 Dijagram „naprežanje-istežanje“ vlaknima ojačanog kompozita

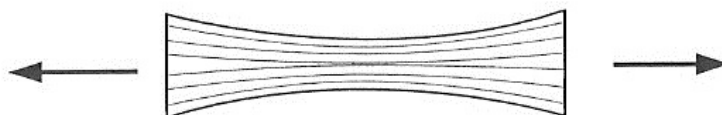
### 2.2.3. Predviđanje čvrstoće kompozita

Čvrstoća kompozita ovisi o vezama između vlakana i matrice te je ograničena deformiranjem matrice. Posljedica ovih okolnosti je da je utvrđena čvrstoća gotovo uvijek manja od predviđene zakonom miješanja. Druga svojstva, kao npr. duktilnost, žilavost, umor materijala i puzanje materijala predviđaju se teže nego vlačna čvrstoća [3].

Ponašanje kompozita pod opterećenjem može se promatrati s obzirom na vrstu naprežanja. Pa tako imamo:

#### a) Vlačno naprežanje

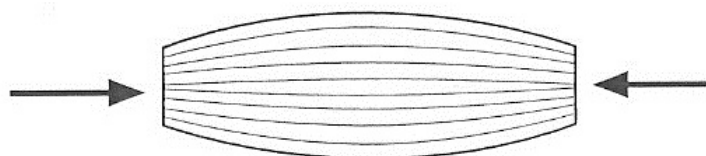
Slika 19 prikazuje vlačno opterećeni kompozit. Odaziv kompozita ovdje uvelike ovisi o vlačnoj čvrstoći vlakana, pošto je ona puno veća od vlačne čvrstoće matrice [2].



Slika 19 Vlačno opterećeni kompozit

## b) Tlačno naprezanje

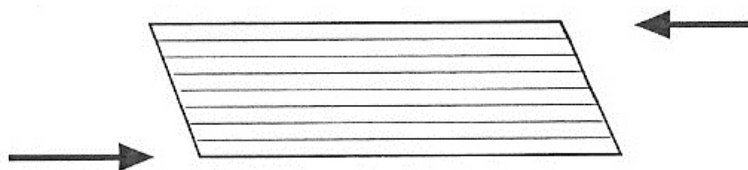
Slika 20 prikazuje tlačno opterećeni kompozit. Ovdje su veza između vlakna i matrice i čvrstoća matrice najvažniji pošto je uloga matrice zadržavanje usmjerenosti vlakana i spriječiti izvijanje [2].



**Slika 20 Tlačno opterećeni kompozit**

## c) Smično naprezanje

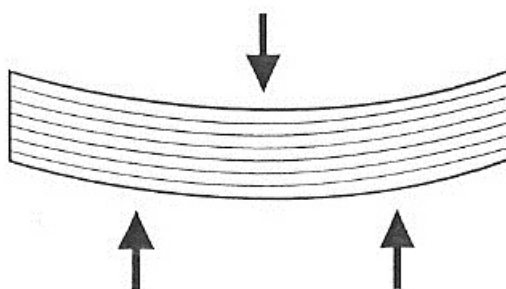
Slika 21 prikazuje smično opterećeni kompozit. Ovo opterećenje pokušava smicati slojeve vlakana jedan po drugom. Matrica vrši ključnu ulogu raspoređujući naprezanje po cijelom kompozitu. Vrlo je važna dobra veza matrice i vlakana [2].



**Slika 21 Smično opterećeni kompozit**

## d) Savijanje

Naprezanja na savijanje su kombinacija vlačnog, tlačnog i smičnog naprezanja. Kada je opterećen kao na slici, gornji sloj je opterećen tlačno, donji sloj vlačno a srednji slojevi opterećeni su smičnim naprezanjima [2].



**Slika 22 Savijanje kompozita**

## 2.3. Karakteristike vlaknima ojačanih kompozita

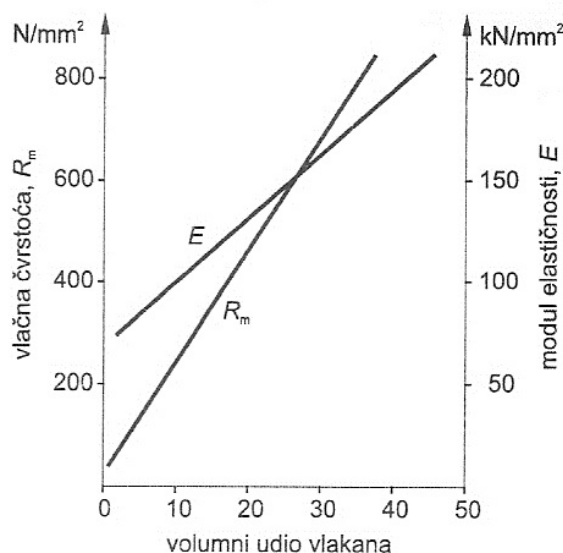
Pri konstruiranju vlaknima ojačanim kompozitima potrebno je uzeti u obzir brojne faktore.

### 2.3.1. Omjer „duljina/promjer“

Kontinuirana vlakna koja vode do najboljih svojstava, često se teško proizvode te također teško ugrađuju u matricu. Diskontinuirana vlakna s velikim omjerom „duljina/promjer“ znatno se lakše ugrađuju u matricu dovodeći tako do materijala visoke krutosti i čvrstoće [3].

### 2.3.2. Volumni udio vlakana

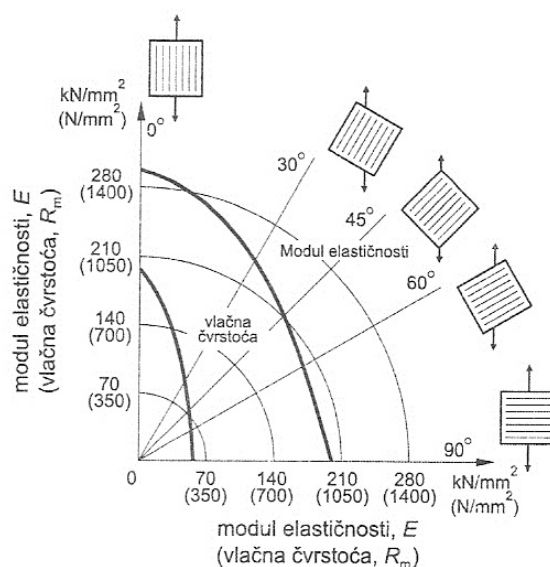
Veći volumni udio vlakana vodi do povećanja čvrstoće i krutosti kompozita (Slika 23). Gornja granica od oko 40% određena je sposobnošću, odnosno mogućnošću da se vlakna okruže materijalom matrice [3].



Slika 23 Utjecaj volumnog udjela vlakana na svojstva kompozita

### 2.3.3. Usmjerenost vlakana

Jednosmjerna vlakna imaju optimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno s vlaknima (Slika 24). Ipak, kao što je pokazano primjerom, svojstva kompozita mogu biti vrlo anizotropna. Umjesto u jednom smjeru, vlakna se mogu polagati ortogonalno ili pod nekim drugim kutom; time se žrtvuje maksimalna čvrstoća, ali se postižu jednoličnija svojstva kompozita [3].



**Slika 24** Utjecaj usmjerenja vlakna obzirom na naprezanje

Dakle, ukupno ponašanje kompozita ovisi o:

1. Svojevima matrice i ojačala
2. Veličini i rasporedu (raspodjeli) konstituenta
3. Volumnom udjelu konstituenta
4. Obliku konstituenta
5. Prirodi i jakosti veze među konstituentima

#### 2.4. Kompoziti s polimernom matricom

Bazni materijali poput epoksida ili poliestera imaju ograničenu primjenu u stvaranju nekih primjenjivih konstrukcija zasebno jer su im mehanička svojstva puno slabija u odnosu na većinu metala. S druge strane imaju poželjna svojstva poput mogućnosti oblikovanja u vrlo složene oblike ili profile.

Materijali poput stakla, ugljika, aramida ili bora imaju vrlo visoku vlačnu i tlačnu čvrstoću ali kada su u obliku čvrstog tijela, ta svojstva nisu vidljiva. To je zbog činjenice da kad je opterećen, svaki materijal će popustiti zbog nepravilnosti u strukturi i prije teoretske vrijednosti sloma. Rješenje tog problema je proizvodnja takvih materijala u vlaknastom obliku s ciljem da se te nepravilnosti svedu na pojedinačna vlakna. Stoga snop takvih vlakana može preciznije prikazati optimalna svojstva tog materijala. Unatoč tome, vlakna sama za

sebe mogu izdržati samo vlačna naprezanja u smjeru vlakana na isti način kao vlakna u užetu. Izvrsna svojstva mogu se dobiti tek kada se vlaknasta ojačanja umetnu u matricu. Matrica širi naprezanja na sva vlakna i štiti vlakna od oštećenja trošenjem ili udarcima. Visoka čvrstoća i krutost, jednostavnost oblikovanja u komplicirane oblike, visoka otpornost na okolišne uvjete uz malu gustoću čine ove materijalne superiornima nad većinom metala [3].

## 2.5. Primjena polimernih kompozita u medicini

Kao sa svim biomaterijalima, pitanje biokompatibilnosti (reakcija tkiva na kompozit) je najvažnije. Pošto su građeni od više različitih materijala, kompoziti predstavljaju mogućnost veće i raznolikije reakcije. Uz to, činjenica da jedan ili više konstituenta imaju dimenzije na staničnoj razini može dovesti do "probavljanja" krhotina ili čestica kompozita što može rezultirati stvaranjem enzima za razgradnju tkiva ili transportom do limfnog sustava [5].

Iako trajnost i biokompatibilnost predstavljaju glavne čimbenike kod izbora kompozita u medicini, oni također imaju prednosti u pogledu mogućnosti oblikovanja i proizvodnje. Te prednosti omogućile su konstrukciju arterijalne proteze (Gershon *et al.*, 1990., 1992.), međukralježničkog diska duplicirajući prirodnu strukturu (Ambrosio *et al.*, 1996.) ili fiksiranje pločica za kosti sa vijcima kontrolirane krutosti (Veerabagu *et al.*, 2003.).

Za neke primjene, propusnost rendgenskih zraka se smatra prednošću. Primjer su naprave za unutarnju fiksaciju prijeloma koje ne blokiraju rendgenske zrake na mjestu prijeloma omogućujući jasnu sliku prilikom snimanja [5].

Primjena polimernih kompozita se može podijeliti s obzirom na korišteno ojačanje. Tako se koriste najčešće ugljična vlakna, polimerna vlakna, keramika i staklena vlakna. U tablici 1 navedeni su neki primjeri primjene kompozita iz prakse [5].

**Tablica 1 Primjene kompozita u medicini**

Primjena	Matrica/ojačanje	Reference
Vanjski fiksator	Epoksid/ugljična vlakna	Migliaresi <i>et al.</i> , 2004.
Pločice, vijci i čavli za kosti	PP/ugljična vlakna	Christel <i>et al.</i> , 1980.
	PE/ugljična vlakna	Rushton and Rae, 1984.

	PLLA/hidroksiapatit	Furukawa <i>et al.</i> , 2000.
Kirurgija kralježnice	PU/biostaklo	Claes <i>et al.</i> , 1999.
	Hidrogel/PET vlakna	Ambrosio <i>et al.</i> , 1996.
Dentalna primjena	PMMA/aramidna vlakna	Vallittu, 1996.
Proteze udova	Epoksid/ugljična, staklena, aramidna vlakna	Dawson, 2000.
Proteze kukova	PEI/ugljična, staklena vlakna	De Santis <i>et al.</i> , 2000.

### 3. ANALIZA ZAHTJEVA NA MATERIJAL

Kao i kod svih proizvoda, izbor materijala za invalidska kolica utječe na proizvođača a i korisnika. Materijal utječe na karakteristike poput trajnosti, čvrstoće, cijenu, izgled, oblik, mogućnosti proizvodnje i težinu. Iako je već postignut značajan napredak u izradi materijala, još ima puno mjesta za daljnja poboljšanja. Svojstva dijelova koji mogu napredovati korištenjem modernih tehnologija su:

- Okvir – omjer čvrstoća/masa, jednostavnija proizvodnja, konačne karakteristike.
- Gume i kotači – bolja svojstva guma bez smanjenja udobnosti vožnje, prijanjanje, trajnost.
- Materijali sjedišta – udobnost, trajnost, izgled, jednostavnost čišćenja, nezapaljivost.

U ovom radu vršit će se analiza materijala iz kojeg su načinjeni okvir i nosači kotača te cijev ručke za guranje iz razloga što su u najviše slučajeva napravljeni od metalnih materijala a ostali dijelovi već sadrže ili su u potpunosti napravljeni od laganijih materijala poput polimera ili kompozita.

Analiza će se vršiti na konkretnom modelu invalidskih kolica koja su dostupna u Hrvatskoj. Kolica su napravljena za opću namjenu. Nosivi okvir izrađen je od metala u kombinaciji čelika i aluminija. Prema vrsti spada u kutijasti oblik sa križno postavljenim cijevima za dodatnu krutost. Kotači su također aluminijski u žičanoj izvedbi sa punim gumama. Nosači kotača su čelični, najvjerojatnije izrađeni lijevanjem. Cijev ručke za guranje je također čelična. Ostali dijelovi su uglavnom izrađeni od tkanina ili polimera te se stoga neće razmatrati u ovome radu.

Za potrebe utvrđivanja najopterećenijih mjesta i iznosa maksimalnih naprezanja na nosivoj konstrukciji izrađeni su CAD modeli. Ti modeli posluži će pri simuliranju naprezanja na nosivu konstrukciju u nekom od programa uz primjenu metode konačnih elemenata. Prema tehničkim specifikacijama navedenim od strane proizvođača, maksimalno dopušteno opterećenje na kolica je 125 kilograma pa će se ta vrijednost koristiti i u simulaciji. Rezultat simulacije trebao bi dati vrstu i iznos maksimalnih naprezanja na konstrukciji te će se te

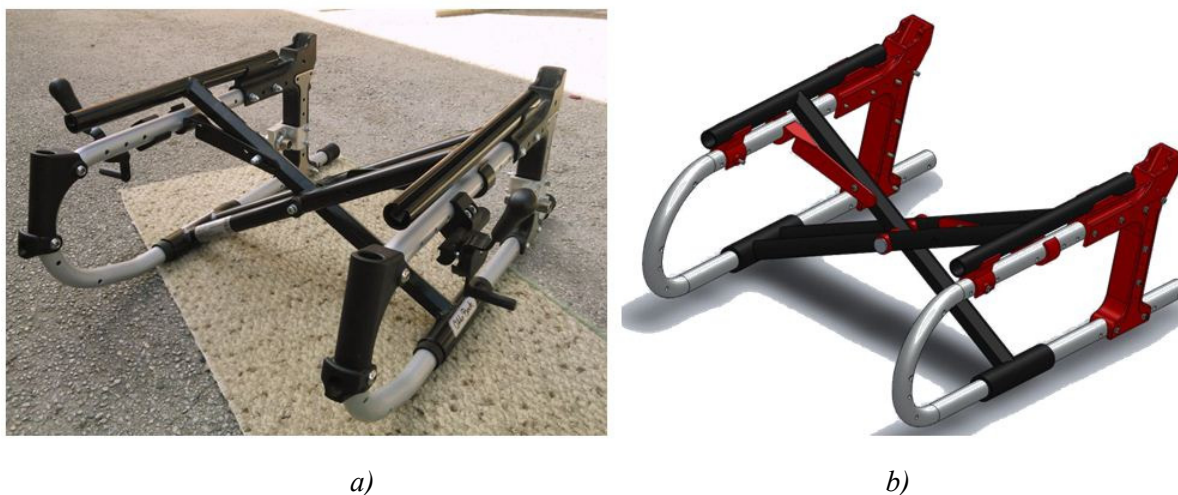


vrijednosti koristiti pri traženju prikladnog polimernog materijala koji će služiti kao zamjena za postojeći materijal.

Za potrebe analize naprezanja izrađeni su modeli u programu SolidWorks. Kao zasebne cjeline promatrati će se nosivi okvir kolica, nosač prednjeg kotača, nosač pogonskog kotača te cijev ručke za guranje. Svi ti dijelovi izrađeni su od čelika ili aluminija uz iznimku okvira koji sadrži i polimerne dijelove potrebne za spajanje u cjelinu.

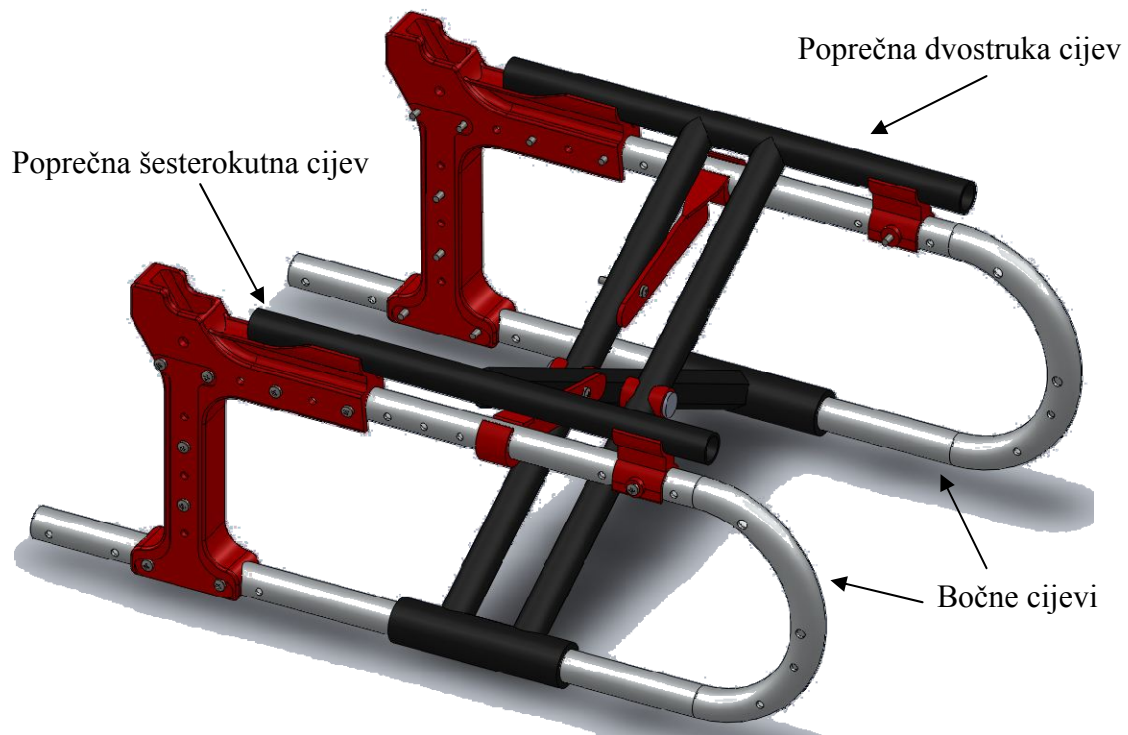
### 3.1. Nosivi okvir

Kao što je prije navedeno, nosivi okvir (Slika 25) je kutijaste izvedbe. Sastoji se od ukupno 8 komponenti ne računajući vijke. Imamo dvije aluminijske cijevi na bočnim stranama, čeličnu cijev sastavljenu od 4 zavarenih cijevi, čeličnu cijev sastavljenu od 3 zavarene cijevi od kojih je jedna šesterokutnog presjeka te četiri komada polimernih dijelova (crvena boja na slici desno) na koje se cijevi oslanjaju i koji ih povezuju u cjelinu (Slika 26).



**Slika 25** Nosivi okvir

(a) Nosivi okvir u stvarnosti, (b) CAD model nosivog okvira



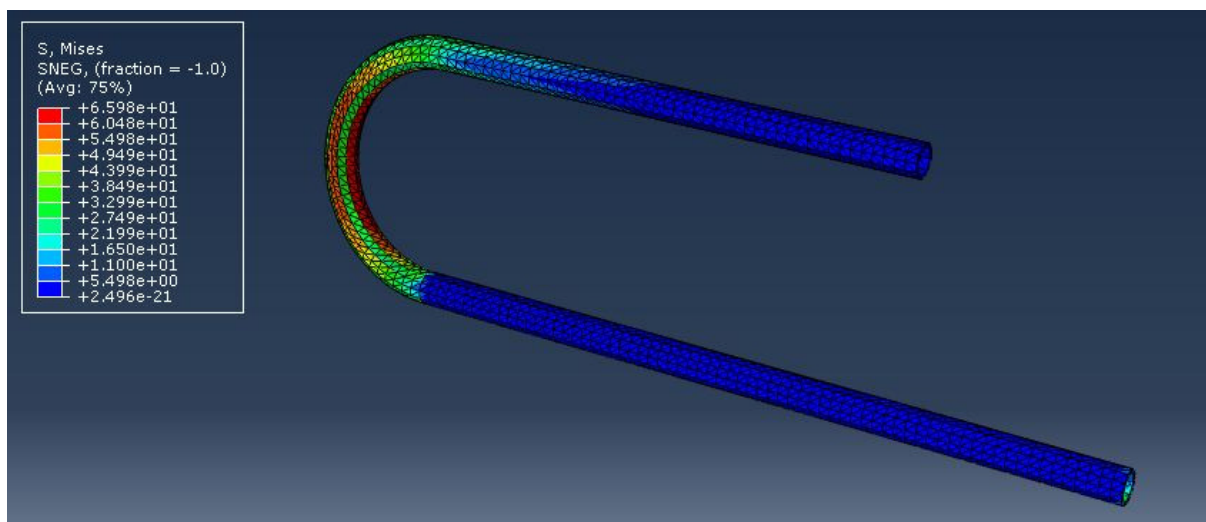
Slika 26 Dijelovi nosivog okvira

### 3.1.1. Analiza naprezanja

Radi jednostavnije analize, svaki dio će se promatrati zasebno. Tako imamo bočnu cijev koja je izrađena od aluminija, poprečnu dvostruku cijev koja je izrađena od čelika te također čeličnu poprečnu cijev sa šesterokutnim presjekom. Kod analize se pretpostavlja da u kolicima sjedi osoba od 125 kilograma.

#### 1) Bočna cijev

Izrađena od aluminija, bočna cijev je opterećena savijanjem silom koja nastaje kao rezultat pritiska na cijev zbog težine korisnika. Uzeto je da je ta sila jednaka 625 N kao polovica težine korisnika. Simulacija je provedena sa ljuskastim trokutnim elementima. Maksimalno naprezanje se očekuje na mjestu zakrivljenosti cijevi. Rezultat je sljedeći:

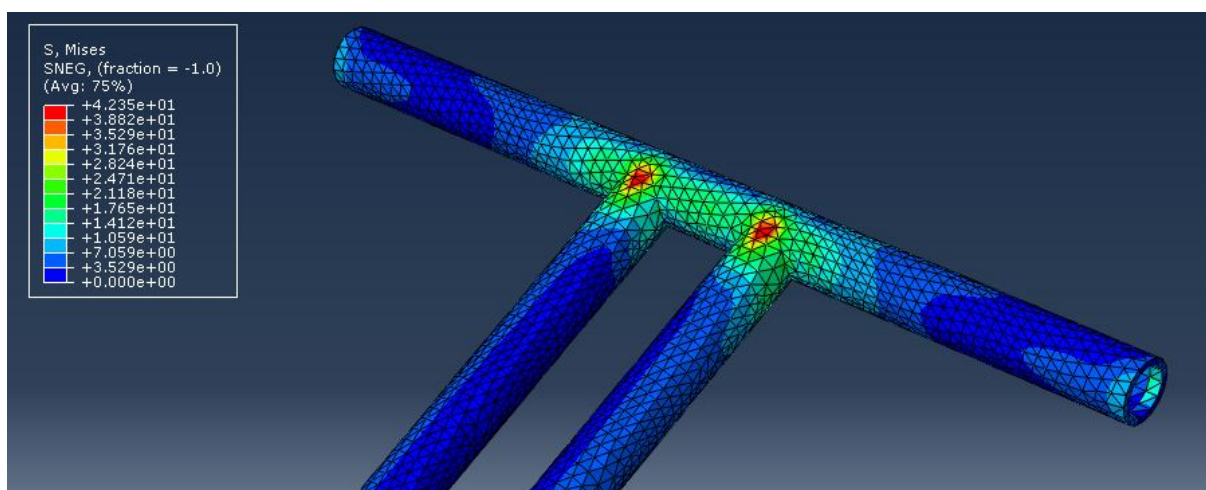


**Slika 27** Rezultat analize napreznja bočne cijevi

Grafički prikaz i tablica prikazuju raspodjelu napreznja prema Von Misesu. Maksimalno očitano napreznje iznosi 65,98 MPa i nalazi se na mjestu zakrivljenosti cijevi.

## 2) Poprečna dvostruka cijev

Izrađena od čelika, prema položaju u okviru pretpostavlja se da je cijev opterećena na tlak što može stvoriti izvijanje. Sila koja djeluje na cijev je uzeta u iznosu od 625 N i djeluje pod kutom na cijev. Originalna izvedba napravljena je kao zavarena te se na mjestu zvara očekuju maksimalna napreznja. Simulacija je provedena sa ljuskastim trokutnim elementima. Rezultati su sljedeći:

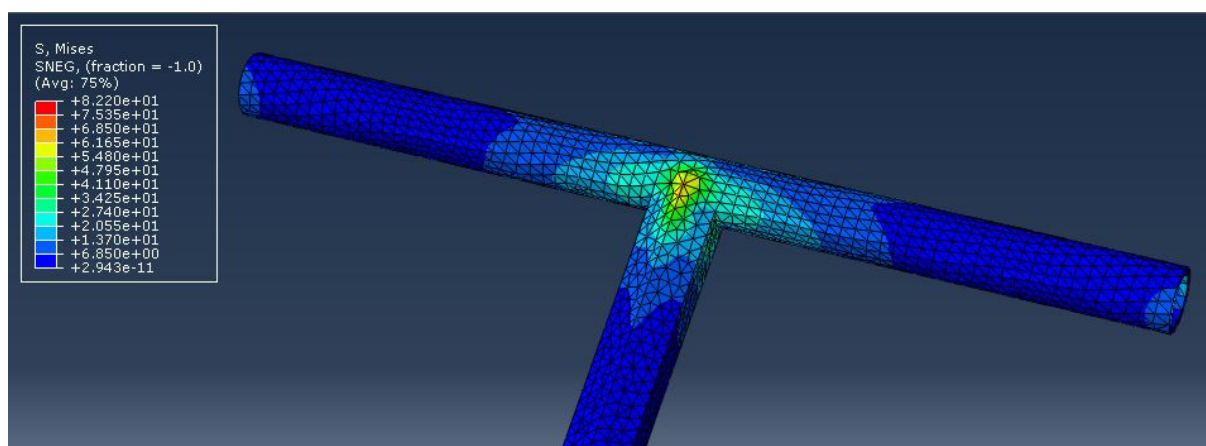


**Slika 28** Rezultat analize napreznja poprečne dvostruke cijevi

Grafički prikaz i tablica prikazuju raspodjelu naprezanja prema Von Misesu. Maksimalno očitano naprezanje iznosi 42,35 MPa i nalazi se na mjestu spoja, to jest zavara.

### 3) Poprečna cijev šesterokutnog presjeka

Također izrađena od čelika, prema položaju u okviru pretpostavlja se da je cijev opterećena na tlak što može stvoriti izvijanje. Sila koja djeluje na cijev je uzeta u iznosu od 625 N i djeluje pod kutom na cijev. Originalna izvedba napravljena je kao zavarena te se na mjestu zavara očekuju maksimalna naprezanja. Simulacija je provedena sa ljuskastim trokutnim elementima. Rezultati su sljedeći:

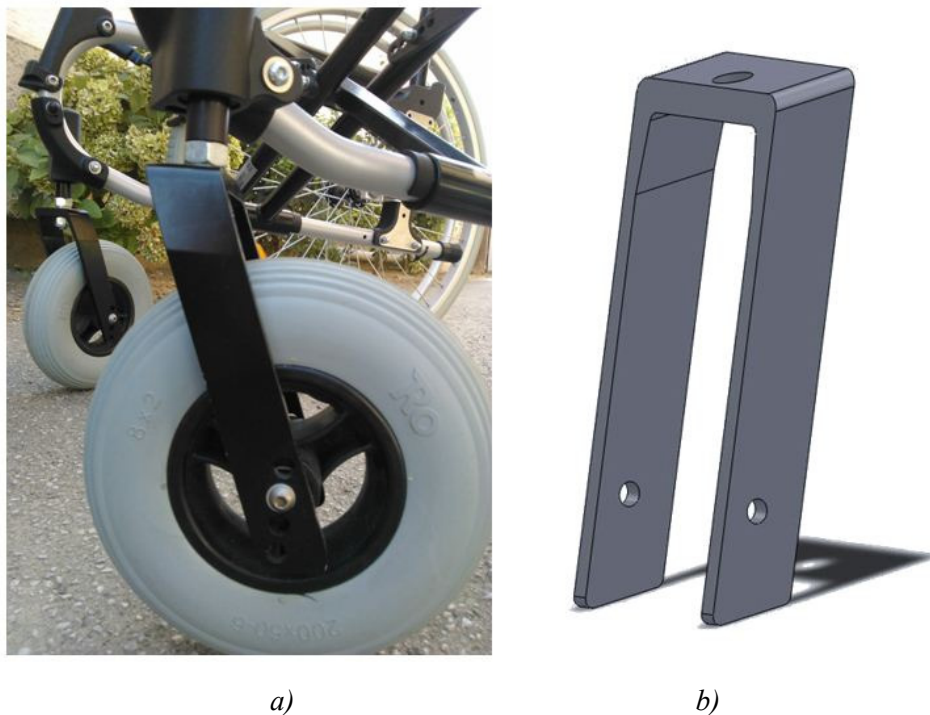


**Slika 29** Rezultat analize naprezanja poprečne cijevi šesterokutnog presjeka

Grafički prikaz i tablica prikazuju raspodjelu naprezanja prema Von Misesu. Maksimalno očitano naprezanje iznosi 82,20 MPa i nalazi se na mjestu spoja, to jest zavara.

### 3.2. Nosač prednjeg kotača

Nosač prednjeg kotača (Slika 30) izrađen je od čelika. Gornji kraj spaja se na bočnu aluminijsku cijev preko polimernog dijela koji u sebi sadrži ležaj. Kroz donji dio prolazi osovina sa kotačem.

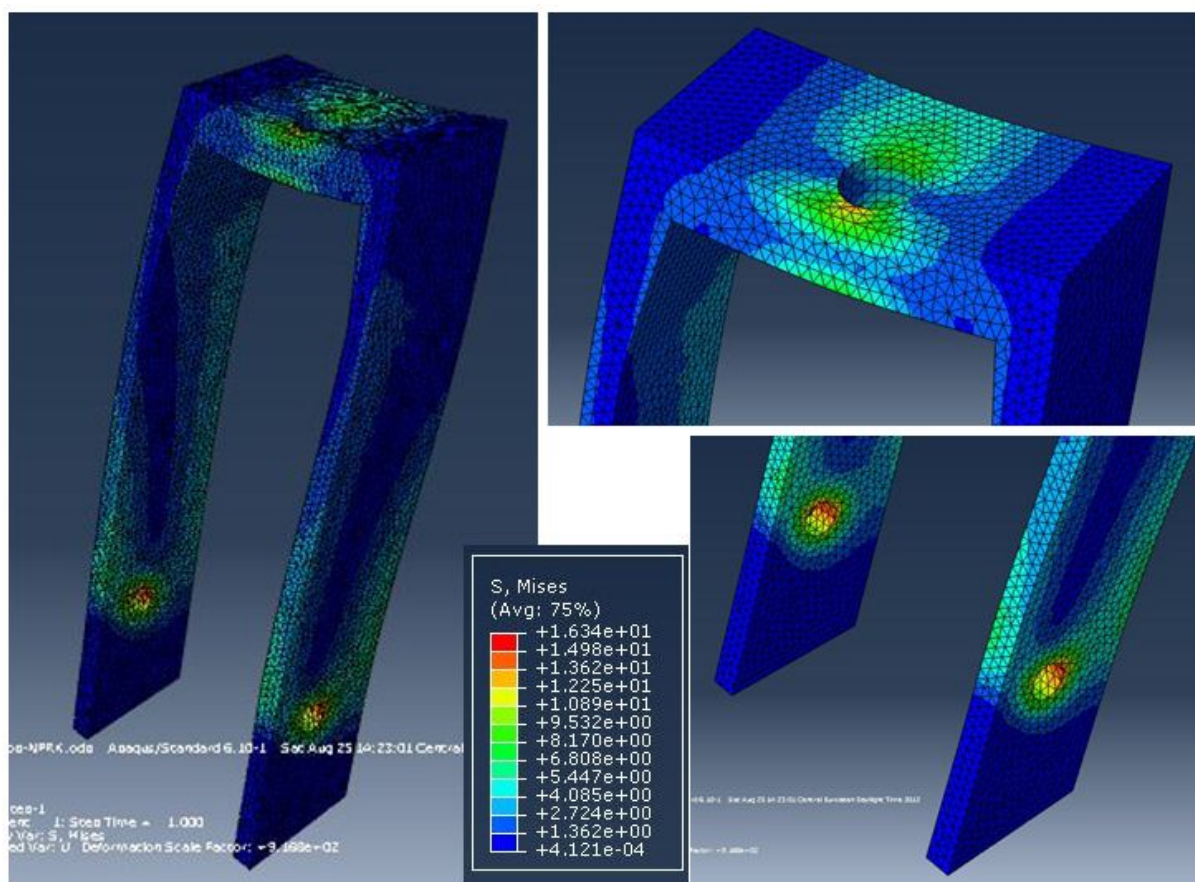


**Slika 30** Nosač prednjeg kotača

(a) Nosač prednjeg kotača u stvarnosti, (b) CAD model nosača prednjeg kotača

#### 3.2.1. Analiza naprežanja

Kao opterećenje je postavljena okomita sila po obodu provrta na gornjem dijelu nastala raspodjelom težine korisnika. Simulacija je provedena sa 3D trokutnim elementima jednoliko raspoređenim po cijelom nosaču. Maksimalno naprežanje se očekuje na mjestu spajanja nosača i osovine.

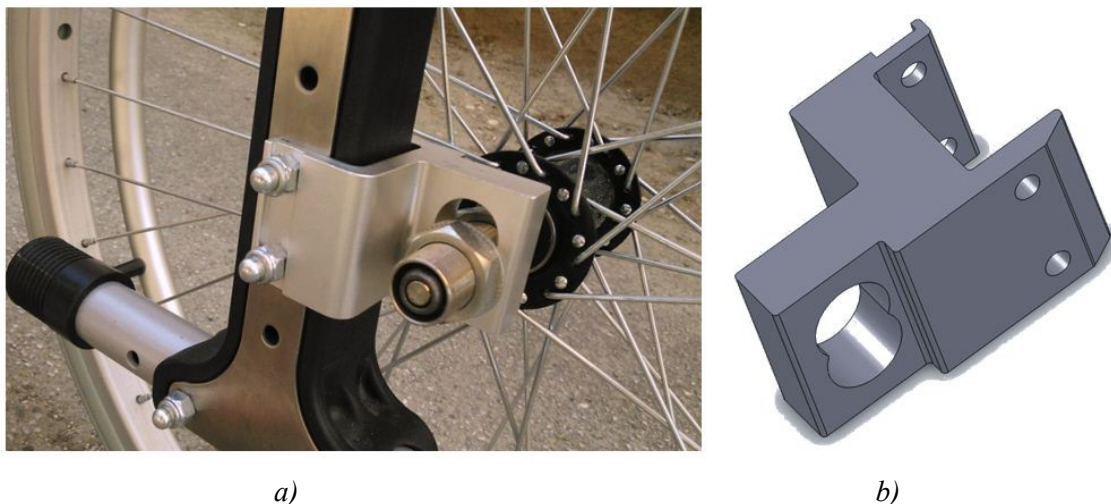


**Slika 31** Rezultat analize naprezanja nosača prednjeg kotača

Graf i tablica prikazuju raspodjelu naprezanja prema Von Misesu. Maksimalno očitano naprezanje iznosi 16,34 MPa i nalazi se na mjestu spoja nosača i osovine kotača.

### 3.3. Nosač pogonskog kotača

Nosač pogonskog kotača (Slika 32) napravljen je od aluminijske legure. Na njega je s jedne strane dodana cijev s navojem kroz koju prolazi osovina kotača. S druge strane su provrti za spajanje na polimerno koljeno.

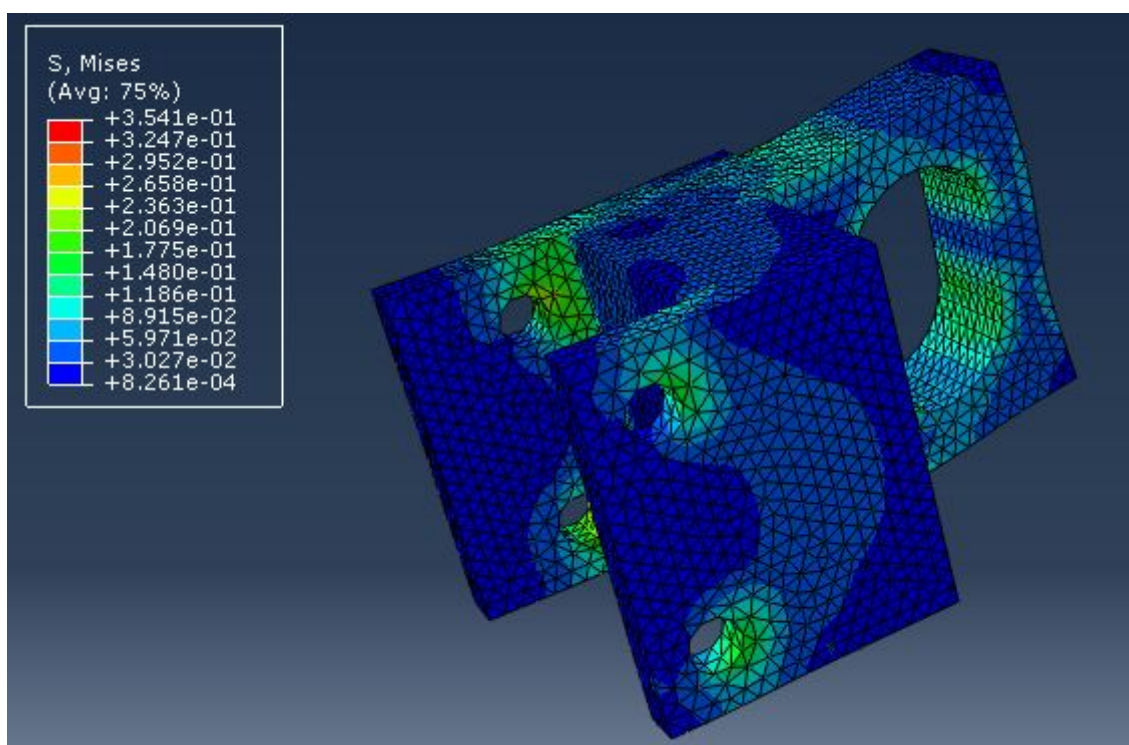


Slika 32 Nosač pogonskog kotača

(a) Nosač pogonskog kotača u stvarnosti, (b) CAD model nosača pogonskog kotača

#### 3.3.1. Analiza naprezanja

Izrađen od aluminijske legure, nosač pogonskog kotača opterećen je silama koje djeluju u mjestima spajanja sa vijcima te na djelu spajanja osovine. U normalnom položaju kolica, sila koja djeluje na nosač jednaka je nešto više od četvrtine težine korisnika no kao sila naprezanja će se uzeti polovica težine korisnika za slučaja kada se kolica naginju na stražnje kotače kao npr. kod uspona stepenicama i slično. Analiza je napravljena sa 3D pravokutnim elementima. Rezultati su sljedeći:



**Slika 33** Rezultat analize napreznja nosača pogonskog kotača

Grafički prikaz i tablica prikazuju raspodjelu napreznja prema Von Misesu. Maksimalno očitano napreznje iznosi 35,41 MPa i nalazi se na mjestu spoja nosača vijcima te na dijelovima gdje se oslanja osovina.



### 3.4. Cijev ručke za guranje

Cijev je čelična sa nekoliko provrta na donjem kraju za spajanje na konstrukciju. Jedan dio se umeće u plastično koljeno i učvršćuje vijcima a na drugom kraju je rukohvat.



a)



b)

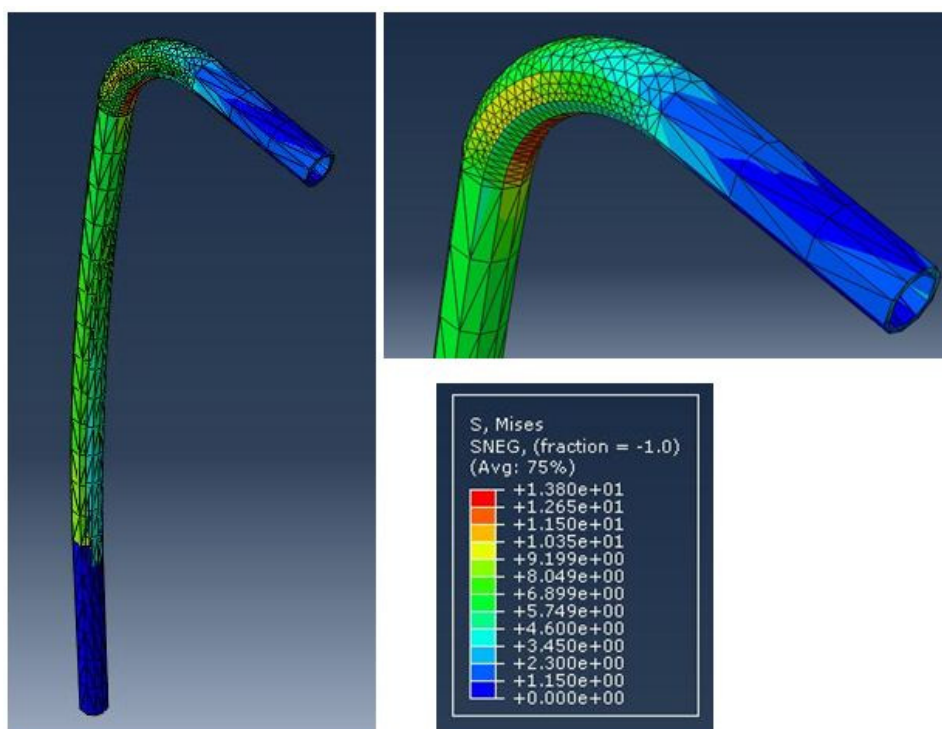
**Slika 34 Cijev ručke za guranje**

(a) Cijev ručke za guranje u stvarnosti, (b) CAD model ručke za guranje

#### 3.4.1. Analiza naprezanja

Cijev je opterećena savijanjem. Pretpostavlja se slučaj da osoba mase 80 kg vuče ili gura kolica. Pri tome je uzeta sila od 200 N koja djeluje okomito na rukohvat kao aktivna sila. Kao rubni uvjet pridodano je uklještenje na donji dio cijevi koji je umetnuti u polimerno koljeno. Analiza je napravljena sa ljuskastim trokutnim elementima, gušće raspoređenim na predviđenom mjestu najvećih naprezanja, na zakrivljenom dijelu cijevi.

Rezultat analize je sljedeći:



**Slika 35** Rezultat analize naprezanja cijevi ručke za guranje

Graf i tablica prikazuju raspored naprezanja prema Von Misesu. Maksimalno očitano naprezanje iznosi 13,8 MPa i pojavilo se prema predviđanju, na zakrivljenom dijelu.

## 4. IZBOR NOVIH MATERIJALA

Izbor novih materijala vršit će se praktičnim testiranjem uzorka kompozitne cijevi te izborom u programskom paketu CES (Cambridge Engineering Selector). Uzorak cijevi koji je ustupila tvrtka Domitran d.o.o. promjera je 35/28 mm te duljine 950 mm. Taj uzorak će se razrezati na dva dijela od kojih će se jedan ispitivati testom savijanja u 3 točke a drugi tlačnim opterećenjem. Rezultat koji će se mjeriti će biti maksimalna sila koju uzorak može izdržati prije oštećenja koja bi izazvala slom konstrukcije.

### 4.1. Testiranje uzorka

Uzorak cijevi za ispitivanje (Slika 36) izrađen je kao kompozitna struktura sa epoksidnom smolom kao matricom dok su kao očvršćenje korištena E staklena vlakna. Kao što je prije navedeno, uzorak je duljine 950 mm te će se razrezati na dva dijela čije duljine odgovaraju duljinama segmenata čeličnih cijevi na konstrukciji invalidskih kolica; prvi duljine 380 mm koji će se koristiti za testiranje savijanjem u 3 točke te drugi duljine 455 mm koji će se ispitivati tlačnim opterećenjem.



Slika 36 Uzorak kompozitne cijevi

Uzorci su i izvagani na preciznoj vazi Mettler P11 (Slika 37). Prvi uzorak duljine 380 mm ima masu 0,229 kg, a drugi duljine 455 mm ima masu 0,272 kg. Iz tih podataka se lako može utvrditi gustoća uzoraka i ona iznosi  $1740 \text{ kg/m}^3$ . Usporedbe radi, uzorci istih dimenzija da su napravljeni od aluminija imali bi masu 0,355 kg, odn. 0,425 kg ili da su čelični 1,03 kg, odn. 1,23 kg.



**Slika 37 Vaganje uzoraka**

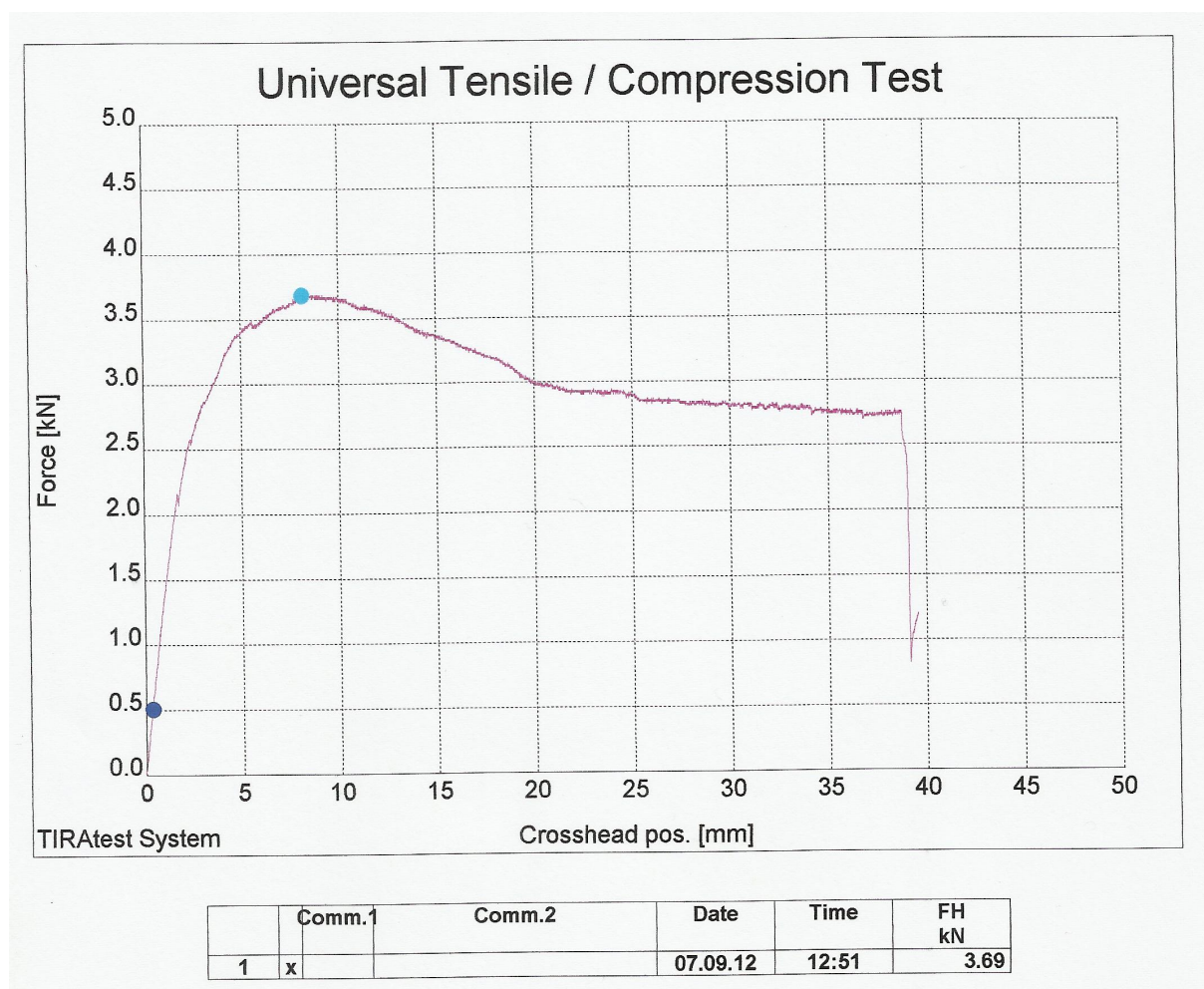
#### ***4.1.1. Ispitivanje savijanjem***

Uzorak je stavljen na uređaj sa testiranjem (Slika 38). Razmak među osloncima je bio 160 mm. U sredini među osloncima djeluje sila okomito na os cijevi stvarajući naprezanja na savijanje. Svrha testa je utvrditi maksimalnu silu koju cijev može izdržati prije puknuća staklenih vlakana. Iznos sile i put trna prati se računalnom metodom te se odmah ispisuje dijagram.



Slika 38 Uređaj za testiranje

Rezultat ispitivanja je sljedeći:



Slika 39 Dijagram ispitivanja savijanjem u 3 točke

Kao što se vidi u dijagramu, maksimalna sila koju je cijev podnijela prije puknuća prvih staklenih vlakana iznosi 3,69 kN. Kod tog iznosa sile nastala su prva puknuća u strukturi matrice i puknuća staklenih vlakana na mjestu djelovanja sile (Slika 40).



**Slika 40 Oštećenja uslijed ispitivanja savijanjem**

Rezultat numeričkih analiza bila su naprezanja pa će se sada izračunati naprezanje koje je stvorila maksimalna sila. To se računa prema izrazu (4):

$$\sigma_f = \frac{M_{\max}}{W} \quad (4)$$

gdje je  $\sigma_f$  naprezanje na savijanje,  $M_{\max}$  maksimalni moment savijanja i  $W$  moment otpora presjeka.

Maksimalni moment savijanja dobiva se iz izraza (5) koji vrijedi za slučaj savijanja silom na polovici udaljenosti među osloncima

$$M_{\max} = \frac{F_{f.\max} \cdot l}{4} \quad (5)$$

gdje je  $F_{f.\max}$  maksimalna sila savijanja a  $l$  udaljenost među osloncima.

Ako se uvrste maksimalna sila očitana iz dijagrama savijanja te razmak među osloncima, moment iznosi:

$$M_{\max} = \frac{3690 \cdot 160}{4} = 147600 \text{ Nmm} .$$

Izraz za moment otpora presjeka očita se iz Krautovog strojarskog priručnika [4] i on za zadani slučaj glasi:

$$W = \frac{\pi \cdot D^4 - d^4}{32 \cdot D} \quad (6)$$

gdje je  $D$  vanjski promjer uzorka cijevi a  $d$  unutarnji promjer uzorka cijevi. Ako se uvrste vrijednosti koje iznose  $D = 35$  mm,  $d = 28$  mm dobije se:

$$W = \frac{\pi \cdot 35^4 - 28^4}{32 \cdot 35} = 2485 \text{ mm}^3 .$$

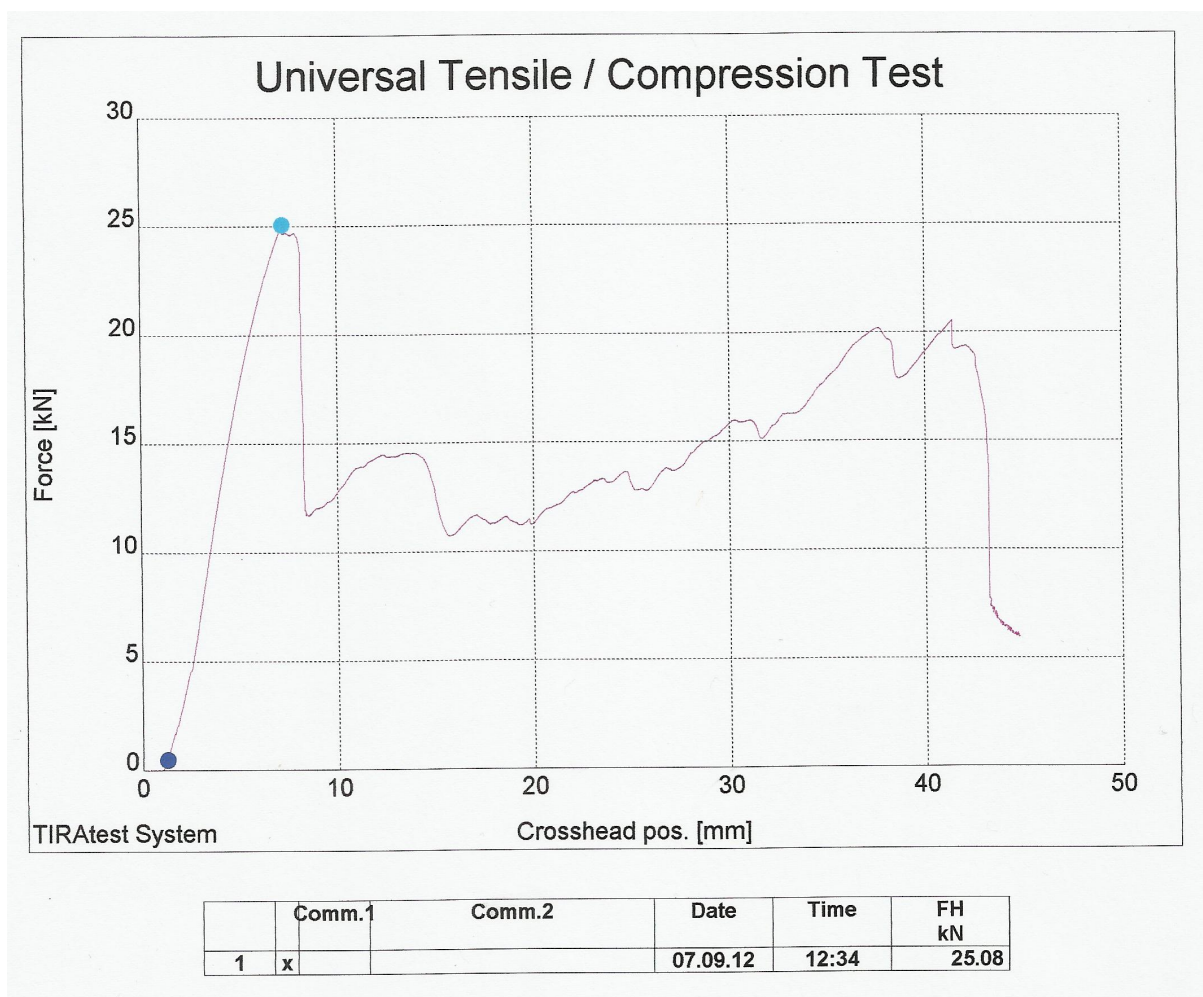
Sada se te vrijednosti uvrste u izraz (4) i dobije se iznos naprezanja na savijanje:

$$\sigma_f = \frac{147600}{2485,137} = 59,4 \text{ MPa} .$$

Cijeli izvještaj ispitivanja savijanjem nalazi se u Prilogu II.

#### 4.1.2. Ispitivanje tlačenjem

Drugi uzorak postavlja se na uređaj paralelno sa osi kretanja trna. Trn djeluje na uzorak pritiskujući je sa gornje strane stvarajući time tlačno naprezanje. Zbog duljine cijevi očekuje se i izvijanje. Sila koju generira trn i pomak istog prate se računalom i odmah se ispisuje dijagram. Rezultat ispitivanja je sljedeći:



**Slika 41 Dijagram ispitivanja tlačnim naprežanjem**

Iz dijagrama se može očitati maksimalna sila koja iznosi 25,08 kN. Kod tog iznosa došlo je do prvih puknuća u strukturi matrice što je u krajnjoj mjeri uzrokovalo i znatno sabijanje na donjem kraju uzorka te izvijanje cijelog uzorka (Slika 42).





**Slika 42 Oštećenja uslijed ispitivanja tlačanjem**

Sada je potrebno izračunati naprezanja koja su nastala prilikom testiranja. Prvo naprezanje je tlačno i ono se računa prema izrazu (7) :

$$\sigma_t = \frac{F_{t,\max}}{A} \quad (7)$$

gdje je  $F_{t,\max}$  maksimalna sila tlačanja i  $A$  je površina presjeka cijevi.

Ako se uvrste vrijednosti iz ispitivanja i mjerenja na uzorku dobije se:

$$\sigma_t = \frac{25080}{\frac{(35^2 - 28^2)\pi}{4}} = 227,5 \text{ MPa} .$$

Drugo naprezanje koje treba uzeti u obzir je izvijanje. Naprezanje izvijanja računa se prema izrazu (8):

$$\sigma_k = \frac{F_k}{A} \quad (8)$$

gdje je  $\sigma_k$  naprezanje izvijanja a  $F_k$  sila izvijanja.

Sila izvijanja računa se prema Eulerovoj jednadžbi za elastično izvijanje i ona glasi:

$$F_k = \pi^2 \frac{E_{uz} \cdot I_{\min}}{l_0^2} \quad (9)$$

gdje je  $E_{uz}$  modul elastičnosti uzorka,  $I_{\min}$  najmanji aksijalni moment tromosti presjeka a  $l_0$  slobodna duljina izvijanja koja za ovaj slučaj ispitivanja iznosi  $2l_{uz}$  .

Aksijalni moment tromosti presjeka računa se prema izrazu (10) i on iznosi:

$$I_{\min} = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64}(35^4 - 28^4) = 43490 \text{ mm}^4. \quad (10)$$

Vrijednost modula elastičnosti koji je očitao iz baze podataka CES-a za kompozit epoksidne smole i staklenih vlakana iznosi 13,8 – 27,58 GPa. Za ovaj proračun uzet će se nepovoljnija varijanta u iznosu modula elastičnosti od 27,58 GPa. Ako se sve izračunate i izmjerene vrijednosti uvrste u izraz (9) dobije se:

$$F_k = \pi^2 \frac{27580 \cdot 43490}{(2 \cdot 455)^2} = 14295,5 \text{ N}.$$

Izračunate vrijednost uvrste se u izraz (8) i dobije se:

$$\sigma_k = \frac{14295,5}{\frac{(35^2 - 28^2)\pi}{4}} = 41,3 \text{ MPa}.$$

Naravno, ovaj iznos naprezanja vrijedi samo u elastičnom području te treba imati na umu da je prilikom testiranja uzorak ušao u plastično područje te je došlo i do loma. Cijeli izvještaj ispitivanja tlačanjem nalazi se u Prilogu I.

#### 4.1.3. Analiza rezultata

Testiranjem je utvrđeno da su maksimalna opterećenja koja je uzorak podnio prije oštećenja 59,393 MPa prilikom savijanja te 227,48 MPa prilikom tlačanja. Ako se ta naprezanja usporede sa naprezanjima dobivenim računalnom metodom vidi se da ona kod dijelova podvrgnutim savijanju, a to su bočna cijev te cijev ručke za guranje, postižu maksimalnu vrijednost od 66 MPa što dovodi do zaključka da se kompozitna cijev dimenzija promjera 35/28 mm ne može upotrijebiti kao zamjena za aluminijsku cijev dimenzija promjera 25/20 mm. Zamjena bi bila moguća u slučaju veće debljine stjenke kompozitne cijevi ili upotrebom drugih materijala kao komponenti kompozita. Zadebljanjem stjenke cijevi nužno bi se povećala masa te će se taj faktor sada detaljnije analizirati. Dakle, uzme li se u obzir dimenzije i masu uzorka koji se ispitivao savijanjem dolazi se do podatka da je uzorak gustoće 1740 kg/m<sup>3</sup> što je u odnosu na aluminij kojem je gustoća 2700 kg/m<sup>3</sup> smanjenje za 35,5% što jasno doprinosi smanjenju mase konstrukcije. Drugi faktor je cijena. Prema podacima iz programa CES, cijena aluminija 6061 je 13,5 kn/kg a kompozita sa epoksidnom

matricom i staklenim vlaknima 70 kn/kg što je povećanje za 5,18 puta. Naravno treba uzeti u obzir da je cijena opravdana skupljom metodom proizvodnje te ograničenom dostupnošću takvih proizvoda. Uzeći to sve u obzir dolazi se do zaključka da se aluminij može zamijeniti sa kompozitom u izradi cijevi za invalidska kolica ali pod cijenu povećanja cijene konstrukcije i izmjene dimenzija. Jedna od mogućnosti je korištenje drugog kompozitnog materijala što ne bi povećavalo dimenzije i možda čak još više smanjilo masu, ali opet uz dodatno povećanje cijene.

S druge strane, prilikom tlačnog ispitivanja ustanovilo se da se kompozitna cijev ponašala i više nego zadovoljavajuće. Najveća tlačna napreznja, prema računalnoj simulaciji, pojavila su se na poprečnoj dvostrukoj te poprečnoj šesterokutnoj cijevi i postižu maksimalnu vrijednost od 82,2 MPa. Te cijevi su u originalu napravljene od čelika te se može provesti analiza kao i za aluminij. Dakle, gustoća čelika je  $7860 \text{ kg/m}^3$  a uzorka kao i prije  $1740 \text{ kg/m}^3$  što je smanjenje za 78%. Testiranjem je utvrđeno da uzorak izdrži tlačno napreznje od 227,48 MPa što je 64% više od potrebnog što dovodi do zaključka da se može koristiti i cijev manjih dimenzija. U ovom slučaju smanjenje mase je značajno. Drugi faktor, cijena čelika je 5 kn/kg što upotrebu kompozita poskupljuje 14 puta. Uzeći sve u obzir zaključuje se da se čelične cijevi mogu zamijeniti kompozitima uz zadržavanje istih ili manjih dimenzija ali uz povećanje cijene.

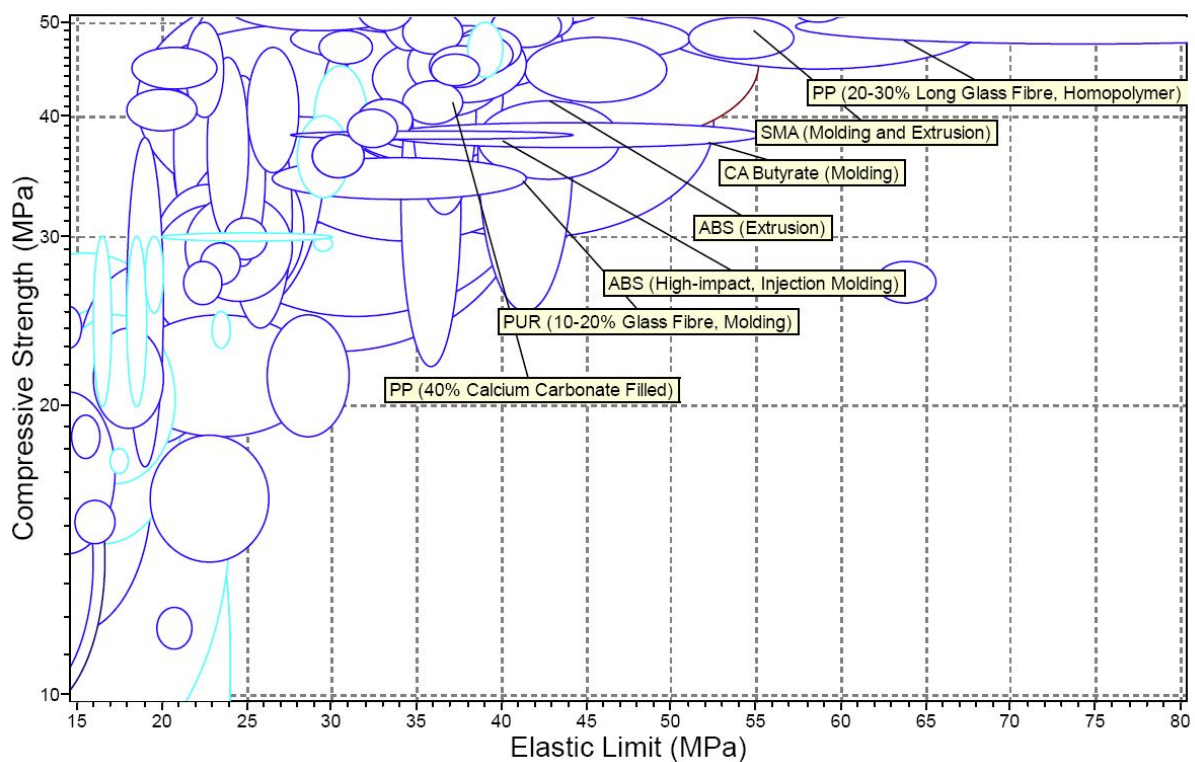
#### **4.2. Odabir materijala korištenjem CES programa**

Za utvrđivanje mogućih zamjena za materijale nosača prednjeg i pogonskog kotača koristit će se program CES. CES (Cambridge Engineering Selector) je program za izbor materijala na temelju mehaničkih svojstava, mogućnostima proizvodnje, cijeni i slično.

Prema obliku oba nosača dolazi se do zaključka da su oba napravljena lijevanjem jer bi u slučaju da su izrađeni samo obradom odvajanjem čestica nastao velik gubitak materijala. Prema tome, tražit će se zamjene koje zadovoljavaju zahtjeve prema napreznjima i koje se daju izraditi lijevanjem. Dodatni razlog tome je široka dostupnost tehnologije injekcijskim prešanjem u Hrvatskoj.

#### 4.2.1. Nosač prednjeg kotača

Računalnom simulacijom utvrđeno je da je najveća vrijednost naprezanja 16,34 MPa i ono se nalazi na mjestu spoja nosača i osovine kotača (Slika 31). Sada će se tražiti polimerni materijal koji se može lijevati ili injekcijski prešati i kojem je granica elastičnosti iznad maksimalne vrijednosti naprezanja.



Slika 43 Pregled materijala prema granici elastičnosti i tlačnoj čvrstoći

Sada će se detaljnije analizirati dva primjera materijala.

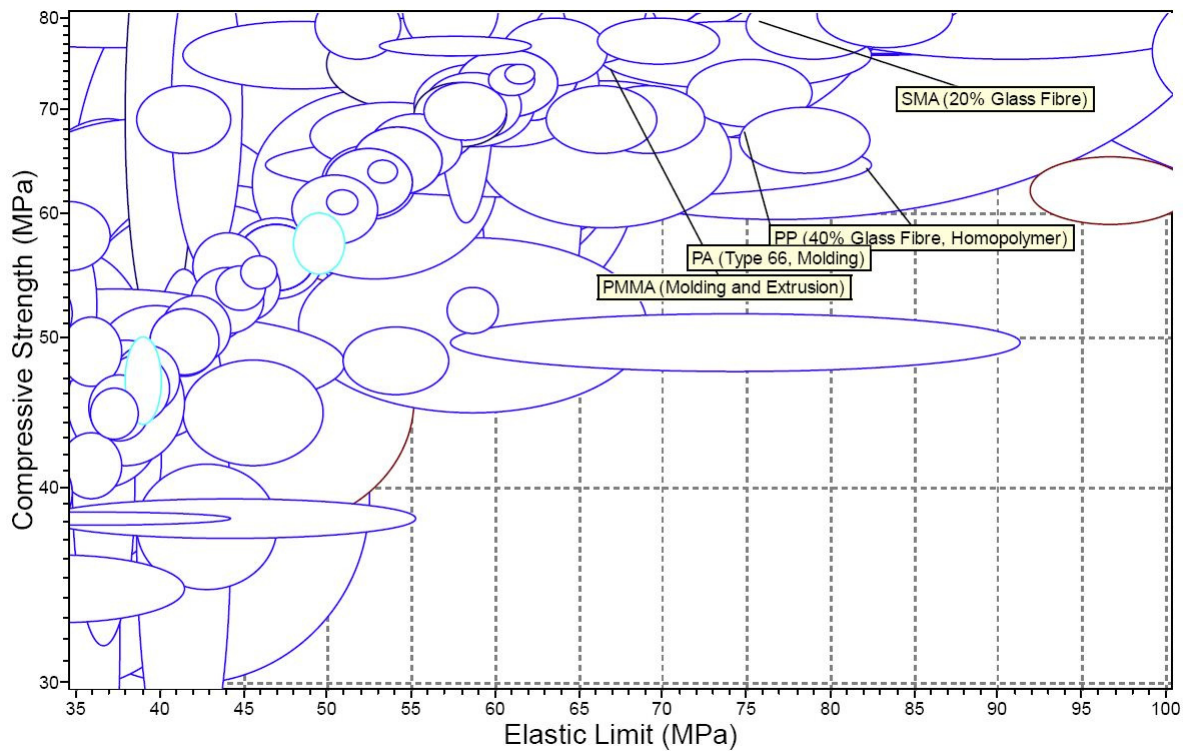
**Tablica 2 Pregled svojstava mogućih zamjena za nosač prednjeg kotača**

<b>Materijal</b>	<b>Svojstvo</b>		<b>U odnosu na aluminij 6061</b>
ABS	Granica elastičnosti	29,6 - 44,1 MPa	Smanjenje za 47%
	Tlačna čvrstoća	35,9 - 69 MPa	Smanjenje za 60%
	Vlačna čvrstoća	30 - 50 MPa	Smanjenje za 80%
	Modul elastičnosti	2 - 2,9 GPa	Smanjenje za 96%
	Gustoća	1020 – 1080 kg/m <sup>3</sup>	Smanjenje za 60,4%
	Cijena	13,05 – 14,35 HRK/kg	Jednaka
PUR (10 – 20% staklena vlakna)	Granica elastičnosti	26,48 – 41,36 MPa	Smanjenje za 65%
	Tlačna čvrstoća	32,8 – 36,2 MPa	Smanjenje za 79%
	Vlačna čvrstoća	31,1 – 51,7 MPa	Smanjenje za 78,5%
	Modul elastičnosti	3,4 – 6,2 GPa	Smanjenje za 91%
	Gustoća	1220 – 1360 kg/m <sup>3</sup>	Smanjenje za 50%
	Cijena	44,47 – 48,92 HRK/kg	Povećanje 3,6 puta

Na prvi pogled je jasno da se ni jedan od navedenih materijala ne može mjeriti sa mehaničkim svojstvima aluminija no kako je utvrđeno da naprezanja ne prelaze vrijednost 16,34 MPa može se zaključiti da se ova oba materijala mogu primijeniti za izradu nosača. Varijanta sa ABS polimerom se pokazuje najboljim izborom jer se uz značajno smanjenje mase ne povećava cijena a i mehanička svojstva su zadovoljavajuća.

#### 4.2.2. Nosač pogonskog kotača

Računalnom simulacijom utvrđena je maksimalna vrijednost naprezanja u iznosu od 35,41 MPa i javlja se na mjestima spoja nosača vijcima (Slika 33). Kao i za prijašnji nosač, tražit će se polimerni materijal zadovoljavajućih mehaničkih svojstava te mogućnosti injekcijskog prešanja.



Slika 44 Pregled materijala prema granici elastičnosti i tlačnoj čvrstoći

Slijedi detaljnija analiza dvaju mogućnosti.

**Tablica 3 Pregled svojstava mogućih zamjena za nosač pogonskog kotača**

<b>Materijal</b>	<b>Svojstvo</b>		<b>U odnosu na aluminij 6061</b>
PA (Tip 66)	Granica elastičnosti	55,2 – 82,7 MPa	Smanjenje za 29%
	Tlačna čvrstoća	66,24 – 99,24 MPa	Smanjenje za 42%
	Vlačna čvrstoća	90 – 92,2 MPa	Smanjenje za 6%
	Modul elastičnosti	1,73 – 3,79 GPa	Smanjenje za 9%
	Gustoća	1130 - 1150 kg/m <sup>3</sup>	Smanjenje za 5%
	Cijena	23,96 – 26,53 HRK/kg	Povećanje 1,95 puta
PMMA	Granica elastičnosti	53,8 – 72,4 MPa	Smanjenje za 38%
	Tlačna čvrstoća	72,4 - 124 MPa	Smanjenje za 2%
	Vlačna čvrstoća	48,3 – 72,4 MPa	Smanjenje za 70%
	Modul elastičnosti	2,24 – 3,24 GPa	Smanjenje za 95%
	Gustoća	1170 - 1200 kg/m <sup>3</sup>	Smanjenje za 56%
	Cijena	12,97 – 14,27 HRK/kg	Povećanje 1,05 puta

Analizom rezultata zaključuje se da oba materijala zadovoljavaju po pitanju mehaničkih svojstava. Izbor PA polimera se ipak pokazuje boljim jer unatoč malo većoj cijeni, manje je gustoće i boljih mehaničkih svojstava od PMMA polimera.

## 5. ZAKLJUČAK

Praktičnim ispitivanjem uzoraka kompozitnih cijevi došlo se do rezultata da je zamjena klasičnih konstrukcijskih materijala poput aluminijskih i čelika sa polimernim materijalima, odn. polimernim kompozitima moguća ali uz potrebno preoblikovanje pojedinih dimenzija konstrukcije. Kod upotrebe kompozitnih materijala treba imati na umu kakva naprezanja djeluju na pojedinim mjestima konstrukcije i sukladno tome se bira vrsta i materijali komponenti kompozitnog materijala. U ovom radu se isti uzorak koristio na dva mjesta sa različitim djelovanjima naprezanja i pokazalo se da takav uzorak nije pogodan za dijelove podvrgnute savijanju. Iako se utjecaj zamjene materijala na smanjenje mase pokazao značajnim, to sa sobom dovodi i značajno poskupljenje. Više mogućih rješenja moglo bi se pronaći korištenjem računalnih programa poput CES-a. Taj i slični programi omogućuju izbor materijala promatrajući više varijabli odjednom, poput mehaničkih svojstava, načina proizvodnje ili cijene. Takvo paralelno pretraživanje znatno doprinosi optimiziranju izbora materijala.



**LITERATURA**

- [1] Cooper, R.A.: Wheeled Mobility: Wheelchairs and Personal Transportation, *The Biomedical Engineering Handbook: Second Edition*, CRC Press LLC, 2000.
- [2] Guide to Composites, SP Systems
- [3] Filetin T., Kovačićek F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2002.
- [4] Krautov strojarski priručnik, Sajema d.o.o., Zagreb 2009.
- [5] Ratner B.D. (*et al.*): Biomaterials Science 2nd Edition, Elsevier Inc., London 2004.

## **PRILOZI**

- I. Izveštaj o ispitivanju uzorka tlačnim naprežanjem
- II. Izveštaj o ispitivanju uzorka naprežanjem na savijanje
- III. CD-R disc